



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-12999-PRE/8276

**IDENTIFICAÇÃO DAS ORIGENS INTERPLANETÁRIAS DAS
TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS INTENSAS OCORRIDAS NO
PERÍODO DE 2002 A 2003**

Jairo Francisco Savian*

*Bolsista INPE

Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/INPE), orientado pelo
Dr. Walter Demetrio Gonzalez-Alarcon

INPE
São José dos Campos
2005



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**IDENTIFICAÇÃO DAS ORIGENS INTERPLANETÁRIAS DAS
TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS INTENSAS OCORRIDAS NO
PERÍODO DE 2002 A 2003**

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

Jairo Francisco Savian (RSU/CEP/INPE - MCT, Bolsista)

E-mail: savian@lacesm.ufsm.br

Dr. Walter Demetrio Gonzalez-Alarcon (DGE/CEA/INPE, Orientador)

E-mail: gonzalez@dge.inpe.br

Santa Maria, Maio de 2005



DADOS DE IDENTIFICAÇÃO:

Processo CNPq N^o: 107615/2003-7

Bolsista:

Jairo Francisco Savian
Acadêmico do curso de Física Licenciatura Plena
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Orientador:

Dr. Walter Demetrio Gonzalez-Alarcon
Divisão de Geofísica Espacial
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Título do Projeto:

**IDENTIFICAÇÃO DAS ORIGENS INTERPLANETÁRIAS DAS
TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS INTENSAS OCORRIDAS NO
PERÍODO DE 2002 A 2003**

Local de execução do projeto

- Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE, São Martinho da Serra, RS
- Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT/UFSM-ME, Santa Maria, RS
- Laboratório de Raios Cósmicos e Previsão de Tempestades Magnéticas CRSPE/INPE-MCT, em Santa Maria, RS



Pesquisadores e Estudantes Colaboradores:

- Dr. Nelson Jorge Schuch – CRSPE/INPE-MCT
- Dr. Alisson Dal Lago – DGE/INPE-MCT
- Dr. Ezequiel Echer – DGE/INPE-MCT
- Dr. Luiz Eduardo Vieira – DGE/INPE-MCT
- Mestrando Marlos Rockenbach da Silva – DGE/INPE-MCT
- Acadêmico Marcos Roberto Signori – LACESM/CT/UFSM-ME
- Acadêmica Vânia Fátima Andrioli – LACESM/CT/UFSM-ME
- Dr. John W. Bieber – Bartol Research Institute, University of Dalaware, Newark

Participantes da cooperação Brasil-Japão em ciências espaciais básicas diretamente envolvidas no projeto:

- Dr. Kazuoki Munakata – Physics Department, Shinshu University, Japan
- Dr. Kazuo Makita - National Institute of Polar Research, Japan

“A mente que se abre a uma nova idéia nunca voltará ao seu tamanho original.”

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer.”

(Albert Einstein, aos estudantes de Princeton, EUA)

Agradecimentos:

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus pais, Valdomiro e Antoninha, por terem me apoiado desde criança nos meus estudos. Todas as minhas conquistas são conquistas de meus progenitores;

Aos meus padrinhos, Orestes e Dionizia, pelo grande apoio, dedicação e carinho. Por ter me dado força em minhas realizações em todas as etapas de minha vida;

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo suporte financeiro e ao Coordenador do Programa PIBIC/INPE-CNPq/MCT por dar oportunidades para que jovens universitários possam entrar em contato com o mundo científico durante seus cursos de graduação; no Programa PIBIC/INPE-CNPq/MCT;

Agradeço a Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, pelo suporte técnico e financeiro disponibilizando minhas viagens para congressos e eventos importantes para a minha formação, tanto no Brasil como no Exterior;

Agradeço ao Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRSPE/INPE-MCT, ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE e ao Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE, pela infra-estrutura disponibilizada para a realização deste trabalho;

Aos alunos que atuam na Parceria: INPE – UFSM através do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT/UFSM Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE-MCT agradeço pelo apoio técnico e grande amizade e companheirismo em todos os momentos;

Agradeço ao meu Orientador, Dr. Walter Demétrio Gonzalez-Alarcon, pela oportunidade de trabalhar neste Projeto e disponibilizar meios para que eu aprendesse vários tópicos sobre Clima Espacial;

Presto meus agradecimentos, em especial ao Pesquisador Dr. Alisson Dal Lago, um dos meus Co-orientadores, pelo apoio técnico e dedicação na correção e sugestão de meus trabalhos científicos e por ser um grande amigo e companheiro;

Agradeço Dr. Luiz Eduardo Vieira pelo apoio no desenvolvimento dos programas para análise de dados, amizade e dedicação e ao Dr. Ezequiel Echer pelo apoio técnico e sugestões em meus trabalhos científicos, amizade e companheirismo;

Ao Dr. Kazuoki Munakata por disponibilizar a utilização dos dados dos detectores multidirecionais de muons, instalados em Hobart e de Nagoya e por ter sido um verdadeiro Professor e Co-Orientador neste Projeto;

Um agradecimento ao Dr. John W. Bieber do “Bartol Research Institute” (University of Dalaware) pelas sugestões dadas para os trabalhos do grupo de pesquisa.

Ao pessoal técnico-científico da operação das missões ACE, WIND e IMP-8, bem como o pessoal de operação da Universidade de Kyoto, por fornecerem os dados interplanetários e de superfície utilizados neste Trabalho. Dados de Campo Magnético Interplanetário e de plasma do satélite ACE são cortesia de N. Ness, do Bartol Research Institute e D. J. McComas, SWRI, através do sistema do ISTP-CDAWeb, e dados do índice Dst são cortesia de WDC-Kyoto;

Agradecemos ao Mestrando Marlos Rockenbach da Silva, pelo apoio técnico desde o início de minhas atividades de Iniciação Científica junto ao CRSPE/INPE-MCT, pela constante atenção, sugestões e orientação no desenvolvimento de diversos estudos e pelo grande companheirismo e amizade;

Um especial agradecimento ao Dr. Nelson J. Schuch por ter revisado este trabalho e ter me confiado a responsabilidade do Laboratório de Clima Espacial e Previsão de Tempestades Geomagnéticas e de operar o Detector de Muons do Observatório Espacial do Sul e pela constante presença em vários momentos de minha vida, demonstrando real interesse em meu desenvolvimento não só profissional como pessoal, sempre me incentivando a fazer o melhor possível, estimulando-me a desenvolver minha liberdade, imaginação e sabedoria; procurar ações e interações não só no Brasil como no Exterior;

Por fim agradeço a Deus por ter me dado Vida e ter criado a complexidade dos fenômenos Físicos que tanto me fascinam.

RESUMO

Tempestades Geomagnéticas são episódios de extraordinárias flutuações do Campo Magnético Terrestre (Gonzalez et al., 1994). Sua característica principal é um decréscimo na componente H, horizontal, do Campo Magnético Terrestre, durando algumas dezenas de horas (Kamide et al., 1998). Atribui-se este decréscimo a um aumento da população de partículas aprisionadas na Magnetosfera e o movimento destas partículas produzem a chamada “Corrente de Anel”. Para medir a intensidade desta corrente, utilizam-se valores horários da variação global da componente H em baixas latitudes, constituindo o índice Dst¹ (Gonzalez et al., 1994). Acredita-se que o mecanismo físico responsável pela transferência de energia do Vento Solar para a Magnetosfera seja a reconexão entre o Campo Magnético Interplanetário e o Campo Magnético Terrestre (Tsurutani e Gonzalez, 1997). Para tanto, é necessário que o Campo Magnético Interplanetário apresente substancial componente na direção Z considerando o sistema de coordenadas Sol-Magnetosfera, ou B_s, Sul. O critério necessário para a ocorrência de Tempestade Geomagnéticas Intensas, Dst < -100 nT², é o de haver um Campo Elétrico Interplanetário, $\vec{E} = \vec{V} \times \vec{B}_s$, na direção do anoitecer, maior que 5 mV/m, por um período de mais de 3 horas (Tsurutani e Gonzalez, 1987). O presente trabalho tem por objetivo identificar os tipos de estruturas interplanetárias que causaram as Tempestades Geomagnéticas durante o máximo do Ciclo Solar 23, ou seja, durante o período de 2002 a 2003. Durante este período houve observações de raios cósmicos pela Rede Internacional de Detectores de Muons, da qual o Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE) passou a fazer parte desde 2001. Estas observações estão sendo usadas para a previsão da ocorrência destas tempestades geomagnéticas com elevada eficiência, podendo fornecer até 8 horas de alerta (Munakata et al., 2000). A identificação das estruturas interplanetárias que causaram tempestades intensas neste período é muito importantes para uma comparação futura com as observações de raios cósmicos (muons), permitindo verificar se há algum tipo preferencial de estrutura que pode ser detectada pela rede de detectores de muons. Este trabalho servirá para: (1) familiarização com as estruturas observadas no meio interplanetário próximo à Terra, tais como ondas de choque, ejeções solares, nuvens magnéticas; (2) familiarização com as conseqüências geomagnéticas relacionadas a estas estruturas, tais como as Tempestades Geomagnéticas; (3) manipulação de dados oriundos de observações de satélites localizados no Meio Interplanetário, principalmente o ACE³, que fornece dados de velocidade, densidade e temperatura do vento solar, e campo magnético do vento solar; (4) identificação de estruturas a partir destes dados, tais como ondas de choque, ejeções interplanetárias e nuvens magnéticas, para o período em torno máximo do Ciclo Solar 23.

¹Dst – Disturbance Storm time.

²nT – nano Tesla = 10⁻⁹ Tesla; Indução Magnética.

³ACE - Advanced Composition Explorer; satélite localizado no ponto lagrangeano L₁.

ABSTRACT

Geomagnetic Storms are episodes of extraordinary fluctuation of the Terrestrial Magnetic Field (Gonzalez et al., 1994). Their main characteristic is a decrease in the H component, horizontal, of the Terrestrial Magnetic Field, lasting some dozens of hours (Kamide et al., 1998). This decrease is attributed to an increase of the population of particles arrested in the Magnetosphere and the movement of these particles produce the average "Ring Current". To measure the intensity of this current, hourly values of the global variation of the H component are used in low latitudes, constituting the Dst¹ index (Gonzalez et al., 1994). It is believed that the physical mechanism responsible for the transfer of energy from the Solar Wind to the Magnetosphere is the reconnection between the Interplanetary Magnetic Field and the Terrestrial Magnetic Field (Tsurutani and Gonzalez, 1997). For the occurrence of such a mechanism, it is necessary that the Interplanetary Magnetic Field possess substantial component in the negative Z direction considering the system of coordinates Sun-Magnetosphere, or Bs, South. The necessary criterion for the occurrence of an Intense Geomagnetic Storm, Dst < -100 nT², is an Interplanetary Electric Field in the direction of the evening larger than 5 mV/m, for a period of more than 3 hours (Tsurutani and Gonzalez, 1987). The present work has as objective to identify the types of interplanetary structures that caused the Geomagnetic storms during period close to the maximum of the Solar Cycle 23, from 2002 to 2003. During this period there were observations of cosmic rays from the International Muon Detector Network, of the which the Southern Space Observatory-SSO (OES/CRSPE/INPE) started to participate since 2001. These observations are being used for the forecast of the occurrence of these Geomagnetic Storm with high efficiency, up to 8 hours in advance of alert (Munakata et al., 2000). The identification of the interplanetary structures that caused intense storms in this period is very important for a future comparison with the observations of cosmic rays (muons), allowing the verification wheter there is some preferential type of structure that can be detected by the muon detector network. The specific objectives of this work are: (1) familiarization with the structures observed in the nearby-earth interplanetary medium, such as shock waves, solar ejecta, magnetic clouds; (2) familiarization with the related geomagnetic consequences of these structures, such as the Geomagnetic Storms; (3) Processing of data from satellites located in the interplanetary medium, mainly the ACE³, that supplies data of speed, density and temperature of the solar wind, plasma and magnetic field of the solar wind; (4) identification of interplanetary structures in the data, such as shock waves, interplanetary ejecta and magnetic clouds, close to the maximum of the Solar Cycle 23.

¹ Dst – Disturbance Storm time. index

² nT – Nano Tesla = 10⁻⁹ Tesla, magnetic induction.

³ ACE - Advanced Composition Explorer; satellite located in the lagrangian point L₁.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	3
INTRODUÇÃO	3
CAPÍTULO 2	5
O SOL E SUA ATIVIDADE, INFLUÊNCIA NO MEIO INTERPLANETÁRIO E EFEITOS GEOMAGNÉTICOS	5
2.1 – O SOL	5
2.1.1 – O INTERIOR SOLAR.....	6
2.1.2 – A ATMOSFERA SOLAR.....	7
2.1.2.1 – FOTOSFERA SOLAR.....	7
2.1.2.2 – A CROMOSFERA.....	9
2.1.2.3 – A COROA SOLAR.....	9
2.1.3 – O VENTO SOLAR.....	10
2.1.4 – O CAMPO MAGNÉTICO INTERPLANETÁRIO.....	13
2.2 – ATIVIDADE SOLAR	15
2.2.1 – CICLO DE ATIVIDADE SOLAR.....	15
2.2.2 – EXPLOSÕES SOLARES - “FLARES”.....	17
2.2.3 – EJEÇÕES CORONAIAS DE MASSA (CME).....	18
2.3 – RELAÇÃO ENTRE EJEÇÕES CORONAIAS DE MASSA E ESTRUTURAS DO MEIO INTERPLANETÁRIO	19
2.3.1 – ASSINATURA DAS EJEÇÕES CORONAIAS DE MASSA NO VENTO SOLAR.....	19
2.3.2 – RELAÇÃO ENTRE EJEÇÕES CORONAIAS DE MASSA RÁPIDAS E ONDAS DE CHOQUE NO VENTO SOLAR.....	19
2.3.3 – NUVENS MAGNÉTICAS.....	21
2.4 – EFEITOS GEOMAGNÉTICOS CAUSADOS PELA ATIVIDADE SOLAR	25
2.4.1 – TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS.....	25
2.4.2 – ORIGEM INTERPLANETÁRIA DAS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS.....	28
2.4.2.1 – TEMPESTADES CAUSADAS POR NUVENS MAGNÉTICAS.....	29
2.4.2.2 – TEMPESTADES CAUSADAS POR CHOQUES.....	30
2.5 – RAIOS CÓSMICOS	31
2.5.1 – INTRODUÇÃO.....	31
2.5.2 – ORIGEM E COMPOSIÇÃO DOS RAIOS CÓSMICOS.....	32
2.5.3 – MUONS.....	34
2.6 – PREVISÃO DO CLIMA ESPACIAL UTILIZANDO RAIOS CÓSMICOS	35
2.6.1 – INTRODUÇÃO.....	35
2.6.2 – ANISOTROPIA PRECURSORA DO CONE DE PERDAS.....	37
2.6.2.1 – ESPECIFICAÇÃO DA ORIENTAÇÃO DA CME E SUA ESTRUTURA.....	42
CAPÍTULO 3	46
METODOLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA	46
3.1 – METODOLOGIA	46
3.2 – INSTRUMENTAÇÃO	47
3.2.1 – MAGNETÔMETROS.....	47
3.2.2 – OS SATÉLITES - DESCRIÇÃO DOS DADOS DE PLASMA E CAMPO MAGNÉTICO INTERPLANETÁRIO PARA OS EVENTOS DE TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS.....	51
3.2.3 – REDE INTERNACIONAL DE DETECTORES DE MUONS.....	54
CAPÍTULO 4	60
ANÁLISES E RESULTADOS	60
4.1 – ANÁLISE DOS PARÂMETROS INTERPLANETÁRIOS DOS EVENTOS DE TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS INTENSAS ($Dst < -100$ nT)	60
4.1.1 – EVENTO DO DIA 24 DE MARÇO DE 2002.....	60
4.1.2 – EVENTOS DOS DIAS 17 E 19 DE ABRIL DE 2002.....	61
4.1.3 – EVENTO DO DIA 11 DE MAIO DE 2002.....	63
4.1.4 – EVENTO DO DIA 23 DE MAIO DE 2002.....	64
4.1.5 – EVENTO DO DIA 2 DE AGOSTO DE 2002.....	66
4.1.6 – EVENTO DO DIA 21 DE AGOSTO DE 2002.....	67
4.1.7 – EVENTOS DOS DIAS 1 E 3 DE OUTUBRO DE 2002.....	68
4.1.8 – EVENTO DO DIA 14 DE OUTUBRO DE 2002.....	70



4.1.9 – EVENTO DO DIA 12 DE JULHO DE 2003.....	72
4.1.10 – EVENTO DO DIA 18 DE AGOSTO DE 2003.....	73
4.1.12 - EVENTO DO DIA 20 DE NOVEMBRO DE 2003.....	76
CAPITULO 5.....	78
CONCLUSÕES.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
ANEXOS.....	83
ANEXO 1.....	84
PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA.....	84
ANEXO 2.....	85
TÍTULOS E RESUMOS DE TRABALHOS APRESENTADOS E OU SUBMETIDOS.....	85
ANEXO 3.....	86
CERTIFICADOS.....	86

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O estudo do Clima Espacial está ligado à relação entre o Sol, o Espaço Interplanetário, a Magnetosfera Terrestre e a Superfície Terrestre. O estudo das Tempestades Geomagnéticas tornou-se essencial devido a seus efeitos observados na Terra, tais como: intensificação de correntes elétricas no espaço e na Superfície Terrestre, ocorrência de auroras nos pólos, aceleração de partículas carregadas, e diversos prejuízos em satélites causando danos no Sistema de Posicionamento Global - GPS - em telecomunicações e até mesmo aos astronautas que se encontram em naves espaciais devido à alta radiação emitida.

As Tempestades Geomagnéticas tem origem em diferentes estruturas solares como por exemplo as chamadas Ejeções Coronais de Massa (EMC). Estes eventos liberam para o Meio Interplanetário grandes quantidades de matéria - plasma - a altas velocidades. As estruturas interplanetárias podem causar Tempestades Geomagnéticas quando sua componente do Campo Magnético está antiparalela à direção do Campo Geomagnético. Sendo assim, o Campo Magnético destas estruturas interplanetárias interconecta-se com a Magnetosfera Terrestre, ocorrendo um transporte efetivo de energia. Como consequência, uma grande quantidade de partículas energéticas do Vento Solar entra na Magnetosfera pelas linhas de campo, abertas pela reconexão, causando grandes distúrbios.

O conhecimento dos fenômenos do meio interplanetário, como nuvens magnéticas e choques interplanetários, fornece informações importantes a respeito da dinâmica do Meio Interplanetário e do consequente desenvolvimento de Tempestades Geomagnéticas. Os satélites localizados no ponto Lagrangeano L1, tais como, ACE, WIND e IMP-8, propiciam um monitoramento contínuo do Clima Espacial através de dados de plasma e Campo Magnético Interplanetário, permitindo uma identificação das diferentes estruturas presentes no Meio Interplanetário. No entanto, através destes dados o conhecimento da chegada das estruturas que originam uma Tempestade Geomagnética é possível apenas com poucas horas de antecedência.

O objetivo principal deste Projeto no Programa PIBIC/INPE-CNPq/MCT, é identificar os tipos de estruturas interplanetárias que causaram as Tempestades Geomagnéticas durante o máximo do Ciclo Solar 23, ou seja, durante o período de 2002 a 2003, em continuação ao Projeto anterior. Durante este período houve observações de raios cósmicos pela Rede Internacional de Detectores de Muons, da qual o Observatório Espacial do Sul - OES/CRSPE/INPE-MCT, em - São Martinho da Serra - RS passou a fazer parte desde 2001, as quais estão sendo usadas para a previsão da ocorrência destas Tempestades Geomagnéticas com elevada eficiência, podendo fornecer até 8 horas de alerta (Munakata et al, 2000).

A identificação das estruturas interplanetárias que causaram tempestade intensas neste período será muito importante para uma comparação futura com as observações de raios cósmicos (muons), permitindo verificar se há algum tipo preferencial de estrutura que pode ser detectada pela Rede Internacional de Detectores de Muons. Este trabalho, portanto, fará parte de um grande projeto de estudo do Clima Espacial utilizando vários tipos de observações. Especificamente o aluno terá como objetivos: (1) familiarização com as estruturas observadas no Meio Interplanetário próximo à Terra, tais como ondas de choque, ejeções solares, nuvens magnéticas; (2) familiarização com as conseqüências geomagnéticas relacionadas a estas estruturas, tais como as Tempestades Geomagnéticas (Gonzalez e Tsurutani, 1987; Gonzalez et al., 1994; Gonzalez et al., 1999); (3) manipulação de dados oriundos de observações de satélites localizados no meio interplanetário, principalmente o ACE (*Advanced Composition Explorer*), que fornece dados de velocidade, densidade e temperatura do Vento Solar, e campo magnético do Vento Solar; (4) identificação de estruturas a partir destes dados, tais como ondas de choque, ejeções interplanetárias e nuvens magnéticas, para o período em torno máximo do Ciclo Solar 23 (2002 à 2003). Os dados interplanetários estão disponíveis através do sistema CDA (*Coordinate Data Analysis*) do Programa ISTP (*International Solar-Terrestrial Physics*), ao qual o INPE tem acesso.

O Laboratório de Raios Cósmicos e Previsão de Tempestades Magnéticas - LRCPTM - está implementando o monitoramento contínuo do Clima Espacial, a partir de um detector de muons instalado no Observatório Espacial do Sul - OES/CRSPE/INPE-MCT. O telescópio está em operação desde março de 2001, tendo como objetivo preencher a falha existente na atual rede de detecção de Raios Cósmicos. A rede completa possibilitará uma previsão mais precisa da chegada de Tempestades Geomagnéticas, objetivando num futuro próximo poder amenizar os prejuízos causados na Terra através de alertas com horas de antecedência ao início das tempestades.

CAPITULO 2

O SOL E SUA ATIVIDADE, INFLUÊNCIA NO MEIO INTERPLANETÁRIO E EFEITOS GEOMAGNÉTICOS

A região que se estende do Sol até o meio interestelar é chamado de Meio Interplanetário. Nesta região ocorrem vários fenômenos físicos, sendo um grande número proveniente da atividade solar, conseqüência direta de processos físicos internos que nele ocorrem. Tais processos, que envolvem instabilidades de plasma e campos magnéticos, fenômenos ainda pouco conhecidos, estão diretamente relacionados às causas de emissões solares transientes, cuja ocorrência varia com um dos mais importantes ciclos solares, o Ciclo de Atividade Solar de 11 anos. As estruturas interplanetárias estão intimamente relacionadas a fenômenos Geomagnéticos, como as Tempestades Geomagnéticas.

2.1 – O SOL

Desde os primórdios da civilização o homem aprendeu a admirar o Sol como o responsável pela existência e manutenção da vida na Terra e por isso, na maioria das culturas antigas o Sol era adorado como um deus. Há milhares de anos o homem já identificava as principais características do Sol, como as Manchas Solares Escuras e a rotação do disco solar. A Tabela 2.1 mostra algumas das características do Sol.

Tabela 2.1 – Características do Sol.

Massa	$1,989 \times 10^{30}$ kG
Raio Equatorial	695.000 km
Raio Médio	109, 2 Raios Terrestres
Densidade Média	$1,41 \text{ g/cm}^3$
Densidade Central	162 g/cm^3
Período de Rotação Equatorial	609 horas (~ 25 dias)
Velocidade de Escape	618,02 km/s
Distância Média à Terra	149,6 milhões de km
Luminosidade	$3,83 \times 10^{33}$ ergs/s
Temperatura Média na Superfície	5.500°C

O Sol é formado predominantemente por hidrogênio e hélio, com pequena quantidade de argônio, cálcio, carbono, ferro magnésio, néon, níquel, oxigênio e enxofre. A energia solar é originada em seu núcleo no processo de fusão de prótons (núcleos de hidrogênio), formando partículas alfa (núcleos de hélio).

O Sol pode ser dividido em interior solar e atmosfera solar. O interior é constituído de Núcleo, Zona Radiativa e Zona Convectiva. A parte externa é composta por: Fotosfera, Cromosfera e Coroa. A Figura 2.1 ilustra a distribuição das camadas.

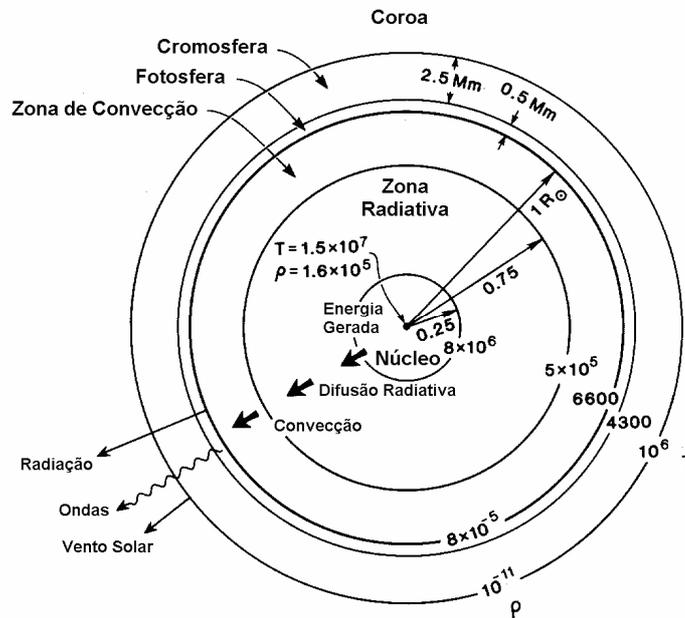


Figura 2.1 – Estrutura interna e Atmosfera Solar [Fonte: Adaptado de Kivelson e Russel (1995)].

2.1.1 – O INTERIOR SOLAR

O interior solar possui um núcleo radiativo e um envelope convectivo que pode chegar até a superfície. O Sol emite uma potência de $3,9 \times 10^{26}$ W. Essa energia se origina de reações nucleares que ocorrem no seu centro e demora 10^7 anos para ser transportada pela Zona Radiativa e em seguida pela Zona Convectiva até atingir a superfície, onde a temperatura é de aproximadamente 5.800 K. O interior é formado pelas seguintes regiões: **Núcleo**, se estende até 0,25 raios solares, onde a energia é gerada através de reação de fusão nuclear, apresentando uma temperatura, T, da ordem de $1,5 \times 10^7$ K e densidade $\rho \sim 1,6 \times 10^5 \text{ m}^{-3}$; **Zona Radiativa**, se estendendo no intervalo de 0,25 a 0,75 raios solares, onde a energia gerada no núcleo é dissipada através do processo de difusão radiativa, tendo uma temperatura da ordem de 8×10^6 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.

2.1.2 – A ATMOSFERA SOLAR

A Atmosfera Solar é a parte mais externa, composta basicamente por 3 camadas: Fotosfera – visível a olho nu, Cromosfera acima da primeira, e Coroa Solar, a camada mais tênue. A Figura 2.2 ilustra a Cromosfera Solar.

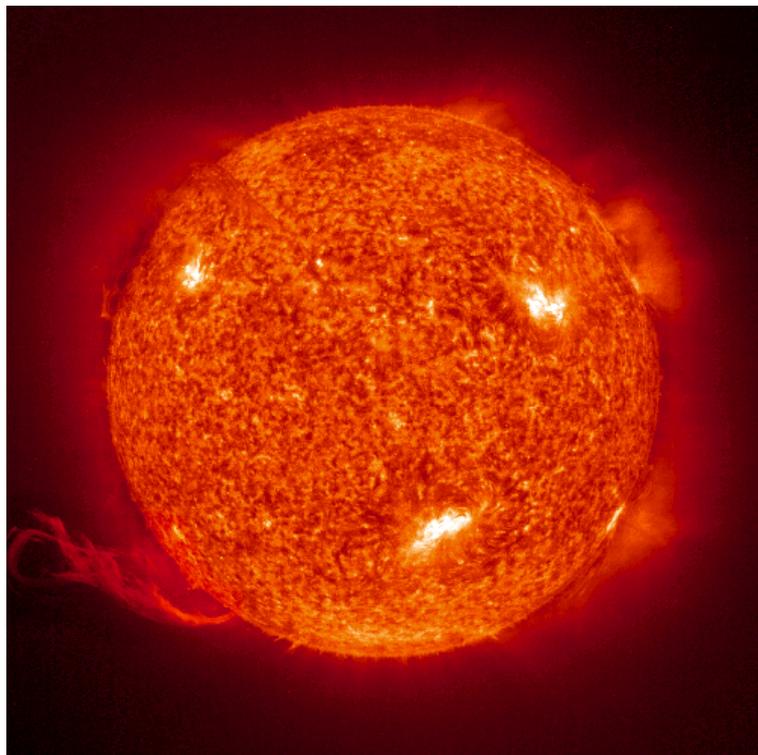


Figura 2.2 - Imagem real da Cromosfera solar – SOHO/EIT, 304^a, emissão do He II, a 60000 K de temperatura [Fonte: <http://soho.www.nascom.nasa.gov>].

2.1.2.1 – FOTOSFERA SOLAR

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

A observação da Fotosfera revela duas estruturas marcantes, as Manchas Solares e as Granulações. Quando muito intensas, as Manchas Solares podem ser vistas a olho nu como notáveis formações escuras. Elas surgem e desaparecem por completo em cerca de 2 semanas e seu número total varia com períodos regulares de aproximadamente 11 anos.

Essas manchas eram conhecidas e observadas pelos chineses 165 AC e ficaram conhecidas como Manchas Solares. Entretanto, só em 1610 Galileu sistematizou o estudo das Manchas Solares utilizando o Telescópio. As Manchas Solares tendem a se formar em grupos e são constituídas de duas partes: a Umbra, parte central mais escura, com temperatura em torno de 3.800 K, e a Penumbra, região um pouco mais clara em torno da Umbra. A Figura 2.3 ilustra as Manchas Solares.

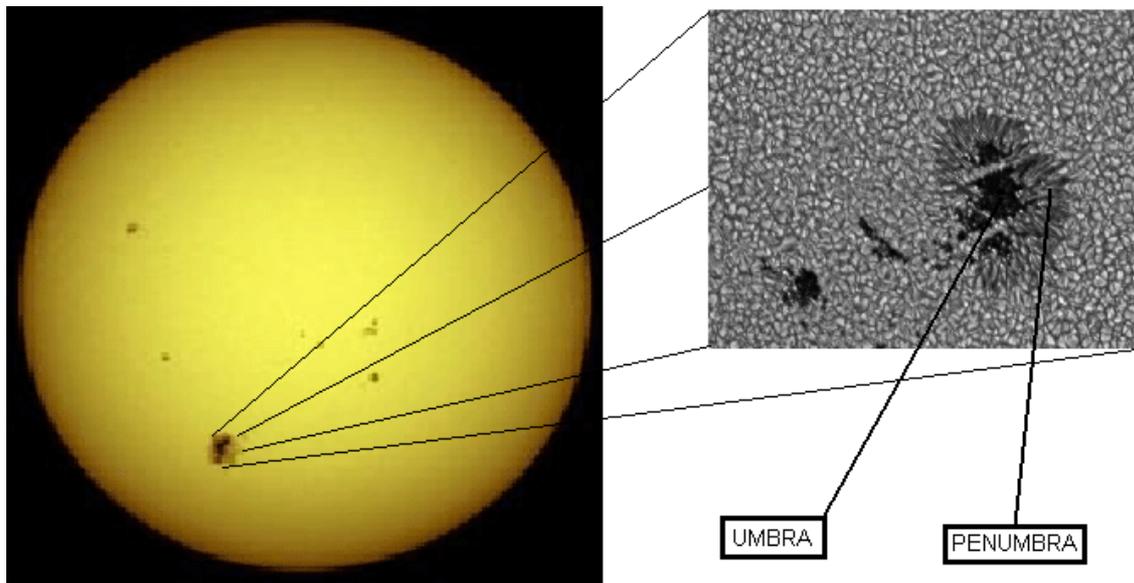


Figura 2.3 – Imagem do disco solar com Manchas Solares onde podem ser identificados a Umbra e a Penumbra [Fonte: Modificado de <http://science.nasa.gov>].

A presença de Manchas Solares nos informa a respeito da existência de campos magnéticos intensos na atmosfera solar (Figura 2.4). Uma vez que o campo magnético inibe o processo convectivo, o transporte de energia nas manchas é bem menor, e conseqüentemente as manchas são mais frias emitindo bem menos radiação que o restante da superfície solar. Os campos magnéticos associados às Manchas Solares estão relacionados a energias eletromagnéticas constituindo regiões de estabilidades. Quando instabilidades são originadas, esta energia é liberada na forma de Ejeções Coronais de Massa, Flares e Proeminências.

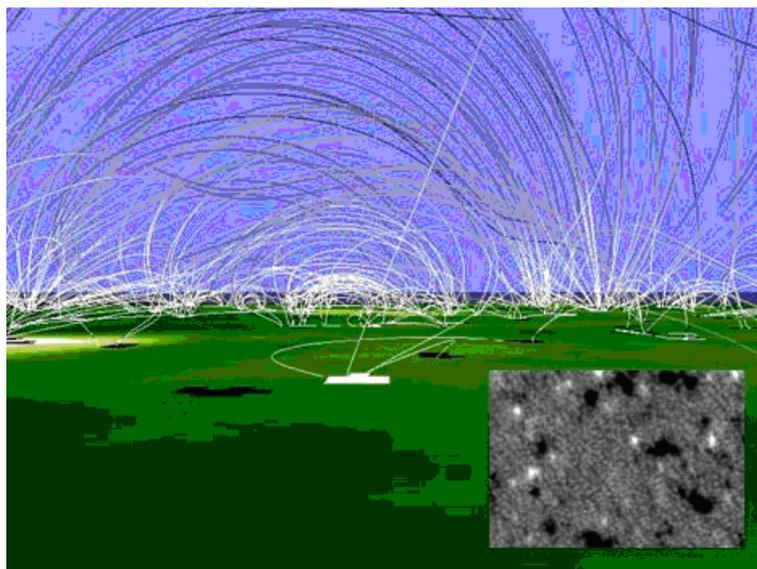


Figura 2.4 - Campo Magnético na Atmosfera Solar relacionada às Manchas Solares [Fonte: <http://science.nasa.gov>].

2.1.2.2 – A CROMOSFERA

A Cromosfera estende-se cerca de 10.000 km acima da Fotosfera, esta camada possui uma temperatura que varia no intervalo de 4300 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. Pode ser vista observando-se o Sol com um filtro solar conhecido como H-alfa. Assim, podemos distinguir as várias estruturas cromosféricas, como por exemplo, as proeminências (Figura 2.5). Apresenta uma coloração alaranjada que só pode ser observada quando ocorre um obscurecimento do disco solar, como, 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, Helio e Hidrogênio em sua composição, esta camada e na realidade uma faixa de transição entre a Cromosfera fria e a Coroa quente.

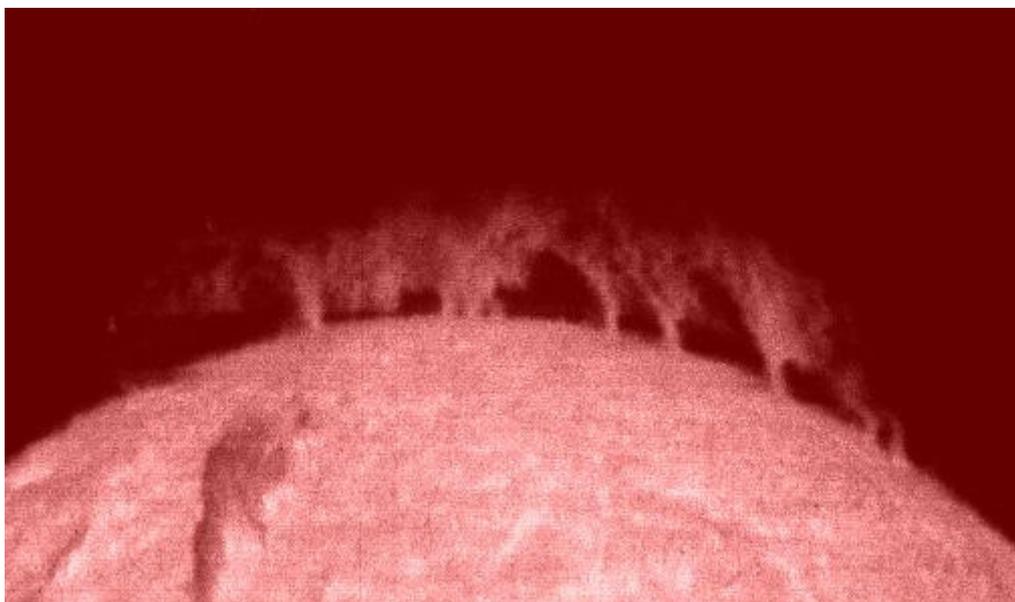


Figura 2.5 – Cromosfera Solar. Proeminência Eruptiva observada em H-alfa [Fonte: <http://science.nasa.gov>].

2.1.2.3 – A COROA SOLAR

A Coroa Solar é a parte mais externa da Atmosfera Solar e estende-se por milhões de quilômetros a partir do Sol. A Coroa Solar é melhor observada durante os eclipses totais do Sol (Figura 2.6), caracteriza-se por variações de forma e largura que costumam acompanhar o Ciclo das Manchas Solares. Sua densidade é de 2-3 ordens de grandeza mais baixa do que aquela da Cromosfera, e sua temperatura e de 1-2 milhões de graus. Como a temperatura é extremamente alta, a Coroa emite grande quantidade de raios-X. Além disso, a esta temperatura o gás encontra-se na forma de plasma – gás ionizado – produzindo assim os elétrons e íons que podem formar o chamado Vento Solar. Este vento se propaga por todo o Sistema Solar e permanentemente atinge a Terra.



Figura 2.6 – Exemplo de eclipse solar total, ocorrida em 1977, mostrando a Coroa Solar [Fonte: <http://www.if.ufrj.br>].

A Coroa é a região de maior importância para os fenômenos físicos do meio interplanetário. Através da evaporação constante de seu material constitui o Vento Solar, que arrasta o Campo Magnético do Sol através do Meio Interplanetário. Ejeções transientes lançam, a altas velocidades, grandes quantidades de material constituintes da Coroa. Ejeções Coronais de Massa estão fortemente relacionadas a fenômenos geomagnéticos, tais como Tempestades Geomagnéticas, e a variabilidade do Clima Espacial.

2.1.3 – O VENTO SOLAR

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

O Vento Solar é um fluxo de elétrons e íons positivos que são expulsos da Coroa Solar a alta velocidade - cerca de 600 km/s – e uma densidade média de 5 cm^{-3} (Brandt, 1970) e propagam-se pelo meio interplanetário. Algumas vezes, o Vento Solar não é emitido uniformemente, pois o Campo Magnético da Coroa solar pode estar altamente estruturado, como mostrado esquematicamente na Figura 2.7. Eventualmente, este vento atinge e interage com a Terra causando tanto o fenômeno conhecido como Aurora, quanto perturbações no Campo Magnético, quando interagindo com a Magnetosfera Terrestre. O Vento Solar quando interage com a Magnetosfera Terrestre causa sua deformação na direção da linha Sol-Terra.

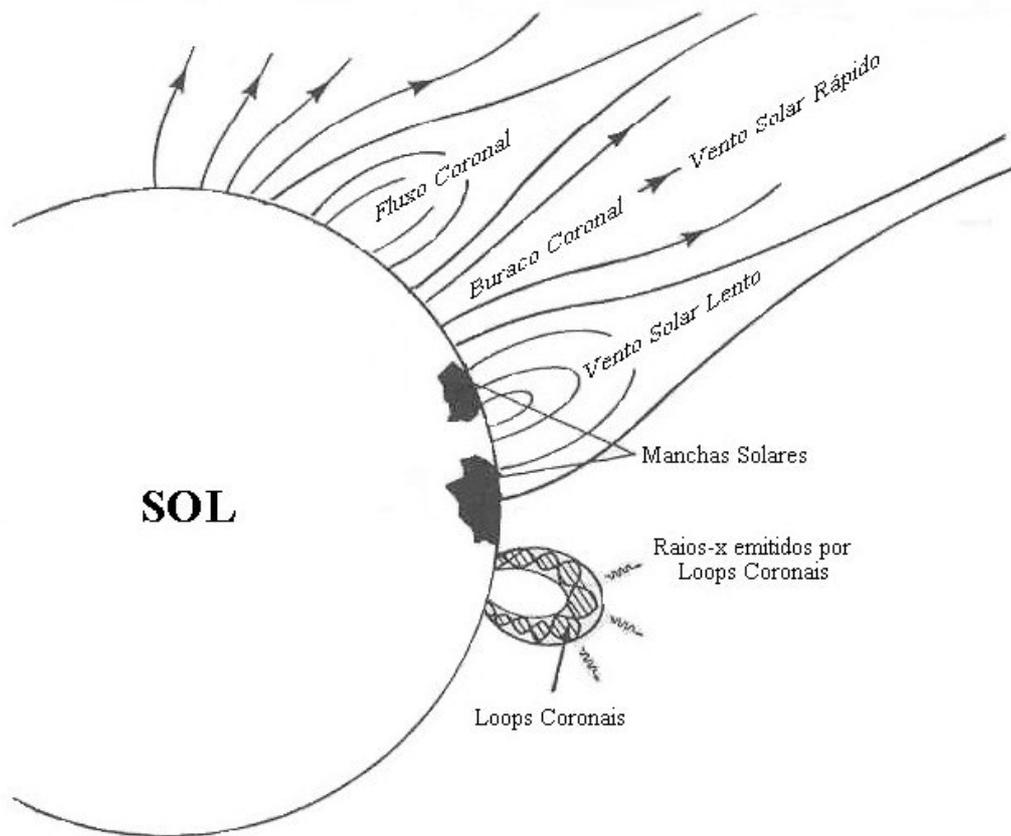


Figura 2.7 – Diagrama esquemático da topologia do Campo Magnético na Coroa solar. Fonte: Modificado de R. W. Schunk and A. F. Nagy, *Ionospheres – Physics, Plasma Physics and Chemistry*, 2000

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

As mais extensivas e detalhadas observações do Vento Solar têm sido feita por satélites próximo a órbita da Terra. Algumas propriedades físicas do plasma e do campo magnético em 1 AU, que são observados por estes satélites, são sumarizadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Propriedade do Vento Solar observadas próximas a órbita da Terra (1 AU). [Fonte: Kivelson e Russell, 1995].

Densidade de Prótons	6,6 cm ⁻³
Densidade de Elétrons	7,1 cm ⁻³
Densidade de He ²⁺	0,25 cm ⁻³
Velocidade de Fluxo	450 km.s ⁻¹
Temperatura de Prótons	1,2 x 10 ⁵ K
Temperatura de Elétrons	1,4 x 10 ⁵ K
Campo Magnético	7 x 10 ⁻⁹ T (tesla)

Um campo Magnético Planetário é um excelente obstáculo para o Vento Solar. A pressão dinâmica do Vento Solar, ou fluxo de momentum pressionam o Campo Magnético Externo, confinando-o em uma cavidade magnética possuindo uma longa cauda, consistindo de dois tubos de fluxos magnéticos antiparalelos que se estendem na direção contrária ao Sol, como mostrado na Figura 2.8.

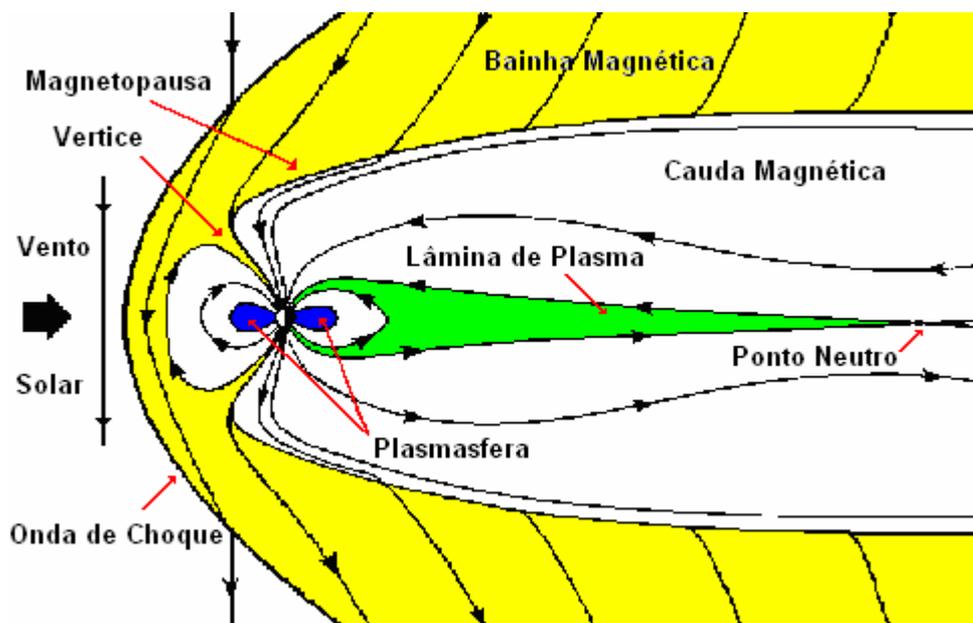


Figura 2.8 – Ilustração artística da Magnetosfera terrestre baseada em dados experimentais. O Vento Solar pressiona e define a forma da Magnetosfera Terrestre. [Fonte: <http://www.oulu.fi/~spaceweb/textbook/magnetosphere.html>].

2.1.4 – O CAMPO MAGNÉTICO INTERPLANETÁRIO

O Sol possui um Campo Magnético, cuja intensidade é 10^{-4} T na superfície da Fotosfera. Este campo é aproximadamente dipolar (Pneuman e Kopp, 1970), porém devido ao fato do Vento Solar ser altamente condutor, ele é transportado para grandes distâncias, constituindo o chamado Campo Magnético Interplanetário (CMI), com intensidade de aproximadamente 5 nT nas circunvizinhanças da Terra.

O eixo do dipolo magnético é próximo ao eixo de rotação do Sol, e pode-se imaginar um plano de simetria cortando o seu equador. As linhas de Campo Magnético Interplanetário são aproximadamente radiais próximas ao Sol - de 1,5 a 2,5 raios solares, entrando 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 Heliosférica, LCH (Schultz, 1973), por causa da lei de Ampère: $\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$. Essa lamina separa um hemisfério com polaridade negativa de outro com polaridade positiva. A Figura 2.9 mostra uma apresentação esquemática do Campo Magnético Interplanetário.

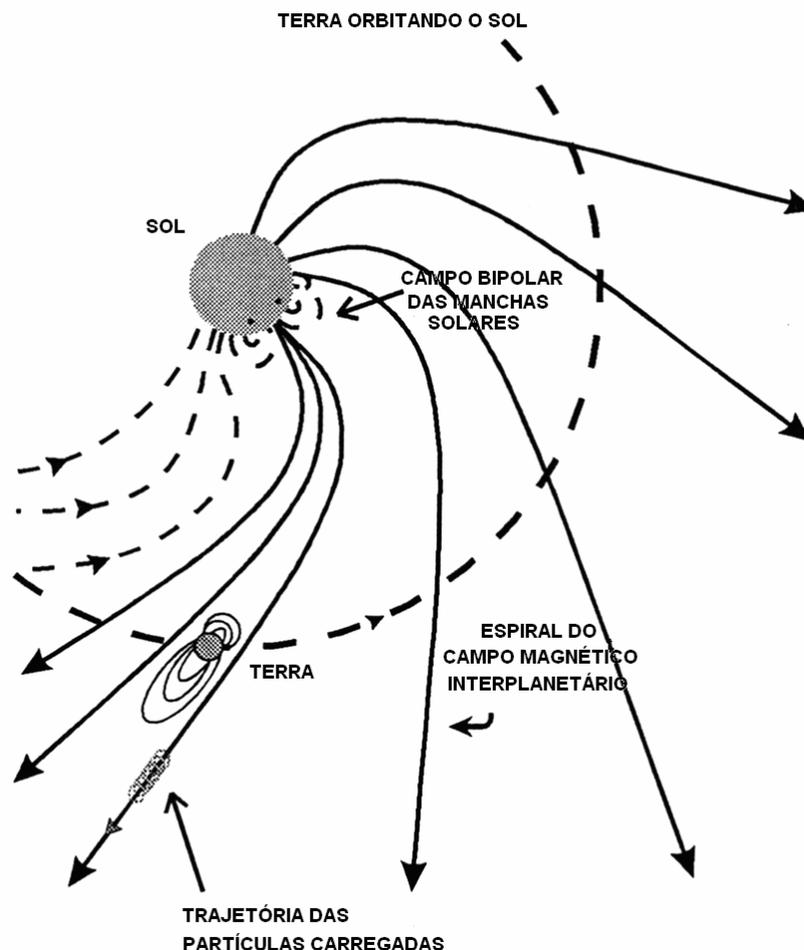


Figura 2.9 – Apresentação esquemática do Campo Magnético Interplanetário. [Fonte: http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/March03/Vallee2/Vallee3_2.html].

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

Como o eixo magnético solar é inclinado em relação ao eixo de rotação do Sol, à medida que o Vento Solar flui para fora, a LCH oscila sobre o equador heliomagnético, formando uma série de picos e depressões. Em três dimensões a LCH parece oscilatória, criando o padrão de “saia de bailarina”, como pode ser visto na Figura 2.10.

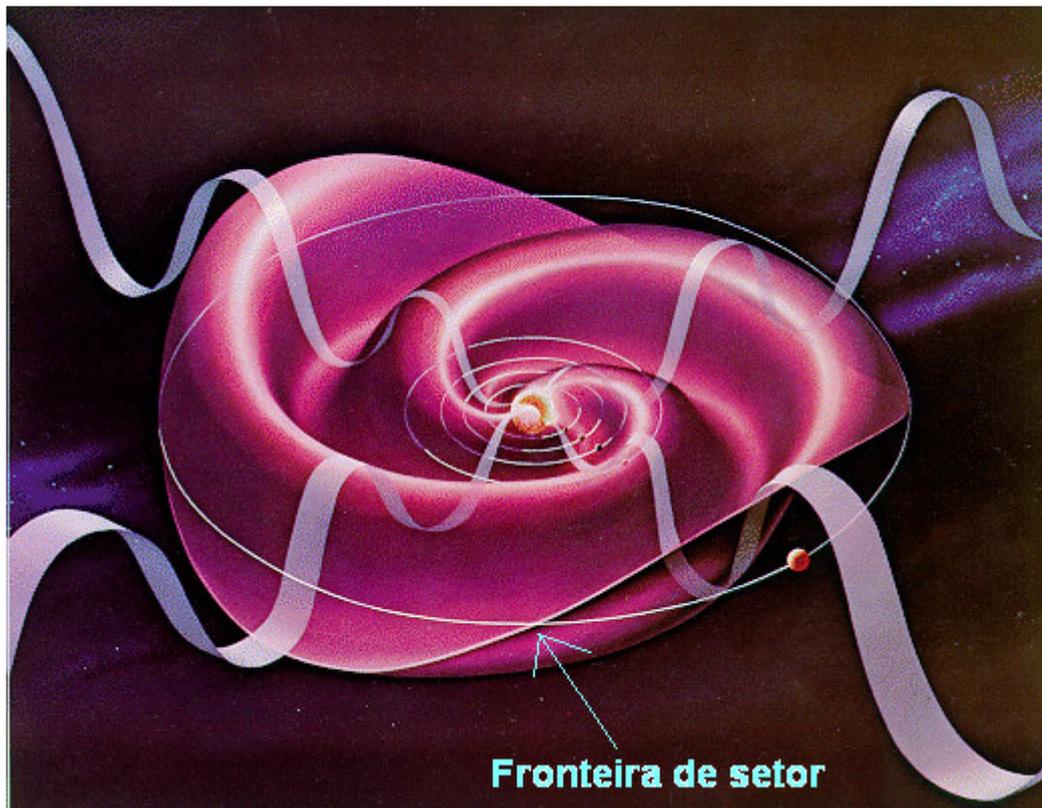


Figura 2.10 – Figura esquemática da estrutura de “saia de bailarina” do CMI [Fonte: <http://www.keelynet.com/spider/magfield.htm>].

Na figura acima vemos que o CMI pode estar setorizado em um padrão quase estacionário de regiões alternadas de polaridade dominante de campo magnético, tanto T (*Toward*, para o Sol, -) como A (*Away*, para longe do Sol, +) ao longo da direção da espiral de Arquimedes. A interfase entre os vetores, onde o sinal das componentes dos campos radial e azimutal muda de $-/+$ ou de $+/-$, foi denominada de **fronteira de setor**. Observações de variações de polaridade magnética indicam que a transição de setores $+/-$ ou $-/+$ é muito abrupta e ocorre em uma distância de poucos rios de Larmor (10^6 m). Esta abrupta reversão de campo magnético indica a existência de uma lâmina de corrente bem intensa através da fronteira (Parks, 1991).

A observação de setores da Terra ocorre da seguinte forma: um setor seria visto quando se está acima da LCH e o oposto quando se está abaixo. Como a LCH é paralela ao equador magnético solar, os parâmetros de Vento Solar poderiam estar organizados em relação a ela (Smith, 2001).

A polaridade do setor pode ser definida a partir dos dados das componentes x e y do Campo Magnético Interplanetário. O ângulo que define a polaridade de setor é calculado por:

$$\varphi = \arctg \frac{B_y}{B_x}$$

Nesta equação, as componentes estão em coordenadas GSE. Quando este ângulo estiver entre 90-180°, tem-se o setor A, entre 270-360°, tem-se o setor T, nos ângulos intermediários, tem-se indefinição de setor.

2.2 – ATIVIDADE SOLAR

O Sol possui regiões situadas no interior de configurações de campo magnético em forma de ferradura ou arco, com linhas de fluxo magnético que se projetam pela Cromosfera até a Coroa Solar, cujas extremidades – pólos magnéticos Norte e Sul – estão presas na Fotosfera associada às manchas solares, como se fosse um ímã gigante. Devido a ação destes campos, é nas regiões ativas que se observam os fenômenos conhecidos como explosões solares - “flare”. Estas explosões ocorrem com maior frequência nos períodos de máxima atividade do ciclo solar.

2.2.1 – CICLO DE ATIVIDADE SOLAR

O Ciclo de Atividade Solar varia com um período de 11 anos e conseqüentemente, as estruturas do Meio Interplanetário e o Campo Magnético Interplanetário também variam com este mesmo período. O Ciclo Solar de 11 anos, é caracterizado por um aumento no número de Manchas Solares atingindo um máximo, decrescendo logo em seguida, como mostra a Figura 2.11.

Durante o Ciclo Solar são identificadas fases distintas, a fase de mínimo solar, fase ascendente e fase de máximo solar, fase descendente. Durante o máximo do ciclo ocorre o aumento de fenômenos energéticos nas regiões ativas associadas as manchas. Estes fenômenos são chamados de explosões solares ou “Flares”, podendo estar associadas a Ejeções Coronais de Massa e a Tempestades Geomagnéticas.

Outros efeitos importantes da atividade solar são os prejuízos causados em telecomunicações, sistemas de navegação, órbita de satélites, exploração de recursos minerais, sistemas de fornecimento de energia, oleodutos, sistemas biológicos e os danos das radiações ionizantes de origem solar que podem atingir missões espaciais tripuladas colocando em risco a vida dos astronautas pela exposição a grande quantidade de radiação.

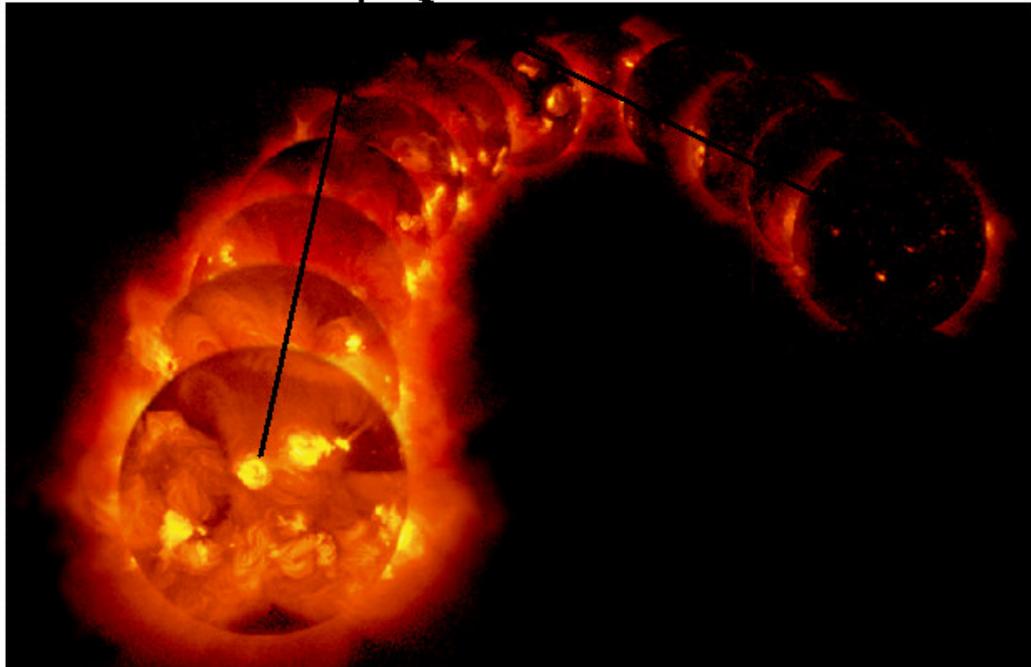
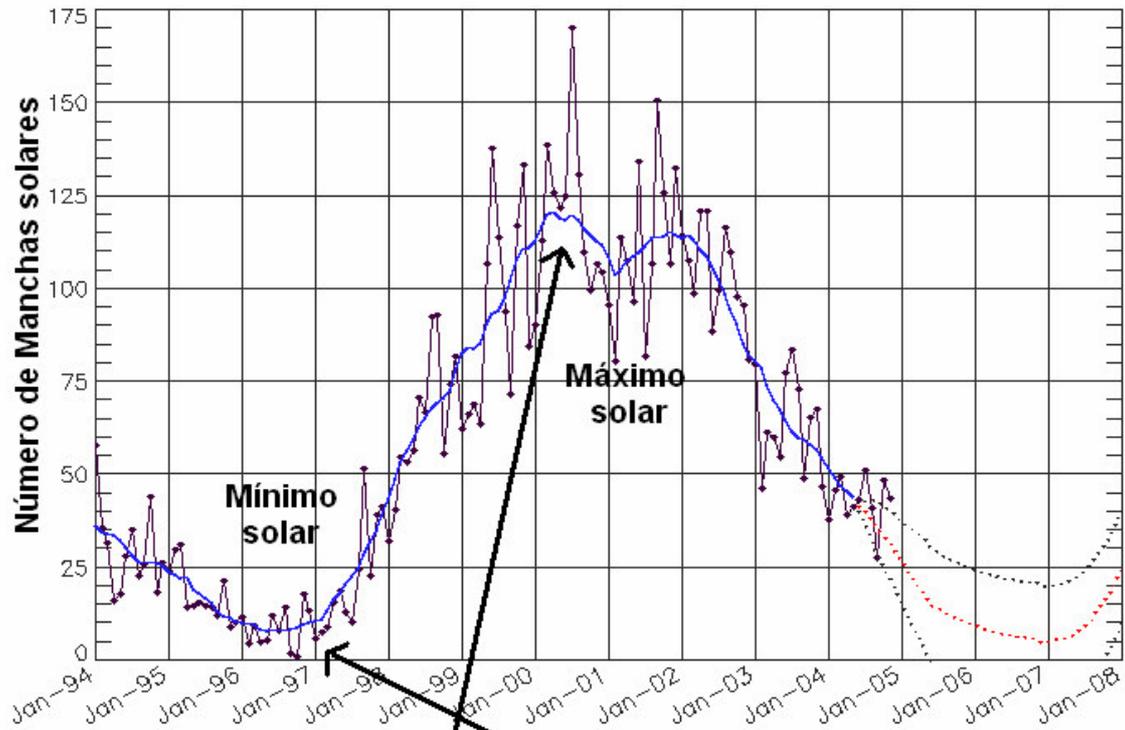


Figura 2.11 - Gráfico da Atividade Solar dado em anos, mostra o Ciclo Solar de 11 anos, em particular o Ciclo Solar 23 [Fonte: Modificado de <http://www.sec.noaa.gov/SolarCycle/> e <http://helios.gsfc.nasa.gov/ace/gallery.html>].

Podemos ver na Figura 2.12 um diagrama demonstrativo do Ciclo Solar de 11 anos desde 1750 até 2000.

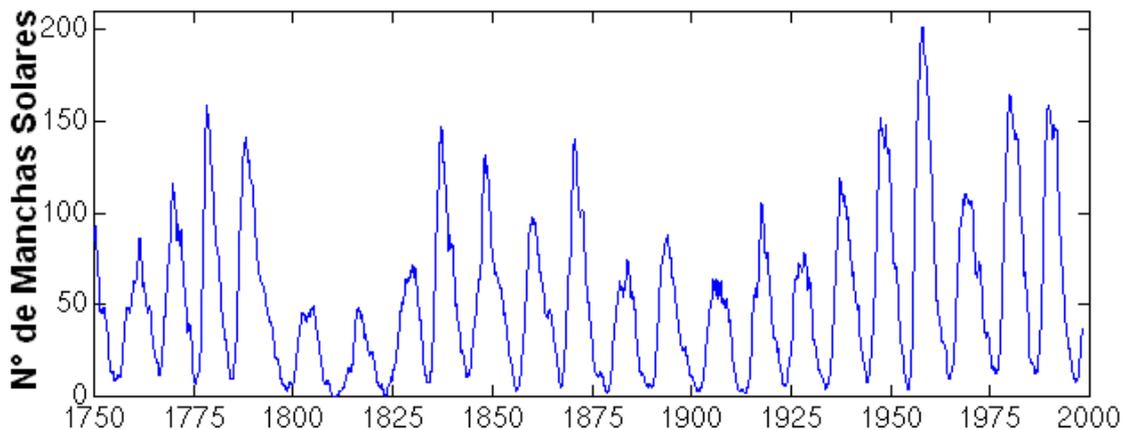


Figura 2.12 – Ciclo da atividade solar de 1750 à 2000 [Fonte: Modificado de <http://www oulu.fi/~spaceweb/textbook/cycle.html>].

2.2.2 – EXPLOSÕES SOLARES - “FLARES”

Estes fenômenos caracterizam-se pela emissão de grande quantidade de energia (10^{26} a 10^{32} ergs), em intervalos de tempo relativamente curtos, variando de alguns segundos até poucas horas, para os fenômenos mais intensos.

A energia cinética térmica liberada é proveniente da energia magnética armazenada na atmosfera solar, no interior de locais conhecidos como regiões ativas. Toda essa energia, que não chega a 10% de toda energia emitida pelo Sol durante um segundo, provoca o aquecimento e aceleração dos elétrons, prótons e íons mais pesados presentes nos locais de liberação de energia e em sua vizinhança próxima, ver Figura 2.13.

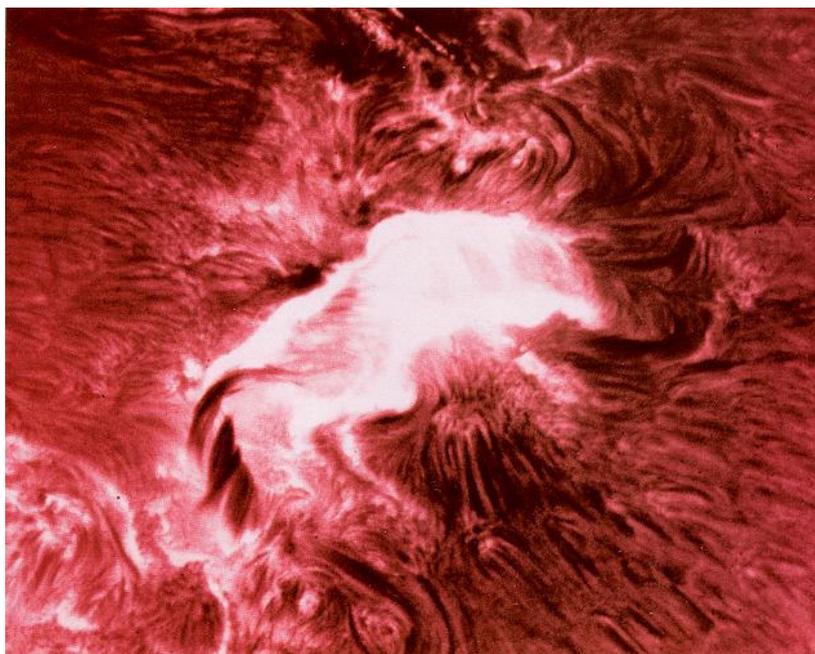


Figura 2.13 – “Flare” solar observado por monitores de raio-X a bordo de satélite Fonte: <http://science.nasa.gov/ssl/pad/solar/images/flare.jpg>

2.2.3 – EJEÇÕES CORONAIS DE MASSA (CME)

Ejeções Coronais de Massa (CMEs) Solares vem sendo objeto de estudos desde a sua descoberta, através de observações feitas por coronógrafos na década de 70. São designadas como grandes quantidades de matéria (10^{15} a 10^{16} g) entremeadas nas linhas de campo magnético. São expulsas do Sol durante um período de várias horas, formando uma enorme erupção que se expande para um espaço a velocidades de varias centenas e poucos milhares de km/h.

Seqüências de imagens de coronógrafos revelam a estrutura de densidade da Coroa Solar e suas variações temporais, bem como suas expulsões transientes de Plasma, que são a essência das Ejeções Coronais de Massa (Hunduhausen, 1997), ver Figura 2.14.

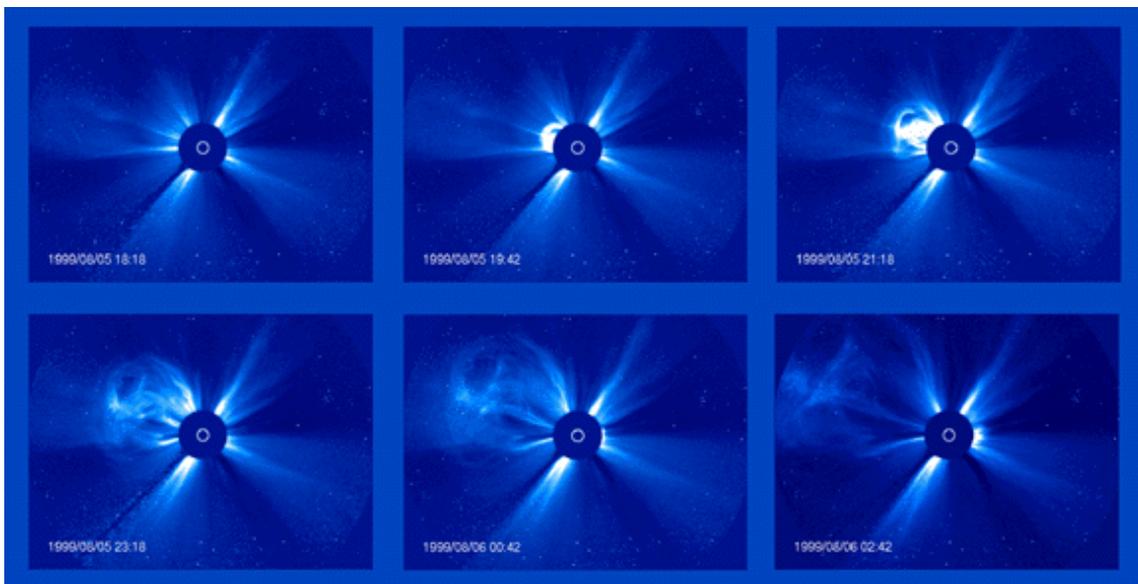


Figura 2.14 - Seqüência de imagens mostrando a ocorrência de uma CME observada pelo Coronógrafo LASCO C3 a bordo do satélite SOHO [Fonte: <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>].

Um exemplo de expulsão transiente de Plasma, ilustrada na seqüência de imagens da Figura 2.14, Mostra uma Ejeção Coronal de Massa observada no período de 5 a 6 de agosto de 1999 pelo coronógrafo LASCO C3, instrumento a bordo do satélite SOHO (Solar Heliospheric Observatory). O coronógrafo mede a radiação fotosférica espalhada por elétrons no Plasma coronal ionizado, mostrando a estrutura da densidade da Coroa. Mais da metade destes fenômenos estão associadas a proeminências eruptivas (Gosling, 1997), o restante acompanha os “flares”. É possível ainda que estejam associadas aos Buracos Coronais, segundo Hewish e Bravo (1986). Os Buracos Coronais são regiões escuras, apresentando configurações de campo magnético aberta, de onde se originam Feixes de Altas.

As Ejeções Coronais de Massa tem uma freqüência relacionada com o Ciclo Solar, podendo ser observados cerca de 1 evento por semana, no mínimo do ciclo, enquanto podem ocorrer 2 a 3 eventos por dia nos períodos do máximo da atividade solar. As EMCs apresentam estruturas que pode ser caracterizada em três regiões

distintas: Loop externo; cavidade interna com densidade menor; proeminência eruptiva interna (Hundhausen, 1988).

As Ejeções Coronais de Massa podem quebrar o fluxo do Vento Solar e produzir alterações que atingem a Terra e as vezes com resultados nocivos e perigosos às atividades humanas. Estes eventos afetam diretamente o Clima Espacial. As imagens do coronógrafo LASCO “Large Angle and Spectroscopic Coronagraph”, a bordo do satélite SOHO “Solar and Heliospheric Observatory” nos possibilita o monitoramento das condições dinâmicas da Coroa Solar, bem como, o desenvolvimento de estudos sobre a forma e amplitude de tais ejeções.

2.3 – RELAÇÃO ENTRE EJEÇÕES CORONAIAS DE MASSA E ESTRUTURAS DO MEIO INTERPLANETÁRIO.

2.3.1 – ASSINATURA DAS EJEÇÕES CORONAIAS DE MASSA NO VENTO SOLAR

A identificação no Vento Solar do Meio Interplanetário do material ejetado em uma CME, é ainda um desafio a ser vencido. Não há uma característica única exibida por todas as nuvens de Plasma resultantes de CMEs Solares. Segundo Neugebauer e Goldstein (1997), várias características podem aparecer juntas ou isoladas, são elas:

- (a) Temperatura cinética de íons ou elétrons baixa para uma dada velocidade do Vento Solar. Esta característica baseia-se na expansão da estrutura;
- (b) 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 a medida que o Plasma se expande;
- (c) Abundancia de Helio não usual;
- (d) Abundancia de outras espécies iônicas;
- (e) Feixes bidirecionais de elétrons supratermais 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;
- (f) Suave e intenso Campo Magnético, interfere nos valores do 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;
- (g) 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;
- (h) Decréscimo do fluxo de Raios Cósicos.

Cerca de 1/3 das estruturas identificadas no Meio Interplanetário são Nuvens Magnéticas (Gosling, 1990).

2.3.2 – RELAÇÃO ENTRE EJEÇÕES CORONAIAS DE MASSA RÁPIDAS E ONDAS DE CHOQUE NO VENTO SOLAR

As EMC rápidas geralmente estão associadas a ondas de choque no Vento Solar. Acredita-se que todas as ondas de choque transitentes no Vento Solar em 1 UA sejam causadas por EMC (Gosling, 1999). Alternativamente, alguns autores acreditam que os Feixes de Alta Velocidade originados em Buracos Coronais também podem ser formadores das ondas de choque transitentes (Hewish e Bravo, 1986).

A seguir temos na Figura 2.15 um diagrama ilustrativo mostrando um esquema idealizado de uma onda de choque causada por uma CME rápida. A Figura representa um plasmóide magneticamente desconectado do Sol. A onda de choque é indicada pela linha curva e se propaga logo à frente da CME. Entre o choque e a ejeção há uma região onde o plasma e o campo magnético do Vento Solar são comprimidos similarmente à Lâmina Magnetosférica da Terra.

Além do Plasma e do campo magnético, a parte interna frontal do plasmóide também é comprimida, como resultado da interação. Esta compressão tem importante papel no aumento da magnitude do campo magnético dentro das CMEs.

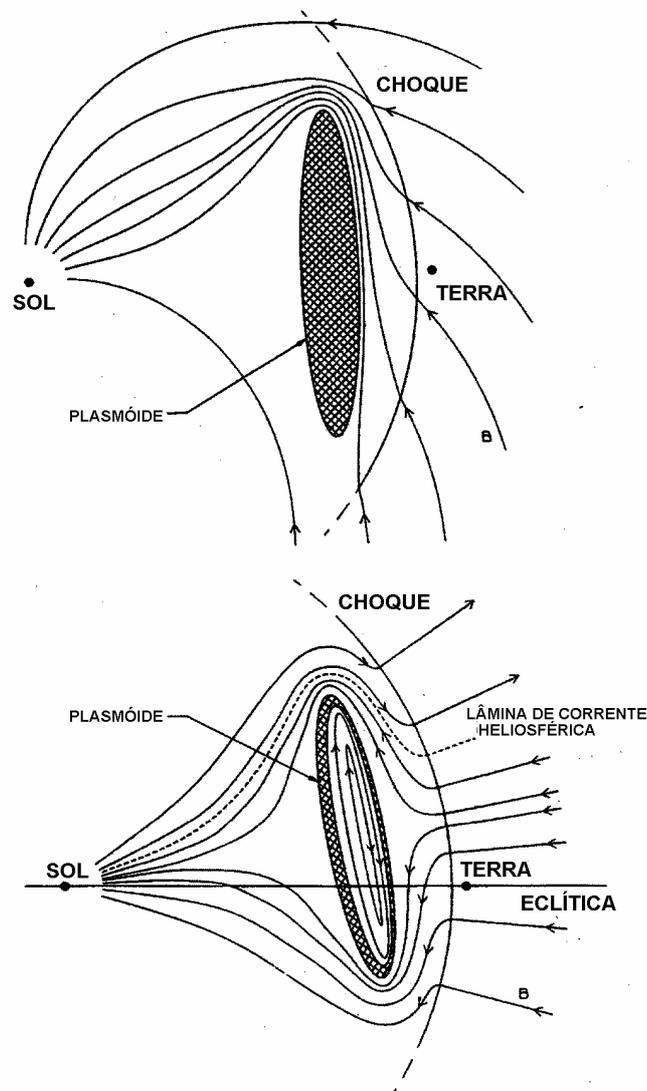


Figura 2.15 – Esquema idealizado de uma onda de choque causada por uma CME rápida [Fonte: Gosling, 1997, p.10].

2.3.3 – NUVENS MAGNÉTICAS

Segundo Klein e Burlaga (1982), uma Nuvem Magnética é definida como sendo uma estrutura com extensão radial de aproximadamente 0,25 UA - em 1UA -, campo magnético mais intenso que o do Vento Solar normal, tipicamente $B > 10$ nT, Suave rotação da direção do campo magnético em um grande ângulo, próximo a 180° , baixa temperatura e baixo valor do parâmetro beta, $\beta \sim 0,1$. As Nuvens Magnéticas são ideais para estudos das interações Sol-Terra devido a sua simplicidade e extensos intervalos de campo magnético na direção sul e norte ou vice-versa (Burlaga et al., 1990).

Medidas dos parâmetros de Plasma - velocidade do Vento Solar, temperatura e densidade de prótons – e campo magnético - componentes B, Bx, By, Bz – possibilitam a identificação de Nuvens Magnéticas. Tais Medidas são feitas diariamente por vários satélites presentes no Meio Interplanetário. Alguns destes satélites situavam-se em: 1 UA: satélite IMP-8 na órbita da Terra (já desativado), no ponto Lagrangeano L1, como o satélite ISEE-3, no período de 1978-1979 e o satélite ACE.

As Nuvens Magnéticas são originadas nas Ejeções Coronais de Massa Solares. Na Figura 2.16 veremos as características de uma Nuvem Magnética observada em 18-20 de outubro de 1995 pelo satélite WIND (Burlaga et al. 1996; Lepping et al., 1997; Farrugia et al., 1998). Na Figura 2.16 vemos a intensidade do campo magnético em 1 UA, componente “z” do campo magnético, temperatura, densidade, velocidade e parâmetro beta. A linha “s” mostra uma onda de choque, caracterizada pelo aumento súbito da velocidade e do campo magnético. As duas linhas verticais sólidas delimitam a Nuvem Magnética. Observa-se uma rotação da componente “z” do campo magnético de valores negativos para valores positivos - sul para norte. O parâmetro beta dentro da nuvem apresenta valores menores ou iguais a 0,1, indicando que a pressão magnética dentro da nuvem é maior que a pressão térmica de plasma $\beta = \frac{Pk}{Pb}$, onde Pk é a pressão

térmica (NkT) e Pb é a pressão magnética ($\frac{B^2}{2\mu_0}$). Então, se β é baixo, significa que B é dominante (β é inversamente proporcional ao quadrado do campo magnético).

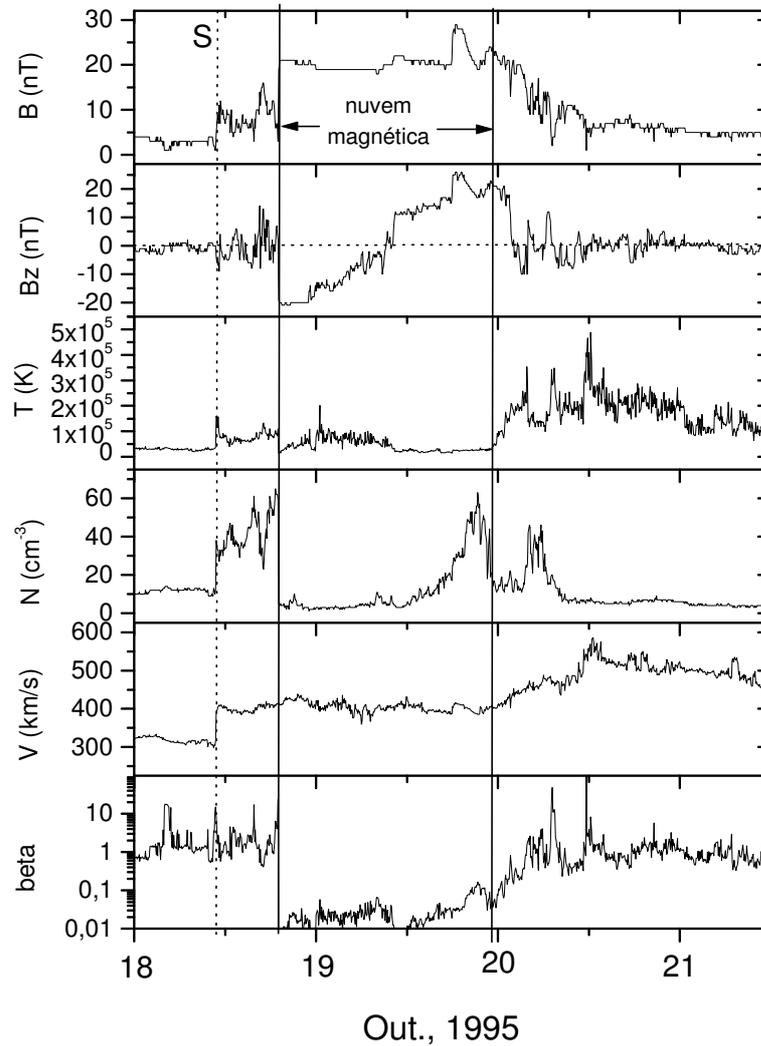


Figura 2.16 – Nuvem Magnética observada em 18-20 de outubro de 1995 pelo satélite WIND [Fonte: adaptado de Burlaga et al. (1996, p.280)].

Após o choque o campo magnético intensifica-se de aproximadamente 5 nT para aprox. 10 nT ocorrendo uma flutuação no campo magnético observado no 2º painel – “Bz”, esta região é conhecida como bainha - *sheath* -. Após várias observações feitas por satélites possibilitou-se o estabelecimento de sua geometria (Figura 2.17).

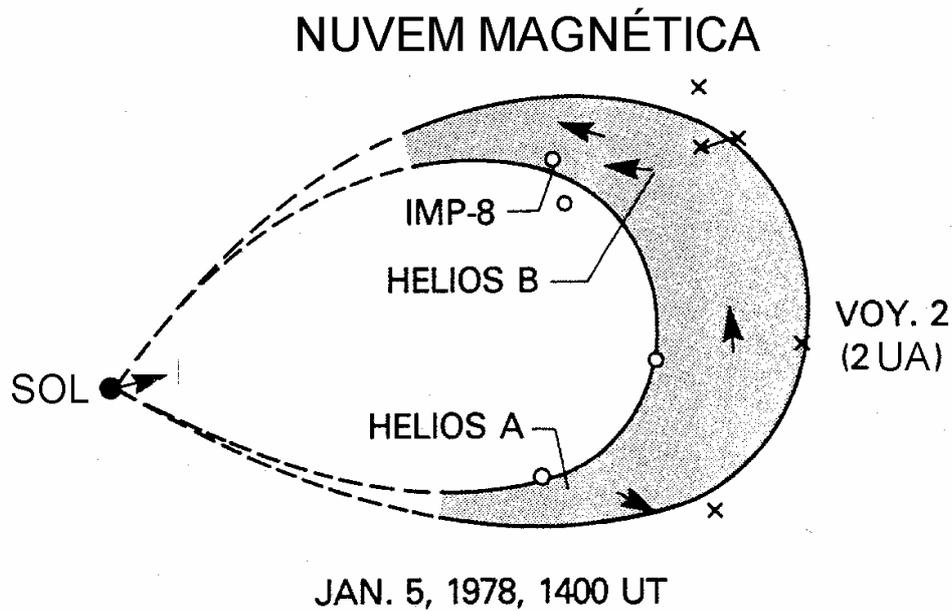


Figura 2.17 – Geometria de uma Nuvem Magnética [Fonte: adaptado de Burlaga et al. - 1990, p.376 –].

Na Figura 2.17 está a localização dos satélites que observam o evento ocorrido em 5 de janeiro de 1978: IMP-8, Helios-1 - “A” -, Helios 2 - “B” - e Voyager-2, os “x” representam a fronteira dianteira da Nuvem Magnética vista por cada um dos satélites, e os círculos, a fronteira traseira. As setas indicam a direção do campo magnético observado por cada um dos satélites. Normalmente não é possível observar estruturas com mais de um satélite simultaneamente, portanto este evento é bastante raro. Diante disso (Burlaga et al., 1990) concluíram que esta Nuvem Magnética tinha a forma de um tubo, que poderia ou não estar conectado ao Sol.

A Figura 2.18 mostra em escala mais global, uma Nuvem Magnética representada por um tubo de fluxo.

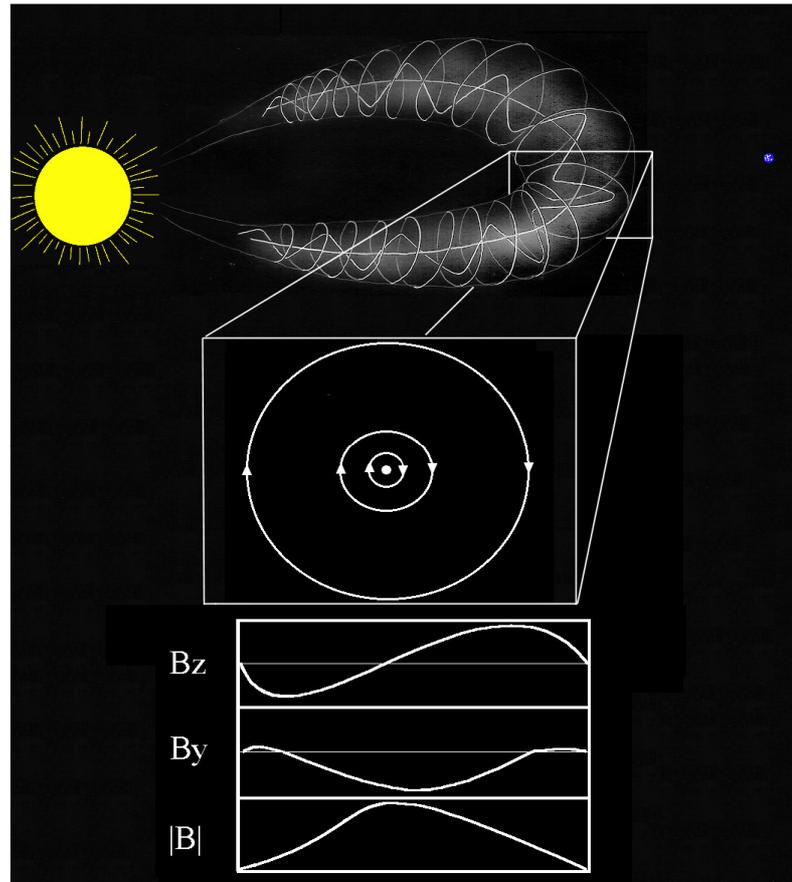
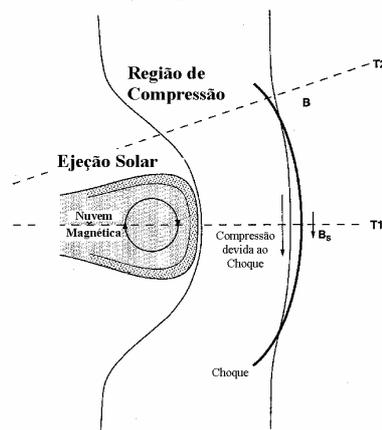


Figura 2.18 – Ilustração da configuração do campo magnético de uma Nuvem Magnética [Fonte: Dal Lago, 1999, p.48].

Dependendo da trajetória do satélite ao interceptar uma Nuvem Magnética, a rotação vista será maior, interceptando a parte central, ou menor, nas bordas da estrutura (Tsurutani e Gonzalez, 1997), como mostra a Figura 2.19.



- T1:** Passando no centro da estrutura da Nuvem Magnética/Choque
- T2:** Passando fora do centro da estrutura da Nuvem Magnética/Choque

Figura 2.19 – Desenho Mostrando a estrutura de uma Nuvem Magnética, região de compressão e onda de choque. T1 e T2 são duas trajetórias de satélites possíveis interceptando a ejeção de maneira diferente [Fonte: Adaptado de Tsurutani e Gonzalez 1997, p.79].

2.4 - EFEITOS GEOMAGNÉTICOS CAUSADOS PELA ATIVIDADE SOLAR

Um dos mais importantes Ciclos Solares é o Ciclo Solar de 11 anos. Durante a fase de intensa atividade neste ciclo, período denominado Máximo Solar, há regiões de instabilidade que podem liberar a altas velocidades, grandes quantidades de matéria e energia através de Explosões e/ou Ejeções Solares. A Atividade Solar é responsável por diversas perturbações no Campo Geomagnético, que podem ser recorrentes ou transientes. As recorrentes normalmente estão relacionadas à rotação do Sol e tem períodos de aproximadamente 27 dias. As transientes estão fortemente relacionadas às Ejeções Coronais de Massa (CME). Dentre estas perturbações podemos destacar as Tempestades Geomagnéticas.

2.4.1 – TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

Tempestades Geomagnéticas são eventos de grandes perturbações no Campo Magnético Terrestre, onde a terra fica vulnerável a precipitação de partículas energéticas do Vento Solar e a raios cósmicos, tendo recebido esta denominação desde a metade do século XIX (Gonzalez et al, 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 et al., 1998). O decréscimo atribui-se a um aumento da população de partículas aprisionadas na magnetosfera. Derivas devidas ao gradiente do campo magnético e a sua curvatura produzem a chamada “Corrente de Anel”.

A Corrente de Anel é gerada pelo movimento de partículas eletricamente carregadas, os íons de leste para oeste e os elétrons de oeste para leste, em torno da Terra devido a distribuição de partículas injetadas e aprisionadas na magnetosfera interna. A perturbação do Campo Geomagnético gerada por essa corrente reflete a condição do Campo Magnético Interplanetário - CMI – que controla o suprimento de energia para o interior da magnetosfera (Akasofu e Chapman, 1972; Burton et al., 1975; Lyons e Willians, 1984; Nishida, 1978).

Para medir a intensidade da Corrente de Anel é utilizado o chamado índice 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 de uma grande Tempestade Geomagnética medida no período de 03 a 11 de novembro de 2001 estão ilustradas na Figura 2.20.

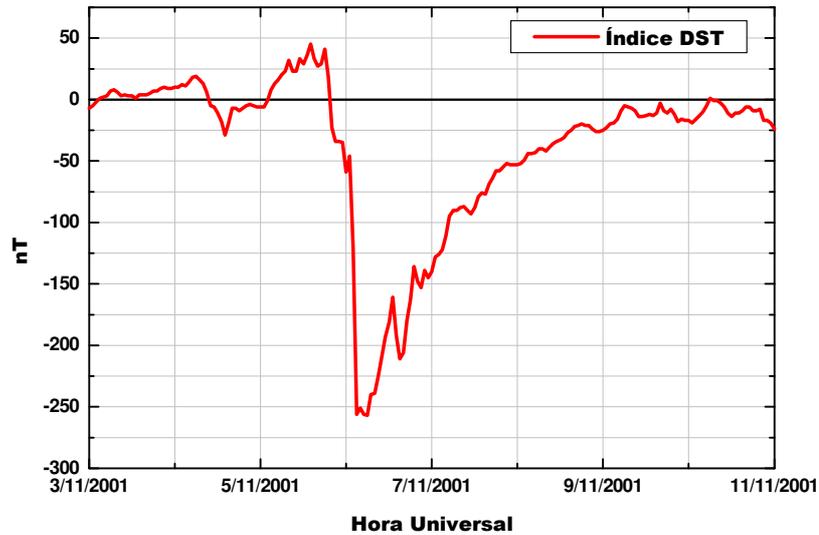


Figura 2.20 - Valores horários do índice Dst para a Tempestade Magnética de 03-11 de novembro de 2002 [Fonte: <http://swdcdb.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>].

Uma Tempestade Geomagnética caracteriza-se por três fases: (1) Um início súbito - *sudden commencement* – e/ou fase inicial, está associada ao aumento da pressão dinâmica - incidência de partículas – do Vento Solar, que comprime a magnetosfera, indicando um aumento brusco no campo magnético; (2) Uma fase principal - *main phase* – é caracterizada por uma redução da intensidade do campo na Superfície Terrestre, essa redução está associada à intensificação da Corrente de Anel e conseqüentemente um alto decréscimo no índice Dst e (3) Uma fase de recuperação – *recovery phase* – caracteriza-se pela diminuição e eliminação gradual da pressão, passando a predominar os processos de perda da Corrente de Anel. A figura 2.21 mostra as fases de uma Tempestade Geomagnética.

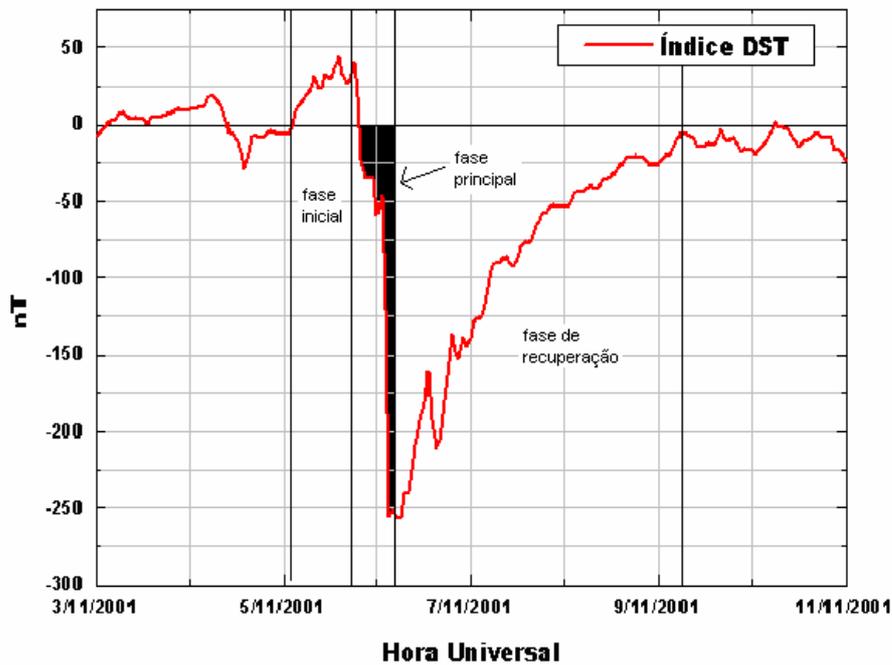


Figura 2.21 – As três fases de uma Tempestade Magnética [Fonte: modificado de <http://swdcdb.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/>].

Podemos classificar uma Tempestade Geomagnética de acordo com a sua intensidade. A Tabela 2.3 mostra esta classificação.

Tabela 2.3 – Classificação das Tempestades Geomagnéticas.

INTENSIDADE DA TEMPESTADE	DEFINIÇÃO
Intensas	$Dst < -100 \text{ nT}$
Moderadas	$-100 \text{ nT} \leq Dst \leq -50 \text{ nT}$
Fracas	$-50 \text{ nT} \leq Dst \leq -30 \text{ nT}$
Atividade Normal	$Dst \geq -30 \text{ nT}$

Para o monitoramento das Tempestades Geomagnéticas são utilizados outros índices. O índice KP ou índice global é obtido através de um valor médio do nível de distúrbio em duas componentes horizontais do Campo Geomagnético. Estes distúrbios são medidos por 13 estações em médias latitudes. Estas perturbações magnéticas podem ser determinadas através das componentes H e D calculando-se o logaritmo da maior variação nestas componentes em um intervalo de 3 horas. Estas variações são distúrbios irregulares do Campo Geomagnético causados pela precipitação de partículas solares. As escalas variam de 0 - magneticamente quieto - a 9 - nível máximo de distúrbio -. Abaixo a Figura 2.22 ilustra uma Tempestade Geomagnética.

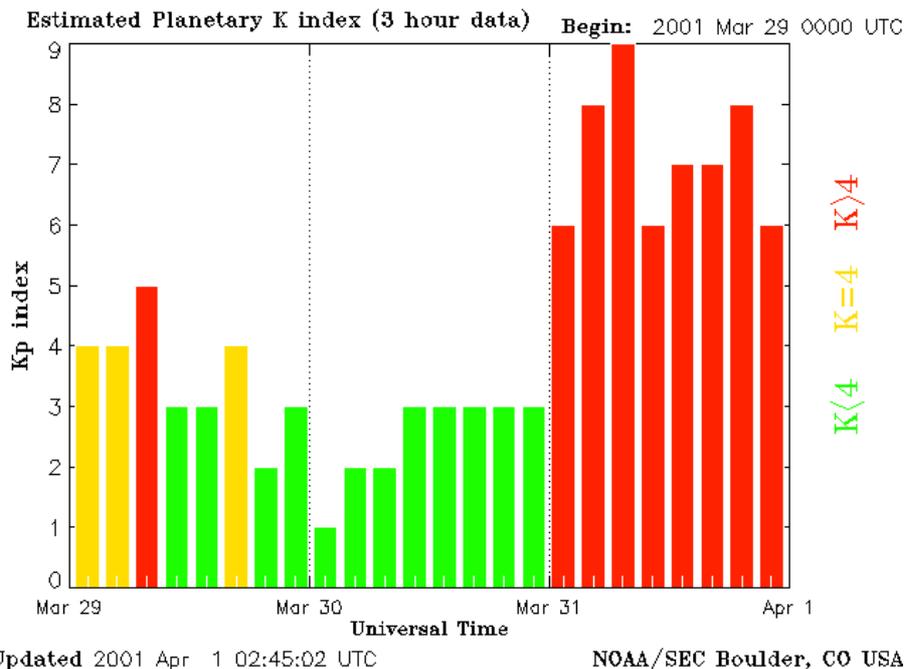


Figura 2.22 – Escala para o índice Kp, mostrando a tempestade Geomagnética de 31 de março de 2001 [Fonte: www.sec.noaa.gov].

2.4.2 – ORIGEM INTERPLANETÁRIA DAS TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

A Magnetosfera Terrestre é uma cavidade preenchida com um Plasma quente e rarefeito interagindo com um fluxo rápido de Plasma do Vento Solar. Devido ao Campo Magnético da Terra intenso, o Vento Solar não pode penetrar diretamente na Magnetosfera e é desviado a sua volta.

Acredita-se que o mecanismo físico responsável pela transferência de energia do Vento Solar para a Magnetosfera seja a reconexão entre o Campo Magnético Interplanetário e o Campo Magnético Terrestre (Tsurutani e Gonzalez, 1997). Para que aconteça este fenômeno é necessário que a componente do CMI esteja na direção antiparalela a do Campo Magnético Terrestre (Figura 2.23). O critério necessário para que ocorra uma Tempestade Geomagnética intensa, $Dst < -100nT$, é o de haver um Campo Elétrico Interplanetário, $\vec{E} = \vec{V} \times \vec{B}_s$, na direção do anoitecer, maior que 5 mV/m, por um período maior que 3 horas. Esse critério foi empiricamente definido por Gonzalez e Tsurutani (1987) com dados de Plasma e campo obtidos do satélite ISEE-3, e implica em um campo magnético B_s maior que 12,5 nT para uma velocidade do Vento Solar de aproximadamente 400 km/s.

O processo da reconexão já proposto por (Dungey, 1961), e supõe uma interconexão entre campos interplanetários e campos magnetosféricos no lado diurno seguida de uma intensa reconexão de campos no lado noturno, com a concomitante injeção de Plasma, proveniente da região do “*plasmashet*”. Um bom entendimento das estruturas interplanetárias que causam Tempestades Geomagnéticas durante o máximo solar e próximo as mínimas condições do ciclo devem conduzir a uma melhor definição de procedimentos de previsão, as quais têm sido considerados como uma ferramenta fundamental para as pesquisas do Clima Espacial.

ACOPLAMENTO SOL-MEIO INTERPLANETÁRIO-MAGNETOSFERA

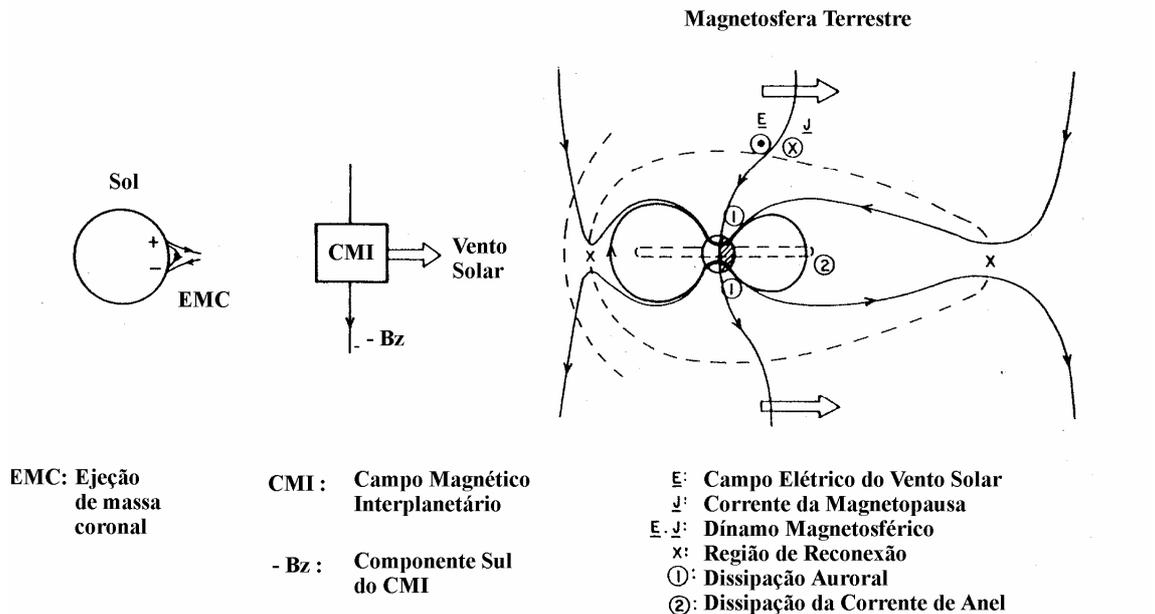


Figura 2.23 - Acoplamento entre Sol, Meio Interplanetário e Magnetosfera Terrestre [Fonte: Adaptado de Tsurutani e Gonzalez 1997, p. 82].

2.4.2.1 – TEMPESTADES CAUSADAS POR NUVENS MAGNÉTICAS

Grande parte das Tempestades Geomagnéticas intensas - $Dst \leq -100nT$ – não recorrentes são causadas por nuvens magnéticas (Gonzalez et al., 1999). A razão principal pela qual Nuvens Magnéticas estão entre as principais causas de Tempestades Magnéticas é o fato de freqüentemente apresentarem campo magnético Bz negativo e intenso - $|B| > 10nT$ - por intervalos de tempo superiores a 3 horas, cumprindo os critérios de Gonzalez e Tsurutani (1987) para a ocorrência de tempestades intensas.

Devido ao aumento de densidade e velocidade, a pressão exercida na Magnetosfera Terrestre, ρv^2 , 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* -. Desde que SI é seguido pela fase principal da tempestade, é chamado de começo repentino da tempestade - *Sudden Storm 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.

A Figura 2.24 apresenta uma comparação entre uma observação de uma nuvem magnética em 18-20 de outubro de 1995 e uma ilustração da estrutura solar-interplanetária envolvida. A seta superior está representando uma onda de choque que é causada por uma Nuvem Magnética oriunda de uma CME, a configuração do campo magnético observado na Terra é de um tubo de fluxo. A seta seguinte mostra a região de compressão, formada logo após o choque, indicada pela flutuação do campo magnético. A terceira seta indica a Nuvem Magnética, representada por um Campo Magnético mais intenso que as demais regiões e a quarta seta representa a rotação da componente Bz de

sul para norte. A Tempestade Geomagnética está representada pela quinta seta, mostrando a queda no índice Dst devido a intensificação da corrente de anel ilustrada ao lado.

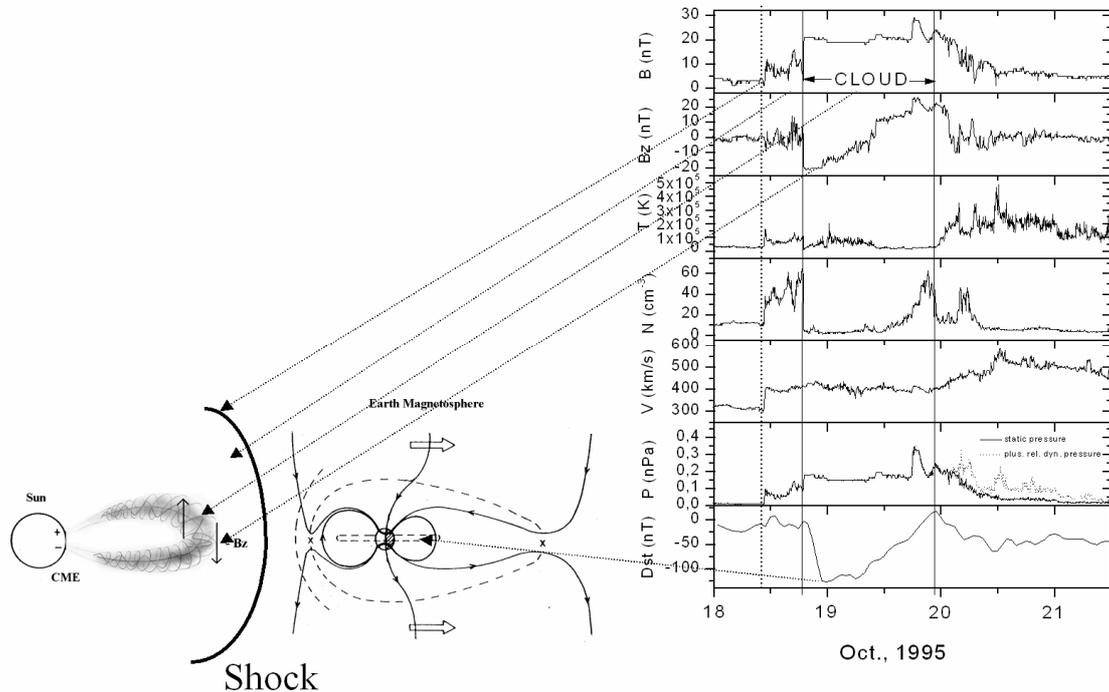


Figura 2.24 - Composição entre a observação de uma nuvem magnética observada em 18-20 de outubro de 1995 nas proximidades da Terra e uma ilustração do cenário solar-interplanetário relacionado. [Fonte: Dal Lago et al., 2001, apresentação no VI COLAGE].

2.4.2.2 – TEMPESTADES CAUSADAS POR CHOQUES

Existem vários mecanismos que conduzem para componentes de campo na direção sul da bainha (Tsurutani et al., 1988a; Zwan and Wolf, 1976). Dois destes mecanismos conduzem para a intensificação de campos magnéticos, independentes da orientação. Estes são compressão por choque e empilhamento. No primeiro mecanismo, o choque comprime tanto o campo magnético quanto o plasma. Segundo (Tsurutani et al., 1992) no segundo mecanismo o encurvamento do campo magnético ao redor da ejeção solar conduz para uma compressão do Plasma.

A Figura 2.25 está relacionada a uma onda de choque. Apresenta um exemplo de uma estrutura interplanetária observada pelo satélite ACE em 06 de abril de 2000. São mostrados, de cima para baixo: campo magnético total $|B|$ e suas componentes B_x , B_y e B_z em coordenadas GSM; densidade de íons; velocidade e temperatura de íons. Está indicada a presença de uma onda de choque em “1”. Seguindo esta onda de choque está a bainha em “2”, porém não há sinal evidente de uma ejeção logo atrás, não havendo campo magnético intenso após a região “2”. No entanto se pode observar uma região de baixa temperatura após a região “2”, que se estende desde aproximadamente 0900UT do dia 7 até aproximadamente 09:00 UT do dia 8.

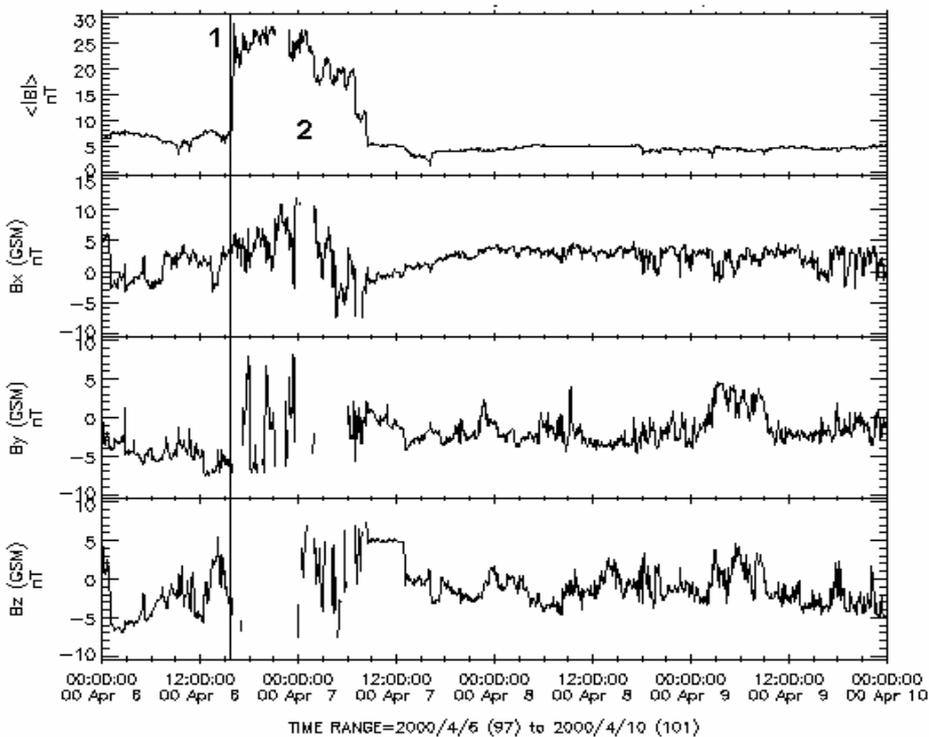


Figura 2.25 – Campo magnético e parâmetros de plasma observados pelo satélite ACE no ponto Lagrangeano L1 no período de 6 a 10 de abril de 2000.

2.5 – RAIOS CÓSMICOS

2.5.1 – INTRODUÇÃO

Os raios cósmicos são radiações naturais cujo poder de penetração é muito superior ao de qualquer outra radiação conhecida, possuem alta energia, se propagam no espaço interestelar atingindo a Atmosfera Terrestre de maneira isotrópica. Sua energia está no intervalo de 10^9 a 10^{19} eV. São compostos principalmente por prótons e íons nucleares. Por muitos anos os raios cósmicos eram a mais importante fonte de partículas energéticas para o estudo da Física Subatômica. Hoje os raios cósmicos são estudados como um fenômeno natural que pode nos dizer muito sobre o meio ambiente espacial Terrestre e sobre processos astrofísicos distantes.

A maior parte dos raios cósmicos observados é originada fora do Sistema solar e são chamados de raios cósmicos galácticos. A principal teoria da origem dos raios cósmicos diz que essas partículas são aceleradas principalmente pela onda de choque quase esférica resultante da explosão de uma supernova (Jokipii, 1998). A Figura 2.26 mostra uma nébula brilhante rodeada de uma nuvem difusa de poeira. No centro pensa-se existir um *pulsar*, isto é, uma estrela de nêutrons em rotação. O campo magnético desta estrela confina os núcleos e as partículas carregadas como os elétrons e acelera-os

a velocidades próximas a da luz. A fotografia foi obtida pelo observatório de raios-X Chandra.

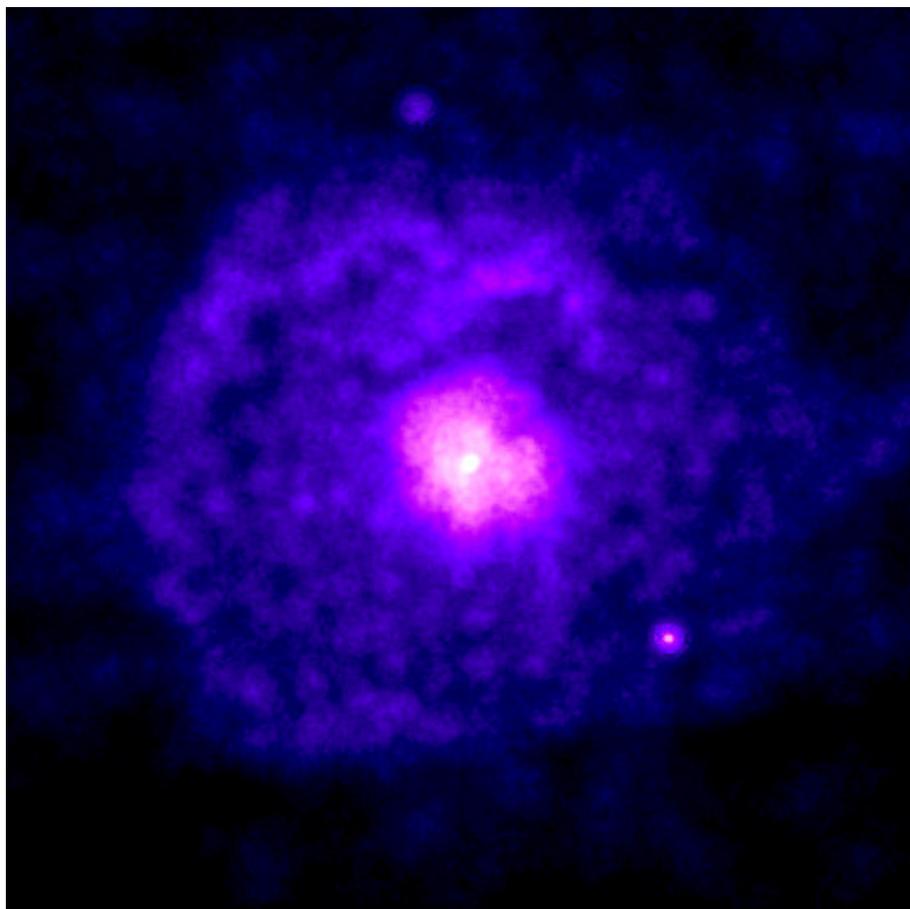


Figura 2.26 - Restos da supernova G21.5-0.9 na constelação de Scutum, possível origem dos raios cósmicos [Fonte: <http://www.lip.pt/experiments/trc/oqsao/oqsao1.html>].

2.5.2 – ORIGEM E COMPOSIÇÃO DOS RAIOS CÓSMICOS

Os raios cósmicos permitem estudar as características das fontes que os produzem, que incluem o Sol, estrelas e outros objetos diversos, de galáxias a buracos negros. São, portanto, uma excelente fonte de informação sobre os variados corpos do Cosmo. Além disso, pode-se observar raios cósmicos para estudar as próprias partículas de que são formados (parte dos raios cósmicos é constituída de partículas subatômicas viajando pelo espaço). Muitos avanços na física de partículas foram devidos aos estudos de raios cósmicos.

As fontes dessa radiação são muito diversificadas. Alguns tipos de raios cósmicos são produzidos pelo Sol e por outras estrelas (além de produzir a luz visível, o Sol também produz radiação de diversas espécies, como raios ultravioletas e neutrinos). Outros, por objetos distantes, fora da nossa galáxia, como outras galáxias e quasares. Outros, ainda, por cataclismas cósmicos, como as supernovas (gigantescas explosões de estrelas que entram em colapso) ou, conforme se prevê, pela matéria que cai nos buracos negros.

Acredita-se que os raios cósmicos extragalácticos, por possuírem energias muito altas (de 10^9 a 10^{19} eV), sejam originados durante a explosão de uma Supernova, pois tanto a frequência de ocorrência quanto à energia liberada nestes eventos são suficientes para acelerar as partículas a energias dos raios cósmicos. Estimou-se que a fonte de aceleração pudesse ser a onda de choque que é criada na frente da matéria ejetada durante a explosão de uma Supernova, como ilustrado na Figura 2.27.

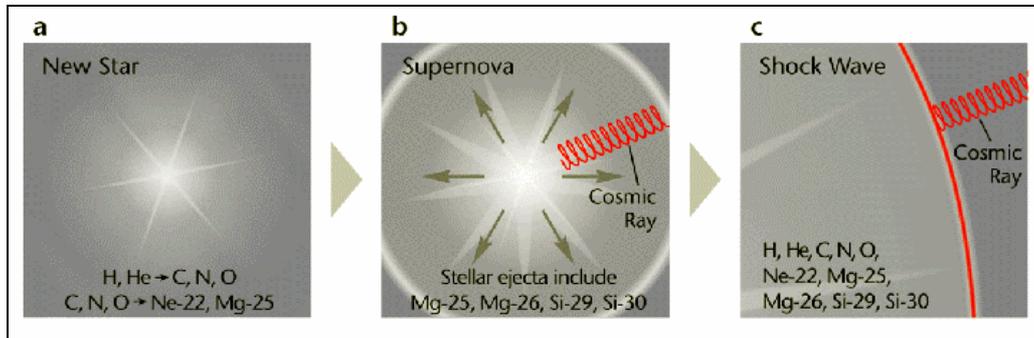


Figura 2.27 - Ilustração gráfica da origem dos raios cósmicos.

A Figura (a) mostra uma estrela no estágio de fusão dos núcleos leves em núcleos mais pesados. A Figura (b) mostra o evento de Supernova, onde o material da estrela é ejetado no espaço e a Figura (c) mostra a onda de choque que acelera as partículas à energia dos raios cósmicos

[Fonte: <http://www-istp.gsfc.nasa.gov/istp/outreach/>].

A grande maioria da radiação cósmica primária (partículas antes da interação com os átomos e moléculas da Atmosfera Terrestre) é formada por prótons, portanto, os raios cósmicos são predominantemente partículas positivamente carregadas. Existem, no entanto, partículas alfa e menos de 1% de núcleos pesados. Sabe-se com certeza que não se tratam de nêutrons nem mésons já que estes são instáveis e decaem durante seu percurso.

Os Raios Cósmicos primários estão divididos em 3 componentes:

- **Raios Cósmicos Galácticos (RCG):** originam-se fora do sistema solar, provavelmente no centro da Via Láctea. Sua propagação é guiada pelos campos magnéticos da Galáxia. O componente primário representa a composição do material original e um componente secundário é produzido pela fragmentação de núcleos mais pesados.
- **Partículas Energéticas Solares (PES):** originam-se no Sol; sua intensidade aumenta quando da ocorrência de explosões solares e outras manifestações da atividade solar.
- **Raios Cósmicos Anômalos (RCA):** originam-se no espaço interestelar além da heliopausa. Diferem dos RCG por apresentarem em sua composição porcentagem superior de hélio (partículas Alfa).

Quando partículas de raios cósmicos entram na Atmosfera superior da Terra, colidem com os átomos e moléculas do ar. Partículas de raios cósmicos pesados, tais como núcleos de hélio, são geralmente fissionados nestas colisões, podendo perder frações

significantes de sua energia. Emergindo destas colisões surgem fluxos de partículas, algumas são íons nucleares e outras são partículas incomuns denominadas mésons. Estes não são constituintes da matéria que nós normalmente encontramos; são radioativos e suas meia-vidas são curtas, geralmente menos de um milionésimo de segundo. Quando eles decaem ou colidem com átomos ou moléculas da Atmosfera Terrestre, mais partículas, inclusive elétrons, são produzidas. Estas partículas resultantes das colisões são chamadas de *Raios Cósmicos Secundários*. Os elétrons podem radiar fótons, que produzem ainda mais elétrons de tal maneira que cascatas desenvolvem-se à medida que o processo é repetido sobre muitas gerações através da Atmosfera, até que chuviros de bilhões de partículas possam ser detectadas simultaneamente na superfície. Esses chuviros aéreos extensivos são a única maneira de detectar partículas de raios cósmicos de altas energias. A Figura 2.28 ilustra esquematicamente a formação de partículas secundárias na Atmosfera Terrestre.

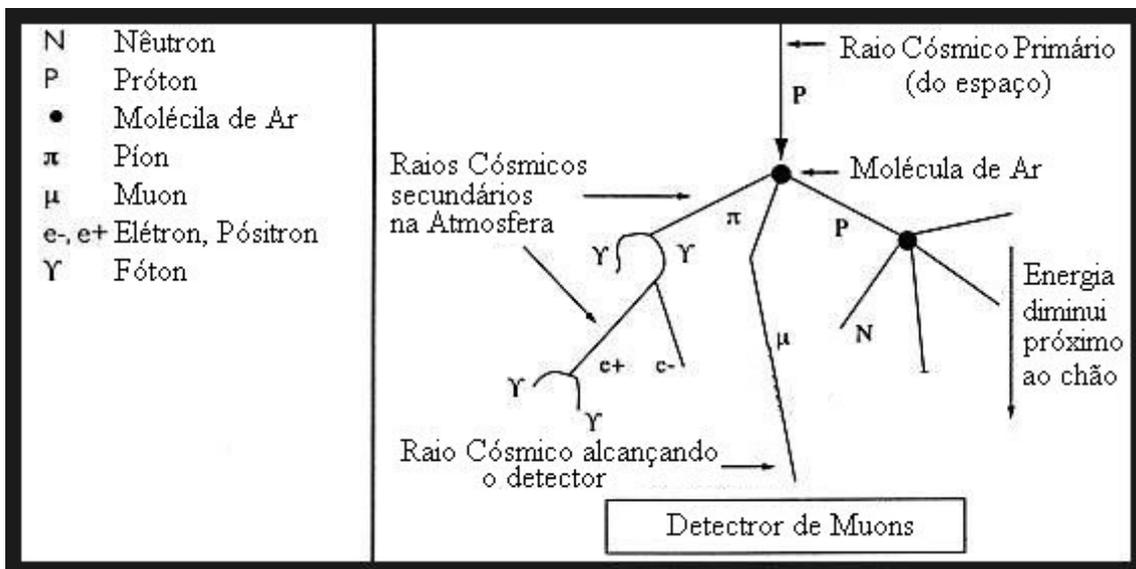


Figura 2.28 - Representação esquemática do desenvolvimento da radiação cósmica secundária na Atmosfera Terrestre como resultado da interação de uma partícula primária incidente com os núcleos dos átomos da Atmosfera superior.

[Fonte: <http://www.bartol.udel.edu/>].

2.5.3 - MUONS

A interação de raios cósmicos que atingem o alto da atmosfera terrestre produz grandes quantidades de partículas elementares conhecidas como píons ou mésons-pi. Esses píons são partículas instáveis e desintegram-se em frações de segundo após terem sido produzidas, criando partículas secundárias chamadas múons e seus neutrinos, conhecidos, por isso mesmo, como neutrinos do múon. Os múons, por sua vez, também são partículas instáveis que desintegram-se formando um terceiro conjunto de partículas elementares: os elétrons, os neutrinos do elétron e mais um neutrino do múon. Os neutrinos produzidos nessa seqüência de decaimentos são chamados neutrinos atmosféricos. Observando-se a seqüência de decaimentos descrita acima, espera-se que para cada dois neutrinos do múon, somente um neutrino do elétron seja observado.

Quando raios cósmicos de alta energia chegam na alta Atmosfera Terrestre, criam certas partículas elementares instáveis, cujos rastros, registrados em emulsões

fotográficas, são muito curtos, mais curvilíneos que o rastro de um próton e menos que o de um elétron. Em outras palavras, estas partículas teriam uma massa intermediária entre a massa do próton e do elétron. Logo se detectaram outros rastros semelhantes, e as partículas descobertas receberam o nome de “mésons” [<http://www.mipagina.cantv.net/aquilesr/muon.htm>].

Do decaimento radioativo destes mésons, origina-se outra partícula, que também possui uma massa intermediária, e se move a velocidades da ordem dos 99% da velocidade da luz. Esta partícula recebeu o nome de “muon”, apresentando duas variedades: positiva e negativa. O muon negativo, que possui 206,77 vezes a massa do elétron, é idêntico a esta partícula em todos os aspectos, exceto pela massa.

As partículas eletricamente carregadas, como é o caso dos Muons, perdem frações de sua energia devido à interação com as partículas constituintes da matéria, principalmente elétrons. Como os Muons possuem uma energia muito alta (pois viajam com uma velocidade $v = 0.99c$), eles interagem muito pouco com a matéria, apenas por ionização. Por causa disto, eles podem deslocar-se por grandes distâncias e comumente alcançam a superfície da Terra.

2.6 – PREVISÃO DO CLIMA ESPACIAL UTILIZANDO RAIOS CÓSMICOS

2.6.1 – INTRODUÇÃO

Devido ao grande volume que pode ser usado em detetores de solo, monitores de nêutrons (Simpson et al. 1953) e detetores de muons (Fujimoto et al. 1976; 1984) ainda são ideais para medir raios cósmicos $> 1\text{GeV}$. Estes instrumentos são excelentes para a detecção de minúsculas variações temporais do fluxo de raios cósmicos e para medir as pequenas anisotropias direcionais típicas dos raios cósmicos. Seus intervalos de energia são altamente complementares aos limites superiores das energias dos detetores de fluxos de raios cósmicos espaciais.

Há várias razões pelas quais partículas com estas energias são interessantes da perspectiva do Clima Espacial. Primeiro, elas viajam a velocidades próximas à da luz. Partículas de raios cósmicos que interagem com uma onda de choque ou uma Ejeção Coronal de Massa (CME) e escapam para a parte frontal dessas estruturas, viajarão mais rapidamente que o choque, trazendo o alerta da chegada da estrutura com antecedência. Segundo, as partículas têm um grande livre caminho médio. Isto é importante porque assinaturas precursoras da chegada de um distúrbio seriam apagadas devido ao espalhamento em escalas maiores que o livre caminho médio. Terceiro, as partículas têm raio de Larmor muito grande em comparação com a magnetosfera da Terra, mas são menores ou da mesma ordem do tamanho do distúrbio. Por exemplo, a energia típica de um monitor de nêutrons é 10 GeV correspondendo a um raio de Larmor de 0,02 Unidades Astronômicas em um campo magnético de 10 nT. A energia típica de um monitor de muons é 50 GeV, correspondendo a um raio de Larmor de 0,1 UA. Isto é importante porque significa que anisotropias cinéticas (tais como a anisotropia $\mathbf{B} \times \mathbf{v}_n$) correspondem a estruturas de larga escala no Vento Solar perturbado.

A instrumentação e os métodos utilizando raios cósmicos para aplicações em Clima Espacial avançaram dramaticamente nos anos recentes. *Spaceship Earth* é uma rede global de detetores de nêutrons otimizada para medir a distribuição angular dos raios cósmicos solares. No entanto, como revela a Figura 2.29, *Spaceship Earth* também

proporciona boa cobertura do céu em altas energias, que são importantes para os decréscimos de Forbush. Este sistema de rede está agora sendo implementado com os detectores de muons. Como mostra a Figura 2.30, a Rede de Detectores de Muons já existente poderia ser melhorada dramaticamente através da instalação de um detector de muons no OES/CRSPE/INPE em São Martinho da Serra, RS, Brasil. Finalmente, a disponibilidade de dados das estações de raios cósmicos está crescendo rapidamente. Seis das estações de monitoramento de nêutrons da rede *Spaceship Earth* disponibilizam dados em tempo real.

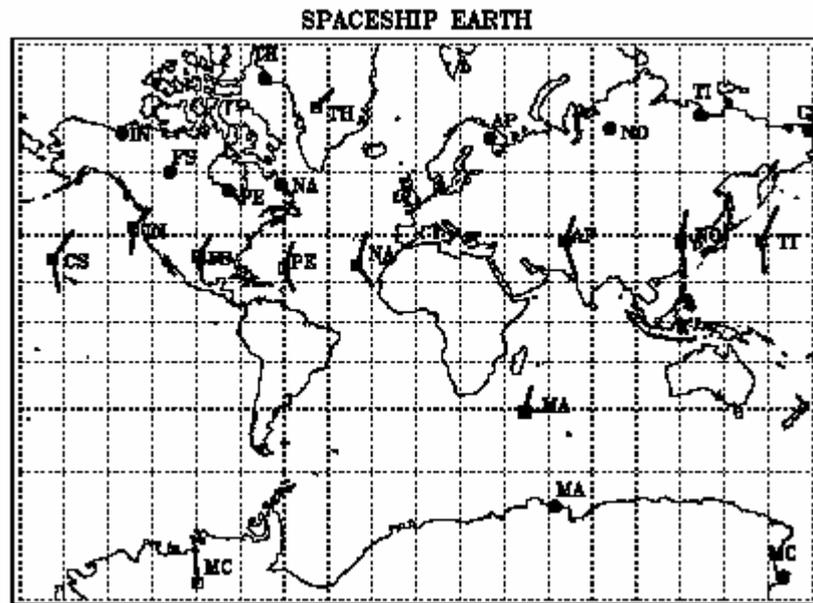


Figura 2.29 - *Spaceship Earth* é uma rede de detecção de nêutrons com 11 estações em 4 continentes, otimizada para fazer medições contínuas da anisotropia tridimensional de raios cósmicos. O nome *Spaceship Earth* representa o âmbito multi-nacional do projeto, bem como a semelhança da estratégia de medida empregada em detectores de fluxo de partículas espaciais. Aqui estão mostradas as localizações geográficas das estações como círculos sólidos. Retângulos abertos mostram as direções de visão das partículas de 10 GV, e as linhas através dos retângulos englobam rigidezes de 5 a 20 GV. Estas são consideradas rigidezes representativas para estudar decréscimos de Forbush. As 11 estações da rede são: Inuvik (IN), Fort Smith (FS), Peawanuck (PE), Nain (NA), Apatity (AP), Norilsk (NO), Tixie Bay (TI), Cape Schmidt (CS), McMurdo (MC), Mawson (MA), and Thule (TH). A rede foi completada em novembro de 2000 com a estação em Nain, Labrador [Fonte: Munakata et al.].

A próxima seção apresenta informações acerca das anisotropias precursoras observadas na região a frente das ondas de choque, com especial atenção para a anisotropia do cone de perdas, que nos consideramos a mais promissora para ser usada na previsão do Clima Espacial. Seguindo isto, uma seção sobre a anisotropia $\mathbf{BX}\nabla\mathbf{n}$, usada para especificar a estrutura de larga escala e a orientação dos distúrbios que estão passando pela Terra, e sobre a utilização dos fluxos bidirecionais de raios cósmicos como um traçador da topologia das linhas de campo.

Possible Muon Detector Network

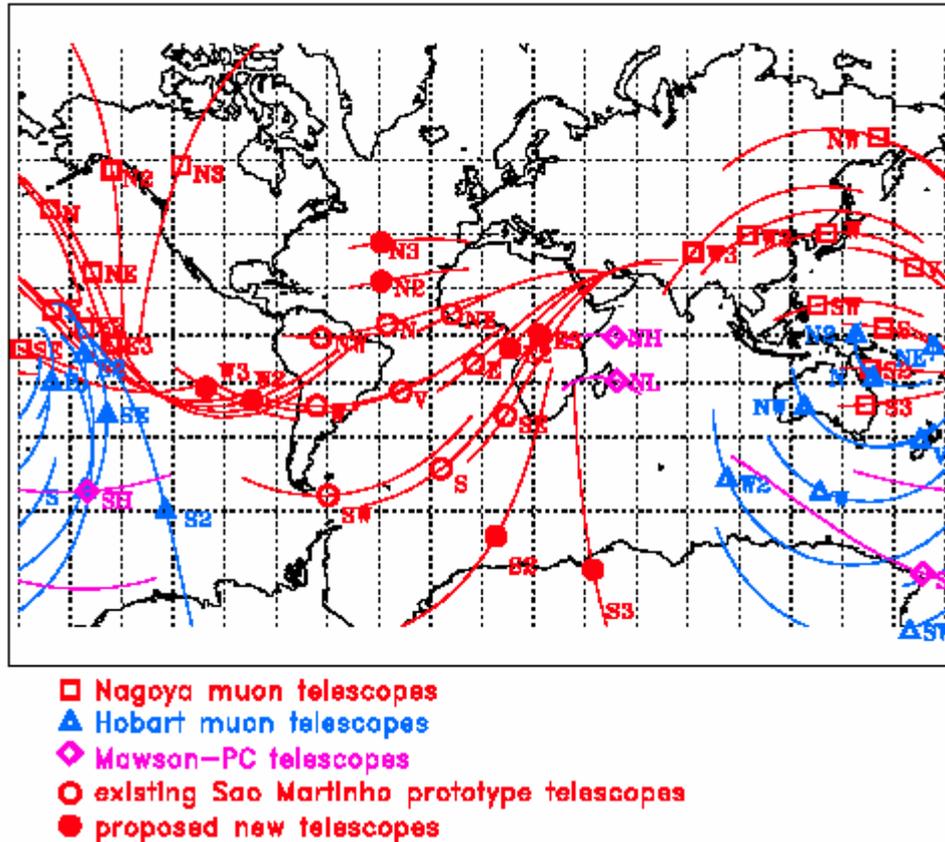


Figura 2.30 - Proposta da expansão da Rede de Detetores de Muons. Utilizando telescópios inclinados, um detetor de muons pode observar direções múltiplas no espaço em uma única posição. Nesta proposta, um protótipo de detetor de muons 2X2 localizado em São Martinho da Serra, Brasil (DA SILVA et al. 2004), seria expandido para um detetor 6X6. São Martinho da Serra foi escolhida porque está aproximadamente antípoda ao grande detetor de Nagaya, Japão. Na figura, os símbolos mostram as direções médias de visão para diferentes telescópios inclinados, e as linhas através dos símbolos englobam 80% da resposta de energia do detetor. Com a expansão proposta, novas direções de visão (círculos sólidos) seriam adicionadas, e a taxa de contagens de todos os telescópios de São Martinho seria incrementada dramaticamente [Fonte: Munakata et al. 2000].

2.6.2 – ANISOTROPIA PRECURSORA DO CONE DE PERDAS

Enquanto a relação entre Ejeções Coronais de Massa (CME) e decréscimos Forbush de raios cósmicos está bem estabelecida (Cane 1993; Cane et al. 1994; 1996), é menos reconhecido que decréscimos de raios cósmicos são frequentemente acompanhados por fortes crescimentos da sua anisotropia (Lockwood 1971; Duggal & Pomerantz 1976; Nagashima & Fujimoto 1993), alguns dos quais se estendem a regiões à frente das ondas de choque que está se aproximando. Tais anisotropias precursoras fornecem um mecanismo chave através do qual informação acerca da presença de um distúrbio pode ser transportada para localidades remotas. Devido ao fato de raios

cósmicos serem rápidos e possuírem grande livre caminho médio no Vento Solar, esta informação é transportada rapidamente sendo útil para a previsão do Clima Espacial.

Anisotropias precursoras têm sido geralmente interpretadas como sendo efeitos cinéticos relacionados à interação dos raios cósmicos ambientes com uma onda de choque se aproximando (Nagashima et al. 1994; Morishita et al. 1997; Bieber & Evenson 1998; Ruffolo et al. 1999; Belov et al. 2001). Decréscimos precursores podem ser resultados de um efeitos de “cone de perdas”, no qual a estação esta magneticamente conectada à região de decréscimo de raios cósmicos à frente da onda de choque. Aumentos precursores podem ser resultados de partículas que receberam uma pequena injeção de energia por reflexão na onda de choque que está se aproximando (Dorman et al. 1995). Aqui nós iremos nos ater ao cone de perdas precursor, por apresentar uma base teórica forte (Ruffolo et al. 1999) e também por ser o precursor mais confiável.

O potencial de contribuição dos detetores de neutrons para a previsão do Clima Espacial também é indicado por resultados estatísticos de Kudela et al. (1995; 1997), que encontrou correlações de 40% entre flutuações nos raios cósmicos registradas por monitores de neutrons e o valor do índice Dst medido ~10 horas mais tarde. A origem deste efeito poderia ser a anisotropia precursora, porque a anisotropia se manifesta através de um aumento da variabilidade nos dados de uma estação isolada.

Um exemplo de um precursor de cone de perdas observado antes de um distúrbio geomagnético intenso está mostrado na Figura 2.31 (Munakata et al. 2000). Aproximadamente 8 horas antes do início súbito da tempestade, um cone de perdas está claramente presente nas observações feitas pelos detetores de muons. Isto pode ser visto no painel central onde os telescópios de muons observando ao longo do campo magnético (0° ângulo de *pitch*) detectam uma forte supressão da intensidade dos raios cósmicos (círculos sólidos) relativa a média omnidirecional. A explicação é que raios cósmicos vindos desta direção escaparam da região de depressão de raios cósmicos a frente da onda de choque (região de decrescimento de Forbush), e eles exibem a característica de mais baixa intensidade de sua origem. Isto parece intuitivamente razoável baseado na conservação da densidade do espaço de fase, mas é também confirmado em simulações teóricas que incluem efeitos do espalhamento do ângulo de *pitch* e focagem adiabática (Ruffolo et al. 1999).

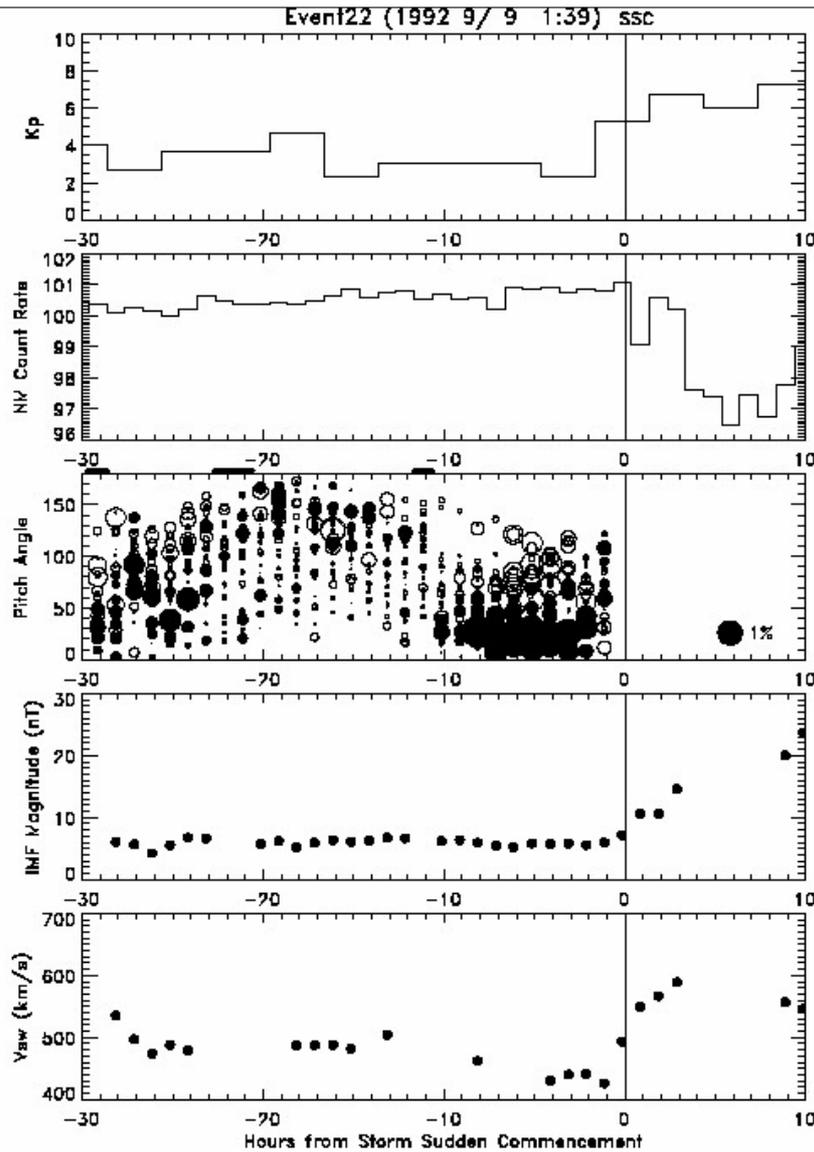


Figura 2.31 - Os detectores de Muons observam claramente um cone de perdas 8 horas antes do grande distúrbio geomagnético de 9 de setembro de 1992. São mostrados, em função do tempo, a partir do Começo Súbito da Tempestade (“*Storm Sudden Commencement*” – SSC): o índice Kp, a taxa de contagens relativas do monitor de nêutrons de McMurdo de hora em hora, a distribuição do ângulo de pitch medida pela rede de detectores de muons (formato explicado abaixo), magnitude do campo magnético de hora em hora, e velocidade do Vento Solar de hora em hora. No gráfico central, cada círculo representa uma medida horária de um único telescópio de muons, plotado para um tempo apropriado (abscissa) e ângulo de pitch (ordenada) para a direção de visão do telescópio. O ângulo de pitch é definido em relação à direção do campo magnético, 0° corresponde a um telescópio vindo na direção ao longo do campo. Os círculos sólidos e abertos representam, respectivamente, um excesso ou deficiência na intensidade relativa dos raios cósmicos para a média unidirecional, e o diâmetro de cada círculo é proporcional à magnitude de deficiência ou excesso (1% escala mostrada no lado direito do gráfico). **Os círculos sólidos próximos ao ângulo de pitch de 0° durante 8 horas antes do SSC, indicam uma deficiência dos raios cósmicos que**

estão chegando através da direção do campo solar – Uma assinatura clássica de um cone de perda. [Fonte: Munakata et al. 2000).

Para determinar quão frequentemente anisotropias de cones de perda podem ser observadas na frente de um distúrbio que está se aproximando, estudos têm sido feitos com detectores de muons (Munakata et al. 2000) e com monitores de neutrons (Belov et al. 2001). A Figura 2.32 mostra resultados destes dois estudos. Cada histograma mostra o tempo inicial do precursor relativo ao início súbito da tempestade (SSC) associada com o Choque da CME. O histograma superior é para as 14 tempestades mais intensas examinadas com o monitor de neutrons (Belov et al. 2001). Estas tempestades intensas são as catalogadas por Gosling et al. (1990) com pico do índice Kp igual a 8 ou superior. O histograma inferior são as 22 tempestades magnéticas intensas examinadas com os detectores de muons (Munakata et al. 2000). Uma tempestade intensa é definida quando o pico do índice Kp é 7 ou maior.

Os precursores marcados com “LC” nos histogramas são aqueles que mostram características claras de um cone de perdas, com supressão de intensidade alinhada a direção do campo magnético. Os precursores marcados com “EV” são semelhantes aos primeiros, porém não claramente perpendiculares à direção do campo magnético. Possivelmente estes são cones de perda observados em situações em que o campo magnético local medido não é representativo do campo magnético de larga escala amostrado pelas partículas. Como estas partículas têm raio de Larmor de ~0,02 a 0,1 UA, é plausível que o campo local no ponto de observação possa desviar-se substancialmente da média do campo na órbita da partícula. Alternativamente, alguns precursores EV podem representar anisotropias que não são alinhadas ao campo magnético, tais como a anisotropia da deriva $\mathbf{B} \times \nabla n$ (Bieber & Evenson 1998).

A Figura 2.32 mostra, primeiramente, que os precursores acompanham a maioria das Tempestades Magnéticas Intensas. Os detectores de muons observaram precursores em 15 das 22 tempestades intensas (68%), enquanto que os detectores de neutrons observaram precursores em 11 das 14 tempestades intensas (79%). Conforme discutido por Munakata et al. (2000), se nos atermos apenas às tempestades mais intensas (pico do Kp 8 ou maior), a proporção de precursores identificados aumentará para 8 em 9 (89%).

A Figura 2.32 também mostra que o instante inicial dos precursores relativo aos respectivos SSC é tipicamente de varias horas e pode chegar a 12 horas. Este tempo é suficiente para ser usado para previsão do Clima Espacial, uma vez que o alerta é substancialmente mais avançado que o tempo de ½ a 1 hora atualmente fornecido pelos satélites localizados no ponto Lagrangeano.

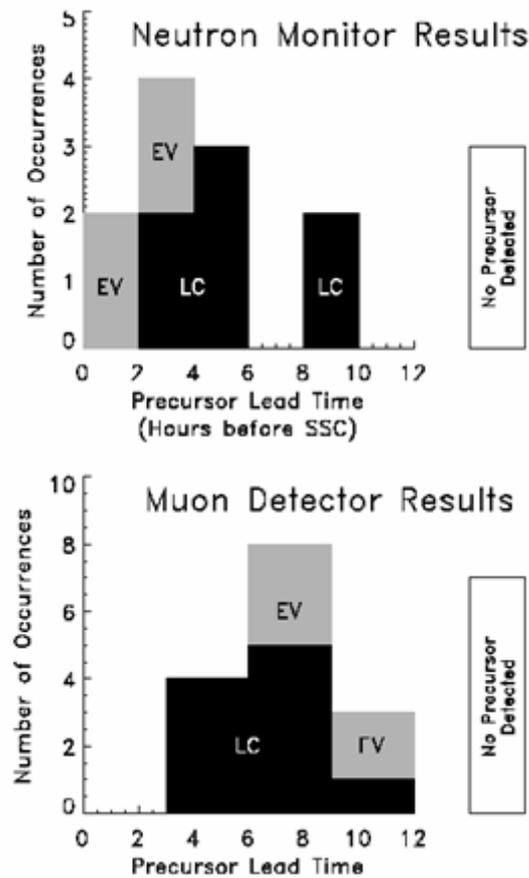


Figura 2.32 - Os cones de perda precusores são realmente observados durante o avanço de um grande distúrbio geomagnético. “Lead time” é o tempo entre a primeira detecção do precursor e a ocorrência do Começo Súbito da Tempestade (SSC), que é tipicamente 4 horas para um detector de nêutrons e 8 horas para um detector de muons. O histograma de cima (Belov et al. 2001) mostra os resultados de um monitor de nêutrons das 14 “principais” tempestades geomagnéticas (Kp igual ou maior que 8), em que os precusores são observados em 79% do tempo. O histograma de baixo (Munakata et al. 2000) mostra os resultados dos detectores de muons para as 22 “maiores” tempestades (Kp maior ou igual a 7), em que os precusores são observados em 68% do tempo. (A porcentagem sobe para 89% se somente as “principais” tempestades são consideradas.) “LC” e “EV” denotam “cone de perda” e “variação aumentada” precusores (ver texto). [Fonte: Belov et al. 2001 e Munakata et al. 2000].

Finalmente, a Figura 2.32 mostra uma clara diferença entre o instante inicial fornecido pelos detectores de muons e os detectores de nêutrons. Típicos instantes iniciais de 8 horas para os detectores de muons e 4 horas para os detectores de nêutrons. Os instantes iniciais observados estão de acordo com as previsões teóricas (Ruffolo et al. 1999; Leerunnavarat, Ruffolo, & Bieber 2001), os quais indicam que os cones de perdas precusores deveriam decair com a distância do Choque com uma distância de decaimento de cerca de um décimo do livre caminho médio paralelo. Felizmente o livre caminho médio de raios cósmicos relativísticos são muito grandes – segundo nossas estimativas, cerca de 0,5 UA para a energia do monitor de nêutrons (Bieber & Pomerantz 1983; Chen & Bieber 1993) e talvez 1,5 UA para a energia do detector de

muons (Hall, Duldig, & Humble 1997). Estas são ordens de magnitudes corretas para explicar os instantes iniciais mostrados na Figura 2.32.

Resumindo, observações recentes e resultados teóricos mostram que os cones de perdas precursoras estão presentes antes de Tempestades Magnéticas Intensas. Foi proposto por Munakata et al. 2000 a inclusão das observações de cones de perda em um sistema operacional de previsão do Clima Espacial.

2.6.2.1 - ESPECIFICAÇÃO DA ORIENTAÇÃO DA CME E SUA ESTRUTURA

GRADIENTES DE RAIOS CÓSMICOS E ORIENTAÇÃO DE EJEÇÕES SOLARES

Anisotropias de raios cósmicos observadas a frente de uma onda de choque devida à uma CME ou devida a própria CME estão entre as maiores anisotropias discutidas anteriormente. Bieber e Evenson (1998) mostraram que estas anisotropias frontais incluem anisotropias $\mathbf{BX}\nabla\mathbf{n}$ substanciais causadas por gradientes de densidade dos raios cósmicos. Eles mostraram, além disso, que com a anisotropia de raios cósmicos medida pelos monitores de nêutrons e o campo magnético medido *in situ* por satélite, as equações que governam a anisotropia $\mathbf{BX}\nabla\mathbf{n}$ poderiam ser resolvidas para obter os gradientes de raios cósmicos. Devido ao grande raio de Larmor para as energias dos monitores de nêutrons, os gradientes dos raios cósmicos fornecem informações únicas acerca da estrutura de larga escala e da orientação dos ejeções solares (Mais precisamente, o método fornece a parte do vetor de gradiente que é perpendicular ao campo magnético de larga escala. No entanto, isto pode ser uma aproximação do gradiente tridimensional, devido ao fato da difusão de raios cósmicos paralelos ao campo magnético remover eficientemente qualquer gradiente paralelo que seja estabelecido).

Um exemplo de gradientes de raios cósmicos obtidos desta maneira é mostrado na Figura 2.33. O painel superior mostra observações dos monitores de nêutrons da Rede *Spaceship Earth* de um decréscimo de Forbush em abril de 2001. Esta mesma atividade produziu uma tempestade magnética cujo pico do índice Kp foi 7. Linhas estreitas no painel superior são os traços das estações individuais, e as linhas largas são as densidades de raios cósmicos derivadas do ajuste dos dados das estações para uma anisotropia de primeira ordem. A intensidade do campo magnético no satélite ACE e a componente norte-sul são mostradas no segundo painel.

Gradientes de raios cósmicos derivados são mostrados no terceiro (gradientes negativos projetados no plano X-Y) e no quarto painel (gradientes negativos projetados no plano Y-Z). São mostrados os gradientes negativos porque as ejeções solares suprimem os raios cósmicos. Portanto, plotando os gradientes negativos, a seta aponta para o centro do distúrbio solar.

A interpretação dos dados de gradiente X-Y mostrados na Figura 2.33 (terceiro painel) é mais facilmente entendida utilizando o desenho da Figura 2.34. A ejeção que se aproximava estava orientada obliquamente, como mostra a Figura 2.33. Isto foi inferido das setas apontando para 12:00-18:00 UT em 8 de abril. Após a passagem da ejeção, as setas se revertem (-X e -Y) em aproximadamente 06:00 UT em 9 de abril. O comportamento do gradiente é consistente com a queda e aumento da densidade de raios cósmicos (painel superior) e com o indicador de feixe bidirecional que será discutido

abaixo. Além disso, os dados do gradiente X-Y (quarto painel) indicam que o centro dessa ejeção passou ao sul da Terra.

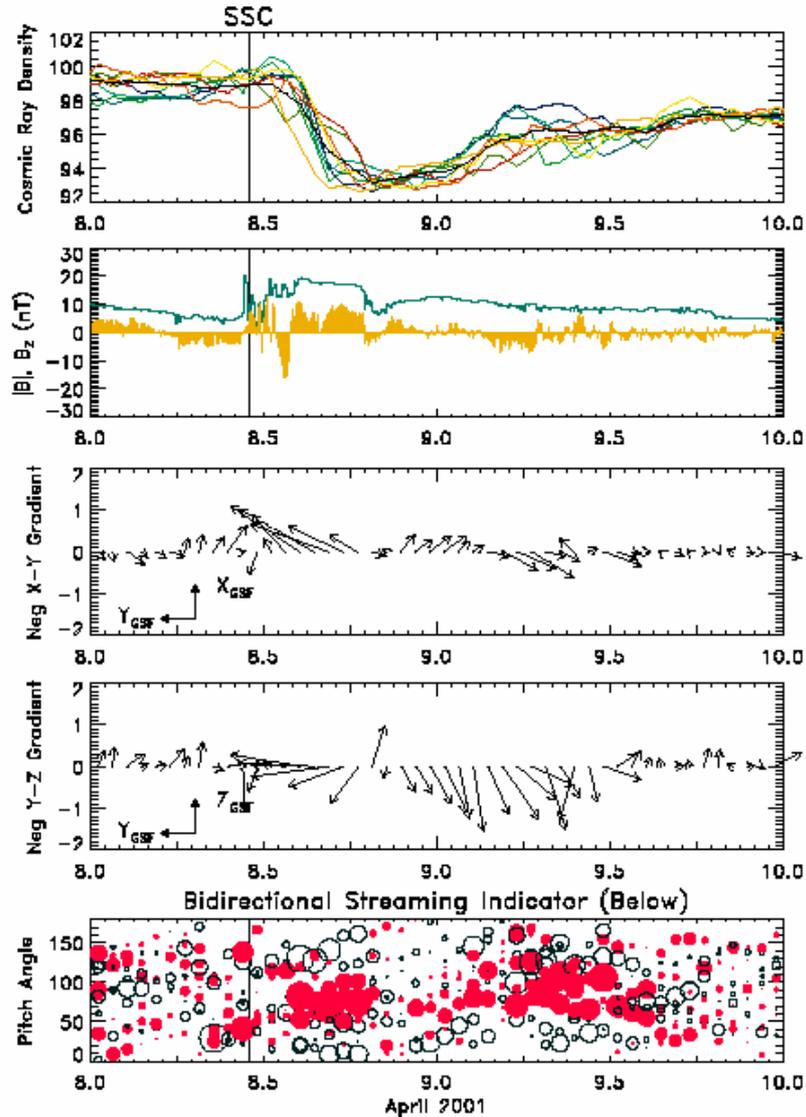


Figura 2.33 - Observações da rede *Spaceship Earth* de um decréscimo de Forbush em Abril 2001. O gráfico do gradiente implica na orientação da ejeção esboçada na Figura 2.34. O último gráfico mostra a intensidade dos raios cósmicos suprimidos próximos ao ângulo de pitch de 90° , indicando um escoamento bidirecional dos raios cósmicos. Estes distúrbios produzem uma grande tempestade com $K_p = 7$. De cima para baixo são mostrados: variação temporal observada pelas estações individuais da *Spaceship Earth* (linhas claras) juntamente com a densidade derivada (linhas fortes), Magnitude e componente Z do campo magnético (GSE) observado pelo satélite ACE, gradiente da densidade dos raios cósmicos no plano x-y (GSE), gradiente da densidade dos raios cósmicos no plano y-z (GSE), e o escoamento bidirecional dos raios cósmicos (ver texto).

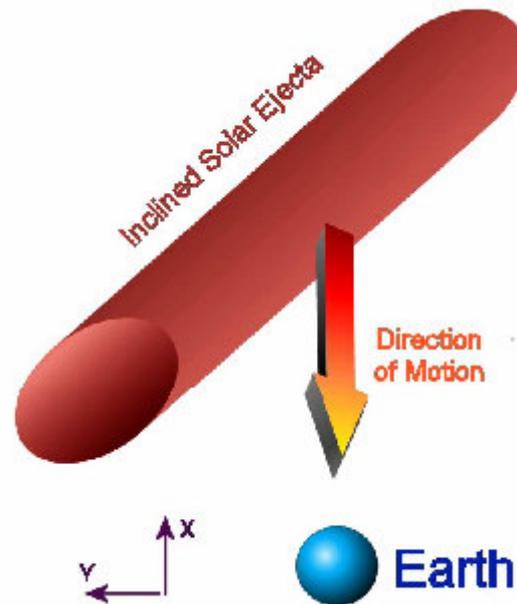


Figura 2.34 - Esboço da orientação da ejeção implicada pela medida do gradiente do *Spaceship Earth* mostrado na Figura 2.33, supondo que os pontos do gradiente estejam na direção para fora dos eixos da ejeção.

FEIXES BIDIRECIONAIS DE RAIOS CÓSMICOS

Trabalhos recentes (Richardson et al. 2000) mostram que raios cósmicos >1 GeV dentro de ejeções às vezes apresentam distribuições angulares bidirecionais remanescentes dos íons e elétrons de baixas energias (Gosling et al. 1990). Uma inspeção em tempestades magnéticas intensas (Bieber et al. 1999) determinou que feixes bidirecionais de raios cósmicos ocorrem na maioria (10 de 14) dos eventos mais intensos, e são menos frequentes em eventos menos intensos (Richardson et al. 2001).

Um exemplo de feixe bidirecional aparece no painel inferior da Figura 2.33. O gráfico está feito de maneira semelhante ao do painel central da Figura 2.31, exceto que este apresenta o ajuste de primeira ordem da anisotropia subtraído dos dados das estações individuais, estando os resíduos apresentados na figura. Este método realça as anisotropias de ordem superior tais como os feixes bidirecionais.

O feixe bidirecional é evidenciado pela observação de redução da intensidade de raios cósmicos nas estações (círculos sólidos) próximas a 90° de ângulo de pitch, com intensidade maior (círculos abertos) próxima a 0° e 180° de ângulo de pitch. O feixe bidirecional é também evidente no painel superior como sendo um aumento do espalhamento dos traços das várias estações.

RAIOS CÓSMICOS PODEM PREVER BZ?

A resposta para esta questão não é conhecida até o momento. Nos sabemos que a princípio deveria ser possível prever \mathbf{B} usando a anisotropia de gradiente ($\mathbf{B}\times\nabla n$), a qual fornece a relação entre o vetor de anisotropia de raios cósmicos, o vetor de gradiente de raios cósmicos e o vetor campo magnético. Se quaisquer dois destes vetores são conhecidos, o terceiro pode ser determinado. Este é o método utilizado acima para obter o gradiente a partir das medidas da anisotropia e do campo.

Suponha no entanto que nós tivéssemos um conhecimento *a priori* do gradiente dos raios cósmicos bem como uma medida da anisotropia. A equação $\mathbf{B} \times \nabla n$ poderia então ser invertida para obter \mathbf{B} , e isto forneceria a média de \mathbf{B} sobre uma região que se estende desde 1 raio de Larmor a frente da terra até um raio de Larmor atrás da Terra. Se o campo atrás da Terra for conhecido a partir de observações *in situ*, as medidas de Raios cósmicos então fornecerão informação (desconhecida) acerca do campo na parte frontal. Com as medidas do detector de muons, os raios de Larmor são suficientemente grandes (0,1 UA para um campo de 10nT) para proporcionarem uma previsão de 5-10 horas da direção do campo. Isto parece um pouco trabalhoso, mas trabalhos anteriores (Mori & Nagashima 1979) mostraram que a polaridade do Campo Magnético Interplanetário pode ser determinada com grande êxito (~76% de correlação) a partir de medidas de detectores de muons.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

O presente Capítulo têm como objetivo apresentar a Metodologia e instrumentação utilizada para a análise dos eventos do Meio Interplanetário e o estudo das estruturas interplanetárias responsáveis pelas Tempestades Geomagnéticas Intensas ($Dst < -100$ nT) ocorridas no período de 2002 a 2003. Estes eventos foram analisados através de observações do índice Dst disponíveis no sítio da Universidade de Kyoto, Japão, que mede a intensidade da corrente de anel magnetosférica (Mendes Jr. 1992), para identificar as tempestades mais intensas.

Em seguida foram utilizados dados de observações do Meio Interplanetário, preferencialmente do satélite ACE, disponíveis no sistema CDA - *Coordinate data análise* - do programa ISTP - *International Solar-Terrestrial physics* -. Para isso utilizou-se o software MATLAB - Matrix Laboratory -, disponível no CRSPE/INPE-MCT. Para analisar as anisotropias precursoras das Tempestades Geomagnéticas foram utilizados raios cósmicos observados através da Rede Internacional de Detectores de Muons, estudadas por Munakata et al., 2000. Os resultados mostram que através das observações das anisotropias de Muons é possível verificar com até 6 a 9 horas antes a chegada de tempestades. A Rede Internacional de Detectores de Muons é uma das mais importantes ferramentas na previsão do Clima Espacial considerando que os satélites permitem o alerta da chegada das estruturas interplanetárias com poucas horas de antecedência.

3.1 – METODOLOGIA

Para a análise dos dados, primeiramente o aluno utilizou observações de índice Dst disponíveis no sítio da Universidade de Kyoto (Japão), que mede a intensidade da corrente de anel magnetosférica (Mendes Jr. 1992), para identificar as Tempestades Geomagnéticas mais intensas ocorridas ($Dst < -100$ nT) no período de 2002 a 2003. A Tabela 3.1 mostra as Tempestades Geomagnéticas Intensas ocorridas no período de 2002 a 2003.

Tabela 3.1 – Tempestades Geomagnéticas Intensas no período de 2002 a 2003.

Data	Dst Máximo	Dados de satélite	Dados de muons
24/03/2002	- 100 nT	Sim	Sim
17/04/2002	- 127 nT	Sim	Sim
19/04/2002	- 149 nT	Sim	Sim
11/05/2002	- 110 nT	Sim	Sim
23/05/2002	- 109 nT	Sim	Sim
02/08/2002	- 102 nT	Sim	Sim
21/08/2002	- 106 nT	Sim	Sim
04/09/2002	- 109 nT	Sim	Não
07/09/2002	- 181 nT	Sim	Não
01/10/2002	- 176 nT	Sim	Sim
03/10/2002	- 146 nT	Sim	Sim
07/10/2002	- 115 nT	Sim	Não

14/10/2002	- 100 nT	Sim	Sim
21/11/2002	- 128 nT	Sim	Não
29/05/2003	- 131 nT	Sim	Não
18/06/2003	- 145 nT	Sim	Não
12/07/2003	- 118 nT	Sim	Sim
16/07/2003	- 117 nT	Sim	Não
18/08/2003	- 168 nT	Sim	Sim
29/10/2003	- 363 nT	Sim	Sim
30/10/2003	- 401 nT	Sim	Sim
20/11/2003	- 472 nT	Sim	Sim

Em seguida utilizaram-se os dados de observações do Meio Interplanetário, preferencialmente do satélite ACE, disponíveis no sistema CDA do ISTP, para identificar as estruturas interplanetárias relacionadas a estas tempestades intensas.

Logo após, utilizamos dados do Detector de Muons do Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, para a identificação do decréscimo de **Forbush** (menor intensidade de raios cósmicos) e possíveis indícios de **anisotropias precursoras** de estruturas solares que podem causar Tempestades Geomagnéticas.

3.2 – INSTRUMENTAÇÃO

3.2.1 – MAGNETÔMETROS

A atividade magnética na superfície terrestre é produzida pela atividade solar, através das correntes elétricas existentes na magnetosfera e ionosfera, devido a interação do Vento Solar com o campo magnético terrestre. Medidas magnéticas em várias partes do globo, provêm um meio de monitorar remotamente estas correntes e registrar como elas variam com o tempo. Nos dois últimos séculos, uma grande rede de observatórios magnéticos permanentes foi estabelecida. Os dados destes observatórios e de estações temporárias são freqüentemente utilizados para estudar os fenômenos magnéticos, juntamente com observações in situ feitas por satélites. A interpretação dos magnetogramas originais requer experiência e é essencial acumular dados de várias estações para um estudo. Para simplificar a análise, várias organizações internacionais criaram índices da atividade magnética. Estes índices são fáceis de serem gerados e eles variam monotonicamente com alguma quantidade física significativa, como a corrente total fluindo no sistema, por exemplo. Os índices mais comuns e mais utilizados nos dias de hoje são Kp, ap, AE e Dst.

Muitos sistemas de correntes responsáveis pela atividade magnética têm sido identificados e estudados. A Figura 3.1 sumariza estas correntes de uma maneira esquemática. Esta Figura inclui vários sistemas de correntes como a corrente da magnetopausa ou corrente Chapman-Ferraro, a corrente da cauda e a corrente de anel. Outras correntes adicionais são ilustradas, como a corrente de anel parcial que é ligada com as correntes alinhadas ao campo magnético, as correntes de subtempestades que também estão ligadas à ionosfera através das correntes alinhadas ao campo magnético. A porção ionosférica deste sistema de correntes flui em canais de alta condutividade em altas latitudes, sendo chamado de eletrojato auroral. As correntes alinhadas ao campo magnético localizadas próximo ao amanhecer e entardecer são ilustradas na figura 3.1 como corrente da região 1 e corrente da região 2. Em altas latitudes a corrente da região

1 flui na ionosfera do amanhecer para o entardecer e em latitudes menores a corrente da região 2 flui com polaridade oposta.

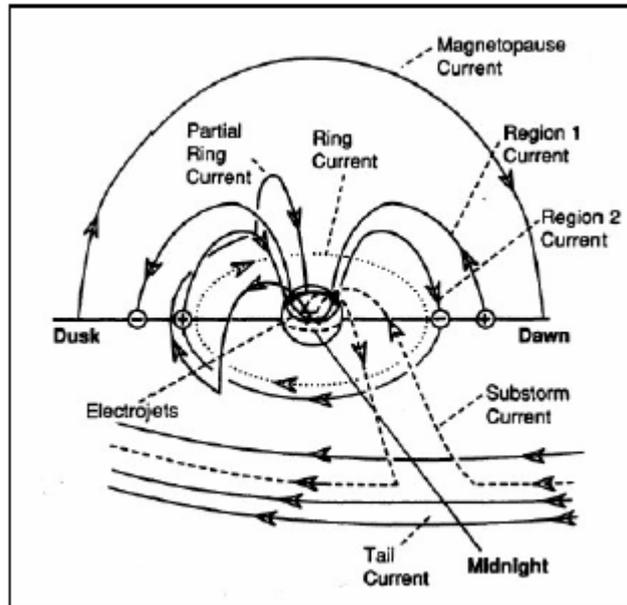


Figura 3.1 – Representação esquemática dos vários sistemas de correntes ligando a magnetosfera e a ionosfera [Fonte: Kivelson e Russel, 1995].

Os magnetogramas utilizados para o cálculo dos índices geomagnéticos são registrados em três componentes no sistema de coordenadas ilustrado na Figura 3.2. $\mathbf{B}(F)$ é o vetor campo magnético calculado no ponto F, X, Y e Z são as componentes cartesianas do campo, medidas em relação ao sistema de coordenadas geográficas sendo X apontando para o Norte, Y apontando para Leste e Z apontando para o centro da Terra. O vetor campo magnético \mathbf{B} projetado no plano horizontal é chamado H (componente horizontal do campo). Esta projeção faz um ângulo D (declinação) com o eixo X, sendo este positivo do Norte para o Leste. O ângulo “dip” I (inclinação) é o ângulo que o vetor campo total faz em relação ao plano horizontal e é positivo para vetores abaixo do plano.

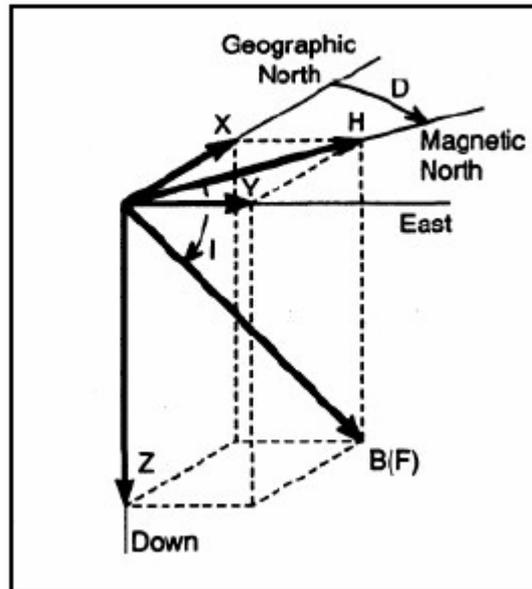


Figura 3.2 – Componentes do campo geomagnético medido em dois sistemas de coordenadas diferentes [Fonte: Kivelson e Russel, 1995].

Os magnetogramas, registros temporais gráficos da intensidade do campo magnético na superfície da Terra, mostram uma diminuição global na componente horizontal do campo magnético em latitudes média e baixa, caracterizando as Tempestades Geomagnéticas. Essas observações experimentais feitas na superfície da Terra são feitas através de magnetômetros.

O índice utilizado neste trabalho para identificar as Tempestades Geomagnéticas é o Dst. O índice Dst é obtido, de hora em hora, a partir da média dos dados de estações próximas ao equador (Figura 3.3), situadas a uma distância em que as variações magnéticas causadas pelo eletrojato equatorial da região E não sejam importantes. Em tais latitudes, as perturbações da componente horizontal do campo geomagnético, H, são dominadas pela intensidade da corrente de anel magnetosférica. A Tabela 3.2 apresenta as coordenadas geomagnéticas e geográficas de localização das estações.

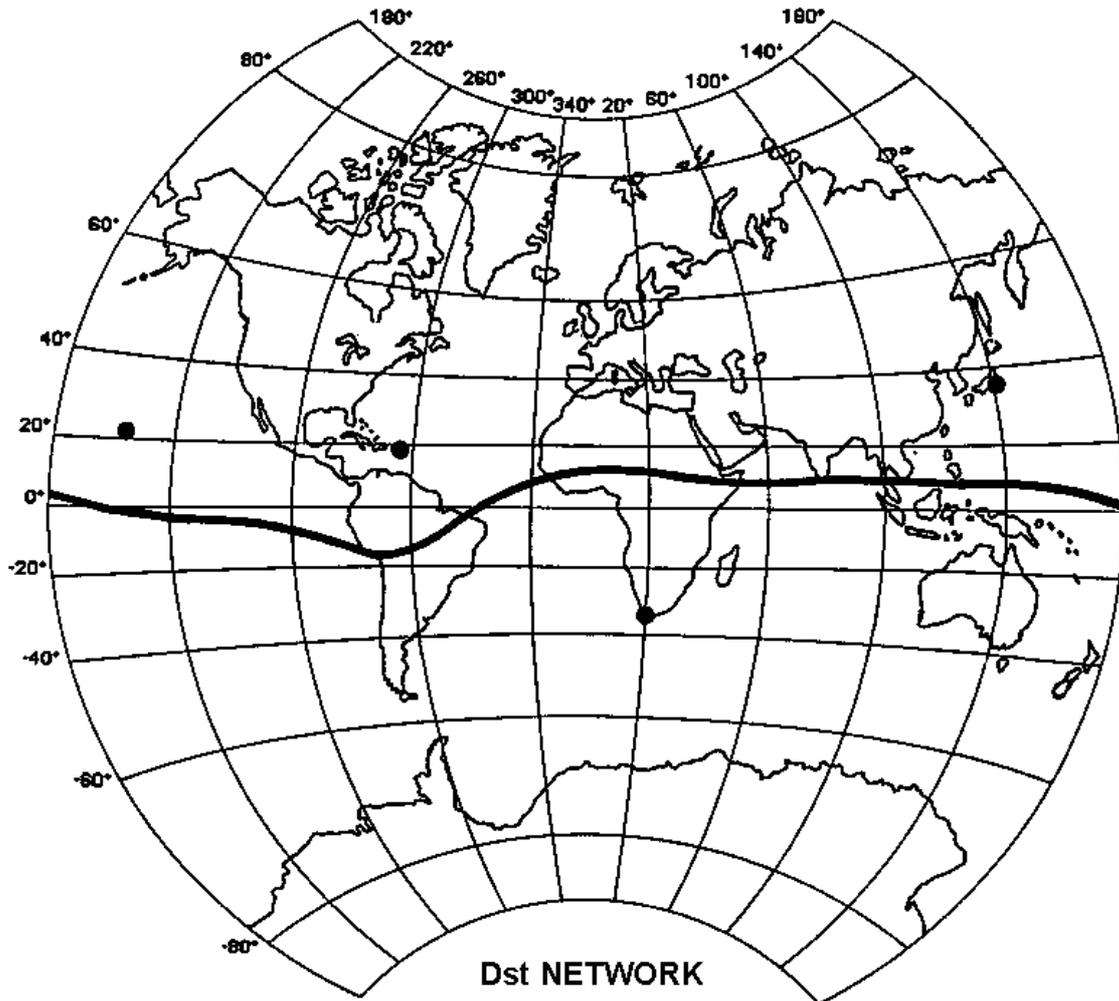


Figura 3.3 – Posições das estações de medida do campo magnético na superfície terrestre utilizadas no calculo do índice Dst [Fonte: <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst2/onDstindex.html>].

Tabela 3.2 – Estações de medidas do campo magnético utilizadas no calculo do índice Dst.

ESTAÇÃO	Coorden. Geomagn.		Coorden. Geograf	
	Latitude	Longitude (E)	Latitude	Longitude (E)
Hermanus	S 33,3°	80,3°	S 34°25'	19°13'
Kakioka	N 26,0°	206,0°	N 36°14'	140°111
Honolulu	N 21,0°	266,4°	N 21°18'	201°54'
San Juan	N 29,9°	3,2°	N 18°23'	293°53'

A corrente de anel é um sistema de correntes que circula a Terra no plano equatorial e é gerada pela deriva longitudinal de partículas energéticas (de 10 a 200 keV) carregadas, aprisionadas no campo magnético terrestre a uma distância entre 2 e 7 RT. Durante uma Tempestade Magnética, o fluxo de partículas da corrente de anel é dramaticamente aumentado. A formação da corrente de anel durante uma tempestade tem sido atribuída a dois diferentes processos: (1) a injeção de plasma para dentro da magnetosfera interna durante a fase de expansão de uma subtempestade magnetosférica e (2) aumento do transporte convectivo de partículas vindas da lâmina de plasma do

lado noturno para dentro da magnetosfera interna, como um resultado de uma intensificação do campo elétrico de convecção amanhecer-entardecer da Terra durante longos períodos de intenso Campo Magnético Interplanetário na direção Sul (reconexão magnética).

O índice Dst é uma média, de hora em hora, da medida direta dessas perturbações. Tomando a superposição dos dados de todas as estações, a diferença entre os maiores e menores valores corresponde ao índice DS, que mede a assimetria da corrente de anel. As variações negativas muito grandes indicam um aumento da intensidade da corrente de anel, pois a corrente gera um campo magnético oposto ao campo geomagnético, diminuindo seu valor original. Essas perturbações duram em torno de uma hora, e caracterizam a fase principal de uma Tempestade Geomagnética. A faixa de observação do índice Dst é de 100 nT até -600 nT. Condições não perturbadas são representadas por um índice Dst de 0, mas isto não é o que realmente ocorre, pois a corrente de anel não desaparece, ela existe sempre, mas com uma intensidade muito menor que durante uma Tempestade Magnética.

As variações do índice Dst de uma grande Tempestade Magnética medida no período de Novembro de 2001 retirado do sitio da universidade de Kioto está ilustrada na Figura 3.4.

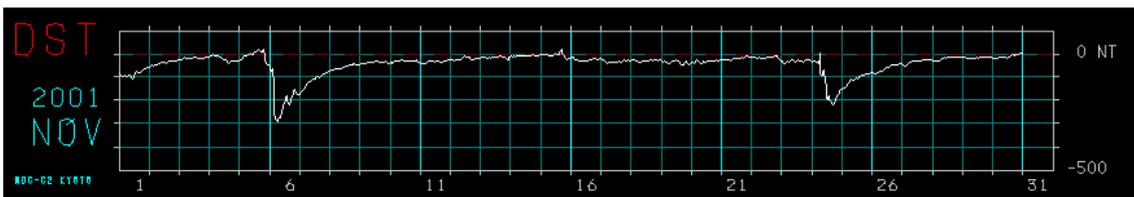


Figura 3.4 – Valores horários do índice Dst para Tempestades Magnéticas ocorridas em Novembro de 2001 [Fonte: <http://swdcd.db.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/dst1/f/dstfinal2001>].

3.2.2 – OS SATÉLITES - DESCRIÇÃO DOS DADOS DE PLASMA E CAMPO MAGNÉTICO INTERPLANETÁRIO PARA OS EVENTOS DE TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

Os dados de plasma – velocidade do Vento Solar, temperatura e densidade de prótons, etc – e Campo Magnético Interplanetário – componentes – foram obtidos via Internet – Sistema CDA – a partir dos instrumentos a bordo do satélite ACE (*Advanced Composition Explorer*). Através desse Sistema é possível obter arquivos de dados com os parâmetros escolhidos de acordo com o interesse de cada usuário.

O satélite ACE orbita o ponto Lagrangeano L1, o qual é definido como um ponto de equilíbrio gravitacional no caminho Sol-Terra e está localizado a aproximadamente 1,5 milhões de quilômetros da Terra e aproximadamente 148,5 milhões de quilômetros do Sol (Ver Figura 3.5). Com um semi-eixo de aproximadamente 200,000 km, a órbita elíptica coloca o ACE a uma visão primária do Sol e regiões galácticas. Alguns dos instrumentos a bordo do satélite são: Espectrômetro de Raios Cômicos, Espectrômetro Solar, Espectrômetro Ultra de Baixas Energias, Analisador de Partículas Energéticas Solares (Íons carregados), espectrômetro de Vento Solar (Massa e composição iônica), Monitor de Prótons, Elétrons e partículas Alfa, Magnetômetro.

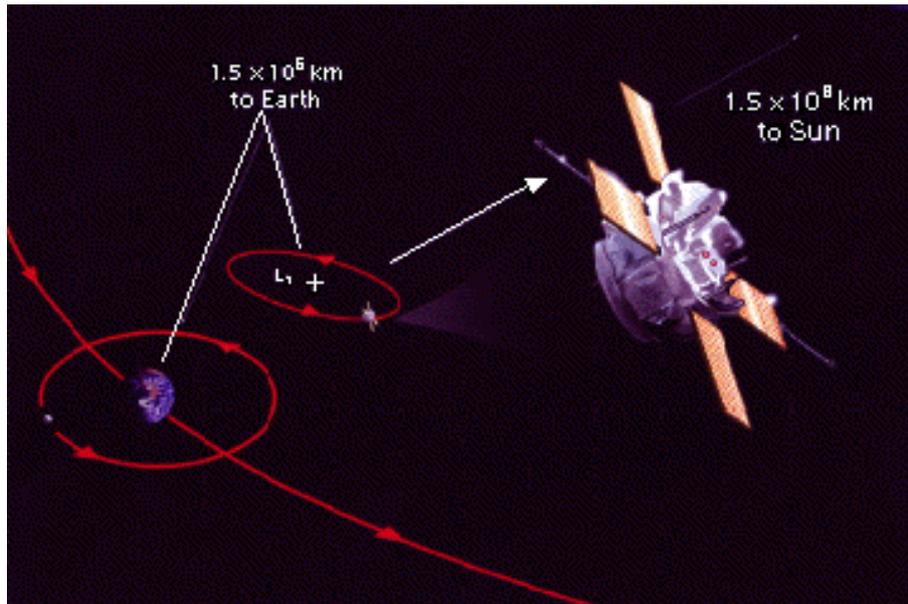


Figura 3.5 – Ilustração da localização do satélite ACE/NASA no ponto Lagrangeano L1 [Fonte: http://www.srl.caltech.edu/ACE/ace_mission.html]

Para a visualização e posterior análise dos parâmetros interplanetários provenientes dos satélites foi necessária uma familiarização com a linguagem de programação. Foi desenvolvido um programa que providência a leitura de arquivos de dados e posteriormente gera um arquivo reduzido. A partir destes arquivos reduzidos é possível a plotagem e manipulação dos dados utilizando rotinas disponíveis.

Este programa além de ter facilitado o desenvolvimento desta análise, e propiciado um importante contato com uma linguagem de programação, poderá ser utilizado futuramente na realização de outros estudos, bem como por diferentes usuários ou outros dados cujos arquivos sejam semelhantes ao arquivo de dados dos satélites.

Medidas dos parâmetros de plasma e campo magnético são feitos por vários satélites no Meio Interplanetário, situados desde 0,3 UA até dezenas de unidades astronômicas. Os parâmetros físicos que caracterizam uma Tempestade Geomagnética podem ser vistos na forma de diagramas, no exemplo obtido pelo satélite ACE em 6 de Abril de 2000, na Figura 3.6.

A Figura 3.6 mostra um evento causado por uma onda de choque “S”, observada pelo satélite ACE às 16:02 UT. Na Figura 3.6, de cima para baixo, a intensidade do campo magnético interplanetário observado em L1, juntamente com suas 3 componentes, Bz, By e Bx, a velocidade, a densidade numérica e a temperatura dos prótons no mesmo ponto L1, e o índice de atividade da corrente de anel magnetosférica Dst, para o período de 5 à 10 de Abril de 2000, o pico negativo do índice Dst chegou a –321 nT. A assinatura deste evento da-se a partir dos parâmetros observados pelos como, aumento súbito do Campo Magnético Interplanetário, aumento da temperatura de prótons e aumento na velocidade do Vento Solar.

Uma enorme compressão do campo magnético ocorre devido a esta onda de choque, passando de valores ~7 nT antes do choque, para valores superiores a 25 nT após o choque, compressão esta permanecendo por um período de aproximadamente 18 h. Logo após o choque, o campo está fortemente direcionado para o sul, permanecendo assim por um tempo aproximado de 10 h. Neste mesmo período, a velocidade de prótons era pouco inferior a 600 km/s. Esta combinação de fatores fez com que o pico negativo do índice Dst atingisse o valor –321 nT.

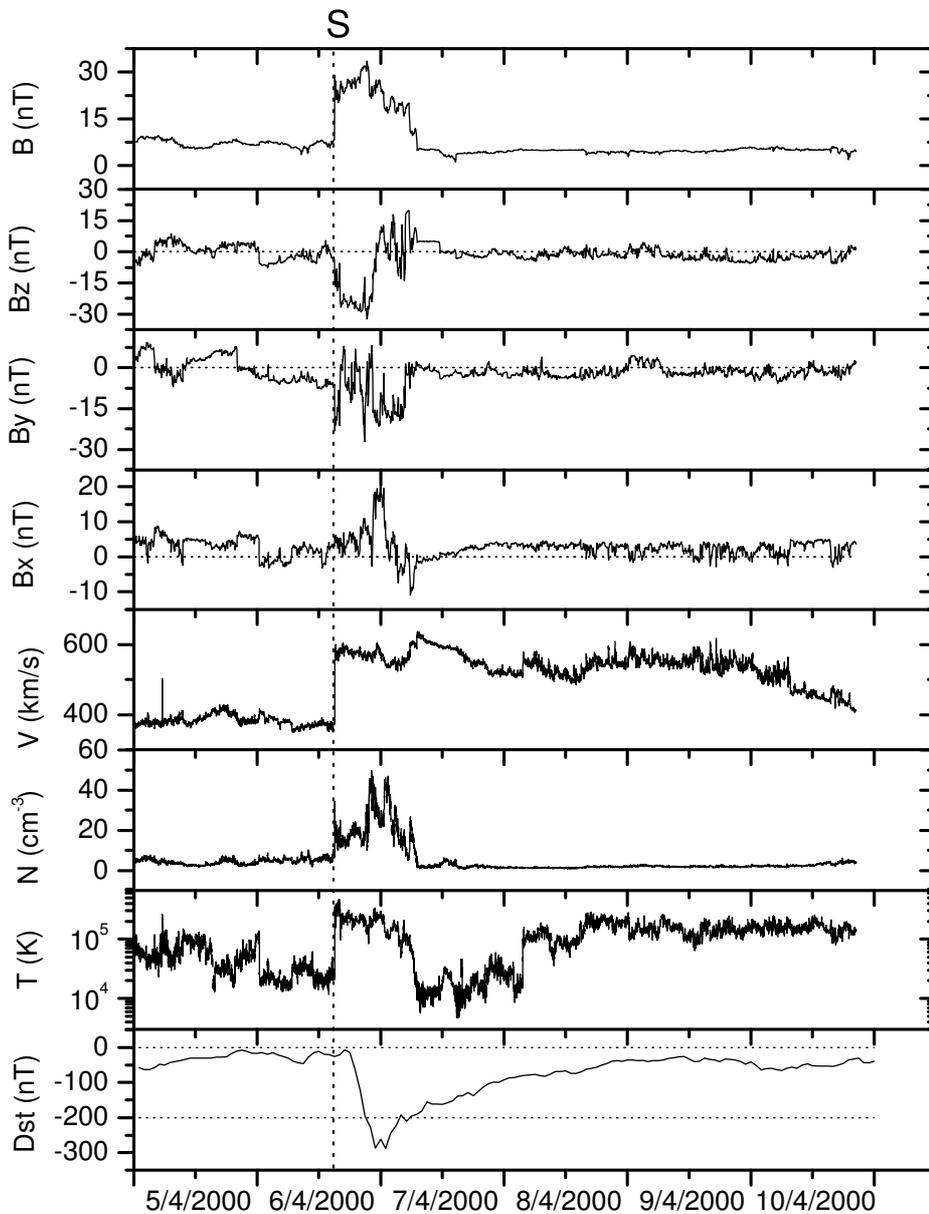


Figura 3.6 – Parâmetros, de cima para baixo: campo magnético total e suas 3 componentes, velocidade, densidade e temperatura de prótons, e índice Dst. Fonte: tese de Doutorado em Geofísica Espacial; Estudo de estruturas MHD geofetivas no meio interplanetário e suas origens solares, Ano de obtenção: 2003; Alisson Dal Lago, Cortesia de N. Ness, Bartol Research Institute, D. J. McComas, SWRI e CDAWeb, e WDC-Kyoto.

3.2.3 – REDE INTERNACIONAL DE DETECTORES DE MUONS

Como no capítulo 2 já foi discutido a fenomenologia utilizada para a previsão do Clima Espacial utilizando raios cósmicos, vamos agora discutir os detectores em si entre eles o detector localizado em São Martinho da Serra que foi utilizado para este trabalho.

A rede Internacional de Detectores de Muons apresentava uma falha que demonstrava a necessidade de um novo detector de muons para preencher a faha existente sobre o Atlantico e a Europa, e também a posterior cobertura após a expansão da rede de telescópios com a instalação de um detector de grande porte em São Martinho da Serra (Figura 3.7).

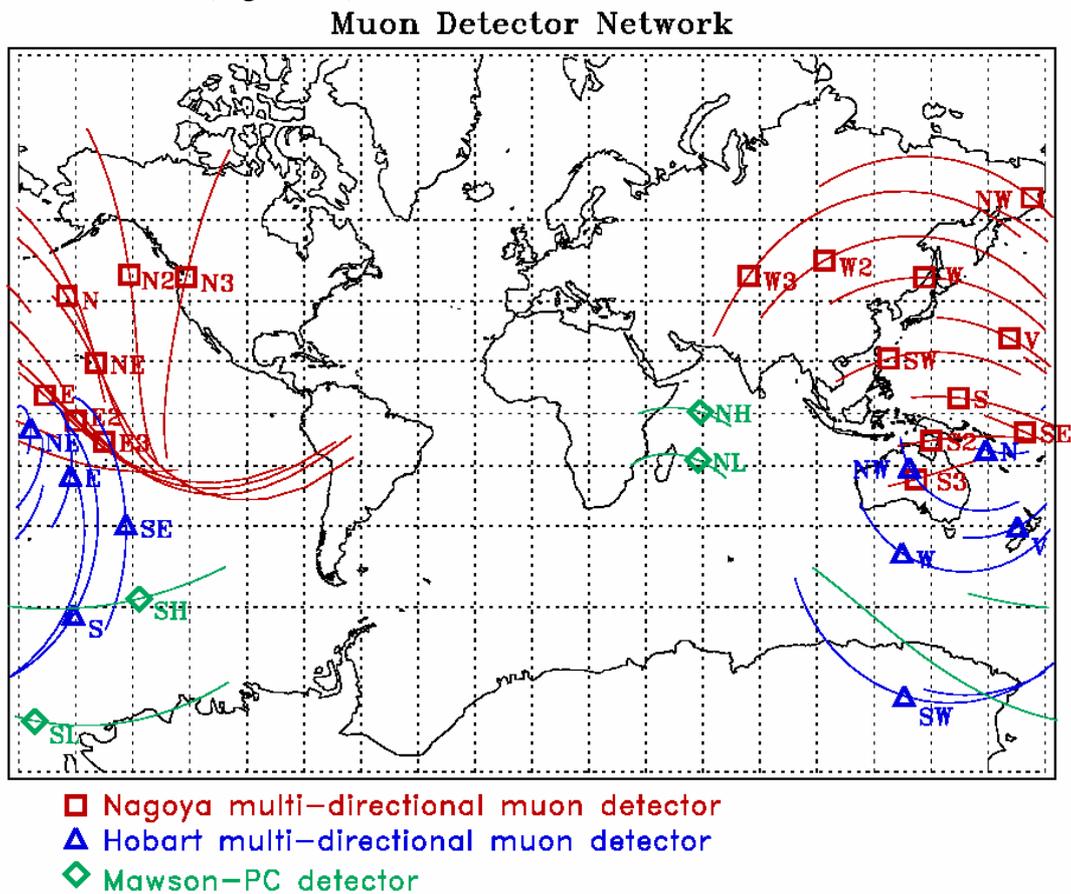
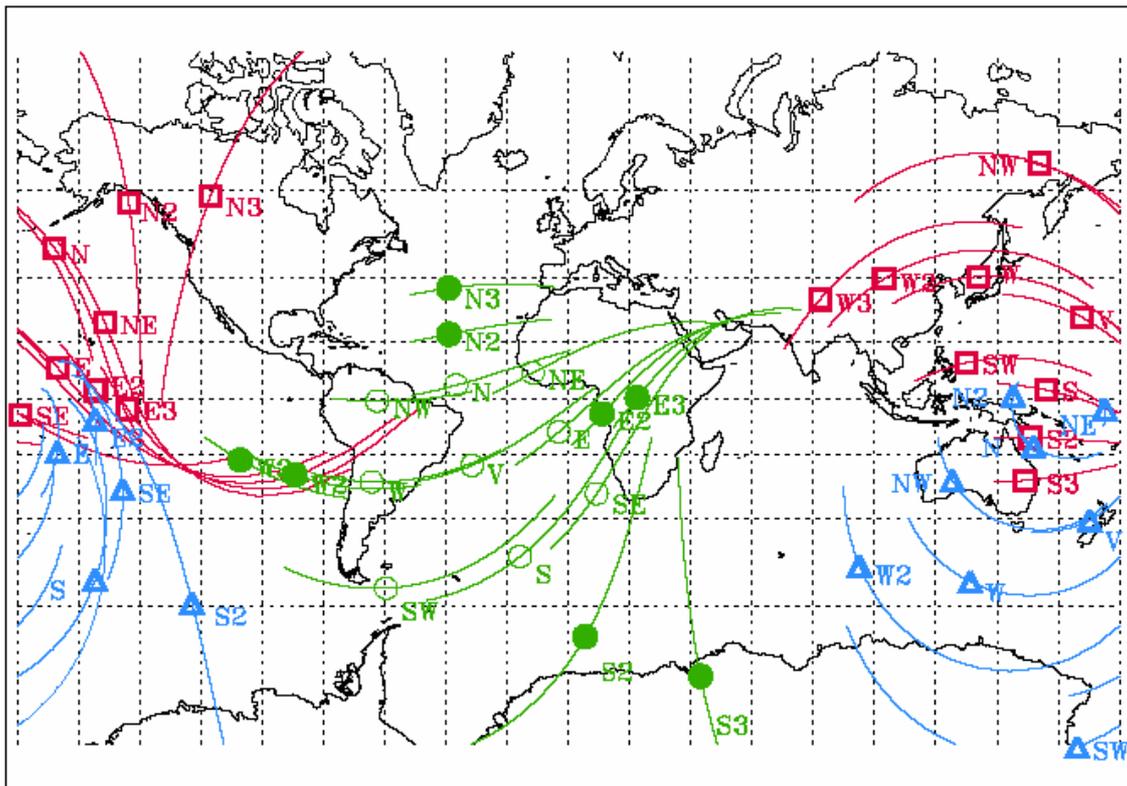


Figura 3.7 - Falha existente antes da instalação do detector protótipo de muons no OES/CRSPE/INPE-MCT.

A proposta de implementação da Rede Internacioanl de Detectores de Muons está ilustrada na Figura 3.8.



- Nagoya muon telescopes
- △ Hobart muon telescopes
- existing Sao Martinho prototype telescopes
- proposed new telescopes

Figura 3.8 - Proposta da expansão da rede de detectores de muons [Fonte: Munakata et al., 2000].

Em março de 2001, um Protótipo de Detector de Muons foi instalado no prédio principal do Observatório Espacial do Sul – OES/RSU/INPE-MCT (Latitude 29°, 26', 24''S, Longitude 53°, 48', 38'' O, Altitude 500 m acima do nível do mar), no Município de São Martinho da Serra, RS. Desde então, o telescópio tem sido mantido em operação para obter informações básicas sobre a performance de uma rede de detectores de Muons de abrangência completa, cuja instalação está sendo negociada entre as instituições envolvidas em um Memorando de Entendimento Brasil, Japão e Estados Unidos da América.



Figura 3.9 - Localização geográfica no Brasil, Rio Grande do Sul, em São Martinho de Serra, do detector de muons, Telescópio Multidirecional de Muons estabelecido no Observatório Espacial do Sul do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – OES/CRSPE/INPE-MCT.

O Telescópio Cintilador de Muons consiste de 2 camadas de 4 detectores, como mostrado na Figura 3.10. Estas camadas são separadas por 1,73 m de altura, intermediadas por uma camada de blocos de chumbo com 5 cm de espessura, usados para absorver os componentes de baixa energia dos raios cósmicos. No fundo de uma caixa metálica de 1,6 mm de espessura, é instalado um bloco plástico cintilante com dimensões 1m x 1m x 0,1m, que libera fótons – UV ao ser transpassado pelos Muons. Estes fótons liberados são captados por um tubo fotomultiplicador, cujo diâmetro é de 12,7 cm, que está no topo da caixa, gerando pulsos elétricos. Estes detectores são arranjados na forma de um quadrado (2 x 2 m) em cada camada, onde um lado é alinhado a direção Norte-Sul geográfica. Cada detector é identificado por um número

com inicial U ou L para as camadas de cima e de baixo (U1, U2, U3, U4, L1, L2, L3, L4), respectivamente.

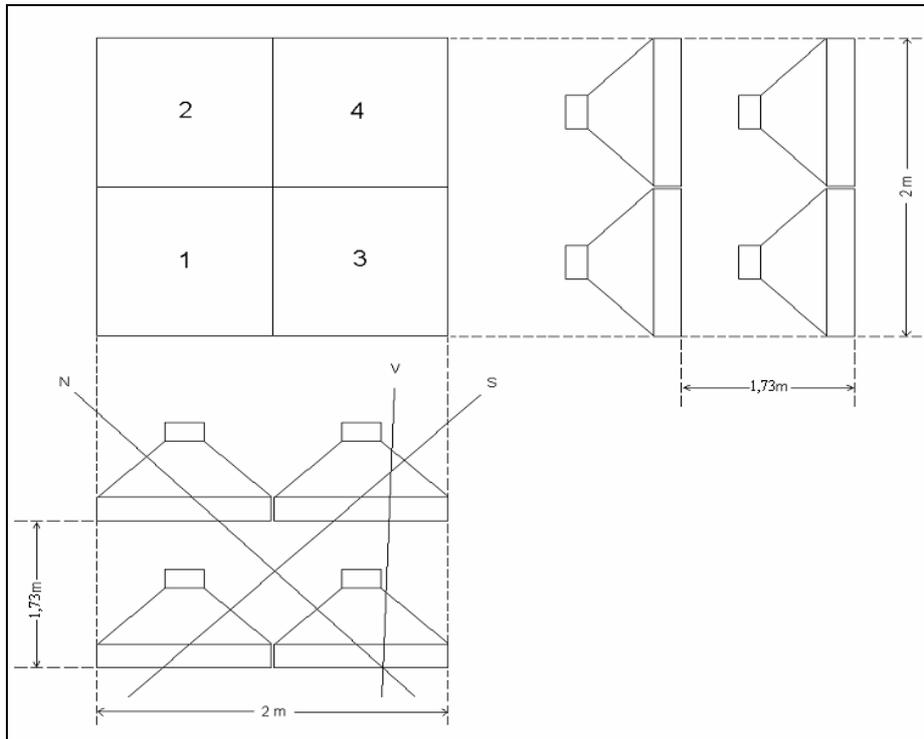


Figura 3.10 - Esquema da montagem do Telescópio Cintilador de Muons.

No Detector Protótipo de Muons do OES/RSU/INPE-MCT, parceria INPE – UFSM, os pulsos dos 8 detectores das camadas superior e inferior dispõem de 16 maneiras de fornecer dados aos circuitos de coincidência, gerando 9 canais direcionais do telescópio. Cada componente do telescópio consiste de todas as possíveis maneiras de se combinar qualquer par de detectores superior e inferior tomados em posições relativas.

O Telescópio Protótipo do Observatório Espacial do Sul – OES/RSU/INPE-MCT, é idêntico aos Telescópios de Muons de Hobart (Austrália) e de Nagoya (Japão) exceto pelo fato de ter um menor número de detectores. Os Telescópios de Hobart e de Nagoya possuem 72 detectores nas camadas superior e inferior, desta forma, eles dispõem de 992 maneiras de coincidência, gerando 17 canais direcionais.

A saída dos pulsos do sistema de coincidência, alimenta um sistema de gravação dos dados. Cada canal de gravação consiste de 10 bits na escala binária e 4 dígitos de contador decimal com uma memória “buffer” de 4 dígitos. O fator de escala (K) da escala binário é ajustado para que a taxa de contagens do contador decimal chegue a aproximadamente 8000/10 min. As contagens acumuladas no contador decimal são transferidas para a memória buffer a cada 10 min, o contador é ajustado para o próximo período de acumulação. O conteúdo da memória “buffer” e o código da hora universal (UT), obtido de um relógio eletrônico, são transferidos por um circuito para um Computador online, via uma saída serial RS232C. 20 canais de gravação são utilizados para gravar as taxas de contagens da intensidade dos raios cósmicos de 9 direções, juntamente com as contagens dos 8 detectores individuais, mais a contagem total das camadas superior e inferior e a contagem total de todos os oito detectores. Outro canal de gravação é usado para acumular pulsos de contagens de um barômetro digital por

meio de um cristal de quartzo ressonante. A temperatura da sala é medida por um termômetro eletrônico digital que é registrada pelo mesmo sistema de gravação.

Os dados do Telescópio Cintilador de Muons são disponibilizados em arquivo .dat diários, podendo ser visualizado na Figura 3.11.

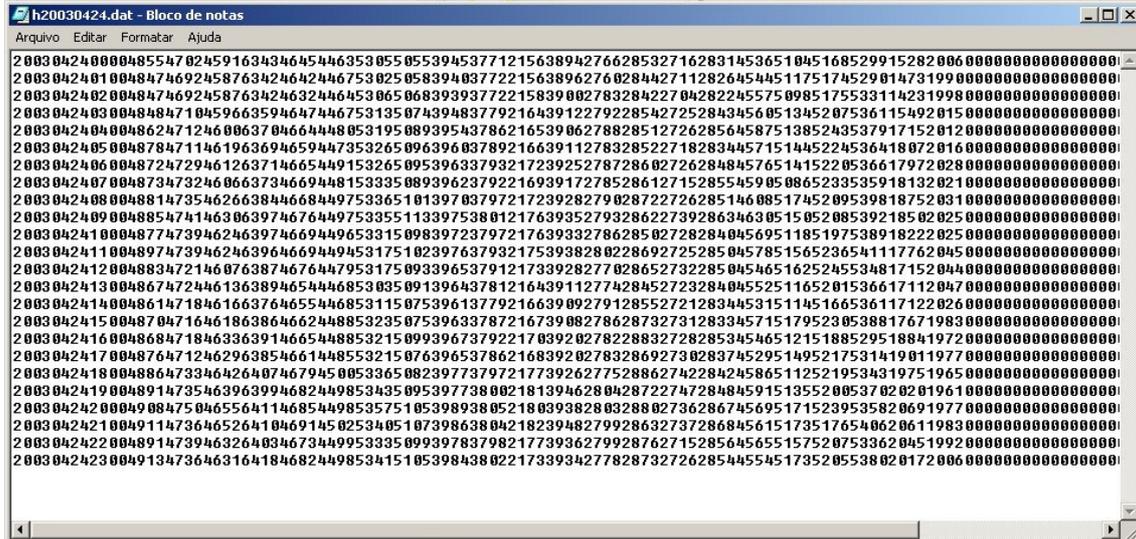


Figura 3.11 - Visualização da disponibilização dos dados do Telescópio protótipo do Observatório Espacial do Sul.

Cada linha corresponde a uma hora, sendo que a seqüência está na seguinte ordem: Ano (4 dígitos), mês (2 dígitos), dia (2 dígitos), hora (2 dígitos), minuto (2 dígitos), U1 (4 dígitos), U2 (4 dígitos), U3 (4 dígitos), U4 (4 dígitos), L1 (4 dígitos), L2 (4 dígitos), L3 (4 dígitos), L4 (4 dígitos), Us (4 dígitos), Ls (4 dígitos), WT (4 dígitos), V (4 dígitos), N (4 dígitos), S (4 dígitos), E (4 dígitos), W (4 dígitos), NE (4 dígitos), NW (4 dígitos), SE (4 dígitos), SW (4 dígitos), PR (4 dígitos), e RT (4 dígitos).

U1, U2, U3, U4, L1, L2, L3, e L4 são os dados de cada detector (figura 3.7). Us, Ls, e WT são as contagens das partículas que passam pelos detectores que estão em cima, em baixo e em abas camadas, respectivamente.

V (Vertical), N (Norte), S (Sul), E (Leste), W (Oeste), NE (Nordeste), NW (Noroeste), SE (Sudeste), e SW (Sudoeste) são os dados de cada direção. A lógica é como segue:

$$Us = U1+U2+U3+U4$$

$$Ls = L1+L2+L3+L4$$

$$WT = Us*Ls$$

$$V = U1*L1 + U2*L2 + U3*L3 + U4*L4$$

$$N = U1*L3 + U2*L4$$

$$S = U3*L1 + U4*L2$$

$$E = U2*L1 + U4*L3$$

$$W = U1*L2 + U3*L4$$

$$NE = U2*L3$$

$$NW = U1*L4$$

$$SE = U4*L1$$

$$SW = U3*L2$$



Os quatro dígitos dos dados são valores divididos por um certo parâmetro, que são:

U1/U2/U3/U4/L1/L2/L3/L4 : 200;

Us/Ls : 1000;

WT : 4000;

N/S/E/W : 40;

NE/NW/SE/SW : 10;

Por exemplo: Dados de U1(4855) multiplicado pelo parâmetro (200) torna-se igual ao valor de U1(971000 contagens/hora). Além disso, RT são os dados de Temperatura da sala e PR são os dados da pressão Atmosférica.

CAPÍTULO 4

ANÁLISES E RESULTADOS

Durante o período de vigência deste Projeto “**Identificação das origens interplanetárias das Tempestades Geomagnéticas intensas ocorridas no período de 2002 a 2003**” foram analisados dados geomagnéticos medidos por magnetômetros a bordo de satélites, bem como dados de plasma e Campo Magnético Interplanetário medidos por instrumentos a bordo do satélite ACE e dados do Detector de muons instalado no Observatório Espacial do Sul em São Martinho da Serra, RS. Foram escolhidos para análise os dias em que ocorreram intensas Tempestades Magnéticas ($Dst < -100$ nT) durante o período de Janeiro de 2002 à Dezembro de 2003.

O objetivo principal deste projeto é identificar os tipos de estruturas interplanetárias que causaram as tempestades geomagnéticas durante o máximo do ciclo solar 23, ou seja, durante o período de 2002 a 2003, em continuação ao Projeto anterior. A identificação das estruturas interplanetárias que causaram as tempestades intensas neste período é muito importante para uma comparação futura com as observações de raios cósmicos (muons), permitindo verificar se há algum tipo preferencial de estrutura que pode ser detectada pela rede de detectores de muons. Este trabalho, portanto, fará parte de um grande projeto de estudo do Clima Espacial utilizando vários tipos de observações.

No Período de Janeiro de 2002 à Dezembro de 2003 ocorreram 22 Tempestades Geomagnéticas Intensas ($Dst < -100$ nT). As respectivas datas estão expostas na Tabela 3.1. Foram analisadas 15 tempestades, pois das 22, 7 apresentaram problemas nos dados do detector de muons.

4.1 – ANÁLISE DOS PARÂMETROS INTERPLANETÁRIOS DOS EVENTOS DE TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS INTENSAS ($Dst < -100$ nT)

Nesta sessão vamos analisar cada um dos eventos de Tempestades Geomagnéticas Intensas ocorrido no período de 2002 a 2003, com exceção das tempestades as quais o detector de muons apresentou defeito nos dados. Iremos apresentar graficamente o comportamento dos dados.

4.1.1 – EVENTO DO DIA 24 DE MARÇO DE 2002

A Figura 4.1 mostra os parâmetros interplanetários, índice Dst e contagens de muons do evento de tempestade Geomagnética ocorrido no período de 23 a 26 de Março de 2002. Temos de cima para baixo, a intensidade do campo magnético B, a componente Z do campo magnético (B_z), a velocidade do vento solar (V), a densidade de prótons (N_p), a intensidade do índice Dst e as contagens relativas do canal vertical do Telescópio Cintilador de Muons (V).

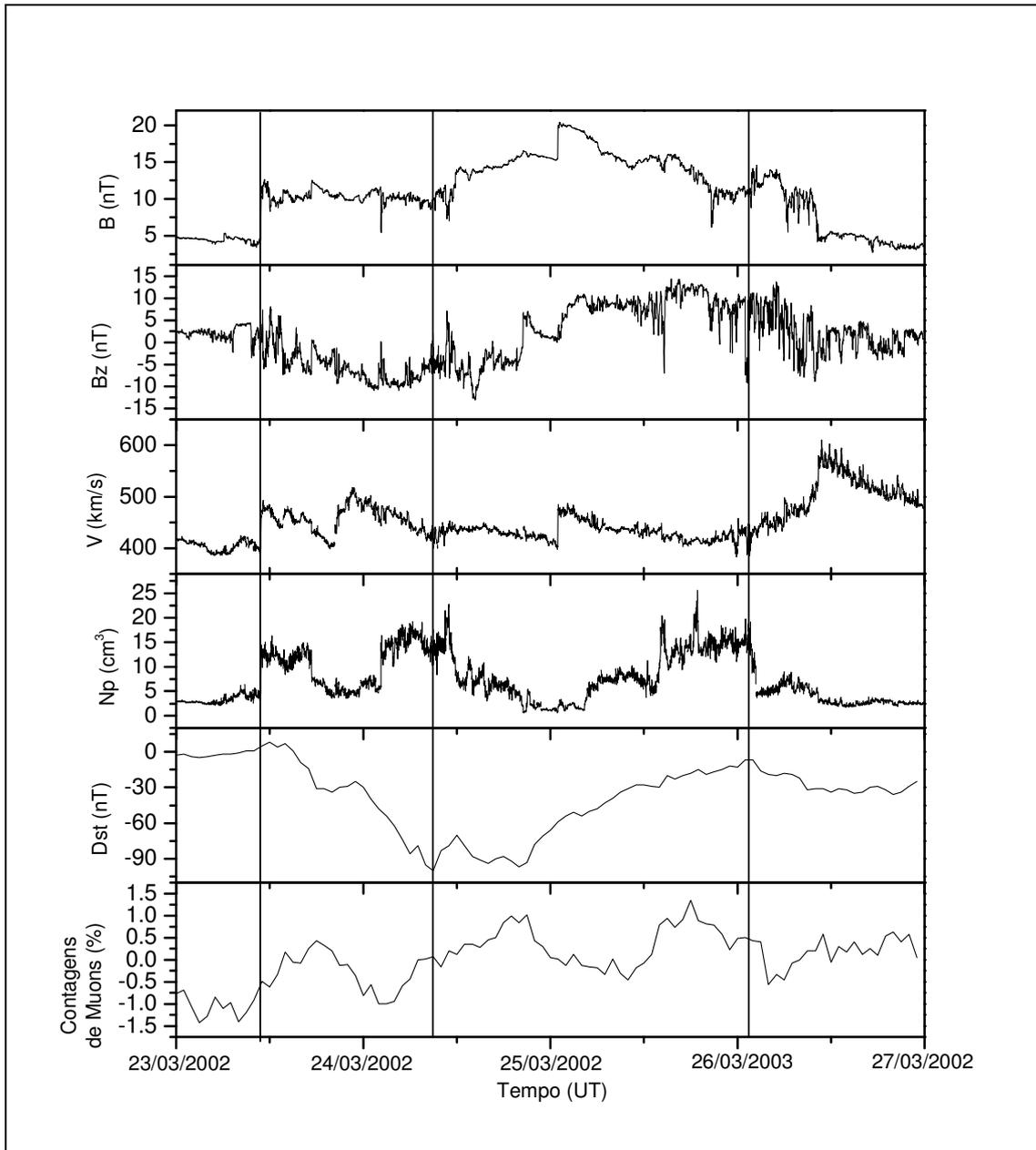


Figura 4.1 – Variações temporais dos parâmetros físicos de uma estrutura do meio interplanetário, observada pelo satélite ACE em 24 de Março de 2002, variações do índice Dst e contagens relativas do Telescópio Cintilador de Muons do Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE-MCT).

A primeira linha vertical mostra o choque provocado pela estrutura interplanetária e o início da Tempestade Geomagnética. Temos um acréscimo súbito na velocidade do vento solar, densidade de prótons e no campo magnético total (B). A segunda linha vertical apresenta a fase principal da tempestade.

No painel inferior podemos perceber que a variação na contagem de muons é muito pequena e sem decréscimos acentuados.

4.1.2 – EVENTOS DOS DIAS 17 E 19 DE ABRIL DE 2002

A Figura 4.2 mostra os parâmetros interplanetários, índice Dst e contagens de muons dos eventos de tempestades Geomagnéticas ocorridos no período de 17 a 21 de Abril de 2002. Temos de cima para baixo, a intensidade do campo magnético B, a componente Z do campo magnético (Bz), a velocidade do vento solar (V), a densidade de prótons (Np), a intensidade do índice Dst e as contagens relativas do canal vertical do Telescópio Cintilador de Muons (V).

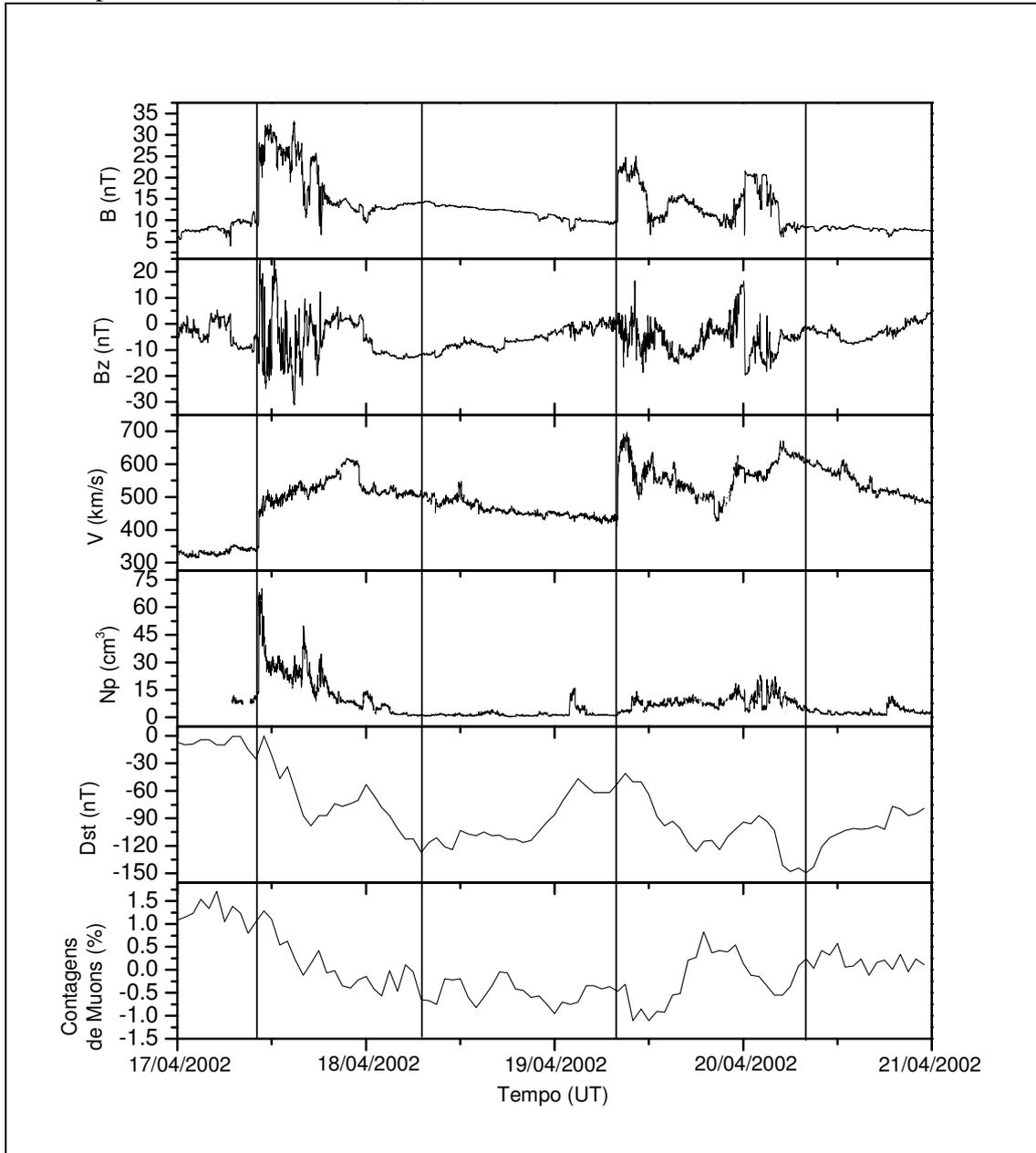


Figura 4.2 - Variações temporais dos parâmetros físicos de uma estrutura do meio interplanetário, observada pelo satélite ACE em 17 e 19 de Abril de 2002, variações do índice Dst e contagens relativas do Telescópio Cintilador de Muons do Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE-MCT).

Na Figura 4.2 vimos a ocorrência de duas Tempestades Geomagnéticas Intensas onde o pico máximo do Dst da primeira chegou a -127 nT e da segunda -149 nT.

A primeira linha vertical mostra o início da primeira tempestade no dia 17 de Abril de 2002. A estrutura que causou esta tempestade foi o campo magnético da bainha logo após o choque. A componente do campo na direção Sul apresentou valor pico de -32 nT e campo magnético pico total B de aproximadamente 33 nT. A segunda linha mostra a fase principal da tempestade a qual foi causada pela ejeção interplanetária logo após a estrutura da bainha que causou a primeira tempestade.

A terceira linha vertical identifica o choque interplanetário causado pela segunda estrutura no dia 19 de Abril de 2002. Temos um pico de -149 nT no índice Dst. O campo magnético Bz na direção Sul foi de aproximadamente -20 nT e o campo magnético B de aproximadamente 25 nT. A linha 4 identifica a fase principal da tempestade e início da fase de recuperação. Trata-se de uma estrutura interplanetária complexa, difícil de definir.

No painel inferior observamos a contagem de muons do Telescópio Cintilador de Muons. Observamos entre a linha 1 e 2 que temos um decréscimo na contagem de aproximadamente 1,5 %, provavelmente provocado pelo campo magnético turbulento da estrutura solar. Na linha 3 observamos um pequeno decréscimo súbito na contagem que pode ser o “Forbuch”.

4.1.3 – EVENTO DO DIA 11 DE MAIO DE 2002

A Figura 4.3 mostra os parâmetros interplanetários, índice Dst e contagens de muons do evento de tempestade Geomagnética ocorrido no dia 11 Maio de 2002. Temos de cima para baixo, a intensidade do campo magnético (B), a componente Z do campo magnético (Bz), a velocidade do vento solar (V), a densidade de prótons Np, a intensidade do índice Dst e as contagens relativas do canal vertical do Telescópio Cintilador de Muons (V).

A primeira linha vertical da Figura 4.3 mostra o salto abrupto dos parâmetros do meio interplanetário e início da tempestade, demonstrada no decréscimo do índice Dst. O campo magnético B alcançou um pico de aproximadamente 25 nT e a componente z na direção Sul obteve o seu valor máximo de -18 nT.

Na segunda linha vertical temos a fase principal da Tempestade Geomagnética onde o índice Dst apresentou valor pico de -110 nT e posterior fase de recuperação.

A terceira linha apresenta o final da tempestade onde o índice Dst se estabiliza.

Na janela inferior da Figura 4.3 observamos a contagem de muons do Telescópio Cintilador de Muons. Observamos entre a linha 1 e 2 que temos um decréscimo na contagem de aproximadamente 0,8 %, este decréscimo provavelmente foi provocado pelo campo magnético turbulento da estrutura solar. Um aspecto importante que vimos no painel inferior é que desde o início do dia 10 de maio de 2002 a contagem vem decrescendo. Depois do dia 11 de Maio a contagem vai aumentando e voltando a sua contagem normal.

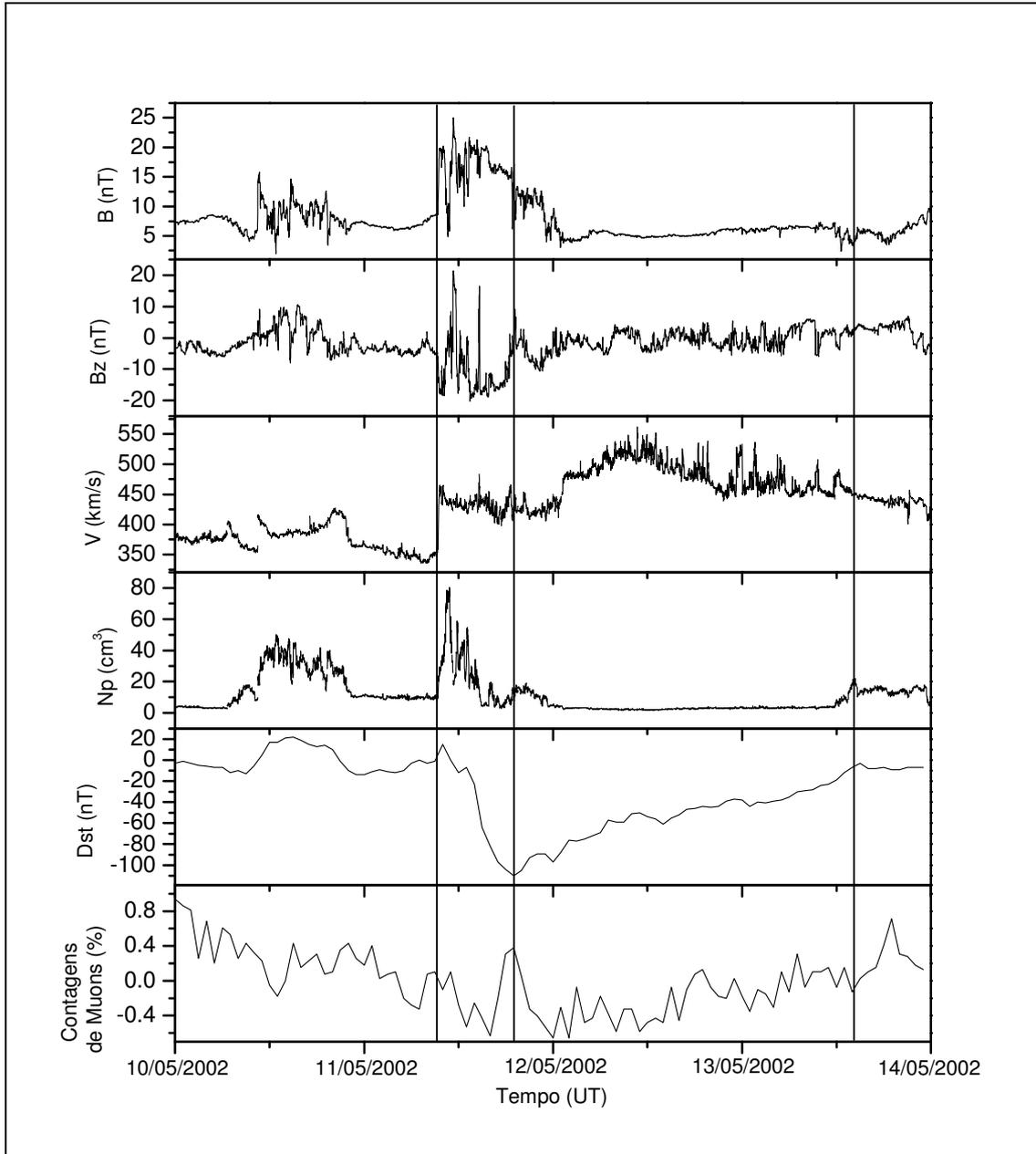


Figura 4.3 - Variações temporais dos parâmetros físicos de uma estrutura do meio interplanetário, observada pelo satélite ACE em 11 de Maio de 2002, variações do índice Dst e contagens relativas do Telescópio Cintilador de Muons do Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE-MCT).

4.1.4 – EVENTO DO DIA 23 DE MAIO DE 2002

A Figura 4.4 mostra os parâmetros interplanetários, índice Dst e contagens de muons do evento de tempestade Geomagnética ocorrido no dia 23 Maio de 2002. Temos de cima para baixo, a intensidade do campo magnético B, a componente Z do campo magnético (Bz), a velocidade do vento solar (V), a densidade de prótons (Np), a intensidade do índice Dst e as contagens relativas do canal vertical do Telescópio Cintilador de Muons (V).

A primeira linha vertical da Figura 4.4 mostra o início da tempestade, demonstrada no decréscimo do índice Dst que atingiu o valor pico de -109 nT. A

estrutura que causou esta tempestade foi o campo na bainha logo após o choque. A componente do campo na direção apresentou valor pico de -35 nT e campo magnético B alcançou um pico de aproximadamente 60 nT. A segunda linha apresenta a fase principal do evento de Tempestade Geomagnética e a terceira demonstra o final da tempestade.

No painel inferior podemos perceber o decréscimo na intensidade de muons que é de aproximadamente 2,8% que é um valor bem significativo. Este decréscimo provavelmente foi provocado pelo campo magnético turbulento da estrutura solar.

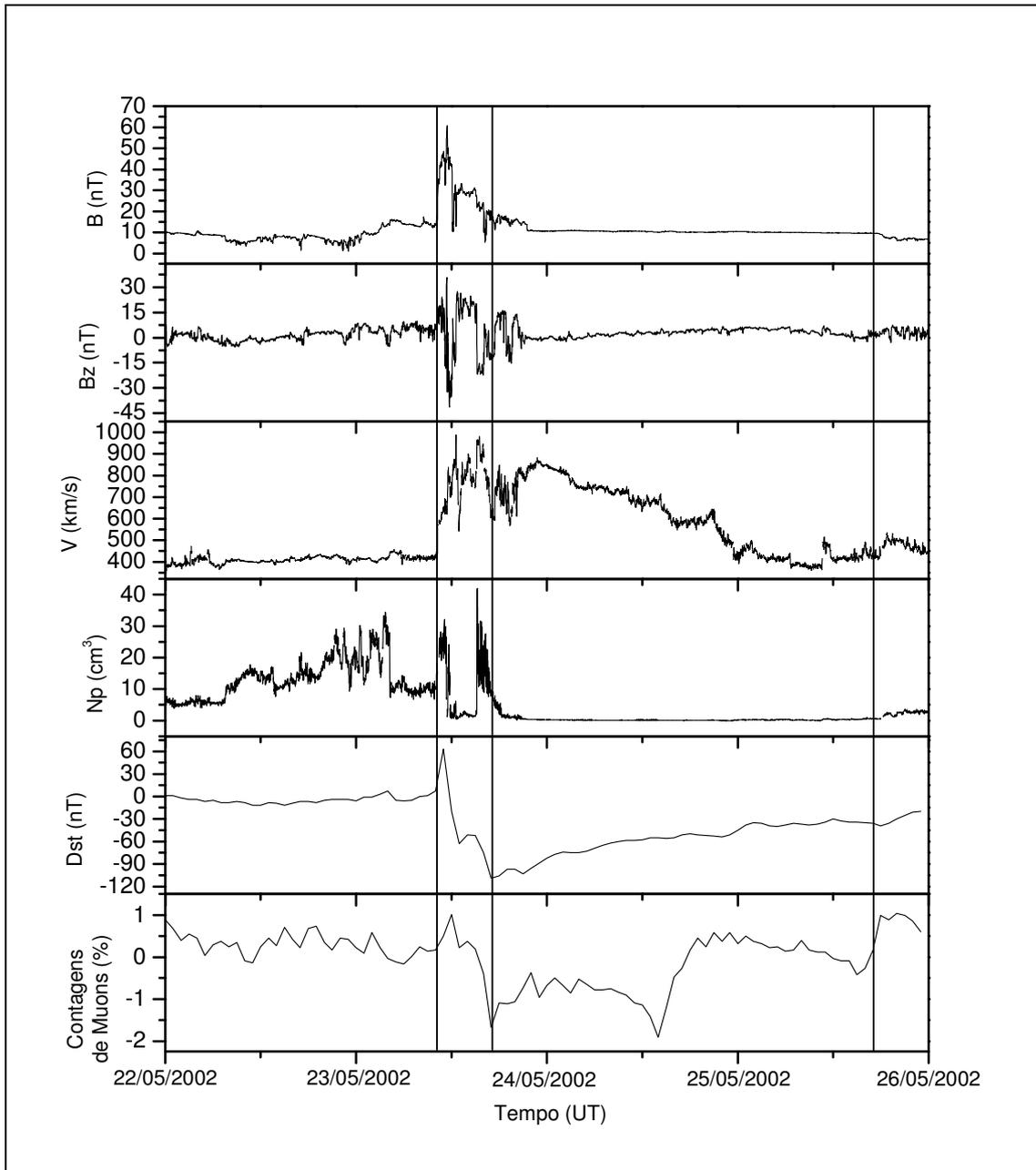


Figura 4.4 - Variações temporais dos parâmetros físicos de uma estrutura do meio interplanetário, observada pelo satélite ACE em 11 de Maio de 2002, variações do índice Dst e contagens relativas do Telescópio Cintilador de Muons do Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE-MCT).

4.1.5 – EVENTO DO DIA 2 DE AGOSTO DE 2002

A Figura 4.5 mostra os parâmetros interplanetários, índice Dst e contagens de muons do evento de tempestade Geomagnética ocorrido no dia 02 de Agosto de 2002. Temos de cima para baixo, a intensidade do campo magnético (B), a componente Z do campo magnético (Bz), a velocidade do vento solar (V), a densidade de prótons (Np), a intensidade do índice Dst e as contagens relativas do canal vertical do Telescópio Cintilador de Muons (V).

A primeira linha vertical nos indica o choque da estrutura interplanetária. No primeiro painel de cima para baixo temos o campo magnético total B com o valor pico máximo de aproximadamente 18 nT. Esta tempestade foi causada por uma estrutura complexa atingindo um valor máximo negativo (Bz) de aproximadamente -15 nT.

Observamos que com a chegada do choque a velocidade do vento solar atinge um valor pico de 550 km/s e a densidade de prótons com aproximadamente 25 cm³.

A segunda linha vertical nos indica a fase principal da tempestade e posterior fase de recuperação. Neste evento temos o pico máximo do índice Dst em -102 nT.

A linha 3 mostra o final da tempestades, nesse estágios os parâmetros volatam a se estabilizar.

Na janela inferior da Figura 4.5 observamos a contagem de muons do Telescópio Cintilador de Muons. Observamos entre a linha 1 e 2 que temos um decréscimo na contagem de aproximadamente 1,4 %, este decréscimo provavelmente foi provocado pelo campo magnético turbulento da estrutura solar.

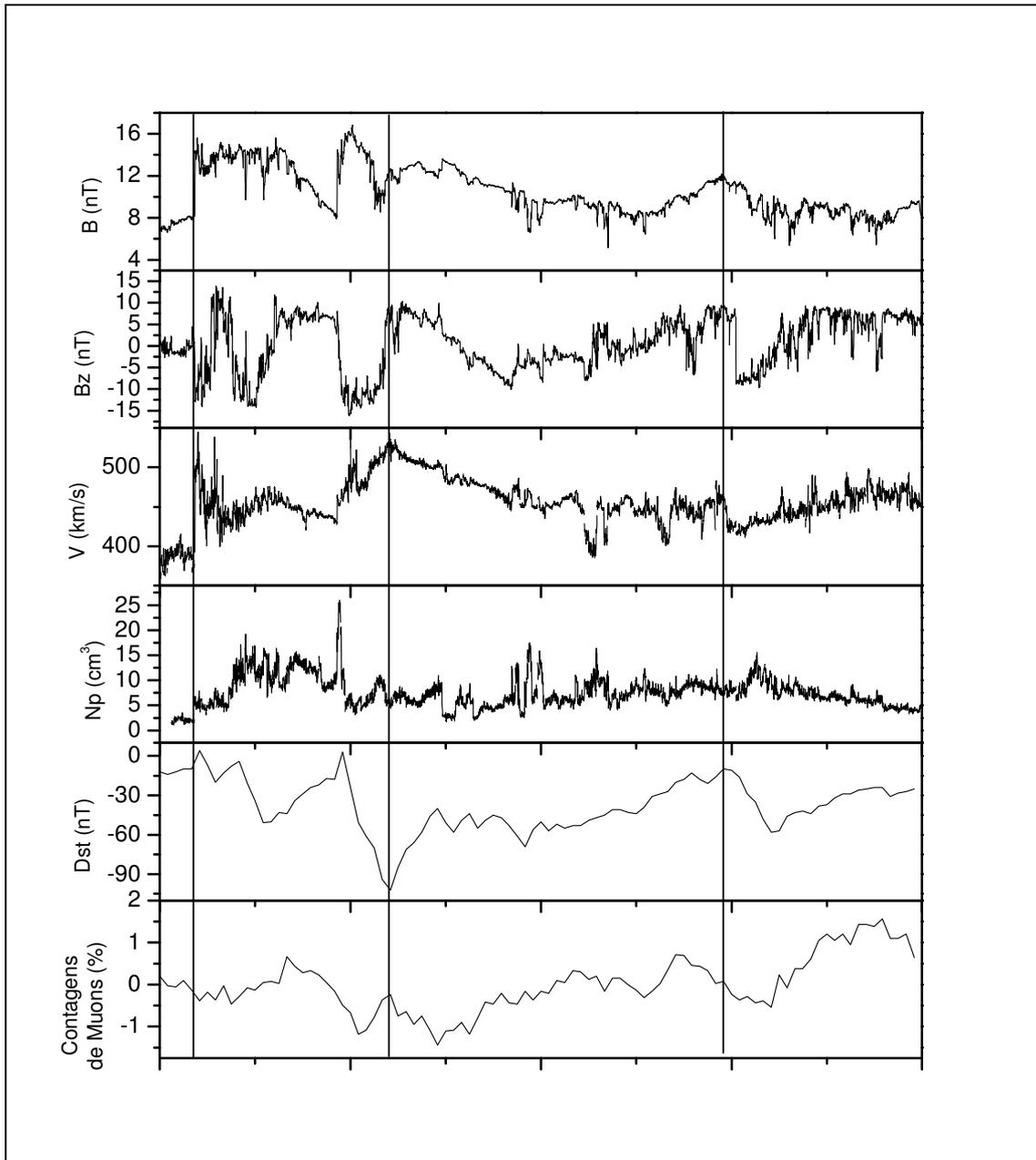


Figura 4.5 - Variações temporais dos parâmetros físicos de uma estrutura do meio interplanetário, observada pelo satélite ACE em 2 de Agosto de 2002, variações do índice Dst e contagens relativas do Telescópio Cintilador de Muons do Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE-MCT).

4.1.6 – EVENTO DO DIA 21 DE AGOSTO DE 2002

A Figura 4.6 mostra os parâmetros interplanetários, índice Dst e contagens de muons do evento de tempestade Geomagnética ocorrido no dia 21 de Agosto de 2002. Temos de cima para baixo, a intensidade do campo magnético (B), a componente Z do campo magnético (Bz), a velocidade do vento solar (V), a densidade de prótons (Np), a intensidade do índice Dst e as contagens relativas do canal vertical do Telescópio Cintilador de Muons (V).

A primeira linha vertical nos indica o choque da estrutura interplanetária e início da Tempestade Geomagnética. A segunda linha indica a fase principal da tempestade onde o valor pico do Dst é de -106 nT. A linha três mostra o final da tempestade.

Na janela inferior da Figura 4.6 observamos a contagem de muons do Telescópio Cintilador de Muons. No final do dia 19 de Agosto temos um decréscimo súbito na contagem de aproximadamente 2,7 %.

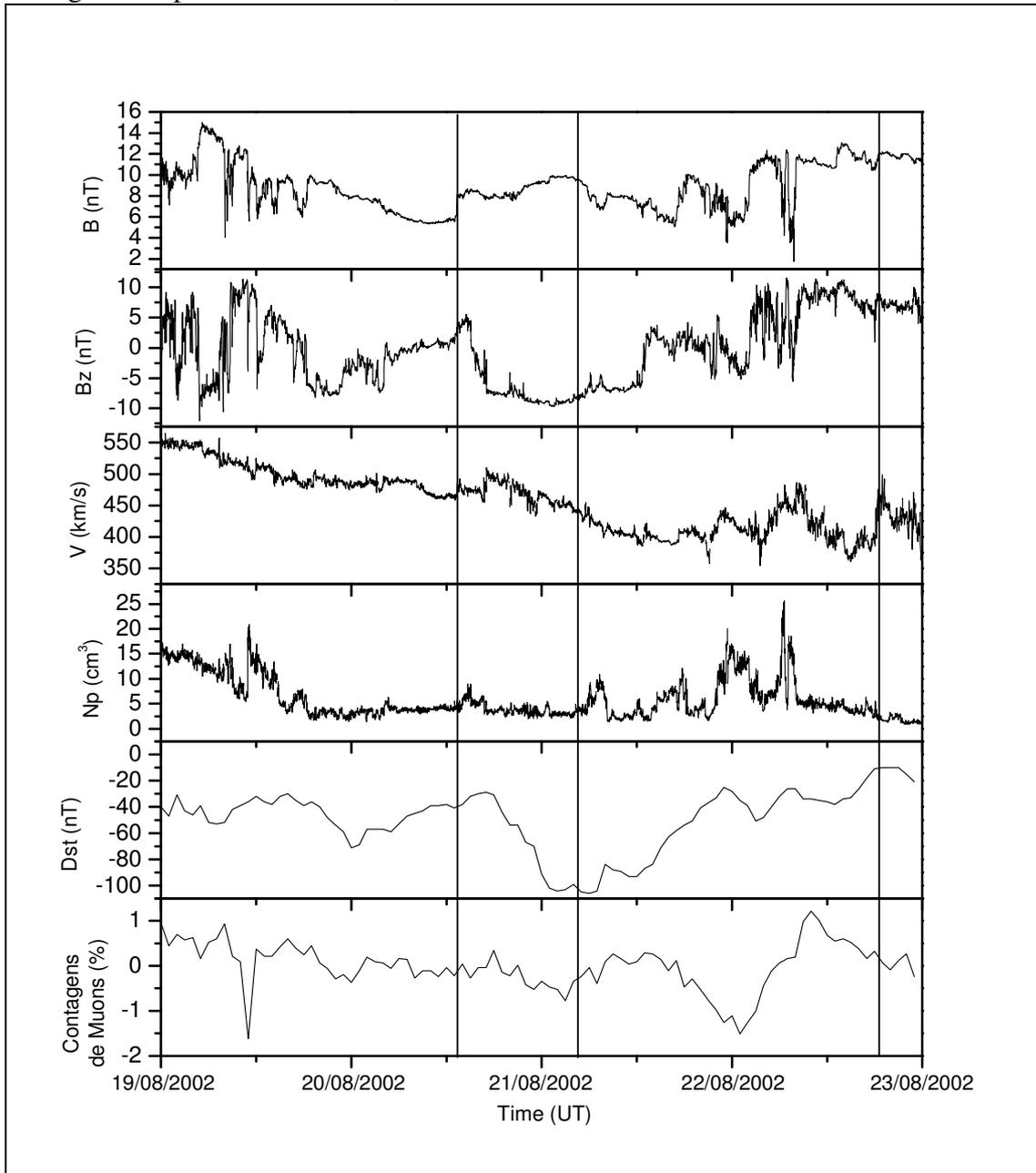


Figura 4.6 - Variações temporais dos parâmetros físicos de uma estrutura do meio interplanetário, observada pelo satélite ACE em 21 de Agosto de 2002, variações do índice Dst e contagens relativas do Telescópio Cintilador de Muons do Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE-MCT).

4.1.7 – EVENTOS DOS DIAS 1 E 3 DE OUTUBRO DE 2002

A Figura 4.7 mostra os parâmetros interplanetários, índice Dst e contagens de muons dos eventos de tempestades Geomagnéticas ocorrido nos dias 1 e 2 de Outubro de 2002. Temos de cima para baixo, a intensidade do campo magnético (B), a componente Z do campo magnético (Bz), a velocidade do vento solar (V), a densidade de prótons (Np), a intensidade do índice Dst e as contagens relativas do canal vertical do Telescópio Cintilador de Muons (V).

A primeira linha vertical mostra o início da primeira Tempestade Geomagnética no dia 1 de outubro de 2002, esta tempestade foi causada por uma nuvem magnética pois, temos uma rotação do Bz na direção sul, cuja intensidade atingiu pico máximo de 22 nT.

A segunda linha nos indica a fase principal da tempestade, cujo Dst atingiu -173 nT, logo após vimos a fase de recuperação.

A quarta linha mostra o início da segunda tempestade onde alcançou o pico do Dst em -146 nT.

Na janela inferior da Figura 4.7 observamos a contagem de muons do Telescópio Cintilador de Muons. Observamos no início do dia 1 de outubro um decréscimo súbito de aproximadamente 1 %. Um aspecto importante está marcado pela terceira linha vertical um acentuado decréscimo de aproximadamente 2%. Este decréscimo iniciou aproximadamente 9 horas antes da estrutura alcançar a magnetosfera.

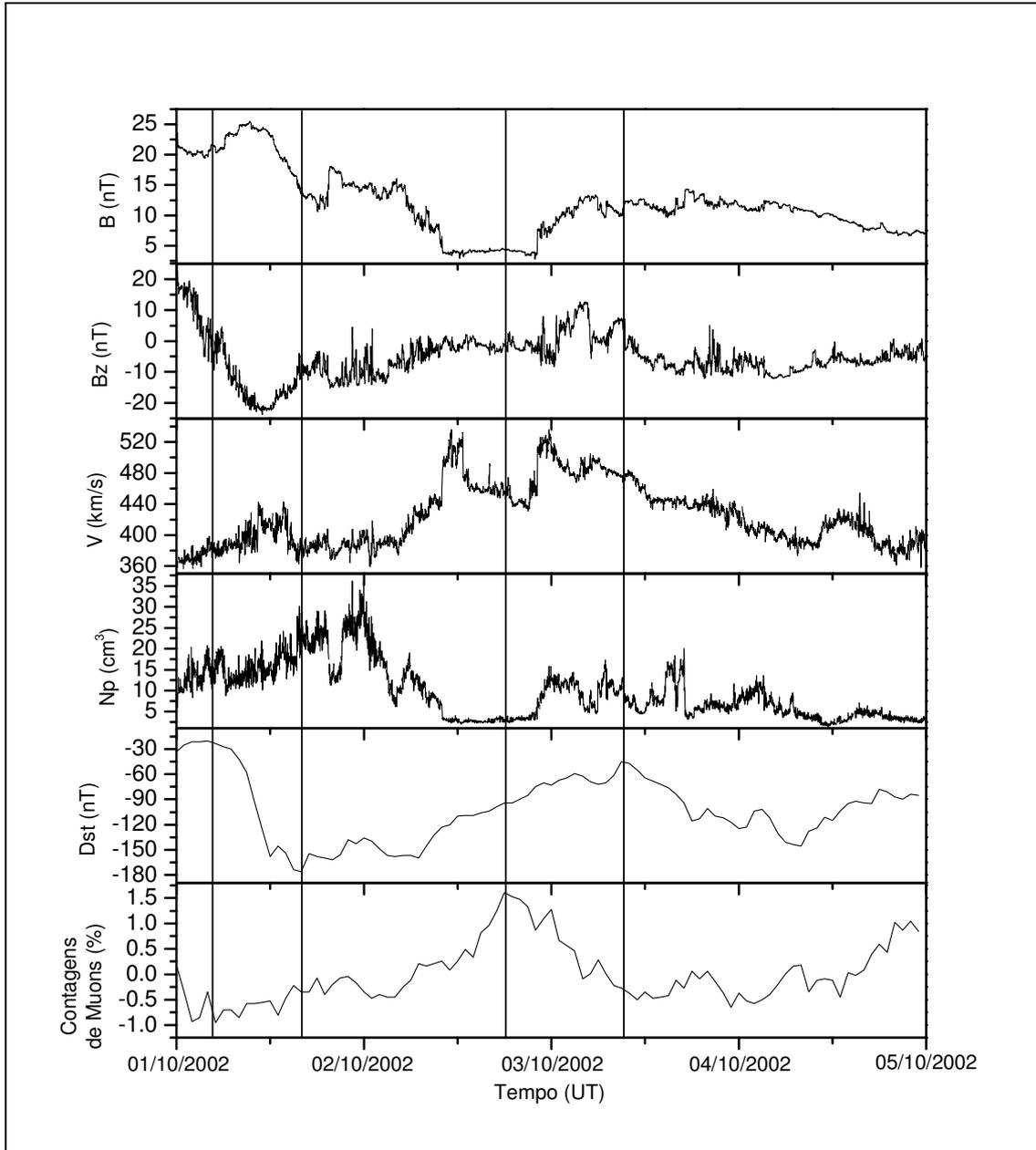


Figura 4.7 - Variações temporais dos parâmetros físicos de estruturas do meio interplanetário, observada pelo satélite ACE em 1 e 3 de Outubro de 2002, variações do índice Dst e contagens relativas do Telescópio Cintilador de Muons do Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE-MCT).

4.1.8 – EVENTO DO DIA 14 DE OUTUBRO DE 2002

A Figura 4.8 mostra os parâmetros interplanetários, índice Dst e contagens de muons do evento de tempestade Geomagnética ocorrido no dia 14 de Outubro de 2002. Temos de cima para baixo, a intensidade do campo magnético (B), a componente Z do campo magnético (Bz), a velocidade do vento solar (V), a densidade de prótons (Np), a intensidade do índice Dst e as contagens relativas do canal vertical do Telescópio Cintilador de Muons (V).

Na primeira linha temos o início da tempestade, onde mostramos o principio da queda do índice Dst. Na segunda linha temos a fase principal e posterior fase de recuperação, onde o índice Dst atingiu um valor pico de -100 nT e a terceira linha indica o final da tempestade.

Notamos que no quarto painel de cima para baixo apresenta uma falha nos dados, provavelmente isto seja causado pela incidência de partículas energéticas no satélite ACE, aceleradas por uma explosão solar relacionada a este evento

No ultimo painel de cima para baixo temos as contagens de muons do Telescópio Cintilador de Muons. Observamos entre a segunda e terceira linha que obtivemos um decréscimo de 2 % provavelmente causado pelo campo turbulento da ejeção solar ao se chocar com a Terra.

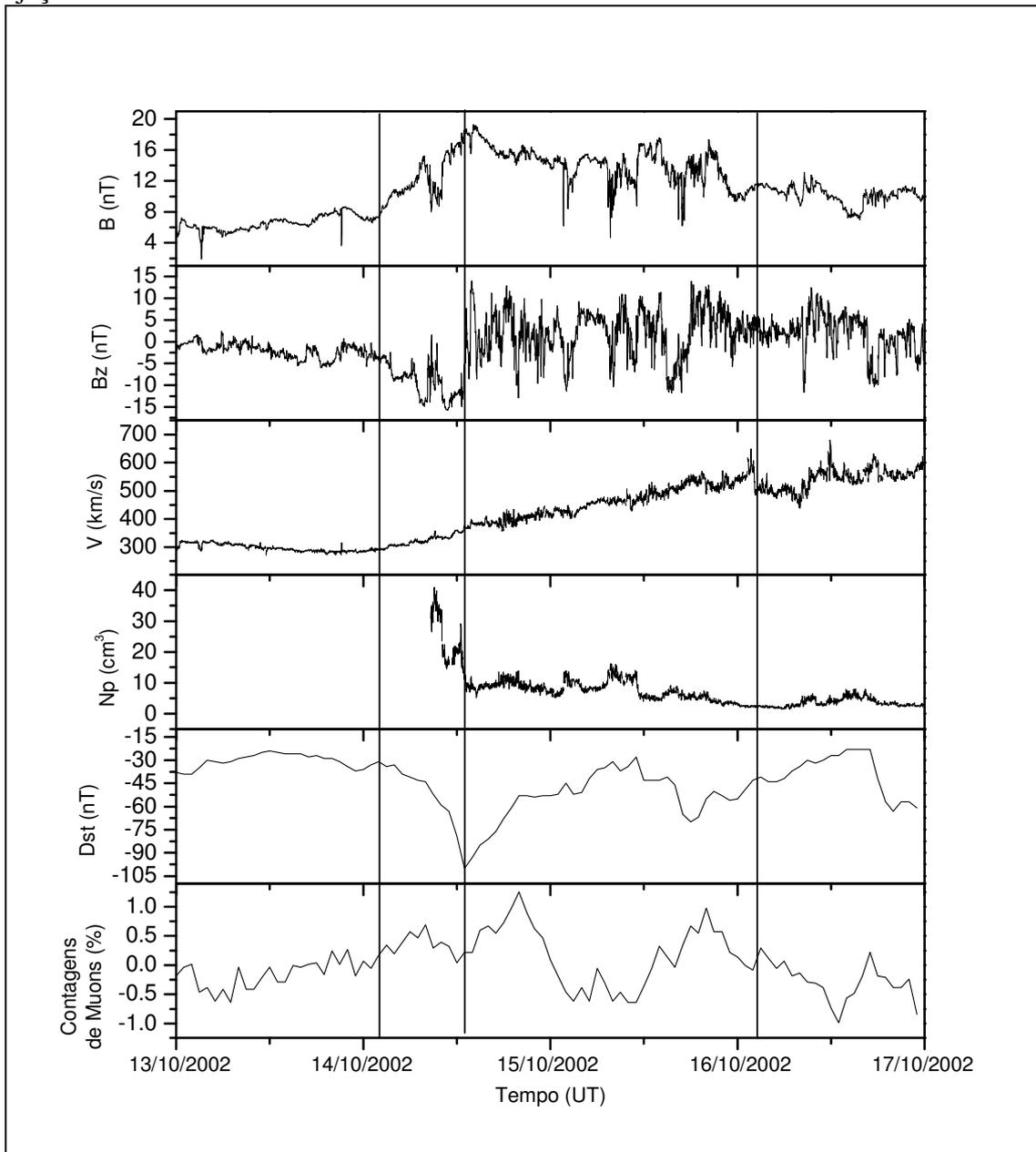


Figura 4.8 - Variações temporais dos parâmetros físicos de uma estrutura do meio interplanetário, observada pelo satélite ACE em 14 de Outubro de 2002, variações do índice Dst e contagens relativas do Telescópio Cintilador de Muons do Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE-MCT).

4.1.9 – EVENTO DO DIA 12 DE JULHO DE 2003

A Figura 4.9 mostra os parâmetros interplanetários, índice Dst e contagens de muons do evento de tempestade Geomagnética ocorrido no dia 12 de julho de 2003. Temos de cima para baixo, a intensidade do campo magnético (B), a componente Z do campo magnético (Bz), a velocidade do vento solar (V), a densidade de prótons (Np), a intensidade do índice Dst e as contagens relativas do canal vertical do Telescópio Cintilador de Muons (V).

A primeira linha vertical indica o choque da estrutura interplanetária com a magnetosfera e o início da tempestade. A segunda linha indica a fase principal da tempestade e a posterior fase de recuperação. O índice Dst atingiu seu valor pico de -118 nT. A terceira linha mostra o final da tempestade quando os parâmetros voltam a se estabilizar.

No último painel de cima para baixo temos as contagens de muons do Telescópio Cintilador de Muons. Observamos um decréscimo de 2,4 % que ocorreu durante a passagem da estrutura pela Terra.

Este evento interplanetário foi uma “região de interação corrotante” (Corotating interaction region – CIR), caracterizado por um aumento gradual da velocidade (diferente de um choque, que tem aumento abrupto). As regiões de interação corrotantes, ou CIRs, são resultados da interação entre o vento solar lento (feixe lento) e o vento solar rápido (“feixe rápido” ou “high speed stream”), estes últimos oriundos dos buracos coronais (“coronal holes”). A densidade aumenta logo antes da chegada do feixe rápido.

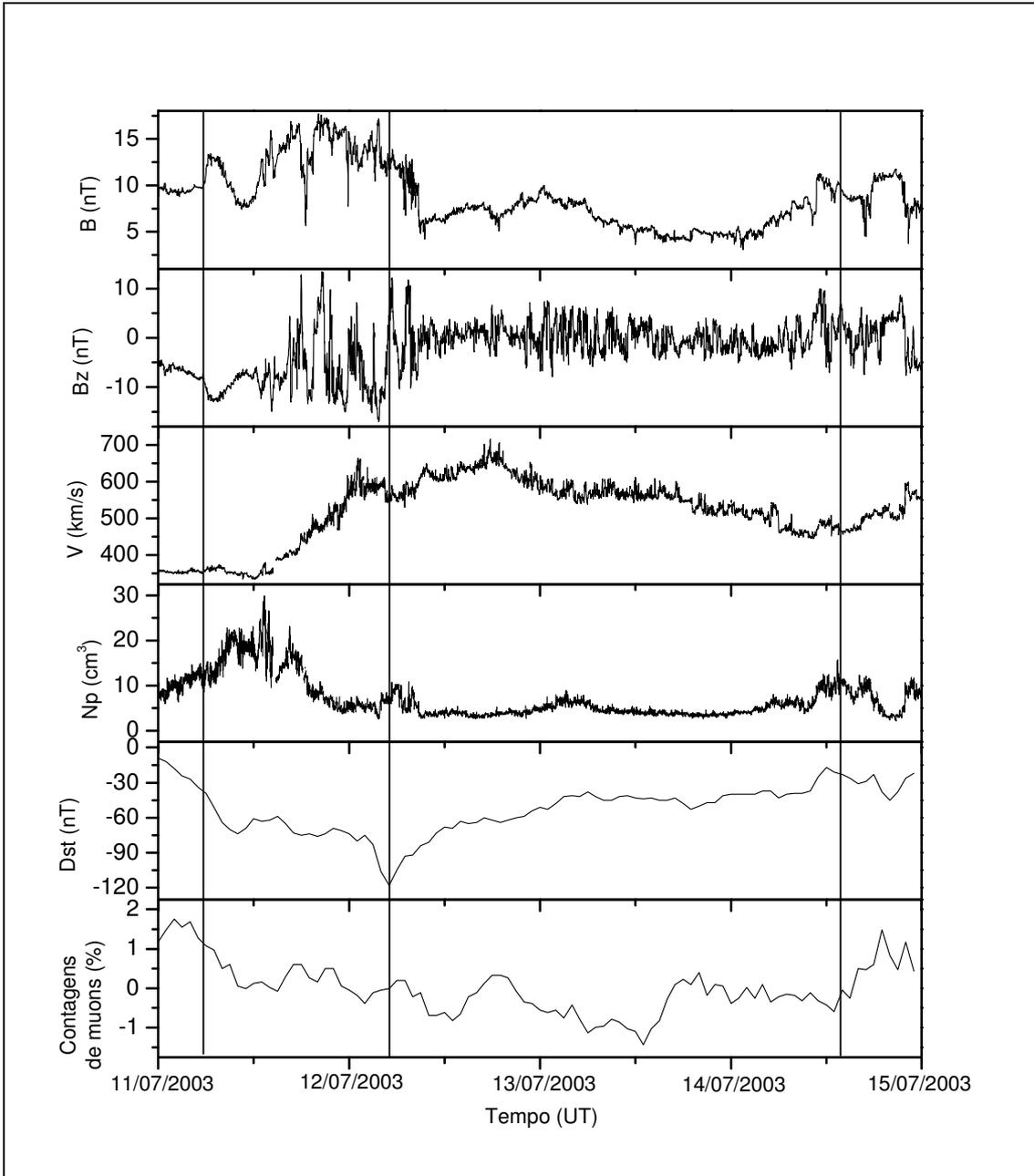


Figura 4.9 - Variações temporais dos parâmetros físicos de uma estrutura do meio interplanetário, observada pelo satélite ACE em 12 de Julho de 2003, variações do índice Dst e contagens relativas do Telescópio Cintilador de Muons do Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE-MCT).

4.1.10 – EVENTO DO DIA 18 DE AGOSTO DE 2003

A Figura 4.10 mostra os parâmetros interplanetários, índice Dst e contagens de muons do evento de tempestade Geomagnética ocorrido no dia 18 de Agosto de 2003. Temos de cima para baixo, a intensidade do campo magnético (B), a componente Z do campo magnético (Bz), a velocidade do vento solar (V), a densidade de prótons (Np), a intensidade do índice Dst e as contagens relativas do canal vertical do Telescópio Cintilador de Muons (V).

Na primeira linha vertical esta indicado o choque causado pela estrutura e o início da tempestade Geomagnética. A segunda linha mostra fase principal e o início da fase de recuperação, esta tempestade foi muito intensa alcançando o valor pico máximo do Dst -168 nT. A terceira linha indica o final da tempestade.

No ultimo painel de cima para baixo temos as contagens de muons do Telescópio Cintilador de Muons. Observamos um acréscimo na contagem que ocorreu durante a passagem da estrutura pela Terra. Este fato foi o único durante todo o trabalho, acredita-se que foi causado pela aceleração das partículas no meio interplanetário provocado pela estrutura solar.

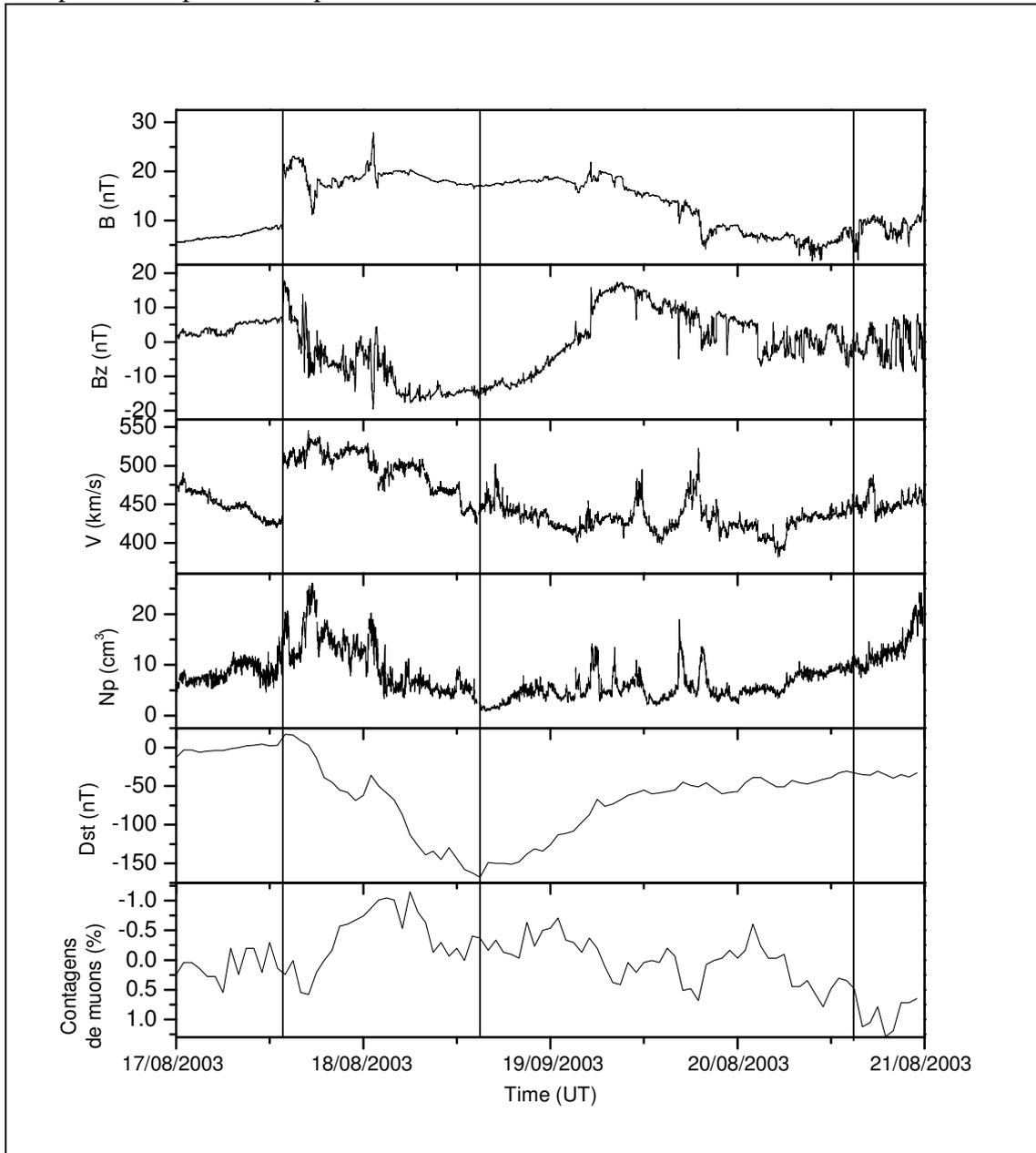


Figura 4.10 - Variações temporais dos parâmetros físicos de uma estrutura do meio interplanetário, observada pelo satélite ACE em 18 de Agosto de 2003, variações do índice Dst e contagens relativas do Telescópio Cintilador de Muons do Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE-MCT).

4.1.11 - EVENTO DOS DIAS 29 E 30 DE OUTUBRO DE 2003

A Figura 4.11 mostra um evento de choque interplanetário que ocorreu no dia 30 de Outubro de 2003. Temos de cima para baixo, a intensidade do campo magnético (B), a componente z do campo magnético (B_z), a velocidade do vento solar (V), a intensidade do índice Dst e as contagens relativas do canal vertical do Telescópio Cintilador de Muons (V).

Neste evento vimos no 3º painel há uma falha no equipamento SWEPAM (*Solar Wind Electron Próton Alpha Monitor*) que nos fornece dados de velocidade do vento solar (V), a qual pode ter sido causada pela incidência de partículas energéticas no satélite ACE, aceleradas por uma explosão solar relacionada a este evento.

A Figura 4 nos mostra a ocorrência de duas Tempestades Geomagnéticas Intensas onde o pico máximo do índice Dst da primeira chegou a -363 nT e da segunda -401 nT, consideradas tempestades muito intensas.

A primeira linha vertical mostra o início da primeira tempestade no dia 30 de Outubro de 2003 onde o pico do índice Dst chegou a -363 nT. A estrutura interplanetária que causou esta tempestade é uma nuvem magnética pois, temos um campo magnético B_z apresentando uma rotação de Sul para Norte (antes e depois da segunda linha).

A componente do campo na direção Sul apresentou valor pico de -55 nT e campo magnético pico total B de aproximadamente 60 nT. A segunda linha marca a fase principal da tempestade e o início da fase de recuperação. A terceira linha mostra o final da primeira tempestade e início da segunda onde temos um pico máximo do Dst de -401 nT. O campo magnético B_z na direção Sul foi de aproximadamente -40 nT e campo magnético B de aproximadamente 40 nT. A quarta linha delimita a nuvem magnética e a fase de recuperação da tempestade. A quinta linha indica o final da segunda tempestade. Há fortes indícios de que estas tempestades tenham sido causadas por duas fortes Ejeções Coronais de Massa observadas no Sol nos dias 28 e 29 de outubro, respectivamente.

No painel inferior podemos perceber o decréscimo na intensidade de muons que é de aproximadamente 15% na primeira tempestade e 6% na segunda. Uma característica interessante é que os dois decréscimos ocorrem na região entre o choque e a nuvem magnética, sugerindo que este seja causado pelo campo magnético turbulento desta região.

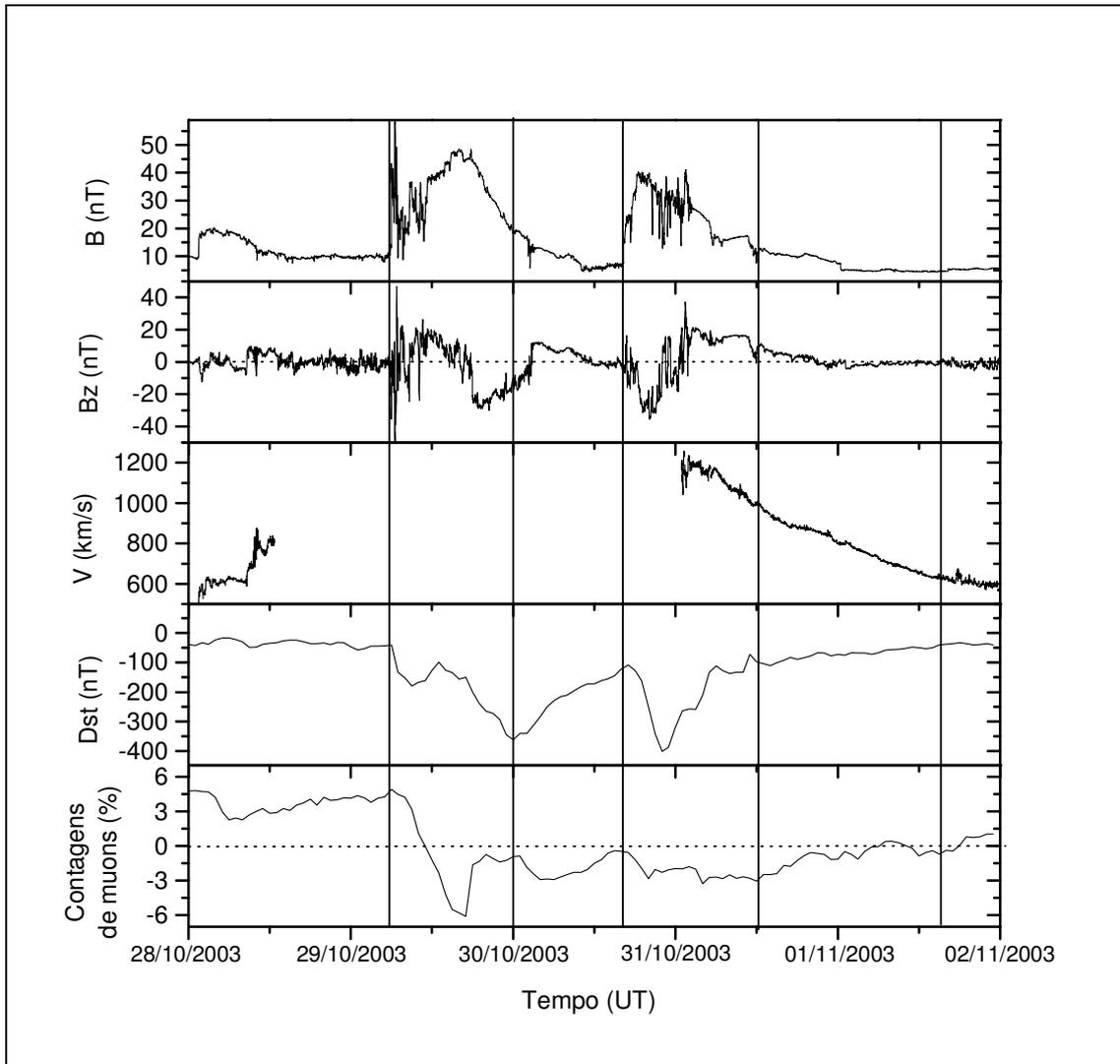


Figura 4.11 – Variações temporais dos parâmetros físicos de uma estrutura do meio interplanetário, observada pelo satélite ACE em 30 de Outubro de 2003, variações do índice Dst e contagens relativas do Telescópio Cintilador de Muons do Observatório Espacial do Sul (OES).

4.1.12 - EVENTO DO DIA 20 DE NOVEMBRO DE 2003

A Figura 5 mostra um evento de choque interplanetário que ocorreu no dia 20 de Novembro de 2003. Temos de cima para baixo, a intensidade do campo magnético (B), a componente z do campo magnético (B_z), a velocidade do vento solar (V), a intensidade do índice Dst e as contagens relativas do canal vertical do Telescópio Cintilador de Muons (V).

A Figura 5 nos mostra a ocorrência de uma Tempestade Geomagnética Intensa onde o pico máximo do índice Dst chegou a -472 nT, considerada uma das maiores da história.

A primeira linha mostra o início da tempestade no dia 20 de Novembro de 2003, a qual foi causada por uma nuvem magnética proveniente de uma Ejeção Coronal de Massa. O campo magnético B_z na direção Sul foi de aproximadamente -50 nT e campo magnético B de aproximadamente 60 nT. A segunda linha delimita a nuvem magnética

e a fase de recuperação da tempestade. A terceira linha mostra o final da tempestade onde os parâmetros se estabilizam.

No painel inferior podemos perceber que o decréscimo na intensidade de muons é de aproximadamente 4%. Do mesmo modo que no evento do dia 30 de Outubro de 2003 uma característica interessante é que o decréscimo ocorre na região entre o choque e a nuvem magnética, sugerindo que este seja causado pelo campo magnético turbulento desta região.

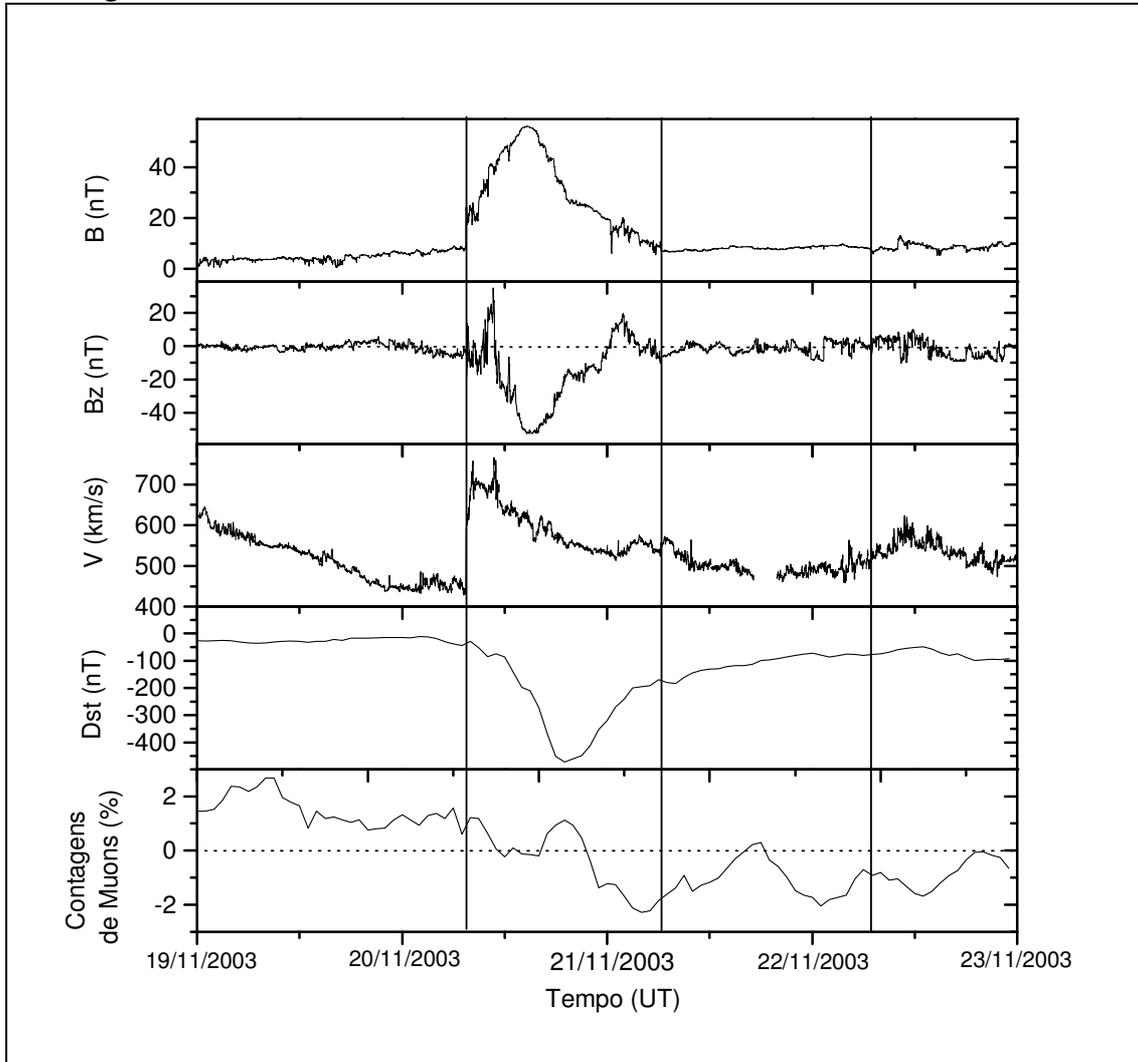


Figura 5 – Variações temporais dos parâmetros físicos de uma estrutura do Meio Interplanetário, observada pelo satélite ACE em 20 de Novembro de 2003, variações do índice Dst e contagens relativas do Telescópio Cintilador de Muons do Observatório Espacial do Sul (OES).

CAPITULO 5

CONCLUSÕES

A variabilidade do Clima Espacial depende de vários fenômenos complexos e com certa dificuldade de serem entendidos, por isso é essencial que se conheça muito bem as estruturas interplanetárias. Estas estruturas nos trazem informações valiosas a respeito dos distúrbios que atingem sistemas tecnológicos, biológicos e outros. Entre esses fenômenos encontram-se as Tempestades Geomagnéticas que são o foco principal deste estudo.

Vimos durante o trabalho que as estruturas do tipo “nuvens magnéticas” são muito importantes neste estudo do Clima Espacial. Podemos observar claramente nos diagramas gráficos que há várias Tempestades Geomagnéticas causadas por uma nuvem magnética, as quais são identificadas por uma rotação na componente z do campo magnético interplanetário.

Um dado importante que podemos observar nos eventos de Tempestades Magnéticas analisadas neste trabalho é que durante a chegada de um choque, caracterizado pelo salto abrupto dos parâmetros de plasma, ocorre um aumento súbito na intensidade do campo magnético interplanetário. Campos comprimidos na bainha logo após o choque estão entre as principais causas de tempestade intensas, junto com as nuvens magnéticas.

Neste projeto foi dado um tratamento especial aos dados do Telescópio Cintilador de Muons, localizado no Observatório Espacial do Sul OES/CRSPE/INPE-MCT, em São Martinho da Serra. Obtivemos bons dados com relação ao decréscimo na contagem de muons durante a ocorrência de Tempestades Geomagnéticas, em média temos um decréscimo de aproximadamente 1,5%. Observamos fenômenos importantes que ainda não sabemos do que se tratam, entre eles está o acréscimo na contagem durante um evento de tempestade. Acredita-se que os raios cósmicos que geram os muons sejam acelerados pela estrutura interplanetária. Notamos que a maioria dos decréscimos ocorre durante a chegada da estrutura na magnetosfera terrestre, isto devido ao campo turbulento provocado pelo choque.

O desenvolvimento desse projeto de Iniciação Científica foi de relevante foi de relevante importância, pois possibilitou-me inúmeros estudos teóricos sobre dinâmica solar, meio interplanetário e Tempestades Geomagnéticas. Para a análise e tratamento dos dados foi utilizada linguagem de programação para a confecção dos gráficos, aprendemos várias ferramentas importantes do software para a análise dos dados.

Durante o período de vigência da bolsa de Iniciação Científica, diversos trabalhos foram desenvolvidos e apresentados em congressos nacionais de iniciação científica e em congressos internacionais.

Entre os dias de 18 e 25 de Julho de 2004 tive a oportunidade de participar do **35th COSPAR Scientific Assenbly, Paris, France** com a apresentação do trabalho intitulado *“Analysis of interplanetary structures associated with cosmic ray*

precursory anisotropies and intense geomagnetic storms”. Neste congresso tive interação com vários pesquisadores renomados na área de Geofísica Espacial. Apreendi muitos assuntos com as palestras destes profissionais.

No período de 6 a 12 de fevereiro de 2005, ocorreu em Manaus, Brasil, a **Chapman Conference on Corotating Solar Wind Streams and Recurrent Geomagnetic Activity**, onde participei como co-autor de um trabalho que intitula-se *“determination of CIR related shock parameters”*.

Vale salientar que foram submetidos, aceitos e apresentados trabalhos, um para a **European Geosciences Union, General Assembly 2005** de 24-29 de Abril de 2005, Vienna, Áustria, e dois para **The International Association of Geomagnetism and Aeronomy, IAGA Scientific Assembly** de 18-29 de Julho de 2005, Toulouse, France e três para a **9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society** de 11-14 de Setembro de 2005, Salvador, Brasil.

Neste período foi submetido para publicação na Revista Brasileira de Geofísica (RBGF) que é uma revista quadrienal da Sociedade Brasileira de Geofísica. O trabalho intitulado *“Análise de Tempestades Geomagnéticas super intensas através da observação de raios cósmicos e de estruturas do meio interplanetário”*. Este artigo está sendo avaliado pelos revisores e se aprovado será publicado em janeiro de 2006.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brant, J. C.; *Introduction to the solar wind*. San Francisco: W. H. Freeman, 1970. 216p.
- Burlaga, L. F.; *Interplanetary magnetohydrodynamics*. New York: Oxford University Press, 1995, 256p.
- Dal Lago, A. Estudo de nuvens magnéticas geoefetivas no meio interplanetário. São José dos Campos. 122p. (INPE – 7263 – TDI/705). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999.
- Gonzalez, W. D.; e Tsurutani, B. T. Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ($Dst < -100$ nT). **Planet. Space Sci.**, v.35, n.9, p.1101-1109, jul. 1987.
- Gonzalez, W. D.; Joselyn, J. A.; Kamide, Y.; Kroehl, H. W.; Rostoker, G.; Tsurutani, B. T.; e Vasyliunas, V. M. What is a magnetic storm?. **J. Geophys. Res.**, v.99, n.A4, p.5771-5792, Apr. 1994.
- Gonzalez, W. D.; Tsurutani, B. T.; Clua de Gonzalez, A. L. Interplanetary origin of geomagnetic storms. **Space Sci. Rev.** v.88, p.529-562, 1999.
- H. V. Cane, *Cosmic Ray Decreases and Magnetic Clouds*, J. Geophys. Res., 98, 3509-3512, 1993.
- H. V. Cane, I. G. Richardson, T. T. von Rosenvinger, and G. Wibberenz, *Cosmic ray decreases and shock structure: A multispacecraft study*, J. Geophys. Res., 99, 21,429-21,441, 1994.
- H. V. Cane, I. G. Richardson, and T. T. von Rosenvinger, *Cosmic ray decreases: 1964 - 1994*, J. Geophys. Res., 101, 21,561, 1996.
- Hewish, A.; Bravo, S. *The sources of large-scale heliospheric disturbances*. Solar Phys., v.106, p.185-200, Apr. 1986.

Hundhausen, A. J., *The origin and propagation of coronal mass ejections*. In: International Solar Wind Conference, 6., Boulder, 1988. Proceedings. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 1988. p.181-214.

J. A. Simpson, W. Fonger, and S. B. Treiman, *Phys. Rev.*, 90, 934, 1953.

J. A. Lockwood, *Forbush decreases in the cosmic radiation*, *Space Sci. Rev.*, 12, 658, 1971.

Kamide, Y.; Baumjohann, W.; Daglis, I. A.; Gonzalez, W. D.; Grande, M.; Joselyn, J.A.; McPherron, R. L.; Phillips, J. L.; Reeves, E. G. D.; Rostoker, G.; Sharma, A. S.; Singer, H. J.; Tsurutani, B. T.; Vasyliunas, V. M.; *Current understanding of magnetic storms: storm-substorm relationships*. *J. Geophys. Res.*, v.103, n.A8, p.17705-17728, Aug. 1998.

K. Fujimoto, S. Yasue, N. Yahagi, A. Inoue, K. Murakami, M. Kodama, I. Kondo and K. Nagashima, *Coupling coefficients of the cosmic ray variation for underground meson telescopes*, Proc. of Internat. Cosmic Ray Symposium on High Energy Cosmic Ray Modulation, University of Tokyo, pp 60-65, 1976.

K. Fujimoto, A. Inoue, K. Murakami and K. Nagashima, *Coupling coefficients of the cosmic ray variation for meson telescopes*, Report of Cosmic-Ray Research Lab., No.9, Nagoya University, 1984.

K. Nagashima, and K. Fujimoto, *Enhancement of north-south anisotropy of cosmic ray during Forbush Decrease, associated with the enhancement of the interplanetary magnetic field component perpendicular to the ecliptic plane*, Proc. 23rd Internat. Cosmic Cosmic Ray Conf. (Calgary), 3, 719-722, 1993.

M. R. da Silva, D. B. Contreira, S. Monteiro, N. B. Trivedi, K. Munakata, T. Kuwabara and N. J. Schuch, *Cosmic ray muon observation at Southern Space Observatory – SSO (29°S, 53°W)*, **Astrophysics and Space Science** 290: 389-397, 2004.

Mendes Jr. A origem interplanetária e o desenvolvimento da fase principal das Tempestades Geomagnéticas Moderadas (1978-1979). São José dos Campos. 268p. (INPE – 5445 – TDI/491). Tese (Doutoramento em Ciência Espacial/Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1992.

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.

R. W. Schunk and A. F. Nagy; *Ionospheres- Physics, Plasma Physics, and Chemistry*, 2000.

Tsurutani, B. T.; Gonzalez, W. D.; *The interplanetary cause of magnetic storms: a review*. In: Tsurutani, B. T.; Gonzalez, W. D.; Kamide, Y.; Arballo, J. A. ed. Magnetic storms. Washington, DC: AGU, 1997. v.98, p.77-89.

W. H. Campbell; *Introduction to Geomagnetic Fields*, 1997



ANEXOS



ANEXO 1

PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

PROJETO DE PESQUISA

Nome do Orientador: Walter Demétrio Gonzalez-Alarcon
C.P.F.: 739.508.238-91

Nome do Bolsista: Jairo Francisco Savian

Título do Projeto: “Identificação das origens interplanetárias das Tempestades Geomagnéticas intensas ocorridas no período de 2002 a 2003”.

Palavras-chaves: Tempestades Geomagnéticas, Meio Interplanetário, Clima Espacial.

Área do conhecimento (de acordo com formulário CNPq): 1.07.02.00-8 Geofísica

Objetivos Específicos:

O objetivo principal deste projeto é identificar os tipos de estruturas interplanetárias que causaram as tempestades geomagnéticas durante o máximo do ciclo solar 23, ou seja, durante o período de 2002 a 2003, em continuação ao Projeto anterior. Durante este período houve observações de raios cósmicos pela rede de detectores de muons, da qual o Observatório Espacial do Sul passou a fazer parte desde 2001, as quais estão sendo usadas para a previsão da ocorrência destas tempestades geomagnéticas com elevada eficiência, podendo fornecer até 8 horas de alerta (Munakata et al., 2000). A identificação das estruturas interplanetárias que causaram as tempestades intensas neste período serão muito importantes para uma comparação futura com as observações de raios cósmicos (muons), permitindo verificar se há algum tipo preferencial de estrutura que pode ser detectada pela rede de detectores de muons. Este trabalho, portanto, fará parte de um grande projeto de estudo do Clima Espacial utilizando vários tipos de observações. Especificamente o aluno terá como objetivos: (1) familiarização com as estruturas observadas no meio interplanetário próximo à Terra, tais como ondas de choque, ejeções solares, nuvens magnéticas; (2) familiarização com as consequências geomagnéticas relacionadas a estas estruturas, tais como as Tempestades Geomagnéticas (Gonzalez e Tsurutani, 1987; Gonzalez et al., 1994; Gonzalez et al., 1999); (3) manipulação de dados oriundos de observações de satélites localizados no meio interplanetário, principalmente o ACE (*Advanced Composition Explorer*), que fornece dados de velocidade, densidade e temperatura do vento solar, e campo magnético do vento solar; (4) identificação de estruturas a partir destes dados, tais como ondas de choque, ejeções interplanetárias e nuvens magnéticas, para o período em torno máximo do ciclo solar 23 (1999 à 2002). Os dados interplanetário estão disponíveis através do sistema CDA (*Coordinate Data Annalysis*) do programa ISTP (*International Solar-Terrestrial Physics*), ao qual o INPE tem acesso.

Metodologia:

O aluno utilizará observações de índice Dst disponíveis no sitio da Universidade de Kyoto (Japão), que mede a intensidade da corrente de anel magnetosférica (Mendes Jr. 1992), para identificar as tempestades geomagnéticas mais intensas ocorridas ($Dst < -100$ nT) no período de 2002 a 2003. Em seguida o aluno utilizará os dados de observações do meio interplanetário, preferencialmente do satélite ACE, disponíveis no sistema CDA do ISTP, para identificar as estruturas interplanetárias relacionadas a estas

tempestades intensas. Para tanto o aluno fará uso de softwares de análise de dados como o IDL (*Interactive Data Language*, disponíveis no CRSPE/INPE).

Plano de trabalho do bolsista:

(1) estudo da literatura referente às estruturas interplanetárias causadoras de tempestades geomagnéticas, tais como as diversas teses e dissertações produzidas no grupo de pesquisa do orientador no INPE em São José dos Campos, SP; (2) obtenção dos dados do índice Dst para identificação das tempestades intensas ocorridas no período de estudo; (3) obtenção dos dados interplanetários referentes ao mesmo período; (4) confecção de gráficos dos parâmetros interplanetários; (5) análise dos dados para identificação de estruturas como ondas de choque e nuvens magnéticas interplanetárias, conforme descritos em trabalhos anteriormente publicados pelo grupo do orientador (Dal Lago, 1999); (6) elaboração de trabalhos da serem apresentados em congressos de iniciação científica.

Cronograma de atividades:

Espera-se que a cada 2 meses o aluno realize cada um dos itens acima descritos, podendo estender este trabalho por mais um ano conforme a profundidade da análise.

Resultados esperados:

(1) aprendizado por parte do aluno de conceitos físicos relacionados à física espacial em geral e à área específica da física da magnetosfera e do meio interplanetário; (2) confecção de gráficos com os parâmetros interplanetários e geomagnéticos das tempestades intensas ocorridas no período de 2002 a 2003; (3) identificação das estruturas interplanetárias causadoras das tempestades geomagnéticas neste período; (4) elaboração e apresentação de trabalho(s) em eventos de iniciação científica; (5) elaboração de relatórios parciais e final das atividades.

Referências Bibliográficas:

Dal Lago, A. **Estudo de nuvens magnéticas geofetivas no meio interplanetário**. São José dos Campos. 122p. (INPE – 7263 – TDI/705). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999.

Gonzalez, W. D.; e Tsurutani, B. T. Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ($Dst < -100$ nT). **Planet. Space Sci.**, v.35, n.9, p.1101-1109, jul. 1987.

Gonzalez, W. D.; Joselyn, J. A.; Kamide, Y.; Kroehl, H. W.; Rostoker, G.; Tsurutani, B. T.; e Vasyliunas, V. M. What is a magnetic storm?. **J. Geophys. Res.**, v.99, n.A4, p.5771-5792, Apr. 1994.

Gonzalez, W. D.; Tsurutani, B. T.; Clua de Gonzalez, A. L. Interplanetary origin of geomagnetic storms. **Space Sci. Rev.** v.88, p.529-562, 1999.

Mendes Jr. **A origem interplanetária e o desenvolvimento da fase principal das Tempestades Geomagnéticas Moderadas (1978-1979)**. São José dos Campos. 268p.

(INPE – 5445 – TDI/491). Tese (Doutoramento em Ciência Espacial/Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1992.

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.

ANEXO 2

TITULOS E RESUMOS DE TRABALHOS APRESENTADOS E OU SUBMETIDOS NO PERÍODO DE VIGÊNCIA DA BOLSA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA AGOSTO/2004 – JULHO/2005



Forbush decreases in November 6-20, 2004 observed by the Muon Detector Network

Jairo F. Savian^(1,2), Marlos R. da Silva⁽³⁾, Vânia F. Andrioli^(1,2), Alisson Dal Lago⁽³⁾, Ezequiel Echer⁽³⁾, Luis E. Antunes Vieira⁽³⁾, Kazuoki Munakata⁽⁴⁾, Galina I. Pugacheva⁽²⁾, John W. Bieber⁽⁵⁾, Walter D. Gonzalez Alarcon⁽³⁾, Nelson J. Schuch⁽²⁾.

⁽¹⁾ Santa Maria Space Science Laboratory, UFSM, Santa Maria, Brazil,

⁽²⁾ Southern Regional Space Research Center – INPE/MCT, Santa Maria, Brazil,

⁽³⁾ National Institute for Space Research, São José dos Campos, Brazil,

⁽⁴⁾ Physics Department, Faculty of Science, Shinshu University, Matsumoto, Japan,

⁽⁵⁾ Bartol Research Institute, University of Delaware, Newark, USA.

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11 – 14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

In this paper we study the relationship between Interplanetary Coronal Mass Ejections (ICMEs) and the count rate muon decrease detected by the muon detector network in November 6-20, 2004. The Muon Detector Network is composed by the detectors installed in Nagoya (Japan), Hobart (Australian) and the prototype detector installed in the "Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE-MCT", located in São Martinho da Serra, RS, Brazil. With the muons count rate observed by the Muon Detector Network, we will be able to observe, in the future, the direction in which a given ICME moves, and with that, we will be able to calculate the angle which they reach the Earth. Also, with this muon network, we will be able to send alerts of up to 12 hours before the arrival of a shock or an ICME. The Space Weather forecast method using cosmic rays will be a very important tool because it provides a forecast with good antecedence.

Introduction

Around solar maximum, the dominant interplanetary phenomena causing Intense Magnetic Storms ($Dst < -100$ nT) are the interplanetary manifestations of fast Coronal Mass Ejections (ICMEs). The primary cause of magnetic storms is associated with interplanetary structures with intense ($B_z \sim -10$ nT) and long-duration ($\Delta t \sim 3$ h) southward magnetic fields (IMF) which interconnect with the Earth's magnetic field and allow Solar Wind energy transport into the Earth's magnetosphere (Dungey, 1961; Bothmer and Schwenn, 1995; Gonzalez et al., 1994). This is schematically shown in Figure 1.

Energetic cosmic rays observed in ground-level detectors are also subject to modulation effects due to interplanetary disturbances such as shocks and ejecta associated with CMEs (Lockwood, 1971; Cane, 1993). A solar disturbance propagating away from the sun affects the pre-existing population of galactic cosmic rays in a number of ways. Figure 2 displays the large-scale structure of a fast ejecta and its associated shock. The CME shields the passage of cosmic rays. Analysis of

cosmic rays anisotropy ($\vec{B} \times \vec{\nabla} n$) with the IMF (\vec{B}) data measured by space probe yields the cosmic ray gradient

vector ($\vec{\nabla} n$), which contains valuable information about the large-scale structure and geometry of the ICME (Bieber and Everson, 1998). Geomagnetic Storm forecast is made with an antecedence of ~1 hour in the case of in-situ solar wind observations obtained from satellites in the Lagrangean point L1, and from 8 to 12 hours using the muon detector network (Munakata et al. 2000). The study of the parameters of the Interplanetary Medium and cosmic rays are important tools for the study of the Space Weather.

Data and Methodology of Analysis

The present work has as objective to present an analysis of the solar event of November 7, 2004 and November 9, 2004, studying data from the Interplanetary Medium to identify the interplanetary structures responsible for this intense Geomagnetic storm, where the Dst index reached peak negative values of -383 nT and -296 nT, respectively. We compared the observations done by the satellites located in the Lagrangian point, L1, and the decrease of the muons count rate by the Muon Detector Network.

The ring current Dst index was introduced in 1964 and it measures primarily the ring current magnetic field. It is based on hourly averages of the horizontal component recorded at four low-latitude observatories (Sugiura, 1964). Following the terminology of Sugiura and Chapman, great storms are those with peak Dst of -100 nT or less, moderate storms fall between -50 nT and -100 nT, and weak storms are those between -30 nT and -50 nT. All interplanetary and geomagnetic data were obtained via the internet, through the ISTEP data services, Coordinated Data Analysis Web and WDC-C2, Kyoto.

Interplanetary magnetic field (B , B_x , B_y , B_z) and plasma (solar wind velocity, proton density, proton temperature) data used in this study were observed by the ACE satellite (Advanced Composition Explorer), to analyze the cosmic ray response to these Geomagnetic Storms, cosmic rays observations from the Muon Detector Network (Munakata et al., 2000) were used. The objective is to show the characteristic of the decrease in the muon count rates related to the ICMEs that caused the Geomagnetic Storms of 7 and 9 November, 2004. This study will be important to help to understand the physical phenomena related to this aspect of the Space Weather.

Results and Discussion

In Figure 3 it is shown, from top to bottom, the Dst index and Count Rate of Muon Detector Network. Two severe Geomagnetic Storms were observed during the period. The first one reached -373 nT and the second one -289 nT in the Dst index. The start of the first Geomagnetic Storm was in November 7th, 2004. One can see a gradual decrease in the Count Rate of the Robart Muon Detector of approximately 8%, starting before the shock arrival, while in the other detectors, decreases were observed after the shock, more abruptly, probably caused for a intense magnetic field of the magnetic cloud. In the second Geomagnetic Storm in November 9, 2004, one can see the biggest decrease in Nagoya Muon Detector, of about 18%, while in the other detectors less intense decreases were observed during the shock passage, probably caused for intense magnetic field of the magnetic cloud. Nevertheless the decrease observed in the Sao Martinho detector was about 4%. In Figure 4, the parameters of interplanetary medium are shown, where one can identify the signature of the geomagnetic storm: B_z in south direction of -50 nT, in the first Geomagnetic Storm; and B_z equal -30 nT in second Geomagnetic Storm.

Summary

In this work we studied the count rate decreases observed by the muon detector network during two November 2004 magnetic storms. These decreases probably occur due to intense magnetic field of magnetic cloud structures within the ICMEs, or within the turbulent magnetic field between the shock and the magnetic cloud, also known as sheath field. The Muon Detector Network covers nearly all meridians and is efficient for detecting different decrease responses in different longitudes in the count rate of the muons of high energy (~ 50 GeV). In the near future, the muon detector network will be a very important tool for Space Weather forecasting.

References

- Bieber, J. W. and Everson, P.:** 1998, *Geophys Res Lett.* 25, 2955-2958.
- Burlaga, L. F.;** *Interplanetary magnetohydrodynamics.* New York: Oxford University Press, 1995, 256p.
- Bothmer, V. and Schwenn, R.,** 1995, *J. Geomag. Geoelectr.* 47, 1127.
- Cane H. V.,** Cosmic ray decreases and magnetic clouds, *J. Geophys. Res.*, 98, 3509–3512, 1993.
- Chapman, S.,** Earth Storms; retrospect and prospect, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 17, 6, 1962.

Da Costa, A.M.; Mendes Junior, O. Anomalia Magnética do atlântico sul e a radiação cósmica sobre a costa do Brasil. *Revista Scientific American Brasil*, São Paulo, Ano 2, n. 23, p. 20-29, Abril de 2004.

Da Silva, M. R., Contreira, D. B., Monteiro S., Trivedi N. B., Munakata K., Kuwabara T. and Schuch N. J., Cosmic Ray Muon Observation at Southern Space Observatory – SSO (29°S, 53°W), *Atrophysical and Space Science*, 290: 398 – 397, 2004.

Dal Lago. A. Estudo de nuvens magnéticas geofetivas no meio interplanetário. 1999. 112 p. (INPE-7263-TDI/705. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, 1999.

Dungey, J. W., 1961, *Phys. Ver. Lett.* 6, 47.

Gonzalez, W.D; Tsurutani, B.T. Criteria of interplanetary causing intense magnetic storms (Dst<-100nT). *Planet Space Sci*, v.35, n.9, p.1101-1109, Jul.1987.

Gonzalez, W. D.; Tsurutani, B. T.; Clua de Gonzalez, A. L. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Sci. Rev.* v.88, p.529-562, 1999.

Gonzalez, W. D.; Joselyn, J. A.; Kamide, Y.; Kroehl, H. W.; Rostoker, G.; Tsurutani, B. T. and Vasylunas, V. M. What is a magnetic storm?. *J. Geophys. Res.*, v.99, n.A4, p.5771-5792, Apr. 1994.

Lockwood, J. A. 1971, *Space Sci. Rev.*, 12, 658

Munakata, K.; Bieber, J.W.; Yasue S.I; Kato C.; Koyama M.; Akahane, S.; Fujimoto, K.; Fujii, Z.; Humble, J.E. and Duldig, M. L., Precursors of geomagnetic storms observed by the muon detector network, *J. Geophys. Res.*, v. 105, n. 27, p. 457, 2000.

Russell, C. T.; Kivelson, M. G. *Introduction to Space Physics*, 1. ed. Los Angeles: Cambridge University Press, 1995.

Sugiura, M.; 1964, Hourly values of equatorial Dst for the IGY, *Annual International Geophysical Year*, V. 35, p. 9, Pergamon, New York.

Acknowledgements

Thanks to Word data Center for Geomagnetism – Kioto for the Dst index, to the International Solar-Terrestrial Physics Project, through ACE teams for high-resolution solar wind data. We thank the group of research workers at the Space Weather Laboratory, to Shinshu University for technical support and also to the “Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico” (CNPq), of Brazil, for the financial support. The author would also like to acknowledge “Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo” – FAPESP, of Brazil, for supporting this work, under the project 02/12723-2.

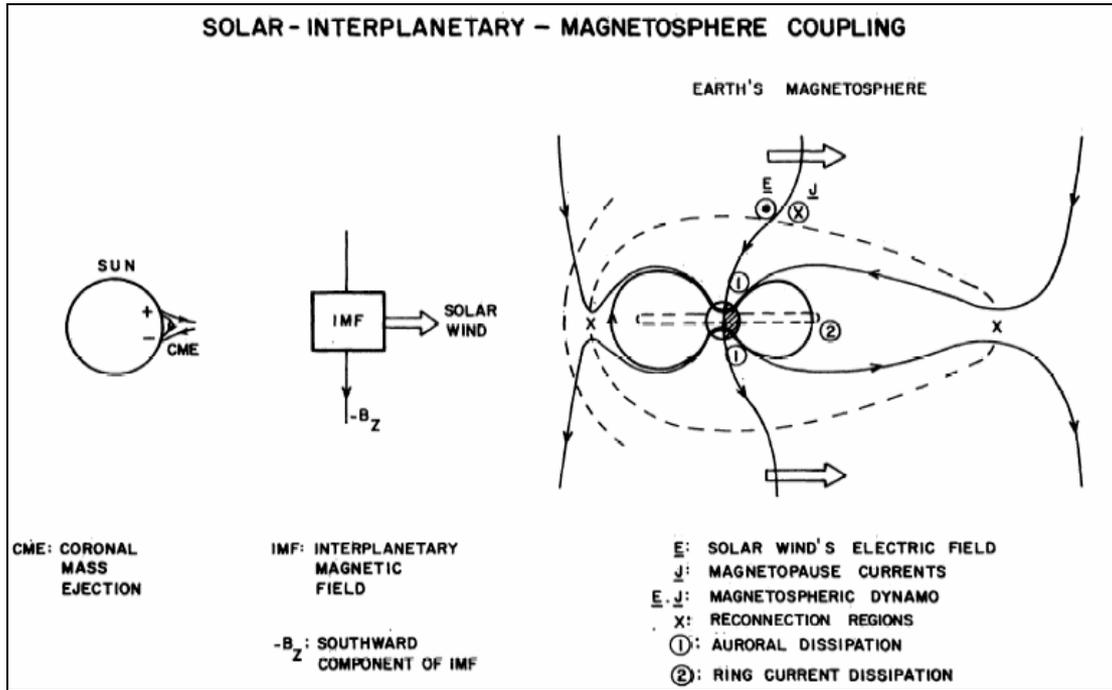


Figure 1 – Schematic of interplanetary-magnetosphere coupling, showing the reconnection process and energy injection into the nightside magnetosphere, which leads to the formation of the storm-time ring current (Gonzalez and Tsurutani, 1992).

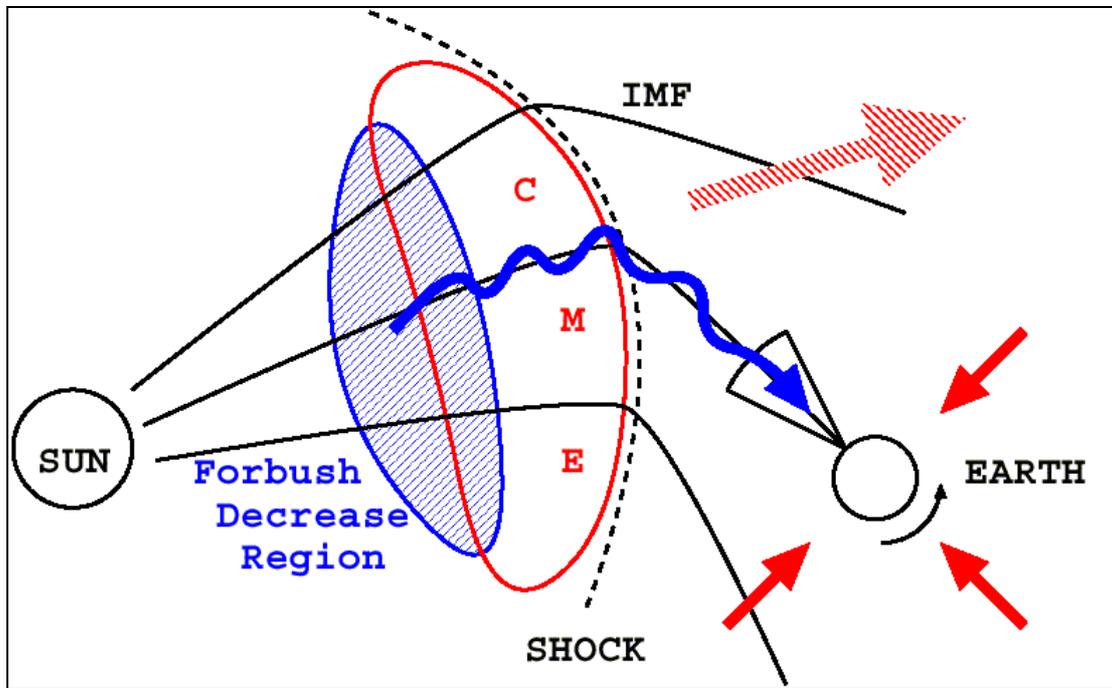


Figure 2 – Schematic figure illustrating the cosmic ray shielding effect (Ruffolo and Nagashima, 1999).

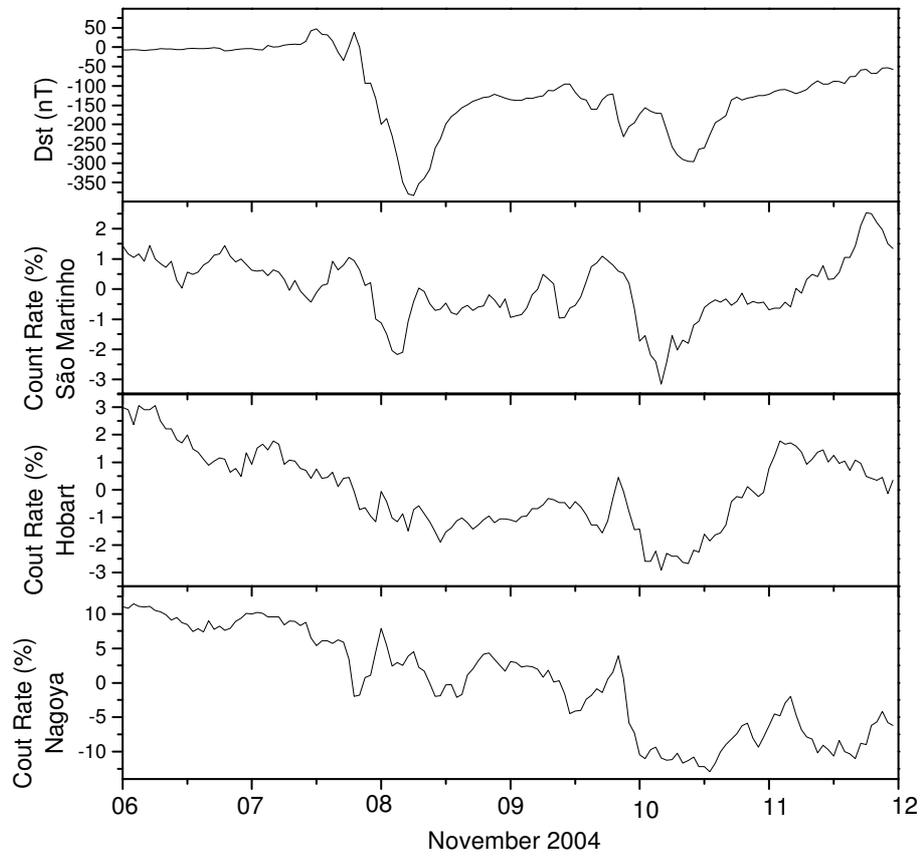


Figure 3 – Dst index and Count Rate of three Muon Detector Network stations: São Martinho da Serra, Hobart, and Nagoya.

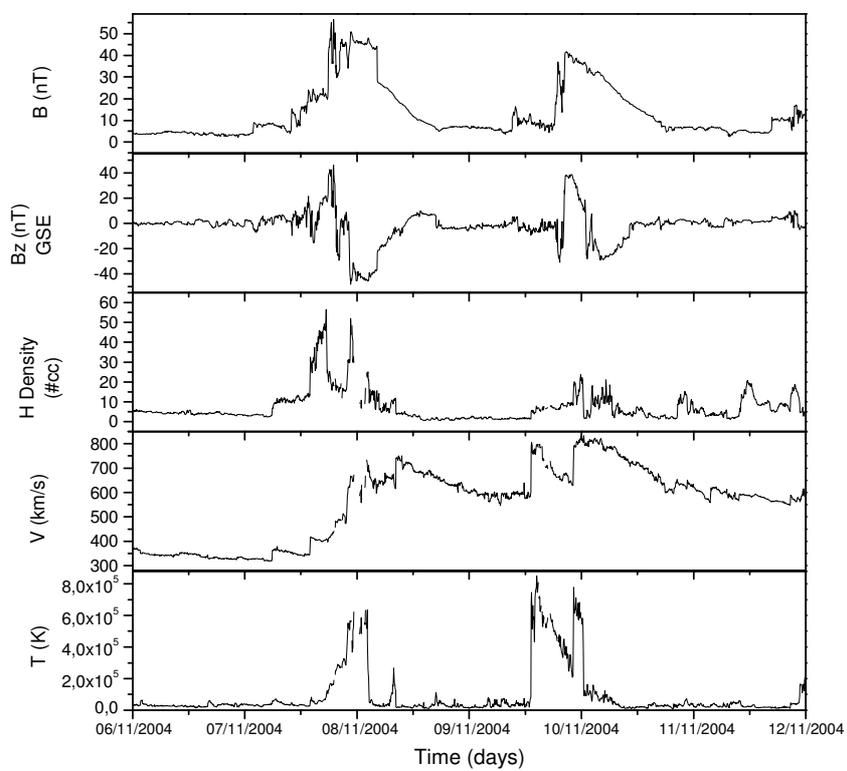


Figure 4 – Interplanetary magnetic field intensity and its B_z component, and plasma parameters observed by the ACE satellite from 6 to 12 of November 2004.



São Paulo 2004

Previsão de Tempestades Geomagnéticas Intensas através da observação de raios cósmicos e de componentes do Meio Interplanetário.

Jairo Francisco Savian^(1,2), Marlos Rockenbach da Silva⁽³⁾, Vânia Fátima Andrioli^(1,2), Marcos Roberto Signori^(1,2), Alisson Dal Lago^(3,4), Ezequiel Echer⁽³⁾, Luis Eduardo Antunes Vieira^(3,4), Kazuoki Munakata⁽⁵⁾, Walter Demétrio Gonzalez Alarcon⁽³⁾, Nelson Jorge Schuch⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – Santa Maria – RS, Brasil – Contato: savian@lacsme.ufsm.br

⁽²⁾ Universidade Federal de Santa Maria – Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – Santa Maria, RS, Brasil;

⁽³⁾ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Divisão de Geofísica Espacial – São José dos Campos – SP, Brasil;

⁽⁴⁾ Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP - SP, Brasil;

⁽⁵⁾ Physics Dept., Shinshu University, Nagano, JAPAN.

Copyright 2004, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no I Simpósio de Geofísica da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo, 26-28 de setembro de 2004. Seu conteúdo foi revisado pela Comissão Tecno-científica do I SR-SBGf mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

Acredita-se que o mecanismo físico responsável pela transferência de energia do Vento Solar para a Magnetosfera seja a reconexão entre o Campo Magnético Interplanetário e o Campo Magnético Terrestre - Tsurutani e Gonzalez, 1997. O critério necessário para que ocorra uma Tempestade Geomagnética Intensa, $Dst < -100nT$, é o de haver um Campo Elétrico Interplanetário, na direção do anoitecer, maior que $5mV/m$, por um período maior que 3 horas. O objetivo do trabalho é comparar a previsão de Tempestades Geomagnéticas feita por satélites localizados no ponto Lagrangeano - L_1 , e a Rede Internacional de Detectores de Muons, mostrando as vantagens e desvantagens de cada um.

Introdução

A cada 11 anos o Sol passa por um período de intensa atividade magnética denominado de Máximo Solar, apresentando um maior número de instabilidade as quais liberam grandes quantidades de matérias na forma de Ejeções Coronais de Massa - CME. Estas manifestações de intensa atividade atingem o Meio Interplanetário e os planetas causando as chamadas Tempestades Geomagnéticas. Um parâmetro importante para desenvolvimento das tempestades é a componente "Z" do Campo Magnético Interplanetário – CMI, quando sua

direção é antiparalela ao Campo Magnético da Terra na região equatorial ocorre a chamada reconexão magnética, acontecendo um transporte efetivo de energia para a Magnetosfera ocasionando um aumento da densidade de partículas que circundam a Terra. Estes distúrbios solares afetam a população de raios cósmicos galácticos pré-existentes de várias maneiras. A mais conhecida é o "decréscimo de "Forbush", uma região de supressão da densidade de raios cósmicos localizadas atrás de um choque devido a uma Ejeção Coronal de Massa (Figura 1). Dentro da região atrás do choque, anisotropias de gradiente ($B \nabla n$) produzem fluxos de partículas perpendiculares ao campo magnético. Análises destas anisotropias permitem obter o vetor de gradiente de raios cósmicos, o qual contém informações valiosas sobre a estrutura de grande escala e a orientação da ejeção solar. Além disso, na região atrás da onda de choque, fluxos bidirecionais de raios cósmicos podem ser usados como delimitadores da presença de uma ejeção. Os efeitos mais conhecidos causados pelas Tempestades Geomagnéticas são: intensificação de correntes elétricas no espaço e na superfície terrestre, ocorrência de auroras nos pólos, aceleração de partículas carregadas, e diversos prejuízos em satélites causando danos no Sistema de Posicionamento Global – GPS, em telecomunicações e até mesmo em astronautas que se encontram em naves espaciais devido a alta radiação emitida. A previsão das Tempestades Geomagnéticas é feita com uma antecedência de duas horas no caso dos satélites e de oito a doze horas utilizando a Rede Internacional de Detectores de Muons.

Metodologia/ Problema Investigado.

O presente trabalho tem por objetivo apresentar uma análise do evento solar do dia 20 de novembro de 2003.

Analisamos dados do Meio Interplanetário e o estudo das estruturas interplanetárias responsáveis por esta Tempestade Geomagnética Intensa, onde o índice Dst atingiu um valor de -472 nT, sendo uma das maiores Tempestades Geomagnéticas da história. Comparamos a previsão feita pelos satélites localizados no ponto Lagrangeano, L₁, e o decréscimo da contagem de muons feita pela Rede Internacional de Detectores de Muons. Os eventos são analisados através de observações do índice Dst disponíveis no sítio da Universidade de Kyoto – Japão, que mede a corrente de anel magnetosférica (Mendes Jr., 1992), para identificar as tempestades mais intensas. Em seguida analisamos dados de observações do Meio Interplanetário, preferencialmente do satélite ACE, disponíveis no sistema CDA – Coordinate Data Analysis, do Programa ISTP – International Solar-Terrestrial Physics. Para analisar as estruturas responsáveis pelas Tempestades Geomagnéticas foram utilizados raios cósmicos observados através da Rede Internacional de Detectores de Muons, estudadas por Munakata et al. (2000). O problema investigado é mostrar que é possível prever as Tempestades Geomagnéticas com uma antecedência de uma a duas horas no caso dos satélites e oito a doze horas no caso da Rede Internacional de Detectores de Muons. Desse modo, faz-se necessário um sistema integrado, coletando e analisado dados sobre o espaço, de forma rápida, precisa e confiável para entender os fenômenos físicos relacionados ao Clima Espacial e amenizar os danos tanto econômicos, quanto à vida.

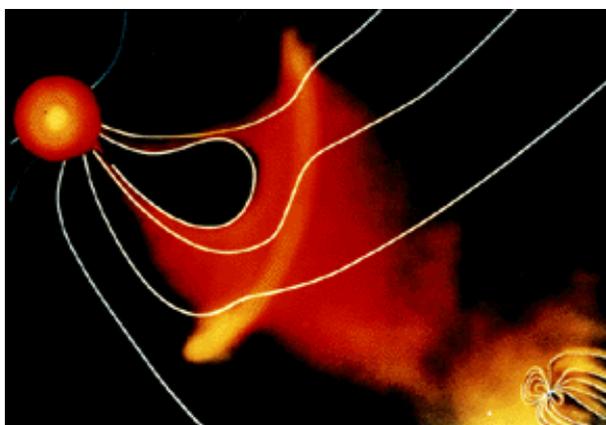


Figura 1 – Interação Sol-Terra mostrando uma Ejeção Coronal de Massa em direção à Terra, uma das causas das tempestades Geomagnéticas. Fonte: www.nasa.gov

Resultados

Às 18:48 UT observa-se no disco solar uma explosão – “flare” – muito intensa e localizada próximo ao meridiano central do Sol, o que alertou para a possível ocorrência de uma Tempestade Magnética na Terra. A Figura 2 mostra a imagem do instrumento EIT do satélite SOHO, que observa o Sol em comprimentos de onda do

ultravioleta extremo (195 Angstroms), e mostra o momento de máxima emissão desta explosão.

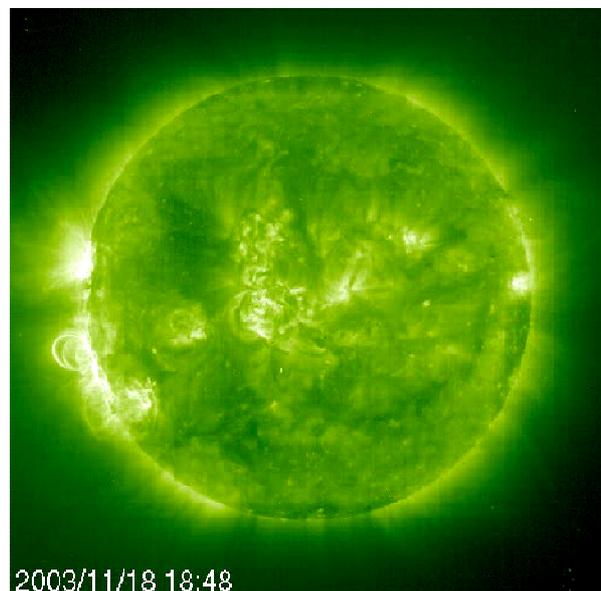


Figura 2 – Flare solar observado em 18/11/2003 pelo satélite SOHO. Fonte: <http://star.mpae.gwdg.de>

Acompanhando esta explosão, observou-se uma Ejeção Coronal de Massa, através do instrumento LASCO (ver Figura 3), e do satélite SOHO. Esse instrumento oculta o disco solar fazendo um eclipse artificial, permitindo a observação detalhada da coroa solar. Essa ejeção apresentou sob a forma de um “halo” ao redor do Sol, indicando estar sendo ejetada na direção da Terra.

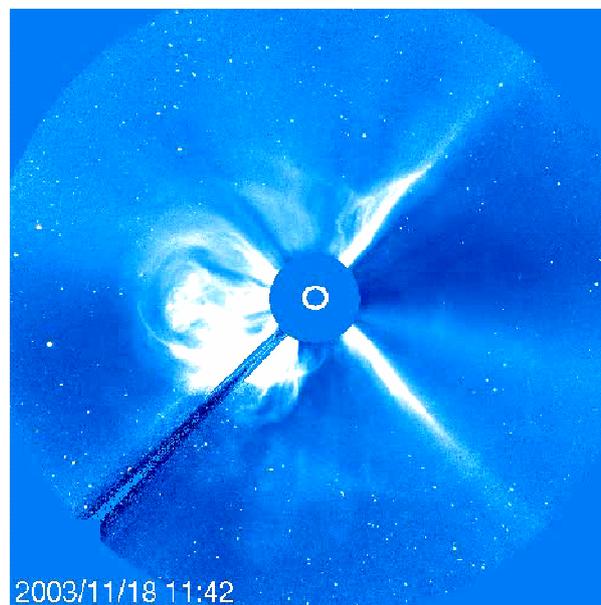


Figura 3 – Ejeção Coronal de Massa tipo halo, observado pelo instrumento LASCO a bordo do satélite SOHO. Fonte: <http://star.mpae.gwdg.de>

Observando o decréscimo do índice Dst, observou-se este evento como sendo a maior Tempestade Geomagnética do Máximo Solar 23, e uma das maiores da história, atingindo um pico de -472 nT (Figura 4).

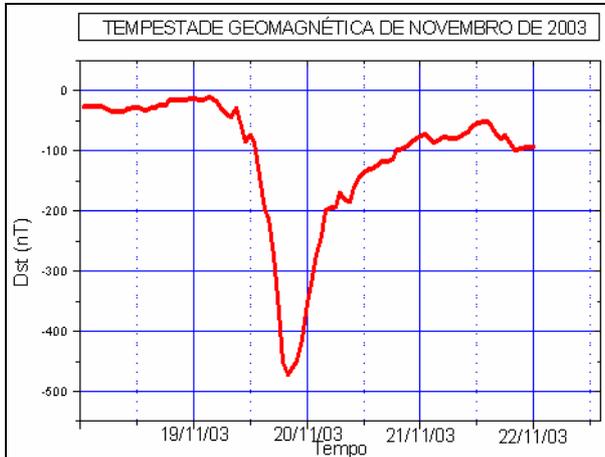


Figura 4 – Índice Dst de 18 à 22 de Novembro de 2003.

No dia 20 de Novembro de 2003 o Telescópio Detector Multidirecional de Muons do Observatório Espacial do Sul OES/CRSPE/INPE-MCT, em São Martinho da Serra, RS, observou um decréscimo na contagem de muons. Este decréscimo foi causado pela Ejeção Coronal de Massa do dia 18 de Novembro de 2003, que devido a onda de choque formada obstruiu a passagem de raios cósmicos. A contagem total do Telescópio Multidirecional Detector de muons do Observatório Espacial do Sul, apresentado no topo da Figura 5, apresenta um decréscimo súbito causado pela onda de choque da Ejeção Coronal de Massa e nos pequenos gráficos abaixo mostra as direções em que se desloca a estrutura. Este decréscimo ocorreu aproximadamente às 21:00 UT.

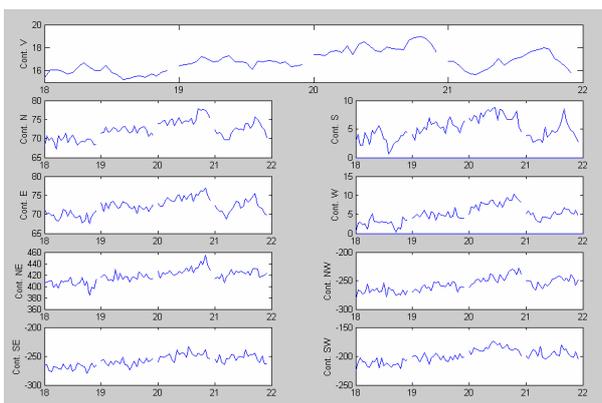


Figura 5 – Decréscimo da contagem de muons do dia 20 de Novembro de 2003.

Dados do satélite ACE – Advanced Composition Explorer – mostram esta chegada, conforme podemos ver na figura 6, que apresenta observações das vizinhanças da

Terra, nos dias 19 à 22 de Novembro de 2003. No painel superior está mostrado o campo magnético, o qual tipicamente apresenta valores de 5 nT em períodos calmos, e quando a frente passou após as 6 horas do dia 21, apresentou valores da ordem de 50 nT. Neste mesmo gráfico, mostra-se, em vermelho, a curva de uma das componentes do campo magnético, a que é a principal responsável pela ocorrência ou não de uma Tempestade Geomagnética na Terra. Quando seu valor for negativo, forma-se uma Tempestade Geomagnética.

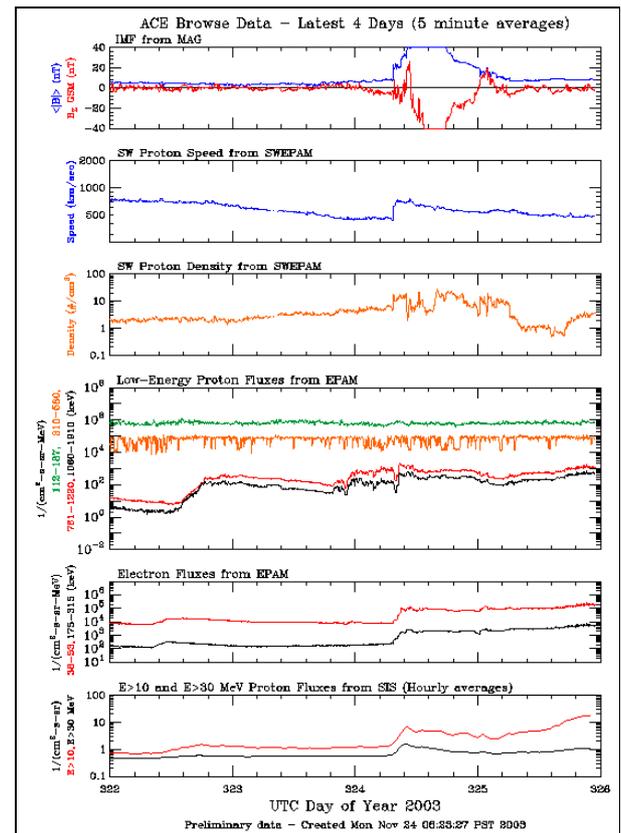


Figura 6 – Dados do satélite ACE. Fonte: http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/browse-plots/4day_plot_archive/

Discussão e Conclusões

Após fazermos uma análise completa da Tempestade Geomagnética do dia 20 de Novembro de 2003, analisando dados do Meio Interplanetário e de raios cósmicos (muons) vimos a eficiência da utilização da Rede Internacional de Telescópios do Detectores de Muons, devido a sua antecedência na previsão de Tempestades Geomagnéticas em relação a satélites. Também a fácil manutenção por estar localizada na superfície de Terra, ao contrário dos satélites. No evento do dia 20 de outubro de 2003 prevemos a chegada de uma tempestade com uma antecedência de aproximadamente 9 horas com o Telescópio

Multidirecional Detector de Muons e de 2 horas no caso dos satélites. O monitoramento contínuo destes parâmetros faz-se necessário para que possamos entender melhor os fenômenos do Meio Interplanetário, o que poderia salvar vários sistemas tecnológicos espaciais ou terrestres.

RUSSELL, Christopher T.; KIVELSON, Margaret G. **Introduction to Space Physics**, 1. ed. Los Angeles: Cambridge University Press, 1995.
UNIVERSITY OF CALIFORNIA.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Dr. Kazuoki Munakata por disponibilizar os dados da Rede Internacional de Telescópios Multidirecionais Detectores de Muons para que fossem analisados e ao pessoal de operação das missões ACE, WINS, IMP-8, bem como ao pessoal de operação de Universidade de Kyoto, por fornecerem os dados interplanetários e de superfície utilizados neste trabalho. Dados do Campo Magnético Interplanetário. Os autores gostariam igualmente de agradecer ao Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT e ao programa PET/UFMS – CAPES/MEC pelas bolsas de iniciação científica, e à FAPESP pelos Programas de Pós-Doutoramento, processos 02/14150-0 e 02/12723-2.

Referências

BURLAGA, L. F.; *Interplanetary magnetohydrodynamics*. New York: Oxford University Press, 1995, 256p.

BRANT, J. C.; *Introduction to the solar wind*. San Francisco: W. H. Freeman, 1970. 216p.

COSTA, A.M.da; MENDES JUNIOR, O. Anomalia Magnética do atlântico sul e a radiação cósmica sobre a costa do Brasil. **Revista Scientific American Brasil**, São Paulo, Ano 2, n. 23, p. 20-29, Abril de 2004.

DAL LAGO, A. **Estudo de nuvens magnéticas geoefetivas no meio interplanetário**. 1999. 112 p. (INPE-7263-TDI/705. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, 1999.

GONZALEZ, W.D; TSURUTANI, B.T. Criteria of interplanetary causing intense magnetic storms(Dst<-100nT). **Planet Space Sci**, v.35, n.9, p.1101-1109, Jul.1987.

GONZALEZ, W. D; TSURUTANI, B. T; CLUA de GONZALEZ, A. L. Interplanetary origin of geomagnetic storms. **Space Sci. Rev.** v.88, p.529-562, 1999.

GONZALEZ, W. D.; JOSELYN, J. A.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B. T.; E VASYLIUNAS, V. M. What is a magnetic storm?. **J. Geophys. Res.**, v.99, n.A4, p.5771-5792, Apr. 1994.

MUNAKATA, K., BIEBER, J.W., YASUE S.I, KATO C., KOYAMA M., AKAHANE, S., FUJIMOTO, K., FUJII, Z., HUMBLE, J.E. e M. L. Duldig, Precursors of geomagnetic storms observed by the muon detector network, **J. Geophys. Res.**, v. 105, n. 27, p. 457, 2000.

ANÁLISE DE TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS SUPER INTENSAS ATRAVÉS DA OBSERVAÇÃO DE RAIOS CÓSMICOS E DE ESTRUTURAS DO MEIO INTERPLANETÁRIO

ANALYSIS OF SUPER INTENSE GEOMAGNETIC STORMS USING COSMIC RAYS AND INTERPLANETARY OBSERVATIONS

ABSTRACT

It is believed that the physical mechanism responsible for the transference of energy from the solar wind to the Earth magnetosphere is the reconnection between the interplanetary magnetic field and the terrestrial magnetic field (Tsurutani and Gonzalez, 1997). The necessary criterion for a Intense Geomagnetic Storms to occur, $Dst < -100nT$, is the existence of a dawn-dusk interplanetary electric field larger than 5 mV/m, for a period larger than 3 hours. Cosmic rays have been studied as a natural phenomenon that can tell us much about both Earth's environment in space and distant astrophysical processes (Suess et al., 2000). A solar disturbance propagating away from the Sun affects the pre-existing population of galactic cosmic rays in a number of ways. For instance, analysis of cosmic ray anisotropy ($\vec{B} \times \vec{\nabla}n$) with the IMF (\vec{B}) data measured by space probe yields the cosmic ray gradient vector ($\vec{\nabla}n$), which contains valuable information about the large-scale structure and geometry of the CME (Bieber and Everson, 1998). The objective of this work is to study super intense geomagnetic storms using observation provided by L_1 satellites and by the ground detector network.

Keywords: interplanetary medium, cosmic rays, Muon Detector Network, forbuch decreases, space weather forecasting, magnetic storms prediction.

RESUMO

Acredita-se que o mecanismo físico responsável pela transferência de energia do vento solar para a magnetosfera terrestre seja a reconexão entre o campo magnético interplanetário e o campo magnético terrestre (Tsurutani e Gonzalez, 1997). O critério necessário para que ocorra uma Tempestade Geomagnética Intensa, $Dst < -100nT$, é o de haver um campo elétrico interplanetário, na direção do anoitecer, maior que 5 mV/m, por um período maior que 3 horas. Raios cósmicos são fenômenos naturais que podem nos contar muito sobre a vizinhança da Terra, espaço e processos astrofísicos distantes (Suess et al., 2000). As estruturas solares que se propagam no meio interplanetário afetam a população pré-existente de raios cósmicos galácticos de várias maneiras. Por exemplo, análise da anisotropia de raios cósmicos ($\vec{B} \times \vec{\nabla}n$) juntamente com o campo magnético interplanetário (\vec{B}) medido por sondas no espaço fornece o vetor de gradiente de raios cósmicos ($\vec{\nabla}n$), que contém valiosa informação sobre a ampla estrutura e geometria da CME (Bieber e Everson, 1998). O objetivo deste trabalho é estudar Tempestades Geomagnéticas Super Intensas usando observações feitas por satélites localizados no ponto Lagrangeano L_1 , e pela Rede Internacional de Detectores de Muons (de solo).

Palavras-chave: meio interplanetário, raios cósmicos, Rede Internacional de Detectores de Muons, decréscimo de "Forbuch", Clima Espacial, previsão de Tempestades Geomagnéticas.

INTRODUÇÃO

A cada 11 anos o Sol passa por um período de mínima e outro de máxima atividade magnética, sendo este último denominado Máximo Solar, apresentando um maior número de instabilidade as quais liberam grandes quantidades de matérias na forma de Ejeções Coronais de Massa (do inglês: *Coronal Mass Ejection* - CME). Estas manifestações de intensa atividade atingem o meio interplanetário e os planetas causando as chamadas Tempestades Geomagnéticas proporcionando um transporte efetivo de energia para a magnetosfera culminando em um aumento na densidade de partículas que circundam a Terra. Estes distúrbios solares afetam a população de raios cósmicos galácticos pré-existentes de várias maneiras. A mais conhecida é o “decréscimo de “Forbush”, uma região de supressão da densidade de raios cósmicos localizadas atrás de um choque devido a uma Ejeção Coronal de Massa. Análises destas anisotropias permitem obter o vetor gradiente de raios cósmicos, o qual contém informações valiosas sobre a estrutura de grande escala e a orientação da ejeção solar. Os efeitos mais conhecidos causados pelas Tempestades Geomagnéticas são: intensificação de correntes elétricas na magnetosfera e na superfície terrestre, ocorrência de auroras nas regiões polares, aceleração de partículas carregadas, e diversos prejuízos em satélites causando danos no Sistema de Posicionamento Global (GPS) em telecomunicações e até mesmo em astronautas que se encontram em naves espaciais devido a alta radiação emitida. A previsão das estruturas solares que podem causar as Tempestades Geomagnéticas é feita com uma antecedência de até uma hora no caso dos satélites e de oito a doze horas utilizando a Rede Internacional de Detectores de Muons.

Tempestades Geomagnéticas

Tempestades Geomagnéticas são eventos onde uma grande quantidade de energia se transfere do vento solar para o campo magnético terrestre, havendo precipitação de partículas energéticas do vento solar nas regiões aurorais, intensificando as correntes elétricas da magnetosfera e da superfície da Terra, tendo recebido esta denominação desde a metade do século XIX (Gonzalez et al., 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 et al., 1998). O decréscimo é devido a um aumento da população de partículas aprisionadas na Magnetosfera. Derivas devidas ao gradiente do campo magnético e a sua curvatura produzem a chamada “Corrente de Anel”.

A Corrente de Anel é gerada pelo movimento de partículas eletricamente carregadas, os íons de leste para oeste e os elétrons de oeste para leste, em torno da Terra devido a distribuição de partículas injetadas e aprisionadas na magnetosfera interna. A perturbação do campo geomagnético gerada por essa corrente reflete a condição do campo magnético interplanetário (do inglês: *Interplanetary Magnetic Field* - CMI) que controla o suprimento de energia para o interior da magnetosfera (Akasofu e Chapman, 1972; Burton et al., 1975; Nishida, 1978; Lyons e Willians, 1984).

Acredita-se que o mecanismo físico responsável pela transferência de energia do vento solar para a magnetosfera seja a reconexão entre o campo magnético interplanetário e o campo magnético terrestre (Tsurutani e Gonzalez, 1997). Para que aconteça este fenômeno é necessário que a componente do CMI esteja na direção antiparalela a do campo magnético terrestre (Figura 1). O critério necessário para que ocorra uma Tempestade Geomagnética intensa, $Dst < -100nT$, é o de haver um campo

elétrico interplanetário, $\vec{E} = \vec{V} \times \vec{B}_s$, na direção do anoitecer, maior que 5 mV/m, por um período maior que 3 horas. Esse critério foi empiricamente definido por Gonzalez e Tsurutani (1987) com dados de plasma e campo magnético obtidos pelo satélite ISEE-3, e implica em um campo magnético B_s maior que 12,5 nT para uma velocidade do vento solar de aproximadamente 400 km/s.

Anisotropia precursora do cone de perdas

Enquanto a relação entre Ejeções Coronais de Massa (CME) e decréscimos “Forbush” de raios cósmicos está bem estabelecida (Cane 1993; Cane et al. 1994; 1996), é menos reconhecido que decréscimos de raios cósmicos são freqüentemente acompanhados por fortes crescimentos da sua anisotropia (Lockwood 1971; Duggal & Pomerantz 1976; Nagashima & Fujimoto 1993), alguns dos quais se estendem a regiões à frente das ondas de choque que está se aproximando. Tais anisotropias precursoras fornecem um mecanismo chave através do qual informação acerca da presença de um distúrbio pode ser transportada para localidades remotas. Devido ao fato de raios cósmicos serem rápidos e possuírem grande livre caminho médio no vento solar, esta informação é transportada rapidamente sendo útil para a previsão do Clima Espacial.

Anisotropias precursoras têm sido geralmente interpretadas como sendo efeitos cinéticos relacionados à interação dos raios cósmicos ambientes com uma onda de choque se aproximando (Nagashima et al. 1994; Morishita et al. 1997; Bieber & Evenson 1998; Ruffolo et al. 1999; Belov et al. 2001). Decréscimos precursoros podem ser resultados de um efeitos de “cone de perdas” (Figura 2), no qual a estação esta magneticamente conectada à região de decréscimo de raios cósmicos à frente

da onda de choque. Aumentos precusores podem ser resultados de partículas que receberam uma pequena injeção de energia por

reflexão na onda de choque que está se aproximando (Dorman et al. 1995).

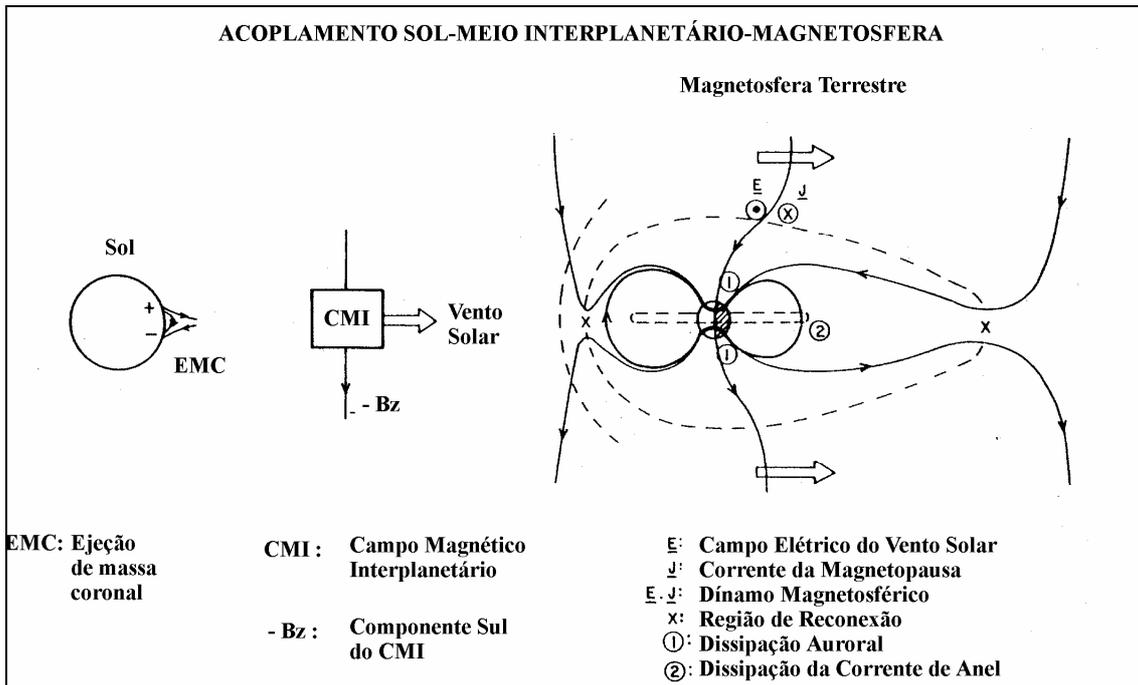


Figura 1 – Esquema do acoplamento Sol, Meio Interplanetário e Magnetosfera Terrestre. Demonstração do processo de reconexão e injeção de energia para dentro da Magnetosfera, o qual conduz a intensificação da Corrente de Anel (Gonzalez e Tsurutani, 1992).

Figure 1 – Schematic view of interplanetary medium-magnetosphere coupling, showing the reconnection process and energy injection into the nightside magnetosphere, which lead to the formation of the storm-time ring current (Gonzalez and Tsurutani, 1992).

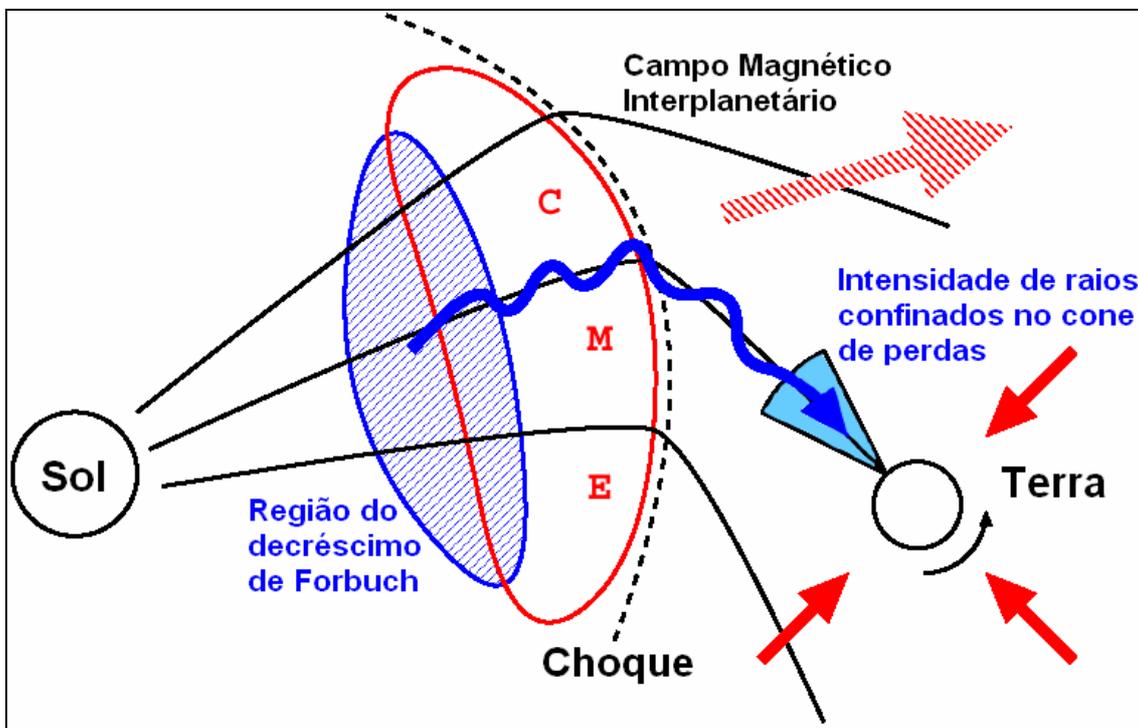


Figura 2 – Figura esquemática do efeito de cone de perdas (Modificado de Rufolo, 1999).

Figure 2 – Schematic figure of the loss-cone precursor effect (Modified of Rufolo, 1999).

Previsão do Clima Espacial utilizando raios cósmicos

Devido ao grande número de detectores de solo que podem ser usados, como os monitores de nêutrons (Simpson et al. 1953) e os detectores de muons (Fujimoto et al. 1976; 1984) continuam sendo os ideais para medir raios cósmicos com energia $> 1\text{GeV}$. Estes instrumentos são excelentes para a detecção de minúsculas variações temporais do fluxo de raios cósmicos e para medir as pequenas anisotropias direcionais típicas dos raios cósmicos. Seus intervalos de energia são complementares às energias dos detectores de fluxos de raios cósmicos espaciais.

Há várias razões pelas quais partículas com estas energias são interessantes da perspectiva do Clima Espacial. Primeiro, elas viajam a velocidades próximas à da luz. Partículas de raios cósmicos que interagem com uma onda de choque em uma Ejeção Coronal de Massa (CME) e escapam para a parte frontal dessas estruturas, viajarão mais rapidamente que o choque, trazendo o alerta da chegada desta estrutura com antecedência. Segundo, as partículas têm um grande livre caminho médio. Isto é importante porque assinaturas precursoras da chegada de um distúrbio seriam apagadas devido ao espalhamento em escalas maiores que o livre caminho médio. Terceiro, as partículas têm raio de Larmor muito grande em comparação com a magnetosfera da Terra, mas são menores ou da mesma ordem do tamanho do distúrbio. Por exemplo, a energia típica de um monitor de nêutrons é 10 GeV correspondendo a um raio de Larmor de 0,02 Unidades Astronômicas em um campo magnético de 10 nT. A energia típica de um monitor de muons é 50 GeV, correspondendo a um raio de Larmor de 0,1 UA para um campo de 10 nT. Isto é importante porque significa que anisotropias cinéticas tais como a anisotropia ($B \times \nabla n$) correspondem a estruturas de larga escala no vento solar perturbado.

MATERIAL E MÉTODOS

A frequência de ocorrência de Tempestades Geomagnéticas Super Intensas ($\text{Dst} < -200\text{nT}$) não é muito grande, variando de anos sem nenhum evento, a anos com cerca de 3 eventos (Tsurutani et al., 1992; Dal Lago et al. 2004). O presente trabalho tem por objetivo apresentar uma análise de 3 eventos solar-interplanetário-geomagnéticos super intensos que ocorreram no ano de 2003. Para a realização do trabalho foram escolhidas estruturas interplanetárias com maior geofetividade com o intuito de entender o comportamento dos raios cósmicos frente a estas estruturas e comparar os diferentes métodos de previsão. Para a análise dos dados, primeiramente utilizou-se observações de índice Dst disponíveis no sítio da Universidade de Kyoto (Japão), que mede a intensidade da corrente de anel magnetosférica (Mendes Jr. 1992), para identificar as Tempestades

Geomagnéticas mais intensas ($\text{Dst} < -200\text{ nT}$) ocorridas no ano de 2003.

Analisamos dados de campo magnético e de plasma do meio interplanetário e o estudo das estruturas interplanetárias responsáveis por estas Tempestades Geomagnéticas Super Intensas ($\text{Dst} < -200\text{ nT}$). Comparamos os parâmetros do meio interplanetário que são medidos pelo satélite ACE (Advanced Composition Explorer) da NASA (National Aeronautics and Space Administration) localizado no ponto Lagrangeano L_1 . A bordo do satélite ACE temos o instrumento MAG (*Magnetic Field Experiment*) que nos dá os dados do Campo Magnético Interplanetário (B , B_x , B_y , B_z) e o instrumento SWEPM (*Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor*) que nos fornece dados de velocidade do Vento Solar, temperatura de prótons e densidade de prótons (V , T , N). Através dos dados do satélite ACE podemos classificar o tipo de estrutura e sua geofetividade.

Os dados de raios cósmicos utilizados neste trabalho são do Telescópio Cintilador de Muons (Figura 3) que está instalado no município de São Martinho da Serra, RS, no Observatório Espacial do Sul OES/CRSPE/INPE-MCT (Latitude $29^\circ, 26', 24''$ S, Longitude $53^\circ, 48', 38''$ O, altitude de 488 m acima do nível do mar).

Os dados do satélite ACE são disponibilizados pelo sistema CDA (Coordinate Data Analysis) do Programa ISTP (International Solar-Terrestrial Physics). Iremos fazer uma descrição destas estruturas interplanetárias para que futuramente possamos entender melhor a fenomenologia física deste problema e com isso prever Tempestades Geomagnéticas com uma maior antecedência. Desse modo, faz-se necessário um sistema integrado, coletando e analisado dados sobre o espaço, de forma rápida, precisa e confiável para entender os fenômenos físicos relacionados ao Clima Espacial e amenizar os danos tanto econômicos, quanto à vida.

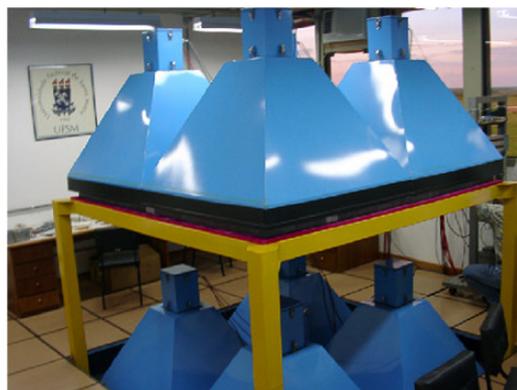


Figura 3 – Detector de muons instalado no OES.
Figure 3 - The muon detector installed at SSO.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram selecionados 3 eventos do meio interplanetário para este trabalho, os quais estão expostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Eventos de Tempestades Geomagnéticas Intensas (Dst < -200 nT)
 Table 1- Events of Intense Geomagnetic Storms (Dst < -200 nT)

Data	Dst (máximo)
30/10/2003	- 363 nT
30/10/2003	- 401 nT
20/11/2003	- 472 nT

Os eventos do dia 30 de Outubro de 2003

A Figura 4 mostra um evento de choque interplanetário que ocorreu no dia 30 de Outubro de 2003. Temos de cima para baixo, a intensidade do campo magnético B, a componente z do campo magnético B_z, a velocidade do vento solar V, a intensidade do índice Dst e as contagens relativas do canal vertical do Telescópio Cintilador de Muons V(%)

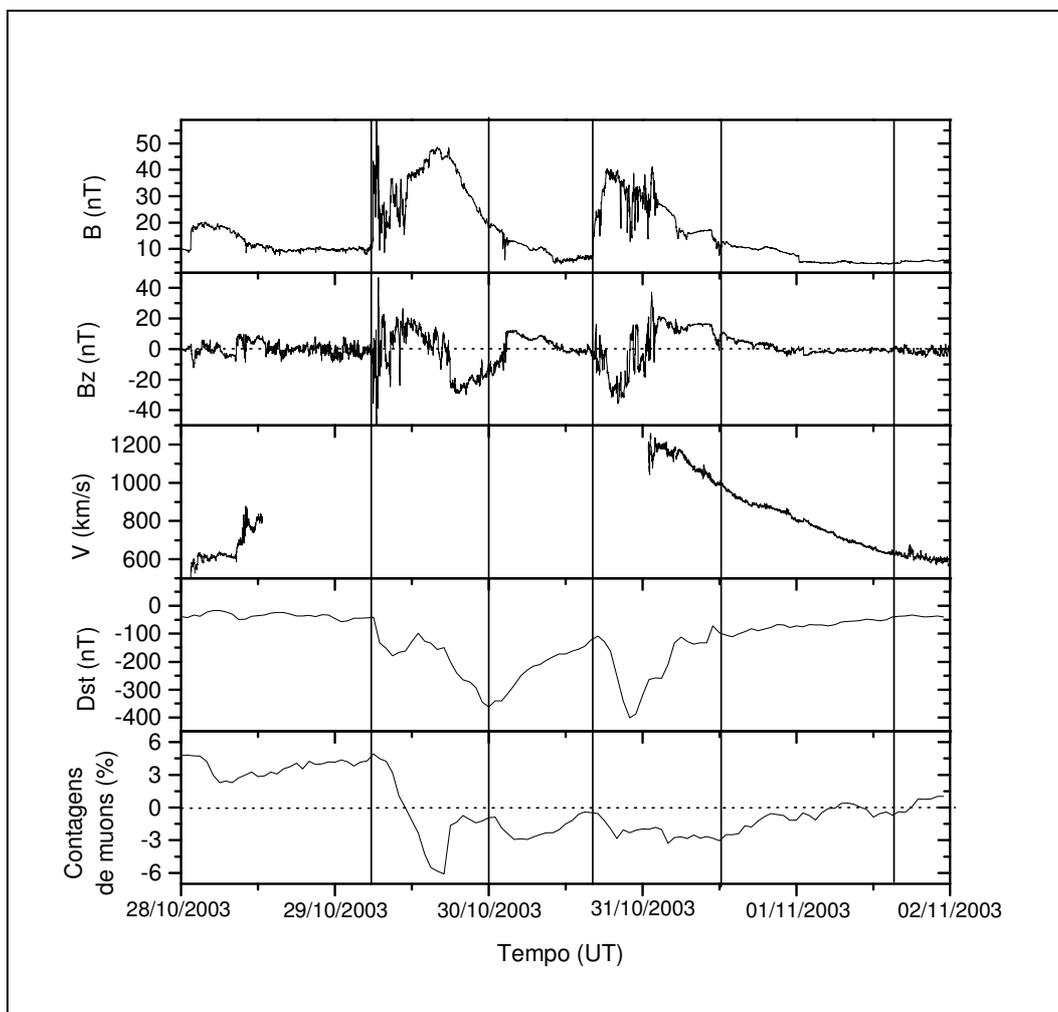


Figura 4 – Variações temporais dos parâmetros físicos de uma estrutura do meio interplanetário, observada pelo satélite ACE em 30 de Outubro de 2003, variações do índice Dst e contagens relativas do Telescópio Cintilador de Muons do Observatório Espacial do Sul (OES).

Figure 4 - Temporary variations of the physical parameters of the interplanetary medium structures, observed by the ACE satellite on October 30, 2003, Dst index variations and relative counts rate of the centiliter muon telescope of the Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE-MCT).

Neste evento vimos no 3º painel há uma falha no equipamento SWEPAM (*Solar Wind Electron Próton Alpha Monitor*) que nos fornece dados de velocidade do vento solar (V), a qual pode ter sido causada pela incidência de partículas energéticas no satélite ACE, aceleradas por uma explosão solar relacionada a este evento. A Figura 4 nos mostra a ocorrência de duas Tempestades Geomagnéticas Intensas onde o pico máximo do índice Dst da primeira chegou a

– 363 nT e da segunda – 401 nT, consideradas tempestades muito intensas.

A primeira linha vertical mostra o início da primeira tempestade no dia 30 de Outubro de 2003 onde o pico do índice Dst chegou a – 363 nT. A estrutura interplanetária que causou esta tempestade é uma nuvem magnética pois, temos um campo magnético B_z apresentando uma rotação de Sul para Norte (antes e depois da segunda linha). A componente do campo na

direção Sul apresentou valor pico de -55 nT e campo magnético pico total B de aproximadamente 60 nT. A segunda linha marca a fase principal da tempestade e o início da fase de recuperação. A terceira linha mostra o final da primeira tempestade e início da segunda onde temos um pico máximo do Dst de -401 nT. O campo magnético B_z na direção Sul foi de aproximadamente -40 nT e campo magnético B de aproximadamente 40 nT. A quarta linha delimita a nuvem magnética e a fase de recuperação da tempestade. A quinta linha indica o final da segunda tempestade. Há fortes indícios de que estas tempestades tenham sido causadas por duas fortes Ejeções Coronais de Massa observadas no Sol nos dias 28 e 29 de outubro, respectivamente.

No painel inferior podemos perceber o decréscimo na intensidade de muons que é de

aproximadamente 15% na primeira tempestade e 6% na segunda. Uma característica interessante é que os dois decréscimos ocorrem na região entre o choque e a nuvem magnética, sugerindo que este seja causado pelo campo magnético turbulento desta região.

Evento do dia 20 de Novembro de 2003

A Figura 5 mostra um evento de choque interplanetário que ocorreu no dia 20 de Novembro de 2003. Temos de cima para baixo, a intensidade do campo magnético B, a componente z do campo magnético B_z , a velocidade do vento solar V, a intensidade do índice Dst e as contagens relativas do canal vertical do Telescópio Cintilador de Muons V(%).

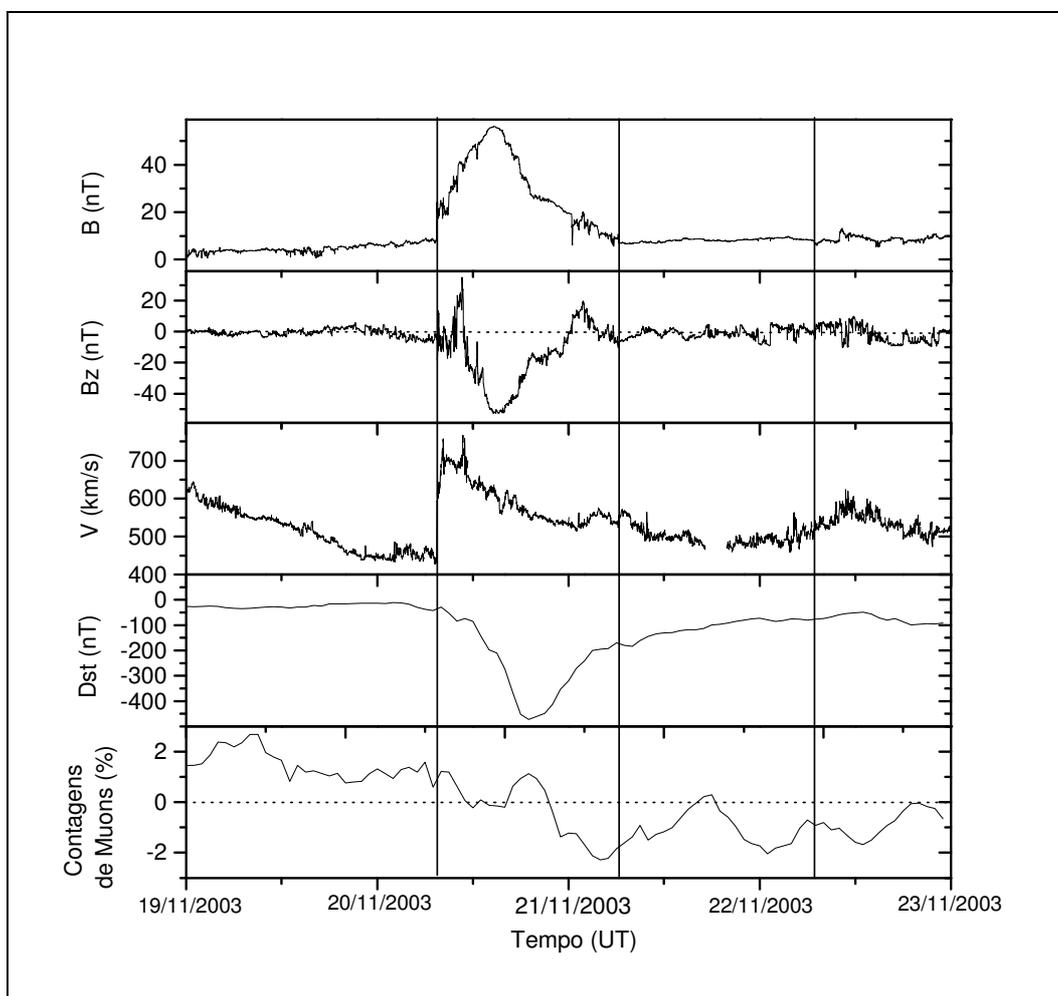


Figura 5 – Variações temporais dos parâmetros físicos de uma estrutura do Meio Interplanetário, observada pelo satélite ACE em 20 de Novembro de 2003, variações do índice Dst e contagens relativas do Telescópio Cintilador de Muons do Observatório Espacial do Sul (OES).

Figure 5 - Temporary variations of the physical parameters of the interplanetary medium structures, observed by the ACE satellite on November 20, 2003, Dst index variations and relative counts rate of the centiliter muon telescope of the Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE-MCT).

A Figura 5 nos mostra a ocorrência de uma Tempestade Geomagnética Intensa onde o pico máximo do índice Dst chegou a - 472 nT, considerada uma das maiores da história.

A primeira linha mostra o início da tempestade no dia 20 de Novembro de 2003, a qual foi causada por uma nuvem magnética proveniente de uma Ejeção Coronal de Massa. O campo magnético B_z na direção Sul foi de aproximadamente -50 nT e campo magnético B de aproximadamente 60 nT. A segunda linha delimita a nuvem magnética e a fase de recuperação da tempestade. A terceira linha mostra o final da tempestade onde os parâmetros se estabilizam.

No painel inferior podemos perceber que o decréscimo na intensidade de muons é de aproximadamente 4%. Do mesmo modo que no evento do dia 30 de Outubro de 2003 uma característica interessante é que o decréscimo ocorre na região entre o choque e a nuvem magnética, sugerindo que este seja causado pelo campo magnético turbulento desta região.

CONCLUSÕES

Após fazermos uma análise das 3 Tempestades Geomagnéticas Super Intensas ocorridas no ano de 2003, analisando dados do índice Dst, Meio Interplanetário e de raios cósmicos (muons) vimos que o canal vertical do detector de muons do Observatório Espacial do Sul em São Martinho da Serra observa decréscimos em sua contagem, em alguns casos significativos e em outros não tanto. Vimos que o decréscimo ocorre entre o choque e a nuvem magnética sugerindo que este tenha sido causado pelo campo magnético turbulento desta região. O monitoramento contínuo destes parâmetros faz-se necessário para que possamos entender melhor os fenômenos do meio interplanetário, o que poderia salvar vários sistemas tecnológicos espaciais ou terrestres.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao pessoal de operação da missão ACE por fornecer dados do campo magnético interplanetário e vento solar, bem como ao pessoal de operação da Universidade de Kyoto, por fornecerem os dados interplanetários e de superfície utilizados neste trabalho. Os autores gostariam igualmente de agradecer ao Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT pela bolsa de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

- BIEBER, J. W., AND P. EVENSON, CME geometry in relation to cosmic ray anisotropy, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 2955–2958, 1998.
- BURLAGA, L. F.; Interplanetary magnetohydrodynamics. New York: Oxford University Press, 1995, 256p.
- BRANT, J. C.; Introduction to the solar wind. San Francisco: W. H. Freeman, 1970. 216p.
- CANE, H. V., Cosmic ray decreases and magnetic clouds, *J. Geophys. Res.*, 98, 3509–3512, 1993.
- COSTA, A.M.da; MENDES JUNIOR, O. Anomalia Magnética do atlântico sul e a radiação cósmica sobre a costa do Brasil. *Revista Scientific American Brasil*, São Paulo, Ano 2, n. 23, p. 20-29, Abril de 2004.
- 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*
- DA SILVA, M. R., D. B. CONTREIRA, S. MONTEIRO, N. B. TRIVEDI, K. MUNAKATA, T. KUWABARA AND N. J. SCHUCH, Cosmic Ray Muon Observation at Southern Space Observatory – SSO (29°S, 53°W), *Atrophysical and Space Science*, 290: 398 – 397, 2004.
- DAL LAGO. A. Estudo de nuvens magnéticas geofetivas no meio interplanetário. 1999. 112 p. (INPE-7263-TDI/705). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, 1999.
- GONZALEZ, W.D; TSURUTANI, B.T. Criteria of interplanetary causing intense magnetic storms(Dst<-100nT). *Planet Space Sci*, v.35, n.9, p.1101-1109, Jul.1987.
- GONZALEZ, W. D; TSURUTANI, B. T; CLUA de GONZALEZ, A. L. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Sci. Rev.* v.88, p.529-562, 1999.
- GONZALEZ, W. D.; JOSELYN, J. A.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B. T.; E VASYLIUNAS, V. M. What is a magnetic storm?. *J. Geophys. Res.*, v.99, n.A4, p.5771-5792, Apr. 1994.
- NAGASHIMA, K., AND K. FUJIMOTO, Enhancement of north–south anisotropy of cosmic rays during Forbush decrease, associated with the enhancement of the

interplanetary magnetic field component perpendicular to the ecliptic plane, *Proc. 23rd Internat. Cosmic Ray Conf. (Calgary)*, 3, 719–722, 1993.

MUNAKATA, K., BIEBER, J.W., YASUE S.I., KATO C., KOYAMA M., AKAHANE, S., FUJIMOTO, K., FUJII, Z., HUMBLE, J.E. e M. L. Duldig, Precursors of geomagnetic storms observed by the muon detector network, *J. Geophys. Res.*, v. 105, n. 27, p. 457, 2000.

MORISHITA, I., K. FUJIMOTO, Z. FUJII, S. SAKAKIBARA, K. NAGASHIMA, K. MUNAKATA, S. YASUE, J. E. HUMBLE, K. B. FENTON, A. G. FENTON, AND M. L. DULDIG, Characteristics of precursory decrease of Forbush decrease inferred from world wide observations of muon and neutron intensities,

Proc. 25th Internat. Cosmic Ray Conf. (Durban), 1, 405-408, 1997.

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.

RUSSELL, CHRISTOPHER T.; KIVELSON, MARGARET G. *Introduction to Space Physics*, 1. ed. Los Angeles: Cambridge University Press, 1995.
UNIVERSITY OF CALIFORNIA.

TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D.; TANG, F.; LEE, Y. T. Great magnetic storms. *Geophys. Res. Lett.*, v.19, n.1, p.73-76, Jan. 1992.



Analysis of the Geomagnetic Storm Variations and the count-rate of Cosmic Ray Muons recorded at the Brazilian Southern Space Observatory

Everton Frigo^(1,2), Jairo F. Savian^(1,2), Marlos R. da Silva⁽³⁾, Alisson Dal Lago⁽³⁾, Nalin B. Trivedi⁽³⁾, Nelson J. Schuch⁽²⁾.

⁽¹⁾ Santa Maria Space Science Laboratory, UFSM, Santa Maria, Brazil,

⁽²⁾ Southern Regional Space Research Center – INPE/MCT, Santa Maria, Brazil,

⁽³⁾ National Institute for Space Research, Sao Jose dos Campos, Brazil.

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11 – 14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

An analysis of geomagnetic storm variations and the count rate of cosmic ray muons recorded at the Brazilian Southern Space Observatory -OES/CRSPE/INPE-MCT, in São Martinho da Serra, RS during the month of November 2004, is presented in this paper. The geomagnetic measurements are done by a three component low noise fluxgate magnetometer and the count rate of cosmic ray muons, are recorded by a multi-directional muon detector, both instruments installed at the Observatory. The fluxgate magnetometer measures variations in the three orthogonal component of Earth magnetic field, H (North-South), D (East-West) and Z (Vertical), with data sampling rate of 0.5 Hz. The muon detector records hourly count rates. The arrival of a solar disturbance can be identify observing the decrease in the muon count rate. The goal of this work is to describe the physical morphology and phenomenology observed during the geomagnetic storm of November 2004, using the H component of the geomagnetic field and vertical channel V (Sun-Earth) of the multi-directional muon detector in South of Brazil.

Introduction

One of the most important periods of solar cycles is the period of 11 years. During the phase of intense activity on the Sun, at the solar maximum, areas of instability can liberate high-speed solar wind and great amounts of matter and energy through solar plasma ejections. When the solar wind reaches the proximities of the Earth, it finds an obstacle in its propagation towards the surface of the Earth, due to the presence of the Earth's magnetic field. A portion of the incoming solar plasma may enter into the magnetosphere and the remaining flows along the lines of the magnetic field creating a bubble or cavity of the magnetosphere, (Figure 1). In the events of great disturbances in the Earth's magnetic field, the planet becomes vulnerable to precipitation of energetic particles of the solar wind and cosmic rays, this phenomenon is denominated geomagnetic storms (González et al., 1994). The geomagnetic storms can be classified through Dst index, based on the hourly measures of the component H of the geomagnetic field at selected low

latitude stations. The geomagnetic storms are grouped in three characteristic groups, according to their intensity, : weak: $-50 \text{ nT} \leq \text{Dst} \leq -30 \text{ nT}$; moderate $100 \text{ nT} \leq \text{Dst} \leq -50 \text{ nT}$ and intense $\text{Dst} < -100 \text{ nT}$ (Gonzalez et al., 1994). The principal characteristic of a geomagnetic storms is the decrease of the H component of the geomagnetic field (Kamide et al., 1998). The decrease is attributed to the increase of the population of particles arrested in magnetosphere. The solar structures capable to cause geomagnetic storms move through the solar wind to high-speeds dragging the interplanetary magnetic field and causing disturbance in the interplanetary medium. This disturbance obstructed the passage of the cosmic rays causing a decrease in the count of the muons, the "Forbush decrease" (Cane 1993; Cane et al., 1994; 1996), Figure 2. In this work we analyzed the variations observed in the H component of the geomagnetic field and the decrease in the muons count during the geomagnetic storm of November of 2004 data observed at the Southern Space Observatory, in São Martinho da Serra, RS.

Data and Methodology of Analysis

The Brazilian Southern Space Observatory is located in the proximities of the center of South Atlantic Magnetic Anomaly - SAMA, that is, the area where the smallest intensity of the Earth's magnetic field is observed in the surface of the Earth (Trivedi et. al., 2003). Fluxgate magnetometer of low noise was used to conduct measurements of three orthogonal components of the geomagnetic field and the data were recorded at a sampling rate of 2 seconds (0.5 Hz). We used the data of the variations observed in the H component during the 5 to November 15, 2004 to identify the geomagnetic storm. The muon detector located at the Observatory, in South of Brazil, is part of the International Muon Detector Network, with the one of Nagoya (Japan), and Hobart (Australia), recording hourly count rates of the muon precipitation on the surface of the Earth. As described previously, a relationship exists among the solar disturbances, the variations in the geomagnetic field and the decrease in the muons count rate.

Results

The Dst index is presented in Figure 3, obtained from Kyoto University (Japan), for November of 2004. It is observed on the 08/11/2004 a decrease in the Dst index corresponding at -373 nT , indicating the occurrence of a intense geomagnetic storm. On the 10/11/2004 a decrease is observed of -289 nT , indicating the occurrence of a second geomagnetic storm. Figure 4, display the variations observed in the H component of the

geomagnetic field for the period of 5 to 15 of November 2004, detected by the fluxgate magnetometer. In the Southern Space Observatory displays the counts for the same period, detected for the muons at the Observatory. The line 1 of the Figure 4 indicates an accentuated decrease of approximately 3,5% in the muons count rate, indicating that a Coronal Mass Ejection (CME) was driving in the direction of the Earth. The line 2 displays a sudden increase in the intensity of the H component and a subsequent decrease, indicating that a solar structure was shocked with Earth magnetosphere. The line 3 displays a new decrease in the muons count rate, approximately 4%, indicating that other solar structure goes the Earth. The line 4 shows a sudden increase in the intensity of the H component, and subsequent decrease, indicating that the second solar structure collided with the Earth's magnetosphere.

Conclusions

Based on these results, it is noticed that the Muon Detector Network may detect the approach of solar structures about 12 hours before the shock of those structures may reach the Earth's magnetosphere. It is of highest importance for the Space Weather forecasts of the arrival of shocks and storms, made from detailed studies of these structures. It is essential to detect them with a larger antecedence, and avoiding eventual damages, such as: intensification of electric currents in the space and in the Earth surface, occurrence of polar auroras, acceleration of charged particles, and several damages in satellites, causing damages in the Global Positioning System (GPS), in telecommunications and even to the astronauts that are in spaceships.

Acknowledgements

Thanks to Word data Center for Geomagnetism, Kyoto University, for the Dst index, to the International Solar-Terrestrial Physics Project. We thank the group of research workers at the Space Weather Laboratory, to Shinshu University for technical support and also to the CNPq for the financial support: PIBIC/Process 104441/2004-6 and 107615/2003-7.

References

- Campbell, W. H.;** Introduction to Geomagnetic Fields. Cambridge University Press, New York, 1997.
- Cane H. V.;** Cosmic ray decreases and magnetic clouds, *J. Geophys. Res.*, 98, 3509–3512, 1993.
- Da Costa, A.M.; Mendes Junior, O.;** Anomalia Magnética do atlântico sul e a radiação cósmica sobre a costa do Brasil. *Revista Scientific American Brasil*, São Paulo, Ano 2, n. 23, p. 20-29, Abril de 2004.
- Da Silva, M. R., Contreira, D. B., Monteiro S., Trivedi N. B., Munakata K., Kuwabara T. and Schuch N. J.;** Cosmic Ray Muon Observation at Southern Space Observatory – SSO (29°S, 53°W), *Atrophysical and Space Science*, 290: 398 – 397, 2004.
- Dal Lago. A.;** Estudo de nuvens magnéticas geofetivas no meio interplanetário. 1999. 112 p. (INPE-7263-TDI/705. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, 1999.
- Gonzalez, W. D.; Joselyn, J. A.; Kamide, Y.; Kroehl, H. W.; Rostoker, G.; Tsurutani, B. T. and Vasylunas, V. M.;** What is a magnetic storm?. *J. Geophys. Res.*, v.99, n.A4, p.5771-5792, Apr. 1994.
- Kamide, Y.; Yokoyama, N.; Gonzalez, W. D.; Tsurutani, B. T.; Daglis, I. A.; Brekke, A.; Masuda, S.;** Two-Step development of geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.*, v.103, n.A4, p.6917-6921, Apr. 1998.
- Munakata, K.; Bieber, J.W.; Yasue S.I.; Kato C.; Koyama M.; Akahane, S.; Fujimoto, K.; Fujii, Z.; Humble, J.E. and Duldig, M. L.;** Precursors of geomagnetic storms observed by the muon detector network, *J. Geophys. Res.*, v. 105, n. 27, p. 457, 2000.
- Russell, C. T.; Kivelson, M. G.;** Introduction to Space Physics, 1. ed. Los Angeles: Cambridge University Press, 1995.
- Trivedi, N. B.; Schuch, N. J.; Pathan, B. M.; Nishino, M.; Barreto, L. M.;** Geomagnetic Phenomena in the South Atlantic Anomaly Region. *Advances in Space Research*, England, v.32, 2003.

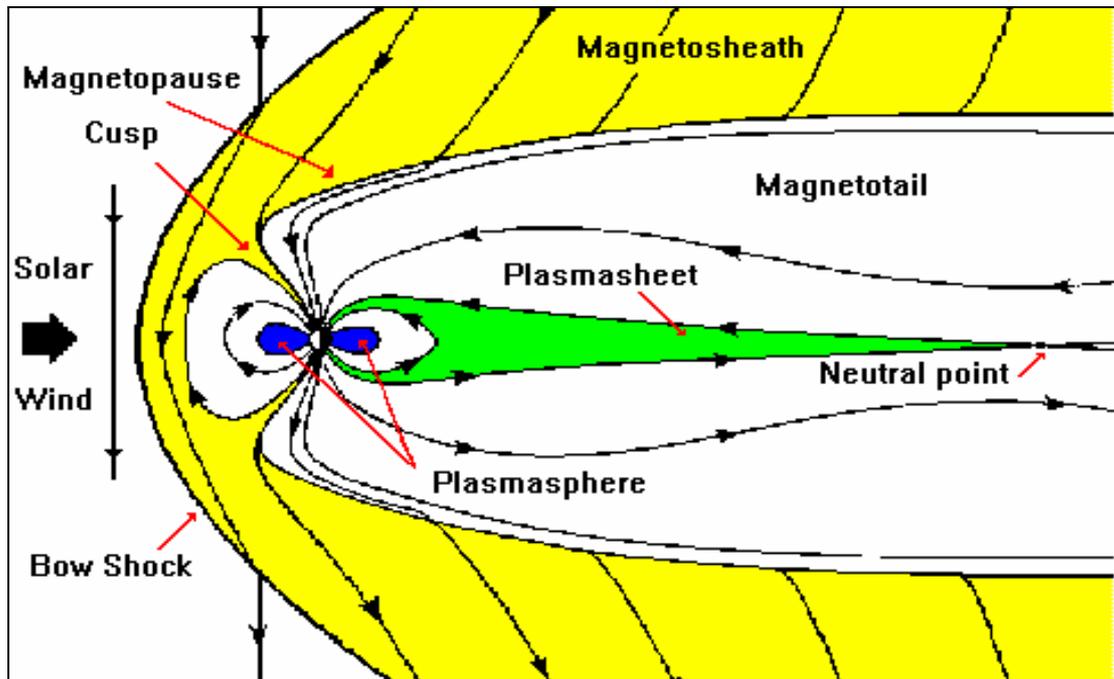


Figure 1 – Schematic of the forcing by the solar wind is able to modify this field, creating a cavity called the magnetosphere (Source: <http://www oulu.fi/~spaceweb/textbook/magnetosphere.html>).

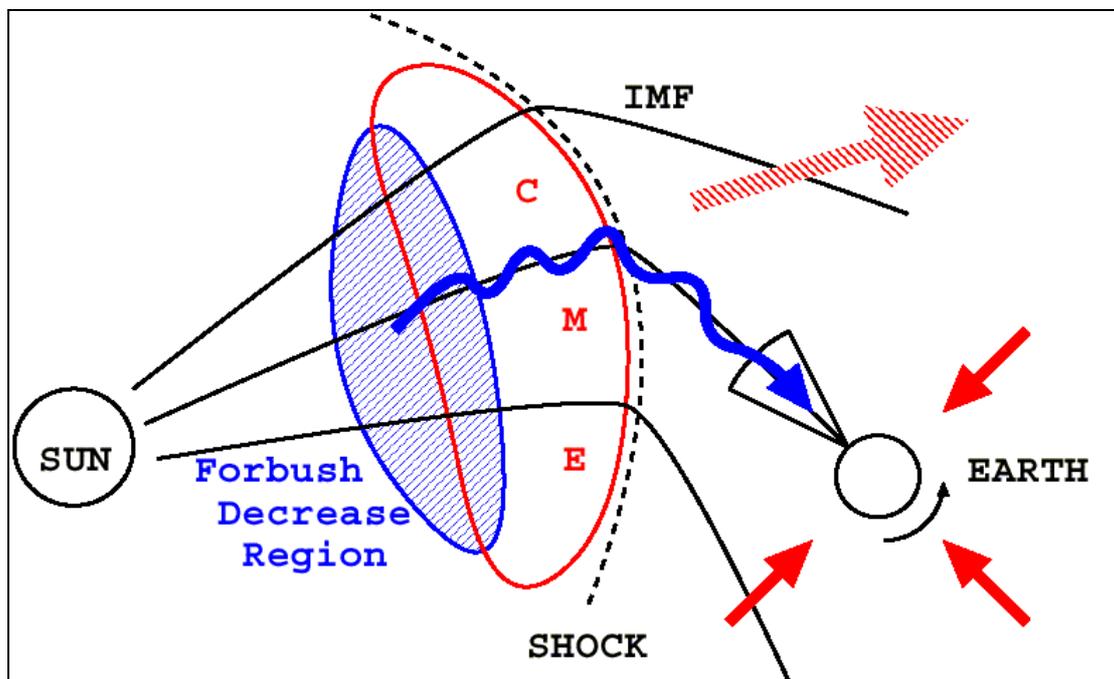


Figure 2 – Schematic figure the effect loss-cone precursor (Rufolo, 1999).

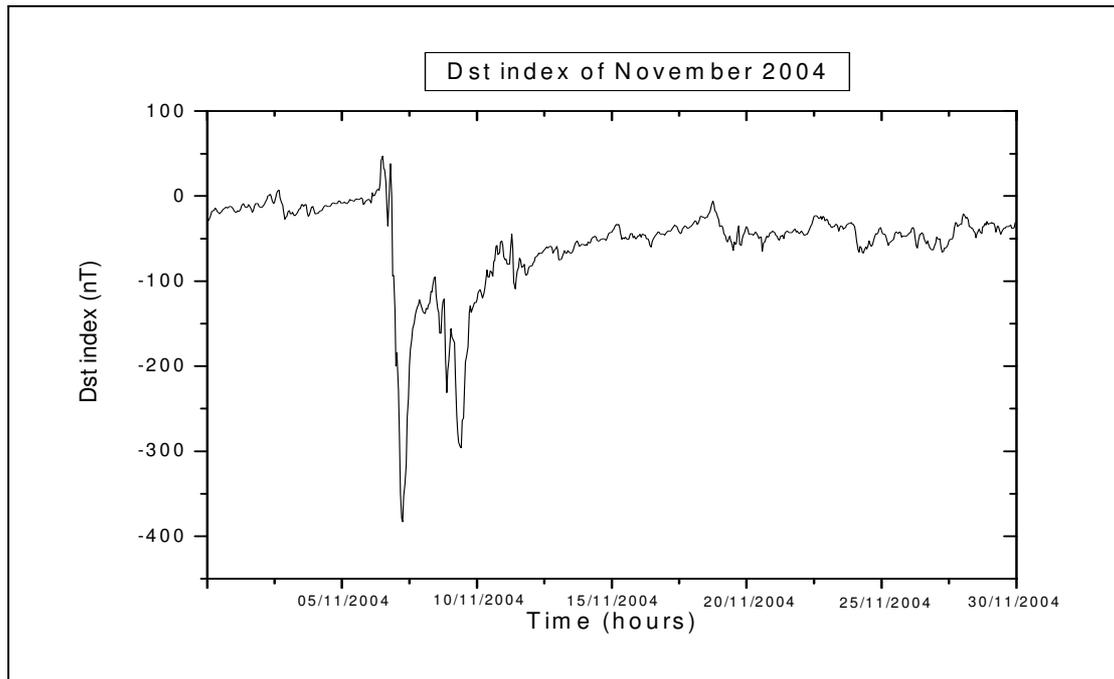


Figure 3 – Dst index of the month November 2004.

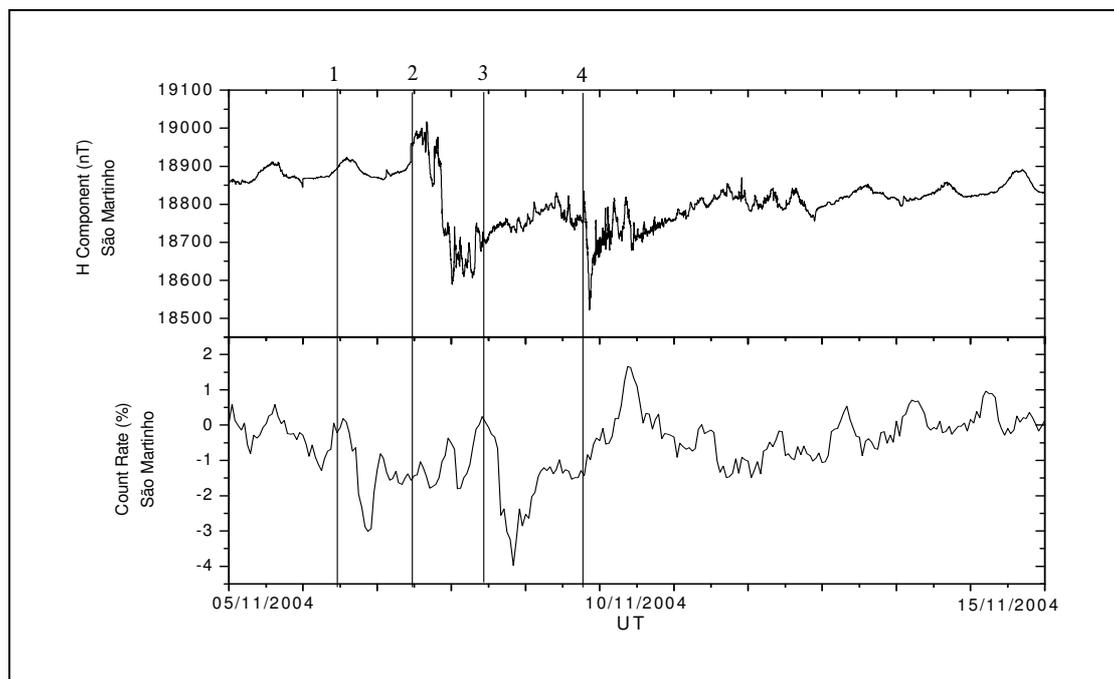


Figure 4 – Variations in H Component of Earth's Magnetic Field and Count Rate of the muon detector for the period 5-15 November 2004.

ANALYSIS OF INTERPLANETARY STRUCTURES ASSOCIATED WITH COSMIC RAYS PRECURSORY ANISOTROPIES AND INTENSE GEOMAGNETIC STORMS

J. F. Savian^{1,4}, M. R. da Silva², M. R. Signori^{1,4}, V. F. Andrioli^{1,4}, A. Dal Lago², L. E. A. Vieira²
 K. Munakata³, W. D. Gonzalez², N. J. Schuch⁴.

¹ Space Science Laboratory of Santa Maria – LACESM/CT - UFSM, Santa Maria, Brazil, ² National Institute for Space Research – CRSPE/INPE - MCT, São José dos Campos, Brazil,
³ Physics Dept., Shinshu University, Nagano, JAPAN, ⁴ Southern Regional Space Research Center – CRSPE/INPE - MCT, Santa Maria, Brazil.
 savian@lacesm.ufsm.br / Fax: +55-55-220-8007

ABSTRACT

Throughout the 11 year solar cycle a number of energetic phenomena such as “flares” and coronal mass ejections (CME) give rise to the so-called magnetic storms. These storms are characterized by a decrease in the H component of terrestrial magnetic field, lasting some dozens of hours. They are associated to interplanetary structures whose Interplanetary Magnetic Field component in the Z direction (Bz) is southward, i.e., antiparallel to the Earth’s Magnetic Field direction. Thus, the interplanetary magnetic field interconnects with the geomagnetic field causing energy to be transported inwards. Some of these structures are associated with precursory anisotropy observed in ground cosmic ray data (muons). This work uses a set of intense geomagnetic storm events (Dst<-100nT), already studied by Munakata et al (2000) in terms of cosmic ray signatures, and identify their interplanetary structures using observations made by ACE, Wind and IMP-8 satellites. We use the following interplanetary data: plasma (solar wind speed, density and temperature of protons), interplanetary magnetic field (B, Bx, By, Bz), observed by IMP-8, WIND and ACE satellites, and Dst index from Kyoto to characterize the storms.

GEOMAGNETIC STORMS

It is believed that the physical mechanism responsible for the energy transfer from the solar wind to the Earth’s Magnetosphere is magnetic reconnection between the Interplanetary Magnetic Field (IMF) and the Earth’s Magnetic Field (Tsurutani and Gonzalez, 1997). Thus, it is necessary that the IMF has substantial component in the -Z direction (considering GSM coordinate system), also called Bs, southward Bz. The interplanetary criteria for an intense geomagnetic storm, Dst < -100 nT, is a dawn-dusk interplanetary electric field greater than 5 mV/m for a period greater than 3 hours (Tsurutani and Gonzalez, 1987).

FORECASTING INTERPLANETARY DISTURBANCES USING COSMIC RAYS

An interplanetary disturbance, propagating from the Sun to the Earth, affects the galactic cosmic ray population in many ways. One of the most known is the “Forbush decrease”. Some interplanetary disturbances like the interplanetary counterparts of coronal mass ejections (CME) can cause depressions in high energy cosmic rays along the IMF main direction, being detected up to 10 hours before the arrival of the CME to the earth (Munakata et al., 2000), according to the diagrama shown in Figure 1.

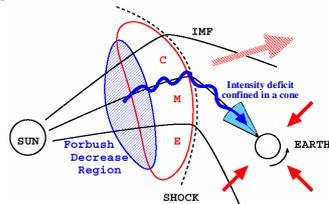


Fig. 1 – Loss-cone precursors. Nagashima et al. [1992], Raffolo [1999].

Cosmic ray particles traveling close to light speed from this “depressed” region are observed as a “loss-cone precursor” at Earth typically 4 to 8 hours before the arrival of the interplanetary disturbance (Munakata et al., 2000). Since these structures are the main cause of intense geomagnetic storms, cosmic ray loss-cone precursors are used to forecast space weather variability.

EVENT OF NOVEMBER 18-20th, 2003

In November 18th 2003, 18:48 UT a flare was observed close to the central meridian of the Sun. In November 20th 2003, the most intense geomagnetic storm of the Solar Cycle 23 was observed, as indicated by the decrease in the Dst index, reaching -472 nT (Figure 2).

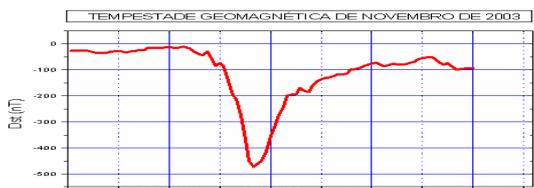


Figure 2 – Dst index from November 18th to 22nd, 2003

A sudden increase in the intensity of the Interplanetary Magnetic Field B, density, speed and temperature, on November 20th (at -08:00 UT), indicating the arrival of a shock wave, as observed by the ACE satellite is shown in Figure 4. Following this shock, a southward excursion of the Bz component some hours later was observed. This event had the characteristics of an interplanetary magnetic cloud, given its smooth rotation in the direction of the magnetic field.

The observations with the Ground Multi-Directional Cosmic Ray-Muon Detector, Figure 3, installed in the Southern Space Observatory – SSO, in São Martinho da Serra, South of Brazil, from 18 to 22 of November 2003, is presented in Figure 5. It shows the percent variation, in relation to the annual average value, for the vertical direction, V (top panel), and the other directions below it. One can observe a decrease on November 20th, 2003 at 22:00 UT. This decrease was caused by the interplanetary magnetic cloud and its associated shock wave of Figure 4.



Figure 3 – The Ground Multi-Directional Cosmic Ray-Muon Detector installed at the Southern Space Observatory – SSO, in São Martinho da Serra, South of Brazil.

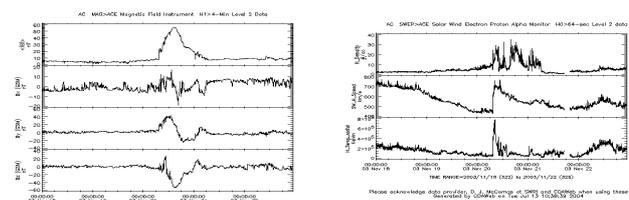


Fig. 4 – Magnetic field, speed and density observed by ACE. (www.srl.caltech.edu/ACE).

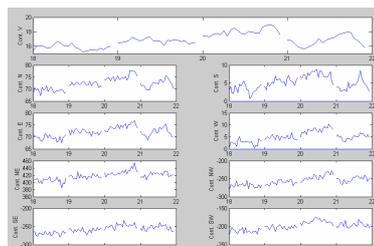


Fig. 5 – Muon data from 18th to 20th of November, 2003 obtained with the Multi-Directional Cosmic Ray Detector, SSO, Brazil, showing the decrease on November 20th, 2003.

Table 1 – Parameters of the Geomagnetic Events

Date	Loss-cone hours in advance* (Munakata et al., 2000)	Interplanetary observation	Type of interplanetary structure	Peak magnetic field in the sheath (nT)	Peak magnetic field inside the cleft (nT)
Mar. 8 th (1993)	NP	IMP-8	2 Shock/Cloud	20 (35.7)**	-
May 15 th (1997)	EV/9 hours	WIND	Shock/Cloud	25	25
Nov. 6 th (1997)	NP	WIND	Shock/Cloud 7)	20	20
Sep. 24 th (1998)	LC/3.5 hours	ACE	Shock/Cloud 7)	40	20

* NP = no precursor; EV = enhanced variation; LC = loss-cone (Munakata et al., 2000).
 ** Short duration peak.

CONCLUSIONS

Analyzing Munakata et al. (2000) events, where they identified loss-cone precursors for several disturbed periods, we could find good quality interplanetary data for 4 of them: March 8th, 1993 (IMP-8); May 15th, 1997 (WIND); November 6th, 1997 (WIND); and September 24th, 1998 (ACE), shown in Table 1.

The event of March 8th, 1993 was a double shock, with no clear eject signature. Magnetic field after the second shock was around 20 nT for some hours, with a fast excursion to 35 nT. The event of May 15th, 1997 was a clear magnetic cloud after a shock front. Magnetic field inside both the cloud and the sheath region was around 25 nT for several hours. The event of November 6th, 1997 event was a cloud-like structure after a shock front. Magnetic field was less than 20 nT during the event. The event of September 24th, 1998 was a cloud-like structure, after a shock front. In the sheath, magnetic field reached 40 nT, and inside the cloud-like structure it was around 20 nT for some hours. According to Table 1, in 2 of these events no precursors was observed (NP), one loss-cone structure was observed (LC) and one enhanced variation (EV).

We have presented a brief analysis of the interplanetary origins of the intense geomagnetic storm on November 20th, 2003 together with a preliminary analysis of the cosmic rays (muons) observations made at the Southern Space Observatory – SSO, Brazil. We analyzed the interplanetary structures associated with 4 events studied by Munakata et al. (2000).

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the ACE, WIND and IMP-8 work teams for providing the data used in this work, obtained through the WDC-Kyoto, as well as the Kyoto University for the geomagnetic data and the Shinshu University – Japan for the donation of the SSO’s Muon Detectors. The authors would also like to acknowledge the PIBIC program from CNPq supporting agency (Brazil), PET program from CAPES supporting agency (Brazil) and FAPESP supporting agency (Brazil) for the post-doc contracts 02/14150-0 e 02/12723-2.

References

BURLAGA, L. F. *Interplanetary magnetohydrodynamics*. New York: Oxford University Press, 1995, 256p.
 BRANT, J. C. *Introduction to the solar wind*. San Francisco: W. H. Freeman, 1970, 216p.
 COSTA, A.M.da; MENDES JUNIOR, O. Anomalia Magnética do atlântico sul e a radiação cósmica sobre a costa do Brasil. *Revista Científica Ambiental*. São Paulo, Ano 2, n. 23, p. 20-29, Abril de 2004.
 DAL LAGO, A. *Estudo de nuvens magnéticas geoefetivas no meio interplanetário*. 1999, 112 p. (INPE-7263-TDI/705. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, 1999.
 GONZALEZ, W.D; TSURUTANI, B.T. Criteria of interplanetary causing intense magnetic storms(Dst<-100nT). *Planet Space Sci*, v.35, n.9, p.1101-1109, Jul.1987.
 GONZALEZ, W. D; TSURUTANI, B. T. CLUA DE GONZALEZ, A. L. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Sci. Rev.* v.88, p.529-562, 1999.
 GONZALEZ, W. D.; JOSELYN, J. A.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B. T.; E VASYLIUNAS, V. M. What is a magnetic storm? *J. Geophys. Res.*, v.99, n.A4, p.5771-5792, Apr. 1994.
 MUNAKATA, K.; BIEBER, J.W.; YASUE, S.I.; KATO, C.; KOYAMA, M.; AKAHANE, S.; FUJIMOTO, K.; FUJII, Z.; HUMBLE, J.E.; DULDIG, M. L. Precursors of geomagnetic storms observed by the muon detector network. *J. Geophys. Res.*, v. 105, n. 27, p. 457, 2000.
 RUSSELL, C. T.; KIVELSON, M. G. *Introduction to Space Physics*, 1. ed. Los Angeles: Cambridge University Press, 1995. UNIVERSITY OF CALIFORNIA.



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE/MCT
CENTRO REGIONAL SUL DE PESQUISAS ESPACIAIS – CRSPE/INPE - MCT
OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL – OES/CRSPE/INPE – MCT

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA – UFSM/MEC
LABORATÓRIO DE CIÊNCIAS ESPACIAIS DE SANTA MARIA – LACESM/CT/UFSM
PARCERIA: INPE/MCT – UFSM/MEC



PREVISÃO DE TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS INTENSAS ATRAVÉS DA OBSERVAÇÃO DE RAIOS CÓSMICOS E DE COMPONENTES DO MEIO INTERPLANETÁRIO.

Jairo Francisco Savian^(1,2), Marlos Rockenbach da Silva⁽³⁾, Vânia Fátima Andrioli^(1,2), Marcos Roberto Signori^(1,2), Alisson Dal Lago^(3,4), Ezequiel Echer⁽³⁾, Luis Eduardo Antunes Vieira^(3,4), Kazuoki Munakata⁽⁵⁾, Walter Demétrio Gonzalez Alarcon⁽³⁾, Nelson Jorge Schuch⁽¹⁾.

- (1) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – Santa Maria – RS, Brasil – Contato: savian@lacsesm.ufsm.br
- (2) Universidade Federal de Santa Maria – Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – Santa Maria, RS, Brasil;
- (3) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Divisão de Geofísica Espacial – São José dos Campos – SP, Brasil;
- (4) Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP - SP, Brasil;
- (5) Physics Dept., Shinshu University, Nagano, JAPAN.

Resumo

Acredita-se que o mecanismo físico responsável pela transferência de energia do Vento Solar para a Magnetosfera seja a reconexão entre o Campo Magnético Interplanetário, na direção do anoitecer, maior que 5mV/m, por um período maior que 3 horas. O objetivo do trabalho é estudar Tempestades Geomagnéticas com dados dos satélites localizados no ponto Lagrangeano - L1, e com o Telescópio Multi-Direcional de Raios Cósmicos (muons) do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE/MCT, de São Martinho da Serra, RS, em preparação para futuras previsões destes distúrbios.

Introdução

A cada 11 anos o Sol passa por um período de intensa atividade magnética denominado de Máximo Solar, apresentando um maior número de instabilidades as quais liberam grandes quantidades de matérias na forma de Ejeções Coronais de Massa – CME (Figura 1). Estas manifestações de intensa atividade atingem o Meio Interplanetário e os planetas causando as chamadas Tempestades Geomagnéticas, que podem provocar distúrbios em sistemas eletrônicos.



Figura 1 – Representação artística da interação Sol-Terra mostrando uma Ejeção Coronal de Massa em direção à Terra, uma das causas das tempestades Geomagnéticas. Fonte: www.nasa.gov

Tempestades Geomagnéticas e seus efeitos

Os efeitos mais conhecidos das Tempestades Geomagnéticas são: intensificação de correntes elétricas no espaço e na superfície terrestre, ocorrência de auroras nos pólos, aceleração de partículas carregadas, e diversos prejuízos em satélites causando danos ao Sistema de Posicionamento Global – GPS, em telecomunicações, e até mesmo à saúde dos astronautas que se encontram em naves espaciais devido à alta dose de radiação emitida, como ilustrado na Figura 2.

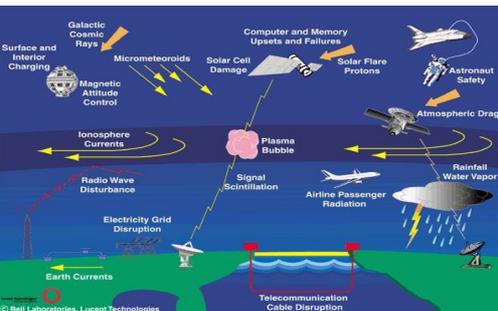


Figura 2 – Sistemas afetados por Tempestades Geomagnéticas. Fonte: http://www.spaceweathercenter.org

Outro efeito importante é o decréscimo da intensidade de raios cósmicos que chegam à Terra, causado pela presença da estrutura interplanetária que está causando a Tempestade Geomagnética.

Metodologia

Analisamos dados do Meio Interplanetário referente à estrutura interplanetária responsável pela Tempestade Geomagnética Intensa ocorrida em 19 de novembro de 2003, onde o índice Dst atingiu um valor de -472 nT, sendo uma das maiores Tempestades Geomagnéticas da história. As observações utilizadas foram feitas pelos satélites localizados no ponto Lagrangeano, L1, e pelo Telescópio Multi-Direcional de Raios Cósmicos (muons) do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE/MCT, de São Martinho da Serra, RS, Parceria: Brasil – Japão – USA (Figura 3). O evento foi selecionado através de observações do índice Dst disponíveis no site da Universidade de Kyoto – Japão, que mede a corrente de anel magnetosférica (Mendes Jr., 1992). Em seguida analisamos dados de observações do Meio Interplanetário, preferencialmente do satélite ACE, disponíveis no sistema CDA – Coordinate Data Analysis, do Programa ISTP – International Solar-Terrestrial Physics, juntamente com os dados de raios cósmicos (Munakata et al. (2000).



Figura 3 – Instrumentos utilizados na Previsão de Tempestades Geomagnéticas, a esquerda o satélite Advanced Composition Explorer (ACE) e a direita o Detector Multidirecional de Muons do Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE-MCT) em São Martinho da Serra, RS.

Resultados

No dia 18 de novembro de 2003 observou-se no disco solar uma explosão “flare” muito intensa e localizada próximo ao meridiano central do Sol, o que alertou para a possível ocorrência de uma Tempestade Magnética na Terra. A Figura 4 mostra a imagem do instrumento EIT do satélite SOHO, que observa o Sol em comprimento de onda do ultravioleta extremo, (195 Angstroms) e uma Ejeção Coronal de Massa (CME) observada pelo instrumento LASCO ambos a bordo do satélite SOHO, que oculta o disco solar fazendo um eclipse artificial, permitindo a observação detalhada da Coroa Solar.

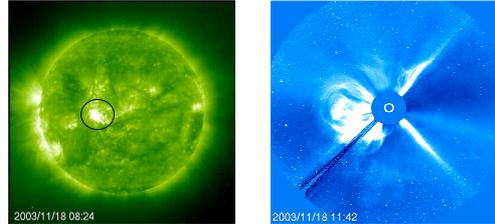


Figura 4 – A esquerda Flare solar observado em 18/11/2003 pelo instrumento EIT e a direita Ejeção Coronal de Massa tipo halo, observado pelo instrumento LASCO ambos a bordo do satélite SOHO. Fonte: http://star.mpae.gwdg.de

O decréscimo do índice Dst, sendo identificado como a maior Tempestade Geomagnética do Máximo Solar 23, atingiu um pico de -472 nT, e é apresentado na Figura 5.

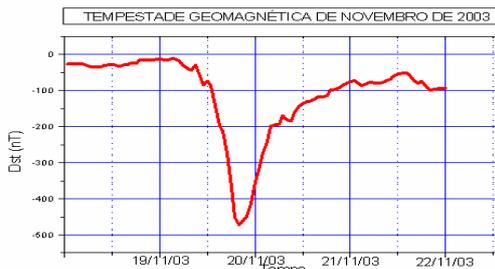


Figura 5 – Índice Dst de 18 a 22 de novembro de 2003.

No dia 20 de Novembro de 2003 o Detector Multidirecional de Muons observou um leve decréscimo na contagem dos muons por volta das 06:00 UT, um leve acréscimo no final do dia, seguido de um decréscimo mais acentuado que se estendeu até as primeiras horas do dia 21. Acredita-se que estes decréscimos foram causados pela CME, que devido a onda de choque formada, obstruiu a passagem de parte dos raios cósmicos.

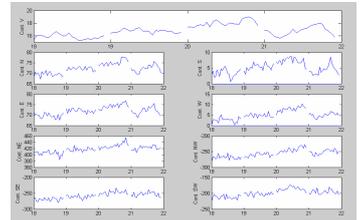


Figura 6 – Decréscimo da contagem de muons do dia 20 de Novembro de 2003.

Dados do satélite ACE mostram a chegada de uma estrutura interplanetária, conforme podemos ver na Figura 7. O painel superior à esquerda, mostra o Campo Magnético Interplanetário, o qual tipicamente apresenta valores de 5 nT em períodos calmos. Quando a frente de choque passou após às 6:00hs do dia 21, apresentou valores da ordem de 50 nT. Quando o campo magnético B apresenta um acréscimo súbito e sua componente Bz é negativa, estão favoráveis as condições para a ocorrência de uma Tempestade Geomagnética na Terra. No painel à direita mostramos dados da densidade, velocidade e temperatura do Vento Solar, que tem um acréscimo súbito, indicando a chegada da estrutura.

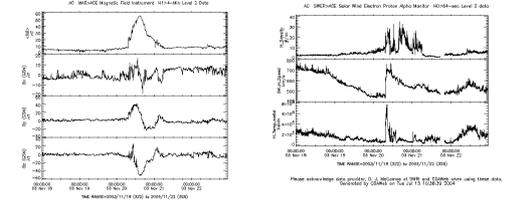


Figura 7 – Dados do satélite ACE. Fonte: http://www.srl.caltech.edu/ACE

Sumário e Comentários Finais

Após fazermos uma análise completa da Tempestade Geomagnética do dia 20 de Novembro de 2003, analisando dados do Meio Interplanetário e de raios cósmicos (muons) vimos a potencialidade desses dados para futura utilização em previsão de ocorrência desse tipo de distúrbio. O Telescópio Multi-Direcional de Raios Cósmicos do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE/MCT integra a Rede Internacional de Telescópios do Detectores de Muons, seu tamanho e sensibilidade serão ampliadas em breve. Com a ampliação do telescópio do Observatório Espacial do Sul e com a utilização simultânea dos dados de raios cósmicos da rede internacional, será possível fazer uma previsão de chegada de distúrbios Geomagnéticos na Terra com antecedência de até aproximadamente 10 horas, conforme mostrado por Munakata et al. (2000). O monitoramento contínuo destes distúrbios se faz necessário para que possamos entendê-los melhor, e para que possamos trazer benefícios econômicos, no sentido da proteção de sistemas tecnológicos espaciais e em geral.

Agradecimentos

Agradecemos por disponibilizar os dados para que fossem analisados e ao pessoal de operação da missão ACE e da missão SOHO, bem como ao pessoal da Universidade de Kyoto, por fornecerem os dados interplanetários e de superfície utilizados no trabalho. Os autores gostariam igualmente de agradecer ao Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT e ao programa PET/UFSM – SeSu/MEC pelas bolsas de iniciação científica, e à FAPESP pelos Programas de Pós-Doutorado, processos 02/14150-0 e 02/12723-2.

Referências

- DAL LAGO, A. Estudo de nuvens magnéticas geofetivas no meio interplanetário. 1999. 112 p. (INPE-7283-TD/05). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, 1999.
- GONZALEZ, W.D; TSURUTANI, B.T. Criteria of interplanetary causing intense magnetic storms(Dst<-100nT). *Planet Space Sci.*, v.35, n.9, p.1101-1109, Jul. 1987.
- GONZALEZ, W. D; TSURUTANI, B. T. CLUA da GONZALEZ, A. L. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Sci. Rev.*, v.88, p.529-562, 1999.
- GONZALEZ, W. D.; JOSELYN, J. A.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B. T.; E VASYLIUNAS, V. M. What is a magnetic storm?. *J. Geophys. Res.*, v.99, n.A4, p.5771-5792, Apr. 1994.
- MUNAKATA, K.; BIBBER, J.W.; YASUE, S.I.; KATO, C.; KOYAMA, M.; AKAHANE, S.; FUJIMOTO, K.; FUJII, Z.; HUMBLE, J.E. e M. L. Duldig, Precursors of geomagnetic storms observed by the muon detector network. *J. Geophys. Res.*, v. 105, n. 27, p. 457, 2000.

DANOS PROVOCADOS POR TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS INTENSAS Dst < -100 nT

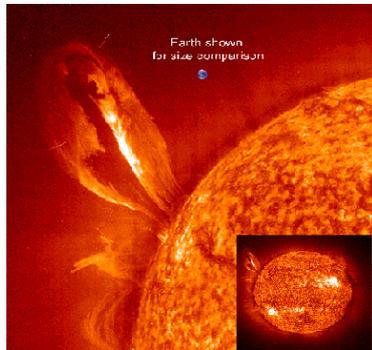
Jairo Francisco Savian(1,2), Marlos Rockenbach da Silva(3), Vânia Fátima Andrioli(1,2), Marcos Roberto Signori(1,2), Alisson Dal Lago(3,4), Ezequiel Echer(3), Luis Eduardo Antunes Vieira(3,4), Kazuoki Munakata(5), Walter Demétrio Gonzalez Alarcon(3), Nelson Jorge Schuch(1).

- (1) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – Santa Maria – RS, Brasil – Contato: savian@lacsom.ufsm.br
(2) Universidade Federal de Santa Maria – Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – Santa Maria, RS, Brasil;
(3) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Divisão de Geofísica Espacial – São José dos Campos – SP, Brasil;
(4) Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP - SP, Brasil;
(5) Physics Dept., Shinshu University, Nagano, JAPAN.

Introdução

A região que se estende do Sol até o meio interestelar é chamado Meio Interplanetário. Nesta região ocorrem fenômenos físicos, sendo grande parte proveniente da atividade solar. As Tempestades Geomagnéticas são eventos de grande perturbação no Campo Magnético Terrestre (CMT). A Tempestade Geomagnética caracteriza-se pelo decréscimo da componente horizontal, H, do Campo Magnético Terrestre e posterior fase de recuperação. O decréscimo atribui-se a um aumento da população de partículas aprisionadas na Magnetosfera que aumentam a intensidade da Corrente de Anel Magnetosférica gerada pelo movimento de partículas eletricamente carregadas. Para medir a intensidade da Corrente de Anel é utilizado o índice Dst que é baseado nas medidas horárias da componente horizontal H. Acredita-se que o mecanismo físico responsável pela transferência de energia do Vento Solar para a Magnetosfera seja a reconexão entre o Campo Magnético Interplanetário (CMI) e o Campo Magnético Terrestre, para isso é necessário que a componente do CMI esteja na direção antiparalela a do CMT. O objetivo deste trabalho é mostrar os efeitos causados por Tempestades Geomagnéticas Intensas Dst < -100nT, tais como, carga e arraste de espaçonaves, falhas em aeronaves, erro na trajetória de lançamento, interferências em radares, anomalias na propagação de rádios, "black out" de energia elétrica, entre outros e mostrar como é feita a previsão destas tempestades utilizando raios cósmicos e dados do Meio Interplanetário.

Tempestades Geomagnéticas e seus danos



Os efeitos mais conhecidos das Tempestades Geomagnéticas são: intensificação de correntes elétricas no espaço e na superfície terrestre, ocorrência de auroras nos pólos, aceleração de partículas carregadas, e diversos prejuízos em satélites causando danos ao Sistema de Posicionamento Global – GPS, em telecomunicações, e até mesmo à saúde dos astronautas que se encontram em naves espaciais devido à alta dose de radiação emitida, como ilustrado na Figura 1.

PARTÍCULAS DE BAIXA-MÉDIA ENERGIA
CHEGADA: 2-4 DIAS
DURAÇÃO: DIAS

TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

CARGA E ARRASTE ESPAÇONAVES
FALHAS EM ESPAÇONAVES
ERRO TRAJETÓRIA LANÇAMENTO
INTERF. RADAR
ANOMALIAS PROPAGAÇÃO RADIO
BLACK-OUT DE ENERGIA ELÉTRICA

Figura 1 – Principais causas das Tempestades Geomagnéticas

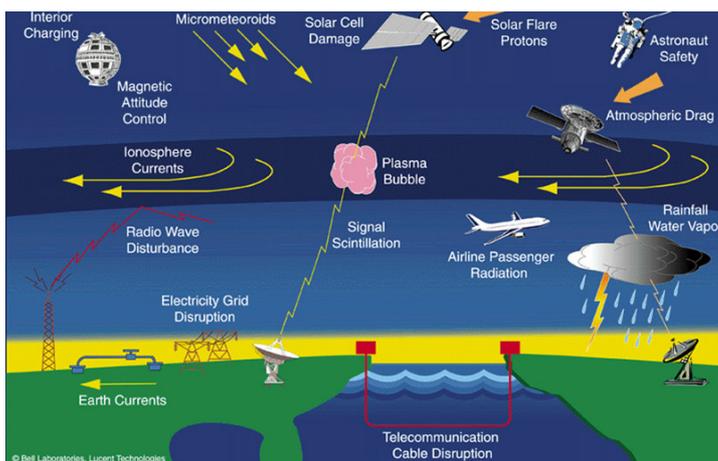


Figura 2 – Sistemas afetados por Tempestades Geomagnéticas.
Fonte: <http://www.spaceweathercenter.org>

Metodologia

O método mais eficiente utilizado para fazer a previsão do Clima Espacial é o satélite SOHO da NASA/ESA que através do sensoriamento remoto do Sol pode nos dar uma previsão com dias de antecedência, porém, com um erro aproximado de até 1 dia. A Rede Internacional de Detectores de Muons, o qual faz parte o Telescópio Multi-Direcional de Raios Cósmicos (muons) do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE/MCT, de São Martinho da Serra, RS pode nos dar uma previsão com até 12 horas antes da chegada do distúrbio. O efeito é detectado pelo decréscimo da intensidade de raios cósmicos que chegam à Terra, causado pela presença da estrutura interplanetária que está causando a Tempestade Geomagnética. Os satélites ACE, IMP-8 e WIND nos dão uma previsão de até 2 horas porém com dados muito precisos referentes ao plasma e campos magnéticos.

Resultados

No dia 18 de Novembro de 2004, observou-se um "Flare" solar observado pelo instrumento EIT do satélite SOHO da ESA/NASA seguido de uma Ejeção Coronal de Massa observada pelo instrumento LASCO também a bordo do satélite SOHO (Figura 3).



Figura 3 – Ejeção Coronal de Massa. Fonte: <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>

O Detector de Muons do Observatório Espacial do Sul (OES) observou um decréscimo na contagem de Muons devido a Ejeção Coronal de Massa que obstruiu a passagem dos raios cósmicos (Figura 4a). O satélite ACE observou através do seu magnetômetro a componente Z do Campo Magnético Interplanetário na direção sul, indicando que ocorrerá a reconexão magnética (Figura 4b).

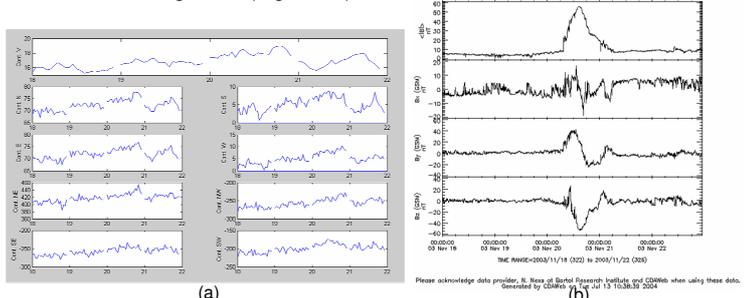


Figura 4 – a) Decréscimo na contagem de muons no dia de 20/11/04. b) Parâmetros do Meio Interplanetário caracterizando uma Tempestade Geomagnética.

Conclusões

Os resultados obtidos mostram que o satélite SOHO é a ferramenta mais eficiente, pois fazendo o sensoriamento remoto do Sol através de imagens pode prever distúrbios com dias de antecedência, porém com incertezas na ordem de 1 dia. Observações de Raios Cósmicos como a feita pela Rede Internacional de Detectores de Muons estão em uma posição intermediária, tanto em antecedência quanto em previsão. O satélite ACE pode prever distúrbios com até 1 hora de antecedência, porém com grande precisão em relação aos seus efeitos terrestres, dando informações completas sobre plasma, partículas energéticas e Campo Magnético Interplanetário.

Referências
DAL LAGO, A. Estudo de nuvens magnéticas geofélicas no meio interplanetário. 1999. 112 p. (INPE-7263-TDI/705. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, 1999).
GONZALEZ, W. D.; TSURUTANI, B. T. Criteria of interplanetary causing intense magnetic storms (Dst<-100nT). Planet Space Sci., v.35, n.9, p.1101-1109, Jul.1987.
GONZALEZ, W. D.; JOSELYN, J. A.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B. T.; E VASYLIUNAS, V. M. What is a magnetic storm? J. Geophys. Res., v.99, n.A4, p.5771-5782, Apr. 1994.
MUNAKATA, K.; BIEBER, J.W.; YASUE S.I.; KATO C.; KOYAMA M.; AKAHANE, S.; FUJIMOTO, K.; FUJII, Z.; HUMBLE, J.E. e M. L. Duldig, Precursors of geomagnetic storms observed by the muon detector network. J. Geophys. Res., v. 105, n. 27, p. 457, 2000.

ANALISYS OF INTERPLANETARY STRUCTURES ASSOCIATED WITH
COSMIC RAY PRECURSORY ANISOTROPIES AND INTENSE
GEOMAGNETIC STORMS

Jairo F. Savian^{1,4}, Marlos R. da Silva², Marcos R. Signori^{1,4},
Vania F. Andrioli^{1,4}, Alisson Dal Lago², Luis Eduardo A.
Vieira², K. Munakata³, Walter D. Gonzalez², Nelson J. Schuch⁴.

⁽¹⁾ Santa Maria Space Science Laboratory, UFSM, Santa Maria,
Brazil, ⁽²⁾ National Institute for Space Research, Sao Jose dos
Campos, Brazil, ⁽³⁾ Physics Dept., Shinshu University, Nagano,
JAPAN, ⁽⁴⁾ Southern Regional Space Research Center –
INPE/MCT, Santa Maria, Brazil.
e-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br / Fax: +55-55-220-8007

Throughout the 11 year solar cycle a number of energetic phenomena such as “flares” and coronal mass ejections (CME) give rise at earth to the so-called magnetic storms. These storms are characterized by a decrease in the H component of terrestrial magnetic field, lasting some dozens of hours. They are associated to interplanetary structures whose interplanetary magnetic field component in the Z direction (B_z) is southward, i.e., antiparalell to the earth’s magnetic field direction. Thus, the interplanetary magnetic field interconnects with the geomagnetic field causing energy to be transported inwards. Some of these structures are associated with precursory anisotropy observed in ground cosmic ray data (muons). The objective of this work is to use a set of intense geomagnetic storm events ($Dst < -100nT$), already studied by Munakata et al (2000) in terms of cosmic ray signatures, and identify their interplanetary structures using observations made by ACE, Wind and IMP-8 satellites. We use the following interplanetary data: plasma (solar wind speed, density and temperature of protons), interplanetary magnetic field (B , B_x , B_y , B_z), observed by IMP-8, WIND and ACE satellites, and Dst index from Kyoto to characterize the storms.

ANALISYS OF INTERPLANETARY STRUCTURES ASSOCIATED WITH
COSMIC RAY PRECURSORY ANISOTROPIES AND INTENSE
GEOMAGNETIC STORMS

Jairo F. Savian^{1,4}, Marlos R. da Silva², Marcos R. Signori^{1,4},
Vania F. Andrioli^{1,4}, Alisson Dal Lago², Luis Eduardo A.
Vieira², K. Munakata³, Walter D. Gonzalez², Nelson J. Schuch⁴.

⁽¹⁾ Santa Maria Space Science Laboratory, UFSM, Santa Maria,
Brazil, ⁽²⁾ National Institute for Space Research, Sao Jose dos
Campos, Brazil, ⁽³⁾ Physics Dept., Shinshu University, Nagano,
JAPAN, ⁽⁴⁾ Southern Regional Space Research Center –
INPE/MCT, Santa Maria, Brazil.
e-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br / Fax: +55-55-220-8007

Throughout the 11 year solar cycle a number of energetic phenomena such as “flares” and coronal mass ejections (CME) give rise at earth to the so-called magnetic storms. These storms are characterized by a decrease in the H component of terrestrial magnetic field, lasting some dozens of hours. They are associated to interplanetary structures whose interplanetary magnetic field component in the Z direction (B_z) is southward, i.e., antiparallel to the earth’s magnetic field direction. Thus, the interplanetary magnetic field interconnects with the geomagnetic field causing energy to be transported inwards. Some of these structures are associated with precursory anisotropy observed in ground cosmic ray data (muons). The objective of this work is to use a set of intense geomagnetic storm events ($Dst < -100nT$), already studied by Munakata et al (2000) in terms of cosmic ray signatures, and identify their interplanetary structures using observations made by ACE, Wind and IMP-8 satellites. We use the following interplanetary data: plasma (solar wind speed, density and temperature of protons), interplanetary magnetic field (B , B_x , B_y , B_z), observed by IMP-8, WIND and ACE satellites, and Dst index from Kyoto to characterize the storms.

COMPARAÇÃO ENTRE VARIAÇÕES GEOMAGNÉTICAS OBSERVADAS EM VASSOURAS – RJ (22.40 S, 43.65 W) E SÃO MARTINHO DA SERRA – RS (29.43 S, 53.80 W)¹

Everton Frigo², Nalin B. Trivedi³, Virnei S. Moreira⁴, Eduardo Andrighetto⁵,
Jairo F. Savian⁶ e Nelson J. Schuch⁷

O Sol emite partículas energéticas – Plasma Solar - continuamente em todas as direções. A Terra possui ao seu redor um campo magnético – chamado Campo Magnético Terrestre ou Campo Geomagnético – que impede as partículas emitidas continuamente pelo Sol – que constituem o chamado Vento Solar – atinjam a Terra diretamente. A região delimitada pelas linhas do Campo Geomagnético é denominada Magnetosfera Terrestre. A interação da radiação solar ultravioleta com a Atmosfera neutra entre 75 e 1000 km de altura forma a Ionosfera Terrestre. Em dias de atividade solar normal, ou magneticamente quietos, as variações diurnas regulares são geradas pelos sistemas de correntes elétricas que fluem na Ionosfera. Devido ao movimento da Terra, que gira abaixo dessas correntes elétricas, ocorrem as chamadas variações diurnas com período de 24 horas. Quando ocorre uma tempestade geomagnética, as variações de origem magnetosférica prevalecem em relação às variações de origem ionosférica. Após a passagem pela Ionosfera as pulsações geomagnéticas sofrem algumas modificações e chegam a Terra como ondas eletromagnéticas. Existem vários locais espalhados ao longo da superfície da Terra, e a bordo de satélites, onde estão instalados equipamentos capazes de medir as variações às quais o Campo Geomagnético é submetido. A região do nosso Planeta onde o Campo Magnético Terrestre apresenta a sua menor intensidade é denominada Anomalia Magnética do Atlântico Sul – AMAS -, e o centro da AMAS é localizado na região Sul do Brasil. O Observatório Geomagnético localizado junto ao Observatório Espacial do Sul - OES/CRSPE/INPE-MCT - no município de São Martinho da Serra – RS, está muito próximo ao centro da AMAS. O estudo dos dados geomagnéticos adquiridos em São Martinho da Serra é muito importante para entender-se quais os processos físicos que estão ocorrendo na Magnetosfera e Ionosfera Terrestre na região da AMAS e o que os diferenciam dos fenômenos observados em outras regiões onde o Campo Geomagnético é mais intenso. O método utilizado para atingir-se esse objetivo é a realização de comparações entre dados geomagnéticos de São Martinho da Serra e da Estação Geomagnética de Vassouras, que fica na borda da AMAS. Como resultado desse estudo, verifica-se que, em dias magneticamente calmos, observa-se nas duas estações geomagnéticas variações diurnas regulares, e nos dias magneticamente perturbados as pulsações magnéticas observadas em São Martinho da Serra possuem uma amplitude maior quando comparadas às pulsações geomagnéticas observadas em Vassouras.

1 -Trabalho desenvolvido no LACESM /CT/UFSM e no OES/CRSPE/INPE-MCT

2 - Apresentador/Autor: Acadêmico do Curso de Física, LACESM/UFSM

3 - Orientador, LACESM/CT/UFSM – FATEC/FURNAS/INPE

4 - Co-autor, Acadêmico do Curso de Física, LACESM/UFSM

5 - Co-autor, Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica, LACESM/UFSM

6 - Co-autor, Acadêmico do Curso de Física, LACESM/UFSM

7 - Co-autor, Coordenador da Ação de Implantação do CRSPE/INPE – MCT

CLIMA ESPACIAL E DISTURBIOS NO GEOESPAÇO¹

Jairo Francisco Savian², Walter Demétrio Gonzalez Alarcon³, Vânia Fátima Andrioli⁴, Marcos Roberto Signori⁵, Everton Frigo⁶ e Nelson Jorge Schuch⁷

A variabilidade solar está intimamente relacionada a distúrbios no Geoespaço, afetando telecomunicações, causando danos em sistemas tecnológicos tanto espaciais, quanto terrestre, que envolvem grandes quantidades de recursos financeiros. A comunidade científica tem sido atraída há vários séculos pelas relações do cenário Sol-Terra, devido à importância do melhor conhecimento dos fenômenos que ocorrem no Meio Interplanetário, possibilitando uma visão global de seus processos físicos. Esta área de conhecimento é chamada de Clima Espacial. Existem três principais fenômenos que afetam o Clima Espacial que dependem das energias envolvidas, os tempos de propagação do Sol até a Terra e a duração de seus efeitos. O primeiro deles é a radiação eletromagnética, sua chegada é imediata e tem duração de 1-2 horas, causam interferência em satélites, radares e perda de ondas curtas. O segundo é o evento de prótons - partículas de alta energia - a sua chegada varia de 15 min à poucas horas e provocam desorientação em satélites, falha na leitura de sensores, danos em espaçonaves, falha em cargas úteis, radiação em aeronaves e perdas em ondas curtas e o terceiro são as Tempestades Geomagnéticas – partículas de baixa e média energia -, seu período de chegada é de 2-4 dias e pode durar dias, causando carga e arraste de espaçonaves, falhas em espaçonaves, erro na trajetória de lançamento, interferência em radares, anomalias na propagação de radio e “black out” de energia elétrica. O objetivo deste trabalho é mostrar quais são os principais mecanismos utilizados para fazer a previsão das Tempestades Geomagnéticas Intensas, cuja principal causa são as Ejeções Coronais de Massa Solares. Esta previsão pode ser feita com uma antecedência de até duas horas pelos satélites localizados no ponto Lagrangeano L1 – ponto de equilíbrio gravitacional entre o Sol e a Terra – e de 8 à 12 horas utilizando a Rede Internacional de Detectores de Muons, a qual faz parte o Sistema Detector Multidirecional de Muons, instalado e em operação no Observatório Espacial do Sul OES/CRSPE/INPE-MCT em São Martinho da Serra, RS.

1 - Trabalho desenvolvido no LACESM/CT/UFSM e no OES/CRSPE/INPE – MCT.

2 - Apresentador: Acadêmico do Curso de Física, LACESM/UFSM

3 - Orientador: Coordenador do Grupo Magnetosfera-Heliosfera, MAGHEL/INPE-MCT.

4 - Co-Autor: Acadêmica do Curso de Física, LACESM/UFSM

5 - Co-Autor: Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica, LACESM/UFSM

6 - Co-Autor: Acadêmico do Curso de Física, LACESM/UFSM

7 - Co-Autor: Coordenador da Ação de implantação do CRSPE/INPE - UFSM

DANOS PROVOCADOS POR TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS INTENSAS Dst < -100 nT

Jairo Francisco Savian^(1,4), Vânia Fátima Andrioli^(1,4), Marcos Roberto Signori^(1,4), Marlos Rockenbach da Silva⁽²⁾, Alisson Dal Lago^(2,3), Luis Eduardo Antunes Vieira^(2,3), Ezequiel Echer⁽²⁾, Walter Demétrio Gonzalez Alarcon⁽²⁾ e Nelson Jorge Schuch⁽⁴⁾

¹Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, LACESM/CT/UFSM, Av. Roraima – Bairro Camobi – Caixa postal 5021 – 97110-970, Santa Maria, RS, Brasil
savian@lacesm.ufsm.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, SP, Brasil

³Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, SP, Brasil

⁴Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE, Santa Maria, RS, Brasil

RESUMO

A região que se estende do Sol até o meio interestelar é chamado Meio Interplanetário. Nesta região ocorrem fenômenos físicos, sendo grande parte proveniente da atividade solar, conseqüências de processos que nele ocorrem, envolvendo instabilidades de plasma e campos magnéticos causados por emissões solares transientes, cuja ocorrência varia com o Ciclo de Atividade Solar de 11 anos. As Tempestades Geomagnéticas são eventos de grande perturbação no Campo Magnético Terrestre (CMT), onde a Terra fica vulnerável a precipitação de partículas energéticas do Vento Solar. A Tempestade Geomagnética caracteriza-se pelo decréscimo da componente horizontal, H, do Campo Magnético Terrestre e posterior fase de recuperação. O decréscimo atribui-se a um aumento da população de partículas aprisionadas na Magnetosfera que aumentam a intensidade da Corrente de Anel Magnetosférica que é gerada pelo movimento de partículas eletricamente carregadas. Para medir a intensidade da Corrente de Anel é utilizado o índice Dst que é baseado nas medidas horárias da componente horizontal H. Acredita-se que o mecanismo físico responsável pela transferência de energia do Vento Solar para a Magnetosfera seja a reconexão entre o Campo Magnético Interplanetário (CMI) e o Campo Magnético Terrestre, para isso é necessário que a componente do CMI esteja na direção antiparalela a do CMT. O objetivo deste trabalho é mostrar os efeitos causados por Tempestades Geomagnéticas Intensas Dst < -100nT, tais como, carga e arraste de espaçonaves, falhas em aeronaves, erro na trajetória de lançamento, interferências em radares, anomalias na propagação de rádios, “black out” de energia elétrica, entre outros e mostrar como é feita a previsão destas tempestades utilizando raios cósmicos e dados do Meio Interplanetário.

INTRODUÇÃO AO ESTUDO DO CLIMA ESPACIAL

INTRODUCTION TO SPACE WEATHER STUDIES

**Jairo Francisco Savian^(1,4), Vânia Fátima Andrioli^(1,4), Luis Eduardo Antunes Vieira⁽³⁾
Marcos Roberto Signori^(1,4), Alisson Dal Lago⁽²⁾
Nelson Jorge Schuch⁽⁴⁾, Walter Demétrio Gonzalez Alarcon⁽²⁾**

¹ Universidade Federal de Santa Maria – Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria
UFSM/ LACESM/CT/UFSM, Av. Roraima – Bairro Camobi – Caixa Postal 5021 – 97110-970
Santa Maria, RS, Brasil
savian@lacesm.ufsm.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT, São José dos Campos, SP, Brasil

³ Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, SP, Brasil

⁴ Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – Observatório Espacial do Sul
OES/CRSPE/INPE-MCT, Santa Maria, RS, Brasil

RESUMO

O objetivo do trabalho é mostrar os efeitos do Clima Espacial e sua previsão para que possamos amenizar suas conseqüências. A previsão é feita por várias técnicas observacionais, dentre as quais destacamos a Rede Internacional de Detectores de Muons oriundos de Raios Cósmicos de alta energia (~50GeV) e Satélites localizados no ponto Lagrangeano como é o caso do satélite SOHO da NASA/ESA e o satélite ACE da NASA. Os resultados obtidos mostram que o satélite SOHO é a ferramenta mais eficiente, pois fazendo o sensoriamento remoto do Sol através de imagens pode prever distúrbios com dias de antecedência, porem com incertezas na ordem de 1 dia. Observações de Raios Cósmicos como a feita pela Rede Internacional de Detectores de Muons estão em uma posição intermediária, tanto em antecedência quanto em previsão. O satélite ACE pode prever distúrbios com até 1 hora de antecedência, porem com grande precisão em relação aos seus efeitos terrestres, dando informações completas sobre plasma, partículas energéticas e Campo Magnético Interplanetário. O estudo é fundamental para entendermos os processos físicos que envolvem a variabilidade do Clima Espacial, cuja origem é o Sol, que a cada 11 anos entra em intensa atividade, apresentando regiões de instabilidades que liberam, grandes quantidades de matéria e energia na forma de Ejeções Coronais de Massa e explosões solares, podendo assim evitar prejuízos em sistemas eletrônicos e biológicos provocados por Tempestades Geomagnéticas.

Study of cosmic ray response to intense geomagnetic storms observed with low latitude muon telescopes at the Brazilian Southern Space Observatory

J. F. Savian (1,2), A. Dal Lago (2), M. R. da Silva (2), V. F. Andrioli (1,2), G. I. Pugacheva (3), W. D. Gonzalez (2), J. W. Bieber (4), K. Munakata (5) and N. J. Schuch (3)

(1) Space Science Laboratory of Santa Maria - LACESM/CT - UFSM, Santa Maria, Brazil, (2) National Institute for Space Research - INPE - MCT, São José dos Campos, Brazil, (3) Southern Regional Space Research Center - CRSPE/INPE - MCT, Santa Maria, Brazil, (4) Bartol Research Institute, University of Delaware, Newark, USA, (5) Physics Department, Faculty of Science, Shinshu University, Matsumoto, Japan

Forbush decreases are depressions of cosmic ray intensity observed by ground telescopes when the interplanetary magnetic field (IMF) disturbances pass by the Earth's magnetosphere. A solar disturbance propagating away from the Sun affects the pre-existing galactic cosmic ray population of in a number of ways. For instance, analysis of cosmic ray anisotropy with the IMF data measured by space probes yields the cosmic ray gradient vector, which contains valuable information about the large-scale structure and geometry of the CME (Bieber and Everson, 1998). In this work we analyse intense geomagnetic storms ($Dst < -100nT$) observed in the period of July 20th to 30th, 2004. The cosmic ray observation data was obtained using the muon telescope of the Brazilian Southern Space Observatory-SSO of the INPE's Southern Regional Space Research Center at ($29^{\circ}26'24''S$; $53^{\circ}48'38''W$). We focus on muon count rate fluctuation during the geomagnetic storm period. Observations made by ACE satellite are used to identify interplanetary structures responsible for the forbush decreases. Interplanetary data such us: plasma parameters (solar wind speed, density and temperature of protons), interplanetary magnetic field (B , B_x , B_y , B_z), observed by ACE satellite, and Dst index from Kyoto were used to characterize the iterplanetary structures causing the storms. With an eye towards the forecasting of geomagnetic disturbances, the SSO muon telescope is part of the International Muon Detector Network, which is able to predict the arrival of disturbances up to 8h in advance.

UTILIZANDO O TELESCÓPIO PROTÓTIPO DE SÃO MARTINHO DA SERRA NO ESTUDO DO CLIMA ESPACIAL¹

VÂNIA FÁTIMA ANDRIOLI², NELSON J. SCHUCH³, JAIRO FRANCISCO SAVIAN⁴,
MARCOS ROBERTO SIGNORI⁵, MARLOS ROCKENBACH DA SILVA⁶, ALISSON DAL
LAGO⁷

O Estudo do Clima Espacial está em uma posição similar à Meteorologia no início do século XX devido ao especial interesse físico nas tempestades espaciais e de seu impacto social e econômico em significantes sistemas tecnológicos como indústria de satélites, companhias aéreas, indústria de petróleo e minerais, indústria de energia elétrica, telecomunicações, usuários e provedores de sistemas de posicionamento, dentre outros. O estudo das relações Terra – Sol é feito com o auxílio de equipamentos especiais como Satélites, Detectores de Raios Cósmicos como Detectores de Muons e de Nêutrons. Neste trabalho foram utilizados os dados do Telescópio Protótipo Multidirecional de Muons, instalado no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE-MCT, no Município de São Martinho da Serra-RS, Brasil, ele faz parte da Rede Internacional de Detectores de Muons composta pelos Detectores instalados nas cidades de Nagoya (Japão), Hobart (Austrália) e o Telescópio Protótipo de São Martinho da Serra (Brasil). Estes detectam partículas, muons, oriundas de Raios Cósmicos de alta energia ~50GeV, os quais chegam na Terra de forma isotrópica. Quando há uma intensa atividade solar, ocorrem ejeções coronais de massa, “flares”, principais responsáveis pela ocorrência de Tempestades Geomagnéticas. Estas estruturas movimentam-se no meio interplanetário através do Vento Solar, em altas velocidades, arrastando o Campo Magnético Interplanetário e causando uma onda de choque que ao se aproximar da Terra obstrui a passagem dos Raios Cósmicos, causando um decréscimo na contagem dos muons, “decréscimos de Forbush”. Com o estudo e análise desses decréscimos é possível prever a chegada das estruturas solares com grande antecedência, de 8 à 12 horas antes do início da Tempestade Geomagnética.. No dia 20 de Novembro de 2003, com a utilização do Telescópio Protótipo do Observatório Espacial do Sul, mesmo não abrangendo grande área de detecção, foi possível ser observado um súbito decréscimo na contagem dos muons causado pela onda de choque de uma Ejeção Coronal de Massa oriunda da intensa atividade solar do dia 18 de Novembro de 2003, aproximadamente às 21:00 UT mais ou menos 9hs antes do início da Tempestade Geomagnética. Estes resultados são encorajadores enfatizando a importância da Rede Internacional de Detectores de Muons para o Estudo e Previsão do Clima Espacial em benefício para as Atividades Espaciais da Humanidade.

1 - Trabalho desenvolvido no LACESM/CT/UFSM e no OES/CRSPE/INPE – MCT.

2 - Apresentador: Acadêmica do Curso de Física, LACESM/UFSM

3 - Orientador: Coordenador da Ação de implantação do CRSPE/INPE - UFSM.

4 - Co-Autor: Acadêmico do Curso de Física, LACESM/UFSM

5 - Co-Autor: Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica, LACESM/UFSM

6 - Co-Autor: Colaborador do Grupo Magnetosfera-Heliosfera, MAGHEL/INPE/MCT

7- Co-Autor: Colaborador do Grupo Magnetosfera-Heliosfera, MAGHEL/INPE/MCT

UTILIZANDO A REDE INTERNACIONAL DE DETECTORES MULTIDIRECIONAIS DE MUONS NA PREVISÃO DA TEMPESTADE GEOMÁGNÉTICA DO DIA 20 DE NOVEMBRO DE 2003

Vânia F. Andrioli^{1,3}, Jairo F. Savian^{1,3}, Marcos R. Signori^{1,3}, Marlos R. Da Silva^{1,3}, Alisson Dal Lago², Luis Eduardo A. Vieira², Ezequiel Echer², Walter D. Gonzalez², Nelson J. Schuch³

¹Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, LACESM/CT/UFSM Av. Roraima – Bairro Camobi – Caixa Postal 5021 – 97110-970 – Santa Maria - RS – Brasil
vania@lacesm.ufsm.br, njschuch@lacesm.ufsm.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos – SP

³Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE, Santa Maria – RS

A Rede Internacional de Detectores Multidirecionais de Muons é composta pelos Sistemas de Detectores instalados em Nagoya (Japão), Hobart (Austrália) e o Telescópio Protótipo de São Martinho da Serra, localizado no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE-MCT, no Município de São Martinho da Serra-RS, Brasil. Estes Sistemas detectam partículas, muons, oriundas de Raios Cósmicos de alta energia, ~50GeV, de várias direções do Espaço. As estruturas solares capazes de causar Tempestades Geomagnéticas viajam através do Vento Solar a altas velocidades arrastando o Campo Magnético Interplanetário e causando perturbação no Meio Interplanetário. Essa perturbação ao passar pela Terra, obstrui a passagem dos Raios Cósmicos causando um decréscimo na contagem dos muons, “decréscimo de Forbush”. Estudando e analisando estes decréscimos é possível prever com uma antecedência de 8 a 12 horas antes do início de uma Tempestade Geomagnética. Examinamos neste trabalho o “decréscimo de Forbush” observado pelo Telescópio Protótipo do Observatório Espacial do Sul, no dia 20 de Novembro de 2003. Este súbito decréscimo na contagem dos muons foi causado pela perturbação ocorrida devido à onda de choque de uma Ejeção Coronal de Massa – CME - do tipo “halo”, observado as 18:48 UT pelo instrumento LASCO a bordo do satélite SOHO. Esta CME foi procedente da intensa atividade solar do dia 18 de Novembro de 2003. O decréscimo estudado foi observado pelo Sistema de Detecção do Observatório Espacial do Sul aproximadamente às 21:00 UT quase 9hs antes do início da Tempestade Geomagnética. O objetivo deste trabalho é mostrar a importância da Rede Internacional de Detectores Multidirecionais de Muons na previsão das Tempestades Geomagnéticas no intuito de aumentar a vida útil de significantes sistemas tecnológicos e em benefício para as Atividades Espaciais da Humanidade.



Forbush decreases for 2001-2004 observed with low latitude muon telescopes of Brazilian SSO observatory

J. F. Savian (1,2), M. R. da Silva (2), L. E. A. Vieira (2), A. Dal Lago (2), E. Echer (2), G. I. Pugacheva (3), W. D. Gonzalez (2), J. W. Bieber (4), K. Munakata (5), V. F. Andrioli and J. N. Schuch (3)

(1) Space Science Laboratory of Santa Maria – LACESM/CT - UFSM, Santa Maria, Brazil, (2) National Institute for Space Research – INPE - MCT, São José dos Campos, Brazil, (3) Southern Regional Space Research Center – CRSPE/INPE - MCT, Santa Maria, Brazil, (4) Bartol Research Institute, University of Delaware, Newark, USA, (5) Physics Department, Faculty of Science, Shinshu University, Matsumoto, JAPAN (galinasm@pochta.ru / Fax: +7 095-3335178 / Phone: +7 095 3333045)

Forbush decrease is a depression of cosmic ray intensity observed by ground based neutron monitors (NM) and muon telescopes when the IMF disturbance associated with the FD passes the Earth or exists in the space between the Sun and Earth. The cosmic ray flux diminishes in the regions closed with enhanced IMF magnitude which forbids particles to enter in the region. In principle, the similar physical mechanism is governing the cosmic ray modulation and cosmic ray decreases: heliospheric magnetic field turbulences, fluctuations on which CR particles are scattering, changing their pitch angles and escape from initial velocity direction. As the CR flux observed on the ground based installations is sensitive to the frequency and amplitude of the IMF inhomogenities the CR flux variations are useful tools for remote sensing and even for tomography (in the case of flux measurements by network) of the large scale structures of solar wind disturbances existing in proximities of the Earth and in the heliosphere on the whole. As for the energy of muons registered by low latitude detectors corresponds to several tens GeV energy of primary CR incident on the Earth atmosphere, those have great Larmor gyration radius in the IMF near the Earth, of about 0.1-0.2 AU that makes them sensitive to the spatial IMF inhomogenities of the similar scale. The CME hitting the Earth magnetosphere have this kind scale comparable with 1 AU and from the muon detector observations there could be derived the features of the disturbances. The latter could be utilized as a precursor of CME

collision with the Earth magnetosphere which causes the geomagnetic storms.

Before to utilize the muon count rate for geomagnetic storm prediction we would like to study the count rate fluctuations in the whole and Forbush decreases first of all. For the time of CR observations by muon telescopes of Southern Space Observatory (29°26'24"S; 53°48'38"W) from 2001 to 2004 there happened 36 great geomagnetic storms with the Dst index lower than -100 nT. In all cases when storms happened, the muon monitors registered FD too. In the half of the cases muon FD generally coincide in time with the storm, beginning several hours before its, in another cases muon FD were observed long before the storms possibly being associated with a preceding turbulence in IMF. Always the muon FD are greater than the FD of South Pole NM, the latter are less or about of 10%. When muon telescope looks at the sun side, it mostly feels a decrease of its count rate of about 10-15% during 12 hours, showing that the space between Sun and Earth is fulfilled with IMF turbulences, however we considered mostly disturbed periods. The statistical study of muon telescope response to disturbed IMF continues and we will report main features of the study in the presentation.



Um estudo sobre as ondas de choque no meio interplanetário

Vânia Fátima Andrioli^(1,2), Jairo Francisco Savian^(1,2), Ezequiel Echer^(3,4), Nelson Jorge Schuch⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – Santa Maria – RS, Brasil;

⁽²⁾ Universidade Federal de Santa Maria – Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – Santa Maria, RS, Brasil;

⁽³⁾ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Divisão de Geofísica Espacial (permanente) - São José dos Campos – SP, Brasil;

⁽⁴⁾ Max Planck Institut fur Sonnensystemforschung (temporary), Katlenburg-Lindau, Germany.

(vania@lasesm.ufsm.br/ Fax: +55 – 55 220 8007)

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005. Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Resumo

O meio interplanetário, o espaço entre os planetas e o Sol, está permeado pelo vento solar que é a própria atmosfera solar se expandindo no espaço interplanetário. Esta atmosfera é composta por um plasma tênue magnetizado o qual favorece a ação das forças Coulombianas de longo alcance. Estas pela presença deste campo magnético, conseguem exercer seu papel que é o de transferência de momentum e informação às partículas provenientes do Sol. Qualquer mudança na atividade solar se reflete no meio interplanetário devido a transferência de informações. A agitação do Sol, consequência de sua constante atividade, é transmitida ao vento solar e frequentemente produz Ondas de Choque. É possível, com o estudo das variações dos parâmetros interplanetários como: densidade, temperatura e velocidade do vento solar e intensidade do campo magnético interplanetário – CMI, identificar a presença desses choques e calcular sua velocidade, intensidade e direção. Neste trabalho utilizamos dados de plasma e CMI fornecidos pelo sistema de dados On-line da sonda ACE – Advanced Composition Explorer, para fazer um estudo acerca de ondas de choque, analisando os gráficos de dados destes eventos e classificando-os, segundo os perfis dos choques feitos por E. Echer et al. [2003], em choques frontais, rápidos e lentos; ou reversos, rápidos e lentos. Este estudo deteve-se ao período de 2002 – 2003, que corresponde ao declínio do Ciclo Solar 23.

Introdução

O meio interplanetário está permeado pelo vento solar que é resultado de uma enorme diferença de pressão de gás entre a Corona Solar e o Espaço Interestelar. Esta diferença conduz o plasma para fora, apesar da influência da gravidade solar. A comunidade científica possui interesse em estudar o vento solar, principalmente nas Relações Sol-Terra, como mostra na Figura 1, pois este distante e tênue plasma é significativamente influenciado pela atividade solar e transmite esta influência para os planetas, cometas, partículas e raios cósmicos que nele estão imersos. A origem da influência

solar através da interação do campo magnético solar com o plasma coronal tem sido o maior tópico da pesquisa do vento solar.

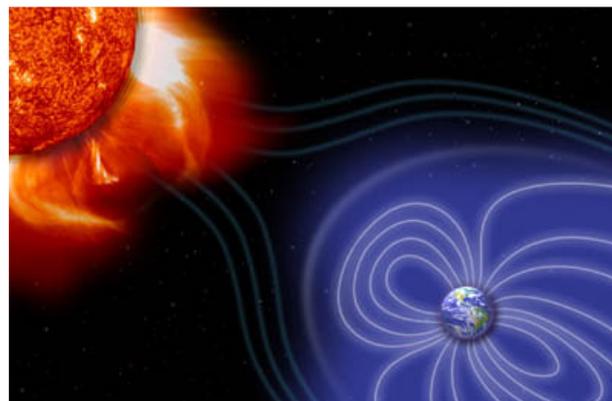


Figura 1 – Interações Sol – Terra principal interesse no estudo do vento solar. Fonte: <http://www.spaceweathercenter.org>

O vento solar que passa pelas proximidades da Terra é constituído principalmente por hidrogênio ionizado, com uma pequena mistura de hélio ionizado (~5%), e íons de elementos mais pesados. Embebido neste plasma está um campo magnético com orientação aproximadamente paralela ao plano da Eclíptica, mas em aproximadamente 45° à linha Sol-Terra para um observador a 1UA (Uma Unidade Astronômica, $1,49598 \times 10^8$ Km). O espaço interplanetário apresenta uma densidade extremamente baixa (cerca de cinco átomos por cm^3), sendo um meio não colisional. Neste meio, o empilhamento de ondas não lineares pode ocorrer e gerar choques. O vento solar favorece a ação das forças Coulombianas de longo alcance. Essas forças exercem no meio interplanetário, um papel semelhante ao das colisões. Colisões em um gás ordinário servem para transferir momentum e energia entre as moléculas, além de fornecer o acoplamento para que a onda sonora, meio básico de transferência de informação, exista (Burgess, 1995). Em um plasma sem colisões, tal acoplamento colisional está ausente, pois o livre caminho médio entre as colisões é muito maior que

o sistema (E. Echer, tese, 2005). No caso do plasma interplanetário, o livre caminho médio na órbita da Terra é da ordem da distância Terra-Sol.

Além do empilhamento das ondas não lineares outros fatores podem produzir ondas de choques, por exemplo, as regiões de interação corrotante (RIC ou RI), quando a compressão do vento solar mais lento é feita pelos feixes rápidos emitidos pelos buracos coronais, provoca o desenvolvimento de choque, principalmente do tipo reverso a 1UA, e mais raramente frontal rápido (Burlaga, 1995); enormes ejeções de material coronal expelidas do Sol, que se propaga no meio interplanetário, EMCIs, a maioria das ondas de choque detectadas próximo à órbita da Terra, são causadas por EMCIs. (Gonzalez et al. 1999).

Choques interplanetários podem ser classificados de acordo com a propagação relativa ao Sol, se estiver se propagando para o Sol é dito choque reverso ou para longe do Sol é dito choque frontal; mas podem ser classificados de acordo com o modo de onda, se a velocidade relativa ao vento solar é maior que o modo rápido da onda magnetossônica, velocidade característica do meio, é considerado choque rápido ou se é maior que o modo lento da onda magnetossônica é considerado choque lento. (Echer et al. 2003).

Na Figura 2, podemos observar os perfis dos parâmetros densidade (Np), temperatura (Tp), e velocidade (VSW) de próton e campo magnético (B), para diferentes tipos de choque. Em choques frontais rápidos observam-se saltos abruptos positivos em todos os parâmetros. Em choques frontais lentos há um salto abrupto negativo no parâmetro B; em choques reversos há saltos negativos nos parâmetros de Tp e Np e saltos positivos em VSW, e se for um choque do tipo rápido, há saltos abruptos negativos em B e, caso for lentos há um salto positivo em B.

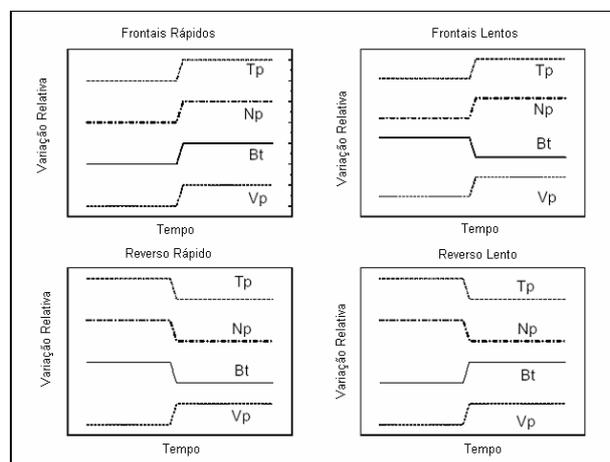


Figura 2 - Diagrama ilustrando os perfis de quatro tipos diferentes de choques: Frontais Rápidos, Frontais Lentos, Reversos Rápidos e Reversos Lentos, com a respectiva variação nos parâmetros de plasma e campo magnético interplanetário. [Adaptado de Echer et al, 2003]

A dinâmica das ondas existentes no vento solar é chamada Magnetohidrodinâmica (MHD), devido ao fato dessas ondas estarem imersas num fluido, o plasma, que

possui propriedades magnéticas. Um choque MHD perpendicular é aquele em que o campo magnético no lado *upstream*, precedente à chegada do fluxo causador do choque, é perpendicular à normal à frente de choque. A única onda que se propaga perpendicular a **B** é a onda magnetossônica. O fluxo entra com uma velocidade maior que a velocidade magnetossônica e sai com uma velocidade menor que a velocidade magnetossônica. Portanto o choque propaga-se supermagnetossonicamente. Para um choque ser considerado perpendicular a equação a seguir deve ser satisfeita:

$$\frac{\overline{B}_d}{\overline{B}_u} = \frac{Np_d}{Np_u} \quad (1)$$

onde, \overline{B}_u e Np_u são os valores da intensidade do campo magnético e densidade de prótons respectivamente *upstream*, \overline{B}_d e Np_d são os valores da intensidade do campo magnético e densidade de prótons respectivamente *downstream*, posterior ao fluxo causador do choque. Esta equação diz que a direção do campo magnético não muda através de um choque perpendicular.

Material e métodos

Utilizamos dados de plasma e CMI fornecidos pela sonda ACE - Advanced Composition Explorer disponíveis em: <<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/index.html>> com resolução temporal de 64 segundos. Na análise das variações de parâmetros, dividimos os gráfico em 3 janelas distintas de 10 minutos cada, o intervalo de turbulência na chegada do choque (S), outra antes da chegada do fluxo (U) e uma última depois do fluxo (D). Fizemos um cálculo do valor médio de cada parâmetro e determinamos as variações dos parâmetros de plasma e campo magnético, e seus respectivos erros de desvio padrão da média,

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \overline{X})^2} \quad (2)$$

Onde n é o número de dados utilizados neste caso 10, X é o valor da variável e \overline{X} é a média aritmética entre os valores utilizados. No cálculo da incerteza da ortogonalidade do choque utilizamos a seguinte equação:

$$\sigma_{rx} = r_x \left(\frac{\sigma_{xu}}{xu} + \frac{\sigma_{xd}}{xd} \right) \quad (3)$$

onde r_x é a razão entre duas grandezas, Np ou B, XU e XD, são os valores de uma grandezas, respectivamente antes e depois do choque, σ_{xu} e σ_{xd} são os erros dos valores médios, respectivamente antes e depois do choque. Posteriormente calculamos a intensidade de cada evento com as equações de Rankine-Hugoniot. Estas equações são relações físicas fundamentais para uma superfície plana de descontinuidade (choque), através da qual há um salto nos campos físicos dos *upstream* para o *downstream*. Essas equações expressam a conservação da massa, de fluxo de

momentum tangencial, de energia e de fluxo magnético. Burlaga (1995) apresenta estas equações relativamente a um sistema de referência com origem no choque.

Se um choque está se movendo radialmente para longe do Sol com velocidade U_s relativa ao Sol, sendo as velocidades de plasma nos lados *upstream* e *downstream* respectivamente u_1 e u_2 e predominantemente radiais, então a conservação de massa fornece a velocidade do choque em termos da densidade e da velocidade medidas por uma única espaçonave:

$$U_s = \frac{n_2 u_2 - n_1 u_1}{n_2 - n_1} \quad (4)$$

Onde, n_1 e n_2 são respectivamente as densidades *upstream* e *downstream*.

Exemplos

Neste trabalho estudamos detalhadamente cada tipo de choque e as figuras seguintes mostram exemplos de eventos estudados. O início do choque é indicado por uma linha nas figuras a seguir.

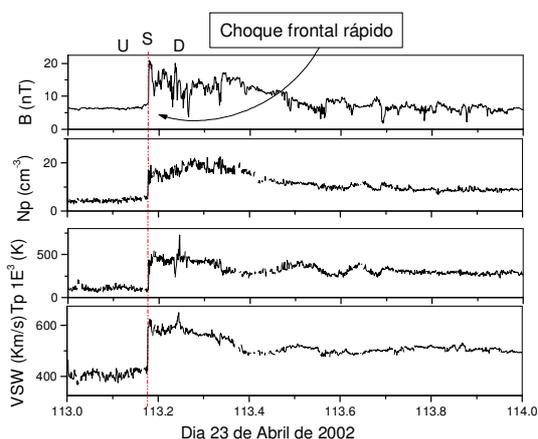


Figura 3 - Exemplo de um choque frontal rápido do dia 23 de abril de 2002. Onde houvera saltos abruptos em todos os parâmetros de plasma densidade (N_p), temperatura (T_p), velocidade (VSW) e campo magnético interplanetário (B).

A Figura 3 é um exemplo de choque que está se movendo para fora do Sol em relação ao Sol, portanto, frontal, e rápido por sua velocidade relativa ao vento solar ser maior que o modo rápido da onda magnetossônica. Pode-se observar com clareza a chegada do fluxo e os saltos nos parâmetros nos lados *upstream* e *downstream*. É apresentado na Figura 4, um exemplo de um choque Reverso, ou seja, está se propagando para o Sol com relação ao mesmo e Rápido, pois a velocidade relativa ao vento solar é maior que o modo rápido da onda magnetossônica.

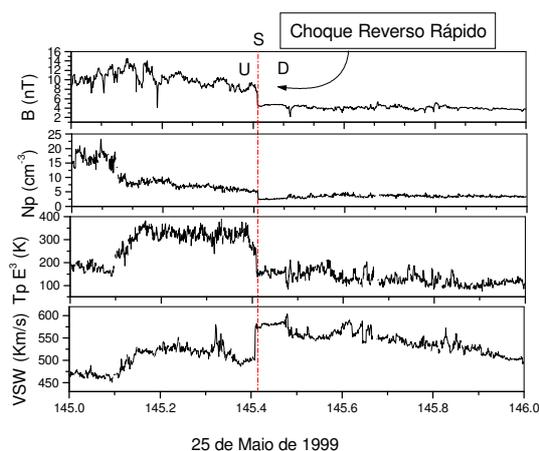


Figura 4 - Exemplo de um choque reverso rápido onde há saltos abruptos negativos nos parâmetros de temperatura (T_p), densidade (N_p) e campo magnético (B) e saltos abruptos positivos no parâmetro de velocidade do vento solar (VSW).

Resultados

Uma análise das porcentagens de cada perfil de choque feita com o total de eventos ocorridos no período de 2002-2003 é apresentada na Figura 5. Foram analisados 83 choques deste período, deste total, 27 ocorreram no ano 2003 e 56 no ano 2002.

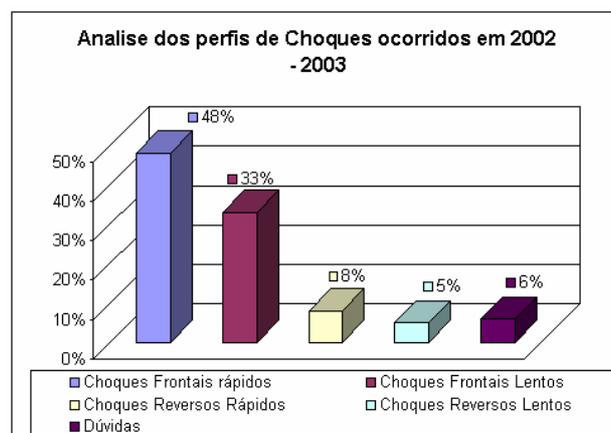


Figura 5 – Diagrama representando as porcentagens dos perfis dos choques ocorridos em 2002 – 2003.

Cálculos de velocidade e variação de parâmetros de eventos ocorridos no período de 2002 – 2003 exemplificando cada tipo diferente de choque são mostrados na Tabela 1. Além do cálculo das variações de cada parâmetro foram calculadas: a velocidade U_s de cada choque e as razões:

$$rB = \frac{B_d}{B_u} \quad (5)$$

$$rNp = \frac{N_{pd}}{N_{pu}} \quad (6)$$

Estes últimos cálculos são importantes para sabermos se a direção do choque é ou não perpendicular, através da relação (1).

Tabela 1 – Exemplo do cálculo da variação de parâmetros para cada tipo de choque onde, os subscritos, u e d, representam respectivamente upstream e downstream. Us representa a velocidade do choque medidas por uma única espaçonave, e r B e r Np representam as razões entre os valores downstream e upstream da intensidade do campo magnético e da densidade respectivamente.

Exemplos de cálculo de parâmetros				
	Choque Reverso Rápido	Choque Reverso Lento	Choque Frontal Rápido	Choque Frontal Lento
	06/02/2002 02:03 UT	03/03/2002 22:00 UT	23/04/2002 04:15 UT	14/10/2003 16:22 UT
Npu (/cm ³)	8,6 ⁺ _{-0,64}	41 ⁺ _{-1,62}	5,76 ⁺ _{-0,52}	15,52 ⁺ _{-0,56}
Npd (/cm ³)	5,5 ⁺ _{-0,67}	20 ⁺ _{-1,21}	15,25 ⁺ _{-2,02}	21,04 ⁺ _{-1,52}
ΔNp (/cm ³)	-3,1	-21,6	9,50	5,52
Tpu (K)	310522	35985,1	85864,83	90116,86
Tpd (K)	248,342	26248,3	439258,89	212890,00
ΔTp (K)	-62,180	-9,737	353394,06	122773,14
VSWu (Km/s)	624,8	353,1	430,11	481,89
VSWd (km/s)	650,9	367,9	599,78	516,66
ΔVSW (Km/s)	26,1	14,8	169,67	34,76
Bu (nT)	14,5 ⁺ _{-0,33}	10,1 ⁺ _{-0,35}	7,42 ⁺ _{-0,11}	15,64 ⁺ _{-0,18}
Bd (nT)	8,8 ⁺ _{-0,18}	15,1 ⁺ _{-0,17}	16,80 ⁺ _{-2,84}	8,53 ⁺ _{-2,02}
ΔB (nT)	-5,7	5,1	9,38	-7,10
Us (Km/s)	578,5	115,8	702,61	614,41
r B	0,61 ⁺ _{-0,03}	1,51 ⁺ _{-0,07}	2,26 ⁺ _{-0,42}	0,55 ⁺ _{-0,14}
r Np	0,64 ⁺ _{-0,12}	0,48 ⁺ _{-0,05}	2,64 ⁺ _{-0,58}	1,36 ⁺ _{-0,15}
Vetores em coordenadas GSE				
Vu (Km/s)	[-615.9; 95.1; -32.5]	[-346.9; -56.5; -33.1]	[-428.51; -9.59; 34.26]	[-477.97; -59.30; -15.40]
Vd (km/s)	[-648.1; 55.5; 1.9]	[-364.2; -45.2; -25.2]	[-597.23; 30.41; 5.15]	[-514.90; -38.63; 1.60]
Bu (nT)	[-9.9; 9.2; 3.7]	[6.4; -4.1; 6.2]	[-1.56; 4.14; -5.56]	[-10.53; 8.38; 7.86]
Bd (nT)	[-60.4; 50.9; -0.9]	[-7.9; 12.5; -1.6]	[-0.05; 9.06; 6.27]	[-1.02; 3.77; -3.30]

Conclusões

Neste trabalho apresenta-se uma breve revisão sobre conceitos básicos de vento solar, ondas de choque no meio interplanetário e suas possíveis origens.

Faz-se um estudos dos perfis dos choques interplanetários e com o auxílio das equações de Rankine-Hugoniot, calcula-se a velocidade Us de cada choque, além das razões entre as densidades e os campos magnéticos. Considerando a margem de erro das medidas, tem-se no dia 06/02/2002 um choque perpendicular, pois $r B = 0,61^{+}_{-0,03}$ que é aproximadamente igual ao valor de $r Np = 0,64^{+}_{-0,12}$, assim como no dia 23/04/2002 tem-se choque

perpendicular, $r B = 2,26^{+}_{-0,42}$ que é aproximadamente igual ao valor de $r Np = 2,64^{+}_{-0,58}$.

No estudo estatístico feito dos choques ocorridos no período de 2002 – 2003, foram analisados 83 eventos, 40 choques Frontais Rápidos; 5 Frontais Lentos; 7 Reversos Rápidos; 4 Reversos Lentos e 27 eventos, analisando somente os gráficos desses parâmetros e utilizando os critérios de análise mencionados no texto, não permitiram a identificação do tipo de choque. Assim é necessário estudar outros critérios/métodos que possam ser utilizados na classificação dos choques.

Conclui-se que a maioria dos choques que ocorreram no meio interplanetário no período de 2002 – 2003, foram do tipo Frontais Rápidos. Em trabalhos futuros estudaremos o motivo da predominância de choques frontais rápidos, se há ou não influência do declínio do ciclo solar, bem

como elaborar uma análise comparativa entre os choques frontais e reversos.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao programa PIBIC/CNPq pelo financiamento de bolsas de Iniciação Científica, processos 119579/2004-9 e 107615/2003-7, as quais são de grande importância para a realização de trabalhos científicos e ao desenvolvimento de mentes investigativas que contribuirão para o aumento da comunidade científica futura.

Os autores gostariam de agradecer a missão ACE pela disponibilidade dos dados de plasma e CMI utilizados neste trabalho.

Referências

Burgess, D., Collisionless shocks, chapter 5, in MG Kivelson and CT Russell (eds.), Introduction to Space Physics, Cambridge University Press, Cambridge, 1995.

Burlaga, L.F., 1995. Interplanetary Magnetohydrodynamics. Oxford University Press, New York

Echer, E., W. D. Gonzalez, L. E. A. Vieira, A. Dal Lago, F. L. Guarnieri, A. Prestes, A. L. C. Gonzalez and N. J. Schuch, Interplanetary shock parameters during solar activity maximum (2000) and minimum (1995-1996), Brazilian Journal of Physics, 33, 115-122, 2003.

Gonzalez, W. D., B. T. Tsurutani, and A. L. Cla de Gonzalez, Space Science Reviews 88, 529 (1999).

A Comparative Study of Shock Parameter Variations Across Transient And Corotating Shocks

V. F. Andrioli (1,3), J. Savian (1,3), E. Echer(2,4) and N. J. Schuch (3)

(1) LACESM/CT - Universidade Federal de Santa Maria – UFSM/ME, Santa Maria, RS, Brazil, (2) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE – MCT (permanent), Sao Jose Campos, SP, Brazil, (3) Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT, Santa Maria, RS, Brazil, (4) Max Planck Institut fur Sonnensystemforschung (temporary), Katlenburg-Lindau, Germany. (vaniandrioli@yahoo.com.br/ Fax: +55 – 55 220 8007)

In this work we study the variations in the plasma and magnetic field parameters across transient, ICME-driven shocks (fast forward), and corotating shocks (mainly fast reverse), associated with CIRs. The period analysed is the decline phase of the solar cycle 23 (2002-2003). Solar wind data were obtained through internet from the ACE - Advanced Composition Explorer database (<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/index.html>). We plot and analyze solar wind data and classify every shock according to its propagation direction (forward or reverse) and MHD wave mode (fast or slow). Associated solar wind structures were also determined (ICMEs or CIRs). The jump of plasma and magnetic field across these shocks was then calculated and distributions obtained for each interplanetary shock type. These distributions are compared in this work.



ANEXO 3

CERTIFICADOS