



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**AMPLIAÇÃO DO PROTÓTIPO DE TELESCÓPIO
MULTIDIRECIONAL DE RAIOS CÓSMICOS DE ALTA ENERGIA
MUONS: PARTICIPAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO TÉCNICO E
DE ENGENHARIA, E ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS.**

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

PROCESSO: CNPq N° 111798/2008-6

Níkolás Kemmerich – Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT
Laboratório de Clima Espacial e Previsão de Tempestades Magnéticas
LCEPTM/CRS/INPE – MCT
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais
CRS/INPE – MCT
E-mail: nikolas@lacesm.ufsm.br

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

Santa Maria, Julho de 2009

RELATÓRIO FINAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO
PROGRAMA: PIBIC/INPE - CNPq/MCT

PROJETO

**AMPLIAÇÃO DO PROTÓTIPO DE TELESCÓPIO
MULTIDIRECIONAL DE RAIOS CÓSMICOS DE ALTA ENERGIA
MUONS: PARTICIPAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO TÉCNICO E
DE ENGENHARIA, E ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS.**

Processo: CNPq N° 111798/2008-6

Relatório elaborado pelo bolsista:

Níkolás Kemmerich - Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT

E-mail: nikolas@lacesm.ufsm.br

Dr. Alisson Dal Lago – Orientador

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

E-mail: dallago@dae.inpe.br

Dr. Nelson Jorge Schuch - Co-Orientador

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

E-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br

Nivaor Rodolfo Rigozo - Co-Orientador

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

E-mail: rigozo@lcesm.ufsm.br

DADOS DE IDENTIFICAÇÃO

Título do projeto:

AMPLIAÇÃO DO PROTÓTIPO DE TELESCÓPIO MULTIDIRECIONAL DE RAIOS CÓSMICOS DE ALTA ENERGIA – MUONS: PARTICIPAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO TÉCNICO E DE ENGENHARIA, E ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS.

Processo: CNPq N° 111798/2008-6

Aluno Bolsista no período de Abril/2009 a Julho/2009:

Níkolás Kemmerich

Curso de Física – Bacharelado

Centro de Ciências Naturais e Exatas – CCNE/UFSM

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Orientador:

Dr. Alisson Dal Lago

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

Co-orientadores:

Dr. Nelson Jorge Schuch

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

Nivaor Rodolfo Rigozo

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

Colaboradores/:

Dr. Kazuoki Munakata

Physics Department, Faculty of Science, Shinshu University - Japan

Dr. John W. Bieber

Bartol Research Institute, University of Delaware - EUA

Dr. Takao Kuwabara

Bartol Research Institute, University of Delaware (BARTOL/UDEL), Newark (DE), USA

Marlos Rockenbach da Silva

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT

Carlos Roberto Braga

Mestrando - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT

Marcos Vinicius Silveira

Mestrando - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT

Tardelli Ronan Coelho Stekel

Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica

Lucas Ramos Vieira

Acadêmico do curso de Física – Bacharelado

José Fernando Thuorst

Acadêmico de curso de Física – Bacharelado

Aline Seeger

Acadêmica de curso de Física – Bacharelado

Local de Trabalho/Execução do Projeto:

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

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

Trabalho desenvolvido no âmbito da parceria INPE/MCT – UFSM, através do Laboratório de Clima Espacial e Previsão de Tempestades Magnéticas - LCEPTM/CRS/INPE - MCT com o Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria - LACESM/CT - UFSM.



Estudante
Nikolas Kemmerich



[Link para Currículo Lattes](#)

[Dados gerais](#)

[Indicadores de produção C, T & A](#)

Dados gerais

Identificação do estudante

Nome: Nikolas Kemmerich

Nível de treinamento: Graduação

Currículo Lattes: 09/06/2009 19:06

E-mail: nikolas@lacesm.ufsm.br

Homepage:

Grupos de pesquisa que atua na instituição

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

Linhas de pesquisa que atua

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

[MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL](#)

Orientadores participantes de grupos de pesquisa na instituição

[Alisson Dal Lago](#)

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

Tipo de produção	2006	2007	2008	2009
Produção bibliográfica	0	7	16	0
Produção técnica	0	0	0	0
Orientação concluída	0	0	0	0
Produção artística/cultural e demais trabalhos	0	0	0	0



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



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

Identificação

Dados básicos

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

Status do grupo: **certificado pela instituição**

Ano de formação: 1996

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

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

Natanael Rodrigues Gomes - natanael.gomes@lacesm.ufsm.br

Área predominante: Ciências Exatas e da Terra; Geociências

Instituição: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Órgão: Coordenação de Gestão Científica - CIE

Unidade: Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS

Endereço

Logradouro: Caixa Postal 5021

Bairro: Camobi

CEP: 97110970

Cidade: Santa Maria

UF: RS

Telefone: 33012026

Fax: 33012030

E-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br

Home page: <http://>

Repercussões dos trabalhos do grupo

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

Recursos humanos

Pesquisadores	Total: 41
Ademar Michels	Jean Pierre Raulin
Alan Prestes	Joao Paulo Minussi
Alicia Luisa Clúa de Gonzalez	Jose Humberto Andrade Sobral
Alisson Dal Lago	Juliano Moro
Antonio Claret Palerosi	Mangalathayil Ali Abdu
Barclay Robert Clemesha	Marcelo Barcellos da Rosa
Caitano Luiz da Silva	Marcos Vinicius Dias Silveira
Carlos Roberto Braga	Nalin Babulal Trivedi
Clezio Marcos De Nardin	Natanael Rodrigues Gomes
Cristiano Max Wrasse	Nelson Jorge Schuch
Delano Gobbi	Nivaor Rodolfo Rigozo
Eurico Rodrigues de Paula	Odim Mendes Junior
Ezequiel Echer	Osmar Pinto Junior
Fabiano Luis de Sousa	Otavio Santos Cupertino Durão
Fábio Augusto Vargas dos Santos	Pawel Rozenfeld
Fernanda de São Sabbas Tavares	Petrônio Noronha de Souza
Fernando Luís Guarnieri	Polinaya Muralikrishna
Gelson Lauro Dal' Forno	Rajaram Purushottam Kane
Hisao Takahashi	Severino Luiz Guimaraes Dutra
Ijar Milagre da Fonseca	Walter Demetrio Gonzalez Alarcon
Jean Carlo Santos	

Estudantes	Total: 30
Aline Seeger Santos	Josemar de Siqueira
Bernardo Henz	Lilian Piecha Moor
Carlos Pinto da Silva Neto	Lucas Antunes Tambara
Cassio Espindola Antunes	Lucas Lopes Costa
Celito Muck Felipetto	Lucas Ramos Vieira
Claudio Machado Paulo	Luis Fernando Nicolini
Cristiano Sarzi Machado	Nikolas Kemmerich
Eduardo Escobar Bürger	Rafael Lopes Costa
Eduardo Weide Luiz	Ricardo Cartier dos Santos
Fernando de Souza Savian	Rodrigo da Rosa Azambuja
Guilherme Aluizio Steffens Lorensen	Rubens Zolar Gehlen Bohrer
Guilherme Grams	Tardelli Ronan Coelho Stekel
Guilherme Simon da Rosa	Thalis José Girardi
Igor Freitas Fagundes	Tiago Jaskulski
Jose Fernando Thuorst	Willian Rigon Silva

Técnicos	Total: 2
Eduardo Ceretta Dalla Favera - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Computação	
Vinicius Ceregati Costa - Graduação - \Outra Função	

Linhas de pesquisa	Total: 4
<ul style="list-style-type: none"> • AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA • Desenvolvimento de CubeSats - NANOSATC-BR • MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO • MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL 	

Relações com o setor produtivo

Total: 0

Indicadores de recursos humanos do grupo

Integrantes do grupo	Total
Pesquisador(es)	41
Estudante(s)	30
Técnico(s)	2



Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil

Linha de Pesquisa

MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL

Linha de pesquisa

MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL

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

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

Pesquisadores:

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

Estudantes:

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

Árvore do conhecimento:

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

Setores de aplicação:

Aeronáutica e espaço

Objetivo:

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



Linha de Pesquisa
Desenvolvimento de CubeSats - NANOSATC-BR

Linha de pesquisa

Desenvolvimento de CubeSats - NANOSATC-BR

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

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

Pesquisadores:

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

Estudantes:

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

Árvore do conhecimento:

Ciências Exatas e da Terra; Astronomia; Astrofísica do Sistema Solar;

Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Instrumentação Científica;
Engenharias; Engenharia Aeroespacial; Engenharia Aeroespacial - Pequenos Satélites;

Setores de aplicação:

Aeronáutica e espaço

Objetivo:

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao apoio de meus pais Luceno Kemmerich e Tânia Elisete Malheiros dos Santos, pelo incentivo à educação e liberdade de pensamento em toda minha vida.

Ao meu orientador, Doutor Alisson Dal Lago, pela sua atenção e disposição em auxiliar-me durante a realização de minhas atividades de iniciação científica. Em especial, ao Doutor Nelson Jorge Schuch, pelos seus ensinamentos, pelas inúmeras oportunidades oferecidas.

Professor Kazuoki Munakata e sua equipe científica da Universidade de Shinshu, pela doação do Detector Direcional de Muons (DDM) do Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/INPE – MCT)

Jairo Francisco Savian (IAG/USP), egresso da UFSM e do CRS/INPE – MCT que me recebeu e me oportunizou os primeiros apoios junto ao Laboratório e ao desenvolvimento do meu Projeto de Pesquisa. Aos meus colegas de Laboratório de Clima Espacial Lucas Ramos Vieira, Aline Seeger, José Fernando Thuorst pelo companheirismo e apoio. Aos mestrandos Marcos Vinícius Dias Silveira e Carlos Roberto Braga.

Agradeço a Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, pelo suporte técnico.

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

Resumo

O Relatório apresenta as atividades de pesquisa vinculadas ao Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT realizadas pelo Bolsista Níkolás Kemmerich, durante o período de agosto de 2008 a julho de 2009, no Projeto “**AMPLIAÇÃO DO PROTÓTIPO DE TELESCÓPIO MULTIDIRECIONAL DE RAIOS CÓSMICOS DE ALTA ENERGIA – MUONS: PARTICIPAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO TÉCNICO E DE ENGENHARIA, E ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS**” junto ao Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE-MCT. As atividades relativas ao Projeto foram desenvolvidas pelo bolsista no Laboratório de Clima Espacial do CRS/INPE-MCT, no âmbito da Parceria: INPE/MCT – UFSM, através do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM.

Clima Espacial é o nome dado à área de conhecimento que estuda os processos físicos envolvendo as interações Sol-Terra. Estruturas solar-interplanetárias tais como ejeções de massa coronais (CME), ejeções de massa coronais interplanetárias (ICMEs) e explosões solares podem causar tempestades geomagnéticas e outros distúrbios danificando vários instrumentos tecnológicos. Os danos causados incluem perda de dados em satélites, cintilação de sinal, interferência em radares, perturbação em cabos de telecomunicação, *black-out* de energia elétrica e riscos à saúde dos astronautas em órbita. Um dos objetivos do Clima Espacial é encontrar mecanismos que possibilitem previsões de tempestades geomagnéticas. A partir de estudos com variações na intensidade de raios cósmicos secundários, gerados pelas colisões inelásticas dos raios cósmicos primários com partículas da atmosfera, percebeu-se que raios cósmicos são dispersos na região englobada pelas ICMEs. Telescópios terrestres de nêutrons e muons detectam uma diminuição na contagem de partículas secundárias, tornando-se úteis na previsão de tempestades geomagnéticas. O objetivo do Projeto é discutir a possibilidade de previsão de tempestades, funcionamento e análise preliminar de dados do Telescópio/Detector Multi-direcional de Raios Cósmicos de Alta Energia – muons (DDM – Detector Direcional de Muons) juntamente com dados de índice Dst (*Disturbance storm time*) de plasma e campo magnético obtidos do satélite ACE. O DDM protótipo foi instalado em 2001 no Observatório Espacial do Sul - SSO/CRS/INPE (29.4°S, 53.8° W, 480 m a.n.m.) e posteriormente expandido em dezembro de 2005. O DDM é composto por duas camadas de 28 detectores cada, totalizando 56 detectores (2 x 4 x 7) com resolução temporal de um minuto. O DDM é parte importante de GMDN (*Ground Muon Detector Network*) integrado em tempo real à Rede Mundial de Detectores de Muons. Dados do DDM tem mostrado a ocorrência de tempestades geomagnéticas na forma de decréscimos de 1% a 10% na contagem de muons (decréscimo de Forbush).

Sumário

Capítulo 1 - Clima Espacial.....	18
Capítulo 2 – Interação Sol-Terra	24
1.0 – O Sol.....	24
2.0 – Atividade Solar.....	27
3.0 – Proeminências.....	30
4.0 – Vento Solar.....	31
5.0 – Campo Magnético Interplanetário (CMI).....	33
6.0 – Ejeções de Massa Coronais e <i>Flares</i>	34
7.0 – Nuvens Magnéticas	37
8.0 – Origem Interplanetária de Tempestades Geomagnéticas	38
9.0 – Tempestades Geomagnéticas e Índice Dst	39
Capítulo 3 – Raios Cósmicos	42
1.0 – Longo Período de Variação na Intensidade de Raios Cósmicos Galácticos (GCR)	42
2.0 – Raios Cósmicos e Muons	44
3.0 – Efeito Cone de Perdas	46
Capítulo 4 – Detector Multi-direcional de raios cósmicos de alta energia – muons. Protótipo e expandido.....	48
1.0 – Detector Protótipo	49
2.0 – Detector Expandido	51
- Fonte de alimentação, sistema de processamento e armazenagem de dados.....	53
3.0 – Princípio de Funcionamento do Detector Direcional de Raios Cósmicos	55
- Cintiladores.....	55
- Fotomultiplicadoras (PMT)	56
4.0 – Rede Mundial de Detectores de Muons GMDN (Ground Muons Detector Network).....	59
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E ANÁLISE DE DADOS DO DETECTOR PROTÓTIPO E DO DETECTOR EXTENDIDO.....	62
1.0 – Análise de dados para o Detector protótipo	62
2.0 – Análise de dados do Detector Extendido.....	66
Capítulo 6 – Conclusões.....	76
Capítulo 7 – Referências	79
ANEXOS.....	85
ANEXO 1 – PROGRAMAS USADOS	86
ANEXO 2 - RESUMOS SUBMETIDOS A EVENTOS	97
ANEXO 3 – RELATÓRIO PARCIAL DO PROJETO DE PESQUISA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA.....	103
ANEXO 4 - CERTIFICADOS DE PARTICIPAÇÃO DE EVENTOS COMO AUTOR.	109

Índice de Ilustrações

Figura 1.1 - Mapeamento de densidade de erros em dados (em escala logarítmica) abordo do experimento ICARE (Novembro 2000 – Setembro 2002). Fonte: D. Falguère et al, 2000, extraído de Duzzelier, 2005.....	19
Figura 1.2 - Fenômenos que afetam o Clima Espacial, energias envolvidas, tempo de duração de seus efeitos e principais tipos de danos em sistemas tecnológicos. FONTE: Schwenn. Extraído de Dal Lago, 2003.....	21
Figura 2.1 – Clássica estrutura solar de seu interior. Fonte: Kivelson e Russell, 1995. .	25
Figura 2.2 – Mancha Solar tirada pela Hinode's Solar Optical Telescope.	27
Figura 2.3 – Acima gráfico do Ciclo Solar dado em anos relacionado pelo número de manchas solares de janeiro de 1994 até janeiro de 2008. O mínimo é indicado pela seta relacionado com a figura abaixo do gráfico. O sol é bem comportado em fase de mínimo e emite menos radiação. No período de máximo, como mostra a seta indicado e relacionado com a figura abaixo, apresenta grande atividade solar. FONTE: Modificado de http://www.sec.noaa.gov/SolarCycle/ e http://helios.gsfc.nasa.gov/ace/gallery.html	28
Figura 2.4 – Representação grosseira relativa à polaridade das manchas solares.....	28
Figura 2.5 – Ilustração da origem das manchas solares. FONTE: Hoyt e Schatten (1997, p.112).....	29
Figura 2.6 - Diagrama da borboleta do período de 1977- 2006.	30
Figura 2.7 - Proeminência solar visível na região do extremo ultravioleta EIT.....	31
Figura 2.8 – Pode-se notar a grande região escura que é caracterizada como Buraco coronal, vista por telescópios de raios-X do satélite Yohkoh.	32
Figura 2.9 – Explosão solar (“flare”), o ponto mais brilhante da imagem obtida pelo instrumento EIT em 29 de outubro de 2003, a bordo do satélite SOHO, em 195 A.....	35
Figura 2.10 - Ejeção Coronal de Massa em 27 de fevereiro de 2000 observada por LASCO C2 e C3, satélite SOHO. FONTE: http://soho.nascom.nasa.gov/gallery/images/las02.html	35
Figura 2.11 – Geometria de uma nuvem magnética. Fonte: Adaptado de Burlaga et al. – 1990.	37
Figura 2.12 - Devido à interação com o vento solar, a magnetosfera toma a forma da figura acima.	38
Figura 2.13 – Acoplamento entre Sol, Meio Interplanetário e magnetosfera Terrestre. .	39
Figura 2.14 - Fases do decréscimo do índice Dst.....	41
Figura 3.1 – Em azul dados obtidos pelo monitor de nêutrons – Climax da universidade de Chicago. Em amarelo dados de manchas solares.	42
Figura 3.2 - Outro gráfico que mostra a anticorrelação entre raios cósmicos e ciclo solar estudada pelo numero de manchas solares. FONTE: http://neutronm.bartol.udel.edu . .	43
Figura 3.3 - Esquema identificando a estrutura magnética solar. Em “a” sol em mínimo e $A > 0$. Em “b” máximo solar. Em “c” fase de mínimo, mas com $A < 0$. O vermelho representa linhas “Toward” que entram e azul representa “away”, que saem do sol. FONTE: Ver Referencia.....	44
Figura 3.4 - Figura esquemática dos raios cósmicos que colidem com partículas da atmosfera Terrestre (chuveiro de raios cósmicos). FONTE: Modificado de Forbush (1993).	46
Figura 3.5 - Representação artística do cone de perdas. FONTE: Rufolo.	47
Figura 4.1 – Foto de protótipo detector de muons instalado no OES/CRS/INPE – MCT mostrando em azul os 8 detectores em duas camadas.....	50

Figura 4.2 – Fotos do detector de muons expandido em dezembro de 2005.	52
Figura 4.3 – Fontes de alimentação e sistema de processamento de sinais do detector de muons.	54
Figura 4.4 – Computador utilizado para gravação dos dados.	54
Figura 4.5 - Quatro cintiladores lado a lado formando uma área de superfície de 1m2. Os cintiladores estão colocados em caixa de metal com espessura de 1,6 mm. Foto tirada em 22/11/2006.	56
Figura 4.6 - Foto da fotomultiplicadora utilizada no detector de raios cósmicos – muons.	57
Figura 4.7 - Tabela com principais informações dos detectores respectivamente Nagoya, Hobart e NAWSON-PC. FONTE: Munakata et al, 2000.	60
Figura 4.8 – Antiga falha existente na região do Atlântico e Europa. Fonte: Munakata et al, 2000.	61
Figura 4.9 - Atual rede de detectores e as diferenças direcionais entre o detector protótipo e expandido. Bolinha aberta representa as direções do protótipo e bolinhas fechadas representam as direções do expandido.	61
Figura 5.1 – Aumento nos parâmetros indicam a chegada da frente de choque primeiro no satélite ACE, minutos depois o Índice Dst e muons.	63
Figura 5.2 – Gráficos das componentes V, N, S, E e W.	64
Figura 5.3 – Outras direções comparadas com o índice Dst.	65
Figura 5.4 - Tempestade intensa ocorrida em dezembro de 2006. Precursor é indicado no círculo vermelho.	67
Figura 5.5 - Índice Dst, muons telescópio protótipo e dados do Satélite ACE correlacionados.	69
Figura 5.6 - Erro de contagem do U30. U31 foi usado para comparação.	71
Figura 5.7 - Display de verificação da contagem de muons.	72
Figura 5.8 - Gráfico do ruído na contagem detector L24.	75
Figura 5.9 – Gráficos da contagem das Componentes N2, S2 E2 e W2.	75

Índice de Tabela

Tabela 2.1 – Alguns dados estatísticos do Sol. FONTE: Introduction to space physics, Margaret G. Kivelson, Christopher, T.Russell. Cambridge, 1995.	24
Tabela 2.2 – Reação de fusão nuclear no interior solar.....	26
Tabela 2.3 – Classificação das Tempestades Geomagnéticas.	41
Tabela 4.1 – Dados específicos do detector protótipo.....	51
Tabela 4.2 – Dados específicos do detector expandido.....	52
Tabela 4.3 – Principais características do Detector de Raios Cósmicos – muons.	55
Tabela 4.4 – Dados específicos das fotomultiplicadoras.....	56
Tabela 5.1 - Alguns resultados para dados do Detector protótipo.	66
Tabela 5.2 - Alguns resultados para dados do Detector Expandido.....	68
Tabela 5.3 - Erros na contagem de para o dia 08 de outubro de 2008.	70
Tabela 5.4 - Análise de erros para o dia 7 de janeiro de 2009.	70
Tabela 5.5 – Quadro branco	72
Tabela 5.6 - Legenda dos números da Tabela 5.5	73
Tabela 5.7 - Legenda para os quadros vermelho e verde da Figura 5.7.....	74
Tabela 5.8 - Significado dos números da Figura 5.7.....	74
Tabela 5.9 - Possíveis direções do detector expandido.....	74

Capítulo 1 - Clima Espacial

Clima Espacial refere-se à dinâmica e condições no ambiente interplanetário incluindo o Sol e sistemas como magnetosfera e ionosfera. Tem tornado-se claro que os processos físicos no ambiente próximo da Terra podem afetar o funcionamento de satélites, clima, sistemas de comunicação global e vários outros sistemas tecnológicos. Estes sistemas dependem hoje do conhecimento das condições do geoespaço (definida como a região onde campos eletromagnéticos da Terra e Sol interagem) tais como condições Solar e ionosféricas e níveis de distúrbios na magnetosfera, além de fluxo de raios cósmicos. Sem estes conhecimentos os sistemas tecnológicos, ao qual depende grande parte do mundo globalizado, não funcionariam apropriadamente.

O campo magnético da Terra pode confinar íons e elétrons relativamente energéticos. Estes íons e elétrons ao interagirem com o campo magnético terrestre movimentam-se formando correntes elétricas na alta atmosfera na região equatorial da Terra e é chamado Cinturão de radiação de Van Allen. Este cinturão de radiação pode ser perigoso para a humanidade e máquinas no espaço. As regiões internas do cinturão são aproximadamente estáveis com o tempo fazendo com que as doses de radiação nos satélites possam ser razoavelmente conhecidas. À medida que nos afastamos da Terra o campo geomagnético torna-se mais fraco e sujeito à fácil variação. A dose de radiação flutua de maneira mais drástica e partículas energéticas solares e raios cósmicos podem penetrar na magnetosfera (Barker, 1998).

Raios Cósmicos Galácticos (GCR – *Galactic Cosmic Rays*) são principalmente prótons e partículas Alfa, e seu comportamento próximo a Terra é bem conhecido. GCR com baixa energia são impedidos de alcançar a superfície da Terra nas regiões equatoriais devido ao campo magnético e a atmosfera neutra. Entretanto nas regiões polares e em altas altitudes em regiões equatoriais raios cósmicos tem fácil acesso e satélites e seres humanos podem ser diretamente afetados pela precipitação de partículas.

Idealmente a Terra pode ser considerada como um dipolo magnético, mas é bem conhecido que a Terra não é um dipolo magnético perfeito e existem regiões ao qual o campo magnético é mais intenso e menos intenso. As linhas de campo podem sair de uma região equatorial e entrar na região de um dos pólos, por exemplo. Partículas energéticas podem precipitar nas regiões de anomalia magnética. A radiação espacial

constitui-se de um sistema não-homogêneo e dinâmico altamente influenciado pela atividade solar. É caracterizada por várias faixas de energia e fluxos multidirecionais. Estruturas solares são como escudos que podem ser usadas para reduzir a dose de radiação mas não são eficazes para radiações de alta energia (Duzellier, 2005).

A Figura 1.1 apresenta uma cartografia de anomalias (perda de dados) observadas em memórias na órbita SAC-C (707 km x 98,2°).

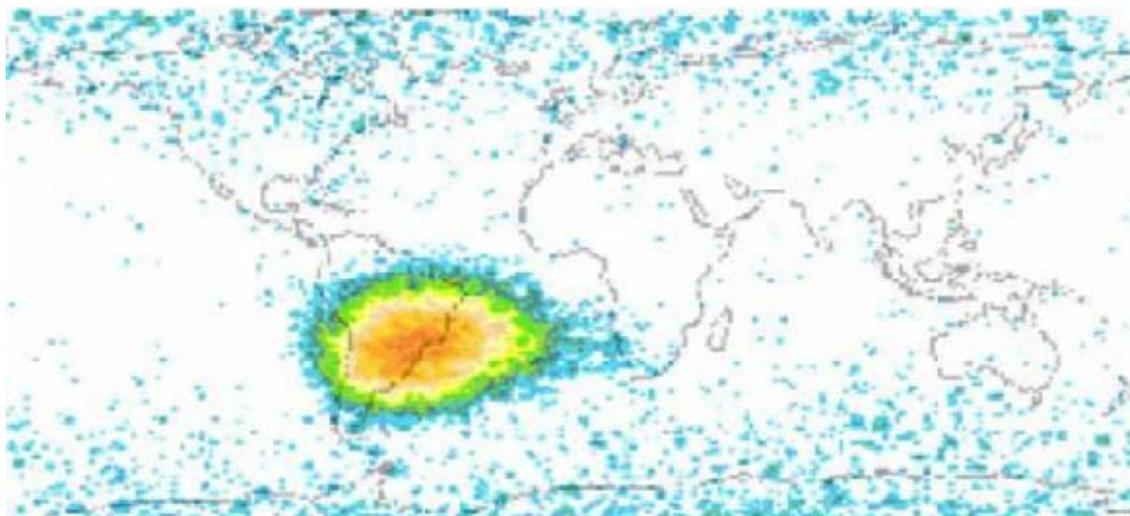


Figura 1.1 - Mapeamento de densidade de erros em dados (em escala logarítmica) abordo do experimento ICARE (Novembro 2000 – Setembro 2002). Fonte: D. Falguère et al, 2000, extraído de Duzellier, 2005.

A anomalia está na Região Sul do Brasil e é chamada Anomalia Magnética do Atlântico Sul AMAS.

No próximo capítulo discute-se o Sol e estruturas interplanetárias que atingem a Terra podendo causar tempestades magnéticas. O Sol e sua atmosfera são origens de energia, o espaço interplanetário o ambiente de propagação de estruturas e a magnetosfera terrestre e a alta atmosfera como sistemas forçados onde a energia originada no Sol propagado pelo meio interplanetário é depositada (Echer, 2005).

Tempestades geomagnéticas são definidas pela variação da componente horizontal do campo magnético terrestre e manifestam-se na natureza como, por exemplo, auroras nos pólos devido a um aumento da população de plasma presentes na atmosfera. As tempestades ocorrem devido à presença da componente do campo magnético interplanetário apontar para o sul relativo ao sul geográfico da Terra, em consequência o pólo sul terrestre é o pólo norte magnético e predominantemente as linhas de campo apontam para o norte geográfico ou sul magnético na alta atmosfera terrestre. Esta configuração de campos possibilita a transferência de energia para a

magnetosfera da Terra através do mecanismo de reconecção (Dungey, 1961; Gonzalez et al., 1994, 1999; Kamide et al., 1998).

Além das auroras, mais alguns efeitos solares são (Echer, 2005):

- **Eventos com liberação de prótons tais como ejeções de massa coronal (CME)** podem alcançar a Terra 30 minutos depois de vistos por satélites tal como satélite SOHO. Algumas destas partículas penetram na alta atmosfera e movem-se em espiral em torno das linhas de campo magnético da Terra e produzem ionização podendo produzir aumento de radiação. Pode também afetar localmente a química da atmosfera ocasionando diminuição de ozônio, principalmente em latitudes polar.

- **Efeitos indiretos da atividade solar em anéis de árvores.** Há também evidências que variação no campo geomagnético pode afetar sistemas biológicos. Um dos efeitos seria perturbação das habilidades de orientação de pombos durante tempestades geomagnéticas, e outros animais migratórios como baleias e golfinhos.

- **Distúrbios ionosféricos:** súbitos distúrbios ionosféricos (SIDs) que acontecem em poucos minutos depois de algum forte *solar flare*. Há forte perturbação nas ondas de rádio de telecomunicação de longa distância no período diurno da Terra. Este efeito deve-se ao aumento da densidade eletrônica em certas camadas da atmosfera devido à penetração de raios X produzidos pelo *solar flare*. Ondas de alta frequência que passariam em certas regiões da atmosfera são absorvidas ao invés de refletidas.

- **Danos em sistemas espaciais:** *Space Charging* é a variação do potencial eletrostático na superfície dos artefatos espaciais com respeito ao plasma circundante. Durante uma tempestade geomagnética o número e energia dos elétrons e íons aumentam. Satélites que viajam através de ambientes energizados como o meio interplanetário, partículas carregadas acertam o satélite deixando-o diferentemente carregado. Descargas elétricas devido aos diferentes potenciais na superfície destes satélites podem danificar ou até mesmo destruir-los, comprometendo sua utilização.

- **Danos em sistemas terrestres.**

1. Comunicação: Vários sistemas de comunicação utilizam a ionosfera para refletir sinais de ondas de rádio de longas distâncias e tempestades ionosféricas comprometem a comunicação por ondas de rádio.
2. Sistemas de Navegação: como um exemplo tomamos o sistema LORAN e OMEGA que foram largamente usados até alguns anos atrás, eram afetados quando a atividade solar cortava seus sinais. Aeronaves e navios usaram por vários anos sinais de baixa frequência daqueles transmissores para determinar

suas posições. Durante eventos solares e tempestades geomagnéticas os sistemas poderiam dar informações aos navegadores imprecisões de vários quilômetros. Sistemas de GPS usados atualmente também são afetados quando a atividade solar causa súbita variação na densidade ionosférica.

3. Energia Elétrica: quando campo magnético variado é aplicado na vizinhança de um condutor, uma corrente elétrica é induzida no condutor. Isto acontece em larga escala em uma tempestade geomagnética. As correntes diretamente induzidas nas linhas de transmissões de energia elétrica a partir de tempestades geomagnéticas são perigosas para equipamentos de transmissão de energia. Em 13 de março de 1989 nas cidades de Quebec e Montreal seis milhões de pessoas ficaram sem energia elétrica por nove horas como resultado de uma tempestade super intensa.

A Figura 1.2 ilustra os três principais fenômenos que afetam o Clima Espacial, indicando as energias envolvidas, os tempos de propagação destes fenômenos desde o Sol até a Terra, a duração de seus efeitos e os tipos de danos em sistemas tecnológicos.

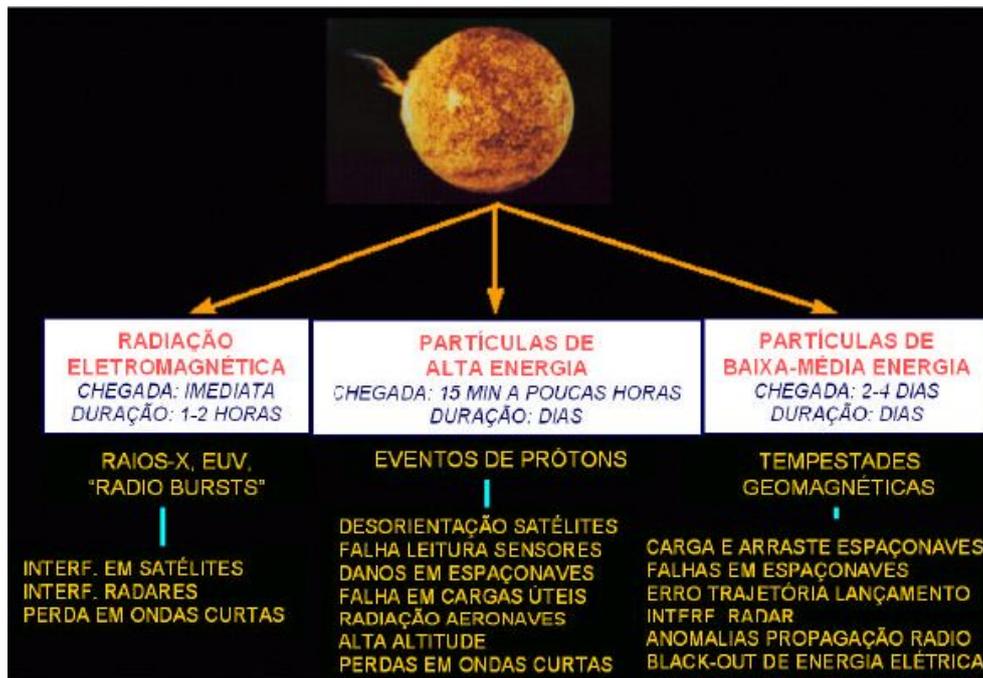


Figura 1.2 - Fenômenos que afetam o Clima Espacial, energias envolvidas, tempo de duração de seus efeitos e principais tipos de danos em sistemas tecnológicos. FONTE: Schwenn. Extraído de Dal Lago, 2003.

A variabilidade solar afeta a modulação de raios cósmicos vindos de fora do sistema solar no meio interplanetário e também aqueles gerados pelo sol. Estes raios cósmicos são acelerados por processos ainda não muito certos para raios cósmicos vindos de fora do sistema solar. Usa-se a modulação de raios cósmicos para estudar

estruturas geoféticas e poder de alguma forma prever estruturas solares que podem causar tempestades geomagnéticas.

Munakata et al. (2000) observaram pela primeira vez de forma sistemática precursores de tempestades geomagnéticas usando rede de detectores (localizados na superfície terrestre) de raios cósmicos de alta energia (muons), mostrando que esta rede de detectores pode ser poderosa ferramenta para previsão de Clima Espacial.

Devido à grande massa de detectores necessária para detectar raios cósmicos de alta-energia, instrumentos localizados em superfície terrestre continuam sendo o estado da arte para estudar estas partículas, visto que a massa de experimentos no espaço deve ser a menor possível. Detectores de superfície trazem a vantagem de ter fácil manutenção.

Existem algumas vantagens na utilização de muons para estudos baseados em instrumentos de superfície terrestre quando comparados com outras partículas resultantes da chegada dos raios cósmicos na atmosfera terrestre: a) grande poder de penetração e b) manutenção da direção e do sentido de chegada do raio cósmico primário que os originou, enquanto que as outras partículas, em geral, são desvios.

Com o objetivo de estudar as causas dos efeitos vistos acima e tentar prevê-los ou evitá-los, foi instalado em 2001 um protótipo do Detector Direcional de Raios Cósmicos – muons no Observatório Espacial do Sul em São Martinho da Serra, Brasil no estado do Rio Grande do Sul, através de uma parceria entre Brasil, Japão e EUA, e apoio INPE-UFSM. O protótipo era formado por duas camadas de 4 detectores e resolução temporal de uma hora, integrando uma rede de detectores que estão distribuídos pelo planeta GMDN (*Ground Muon Detector Network*). O protótipo foi expandido em dezembro de 2005 com a diferença de ser constituído de 56 detectores com resolução temporal de um minuto e melhor integrando a rede mundial de detectores – muons de alta energia.

Assim, os objetivos deste projeto envolvem participar do desenvolvimento técnico e de engenharia, análise preliminar dos dados oriundos da ampliação do Telescópio Multi-direcional de Raios Cósmicos de Alta Energia – Muons (DDM) e avaliar a modulação dos raios cósmicos de alta energia devida à variabilidade do Clima Espacial, utilizando dados tanto do protótipo de detector que operou de 2001 ao início do ano de 2005, quanto dados do novo detector que foi instalado em dezembro de 2005. Pretende-se analisar eventos de tempestades geomagnéticas utilizando dados de satélites

do meio interplanetário, índices geomagnéticos, e dados (de superfície) de raios cósmicos secundários do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE - MCT.

Capítulo 2 – Interação Sol-Terra

1.0 – O Sol

Ao longo de observações mostrou-se que o Sol não é único, mas sim uma estrela ordinária dentro de uma galáxia que apresenta milhões de estrelas. Ao longo do tempo, foi constatada uma periodicidade nas manchas negras que havia no Sol, e hoje se sabe que essas manchas seguem um ciclo de 11 anos, durante os quais passa por períodos de máximos e mínimos. Com avanço na tecnologia ficou claro que ocorrem processos no Sol envolvendo estruturas que influencia todo meio interplanetário e conseqüentemente a Terra.

Para astrônomos o Sol é uma estrela ordinária com tipo espectral de G2V e com magnitude 4.8. Entretanto, sendo o Sol muito próximo à Terra, isto faz dele imediatamente muito importante para estudo da interação Sol-Terra. Na Tabela 2.1 abaixo são dados alguns dados estatísticos vitais do Sol.

Tabela 2.1 – Alguns dados estatísticos do Sol. FONTE: Introduction to space physics, Margaret G. Kivelson, Christopher, T.Russell. Cambridge, 1995.

Idade	$4,5 \times 10^9$ anos
Massa	$1,99 \times 10^{30}$ kg
Raio	696,000km
Densidade média	$1,4 \times 10^3$ kg.m ⁻³
Distância média da Terra (1 UA)	150×10^6 km (250 raios solares)
Aceleração gravitacional na superfície	274 m.s ⁻²
Radiação emitida (Luminosidade)	$3,86 \times 10^{26}$ W
Período de rotação equatorial	26 dias terrestres
Composição	Aproximadamente 90% de H (hidrogênio), 10% He (hélio), 0,1% outros elementos

A atmosfera solar é dividida em três partes. **Fotosfera**, com 500 km de espessura de onde vem a maior parte da luz visível e vista a olho nu. É formada por gás opaco que nos impede de ver o interior solar, sua densidade é cerca de 10^{23} m⁻³ (partículas por centímetro cúbico), é aqui que Manchas Solares podem ser observadas. A temperatura mínima é de 4.200K. **Cromosfera** estende-se cerca de 10.000 km acima da Fotosfera e possui uma temperatura que varia de 4300 a 106 K que aumenta do interior para

exterior. Apresenta densidade de 10^{17} m^{-3} e pode ser observado com um filtro solar conhecido como H-alfa. Num eclipse solar esta camada revela uma coloração alaranjada e essa camada brilhante e colorida é de onde partem raios luminosos revelando a presença de Cálcio, Helio e Hidrogênio como constituintes. **Coroa**, com densidade de aproximadamente 10^{15} m^{-3} próximo do Sol e estendendo-se até a órbita terrestre (onde a densidade é 10^{17} m^{-3}) e mais por milhões de quilômetros. Pode ser vista em um eclipse solar. Devido a sua alta temperatura emite grande quantidade de raios-x sendo constituída por gás ionizado chamado de plasma. A propósito, todo Sol está num estado físico chamado plasma e por não ser sólido tem uma rotação diferencial com velocidade angular maior em baixas latitudes e velocidade angular menor em altas latitudes até os pólos. A Figura 2.1 mostra uma representação das camadas constituintes do Sol.

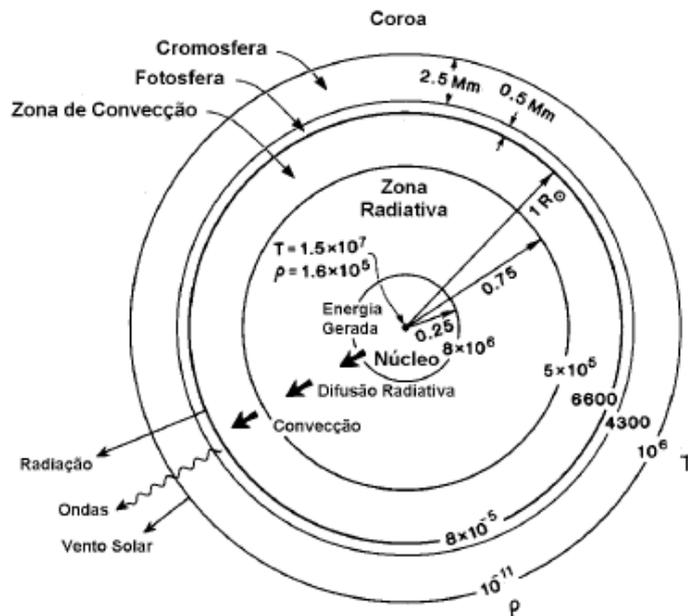


Figura 2.1 – Clássica estrutura solar de seu interior. Fonte: Kivelson e Russell, 1995.

Modelos teóricos sugerem que no interior solar há um reator de fusão nuclear operando a uma temperatura de $1,5 \times 10^7 \text{ K}$ e gerando energia através da fusão de 5 milhões de toneladas de hidrogênio por segundo para formar hélio. A Tabela 2.2 dá informações da reação de fusão nuclear do interior do Sol.

Tabela 2.2 – Reação de fusão nuclear no interior solar.

$2(^1H + ^1H) \rightarrow 2(^2H + e^+ + e^- + \nu)$
$2(e^+ + e^-) \rightarrow 2\gamma$
$2(^2H + ^1H) \rightarrow 2(^3He + \gamma)$
$^3He + ^3He \rightarrow ^4He + 2^1H + \nu$
$4^1H \rightarrow ^4He + 5\gamma + 2\nu$

Um produto da fusão nuclear é o fluxo de neutrinos. A temperatura no interior solar decresce com o raio rapidamente. Dividindo-se o raio solar em quatro partes observa-se que a parte mais externa desta divisão é convectivamente instável e turbulenta, chamado **zona convectiva**. A radiação emitida pelo núcleo propaga-se lentamente. O interior solar é muito opaco, como uma névoa espessa, e se a trajetória desta radiação fosse retilínea ela chegaria à superfície em 2 segundos, mas, existe muita radiação que pode levar 10 milhões de anos para chegar à superfície. Esta região está entre o núcleo e a zona convectiva é a zona radiativa.

A fotosfera está no topo da zona convectiva e é fechado uniformemente com um leve borbulho granular. É na fotosfera que se enxergam as manchas solares que aparecem aos pares. É possível enxergar com um filtro H α a cromosfera e envolta das machas existem regiões que brilham mais que o normal chamado de regiões ativas. Ocasionalmente tais regiões brilham rapidamente dando origem a uma explosão solar (*flare*). Também há estruturas escuras e finas chamadas de filamentos ou proeminências.

2.0 – Atividade Solar

A existência de manchas solares era conhecida a centenas de anos. Sua região central é escura chamada de umbra com temperatura de 4100 K e envolta pela penumbra, região um pouco mais clara que a umbra. A Figura 2.2 apresenta uma imagem da mancha.

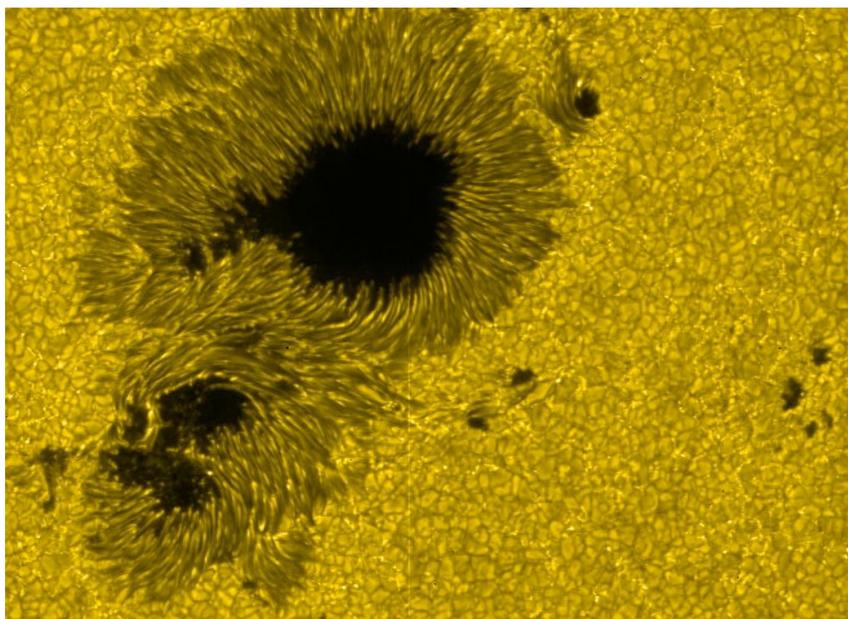


Figura 2.2 – Mancha Solar tirada pela Hinode's Solar Optical Telescope.

Fonte: http://www.nasa.gov/mission_pages/solar-b/solar_022.html

A atividade solar varia com um período de 11 anos e se pode observar a atividade solar relacionando o número de manchas solares em sua superfície. A Figura 2.3 apresenta um gráfico do ciclo solar de 11 anos. Pode-se ver a regularidade das manchas solares com o ciclo solar. Elas aparecem em médias latitudes e migram para o equador solar, baixas latitudes. Este processo leva em média 11 anos. As manchas aparecem aos pares como ilustra a Figura 2.4.

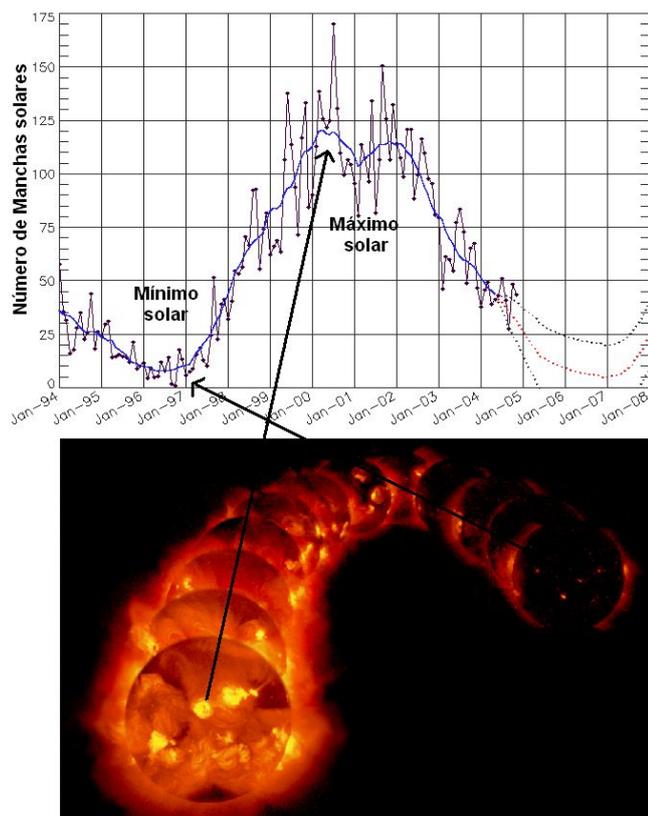


Figura 2.3 – Acima gráfico do Ciclo Solar dado em anos relacionado pelo número de manchas solares de janeiro de 1994 até janeiro de 2008. O mínimo é indicado pela seta relacionado com a figura abaixo do gráfico. O sol é bem comportado em fase de mínimo e emite menos radiação. No período de máximo, como mostra a seta indicado e relacionado com a figura abaixo, apresenta grande atividade solar. FONTE: Modificado de <http://www.sec.noaa.gov/SolarCycle/> e <http://helios.gsfc.nasa.gov/ace/gallery.html>.

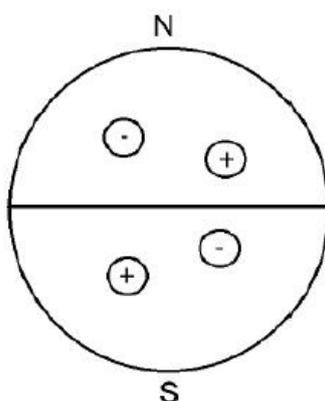


Figura 2.4 – Representação grosseira relativa à polaridade das manchas solares. FONTE: Dal Lago, 2004.

Algumas são bipolares, outras unipolares e outras mais complexas, mas sempre um ao norte com uma polaridade e outro ao sul com a polaridade inversa. Isto caracteriza os pares com polaridades regulares. No início de um novo ciclo as polaridades trocam.

A mancha apresenta temperatura mais baixa do que a fotosfera. Isto se deve ao fato de que o campo magnético inibe as correntes convectivas na superfície e assim permite a queda de temperatura.

O mecanismo gerador do campo magnético solar é o de um dínamo. Como um modelo ideal pode-se pensar que o sol tem linhas de campo magnético bem alinhado de norte para sul ou de sul para norte dependendo da polaridade solar. Devido à rotação solar diferenciada, velocidade angular maior no equador e menor nos pólos, as linhas torcem-se ocasionando acúmulo de linhas de campo magnético de modo que o fluxo magnético e por empuxo força as linhas a emergirem para a superfície originando as manchas (Hoyt e Schatten, 1997). Resumindo, as manchas solares são geradas por campos magnéticos torçoidais que são trazidos à superfície solar, por efeito de empuxo (Echer, 2003). A Figura 2.5 mostra o modelo da descrição anterior para melhor compreensão da idéia.

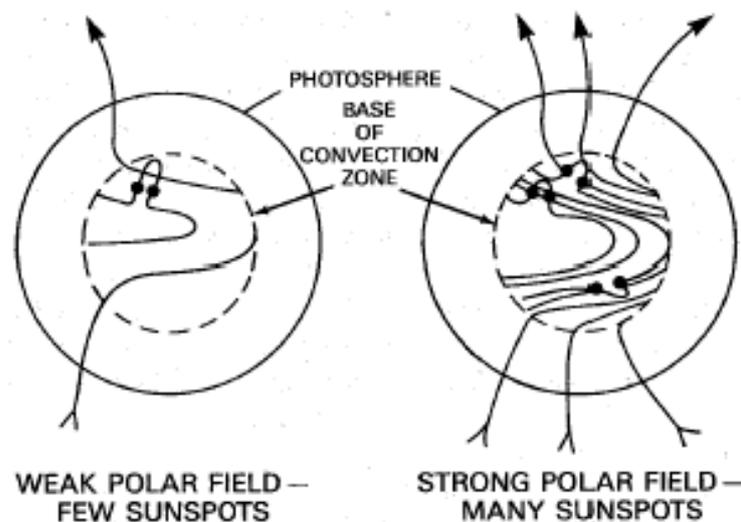


Figura 2.5 – Ilustração da origem das manchas solares. FONTE: Hoyt e Schatten (1997, p.112).

Pode-se ter o chamado diagrama da borboleta para o estudo da atividade do ciclo solar de 11 anos como mostra a Figura 2.6.

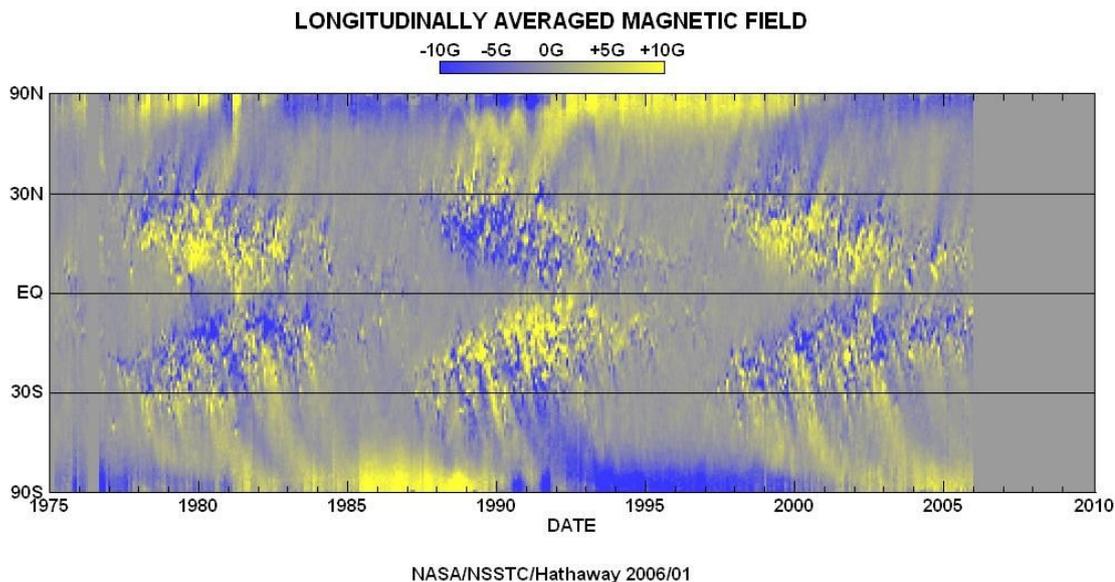


Figura 2.6 - Diagrama da borboleta do período de 1977- 2006.

FONTE: http://www.nasa.gov/vision/universe/solarsystem/solar_cycle_graphics.html

As cores azuis e amarelas da Figura 2.6 representam polaridades diferentes. Acima do gráfico há uma escala que dá a diferença da intensidade magnética, em Gauss. Nota-se claramente que as manchas aparecem aos pares e com polaridades diferentes. No tempo as manchas nascem em médias latitudes e seguem para o equador.

3.0 – Proeminências

Proeminências aparecem como finos filamentos escuros no disco solar. É possível observar-las com filtro H α . Na realidade elas são imensas cortinas verticais de plasma com vezes mais frias e densas do que o meio em que as rodeia, a coroa.

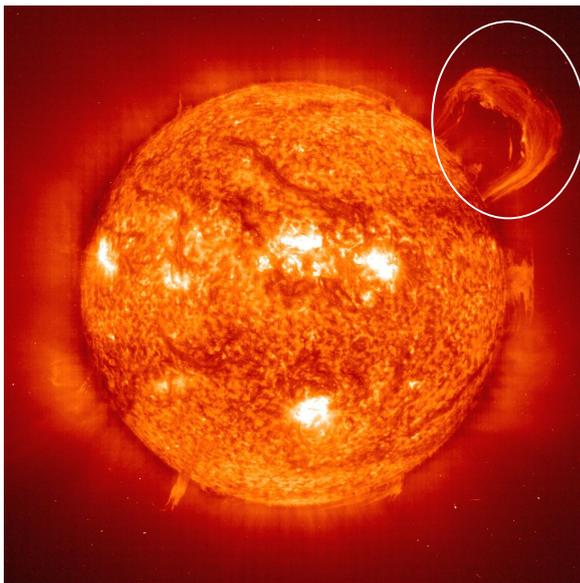


Figura 2.7 - Proeminência solar visível na região do extremo ultravioleta EIT (SOHO/EIT -Extreme ultraviolet Imaging Telescope). FONTE: <http://soho.nascom.nasa.gov/>.

As regiões brilhantes do Sol, na Figura 2.7, são regiões ativas e o círculo branco indica a proeminência vista em 14 de setembro de 1999 vista pelo instrumento EIT a bordo do satélite SOHO. A temperatura dela é de aproximadamente 60000 K enquanto a coroa ao seu redor tem temperatura acima de 1 milhão K. As proeminências podem estar associadas às ejeções coronais de massa que, caso estejam na direção a Terra, podem causar significativa atividade geomagnética e auroras.

4.0 – Vento Solar

Vento Solar é a emissão de radiação corpuscular contínua (Brandt, 1970), ou um gás ionizado que se origina da diferença de pressão dos constituintes da Coroa Solar que continuamente acelera o fluxo de partículas para fora do Sol (E. N. Parker, 1958). Constituídos por prótons e elétrons, o Vento Solar flui passando constantemente pela Terra com uma velocidade média de 400 a 500 km/s e com densidade média de prótons e elétrons de 5 partículas por centímetro cúbico (Brandt, 1970).

O fato observacional de que a cauda ionizada dos cometas tem uma direção radial ao Sol, independente da direção de seu movimento fez Ludwig Birmann propor em seus trabalhos publicados entre 1951 e 1957 a existência do Vento Solar. Além disso, o Vento Solar foi sugerido por outros cientistas pelo fato de grandes explosões solares (“*flares*”) provocarem mudanças no campo magnético da Terra (Burlaga, 1995).

O vento solar não é emitido uniformemente devido ao campo magnético do Sol estar altamente estruturado em algumas regiões e em outras não. O gás fica aprisionado nas regiões de campo magnético forte que emite grande quantidade de raios x, associada à formação de laços, formando um fluxo coronal que se expande para o espaço. Dependendo da intensidade de campo estas linhas podem se desprender caracterizando o Vento Solar lento geralmente observada na região equatorial solar. Onde não há formação de laços indica um campo magnético não aprisionado. Há um **Buraco Coronal** por onde o gás escapa junto ao campo magnético que constitui o Vento Solar Rápido. Na Figura 2.8 visto por telescópio de raios-x, a região escura no pólo caracteriza o buraco coronal, nesta região o vento solar é rápido. Na região equatorial as linhas de campo confinam o plasma originando o vento solar lento.

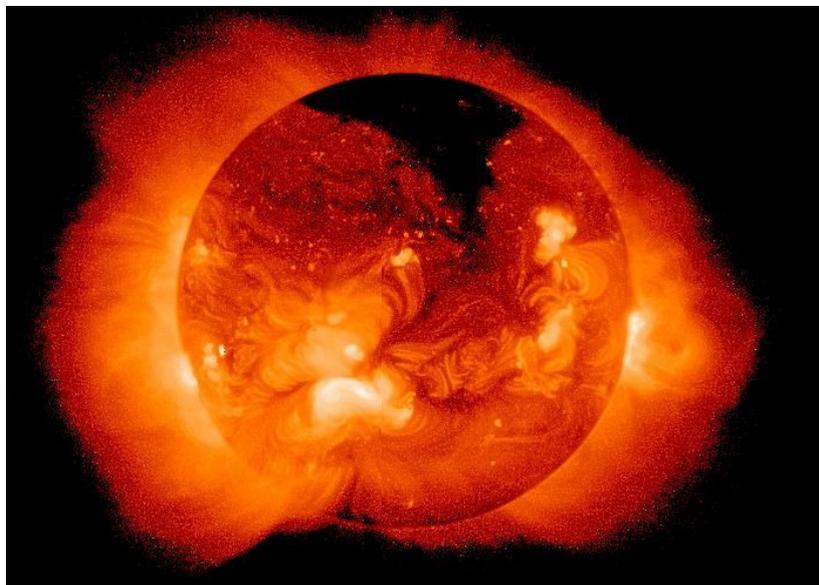


Figura 2.8 – Pode-se notar a grande região escura que é caracterizada como Buraco coronal, vista por telescópios de raios-X do satélite Yohkoh.
FONTE: <http://solarscience.msfc.nasa.gov/feature3.shtml>.

No início, os cientistas acharam que as explosões solares, os “*flares*”, eram responsáveis pela mudança intensa na magnetosfera terrestre, mas após o início da década de 1970 as observações mostraram que, além de explosões, ocorria ejeção de grande quantidade de massa solar (CME). Em certos casos o campo que acompanha a ejeção se conecta com o campo magnético da Terra (Tempestade Magnética) causando o efeito das auroras, perdas de dados nos satélites, *black-out*, e grandes conseqüências que comprometem a manutenção da tecnologia. Com o objetivo de evitar desastres, foram propostos vários métodos de poder prever estas estruturas que causam

Tempestades Magnéticas, sendo então o objetivo do Clima espacial, identificar estruturas e maneiras de prever tais tempestades.

As sondas Soviéticas Lunik 2 e Lunik 3 em 1960 primeiramente fizeram a medida do Vento Solar, e em 1962 a sonda norte americana Mariner 2 confirmou as previsões de E.N. Parker. Observações indicam que o Vento Solar se estende além de 50 UA (unidades astronômicas). Foi sugerido em 1960 que o Vento Solar termina em uma grande onda de choque (Parker, 1961). Com muita incerteza foi estimado que a fronteira de grande onda de choque do Vento Solar encontra-se a 100 UA. Em 30 de agosto de 2007 a esperada candidata sonda Voyager 1 entra na região chamada “Héliosheath” e atualmente atravessa a chamada “Termination Shock”.

5.0 – Campo Magnético Interplanetário (CMI)

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 distancias junto ao vento solar (congelado) constituindo o chamado campo magnético interplanetário, nas vizinhanças da Terra sua intensidade é 5 n T.

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 próximo ao Sol (de 1,5 a 2,5 raios solares), entrando no Sol acima do plano de simetria e saindo abaixo, dependendo da fase do ciclo solar de 11 anos. No meio interplanetário a transição entre o campo de entrada e saída constitui uma estreita região onde se forma uma lamina de corrente, chamada de Lamina de Corrente Heliosférica (LCH, Schultz 1973). Esta lamina divide um hemisfério com polaridade negativa do outro com polaridade positiva.

Devido à rotação do Sol, o campo magnético interplanetário tem, em larga escala, o aspecto de uma espiral, sendo quase radial próximo ao Sol e praticamente perpendicular à direção radial além de 5-10 UA. Na vizinhança da Terra, 1 UA, o CMI tem inclinação de aproximadamente 45°.

6.0 – Ejeções de Massa Coronais e *Flares*

As Explosões Solares (*flares*) são fenômenos caracterizados 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.

Carrington, em 1859, observou um intenso e breve aumento de luminosidade nas vizinhanças de uma mancha solar denominando-o de “explosão solar” (*flare*). Aproximadamente um dia após este evento houve uma intensa tempestade magnética, levando Carrington a concluir que as explosões solares são as causadoras dos distúrbios geomagnéticos não-recorrentes (Gosling, 1993). A partir daí este fenômeno ganhou destaque no estudo da física solar.

Mas foi só em 14 de dezembro de 1971 que a primeira Ejeção Coronal de Massa (CME) foi observada, pela *Orbiting Solar Observatory*, OSO-7 (Howard et al., 1997). O termo “Ejeções Coronais de Massa” foi primeiramente usada por Gosling et al. (1975). Estudos mostraram que as CMEs muitas vezes estavam associadas a explosões solares e proeminências. A primeira idéia era de que as CMEs eram causadas pelas Explosões Solares (Dryer, 1982; Dryer e Wu, 1985). Uma CME também libera uma energia de 10^{31-32} ergs (Illing e Hundhausen, 1986) sendo juntamente com as explosões os dois fenômenos mais energéticos da coroa solar. Existem diferenças entre os dois fenômenos. As Explosões Solares liberam energia em forma de aquecimento, sendo eventos locais de baixa escala, aquecendo o material a sua volta em poucos minutos. As CMEs liberam energia em forma de trabalho (Low, 1996) e, em comparação com Explosões Solares, são fenômenos de grande escala. São grandes bolhas de gás magnetizado que podem levar diversas horas para serem expelidas ao espaço. A Figura 2.9 mostra um *flare* observado pelo instrumento EIT a bordo do satélite SOHO em 29 de outubro de 2003. CMEs são na Figura 2.10 observada em 24 de fevereiro de 2000. Nota-se a diferença entre CME e *flares* a partir das imagens.

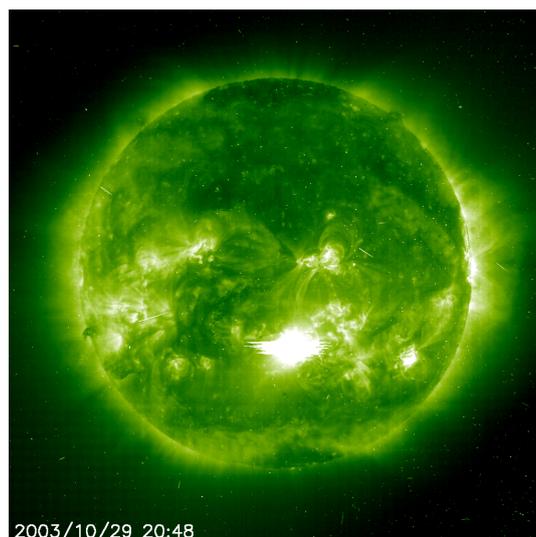


Figura 2.9 – Explosão solar (“flare”), o ponto mais brilhante da imagem obtida pelo instrumento EIT em 29 de outubro de 2003, a bordo do satélite SOHO, em 195 A.

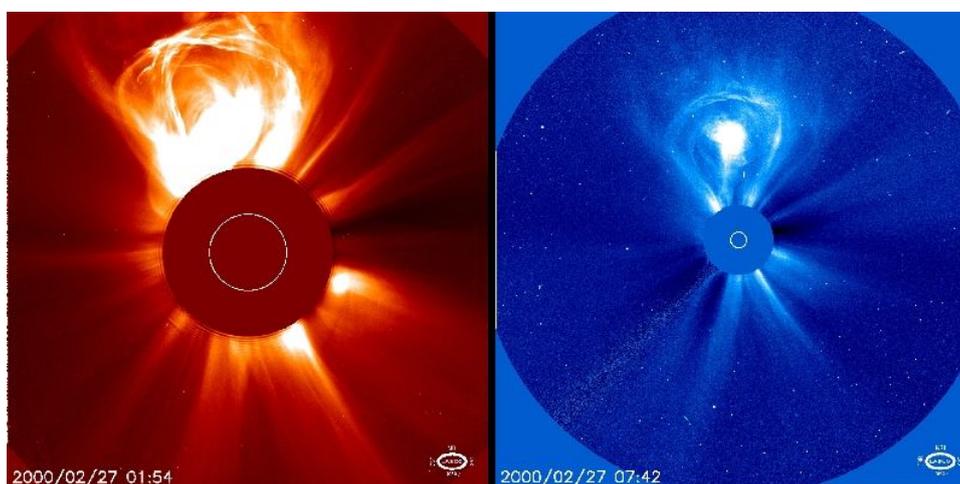


Figura 2.10 - Ejeção Coronal de Massa em 27 de fevereiro de 2000 observada por LASCO C2 e C3, satélite SOHO. FONTE: <http://soho.nascom.nasa.gov/gallery/images/las02.html>.

Assim, nem todas as CMEs estão associadas a explosões e, quando estão geralmente ocorrem antes delas (Gosling, 1993; Gosling 1997). Os intensos distúrbios geomagnéticos também passaram a ser associados às CMEs (Gosling, 1993) e não às explosões, colocando as CMEs em uma posição de destaque no estudo da física solar-terrestre. A discussão entre as relações entre CMEs e explosões culminou com a publicação do artigo *The solar flare myth* (o mito da explosão solar, Gosling, 1993).

CMEs estão diretamente relacionadas com o ciclo solar. Elas tem frequência de um evento por semana no mínimo e de 2 a 3 eventos por dia nos períodos de máximo solar. A grande quantidade de material que carrega as linhas de campo magnético do Sol que é ejetada para o meio interplanetário com uma CME é chamada de Ejeção Coronal de Massa Interplanetária (ICME). A interação da ICME com a magnetosfera

terrestre causa distúrbios geomagnéticos devido à velocidade das partículas ejetadas do Sol ter várias centenas de km/s. As ICMEs geralmente estão acompanhadas de ondas de choque.

As Ejeções Coronais de Massa podem alterar 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.

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

1. Temperatura cinética de íons ou elétrons baixa para uma dada velocidade do Vento Solar. Esta característica baseia-se na expansão da estrutura;
2. Anisotropia não usual da distribuição de prótons com temperatura paralela superior a temperatura perpendicular ao Campo Magnético Interplanetário, causado pela conservação do momento magnético dos íons à medida que o Plasma se expande;
3. Abundancia de Helio não usual.
4. Abundancia de outras espécies iônicas;
5. Feixes bidirecionais de elétrons supra termais e íons energéticos. Ao caracterizar uma configuração de Campo Magnético Interplanetário, é possível que seja o campo magnético interno de uma injeção, fechado e com extremidades presas no Sol;
6. Suave e intenso Campo Magnético interfere nos valores de parâmetro β de Plasma, que quando combinado com baixas temperaturas levam o parâmetro β a baixos valores. Este parâmetro é geralmente menor que 0,1;
7. 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;
8. Decréscimo do fluxo de Raios Cósmiticos;

Cerca de 1/3 das estruturas identificadas no meio Interplanetário são Nuvens Magnéticas (Gosling, 1990). Estruturas que apresentam as características necessárias para uma tempestade geomagnética são estruturas “geoefetivas”.

7.0 – Nuvens Magnéticas

A descoberta das Nuvens Magnéticas foi feita por Burlaga et al. (1981). Segundo Klein e Burlaga (1982), uma Nuvem Magnética é definida como sendo uma estrutura com extensão radial de aproximadamente 0,25 UA - em 1 UA -, Campo Magnético mais intenso do que o Vento Solar normal, tipicamente $B > 10nT$, suave rotação da direção do campo magnético em um grande ângulo, próximo a 180° , baixa temperatura e baixo valor do parâmetro beta, $B \sim 0,1$. 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., 1997).

Medidas dos parâmetros de Plasma – velocidade do Vento Solar, temperatura e densidade de prótons e Campo Magnético – componentes $|B|$, B_x , B_y , B_z – possibilitam identificação de Nuvens Magnéticas. Tais medidas são feitas diariamente por vários satélites presentes no Meio Interplanetário.

As Nuvens Magnéticas são originadas nas Ejeções Coronais de Massa CMEs. A relação entre uma CMEs, observada pelo satélite SOHO em 6 de janeiro de 1997, e a chegada de uma Nuvem Magnética na Terra, quatro dias depois, observada pelo satélite WIND, foi descrita por Fox et al. (1998). A região da cavidade interna da CMEs foi identificada como possível origem desta Nuvem Magnética por Gopalswamy et al. (1998).

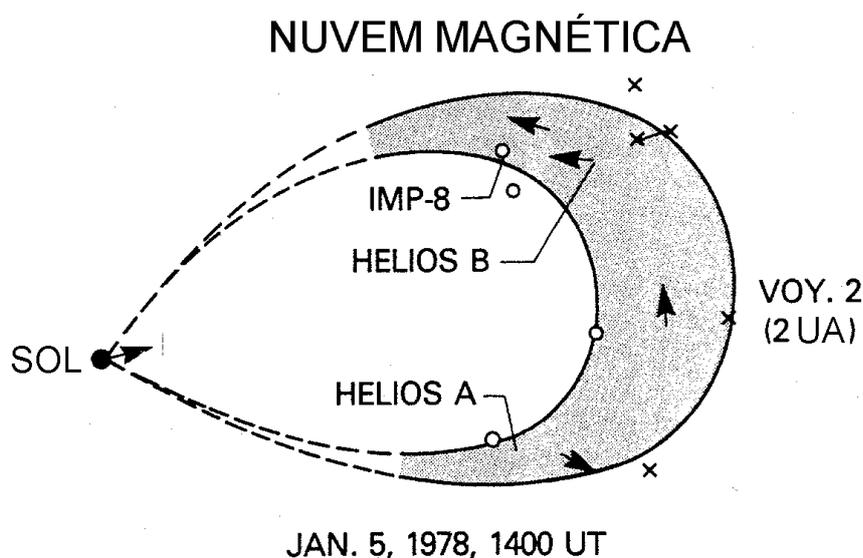


Figura 2.11 – Geometria de uma nuvem magnética. Fonte: Adaptado de Burlaga et al. – 1990.

Uma Nuvem Magnética observada por vários satélites possibilitou o estabelecimento de sua geometria, ilustrada no diagrama da Figura 2.11, adaptado de

Burlaga et al. (1990). Nela estão indicados os satélites que observaram o evento ocorrido em 5 de Janeiro de 1978: IMP-8, Hélios A 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. Esta situação é bastante rara, pois normalmente não é possível observar Nuvens Magnéticas com mais de um satélite simultaneamente.

8.0 – Origem Interplanetária de 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. A Figura 2.12 é uma representação artística da magnetosfera terrestre interagindo com o vento solar.

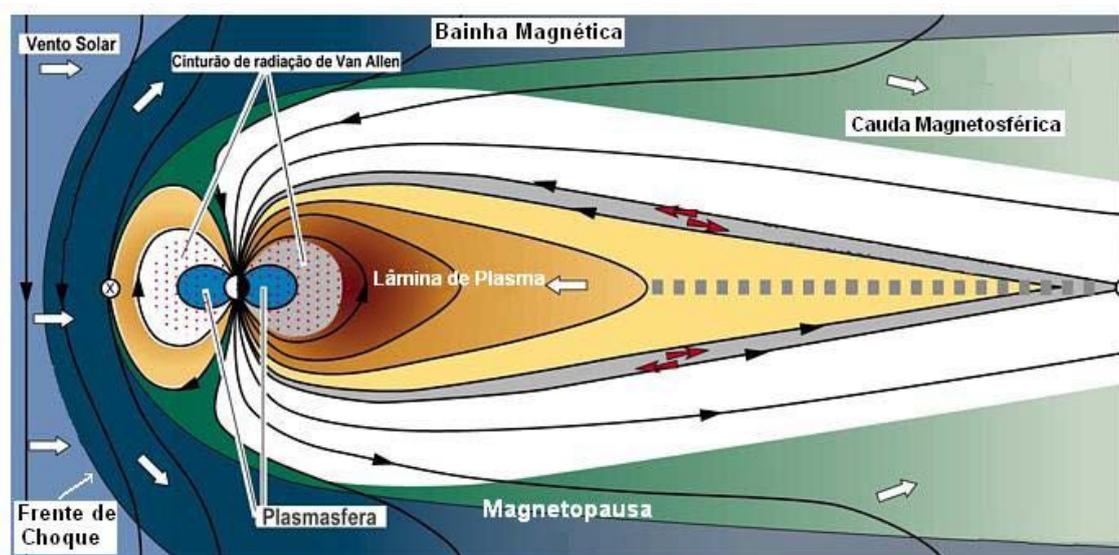


Figura 2.12 - Devido à interação com o vento solar, a magnetosfera toma a forma da figura acima.
FONTE: Tese de mestrado – Aline de Lucas - ESTUDO DA DINÂMICA DA CORRENTE DE ANEL DURANTE A FASE PRINCIPAL DE SUPERTEMPESTADES MAGNÉTICAS.

Acredita-se que o mecanismo 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) (Figura 2.13). Para que aconteça este fenômeno é necessária que a componente do CMI esteja na direção antiparalela a do Campo Magnético Terrestre. O critério necessário para que ocorra uma Tempestade Geomagnética intensa, $Dst < -100 \text{ nT}$, é o de haver um campo

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

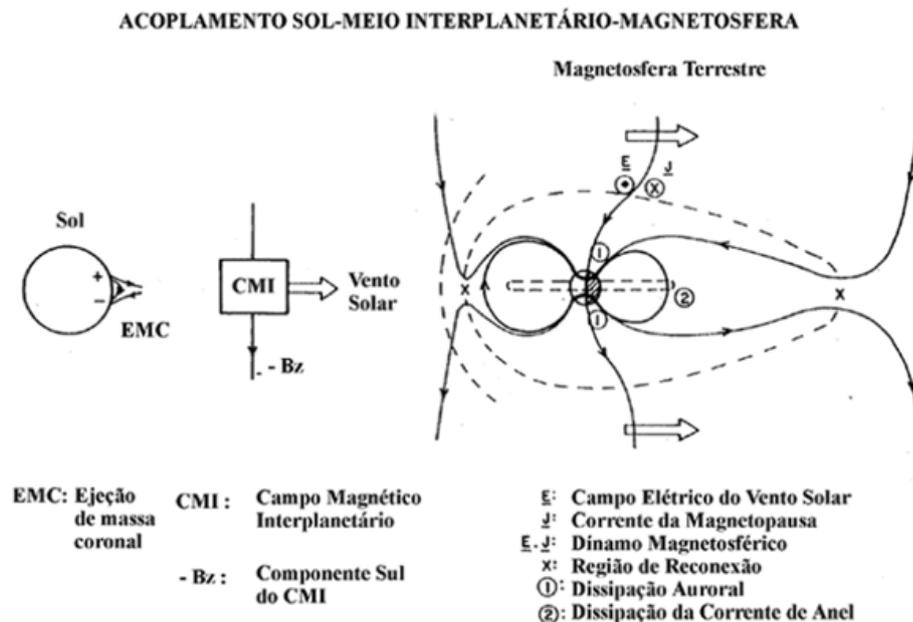


Figura 2.13 – Acoplamento entre Sol, Meio Interplanetário e magnetosfera Terrestre.
 FONTE: Adaptada de Gonzalez et al. (1994).

9.0 – Tempestades Geomagnéticas e Índice Dst

Tempestades Geomagnéticas são eventos de grande perturbação no campo magnético Terrestre, onde a Terra fica vulnerável à 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 Magnético 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 devido 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, íons de Leste para oeste e os elétrons de oeste para leste, em torno da Terra

devido à distribuição de partículas injetadas e aprisionadas na magnetosfera interna. A perturbação do Campo Magnético gerado 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 uma medida quantitativa da ocorrência de tempestades geomagnéticas. É calculado a partir de dados de magnetômetros de superfície em observatórios próximos ao Equador.

Em latitudes baixas a perturbação da componente horizontal do campo geomagnético H, é dada pela intensidade da corrente de anel magnetosférica. “Corrente de anel magnetosférica” é um sistema de correntes que circula a Terra no plano equatorial, que são geradas pela deriva longitudinal de partículas energéticas (de 10 a 200 keV) carregadas, aprisionadas no campo magnético terrestre a uma distância entre 2 e 7 raios terrestres. Durante uma Tempestade Magnética, o fluxo de partículas da corrente de anel é dramaticamente aumentado. Este aumento tem sido atribuído 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 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 como o Índice Dst é uma média da medida direta das perturbações causadas na magnetosfera, tomando-se a superposição dos dados de todas as estações, a diferença entre os maiores e menores valores corresponde ao índice Dst, 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. Neste trabalho foi

utilizado índice Dst oriundo do World Data Center for Geomagnetismo (Kyoto, Japão) disponível no site <http://swdcdb.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/>. A Tabela 2.3 abaixo mostra a classificação das Tempestades Geomagnéticas de acordo com a intensidade. As intensidades seguem de acordo com critérios de Gonzalez et. al., 1994.

Tabela 2.3 – Classificação das Tempestades Geomagnéticas.

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

Uma tempestade Geomagnética caracteriza-se por três fases, a Figura 2.14 é apresentada antes da descrição das fases:

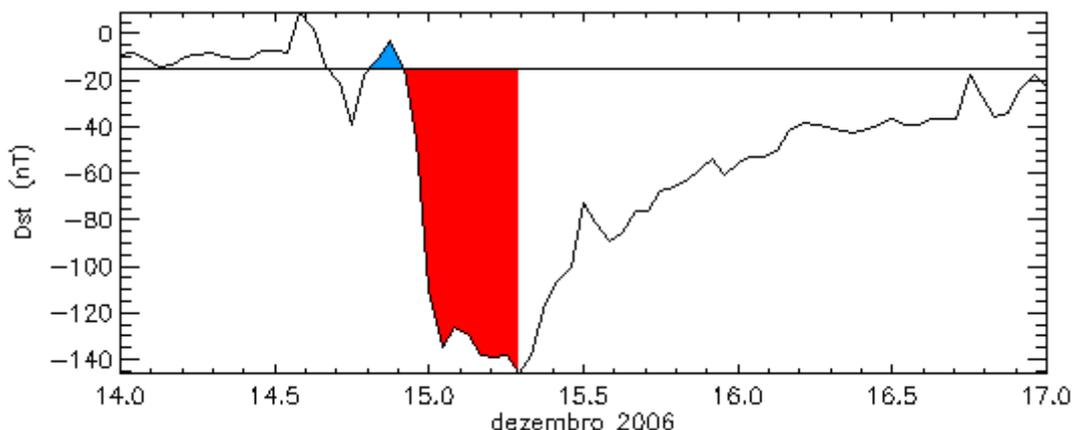


Figura 2.14 - Fases do decréscimo do índice Dst.

1. Um início súbito (**em azul**) - *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 (**em vermelho**) – *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 consequentemente um alto decréscimo no índice Dst;
3. Uma fase de recuperação (**após vermelho**) – *recovery phase* – caracteriza-se pela diminuição e eliminação gradual da pressão, passando a predominar os processos de perda da Corrente de Anel.

Capítulo 3 – Raios Cósmicos

1.0 – Longo Período de Variação na Intensidade de Raios Cósmicos Galácticos (GCR)

Intensidades de raios cósmicos medidas na superfície da Terra mudam com varias escalas de tempo. O Sol apresenta atividade solar de máximo e de mínimo e a modulação dos raios cósmicos no meio interplanetário é afetada pela atividade solar. Há uma relação entre intensidade de raios cósmicos medidas na superfície da Terra e o ciclo solar de 11 anos. Pode-se dizer que quando a atividade solar é máxima a intensidades de raios cósmicos medida é mínima. Quando a atividade solar é mínima a intensidade é máxima. Acredita-se que intensidade de GCR (*Galactic Cosmic Ray*) é reduzida no máximo solar devido à forte turbulência do campo magnético interplanetário IMF.

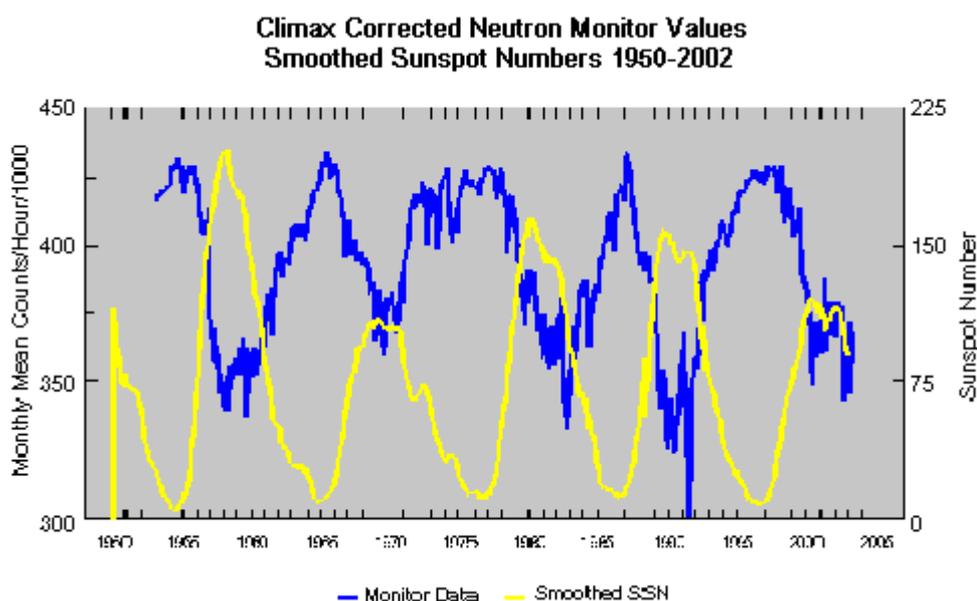


Figura 3.1 – Em azul dados obtidos pelo monitor de nêutrons – Climax da universidade de Chicago. Em amarelo dados de manchas solares.

FONTE: http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/COSMIC_RAYS/image/cr_ssn.gif

Podemos ver na Figura 3.1 que intensidade GCR exibe variação de 11 anos é anticorrelatada com atividade solar de 11 anos. Em contraste com a variação de 11 anos, GCR exibe variação de 22 anos em conexão à inversão da polaridade magnética solar.

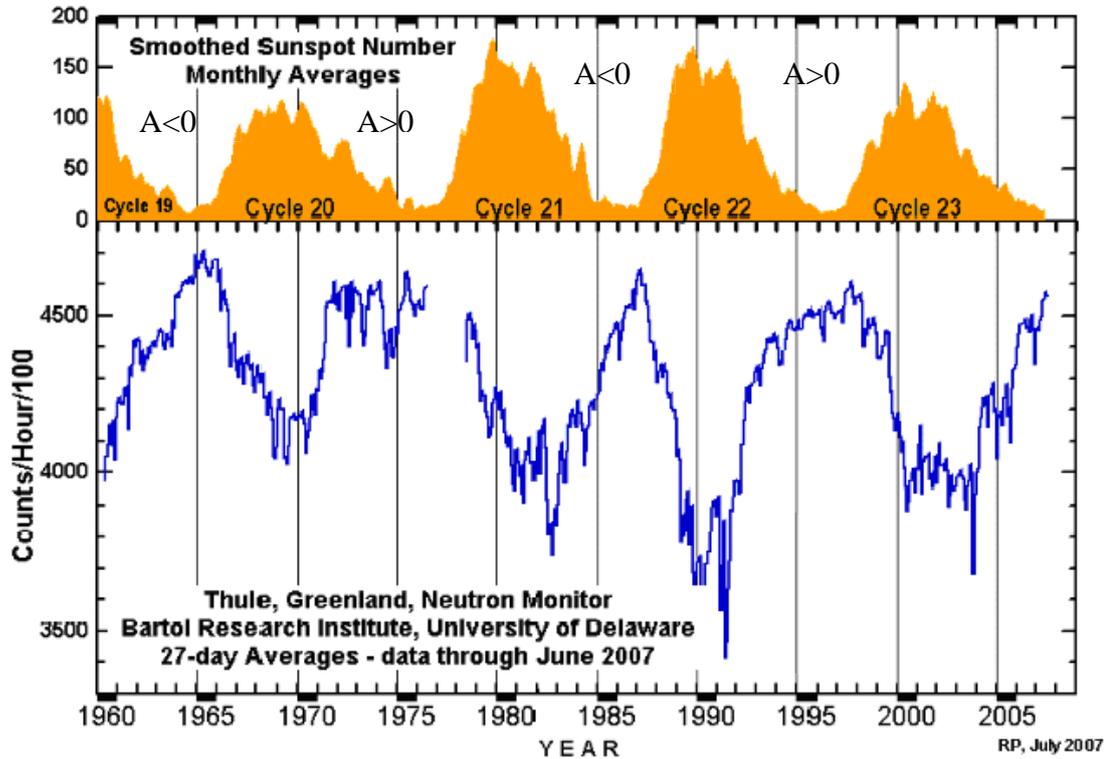


Figura 3.2 - Outro gráfico que mostra a anticorrelação entre raios cósmicos e ciclo solar estudada pelo numero de manchas solares. FONTE: <http://neutronm.bartol.udel.edu>.

A polaridade é definida pelo produto interno entre o vetor velocidade angular do sol e o momento magnético do sol $A \equiv \vec{\Omega} \cdot \vec{M}$.

Como pode ser visto na Figura 3.2 a intensidade de GCR tem pico achatado no mínimo solar quando a polaridade é $A > 0$ enquanto o pico é bem definido quando $A < 0$. Não é possível ver esta relação pelo numero de manchas solares.

Durante o período de mínimo a coroa é dominada por buracos coronais dos pólos, de onde o vento solar rápido flui com as linhas abertas do campo magnético do sol com polaridades opostas nos dois hemisférios. A lâmina de corrente heliosferica limita onde as linhas de campo magnético interplanetário são opostas. Na Figura 3.3 abaixo “a” mostramos o campo magnético interplanetário apontando “away” (azul), ou seja, afastando-se do Sol no norte e “toward” em direção ao Sol ao sul na época de $A > 0$. Na mesma Figura 3.3, “b” representa fase de máximo solar dificultando a identificação do eixo magnético. A direção do IMF nos dois hemisférios é invertida em $A < 0$ em “c” na Figura 3.3.

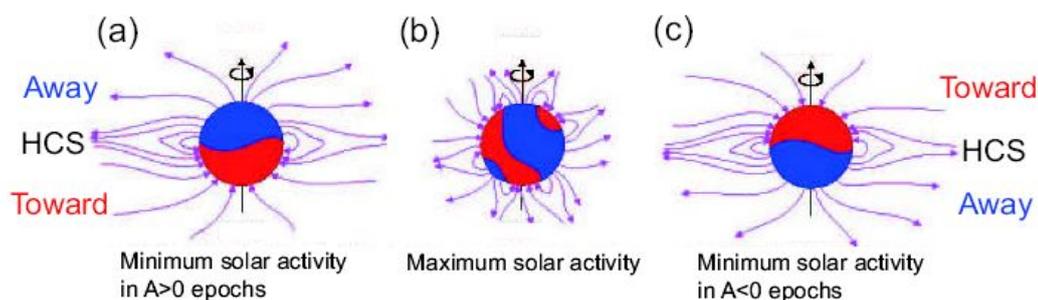


Figura 3.3 - Esquema identificando a estrutura magnética solar. Em “a” sol em mínimo e $A > 0$. Em “b” máximo solar. Em “c” fase de mínimo, mas com $A < 0$. O vermelho representa linhas “Toward” que entram e azul representa “away”, que saem do sol. FONTE: Ver Referencia.

O estudo da configuração do campo magnético do sol é importante para estudo de raios que seguem as linhas de campo magnético do meio interplanetário.

2.0 – Raios Cósmicos e Muons

Os raios cósmicos foram descobertos em 1912 por Vitor Hess. Ao contrário do que o nome pode sugerir, não são raios, mas sim partículas. São originados do espaço, produzidos por diferentes fontes, tais como o Sol, supernovas, estrelas de nêutrons, buracos negros e radio galáxias. Em geral consistem de átomos ionizados.

Muitos raios cósmicos viajam a velocidades próximas a da luz. Os mais energéticos já observados possuem energia de aproximadamente 150 Joules, equivalente a energia cinética de uma bola de baseball. A densidade numérica de raios cósmicos integradas sobre a energia é da ordem de 10^{-10} cm⁻³ nas vizinhanças da Terra. A densidade total de energia para raios cósmicos é ~ 1 eV cm⁻³ (Mursula, 2003).

A atmosfera terrestre e o campo geomagnético protegem-nos contra exposição excessiva a estas partículas. Assim que raios cósmicos entram na atmosfera, estes colidem com partículas como nitrogênio ou oxigênio, gerando uma série de partículas secundárias como, por exemplo, os muons.

O estudo dos raios cósmicos constitui oportunidade singular em áreas como física nuclear e de partículas, já que possuem faixas de energia inatingíveis até o presente em laboratório. Outras contribuições do seu estudo estão na astrofísica (teoria de novas, supernovas e teoria magnetohidrodinâmica) e, mais recentemente, na área de clima espacial, para previsão de tempestades geomagnéticas.

Costuma-se separar os raios cósmicos em três categorias: a) raios cósmicos galácticos (GCR, da sigla em inglês *galactic cosmic rays*), b) raios cósmicos solares

(SCR, da sigla em inglês, solar cosmic rays) e c) raios cósmicos anômalos (ACR, da sigla em inglês anomalous cosmic rays).

Quando partículas de raios cósmicos atingem o topo da atmosfera, estas passam por reações nucleares que fazem com que um conjunto de partículas secundárias seja formado. Como estas partículas primárias possuem energias relativísticas, a maioria das partículas secundárias propaga-se aproximadamente na mesma direção em que a partícula primária se deslocava antes da colisão.

Os muons são um subconjunto do produto dos raios cósmicos primários. Os muons são partículas subatômicas que possuem a mesma carga do elétron, porém tem massa 207 vezes maior. Têm grande poder de penetração e mantêm a direção e o sentido do raio cósmico primário que os originou.

A interação de raios cósmicos que atingem o alto da atmosfera terrestre produz grandes quantidades de partículas elementares conhecidas como pions ou mésons-pi. Esses pions são partículas instáveis que se desintegram em frações de segundos após terem sido produzidas, criando partículas secundárias chamadas muons e seus neutrinos, conhecidos como neutrinos de muon. Os muons, por sua vez, também são partículas instáveis que se desintegram formando um terceiro conjunto de partículas elementares: os elétrons, os neutrinos do elétron e mais um neutrino do muon. Os neutrinos produzidos nessa seqüência de decaimentos são chamados neutrinos atmosféricos. Observando-se seqüência de decaimento descrita acima se espera que para cada dois neutrinos do muon, somente um neutrino do elétron seja observado. Quando raios cósmicos de alta energia chegam na alta Atmosfera Terrestre, criam partículas elementares instáveis, cujo rastro, 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".

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 suas variedades: positiva e negativa. O muon negativo 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 energia muito alta (pois viajam com uma velocidade $v \approx 0.99c$) eles interagem muito pouco com a matéria, apenas por ionização. Por causa disto eles podem alcançar grandes distâncias e conseqüentemente atingem a superfície da Terra.

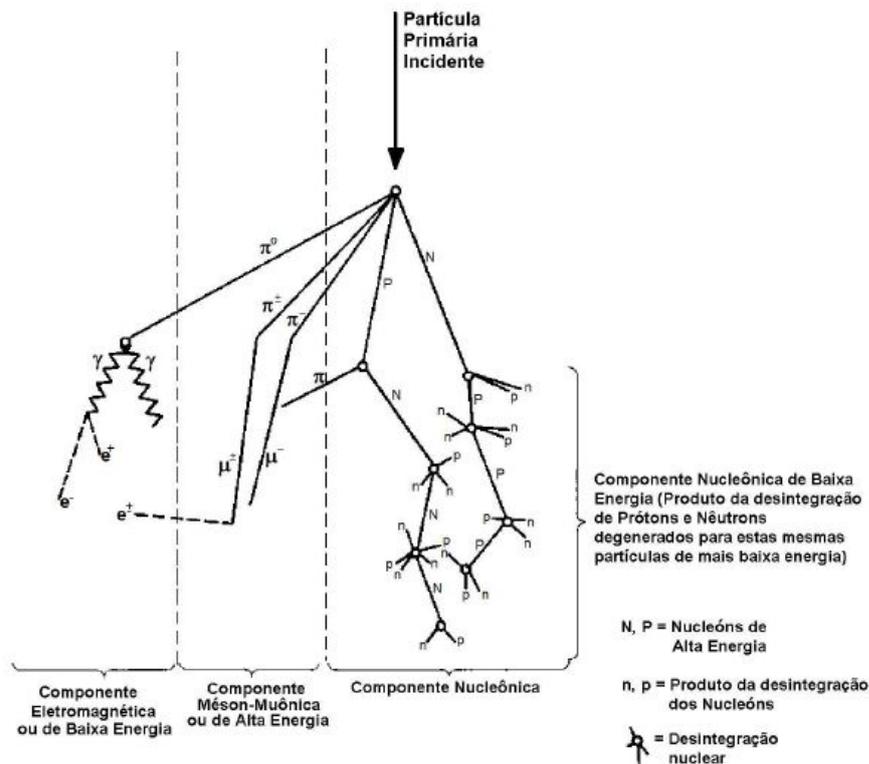


Figura 3.4 - Figura esquemática dos raios cósmicos que colidem com partículas da atmosfera Terrestre (chuveiro de raios cósmicos). FONTE: Modificado de Forbush (1993).

3.0 – Efeito Cone de Perdas

Antes de entender como o detector de raios cósmicos de alta energia – muons funciona, é preciso compreender fisicamente qual a relação entre raios cósmicos, estruturas CMEs e a Terra.

Anteriormente foi dito que muons são formados a partir da interação dos raios cósmicos com constituintes da atmosfera terrestre e que muons chegam à superfície da Terra. Além disso, os muons produzidos pelo decaimento conservam aproximadamente a direção do raio cósmico incidente, diferentemente do neutrino.

É bem estabelecido que uma CME acompanhada de um forte choque faz com que raios cósmicos vindo da direção da CME sejam retidos atrás do choque e um detector de raios cósmicos terrestre observa a diminuição na intensidade de raios cósmicos (K. Munakata, 2005) na ocorrência de tempestades magnéticas chamada de

“decréscimo de Forbush”. Um aumento na anisotropia, ou seja, diferentes em direções diferentes, pode ser observado em alguns eventos antes do choque chegar a Terra, porque os raios cósmicos viajam muito mais rápido do que o choque e carrega a informação sobre a rarefação do fluxo de raios cósmicos distantes, caracterizando o “cone de perdas” (K. Munakata et al., 2005). A ilustração artística do cone de perdas está na Figura 3.5 abaixo.

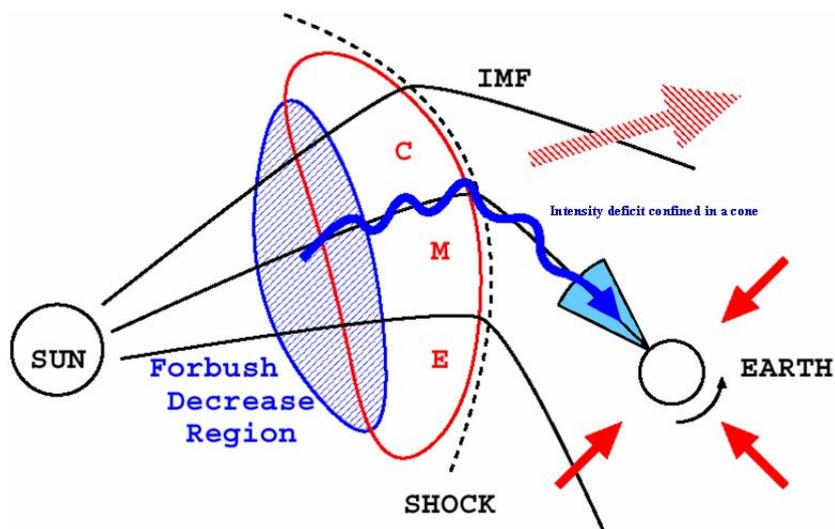


Figura 3.5 - Representação artística do cone de perdas. FONTE: Rufolo.

Assim, 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)

Em análises de dados posteriores será possível ver que existe resposta na ocorrência de tempestades geomagnéticas na forma de diminuição no fluxo de raios cósmicos. O que é diferente de ver algo antes da ocorrência de tempestades, no intuito de prever a tempestade. Outro tópico importante é que é preciso mais de um detector Terrestre para medir o fluxo de raios cósmicos na Terra, por isso é importante uma rede mundial detectores que será em seções posteriores comentada.

Capítulo 4 – Detector Multi-direcional de raios cósmicos de alta energia – muons. Protótipo e expandido.

As estruturas geofetivas devem ser previstas com antecedência devido as suas conseqüências na Terra. Para isso dispomos do satélite, não o único, ACE localizado no ponto lagrangeano L1 que coleta dados do Vento Solar, como: velocidade do Vento Solar, temperatura, número de partículas / cm³, intensidade e as componentes do CMI. Quando há uma tempestade o satélite com seus dados a prevê algo entre 40 minutos a 1 hora, dependendo da velocidade da estrutura interplanetária que irá causar a tempestade.

Existe também o satélite SOHO da NASA, o qual observa o Sol com diversos instrumentos ópticos. A fim de melhorar este tempo de previsão, são utilizados detectores terrestres.

A importância de se estudar previsões de tempestades geomagnéticas consiste em manter a Astronáutica segura oferecendo mais segurança aos astronautas em órbita terrestre. É essencial para manter os sistemas de memória e informáticos dos muitos satélites e evitar danos em redes de energia elétrica na Terra. O aumento na intensidade de corrente de anel induz correntes elétricas em transformadores próximos ao mar sobrecarregando os sistemas elétricos. A variabilidade solar está intimamente relacionada a distúrbios no geoespaço, afetando telecomunicações, causando danos em sistemas tecnológicos tanto espaciais, quanto terrestres, que envolvem grandes quantidades de recursos financeiros. Por outro lado, o cenário das relações Sol-Terra é fascinante do ponto de vista científico, e tem atraído a atenção da comunidade científica há vários séculos (Dal Lago, 2003).

Atualmente pesquisa-se um método de previsão de tempestades através de imagens (STEREO). Utilizando o satélite SOHO da NASA é possível ter imagens bidimensionais das estruturas interplanetárias, limitando muito a visualização das estruturas no meio interplanetário. Lançado dia 25 de outubro de 2006, a missão STEREO (*Solar TERrestrial RELations Observatory*) tem como objetivo, com dois satélites ao redor do Sol em direções contrárias ter uma visão em três dimensões das estruturas interplanetária e vê-las evoluindo no meio interplanetário. Então ficam para o futuro novos métodos de previsão de tempestades utilizando os satélites da missão STEREO.

1.0 – Detector Protótipo

Em março de 2001 foi instalado um protótipo detector direcional de muos no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/INPE – MCT), em São Martinho da Serra, RS, Brasil (Latitude 29°, 26', 24''S, Longitude 53°, 48', 38''O, altitude 492m acima do nível do mar) no âmbito da parceria INPE/MCT – LACESM/CT-UFSM.

Este detector era formado por duas camadas de 4 detectores cada, como mostrado na Figura 4.1. Estas camadas são sustentadas por uma estrutura de ferro e intermediadas por uma camada de chumbo de alta pureza de 5cm de espessura usada para absorver os componentes de mais baixa energia dos Raios Cósmicos. Cada um dos 8 detectores são compostos por uma caixa metálica onde no topo localiza-se uma fotomultiplicadora com a área de detecção voltada para baixo, juntamente com os circuitos relacionados.

Na porção inferior da caixa metálica está localizado um plástico cintilante que é excitado quando ocorre passagem de raios cósmicos de alta energia. Este plástico tem área de 1m² e espessura de 5 cm. Os detectores estão dispostos na forma de quadrado de lado 2m² em cada camada. Cada detector é identificado por um uma letra seguida de um número (por exemplo U1, U2, ..., L1, L2,...), sendo que U refere-se a camada superior (do inglês, *upper*), e L refere-se a camada inferior (do inglês, *lower*).

Cada detector é alimentado por dois condutores, sendo um para alta tensão (para a fotomultiplicadora) e outro de baixa tensão (para o circuito eletrônico de pré-amplificação). De cada detector parte um cabo coaxial para os circuitos de coincidência, que correlacionam os dados aos pares provenientes da incidência de muons nos detectores superiores e inferiores.

Somente são contados como muons aquelas partículas que passaram tanto por algum detector da camada superior como por algum detector camada inferior, de forma a produzir pulsos elétricos nos dois circuitos correspondentes. Se uma partícula passar apenas em uma das camadas, esta não será contada como muon.

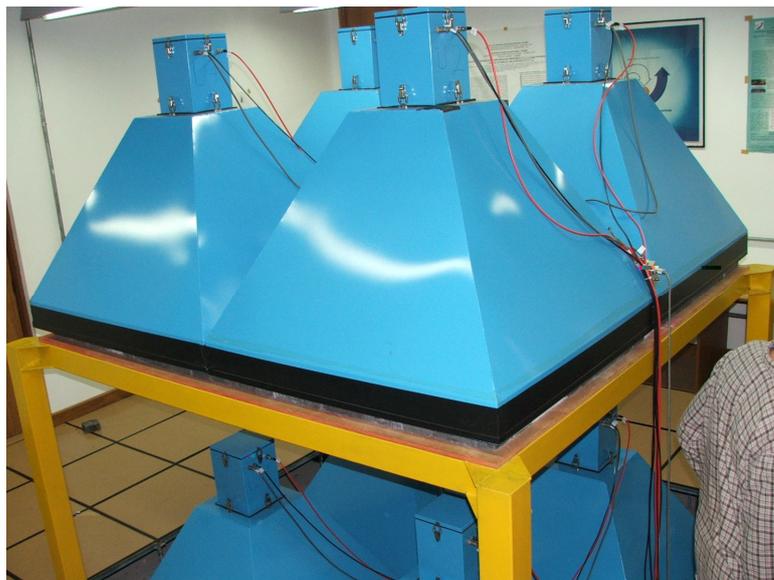


Figura 4.1 – Foto de protótipo detector de muons instalado no OES/CRS/INPE – MCT mostrando em azul os 8 detectores em duas camadas.

Existe duas possibilidades para que não ocorra a contagem:

- a) a partícula foi blindada pela camada de chumbo, sendo sua energia inferior a $\sim 50\text{GeV}$;
- b) a trajetória da partícula não coincide com a posição dos dois detectores em razão do ângulo em relação à vertical ser superior a $49,14^\circ$.

A primeira possibilidade é desejada visto que atua como um filtro para outras partículas de energia menor que $\sim 50\text{GeV}$ que podem não ser muons ou, se forem muons, não são desejados para o estudo em questão. A energia limite de blindagem é função do grau de pureza da camada de chumbo disposta entre os detectores. Em razão disso todo o chumbo tem grau de pureza e aproximadamente igual em toda a extensão da camada. A segunda possibilidade limita a área de cobertura do detector. Esta segunda possibilidade é indesejada, pois limita a cobertura de ângulos de *pitch*.

Juntamente com a fotomultiplicadora encontra-se um pré-amplificador, responsável por amplificar aproximadamente 300 vezes os pulsos provenientes da fotomultiplicadora.

O suprimento de alta tensão é realizado pelo HV *power supply* SPELLMAN SL15, que recebe energia do estabilizador em 110V e fornece 1KVA para um distribuidor de alta tensão. A função do distribuidor é fazer ajuste fina na tensão de cada fotomultiplicadora e compensar diferenças de ganho entre as 8 fotomultiplicadoras do

detector, mesmo se tratando de fotomultiplicadoras de mesmo modelo e fabricante e sob mesmas condições de temperatura.

A partir da combinação dos 8 pulsos de 2 a 2, sendo um na camada superior e outro na inferior, formam-se 16 maneiras de coincidência diferentes. Destas coincidências, formam-se 9 detectores direcionais.

Tabela 4.1 – Dados específicos do detector protótipo.

Detector direcional	Combinação de detectores	Contagem horária (fator 10^4)	Erro de Poisson (%)	P_m (GV)
Vertical (V)	U1-L1 U2-L2 U3-L3 U4-L4	39	0,16	53
30° Norte (N)	U1-L3 U2-L4	11	0,30	58
30° Sul (S)	U4-L2 U3-L1	11	0,30	57
30° Leste (L)	U2-L1 U4-L3	11	0,30	59
30° Oeste (O)	U1-L2 U3-L4	11	0,30	56
39° Nordeste (NE)	U2-U3	4,7	0,46	64
39° Noroeste (NO)	U1-U4	5,4	0,43	61
39° Sudeste (SE)	U4-L1	5,3	0,43	63
39° Sudoeste (SO)	U3-L2	5,5	0,43	60

A Tabela 4.1, com exceção feita para o vertical, as componentes estão acompanhados de um valor de ângulo (em graus). Esse ângulo é a inclinação do dado componente em relação à direção vertical. Percebe-se que quanto menor é a contagem de muons para um dado canal direcional, maior é o seu ângulo de inclinação. Isso é explicado pela rigidez dielétrica da atmosfera (dado em GV), quanto mais inclinado o raio cósmico chega à atmosfera maior é a energia mínima que o mesmo necessita para atravessar a atmosfera e alcançar a superfície terrestre.

Assim, os dados são transferidos dos circuitos contadores para um computador pessoal e gravados em forma de texto a cada hora, acompanhados da informação da hora universal (UT), da pressão atmosférica local e da temperatura da sala.

2.0 – Detector Expandido

O detector expandido (Figura 4.2) possui um total de 56 detectores dispostos em duas camadas de 4x7 detectores separadas por uma distância de 1,73m, totalizando uma área de 28 m² de placas cintiladoras para cada camada. Da mesma forma que no protótipo, as duas camadas estão separadas por outra de chumbo com 5cm de espessura.

As numerações do detectores estão nas faixas 3 a 9, 12 a 16, 19 a 25 e 28 a 34 acompanhados da letra U, se estiverem na camada superior, ou L, se estiverem na camada inferior.



Figura 4.2 – Fotos do detector de muons expandido em dezembro de 2005.

Algumas informações do detector expandido são dados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Dados específicos do detector expandido.

Detector direcional	Número de sub-telescópios	Contagem horária (fator 10^6)	Erro de Poisson (%)
Vertical (V)	28	2,56	0,06
30° Norte (N)	21	1,03	0,10
30° Sul (S)	21	1,06	0,10
30° Leste (L)	24	1,19	0,10
30° Oeste (O)	24	1,20	0,10
39° Nordeste (NE)	18	0,51	0,14
39° Noroeste (NO)	18	0,53	0,14
39° Sudeste (SE)	18	0,53	0,14
39° Sudoeste (SO)	18	0,54	0,14
49° Norte (NN)	14	0,36	0,17
49° Sul (SS)	14	0,35	0,17
49° Leste (EE)	20	0,49	0,14
49° Oeste (WW)	20	0,48	0,14

Na primeira coluna da Tabela 4.2 são dados os ângulos de inclinação dos canais direcionais em relação a direção vertical. Estes ângulos são calculados da seguinte forma:

- a) tomando a separação entre a camada inferior e superior de 1,73m;

b) tomando-se a distância de 1m entre dois detectores adjacentes. Na terceira coluna são dadas as contagens para estes detectores, com fator 10^6 . Tratam-se de médias de contagens horárias baseadas em dados de contagens de 10 minutos do detector durante o dia 08/04/2006. O erro de Poisson é dado, em porcentagem, por $\sigma = \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot 100$.

- Fonte de alimentação, sistema de processamento e armazenagem de dados.

O sistema está montado em circuitos lógicos, disponíveis em chips da família 74XX. Existe outra forma de coincidência dos dados baseada em FPGA (Field Programmable Gate Array) e VHDL (Verilog Hardware Description Language). Com esse sistema determinam-se 119 detectores direcionais. O modelo utilizado é o XC2S200 de fabricação da Xilinx que suporta 32 canais direcionais. Dessa forma basta utilizar-se 4 placas. A Figura 4.3 apresenta o sistema de processamento de sinais provenientes das Fotomultiplicadoras (PMTs) e as fontes de alimentação de todo o detector.

Na porção superior dos racks da Figura 4.3 estão as fontes de alta e baixa tensão. A fonte de alta tensão (que alimenta as PMTs) é do tipo DC (corrente contínua) controlado e monitorado por computador de tensão máxima de 1500 V. A fonte de baixa tensão alimenta os 56 amplificadores de corrente (placas eletrônicas). Na parte inferior do rack no retângulo vermelho estão os potenciômetros para ajuste individual das tensões aplicadas às PMTs. À direita potenciômetros auxiliares, caso algum potenciômetro no retângulo vermelho venha a falhar. Um pequeno aumento de tensão aumenta a contagem das PMTs (Fotomultiplicadoras) sem que tenha ocorrido um aumento na quantidade da chegada de muons. Na porção inferior do rack a esquerda está todo o sistema de processamento de dados, inclusive as placas de FPGA.



Figura 4.3 – Fontes de alimentação e sistema de processamento de sinais do detector de muons.

O computador utilizado para gravação e monitoramento do sistema, tanto local como remotamente está na Figura 4.4.

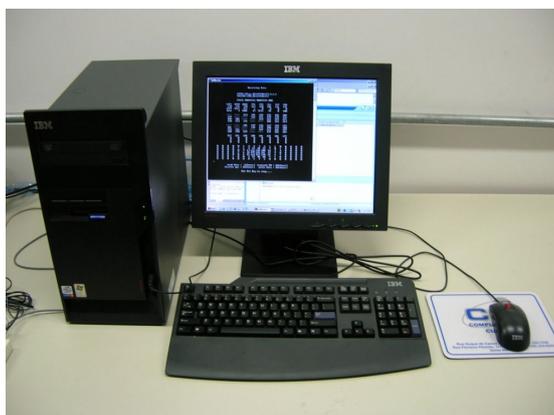


Figura 4.4 – Computador utilizado para gravação dos dados.

O sistema de hora do detector direcional de muons é baseado em relógio de computador pessoal. Como esse sistema não possui a precisão desejada, faz-se sincronização periódica e automática desse horário com o horário disponível no sistema de posicionamento global GPS e com o horário de diversos relógios atômicos disponíveis na internet. Uma vantagem desse sistema é permitir sincronização de horários entre todos detectores da rede internacional.

3.0 – Princípio de Funcionamento do Detector Direcional de Raios Cósmicos

Antes foi visto os princípios físicos para análise de raios cósmicos com muons, que foi o cone de perdas e o decréscimo de Forbush. Agora começa o estudo técnico de como se “vê” o fluxo de raios cósmicos ao redor da Terra. Para fazer isso se deve lavar em conta a energia do raio cósmico e sua direção de incidência. Para se estudar ciência é preciso ter conhecimento em instrumentação, ou seja, a física experimental.

– Cintiladores

Os plásticos cintiladores utilizados nos Detectores Direcionais de Raios Cósmicos do OES/CRS/INPE – MCT são produzidos pela companhia japonesa C. I. Industrial Company Co. Todos cintiladores tem dimensões 25x25x10cm, sendo que para um detector de área 1m² são necessários 4 cintiladores dispostos lado a lado. Suas principais características são dadas na Tabela 4.3. Os cintiladores dos Detectores de Raios Cósmicos – muons estão na Figura 4.5.

Tabela 4.3 – Principais características do Detector de Raios Cósmicos – muons.

FONTE: Munakata, K

Característica	Valor
Comprimento de onda de máxima cintilação	420 nm
Tempo de decaimento da luz emitida	3.0-3.2 ns
Eficiência de cintilação	50-60%
Comprimento de atenuação da luz	90-110cm
Índice de Refração	1.50-1.58
Densidade	1.04

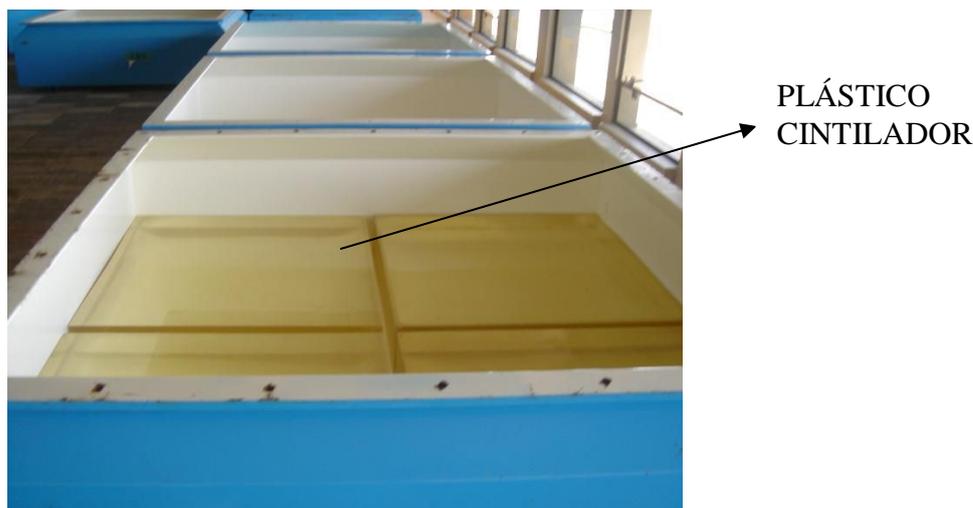


Figura 4.5 - Quatro cintiladores lado a lado formando uma área de superfície de 1m². Os cintiladores estão colocados em caixa de metal com espessura de 1,6 mm. Foto tirada em 22/11/2006.

– Fotomultiplicadoras (PMT)

Para que seja possível detectar muons é preciso algum instrumento que transforme energia de radiação em sinal elétrico para fazer a mediada da contagem. Baseado no efeito fotoelétrico utiliza-se as chamadas fotomultiplicadoras, sigla PMT (do inglês, photomultiplier tube). O efeito fotoelétrico é a emissão de elétrons de um material ao qual incide uma radiação, a luz por exemplo.

Nos Detectores Direcionais de Raios Cósmicos - muons (tanto no protótipo como no expandido) é utilizada fotomultiplicadora fabricada pela *Hamamatsu Photonics* modelo n°. R877. Trata-se de um modelo projetado para contagem por cintilação do tipo *head-on*. Maiores detalhes dessa fotomultiplicadora são dados na Tabela 4.4 e a Figura 4.6 mostra a fotomultiplicadora instalada no detector expandido.

Tabela 4.4 – Dados específicos das fotomultiplicadoras.

Parâmetro	Descrição/Valor	Unidade
Resposta Espectral	300 a 650	Nm
Comprimento de onda com máxima resposta	420	Nm
Número de multiplicadores de elétrons	10	-
Máxima tensão fornecida entre cátodo e ânodo	1500	Vdc
Sensibilidade de radiação do cátodo a 25°C, 420 nm	80	MA/W
Tempo de trânsito dos elétrons a 25°C	90	ns
Ganho típico a 25°C	5E5	-

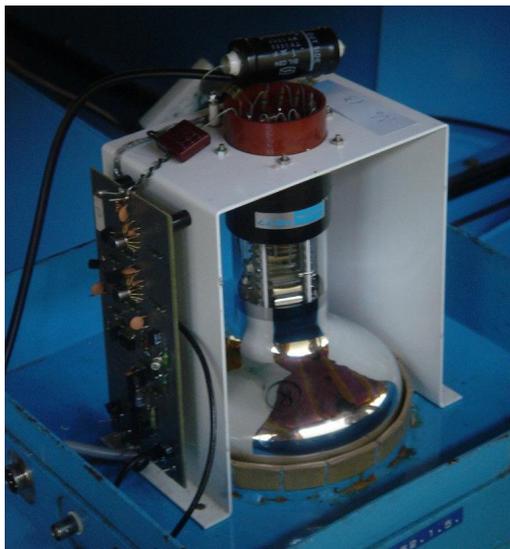


Figura 4.6 - Foto da fotomultiplicadora utilizada no detector de raios cósmicos – muons.

Dentre os diversos dispositivos fotossensíveis disponíveis no mercado, as fotomultiplicadoras, são dispositivos versáteis com resposta extremamente rápida e altíssima sensibilidade. As fotomultiplicadoras, ou células fotoelétricas, são tubos de vidro de vácuo. Dentro deste tubo existe um foto-cátodo (negativo) recoberto por material que absorve a luz e emite elétrons, que são acelerados em direção a um ânodo (positivo). Estes elétrons se chocam com dinodos que estão progressivamente a potenciais mais altos, e em cada um destes um elétron desloca 3 a 4 novos elétrons, que são acelerados até o próximo dinodo. Desta maneira, após 10 estágios, os elétrons foram multiplicados por um fator de $4^{10}=10^6$. Assim, a luz incidente produz uma corrente que pode ser medida eletronicamente. O fator de amplificação é extremamente sensível às mudanças na tensão (cerca de 1kV), que precisa ser altamente estabilizada. Por isso é controlada por potenciômetro, visto na seção anterior. Ao aumentar a tensão na fotomultiplicadora, conseqüentemente a contagem de partículas aumenta consideravelmente. Portanto a partir de tensões bem ajustadas é possível “ver” a modulação de raios cósmicos.

Em razão da emissão-secundária de multiplicação, as PMTs possibilitam sensibilidades extremamente altas e ruído extremamente baixo, se comparado a outros dispositivos fotosensíveis usados atualmente para detectar energia radiante na faixa de ultravioleta, visível e próxima ao infravermelho. As fotomultiplicadoras permitem resposta rápida no tempo e vasta disponibilidade de áreas fotossensíveis.

O fotocátodo é uma superfície fotoemissiva que consiste usualmente de metais alcalinos com baixa função trabalho. Dentre os diversos materiais utilizados, pode-se

citar: liga prata-oxigênio-césio (Ag-O-Cs), liga gálio-arsênio (Ga-As), liga Antimônio-Césio (Sb-Cs). Para se realizar contagem por cintilação, como é o caso do detector cintilador de muons, costuma-se utilizar material bialcalino formado pelas ligas Antimônio-Rubídio-Césio (Sb-Rb-Cs) e Antimônio-Potássio-Césio (Sb-K-Cs). Sua resposta está na faixa visível e ultravioleta.

Fotoelétrons emitidos pelo fotocátodo são acelerados por um campo elétrico de forma a colidirem com o primeiro dinodo e produzirem emissão secundária de elétrons. Estes elétrons secundários alcançam o próximo dinodo e produzirem uma emissão secundária de elétrons. Repetindo esse processo sobre sucessivos estágios de dinodos obtém-se elevada amplificação de corrente. Dessa forma, uma pequena corrente fotoelétrica do fotocátodo pode produzir uma alta corrente de saída no ânodo do tubo fotomultiplicador.

Ganho (Amplificação de corrente) é simplesmente a relação entre a corrente de saída do ânodo e a corrente fotoelétrica do fotocátodo. De um modo ideal, o ganho de uma fotomultiplicadora com n dinodos é uma taxa de emissão secundária δ por estágio é δ^n . A taxa de emissão secundária de elétrons é dada por $\delta = A \cdot E^\alpha$ onde A é uma constante, E é a tensão entre dois estágios consecutivos de multiplicadores de elétrons e α é um coeficiente determinado pelo material e pela geometria do dinodo. Em geral α está entre 0,7 e 0,8.

Quando uma tensão V é aplicada entre o cátodo e o ânodo de uma fotomultiplicadora possuindo n estágios de dinodo, o ganho μ é dado por:

$$\mu = \delta^n = (A \cdot E^n) = \left\{ A \cdot \left(\frac{V}{n+1} \right)^\alpha \right\}^n = \frac{A^n}{(n+1)^{\alpha n}} \cdot V^{\alpha n} K \cdot V^{\alpha n}$$

onde K é uma contante.

Visto que fotomultiplicadoras geralmente possuem entre 9 e 12 dinodos, a saída do ânodo é diretamente proporcional a nona até a décima potência da tensão de alimentação. Isso mostra que uma fotomultiplicadora é extremamente susceptível a flutuações na fonte de tensão. Dessa forma, a fonte de tensão deve ser extremamente estável e prover o mínimo de *ripple* e coeficiente de temperatura.

Uma pequena quantidade de corrente circula em uma fotomultiplicadora mesmo quando é operada em completo estado de escuro. Esta corrente de saída é chamada **corrente “de escuro” do ânodo** e se trata de fator crítico na determinação do limite inferior de determinação de luz.

A corrente “de escuro” originária de emissões termiônicas pode ser reduzida ao se reduzir a temperatura ambiente de um tubo fotomultiplicador. A sensibilidade de um tubo fotomultiplicador também varia com a temperatura, mas estas alterações são menores que os efeitos da temperatura na corrente “de escuro”, dessa forma, resfriar uma fotomultiplicadora irá aumentar significativamente sua razão sinal-ruído.

Em razão destes fatores a sala onde se encontra o detector de muons tem sua temperatura mantida aproximadamente constante em 20° através de aparelhos de ar condicionado.

4.0 – Rede Mundial de Detectores de Muons GMDN (Ground Muons Detector Network)

Munakata e colaboradores analisaram os raios cósmicos precursores de tempestades geomagnéticas registrados por uma rede de detectores de muons de superfície terrestre em Nagoya (Japão), Hobart (Austrália) e Mawson-PC (Antártida) (Figura 4.7). O número total de detectores direcionais em uso neste artigo (Munakata et al, 2000) é 30 para o período posterior à 1992, início da operação de Hobart, e 17 para o período anterior, todos de Nagoya. A rigidez média (P_m) dos raios cósmicos primários registrados varia de 56 a 119 GV e o erro estatístico de contagem horária é estimado estar entre 0.06% e 0.32%. Os símbolos (quadrados, triângulos e losangos) na Figura 4.8 mostram a direção de visão assintótica para uma partícula incidente para cada detector direcional com rigidez P_m como determinado por um código de trajetória da partícula (Lin et al., 1995). As linhas que atravessam os símbolos representam as extensões de direção de vista para rigidez de partículas entre P_1 e P_2 que concentram 80% da energia central de resposta de cada detector. Para diferentes detectores, P_1 varia entre 16 e 38 GV, enquanto P_2 varia de 356 a 890 GV.

A rede internacional de detectores de muons apresentava uma falha sobre o Atlântico e a Europa, mostrado na Figura 4.8, que também mostra a posterior cobertura após a expansão da rede de Detectores com a instalação de um detector protótipo em São Martinho da Serra (Figura 4.9 – Bolinhas abertas).

Munakata e co-autores sugerem que a rede de detectores de muons pode ser uma boa ferramenta para a previsão do clima espacial. Detectores a serem instalados para preencher a lacuna foram urgentemente requeridos para o melhor entendimento dos precursores e para previsão do Clima Espacial. Conforme afirma Munakata em seu

artigo em 2000, um único detector multidirecional estrategicamente situado no sul do Brasil permitirá grande aumento a cobertura do céu pela rede de detectores de muons (Munakata et al., 2000).

Telescope Name	Hourly Count, 10 ⁴ eph	Count Error %	P_{es} , GV
Nagoya (35.1°N, 137.0°E)			
V	276	0.06	60
N	125	0.09	66
S	123	0.09	64
E	120	0.09	67
W	126	0.09	63
NE	58	0.13	73
NW	62	0.13	68
SE	58	0.13	71
SW	60	0.13	67
N2	61	0.13	87
S2	59	0.13	85
E2	58	0.13	91
W2	61	0.13	84
N3	17	0.24	112
S3	17	0.24	111
E3	17	0.24	119
W3	18	0.24	110
Hobart (42.9°S, 147.4°E)			
V	77	0.11	56
N	27	0.19	62
S	28	0.19	62
E	27	0.19	62
W	27	0.19	62
NE	11	0.30	67
NW	10	0.32	67
SE	11	0.30	67
SW	11	0.30	67
Mawson-PC (67.6°S, 62.9°E) ^b			
NL	27	0.19	72
NH	18	0.24	106
SL	27	0.19	72
SH	18	0.24	106

Figura 4.7 - Tabela com principais informações dos detectores respectivamente Nagoya, Hobart e NAWSON-PC. FONTE: Munakata et al, 2000.

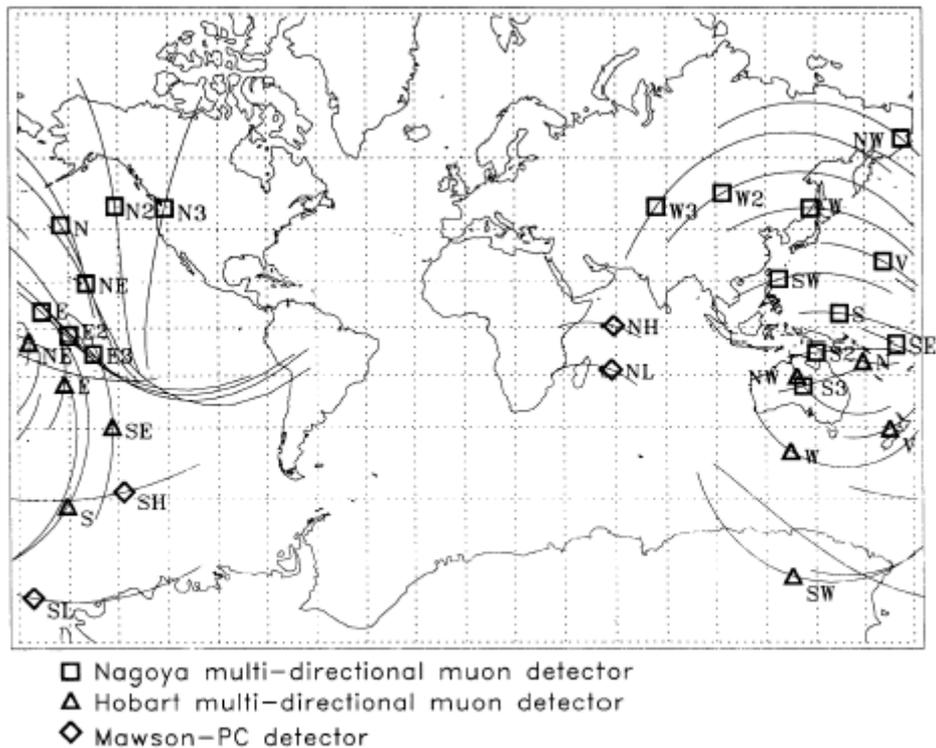


Figura 4.8 – Antiga falha existente na região do Atlântico e Europa. Fonte: Munakata et al, 2000.

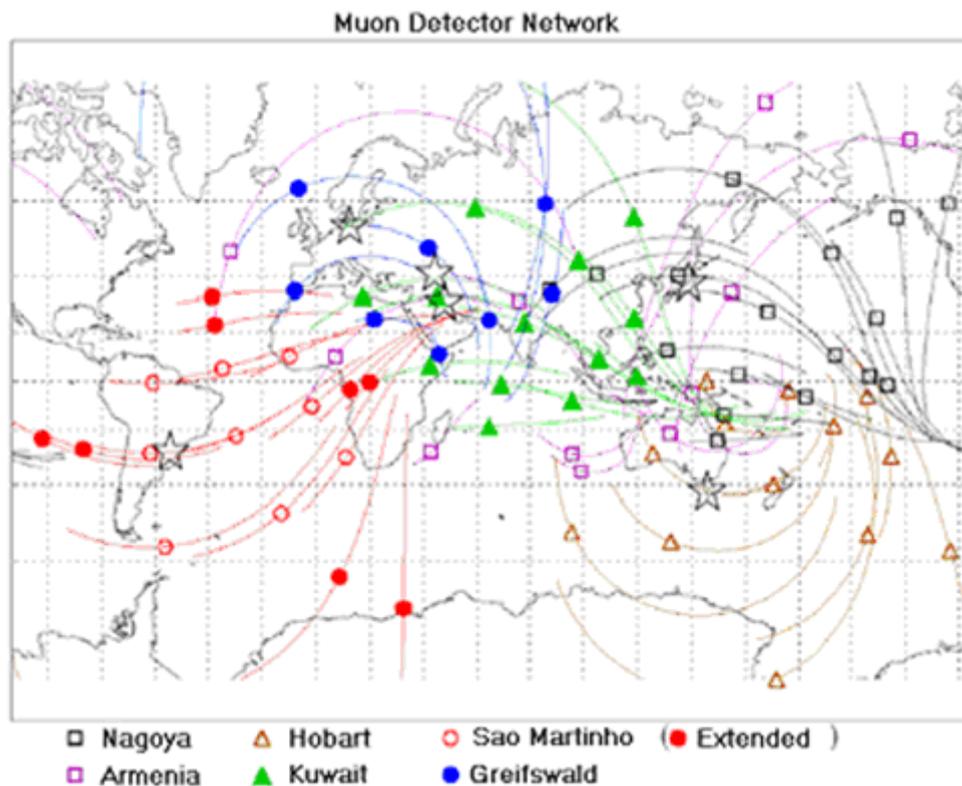


Figura 4.9 - Atual rede de detectores e as diferenças direcionais entre o detector protótipo e expandido. Bolinha aberta representa as direções do protótipo e bolinhas fechadas representam as direções do expandido.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E ANÁLISE DE DADOS DO DETECTOR PROTÓTIPO E DO DETECTOR EXTENDIDO.

Os dados estudados foram organizados em gráficos e tabelas de forma a permitir identificação de estruturas interplanetárias geofetivas na ocorrência de tempestade geomagnética em resposta com decréscimo na contagem de muons. Os gráficos e programas foram desenvolvidos com auxílio de programação em IDL (*Interactive Data Language*).

Foram usados dados do detector de muons protótipo e expandido. Também foram obtidos dados do satélite ACE localizado no ponto lagrangeano L1. Dados do Índice Dst foram retirado do site <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/>,com. A variação de contagens de muons Δ é representada em forma de porcentagem para cada detector: $\Delta(\%) = \left[\frac{X - Y}{Y} \right] \times 100$ onde X é a contagem em análise e Y é a média de contagens para um período de tempo muito maior do que a duração da tempestade geomagnética.

1.0 – Análise de dados para o Detector protótipo

Por motivo de ser um evento de grande perturbação escolheu-se para o relatório a tempestade geomagnética ocorrida entre os dias 11 a 13 em abril de 2001. De acordo com critérios de Gonzalez et al. (1994) para o índice Dst a tempestade é intensa. O Dst chega a -340 nT. Pode-se notar que a estrutura é identificada pelo satélite ACE no qual repentinamente ocorrem grandes saltos perturbados nos parâmetros como temperatura, velocidade do vento solar, número de partículas e intensidade do campo magnético. Minutos depois a estrutura chega a Terra causando tempestade geomagnética intensa. Acompanhado com o decréscimo de Dst, a componente vertical do detector registra um decréscimo de aproximadamente 2%. Por mais que detectores de nêutrons consigam ver maiores decréscimos, o objetivo do detector de muons é registrar a modulação de raios cósmicos de alta energia ~50GeV que são oriundos de fora do sistema solar Também sabendo a direção dos muons, é possível fazer uma estimativa da configuração da estrutura. A anisotropia da intensidade de raios cósmicos, ou seja, a perturbação do meio interplanetário indica uma assimetria do fluxo de raios cósmicos, pode fornecer

algum método para fazer previsão de tempestades, como o cone de perdas. Mas este é um método mais complicado que necessita de dados de todos os detectores da rede mundial dispostos na superfície da Terra. A Figura 5.1 mostra dados do satélite ACE correlacionados com parâmetros do meio interplanetário com o índice Dst e a componente vertical do Detector protótipo.

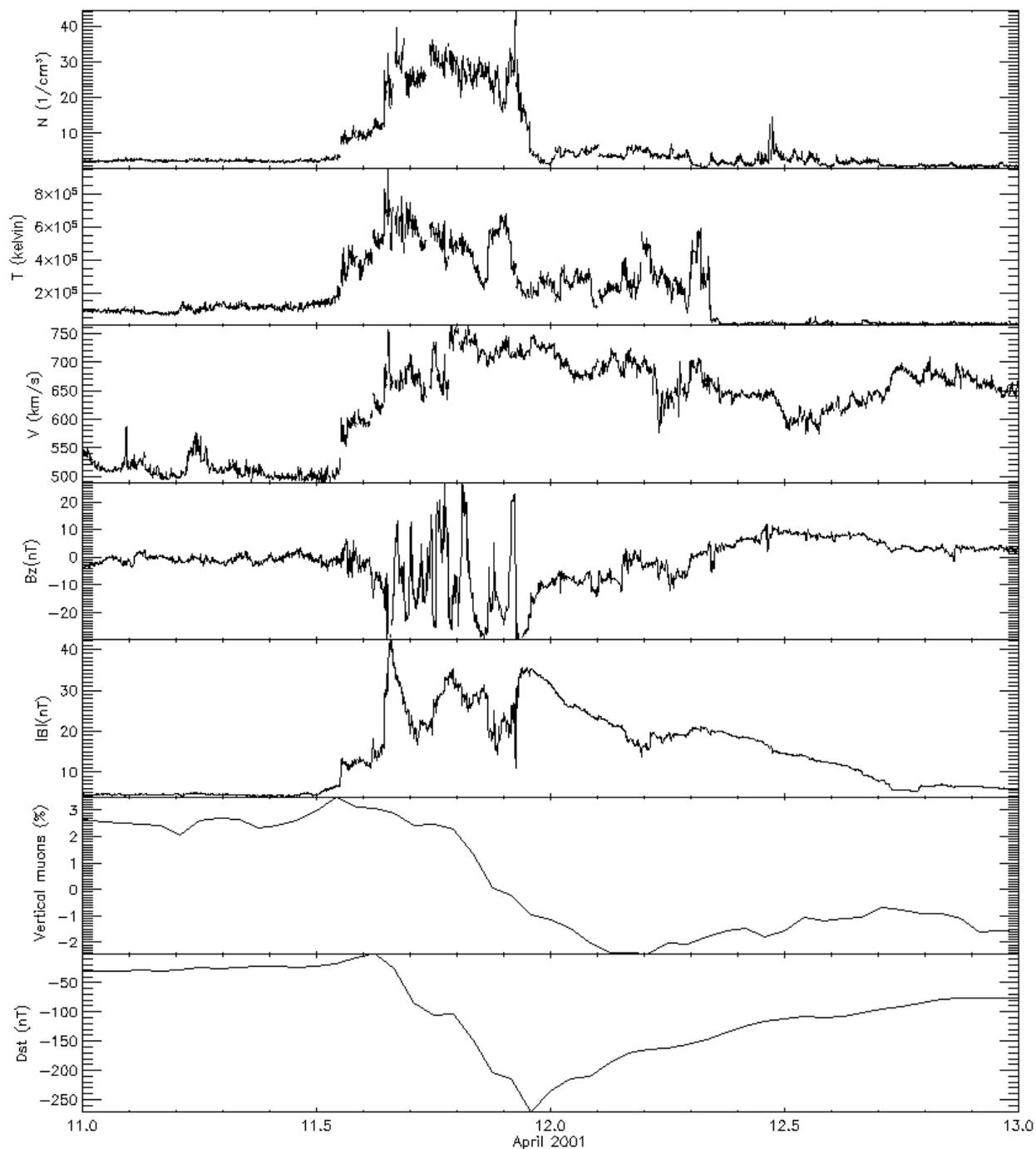


Figura 5.1 – Aumento nos parâmetros indicam a chegada da frente de choque primeiro no satélite ACE, minutos depois o Índice Dst e muons.

O protótipo tinha nove direções ou canais. A Figura 5.2 apresenta os gráficos das direções: vertical, norte, sul leste e oeste. A componente vertical aparece novamente para comparação.

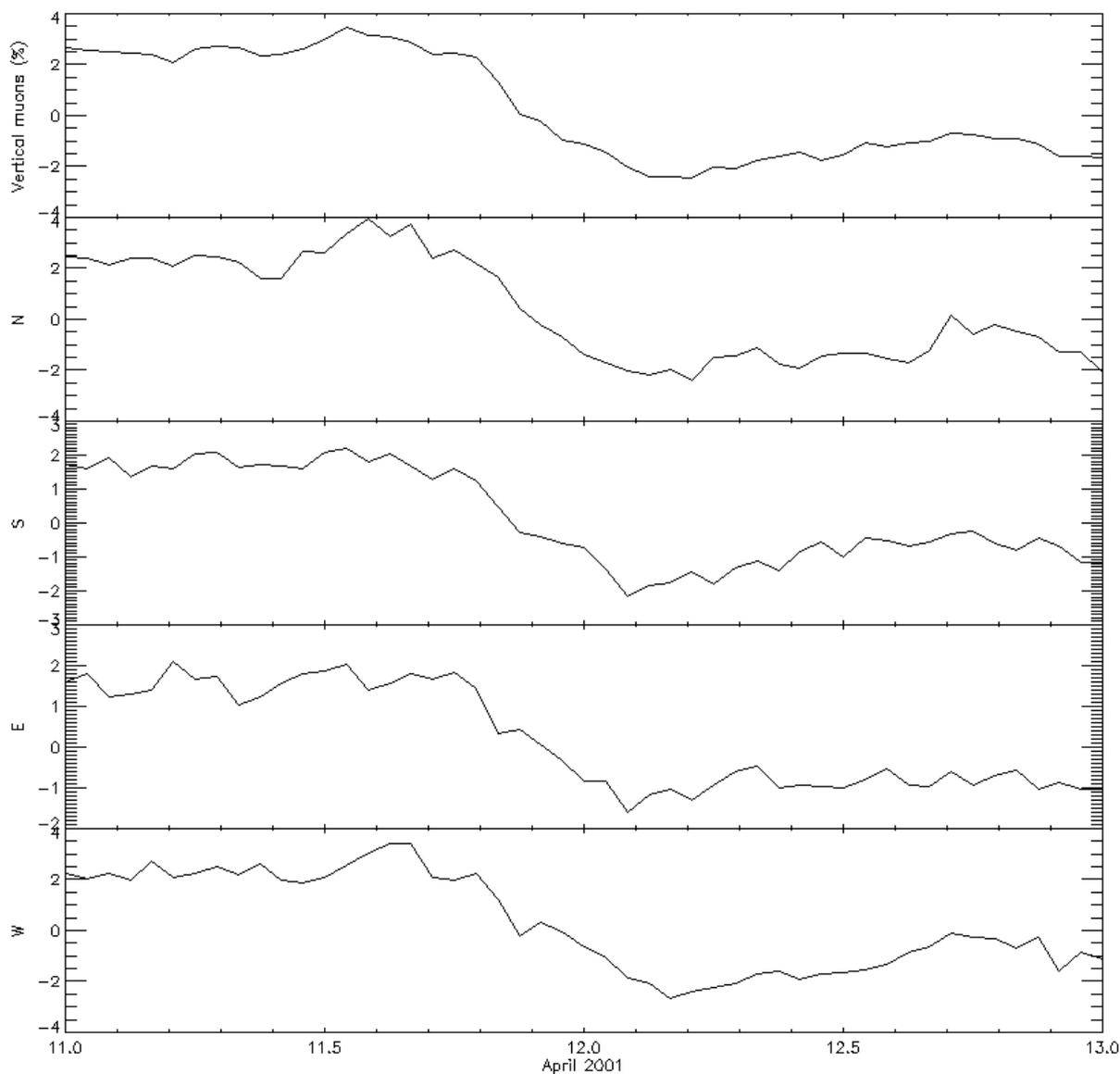


Figura 5.2 – Gráficos das componentes V, N, S, E e W.

As outras direções são nordeste, noroeste, sudeste e sudoeste. Pode-se ver claramente o decréscimo de muons (Decréscimo de Forbush). A Tabela 5.1 apresenta os erros na contagem horária de muons. Estes valores correspondem aos dados do dia 11 de abril de 2001, às 4h da manhã antes da tempestade que caracteriza um fluxo de muons isotrópico. A resolução temporal é de uma hora permitindo um erro na contagem de 0.16%. Pequeno comparado com o decréscimo de 2 % em tempestades geomagnéticas. A última coluna representa a rigidez na intensidade de muons em São

Martinho da Serra, que é a energia mínima para que o raio cósmico deva ter para ser considerada muon na direção indicada.

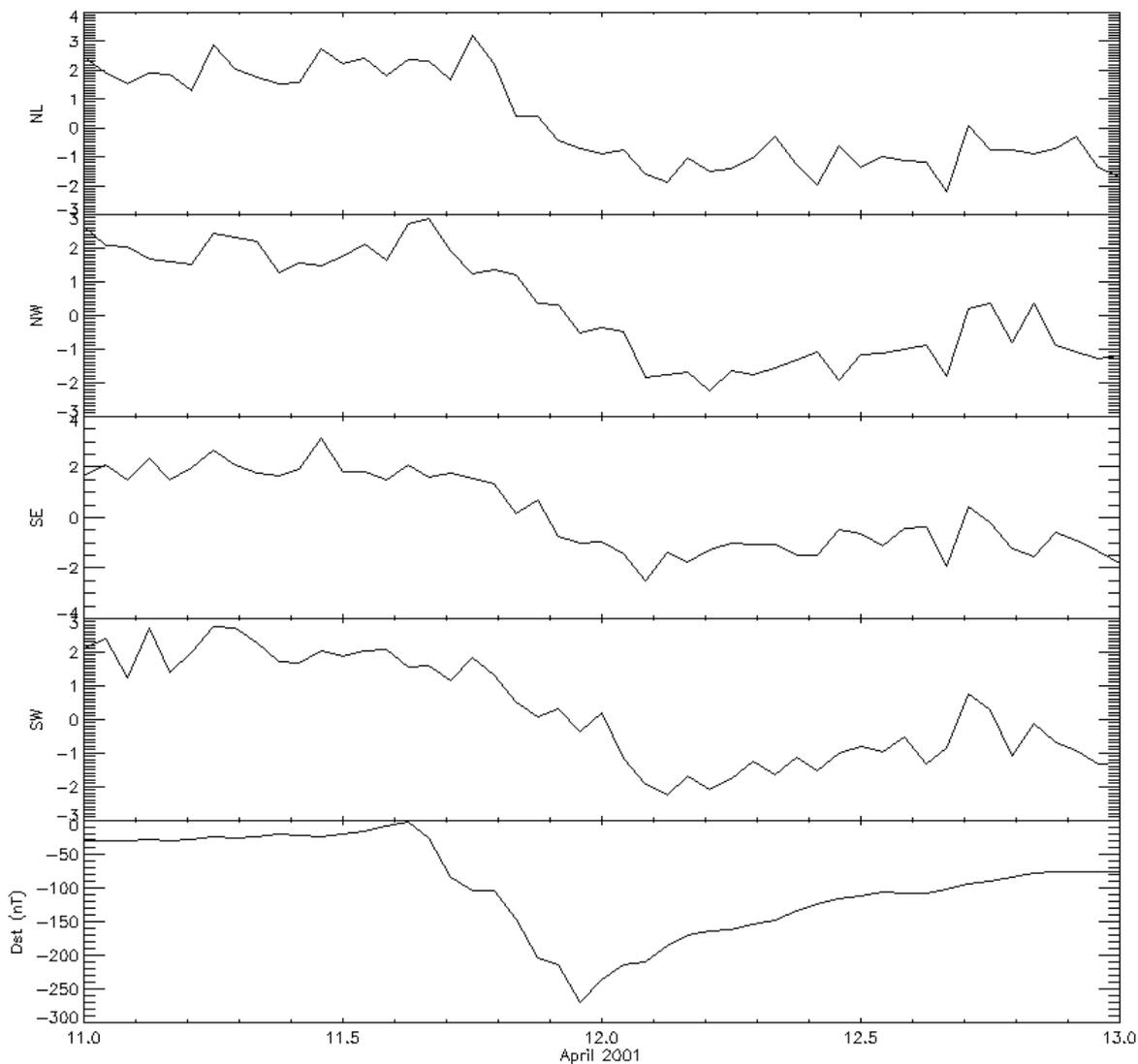


Figura 5.3 – Outras direções comparadas com o índice Dst.

A Figura 5.3 apresenta gráficos do detector protótipo para as direções Noroeste, Nordeste, Sudeste e Sudoeste e índice Dst (nT) todos com decréscimos. Com resolução temporal de 10 minutos a quantidade de dados fornece erro significativo quando mostrado na Tabela 5.1 abaixo.

Tabela 5.1 - Alguns resultados para dados do Detector protótipo.

Directional Telescope	Number of Telescope	Hourly Counting (factor 10^4)	Count Error(%)	P_m (GV)
Vertical (V)	U1-L1 U2-L2 U3-L3 U4-L4	39.4	0.16	53
30° North (N)	U1-L3 U2-L4	11.3	0.30	58
30° South (S)	U4-L2 U3-L1	11.4	0.30	57
30° East (E)	U2-L1 U4-L3	11.0	0.30	59
30° West (W)	U1-L2 U3-L4	11.5	0.30	56
39° Northeast (NE)	U2-U3	4.7	0.46	64
39° Northwest (NW)	U1-U4	5.4	0.43	61
39° Southeast (SE)	U4-L1	5.3	0.43	63
39° SouthWest (SW)	U3-L2	5.5	0.43	60

Como o protótipo foi expandido em 2005, os eventos a serem analisados são limitados. O que se deve fazer é continuar análises de dados do protótipo expandido.

2.0 – Análise de dados do Detector Extendido

Os recursos do detector expandido tem vantagens sobre o protótipo no numero de direções e resolução temporal. Enquanto o protótipo apresentava 9 direções o detector expandido apresenta 13. Além de fornecer dados de resolução temporal de um minuto tem-se armazenado dados com resolução de 10 minutos.

Outra vantagem é que a expansão preencheu a falha existente na Figura 4.10 (Bolinhas Fechadas). Abaixo a Figura 5.4 compara alguns parâmetros do meio interplanetário com dados de índice Dst e a componente vertical do detector. A tempestade ocorreu em dezembro de 2006, entre os dias 14 e 16.

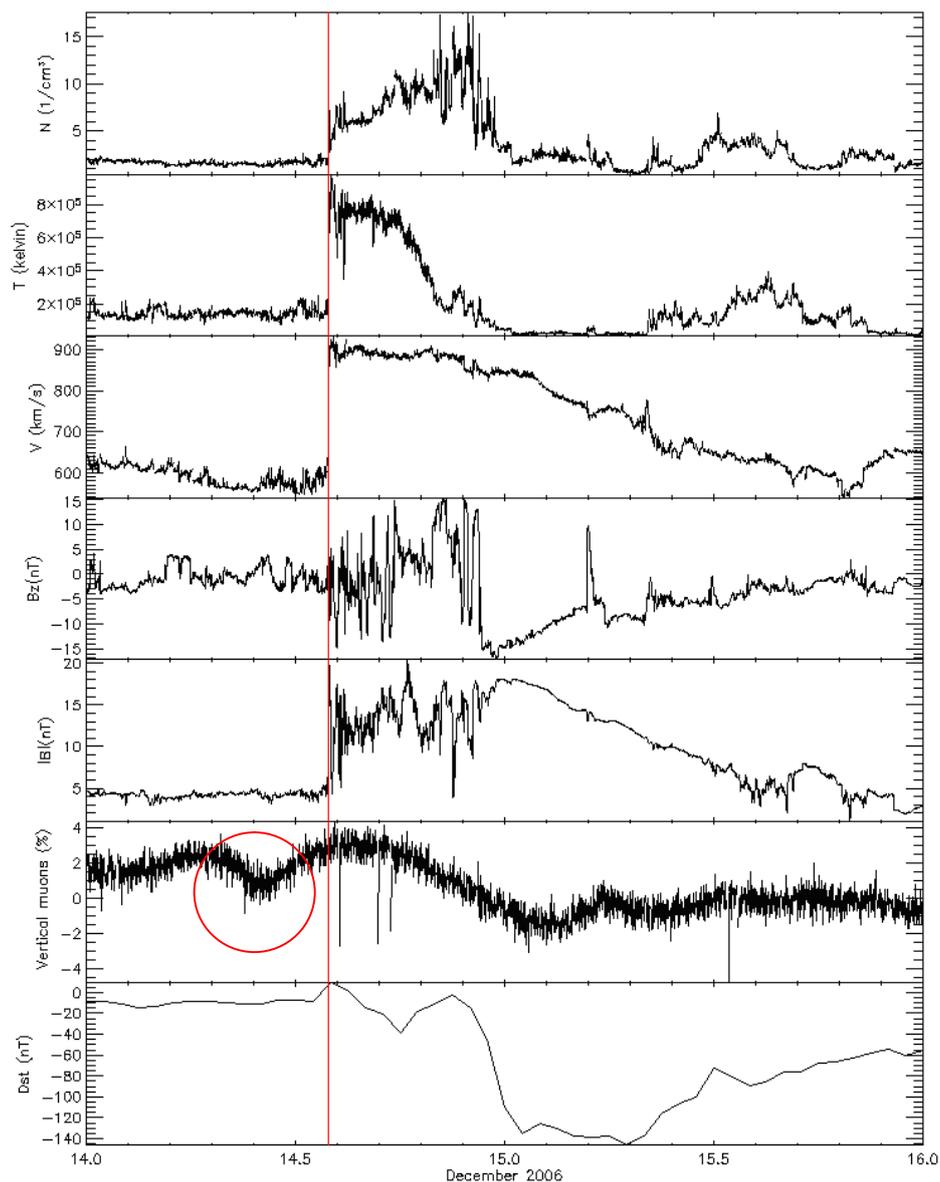


Figura 5.4 - Tempestade intensa ocorrida em dezembro de 2006. Precursor é indicado no círculo vermelho.

Nota-se que a anisotropia da intensidade de muons é identificada mais facilmente. Antes do choque visto pelo satélite ACE da NASA é possível ver o precursor de tempestades geomagnéticas grifado pelo círculo vermelho e a linha vermelha representa o choque. O decréscimo de Forbush decai aproximadamente junto com Dst.

Erros de contagens são menores quando comparados ao detector protótipo. Isto pode ser visto na Tabela 5.2. Todos os erros na contagem das direções foram feitos para o mesmo período do dia 13 de dezembro de 2006.

Tabela 5.2 - Alguns resultados para dados do Detector Expandido.

Directional Telescope	Number of Telescope	Hourly Counting (factor 10^6)	Count Error(%)
Vertical (V)	28	2.30	0.06
30° North (N)	21	0.95	0.10
30° South (S)	21	0.98	0.10
30° East (E)	24	1.05	0.10
30° West (W)	24	1.16	0.09
39° Northeast (NE)	18	0.47	0.14
39° Northwest (NW)	18	0.51	0.14
39° Southeast (SE)	18	0.49	0.14
39° SouthWest (SW)	18	0.52	0.14
49° North (N2)	14	0.33	0.17
49° South (S2)	14	0.32	0.18
49° East (E2)	20	0.47	0.14
49° West (W2)	20	0.43	0.15

Foram analisados dados de duas tempestades ocorridas em novembro de 2004. Como mostra a Figura 5.5, a primeira tempestade é intensa, o índice Dst cai para -373nT. As linhas vermelhas representam os choques. A queda na intensidade de muons fica na faixa de ~1.6%.

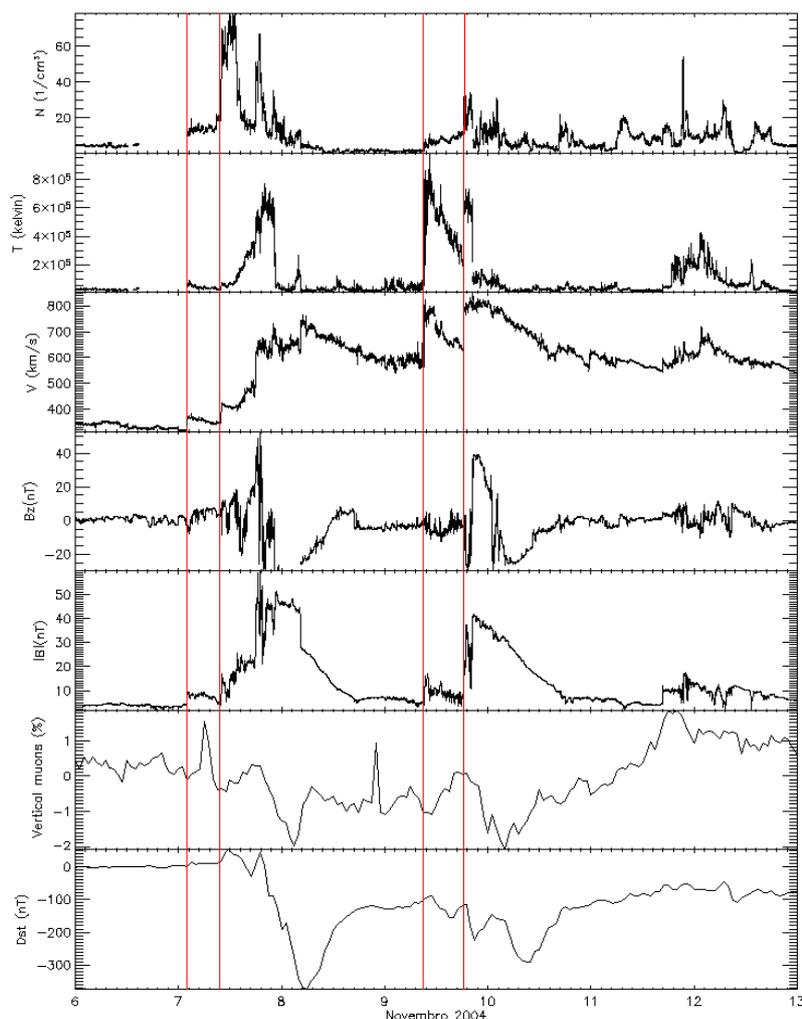


Figura 5.5 - Índice Dst, muons telescópio protótipo e dados do Satélite ACE correlacionados.

Como estamos em período de mínimo o que se deve observar é que apenas tempestades recorrentes. Decréscimos quanto à CIRs não são perceptíveis quando analisados de maneira preliminar.

Recebemos a visita do Professor Doutor Dr. Kazuoki Munakata do departamento da física da Universidade de Shinshu – Japão, sendo uns dos principais colaboradores do projeto. Junto com ele o doutorando em geofísica espacial Marlos Rockenbach da Silva substituíram os potenciômetros que regulam a tensão de contagem de muons no Observatório Espacial do Sul OES/CRS/INPE – MCT.

Os erros das contagens para o período de um dia, 08 de outubro de 2008, antes da substituição estão mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Erros na contagem de para o dia 08 de outubro de 2008.

Directional Telescope	Number of Telescope	Hourly Counting (factor 10^6)	Count Error(%)
Vertical (V)	28	2.50	0.06
30° North (N)	21	1.01	0.10
30° South (S)	21	1.04	0.10
30° East (E)	24	1.16	0.10
30° West (W)	24	1.18	0.09
39° Northeast (NE)	18	0.5	0.14
39° Northwest (NW)	18	0.51	0.14
39° Southeast (SE)	18	0.52	0.14
39° SouthWest (SW)	18	0.52	0.14
49° North (N2)	14	0.33	0.17
49° South (S2)	14	0.35	0.17
49° East (E2)	20	0.45	0.15
49° West (W2)	20	0.46	0.15

Pode-se perceber que o erro não varia muito se comparado com a Tabela 5.2 para o período de 2006. Apresenta-se abaixo o erro para dados de 07 de janeiro de 2009.

Tabela 5.4 - Análise de erros para o dia 7 de janeiro de 2009.

Directional Telescope	Number of Telescope	Hourly Counting (factor 10^6)	Count Error(%)
Vertical (V)	28	2.70	0.06
30° North (N)	21	1.07	0.97
30° South (S)	21	1.11	0.95
30° East (E)	24	1.24	0.09
30° West (W)	24	1.25	0.09
39° Northeast (NE)	18	0.54	0.14
39° Northwest (NW)	18	0.55	0.13
39° Southeast (SE)	18	0.56	0.13
39° SouthWest (SW)	18	0.56	0.13
49° North (N2)	14	0.36	0.17
49° South (S2)	14	0.38	0.16
49° East (E2)	20	0.48	0.14
49° West (W2)	20	0.49	0.14

Logo após a substituição houve erro de contagem no detector U30 (upper 30) nos 13 e 14 dias de maio de 2009. A contagem deste detector está na Figura 5.6 comparada com U31. O procedimento para estes casos é aumentar a tensão do potenciômetro referente ao U30 ou trocar por um potenciômetro reserva e, caso o problema não seja resolvido, deve-se verificar os cabos e a fotomultiplicadora o que pode ser mais complicado de fazer. Em todo caso a simples troca por um potenciômetro reserva resolveu o problema.

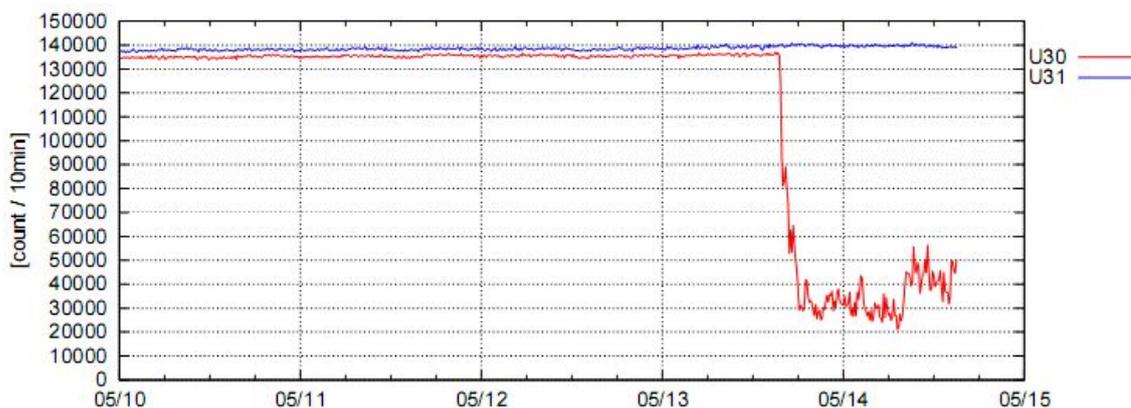


Figura 5.6 - Erro de contagem do U30. U31 foi usado para comparação.

Deve-se verificar diariamente pelo programa de acesso remoto *pcAnywhere* a rede e a contagem de intensidade de muons no OES/CRS/INPE – MCT. A Figura 5.7 mostra o *display* do programa de acesso da contagem.

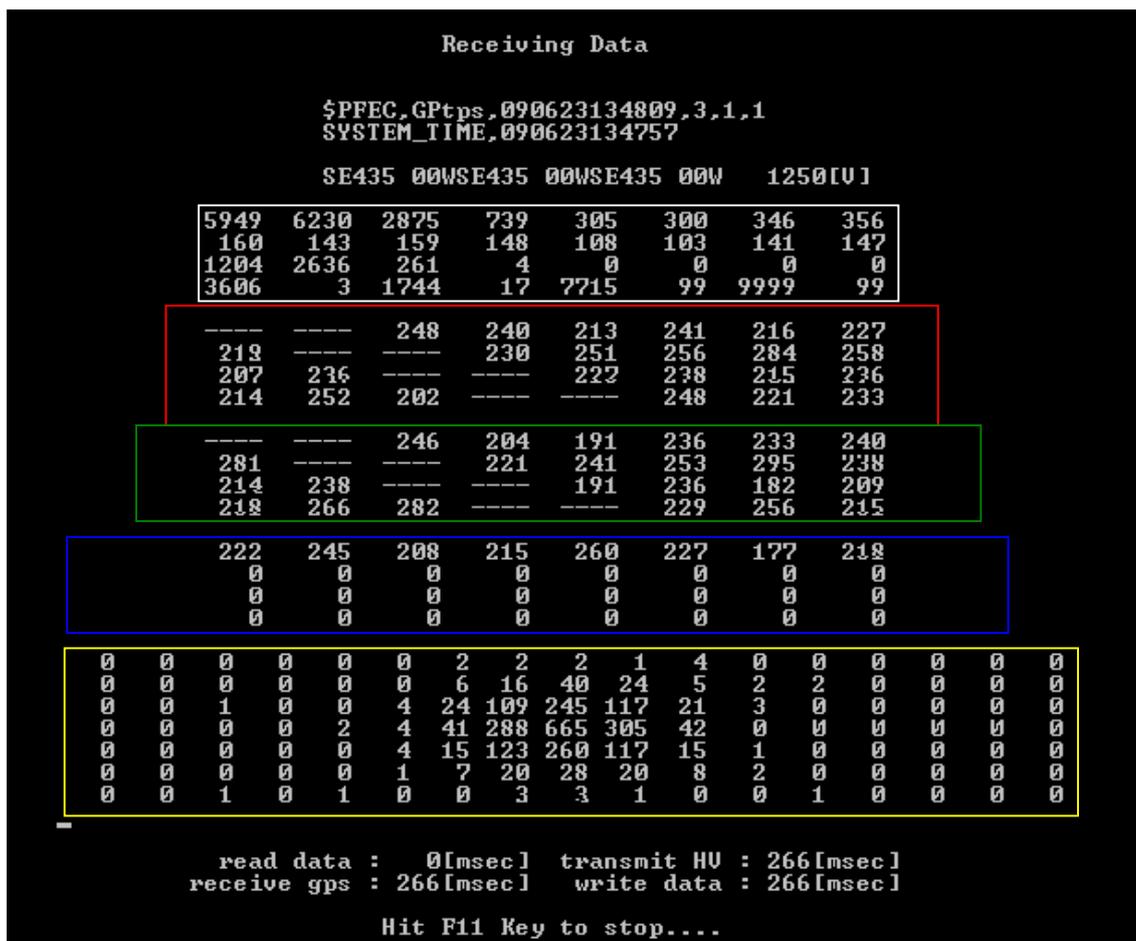


Figura 5.7 - Display de verificação da contagem de muons.

A região do quadro branco na Figura 5.7 contém contagens dos componentes direcionais e alguns parâmetros relativos ao sistema. A Tabela 5.5 abaixo mostra o que cada número da região do quadro branco significa. A legenda dos números da Tabela 5.5 estão na Tabela 5.6.

Tabela 5.5 – Quadro branco

0	1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30	31

Tabela 5.6 - Legenda dos números da Tabela 5.5

Legenda	Sigla	Descrição
0	UT	Contagem total da camada superior
1	LT	Contagem total da camada inferior
2	WT	Contagem Total
3	V	Componente Vertical
4	N	Componente Norte
5	S	Componente Sul
6	E	Componente Leste
7	W	Componente Oeste
8	NE	Componente Nordeste
9	NW	Componente Noroeste
10	SE	Componente Sudeste
11	SW	Componente Sudoeste
12	NN	Componente Norte
13	SS	Componente Sul
14	EE	Componente Leste
15	WW	Componente Oeste
16	HV	Tensão Fornecida a PMT
17	BSY	Busy event (sistema novo de correção)
18	REJ	Rejent event (sistema novo de correlação)
19	ERR	Error event (sistema novo de corrlação)
20	-	Não utilizado
21	-	Não utilizado
22	-	Não utilizado
23	-	Não utilizado
24	P_I	Pressão atmosférica
25	P_h	Pressão atmosférica
26	T_I	Temperatura
27	T_h	Temperatura
28	G-Mhz_I	Não utilizado
29	G-Mhz_h	Não utilizado
30	Mhz_I	Não utilizado
31	MHz_h	Não utilizado

Os quadros **vermelho** e **verde** mostram as contagem individuais de detectores da camada superior e inferior respectivamente. O numero de detector referente a cada campo é dão na Tabela 5.7. Os campos com “*” não são utilizados, pois não há detectores para estes compôs. Os números correspondem aos números de detectores, por exemplo, U1, U2, ..., e L1, L2,

Tabela 5.7 - Legenda para os quadros vermelho e verde da Figura 5.7.

1*	2*	3	4	5	6	7	8
9	10*	11*	12	13	14	15	16
17	18*	19*	20	21	22	23	24
25	26	27*	28*	29	30	31	32

O quadro **azul** mostra a contagem dos quatro detectores da camada superior e inferior que não foram mencionados na Tabela 5.7 como mostra a Tabela 5.8. Utiliza-se somente a primeira linha.

Tabela 5.8 - Significado dos números da Figura 5.7.

U32	U33	U34	U35	L32	L33	L34	L35
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

A região em **amarelo** na Figura 5.7 mostra a contagem das 119 possíveis direções do detector expandido, como mostra a Tabela 5.10.

N

Tabela 5.9 - Possíveis direções do detector expandido.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68
69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102
103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119

W

E

S

Numero 60: Contagem Vertical, Num. 43: Contagem Norte, Num. 61: Contagem Leste, Num. 77: Contagem Sul, Num. 59: Contagem Oeste, Num. 44: Contagem NE, Num. 78 SE, etc

Num. 26: NN, Num 62: EE, etc. Num. 9: 3N, Num.63: 3E etc.

Além do problema com o detector U30, que foi sanado com um potenciômetro reserva, está sendo observado ruído pelo detector L24 (Figura 5.8). Pode ser que a fotomultiplicadora esteja defeituosa. Mas como o detector L24 afeta as direções Sul 2 Leste 2 e Oeste 2 o ruído de contagem do L24 não influencia as direções principais (Figura 5.9).

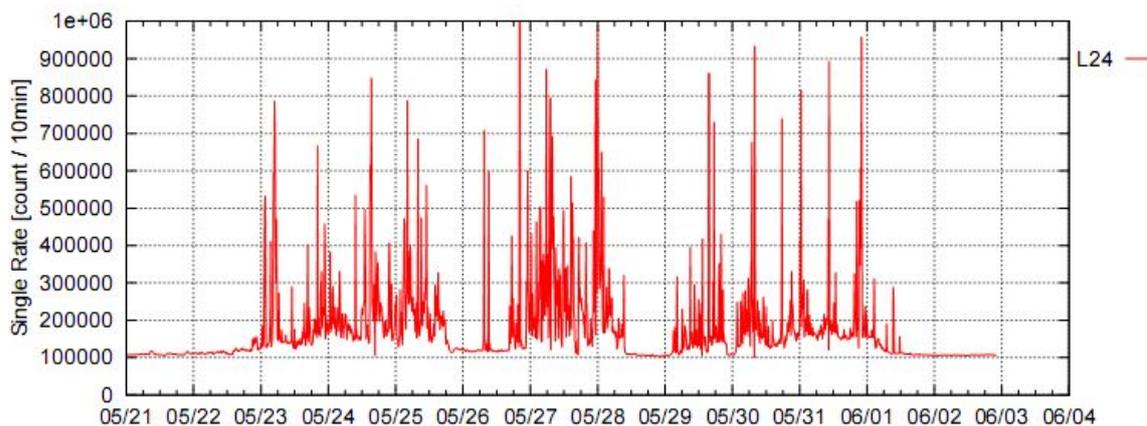


Figura 5.8 - Gráfico do ruído na contagem detector L24.

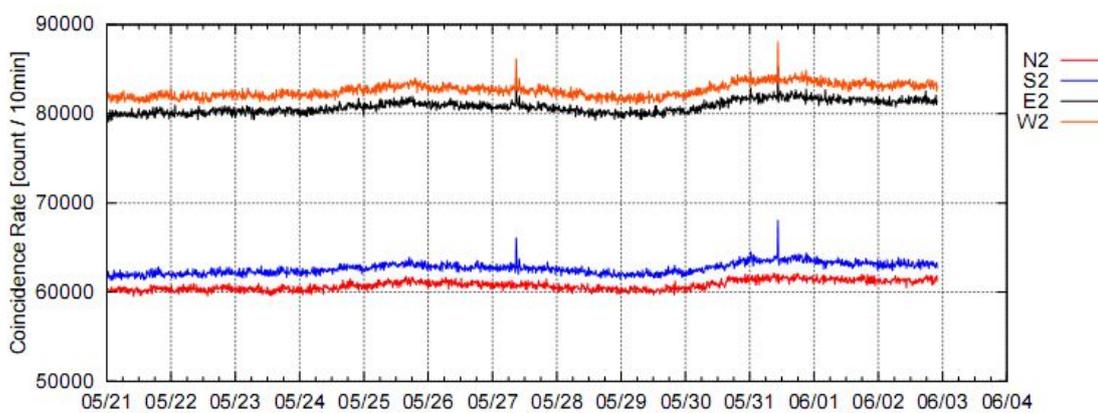


Figura 5.9 – Gráficos da contagem das Componentes N2, S2 E2 e W2.

Os gráficos de checagem de contagem também podem ser vistos pelo site: <http://www.bartol.udel.edu/~takao/saomartinho/single.html> que dá a contagem anual desde 2006.

Os gráficos de checagem de contagem para os ultimo mês pode ser visto pelo site: <http://www.bartol.udel.edu/~takao/saomartinho/singlemonth.html>

Capítulo 6 – Conclusões

No Relatório o Bolsista demonstra as atividades desenvolvidas no Projeto **“AMPLIAÇÃO DO PROTÓTIPO DE TELESCÓPIO MULTIDIRECIONAL DE RAIOS CÓSMICOS DE ALTA ENERGIA – MUONS: PARTICIPAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO TÉCNICO E DE ENGENHARIA, E ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS.”**, que foi desenvolvido no período de Agosto de 2008 a Julho de 2009, no Laboratório de Clima Espacial do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – LCETM/CRS/INPE – MCT, em Santa Maria, RS.

Revisando o que foi visto no Relatório, no primeiro capítulo apresentou-se o que é clima espacial e os objetivos do Projeto de Pesquisa. Os danos nos sistemas tecnológicos, clima e ambiente (dois últimos assuntos polêmicos) são diretamente influenciados pela variabilidade solar de 11 anos. Viu-se que a maior perda de dados em satélites se dá na região do AMAS - Anomalia Magnética do Atlântico Sul, por causa da maior precipitação de partículas energética emitidas pelos processos mais energéticos solar, ejeções de massa coronais e *“flares”* (ou explosões solares).

No segundo capítulo o foque foi dado aos conhecimentos fenomenológicos do sol e modelos teóricos que nos auxiliam a construir um conhecimento sobre a interação Sol-Terra. Quando CMEs atingem a Terra causam perturbação geomagnética fazendo com que o índice Dst assuma valores negativos. Acredita-se que o processo responsável pelas tempestades é o de reconexão de campos. Estruturas que se propagam no meio interplanetário são chamadas de ICME e quando elas são acompanhadas por choques, isto é a velocidade da ICME é maior que a velocidade magnetossônica, a região do choque causa um decréscimo de raios cósmicos antes que o satélite ACE detecte a onda de choque. A vantagem de usar detectores de raios cósmicos secundários de alta energia muons sobre os monitores de nêutrons na superfície da Terra é que se pode ver com maior antecedência a região rarefeita de raios cósmicos ao qual é chamado efeito de cone de perdas. O estudo da polaridade do Sol é de fundamental importância para o entendimento da anisotropia dos raios cósmicos que são medidas na superfície da Terra, embora não tenha sido aprofundado o assunto neste relatório.

No capítulo quatro falou-se sobre o detector Protótipo de Raios Cósmicos de alta energia foi instalado em 2001 no Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/INPE – MCT (29.4°S, 53.8° W, 480 m acima do nível do mar), em São Martinho da Serra,

Brasil, RS. O Detector protótipo era formado por duas camadas de 4 detectores com resolução temporal de uma hora. O protótipo foi expandido em 2005 melhor integrando rede mundial de detectores de muons GMDN (*Grouns Muon Detector Network*). O detector expandido é formado por 56 detectores e resolução temporal de um minuto, reduzindo assim os erros na contagem horária como visto nas Tabelas 5.1; 5.2; 5.3; 5.4 e permitindo a observação de raios cósmicos de maior energia, pois foi aumentado o número de direções de observação de 9 para 13 com possível aumento de direções para 17, pois o sistema ainda não está completamente integrado mesmo funcionando apropriadamente. Foi descrito como os sistemas detectam as partículas e contam como muons. Este sistema, tanto para o protótipo como o expandido, correlaciona dois pulsos vindos de quaisquer combinações entre dois detectores. As partículas não são detectadas se a camada de chumbo entre quaisquer dois detectores blindar partículas de menor energia que aproximadamente 50 GeV ou se o ângulo de incidência da partícula for maior que 49°, para o protótipo, ou 75° para o expandido em relação à vertical.

No capítulo cinco foi descrito as análises de dados para eventos geofetivos para o protótipo que se escolheu o período de abril de 2001. A análise para este evento foi satisfatória para comparar com os dados do detector expandido como os erros e resolução temporal, além de comparar dados observados pelo satélite ACE e índice geomagnético. É observado decréscimo de Forbush na ocorrência da tempestade.

Dos eventos geofetivos observados pelo detector expandido o mais interessante é o de dezembro de 2006, pois mostra um precursor de tempestade antes do satélite ACE observar a onda de choque da estrutura. O detector expandido mostra resposta a tempestades geomagnéticas quando comparado com o índice Dst e dados observados pelo satélite ACE do meio interplanetário. Por estarmos em período de mínimo solar não foram observadas tempestades não-recorrentes (período 2007-2009). Assim, a ênfase no relatório foi dada à manutenção do detector de muons expandido. Ao analisar os dados de novembro de 2004, O detector direcional de muons (DDM) mostrou respostas a Tempestades Geomagnéticas.

Detectores de partículas de alta energia terrestres são ferramentas úteis para estudo de modulação de raios cósmicos, previsão de tempestades geomagnéticas intensas e tem resposta a tempestades geomagnéticas. Como mostra todos os dados analisados, o índice Dst cai quase que juntamente com a intensidade na contagem de muons.

Foi recebida em Dezembro do ano de 2008 a visita do Professor Dr. Kazuoki Munakata do Departamento de Física da Universidade de Shinshu – Japão, que junto ao pesquisador do INPE Dr. Alisson Dal Lago e ao doutorando em Geofísica Espacial Marlos Rockenbach da Silva substituíram os potenciômetros que regulam a tensão de contagem de muons. Foram analisados erros para os dias 08 de outubro de 2008 e dias 07 de Janeiro de 2009. Há uma leve correção nos valores de erros analisados.

Os alunos do Laboratório de Clima Espacial do CRS/INPE - MCT na ocasião interagiram técnica e cientificamente com o Professor K. Munakata e tiveram uma ótima oportunidade de exercitar longas conversações na língua inglesa. O aluno aprendeu a contornar problemas ocorridos no detector de raios cósmicos trocando e-mails com o Dr. Takao Kuwabara do *Bartol Research Institute* da Universidade de *Delaware* (BARTOL/UDEL), *Newark* (DE), USA.

Capítulo 7 – Referências

Aline de Lucas. **Estudo da Dinâmica da Corrente de Anel Durante a Fase Principal de Supertempestades Magnéticas**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, aprovada em 31 de maio de 2005.

Brant, J. **Introduction to the solar wind**. San Francisco (1970).

Burlaga, L. F.; Lepping, R. P.; Mish, W.; Ogilvie, K. W.; Szabo, A.; Lazarus, A. J.; Steinberg, J. T. **A magnetic cloud observed by Wind on October 18-20, 1995**. Washington, DC, NASA, GSFC, Feb. 1996.

Burlaga, L. F.; Sittler, E.; Mariani, F.; Schwenn, R. **Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios and IMP-8 observations**. J. Geophys. Res., v.86, n.A8, p.6673-6684, Aug. 1981.

Burlaga, L. F.; Behannon, K. W. **Magnetic clouds: voyager observations between 2 and 4 AU**. Solar Phys. v.81, p.181-185, 1982.

Burlaga, L. F.; Fitzenreiter, R.; Lepping, R.; Ogilvie, K.; Szabo, A. Lazarus, A.; Steinberg, J.; Gloeckler, G.; Howard, R.; Michels, D.; Farrugia, C.; Lin, R. P.; Larson, D. E. **A magnetic cloud containing prominence material: January 1997**. J. Geophys. Res., v.103, n.A1, p.277-285, Jan. 1998

Carlos Roberto Braga, **Instruções para Coleta e Utilização de Dados do Telescópio Cintilador Detector de Muons (TCM) do OES**, Abril de 2007.

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.

Dal Lago, A. **Estudo das estruturas geofetivas no meio interplanetário e de suas causas solares.** Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (2004).

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

Da Silva, M. R. **Variação da Intensidade dos Raios Cósmicos em Resposta a Diferentes Estruturas Magnéticas do Meio Interplanetário.** Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo (2005).

D. Falguère, et al. **In-flight observations of the radiative environment and its effects on devices in the SAC-C polar orbit, IEEE Trans. Nucl. Sci. n. 6, 2782 (2002).**

D. N. Barker, **What is Space Weather? Space Weathe.** Advances in Space Research Vol 22, No. 1, pp. 7-16,1998.

Dryer, M. **Coronal transient phenomena.** Space Sci. Rev. v.33, p.233-275, 1982.

Dryer, M.; Wu, S. T. **Comments on “density distribution in looplike coronal transients: a comparison of observations and a theoretical model” by D. G. Sime, R. M. MacQueen, and A. J. Hanhausen.** J. Geophys. Res. v.90, n.A1, p.559-561, 1985.

Dungey, J. W. **Interplanetary magnetic field and the auroral zones.** Phys. Rev. Lett., v.6, n.2, p.47-48, Jan. 1961

Duzellier, S. **Radiation effects on electronic devices in space. Aerospace science and technology, n.9, 93-99 (2005).**

E. Echer, W. D. Gonzalez, F. L. Guarnieri, A. Dal Lago, L. E. A. Vieira, **Introduction to Space Weather**. *Advances in Space Research* 35 (2005) 855-865.

Gonzalez, W.D., e B.T. Tsurutani, **Criteria of Interplanetary Parameters Causing Intense Magnetic Storms ($Dst < - 100$ nT)**, *Planetary and Space Science*, 35 (9), 1101-1109, 1987.

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

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.

Gopalswamy, N.; Lara, A.; Lepping, R. P.; Kaiser, M. L.; Berdichevsky, D.; St. Cyr, O. C. **Interplanetary acceleration of coronal mass ejections**. *Geophys. Res. Lett.* v.26, n.2, p.145-148, Jan. 2000.

Gosling, J. T. **Coronal mass ejections: the link between solar and geomagnetic activity**. *Phys. Fluids B* 5, v.7, p.2638-2645, July 1993a.

Gosling, J. T. **The solar flare myth**. *J. Geophys. Res.* v.98, n.A11, p.18937-18949, 1993b.

Gosling, J. T.; Hildner, E.; Macqueen, R. M.; Munro, R. H.; Poland, A. I.; Ross, C. L. **Direct observations of a flare related coronal and solar-wind disturbance**. *Solar Phys.* v.40, n.2, p.439-448, 1975.

Gosling, J. T. **Coronal mass ejections and magnetic flux ropes in interplanetary space**. In: Russel, C. T. Priest, E. N. , Lee, L. C. ed. *Physics of magnetic flux ropes*, Washington, DC: AGU, 1990. v.58, p.343-364.

Howard, R. A., et al. **Observations of CME from SOHO/LASCO**. In: Crooker, N.; Joselyn J. A.; Feynman, J. ed. Coronal mass ejections. Washington, DC: AGU, 1997. v. 99, p.17-26.

Hoyt, V.; Schatten, K. H. **The role of the sun in climate change**. New York: Oxford University Press, 1997. 279p.

Illing, R. M.; Hundhausen, A. J. Disruption of a coronal streamer by an eruptive prominence and coronal mass ejection. J. Geophys. Res. v.91, n.A10, p.10951-10960, 1986.

Jokipii, J. R. **Cosmic Rays**. In: Sues, S. T., Tsurutani, B. T.(eds.) From the Sun. Washington DC, American Geophysical Union (2000).

Kamilde, 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, A4, 6917-6921 (1998).

Kivelson, M. G.; e Russell, C. T. Introduction to Space Physics. Los Angeles: Cambridge University Press, 1995. 568p.

Low, B. C. **Solar activity and the corona**. Solar Phys. v.167, p.217-265, 1996.

Munakata, K.; Bieber, J.; Hattori, T.; Inoue, K.; Yasue, S.; Kato, C.; Koyama, M.; Fujii, Z.; Fujimoto, K.; Duldig, M.; Humble, J.; Trivedi, N.; Gonzalez, W.; Da Silva, M.; Tsurutani, B.; Schuch, N. **A Prototype Muon Detector Network Covering a Full Range of Cosmic Ray Pitch Angles**. Proceedings of ICRC 2001 (2001).

Munakata, K.; Bieber, J.; Yasue, S.; Kato, C.; Koyama, M.; Akahane, S.; Fujimoto, K.; Fujii, Z.; Humble, J.; Duldig, M. **Precursors of Geomagnetic Storms Observed by the Muon Detector Network**. Journal of Geophysical Research, v. 105, A12,27.457-27.468 (2000).

Mursula, K; Usoskin, I. **Heliospheric Physics and Cosmic Ray**, Lecture Notes. American Geophysics Union, Washington, DC (2003).

Neugebauer, M.; e Goldstein, R.. **Particle and field signatures of coronal mass ejections in the solar wind**. In: Crooker, N.; Joselyn J. A.; Feynman, J. ed. Coronal mass ejections, Washington, DC: AGU, 1997. v. 99, p.245-251

Parker, E. N. **The stellar-wind regions**. Astrophys. J., v.134, p.20-27, Feb. 1961.

Pneuman, G. W.; Kopp, R. A. **Coronal streamers III: energy transport in streamers and interstreamer regions**. Solar Phys, v.13, n. 1, 176-193 (1970).

Savian, J.F.; Silva, M.R., Dal Lago, A., Munakata, K., Gonzalez, W.D., Schuch, N.J., **Analisis of super intense geomagnetic storms using cosmic rays and interplanetary observations**. Submetido: Revista Brasileira de Geofísica (2005).

Schultz, M. **Interpanetary sector structure and heliomagnetic equator**. Astrophys. Space Sci., v.24, p.371-383, May 1973.

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

Tsurutani, B. T.; Gonzalez, W. D. **The cause of high intensity long-duration continuous AE activity (HILDCAAs): interplanetary Alfvén waves trains**. Planet. Space Sci. v.35, p.405-409, 1987.

Tsurutani, B. T; Gonzalez, W. D. **Magnetic storms**. In: Sues, S. T., Tsurutani, B. T.(eds.) From the Sun. Washington DC, American Geophysical Union, 2000.

Z.Fujii, M.Orito, T.Yamada, S. Sakakibara, K. Fujimoto. **Multi-Directional Cosmic-Ray Intensities, Nagoya, 1995-200**. Reporte of Cosmic-Ray Research Section No. 19. Cosmic-Ray Research Section, Solar-Terrestrial Environmente Laboratory, Nagoya University, Nagoyan, JAPAN.

Yasue, S., Kunakata, K., Kato, C., Kuwabara, T., Akahane, S., Koyama, M., Fujii, Z., Everson, P., Bieber, J. W. **Design of a Recording System for a Muon Telescope Using FPGA and VHDL**. In: 28th International Cosmic Ray Conference, 3461-3464 (2003).

YoshitakaOkazaki. **Three dimensional anisotropy and density gradient of galactic Cosmic rays measured by global muon detector network**. Tohoku University.Department of Geophysics. March 2008.

ANEXOS

ANEXO 1 – PROGRAMAS USADOS

Programa em linguagem IDL usado para calcular erros nas contagens horárias. Criou-se um arquivo com dados de resolução temporal um minuto para um dia. Para o protótipo criou-se um arquivo com apenas a contagem horária visto que a resolução temporal do Telescópio protótipo é de uma hora.

```

result1=read_ascii('D:\caminho do programa '); mês

ERRO=result1.(0)
Tempom=(ERRO(2,*)/1.0)+(ERRO(3,*)/24)+(ERRO(4,*)/(60.0*24.0))
Vm=ERRO(10,*)
Nm=ERRO(11,*)
Sm=ERRO(12,*)
Em=ERRO(13,*)
Wm=ERRO(14,*)
NLm=ERRO(15,*)
NWm=ERRO(16,*)
SEm=ERRO(17,*)
SWm=ERRO(18,*)
N2m=ERRO(19,*)
S2m=ERRO(20,*)
E2m=ERRO(21,*)
W2m=ERRO(22,*)
Vmedio = MEAN(Vm)
PRINT, 'Média de V: ', Vmedio[0]
Nmedio = MEAN(Nm)
PRINT, 'Média de N: ', Nmedio[0]
Smedio = MEAN(Sm)
PRINT, 'Média de S: ', Smedio[0]
Emedio = MEAN(Em)
PRINT, 'Média de E: ', Emedio[0]
Wmedio = MEAN(Wm)
PRINT, 'Média de W: ', Wmedio[0]
NLmedio = MEAN(NLm)
PRINT, 'Média de NL: ', NLmedio[0]
NWmedio = MEAN(NWm)
PRINT, 'Média de NW: ', NWmedio[0]
SEmedio = MEAN(SEm)
PRINT, 'Média de SE: ', SEmedio[0]
SWmedio = MEAN(SWm)
PRINT, 'Média de SW: ', SWmedio[0]
N2medio = MEAN(N2m)
PRINT, 'Média de N2: ', N2medio[0]
S2medio = MEAN(S2m)
PRINT, 'Média de S2: ', S2medio[0]
E2medio = MEAN(E2m)
PRINT, 'Média de E2: ', E2medio[0]
W2medio = MEAN(W2m)
PRINT, 'Média de W2: ', W2medio[0]
;Erro de poisson, período de uma hora.

```

```
Vhorario=Vmedio*60
raiz=sqrt(Vhorario)
resposta=((1/raiz)*100)
print, 'Erro de poisson V',resposta
Nhorario=Nmedio*60
raiz1=sqrt(Nhorario)
resposta1=((1/raiz1)*100)
print, 'Erro de poisson N',resposta1
Shorario=Smedio*60
raiz2=sqrt(Shorario)
resposta2=((1/raiz2)*100)
print, 'Erro de poisson S', resposta2
Ehorario=Emedio*60
raiz3=sqrt(Ehorario)
resposta3=((1/raiz3)*100)
print, 'Erro de poisson E', resposta3
Whorario=Wmedio*60
raiz4=sqrt(Whorario)
resposta4=((1/raiz4)*100)
print, 'Erro de poisson W', resposta4
NLhorario=NLmedio*60
raiz5=sqrt(NLhorario)
resposta5=((1/raiz5)*100)
print, 'Erro de poisson NL', resposta5
NWhorario=NWmedio*60
raiz6=sqrt(NWhorario)
resposta6=((1/raiz6)*100)
print, 'Erro de poisson NW', resposta6
SEhorario=SEmedio*60
raiz7=sqrt(SEhorario)
resposta7=((1/raiz7)*100)
print, 'Erro de poisson SE',resposta7
SWhorario=SWmedio*60
raiz8=sqrt(SWhorario)
resposta8=((1/raiz8)*100)
print, 'Erro de poisson SW', resposta8
N2horario=N2medio*60
raiz9=sqrt(N2horario)
resposta9=((1/raiz9)*100)
print, 'Erro de poisson N2', resposta9
S2horario=S2medio*60
raiz10=sqrt(S2horario)
resposta10=((1/raiz10)*100)
print, 'Erro de poisson S2', resposta10
E2horario=E2medio*60
raiz11=sqrt(E2horario)
resposta11=((1/raiz11)*100)
print, 'Erro de poisson E2', resposta11
W2horario=W2medio*60
raiz12=sqrt(W2horario)
```

```

resposta12=((1/raiz12)*100)
print, 'Erro de poisson W2', resposta12
Print, 'contagem horária V',Vhorario
Print, 'contagem horária N',Nhorario
Print, 'contagem horária S',Shorario
Print, 'contagem horaria E', Ehorario
Print, 'contagem horaria W', Whorario
Print, 'contagem horaria NL', NLhorario
Print, 'contagem horaria NW', NWhorario
Print, 'contagem horaria SE', SEhorario
Print, 'contagem horaria SW', SWhorario
Print, 'contagem horaria N2', N2horario
Print, 'contagem horaria S2', S2horario
Print, 'contagem horaria E2', E2horario
Print, 'contagem horaria W2', W2horario

```

stop

end

Programas para analise de dados:

pro data1

```

result=read_ascii('D:\Documents and Settings\Nikolas\inpe-pibic\cospar2008\Programa
de dezembro de 2006\dez 06 muons.txt')

```

```

data1=result.(0)

```

```

Tempo=(data1(2,*)/1.0)+(data1(3,*)/24)+(data1(4,*)/(60.0*24.0))

```

```

V=data1(10,*)          ;direções: vertical V, 30°norte N, 30°sul S, 30°leste, 30°oeste,
N=data1(11,*)          ;nordeste NL, noroeste NW, sudeste SE, sudoeste SW, 49° norte
N2,
                      ;49°sul S2, 49°, 49° leste E2, 49° oeste
S=data1(12,*)          ;
                      ;
E=data1(13,*)          ; dados de 1 a 31 de novebro de 2006
                      ;
W=data1(14,*)
NL=data1(15,*)
NW=data1(16,*)
SE=data1(17,*)
SW=data1(18,*)

```

```
N2=data1(19,*)
S2=data1(20,*)
E2=data1(21,*)
W2=data1(22,*)
result1=read_ascii('D:\ caminho do documento ')
data2=result1.(0)
Tempom=(data2(2,*)/1.0)+(data2(3,*)/24)+(data2(4,*)/(60.0*24.0))
Vm=data2(10,*)
Nm=data2(11,*)
Sm=data2(12,*)
Em=data2(13,*)
Wm=data2(14,*)
NLm=data2(15,*)
NWm=data2(16,*)
SEm=data2(17,*)
SWm=data2(18,*)
N2m=data2(19,*)
S2m=data2(20,*)
E2m=data2(21,*)
W2m=data2(22,*)
Vmedio = MEAN(Vm)
PRINT, 'Média de V: ', Vmedio[0]
Nmedio = MEAN(Nm)
PRINT, 'Média de N: ', Nmedio[0]
Smedio = MEAN(Sm)
PRINT, 'Média de S: ', Smedio[0]
Emedio = MEAN(Em)
```

PRINT, 'Média de E: ', Emedio[0]

Wmedio = MEAN(Wm)

PRINT, 'Média de W: ', Wmedio[0]

NLmedio = MEAN(NL)

PRINT, 'Média de NE: ', NLmedio[0]

NWmedio = MEAN(NW)

PRINT, 'Média de NW: ', NWmedio[0]

SEmedio = MEAN(SE)

PRINT, 'Média de SE: ', SEMedio[0]

SWmedio = MEAN(SW)

PRINT, 'Média de SW: ', SWmedio[0]

N2medio = MEAN(N2)

PRINT, 'Média de N2: ', N2medio[0]

S2medio = MEAN(S2)

PRINT, 'Média de S2: ', S2medio[0]

E2medio = MEAN(E2)

PRINT, 'Média de E2: ', E2medio[0]

W2medio = MEAN(W2)

PRINT, 'Média de W2: ', W2medio[0]

Vper=(V-Vmedio)/Vmedio*100

Nper=(N-Nmedio)/Nmedio*100

Sper=(S-Smedio)/Vmedio*100

Eper=(E-Emedio)/Vmedio*100

Wper=(W-Wmedio)/Wmedio*100

NLper=(NL-NLmedio)/NLmedio*100

NWper=(NW-NWmedio)/NWmedio*100

SEper=(SE-SEmedio)/SEmedio*100 ;

SWper=(SW-SWmedio)/SWmedio*100 ;

N2per=(N2-N2medio)/N2medio*100

S2per=(S2-S2medio)/S2medio*100

$E2_{per} = (E2 - E2_{medio}) / E2_{medio} * 100$

$W2_{per} = (W2 - W2_{medio}) / W2_{medio} * 100$

```
!P.MULTI = [0,1,6]
!Y.Margin = [0,0]
!X.Margin = [5,5]
!Y.OMARGIN=[5,5]
!X.OMARGIN=[5,5]
```

```
window,2,xsize=900,ysize=800
```

```
;plot, Tempo, Vper, ytitle= 'Vertical', max_value=5, min_value=-4,
xrange=[14,16],charsize=2,/XSTYLE,XTICKN = [' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' '],
BACKGROUND = -1,COLOR = 0
```

```
plot, Tempo, Nper, ytitle= 'Norte',max_value=5, min_value=-4 ,
xrange=[14,16],charsize=2,/XSTYLE,XTICKN = [' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' '],
BACKGROUND = -1,COLOR = 0
```

```
plot, Tempo, Sper, ytitle= 'Sul',max_value=5, min_value=-4,
xrange=[14,16],charsize=2,BACKGROUND = 255,COLOR = 0 ,/XSTYLE,XTICKN =
[' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ']
```

```
plot,Tempo,Eper, ytitle= 'Leste',max_value=5, min_value=-4 ,
xrange=[14,16],charsize=2,/XSTYLE,XTICKN = [' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' '],
BACKGROUND = -1,COLOR = 0
```

```
plot,Tempo,Wper, ytitle= 'Oeste',xtitle='Dezembro 2006',max_value=5,
xrange=[14,16],min_value=-4 ,charsize=2,BACKGROUND = 255,COLOR =
0;/XSTYLE,XTICKN = [' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ']
```

```
;plot,Tempo,NLper, ytitle= 'Northeast',max_value=5, min_value=-
4,xrange=[14,16],charsize=2,/XSTYLE,XTICKN = [' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' '],
BACKGROUND = -1,COLOR = 0
```

```
;plot,Tempo,NWper,ytitle='Northwest', max_value=5, min_value=-
4,xrange=[14,16],charsize=2,BACKGROUND = -1,COLOR = 0,/XSTYLE,XTICKN =
[' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ']
```

```
;plot,Tempo,SEper, ytitle= 'Southeast',max_value=5, min_value=-
4,xrange=[14,16],charsize=2,BACKGROUND = -1,COLOR = 0,/XSTYLE,XTICKN =
[' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ', ' ']
```


B = dst(6,*)

hora2 = hora/24

dia2 = hora2 + dia

fp_tempo=muons(5,*)

V=muons(10,*)

V1=muons1(10,*)

dia=muons(2,*)

hora=muons(3,*)

minuto=muons(4,*)

tempo=(dia+(hora/24))+((minuto/24)*1/60)

Vmedia=mean(V1)

Vper=(V-Vmedia)/Vmedia*100

EPV=(1/(vmedia)^1/2)*100
print, 'erro de poisson V', EPV

ano = dez06(0,*)

dia = dez06(1,*)

hora = dez06(2,*)

minuto = dez06(3,*)

secundo = dez06(4,*)

fp_year= dez06(5,*)

Np= dez06(6,*)

Tp= dez06(7,*)

Vp= dez06(8,*)

B_gsm_x= dez06(9,*)

B_gsm_y= dez06(10,*)

B_gsm_z= dez06(11,*)

Bmag= dez06(12,*)

window, 1, xsize=1100, ysize=1000

hora1 = hora/24

minuto1 = minuto/1440

segundo1 = segundo/86400

dia1 = hora1 + minuto1 + segundo1 + dia

!P.MULTI = [0,1,7]

!Y.Margin = [0,0]

!X.Margin = [5,5]

!Y.OMARGIN=[5,5]

!X.OMARGIN=[5,5]

window,1,xsize=900,ysize=800

plot, dia1, Np, min_value=0, max_value=200 ,ytitle='N (1/cm³)', charsize=2.0, BACKGROUND= -1, COLOR = 0,xrange=[348,350]/XSTYLE,/YSTYLE, XTICKN = [' ',' ',' ',' ',' ',' ',' ']

plot, dia1, Tp, min_value=0, ytitle='T (kelvin)', charsize=2.0, BACKGROUND= -1, COLOR = 0, xrange=[348,350]/XSTYLE,/YSTYLE, XTICKN = [' ',' ',' ',' ',' ',' ',' ']

plot, dia1, Vp, min_value=0, ytitle='V (km/s)', charsize=2.0, BACKGROUND= -1, COLOR = 0, xrange=[348,350]/XSTYLE,/YSTYLE, XTICKN = [' ',' ',' ',' ',' ',' ',' ']

plot, dia1, B_gsm_z, ytitle='Bz(nT)',charsize=2.0, min_value=-30, BACKGROUND= -1, COLOR = 0, xrange=[348,350]/XSTYLE,/YSTYLE, XTICKN = [' ',' ',' ',' ',' ',' ',' ']

plot, dia1, Bmag, ytitle='|B|(nT)', charsize=2.0, min_value=-30, BACKGROUND= -1, COLOR = 0, xrange=[348,350]/XSTYLE,/YSTYLE, XTICKN = [' ',' ',' ',' ',' ',' ',' ']

plot, tempo, Vper, min_value=-5,max_value=9 ,xtitle="", ytitle=' Vertical muons (%)',charsize=2.0,xrange=[14,16] ,BACKGROUND= -1, COLOR = 0,/XSTYLE,/YSTYLE, XTICKN = [' ',' ',' ',' ',' ',' ',' ']

```
plot, dia2, B, xtitle='Dezembro 2006', ytitle='Dst (nT)',charsize=2.0 ,BACKGROUND=-1, COLOR = 0,/XSTYLE,/YSTYLE,xrange=[14,16]
```

```
stop
```

```
end
```

ANEXO 2 - RESUMOS SUBMETIDOS A EVENTOS

SBGEA 2008 –

AMPLIAÇÃO DO PROTÓTIPO DO TELESCÓPIO DETECTOR DE MUONS – RAIOS CÓSMICOS DE ALTA ENERGIA

Kemmerich, N. [1]; Dal Lago, A.[2]; Schuch, N. J. [1]; Braga, C. R. [1]; Silveira, M. V. D. [1]; Vieira, L. R. [1]; Stekel, T. R. C. [1].

[1] Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE – MCT em parceria com o

Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM,
Av. Roraima, Campus UFSM, CP 5021, CEP 97110-970, Santa Maria, RS, Brasil

[2] Divisão de Geofísica Espacial - DGE/CEA/INPE - MCT, São José dos Campos, SP, Brasil.

RESUMO

O estudo do clima espacial está ligado à relação entre o Sol, o espaço interplanetário, a magnetosfera e a superfície terrestre. Danos causados na Terra têm origem em ejeções coronais de massa (CME) solares e quando atingem a Terra podem causar tempestades geomagnéticas. Os possíveis danos devidos às tempestades são perdas de dados de satélite, interferência em radares e *black-out* de energia elétrica. Com o objetivo de prevenir possíveis danos tecnológicos, foi instalado em 2001 o protótipo de telescópio detector de muons – TDM, de raios cósmicos de alta energia no Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CIE/INPE – MCT, (29°S, 53°O), em São Martinho da Serra, RS. Constituído desde a sua instalação, em 2001, de 2 camadas de 4 detectores cintiladores (2x2x2) com resolução temporal de uma hora. O telescópio detector de muons foi expandido em 2005 e passou a ter 2 camadas de 28 detectores (2 x 4 x 7) e resolução temporal de um minuto. O propósito deste trabalho é discutir a expansão do telescópio e apresentar resultados comparativos da modulação dos raios cósmicos (muons) de energia da ordem ou superior a ~ 50 GeV, em períodos de tempestades geomagnéticas. Para tanto, são utilizados dados do TDM, antes e após a ampliação, o índice Dst e dados do campo magnético e de plasma no ponto Lagrangeano L1 obtidos pelo satélite *Advanced Composition Explorer* – ACE da NASA. A expansão do TDM possibilitou um decréscimo no erro da contagem horária de 0,16 % para 0,06 % para a direção vertical. Outra vantagem da expansão foi o aumento do número de canais direcionais de observação simultânea, ampliando as possibilidades de observações das modulações de raios cósmicos - muons precursoras das tempestades geomagnéticas e dos choques interplanetários.

Jornada Acadêmica integrada 2008 –

**AMPLIAÇÃO DO PROTÓTIPO DE TELESCÓPIO MULTIDIRECIONAL DE
RAIOS CÓSMICOS DE ALTA ENERGIA – MUONS: PARTICIPAÇÃO DO
DESENVOLVIMENTO TÉCNICO E DE ENGENHARIA, E ANÁLISE
PRELIMINAR DOS DADOS – SICINPE 2008**

Níkolás Kemmerich¹ (CRS/CIE/INPE – MCT, Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT)
Dr. Alisson Dal Lago² (Orientador - DGE/CEA/INPE-MCT)
Dr. Nelson Jorge Schuch³ (Co-orientador - CRS/CIE/INPE-MCT)

Resumo

O Clima Espacial estuda a relação Sol-Terra, previsão e origem de tempestades geomagnéticas bem como seus processos físicos no geoespaço e dos respectivos danos causados em sistemas tecnológicos. Tempestades geomagnéticas são causadas por ejeções coronais de massa (CME), geralmente nuvens magnéticas, que, ao interagirem com a Magnetosfera Terrestre, trocam energia, intensificando as correntes existentes na Magnetosfera Terrestre. Os danos causados pelas tempestades são perda de dados de satélite, interferência em radares e *black-out* de energia elétrica, além de causarem as auroras nas calotas polares. Muons são partículas originadas da colisão de raios cósmicos originados no espaço exterior com os componentes da Atmosfera Terrestre. Ejeções coronais de massa blindam raios cósmicos e influenciam na sua modulação no geoespaço. Assim podem-se utilizar detectores de raios cósmicos terrestres para estudar as causas interplanetárias de tempestades geomagnéticas, através da análise da modulação destes raios cósmicos. O Projeto tem por objetivo o estudo do Telescópio Multidirecional de Raios Cósmicos de Alta Energia – muons na sua parte técnica de funcionamento, análise de dados de seu protótipo e do sistema expandido quando da ocorrência de tempestades geomagnéticas juntamente com dados do meio interplanetário coletados pelo satélite da NASA, ACE localizado em órbita, no ponto Lagrangeano - L1. O protótipo foi instalado em 2001 no Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CIE/INPE – MCT em São Martinho da Serra, RS, e expandido em dezembro de 2005. O protótipo foi constituído com 2 camadas de 4 detectores (2x2x2) com resolução temporal a cada hora. O novo sistema expandido é constituído de 56 detectores (2x4x7) permitindo uma resolução temporal a cada minuto, sendo 7 vezes mais preciso que o protótipo e melhor integrando a Rede Internacional de Detectores de Muons. O telescópio detector de raios cósmicos, Muons, permite resposta à ocorrência de tempestades geomagnéticas na forma de decréscimo de 1% a 10% na contagem de muons (decrécimo de Forbush).

¹ Aluno do Curso de Física Licenciatura Plena da UFSM, vinculado ao LACESM/CT - UFSM.

E-mail: nikolas@lacesm.ufsm.br

² Pesquisador da Divisão de Geofísica Espacial - DGE/CEA/INPE – MCT.

E-mail: dallago@dge.inpe.br

³ Pesquisador do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CIE/INPE – MCT.

E-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br

IAU 2009 -

USING THE MUON DETECTOR TELESCOPE FOR WHOLE HELLIOSPHERE INTERVAL SPACE WEATHER STUDIES

**KEMMERICH, N.¹; DAL LAGO, A.²; SCHUCH, N.J.¹; VIEIRA, L. R.¹;
BRAGA, C. R.^{1,2}; SILVEIRA, M. V. D.^{1,2}; STEKEL, T. R. C.¹;
THUORST, J. F.¹; MUNAKATA, K.³.**

1 - Southern Regional Space Research Center - CRS/INPE - MCT, in collaboration with the Santa Maria Space Science Laboratory - LACESM/CT - UFSM, Santa Maria, RS, Brazil.

2 - National Institute for Space Research - DGE/CEA/INPE - MCT, São José dos Campos, SP, Brazil.

3 - Physics Department, Faculty of Science, Shinshu University, Matsumoto, Japan.

ABSTRACT

Space Weather is related to the conditions of the interplanetary environment and its effects on the Earth. These conditions are modulated by the 11-year solar activity cycle. The Sun ejects plasma and magnetic field structures which may hit the Earth's magnetosphere, causing geomagnetic storms. Interplanetary counterparts of Coronal Mass Ejections (CMEs) and corotating interaction regions (CIRs) are main interplanetary structures causing the geomagnetic disturbances in the maximum and minimum solar activity periods, respectively. The damages of geomagnetic storms include the loss of data from satellite, signal scintillation, interference on radars, telecommunication cable disruption, electricity grid disturbance and electrical power black-out. High energy galactic cosmic ray intensity observed by ground-based detectors also changes responding to interplanetary disturbances such as CMEs and CIRs. Muons are secondary cosmic rays originated from inelastic collisions of high energy cosmic rays with atmospheric nuclei in the high altitude atmosphere. The purpose of this work is to discuss the modulation of cosmic rays (~50GeV) observed with the Muon Detector Telescope (MDT), in the WHI period between March 20 to April 16, 2008. The MDT was installed in 2001 at the Southern Space Observatory - SSO/CRS/INPE (29.4°S, 53.8° W, 480 m a.s.l.) and upgraded later in 2005. The MDT in 2008 is composed of 56 detectors (2x4x7) with a temporal resolution of one minute. Plasma and magnetic field data from ACE satellite and Dst index are compared with cosmic rays data.

Pôster apresentado no evento: SBGEA 2008



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



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA – UFSM
CENTRO DE TECNOLOGIA – CT/UFSM
LABORATÓRIO DE CIÊNCIAS ESPACIAIS DE SANTA MARIA – LACESM/CT/UFSM

AMPLIAÇÃO DO PROTÓTIPO DO TELESCÓPIO DETECTOR DE MUONS - TDM
RAIOS CÔSMICOS DE ALTA ENERGIA

Nikolas Kemmerich[1]; Alisson Dal Lago [2]; Nelson J. Schuch [1]; Carlos R. Braga [1]; Marcos V. D. Silveira[1]; Lucas Ramos Vieira[1].

[1] Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE – MCT em parceria com o Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM, Av. Roraima, Campus UFSM, CP 5021, CEP 97110-970, Santa Maria, RS, Brasil
[2] Divisão de Geofísica Espacial – DGE/CEA/INPE – MCT, São José dos Campos, SP, Brasil

E-mail: nikolas@lacesm.ufsm.br

RESUMO

O estudo do clima espacial está ligado à relação entre o Sol, o espaço interplanetário, a magnetosfera e a superfície terrestre. Danos causados na Terra têm origem em ejeções coronais de massa (CME) solares que quando atingem a Terra podem causar tempestades geomagnéticas. Os possíveis danos devidos às tempestades são perdas de dados de saúde, interferência em radares e *black-out* de energia elétrica. Com o objetivo de prevenir possíveis danos tecnológicos, foi instalado em 2001 o protótipo de telescópio detector de muons – TDM, de raios cósmicos de alta energia no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT, (29°S, 53°O), em São Martinho da Serra, RS. Constituído desde a sua instalação, em 2001, de 2 camadas de 4 detectores cintiladores (2 x 2 x 2) com resolução temporal de uma hora. O telescópio detector de muons foi expandido em 2005 e passou a ter 2 camadas de 28 detectores (2 x 4 x 7) e resolução temporal de um minuto. O propósito deste trabalho é discutir a expansão do telescópio e apresentar resultados comparativos da modulação dos raios cósmicos (muons) de energia da ordem de ~50 GeV, em períodos de tempestades geomagnéticas. Para tanto, são utilizados dados do TDM, antes e após a ampliação, o índice Dst e dados do campo magnético e de plasma no ponto Lagrangeano L1 obtidos pelo satélite *Advanced Composition Explorer* – ACE da NASA. A expansão do TDM possibilitou um decréscimo no erro da contagem horária de 0,16 % para 0,06 % para a direção vertical. Outra vantagem da expansão foi o aumento do número de canais direcionais de observação simultânea, ampliando as possibilidades de observações das modulações de raios cósmicos – muons precursoras das tempestades geomagnéticas e dos choques interplanetários.

INTRODUÇÃO

O fluxo de raios cósmicos galácticos (GCR) no meio interplanetário é modulado pelo ciclo solar [1]. Quando ejeções coronais de massa (CME) atingem a magnetosfera terrestre, elas podem causar tempestades magnéticas. Conseqüentemente, danos no planeta podem ser causados. Muons são originados na colisão de raios cósmicos galácticos (~50GeV) com partículas da atmosfera terrestre, conservando aproximadamente a direção do GCR incidente. Ejeções coronais de massa acompanhadas de um intenso choque frequentemente retem raios cósmicos atrás do choque [2]. Detectores terrestres de raios cósmicos observam um decréscimo na intensidade de raios cósmicos chamado de "decréscimo de Forbush" ("Forbush Decrease") [2]. Um precursor anisotrópico é às vezes observado como "cone de perdas" ("Loss Cone", Figura 1)[2]. Assim, é possível fazer uma previsão de tempestades geomagnéticas.

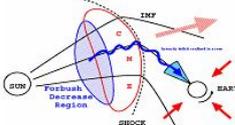


Figura 1: Representação artística de raios cósmicos "Cone de Perdas", precursor. Ruffolo (1999).

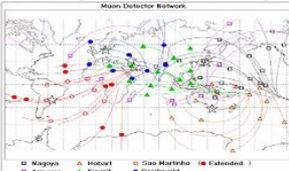


Figura 2: Rede Mundial de detectores de Raios cósmicos muons, Munakata et al., 2004.

METODOLOGIA

•ACE: Para este trabalho foram utilizados parâmetros do vento solar obtidos pelo satélite ACE da NASA localizado no ponto Lagrangeano L1.

•DETECTOR DE RAIOS CÔSMICOS, ALTA ENERGIA – MUONS (PROTÓTIPO):

O telescópio detector protótipo era composto de 2 camadas de 4 detectores (2 x 2 x 2) com resolução temporal de uma hora, com nove direções de observação [3]. Algumas características do detector protótipo são apresentadas na Tabela 1. Contagem horária, erro na contagem e rigidez dos raios cósmicos observados no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT, (29°S, 53°O), em São Martinho da Serra, RS, são mostrados. As direções do detector protótipo são apresentadas na Figura 2 (círculos abertos). O erro na contagem vertical é de 0,16% no período analisado.

Tabela 1: Características do telescópio protótipo de muons, 11 de abril de 2001.

Direção do telescópio	Combinação de Detectores	Contagem Horária (fator 10 ⁴)	Erro na contagem (%)	P ₀ (GV)
Vertical (V)	U14.1 U12.1-12 U14.2 U14.4	39,4	0,16	53
30° Norte (N)	U14.3 U12.14	11,3	0,30	58
30° Sul (S)	U14.2 U13.1	11,4	0,30	47
30° Leste (E)	U12.1 U14.13	11,0	0,30	59
30° Oeste (O)	U14.2 U13.14	11,5	0,30	56
30° Nordeste (NE)	U12.13	4,7	0,46	64
30° Sudoeste (SW)	U14.4	5,4	0,43	61
30° Sudeste (SE)	U14.1	5,3	0,43	63
30° Sudoeste (SW)	U14.2	5,5	0,43	60

Tabela 2: Características do telescópio expandido de muons, 13 de dezembro de 2006.

Direção do telescópio	Número de sub-telescópios	Contagem horária (fator 10 ⁴)	Erro na contagem (%)
Vertical (V)	28	2,50	0,06
30° Norte (N)	21	0,99	0,10
30° Sul (S)	21	0,98	0,10
30° Leste (E)	24	1,05	0,10
30° Oeste (O)	24	1,16	0,09
30° Nordeste (NE)	18	0,47	0,14
30° Noroeste (NW)	18	0,51	0,14
30° Sudoeste (SW)	18	0,49	0,14
30° Sudeste (SE)	18	0,52	0,14
40° Sul 2 (S2)	14	0,33	0,17
40° Sul 1 (S1)	14	0,32	0,18
40° Leste 2 (E2)	20	0,47	0,14
40° Oeste 2 (O2)	20	0,43	0,15

•DETECTOR DE RAIOS CÔSMICOS, ALTA ENERGIA – MUONS (EXPANDIDO):

O detector expandido tem 56 detectores (2 x 4 x 7) e treze direções, como apresentado na Tabela 2 para o período de 13 de dezembro de 2006. Estas direções permitem uma melhor integração na rede mundial de detectores de muons – GMDT, representados por círculos fechados na Figura 2. A resolução temporal do telescópio expandido é de 01 (um) minuto, reduzindo assim o erro na contagem que, por exemplo, para a direção vertical passou a ser de 0,06%.

RESULTADOS

Protótipo : 11 à 13 de Abril, 2006.

Expandido: 14 à 16 de dezembro, 2006.

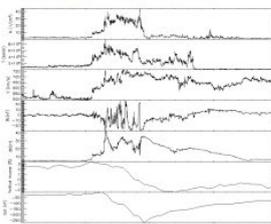


Figura 3: Do topo da figura para baixo: densidade de partículas no vento solar, temperatura, velocidade, componente z e módulo do campo magnético interplanetário. Contagem de muons em % para direção vertical do telescópio protótipo e índice Dst.

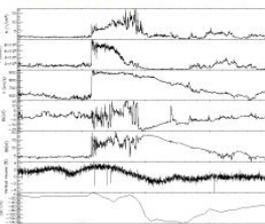


Figura 4: Do topo da figura para baixo: densidade de partículas no vento solar, temperatura, velocidade, componente z e módulo do campo magnético interplanetário. Contagem de muons em % para direção vertical do telescópio expandido e índice Dst.

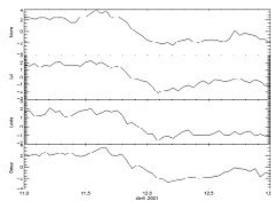


Figura 5: Exemplos de algumas direções para a contagem de muons em % do telescópio protótipo: Norte, Sul, Leste e Oeste.

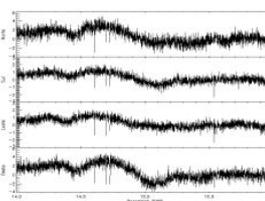


Figura 6: Exemplos de algumas direções para a contagem de muons em % do telescópio expandido: Norte, Sul, Leste e Oeste.

CONCLUSÕES: Ambos telescópios TDM, protótipo e expandido, apresentaram resposta a tempestades geomagnéticas com um decréscimo na intensidade de muons (Decréscimo de Forbush). O telescópio expandido, com novos canais, melhor integra a GMDT, rede mundial de detectores de muons. O erro na contagem horária foi reduzido para a vertical de 0,16% para 0,06%, assim como para os outros canais. É possível se ver claramente um "cone de perdas" na direção vertical e em algumas direções como N, S, E e W, que demonstra a possibilidade do telescópio detector de muons – TDM permitir previsões de tempestades geomagnéticas.

REFERÊNCIAS:

- [1] J.F. Valdés-Galicia. Low energy galactic cosmic rays in the heliosphere.
- [2] K. Munakata, T. Kawahara, S. Yasue, C. Kato, S. Akahane, M. Koyama, Y. Ohashi, A. Okada, T. Aoki, K. Mitsui, H. Kojima, and J. W. Bieber. A "Loss cone" precursor of an approaching shock observed by a cosmic ray muon hodoscope on October 28, 2003. *Geophysical Research Letters*, Vol.32,L03S04, doi:10.1029/2004GL021469, 2005.
- [3] M. R. da Silva, D. B. Coimbra, S. Monteiro, N. B. Trivedi, K. Munakata, T. Kawahara and N. J. Schuch. COSMIC RAY MUON OBSERVATION AT SOUTHERN SPACE. *Astrophysics and Space Science* 290: 389 – 397, 2004.

AGRADECIMENTOS:

Ao Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT pela aprovação dos Projetos de Pesquisas, A National Science Foundation (NSF/USA) pelo subsuporte entre a Universidade e a UFSM, para a expansão do Telescópio Multidirecional Detector de Muons do Observatório Espacial do Sul, ao Prof. Dr. K. Munakata e a Universidade de Shizuoka, Japão, pela doação do equipamento a UFSM para ser instalado no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE - MCT, no âmbito da parceria INPE/MCT - UFSM.

Pôster apresentado no evento: XXIII Jornada acadêmica integrada 2008



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



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA – UFSM
CENTRO DE TECNOLOGIA – CT/UFSM
LABORATÓRIO DE CIÊNCIAS ESPACIAIS DE SANTA MARIA – LACESM/CT/UFSM

AMPLIAÇÃO DO PROTÓTIPO DO TELESCÓPIO DETECTOR DE MUONS - TDM
RAIOS CÓSMICOS DE ALTA ENERGIA – SICINPE 2008

Nikolas Kemmerich[1]; Alisson Dal Lago [2]; Nelson J. Schuch [1].

[1] Laboratório de Clima Espacial e Previsão de Tempestades Magnéticas do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – LCEPTM/CRS/INPE – MCT em parceria com o Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria, Convênio: INPE – UFSM, Santa Maria, RS, Brasil;
[2] Divisão de Geofísica Espacial da Coordenação de Ciências Espaciais – DGE/CEA/INPE – MCT, São José dos Campos, SP, Brasil.
E-mail: nikolas@lacesm.ufsm.br

INTRODUÇÃO

O estudo do clima espacial está ligado à relação entre o Sol, o espaço interplanetário, a magnetosfera e a superfície terrestre. O Vento Solar é um gás de prótons e elétrons que flui passando pela Terra e pelo interplanetário envolvendo-a até o meio interestelar, sendo ele responsável pela interação Sol-Terra. Os processos dinâmicos do Sol liberam grandes quantidades de energia afetando diretamente a Terra. Entre os processos, os mais interessantes para estudo são Ejeções Coronais de Massa (CME), que são grandes liberações de plasma solar, e Flares que liberaram energia na forma de radiação eletromagnética. A atividade solar é modulada pelo ciclo solar de 11 anos ao qual classicamente pode ser estudado pelo número de manchas solares [1]. No início de um ciclo as manchas aparecem em médias latitudes e migram para o equador solar quando desaparecem marcando a fase de fim do ciclo. Essas estruturas quando atingem a Terra provocam perturbações no campo geomagnético podendo ser medida através de índices geomagnéticos tais como o Dst (Disturbance storm time). Quanto mais negativo o índice Dst maior é a perturbação e diz-se que houve uma tempestade geomagnética. Portanto, estruturas como CME e Flares causam tempestades geomagnéticas podendo ter sérias consequências no mundo moderno tão dependente de tecnologia. Os possíveis danos devido às tempestades são perdas de dados de satélite, interferência em radares e flutuação de energia elétrica. Muons são originados na colisão de raios cósmicos galácticos (GCR, ~50GeV) com partículas da atmosfera terrestre, conservando aproximadamente a direção do GCR incidente. Ejeções coronais de massa acompanhadas de um intenso choque frequentemente redirecionam raios cósmicos através do choque. Detectores terrestres de raios cósmicos observam um decréscimo na intensidade de raios cósmicos chamado de "decréscimo de Forbush" ("Forbush Decrease"). Um precursor anisotrópico é às vezes observado como "cone de perdidas" ("Loss Cone", Figura 1[2]). Assim podemos utilizar detectores de raios cósmicos terrestres para estudar as causas interplanetárias de tempestades geomagnéticas, através da análise da modulação destes raios cósmicos. Com o objetivo de prevenir possíveis danos tecnológicos, foi instalado em 2001 o protótipo de telescópio detector de muons – TDM, de raios cósmicos de alta energia no Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/INPE – MCT, (29°S, 53°O), em São Martinho da Serra, Brasil, RS. O telescópio detector de muons foi expandido em 2005 e faz parte da Rede Mundial de Detectores de raios cósmicos de alta energia (Figura 3).

OBJETIVOS

O propósito deste trabalho é discutir a expansão do telescópio e apresentar resultados comparativos da modulação dos raios cósmicos (muons) de energia da ordem ou superior a ~50 GeV, em períodos de tempestades geomagnéticas. Para tanto, são utilizados dados do TDM, antes e após a ampliação, o índice Dst e dados do campo magnético e de plasma no ponto Lagrangeano L1 obtidos pelo satélite Advanced Composition Explorer – ACE 4+ N.A.S.A.



Figure 1: Telescópio detector de muons - expandido.

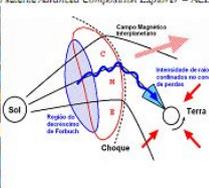


Figure 2: Representação artística de raios cósmicos "Cone de Perdidas", precursor, Ruffolo (1999).

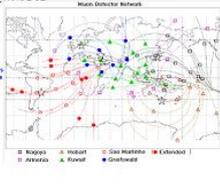


Figure 3: Rede Mundial de detectores de Raios cósmicos muons. Munakata et al., 2004.

METODOLOGIA

•ACE: Para este trabalho foram utilizados parâmetros do vento solar obtidos pelo satélite ACE da NASA localizado no ponto Lagrangeano L1.

•DETECTOR DE RAIOS CÓSMICOS, ALTA ENERGIA – MUONS (PROTÓTIPO): O telescópio detector protótipo era composto de 2 câmaras de 4 detectores (2 x 2 x 2), resolução temporal de uma hora, com nove canais de contagem [3]. Alguns características do detector protótipo são apresentados na Tabela 1. Contagem horária, erro na contagem e rigidez dos raios cósmicos observados no Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/INPE – MCT, (29°S, 53°O), em São Martinho da Serra, RS, são mostrados. As direções do detector protótipo são apresentadas na Figura 3 (setores abertos). O erro na contagem vertical é de 0,16% no período analisado.

Tabela 1. Características do telescópio protótipo de muons, 11 de abril de 2001.

Direção do telescópio	Combinação de Detectores	Contagem Horária (valor 10 ⁴)	Erro na contagem(%)	P ₁₀ (GV)
Vertical (V)	U1-4, U2-1, U3-1, U4-1, U4-2	39,4	0,16	53
30° Norte (N)	U1-4, U2-1, U3-1	11,3	0,30	58
30° Sul (S)	U4-1, U4-2, U3-1	11,4	0,30	57
30° Leste (E)	U2-1, U4-1, U4-2	11,0	0,30	59
30° Oeste (W)	U1-2, U3-1, U4-1	11,5	0,30	56
30° Nordeste (NE)	U2-1, U3-1	4,7	0,45	64
30° Noroeste (NW)	U1-4, U4-1	5,4	0,43	61
30° Sudeste (SE)	U4-1	5,3	0,43	63
30° Sudoeste (SW)	U3-1, U4-2	5,5	0,43	60

Tabela 2. Características do telescópio expandido de muons, 13 de dezembro de 2005.

Direção do telescópio	Número de sub-telescópios	Contagem horária (valor 10 ⁴)	Erro na contagem(%)
Vertical (V)	28	2,30	0,06
30° Norte (N)	21	0,95	0,10
30° Sul (S)	21	0,96	0,10
30° Leste (E)	24	1,05	0,10
30° Oeste (W)	24	1,16	0,09
30° Nordeste (NE)	18	0,47	0,14
30° Noroeste (NW)	18	0,51	0,14
30° Sudeste (SE)	18	0,49	0,14
30° Sudoeste (SW)	18	0,52	0,14
40° Norte (N2)	14	0,33	0,17
40° Sul (S2)	14	0,32	0,18
40° Leste (E2)	20	0,47	0,14
40° Oeste (W2)	20	0,43	0,15

•DETECTOR DE RAIOS CÓSMICOS, ALTA ENERGIA – MUONS (EXPANDIDO):

O detector expandido tem 56 detectores (2 x 4 x 7) e treze direções, como apresentado na Tabela 2 para o período de 13 de dezembro de 2005. Estas direções permitem uma melhor integração na rede mundial de detectores de muons – GMDT, representadas por círculos fechados na Figura 3. A resolução temporal do telescópio expandido é de um minuto, reduzindo assim o erro na contagem que, por exemplo, para a direção vertical passou a ser de 0,06%.

RESULTADOS

Protótipo : 11 à 13 de Abril, 2006.

Expandido: 14 à 16 de dezembro, 2006.

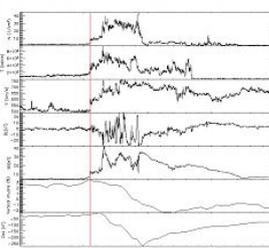


Figure 4: Do topo da figura para baixo, densidade de partículas no vento solar; temperatura, velocidade, componente x e módulo do campo magnético. Contagem de muons em % para direção vertical do telescópio protótipo e índice Dst.

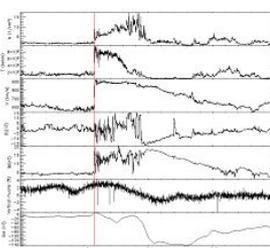


Figure 5: Do topo da figura para baixo, densidade de partículas no vento solar; temperatura, velocidade, componente x e módulo do campo magnético interplanetário. Contagem de muons em % para direção vertical do telescópio expandido e índice Dst.

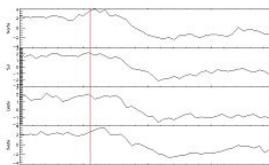


Figure 6: Exemplos de algumas direções para a contagem de muons em % do telescópio protótipo: Norte, Sul, Leste e Oeste.

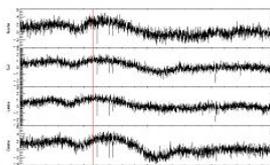


Figure 7: Exemplos de algumas direções para a contagem de muons em % do telescópio expandido: Norte, Sul, Leste e Oeste.

CONCLUSÕES: Ambos telescópios TDM, protótipo e expandido, apresentaram resposta a tempestades geomagnéticas com um decréscimo na intensidade de muons (Decréscimo de Forbush). O telescópio expandido, com novos canais, melhor integra a GMDT, rede mundial de detectores de muons. O erro na contagem horária foi reduzido para a vertical de 0,16% para 0,06%, assim como para os outros canais. É possível se ver claramente um "cone de perdidas" na direção vertical e em algumas direções como N, S, E e W, que demonstra a possibilidade do telescópio detector de muons – TDM permitir previsões de tempestades geomagnéticas.

REFERÊNCIAS:

- [1] Dal Lago, Estudo de nuvens magnéticas geoefetivas no meio interplanetário. Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (1999).
- [2] K. Munakata, T. Kuwahara, S. Yasue, C. Kato, S. Akahane, M. Koyama, Y. Ohashi, A. Okada, T. Aoki, K. Mitsui, H. Kojima, and J. W. Bieber. A "Loss cone" precursor of an approaching shock observed by a cosmic ray muon telescope on October 28, 2003. Geophysical Research letters, Vol.32L03S04, doi:10.1029/2004GL021469, 2005.
- [3] M. R. da Silva, D. B. Conreia, S. Monteiro, N. B. Trivadi, K. Munakata, T. Kuwahara and N. J. Schuch. COSMIC RAY MUON OBSERVATION AT SOUTHERN SPACE. Astrophysics and Space Science 290: 389 – 397, 2004.

AGRADECIMENTOS:

Ao Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT pela aprovação dos Projetos de Pesquisas, A National Science Foundation (NSF-USA) pelo subsídio entre a Delaware University e FATEC/UFMS, para a expansão do Telescópio Multidirecional. Deador de Muons do Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/INPE - MCT, no âmbito da parceria INPE-MCT - UFSM.



**ANEXO 3 – RELATÓRIO PARCIAL DO PROJETO DE
PESQUISA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA.**

RELATÓRIO PARCIAL DE ATIVIDADES PIBIC/CNPq-INPE – FEVEREIRO DE 2009

1. Título do Projeto

AMPLIAÇÃO DO PROTÓTIPO DE TELESCÓPIO MULTI-DIRECIONAL DE RAIOS CÓSMICOS DE ALTA ENERGIA – MUONS: PARTICIPAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO TÉCNICO E DE ENGENHARIA, E ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS.

2. Identificação do aluno e orientadores

Bolsista: Níkolás Kemmerich

Orientador: Dr. Alisson Dal Lago

Co-orientador: Dr. Nelson Jorge Schuch

Protocolo: 111798/2008-6

3. Colocação do problema estudado:

Clima Espacial estuda as condições do meio interplanetário e os efeitos causados devido a estas condições na Terra. Estas condições dependem muito da variabilidade solar. O Vento Solar é o responsável pela interação Sol-Terra e flui constantemente passando pela Terra. Os efeitos causados na Terra por eventos altamente energéticos solares tais como *flares* e Ejeções de Massa Coronais (CME) atingem áreas tecnológicas na telecomunicação, astronautas em órbita, navegação e satélites que são danificados pela energia transferida diretamente ou através do Vento Solar para a magnetosfera terrestre. Raios cósmicos são úteis para estudo de Clima Espacial bem como em métodos para previsão de ICMEs que chegam à Terra, pois ICMEs blindam raios cósmicos. O telescópio multidirecional de raios cósmicos de alta energia – muons (TDM) foi instalado em 2001 no Observatório Espacial do Sul OES/CRS/INPE – MCT (29S,53W), no âmbito da parceria INPE-UFSM, cooperação Brasil-Japão-USA em Clima Espacial. O TDM pode ser utilizado na previsão de tempestades geomagnéticas com até 8 horas de antecedência (Munakata *et al* 2001). Desde dezembro de 2005 está em operação o TDM ampliado. O presente projeto visa a análise preliminar de dados, tanto do protótipo quanto do expandido, buscando uma avaliação comparativa da modulação dos raios cósmicos (muons) associadas às tempestades geomagnéticas. Para analisar os eventos de tempestades geomagnéticas utilizaram-se dados de satélite do meio interplanetário, índices geomagnéticos e dados de raios cósmicos do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE - MCT.

4. Metodologia

Utilizar rotinas em IDL ou Matlab para análise preliminar de dados do meio interplanetário obtidos pelo satélite “Advanced Composition Explorer” – ACE, para identificar estruturas interplanetárias dos distúrbios geomagnéticos originadas de Ejeções de Massa Coronais. Juntamente utilizar dados do telescópio multidirecional de raios cósmicos de alta energia – muons para avaliar a resposta aos eventos interplanetários geomagnéticos em forma de decréscimo na contagem de muons para o telescópio expandido e comparar com dados do protótipo obtidos antes da expansão em 2005. Utiliza-se o índice geomagnético Dst fornecido pela Universidade de Kyoto pelo site”<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html>”, para identificar a ocorrência de tempestades geomagnéticas.

5. Resultados obtidos até janeiro de 2009

O aluno revisou o princípio do funcionamento do TDM, analisou os dados do protótipo com rotinas de programação em IDL e confeccionou gráficos com dados de parâmetros interplanetário do satélite ACE, com dados do telescópio protótipo e do expandido.

Como exemplo das análises feitas, abaixo apresenta gráficos do telescópio protótipo e expandido.

Dados obtidos pelo satélite ACE de densidade, temperatura, velocidade do Vento Solar componente Bz do campo magnético e valor de B em módulo são apresentados na Figura 1. O segundo gráfico de cima para baixo apresenta dados obtidos pelo detector protótipo de muons que foi desativado em 2005 por motivo de ampliação do seu sistema. O ultimo gráfico é do índice Dst que está indicando resposta a tempestade geomagnética ocorrida entre os dias 11 e 13 de abril de 2001.

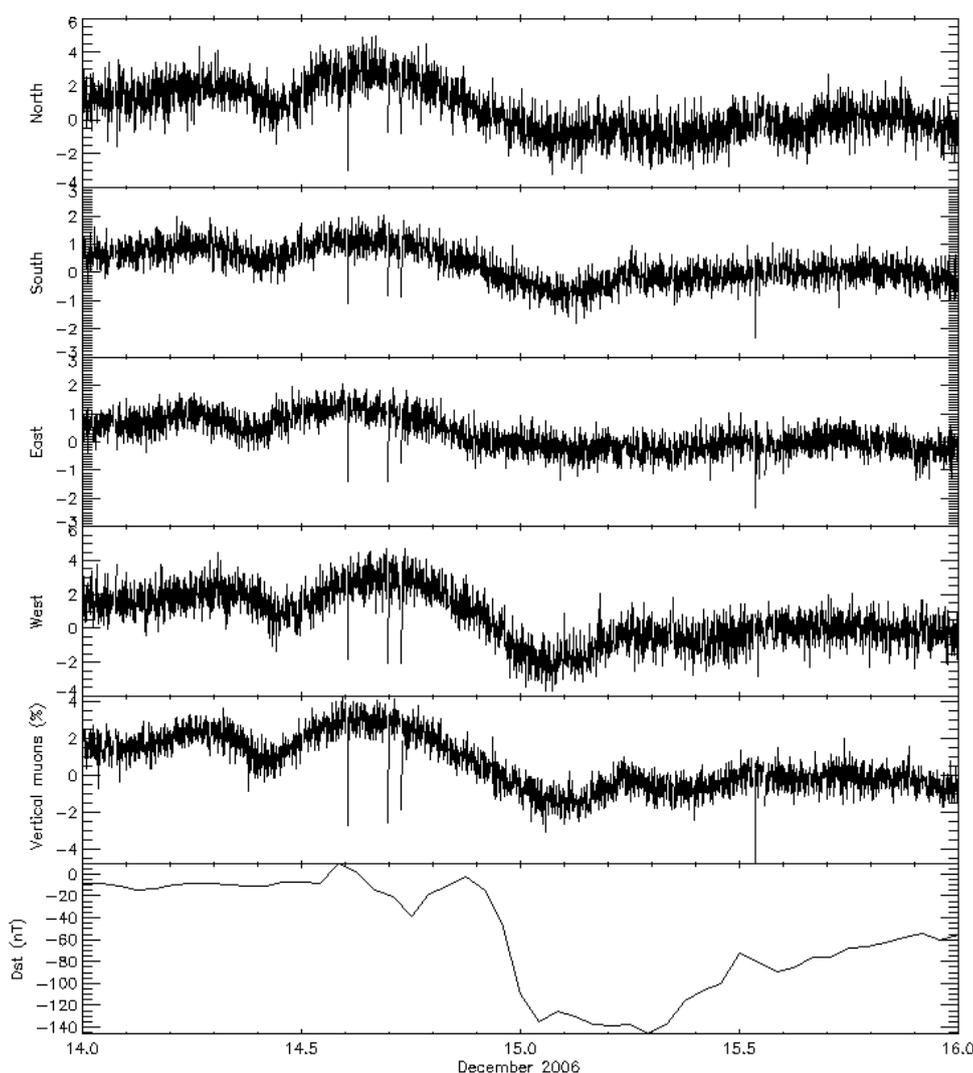


Figura 1 – Dados do Satélite ACE, TDM protótipo e índice Dst.

Um exemplo dos dados obtidos pelo telescópio expandido nas direções norte, sul, leste, oeste e vertical e sua resposta a tempestades geomagnéticas ocorrido entre os dias 14 e 16 de dezembro de 2006 como decréscimo de raios cósmicos (decréscimo de Forbush), pode-se ver a resposta comparando com queda do índice Dst que indica a ocorrência da tempestade e mostrado na Figura 2.

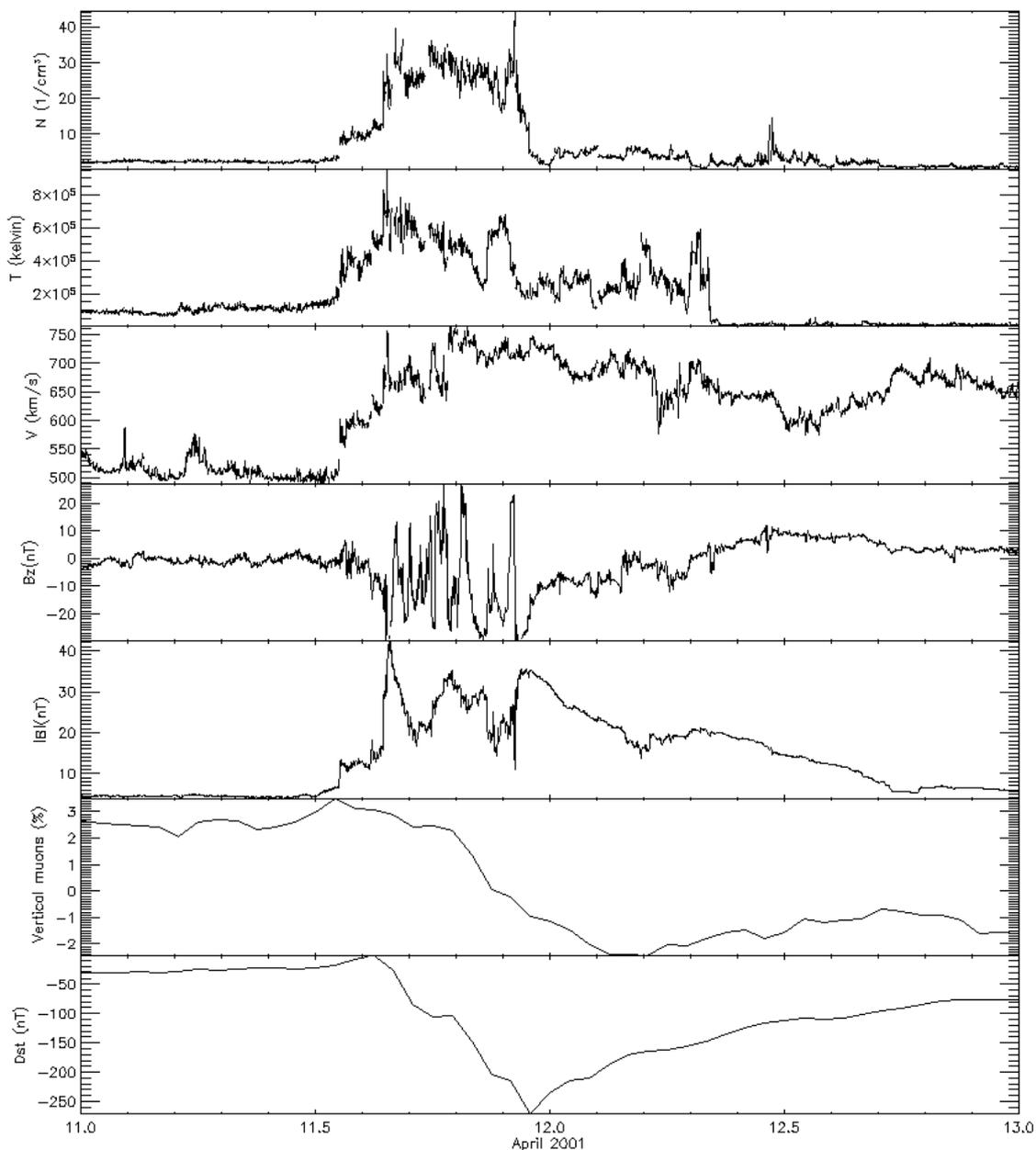


Figura 2 – TDM expandido. Direções norte, sul, leste, oeste, vertical e índice Dst.

Houve estreita interação com pesquisadores brasileiros e estrangeiros a partir dos contatos estabelecidos durante a participação do acadêmico em eventos científicos ou/e durante a visita dos pesquisados ao CRS/INPE – MCT.

O aluno participou dos seguintes eventos e atividades científicas:

- **II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia (II SBGEA)**, que foi realizado de 08 a 12 de setembro de 2008 em Campina Grande, PB.

- **23ª Jornada Acadêmica Integrada**, foi realizada no período de 3 a 6 de novembro de 2008. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

- Visita do pesquisador Prof. Dr. Kazuoki Munakata, da Shinshu University (Matsumoto, Japão) ao CRS/INPE – MCT e ao OES/CRS/INPE – MCT entre os dias 2 e 6 de dezembro de 2008. Na oportunidade o aluno acompanhou a substituição dos potenciômetros do TDM do OES, que são responsáveis pelos ajustes de ganho dos detectores individuais que formam o TDM. Após a substituição dos potenciômetros foi realizada, com orientação e supervisão do Prof. Dr. Kazuoki Munakata, a calibração do sistema.

Até a presente data o aluno submeteu e apresentou em eventos científicos, como autor ou co-autor, os seguintes resumos de trabalhos científicos:

1 - KEMMERICH, N.; DAL LAGO, A.; SCHUCH, N. J. ; BRAGA, Carlos Roberto; SILVEIRA, M. V. D. ; VIEIRA, L. R. ; STEKEL, T. R. C. . AMPLIAÇÃO DO PROTÓTIPO DO TELESCÓPIO DETECTOR DE MUONS RAIOS CÓSMICOS DE ALTA ENERGIA. In: II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia SBGEA 2008, 2008, Campina Grande. Anais - II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia, 2008.

2 - BRAGA, Carlos Roberto; DAL LAGO, A.; SCHUCH, N. J. ; KEMMERICH, N.; SILVEIRA, M. V. D. ; VIEIRA, L. R. ; SILVA, M. R. . Modulações de raios cósmicos de alta energia observados por detectores de muons e de neutrons. In: II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia SBGEA 2008, 2008, Campina Grande. Anais - II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia, 2008.

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

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

5 - KEMMERICH, N.; DAL LAGO, A.; SCHUCH, N. J. . AMPLIAÇÃO DO PROTÓTIPO DO TELESCÓPIO DETECTOR DE MUONS - TDM RAIOS CÓSMICOS DE ALTA ENERGIA SICINPE 2008. In: 23ª Jornada Acadêmica Integrada, 2008, Santa Maria. Anais da 23ª Jornada Acadêmica Integrada, 2008.

6 - KEMMERICH, N.; DAL LAGO, A.; SCHUCH, N. J. . AMPLIAÇÃO DO PROTÓTIPO DE TELESCÓPIO MULTIDIRECIONAL DE RAIOS CÓSMICOS DE

ALTA ENERGIA – MUONS: PARTICIPAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO TÉCNICO E DE ENGENHARIA, E ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS – SICINPE 2008. Resumos SICINPE 2008.

6. Resultados a serem obtidos até julho de 2009

O aluno dará continuidade ao estudo e análise de dados do TDM e do satélite ACE. Em paralelo, dará continuidade aos estudos bibliográficos dos processos físicos envolvidos na blindagem dos raios cósmicos por estruturas magnéticas como nuvens ou regiões de interação corrotante (as CIRs). Nos últimos três meses será elaborado relatório final de atividades no Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT e serão preparados trabalhos científicos a serem submetidos em congressos ou periódicos nacionais e internacionais.

**ANEXO 4 - CERTIFICADOS DE PARTICIPAÇÃO DE
EVENTOS COMO AUTOR.**

SBGEA – 2008

SBGEA 2008

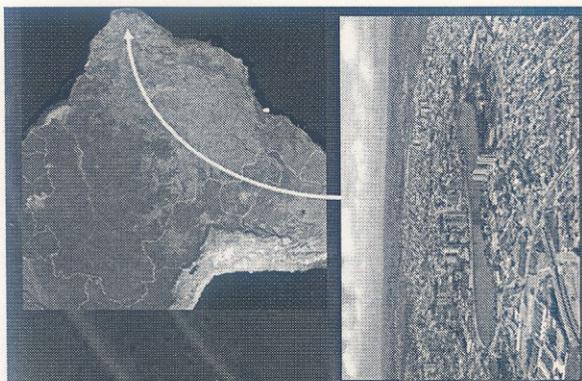
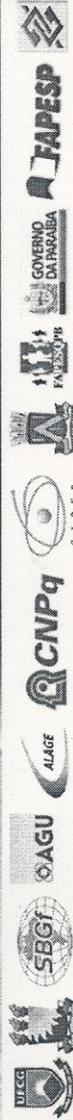
Certificado

Certificamos que **Nikolas Kemmerich** participou do II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia, realizado em Campina Grande de 08 a 11 de setembro de 2008 na qualidade de apresentador.

Campina Grande, 11 de setembro 2008.


Amauri Prágoso de Medeiros
(Coordenador do SBGEA2008)

<http://www.df.ufcg.edu.br/~sbgea2008/>



XXIII Jornada Acadêmica Integrada – 2008

