

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE DE RAIOS
CÓSMICOS GALÁCTICOS DEVIDO A ESTRUTURAS
SOLARES NO MEIO INTERPLANETÁRIO**

MONOGRAFIA

Níkolás Kemmerich

**Santa Maria, RS, Brasil
Dezembro de 2010**

ANÁLISE DA VARIABILIDADE DE RAIOS CÓSMICOS GALÁCTICOS DEVIDO A ESTRUTURAS SOLARES NO MEIO INTERPLANETÁRIO

por

Nícolas Kemmerich

Monografia desenvolvida pelo acadêmico Nícolas Kemmerich do Curso de Física – Bacharelado do Centro de Ciências Naturais e Exatas da UFSM junto ao Laboratório de Clima Espacial e Previsão de Tempestades Magnéticas do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CCR/INPE – MCT. Apresentado à disciplina de Trabalho de Graduação em Física II – FSC1048.

Orientador: Dr. Nelson Jorge Schuch

Pesquisador Titular Sênior III do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais CRS/CCR/INPE – MCT.

Santa Maria, RS, Brasil

Dezembro 2010

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Monografia de Graduação

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE DE RAIOS CÓSMICOS GALÁCTICOS
DEVIDO A ESTRUTURAS SOLARES NO MEIO INTERPLANETÁRIO**

**ELABORADA POR
NÍKOLAS KEMMERICH**

como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Física

COMISSÃO EXAMINADORA:

**Nelson Jorge Schuch, Dr.
(Presidente/Orientador)**

**Nivaor Rodolfo Rigozo, Dr.
(Pesquisador do CRS/INPE – MCT)**

**Natanael Rodrigues Gomes, Prof. Dr.
(Professor do Departamento de Engenharia Elétrica do CT/UFSM e Pesquisador do
LACESM/CT - UFSM)**

Santa Maria, 10 de Dezembro de 2010.

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar ao apoio de meus pais Luceno Kemmerich e Tânia Elisete Malheiros dos Santos. Ao meu Orientador de iniciação científica Doutor Alisson Dal Lago pela sua atenção e disposição em auxiliar-me durante a realização de minhas atividades extracurriculares. Em especial ao Doutor Nelson Jorge Schuch pelos seus ensinamentos pelas inúmeras oportunidades oferecidas.

A todos os meus colegas e ex-colegas que estiveram comigo ao longo da graduação. Essa foi uma época da qual nunca esquecerei.

Ao Doutor Marlos Rockenback da Silva, aos mestrandos Lucas Ramos Vieira, Marcos Vinícius Dias Silveira e Carlos Roberto Braga, pelas discussões e ajuda.

Agradeço a Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, pelo suporte técnico. Meus sinceros agradecimentos: (i) aos funcionários, servidores do CRS/CCR/INPE - MCT e do LACESM/CT – UFSM pelo apoio e pela infra-estrutura disponibilizada; (ii) ao Programa PIBIC/INPE - CNPq/MCT por me oportunizar a aprovação de um Projeto de Pesquisa durante minha graduação, que me permitiu dar os primeiros passos na iniciação científica e tecnológica, propiciando grande crescimento profissional.

Resumo

Medidas de intensidade de Raios C3smicos (RC) secund3rios na superf3cie terrestre, que s3o oriundos de Raios C3smicos Gal3cticos – RCG mostram uma s3rie de varia33es causadas por efeitos terrestres e extraterrestres, ambos podendo ser peri3dicos e espor3dicos. Dentre as causas das varia33es extraterrestres e espor3dicas est3o estruturas solares no meio interplanet3rio e choques associados. Quando as estruturas solares interplanet3rias atingem a Terra, al3m de poss3veis tempestades geomagn3ticas, decr3scimos isotr3picos dos Raios C3smicos s3o observados, chamados de Decr3scimos de *Forbush* (DF). O DF 3 caracterizado por um intenso decr3scimo de RC formado atr3s do choque de uma estrutura interplanet3ria. Certos tipos de decr3scimos s3o observados antes do DF e s3o ditos precursores anisotr3picos relacionados com efeitos cin3ticos da intera33o dos RC com a frente de choque. Para estudar a variabilidade isotr3pica e anisotr3pica dos RCG devido a estruturas solares no meio interplanet3rio s3o utilizados dados observados pelo Detector Multidirecional de Muons, DMM, localizado no Observat3rio Espacial do Sul - OES/CRS/CCR/INPE – MCT, (29.4°S, 53.8° W, 480 m a.n.m.), em S3o Martinho da Serra, RS, e pelo DMM de Nagoya, Jap3o. Para identificar estruturas solares no meio interplanet3rio s3o utilizadas tabelas de estruturas previamente observadas, analisando-as com dados do plasma e do campo magn3tico interplanet3rio observados pelo sat3elite ACE da NASA. Para verifica33o de tempestades geomagn3ticas s3o utilizados dados do 3ndice geomagn3tico Dst (*Disturbance Storm Time*). Os resultados mostram a exist3ncia de Decr3scimos de *Forbush* na isotropia dos Raios C3smicos Gal3cticos, com energia igual ou superior a 50 GeV, sendo ocasionalmente observado decr3scimos anisotr3picos como o do cone de perdas.

Abstract

Measurements by ground based detectors of Secondary Cosmic Rays Intensity, from primary Galactic Cosmic Rays – GCR, shown several variations series caused by terrestrials and extraterrestrials effects, both of which can be periodic and sporadic. Among the causes of terrestrials and extraterrestrials variations are solar structures in the interplanetary medium and their associated shocks. When interplanetary solar structures hit the Earth, besides of possible geomagnetic storms, isotropic decreases of Cosmic Rays are observed, called Forbush Decreases. The Forbush Decrease is characterized by an intensity decrease of Cosmic Rays behind the shock. Certain kinds of decreases are observed before Forbush Decreases and are said to be anisotropic precursors related with kinetic effects due the interaction of Cosmic rays with the approaching shock. For study isotropic and anisotropic variability of GCRs due to solar structures in the interplanetary medium are utilized data observed by the Multidirectional Muon Detector, MMD, located at Southern Space Observatory SSO/CRS/CCR/INPE – MCT (29.4°S, 53.8° W, 480 m a.s.l.) São Martinho da Serra, Brasil, RS, and by the MMD at Nagoya, Japan. For the identification of solar structures in the interplanetary medium data tables related to structures earlier observed were used, analyzing them with data of plasma and interplanetary magnetic field observed by the spacecraft ACE of NASA. For the inspections of geomagnetic storms the Geomagnetic index Dst (Disturbance Storm Time) were used. The results shown the existence of Forbush Decreases in the isotropy Galactic Cosmic Rays, with energy equal or greater than 50GeV, it also was occasionally observed anisotropic decrease like the Loss Cone Precursor.

Índice de Ilustrações

Figura 1 – Espectro de Energia diferencial dos Raios Cósmicos (Swordy, S. P., 2001, p.86).	15
Figura 2 – Representação esquemática da produção dos Raios Cósmicos secundários. Fonte: Forbush (1993 apud Rockenback, M. S., 2005, p. 64).	17
Figura 3 – Gráfico das contagens de Raios Cósmicos secundários – nêutrons e das manchas solares. Fonte: http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/COSMIC_RAYS/image/cr_ssn.gif .	19
Figura 4 – CME observada pelos instrumentos LASCO C2 e C3 a bordo do SOHO. Os instrumentos simulam um eclipse solar. O círculo branco representa o disco solar. Note a dimensão da CME e do disco solar. Fonte: NASA-SOHO.	20
Figura 5 – Forma do CMI. Uma espiral de Arquimedes. Fonte: KENNETH (1967, p. 2150).	21
Figura 6 – Gráfico do DF Clássico. Fonte: Cane, H.V., 2000.	24
Figura 7 – Estrutura em larga escala da ejeção (ejecta) e o choque associado. Fonte: Cane, 2000.	25
Figura 8 – Ilustração artística da anisotropia do cone de perdas. Fonte: Rufolo et al. (1999 apud Rockenback, M. S., 2010, p. 69).	26
Figura 9 – Mapa das direções assintóticas dos detectores de muons espalhados pelo globo terrestre. Fonte: Rockenback, 2010, p. 46).	27
Figura 10 – À esquerda um esquema do DMM e à direita uma fotografia.	29
Figura 11 – Ilustração artística do DMM e o modo de detecção dos muons.	30
Figura 12 – Fases do decréscimo do índice Dst.	32
Figura 13 – Nuvem Magnética observada pelo Satélite ACE no dia 11/04/2001 (dia 101).	35
Figura 14 – À esquerda dados do DMM em São Martinho da Serra, e à direita dados de Nagoya.	35
Figura 15 – Nuvem Magnética observada pelo Satélite ACE no dia 27/05/2001 (dia 147).	36
Figura 16 - À esquerda dados do DMM em São Martinho da Serra, e à direita dados de Nagoya.	37
Figura 17 – Tempestade Magnética causada por uma NM no dia 21/10/2001.	38
Figura 18 – Contagem de muons à esquerda em São Martinho e à direita Nagoya dos dias 20 à 23 de outubro de 2001.	39
Figura 19 - Tempestade Magnética causada por uma NM no dia 29/10/2003 e uma estrutura complexa em 30/10/2003.	40
Figura 20 - Contagem de muons à esquerda em São Martinho e à direita Nagoya na tempestade ocorrida no dia 29 de outubro de 2003.	40
Figura 21 – Tempestade Geomagnética ocorrida em 14/12/2006.	41
Figura 22 – Dados do DMM expandido no Observatório Espacial do Sul em São Martinho da Serra.	42
Figura 23 - Dados do DMM expandido no Observatório Espacial do Sul em São Martinho da Serra.	42

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Tabela dos efeitos Terrestres na modulação dos RC. Fonte: Mursola e Usoskin (2003, p. 124).	23
Tabela 2 – Tabela dos efeitos extraterrestres na modulação dos RC.	23
Tabela 3 – Características do DMM protótipo.	28
Tabela 4 – Características do DMM expandido.	30
Tabela 5 – Classificação das Tempestades Geomagnéticas.	32
Tabela 6 – Tabela de Nuvens Magnéticas Observadas.	33

Sumário

1	Raios Cósmicos	10
1.1	Introdução	10
1.2	Classificação dos Raios Cósmicos.....	12
1.3	Unidades de Intensidade, Momento e Rigidez	13
1.4	Composição dos Raios Cósmicos e Espectro de Energia	14
1.5	Interação dos Raios Cósmicos com a Atmosfera.....	16
1.5.1	Componente Muônica	18
1.6	Ciclo Solar de 11 anos	18
1.6.1	Ejeções Coronais de Massa (CMEs)	20
1.6.2	Nuvens Magnéticas	21
1.6.3	Regiões de Interação Co-rotante	21
1.7	Efeitos de Modulação nos Raios Cósmicos Galácticos	22
1.7.1	Decréscimo de <i>Forbush</i> (DF).....	23
1.7.2	Decréscimo Anisotrópico do Cone de Perdas	25
2	Instrumentos e dados utilizados.....	28
2.1	Detector Multidirecional de Muons – DMM	28
2.2	Satélite ACE	31
2.3	Dados Geomagnéticos (índice Dst)	31
3	Análise de dados	33
3.1	Tempestade do dia 11 de Abril de 2001	34
3.2	Tempestade do dia 27 de Maio de 2001	36
3.3	Tempestade do dia 21 de Outubro de 2001	37
3.4	Tempestade do dia 29 de Outubro de 2003	39
3.5	Tempestade do dia 14 de Dezembro de 2006.....	40
4	Conclusões.....	43
5	Referências	44

1 RAIOS CÓSMICOS

1.1 Introdução

No início do século XX vários experimentos revelaram processos físicos que não podiam ser interpretados sem a contradição dos conceitos clássicos de onda e partícula. Nesta época a teoria quântica ainda estava em construção e a mecânica relativística de Einstein (relatividade restrita) estava bem estabelecida. Neste contexto, o poder de penetração de "raios" ejetados por elementos radioativos estavam sendo investigados e foram classificados como α , β e γ , respectivamente em ordem crescente de penetração. Sandström (1965 p.1) diz que “não se conhecia partículas com poder de penetração maior que os raios γ ”.

Mursola e Usoskin (2003) relatam que C.T.R. Wilson em 1900 constatou o descarregamento das lâminas eletrostaticamente carregadas nos eletroscópios não importando o quão eram blindados com chumbo. As lâminas eletrostáticas, que ficavam no interior do eletroscópio preenchido com gás, eram descarregadas para o gás depois que as partículas penetrantes ionizavam o gás. Pensou-se inicialmente, e erroneamente, que o fato era devido à radiação vinda do interior da Terra. Se as partículas penetrantes eram de origem Terrestre, então a taxa de descarregamento das lâminas do eletroscópio decresceria com o a altitude. Para verificar isso, experimentos feitos por Victor F. Hess (1883-1964), prêmio Nobel de Física em 1936, revelaram uma taxa de decréscimo no descarregamento eletrostático até 700m. Após esta altura a taxa de descarregamento aumentava mostrando que a radiação responsável pelas ionizações no gás era de origem de fora da Atmosfera. Os estudos mostraram que existia algum tipo de radiação de alta energia que era mais penetrante que os raios γ , que segundo Daglis (2001 p.369) “radiação esta que poderia penetrar vários metros de chumbo sólido”. A nova radiação foi chamada de Raios Cósmicos. Estudos posteriores mostraram que são partículas carregadas.

De acordo com Mursola e Usoskin (2003) e Daglis (2001), a descoberta dos Raios Cósmicos beneficiou várias áreas da Ciência Espacial, tais como, o estudo de meteoritos, distribuição do Campo Magnético da Terra, composição química da matéria e campo magnético interestelar (ambiente fora do Sistema Solar), bem como, a forma do campo magnético interplanetário (no meio ambiente do Sistema Solar), e na Astrofísica nas investigações de estrelas novas e super novas, além de sub-áreas da Física Nuclear e da Física de Partículas. Assim, o assunto "Raios Cósmicos" está relacionado com várias áreas da Ciência atual.

Será apresentado o Ciclo Solar de 11 anos e que as estruturas solares estão relacionadas à atividade solar. Estruturas solares podem causar Tempestades Magnéticas na Terra e segundo Echer (2005) alguns efeitos solares em sistemas naturais terrestres são diminuição do ozônio atmosférico em regiões polares, aurora nos pólos, na produção de anéis em árvores e na variação do fluxo de Raios Cósmicos; e em sistemas tecnológicos perda de dados e ou destruição de componentes de satélites, absorção de ondas curtas na Ionosfera e em eventos extremos *blackouts* na rede de distribuição de energia elétrica.

Segundo Munakata (2000 p.457) “Raios Cósmicos Galácticos (RCG) observados por detectores terrestres estão sujeitos a efeitos de modulação devido a distúrbios interplanetários (estruturas solares), tais como, choques e ejeções associadas com Ejeções de Massa Coronais” (CME, do inglês *Coronal Mass Ejections*). Echer (2006, p. 54) ressalta que “uma onda de choque tem o lado pré-choque ou frente de choque (*upstream*) e o lado pós-choque, ou seja, atrás do choque (*downstream*)”. Ainda segundo Munakata (2000, p.457), “Raios Cósmicos de Energia $>1\text{GeV}$ são normalmente suprimidos de $\sim 1-10\%$ no *downstream* do choque e dentro das ejeções seguido do choque”. Cane (2000) relata que este decréscimo é estudado a mais de 60 anos e é chamado “Decréscimo de *Forbush*”, e é um **decréscimo isotrópico**, isto é, um decréscimo na contagem de Raios Cósmicos em todas as direções. Além dos decréscimos isotrópicos, Munakata (2000 p.457) diz que “**anisotropias**”, ou seja, decréscimos ou acréscimos de Raios Cósmicos em diferentes direções, “são observados e interpretados como efeitos cinéticos relacionados à interação dos Raios Cósmicos ambientes com o choque de uma ejeção que se aproxima da Terra”.

Assim, seguindo o contexto descrito, esta Monografia TGFII se limita a descrever aspectos gerais a respeito dos Raios Cósmicos Galácticos (RCG) e relacioná-los com estudos da interação Sol-Terra. Dentre diferentes tipos de estruturas solares no meio interplanetário as Nuvens Magnéticas são ideais para estudo de modulação dos Raios Cósmicos, pois são estruturas que melhor respondem a decréscimos de muons, portanto as estruturas solares na monografia estão restritas a Nuvens Magnéticas como será observado no Capítulo 3. Utilizam-se dados de muons observados pelo Detector Multidirecional de Muon, DMM, um em Nagoya, Japão, e outro no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, RS, Brasil, para verificar os **decréscimos de *Forbush***, **decréscimo isotrópico**, e os **decréscimos anisotrópicos** que representam precursores de Tempestades Magnéticas. O detector DMM observa RCG de energia em torno de 50 GeV.

1.2 Classificação dos Raios Cósmicos

Em 1938 Pierre Auger descobriu o “Chuveiro Atmosférico”. O Chuveiro Atmosférico é composto de partículas secundárias, tais como muons, neutrinos, prótons e nêutrons. São produzidos por colisões dos Raios Cósmicos vindo do espaço exterior, chamados Raios Cósmicos primários, com os constituintes atmosféricos (normalmente nitrogênio e oxigênio).

Os Raios Cósmicos primários, segundo Mursola e Usoskin (2003), são usualmente classificados em Raios Cósmicos Solares - RCS, Raios Cósmicos Galácticos RCG e Raios Cósmicos Anômalos RCA:

1. **RCS:** chamadas de partículas energéticas solares, originadas das explosões solares. CMEs e choques no meio interplanetário podem produzir partículas energéticas. Segundo Miroshnichenko (2000) tem energia típica de várias centenas de MeV/nucleon ($M=10^6$) que podem em eventos extremos chegar até 100 GeV. Nesta faixa de energia, ~90% dos RCS são compostos de prótons, ~10% de He e <1% de elementos pesados. Durante eventos de fortes explosões solares, o fluxo de Raios Cósmicos na Terra pode aumentar de horas a dias por causa do aumento dos RCS. Aumentos que são chamados de “*Solar Particles Events*”(SPE) (Miroshnichenko, 2000 p.30).
2. **RCG:** são originados fora do Sistema Solar. Eles são as partículas mais energéticas com o espectro de energia estendendo-se até 10^{21} eV. A composição é principalmente de prótons, com ~7% - 10% de He e ≈1% de elementos pesados. Objetos que dão origem a partículas de tão alta energia ainda são de conhecimento incertos ou desconhecidos. O fluxo dos Raios Cósmicos Galácticos é modulado pelo Ciclo Solar de 11 anos, o aumento na atividade solar blinda a Terra dos RCG.
3. **RCA:** são originados do espaço interestelar, além da chamada Hélio pausa (nos limites do Sistema Solar). São compostos principalmente de hélio ao invés de prótons e muito mais oxigênio do que carbono.

1.3 Unidades de Intensidade, Momento e Rigidez

As informações desta Seção foram obtidas de Sandström (1965 p.3-5). A intensidade total absoluta dos Raios Cósmicos pode ser expressa pelo número de partículas por unidade de tempo que cruza uma superfície sob determinada condição geométrica. Três unidades separadas são empregadas:

1. *Intensidade vertical*, expresso pelo número de partículas por unidade de área por segundo em uma unidade de ângulo sólido ($\text{par.cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}.\text{sterrad}^{-1}$);
2. *Fluxo através de uma seção unitária de área horizontal*, expresso em partículas por unidade de área por segundo ($\text{par.cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$);
3. *Fluxo através de uma esfera unitária* ($\text{par.cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$).

As intensidades podem ser dadas em termos de taxa de contagem de um detector ou pela variação percentual da contagem da média para um determinado período.

Os Raios Cósmicos podem ser divididos em Raios Cósmicos – Primários e Secundários. A velocidade dos Raios Cósmicos primários é grande o suficiente para levar em consideração os efeitos relativísticos. Para uma partícula de massa de repouso m_0 e velocidade v , a energia total W e o momento p são expressos por

$$W = m_0 c^2 (1 - \beta^2)^{-1/2} \quad (1)$$

e

$$p = m_0 v (1 - \beta^2)^{-1/2}, \quad (2)$$

onde, c , é a velocidade da luz e $\beta=(v/c)$. A energia cinética pode ser representada como função do momento

$$W = [(pc)^2 - (m_0 c^2)^2]^{1/2} - m_0 c^2. \quad (3)$$

Assim, como são eletricamente carregados, os Raios Cósmicos estão sujeitos à Força de Lorentz

$$F_{mag} = qv_{\perp}B = m \frac{v^2}{\rho},$$

ρ é o raio de Larmor. Expressando em termos do raio de Larmor

$$\rho = \frac{p}{qB} = \frac{P}{cB}, \quad (4)$$

onde p é o momento da partícula, q é a carga, B é o módulo do campo magnético, c a velocidade da luz e P é a rigidez magnética da partícula

$$P = \frac{pc}{q}. \quad (5)$$

Pode-se perceber de (4) que o raio com que a partícula espirala em um campo magnético é inversamente proporcional ao módulo do campo magnético aplicado para a mesma rigidez da partícula. Ou, fixando-se o valor do campo e variando o valor da rigidez magnética, o raio de giro é proporcional a rigidez. A rigidez é uma medida do quanto a partícula resiste para ser desviada num campo magnético. Medindo a rigidez em volts (V) e energia em elétrons-volts (eV), (4) fica

$$\rho = \frac{1}{300} \frac{P}{cB}. \quad (6)$$

Um sobre trezentos é só um fator de conversão. Se, por exemplo, $P = 50$ GV e $B = 5$ nT (típico valor do campo magnético medido no meio interplanetário), o raio de Larmor é aproximadamente 0,2 Unidades Astronômicas (1UA é a distância Sol-Terra).

1.4 Composição dos Raios Cósmitos e Espectro de Energia

O artigo revisado por T. K. Gaisser and T. Stanev (**Bartol Research Inst., Univ. of Delaware**), do *Data Particle Group*, Agosto 2009, mostra que Raios Cósmitos primários são formados por partículas estáveis com tempo de vida 10^6 anos ou mais. São prótons, elétrons, hélio, carbono, oxigênio, ferro e outros núcleos sintetizados em estrelas. São acelerados por fontes astrofísicas. Já núcleos como lítio, berílio e boro são originados na interação dos Raios Cósmitos com poeira interestelar. Cerca de 90% dos núcleos dos Raios Cósmitos são núcleos de hidrogênio (prótons), os próximos mais comuns são núcleos de hélio (partículas - α), o 1% restante representa núcleos pesados. Mursola e Usoskin (2003, p.9) dizem que “Todas as partículas são altamente ionizadas compondo somente de núcleos devido ao processo de aceleração dos RC”.

O espectro diferencial de energia dos RCs, ou seja, o fluxo (partícula por $cm^2 s sterrad GeV$) dos RCs a diferentes faixas de energia é apresentado na Figura 1. O gráfico, em escala logarítmica, facilita a distribuição dos dados. Conforme Beatriz (2009, p. 37-38), “medidas feitas baseadas em diferentes instrumentos cobrindo a energia de 10 MeV($E=10^6$) a 100 EeV ($E=10^{18}$) mostrou que o espectro de energia segue uma lei de potência em função da energia” dada por

$$\Phi_{rc} = E^{-\alpha}, \quad (7)$$

onde, α , é o índice espectral, tendo o valor aproximadamente:

- 2,6 para energia até $4 \times 10^{15} eV$.
- 3,0 para energias entre $\sim 4 \times 10^{15} eV$ e $6 \times 10^{17} eV$.
- 3,3 para energia até $6 \times 10^{17} eV$ e $4EeV$.
- 2,69 entre $4EeV$ e $\sim 40EeV$.

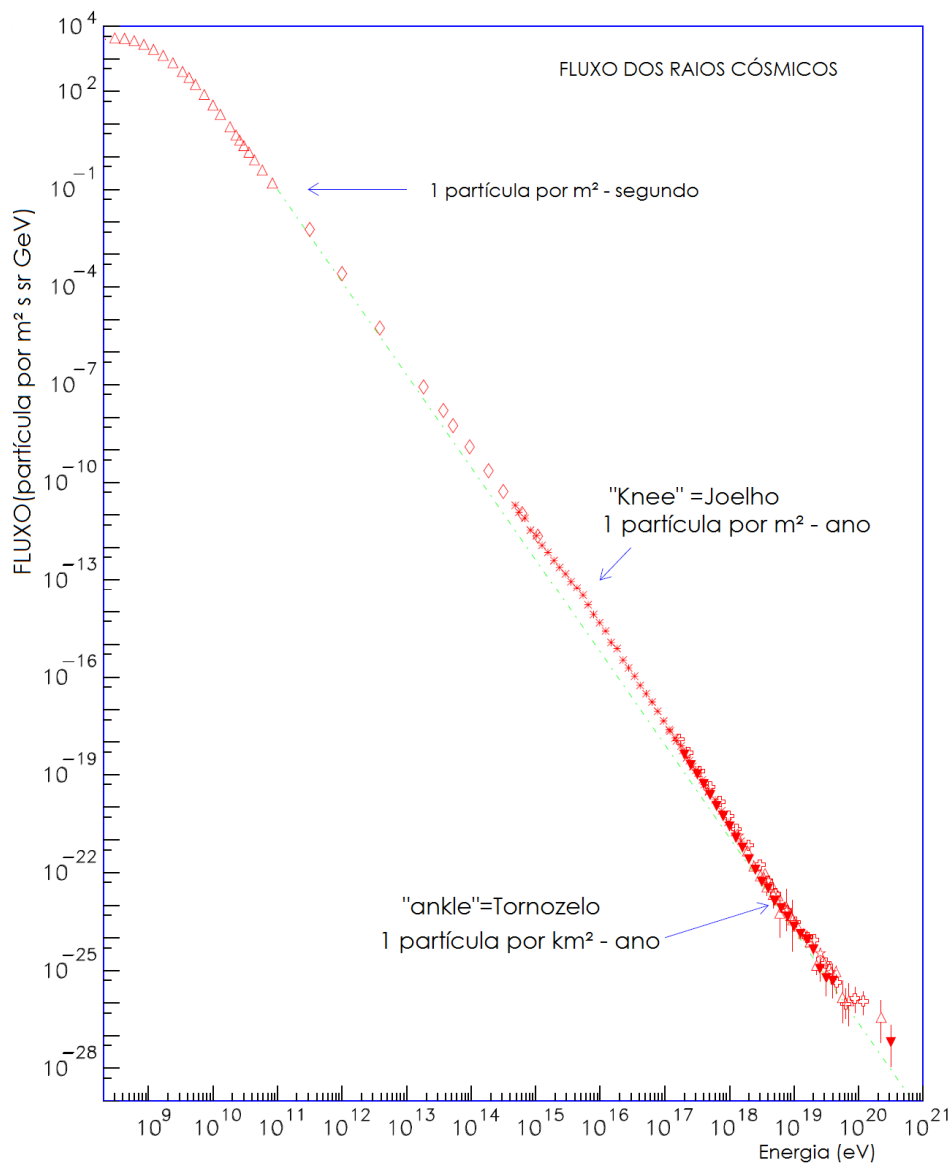


Figura 1 – Espectro de Energia diferencial dos Raios Cósmicos (Swordy, S. P., 2001, p.86).

A fraca linha em verde no espectro de energia é apenas uma função na terceira potência para comparação. Beatriz (2008, p.37-39) diz que “Acredita-se que a quebra no índice espectral em $4 \times 10^{15} eV$, no joelho (*knee*), seja a região onde se inicia uma mudança na composição dos Raios Cósmicos primários de prótons para elementos mais pesados, porém

existem outras possíveis explicações, dentre elas que um diferente mecanismo de aceleração possa dominar nesta parte do espectro”. Os RCG com energia ~ 50 GeV ficam entre 10^9 - 10^{10} , antes do “*knee*” no espectro. A seta no topo da Figura 1 mostra que naquela região se detecta em média 1 partícula por metro quadrado a cada segundo. Na medida em que a energia aumenta, o fluxo diminui até chegar à seta do meio da Figura 1. Nesta região do espectro é detectado em média 1 partícula por metro quadrado a cada ano. A seta inferior do gráfico da Figura 1 indica a região do espectro de partículas extremamente energéticas, provavelmente partículas que são originados fora da Galáxia, e que é detectado em média 1 partícula por quilometro quadrado por ano.

1.5 Interação dos Raios Cósmicos com a Atmosfera

Segundo Daglis, (2001), Mursola e Usoskin (2003) e Sandström (1965) o Raio Cósmico primário é um tipo de radiação energética carregada eletricamente que vem do espaço, e em consequência, uma cadeia complexa de interações é esperada quando essa radiação colide inelasticamente com os átomos e núcleos da atmosfera. A Figura 2 mostra esquematicamente a interação dos Raios Cósmicos primários com as partículas da Atmosfera, chamada de “Chuveiro Cósmico”. Daglis (2001, p. 378) diz que “Pode-se notar que muitas partículas secundárias são criadas, algumas das quais são instáveis e podem decair em outras partículas em vôo”. Radiação secundária que é detectada ao nível do mar é chamada de Raios Cósmicos secundários.

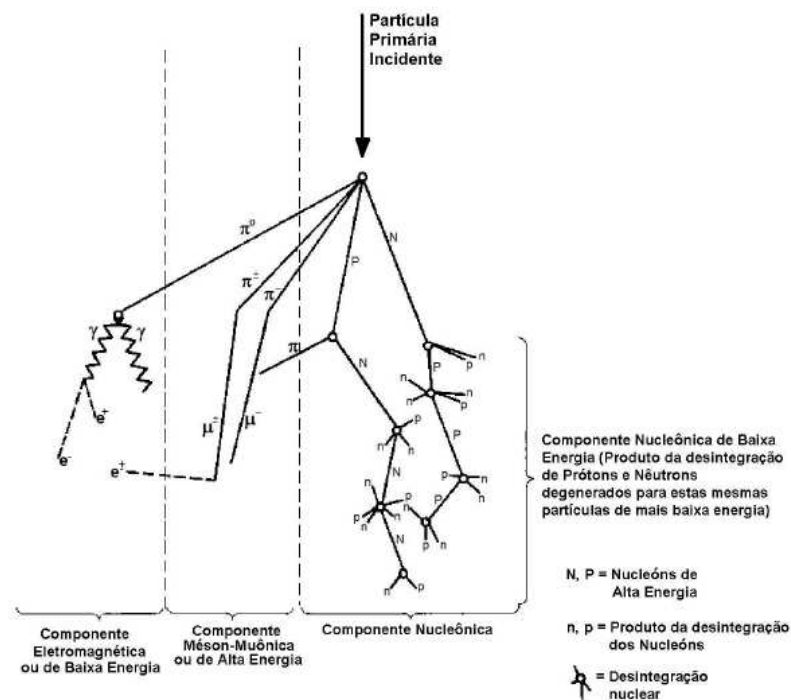


Figura 2 – Representação esquemática da produção dos Raios Cósmiticos secundários. Fonte: Forbush (1993 apud Rockenback, M. S., 2005, p. 64).

Conforme Mursola e Usoskin (2003), o chuva cósmico consiste de três componentes secundárias, como ilustrado na Figura 2:

1. Componente eletromagnética: são formados por Raios Cósmiticos de mais baixa energia. Consistem de elétrons, pósitrons e fótons (γ -quanta).
2. Componente muônica: são formados por Raios Cósmiticos de mais alta energia. Consistem de muons.
3. Componente nucleônica: consistem de prótons e nêutrons. São detectados por detectores de nêutrons.

Os espectros de energia e intensidade de cada tipo de radiação secundária dependem de vários fatores, tais como o ângulo zenital definido como ângulo medido a partir da vertical do lugar até o astro (com limite no horizonte), latitude geomagnética e da profundidade atmosférica medida em g/cm^2 . Quanto maior a altitude maior a profundidade. Como exemplo:

O número total de partículas aumenta com o aumento da profundidade (ou altura, ou diminuição de pressão atmosférica) X até $X=100 g/cm^2$, para uma determinada latitude, e então diminui mais ou menos exponencialmente a maiores profundidades onde a absorção de partículas primárias predomina sob multiplicação de partículas secundárias. Assim, o fluxo máximo de partículas ocorre a $100g/cm^2$. Esse máximo é chamado de máximo de *Pfotzer* (Daglis, 2001, p.379).

O exemplo dado por Daglis, (2001) mostra o fato experimental de que a contagem de radiação aumenta com até uma altitude máxima, chamado máximo de *Pfotzer*. Este limite varia em torno de 20 a 30 km de altitude, e segundo Sandström (1962) é onde a radiação

secundária é somada a remanescente da radiação primária. Segundo A. C. Fauth (2007) quanto mais energético o RC primário maior é quantidade de partículas produzidas no chuveiro cósmico.

1.5.1 Componente Muônica

A componente muônica é a componente que dá origem aos muons que são contados nos Detectores Multidirecionais de Muon descritos no próximo Capítulo. Mas, o que são os muons? Como referência, o artigo de A.C.Fauth et al. (2007) descreve várias de suas características. Muons são partículas elementares instáveis, com massa de repouso $105,658 \text{ MeV}/c^2$ (como comparação, a massa de repouso do elétron é de $5,11 \times 10^{-5} \text{ eV}$, 200 vezes menor), tempo de vida média de $2,107 \times 10^{-6} \text{ s}$, não interage fortemente como o pion, é a partícula mais abundante que chega na superfície da Terra.

Mesmo tendo um tempo de vida tão pequeno os muons tem velocidades próximas a da luz e chegam na superfície devido ao efeito relativístico da dilatação temporal. O fluxo de muons é regido pela estrutura atmosférica, em particular pela altitude. Quanto mais alta a primeira colisão dos Raios Cósmicos primários, menores são as contagens de muons na superfície.

1.6 Ciclo Solar de 11 anos

Margaret G. Kivelson, Christopher, T. Russell (1995) expõe que desde os tempos de Galileu as manchas solares são conhecidas, e segundo eles, manchas solares são manchas escuras magnetizadas e frias que surgem na superfície solar. As manchas solares estão diretamente ligadas à atividade solar de 11 anos. Pouca ou nenhuma mancha na superfície do sol indica atividade solar mínima, enquanto muitas manchas solares indicam atividade solar máxima.

Segundo Gosling et al. (1999) observações feitas pelos satélites SOLWIND e SOHO estabeleceram as características essenciais das Ejeções de Massa Coronais e a frequência com que elas ocorrem. Próximo ao mínimo as ejeções tendem a ocorrer a uma taxa de $\sim 0,2$ eventos por dia, enquanto próximo a atividade solar máxima eles ocorrem $\sim 3,5$ eventos por dia.

Subramanian, P., (*lectures notes*), diz que “já é bem estabelecido que a intensidade dos Raios Cósmicos que chegam há Terra varia em anti-correlação com a atividade solar de 11 anos”. A Figura 3 mostra o gráfico de médias de 27 dias das contagens dos detectores de nêutrons (*Monitor Data*) e a média mensal do número de manchas solares (*Smoothed SSN*) para o período compreendido entre 1960 e 2005, respectivamente na ordenada esquerda e direita. Os círculos vermelhos na Figura 3 mostram a periodicidade na contagem dos RCG de 22 anos.

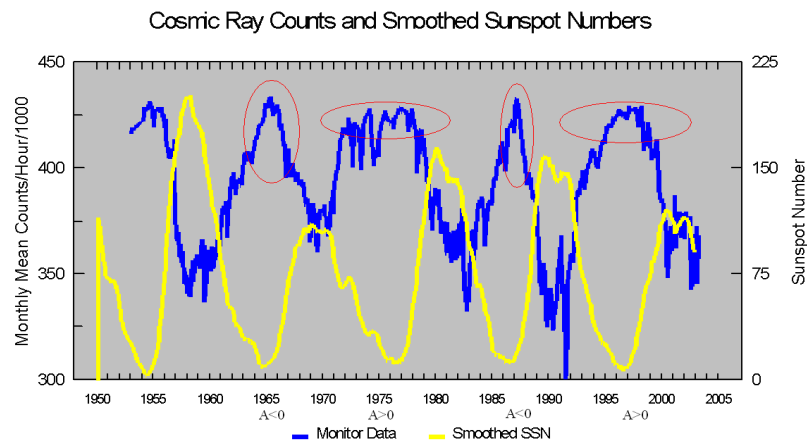


Figura 3 – Gráfico das contagens de Raios Cósmicos secundários – nêutrons e das manchas solares. Fonte: http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/COSMIC_RAYS/image/cr_ssn.gif

Segundo Okazaki (2008, p. 4) “a periodicidade de 22 anos está relacionada com a inversão na polaridade do campo magnético solar a cada 11 anos”. A polaridade pode ser definida como:

$$A = \vec{\Omega} \cdot \vec{M}, \quad (8)$$

onde $\vec{\Omega}$ é o vetor velocidade angular e \vec{M} o vetor momento magnético do Sol. Na Figura 3 a intensidade de RCG tem pico achatado no mínimo solar, ou seja, quando a polaridade é $A > 0$, enquanto o pico é bem definido quando $A < 0$.

Okazaki (2008, p.4) diz que “embora os detalhes da anti-correlação não sejam ainda bem compreendidos, acredita-se que a intensidade dos RCGs seja reduzida durante a atividade de máximo solar por causa da forte turbulência do campo magnético do Sol no meio interplanetário”.

O Campo Magnético do Sol no meio interplanetário é mais conhecido como Campo Magnético Interplanetário.

1.6.1 Ejeções Coronais de Massa (CMEs)

Segundo Dal Lago (1999, p.34) “um gás ionizado constituído por prótons e elétrons (plasma) chamado de Vento Solar flui constantemente do Sol para o meio interplanetário” e ainda que “o Vento Solar passa pela Terra com uma velocidade média de 400 a 500 km/s e com densidade média de prótons e elétrons de 5 partículas por centímetro cúbico”.

Segundo Dal Lago (2004) e H. S. HUDSON (2006), neste ambiente de plasma injeções transientes de material, modernamente chamadas de Ejeções de Massa Coronais ou CMEs (*Coronal Mass Ejections*), são observadas com características de serem frequentemente mais rápidas do que o Vento Solar e carregando forte campo magnético. A Figura 4 mostra uma CME observada em 27 de fevereiro de 2000 pelo Satélite SOHO da NASA.

Dal Lago (1999) diz que “o Sol possui um campo magnético, cuja intensidade é da ordem de 10^{-4} nT na superfície da Fotosfera”.

Devido ao Vento Solar ser altamente condutor, ele é transportado ‘congelado’ para grandes distâncias, constituindo o campo magnético Interplanetário – CMI, com intensidade de aproximadamente 5 nT nas circunvinhaças da Terra (Dal Lago 1999, p.34).

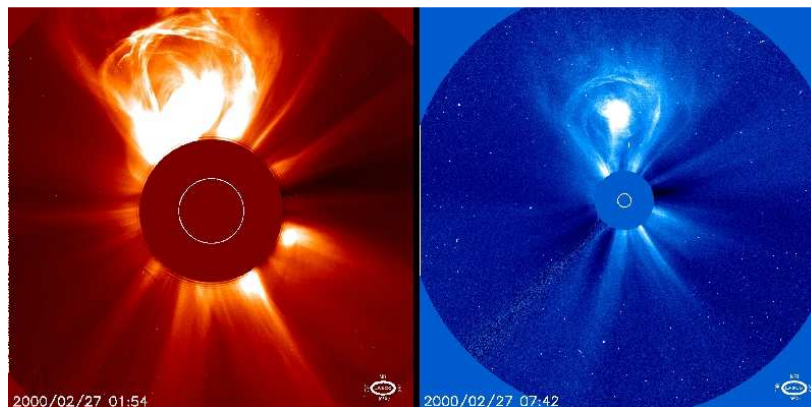


Figura 4 – CME observada pelos instrumentos LASCO C2 e C3 abordo do SOHO. Os instrumentos simulam um eclipse solar. O círculo branco representa o disco solar. Note a dimensão da CME e do disco solar. Fonte: NASA-SOHO.

Segundo KENNETH (1967) desde 1963 não menos do que 10 veículos espaciais tais como, IMP, EGO, *Mariner*, *Pioneer*, tem provido contínuas medidas que determinam propriedades do meio interplanetário, entre elas que o Vento Solar, sendo um fluido magnetohidrodinamico transporta o campo magnético solar para todo Sistema Solar,

formando em larga escala linhas de força na forma de uma espiral de Arquimedes, como mostra a Figura 5.

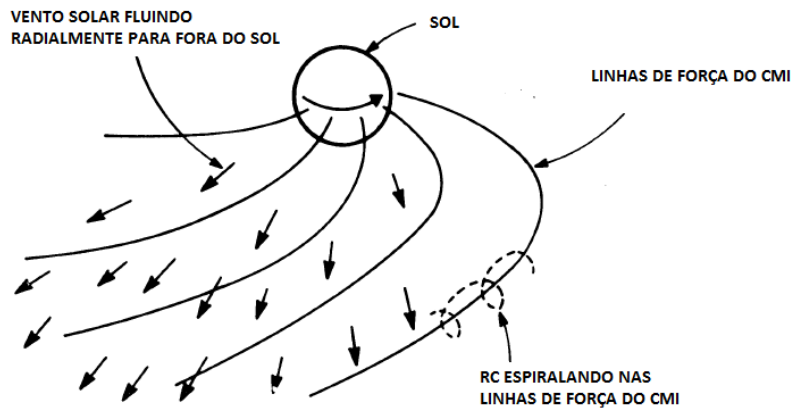


Figura 5 – Forma do CMI. Uma espiral de Arquimedes. Fonte: KENNETH (1967, p. 2150).

Nas palavras de KENNETH (1967, p. 2149) “a intensidade do campo magnético é forte o suficiente para dominar completamente o movimento de qualquer partícula carregada de energia menor que 10^{11} eV, essa energia compreende 99,9 % da radiação cósmica”.

1.6.2 Nuvens Magnéticas

Segundo Dal Lago (1999) Nuvens Magnéticas representam uma fração das ejeções identificadas no meio interplanetário e são de origem relacionada às Ejeções de Massa Coronais solares com característica de ter extensão radial de aproximadamente 0,25-1 UA, campo magnético mais intenso do que o do vento solar normal ($B > 10$ nT), suave rotação da componente z (B_z) do campo magnético, baixa temperatura e baixo valor do parâmetro, $\beta \sim 0,1$ (definido pela razão entre a pressão cinética e pressão magnética).

1.6.3 Regiões de Interação Co-rotante

As Regiões de Interação Co-rotantes (RICs) no Vento Solar originam-se da interação dos feixes de plasma rápido e lento, originados no Sol. Os feixes de plasma rápidos originam-se nos buracos coronais estendendo-se a baixas latitudes, pois nestas regiões o campo magnético solar possui uma configuração de linhas de campo abertas e não oferece resistência ao fluxo de partículas, enquanto que os feixes de plasma lentos originam-se nas regiões solares de mais baixa latitude, onde as linhas do campo magnético solar são fechadas, oferecendo resistência ao fluxo de partículas diminuindo sua velocidade (Rockenback, 2008, p. 45).

Devido à rotação solar RICs tendem a passar pela Terra a cada 27 dias. É conhecido que a passagem de RICs causam decréscimos recorrentes na densidade de RCG (Richardson, 2004 apud Okazaki 2008).

1.7 Efeitos de Modulação nos Raios Cósmicos Galácticos

Segundo Mursola e Usoskin (2003) pode-se classificar dois grupos os efeitos na modulação de intensidade dos RC, o primeiro grupo é de origem Terrestre e o segundo de origem extraterrestre, como mostra respectivamente nas Tabelas 1 e 2. Dentro dos grupos podem-se dividir os efeitos como periódicos e esporádicos.

As variações terrestres Sazonais e Diurnas são causadas porque a estrutura da atmosfera é diferente, respectivamente, nas estações do ano e ao longo do dia e da noite. A outra variação Diurna na Tabela 1 é devido à deformação da Magnetosfera da Terra pelo Vento Solar e conseqüentemente no valor da rigidez geomagnética de corte. Segundo Sandström (1965) e Daglis (2001) a rigidez de corte geomagnética é definida como o momento mínimo que o RC primário deve ter para penetrar o Campo Magnético da Terra e ser detectado na superfície. A Rigidez depende de latitude geográfica considerando a Terra como um dipolo magnético.

Efeitos extraterrestres periódicos incluem variação diurna, rotação solar, e do Ciclo Solar. Há um decréscimo do RC devido ao forte efeito das manchas solares ou de buracos coronais que escapam vento solar rápido e que atingem a Terra em uma média de 27 dias. Efeitos não periódicos são causados por estruturas interplanetárias como ejeções e suas ondas de choque.

Tabela 1 – Tabela dos efeitos Terrestres na modulação dos RC. Fonte: Mursola e Usoskin (2003, p. 124).

Tipo	Amplitude	Natureza
-----	PERIÓDICO	Variação
Sazonal	<1%	Variação da absorção das partículas secundárias na atmosfera devido à troca sazonal da estrutura atmosférica.
Diurna	<1%	Variação da absorção das partículas secundárias devido à diferença da estrutura atmosférica do dia e da noite.
Diurna	Pequena	Assimetria da magnetosfera levando a variação diurna na rigidez de corte.
-----	ESPORÁDICO	-----
Aumento na contagem durante uma tempestade magnética	Até 10%	Decréscimo da rigidez de corte geomagnética local.

Tabela 2 – Tabela dos efeitos extraterrestres na modulação dos RC.

Fonte Mursola e Usoskin (2003, p. 125).

Tipo	Amplitude	Natureza
-----	PERIÓDICO	-----
11 e 22 anos	Até 30%	Modulação Solar dos RCs.
27 dias	<2%	Estrutura do CMI e do Vento Solar.
Diurna	Poucos %	Devido à convecção e difusão do vento solar no CMI.
-----	ESPORÁDICO	-----
Aumento de contagem (GLE)	1-300%	Aumento de RC devido à chegada de RCS.
Decréscimo de <i>Forbush</i> (DF)	Até 30%	Decréscimo devido à blindagem de um choque interplanetário passando pela Terra.
Aumento na contagem antes do DF	<2%	Aumento devido ao choque interplanetário.
Nuvens Magnéticas (NM)	Poucos %	Decréscimo dos RC devido à blindagem da NM que passa pela Terra.

1.7.1 Decréscimo de *Forbush* (DF)

Em sete de outubro de 2005 a NASA, Agência Espacial Americana, publicou na página *Science News* um artigo intitulado “*Who’s Afraid of a Solar Flare?*” onde comenta um fato curioso observado a bordo da Estação Espacial Internacional, os níveis de radiação caíram durante tempestades geomagnéticas. A razão dada pela NASA é que ejeções tem campo

magnético que deflete os Raios Cósmicos que viajam na direção dela. O decréscimo da radiação é chamado de Decréscimo de *Forbush* – DF. O DF foi descoberto pelo físico americano Scott E. Forbush em estudos com Raios Cósmicos entre 1930-40. Além de ser observado na Terra através dos RC secundários e no espaço próximo a Terra, os satélites Pioneer 10 e 11, e Voyager 1 e 2 detectaram o DF além da órbita de Netuno.

O gráfico do DF clássico é mostrado na Figura 6. O gráfico é uma medida da intensidade isotrópica obtida da média da contagem de três detectores de nêutrons (*Deep River, Kerguelen e Mt. Wellington*). A primeira fase do decréscimo está associada com o choque e a segunda fase com a ejeção.

Segundo Cane, H. V. (2000) os DF podem ser “não recorrentes” ou “recorrentes”.

1. Não recorrentes: DF causado por CMEs. A característica do decréscimo é um início súbito, fase de depressão e fase de recuperação.
2. Recorrentes: DF causado por feixes rápidos do Vento Solar. Como característica não tem início súbito e tem a forma simétrica em relação à fase de decréscimo e recuperação.

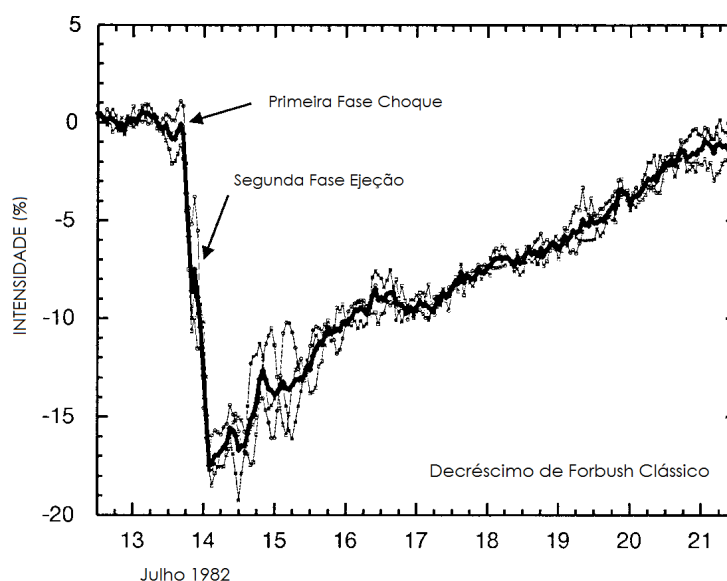


Figura 6 – Gráfico do DF Clássico. Fonte: Cane, H.V.,2000.

Uma ilustração artística, Figura 7, apresenta uma estrutura solar em larga escala no meio interplanetário. Um observador ao atravessar a estrutura observa o Decréscimo de *Forbush* com diferentes características. Se um observador passar pelo choque mais ejeção (ejecta), A na Figura 7, duas fases são observadas, uma devido ao choque e o outro em relação à associada ejeção. Cane (2000) ressalta que se uma ejeção não criar um choque, somente a segunda fase é observada.

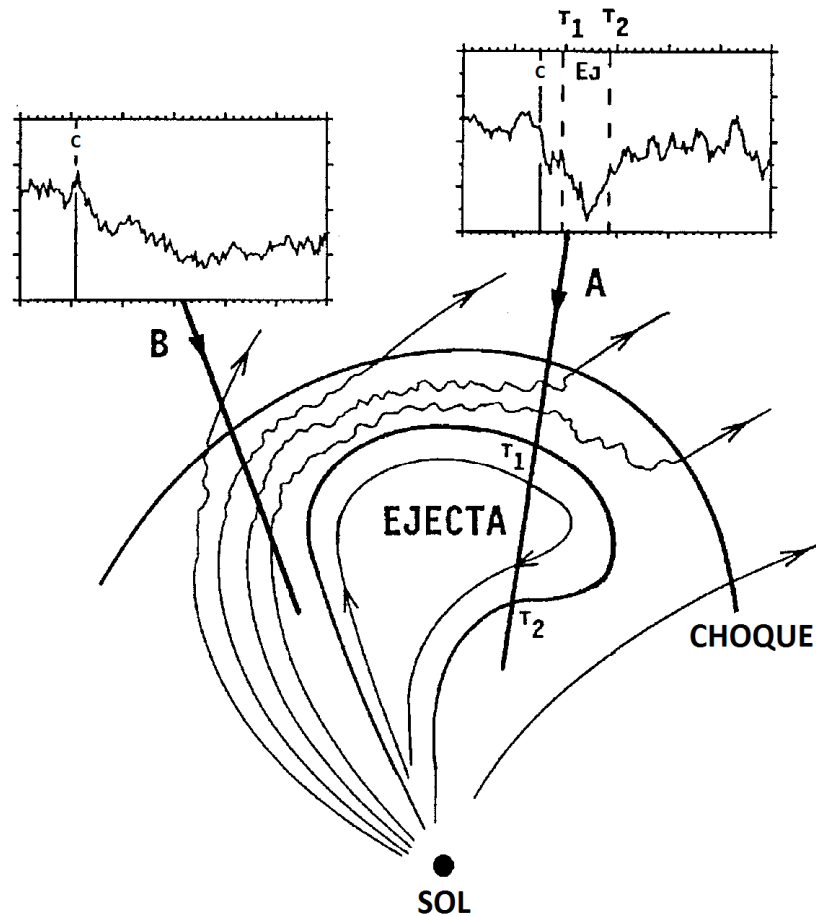


Figura 7 – Estrutura em larga escala da ejeção (ejecta) e o choque associado. Fonte: Cane, 2000.

O choque tem extensão maior que a ejeção, por isso é possível interceptar somente o choque como mostra em B na Figura 7. Neste caso somente a primeira fase é observada.

1.7.2 Decréscimo Anisotrópico do Cone de Perdas

De acordo com Munakata (2005) “é bem estabelecido que uma CME acompanhada de um forte choque forma uma região rarefeita de Raios Cósmicos atrás do choque e um detector de Raios Cósmicos terrestre observa a diminuição na intensidade de Raios Cósmicos quando a Terra passa pela CME” causando um DF.

Segundo Munakata (2005), anisotropias na intensidade dos RCG podem ser observadas em alguns eventos antes do choque chegar a Terra, porque os Raios Cósmicos viajam muito mais rápido do que o choque e carregam informações sobre o fluxo de Raios Cósmicos. Munakata (2000) diz que o precursor anisotrópico caracterizado como “cone de perdas” às vezes pode ser observado.

Uma ilustração artística do cone de perdas é apresentada na Figura 8. A CME representada em vermelho distorce as linhas do CMI espalhando os RC deixando uma região na forma de cone rarefeita.

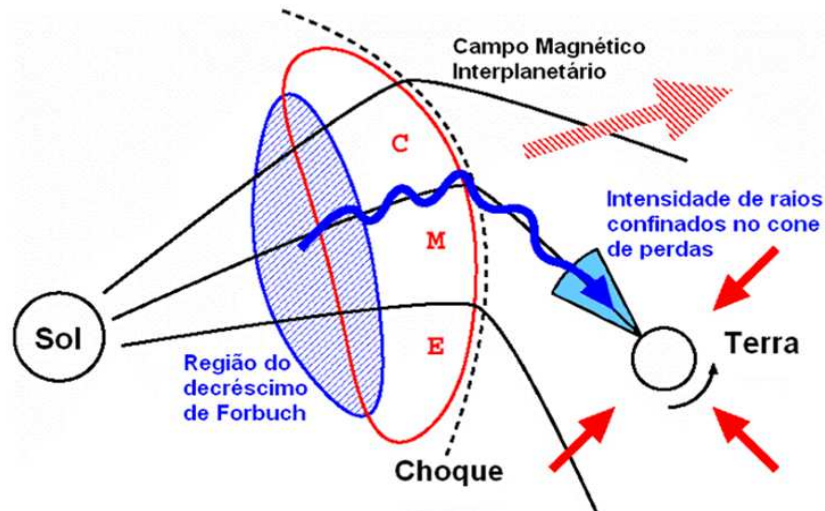


Figura 8 – Ilustração artística da anisotropia do cone de perdas. Fonte: Rufolo et al. (1999 apud Rockenback, M. S., 2010, p. 69).

Munakata (2000) atribui que o decréscimo do Cone de Perdas é caracterizado por confinar partículas que viajam ao longo do campo magnético interplanetário com pequenos ângulos de “pitch” (ângulo formado pelo campo magnético e o vetor velocidade dos RCs). Um detector na Terra que esteja apontado para o lado diurno pode ocasionalmente observar o decréscimo do cone de perdas.

Diversos detectores estão espalhados pelo globo a fim de detectar o fluxo global de Raios Cósmicos. Os diversos detectores formam, então, a Rede Mundial de Detectores de Muons (GMDN, do inglês, *Global Muon Detector Network*). A Figura 9 é um mapa de detectores de muons e as direções assintóticas das partículas primárias em diversas direções (representada por símbolos).

Segundo Rockenback (2010) a direção assintótica é a direção através da qual a partícula primária estava viajando antes de ser influenciada pelo Campo Magnético Terrestre. A linha através de cada símbolo representa o espalhamento das direções assintóticas para diferentes rigidez de corte.

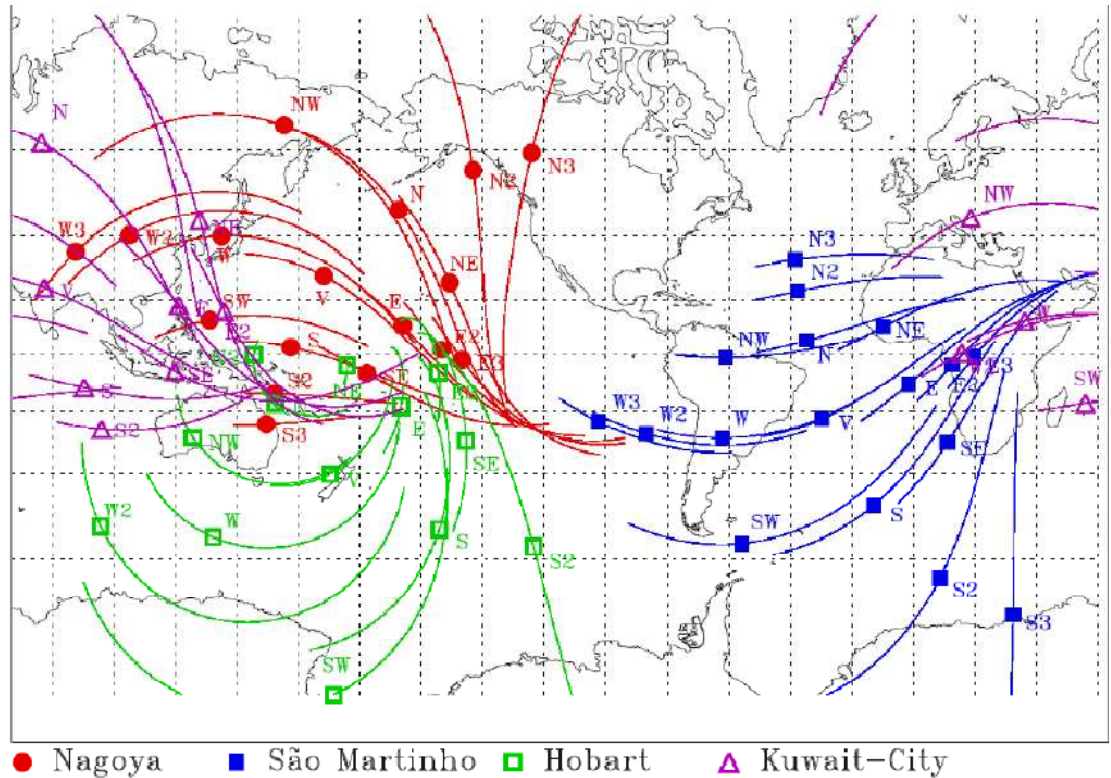


Figura 9 – Mapa das direções assintóticas dos detectores de muons espalhados pelo globo terrestre. Fonte: Rockenback, 2010, p. 46).

A observação de muons na superfície da Terra é atualmente muito importante para a área de Clima Espacial, nas palavras de Munakata (2000, p.458) “as observações de muons a regiões de alta energia pode fornecer informações úteis para prever tempestades magnéticas, e pode ser demonstrado que o GMDN pode ser uma boa ferramenta para o Clima Espacial”.

2 INSTRUMENTOS E DADOS UTILIZADOS

Nesta Sessão são descritos os aspectos básicos do aparato experimental usado para detectar os RCs secundários muons, originados de RCs primários com energia igual ou superior a 50 GeV. É apresentado o Detector Multidirecionais de Muons, DMM, instalado e em operação no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho do Serra, RS, Brasil, e algumas de suas principais características. Outro DMM, em Nagoya, Japão, funciona com os mesmos princípios, mudando somente os dados característicos do lugar de observação como a rigidez de corte e a estrutura atmosférica.

2.1 Detector Multidirecional de Muons – DMM

Em 2001 um detector, protótipo do DMM, de RCs de alta energia – muons foi instalado no Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CCR/INPE – MCT, (29.4°S, 53.8° W, 480 m a.n.m.), em São Martinho da Serra, RS, Brasil, no âmbito da Parceria INPE-UFSM, através da Cooperação: Brasil – Japão – EUA em Clima Espacial.

O DMM, protótipo, era composto de 2 camadas com quatro detectores (2x2x2) separadas por uma camada de chumbo de 5 cm de espessura, que serve para selecionar os muons, e cada detector com 1 m² de área. Possuía um sistema de resolução temporal de dados de 1 hora. Na Tabela 3 são listadas as 9 direções de observação do DMM protótipo, contagem horária, erro de contagem e rigidez de corte dos Raios Cósmicos em cada direção. Os dados apresentados na Tabela 3 são do dia 11 de Abril de 2001.

Tabela 3 – Características do DMM protótipo.

Detector direcional	Combinação de detectores	Contagem horária (fator 10 ⁴)	Erro de Poisson (%)	P_m (GV)
Vertical (V)	U1-L1 U2-L2 U3-L3 U4-L4	39,4	0,16	53
30° Norte (N)	U1-L3 U2-L4	11,3	0,30	58
30° Sul (S)	U4-L2 U3-L1	11,4	0,30	57
30° Leste (L)	U2-L1 U4-L3	11,0	0,30	59
30° Oeste (O)	U1-L2 U3-L4	11,5	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

O DMM, protótipo, operou até o início do ano de 2005 quando foi expandido com o objetivo de reduzir os erros experimentais, já que há efeitos detectáveis na variação dos RC secundários em $<1\%$, para monitorar uma maior área de cobertura do céu e ganhar mais canais de observação.

O DMM, expandido, é formado por duas camadas de 28 detectores ($2 \times 4 \times 7$) entre as quais é separada por uma camada de 5 cm de chumbo. A resolução temporal DMM expandido é de um minuto. O DMM expandido tem um sistema de captura baseado em dispositivos de hardware específicos FPGA (*Field Programmable Gate Array*) que possibilita informações de contagens de 91 canais direcionais (Petry, 2009). A Figura 10 mostra à esquerda um esquema e à direita uma foto do DMM no Observatório Espacial do Sul.

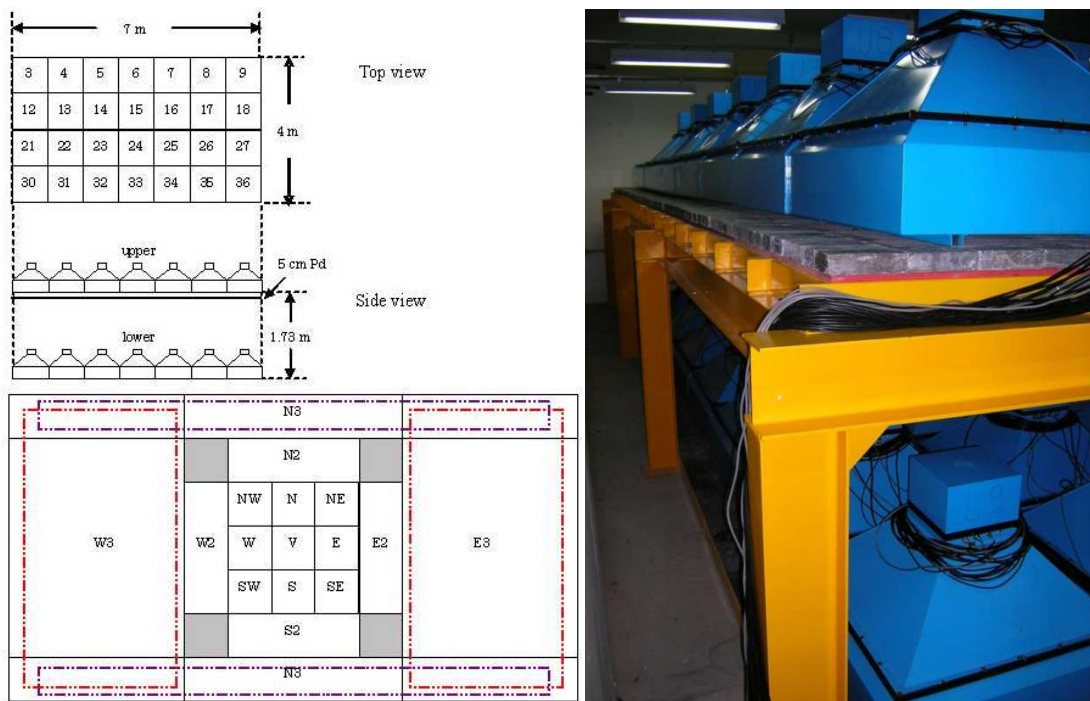


Figura 10 – À esquerda um esquema do DMM e à direita uma fotografia.

As 13 direções principais de observação do DMM no OES, número de detectores em cada direção, contagem horária, erro de contagem e rigidez de corte, são listadas na Tabela 4. Os dados apresentados na Tabela 4 são do dia 13 de Dezembro de 2006.

Tabela 4 – Características do DMM expandido.

Detector direcional	Número de sub-detectores	Contagem horária (fator 10^6)	Erro de Poisson (%)	P_m (GV)
Vertical (V)	28	2,56	0,06	55,6
30° Norte (N)	21	1,03	0,10	59,8
30° Sul (S)	21	1,06	0,10	59,1
30° Leste (L)	24	1,19	0,10	61,7
30° Oeste (O)	24	1,20	0,10	58,3
39° Nordeste (NE)	18	0,51	0,14	66,6
39° Noroeste (NO)	18	0,53	0,14	62,7
39° Sudeste (SE)	18	0,53	0,14	65,2
39° Sudoeste (SO)	18	0,54	0,14	62,3
49° Norte (NN)	14	0,36	0,17	79,0
49° Sul (SS)	14	0,35	0,17	77,3
49° Leste (EE)	20	0,49	0,14	80,6
49° Oeste (WW)	20	0,48	0,14	75,0

A forma de como o DMM faz a contagem dos muons é ilustrada na Figura 11. Cada detector é composto por uma fotomultiplicadora apontada para baixo, na direção de um plástico cintilante. Quando uma partícula passa através do plástico um fóton é emitido e capturado pela fotomultiplicadora e transformado em um pulso de corrente elétrica.

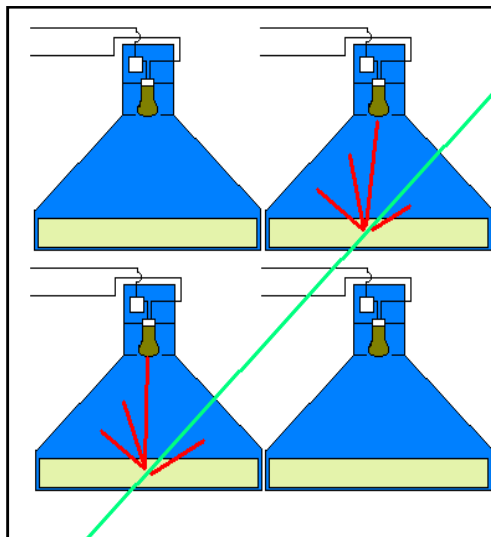


Figura 11 – Ilustração artística do DMM e o modo de detecção dos muons.

As partículas que passam pela camada de 5 cm de chumbo são detectadas na camada de detectores abaixo que também mandam pulsos de corrente elétrica. Quando os pulsos da camada de cima e de baixo coincidem o DMM conta como um muon. Diferentes canais

direcionais são obtidos pela combinação dos diferentes pulsos entre os detectores da camada de cima e de baixo.

Como foi visto no Capítulo 1 Sessão 1.3, as contagens de Raios Cósmicos podem ser estudadas através da variação percentual. A variação percentual é obtida pela expressão:

$$\Delta M(\%) = \frac{M - \bar{M}}{\bar{M}} \cdot 100 \quad (9)$$

onde M é a contagem de muons e \bar{M} é a média de contagens para um certo período. A equação vai ser usada para a análise de dados dos DMM do OES e de Nagoya.

2.2 Satélite ACE

Dados de plasma e de campo são obtidos pelos instrumentos a bordo do satélite ACE (*Advanced Composition Explorer*) da NASA. O satélite ACE orbita o ponto de Lagrange L1, ponto de equilíbrio gravitacional entre o Sol e a Terra. O satélite ACE fica em média a $1,5 \times 10^6 km$ da Terra e a $5 \times 10^8 km$ o Sol. Os instrumentos que medem os parâmetros de plasma e campo magnético interplanetário local são o SWEPAM (*The Solar Wind Electron, Proton, and Alpha Monitor*) e MAG (*Magnetometer*). Os dados estão disponibilizados na página *online* <http://www.srl.caltech.edu/ACE/>.

Os dados vão ser analisados para identificar distúrbios dos parâmetros no meio interplanetário como velocidade do vento solar e campo magnético. Com isso podemos saber graficamente o horário do choque interplanetário que se aproxima da Terra. As estruturas analisadas vão ser do tipo Nuvens Magnéticas, pois, segundo Rockenback (2008) são estruturas que melhor respondem aos decréscimos de muons. A tabela dos eventos escolhidos está em anexo e foi obtida da dissertação de Rockenback (2008).

2.3 Dados Geomagnéticos (índice Dst)

Dados de índice geomagnético Dst (*Disturbance Storm Time*) são obtidos no *Geomagnetic Equatorial Dst Index Home Page* da Universidade de Kyoto. Os dados de índice Dst serão usados para identificar Tempestades Geomagnéticas.

Tempestades Geomagnéticas são eventos de grande perturbação no campo magnético Terrestre, onde a Terra fica vulnerável à precipitação de partículas energéticas do Vento Solar e a RCs. Segundo Kamide (1998b, Apud Dal Lago, 1999) “a característica principal de uma Tempestade Geomagnética é o decréscimo acentuado da componente horizontal, H, do Campo Magnético terrestre, durando cerca de algumas dezenas de horas”. Segundo Dal Lago

(1999, p.51) “derivas devido ao gradiente do campo magnético e a sua curvatura produzem a chamada ‘Corrente de Anel’, que é o movimento de íons de Leste para Oeste e elétrons de oeste para leste”. Gonzalez (1994, apud Dal Lago 1999, p.51) diz que “para medir a intensidade da corrente utilizam-se valores horários global da componente horizontal H em baixas latitudes, constituindo o Dst”.

De acordo com Dal Lago (1999) Tempestades Geomagnéticas tem tipicamente 3 fases:

1. Início súbito (*Sudden commencement*): caracterizado por um aumento do campo magnético;
2. Fase principal (*main phase*): fase de decréscimo do índice Dst;
3. Fase de recuperação (*recovery phase*): o campo magnético tende a restaurar sua intensidade normal.

As 3 fases do fenômeno, são apresentadas na Figura 12, em azul início súbito, fase vermelha decréscimo do índice Dst e posterior fase de recuperação.

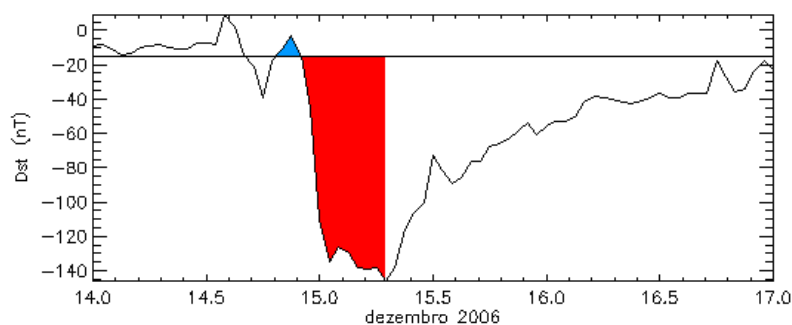


Figura 12 – Fases do decréscimo do índice Dst.

Segundo Gonzalez (1994 apud Dal Lago, 1999, p.51) Tempestades Geomagnéticas podem ser postas em 3 grupos de intensidade, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Classificação das Tempestades Geomagnéticas.

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

Dal Lago (1999) diz que o mecanismo físico responsável pelas tempestades é o processo de Reconexão Magnética que ocorre quando CMI tem sentido oposto ao do campo magnético da Terra.

3 ANÁLISE DE DADOS

No Capítulo são analisados os dados observacionais de parâmetros do meio interplanetário como o campo magnético, componente z do campo magnético (no sistema de coordenadas GSM) e velocidade do Vento Solar para verificar as estruturas solares, obtidas da Tabela 6 abaixo, e dos dados dos DMMs do Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, e de Nagoya, Japão, para averiguar os Decréscimos de *Forbush* e, eventualmente, decréscimos anisotrópicos antes do choque interplanetário atingir a Terra. Dados do índice Dst são utilizados para analisar as Tempestades Magnéticas.

As estruturas solares escolhidas para a análise foram as Nuvens Magnéticas (NM), que segundo Rockenback (2008) são estruturas que melhor respondem aos decréscimos de muons na passagem de estruturas magnéticas. Na Tabela 6, da primeira coluna à esquerda para a direita, o número do evento, data do evento, data e horário do início do Choque em UTC observada pelo satélite ACE, data e horário do início da Nuvem Magnética também observada pelo satélite ACE, decréscimo de muons observado pelo DMM de São Martinho, intervalo de tempo entre do início do choque e início da nuvem e na última coluna a variação percentual no decréscimo de muons.

Tabela 6 – Tabela de Nuvens Magnéticas Observadas.

No.	Evento	Choque (T_s)		Nuvem Mag. (T_n)		Decréscimo <i>Muons</i>		Δ $T_s - T_n$ (hor.)	Dec. <i>Muons</i> (%)
		Data	Hora UT	Data	Hora UT	Data	Hora UT		
1	19/3/2001	19/3	10:23	19/3	17:17	19/3	13:39	6,9	1,5
2	11/4/2001	11/4	13:17	11/4	22:14	11/4	13:25	8,9	5,8
3	28/4/2001	28/4	04:35	28/4	15:35	28/4	05:19	11	3,5
4	27/5/2001	27/5	14:19	28/5	10:23	27/5	16:15	20,1	3,1
5	21/10/2001	21/10	16:12	22/10	00:47	21/10	14:01	8,6	2,7
6	25/10/2001	25/10	07:58	25/10	21:09	25/10	05:55	13,2	1,6
7	31/10/2001	31/10	12:48	31/10	20:55	1/11	15:24	8,2	1,6
8	17/4/2002	17/4	10:20	17/4	23:09	17/4	12:16	12,8	1,4
9	19/7/2002	19/7	14:37	19/7	16:12	19/7	18:22	1,6	3,4
10	18/8/2002	18/8	18:08	19/8	18:19	18/8	18:22	0,2	1,8
11	2/10/2002	2/10	22:11	3/10	07:00	2/10	20:15	8,8	2,2
12	29/10/2003	29/10	05:55	29/10	08:58	29/10	06:31	0,6	10,6
13	20/11/2003	20/11	07:22	20/11	10:23	20/11	18:58	3	3,6
14	22/1/2004	22/01	00:58	22/1	11:50	22/1	00:58	10,9	3,6
15	26/4/2004	26/4	15:14	26/4	17:17	26/4	17:10	2	1,9
16	24/7/2004	24/7	05:40	24/7	17:31	24/7	03:59	11,8	2,3

Os dados do Satélite ACE, Dst e de muons são integrados da seguinte forma: os dados em gráficos são analisados, um abaixo do outro, compartilhando o mesmo intervalo da abscissa que é o tempo em dia do ano do evento em análise. Os choques e as Nuvens Magnéticas são identificados primeiro pelo satélite ACE detectando súbita variação dos parâmetros de campo magnético e da velocidade do Vento Solar. Logo após, é observado as fases do índice Dst, isto porque a onda de choque e mais a estrutura interplanetária iniciam sua interação com a Magnetosfera da Terra. O intervalo entre a observação efetuada pelo satélite ACE e com a variação Dst é porque o satélite ACE está localizado entre o Sol e a Terra, fora da Magnetosfera. Os dados de muons observados pelos DMMs de Nagoya e São Martinho são comparados com os dados do ACE e Dst, principalmente para identificação do início da onda de choque e da nuvem.

3.1 Tempestade do dia 11 de Abril de 2001

Na Tempestade Magnética ocorrida dia 11 de Abril de 2001, o DMM protótipo em São Martinho estava no início de sua operação. É um evento onde há um decréscimo acentuado de muons.

A onda de choque gerada pela Nuvem Magnética atinge o Satélite ACE, localizado em L1, às 13,28 horas = 101,55 dias, horário de Greenwich (UTC). Na Figura 13 de cima para baixo são apresentados os dados de CMI, componente z do CMI, velocidade do vento solar e Dst. A linha vermelha indica a onda de choque.

A Nuvem Magnética tem início às 11/04 às 22 h, pouco antes do dia 12 (102), e tem suave rotação de valores negativos e positivos na componente z do CMI. O índice Dst cai para -236nT antes da NM chegar à Terra caracterizando uma tempestade geomagnética intensa. Pouco antes do índice Dst decair ou logo após a onda de choque pode-se notar que a componente z do CMI assume valores cada vez mais negativos sugerindo Bz com sentido oposto ao Campo Magnético da Terra, onde ocorre injeção de partículas na Magnetosfera.

À esquerda e à direita, na Figura 14, dados de RC secundários muons respectivamente observados em São Martinho da Serra (SMS), no Observatório Espacial do Sul, e em Nagoya. De cima para baixo tem-se as contagens das observações dos DMMs nas principais direções, que são Vertical, Norte, Leste, Sul e Oeste.

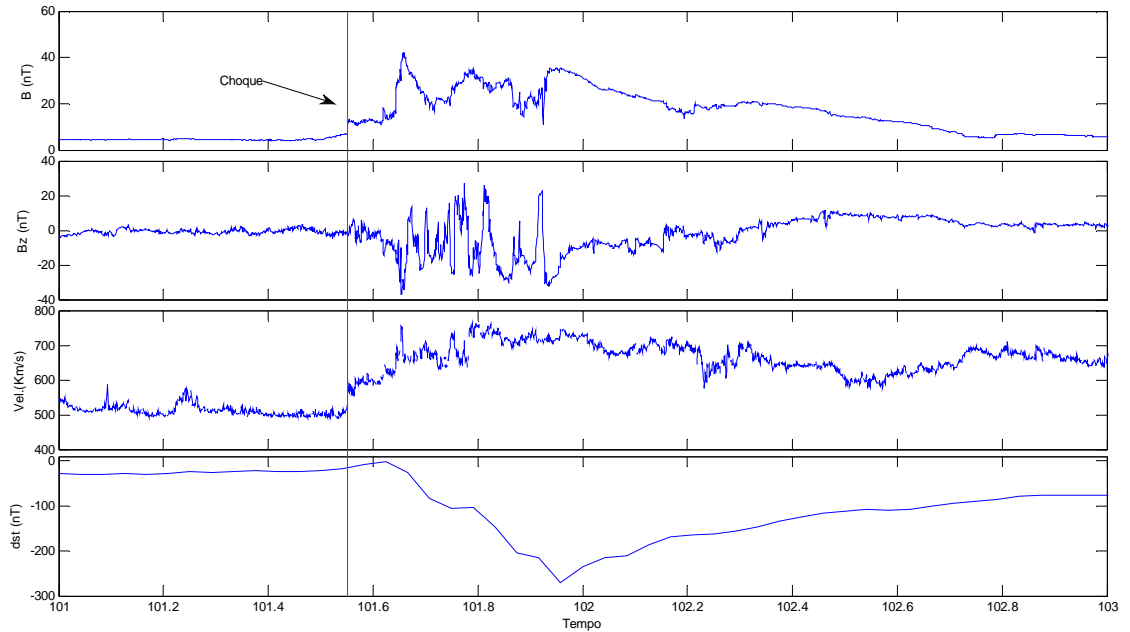


Figura 13 – Nuvem Magnética observada pelo Satélite ACE no dia 11/04/2001 (dia 101).

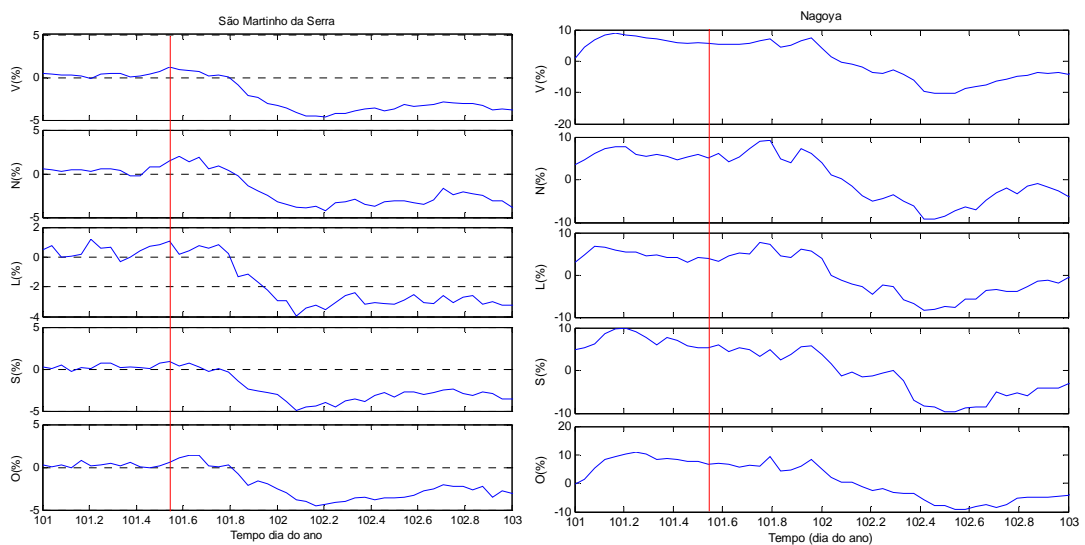


Figura 14 – À esquerda dados do DMM em São Martinho da Serra, e à direita dados de Nagoya.

O decréscimo de muons inicia às 13h25min (UTC) = 13,42h = 101,56. Levando em consideração a diferença de horário entre Japão e Brasil 12 horas, Nagoya estava no lado noturno (22 da noite) e São Martinho da Serra, estava no lado diurno (10h25min).

Pode-se notar que em algumas direções há um aumento da contagem, como a direção Oeste e Norte em São Martinho da Serra e Leste e Norte em Nagoya, antes da queda nas contagens em todas as direções característica de CHOQUE + EJEÇÃO.

Decréscimo na componente vertical foi de ~6%. O decréscimo percentual foi obtido através do seguinte cálculo,

$$d(\%) = \frac{\bar{M} - m}{\bar{M}} \cdot 100 - 1\%,$$

que é média menos o menor valor de contagem dividido pela média multiplicado por cem e diminuindo o resultado por 1%, pois os dados não são corrigidos para temperatura e pressão atmosférica, e para compensar os efeitos diurnos e sazonais. Existe um precursor além do cone de perdas chamado por Rockenback (2010) de “aumento precursor”, que foi observado pelo DMM em São Martinho da Serra neste evento, porém não é possível observar o aumento direto pelos gráficos acima na Figura 14.

3.2 Tempestade do dia 27 de Maio de 2001

O horário do choque da Tempestade Magnética ocorrida dia 27 de Maio de 2001 teve início às 14,32h = 147,60 dias. Na Figura 15 de cima para baixo dados observados pelo satélite ACE, CMI, Bz do CMI, velocidade do Vento Solar, e dados de Dst. A linha vermelha indica a onda de choque. Note que após a onda de choque há saltos abruptos dos parâmetros.

Após a onda de choque o índice Dst não cai imediatamente, pois a componente Bz atrás do choque não carrega valores negativos e não há transferência de energia para a magnetosfera até o início da NM dia 28/05 às 10,5h = 148,44 dias. Neste horário é possível observar no gráfico na Figura 15 Bz assumindo valores negativos e depois positivos indicando suave rotação.

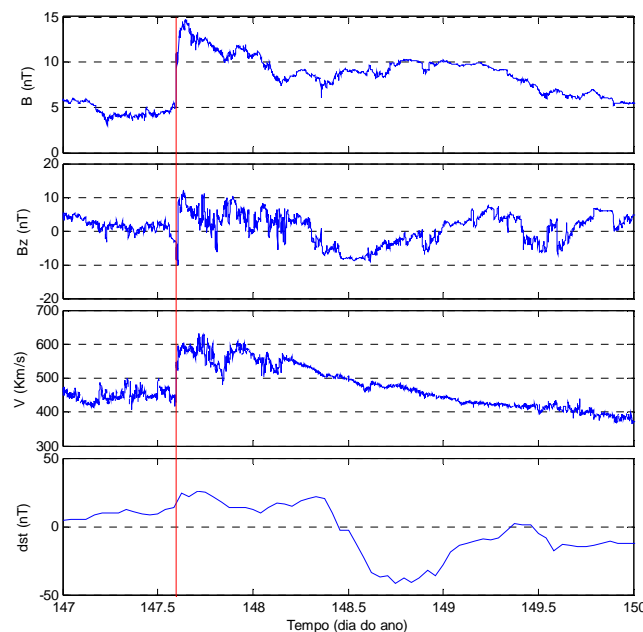


Figura 15 – Nuvem Magnética observada pelo Satélite ACE no dia 27/05/2001 (dia 147).

Na Figura 16 à esquerda e à direita contagem de RC secundários muons respectivamente observado em São Martinho da Serra (SMS) no Observatório Espacial do Sul e em Nagoya. De cima para baixo tem-se contagens nas principais direções, que são Vertical, Norte, Leste, Sul e Oeste. O decréscimo de muons tem início dia 27/05 às 16h = 147,7 dias em São Martinho da Serra.

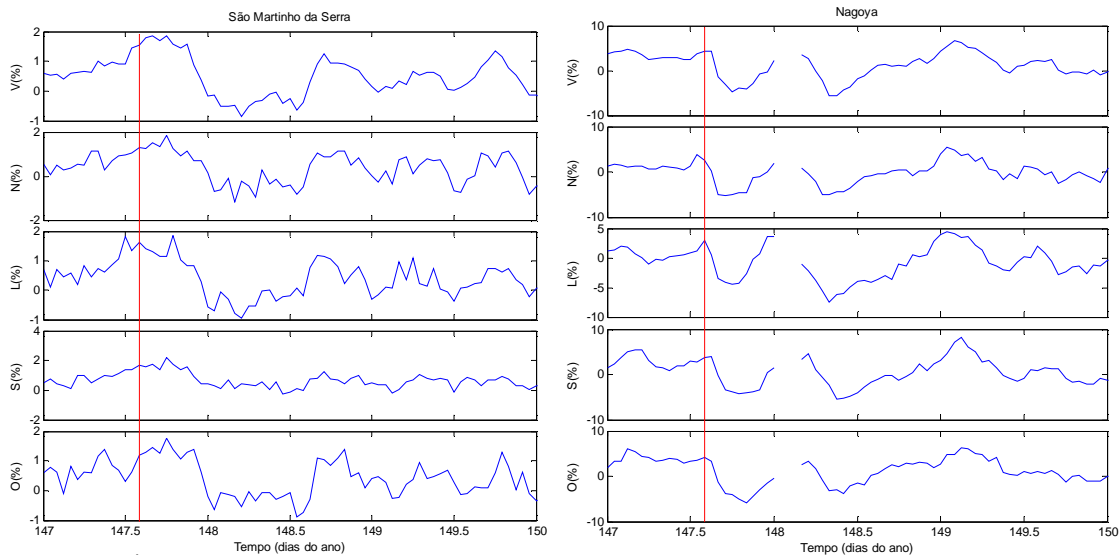


Figura 16 - À esquerda dados do DMM em São Martinho da Serra, e à direita dados de Nagoya.

No horário da observação do choque Nagoya (23,32h) encontrava-se no lado noturno da Terra e São Martinho (11h,32h) no lado diurno. Após o choque a intensidade de muons decaí 3,1 % em São Martinho. Já em Nagoya há um decréscimo, mas pode-se notar a existência de falha nos dados.

3.3 Tempestade do dia 21 de Outubro de 2001

O horário do choque da Tempestade Magnética ocorrida dia 21 de Agosto de 2001 teve início às 16,2h = 294,68 dias. Na Figura 17 de cima para baixo dados observados pelo satélite ACE, CMI, Bz do CMI, velocidade do Vento Solar, e dados de Dst. A primeira e a segunda linhas vermelhas indicam respectivamente a onda de choque e o início da NM.

Após a onda de choque o índice Dst decaí imediatamente, pois a componente Bz atrás do choque carrega valores negativos e há transferência de energia do Vento Solar para a magnetosfera. A NM inicia dia 22/10 às ~00h47min = 295,033 dias.

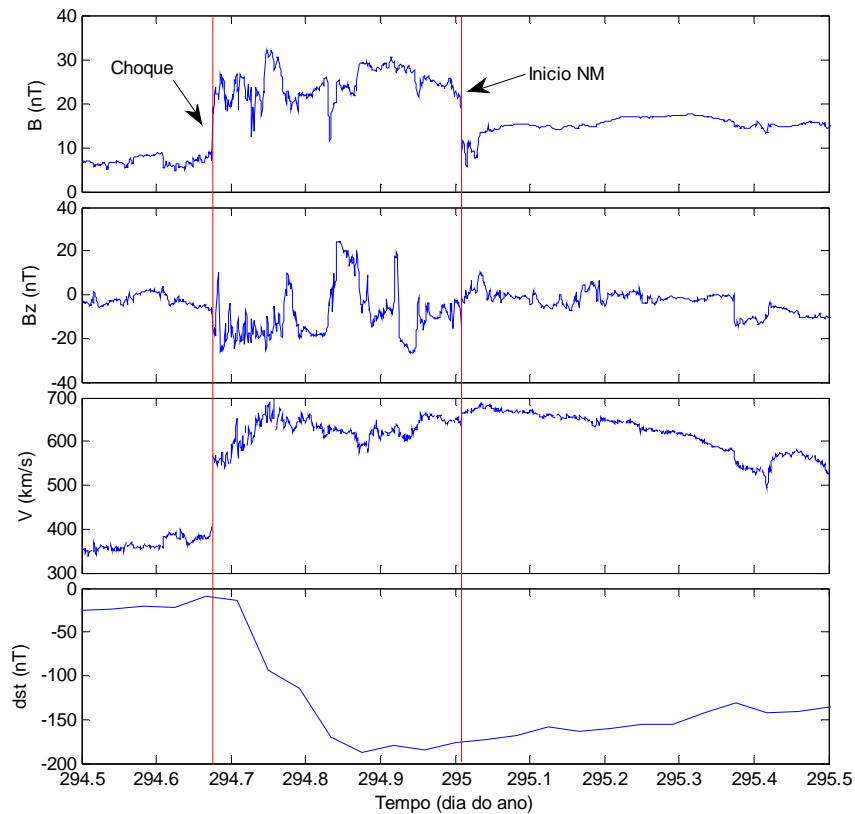


Figura 17 – Tempestade Magnética causada por uma NM no dia 21/10/2001.

À esquerda e à direita, da Figura 18, mostram contagens de RCs secundários muons respectivamente observados em São Martinho da Serra e Nagoya. De cima para baixo tem-se novamente contagens nas direções: Vertical, Norte, Leste, Sul e Oeste. O decréscimo de muons tem início dia 21/10 às 14h = 294,6 dias, em São Martinho da Serra, antes da chegada da onda de choque. O decréscimo foi de aproximadamente 2,7%.

No horário da observação do choque Nagoya encontrava-se no lado noturno (~1h) da Terra e São Martinho no lado diurno (~13h).

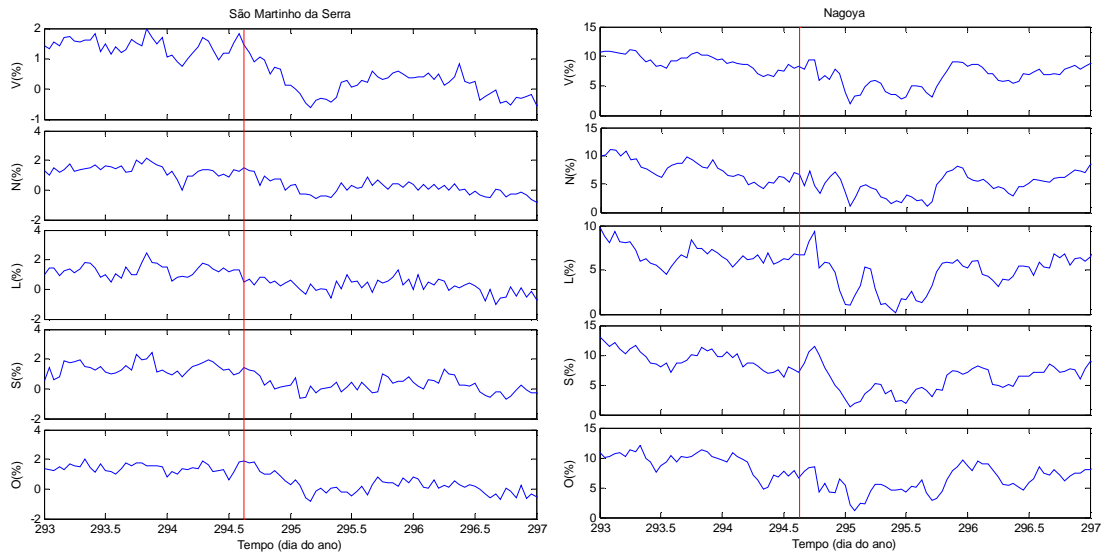


Figura 18 – Contagem de muons à esquerda em São Martinho e à direita Nagoya dos dias 20 à 23 de outubro de 2001.

3.4 Tempestade do dia 29 de Outubro de 2003

A Tempestade Geomagnética ocorrida dia 29 de Outubro de 2003 foi a tempestade que causou o maior decréscimo de muons já observado por detectores terrestres. A Figura 19 mostra um gráfico dos dados observados pelo satélite ACE e índice geomagnético. De cima para baixo CMI, Bz do CMI, velocidade do Vento Solar (estragado), e dados de Dst. A primeira e a segunda linhas vermelhas indicam ondas de choque respectivamente de uma NM e de uma estrutura solar que não é uma NM e nem uma RIC, chamada de estrutura complexa.

O choque devido a NM inicia dia 29/10 às 05h55min = 302,25 dias. A NM inicia dia 29/10 às 08,97h = 302,37 dias. Após a onda de choque o índice Dst decai por causa da componente z do campo magnético interplanetário estar no sentido oposto ao da Terra. Logo depois, vem uma leve recuperação e um novo decréscimo no Dst causado pelo início da NM.

O choque devido à estrutura complexa teve início dia 30/10 às 16h04min = 303,67 dias. A estrutura causa decréscimo de 3% na contagem de muons.

As contagens de muons em São Martinho Serra e em Nagoya são apresentadas na Figura 20. O decréscimo de muons acontece dia 29/10 às 06h31min = 302,27 e alcança um valor de ~11% em São Martinho da Serra. Note que o decréscimo em Nagoya é muito maior, gerando resultados inconclusivos a respeito do decréscimo de muons neste detector. Nesta época aparecem erros nas contagens de muons no DMM em Nagoya sugerindo algum problema de contagem.

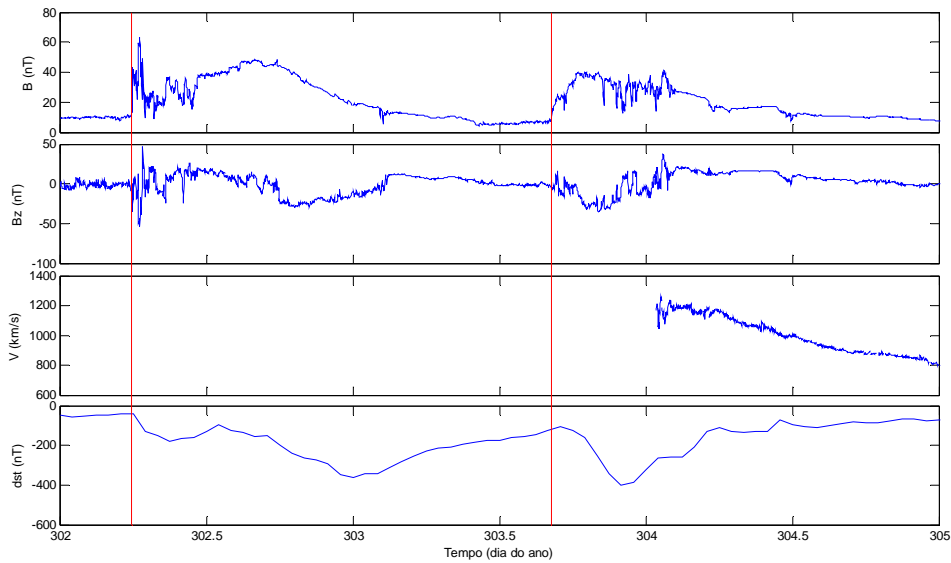


Figura 19 - Tempestade Magnética causada por uma NM no dia 29/10/2003 e uma estrutura complexa em 30/10/2003.

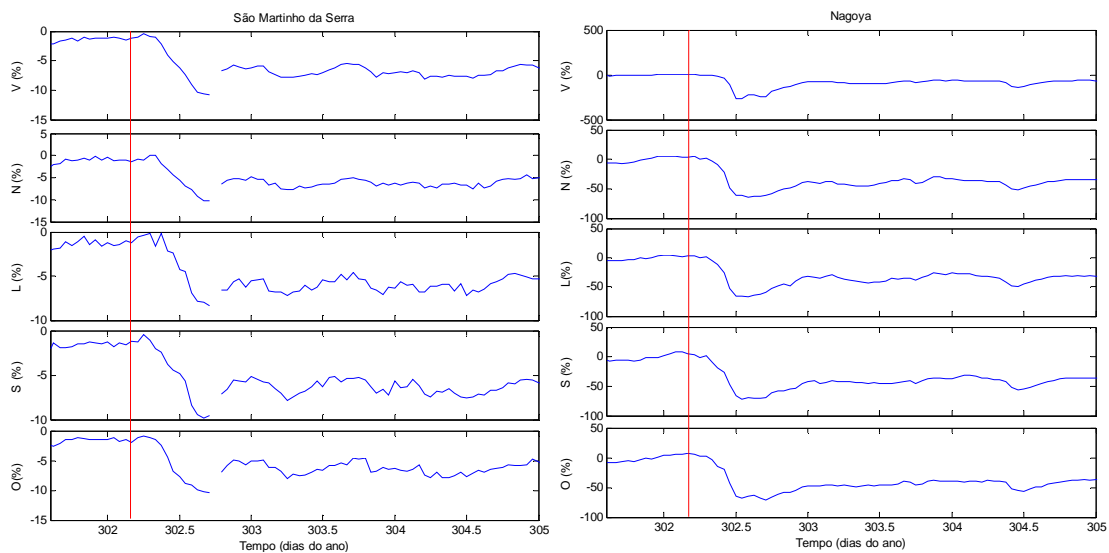


Figura 20 - Contagem de muons à esquerda em São Martinho e à direita Nagoya na tempestade ocorrida no dia 29 de outubro de 2003.

O DMM em São Martinho Serra estava no lado noturno da Terra (~3h) e Nagoya estava no lado Diurno (~15h).

3.5 Tempestade do dia 14 de Dezembro de 2006

A Tempestade Geomagnética ocorrida em dezembro de 2006 é importante, pois é a primeira tempestade intensa registrada logo após o GMDN estar completa. Esta tempestade ocorreu após a expansão do DMM em São Martinho Serra, assim as contagens tem menores erros experimentais.

A tempestade foi causada por uma NM com início dia 14/12 às 22,8h = 348,95 dias. A Figura 21 mostra os dados do meio interplanetário, de cima para baixo CMI, componente z do CMI, Vento Solar e índice Dst. A primeira linha vermelha identifica o choque e a segunda o início da NM. A Tempestade Geomagnética causou decréscimo no índice Dst de -146nT.

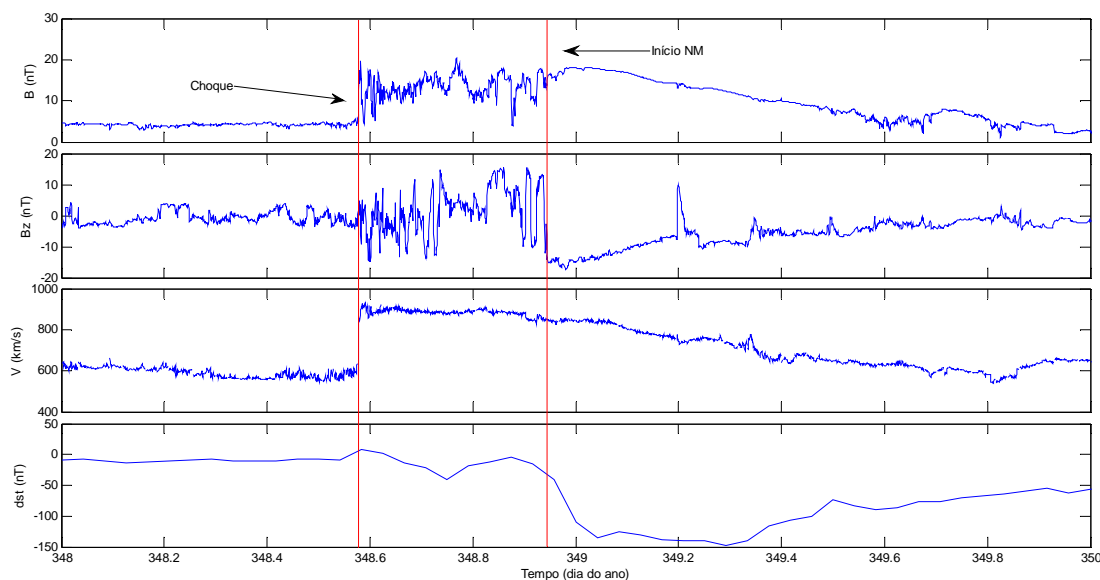


Figura 21 – Tempestade Geomagnética ocorrida em 14/12/2006.

Dados do DMM em São Martinho da Serra são apresentados na Figura 22. De cima para baixo contagens nas direções Vertical, Norte, Leste, Sul e Oeste. A linha vermelha indica a onda de choque. A tempestade causou decréscimo de ~1,6% na contagem de muons.

Dados do DMM em Nagoya, Japão são apresentados na Figura 23. A linha vermelha indica a onda de choque.

Na ocorrência da tempestade São Martinho da Serra estava no lado diurno do Globo Terrestre e Nagoya no lado noturno. A posição privilegiada do DMM em São Martinho da Serra possibilitou a observação da anisotropia do cone de perdas. Podemos perceber que antes da onda de choque há um leve decréscimo nas contagens de muons na Figura 22. Entretanto o decréscimo antes do choque não é visto no lado noturno.

Com isso verifica-se que estruturas solares modulam os RCG no meio interplanetário e que detectores terrestres detectam os DF e podendo detectar distúrbios anisotrópicos precursores de Tempestades Geomagnéticas.

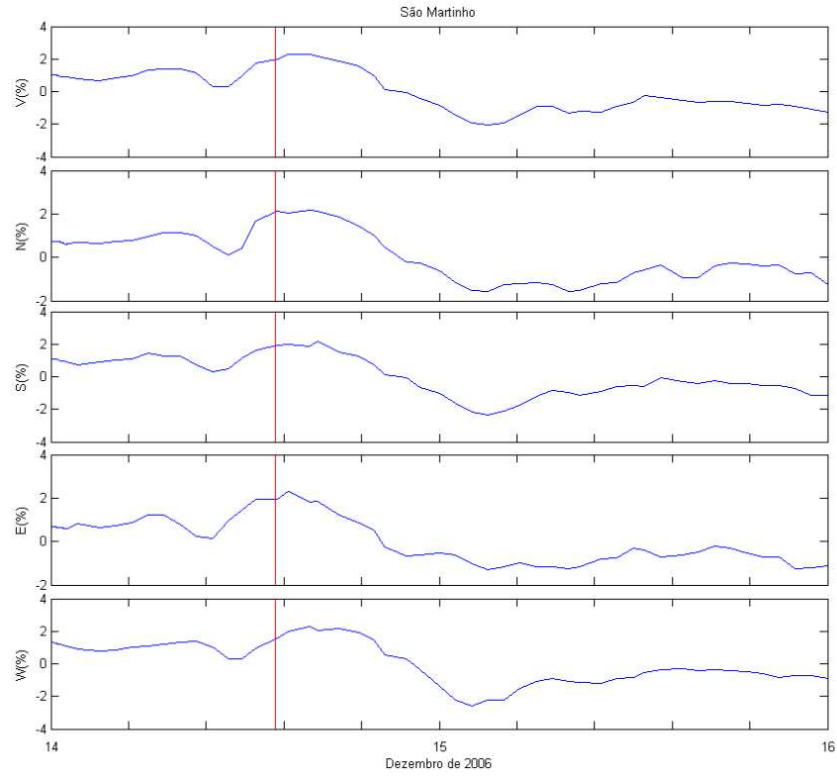


Figura 22 – Dados do DMM expandido no Observatório Espacial do Sul em São Martinho da Serra.

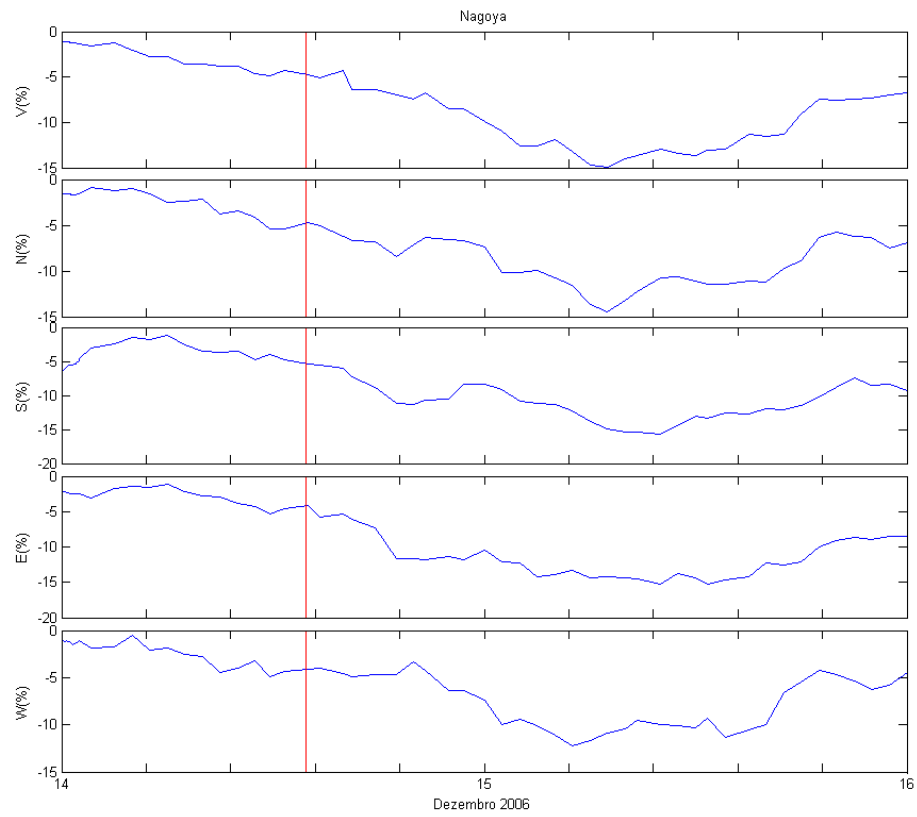


Figura 23 - Dados do DMM expandido no Observatório Espacial do Sul em São Martinho da Serra.

4 CONCLUSÕES

O principal efeito das estruturas interplanetárias é blindar a Terra do fluxo dos Raios Cósmicos por espalhamento das partículas com seus intensos e ou turbulentos campos magnéticos, caracterizando o **decréscimo isotrópico de *Forbush***.

De acordo com Rockenback (2010) observa-se que durante a passagem de nuvens magnéticas, decréscimos nos RC são maiores do que durante outras estruturas. Apesar dos resultados, não é possível explicar de maneira satisfatória os mecanismos da resposta dos RC durante a passagem de estruturas interplanetárias, mas vários modelos e observações atribuem os decréscimos dos RC principalmente ao espalhamento das partículas na área do campo magnético turbulento entre o choque e a ejeção.

Detectores de muons, DMMs, são ferramentas poderosas para a área de Clima Espacial, segundo Munakata (2000) “o **precursor anisotrópico do cone de perdas** pode ser observado por monitores de nêutrons até ~5 horas antes da chegada de choques assumindo uma velocidade de 600km/s, entretanto os detectores de muons, DMMs, podem observar o cone de perdas antes que os detectores de nêutrons visto que possuem maior energia (~50GeV)”. Segundo Munakata (2000) “Recentes modelos numéricos elaborados por Ruffolo (1999) para a distribuição do ângulo de ‘pitch’ de partículas carregadas que cruzam através de um choque interplanetário prediz uma rarefação na intensidade de RC em um cone na frente de choque”.

Como sugestão para próximos trabalhos, sugere-se estender as análises de eventos para regiões de interação co-rotantes, visto que os Raios Cósmicos Galácticos respondem a estas estruturas nas suas passagens. Sugere-se pesquisar e analisar os dados de muons observados pelos DMMs, corrigidos para os efeitos de pressão atmosférica e temperatura.

5 REFERÊNCIAS

A. Dal Lago; L. E. A. Vieira; E. Echer; W. D. Gonzalez; A. L. Clúa de Gonzalez; F. L. Guarnieri; L. Balmaceda; J. Santos; M. R. da Silva; A. de Lucas; N. J. Schuch. **Great geomagnetic storms in the rise and maximum of solar cycle 23**, Braz. J. Phys. vol.34 no.4b São Paulo Dec. 2004

A. E. Sandström, Cosmic Ray Physics, North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 1965.

Cane, H. V., **CMEs and Forbush Decreases**, Space Science Ver., 10, 41-62, 2000.

Daglis, I.A., Cosmic Rays, chapter 13, p.369-400, Athens, May 2001.

Dal Lago, A., **Estudo de Nuvens Magnéticas Geofetivas no Meio interplanetário**, Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, INPE-7263-TDI/705, 1999.

Echer, E., Alves, M.V., Gonzalez, W.D., **Ondas não Colisionais no Espaço interplanetário**, Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 28, n.1, p.51-66, 2006.

E. Echer, W. D. Gonzalez, F. L. Guarnieri, A. Dal Lago, L. E. A. Vieira, **Introduction to Space Weather**. Advances in Space Research , Volume 35, Issue 5, p. 855-865, 2005.

Gosling, J. T., **Coronal Mass Ejections: An Overview**, Geophysical Monograph, p.9-15, 1999.

H. S. HUDSON, J. L. BOUGERET and J. BURKEPILE, **CORONAL MASS EJECTIONS: OVERVIEW OF OBSERVATIONS** Space Science Reviews (2006) 123: 13–30, 2006.

KENNETH G. MCCRACKEN, **PARTICLES AND FIELDS IN THE INTERPLANETARY MEDIUM**, UNIVERSITY OF ADELAIDE, ADELAIDE, AUSTRALIA, N. A. S. SYMPOSIUM, p. 2149-2153, VOL. 58, 1967.

K. Munakata, T. Kuwabara, S. Yasue, C. Kato, S. Akahane, M. Koyama, Y. Ohashi, A. Okada, T. Aoki, K. Mitsui, H. Kojima, and J. W. Bieber, **A “loss cone” precursor of an approaching shock observed by a cosmic ray muon hodoscope on October 28, 2003**, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, V. 32, L03S04, doi:10.1029/2004GL021469, 2005.

Margaret G. Kivelson, Christopher, T. Russell, Introduction to space physics, Cambridge, 1995.

Miroshnichenko leonty I., Solar Cosmic Rays, 2000.

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 Rays, lectures fall 2003.

PETRY, A. **BANCO DE DADOS PARA O TELESCÓPIO CINTILADOR DE MUONS INSTALADO NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL**, Santa Maria (INPE-00000-MAN/0000), 2009.

Rockenback, M. R., **Variação da intensidade dos Raios Cósmicos em Resposta a Diferentes Estruturas Magnéticas do Meio Interplanetário**. Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, INPE-15242-TDI/1329, 2008.

Rockenback, M. R., **Detecção de Distúrbios Solar-Interplanetários Combinando Observações de Satélites e de Raios Cósmicos de Superfície para Aplicação em Clima Espacial**, Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, 2010.

Siffert, Beatriz Blanco, Anisotropia de Raios Cósmicos de Altíssimas Energias no Observatório Pierre Auger, Tese de Doutorado, Rio de Janeiro: UFRJ/IF, 2008.

RUFFOLO, D.; BIEBER, J.; EVENSON, P.; PYLE, R. **Precursors to forrush decrease and space weather prediction**. In: Proc. Int. Cosmic Ray Conf. 26th. [S.l.: s.n.], 1999.(Figura cone de Perdas)

Subramanian, P., **Forbush decreases and Space weather**, Lectures, Indian Institute of Astrophysics, p.1-10.

Swordy, S. P., **THE ENERGY SPECTRA AND ANISOTROPIES OF COSMIC RAYS**, Space Science Reviews 99: p. 85-94, 2001.

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

http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1936/hess-bio.html (01/11/ 2010)

<http://neutronm.bartol.udel.edu/catch/cr1.html> (25/10/2010)

http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2005/07oct_afraid/ (18/11/2010)

<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/ste-www1/div3/muon/dbtext22.pdf>

http://www.bartol.udel.edu/~chuck/ace/ACElists/obs_list.html (01/10/2010)