



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

aa/bb/cc/dd-TDI

**MODULAÇÃO DE RAIOS CÓSMICOS GALÁCTICOS
PELA ATIVIDADE SOLAR OBSERVADA PELO
DETECTOR MULTIDIRECIONAL DE MUONS
INSTALADO NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL**

Eduardo Saenger Potter

Relatório PIBIC, orientado pelo
Dr. Marlos Rockenbach da Silva.

URL do documento original:

[<http://urlib.net/xx/yy>](http://urlib.net/xx/yy)

INPE
São José dos Campos

2021

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6923/6921

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
(CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação
(SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

aa/bb/cc/dd-TDI

**MODULAÇÃO DE RAIOS CÓSMICOS GALÁCTICOS
PELA ATIVIDADE SOLAR OBSERVADA PELO
DETECTOR MULTIDIRECIONAL DE MUONS
INSTALADO NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL**

Eduardo Saenger Potter

Relatório PIBIC, orientado pelo
Dr. Marlos Rockenbach da Silva.

URL do documento original:

[<http://urlib.net/xx/yy>](http://urlib.net/xx/yy)

INPE
São José dos Campos

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Potter, E.S..

Cutter Modulação de raios cósmicos galácticos pela atividade solar observada pelo detector multidirecional de Muons instalado no Observatório Espacial do Sul / Eduardo Saenger Potter. – São José dos Campos : INPE, 2021.

v + 19 p. ; (aa/bb/cc/dd-TDI)

1. Raios Cósmicos. 2. Heliosfera. 3. Transporte de Partículas.
4. Atividade Solar. 5. Magnetosfera da Terra I. Título.

CDU 000.000



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Espectro de energia dos componentes nucleares dos raios cósmicos primários.	4
3.1 Ilustração de um Chuveiro de partículas na atmosfera Terrestre. É possível observar a luz fluorescente (UV ou azulada) e as partículas carregadas em verde. No detalhe do quadro da esquerda, pode-se observar a geração de partículas chamadas píons (π), que rapidamente decaem em léptons mais leves (elétrons - e^- , múons - μ , neutrinos - ν) e fótons (γ).	8
4.1 O instrumento SWAP a bordo da sonda da NASA New Horizons confirmou que o vento solar desacelera a medida que desloca-se para longe do Sol. Esse esquema da Heliosfera mostra que o vento solar começa a desacelerar a uma distância radial de aproximadamente 4 AU a partir do Sol e continua diminuindo sua velocidade a medida que desloca-se para o sistema solar exterior e atinge o meio interestelar. Extrapolações atuais revelam que o choque terminal pode ser mais perto que aquele encontrado pela sonda Voyager. Contudo, com o aumento da atividade solar a Heliosfera se expande e empurra o Choque Terminal para mais longe, possivelmente para 84 – 94 AU que foi medido pelo satélite Voyager.	10
5.1 Série temporal das medidas de raios cósmicos feita no observatório de Oulu na Finlândia, desde 1964 até 2019.	11
6.1 Cobertura global da GMDN através das direções de visão assintóticas dos canais direcionais dos detectores da rede.	15
6.2 Correção dos dados de <i>muons</i> para o efeito de pressão atmosférica.	16

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 RESUMO DO PROJETO PROPOSTO	1
1.1 O que São Raios Cósmicos?	1
1.2 Objetivos	1
2 RAIOS CÓSMICOS PRIMÁRIOS	3
2.1 Raios Cósmicos Galácticos (“ <i>Galactic Cosmic Rays</i> ” - GCR)	3
2.2 Origem dos Raios Cósmicos Galácticos	4
3 RAIOS CÓSMICOS SECUNDÁRIOS	7
3.1 Componente Méson-Muônica	7
4 HELIOSFERA	9
5 EFEITOS HELIOSFÉRICOS E MODULAÇÃO SOLAR	11
6 Plano de Trabalho	13
6.1 Etapa 1	13
6.2 Etapa 2	13
6.3 Correção dos efeitos atmosféricos nos dados de raios cósmicos	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	17

1 RESUMO DO PROJETO PROPOSTO

1.1 O que São Raios C3smicos?

Apesar do nome sugerir, os Raios C3smicos n3o s3o raios, mas **part3culas**. Originados no espaço exterior, os raios c3smicos s3o compostos por 3tomos ionizados, desde pr3tons at3 n3cleos de ferro ou mesmo n3cleos ainda mais pesados, cujo poder de penetraço3o 3 muito superior ao de qualquer outra part3cula conhecida. Essas part3culas constantemente “bombardeiam” a Terra a partir de todas as direço3es, atingindo o topo da atmosfera terrestre com um fluxo de mais de 10^{18} part3culas por segundo, possuindo uma energia maior que 1 MeV ¹ (JOKIPII, 1998). Seu estudo 3 de grande interesse por duas raz3es:

- a) Como os raios c3smicos s3o fundamentalmente constitu3dos por part3culas e f3tons dotados de energia muito elevadas, provocam processos que eram desconhecidos e que levaram 3 descoberta de outras part3culas.
- b) Os raios c3smicos fornecem informaço3es tanto sobre processos astrof3sicos distantes quanto sobre o meio interplanet3rio, magnetosfera e atmosfera terrestre, que eram antes somente acess3veis 3 especulaço3o.

1.2 Objetivos

A interaço3o de raios c3smicos gal3ticos com energias at3 100 GeV com atmosfera terrestre produz m3ons secund3rios, que podem ser detectados na superf3cie. 3 bastante conhecida a anti-correlaço3o que existe entre a incid3ncia de raios c3smicos de 10 GeV , que produzem n3utrons secund3rio na Terra, e o ciclo de atividade solar. Esta anti-correlaço3o 3 devida ao fato de que as estruturas magn3ticas ejetadas pelo Sol durante os per3odos de alta atividade solar removem uma parcela dos raios c3smicos prim3rios, causando uma diminuiço3o da contagem dos raios c3smicos secund3rios. Desde 2001, est3 em operaço3o no Observat3rio Espacial do Sul do Inpe (OES/COESU/CGGO-INPE) um detector multidirecional de m3ons, capaz de observar as contagens totais e direcionais destas part3culas.

O objetivo geral deste projeto 3 correlacionar as contagens de raios c3smicos gal3ticos com energias suficientes para formaço3o de m3ons ($< 100 \text{ GeV}$) com a atividade solar, medida pelo n3mero de manchas solares, desde o in3cio do per3odo de operaço3o da atual vers3o do instrumento no Brasil, desde Janeiro de 2007 at3 Dezembro

¹eV - El3tron Volt. Um eV 3 a energia que um el3tron ganha se for acelerado por uma diferença de potencial de 1 V.

de 2019, período em que existem dados de pressão e temperatura atmosférica para realizar correção dos efeitos de pressão e temperatura.

Especificamente, pretende-se estudar e avaliar a modulação de raios cósmicos devida à atividade solar, em relação as energias associadas aos múons. Uma vez que o período escolhido para análise dos dados cobre mais de uma década, este tipo de estudo torna-se possível, dado que a escala de variação do ciclo de atividade solar é de aproximadamente 11 anos.

2 RAIOS CÓSMICOS PRIMÁRIOS

São chamadas de raios cósmicos primários as partículas que ainda não interagiram com os constituintes da atmosfera terrestre. Os raios cósmicos primários que permeiam a Heliosfera podem ser divididos em três tipos, de acordo com sua origem: **raios cósmicos galácticos**, **raios cósmicos solares** e **raios cósmicos anômalos**.

2.1 Raios Cósmicos Galácticos (“*Galactic Cosmic Rays*” - GCR)

Os raios cósmicos galácticos são compostos por aproximadamente 86% de prótons, 13% de núcleos de hélio, e todos os outros núcleos de elementos mais pesados compõem apenas 1% deste tipo de raios cósmicos. Todos os GCR são núcleos de átomos que foram completamente ionizados em sua origem, devido ao violento processo de aceleração que estas partículas sofreram (SCHUCH, 1991).

Utilizando-se dados de diversos experimentos de raios cósmicos, foi possível plotar o fluxo (dado em $(m^2 sr GeV sec)^{-1}$), em função da energia (dada em eV), das partículas primárias, cujo resultado é apresentado na Figura 2.1. Cada experimento é capaz de detectar partículas dentro de uma faixa de energia específica: LEAP - *Low-Energy AntiProton* - 130 – 1200 MeV ; Satélite Próton - $10^{12} eV$ até $10^{15} eV$; Yakutsk EAS Array - de $1 \times 10^{15} eV$ até $0.1 \times 10^{18} eV$; Haverah Park - $4 \times 10^{17} eV$; AGASA - de $10^{14} eV$ até $10^{17} eV$; Fly’s Eye - $3, 2 \times 10^{20} eV$; *High Resolution Fly’s Eye* (HiRes) mono - $6 \times 10^{19} eV$; HiRes Stereo - $10^{19.7} eV$ e Observatório Pierre Auger - $4 \times 10^{19} eV$. A energia mais alta de partículas de raios cósmicos já detectados até então foi $10^{21} eV$.

O gráfico de espectro de energia mostrado na Figura 2.1 é duplo logarítmico e a linha reta indica que o fluxo de raios cósmicos com alguma energia é proporcional à energia em alguma potência. Uma vez que o espectro de energia não é exponencial, o espectro de GCR é mais duro que o espectro de energia térmica (distribuição gaussiana), significa que as partículas experimentaram uma aceleração (não térmica) considerável. É então razoável considerar um bom ajuste dos dados, um espectro de energia de GCR com a lei de potência, exceto para energias mais baixas, é:

$$I(E) \propto E^\gamma, \quad (2.1)$$

onde $I(E)$ é a intensidade dos componentes nucleares com energia E e γ é chamado de índice espectral, que é a principal característica do espectro.

Cosmic Ray Spectra of Various Experiments

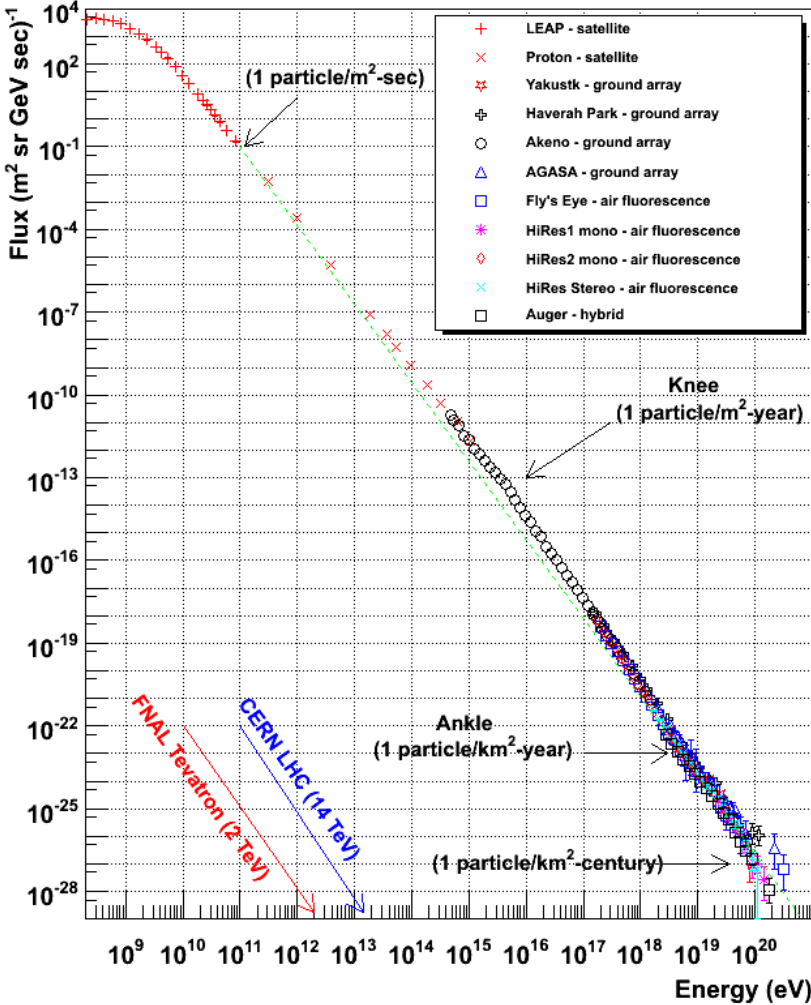


Figura 2.1 - Espectro de energia dos componentes nucleares dos raios cósmicos primários.
 Fonte: <https://www.physics.utah.edu/~whanlon/spectrum.html>

2.2 Origem dos Raios Cósmicos Galácticos

A isotropia dos raios cósmicos detectados próximos à Terra e sua constância sobre um longo período de tempo são fatores importantes para a discussão sobre a origem dos GCR. Medidas feitas no espaço exterior indicam que o fluxo de raios cósmicos é essencialmente isotrópico para energias $\leq 10^{15} \text{ eV}$, permanecendo constante por aproximadamente 10^9 anos . Desta forma, a fonte dos raios cósmicos deve produzir raios cósmicos com energia próxima à 10^{20} eV e com um espectro de potências dado pela Equação 2.1. Além disso, a energia total produzida deve ser da ordem de

10^{49} *ergs/ano* em nossa galáxia; os raios cósmicos devem ser isotrópicos e constantes durante 10^9 *anos*. Também, o espectro primário deve incluir elementos pesados em torno de aproximadamente $Z = 100$.

Nenhum modelo proposto até hoje explica todas estas propriedades unicamente e de uma maneira satisfatória. Três das mais importantes questões permanecem sem respostas: (1) De onde os raios cósmicos primários vêm? (2) Como eles são produzidos? e (3) Como eles são acelerados? Algumas observações podem ser feitas em relação à estas questões:

- a) Atualmente, acredita-se que supernovas e estrelas de nêutrons podem produzir os raios cósmicos com as características acima citadas. Em nossa galáxia, uma supernova surge aproximadamente a cada 40 anos e acredita-se que ela possa produzir entre 10^{51} e $10^{52,5}$ *ergs* de energia. A investigação das supernovas mostra que elas podem fornecer a energia necessária para os raios cósmicos (aproximadamente 10^{49} *ergs/ano*). Contudo, o modelo de aceleração das partículas pela onda de choque de uma supernova não se aplica às partículas com energia acima de 10^{15} *eV*. Detecções recentes de raios cósmicos vindos dos sistemas binários de Cygnus X-3 e Hercules X-1 sugerem que para energias acima do “joelho” do espectro dos raios cósmicos, originam-se em pulsares ou sistemas binários constituídos de uma estrela de nêutrons e uma estrela gigante.
- b) É possível que os raios cósmicos sejam emitidos com um espectro de energia dado pela Equação 2.1. Portanto, é também possível que a natureza utilize as mesmas técnicas dos aceleradores de altas energias, ou seja, aceleração em estágios. Um dos mecanismos propostos para aceleração das partículas no espaço interestelar é a interação destas partículas com o campo magnético do meio em que elas estão se deslocando, que foi sugerido por Fermi. Contudo, hoje em dia é mais aceitável que a fonte dos raios cósmicos primários sejam as explosões de supernovas e suas remanescentes.

3 RAIOS CÓSMICOS SECUNDÁRIOS

O que se observa na superfície da Terra não é decerto a radiação cósmica original. Quando partículas de raios cósmicos primários atingem o topo da atmosfera terrestre, reações nucleares fazem com que um conjunto de várias partículas secundárias sejam formadas. Como estas partículas primárias possuem energias relativísticas, a maioria das partículas secundárias propagam-se aproximadamente na mesma direção em que a partícula primária se deslocava antes da colisão e o número de partículas secundárias aumenta com o aumento da energia da partícula primária, conforme ilustra a Figura 3.1.

Na região de baixa energia, os estudos das emulsões fotográficas² revelaram que os processos são caracterizados por traços radiais a partir do ponto de interação, conhecidos como estrelas. Alguns destes rastros são reconhecidos como sendo píons, outros representando nucleons e um deles sendo o remanescente do núcleo original.

3.1 Componente Méson-Muônica

A componente Méson-Muônica é composta por dois componentes distintos dos raios cósmicos, a *componente mesônica* e a *componente muônica*.

A maior parte da componente mesônica é constituída de píons, π . Da teoria nuclear, sabe-se que eles podem ter sido criados em processos de desintegração na interação de um próton primário com os constituintes atmosféricos. Os píons são partículas que podem ser encontradas com cargas elétricas nula, positiva e negativa. Os píons neutros decaem em aproximadamente $10^{-15}s$ em um par de fótons, iniciando a formação da componente eletromagnética dos raios cósmicos secundários. Os píons eletricamente carregados, que possuem um tempo de vida de aproximadamente $2,5 \times 10^{-8}s$, decaem em *muons* e neutrinos, formando um subconjunto de partículas conhecido como *componente muônica*. O sinal das cargas deve ser conservado neste processo que nós podemos escrever como sendo representado por:

$$\begin{cases} \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu, \\ \pi^- \rightarrow \mu^- + \nu. \end{cases} \quad (3.1)$$

²Emulsão fotográfica consiste de uma chapa fotográfica colocada em uma câmara de ionização. Nesta câmara são inseridos grãos microscópicos de prata nos quais as partículas de alta energia dos raios cósmicos interagem, ocorrendo reações nucleares, formando traços de partículas secundárias na direção radial a partir do ponto de interação. Estes traços ficam registrados em detalhes na chapa fotográfica podendo serem visualizados através de um microscópio após a revelação da mesma.

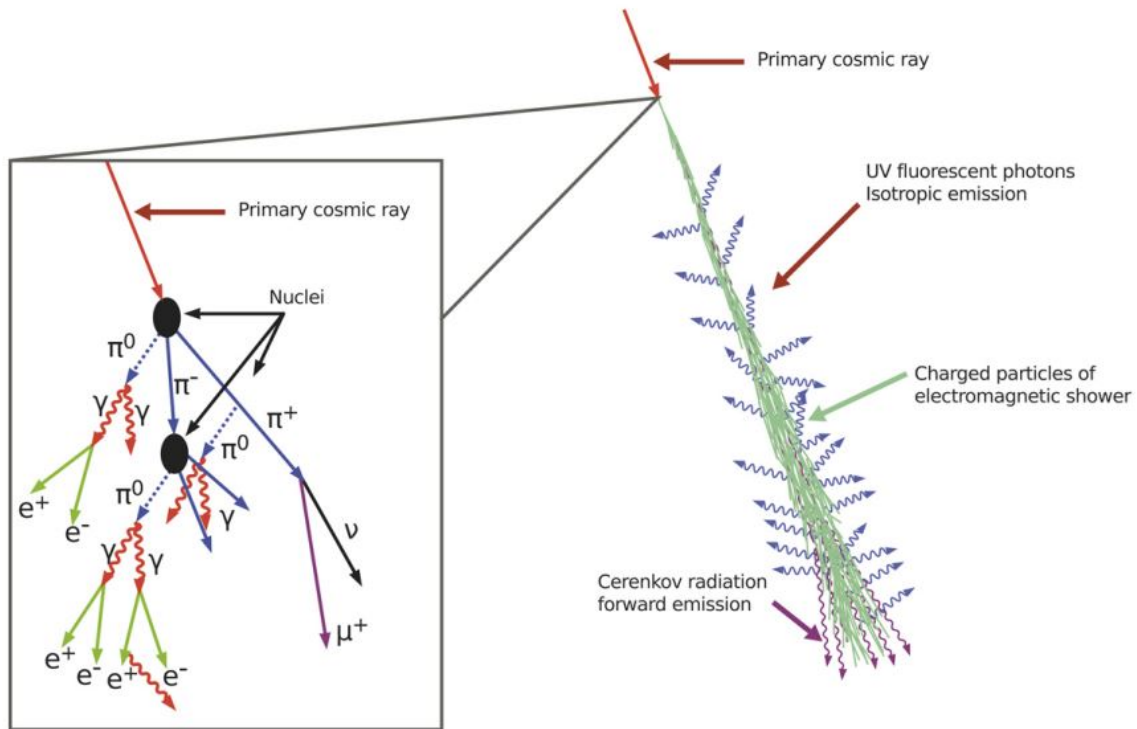


Figura 3.1 - Ilustração de um Chuveiro de partículas na atmosfera Terrestre. É possível observar a luz fluorecente (UV ou azulada) e as partículas carregadas em verde. No detalhe do quadro da esquerda, pode-se observar a geração de partículas chamadas píons (π), que rapidamente decai em léptons mais leves (elétrons - e^- , múons - μ , neutrinos - ν) e fótons (γ).

Fonte: <https://arxiv.org/pdf/1305.1346v1.pdf>

Os *muons* são partículas bastante penetrantes, com massa de aproximadamente 210 vezes a massa do elétron e o tempo de vida (em repouso), é de aproximadamente $2 \times 10^{-6} s$ tendo, como produto do decaimento, pares elétron-pósitrons e neutrinos, como podemos ver na Equação 3.2 (FORBUSH, 1993). Este tipo de partícula só consegue atingir a superfície terrestre devido a sua velocidade relativística, que pode chegar a aproximadamente $0,96c$.

$$\begin{cases} \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu} \\ \mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu} \end{cases} \quad (3.2)$$

4 HELIOSFERA

A coroa solar é um plasma magnetizado altamente condutivo, cujo o aumento da temperatura com a altitude a partir da superfície solar resulta num fluxo de “vento” solar para fora devido à diferença de pressão (PARKER, 1959). Desta forma, o vento solar flui até interagir com o “vento” interestelar, reduzindo sua velocidade e formando uma estrutura chamada de choque terminal, conforme ilustra a Figura 4.1, que define a região do espaço, a *Heliosfera*, cujos processos físicos são dominados pelo Sol e suas estruturas.

Na Heliosfera, o principal agente de modulação dos Raios Cósmicos é o Campo Magnético Heliosférico (“*Heliospheric Magnetic Field*” - HMF), historicamente chamado de Campo Magnético Interplanetário (“*Interplanetary Magnetic Field*” - IMF), que permeia toda a Heliosfera. A estrutura e a dinâmica da HMF são as chaves para o entendimento, tanto da modulação de raios cósmicos, quanto para previsão do Clima Espacial, uma vez que ele acopla diretamente o Sol com as magnetosferas planetárias, assim como canaliza o fluxo de partículas energéticas solares e cósmicas. O HMF é também a única porção do campo magnético solar que é acessível à medidas diretas, fornecendo importantes restrições nas teorias da formação do vento solar e do dínamo solar. No decorrer desse capítulo, os mecanismos das ejeções solares serão detalhados, onde o IMF e as ICMEs serão explicados e postos no contexto da modulação dos Raios Cósmicos. O principal mecanismo que propicia a ejeção de plasmas magnetizados do Sol para meio interplanetário é a reconexão magnética, cuja teoria será explicada na próxima seção.

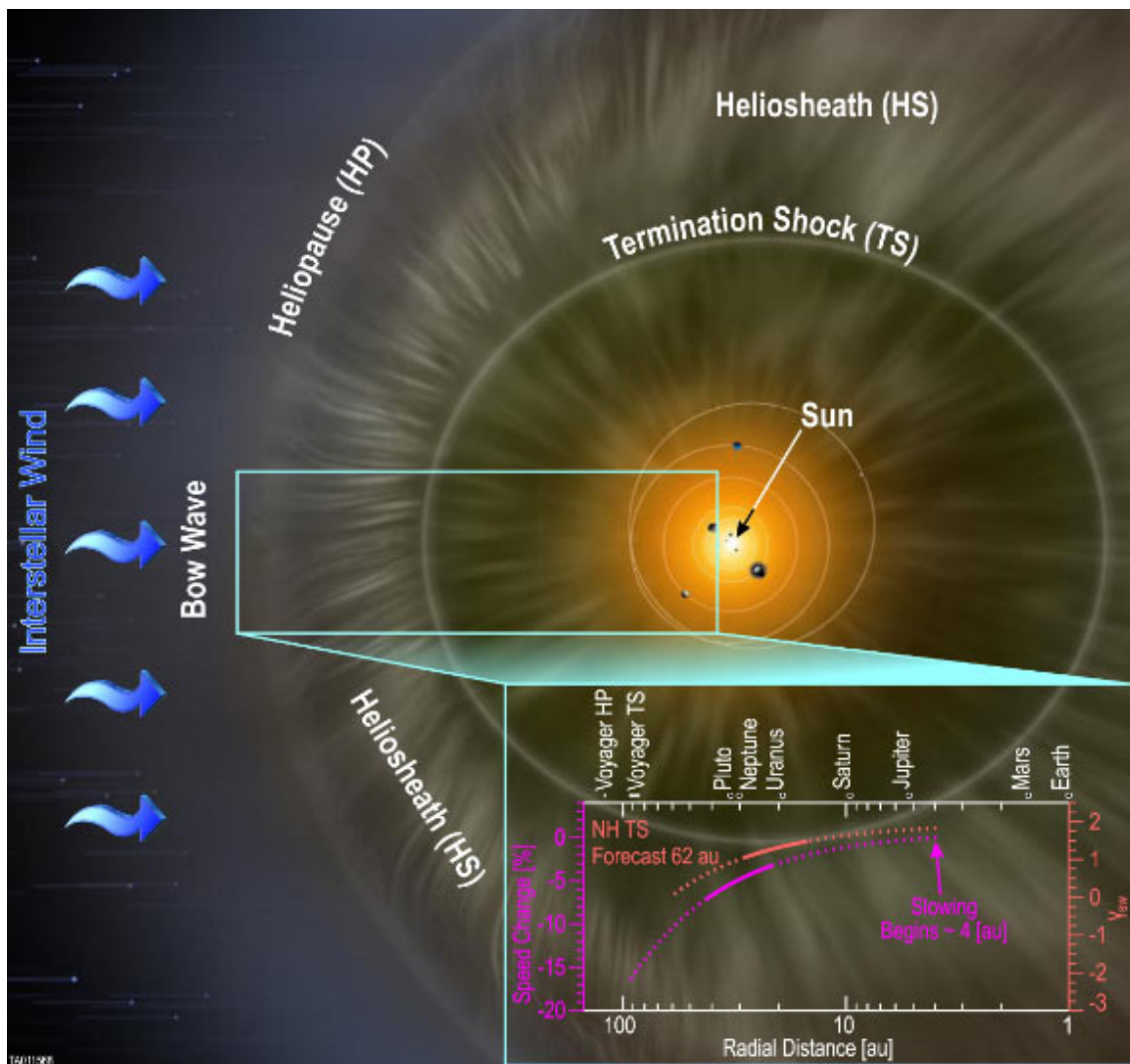


Figura 4.1 - O instrumento SWAP a bordo da sonda da NASA New Horizons confirmou que o vento solar desacelera a medida que desloca-se para longe do Sol. Esse esquema da Heliosfera mostra que o vento solar começa a desacelerar a uma distância radial de aproximadamente 4 AU a partir do Sol e continua diminuindo sua velocidade a medida que desloca-se para o sistema solar exterior e atinge o meio interestelar. Extrapolações atuais revelam que o choque terminal pode ser mais perto que aquele encontrado pela sonda Voyager. Contudo, com o aumento da atividade solar a Heliosfera se expande e empurra o Choque Terminal para mais longe, possivelmente para 84 – 94 AU que foi medido pelo satélite Voyager.

Fonte: Cortesia do Southwest Research Institute; fundo artístico renderizado pela NASA e Adler Planetarium.

5 EFEITOS HELIOSFÉRICOS E MODULAÇÃO SOLAR

Quando detectados na superfície terrestre, por um longo período de tempo, os raios cósmicos apresentam o perfil temporal como mostrado na Figura 6.1, que mostra a série temporal das medidas de nêutrons em Oulu na Finlândia, desde 1964 até 2019.

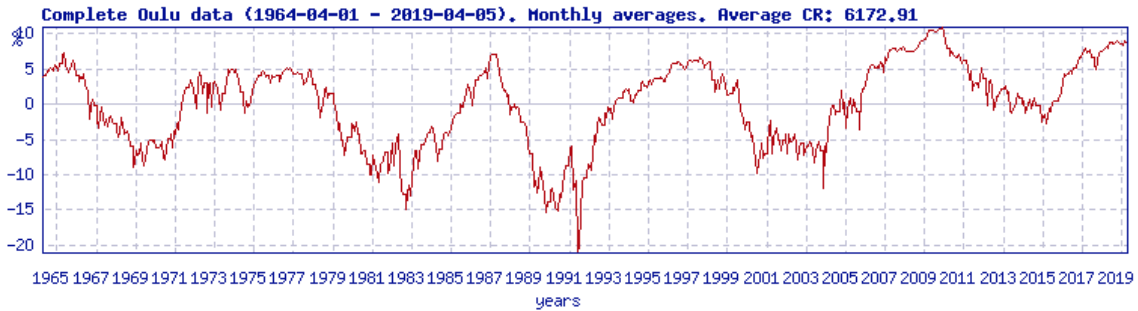


Figura 5.1 - Série temporal das medidas de raios cósmicos feita no observatório de Oulu na Finlândia, desde 1964 até 2019.

Fonte: <http://cosmicrays oulu.fi/>

A Figura 6.1 mostra algumas características interessantes, tais como sua periodicidade entre vales consecutivos, de aproximadamente 11 anos, coincidindo com a periodicidade do ciclo de atividade solar; alternância entre picos pontudos e achatados, num período de aproximadamente 22 anos, coincidindo com o pico magnético solar, dando indícios de que o fluxo de raios cósmicos é modulado pela atividade solar. Uma vez que os raios cósmicos são compostos por átomos completamente ionizados, ou seja, possuem carga elétrica positiva, eles sofrem influência dos campos magnéticos interplanetário, magnetosféricos e geomagnético quando se aproximam da Terra. Esse efeito de modulação diminui com o aumento da energia e torna-se insignificante para partículas com rigidez acima de ~ 10 GV.

Desde 1912 os raios cósmicos têm sido estudados extensivamente; sua composição, espectro de energia, as variações espaciais e temporais são exploradas com grande sofisticação e muitas teorias a respeito de sua origem têm sido propostas. Os raios cósmicos são um dos principais componentes da galáxia. Esta avaliação é baseada no fato de que a densidade de energia dos raios cósmicos em nossa galáxia, aproximadamente $1eV/cm^3$, é da mesma ordem de magnitude da densidade de energia do campo magnético galáctico e do movimento térmico do gás interestelar (MURSULA; USOSKIN, 2003).

Os raios cósmicos são observados e estudados em várias altitudes, em profundas cavernas subterrâneas, em laboratórios no topo de montanhas, com balões em altitudes acima de 40 *km*, com foguetes e com satélites.

6 Plano de Trabalho

- a) Etapa 1: Leitura introdutória da bibliografia e preparação dos dados de raios cósmicos, pressão atmosférica e temperatura atmosférica;
- b) Etapa 2: Realização das correções de pressão e temperatura nos dados de raios cósmicos;
- c) Etapa 3: Preparação dos dados referentes à atividade solar, em particular a série de número de manchas solares. Outros parâmetros do meio interplanetário também serão utilizados, tais como o módulo do campo magnético na órbita da Terra, a densidade numérica, temperatura e velocidade do vento solar;
- d) Etapa 4: Análise de correlação entre as séries temporais, com análise de correlação;
- e) Etapa 5: Análise da forma do pico de incidência de raios cósmicos e comparação com picos observados em séries de nêutrons;
- f) Etapa 6: Redação do relatório final e produção de trabalhos para apresentações em eventos de iniciação científica.

6.1 Etapa 1

A leitura introdutória da bibliografia e preparação dos dados de raios cósmicos, pressão atmosférica e temperatura atmosférica foi realizada, cujo resultado está resumido e compões os capítulos iniciais desse relatório.

6.2 Etapa 2

A realização das correções de pressão e temperatura nos dados de raios cósmicos é realizada nos dados do detector de múons que faz parte da “Global Muon Detector Network” - GMDN, que iniciou a operar em dezembro de 1992, fazendo observações em dois hemisférios, utilizando os detectores instalados em Nagoya, Japão e Hobart, Austrália, os quais possuem áreas de detecção de $36m^2$ e $9m^2$, respectivamente. Cada detector é multidirecional, permitindo medir simultaneamente a intensidade em 30 direções.

Um protótipo de $4m^2$ de área de detecção foi instalado no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE – em São Martinho da Serra, Brasil em março de 2001 para

preencher um buraco na cobertura direcional da rede sobre o Oceano Atlântico e a Europa (mais detalhes ver [Silva et al. \(2004\)](#)). Esses detectores são exatamente iguais, exceto por suas áreas de detecção. O protótipo de São Martinho da Serra foi ampliado em dezembro de 2005 tendo sua área de detecção expandida para $28m^2$, aumentando também o número de canais direcionais, de 9 para 17. A rede de detectores de *muons* tornou-se GMDN (“Global Muon Detector Network”) em Março de 2006 quando foi instalado o quarto detector na Universidade do Kuwait, Kuwait, com uma área de detecção de $9m^2$. Esse detector acrescenta novas direções de visão sobre a África e na parte oeste do Oceano Índico, aumentando a cobertura global da Rede de Detectores de *Muons*. Diferentemente dos outros três detectores, que são cintiladores, o detector de *muons* da Universidade do Kuwait é do tipo *hodoscope*, que consiste de quatro camadas horizontais de 30 tubos contadores proporcionais (*Proportional Counter Tub – PCTs*). Cada PCT é formado por um cilindro de $5m$ de comprimento com 10 cm de diâmetro. Para analisar os dados do detector da Universidade do Kuwait juntamente com os dados dos outros três detectores de diferentes geometrias, é necessária uma conversão dos 529 canais direcionais originais em 13 canais, que serão equivalentes àqueles de Hobart, possuindo a mesma área de detecção ($9m^2$). O número total de canais direcionais disponíveis na GMDN é de 60 a partir de março de 2006. A rigidez média (P_m) dos GCRs observados, calculado utilizando-se a função resposta dos *muons* atmosféricos para as partículas primárias (Murakami et al., 1979), varia de 55 a 114 *GV* e o erro estatístico (σ_c) da taxa de contagens horárias varia entre 0.06 e 0,49%. A Figura 1 mostra um mapa com as direções assintóticas de cada canal direcional da GMDN, onde cada símbolo indica uma direção de visão. A linha sobre cada símbolo representa o espalhamento da direção de visão para partículas com rigidez entre e e $2e$ que representa 80% da energia central de cada canal direcional. Pode-se perceber que a cobertura global da GMDN é completa, apesar de ainda possuírem buracos sobre a América do Norte e na região sul do Oceano Índico.

6.3 Correção dos efeitos atmosféricos nos dados de raios cósmicos

A GMDN foi projetada e construída para medir precisamente os raios cósmicos secundários gerados na atmosfera terrestre, que preservam a direção das partículas primárias que as geraram. Para isso, a altitude da interação do próton primário com a atmosfera da Terra é altamente dependente da pressão e temperatura atmosféricas. Por esse motivo, é necessária a correção do efeito da pressão atmosférica sobre os dados observados por detectores de raios cósmicos de superfície. Esta correção é feita utilizando-se a Equação 6.1:

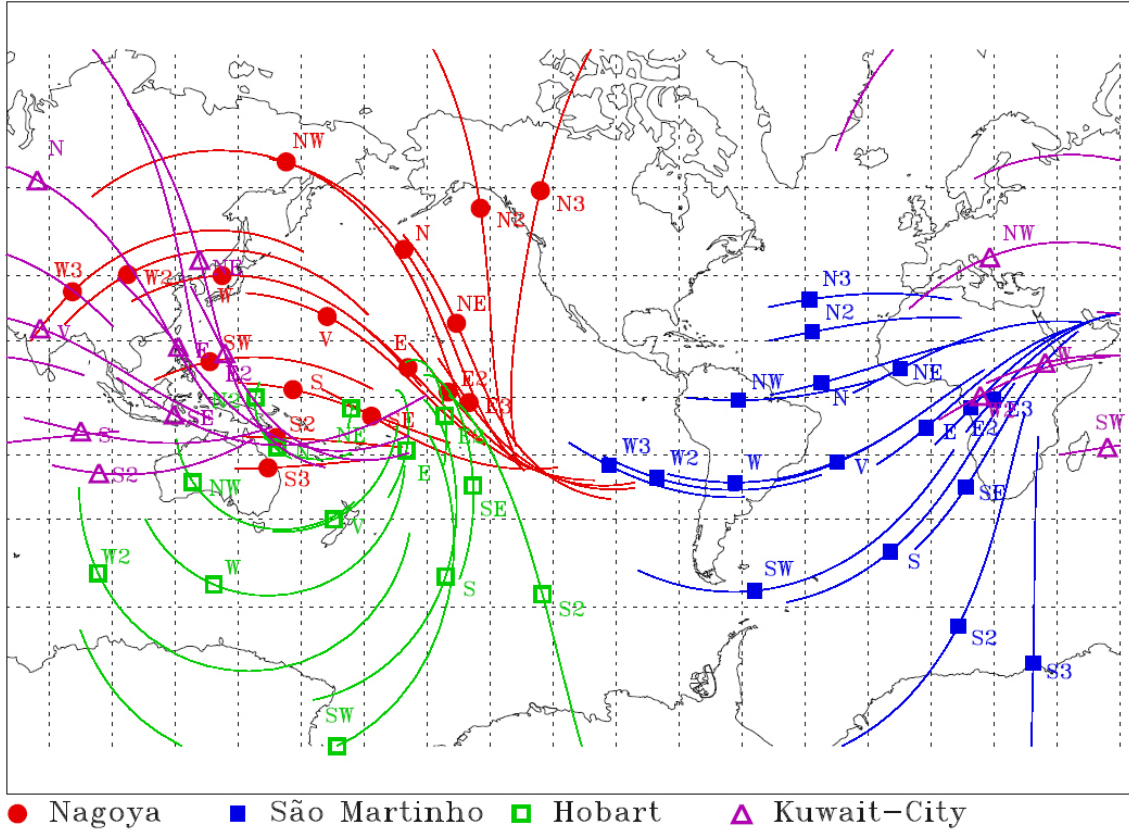


Figura 6.1 - Cobertura global da GMDN através das direções de visão assintóticas dos canais direcionais dos detectores da rede.

$$\frac{\Delta I}{I} = \beta \Delta p \quad (6.1)$$

onde Δp é a variação da pressão atmosférica medida através de um barômetro instalado juntamente com o detector, β são os coeficientes barométricos calculados para cada direção de visão do detector, que é definido a partir de uma correlação linear entre a variação de pressão com a intensidade de *muons* incidentes em cada um dos canais direcionais. Para fins de ilustração, a Figura 6.2 mostra os dados de pressão atmosférica, no painel superior, medida no local onde as contagens de *muons* são feitas, os dados do canal vertical do detector de São Martinho da Serra, no segundo painel, e os dados corrigidos no último painel.

A correção do efeito de temperatura necessita do perfil vertical da temperatura, desde a superfície terrestre até o topo da atmosfera, de hora em hora.

Essa correção não foi executada nesse projeto, assim como as demais etapas do

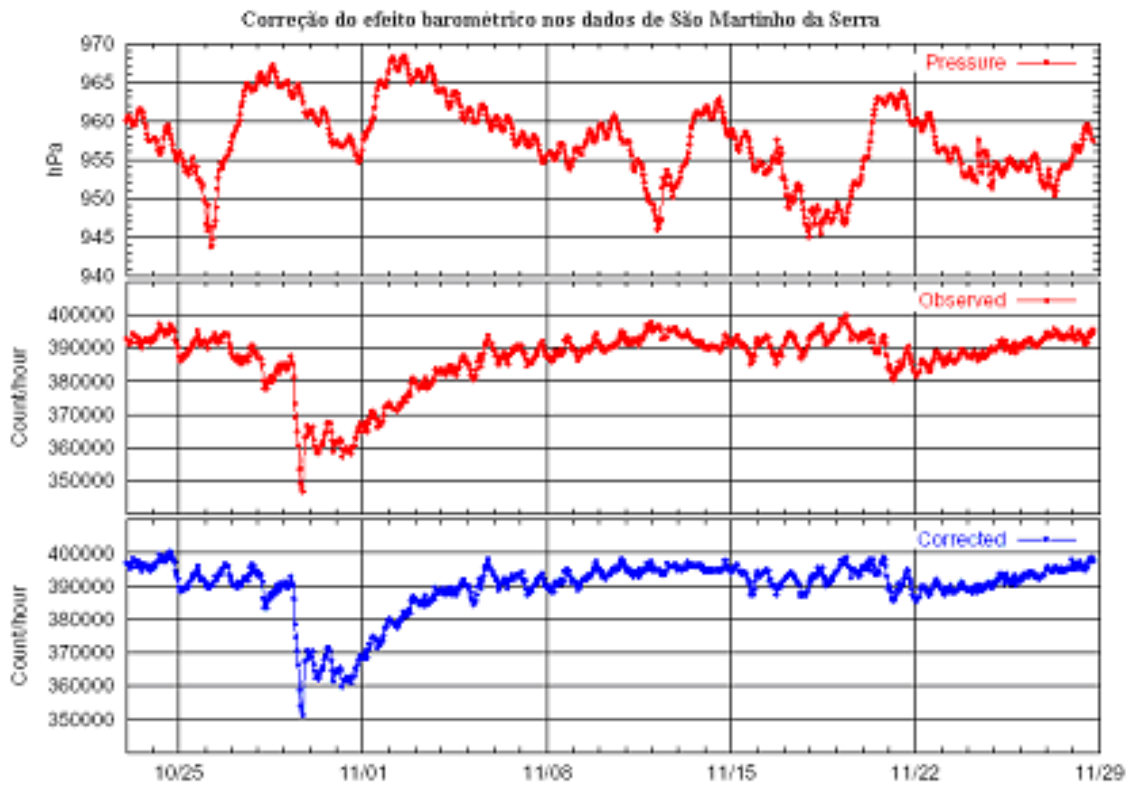


Figura 6.2 - Correção dos dados de *muons* para o efeito de pressão atmosférica.

projeto.

O aluno candidato está sendo solicitado pelo Exército Brasileiro a executar muitas atividades, comprometendo as atividades desenvolvidas no projeto e, por esse motivo, solicitou o desligamento da bolsa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FORBUSH, S. **Cosmic Rays, The Sun and Geomagnetism: The works of Scott E. Forbush.** [S.l.]: James A. Van Allen, Editor, 1993. 8
- JOKIPII, J. Cosmic rays. In: _____. **From the Sun.** [S.l.]: American Geophysics Union - AGU, 1998. p. 123–132. 1
- MURSULA, K.; USOSKIN, I. **Heliospheric Physics and Cosmic Rays, Lectures Notes.** [S.l.]: American Geophysics Union, Washington, DC, 2003. 11
- PARKER, E. Extension of the solar corona into interplanetary space. **Journal of Geophysical Research**, v. 64, n. 13, 1959. 9
- SCHUCH, L. **Introdução ao Estudo dos Raios Cósmicos e sua Interação com a atmosfera Terrestre.** São José dos Campos - SP: [s.n.], 1991. 3
- SILVA, M. D.; CONTREIRA, D.; MONTEIRO, S.; TRIVEDI, N.; MUNAKATA, K.; KUWABARA, T.; SCHUCH, N. Cosmic ray muon observation at southern space observatory - sso (29°s, 53°w). **Astrophysics and Space Science**, v. 290, p. 389–397, 2004. 14

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.