



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

**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.**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA**

(PIBIC/INPE – CNPq/MCT)

Carlos Roberto Braga (UFSM, Bolsista PIBIC/CNPq – INPE - MCT)

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

Dr. Alisson Dal Lago (DGE/CEA/INPE - MCT, Orientador)

E-mail: [dallago@dge.inpe.br](mailto:dallago@dge.inpe.br)

Julho de 2006

## **Dados de Identificação**

### **Bolsista:**

Carlos Roberto Braga

Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

### **Processo N°:**

Processo CNPq N° 105372/2005-6

### **Orientador:**

Alisson Dal Lago

Divisão de Geofísica Espacial

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

### **Co-orientador:**

Nelson Jorge Schuch

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais

Pesquisador, Coordenador da Ação 1275 do PNAE de Implantação do CRSPE e

Chefe da RSU/CIE/INPE – MCT

### **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.**

### **Local de execução do projeto:**

- Observatório Espacial do Sul, OES/CRSPE/INPE – MCT, São Martinho da Serra, RS;
- Laboratório de Clima Espacial, CRSPE/INPE - MCT, Santa Maria, RS;

- Projeto Desenvolvido no âmbito da parceria INPE – UFSM via Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria, LACESM/CT/UFSM, Santa Maria, RS.

**Pesquisadores e Estudantes Colaboradores:**

- Dr. Ezequiel Echer – DGE/CEA/INPE – MCT
- Dra. Damaris Kirsch Pinheiro - UFSM
- Doutorando Marlos Rockenbach da Silva – INPE - MCT
- Dr. Luiz Eduardo Antunes Vieira – DGE/INPE - MCT
- Acadêmico Jairo Francisco Savian – UFSM
- Acadêmico Samuel Martins da Silva – UFSM

**Pesquisadores da cooperação Brasil-Japão-EUA em Clima Espacial diretamente envolvidos no projeto:**

- Dr. Kazuoki Munakata - Physics Department, Faculty of Science, Shinshu University - Japão
- Dr. John W. Bieber - Bartol Research Institute, University of Delaware - EUA
- Dr. Takao Kuwabara - Bartol Research Institute, University of Delaware – EUA

*“Don’t be afraid to be weak  
Don't be too proud to be strong  
Just look into your heart my friend  
That will be the return to yourself  
The return to innocence”*

*(autor desconhecido)*

*Aos meus pais,*

*Léo Ivo Braga e*

*Isonia Iva Beling Braga*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao grande apoio da minha família: meus pais, Léo e Isonia, minha irmã, Carina, e seu noivo, Elissandro.

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

Prof. Kazuoki Munakata e sua equipe científica da Universidade de Shinshu, pela doação do Telescópio Multidirecional Cintilador de Muons do Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE – MCT) a UFSM e pela atenção fornecida durante sua visita ao OES.

Ao doutorando em Geofísica Espacial, Marlos Rockenbach da Silva que colaborou na realização dos meus trabalhos com seu conhecimento relativo ao detector de muons. Ao Dr. Takao Kuwabara, pelo aprendizado.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e ao seu Centro de Tecnologia (CT) pelo auxílio financeiro concedido para a participação em vários eventos científicos, tanto nacionais como internacionais.

À missão espacial ACE, WIND e IMP-8 e ao pessoal de operação da Universidade de Kyoto por disponibilizarem os dados interplanetários e de superfície utilizados neste projeto.

Aos grandes amigos do CRSPE/INPE – MCT que sempre estiveram dispostos a auxiliar. Aos inúmeros amigos e colegas da UFSM.

Ao Programa de Bolsas de Iniciação Científica do CNPq e ao Coordenador do programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT, pela bolsa, atenção e sempre alerta para informar e cobrar informações. Em especial e com carinho a secretária do Programa, Egídia Ignácio Rosa.

## RESUMO

A variabilidade solar está fortemente relacionada aos distúrbios espaciais nas proximidades da Terra, afetando sistemas tecnológicos terrestres. Estruturas ejetadas pelo Sol, quando direcionadas à Terra, blindam parte dos raios cósmicos de alta energia antes que atinjam a atmosfera terrestre. Detectores de superfície de raios cósmicos de alta energia (muons) observam essa blindagem e podem ser utilizados para previsão da chegada dessas estruturas com antecedência de até 8 horas. Para esta previsão foi instalado em março de 2001 um protótipo de telescópio detector de raios cósmicos – muons de alta energia no Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE – MCT). O objetivo deste trabalho é discutir a ampliação do detector realizada em 2005, mostrando as razões da ampliação e as vantagens técnicas e científicas das observações. O telescópio protótipo operou com 8 (2x2x2) detectores e com resolução temporal de uma hora. O telescópio expandido possui 56 (2x4x7) detectores com resolução temporal de um minuto. Os dados registrados pelos 2 telescópios são contagens da detecção de muons para direções determinadas. Para identificar a chegada de estruturas interplanetárias geofetivas foram utilizados os parâmetros de plasma e de campo magnético do meio interplanetário obtidos pelo satélite ACE da NASA. Para caracterizar as tempestades geomagnéticas associadas foi utilizado o índice Dst. Com a expansão física do telescópio a área de observação foi aumentada 7 vezes e o erro na contagem horária de muons na componente direcional vertical passou de 0,16% para 0,06%. O número de componentes direcionais passou de 9 para 13. O telescópio protótipo mostrou resposta a tempestades geomagnéticas analisadas em forma de decréscimo de contagens de muons.

## ABSTRACT

The solar variability is closely correlated with disturbances in the interplanetary space near the Earth, that may cause damage to technological systems. Structures ejected from the Sun can modulate high-energy cosmic ray that reach the Earth atmosphere. Ground based high-energy cosmic ray (muons) detectors can detect this modulation effect and can be used to observe it 8 hours prior the disturbance arrival in the Earth's atmosphere. In order to do this forecast, a high-energy muon detector telescope prototype was installed in the Southern Space Observatory (SSO/CRSPE/INPE – MCT). The objective of this work is to discuss the muon detector upgrade in 2005 and to show its scientific and technical advantages for observation. The prototype telescope was formed by 8 (2x2x2) detectors with 1 hour temporal resolution. The extended telescope has 56 (2x4x7) detectors with 1 minute temporal resolution. The data recorded for both telescopes are the counts in several defined direction. To identify the arrival of interplanetary geoeffective structures we used plasma and magnetic field data from ACE spacecraft. We used the Dst index to identify geomagnetic storms. With the telescope's physical expansion the observation's area increased 7 times and the error on hourly counts decrease from 0,16% to 0,06%. The number of directional telescopes has increased from 9 to 13. The prototype showed response to geomagnetic storms in the form of decrease on count rate of muons.



## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....	18
1.1 Introdução .....	18
1.2 Objetivos Específicos: .....	18
CAPÍTULO 2 - INTERAÇÃO SOL-TERRA, TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS, RAIOS CÓSMICOS .....	20
2.1 Interação Terra-Sol .....	20
2.2 O Sol .....	20
2.3 Vento Solar.....	22
2.4 Campo Magnético do Sol e Campo Magnético Interplanetário .....	22
2.5 Ejeções coronais de massa .....	23
2.6 Tempestades Geomagnéticas .....	24
2.7 Raios cósmicos .....	25
2.8 Clima Espacial.....	26
2.9 Danos em sistemas tecnológicos relacionados a variabilidade solar.....	27
2.10 Previsão de Clima Espacial .....	28
2.11 Efeitos da Radiação em Dispositivos Eletrônicos no Espaço .....	29
CAPÍTULO 3 - DETECÇÃO DE RAIOS CÓSMICOS (MUONS) ATRAVÉS DE FOTOMULTIPLICADORAS E CINTILADORES .....	30
3.1 Plásticos cintiladores .....	30
3.2 Características construtivas e operacionais de fotomultiplicadoras .....	31
3.2.1 Características gerais .....	31
3.2.2 Multiplicadores de elétrons .....	32
3.2.3 Resposta espectral.....	32
3.2.4 Material do fotocátodo .....	33
3.2.5 Ganho (amplificação de corrente).....	34
3.2.6 Corrente “de escuro” do ânodo.....	35
3.2.8 Efeitos do campo magnético .....	37

3.2.9 Características de temperatura.....	37
3.2.10 Fontes de ruído durante na detecção de fótons.....	38
3.2.11 Circuitos divisores de tensão .....	38
3.3 PMTs utilizadas no telescópio detector de muons .....	40
CAPÍTULO 4 - A EXPANSÃO DO TELESCÓPIO DETECTOR DE MUONS: DIFERENÇAS ENTRE O TELESCÓPIO PROTÓTIPO E EXTENDIDO .....	42
4.1 O telescópio protótipo.....	42
4.2 O telescópio expandido.....	45
CAPÍTULO 5 - OBSERVAÇÃO DE PRECURSORES DE TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS ATRAVÉS DE DETECTORES DE RAIOS CÓSMICOS DE ALTA ENERGIA (MUONS) $\geq 50\text{GeV}$ .....	50
5.1 Precursores de tempestades geomagnéticas observados por rede de detectores de muons .....	50
5.1.1 Fundamentação Teórica .....	50
5.1.2 Metodologia de análise de eventos de tempestades geomagnéticas .....	52
5.1.3 Resultados .....	56
5.1.4 Sumário e discussão.....	64
CAPÍTULO 6 - CALIBRAÇÃO DOS DADOS DO TELESCOPIO MULTIDIRECIONAL DETECTOR DE MUONS.....	67
6.1 Verificação da vedação luminosa dos detectores .....	67
6.2 Verificação dos níveis de ruído na saída dos amplificadores .....	68
6.3 Verificação do ganho da fotomultiplicadora.....	69
6.4 Escolha da tensão comum de alimentação das fotomultiplicadoras.....	71
CAPÍTULO 7 - ANÁLISE DE DADOS DO TELESCÓPIO PROTÓTIPO E DO TELESCÓPIO EXTENDIDO.....	74
7.1 Dados do meio interplanetário .....	74
7.2 Índice Dst .....	75
7.3 Dados do Telescópio Cintilador de Muons.....	75
7.4 Confeção de gráficos.....	75

CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES .....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
ANEXO 1 .....	85
ANEXO 2.....	101

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação artística da interação Sol –Terra. Fonte: SOHO/LASCO/EIT (ESA & NASA).....	20
Figura 2.2 - Estrutura do interior solar e atmosfera. Fonte: Kivelson e Russell (1995, p.61) .....	21
Figura 2.3 - Representação das linhas de campo magnético da coroa solar (círculo no centro da figura) para um período de menor atividade solar. A linha escura que atravessa o Sol indica seu eixo de rotação. Fonte: Modificado de <a href="http://www.sp.ph.ic.ac.uk/~forsyth/reversal/">http://www.sp.ph.ic.ac.uk/~forsyth/reversal/</a> .....	22
Figura 2.4 - O campo magnético interplanetário tem, em larga escala, o aspecto de uma espiral de Arquimedes devido à rotação solar. Fonte: Modificado de <a href="http://www.gsfc.nasa.gov/indepth/photos_spaceearly.html">http://www.gsfc.nasa.gov/indepth/photos_spaceearly.html</a> . (apud Da Silva, 2005).....	23
Figura 2.5 - Seqüência de imagens de uma CME observada pelo coronógrafo LASCO C2 a bordo do satélite SOHO. As porções mais claras da figura indicam maior concentração de plasma. Pela seqüência de figuras pode-se perceber uma expulsão de plasma do Sol. Fonte: <a href="http://sohowww.nascom.nasa.gov">http://sohowww.nascom.nasa.gov</a> (apud Da Silva, 2005) .....	24
Figura 2.6 – Fenômenos que afetam o Clima Espacial, energias envolvidas, tempo de duração de seus efeitos e principais tipos de danos em sistemas tecnológicos. Fonte: Schwenn (comunicação pessoal). (apud Dal Lago, 2003) .....	27
Figura 2.8 – Sistemas afetados por tempestades geomagnéticas. Fonte: <a href="http://www.spaceweathercenter.org/">http://www.spaceweathercenter.org/</a> .....	28
Figura 2.9 - Mapeamento de densidade de erros em dados (em escala logarítmica) a bordo do experimento ICARE (Novembro 2000 – Setembro 2002). Fonte: D. Falguère <i>et al</i> , 2000, extraído de Duzzelier, 2005 .....	29
Figura 3.1 - Quatro cintiladores lado a lado formando uma área de superfície de 1m <sup>2</sup> . Os cintiladores estão colocados em caixa de metal com espessura de 1,6 mm que forma a base de um dos 56 detectores de telescópio. Foto tirada em 22/11/2006.....	30

Figura 3.2 - Esquema de fotomultiplicadora com 8 dinodos, fotocátodo, ânodo envolvidos por um tubo de vácuo. Fonte: <http://holly.orc.soton.ac.uk/~wsb/phys1004/index.html>..... 31

Figura 3.3 - Gráfico mostrando a resposta espectral das fotomultiplicadoras utilizadas no Telescópio Cintilador de Muons instalado no OES. A resposta máxima está na faixa entre 400 e 500 nm. Fonte: [www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877\\_TPMH1112E03.pdf](http://www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877_TPMH1112E03.pdf) ..... 33

Figura 3.4 - Gráfico mostrando a sensibilidade luminosa do ânodo e o ganho como funções da tensão fornecida à PMT. Nota-se que os eixos das ordenadas estão em escala logarítmica. Pode-se supor a partir do aspecto do gráfico do ganho que este é função potencial da tensão. Como é explicado no item 3.2, essa suposição é verdadeira. Fonte: [www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877\\_TPMH1112E03.pdf](http://www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877_TPMH1112E03.pdf) ..... 35

Figura 3.5 - Gráfico mostrando a corrente de escuro do ânodo como função da tensão aplicada nas fotomultiplicadoras. Fonte: [www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877\\_TPMH1112E03.pdf](http://www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877_TPMH1112E03.pdf) ..... 36

Figura 3.6 - Diagrama esquemático de circuito divisor de tensão para saída com saída para corrente contínua. Fonte: [www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877\\_TPMH1112E03.pdf](http://www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877_TPMH1112E03.pdf) ..... 39

Figura 3.7 - Diagrama esquemático de circuito divisor de tensão utilizado para contagem de pulsos. Fonte: [www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877\\_TPMH1112E03.pdf](http://www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877_TPMH1112E03.pdf) ..... 39

Figura 3.8 - Seqüência de pulsos de saída de uma fotomultiplicadora em aplicações típicas. Fonte: [www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877\\_TPMH1112E03.pdf?](http://www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877_TPMH1112E03.pdf?)..... 39

Figura 3.9 - Saída de pulsos resultante da seqüência de pulsos descrita na figura 3.8. Fonte: [www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877\\_TPMH1112E03.pdf](http://www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877_TPMH1112E03.pdf)..... 40

Figura 3.10 – PMT instalada no telescópio detector de muons expandido. Ao lado dela está o amplificador. .... 41

Figura 4.1 - Foto de protótipo telescópio cintilador de muons instalado no OES/CRPSE/INPE – MCT mostrando em azul os 8 detectores em duas camadas. A estrutura metálica de sustentação tem cor amarela e pode se notar a camada de chumbo entre as duas camadas. Os sistemas eletrônicos não estão a mostra. ....	43
Figura 4.2 - Fotos do telescópio detector de muons expandido em dezembro de 2005.....	46
Figura 4.3 – Fontes de alimentação e sistema de processamento de sinais do telescópio detector de muons.....	48
Figura 4.4 – Computador utilizado para gravação dos dados e monitoramento do sistema.....	49
Figura 5.1 - Direção de visão assintótica dos telescópios de muons. Cada um dos símbolos (quadrado para Nagoya, triângulo para Hobart e losango para Mawson-PC) mostra a direção de visão assintótica de uma partícula incidente em cada telescópio com a rigidez média primária ( $P_M$ ). $P_M$ para cada telescópio está listado na Tabela 1. As linhas atravessando cada círculo representam os limites de visão correspondendo aos 80% da resposta central de cada telescópio (ver texto). Fonte.: Munakata et al, 2000 .....	54
Figura 5.2 - Amostra de distribuição de ângulos de <i>pitch</i> para uma tempestade geomagnética ocorrida no dia 9 de setembro de 1992. De cima para baixo, os gráficos mostram o índice geomagnético $K_p$ , a contagem relativa do detector de nêutrons de McMurdo, a distribuição do ângulo de <i>pitch</i> dos raios cósmicos antes da chegada da tempestade, a intensidade do campo magnético interplanetário e a velocidade do vento solar, todos como função do tempo (horas) medido em relação ao início súbito da tempestade (SSC) associado com a tempestade geomagnética do dia 9 de setembro de 1992. No terceiro gráfico de cima para baixo, cada círculo representa uma medida horária de um único telescópio para um dado tempo (abscissa) e ângulo de <i>pitch</i> (ordenada) do ângulo de visão do telescópio. Um ângulo de <i>pitch</i> de 0° corresponde a direção do campo magnético interplanetário no sentido do Sol. Círculos abertos e fechados representam, respectivamente, um excesso e um déficit na intensidade de raios cósmicos em relação à média, sendo que o diâmetro de cada círculo é diretamente proporcional	

a intensidade do decréscimo ou excesso. Uma escala está indicada abaixo e à direita na figura. Os dados entre -0.5 horas antes do SSC são excluídos da plotagem. A variação resultante do efeito da temperatura e da pressão está removida nos dados (ver texto). O ângulo de *pitch* é calculado usando a média horária do IMF nos dados do OMNI e a direção de visão assintótica de cada telescópio. Intervalos nos quais os dados do IMF não estão disponíveis são denotados por uma barra no eixo horizontal superior. Nesses períodos de tempo, foi assumido campo de Parker com velocidade de vento solar de 400Km/s. Fonte: Munakata et al., 2000..... 57

Figura 5.3 - Distribuição do ângulo de *pitch* de eventos de tempestade geomagnética selecionados são mostrados da mesma forma que no terceiro gráfico (de cima para baixo) na Figura 2. A escala está indicada está indicada no quarto gráfico na direita abaixo. Somente quatro eventos retirados de um total de 25 eventos são plotados nesta figura (ver Tabela 2). O índice  $K_p$  máximo usado nestes eventos selecionados é inferior àquele usado nos eventos selecionados por Gosling. Fonte: Munakata et al., 2000..... 59

Figura 5.4 - Distribuição de intensidade em precursores do tipo cones de perdas (LC). As intensidades ( $\Delta I_{i,j}(t)$ ) amostradas em quatro precursores LC na Figura 2 e 3 são plotadas como funções do ângulo de *pitch*. O número do evento e o tempo de amostragem medido em relação ao SSC estão indicados em cada gráfico. Os decréscimos de intensidade nas vizinhanças de ângulos de *pitch* de  $0^\circ$  em consequência do cone de perdas é visto claramente. Fonte: Munakata et al., 2000..... 62

Figura 5.5 - Distribuição do ângulo de *pitch* para os eventos de tempestades geomagnética selecionados por Gosling. Semelhante a Figura 4.3 mas para eventos de Gosling da Tabela 4.2. Nesta figura, são mostrados somente cinco eventos de um total de 14 (ver tabela 4.2). Fonte: Munakata et al., 2000 ..... 63

Figura 5.6 - Histogramas de (à esquerda) o índice  $K_p$  máximo e (à direita) o tempo de aparecimento em relação aos precursores. Eventos que se enquadram exatamente no limite dos escaninhos, são colocados naquele imediatamente superior, isto é, imediatamente à direita. Conforme a Tabela 5.2, LC, EV e NP na

legenda representam, respectivamente, precursores do tipo *loss cone* (cone de perdas), *enhanced variation* (variação realçada) e *no precursor* (nenhum precursor). Nota-se que o tempo de aparecimento no histograma à direita é somente uma estimativa conservativa e o precursor possivelmente tem estado presente mais cedo em muitos casos (ver texto). Fonte: Munakata et al., 2000 ..... 64

Figura 5.8 - Possível acréscimo na cobertura da rede de detectores de muons sugerido pelo trabalho publicado em 2000. A colocação de um único detector multidirecional com 17 telescópios (círculos sólidos) em São Martinho da Serra, Brasil (29.44°S, 53.81W) acarretaria um grande aumento na cobertura se combinado com a rede de detectores de muons existente (símbolos abertos). As direções de visão assintótica são mostradas da mesma forma que na Figura 5.1. Fonte: Munakata et al., 2000. .... 66

Figura 6.1 - Gráfico de contagens/10 minutos no tempo (dado na hora internacional de Greenwich) para 7 detectores da camada superior numerados de 21 a 27. Percebem-se problemas de vedação luminosa no detector U22 através dos incrementos de contagem do período do dia com insolação (a sala onde se encontra o telescópio esteve sujeita a luz solar), aproximadamente entre as 12h e 0h. Os intervalos de tempo nos qual a contagem é nula são referentes à manutenção do sistema. Fonte: Kuwabara, 2005 (comunicação pessoal). .... 68

Figura 6.2 - Fotografia da tela de osciloscópio utilizado na calibração dos detectores de muons mostrando as saídas do amplificador. No sinal mostrado na porção superior da figura, percebe-se que o nível de ruído é relativamente pequeno com intensidade de aproximadamente 100mV. Dessa forma, o nível de ruído está próximo do ideal. Na porção inferior da figura, vê-se sinal com formato de onda quadrado onde o pulso é gerado caso o nível do sinal na porção superior da imagem seja superior a 500mV, sendo sua largura proporcional a intensidade do referido sinal. .... 69

Figura 6.3 - Contagem de muons por minuto para os detectores L3-9 como função da tensão aplicada entre o fotocátodo e o fotoânodo em suas respectivas fotomultiplicadoras. A diferença de contagem entre os detectores para uma dada tensão é consequência da diferença entre o ganho entre duas fotomultiplicadoras. Fonte: Kuwabara, 2005 (comunicação pessoal). .... 70



Figura 6.4 - Contagem de muons por minuto para os detectores L3-9 como função da tensão aplicada entre o fotocátodo e o fotoânodo em suas respectivas fotomultiplicadoras após ajustes independentes de tensão. Fonte: Kuwabara, 2005 (comunicação pessoal). .....	71
Figura 6.5 - Contagens de muons como função da tensão comum de alimentação das PMTs para todos os detectores da camada superior. Fonte: Kuwabara, 2005 (comunicação pessoal). .....	72
Figura 6.6 - Contagens de muons como função da tensão comum de alimentação das PMTs para todos os detectores da camada inferior. Fonte: Kuwabara, 2005 (comunicação pessoal). .....	73
Figura 7.1 - Evento de tempestade geomagnética intensa ocorrido no período de 7 a 15 de fevereiro de 2004. ....	76
Figura 7.2 – Evento de tempestade geomagnética ocorrido entre 14 e 21 de julho de 2004. ....	77
Figura 7.3 – Evento de tempestade geomagnética ocorrido de 9 a 17 de outubro de 2004. ....	78
Figura 7.4 - Evento de tempestade geomagnética ocorrido de 5 a 12 de novembro de 2004. ....	79

## CAPÍTULO1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

### 1.1 Introdução

A variabilidade solar está fortemente relacionada aos distúrbios espaciais nas proximidades da Terra, afetando de várias maneiras os sistemas tecnológicos terrestres, tais como sistemas de telecomunicações. Entre os fenômenos solares mais importantes estão as Ejeções de Massa Coronal (CME da sigla em inglês), que são as principais causas das Tempestades Geomagnéticas (Gosling et al., 1990, 1991). As CMEs ejetam enormes quantidades de matéria solar no meio interplanetário onde a Terra se encontra (Hundhausen, 1997 e referências daquele texto). Está bem estabelecido que Tempestades Geomagnéticas intensas, ou seja, cujo índice geomagnético Dst decresce a valores menores que  $-100$  nT, são causadas pela chegada das CMEs na Terra, as quais possuem campos magnéticos interplanetários direcionados para o Sul Terrestre e alta velocidade de plasma (Gonzalez and Tsurutani, 1987; Tsurutani et al., 1988; Tsurutani et al., 1992; Gonzalez et al., 1999). Detectores de raios cósmicos de alta energia localizados na superfície terrestre, ou seja, detectores de partículas oriundas da interação destes raios cósmicos com a atmosfera da Terra, neste caso os muons, observam a ocorrência de blindagem dos mesmos quando da aproximação do plasma das CMEs na Terra, podendo ser utilizados para detecção da chegada das mesmas na Terra com até 8 horas de antecedência (Munakata et al., 2000).

Desde 2001, está em operação um protótipo de telescópio detector de raios cósmicos de alta energia no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE - MCT, em São Martinho da Serra, RS. Este protótipo foi instalado através de uma colaboração entre Brasil e Japão, e será ampliado através de uma colaboração multilateral entre Brasil, Japão e Estados Unidos, para um detector maior. Tanto o protótipo em operação quanto o novo detector são parte da Rede Internacional de Detectores de Raios Cósmicos de Alta Energia, que além do telescópio de São Martinho da Serra, conta com mais dois telescópios, um em Nagoya (Japão) e outro em Hobart (Austrália).

### 1.2 Objetivos Específicos:

Os objetivos deste Projeto envolvem qualificar o acadêmico com sua participação no desenvolvimento técnico e de engenharia, e análise preliminar dos

dados oriundos da ampliação do Telescópio Multi-direcional de Raios Cósmicos de Alta Energia – Muons, instalado no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE - MCT, Parceria INPE-UFSM, Cooperação Brasil-Japão-USA em Clima Espacial. Avaliar a modulação sofrida por raios cósmicos de alta energia devida à variabilidade do Clima Espacial, utilizando dados tanto do protótipo do telescópio que operou de 2001 ao início do ano de 2005, quanto dados do novo telescópio que está sendo instalado, com a participação ativa do aluno. Trata-se de uma oportunidade singular para a formação de cientistas e de engenheiros com forte participação na atividade de instrumentação, permitindo uma melhor capacidade de avaliar as características dos dados obtidos pelo telescópio. Pretende-se que o aluno realize, além dos conhecimentos básicos de engenharia eletrônica, correlação de sinais, análise de eventos de tempestades geomagnéticas utilizando dados de satélites do meio interplanetário, índices geomagnéticos, e dados (de superfície) de raios cósmicos do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT.

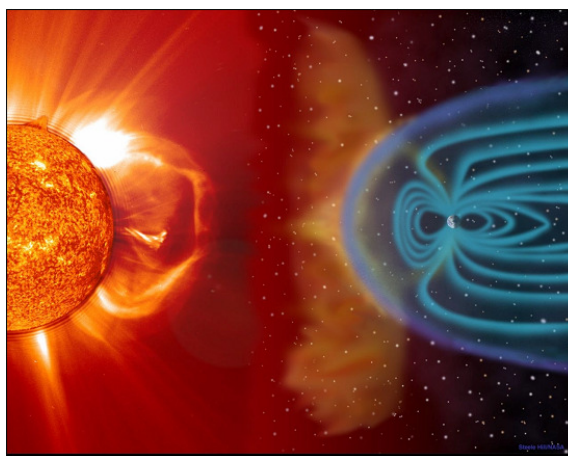
## CAPÍTULO 2 - INTERAÇÃO SOL-TERRA, TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS, RAIOS CÓSMICOS

### 2.1 Interação Terra-Sol

O meio interplanetário é a região dominada pela atividade do Sol e pelos processos físicos que ocorrem em seu interior. Esta região é influenciada pelo vento solar, expansão da atmosfera solar.

O Sol é o “motor” que controla tudo o que ocorre no meio interplanetário. Ele é a fonte de estruturas magnéticas do meio interplanetário, que muitas vezes alcançam a vizinhança da Terra, podendo causar efeitos diversos na Terra, muitas vezes associados a perturbações na magnetosfera terrestre. Outro efeito é alterar a população de raios cósmicos que chegam a atmosfera terrestre.

Uma ilustração artística da interação Sol-Terra é dada pela Figura 2.1. O Sol (extremidade esquerda da figura) ejetando material em estado de plasma, que se propaga pelo meio interplanetário atingindo, em seguida, o campo magnético terrestre (extremidade direita da figura).



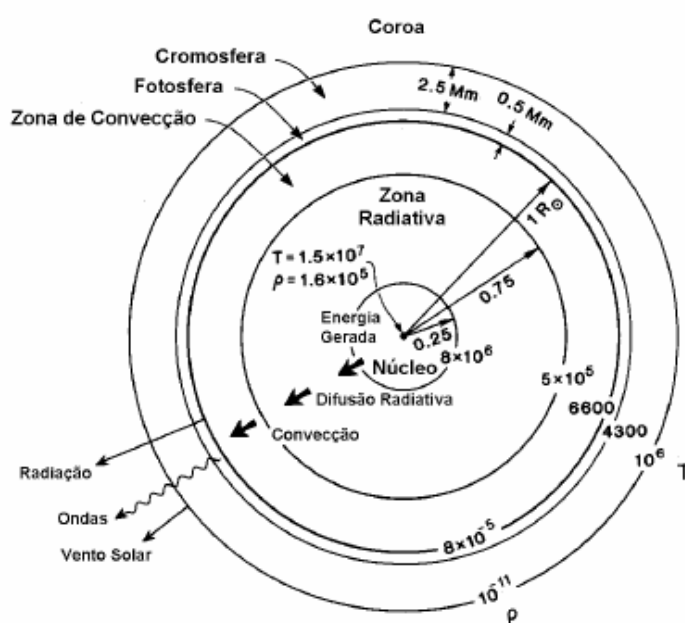
**Figura 2.1** - Representação artística da interação Sol –Terra.  
Fonte: SOHO/LASCO/EIT (ESA & NASA)

### 2.2 O Sol

O Sol é uma estrela ativa com uma massa média de  $1,99 \times 10^{30}$  g, raio de 696.000km e potência luminosa de  $3,9 \times 10^{26}$  W. É formado predominantemente por

hidrogênio e hélio. A energia solar é originada em seu núcleo no processo de fusão de núcleos de hidrogênio (prótons), formando núcleos de hélio (partículas alfa).

O Sol é costuma ser dividido nas partes: a) núcleo (do centro até 0,25 raio solar), onde ocorre o processo de fusão; b) zona radiativa (de 0,25 a 0,75 raio solar), onde a energia é dissipada pelo processo de difusão radiativa; c) zona convectiva (de 0,75 a 1 raio solar), onde a energia é dissipada na forma de convecção e d) atmosfera solar, que é dividida em 3 outras partes. Um esquema com as principais partes do Sol é mostrado na Figura 2.2.



**Figura 2.2** - Estrutura do interior solar e atmosfera. Fonte: Kivelson e Russell (1995, p.61)

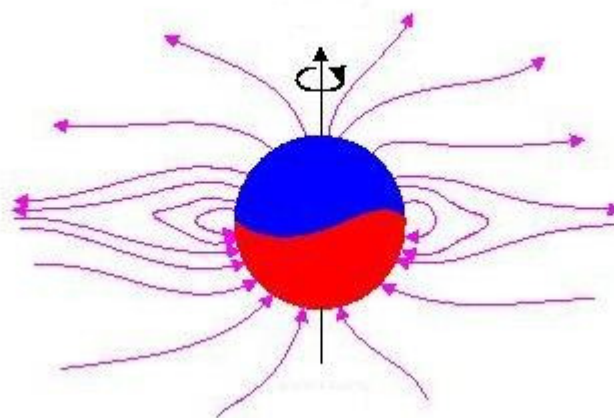
A atmosfera solar, em função de suas características e processos físicos é dividida em fotosfera, cromosfera e coroa. A fotosfera é a porção inferior com uma espessura de 0,5 Mm e temperatura da ordem de 6600K. Na fotosfera se origina a radiação visível, com um espectro contínuo e irradia toda a energia que chega a Terra. A cromosfera localiza-se logo acima da fotosfera, tem espessura de 2,5 Mm e temperatura variando entre 4300K a 1MK. Acima da cromosfera está a coroa, que tem uma temperatura de 1MK. Esta camada não tem limite superior já que se expande para o espaço interplanetário com o vento solar (adaptado de Da Silva, 2005).

### 2.3 Vento Solar

O vento solar é um plasma (gás de íons e elétrons) emitido radialmente pelo Sol como resultado de diferença de pressão dos gases da coroa solar e do espaço interestrelar nas proximidades do Sol. Este plasma espalha-se por todo meio interplanetário, passando pela Terra com uma velocidade média de 400-500 km/s e densidade média de prótons e elétrons de  $5 \text{ cm}^{-3}$  (Brandt, 1970). Seu fluxo propaga-se até um ponto onde a pressão do vento interestrelar e do vento solar se equilibram, chamada de heliopausa, uma grande onda de choque, cuja localização não é muito bem estabelecida.

### 2.4 Campo Magnético do Sol e Campo Magnético Interplanetário

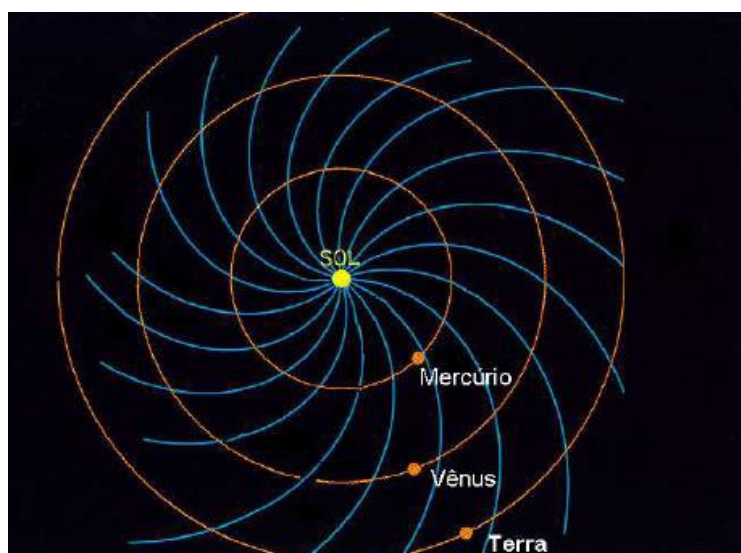
O Sol possui um campo magnético de intensidade  $10^{-4}$  T na superfície da Fotosfera. Nas proximidades do Sol (1,5 a 2,5 raios solares), este campo é aproximadamente dipolar (Pneuman e Kopp, 1970), sendo seu eixo próximo ao eixo de rotação do Sol (Figura 2.3). Sua polarização inverte aproximadamente a cada 11 anos.



**Figura 2.3** - Representação das linhas de campo magnético da coroa solar (círculo no centro da figura) para um período de menor atividade solar. A linha escura que atravessa o Sol indica seu eixo de rotação. Fonte: Modificado de <http://www.sp.ph.ic.ac.uk/~forsyth/reversal/>

Devido ao fato do vento solar ser altamente condutor, pode-se mostrar por meio da teoria magnetohidrodinâmica (MHD), que o campo magnético do Sol é transportado “congelado” para grandes distâncias, constituindo o chamado campo magnético interplanetário (IMF, da sigla em inglês *interplanetary magnetic field*).

Como consequência da rotação do Sol, o campo magnético interplanetário tem, em larga escala, o aspecto de uma espiral de Arquimedes, sendo quase radial próximo ao Sol, e praticamente perpendicular à direção radial além de 5-10 UA. Nas proximidades da Terra, 1 UA, a CMI tem inclinação de aproximadamente 45° e intensidade de aproximadamente 5 nT (Figura 2.4).



**Figura 2.4** - O campo magnético interplanetário tem, em larga escala, o aspecto de uma espiral de Arquimedes devido à rotação solar. Fonte: Modificado de [http://www.gsfc.nasa.gov/indepth/photos\\_spaceearly.html](http://www.gsfc.nasa.gov/indepth/photos_spaceearly.html).

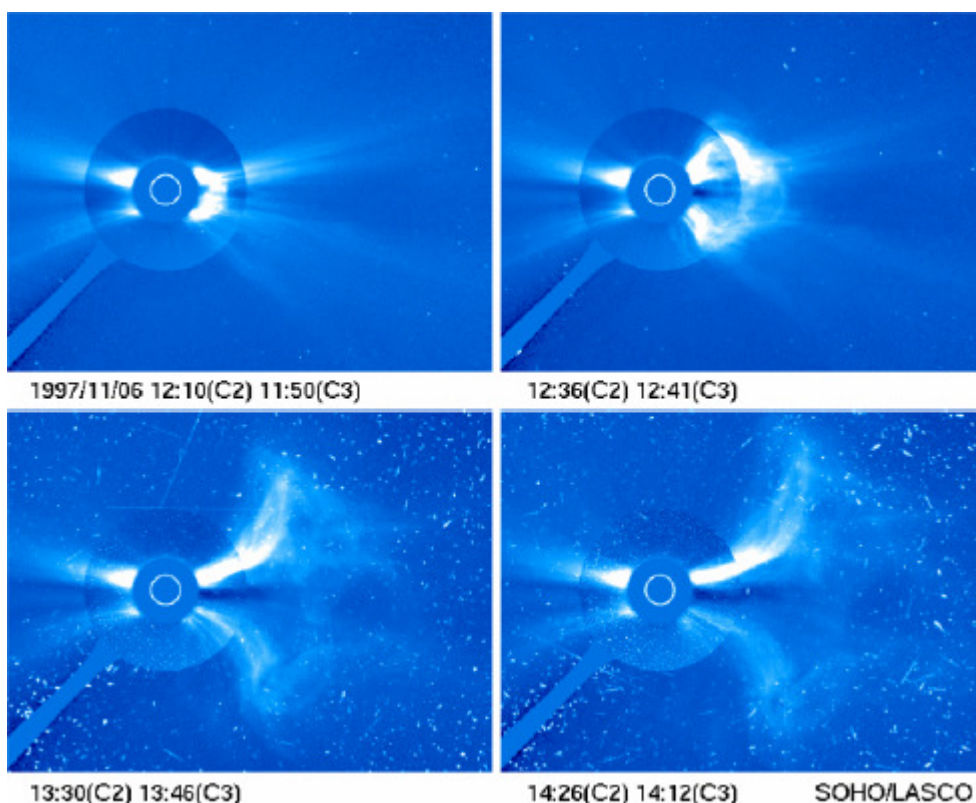
A região onde a CMI domina os processos é conhecida como Heliosfera.

### 2.5 Ejeções coronais de massa

As ejeções coronais de massa (CME, da sigla em inglês, *coronal mass ejections*) são um exemplo de atividade Solar. Foram descobertas na década de 70 e a partir de observações de seqüência de imagens de coronógrafos, que revelam a densidade de uma região da coroa solar em função do tempo. Desde então têm sido objeto de intenso estudo.

As CMEs consistem em desprendimentos de plasma do Sol, em seguida se propagando do meio interplanetário. Após a ejeção estas estruturas propagam-se pelo espaço interplanetário, quando recebem a designação de ICME (da sigla em inglês, *interplanetary coronal mass ejections*). Quando as ICMEs interagem com o campo magnético terrestre produzem distúrbios geomagnéticos. Devido a sua velocidade de várias centenas de km/s as ICMEs estão acompanhadas de ondas de choque.

Desde o lançamento do satélite SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*) em 1997, destacou-se a utilização do instrumento LASCO (*Large Angle and Spectroscopic Coronagraph*), que é um coronógrafo baseado em câmera CCD (*Coupled Charged Device*). A Figura 2.5 mostra uma seqüência de imagens de uma CME observada pelo coronógrafo LASCO.



**Figura 2.5** - Seqüência de imagens de uma CME observada pelo coronógrafo LASCO C2 a bordo do satélite SOHO. As porções mais claras da figura indicam maior concentração de plasma. Pela seqüência de figuras pode-se perceber uma expulsão de plasma do Sol. Fonte:

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

## 2.6 Tempestades Geomagnéticas

Observações realizadas na metade do século XIX baseadas em magnetômetros terrestres constataram episódios de fortes flutuações no Campo Magnético Terrestre, sendo denominadas “Tempestades Geomagnéticas” ou “Tempestades Magnéticas” (Gonzalez et al., 1994). Sua assinatura característica é um decréscimo na componente H, horizontal, do Campo Magnético Terrestre durante cerca de algumas dezenas de horas. (Kamilde et al., 1998)



Nesses eventos ocorre grande transferência de energia do vento solar para o campo magnético terrestre, havendo precipitação de partículas energéticas no vento solar nas regiões aurorais, intensificando as correntes da magnetosfera.

Para sua ocorrência é necessário que o campo magnético interplanetário apresente substancial componente na direção Z negativa do sistema de coordenadas Magnetosfera-Sol (GSM)

As tempestades geomagnéticas são caracterizadas tipicamente por três fases: a) fase inicial, onde o componente horizontal aumenta a valores positivos; b) fase principal, cuja magnitude é de dezenas de nano-Teslas negativos; e c) fase de recuperação, na qual o campo magnético vai gradativamente retornando aos valores médios. As escalas de tempo das três fases são variáveis. A primeira é de alguns minutos a algumas horas. A segunda de meia-hora a várias horas. A terceira de várias horas a uma semana. (Tsurutani et al., 2000).

## 2.7 Raios cósmicos

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

Muitos raios cósmicos viajam a velocidades próximas à da luz. Os mais energéticos 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  $10^{-10} \text{ cm}^{-3}$  nas vizinhanças da Terra. A densidade total de energia para raios cósmicos é  $\sim 1 \text{ eV cm}^{-3}$  (Mursula, 2003).

A atmosfera terrestre e o campo geomagnético protegem-nos contra a exposição excessiva a estas partículas. Assim que os 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, 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*).

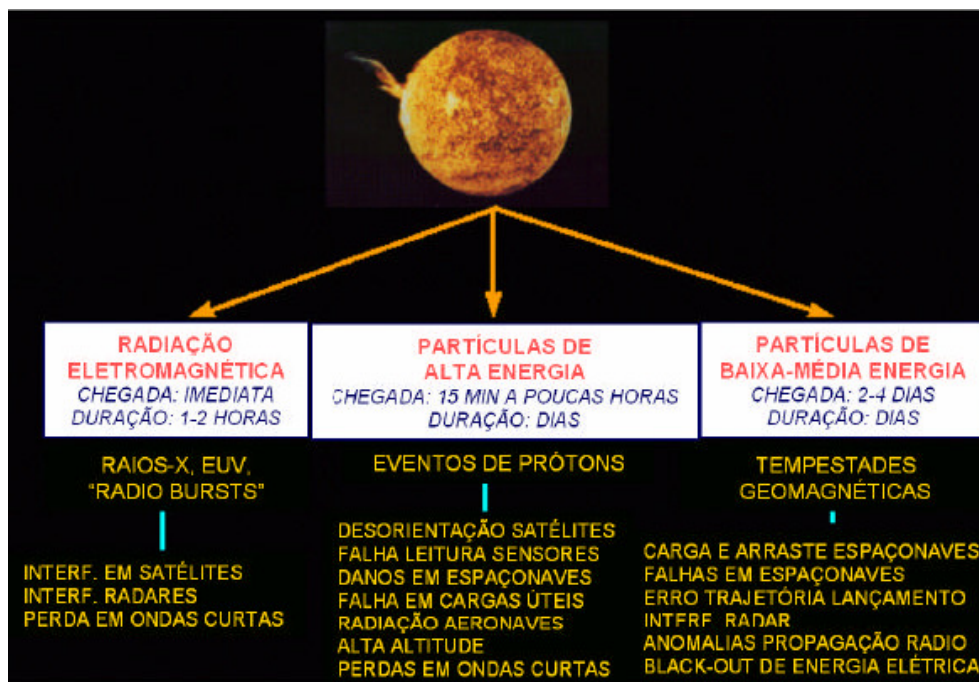
Quando partículas de raios cósmicos atingem o topo da atmosfera, estas passam por reações nucleares que fazem com que um conjunto de partículas secundárias seja formado. Se estas partículas primárias possuírem energias relativísticas, a maioria das partículas secundárias propagar-se-á aproximadamente na mesma direção 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.

## 2.8 Clima Espacial

Clima Espacial é o conjunto de condições que mudam constantemente no meio interplanetário como resposta a atividade solar. O vento solar, a radiação eletromagnética e o campo magnético interplanetário são exemplos dessas condições. (adaptado de Russell, 2004). R. Russell afirma ainda que o Sol é o principal forçante (*primary driver*) do Clima Espacial.

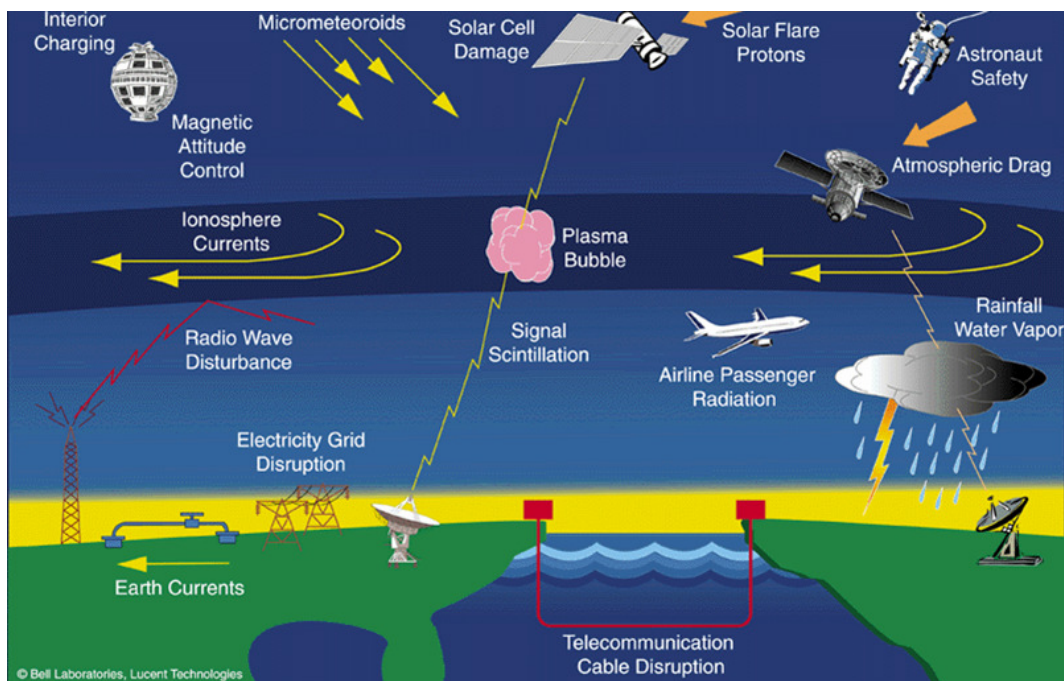
Os três principais fenômenos que afetam o Clima Espacial são indicados na Figura 2.6, indicando as energias envolvidas, os tempos de propagação destes fenômenos deste o Sol até a Terra, a duração de seus efeitos e os tipos de danos em sistemas tecnológicos (ver detalhes no próximo item).



**Figura 2.6** – Fenômenos que afetam o Clima Espacial, energias envolvidas, tempo de duração de seus efeitos e principais tipos de danos em sistemas tecnológicos. Fonte: Schwenn (comunicação pessoal). (apud Dal Lago, 2003)

## 2.9 Danos em sistemas tecnológicos relacionados a variabilidade solar

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).



**Figura 2.8** – Sistemas afetados por tempestades geomagnéticas. Fonte: <http://www.spaceweathercenter.org/>

## 2.10 Previsão de Clima Espacial

Como forma de tentar reduzir os danos em sistemas tecnológicos, foram desenvolvidos diversos métodos para previsão de Clima Espacial.

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 uma poderosa ferramenta para previsão de Clima Espacial. Maiores detalhes deste estudo são dados no Capítulo 5.

Devido a grande massa necessária nos detectores de raios cósmicos de alta-energia, instrumentos localizados em superfície terrestre continuam sendo o estado da arte para estudar estas partículas, visto que a massa envolvida em 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

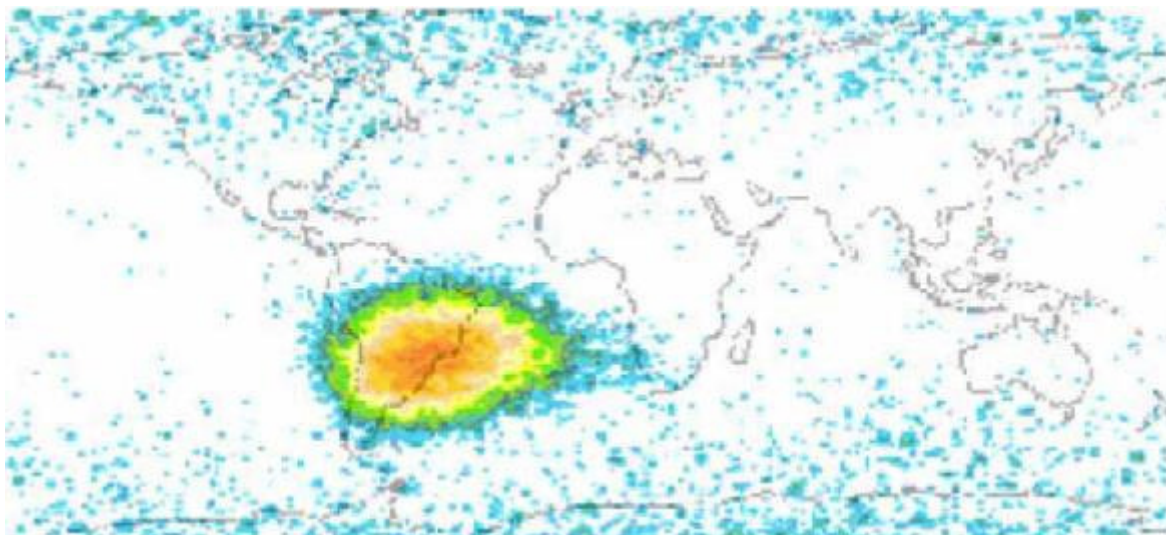
penetração e b) manutenção da direção e do sentido de chegada do raio cósmico primário que os originou, enquanto que as outras partículas, em geral, sofrem desvios.

### 2.11 Efeitos da Radiação em Dispositivos Eletrônicos no Espaço

Componentes eletrônicos modernos são extremamente sensíveis a radiação do meio espacial. A presença de alta energia e/ou partículas ionizadas (prótons, íons pesados e elétrons) induzem diversos efeitos. Estes efeitos variam de redução de performance a disrupções funcionais que podem afetar os sistemas em operação. Satélites terão tempo de vida mais curto ou maior número de falhas (Duzellier, 2005).

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

Uma cartografia de anomalias (perda de dados) observadas em memórias na órbita do satélite SAC-C (707 km x 98,2°) é mostrada na Figura 2.9

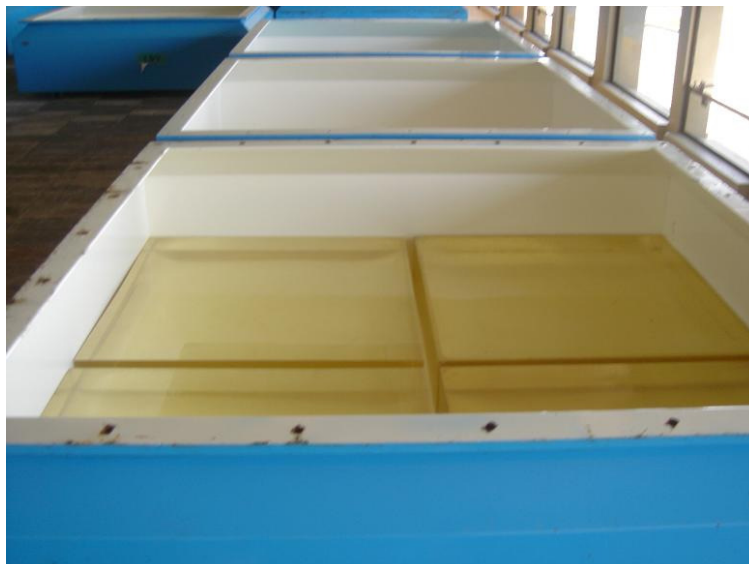


**Figura 2.9** - Mapeamento de densidade de erros em dados (em escala logarítmica) a bordo do experimento ICARE (Novembro 2000 – Setembro 2002). Fonte: D. Falguère *et al*, 2000, extraído de Duzellier, 2005

## CAPÍTULO 3 - DETECÇÃO DE RAIOS CÓSMICOS (MUONS) ATRAVÉS DE FOTOMULTIPLICADORAS E CINTILADORES

### 3.1 Plásticos cintiladores

Os plásticos cintiladores utilizados no Telescópio Cintilador de Muons do OES/CRSPE/INPE são produzidos pela companhia japonesa *C. I. Industrial Company Co.* Todos cintiladores tem dimensões 25x25x10cm, sendo que para um detector de área 1m<sup>2</sup> são necessários 4 cintiladores dispostos lado a lado. Suas principais características são dadas na Tabela 3.1. A Figura 3.1 mostra uma foto dos cintiladores do telescópio detector de muons.



**Figura 3.1** - Quatro cintiladores lado a lado formando uma área de superfície de 1m<sup>2</sup>. Os cintiladores estão colocados em caixa de metal com espessura de 1,6 mm que forma a base de um dos 56 detectores de telescópio. Foto tirada em 22/11/2006.

**Tabela 3.1** – Principais características dos cintiladores utilizados no telescópio detector de muons protótipo e no extendido. Fonte: Munakata, K (comunicação pessoal)

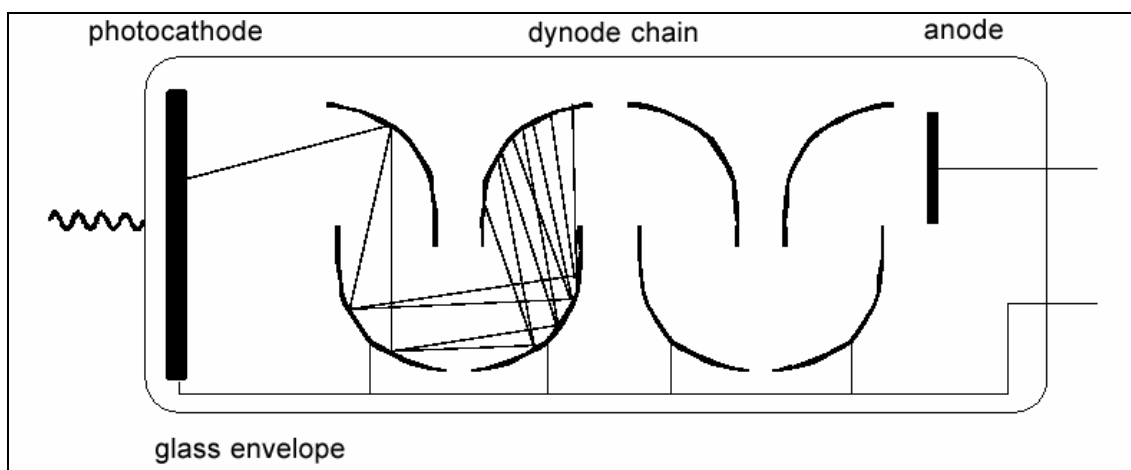
Característica	Valor
Comprimento de onda de máxima cintilação	420 nm
Tempo de decaimento da luz emitida	3.0-3.2 ns
Eficiência de cintilação	50-60%
Comprimento de atenuação da luz	90-110 cm
Índice de Refração	1.50-1.58
Densidade	1.04

### 3.2 Características construtivas e operacionais de fotomultiplicadoras

#### 3.2.1 Características gerais

Fotomultiplicadoras, conhecidas pela sigla PMT (do inglês, *photomultiplier tube*), são detectores ópticos (transdutores) que transformam energia na forma luminosa (fótons) em energia elétrica (corrente elétrica). Seu funcionamento é baseado no efeito fotoelétrico.

Dentre os diversos dispositivos fotossensíveis disponíveis no mercado, as fotomultiplicadoras, são dispositivos versáteis com resposta extremamente rápida e altíssima sensibilidade. Uma fotomultiplicadora típica consiste de um emissor de elétrons (fotocátodo), de multiplicadores de elétrons (chamados de dinodos) e de um coletor de elétrons (ânodo), todos dispostos em um tubo de vácuo (Figura 3.2).



**Figura 3.2** - Esquema de fotomultiplicadora com 8 dinodos, fotocátodo, ânodo envolvidos por um tubo de vácuo. Fonte: <http://holly.orc.soton.ac.uk/~wsb/phys1004/index.html>

Quando luz incide no fotocátodo, este emite fotoelétrons no vácuo. Estes fotoelétrons são direcionados para os dinodos onde são multiplicados por um processo secundário de emissão. Os elétrons multiplicados são então coletados pelo ânodo como um sinal de saída.

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.

### 3.2.2 Multiplicadores de elétrons

Os multiplicadores de elétrons são os responsáveis pela alta sensibilidade das PMTs (alta corrente de amplificação e alta razão sinal/ruído). Estão dispostos nos tubos fotomultiplicadores de forma cascadeada como emissores secundários de elétrons. O multiplicador de elétrons consiste de 8 a 19 estágios de eletrodos chamados dinodos. Em cada eletrodo, cada elétron incidente desencadeia a liberação de vários outros elétrons. Dessa forma, para uma fotomultiplicadora de  $n$  dinodos a amplificação de corrente está numa potência de ordem  $n$ .

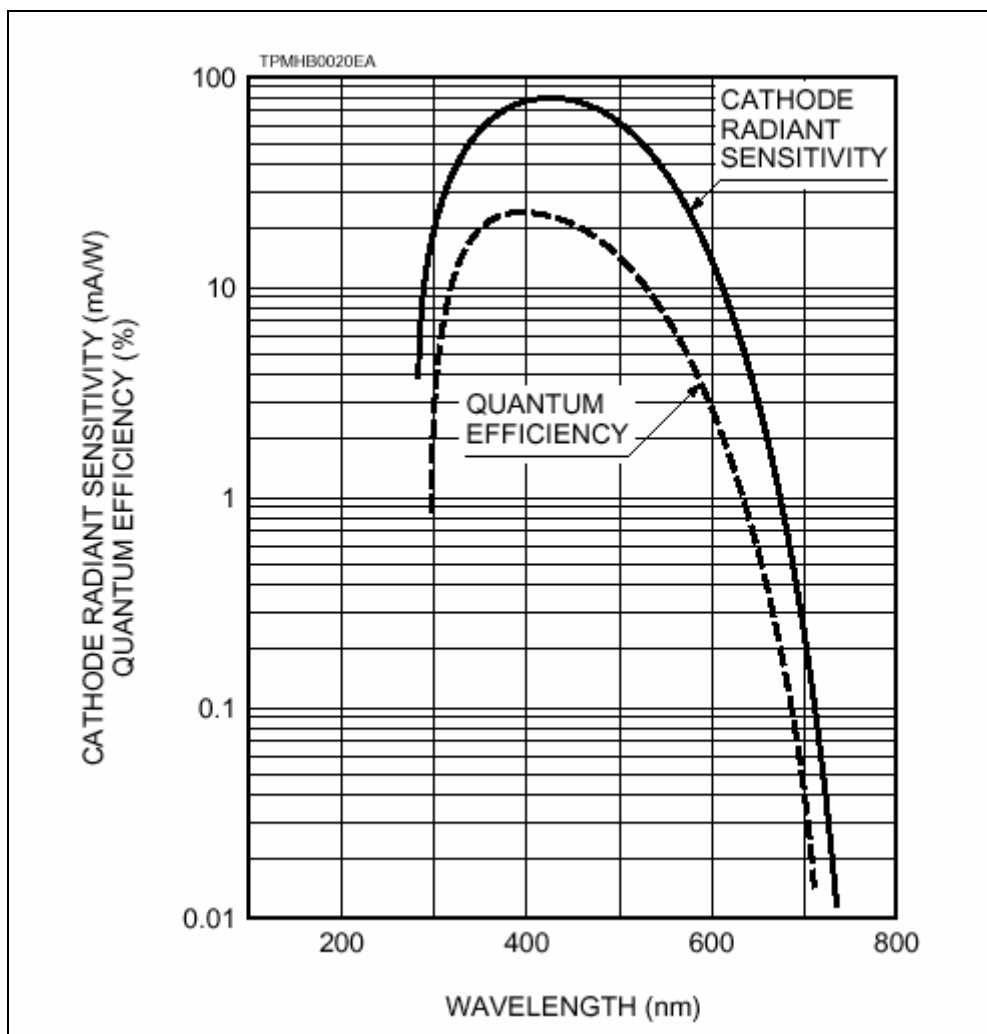
### 3.2.3 Resposta espectral

O fotocátodo de uma fotomultiplicadora converte energia incidente na forma de luz em elétrons. A eficiência da conversão (sensibilidade do fotocátodo) varia como função do comprimento de onda da luz incidente. A relação entre a sensibilidade do fotocátodo e o comprimento de onda é chamada de resposta espectral característica.

A resposta espectral característica varia conforme o modelo de fotomultiplicadora, sendo determinada principalmente pelo material da janela e do fotocátodo. A resposta espectral característica costuma estar expressa em termos de sensibilidade radiante ou eficiência quântica. A sensibilidade radiante é a razão entre a corrente fotoelétrica do fotocátodo e a potência incidência para um dado comprimento de onda, sendo expressa em Amperes por Watt (A/W). A eficiência quântica é a razão entre o número de fotoelétrons emitidos pelo fotocátodo e o número de fótons incidentes no fotocátodo. A eficiência quântica geralmente é expressa como uma porcentagem.

A resposta espectral característica para o modelo R877 de fabricação da Hamamatsu Photonics é apresentada na Figura 3.3. Como se pode ver na figura 3, a resposta espectral está concentrada basicamente da faixa de frequência visível (aproximadamente entre 400nm e 700nm) e na faixa do ultravioleta (superior aos 700nm).





**Figura 3.3** - Gráfico mostrando a resposta espectral das fotomultiplicadoras utilizadas no Telescópio Cintilador de Muons instalado no OES. A resposta máxima está na faixa entre 400 e 500 nm.  
Fonte: [www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877\\_TPMH1112E03.pdf](http://www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877_TPMH1112E03.pdf)

#### 3.2.4 Material do fotocátodo

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 realizar-se contagem por cintilação, como é o caso do telescópio 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.

### 3.2.5 Ganho (amplificação de corrente)

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 obtem-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.

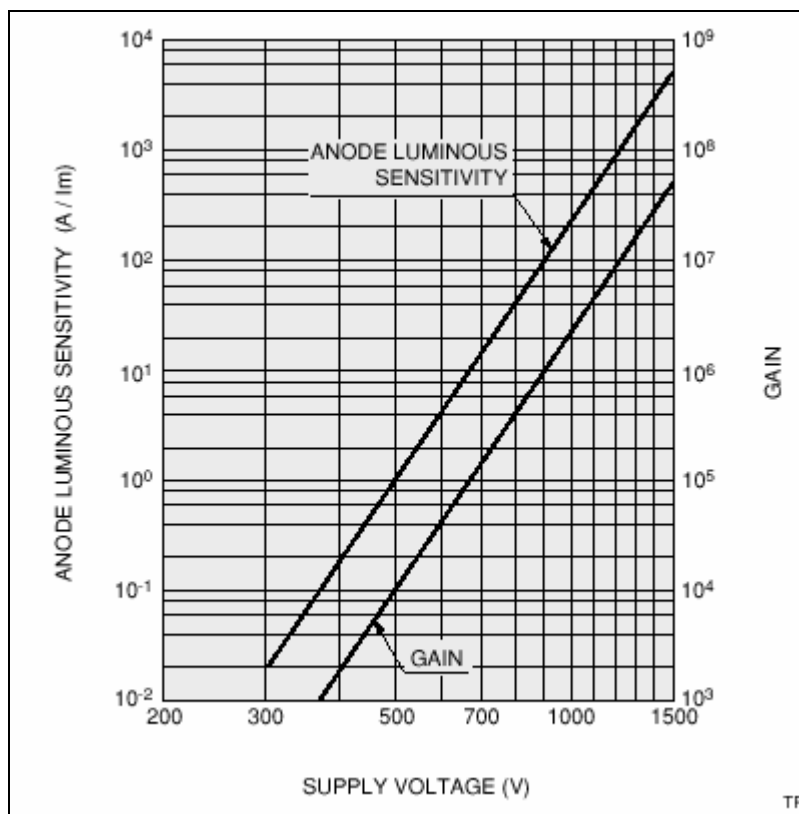
Ganho é simplesmente a relação entre a corrente de saída do ânodo e a corrente fotoelétrica do fotocátodo. De um modo ideal, o ganho de uma fotomultiplicadora com  $n$  dinodos é uma taxa de emissão secundária  $\delta$  por estágio é  $\delta^n$ . A taxa de emissão secundária de elétrons é dada por  $\delta = A \cdot E^\alpha$  onde  $A$  é uma constante,  $E$  é a tensão entre dois estágios consecutivos de multiplicadores de elétrons e  $\alpha$  é um coeficiente determinado pelo material e pela geometria do dinodo. Em geral  $\alpha$  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  $\mu$  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. A Figura 3.4 mostra o ganho típico e a sensibilidade luminosa do ânodo como função da tensão de alimentação.

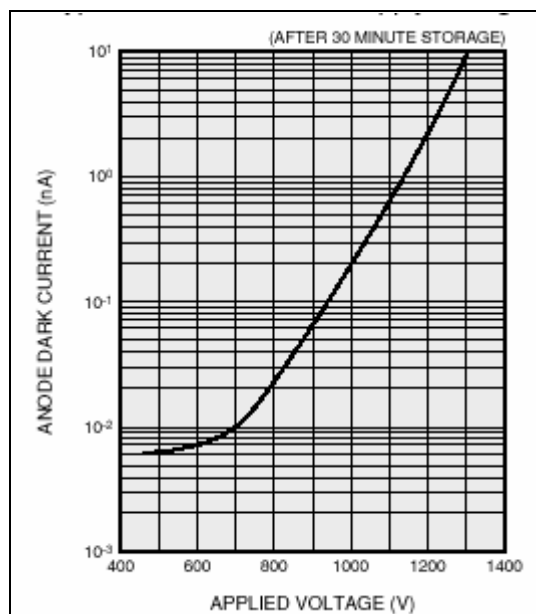


**Figura 3.4** - Gráfico mostrando a sensibilidade luminosa do ânodo e o ganho como funções da tensão fornecida à PMT. Nota-se que os eixos das ordenadas estão em escala logarítmica. Pode-se supor a partir do aspecto do gráfico do ganho que este é função potencial da tensão. Como é explicado no item 3.2, essa suposição é verdadeira.

Fonte: [www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877\\_TPMH1112E03.pdf](http://www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877_TPMH1112E03.pdf)

### 3.2.6 Corrente “de escuro” do ânodo

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. Como mostra a Figura 3.5, a corrente de escuro é fortemente dependente da tensão de alimentação.



**Figura 3.5** - Gráfico mostrando a corrente de escuro do ânodo como função da tensão aplicada nas fotomultiplicadoras. Fonte: [www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877\\_TPMH1112E03.pdf](http://www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877_TPMH1112E03.pdf)

As principais fontes de corrente “de escuro” estão descritas nos itens a seguir.

1) Emissão termoiônica de elétrons

Emissão de elétrons em pequenas quantias pelo próprio material do fotocátodo na temperatura ambiente. Para reduzir-se esse efeito, costuma-se reduzir a temperatura do meio no qual se encontra a fotomultiplicadora. Esse efeito é particularmente importante em aplicações nas quais se realiza contagem de fótons.

2) Ionização de gases residuais

Gases residuais dentro da fotomultiplicadora podem ser ionizados por colisão com os elétrons. Estes elétrons, através de emissão secundária pelos multiplicadores de elétrons, podem produzir pulsos de saída com valores consideráveis. Estes pulsos de ruído são observados como pulsos posteriores ao pulso primário de sinal e podem se tornar problema na detecção de pulsos de luz de curta duração.

3) Cintilação de vidro

Elétrons podem ser desviados de sua trajetória ao atravessarem o envoltório de vidro da fotomultiplicadora, resultando em aumento da corrente

“de escuro”. Para eliminar este tipo de ruído, as fotomultiplicadoras devem ser operadas com o ânodo em altas tensões e o cátodo ao potencial do aterramento.

#### 4) Emissão de campo

Quando a fotomultiplicadora é operada em tensões próximas ao máximo valor permitido, alguns elétrons podem ser emitidos dos eletrodos em razão do campo elétrico elevado e podem causar incremento na corrente “de escuro”. Em razão disso é recomendável operar fotomultiplicadoras com tensões entre 20 e 30% inferiores aos máximos valores recomendados.

#### 3.2.8 Efeitos do campo magnético

Muitas fotomultiplicadoras são afetadas pela presença de campos magnéticos. Estes campos magnéticos podem mover os elétrons de sua trajetória normal e causar uma perda no ganho do tubo. A perda do ganho depende do tipo de PMT e da orientação do campo magnético. Algumas vezes é necessário utilizar algum envoltório protetor. No caso de telescópio multidirecional detector de muons, não é utilizado nenhum dispositivo para evitar este efeito visto que as fotomultiplicadoras não estão sujeitas a campos magnéticos elevados, apenas ao campo geomagnético e outros de intensidade inferior oriundos dos cabos utilizados no sistema.

#### 3.2.9 Características de temperatura

A corrente “de escuro” originária de emissões termiônicas pode ser reduzida ao reduzir-se 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 (não seria “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.

Está sendo realizada uma correlação dos valores de temperatura medidos no interior da sala por termômetro digital com as contagens individuais de muons para observações do período entre janeiro de 2006 e março 2006. Caso se encontrem valores

de correlação elevados, a razão deve estar relacionada à operação das fotomultiplicadoras.

### 3.2.10 Fontes de ruído durante na detecção de fótons

Dentre diversas fontes de ruído em fotomultiplicadoras, podemos destacar o ruído térmico (ou de Johnson) e o ruído “curto” (do inglês, *short noise*).

PMTs são utilizadas para produzir corrente quando atingidas por luz (fótons). A seguir, transforma-se esta corrente em tensão para em seguida ser medida (por um osciloscópio ou voltímetro, por exemplo). Nesta transformação, resistores produzem ruído de voltagem em razão do movimento térmico dos elétrons no resistor. Este ruído é chamado térmico ou de Johnson e pode-se prever sua amplitude a partir da temperatura do resistor. A tensão média quadrática é dada por:

$$\bar{V}_{termico}^2 = 4kTR\Delta v.$$

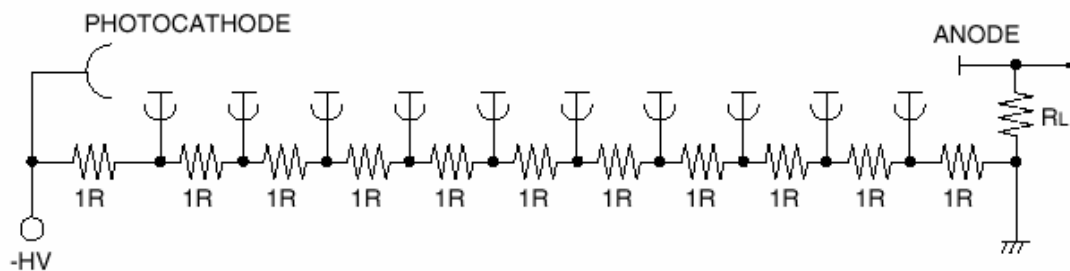
Na equação 1,  $k$  é a constante de Boltzmann,  $T$  é a temperatura absoluta do resistor,  $R$  é a resistência elétrica do resistor e  $\Delta v$  é a largura de banda de detecção do sistema.

O ruído conhecido como “curto” é decorrente da quantização da energia, é decorrente do fato de a luz estar predominante na forma de fótons ao invés de estar na forma de onda contínua. Dessa forma, o fluxo de energia no interior do detector não é contínuo, mas em pequenos pulsos, produzindo um inevitável ruído na corrente elétrica no fotocátodo que é dada por:

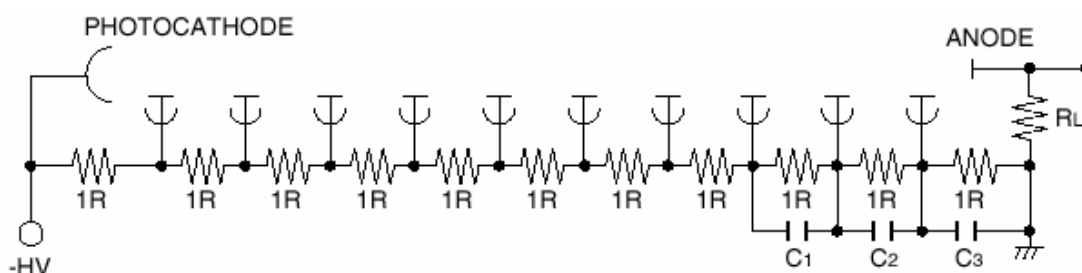
$$\bar{i}_{curto}^2 = 2eI\Delta v. (2)$$

### 3.2.11 Circuitos divisores de tensão

Tensões de interestágios para os dinodos de uma fotomultiplicadora costumam ser supridos por circuitos divisores de tensão consistindo de resistores conectados em série. As Figuras 3.6 e 3.7 são diagramas esquemáticos de circuito divisor de tensão. O primeiro é utilizado para aplicações com saída para corrente contínua. O segundo é utilizado para contagem de pulsos, como é o caso do Telescópio Cintilador de Muons.



**Figura 3.6** - Diagrama esquemático de circuito divisor de tensão para saída com saída para corrente contínua. Fonte: [www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877\\_TPMH1112E03.pdf](http://www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877_TPMH1112E03.pdf)

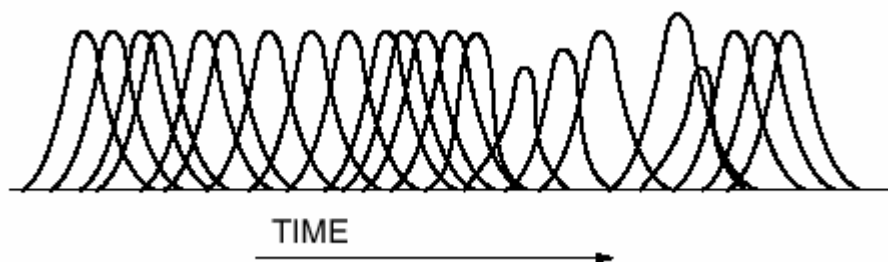


**Figura 3.7** - Diagrama esquemático de circuito divisor de tensão utilizado para contagem de pulsos. Fonte: [www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877\\_TPMH1112E03.pdf](http://www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877_TPMH1112E03.pdf)

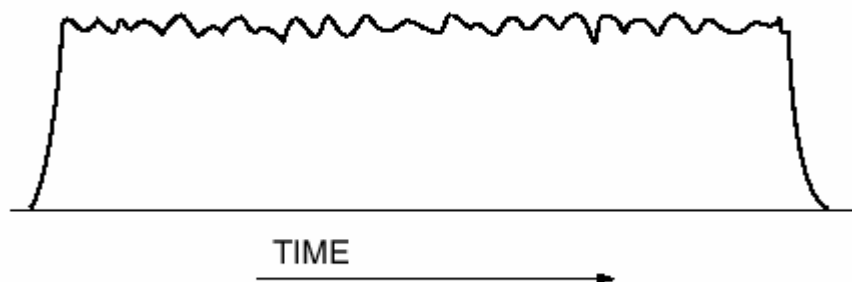
### 3.2.11 Contagem de fótons por cintilação

A contagem por cintilação consiste em um dos métodos mais sensíveis e efetivos para detecção de radiação e/ou partículas. Quando determinada radiação incide em um material cintilante, ocorre liberação de fótons.

Nas aplicações científicas usuais de contagens de fótons em fotomultiplicadoras, um determinado número de fótons entra no tubo da PMT e cria uma seqüência de pulsos de saída, tal como mostrado na Figura 3.8. Ao realizarem-se medidas no circuito, constatar-se-á uma corrente contínua com algumas flutuações, como mostrado na Figura 3.9.



**Figura 3.8** - Seqüência de pulsos de saída de uma fotomultiplicadora em aplicações típicas. Fonte: [www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877\\_TPMH1112E03.pdf](http://www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877_TPMH1112E03.pdf)



**Figura 3.9** - Saída de pulsos resultante da seqüência de pulsos descrita na Figura 3.8.

Fonte: [www.hpj.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877\\_TPMH1112E03.pdf](http://www.hpj.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/R877_TPMH1112E03.pdf)

O método mais simples para realizar a contagem seria simplesmente realizar a contagem de pulsos. Entretanto, isso levaria a resultados pouco precisos em razão dos pulsos de ruído como “corrente de escuro”, dentro outros. O método mais efetivo de eliminar ruído é discriminar os pulsos de saída de acordo com sua altura máxima.

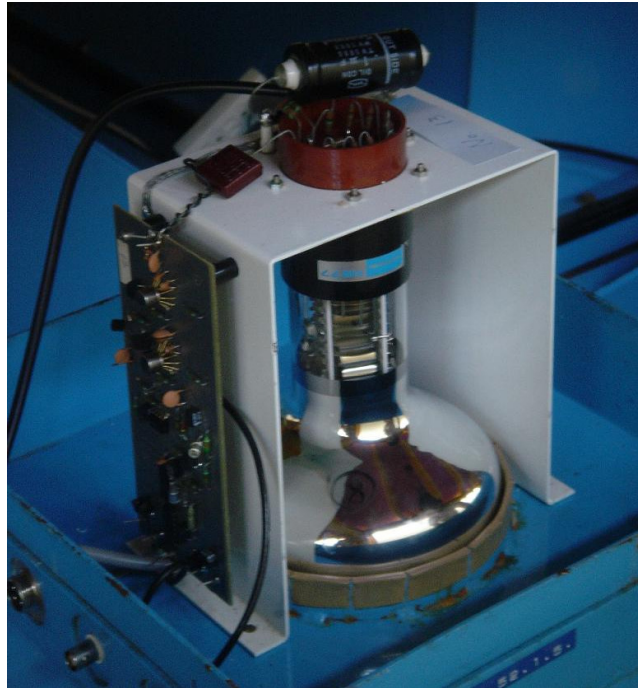
### 3.3 PMTs utilizadas no telescópio detector de muons

No telescópio cintilador de muons (tanto no protótipo como no expandido) é utilizada fotomultiplicadora fabricada pela *Hamamatsu Photonics* modelo nº. R877. Trata-se de um modelo projetado para contagem por cintilação do tipo *head-on*. Maiores detalhes dessa fotomultiplicadora são dados na Tabela 3.2. A Figura 3.10 mostra a fotomultiplicadora instalada no telescópio expandido.

**Tabela 3.2** – Algumas características da PMT de fabricação da *Hamamatsu Photonics*, modelo nº. R877.

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	$5 \times 10^5$	-





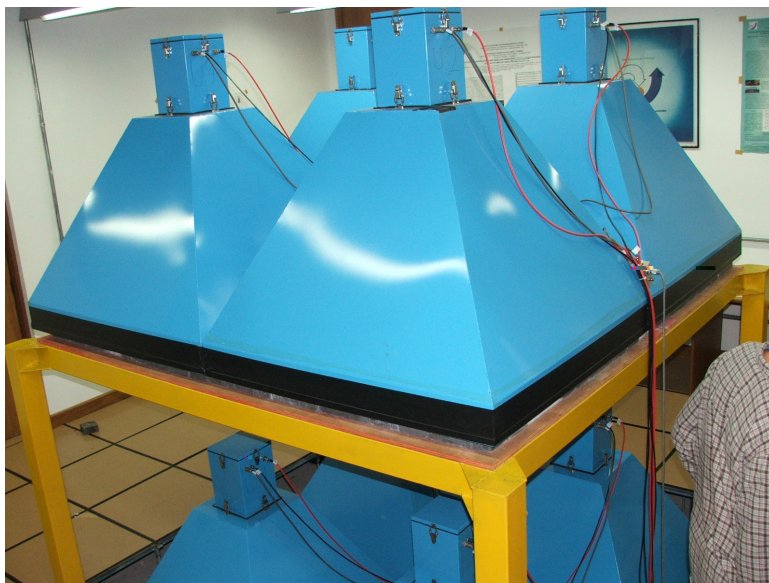
**Figura 3.10** – PMT instalada no telescópio detector de muons expandido. Ao lado dela está o amplificador.

## **CAPÍTULO 4 - A EXPANSÃO DO TELESCÓPIO DETECTOR DE MUONS: DIFERENÇAS ENTRE O TELESCÓPIO PROTÓTIPO E EXTENDIDO**

### 4.1 O telescópio protótipo

Em março de 2001 foi instalado um protótipo telescópio cintilador de muons no Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPSE/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 telescópio é 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 5m de espessura, usada para absorver as componentes de mais baixa energia dos Raios Cósmicos. Cada um dos 8 detectores é composto por uma caixa metálica em cujo 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 1m<sup>2</sup> e espessura de 5 cm. Os detectores estão dispostos na forma de quadrado de lado 2m 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*).



**Figura 4.1** - Foto de protótipo telescópio cintilador de muons instalado no OES/CRPSE/INPE – MCT mostrando em azul os 8 detectores em duas camadas. A estrutura metálica de sustentação tem cor amarela e pode se notar a camada de chumbo entre as duas camadas. Os sistemas eletrônicos não estão a mostra.

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 quanto por algum detector da camada inferior, de forma a produzir pulsos elétricos nos dois circuitos correspondentes. Se uma partícula passar por apenas uma das camadas, esta não será contada como sendo muon.

Existem duas possibilidades para que isso ocorra: a) a partícula foi blindada pela camada de chumbo, sendo sua energia inferior a  $\sim 50\text{GeV}$  e 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 para o estudo e previsão do Clima Espacial, já 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. Observa-se que 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 bem definido e aproximadamente igual em toda a

extensão da camada. A segunda possibilidade limita a área de cobertura do telescópio. 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 fino na tensão de cada fotomultiplicadora e compensar diferenças de ganho entre as 8 fotomultiplicadoras do telescópio, mesmo se tratando de fotomultiplicadoras de mesmo modelo e fabricante e sob mesmas condições de temperatura.

Após a pré-amplificação dos pulsos, estes são enviados ao amplificador principal, que é responsável por dar ganho ao pulso que permita o seu tratamento e posterior manipulação pelos demais circuitos.

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 telescópios direcionais (ver Tabela 4.1).

**Tabela 4.1** – Principais informações sobre o Telescópio Cintilador de Muons protótipo do Observatório Espacial do Sul do CRSPE/INPE – MCT.

Telescópio 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

Nota-se na Tabela 4.1 que todos nomes dos componentes, exceção feita para o vertical, estão acompanhados de um valor de ângulo (dado em graus). Esse ângulo é a inclinação do dado componente em relação à direção vertical. Pode-se perceber que quanto menor é a contagem de muons para um dado telescópio, maior é o seu ângulo de inclinação. Isso é explicado pela rigidez dielétrica da atmosfera (dado em GV), que é a energia mínima que o muon necessita para atravessar a atmosfera e alcançar a superfície terrestre.

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.

#### 4.2 O telescópio expandido

O telescópio expandido (ver 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 m<sup>2</sup> 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 telescópio detector de muons expandido em dezembro de 2005.

Algumas informações do telescópio expandido são dados na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2** – Principais informações do Telescópio Cintilador de Muons estendido

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

A contagem de um telescópio direcional não indica que todas as partículas possuem o ângulo de chegada dado na tabela. Por exemplo, para se ter um ângulo de exatamente 30° o muons deve percorrer uma trajetória que tenha projeção na horizontal de 1m. Dependendo da trajetória, a projeção (assim como o ângulo de chegada) pode ser menor ou maior. Na verdade os valores dados na tabela indicam o valor médio do ângulo de chegada dos muons naquele telescópio direcional, visto que chegam de forma aproximadamente isotrópica.

Para determinar-se as direções de incidência conforme dado na Tabela 4.2, foi usada lógica baseada em coincidência de pares de pulsos, um oriundo de detectores da camada superior e outro de detectores da camada inferior. Por exemplo, para o telescópio direcional 30° norte temos:

$$N = U12 \times L3 + U21 \times L12 + U30 \times L21 + U13 \times L4 + U22 \times L13 + \dots + U36 \times L27$$

Onde ‘×’ e ‘+’ denotam as operações lógicas ‘AND’ e ‘OR’. Os números dos detectores são mostrados na Figura 4.3. Esse 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 telescópios direcionais. O modelo utilizado é o XC2S200 de fabricação da Xilinx que suporta 32 canais direcionais. Dessa forma basta utilizar-se 4 placas.

O sistema de processamento de sinais provenientes da PMTs (amplificação, discriminação, contagem e correlação) bem como as fontes de alimentação de todo o detector são mostradas na Figura 4.3



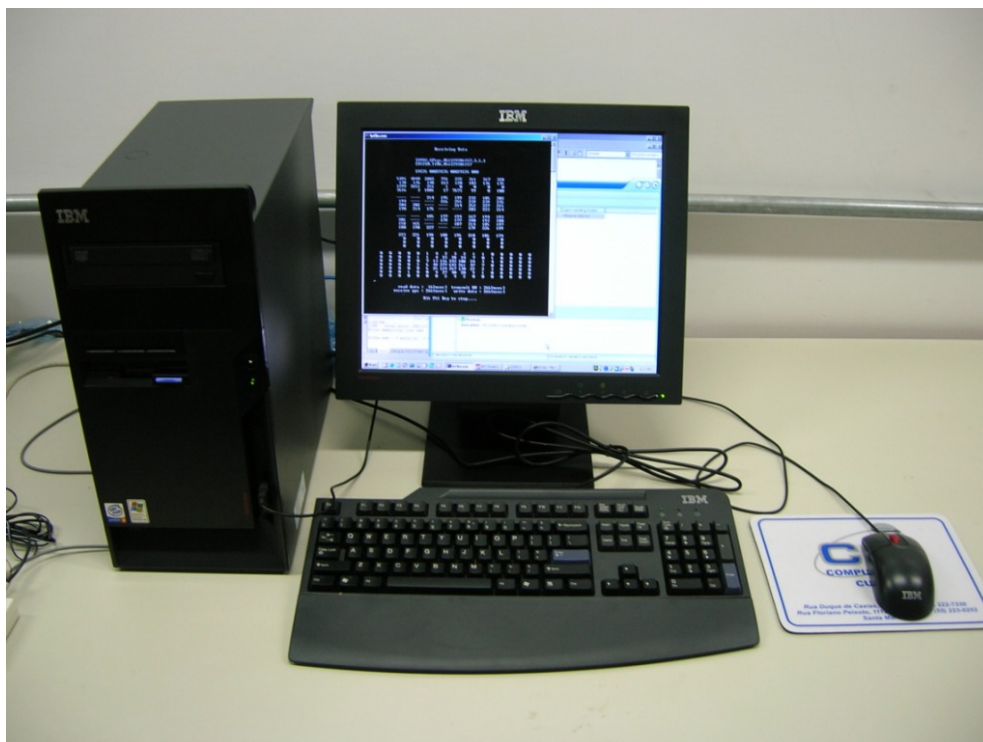
**Figura 4.3** – Fontes de alimentação e sistema de processamento de sinais do telescópio detector de muons.

Observando a Figura 4.3, na porção superior dos racks estão as fontes de alta e baixa tensão. A fonte de alta tensão (que alimenta as PMTs) é do tipo DC. É controlada e monitorada por computador, tendo seu valor máximo de 1500 V. A fonte de baixa tensão alimenta os 56 amplificadores. Na parte inferior do rack à esquerda estão os potenciômetros para ajuste individual das tensões aplicadas às PMTs. Um pequeno aumento de tensão fornecida representa aumento da contagem de uma dada PMTs 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.

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



**Figura 4.4** – Computador utilizado para gravação dos dados e monitoramento do sistema.

O sistema de hora do telescópio detector 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 de duas formas: 1) com o horário disponível no sistema de posicionamento global GPS e 2) 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.

## **CAPÍTULO 5 - OBSERVAÇÃO DE PRECURSORES DE TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS ATRAVÉS DE DETECTORES DE RAIOS CÓSMICOS DE ALTA ENERGIA (MUONS) $\geq 50\text{GeV}$**

O texto seguinte é baseado no artigo: *Precursor of geomagnetic storms observed by muons detector network*, publicado em 2000, de autoria do Prof. Kazuoki Munakata, do Departamento de Física da Universidade de Shinshu (Matsumoto, Japão) e co-autores. Este artigo mostra observações de tempestades geomagnéticas através da rede internacional de detectores de raios cósmicos de alta energia (muons) e justifica a instalação do protótipo telescópio detector de muons no Observatório Espacial do Sul. O acadêmico teve oportunidade de interagir com o Professor K. Munakata por uma semana durante sua última visita quando da ampliação do telescópio detector de muons do Observatório Espacial do Sul.

5.1 Precursores de tempestades geomagnéticas observados por rede de detectores de muons

### 5.1.1 Fundamentação Teórica

Gosling e colaboradores (Gosling et al. 1990; Gosling, 1993) demonstraram que tempestades geomagnéticas intensas são primariamente causadas por distúrbios interplanetários associados com ejeções coronais de massa, CMEs (da sigla em inglês *Coronal Mass Ejections*). Raios cósmicos de alta energia registrados por detectores na superfície terrestre também estão sujeitos a efeitos de modulações conseqüentes de distúrbios interplanetários como choques e ejeções associadas com CME's. (Lockwood, 1971; Cane, 1993). As partículas de raios cósmicos de intensidades superiores a 1 Gev são normalmente suprimidas em ~1-10% em resultado devido ao choque interplanetário e à própria ejeção que causa esse choque. Em adição a esta redução de intensidade, chamada “decréscimo de Forbush”, fenômenos precursores ao choque também tem sido relatados (Dorman, 1963; Dorman et al., 1967, 1972).

Certos tipos de anisotropias precursoras têm sido interpretadas como efeitos cinéticos relacionados à interação dos raios cósmicos ambientes com o choque em aproximação. (Nagashima et al., 1992, 1994; Belov et al., 1995; Morishita et al., 1997; Bieber and Evenson, 1998; Ruffolo et al., 1999). Decréscimos precursores devem resultar de um efeito “cone de perdas”, no qual o detector está observando partículas

que passam na região de depleção de raios cósmicos atrás do choque. O efeito cone de perdas é geralmente restrito a partículas movendo-se de modo a afastar-se do choque e com ângulos de *pitch* pequenos. Alguns ângulos de *pitch* elevados correspondem a raios cósmicos ambientes que se aproximaram do choque na região anterior ao fluxo e foram refletidos deste. Detectores observando estes ângulos de *pitch* irão observar um acréscimo precursor porque as partículas recebem um pequeno aumento de energia resultante da reflexão causada pelo choque. (Dorman et al., 1995; Bieber and Evenson, 1998). Em consequência da sua alta velocidade e de seu livre caminho médio elevado no vento solar, a informação contida em anisotropias precursoras é carregada rapidamente para regiões remotas e poderá conter informações úteis para a previsão do Clima Espacial.

Neste Capítulo descreve-se a análise realizada por K. Munakata e co-autores de precursores de tempestades geomagnéticas intensas ( $Dst < -100$  nT) através da intensidade de raios cósmicos de alta energia observados por detectores de muons instalados na superfície terrestre.

Um recente modelo numérico de Ruffolo (1999) para a distribuição de ângulos de *pitch* de partículas carregadas viajando através de um choque interplanetário prediz uma redução na intensidade de partículas em um estreito cone de perdas anterior ao choque. Esta redução deve ser observada através dos detectores de raios cósmicos como uma intensidade de déficit de partículas oriundas do choque com ângulos de *pitch* pequenos. Este modelo mostrou que a redução torna-se menor na medida que a distância do choque aumenta. É observada somente dentro de uma distância de  $\sim 0.1 \lambda_{||} \cos \psi$  do choque, onde  $\psi$  é o ângulo entre a direção radial e o sentido oposto ao Sol seguindo a direção do campo magnético interplanetário (IMF, da sigla em inglês *Interplanetary Magnetic Field*) e  $\lambda_{||}$  é o livre caminho médio das partículas no IMF. Como  $\lambda_{||}$  é esperado estar próximo de 1 AU da Terra para raios cósmicos de  $\sim 10$  GeV registrados por monitores de nêutrons (Chen e Bieber, 1993). Estes cones de perdas podem ser observados por monitores de nêutrons acima de  $\sim 5$ h antes da chegada do choque, assumindo a velocidade do choque de 600 km/s. Isto implica que precursores serão observados muito anteriormente por detectores de muons do que por monitores de nêutrons, visto que os detectores de muons respondem a energias mais elevadas ( $\geq 50$  GeV) para o qual espera-se  $\lambda_{||}$  ser muito maior. Neste sentido, as observações de

muons a energias elevadas irão fornecer informações úteis para prever tempestades geomagnéticas. Esta é a primeira motivação para a presente análise. Será mostrado que as observações da rede de muons podem ser excelente ferramenta para a previsão de tempestades geomagnéticas se estas possuírem uma boa cobertura em uma larga faixa de ângulos de *pitch*.

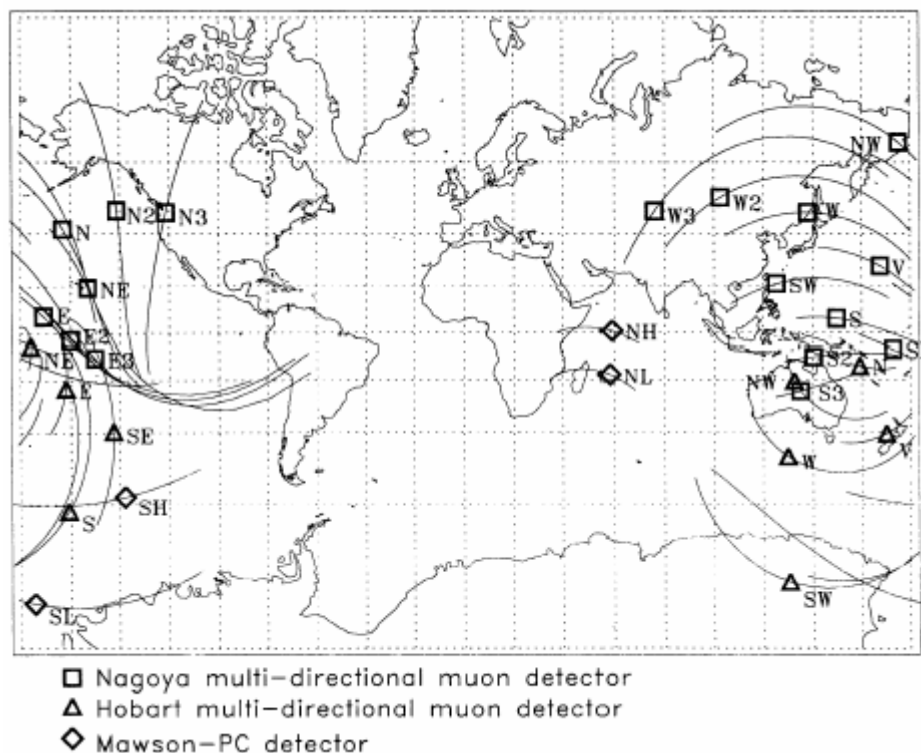
### 5.1.2 Metodologia de análise de eventos de tempestades geomagnéticas

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) (ver Tabela 1). Para os eventos descrito neste Capítulo não estão sendo utilizados os dados de São Martinho da Serra, todos os eventos são anteriores a 2000 e São Martinho passou a operar em 2001. O número total de telescópios direcionais em uso neste artigo é 30 para o período posterior a 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 5.1 mostram a direção de visão assintótica para uma partícula incidente para cada telescópio 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 telescópio. Para diferentes telescópios,  $P_1$  varia entre 16 e 38 GV, enquanto  $P_2$  varia de 356 a 890 GV.

Nota-se na Figura 5.1 que a rede utilizada nos eventos estudados por Munakata e co-autores tem sua maior lacuna na cobertura longitudinal na região do Atlântico e da Europa. Esta lacuna foi preenchida com os telescópios de São Martinho da Serra: o protótipo a partir de 2001, e o expandido a partir de 2006. Obteve-se cobertura sobre um faixa total de ângulos de *pitch*.

**Tabela 5.1** - Telescópios de Muons usados nos eventos descritos neste Capítulo. Taxa média de contagem horária, erro estatístico de contagem horária, e rigidez média de raios cósmicos primários ( $P_M$ ) estão listados para cada telescópio usado neste Capítulo. O detector de muons de Mawson usa contadores proporcionais. Fonte: Munakata et al, 2000

Telescope Name	Hourly Count, 10 <sup>4</sup> cph	Count Error %	$P_m$ , 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)			
NL	27	0.19	72
NH	18	0.24	106
SL	27	0.19	72
SH	18	0.24	106



**Figura 5.1** - Direção de visão assintótica dos telescópios de muons. Cada um dos símbolos (quadrado para Nagoya, triângulo para Hobart e losango para Mawson-PC) mostra a direção de visão assintótica de uma partícula incidente em cada telescópio com a rigidez média primária ( $P_M$ ).  $P_M$  para cada telescópio está listado na Tabela 1. As linhas atravessando cada círculo representam os limites de visão correspondendo aos 80% da resposta central de cada telescópio (ver texto).

Fonte.: Munakata et al, 2000

As tempestades geomagnéticas analisadas no trabalho de autoria de K. Munakata incluem os 14 maiores eventos (maior índice  $K_p \geq 8-$ ) definidos por Gosling (1990) sobre um período entre 1978 e 1982, quando 17 telescópios direcionais de Nagoya estavam em operação. No artigo foram analisadas outros 25 eventos de tempestades geomagnéticas (maior índice  $K_p \geq 7-$ ) nos anos entre 1992 e 1998, quando estavam em operação Nagoya, Hobart e Mawson-PC (Tabela 1). Seguindo o critério adotado nos trabalhos de Gosling (1990), Munakata e co-autores selecionaram tempestades geomagnéticas nas quais o índice  $K_p$  máximo foi maior ou igual 7- e no qual o índice  $K_p$  foi maior ou igual a 6- por pelo menos 3 intervalos de 3 horas durante um período de 24 horas após o início da tempestade. Os instantes de início súbito da tempestade

(SSC, da sigla em inglês *storm sudden commencement*) são dados para todos os eventos na Tabela 5.2.

O artigo analisou as contagens horárias de raios cósmicos (muons) com correção para a variação da pressão atmosférica durante os períodos de cada tempestade geomagnética definida acima. Para cada telescópio direcional de cada detector, K. Munakata e co-autores obtiveram o desvio ( $I_{i,j}^{obs}(t)(\%)$ ) da taxa média para a contagem horária gravada pelo j-ésimo telescópio direcional no i-ésimo detector. Para muons com energias consideradas, também eles corrigiram  $I_{i,j}^{obs}(t)$  para o efeito da temperatura atmosférica. A expansão do ar causada por um acréscimo na temperatura atmosférica tende a incrementar o decaimento de muons antes de sua chegada ao detector e, dessa forma, há uma correlação negativa entre a intensidade de muons e a temperatura atmosférica. Os coeficientes parciais de temperatura para este efeito são calculados por Sagisaka (1986) para várias altitudes na atmosfera e energias de muons. O artigo nota que a separação angular máxima entre dois telescópios direcionais em um mesmo detector é próxima a 120°, em maioria, e a separação angular de caminhos sobre duas direções é apenas 350km no topo da atmosfera (~100km acima do nível do mar). A separação horizontal é muito menor a baixas altitudes. A variação da temperatura na atmosfera e, conseqüentemente, o efeito da temperatura foram considerados por Munakata como aproximadamente constantes dentro de uma região na atmosfera coberta por uma única estação. Por esta razão, foi feito o seguinte ajuste fino para a distribuição do ângulo de *pitch* ( $I_{i,j}^{cal}(t)$ ) para  $I_{i,j}^{obs}(t)$  no tempo t,

$$I_{i,j}^{cal}(t) = I_i^0(t) + I_i^1(t) \cos(\chi_{i,j}(t)), \quad (1)$$

Onde  $\chi_{i,j}(t)$  é o ângulo de *pitch* calculado como o ângulo entre a direção do campo magnético interplanetário no sentido do Sol e a direção de vista do j-ésimo telescópio direcional no i-ésimo detector. Munakata e co-autores calcularam a direção do campo magnético interplanetário para cada hora usando a média horária usando dados da média deste campo usando a fonte de dados OMNI (Couzens and King, 1986). O ângulo de *pitch* é medido para a direção apontando para o Sol ao longo do campo magnético interplanetário, isto é, 0° corresponde à direção do IMF no sentido do Sol. Um dos parâmetros de ajuste,  $I_i^0(t)$ , na equação (1) representa efeitos, incluindo o

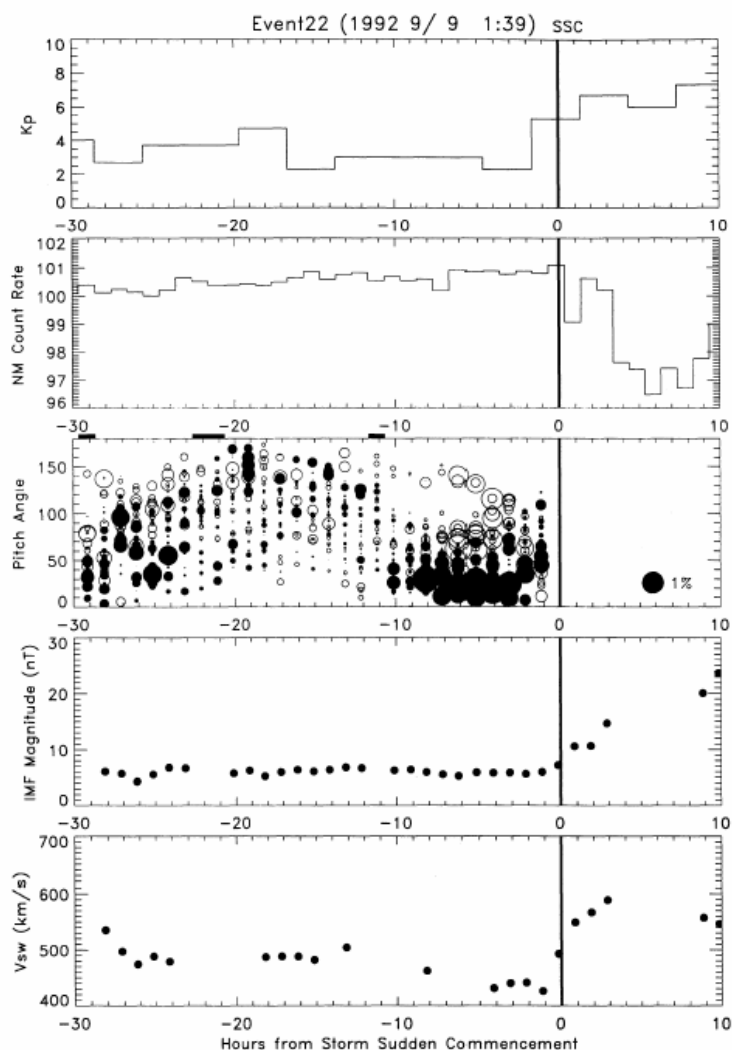
efeito da temperatura, que são comuns para todos os telescópios (subscrito j) mas diferente de um detector para o outro (subscrito i), quando  $I_i^1(t)$  é o melhor parâmetro representando a anisotropia de primeira ordem. Simplesmente subtraiu-se  $I_i^0(t)$  de  $I_{i,j}^{obs}(t)$  para extrair o componente da anisotropia de  $I_{i,j}^{obs}(t)$ , que é livre do efeito da temperatura, no qual temos interesse primário aqui. O artigo notou que  $I_i^0(t)$  também inclui a variação temporal da intensidade de raios cósmicos. Entretanto, para analisar esta variação separadamente do efeito da temperatura, o artigo considerou necessário fazer uma correção para o efeito da temperatura medido para várias altitudes na atmosfera.

### 5.1.3 Resultados

Um exemplo de distribuição de ângulo de *pitch* (terceiro gráfico a partir do topo) durante o período anterior a uma tempestade geomagnética em 9 de setembro de 1992 (evento recente nº 22) é mostrado na Figura 5.2, juntamente com o índice geomagnético  $K_p$ , contagem relativa do monitor de nêutrons de McMurdo, intensidade do campo magnético interplanetário e velocidade do vento solar. A distribuição do ângulo de *pitch* no terceiro gráfico é observada por Munakata e co-autores por 30 telescópios direcionais de Nagoya, Hobart e Mawson-PC durante 30 horas precedentes do SSC associado com o índice geomagnético. Neste gráfico é apresentado que  $\Delta I = I_{i,j}^{obs}(t) - I_i^o(t)$  como uma função do tempo medida a partir do SSC (abscissas) e o ângulo de *pitch* (ordenadas). Para períodos nos quais dados de IMF não estão disponíveis, o trabalho em descrição calculou o ângulo de *pitch* assumindo o campo de Parker com velocidade de vento solar de 400km/s. Cada círculo no gráfico de ângulo de *pitch* representa uma medida horária de um único telescópio, com excesso ou déficit de intensidade de raios cósmicos em relação a media representados, respectivamente, por círculos abertos e sólidos. O diâmetro de cada círculo é proporcional a magnitude do déficit ou excesso. Munakata *et al.*, 2000 apresentam na Figura 5.2 uma assinatura de uma anisotropia precursora de cone de perdas através de intensos déficits (círculos sólidos) nas proximidades de 0° de ângulo de *pitch*. A assinatura aparece aproximadamente 8 horas antes da SSC associada com ativo acréscimo no índice  $K_p$ . Conforme o SSC, a taxa de contagem do monitor de nêutrons de McMurdo obteve um decréscimo de ~4% dentro de 4 horas. O acréscimo da

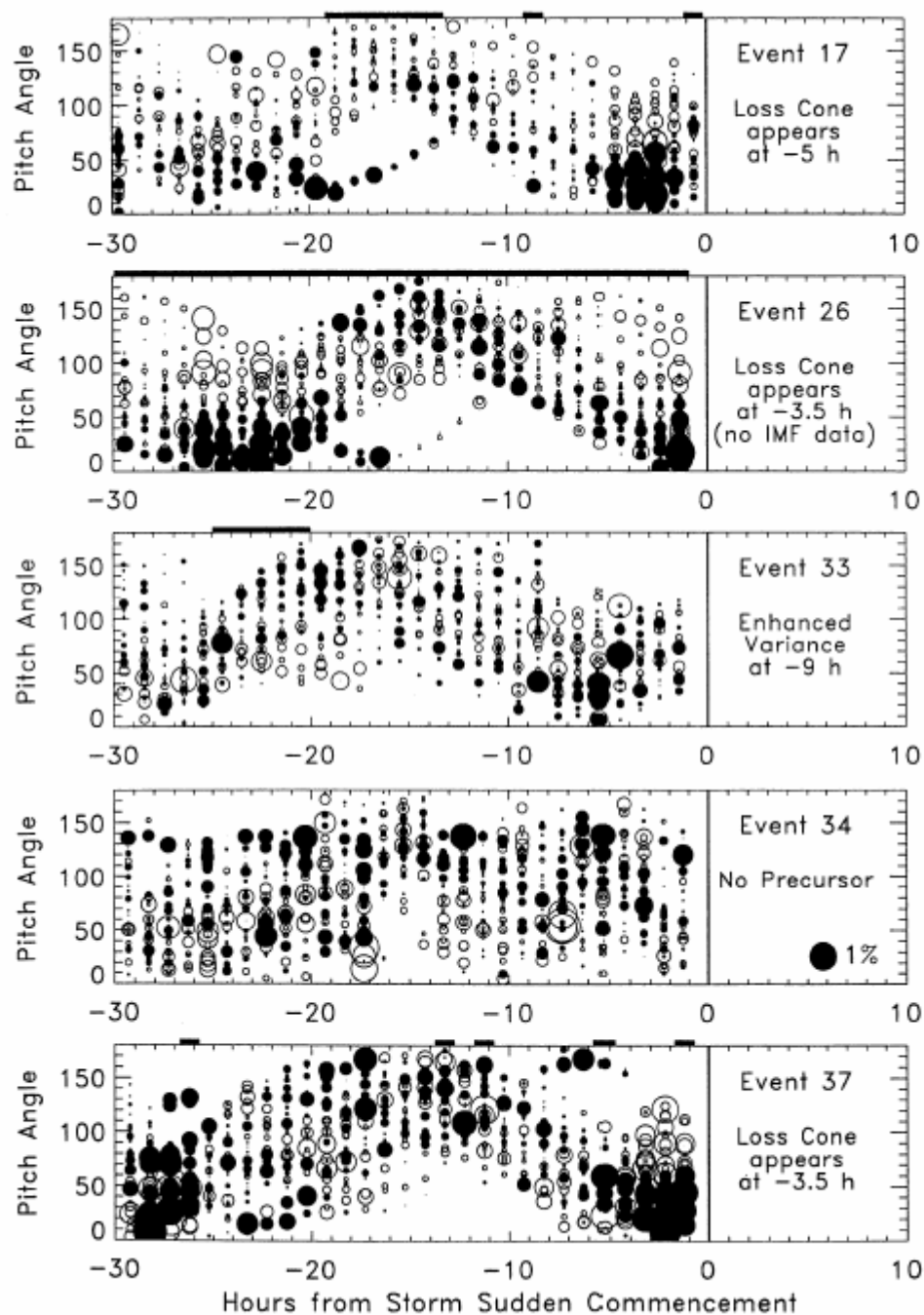


intensidade do IMF e da velocidade do vento solar indica a passagem do choque associado com o SSC.



**Figura 5.2** - Amostra de distribuição de ângulos de *pitch* para uma tempestade geomagnética ocorrida no dia 9 de setembro de 1992. De cima para baixo, os gráficos mostram o índice geomagnético  $K_p$ , a contagem relativa do detector de nêutrons de McMurdo, a distribuição do ângulo de *pitch* dos raios cósmicos antes da chegada da tempestade, a intensidade do campo magnético interplanetário e a velocidade do vento solar, todos como função do tempo (horas) medido em relação ao início súbito da tempestade (SSC) associado com a tempestade geomagnética do dia 9 de setembro de 1992. No terceiro gráfico de cima para baixo, cada círculo representa uma medida horária de um único telescópio para um dado tempo (abscissa) e ângulo de *pitch* (ordenada) do ângulo de visão do telescópio. Um ângulo de *pitch* de  $0^\circ$  corresponde a direção do campo magnético interplanetário no sentido do Sol. Círculos abertos e fechados representam, respectivamente, um excesso e um déficit na intensidade de raios cósmicos em relação à média, sendo que o diâmetro de cada círculo é diretamente proporcional a intensidade do decréscimo ou excesso. Uma escala está indicada abaixo e à direita na figura. Os dados entre -0.5 horas antes do SSC são excluídos da plotagem. A variação resultante do efeito da temperatura e da pressão está removida nos dados (ver texto). O ângulo de *pitch* é calculado usando a média horária do IMF nos dados do OMNI e a direção de visão assintótica de cada telescópio. Intervalos nos quais os dados do IMF não estão disponíveis são denotados por uma barra no eixo horizontal superior. Nesses períodos de tempo, foi assumido campo de Parker com velocidade de vento solar de 400Km/s. Fonte: Munakata et al., 2000

As distribuições de ângulos de *pitch* precedentes a tempestades geomagnéticas recentes é apresentada na Figura 5.3. Na Figura 5.3, os autores do artigo mostraram somente eventos selecionados. O sumário da análise de precursoros por Munakata *et al.* (2000) é dado da Tabela 5.2 (veja coluna “Sumário”). Em virtude da lacuna da cobertura longitudinal vista na Figura 5.1, a rede freqüentemente apresenta cobertura pobre (PC, da sigla em língua inglesa *poor coverage*) na direção do campo magnético interplanetário no sentido do Sol durante as horas cruciais imediatamente anteriores ao SSC. Observaram cobertura pobre em 11 eventos nos quais não puderam decidir se algum precursor esteve presente ou não (um exemplo típico de evento com cobertura pobre é mostrado na Figura 5.5).



**Figura 5.3** - Distribuição do ângulo de *pitch* de eventos de tempestade geomagnética selecionados são mostrados da mesma forma que no terceiro gráfico (de cima para baixo) na Figura 5.2. A escala está indicada está indicada no quarto gráfico na direita abaixo. Somente quatro eventos retirados de um total de 25 eventos são plotados nesta figura (ver Tabela 2). O índice  $K_p$  máximo usado nestes eventos selecionados é inferior àquele usado nos eventos selecionados por Gosling.  
 Fonte: Munakata et al., 2000

Munakata *et al.* (2000) observaram precursores do tipo cone de perdas (LC, da sigla em inglês *loss cone*) em sete tempestades geomagnéticas nas 14 remanescentes na qual a rede tem uma boa cobertura da direção do IMF sobre o período imediatamente anterior ao SSC. O efeito cone de perdas é caracterizado por redução de intensidade de raios cósmicos (círculos sólidos) antes do SSC para ângulos de *pitch* próximos de 0°. Os eventos 17, 26 e 37 mostrados na Figura 5.3 e evento 22 mostrado na Figura 2 são cones de perdas típicos.

Munakata *et al.* (2000) observaram outro tipo de precursor: os precursores de variações realçadas (EV, da sigla em inglês *enhanced variance*) em duas tempestades geomagnéticas (evento n°. 20 e n°. 33). O precursor EV é caracterizado por um acréscimo ou decréscimo de intensidade que não pode ser descrito como função sistemática do ângulo de *pitch*.

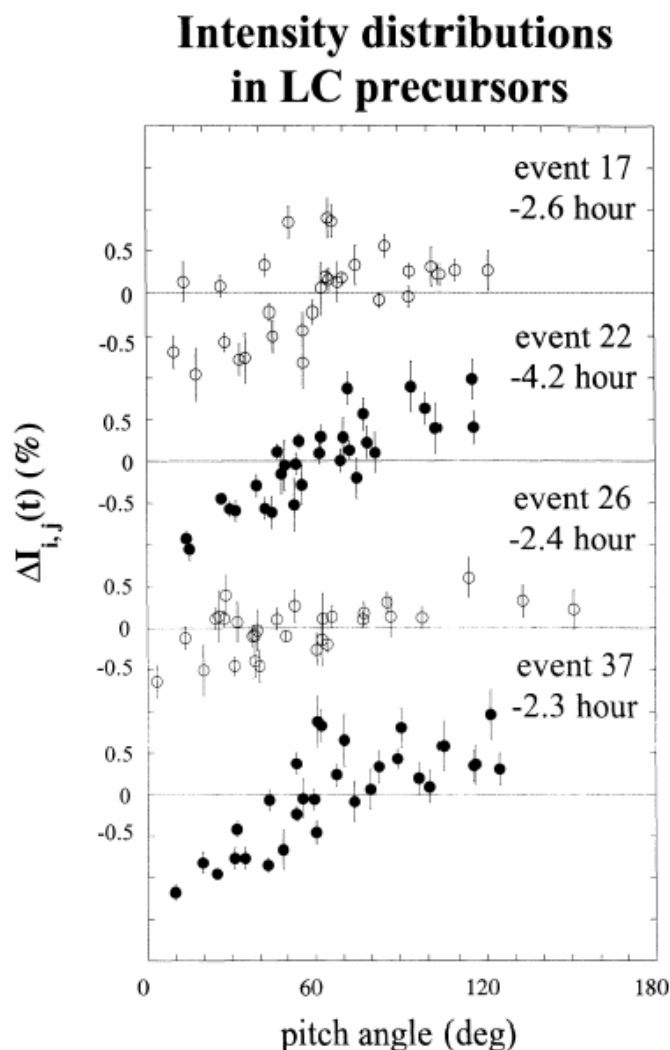
Em 14 dos eventos com boa cobertura na direção do IMF no sentido do Sol, Munakata e co-autores não encontraram precursores. Um exemplo deste tipo de tempestade é mostrado na Figura 5.3 (evento n°. 34).

Na coluna intitulada “Sumário” da Tabela 5.2 o artigo mostra o tempo de aparecimento de precursores medidos em relação ao SSC. Contudo a lacuna da direção de cobertura direcional na presente rede torna difícil precisar o tempo. Por exemplo, o precursor do tipo LC visto no evento n°. 26 na Figura 5.3 pode ter aparecido muito antes, em ~-26 horas, e permanecido durante todo o período entre -26 e -3.5 horas, mas não se pode confirmar isto em razão da cobertura pobre do IMF sobre o período. Desta forma, a Tabela 5.2, mostra apenas o tempo mínimo estimado de aparecimento. De acordo com esta definição, os precursores para tempestades recentes aparecem entre 3.5 e 11 horas antes do SSC (Munakata *et al.*, 2000).

**Tabela 5.2** - Tempestades geomagnéticas analisadas neste trabalho<sup>a</sup>. Fonte: Munakata et al, 2000. O tempo de início súbito de tempestade (coluna chamada Time of SSC, UT), o índice  $K_p$  máximo (coluna chamada maximum  $K_p$  index), e um pequeno sumário (coluna da extremidade direita) dos precursores observados são listados para cada evento. Na coluna da direita, “PC” e “NP” significam respectivamente “poor coverage” (cobertura pobre) na direção do IMF no sentido do Sol e “no precursor” (nenhum precursor), enquanto “LC” e “EV” representam, respectivamente, precursores “loss cone” (cone de perdas) e “enhanced variation” (variação realçada). Não há dados de IMF disponíveis para tempestades com sumário entre parênteses. Para estes eventos calculou-se ângulo de pitch assumindo o campo de Parker convencional em 1AU com velocidade de vento solar de 400Km/s. O tempo de aparecimento no qual o precursor é visto inicialmente (relativo ao SSC) é dado, mas este é somente uma mínima estimativa (ver texto). Fonte: Munakata et al., 2000

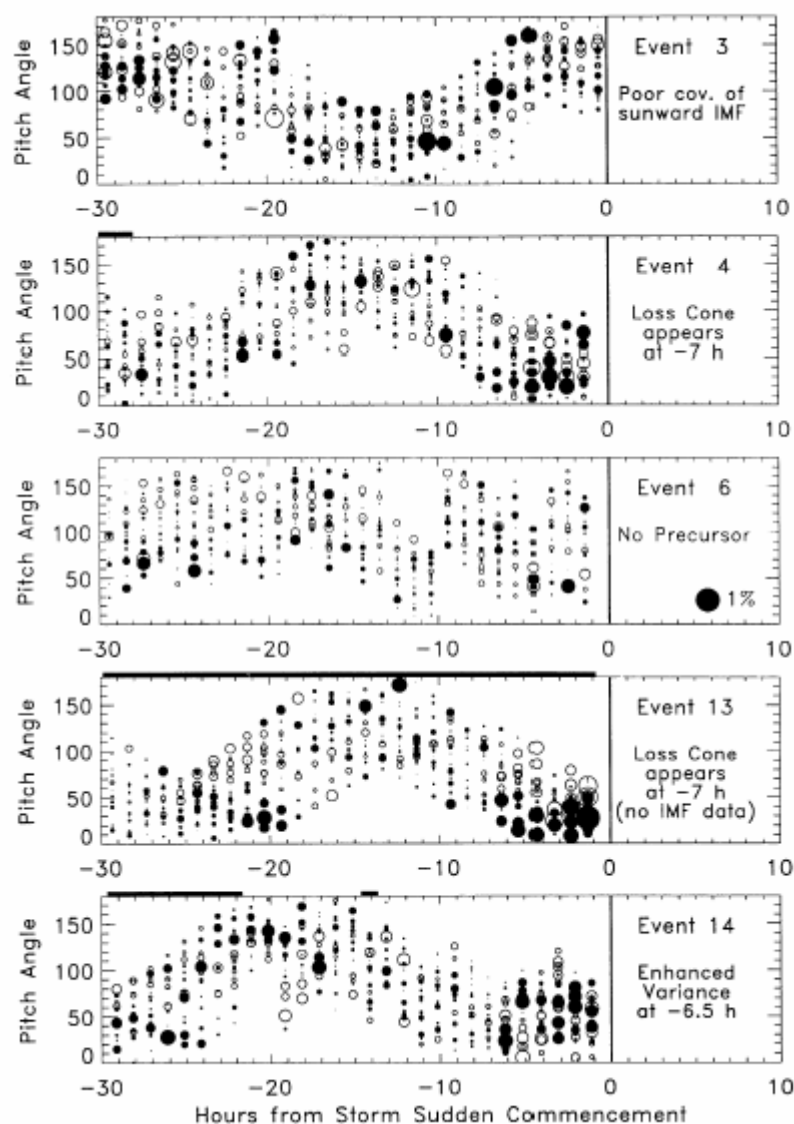
Storm	Date	Time of SSC, UT	Maximum $K_p$ Index	Summary
<i>Gasling's Major Geomagnetic Storms (Maximum <math>K_p \geq 8</math>-)</i>				
1	Aug. 27, 1978	0246	8.3	EV at -8.5 hours
2	Sept. 29, 1978	0301	8.0	LC at -6 hours
3	April 3, 1979	1001	8.0	PC
4	April 24, 1979	2358	8.0	LC at -7 hours
5	Aug. 29, 1979	0459	7.7	PC
6	Dec. 19, 1980	0456	7.7	NP
7	April 11, 1981	1339	8.3	PC
8	July 25, 1981	0514	8.3	PC
9	Oct. 13, 1981	2240	8.0	NP
10	March 1, 1982	1138	8.0	PC
11	July 13, 1982	1617	9.0	EV at -12 hours
12	Aug. 6, 1982	1836	7.7	(PC)
13	Sept. 5, 1982	2250	8.7	(LC at -7 hours)
14	Sept. 21, 1982	0339	8.3	EV at -6.5 hours
<i>Recent Geomagnetic Storms (Maximum <math>K_p \geq 7</math>-)</i>				
15	Feb. 1, 1992	0607	6.7	(LC at -8 hours)
16	Feb. 8, 1992	1428	7.0	(PC)
17	Feb. 20, 1992	0109	7.3	LC at -5 hours
18	Feb. 24, 1992	0703	6.7	NP
19	Feb. 26, 1992	1657	8.0	(PC)
20	Feb. 29, 1992	0920	6.7	(EV at -10 hours)
21	May 9, 1992	1557	8.7	LC at -7 hours
22	Sept. 9, 1992	0139	7.3	LC at -8 hours
23	Sept. 17, 1992	0429	7.3	(NP)
24	March 8, 1993	2137	6.7	NP
25	March 11, 1993	0640	6.7	(NP)
26	March 23, 1993	2155	7.3	(LC at -3.5 hours)
27	April 4, 1993	1434	7.7	(PC)
28	Aug. 15, 1993	1514	7.0	(PC)
29	Nov. 3, 1993	1727	6.7	(PC)
30	Feb. 21, 1994	0901	7.7	(LC at -11 hours)
31	April 2, 1994	1144	7.3	(PC)
32	Oct. 2, 1994	1712	7.0	PC
33	May 15, 1997	0159	6.7	EV at -9 hours
34	Nov. 6, 1997	2248	7.0	NP
35	Nov. 22, 1997	0949	7.3	(PC)
36	Aug. 6, 1998	0736	7.3	(PC)
37	Sept. 24, 1998	2345	8.3	LC at -3.5 hours
38	Oct. 18, 1998	1952	6.7	PC
39	Nov. 7, 1998	0815	7.7	(PC)

A distribuição de intensidade mostrada em quatro precursores do tipo LC na Figura 5.2 e 5.3 são mostrados na Figura 5.4, onde  $\Delta I_{i,j}(t)$  é mostrado com função do ângulo de *pitch* para cada tempo indicado em cada gráfico. A diminuição de intensidade próxima a 0° de ângulo de *pitch* resultante do efeito cone de perdas é visto claramente.



**Figura 5.4** - Distribuição de intensidade em precursores do tipo cones de perdas (LC). As intensidades ( $\Delta I_{i,j}(t)$ ) amostradas em quatro precursores LC na Figura 2 e 3 são plotadas como funções do ângulo de *pitch*. O número do evento e o tempo de amostragem medido em relação ao SSC estão indicados em cada gráfico. Os decréscimos de intensidade nas vizinhanças de ângulos de *pitch* de 0° em consequência do cone de perdas é visto claramente. Fonte: Munakata et al., 2000

A Figura 5.5 é semelhante à Figura 5.3, mas para eventos selecionados por Gosling. Apenas 17 telescópios direcionais de Nagoya estão disponíveis para estes eventos. É mostrado que a cobertura do ângulo de *pitch* é inferior àquela na Figura 5.3 com inferior número de telescópios direcionais e com extensas regiões deixadas sem dados. Em razão desta lacuna, a rede mostrou cobertura pobre (PC) na direção do IMF apontando para o Sol em 5 eventos (eventos n°. 3, 7, 8, 10 e 12). Um exemplo é o evento 3 mostrado na Figura 5.5. Há uma lacuna de dados para Nagoya no evento 5. Entre os 8 eventos restantes, há 6 precursores observados, sendo três do tipo LC e três do tipo EV aparecendo entre 6 a 12 horas antes dos SSCs (ver Tabela 5.2). (Munakata et al, 2000)

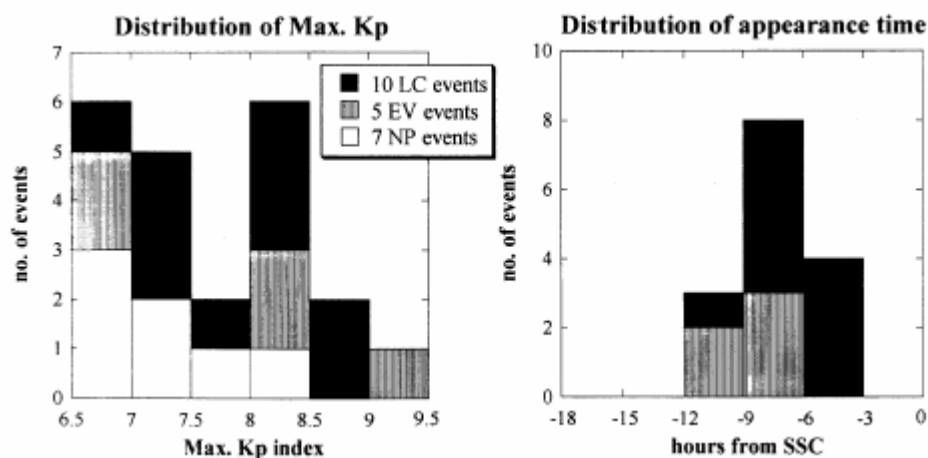


**Figura 5.5** - Distribuição do ângulo de *pitch* para os eventos de tempestades geomagnética selecionados por Gosling. Semelhante a Figura 4.3 mas para eventos de Gosling da Tabela 4.2. Nesta Figura, são mostrados somente cinco eventos de um total de 14 (ver tabela 4.2).

Fonte: Munakata et al., 2000

A distribuição do índice  $K_p$  máximo e do tempo de aparecimento de todos os precursores na Tabela 5.2 são mostrados na Figura 5.6. Munakata *et al* (2000), notaram que oito entre nove dos eventos com índice  $K_p$  máximo superior ou igual a 8.0 estão associados com precursores (cinco do tipo LC e três do tipo EV). Os índices máximos de  $K_p$  para eventos com precursores de ambos os tipos tem uma ampla distribuição, enquanto que aqueles que não possuem precursores (NP) aparentam ter uma correlação com índices máximos de  $K_p$  reduzidos. Isto implica que se está direcionando atenção

para pequenos precursores associados com pequenas tempestades no exemplo em estudo, devendo para erros estatísticos da observação.



**Figura 5.6** - Histogramas de (à esquerda) o índice  $K_p$  máximo e (à direita) o tempo de aparecimento em relação aos precursores. Eventos que se enquadram exatamente no limite dos escaninhos, são colocados naquele imediatamente superior, isto é, imediatamente à direita. Conforme a Tabela 5.2, LC, EV e NP na legenda representam, respectivamente, precursores do tipo *loss cone* (cone de perdas), *enhanced variation* (variação realçada) e *no precursor* (nenhum precursor). Nota-se que o tempo de aparecimento no histograma à direita é somente uma estimativa conservativa e o precursor possivelmente tem estado presente mais cedo em muitos casos (ver texto). Fonte: Munakata et al., 2000

A distribuição do tempo de aparecimento de precursores mostrado no histograma à direita na Figura 5.6 indica um tempo de duração típico de 6 a 9 horas antes do SSC. Para alguns casos, o precursor está presente quando a direção de visão disponível gira na direção do IMF no sentido do Sol e possivelmente esteve presente antes, mas não-observado em função da considerável lacuna na rede de detectores de muons (Munakata et al., 2000).

#### 5.1.4 Sumário e discussão

Examinaram-se precursores de raios cósmicos de um total de 39 tempestades geomagnéticas através da análise da distribuição do ângulo de *pitch* de raios cósmicos de alta energia medidos por detectores de raios cósmicos por meio da rede de detectores de muons de superfície terrestre. Conforme Munakata e co-autores, a rede mostrou boa cobertura para a direção do campo magnético interplanetário (IMF) no sentido do Sol para 22 tempestades (56.4%) sobre o período imediatamente precedente ao SSC. Os pesquisadores omitiram a discussão de 17 eventos com pobre cobertura da rede, visto que não podemos decidir se um precursor está ou não presente.



Dentre os 22 eventos com boa cobertura, Munakata e co-autores encontraram 15 tempestades (68.2% de 22 tempestades) associadas com precursores, dos quais 10 são do tipo cone de perdas (LC) e 5 do tipo variação realçada (EV). O precursor LC é caracterizado por redução de intensidade confinada em uma região de ângulo de *pitch* próxima à direção do campo magnético interplanetário no sentido do Sol. Por outro lado, os precursores do tipo EV são caracterizados por um acréscimo ou decréscimo de intensidade que não está sistematicamente alinhada com a mesma direção e sentido. Nos sete eventos restantes não foram encontrados precursores.

Em particular, oito entre nove maiores tempestades (89%) com índice  $K_p$  máximo maior ou igual a 8.0 estão associados com precursores (cinco do tipo LC e três do tipo EV), implicando que a incidência de precursores aumenta com o aumento da intensidade de tempestades geomagnética. Munakata e co-autores sugerem que precursores do tipo LC podem ser frequentemente observados em dados de muons antes do descrito neste capítulo. A possível razão é que o tempo de aparecimento do precursor do tipo LC é frequentemente determinado pela alternante cobertura da rede, isto é, o precursor parece estar realmente presente quando a direção de visão da rede move-se na direção do IMF apontando para o Sol.

Munakata e co-autores sugerem que a rede de detectores de muons pode ser uma boa ferramenta para a previsão do clima espacial. Entretanto, afirma-se que a rede utilizada nos eventos transcritos para este Capítulo (todos anteriores a 2000 e, portanto, sem a cobertura do detector de São Martinho da Serra) possui uma grande lacuna na cobertura direcional sobre a região do Atlântico e da Europa. Em razão desta lacuna, não foi possível analisar os precursores em um total de 17 eventos (43.6%). Esta lacuna também impossibilitou a distribuição de intensidade sobre uma escala inteira de ângulos de *pitch* e a determinação do tempo de aparecimento de precursores do tipo cone de perdas de longa duração. 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 (ver Figura 5.8) permitirá grande aumento a cobertura do céu pela rede de detectores de muons (Munakata et al., 2000).



## **CAPÍTULO 6 - CALIBRAÇÃO DOS DADOS DO TELESCOPIO MULTIDIRECIONAL DETECTOR DE MUONS**

Após a montagem do telescópio, foram realizados testes para averiguar os efeitos de ruídos na contagem de muons. Uma das principais fontes de ruído é o vazamento de luz para o interior dos detectores por problemas na vedação.

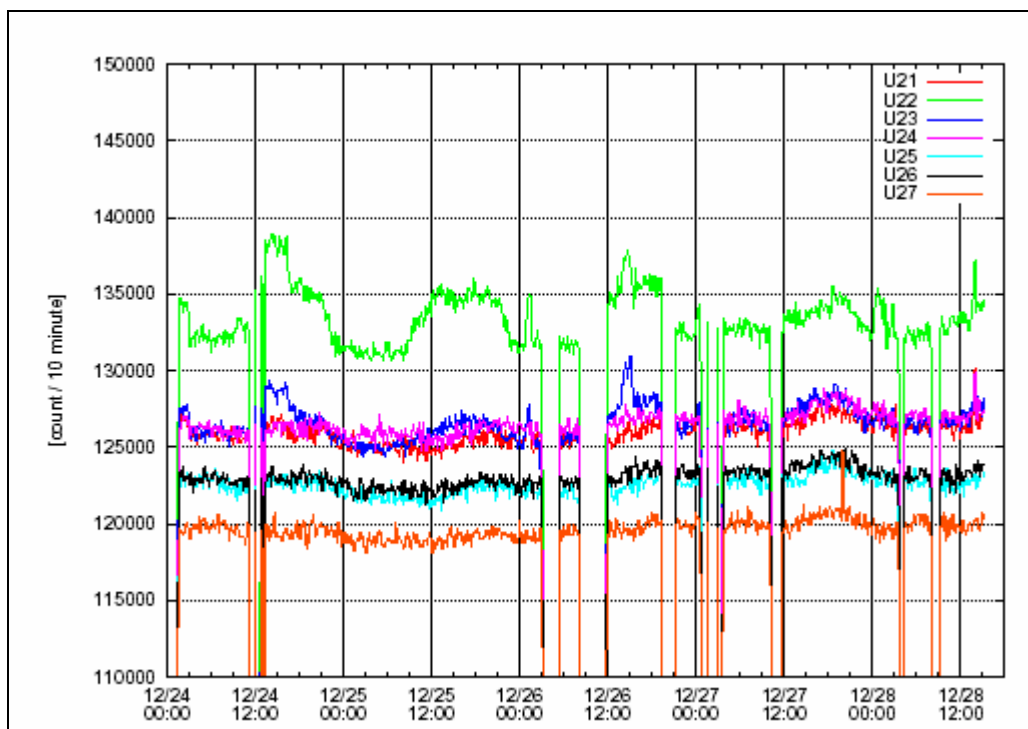
Durante a calibração realizaram-se ajustes de forma a igualar as contagens de todos os detectores através do ajuste do ganho das fotomultiplicadoras, conforme será explicado em seguida.

### **6.1 Verificação da vedação luminosa dos detectores**

Durante a montagem do sistema, constatou-se que alguns detectores apresentaram vedação luminosa insuficiente. Nestes detectores, fótons do exterior podem chegar ao seu interior e ser detectados pela PMT. Dessa forma observa-se um incremento de sua contagem quando este é exposto a fontes de luz.

O gráfico da Figura 6.1 mostra as contagens (por 10 minutos) dos detectores U21 até U29, onde se detectaram problemas de vedação luminosa. O tempo mostrado no gráfico é dado na Hora Internacional de Greenwich, ou seja, com 2h de adiantamento em relação à hora local. A sala onde se encontra o telescópio esteve sujeita a iluminação solar durante o período de insolação. Iluminação artificial foi utilizada basicamente durante o mesmo período. Nos demais períodos, não havia fontes de luz significativas na sala. Dessa forma, os detectores estiveram sujeitos à iluminação aproximadamente das 10h até às 22h.

Nota-se na Figura 6.1 que os detectores U21, U24, U25, U26 e U27 têm suas contagens aproximadamente constantes no tempo, indicando que não há problemas na vedação luminosa. Entretanto, os detectores U22 e U23 apresentaram acréscimos de contagem no período em que estiveram sujeitos a iluminação, indicando correlação destes fatores e, dessa forma, problemas na vedação luminosa.



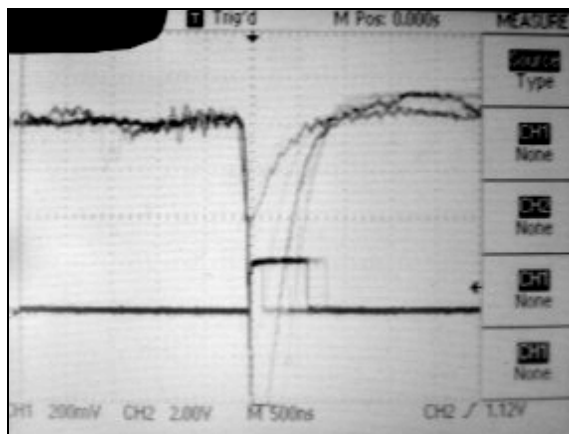
**Figura 6.1** - Gráfico de contagens/10 minutos no tempo (dado na hora internacional de Greenwich) para 7 detectores da camada superior numerados de 21 a 27. Percebem-se problemas de vedação luminosa no detector U22 através dos incrementos de contagem do período do dia com insolação (a sala onde se encontra o telescópio esteve sujeita a luz solar), aproximadamente entre as 12h e 0h. Os intervalos de tempo nos qual a contagem é nula são referentes à manutenção do sistema.

Fonte: Kuwabara, 2005 (comunicação pessoal).

Este tipo de ruído não é facilmente eliminável. Durante os testes realizados durante a calibração, constatou-se redução deste efeito apenas parcial. Para amenizar-se este efeito, mantém-se a sala do detector o mais escura possível, sem ação de fontes luminosas naturais e artificiais.

## 6.2 Verificação dos níveis de ruído na saída dos amplificadores

Para testar-se o nível de ruído dos sinais coletados, tais como a “corrente de escuro” da fotomultiplicadora, bem como outros oriundos dos circuitos amplificadores, testaram-se as saídas dos mesmos com uso de osciloscópio. Sabendo-se que o nível de discriminação do pulso é 500 mV, escolheu-se um limite máximo de ruído de 200 mV, sendo 100 mV o nível ideal de ruído. A Figura 6.2 mostra a tela do osciloscópio para um detector com nível de ruído baixo, muito próximo do ideal.



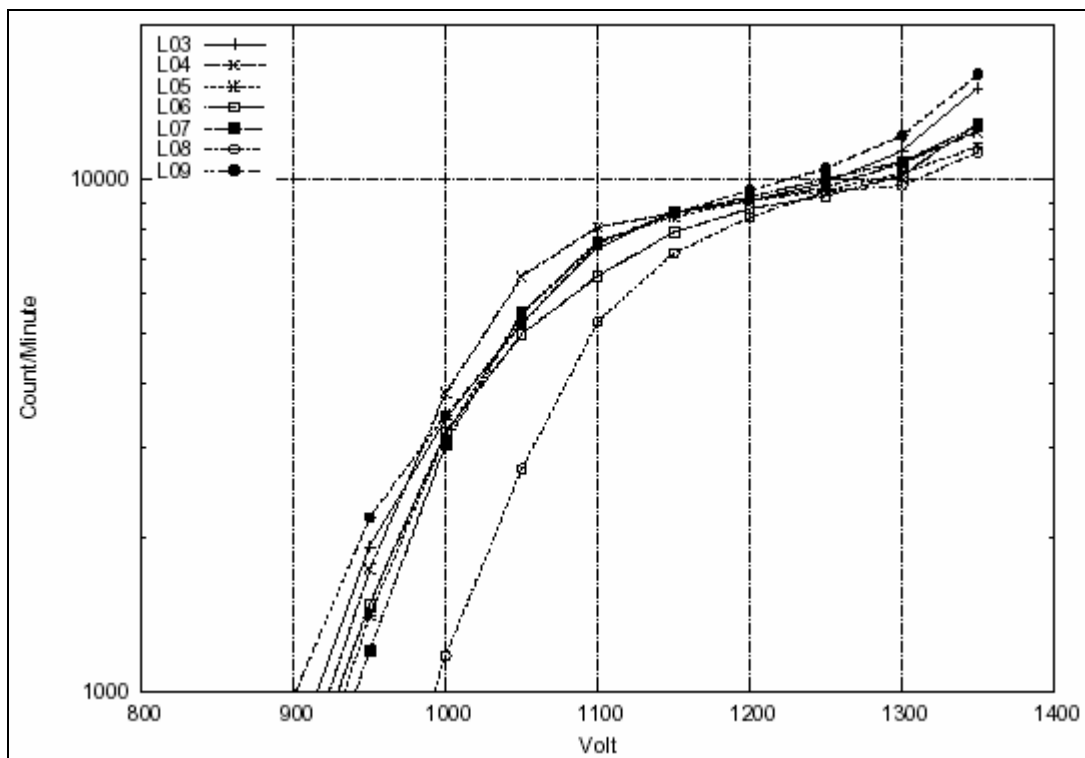
**Figura 6.2** - Fotografia da tela de osciloscópio utilizado na calibração dos detectores de muons mostrando as saídas do amplificador. No sinal mostrado na porção superior da Figura, percebe-se que o nível de ruído é relativamente pequeno com intensidade de aproximadamente 100mV. Dessa forma, o nível de ruído está próximo do ideal. Na porção inferior da Figura, vê-se sinal com formato de onda quadrado onde o pulso é gerado caso o nível do sinal na porção superior da imagem seja superior a 500mV, sendo sua largura proporcional a intensidade do referido sinal.

### 6.3 Verificação do ganho da fotomultiplicadora

Como mostrado anteriormente, o ganho de uma fotomultiplicadora está largamente relacionado à tensão aplicada entre o fotocátodo e o fotoânodo e varia de exemplar para outro, ainda que sejam de mesmo fabricante e modelo.

O gráfico da Figura 6.3 mostra a contagem de muons (em escala logarítmica para as ordenadas) de detectores individuais da camada inferior (L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9) como função da tensão comum aplicada entre o fotocátodo e o fotoânodo de todas PMTs. Realizaram-se contagens em períodos de 1 minuto, e em cada período a tensão aplicada foi incrementada em 50 V, desde 800 V até 1400 V. Nesta data (22/12/2005) não há indícios de efeitos de modulação de raios cósmicos conseqüente de estruturas geomagnéticas no meio interplanetário, bem como indícios de tempestade geomagnética por redução do índice Dst. Nessas circunstâncias, espera-se que os raios cósmicos atinjam a Terra forma aproximadamente isotrópica e com intensidade constante. Desse modo, todos os detectores individuais em análise são atravessados pelo mesmo número de muons. Logo, para uma dada tensão aplicada, a diferença de contagem de muons entre dois detectores quaisquer é resultado de diferença de ganho entre as fotomultiplicadoras.

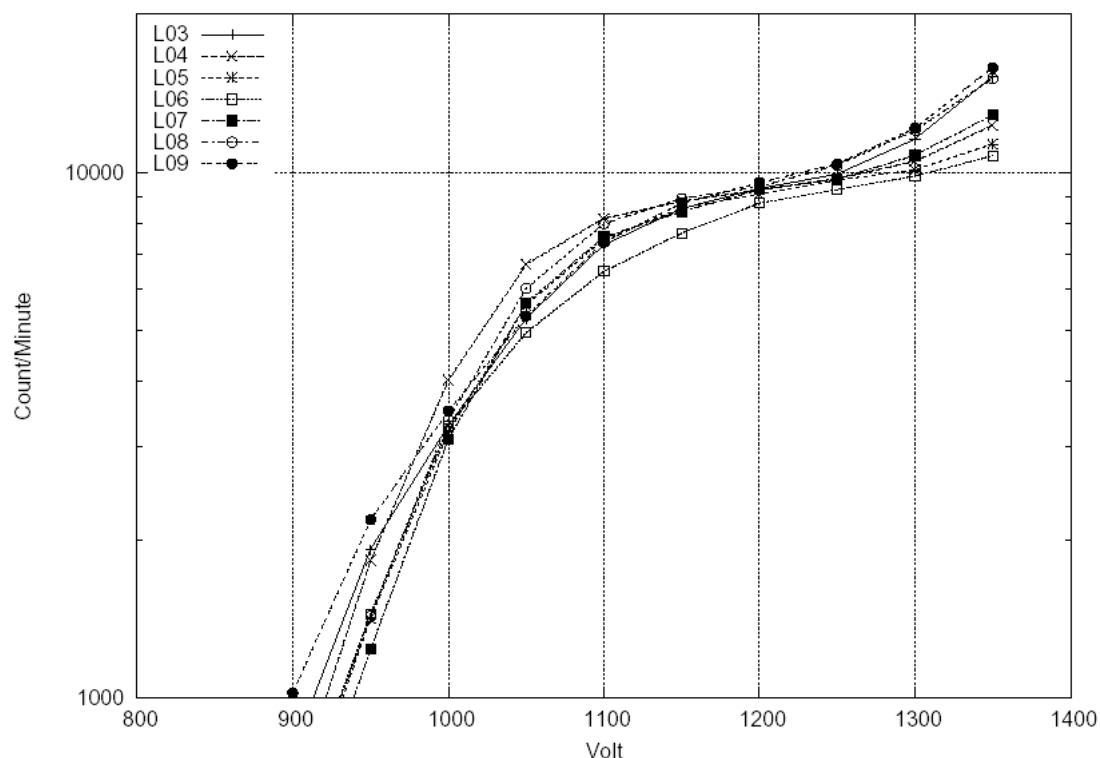
Como se vê na Figura 6.3, a PMT instalada no detector L8 possui ganho inferior às demais para a faixa de tensão entre 800 V e 1200 V. O detector L4 possui maior ganho para tensões entre 1000 V e 1100 V.



**Figura 6.3** - Contagem de muons por minuto para os detectores L3-9 como função da tensão aplicada entre o fotocátodo e o fotoânodo em suas respectivas fotomultiplicadoras. A diferença de contagem entre os detectores para uma dada tensão é consequência da diferença entre o ganho entre duas fotomultiplicadoras. Fonte: Kuwabara, 2005 (comunicação pessoal).

Em razão disso, para cada PMT faz-se um ajuste individual da tensão através de um potenciômetro. Dessa forma busca-se aproximar a contagem entre os vários detectores o máximo possível, isto é, aproximar ao máximo as curvas mostradas no gráfico da Figura 6.3.

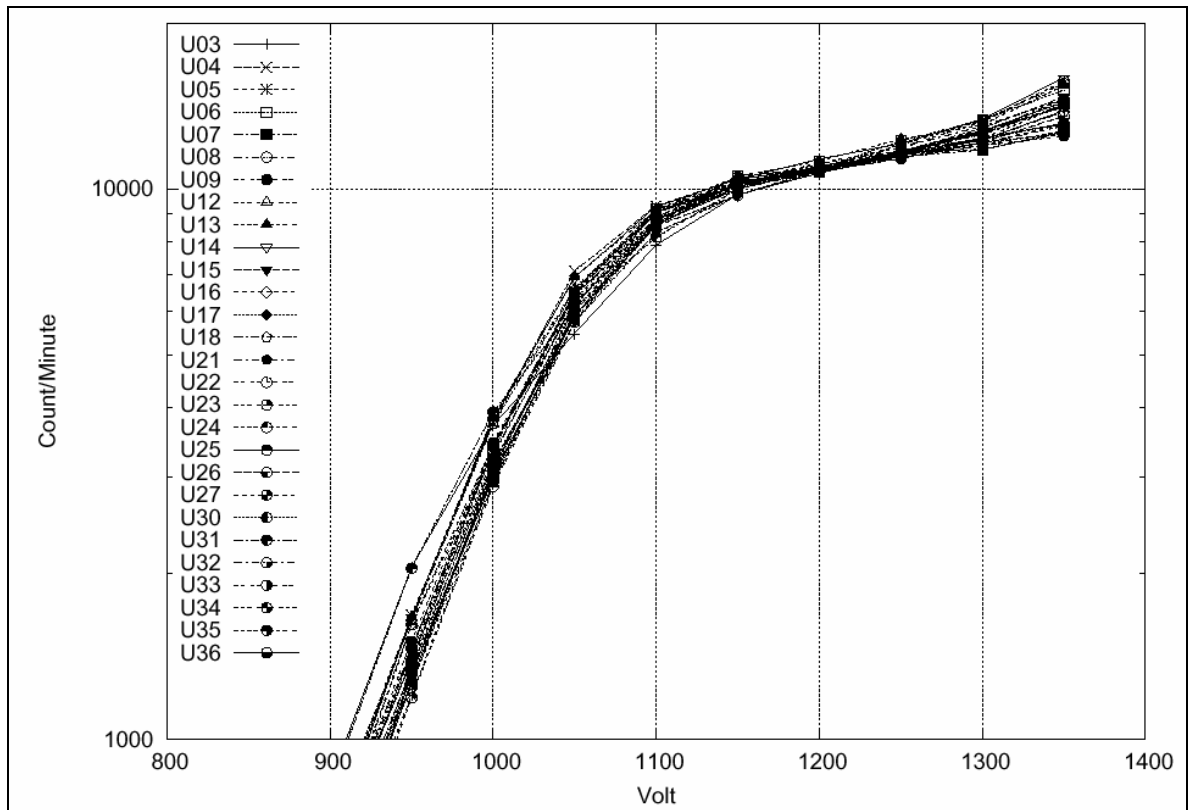
Após estes ajustes, conseguiu-se a aproximação entre as curvas conforme mostrado na Figura 6.4.



**Figura 6.4** - Contagem de muons por minuto para os detectores L3-9 como função da tensão aplicada entre o fotocátodo e o fotoânodo em suas respectivas fotomultiplicadoras após ajustes independentes de tensão. Fonte: Kuwabara, 2005 (comunicação pessoal).

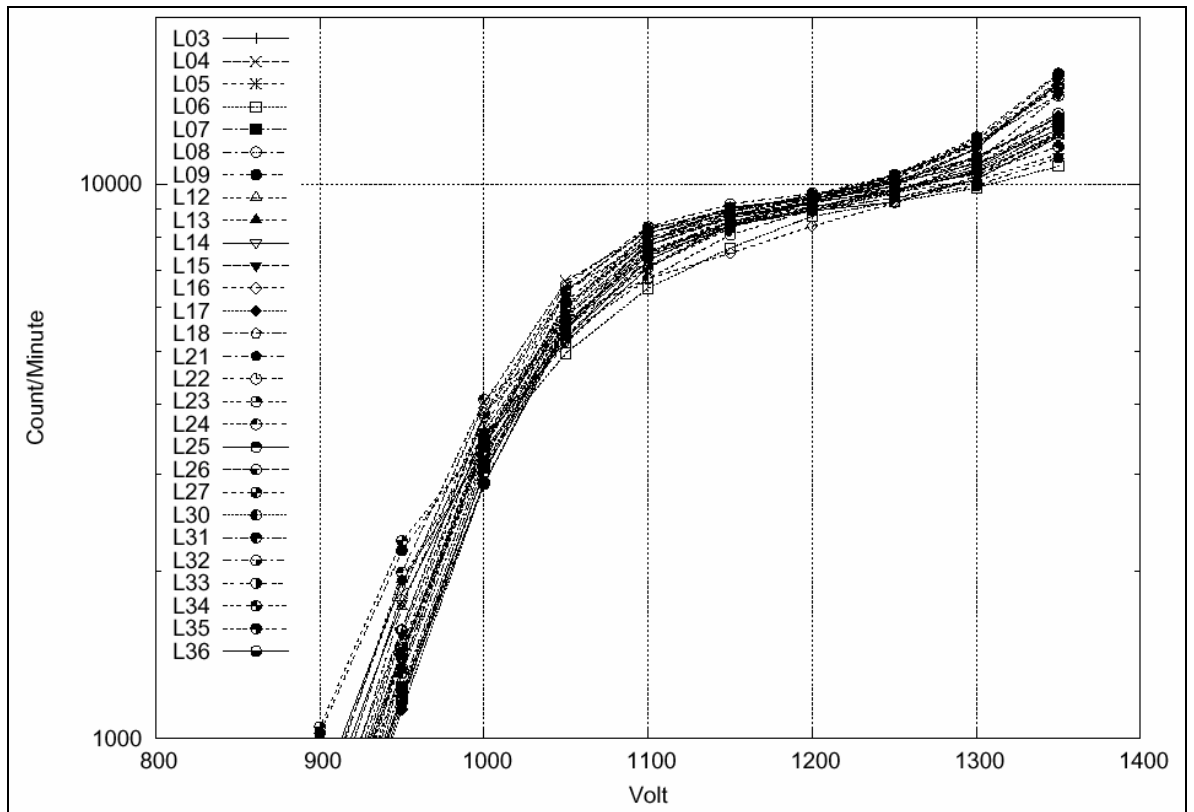
#### 6.4 Escolha da tensão comum de alimentação das fotomultiplicadoras

Após os ajustes de tensão individuais, faz-se ajuste da tensão comum a ser fornecida aos potenciômetros que por sua vez alimentam as PMTs. Na escolha desta tensão, observam-se os gráficos das contagens por minuto como função da tensão aplicada para todos os detectores (Figura 6.5, para a camada superior, Figura 6.6 para a camada inferior) e escolhe-se o ponto onde a inclinação das curvas é mínima. Dessa forma, variações eventuais de tensão resultarão em mínima variação na contagem.



**Figura 6.5** - Contagens de múons como função da tensão comum de alimentação das PMTs para todos os detectores da camada superior. Fonte: Kuwabara, 2005 (comunicação pessoal).





**Figura 6.6** - Contagens de múons como função da tensão comum de alimentação das PMTs para todos os detectores da camada inferior. Fonte: Kuwabara, 2005 (comunicação pessoal).

Observando-se os gráficos, escolheu-se a tensão comum de 1300 V.

## CAPÍTULO 7 - ANÁLISE DE DADOS DO TELESCÓPIO PROTÓTIPO E DO TELESCÓPIO EXTENDIDO

### 7.1 Dados do meio interplanetário

Para a identificação das estruturas magnéticas do meio interplanetário foram utilizados dados dos instrumentos MAG (*Magnetometer*) e SWEPAM (*Solar Wind Electron Próton Alpha Monitor*) a bordo do satélite ACE (*Advanced Space Composition*). Estes dados são públicos e estão disponíveis no site <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2>.

O satélite ACE órbita o ponto Lagrangeano L1, que é o ponto de equilíbrio gravitacional Terra-Sol, distante 1,5 milhões de quilômetros da Terra e 148,5 milhões de quilômetros do Sol. Alguns instrumentos presentes no satélite ACE são: espectrômetro de raios cósmicos, espectrômetro de vento solar, monitor de prótons, elétrons e partículas alfa, magnetômetro e analisador de partículas energéticas solares (íons carregados).

O instrumento MAG mede a direção e a intensidade do campo magnético interplanetário (IMF) em 1 UA como função do tempo. Trata-se basicamente de um magnetômetro fluxgate de 3 eixos. O sistema de processamento usa conversor A/D de 12 bits controlado por microprocessador. O equipamento tem várias faixas de medição, desde  $\pm 4nT$  até  $\pm 65.536nT$ . O nível de ruído do sensor  $< 0,006nT$  RMS. A taxa de amostragem é de até 6 vetores por segundo de forma contínua no modo padrão. (baseado em <http://www-ssg.sr.unh.edu/mag/ace/instrument.html>)

O instrumento SWEPAM mede os fluxos do plasma do vento solar de elétrons e íons como função da energia e da direção. Esses dados fornecem informações detalhadas das condições do vento solar. Medições de elétrons e íons são realizadas com sensores separados. O sensor de íons mede energia entre 0,26 e 36 keV e a faixa de energia do sensor de elétrons é entre 1 e 1350 eV (por núcleo). Os dois sensores são analisadores eletrostáticos, que medem a energia por carga de cada partícula orientando sua trajetória através do sistema. Em razão da rotação do satélite, são monitoradas todas as direções de chegada do vento solar.

## 7.2 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. Neste trabalho foi utilizado índice Dst oriundo do *World Data Center for Geomagnetism* (Kyoto, Japão) disponível no site <http://swdcd.db.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>.

## 7.3 Dados do Telescópio Cintilador de Muons

No telescópio protótipo foram utilizados contagens para direções determinadas com resolução temporal de uma hora. No telescópio expandido foi utilizada resolução temporal de 10 minutos.

A variação na contagem de detector de muons  $\Delta$  é apresentada em forma de porcentagem para cada telescópio,

$$\Delta(\%) = \left[ \frac{X - Y}{Y} \right] \times 100.$$

Onde  $X$  é a contagem em análise e  $Y$  é a média da contagens para um período de tempo muito maior do que a duração da tempestade geomagnética. A média foi calculada usando o período de tempo de um ano. As contagens são tomadas para período de 1 hora, no telescópio protótipo, e de 10 minutos, no telescópio expandido.

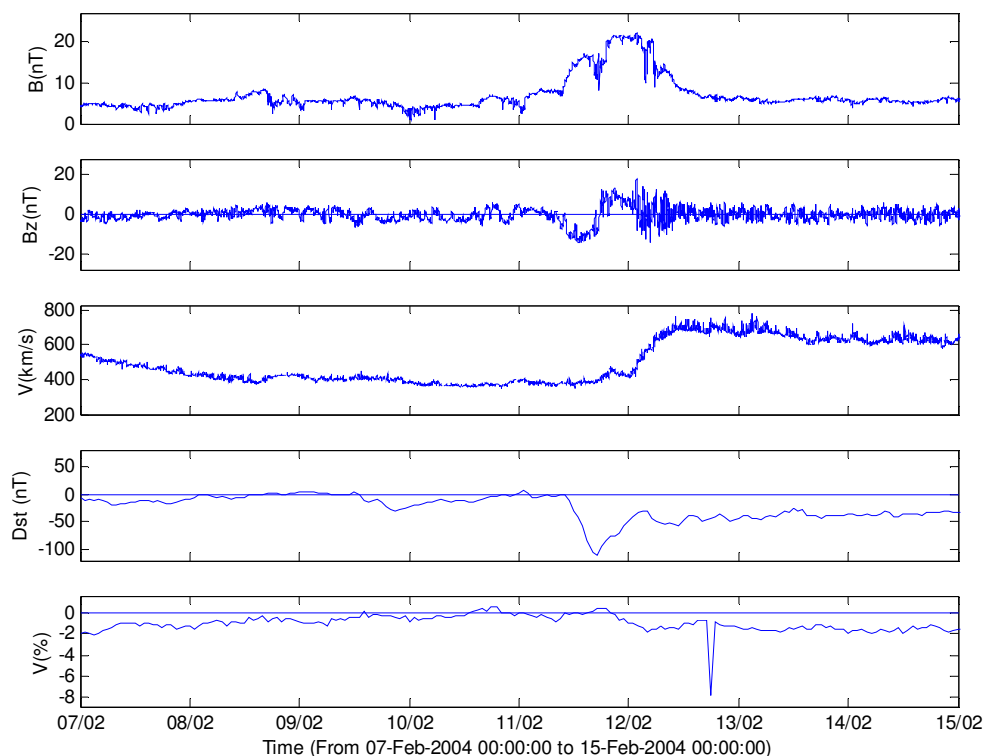
## 7.4 Confeção de gráficos

Os dados estudados foram organizados em gráficos de forma permitir a identificação de estruturas interplanetárias geoféticas, a ocorrência de tempestade geomagnética e a resposta de contagem de muons.

Estes gráficos foram desenvolvidos com auxílio de programação em Matlab (*Matrix Laboratory*) e IDL (*Interactive Data Language*).

Os gráficos das Figuras 7.1, 7.2, 7.3 e 7.4 mostram a associação de todos os dados. Nos dois primeiros painéis de cima para baixo, estão representados o módulo do campo magnético interplanetário (em nT) e o componente “z” do campo magnético interplanetário (em nT), dado no sistema de coordenadas GSM, que é paralelo ao eixo

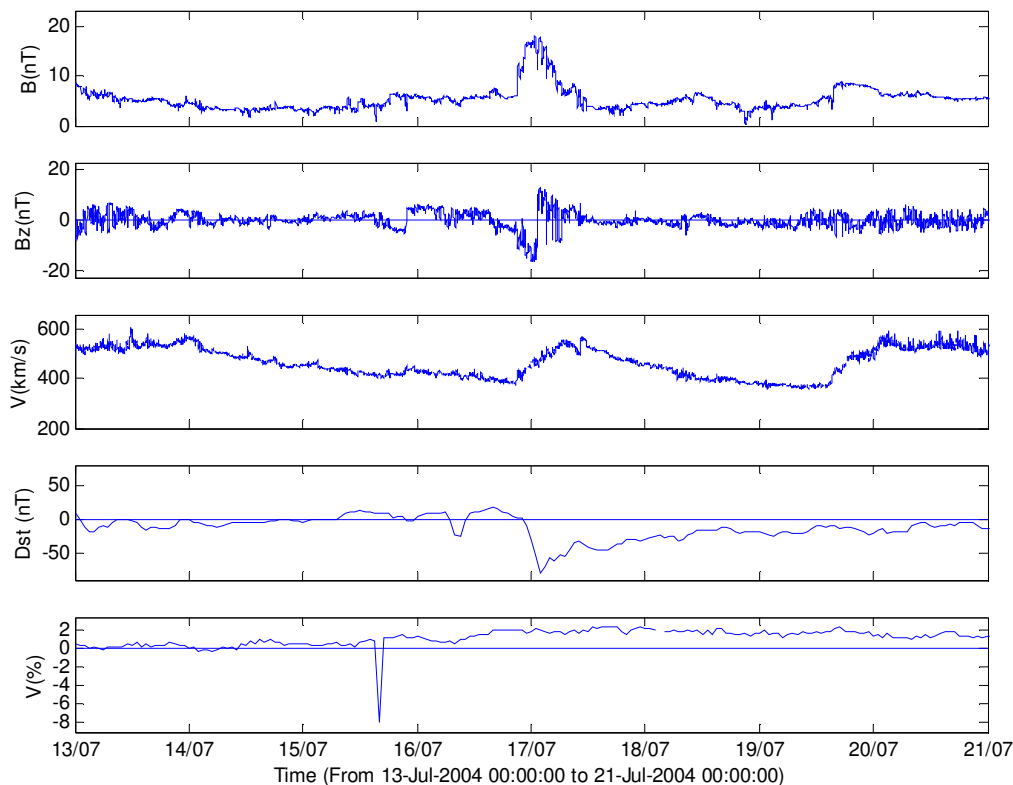
de dipolo magnético da Terra ambos obtidos do instrumento MAG. O terceiro painel mostra a velocidade do vento solar está a velocidade do vento solar (em km/s) obtido pelo instrumento SWEFAM. Estes três parâmetros são obtidos do satélite ACE com resolução temporal de 64s. O quarto painel de cima para baixo mostra o índice Dst (em nT). No último painel tem-se a contagem de muons para o telescópio protótipo de muons do Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra. Seguem abaixo análises individuais de gráficos para o período de 2004.



**Figura 7.1** - Evento de tempestade geomagnética intensa ocorrido no período de 7 a 15 de fevereiro de 2004.

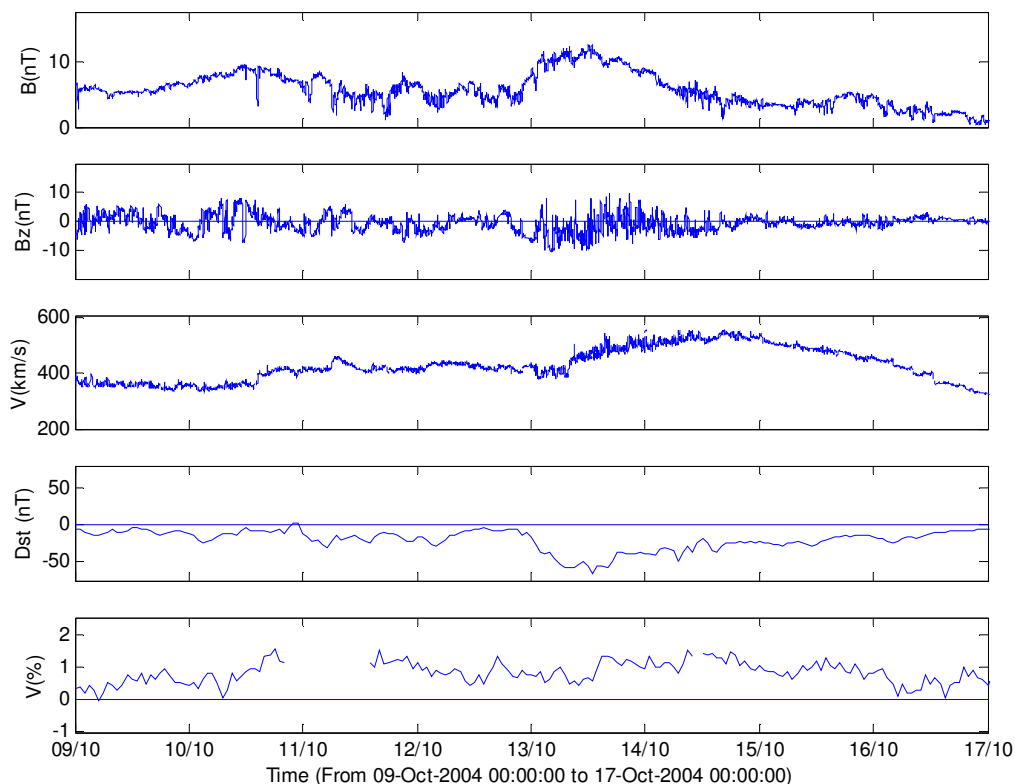
No período de 07 a 15 de fevereiro de 2004 (Figura 7.1) ocorreu uma tempestade geomagnética intensa com valor de mínimo do índice Dst  $-109$  nT no dia 11. A velocidade do vento solar atingiu valor máximo de  $\sim 700$  km/s. O módulo do CMI foi  $\sim 20$  nT e pôde-se notar uma rotação no seu componente “z”. Observou-se decréscimo na contagem de muons de  $\sim 2\%$  após o início da tempestade geomagnética. Conforme Da Silva (2005) esse decréscimo ocorreu 16,5 horas após o choque interplanetário e a estrutura se trata de uma CIR (*Corotating Interaction Region*, Região de Interação Cor-

Rotante), que são originárias da interação de feixes de plasma rápidos e lentos originários do Sol.



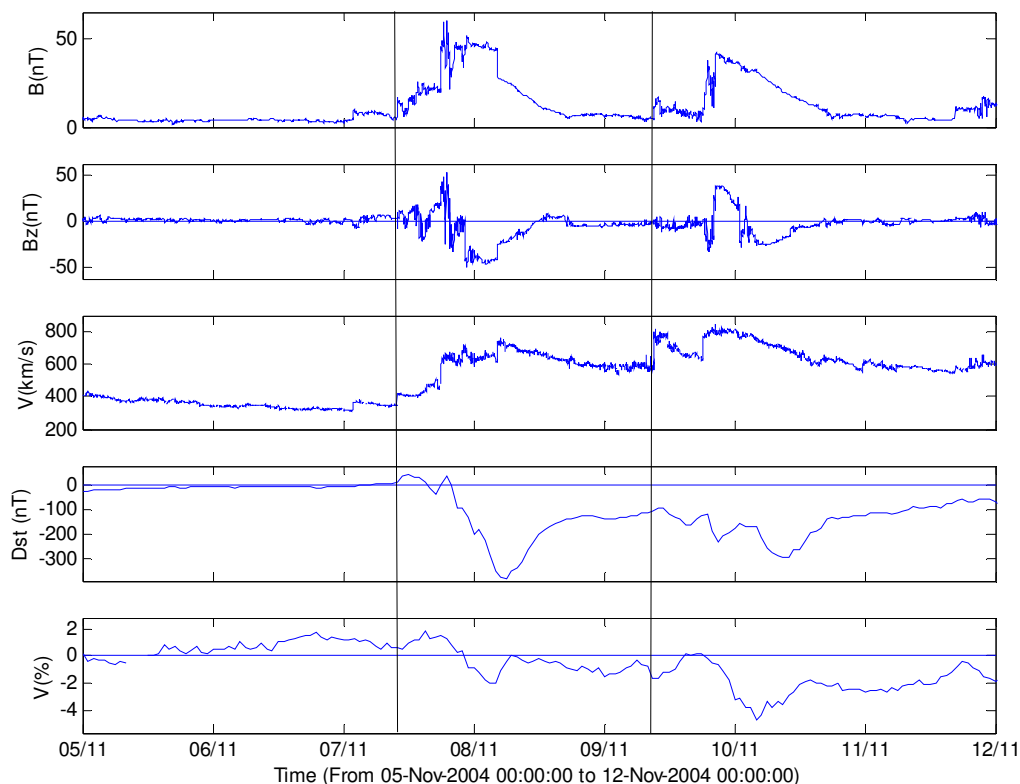
**Figura 7.2** – Evento de tempestade geomagnética ocorrido entre 14 e 21 de julho de 2004.

No período entre 13 e 21 de julho de 2004 (Figura 7.2), o índice Dst sofreu um decréscimo com pico de  $-80$  no dia 17. O valor do módulo do campo magnético interplanetário atingiu um valor máximo entre 10 e 20 nT e o componente na direção “z” deste campo sofreu uma rotação, passando inicialmente do sentido positivo para o negativo e posteriormente do negativo para o positivo. A velocidade do vento solar teve seu valor máximo entre 500 e 600 km/s. A contagem de muons sofreu um aparente aumento de 2% em relação à média no período de ocorrência da tempestade. Conforme Da Silva (2005), a estrutura interplanetária causadora da tempestade geomagnética trata-se de uma estrutura complexa, que é a interação de dois ou mais tipos de estruturas diferentes ou iguais.



**Figura 7.3** – Evento de tempestade geomagnética ocorrido de 9 a 17 de outubro de 2004.

No evento entre 9 e 17 de outubro de 2004 (Figura 7.3) ocorreu um decréscimo no índice Dst com valor mínimo de  $-63$  nT. Trata-se de uma tempestade geomagnética moderada. Não se pode observar decréscimo na contagem de muons para a direção vertical. O campo magnético interplanetário alcançou valores de  $\sim 10$  nT durante a ocorrência da tempestade geomagnética na Terra. A velocidade do vento solar superou os 500 km/s.



**Figura 7.4** - Evento de tempestade geomagnética ocorrido de 5 a 12 de novembro de 2004

No período entre 5 e 12 de novembro de 2004 houveram dois eventos de tempestades geomagnéticas cujos índices Dst limites foram  $-373$  nT e  $-289$  nT para o primeiro e segundo eventos, respectivamente. Tratam-se de duas tempestades geomagnéticas super-intensas. Pode-se observar um decréscimo na contagem de muons para a direção vertical de  $\sim 2\%$  na primeira tempestade e de mais de  $4\%$  na segunda. Pode-se notar um aumento do valor do campo magnético interplanetário B atingindo um valor de  $\sim 50$  nT. No primeiro evento é velocidade do vento solar é  $\sim 700$  km/s e no segundo  $\sim 800$  km/s. O aspecto do parâmetro Bz (que é a componente “z” do campo magnético no sistema de coordenadas GSM) no primeiro evento indica possivelmente a presença de uma nuvem magnética.

## CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES

O meio interplanetário tem sua atividade fortemente influenciada pelo Sol, que pode ser considerado o “motor” do Sistema Solar. A Terra está sujeita a fenômenos resultantes da atividade solar, tais como tempestades geomagnéticas, que por sua vez têm conseqüências sobre sistemas tecnológicos, causando prejuízos econômicos.

O Telescópio Cintilador de Muons do Observatório Espacial do Sul, São Martinho da Serra, RS, mostrou resposta a tempestades geomagnéticas intensas no período de 2004. Nos 3 eventos de tempestade geomagnética intensa ou super-intensa ( $Dst < -100$  nT) analisados pode ser observado decréscimo na contagem de muons. Nos dois eventos com tempestade geomagnética moderada ( $-50$  nT  $< Dst < -100$  nT) estudados não pode ser observado decréscimo de muons.

Com a ampliação do sistema, o Telescópio Cintilador de Muons, o erro na observação sofreu redução. O aumento do número de detectores de 8 para 56 permitiu acréscimo do número de direções de visão. Dessa forma, tende-se a uma cobertura continua dos ângulos de *pitch*, o que é adequado para realizar a previsão das tempestades geomagnéticas, conforme sugerido por Munakata *et al.* (2000). A ocorrência de tempestade geomagnética está associada a decréscimos na contagem do telescópio de muons.

Foi constatada correlação dos níveis de tensão aplicada às fotomultiplicadoras e temperatura da sala com as contagens de muons. Essas correlações são indesejadas, podem ser consideradas como ruído. Está sendo avaliado a correlação entre a luminosidade da sala onde se encontra o telescópio detector de muons com as suas contagens.

O desenvolvimento do Projeto dentro da Cooperação Brasil-Japão-EUA em Clima Espacial permitiu ao acadêmico interagir com o Pesquisador Prof. Dr. Kazuoki Munakata, da Universidade de Shinshu (Japão) e com o Pesquisador Dr. Takao Kuwabara, da Universidade de Delaware (EUA).

Em dezembro de 2005, o acadêmico teve a oportunidade de participar do *3rd El Leoncito School on School Physics*, realizado em San Juan, Argentina, onde participou de palestras sobre Física Solar e instrumentação ministradas pelo Prof. Rainer Schwenn, do Max-Planck Institut für Sonnensystemforschung – MPS, Alemanha, e do Dr.



Guilherme Stenborg, do Goddard Space Flight Center (GSFC/NASA), EUA. Além disso apresentou trabalho intitulado “*Update of the Southern Space Observatory’s multidirecional muons detector telescope*”.

Em março de 2006 surgiu outra grande oportunidade para o acadêmico: a participação no simpósio internacional *11th Quadrennial Solar Terrestrial Physics Symposium “Sun, Space Physics and Climate”*, no Rio de Janeiro – RJ. Neste evento o acadêmico apresentou trabalho e assistiu a diversas palestras de pesquisadores de diversos países.

Além de permitir ao acadêmico o conhecimento e utilização do método científico, o Projeto permitiu o desenvolvimento de diversas habilidades interpessoais e de capacidade de trabalho em grupo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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).
- 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).
- Russell, R. *What is space Weather?* Disponível em: <[http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/space\\_weather/sw\\_intro/what\\_is\\_sw.html&edu=high](http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/space_weather/sw_intro/what_is_sw.html&edu=high)>. Acessado em 22 de dezembro de 2005.
- Jokipii, J. R. *Cosmic Rays*. In: Sues, S. T., Tsurutani, B. T.(eds.) From the Sun. Washington DC, American Geophysical Union (2000).
- 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).
- Hamamatsu Photonics K. K., *Electron Tube Center. Construction and Operating Characteristics*, <[www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/PMT\\_construction.pdf](http://www.hpk.co.jp/Eng/products/ETD/pdf/PMT_construction.pdf)>. Acessado em 23 de dezembro de 2005.
- 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).

- Gonzalez, W. D., Joselyn, J. A., Kamide, Y., Kroehl, H. W., Rostoker, G., Tsurutani, B. T., Valyiliunas, V. M. *What is a magnetic storm?*. J. Geophys. Res., v. 99, A4, 5771-5792 (1994).
- 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.
- Kamide, Y.; Yokoyama, N.; Gonzalez, W. D.; Tsurutani, B. T.; Daglis, I. A.; Brekke, A.; Masuda, S. *Two-step development of geomagnetic storms*. J. Geophys. Res., v. 103, A4, 6917-6921 (1998).
- Brant, J. *Introduction to the solar wind*. San Francisco (1970).
- Dal Lago, A. *Estudo de nuvens magnéticas geoféticas no meio interplanetário*. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo (1999).
- Dal Lago, A. *Estudo das estruturas geoféticas 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. *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).
- Savian, J.F.; Silva, M.R., Dal Lago, A., Munakata, K., Gonzalez, W.D., Schuch, N.J., *Analysis of super intense geomagnetic storms using cosmic rays and interplanetary observations*. Submetido: Revista Brasileira de Geofísica (2005).
- 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).
- Forsyth, B. *Solar Magnetic Field Reversal*. Disponível em <<http://www.sp.ph.ic.ac.uk/~forsyth/reversal/>>. Acessado em 15 de maio de 2006.
- Duzellier, S. *Radiation effects on electronic devices in space*. Aerospace science and technology, n.9, 93-99 (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).

**ANEXO 1**

**TÍTULOS E RESUMOS DE TRABALHOS APRESENTADOS NO PERÍODO DE  
VIGÊNCIA DA BOLSA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA**

**AGOSTO/2005 – JULHO/2006**

1. **BRAGA, Carlos Roberto** ; SAVIAN, Jairo Francisco ; SILVA, Cristian Willian Saueressig da ; SILVA, Samuel Martins da ; ANDRIOLI, Vânia Fátima ; SILVA, Marlos Rockenbach da ; LAGO, Alisson Dal ; MUNAKATA, Kazuoki ; SCHUCH, Nelson Jorge . *Amplification of the international high-energy cosmic rays (muons) detector network*. In: 11th Quadrennial STP Symposium on Sun, Space Physics and Climate, 2006, Rio de Janeiro - RJ, 2006.
2. SAVIAN, Jairo Francisco ; SILVA, Marlos Rockenbach da ; LAGO, Alisson Dal ; **BRAGA, Carlos Roberto** ; SANTOS, Luiz Cezar Nunes dos ; SILVA, Cristian Willian Saueressig da ; SILVA, Samuel Martins da ; ANDRIOLI, Vânia Fátima ; MUNAKATA, Kazuoki ; SCHUCH, Nelson Jorge . *Preliminary data from the new muon telescope located in the Southern Space Observatory at São Martinho Serra, RS, Brazil*. In: European Geosciences Union General Assembly 2006, 2006, Viena, 2006.
3. **BRAGA, Carlos Roberto** ; SAVIAN, Jairo Francisco ; SILVA, Marlos Rockenbach da ; MUNAKATA, Kazuoki ; LAGO, Alisson Dal ; SCHUCH, Nelson Jorge . *Ampliação do protótipo do telescópio multidirecional detector de muons*. In: Jornada Acadêmica Integrada JAI-UFSM, 2006, Santa Maria - RS, 2006.
4. SAVIAN, Jairo Francisco ; **BRAGA, Carlos Roberto** ; ANDRIOLI, Vânia Fátima ; SILVA, Samuel Martins da ; SILVA, Cristian Willian Saueressig da ; SILVA, Marlos Rockenbach da ; LAGO, Alisson Dal ; GONZALEZ, Walter Demetrio ; MUNAKATA, Kazuoki ; BIEBER, John ; SCHUCH, Nelson Jorge. *Analysis of the solar and interplanetary origin of intense geomagnetic storms and their effects on ground cosmic rays*. In: 11th Quadrennial STP Symposium on Sun, Space Physics and Climate, 2006, Rio de Janeiro - RJ, 2006.
5. SILVA, Samuel Martins da ; ANDRIOLI, Vânia Fátima ; SAVIAN, Jairo Francisco ; **BRAGA, Carlos Roberto** ; ECHER, Ezequiel ; SCHUCH, Nelson Jorge . *Estudo comparativo de frentes de choques planetárias*. In: XX Jornada Acadêmica Integrada, 2006, Santa Maria - RS, 2006.

6. SILVA, Samuel Martins da ; ANDRIOLI, Vânia Fátima ; **BRAGA, Carlos Roberto** ; SILVA, Cristian Willian Saueressig da ; SAVIAN, Jairo Francisco ; ECHER, Ezequiel ; SCHUCH, Nelson Jorge . *A comparative study of planetary bow shocks*. In: 11th Quadrennial STP Symposium on Sun, Space Physics and Climate, 2006, Rio de Janeiro - RJ, 2006.
7. **BRAGA, Carlos Roberto** ; LAGO, Alisson Dal ; SILVA, Marlos Rockenbach da ; SAVIAN, Jairo Francisco ; ANDRIOLI, Vânia Fátima ; SCHUCH, Nelson Jorge . *Tempestades Geomagnéticas: danos materiais e busca de sua redução através de previsão usando detectores de muons*. In: XX CRICTE - CONGRESSO REGIONAL E INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA e V FEIRA DE PROTÓTIPOS, 2005, Foz do Iguaçu - PR, 2005.
8. ANDRIOLI, Vânia Fátima ; SAVIAN, Jairo Francisco ; SILVA, Samuel Martins da ; **BRAGA, Carlos Roberto** ; ECHER, Ezequiel ; SCHUCH, Nelson Jorge . *Estimativa do tempo de propagação no meio interplanetário das ondas de choques transientes do Sol a 1UA*. In: XX CRICTE -CONGRESSO REGIONAL E INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA e V FEIRA DE PROTÓTIPOS, 2005, Foz do Iguaçu - PR, 2005.
9. **BRAGA, Carlos Roberto** ; SAVIAN, Jairo Francisco ; ANDRIOLI, Vânia Fátima ; SANTOS, Luiz Cezar Nunes dos ; SILVA, Cristian Willian Saueressig da ; LAGO, Alisson Dal ; SILVA, Marlos Rockenbach da ; GONZALEZ, Walter Demetrio ; ECHER, Ezequiel ; VIEIRA, Luiz Eduardo Antunes ; LUCAS, Aline de ; MUNAKATA, Kazuoki ; BIEBER, John ; SCHUCH, Nelson Jorge. *Upgrade of the Southern Space Observatory's multidirecional muons detector telescope*. In: 3rd El Leoncito School of Solar Physics, 2005, San Juan, 2005.
10. SILVA, Samuel Martins da ; SAVIAN, Jairo Francisco ; **BRAGA, Carlos Roberto** ; SILVA, Cristian Willian Saueressig da ; ANDRIOLI, Vânia Fátima ; ECHER, Ezequiel ; SCHUCH, Nelson Jorge . *A comparative study of planetary bow shocks*. In: 3rd El Leoncito School of Solar Physics, 2005, San Juan, 2005.

11. SAVIAN, Jairo Francisco ; LAGO, Alisson Dal ; SILVA, Marlos Rockenbach da ; LUCAS, Aline de ; SANTOS, Luiz Cezar Nunes dos ; SILVA, Samuel Martins da ; **BRAGA, Carlos Roberto** ; SILVA, Cristian Willian Saueressig da ; ANDRIOLI, Vânia Fátima ; ECHER, Ezequiel ; VIEIRA, Luiz Eduardo Antunes ; GONZALEZ, Walter Demetrio ; MUNAKATA, Kazuoki ; BIEBER, John ; SCHUCH, Nelson Jorge . *On the solar and interplanetary origin of intense geomagnetic storms and ground cosmic ray response*. In: 3rd El Leoncito School of Solar Physics, 2005, San Juan, 2005.
12. ANDRIOLI, Vânia Fátima ; SAVIAN, Jairo Francisco ; SILVA, Samuel Martins da ; **BRAGA, Carlos Roberto** ; ECHER, Ezequiel ; SCHUCH, Nelson Jorge. *A comparison between fast and slow interplanetary shock parameters observed near the Earth*. In: 8º Encontro Brasileiro de Física de Plasmas, 2005, Rio de Janeiro - RJ, 2005.



AMPLIATION OF THE INTERNATIONAL HIGH-ENERGY COSMIC RAYS  
(MUONS) DETECTOR NETWORK

**Carlos Roberto Braga**<sup>(1,2)</sup>, **Jairo Francisco Savian**<sup>(1,2)</sup>, **Cristian Willian Saueressig da Silva**<sup>(1,2)</sup>, **Samuel Martins da Silva**<sup>(1,2)</sup>, **Vânia Fátima Andrioli**<sup>(1,2)</sup>,  
**Marlos Rockenbach da Silva**<sup>(3)</sup>, **Alisson Dal Lago**<sup>(3)</sup>,  
**Kazuoki Munakata**<sup>(4)</sup>, **Nelson Jorge Schuch**<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> *Southern Regional Space Research Center (CRSPE/INPE – MCT),  
Santa Maria, Brazil.*

<sup>(2)</sup> *Space Science Laboratory of Santa Maria – (LACESM/CT/UFSM – MEC),  
Santa Maria, Brazil.*

<sup>(3)</sup> *Space Geophysics Department, National Center for Space Research (DGE/CEA/INPE –  
MCT), Sao Jose dos Campos, Brazil.*

<sup>(4)</sup> *Physics Department, Faculty of Science, Shinshu University, Matsumoto, Japan.*

**Abstract:** The utilization of high-energy cosmic-ray (muons) detectors is been shown to be a useful tool for Space Weather studies and forecasting. The objective of this studies to show preliminary cosmic-ray response to interplanetary geoeffective events and comment on the engineering-related aspects of the ampliation of the prototype multidirectional muons detector telescope at the Southern Space Observatory (SSO/CRSPE/INPE – MCT), at geographic coordinates (29°26'24''S, 53°48'38''W) and geomagnetic coordinates (19° 13' 48''S and 16°30'E) with inclination “dip” 33°S, in Sao Martinho da Serra, Brazil. We use the vertical component hourly muon count rates of SSO's detector, Kyoto's hourly Equatorial Dst values and IMF data from the *Advanced Composition Explorer* (ACE) satellite for periods with intense geomagnetic storms (Dst < -100nT). We plotted the data and observed, at many times, a decrease in the hourly muon count rates during the geomagnetic storms (Forbush decreases). On the second part, we use manufacturer's information and obtain a general description of the prototype's construction/operation and muon counting characteristics, in order to allow future works linked with ground-based high-energy comic ray Space Weather instrumentation. The data in analysis tend to confirm previous studies that show a gap in muon detector coverage and the necessity of the current network ampliation.

## A COMPARATIVE STUDY OF PLANETARY BOW SHOCKS

**S. M. da Silva**<sup>1,3</sup>, **V. F. Andrioli**<sup>1,3</sup>, **C. R. Braga**<sup>1,3</sup>, **C. W. S. da Silva**<sup>1,3</sup>, **J. F. Savian**<sup>1,3</sup>, **E. Echer**<sup>2</sup>, **N. J. Schuch**<sup>3</sup>

(1) *Space Science Laboratory of Santa Maria – LACESM/UFSM,  
Santa Maria, RS, Brazil.*

(2) *National Institute for Space Research – INPE – MCT, São José Campos, SP, Brazil.*

(3) *Southern Regional Space Research Center – CRSPE/INPE – MCT,  
Santa Maria, RS, Brazil.*

*samuel@lacesm.ufsm.br/ Fax: +55 – 55 220 8007*

**Abstract:** We present a comparative study of planetary bow shocks in the solar system. The planetary bow shocks shape and strength will depend both on the planetary magnetosphere and on the solar wind strength (Mach Number). The solar wind properties vary with the heliocentric distance and this variation will influence on the solar wind – planet interaction. In the solar system, it is known that planets have two types of magnetospheres: induced (Venus, Mars) and intrinsic (Earth, Mercury, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptune). The induced magnetospheres of Venus and Mars are caused by the interaction of solar wind with their ionospheres, since their intrinsic magnetic fields are very weak. The others planets are known to have an internal magnetic field (with exception of Pluto, which it is not know at present if it has or not an intrinsic magnetic field). These differences in the magnetospheres will cause different types of bow shocks. We review the present day knowledge about these bow shocks and show examples of bow shock crossings as measured by magnetometers on spacecrafts.

ANALYSIS OF THE SOLAR AND INTERPLANETARY ORIGIN OF  
INTENSE GEOMAGNETIC STORMS AND THEIR EFFECTS

ON GROUND COSMIC RAYS

**Jairo Francisco Savian<sup>(1,5)</sup>, Carlos Roberto Braga<sup>(1,5)</sup>, Vânia Fátima  
Andrioli<sup>(1,5)</sup>,  
Samuel Martins da Silva<sup>(1,5)</sup>, Cristian Willian Saueressig da Silva<sup>(1,5)</sup>,  
Marlos Rockembach da Silva<sup>(2)</sup>, Alisson Dal Lago<sup>(2)</sup>,  
Walter Demetrio Gonzalez<sup>(2)</sup>, Kazuoki Munakata<sup>(3)</sup>,  
John Bieber<sup>(4)</sup>, Nelson Jorge Schuch<sup>(5)</sup>**

(1) *Space Science Laboratory of Santa Maria – LACESM/CT – UFSM,  
Santa Maria, Brasil,*

(2) *National Institute For Space Research – INPE – MCT,  
São José dos Campos, Brasil,*

(3) *Physics Department, Faculty of Science, Shinshu University, Matsumoto, Japan.*

(4) *Bartol Research Institute, University of Dalaware, Newark, USA,*

(5) *Southern Regional Space Research Center – CRSPE/INPE – MCT,  
Santa Maria, Brasil*

SAVIAN@LACESM.UFSM.BR/ FAX: +55 – 55 220 8007/ TEL: +55- 55- 3220-8021

**Abstract:** Solar coronal mass ejections (CMEs) are the principal cause of the intense geomagnetic storms at Earth. In this paper we study the solar origin of intense geomagnetic storms ( $Dst < -100nT$ ), in the period from April 2001 to May 2005, using observations of the *Large Angle and Spectroscopic Coronagraph* (LASCO) instrument, aboard the *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO). In order to do that, we correlate the geoeffective interplanetary structures near the Earth, using observations of *Advanced Composition Explorer* (ACE) satellite, with solar CMEs. ACE supplies observations of plasma and magnetic field in the interplanetary medium. We analyze the effects this solar-interplanetary structures in geomagnetic activity using geomagnetic index and modulation effects in high-energy cosmic rays (muons) observed in South of Brazil at Sao Martinho da Serra, with the multidirectional muon telescope in the Southern Space Observatory – SSO of the INPE’s Southern Regional Space Research Center at (29°26’24’’S, 53°48’38’’W). In this project we present preliminary results and future perspectives.

## **TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS: DANOS MATERIAIS E BUSCA DE SUA REDUÇÃO ATRAVÉS DE PREVISÃO USANDO DETECTORES DE MUONS**

**Carlos Roberto Braga<sup>1,2</sup>, Alisson Dal Lago<sup>3</sup>, Marlos Rockenbach da Silva<sup>3</sup>, Jairo Francisco Savian<sup>1,2</sup>, Vânia Fátima Andrioli<sup>1,2</sup> e Nelson Jorge Schuch<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup>Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT

<sup>2</sup>Universidade Federal de Santa Maria - Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM

<sup>3</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Departamento de Geofísica Espacial DGE/CEA/INPE - MCT

Av. Roraima – Bairro Camobi – Caixa Postal 5021 - 97110-970 – Santa Maria-RS

carlos@lacesm.ufsm.br

Danos a dispositivos e equipamentos, tanto na Terra quanto no espaço, estão associados a tempestades geomagnéticas. Associada a área de Clima Espacial, desenvolveu-se instrumentação para estudar e monitorar tempestades geomagnéticas, como é o caso da Rede Internacional de Telescópios Multidirecionais de Raios Cósmicos de Alta Energia (Muons), formada por um telescópio em Nagoya (Japão), um em Hobart (Australia) e recentemente um telescópio em São Martinho da Serra, RS (Brasil), instalado no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE - MCT. Sabe-se que as estruturas ejetadas pelo Sol que viajam até a Terra, causando tempestades geomagnéticas, blindam parte dos raios cósmicos observados na superfície terrestre, podendo ser este efeito utilizado para previsão. O objetivo deste trabalho é relatar alguns danos oriundos de tempestades geomagnéticas, descrever o funcionamento do detector de muons e comentar sobre a sua eficiência para futuras previsões de tempestades geomagnéticas. Para realizar esta análise, utilizam-se os dados da própria rede juntamente com dados de satélites do meio interplanetário. Em um estudo desenvolvido em 2000 por Munakata e colaboradores, foi constatado que é possível prever a ocorrência de eventos de Tempestades Geomagnéticas. Estudos mostram que a ampliação desta rede, com a inclusão do telescópio em São Martinho da Serra aumenta sua eficiência e confiabilidade, tornando a rede uma excelente ferramenta para a previsão de tempestades geomagnéticas.

**ESTIMATIVA DO TEMPO DE PROPAGAÇÃO NO MEIO INTERPLANETÁRIO  
DAS ONDAS DE CHOQUES TRANSIENTES DO SOL A 1UA**

Vania Fatima Andrioli, Jairo Francisco Savian, Samuel Martins da Silva, Carlos Roberto Braga, Ezequiel Echer, Nelson Jorge Schuch  
vania@lacesm.ufsm.br - Universidade Federal de Santa Maria

Diversos tipos de ondas MHD (Magnetohidrodinâmicas), se propagam no meio interplanetário. Muitas dessas ondas podem originar frentes de choque que causam variações descontínuas nos parâmetros de plasma e campo magnético do vento solar. Essas ondas de choques podem ter suas origens nos remanescentes interplanetários das ejeções coronais de massa, desde que, os mesmos se propaguem no espaço interplanetário com velocidade relativa ao vento solar, maior do que a velocidade característica do meio, ou seja, a velocidade magnetosônica. Podemos identificar esses choques através da análise dos parâmetros de plasma, (densidade de prótons, temperatura e velocidade do vento solar) e intensidade do campo magnético interplanetário, a partir de observações “in-situ” no vento solar. O objetivo deste trabalho é estimar o tempo de propagação destas frentes de choque do Sol até a Terra. Pois, em muitos casos, esses remanescentes interplanetários indutores de choques, são fontes de tempestades geomagnéticas, as quais podem danificar muitos equipamentos tecnológicos. Assim, estimando o tempo de propagação, pode-se ter uma ferramenta adicional no estudo do clima espacial. Utilizou-se neste trabalho uma equação derivada das equações da teoria MHD ideal de Rankine-Hugoniot, para o cálculo da velocidade média de propagação dos choques. Usando-se esta velocidade calculada e a distância média Terra - Sol de 1UA (uma Unidade Astronômica 150 milhões de km), estimou-se o tempo de propagação da frente de choque. Com base em resultados preliminares de alguns eventos analisados, temos que, para um choque com velocidade de 650 km/s o tempo de propagação Sol - Terra é de aproximadamente 64 horas. Porém, há necessidade de comparar estes resultados com os obtidos por pesquisadores que utilizam outros métodos para a estimativa desse tempo de propagação. Assim, poderemos avaliar a precisão desse método. Esta avaliação está sendo realizada e será apresentada juntamente com os demais resultados. Tudo isso está sendo realizado com o objetivo maior de, futuramente, se dispor de métodos mais eficazes de correlação entre eventos interplanetários e suas origens solares, o que contribuirá para melhorias na previsão do Clima Espacial.

## **AMPLIAÇÃO DO PROTÓTIPO DO TELESCÓPIO MULTIDIRECIONAL DETECTOR DE MUONS<sup>1</sup>**

Carlos Roberto Braga<sup>2</sup>, Jairo Francisco Savian<sup>3</sup>, Marlos Rockenbach da Silva<sup>4</sup>,  
Kazuoki Munakata<sup>5</sup>, Alisson Dal Lago<sup>6</sup>, Nelson Jorge Schuch<sup>7</sup>

A utilização de detectores de raios cósmicos (muons) de alta energia tem se mostrado uma ferramenta importante para o clima espacial e previsão das estruturas interplanetárias capazes de causar tempestades geomagnéticas. Em março de 2001, um protótipo foi instalado no Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE – MCT), em São Martinho da Serra, RS (Brasil) como parte integrante da rede internacional de detectores de raios cósmicos de alta energia, que inclui detectores em Nagoya (Japão) e Hobart (Austrália). O objetivo deste trabalho é discutir a ampliação deste telescópio e, utilizando seus dados, apresentar dados preliminares da resposta dos raios cósmicos a distúrbios causadores de tempestades geomagnéticas. Além dos dados do protótipo, utilizaram-se observações de campo magnético e parâmetros de plasma do meio interplanetário. Espera-se que com esta ampliação seja possível, juntamente com os demais detectores da rede internacional, realizar a previsão de tempestades geomagnéticas com maior confiabilidade e antecedência e, dessa forma, evitar danos a dispositivos aeroespaciais e de telecomunicações. O presente trabalho tem se mostrado uma oportunidade singular para formação de conhecimentos nas áreas de clima espacial, física da magnetosfera e do meio interplanetário, raios cósmicos e instrumentação aeroespacial.

- 1 - Trabalho desenvolvido no Laboratório de Clima Espacial do CRSPE/INPE – MCT em parceria com o LACESM/CT - UFSM.
- 2 – Apresentador/Autor: Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica – UFSM.
- 3 – Co-autor: Acadêmico do Curso de Física – UFSM
- 4 – Co-autor: Mestre em Geofísica Espacial – DGE/CEA/INPE – MCT, São José dos Campos, SP.
- 5 – Co-autor: Pesquisador do Departamento de Física, Universidade de Shinshu, Japão
- 6 – Orientador: Pesquisador do Departamento de Geofísica Espacial – DGE/CEA/INPE – MCT, São José dos Campos, SP.
- 7 – Co-orientador: Coordenador da Ação 1275 do PNAE, Implantação do CRSPE/INPE - MCT

---

**XX Jornada Acadêmica Integrada, UFSM, 19, 20 e 21 de outubro de 2005**

## **ESTUDO COMPARATIVO DE FRENTES DE CHOQUES PLANETÁRIAS<sup>1</sup>**

Samuel Martins da Silva<sup>2</sup>, Vânia Fátima Andrioli<sup>3</sup>, Jairo Francisco Savian<sup>4</sup>  
Carlos Roberto Braga<sup>5</sup>, Ezequiel Echer<sup>6</sup>, Nelson Jorge Schuch<sup>7</sup>

A atmosfera superior solar encontra-se em contínua expansão supersônica através do meio interplanetário, com o plasma e o campo magnético da coroa solar preenchendo o sistema solar inteiro e constituindo o vento solar. O objetivo deste trabalho é um estudo comparativo entre as frentes de choque dos diversos planetas, através da comparação das respectivas magnetosferas e da identificação dos sinais de cruzamento das frentes de choque por espaçonaves, utilizando dados de plasma e campo magnético medidos por sensores a bordo das mesmas. Neste trabalho apresentamos uma comparação das principais características das magnetosferas planetárias e da variação do vento solar com a distância heliocêntrica. Alguns exemplos de cruzamentos de frente de choque são apresentados.

- 1 – Trabalho desenvolvido no Laboratório de Clima Espacial do CRSPE/INPE – MCT, em parceria com o LACESM/CT – UFSM.
- 2 – Apresentador/Autor: Acadêmico do Curso de Física Bacharelado – UFSM.
- 3 – Co-Autor: Acadêmico do Curso de Física Licenciatura – UFSM.
- 4 – Co-Autor: Acadêmico do Curso de Física Licenciatura – UFSM.
- 5 – Co-Autor : Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica – UFSM.
- 6 – Orientador: Pesquisador do Departamento de Geofísica Espacial – DGE/CEA/INPE – MCT.
- 7 – Co-orientador: Coordenador da Ação 1275 do PNAE, Implantação do CRSPE/INPE – MCT.

---

**XX Jornada Acadêmica Integrada, UFSM, 19, 20 e 21 de outubro de 2005.**

**A COMPARISON OF FAST AND SLOW INTERPLANETARY SHOCK PARAMETERS  
OBSERVED NEAR EARTH**

Vânia Fátima Andrioli

*Federal University of Santa Maria - UFSM- RS - Brazil*

Jairo Francisco Savian

*Federal University of Santa Maria - UFSM - RS - Brazil*

Samuel Martins da Silva

*Federal University of Santa Maria - UFSM- RS - Brazil*

Carlos Roberto Braga

*Federal University of Santa Maria - UFSM- RS - Brazil*

Ezequiel Echer

*National Institute for Space Research , DGE/CEA/INPE - MCT - SP - Brazil*

Nelson Jorge Schuch

*Southern Regional Space Research Center - CRSPE/INPE - MCT - RS - Brazil*

Several types of Magnetohydrodynamic waves - MHD - can propagate in the interplanetary space. Shock waves can appear when the relative speed between these waves and the solar wind is higher than the characteristic of magnetosonic speed. The interplanetary shock waves may have two basic origins: the interaction between the fast and slow speed streams of the solar wind in the corotating interaction regions and the interplanetary remnants of the coronal mass ejections. We can identify the occurrence of those shocks and classify each type through the analysis of the interplanetary parameters of plasma (protons density, temperature and speed of the solar wind) and magnetic field, by observations in-situ of the solar wind. We have used plasma and magnetic field data from sensors onboard the ACE - Advanced Composition Explorer spacecraft. We have classified the shocks according to the types fast or slow and forward or reverse, by looking at the plasma and magnetic field through the shocks. In this work we compare the solar wind upstream conditions (density, velocity, Alfvén and magnetosonic speeds) before interplanetary shocks and contrast these conditions for fast and slow shocks, during the solar cycle 23 decline (2002-2003).



Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 00880, 2006  
SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-00880  
© European Geosciences Union 2006



## **Preliminary data from the new muon telescope located in the Southern Space Observatory at São Martinho Serra, RS, Brasil**

J. F. Savian(1, 3), M. R. da Silva(2), A. Dal Lago(2), C. R. Braga(1, 3), L. C. N. dos Santos(1,3), C. W. S. da Silva(1,3), S. M. da Silva(1,3), V. F. Andrioli(1,3),

K. Munakata(4), N. J. Schuch(3)

(1) Space Science Laboratory of Santa maria – LACESM/CT/UFSM, Brasil, (2) National Institute for Space Research – INPE/MCT, Brasil, (3) Southern Regional Space Research Center – CRSPE/INPE/MCT, Brasil, (4) Physics Department, Faculty of Science, Shinshu University, Matsumoto Japan.

(savian@lacesm.ufsm.br/ +55-553220-8021)

Large geomagnetic storms are primarily caused by interplanetary disturbances associated with coronal mass ejection (CMEs). The cosmic ray particles of intensities  $> 1\text{ GeV}$  are normally suppressed by a factor of  $\sim 1$  to 10% downstream the CME shock and within the CME ejecta following the shock. In addition to these intensity depressions, called “Forbush decreases” (FDs), precursory phenomena appearing upstream the CME shock have also been reported. Munakata et. al. (2000) have identified cosmic ray precursors with lead times ranging from six to nine hours prior to the storm sudden commencement (SSC) and demonstrated that the muon detector network may provide useful information for space weather forecasting. In early March 2001, a small prototype muons detector was installed at Sao Martinho da Serra ( $29^{\circ}26'24''\text{S}$ ,  $53^{\circ}48'38''\text{W}$ , above 500m sea level), at the SSO of INPE, Brazil. The detector consists of two horizontal layers of plastic scintillators separated by 1.73 m, with an intermediate 5 cm thick layer of lead to absorb the soft component in cosmic rays in the atmosphere. Each layer comprises a  $2 \times 2$  array of  $1\text{ m}^2$  unit detectors ( $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$  plastic scintillator viewed by a photomultiplier tube of 12.7 cm diameter) giving a total detection area of  $4\text{ m}^2$ . In December 2005 this detector was upgraded to a  $7 \times 4$  configuration, enlarging its detection capability. In this work we present some prelim-

inary data from this new muon telescope. This study is important for the monitoring of energetic cosmic rays and their response to interplanetary magnetic disturbances, and in the near future it will be used for space weather forecasting.

**UPDATE OF THE SOUTHERN SPACE OBSERVATORY'S  
MULTIDIRECIONAL MUONS DETECTOR TELESCOPE**

Carlos Roberto Braga (1,3), Jairo F. Savian (1,3), Vânia F. Andrioli(1,3), Luiz C. N. dos Santos(1,3), Cristian W. S. da Silva (1,3) Alisson Dal Lago (2), Marlos R. da Silva (2), Walter D. G. Alarcon (2), Ezequiel Echer(2), Luis E. A. Vieira(2), Aline de Lucas(2), Kazuoki Munakata (4), John Bieber (5), Nelson J. Schuch (3)

1 Space Science Laboratory of Santa Maria – LACESM/CT - UFSM, Santa Maria, Brazil,

2 National Institute for Space Research – INPE – MCT, São José dos Campos, Brazil,

3 Southern Regional Space Research Center – CRSPE/INPE - MCT, Santa Maria, Brazil,

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

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

carlos@lacesm.ufsm.br / Fax: +55-55-220-8007

The utilization of high-energy cosmic rays (muons) detector have been showed to be an useful tool for Space Weather and forecasting of interplanetary structures that can produce geomagnetic storms. Since March 2001, a prototype was installed in Southern Space Observatory (SSO/CRSPE/INPE – MCT), in Sao Martinho da Serra, Brazil like part of an international high-energy cosmic rays detector network, with detectors in Nagoya (Japan) and Hobart (Australia). The objective of current project is discuss the detector's ampliation and using its data, preliminary show cosmic ray response to geomagnetic storms. It is also use data from interplanetary magnetic field. With the ampliation, it is waited that may be possible to do more accuracy geomagnetic storms forecasting and, in this way, to avoid damages to aerospace the telecommunications equipments. The current work showed itself a very good opportunity for formation of knowledge related to Space Weather, physics of interplanetary medium, cosmic rays and aerospace instrumentation.

**ON THE SOLAR AND INTERPLANETARY ORIGIN OF INTENSE  
GEOMAGNETIC STORMS AND GROUND COSMIC RAY RESPONSE**

J. F. SAVIAN (1,2); A. DAL LAGO (3); M. R. DA SILVA (3); A. de LUCAS (3); L. C. N. DOS SANTOS(1,2); S. M. DA SILVA (3); C. R. BRAGA(1,2); C. W. S. DA SILVA(1,2); V. F. ANDRIOLI(1,2); E. ECHER(3); L. E. A. VIEIRA(3); W. D. GONZALEZ (3); K. MUNAKATA(4); J. W. BIEBER(5); N. J. SCHUCH(1,2)

1 Space Science Laboratory of Santa Maria – LACESM/CT - UFSM, Santa Maria, Brazil,

2 National Institute for Space Research – INPE – MCT, São José dos Campos, Brazil,

3 Southern Regional Space Research Center – CRSPE/INPE - MCT, Santa Maria, Brazil,

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

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

carlos@lacesm.ufsm.br / Fax: +55-55-220-8007

The solar coronal mass ejection (CMEs), are the principal cause of the intense geomagnetic storms in the Earth. In this paper we study of the solar origin of intense geomagnetic storms during last 4 years, using observations of instrument *Large Angle and Spectroscopic Coronagraph* (LASCO), on board of *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO). A subsequent we correlacinar the collection of events of the solar CMEs with structures near the Earth, using observations of *Advanced Composition Explorer* (ACE) satellite, who supply observation of plasma and magnetic field in interplanetary medium. We analyzing the effects this structures solar-interplanetary in geomagnetic activity using geomagnetic index and effects in cosmic ray of with energy observed in Sao Martinho da Serra for multidirectional muon telescope operating in Southern Space Observatory – SSO/CRSPE/INPE.

**ANEXO 2**

TÍTULOS E RESUMOS DE TRABALHOS SUBMETIDOS NO PERÍODO DE  
VIGÊNCIA DA BOLSA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA AGOSTO/2005 –  
JULHO/2006

- 1 . **BRAGA, C. R.**, SAVIAN, J. F., DA SILVA, M. R., DA SILVA, S. M, DA SILVA, C. W. S., DOS SANTOS, L. C. N, DAL LAGO, A., KUWABARA, T., MUNAKATA, K., BIEBER, J. W., SCHUCH, N. J. *Cosmic ray modulation and noise level on the extended multidirecional muons detector telescope installed in south of Brazil: preliminary analysis*. In: Cospar Scientific Assembly, Beyjing, China.
2. SAVIAN, C. R., M. .R. da SILVA, A. DA LAGO, **C. R. BRAGA**, C. W. S. DA SILVA, L. C. N. DOS SANTOS, S. M. DA SILVA, E. ECHER, L. E. A. VIEIRA, K. MUNAKATA, T. KUWABARA, N. J. SCHUCH. *Analysis of three intense geomagnetic storms observed on July 20-31, 2004: Solar, Interplanetary and Comisc Ray effects near the Earth*. In: Cospar Scientific Assembly, Beyjing, China.
3. **BRAGA. C. R.**, DAL LAGO, A., DA SILVA, M. R., SAVIAN, J. F., DA SILVA, S. M., SCHUCH, N. J. *Detector de raios cósmicos de alta-energia (muons) do Observatório Espacial do Sul: ampliação*. In: 56ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, Florianópolis, SC.
4. DA SILVA, S. M., ECHER, E. **BRAGA, C. R.**, DA SILVA, C. W. S., SAVIAN, J. F., SCHUCH, N. J. *Cálculo do vetor normal às frentes de choque dos planetas terrestres pelo método da coplanaridade magnética*. In: 56ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, Florianópolis, SC.

## **Cosmic ray modulation and noise level on the extended multidirectional muons detector telescope installed in south of Brazil: preliminary analysis**

**C. R. Braga** (1, 2), J. F. Savian (1, 2), M. R. da Silva (3), S. M. da Silva (1, 2), C. W. S. da Silva (1, 2), L. C. N dos Santos (1, 2), A. Dal Lago (3), T. Kuwabara (5), K. Munakata (4), J. W. Bieber (5), N. J. Schuch (1,2)

(1) Southern Regional Space Research Center, National Institute for Space Research (CRSPE/INPE - MCT), Santa Maria-RS, Brazil (2) Space Science Laboratory of Santa Maria, Federal University of Santa Maria (LACESM/CT/UFSM), Santa Maria-RS, Brazil (3) Space Geophysics Division, National Institute for Space Research (DGE/CEA/INPE - MCT), São José dos Campos-SP, Brazil (4) Physics Department, Faculty of Science, Shinshu University (5) Bartol Research Institute and Department of Physics and Astronomy, University of Delaware, Newark, DE, USA

Because of the large detector mass required to detect high-energy cosmic rays, ground-based instruments remain the state-of-the-art method for studying these particles. At energies up to  $\sim 100$  GeV, primary galactic cosmic rays experience significant variation in response to solar wind disturbances, such as interplanetary coronal mass ejections (ICMEs). In this way, ground-based detectors can provide unique information on conditions in the near-earth interplanetary medium. Since 2001 a prototype multidirectional high energy  $> 50$  GeV cosmic-ray (muons) detector telescope was operating in the Southern Space Observatory (SSO/CRSPE/INPE - MCT), Brazil (geomagnetic coordinates  $19^{\circ} 13' S$  and  $16^{\circ} 30' E$ ). In December 2005, an upgrade increased the collection area in 600 %, becoming two layers of 28 m<sup>2</sup> each. The objective of this work is to analyze cosmic ray count rates observed by ground-based detector in order to find both variations not associated with interplanetary structures, possible associated with the noise from the instrument, and decrease rates caused by cosmic ray modulation due to interplanetary structures near Earth. We use 1 minute resolution data from the extended telescope collected since January 2006, which is the first data since the update of the instrument on December 2005. We also use the disturbance storm time Dst index from Kyoto, plasma and interplanetary magnetic field from the ACE satellite. In the future, this study will help to separate cosmic ray modulation caused by interplanetary structures from those variations in short periods (less than 1 month) caused by noise from the instrument. The high energy cosmic ray (muon) telescope at the SSO is a tri-lateral collaboration between Brazil, Japan and the United States.

**ANALYSIS OF THE THREE INTENSE GEOMAGNETIC STORM OBSERVED  
ON JULY 20-31, 2004: SOLAR, INTERPLANETARY AND COSMIC RAY  
EFFECTS NEAR THE EARTH.**

J. F. Savian<sup>1</sup>, M. R. da Silva<sup>2</sup>, A. Dal Lago<sup>2</sup>, C. R. Braga<sup>1</sup>, C. W. S. da Silva<sup>1</sup>,  
L. C. N. dos Santos<sup>1</sup>, S. M. da Silva<sup>1</sup>, E. Echer<sup>2</sup>, L. E. A. Vieira<sup>2</sup>, K. Munakata<sup>3</sup>,  
T. Kuwabara<sup>4</sup>, N. J. Schuch<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Southern Regional Space Research Center (CRSPE/INPE – MCT) and Space Science  
Laboratory of Santa Maria, Federal University of Santa Maria (LACESM/CT/UFSM), Santa  
Maria, 97910-110, (RS), Brazil,*

<sup>2</sup> *Space Geophysics Division, National Institute for Space Research (DGE/CEA/INPE – MCT),  
São José dos Campos, 12201-970, (SP), Brazil,*

<sup>3</sup> *Physics Department, Faculty of Science, Shinshu University, Matsumoto, 390-8621, Japan,*

<sup>4</sup> *Bartol Research Institute, University of Delaware (BARTOL/UDEL), Newark, (DE), 19716,  
USA.*

**ABSTRACT**

Geomagnetic storms are geomagnetic field disturbances caused by gusts in the solar wind, injecting a substantial quantity of energy into the magnetosphere, intensifying the ring current, becoming strong enough to exceed some key threshold of the quantifying storm time Dst index. In this work we analyze three intense geomagnetic storms (Dst < -100nT) occurred in period of July 22nd, 24th and 27th, 2004. We use images of solar corona made by Large Angle and Spectroscopic Coronagraph (LASCO) and the solar disk made by the Extreme Ultraviolet Imaging Telescope (EIT) aboard the Solar and Heliospheric Observatory (SOHO). Observations of plasma and interplanetary magnetic field obtained by the Advanced Composition Explorer (ACE) were also used. We analyze high energy cosmic ray observations obtained using the Muon Telescope of the Brazilian Southern Space Observatory-SSO of the INPE's Southern Regional Space Research Center at (29°26'24''S; 53°48'38''W) for identify Forbush decreases in the cosmic ray intensity. The main objective of this work is study three intense geomagnetic storms (Dst < - 100 nT), that occurred in a relatively small time interval, in order to identify their solar origin, interplanetary counterparts and cosmic ray modulation near the Earth. This study is important for the study of energetic cosmic rays modulation due to a subsequent chain of interplanetary disturbances, and in the near future it will help the understanding of space weather cosmic ray variability.



## DETECTOR DE RAIOS CÓSMICOS DE ALTA-ENERGIA (MUONS) DO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL: AMPLIAÇÃO

Carlos Roberto Braga<sup>1,2</sup> (carlos@lacesm.ufsm.br)

Alisson Dal Lago<sup>3</sup>

Marlos Rockembach da Silva<sup>3</sup>

Jairo Franscisco Savian<sup>1,2</sup>

Samuel Martins da Silva<sup>1,2</sup>

Nelson Jorge Schuch<sup>1,2</sup>

1. Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais (CRSPE/INPE – MCT)

2. Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria (LACESM/CT – UFSM)

3. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DGE/CEA/INPE – MCT)

### INTRODUÇÃO:

Estruturas ejetadas pelo Sol viajam através do meio interplanetário podendo atingir a magnetosfera da Terra e causar tempestades geomagnéticas. Estas estruturas agem como escudo blindando parte dos raios cósmicos de alta energia observados na superfície terrestre. Este efeito de blindagem é utilizado para previsão da chegada destas estruturas à Terra. Para permitir observações dos raios cósmicos cobrindo todo o globo terrestre foi criada uma rede internacional com detectores de muons em Nagoya (Japão), Hobart (Austrália) e em São Martinho da Serra – RS, no Observatório Espacial do Sul (OES/CRSPE/INPE – MCT). O objetivo deste estudo é mostrar as diferenças entre o telescópio de São Martinho da Serra antes e após a sua ampliação.

### METODOLOGIA:

O telescópio protótipo de São Martinho da Serra operou desde 2001 até maio de 2005, com 8 detectores dispostos em duas camadas de 2x2 detectores. Após a ampliação, realizada em dezembro de 2005, o telescópio passou a ter 56 detectores, dispostos em duas camadas de 4x7 detectores. O telescópio protótipo gerava dados com resolução de contagens por hora, já o telescópio expandido, a resolução é de contagens por minuto. As contagens são realizadas em várias direções, constituindo os componentes direcionais.

### RESULTADOS:

A área de observação sofreu um aumento de 600% e o erro na contagem de muons no componente direcional vertical passou de 0,16% para 0,06% para uma contagem horária. O número de componentes direcionais passou de 9 para 13.

### CONCLUSÕES:

A ampliação permitiu redução do erro percentual nas contagens horárias. Com o acréscimo no número de direções de visão obteve-se uma melhor cobertura da superfície terrestre, as áreas antes não cobertas pelo protótipo agora possuem uma cobertura satisfatória.

**Instituição de fomento:** Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

**Trabalho de Iniciação Científica**

**Palavras-chave:** Clima Espacial; detectores de raios cósmicos de alta energia (muons); tempestades geomagnéticas.

Geofísica

CÁLCULO DO VETOR NORMAL ÀS FRENTES DE CHOQUE DOS PLANETAS TERRESTRES PELO MÉTODO DA COPLANARIDADE MAGNÉTICA

Samuel Martins da Silva	(1,3)
samuel@lacesm.ufsm.br	
Ezequiel Echer	(2)
Carlos Roberto Braga	(1,3)
Cristian Willian Saueressig da Silva	(1,3)
Jairo Francisco Savian	(1,3)
Nelson Jorge Schuch	(3)

(1) Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria (LACESM/UFSM);

(2) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE – MCT);

(3) Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais (CRSPE/INPE – MCT).

### INTRODUÇÃO

Nós apresentamos neste trabalho um estudo sobre as propriedades físicas das frentes de choques planetárias dos planetas terrestres (Mercúrio, Vênus, Terra e Marte) e apresentamos o cálculo dos vetores normais às frentes de choque pelo teorema da coplanaridade magnética. Este método nos permite determinar o ângulo entre as normais a superfície dos choques e o campo magnético interplanetário ambiente. O teorema da coplanaridade diz que o campo magnético pré-choque,  $B_u$ , o campo magnético pós-choque,  $B_d$ , e a normal de choque,  $n_s$ , devem estar todos no mesmo plano. O ângulo entre o campo magnético pré-choque e a normal do choque é um dos mais importantes parâmetros na determinação dos processos físicos que ocorrem nos choques. Escolhemos este método por exigir somente as medidas de campo magnético antes e depois do choque. As flutuações no campo magnético através do choque dependem do ângulo. O campo magnético interplanetário na região anterior e posterior ao choque nunca é uniforme. Por todas essas razões, o ângulo é um importante parâmetro. Implicitamente, uma quantidade fundamental no estudo quantitativo dos choques é a normal. Usando o ângulo, nós definimos os choques como paralelos, oblíquos ou perpendiculares. A orientação da normal ao choque em relação ao campo magnético ambiente tem grande importância na geração de ondas de plasma na região anterior ao choque.

### METODOLOGIA

Para inferirmos os parâmetros locais dos choques, é necessário definir as regiões pré-choque e pós-choque, utilizando dados de campo magnético medidos por sensores a bordo de sondas espaciais. Utilizamos os dados de campo magnéticos fornecidos pelas sondas Mariner 10 (Mercúrio) e ISEE-1 (Terra) disponíveis na internet. Para calcular a normal do choque, temos que utilizar como valor pré-choque, o background ligeiramente afastado da frente de choque, para evitar efeitos da região do “pé” do choque, onde perturbações magnéticas devido a íons refletidos ocorrem. E para o lado pós-choque, temos que utilizar os valores longe da grande oscilação vista após o choque, a sobre-oscilação. Em média, o afastamento é de 5 minutos em cada lado. Em seguida, com a média do campo magnético dentro de um período de 15 minutos tanto do lado pré-choque como do pós-choque é, então, realizado o cálculo da normal de choque. Apresentaremos alguns exemplos de cruzamentos de frentes de choque.

### RESULTADOS

No evento detectado pela ISEE-1 ao investigar a magnetosfera terrestre em 2 Dezembro de 1977, obtivemos um ângulo de  $67,34^\circ$  e  $n=(-0,54; 0,71; -0,44)$  e em 25 de Julho de 1978, um ângulo de  $69,04^\circ$  e  $n=(0,84; 0,51; 0,14)$ . Na passagem da Mariner 10 por Mercúrio em 26 de Março de 1974, obtivemos um ângulo de  $62,62^\circ$  e  $n=(0,72; 0,57; 0,37)$  e em 15 de Março de 1975, um ângulo  $50,64^\circ$  e  $n=(-0,90; 0,42; 0,04)$ . Estes dados indicam que os choques naqueles casos eram do tipo oblíquo ou quase-perpendicular.

### CONCLUSÃO

Os choques observados são oblíquos ou quase-perpendiculares, significando que o ângulo entre o campo magnético pré-choque e a normal não é nem próximo de  $90^\circ$  nem de  $0^\circ$ . O comportamento flutuante do campo magnético interplanetário e as perturbações atribuídas a processos internos dos choques produzem uma incerteza na estimativa dos parâmetros. Isto restringe a duração das regiões pré-choque e pós-choque relevantes para poucos minutos antes e depois do choque.

Fomento: PIBIC/CNPq.

Trabalho de Iniciação Científica.

Palavra-chave: interações Terra-Sol, frentes de choque, normal de choque.