

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

INPE-5243-RPQ/649

**INTRODUÇÃO AO ESTUDO DOS RAIOS CÓSMICOS E SUA
INTERAÇÃO COM A ATMOSFERA TERRESTRE**

Luiz Alexandre Schuch

**INPE
SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
1991**

539.141

SCHUCH, L.A.

Introdução ao estudo dos raios cósmicos e sua interação com a atmosfera terrestre. / L.A. Schuch. -- São José dos Campos: INPE, 1991. 22 p. -- (INPE-5243-RPQ/649)

1. Radiação cósmica. 2. Raios cósmicos e atmosfera. 3. Detecção de raios cósmicos. I. Título.

ABSTRACT

This work presents a broad survey on the origin and composition of cosmic ray, its modulation associated with solar activity, its interaction with the Earth's magnetic field and atmosphere and its energy spectrum at sea level. Special attention is given to detection systems and to the effects of cosmic ray on material and live beings, and specially on man.

RESUMO

Este trabalho procura fornecer uma visão abrangente da origem e da composição dos raios cósmicos, sua modulação relacionada com a atividade solar, sua interação com o campo magnético e com a atmosfera da Terra, e seu espectro de energia ao nível do mar. Atenção especial é dada aos sistemas de detecção e aos efeitos e danos causados pela radiação cósmica sobre os materiais e seres vivos de um modo geral e em particular sobre o homem.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xiii
<u>INTRODUÇÃO</u>	1
<u>CAPÍTULO 1 - ORIGEM DOS RAIOS CÓSMICOS</u>	5
1.1 - Raios Cósmicos Galáticos	5
1.2 - Raios Cósmicos Solares	14
<u>CAPÍTULO 2 - COMPOSIÇÃO DOS RAIOS CÓSMICOS</u>	17
2.1 - Raios Cósmicos Galáticos	17
2.2 - Raios Cósmicos Solares	23
<u>CAPÍTULO 3 - MODULAÇÃO DO FLUXO DE RAIOS CÓSMICOS</u>	29
<u>CAPÍTULO 4 - O CONCEITO DE RIGIDEZ MAGNÉTICA</u>	39
<u>CAPÍTULO 5 - INTERAÇÃO DOS RAIOS CÓSMICOS COM A ATMOSFERA</u> <u>TERRESTRE</u>	43
<u>CAPÍTULO 6 - DETECÇÃO DA RADIAÇÃO CÓSMICA</u>	49
6.1 - Detetores Convencionais	49
6.1.1 - Detetores Baseados na Ionização Gasosa	49
6.1.2 - Detetores Cintiladores	51
6.1.3 - Detetores Semicondutores	55
6.2 - Emulsões Nucleares	58
6.3 - Sistemas Especiais de Detecção	61
6.3.1 - Método de antikoíncidência	61

6.3.2 - Método de Coincidência	61
6.4 - Detetores do Tipo Telescópio	62
6.5 - Detecção de Cascatas de Radiação Cósmica Secundária	67
 <u>CAPÍTULO 7 - ESPECTRO DA RADIAÇÃO CÔSMICA</u>	 75
 <u>CAPÍTULO 8 - EFEITOS DOS RAIOS CÔSMICOS SOBRE ATMOSFERA TERRESTRE</u>	 87
 <u>CAPÍTULO 9 - EFEITOS BIOLÓGICOS CAUSADOS PELOS RAIOS CÔSMICOS</u> ...	 93
 <u>CAPÍTULO 10 - EFEITOS DOS RAIOS CÔSMICOS SOBRE SISTEMAS ESPACIAIS</u>	 103
10.1 - Mal Funcionamento de Detetores	104
10.2 - Alteração da memória	104
10.3 - Falhas nos Sistemas de Controle	105
 CONSIDERAÇÕES FINAIS	 107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	113

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 - (a) De acordo com o modelo de Fermi, partículas de baixas energias emitidas por estrelas ordinárias são <u>acelera</u> das nas velocidades dos raios cósmicos quando colidem com núvens de gases magnetizados em movimento, ou com frentes de choque que se expandem de explosões de <u>su</u> pernovas.	
(b) Uma visão alternativa, onde os raios cósmicos se <u>origi</u> nam de um pequeno número de objetos exóticos capazes de acelerar patículas até altas energias	9
1.2 - Pensa-se que os raios gama de Cygnus X-3 sejam produzidos pela colisão de prótons de altas energias, provenientes da estrela de nêutrons, com núcleos de gás da <u>compa</u> nheira. O pñon neutro decai em dois raios gama altamente energéticos	11
1.3 - Cascatas de raios cósmicos secundários, produzidos por raios gama de energia muito alta (10^{12} eV) e por raios gama de energia ultra-alta (10^{15} eV)	13
2.1 - Abundância universal dos elementos químicos na natureza, relação ao silício = 10^6 . Estes resultados foram obtidos estudo de meteoritos, do Sol e de outras estrelas	18
2.2 - Abundâncias de elementos no sistema solar e dos constituin <u>tes</u> dos raios cósmicos de altas energias. O lítio, o ber <u>l</u> lío e o boro são mais abundantes nos raios cósmicos, por um fator da ordem de 10^6	19
2.3 - O fluxo de prótons solares, determinado a partir de dados lunares, é muito maior do que o fluxo de prótons de GCR, para diferentes níveis de modulações. ($\phi=0$ refere-se à <u>au</u> sência de modulação e $\phi = 900$ é típico do fluxo durante o máximo solar)	24

	<u>Pág.</u>
2.4 - Número de Zürich de manchas solares (curva sólida contínua) e diferentes fluxos integrais de prótons, acima de 10 e 30 MeV, emitidos por erupções solares de 1954 a 1976. Para as erupções que ocorrem muito próximas uma das outras, as fluências foram combinadas	25
3.1 - Componentes (estacionária, de lenta variação e transiente) da emissão solar para um certo comprimento de onda λ . As intensidades relativas destas componentes são dependentes do comprimento de onda	29
3.2 - Número médio anual de manchas solares de 1610 a 1975	31
3.3 - Grupo dipolar de manchas solares que mostram a mancha guia, à direita, e a mancha seguidora. O padrão de granulação do background é também visível	32
3.4 - Diagrama típico (forma de borboleta) que mostra a variação na distribuição de manchas solares com o tempo. Durante o ciclo de manchas solares, a distribuição desloca-se para o equador solar	33
3.5 - Espectro diferencial de prótons galácticos primários próximo ao mínimo de atividade solar (1965) e máximo de atividade solar (1969)	35
3.6 - Modelos para o crescimento do campo magnético interplanetário que produz o decréscimo de Forbush no fluxo de raios cósmicos na Terra	36
4.1 - A variação Leste-Oeste da rigidez geomagnética de corte em função da latitude geomagnética é comparada com a rigidez efetiva de corte para um detetor isotrópico	41
5.1 - Relação geral e parcela de energia carregada pelas partículas de raios cósmicos secundários produzidos na atmosfera da Terra	47
6.1 - Detetor baseado na ionização gasosa	50
6.2 - Tubo fotomultiplicador	52
6.3 - Diagrama esquemático de um detetor de cintilação	53
6.4 - Diagrama esquemático de um diodo semicondutor	56
6.5 - Detetor de silício	57
6.6 - Detetor de silício com a camada n reduzida	58

	<u>Pág.</u>
6.7 - Traços em emulsões nucleares deixados por núcleos relativísticos com $Z = 1$ a $Z = 26$, obtidos a partir de vãos balões a grandes altitudes e por exposições em satélites. Estes traços, correspondentes a partículas primárias, mostram menos de 0,5 mm de percurso. Supõe-se que a perda de energia por ionização, que leva à ativação dos grãos de brometo de prata na emulsão, é $\propto$ a Z^2 . Quando esta dependência não puder ser estabelecida pelo exame minucioso dos traços, sabe-se que o escurecimento aumenta mais rapidamente do que $\propto$ a Z	60
6.8 - Esquema simplificado de telescópios constituídos de detetores cintiladores e Geiger Müller (GM)	63
6.9 - Visão do telescópio de raios gama da Universidade de New Hampshire	65
6.10 - Esquema simplificado do telescópio Compton do Instituto Max-Planck	66
6.11 - Telescópio de luz Cerenkov usado no Observatório "Fred Lawrence Whipple", no Arizona. Consiste num refletor de 10 m de diâmetro, com 248 espelhos que focalizam a luz num arranjo hexagonal de 37 fototubos	69
6.12 - Mapa da luz Cerenkov, de uma cascata de raios cósmicos secundários, produzido pelo refletor de 10 m do Observatório "Fred Lawrence Whipple". Os círculos representam os fototubos. Os números são proporcionais à intensidade da luz registrada por cada fototubo. As linhas são contornos de intensidade. A partir do mapa, o eixo da cascata e a direção de chegada dos raios cósmicos podem ser calculados. Neste caso, o eixo da cascata é paralelo ao eixo do detetor e distanciado dele em direção ao lado esquerdo inferior	70
6.13 - Vista plana do arranjo de detetores LEDA. Dezenove contadores cintiladores são dispostos numa matriz hexagonal, afastados 43m entre si. A cabana de instrumentação eletrônica é colocada no centro do arranjo	71

	<u>Pág.</u>
7.1 - Profundidade atmosférica em g/cm ² em função da altitude em km	77
7.2 - Medida do espectro primário de prótons de raios cósmicos, obtido no período de 28 de junho a 4 de agosto de 1965 ...	78
7.3 - Componente vertical do fluxo de núcleons (prótons e nêutrons) de raios cósmicos secundários ao nível do mar ..	80
7.4 - Componente vertical do fluxo de pñons de raios cósmi secundários ao nível do mar	81
7.5 - Componente vertical do fluxo de mñons de raios cósmicos se cundários ao nível do mar	82
7.6 - Perfil de ionização atmosférico de raios cósmicos a uma la titude geomagnética de 55°	83
7.7 - Perfis de ionização atmosférica dos diferentes componentes dos raios cósmicos secundários para latitude geomagnética de 55°	84
7.8 - Taxa total de ionização de raios cósmicos a duas profundi dades na atmosfera, referenciada no ar a 24° C e 74 cm de Hg. O número médio de manchas solares até 1971 é forne cido	85
8.1 - Modo de decaimento de nêutrons de albedo de raios cósmi cos, para a produção da zona interna do cinturão de radia ção. Um próton incidente sofre uma colisão com a atmosfera da Terra, produzindo um nêutron que ao se afastar da Terra decai produzindo elétron e próton	91
9.1 - Fluxo de prótons de uma erupção solar típica e de raios cósmicos galáticos, durante um período de mínima atividade solar	93
9.2 - Contribuição das diversas radiações do background para a radiação recebida por um ser humano normal	98

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1 - Energias e Fluxos médios para os dois tipos de partículas de raios cósmicos	2
2.1 - Composição média, relativa ao oxigênio, dos raios cósmicos observada a 1 AU	20
2.2 - Abundância da componente anômala dos raios cósmicos galácticos em relação ao carbono	22
2.3 - Abundâncias médias, relativas ao oxigênio, de partículas energéticas no meio interplanetário	27
5.1 - Radionuclídeos produzidos por raios cósmicos frequentemente medidos em material terrestre ou extraterrestre	44
6.1 - Distribuição de energia para cascatas produzidas por prótons de energias ultra-altas ($\times 10^{15}$ eV)	72
6.2 - Cascatas induzidas por fótons com $\theta = 30^\circ$ e a 2,5 km acima do nível do mar	73
7.1 - Medidas da composição relativa de prótons núcleos de He e núcleos pertencentes aos grupos M, H e VH, na faixa de energias de $2,5 \times 10^{12}$ a 10×10^{12} eV, feitas pelo sistema de detecção "SOKOL"	79
9.1 - Fontes de irradiação de background	95
9.2 - valores de EBR	96
9.3 - Doses equivalentes de radiações devidas aos raios cósmicos em locais de altitudes elevadas	97

INTRODUÇÃO

Existem duas componentes de raios cósmicos, a galáctica e a solar. Os raios cósmicos galácticos(GCR) são provenientes de fora do sistema solar e os raios cósmicos solares(SCR) são emitidos irregularmente pelas erupções solares. Os GCR são modulados pela mudança contínua da atividade solar. O descobrimento dos raios cósmicos pelo físico Australiano Victor F. Hess, em 1912, deu-se através de um histórico voo de balão que levava a bordo instrumentos de medidas. Subsequentemente Scott E. Forbush identificou três aspectos na variação temporal da intensidade dos raios cósmicos: periodicidade de 27 dias devido à rotação do Sol, o decréscimo característico relacionado com as erupções solares, chamado posteriormente de decréscimo de Forbush e a variação temporal de longa escala, negativamente correlacionada com a atividade solar, representada pelo número de manchas solares R. Todas estas variações significativas, juntamente com a variação diária da intensidade dos raios cósmicos (um efeito menor que 0,5% proveniente da rotação da Terra), têm demonstrado claramente a interação do Sol com o meio interplanetário.

As partículas dos GCR possuem maiores energias mas menores fluxos, enquanto as partículas dos SCR possuem menores energias mas maiores fluxos, de acordo com a Tabela 1. A energia e a carga de uma partícula controla o mecanismo que dominará a sua interação com a matéria, isto é, por reação nuclear ou por perda de energia por ionização, por excitação e por outros processos como "bremsstrahlung". As partículas dos SCR e os núcleos muito pesados ($Z \geq 20$) dos GCR são freados nos primeiros centímetros de matéria sólida, em consequência da alta densidade de interações. As partículas mais leves dos GCR são muito mais penetrantes e tipicamente induzem reações nucleares. As reações nucleares produzem uma variedade de radionuclídeos e nuclídeos estáveis que podem ser detetados e identificados como tendo sido produzidos por partículas de raios cósmicos. Os caminhos percorridos por núcleos individuais com $Z \geq 20$, com energia suficiente, causam danos nos materiais que podem ser

registrados por processos químicos e tornam-se visíveis pelos traços de seus percursos.

TABELA 1 - ENERGIAS E FLUXOS MÉDIOS PARA OS DOIS TIPOS DE PARTÍCULAS DE RAIOS CÔSMICOS.

Radiação	Energias (MeV núcleon ⁻¹)	Fluxo médio (Part.cm ⁻² s ⁻¹)
<u>Raios cósmicos solares</u>		
Prótons e núcleos de He	5-100	~ 100
Grupo do Fe, núcleos+pesados	1-50	~ 1
<u>Raios cósmicos galáticos</u>		
Prótons e núcleos de He	100-3000	3
Grupo do Fe, núcleos+pesados	100	0,03

FONTE: Reedy et al. (1983).

Os registros de interações de raios cósmicos têm sido estudados em amostras terrestres e em meteoritos, poeira cósmica e amostras lunares. Exemplos de matéria analisada são sedimentos de oceanos, pedras lunares e anéis de madeira das árvores, entre outros. Radionuclídeos de várias meias-vidas permitem o estudo de períodos específicos de tempo. Nuclídeos traços radioativos e estáveis estendem este estudo ao passado, incluindo registros que foram produzidos pouco depois da formação do sistema solar. Estes registros podem ser usados tanto para estudar a história dos alvos atingidos pelos raios cósmicos como também para determinar a natureza e a intensidade dos raios cósmicos no passado.

Desde que GCR permanecem no disco galáctico por cerca de 20 milhões de anos, eles podem carregar informações acerca da atividade de nucleossíntese recente na galáxia. Por outro lado, os SCR, originados na corona solar, cuja composição provavelmente tem permanecido estável por muitos bilhões de anos, fornecem informações a respeito da origem do sistema solar.

CAPÍTULO 1

ORIGEM DOS RAIOS CÓSMICOS

1.1 - RAIOS CÓSMICOS GALÁTICOS

Poucas questões têm desafiado tão intensamente os astrofísicos como a origem da radiação cósmica. Suas propriedades têm sido reveladas gradualmente desde 1912, quando Victor F. Hess demonstrou sua existência. Consiste primeiramente em núcleos atômicos, despojados de elétrons, que se movem com velocidades próximas à da luz. Muitos dos avanços da Astronomia ocorreram a partir da análise detalhada de fontes de raios X e de rádio, pois, até recentemente, as fontes de raios cósmicos eram um assunto de grande especulação. Eles parecem vir de toda a parte, atingindo a Terra de todas as direções, a uma taxa uniforme.

Finalmente, com o estudo de Cygnus X-3, o terceiro mais brilhante emissor de raios X da constelação de Cygnus, este panorama começou a mudar. Este emissor foi primeiro observado por raios X no final de 1960 e ganhou notoriedade em 1972, quando passou por uma explosão violenta na qual a intensidade de suas emissões de rádio aumentaram cerca de mil vezes. Recentemente, observou-se que ele era uma fonte de raios gama de alta energia. São os raios gama que têm identificado o Cygnus X-3 como uma fonte de radiação cósmica: eles podem ter sido produzidos somente por partículas carregadas movendo-se próximas à velocidade da luz.

Não existe ainda um consenso de como tais partículas são aceleradas a tais velocidades. Muitos modelos do processo de aceleração foram propostos. Muitos concordam que o Cygnus X-3 é um sistema de estrelas binárias afastadas, ao menos, 37.000 anos-luz da Terra. Não pode ser observado dentro do visível mesmo com o maior telescópio, porque as nuvens de poeira nos braços espirais da galáxia o obscurece.

Qualquer fonte de radiação cósmica deve ser um poderoso acelerador de partículas para possibilitar a enorme energia dos raios cósmicos individuais. Os mais energéticos deles possuem energias maiores que 10^{20} eV. O outro extremo do espectro de energia dos raios cósmicos galácticos é definido de uma forma mais arbitrária: qualquer partícula com energia maior que 10^8 eV que chegue do espaço é considerada raio cósmico. A definição engloba não somente partículas mas também fótons de raios gama. Menos que 0,1% dos raios cósmicos são raios gama. O restante é constituído de partículas. Os raios cósmicos tanto podem ser provenientes de objetos de composição típica como podem se originar de um grande número de objetos bem diferentes, que, juntos, produzem uma mistura de elementos.

Outras observações excluem a possibilidade de que a radiação cósmica que hoje bombardea a Terra possa ser o resultado de um simples evento catastrófico ocorrido num local específico, tal como uma explosão solar ou a explosão de uma supernova próxima. Primeiro, um exame dos traços de ionização deixados em meteoritos por partículas carregadas de raios cósmicos sugere que a densidade dos raios cósmicos no sistema solar tem permanecido aproximadamente constante nos últimos bilhões de anos. Os traços de ionização são visíveis como um defeito na estrutura cristalina do meteorito. O número deles, juntamente com a idade do meteorito (que é calculada por datação utilizando radioisótopos), fornece a taxa média na qual o meteorito tem sido atingido por raios cósmicos. Segundo, a densidade de raios cósmicos no sistema solar parece ser típica em toda a galáxia. A evidência para esta conclusão é indireta: provém da observação, através da galáxia, de emissores síncrotron em comprimentos de ondas de rádio. Radiação síncrotron, que possui uma polarização característica, é gerada primeiramente por elétrons relativísticos que se movem num campo magnético. Um elétron relativístico no espaço é considerado um raio cósmico. Pela suposição de que elétrons e outras partículas de raios cósmicos estão presentes nas regiões de emissão síncrotron nas mesmas

proporções observadas próxima à Terra, pode-se estimar a densidade geral de raios cósmicos em distantes partes da galáxia.

Sabendo-se quanto tempo uma partícula de alta energia viaja no espaço antes de colidir com núcleos de gás interestelar, pode-se calcular a taxa na qual a galáxia precisa estar produzindo raios cósmicos de forma a manter a densidade observada. Estimativas do tempo de vida dos raios cósmicos estão baseadas no exame detalhado da composição da radiação. Embora esta composição da radiação seja similar à composição da galáxia como um todo, os elementos leves tais como lítio, berílio e boro estão presentes na radiação cósmica galáctica em níveis mais elevados. Estes elementos não devem ter sido produzidos por reações de fusão nas estrelas. Eles certamente resultam da fragmentação de elementos pesados que colidem com átomos de gases estacionários no espaço interestelar. De sua abundância relativa na radiação cósmica e de uma estimativa da densidade do gás interestelar, pode-se calcular o tempo médio em que os raios cósmicos estão no espaço: cerca de 20 milhões de anos.

Historicamente existem duas grandes escolas de pensamento sobre a origem da radiação cósmica. A primeira, originalmente posta em evidência pelo físico Enrico Fermi, considerava que núcleos de raios cósmicos eram injetados no espaço com energias comparativamente baixas e acelerados a altas velocidades através de colisões com núvens de gás magnetizadas, frentes de choques devido a explosões de supernovas ou outros grandes e energéticos acontecimentos no meio estelar. Núcleos de baixa energia são emitidos por estrelas ordinárias. De acordo com o modelo de Fermi, tais núcleos podem adquirir energias de raios cósmicos passo a passo, num longo caminho randômico através do espaço. A trinta anos atrás, este modelo de aceleração distribuída era grandemente favorecido porque evitava a necessidade de postular a existência de objetos exóticos ainda não descobertos, capazes de fornecer velocidades relativísticas às partículas de uma só vez.

Atualmente, o modelo de Fermi deixou de ser aceito. Cálculos detalhados têm mostrado que as energias dos núcleos poderiam provavelmente crescer em sua jornada através do espaço interestelar até chegar às energias dos raios cósmicos observados. Entretanto, desde que Fermi primeiramente propôs o modelo, observações destes objetos exóticos e extremamente energéticos têm se tornado comuns em Astronomia. Ninguém em 1950 poderia prever o descobrimento dos "pulsars": estrelas de nêutrons densas, que giram rapidamente, com campos magnéticos trilhões de vezes maior que o campo magnético da Terra. Assim, muitos pesquisadores aderiram à segunda escola de pensamento: a noção de que os raios cósmicos recebem toda a sua energia de fontes discretas, com o espaço interestelar agindo somente como meio difusivo. Muitos tipos de fontes têm sido propostas, incluindo "pulsars", explosões de supernovas e estrelas T Tauri (estrelas jovens e variáveis onde algumas vezes ocorrem rápidos aumentos em seu brilho). Alguns destes objetos são numerosos o suficiente para justificar a energia total contida na radiação cósmica. Eles parecem, entretanto, ser incapazes de produzir todo o espectro de energia. Uma ilustração esquemática destes modelos pode ser vista na Figura 1.1.

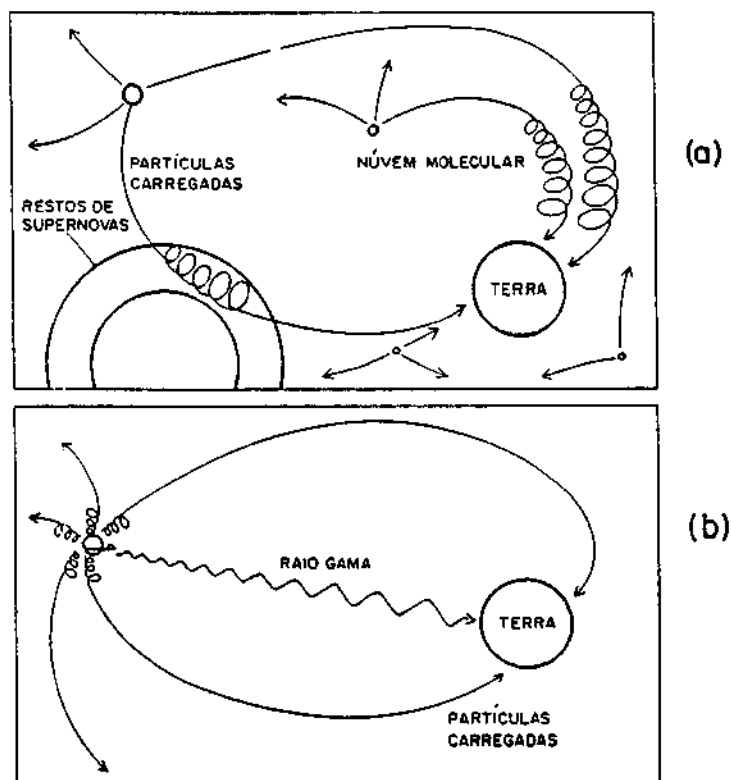


Fig. 1.1 - (a) De acordo com o modelo de Fermi, partículas de baixas energias emitidas por estrelas ordinárias são aceleradas nas velocidades dos raios cósmicos quando colidem com núvens de gases magnetizados em movimento, ou com frentes de choque que se expandem de explosões de supernovas.

(b) Uma visão alternativa, onde os raios cósmicos se originam de um pequeno número de objetos exóticos capazes de acelerar partículas até altas energias.

FONTE: Mackeown e Weeks (1985).

Alguns pesquisadores têm argumentado que os raios cósmicos, ou ao menos os mais energéticos, provêm de fora de nossa galáxia. Emissão síncrotron de outras galáxias mostram que elas também contêm raios cósmicos. Um número relativamente pequeno de galáxias possuem núcleos violentamente ativos, algumas das quais expõem partículas em jatos relativísticos. "Quasars" são considerados

exemplos extremos de tais "galáxias ativas". Um núcleo de galáxia ativo pode de modo concebível acelerar partículas às energias além das alcançadas por partículas originadas de uma estrela individual ou binária, de nossa própria galáxia.

Os núcleos de raios cósmicos chegam à Terra de todas as direções, a uma taxa quase-constante, não porque as fontes estão em todos os lugares, mas porque as trajetórias das partículas são misturadas devido ao campo magnético galático. Desde que os núcleos são eletricamente carregados, eles não viajam em linhas retas através do espaço interestelar. Ao contrário, são constrangidos a espiralar ao longo das linhas do campo magnético. Sobre isto pouco é conhecido, além do fato de seu movimento ser desordenado e caótico. Quando as partículas atingem a Terra, após 20 milhões de anos de viagem pela galáxia, seus caminhos são necessariamente aleatórios, atingindo a Terra isotropicamente.

De forma a identificar uma fonte, deve-se estudar os componentes da radiação cósmica que são relativamente pouco afetados pelos campos magnéticos. Os candidatos óbvios são partículas eletricamente neutras. Os nêutrons podem ser excluídos, porque sofreriam decaimentos muito antes de atingirem a Terra. Neutrinos seriam mais promissores, sendo gerados em reações nucleares que ocorrem na fonte de raios cósmicos, podem penetrar obstáculos sem serem absorvidos. Infelizmente, esta mesma propriedade faz dos neutrinos partículas muito difíceis de serem detetadas. O caminho seguido por muitos pesquisadores, e que deu frutos com a detecção confirmada da radiação cósmica de Cygnus X-3, é observar os fótons de raios gama, que da mesma forma que os nêutrons e neutrinos são eletricamente neutros. Assim, raios gama de altas energias são produzidos somente por partículas relativísticas, de acordo com a Figura 1.2. Raios gama são assim uma efetiva sonda de fontes de radiação cósmica, mesmo que sejam menos que 0,1% do seu fluxo total. Além disto, em muitos comprimentos de onda, eles interagem muito pouco

com o gás interestelar de forma a chegarem no sistema solar virtualmente sem atenuações.

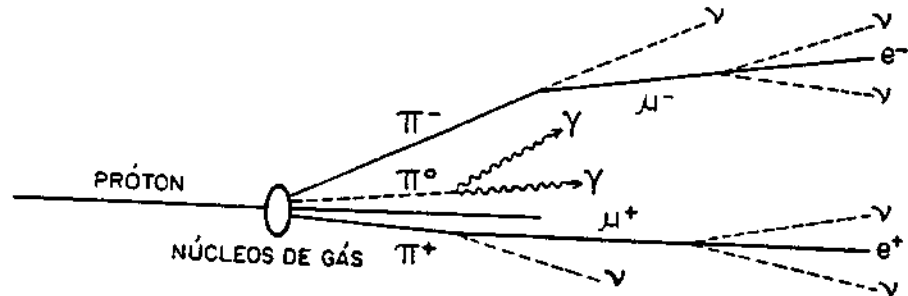


Fig. 1.2 - Pensa-se que os raios gama de Cygnus X-3 sejam produzidos pela colisão de prótons de altas energias, provenientes da estrela de nêutrons, com núcleos de gás da estrela companheira. O píon neutro decai em dois raios gama altamente energéticos.

FONTE: Mackeown e Weeks (1985).

Estes raios gama cósmicos entretanto não alcançam a superfície da Terra. Antes de penetrarem uma quadragésima parte da atmosfera densa, eles interagem com núcleos do gás atmosférico. Assim, eles somente podem ser detetados diretamente por instrumentos transportados acima da atmosfera. Porém, instrumentos em satélites estão limitados em tamanho e não podem detetar fluxos menores do que um fóton por metro quadrado por mês. O fluxo de raios gama com energias maiores do que 10^{12} eV está abaixo deste limite e não pode ser detetado diretamente. Felizmente, estes raios gama podem ser estudados indiretamente a partir do solo porque eles iniciam cascatas observáveis de partículas secundárias e fótons na atmosfera. Uma cascata inicia quando um raio gama cósmico interage com o campo elétrico do núcleo do gás na atmosfera superior, tipicamente a uma altitude de 20 km. A energia do raio gama é convertida em matéria: é formado um par elétron-pósitron, onde cada partícula carrega energia em torno da metade da energia do raio gama original. Após uma certa distância, cada uma das duas partículas rápidas são defletidas nos campos elétricos dos núcleos do gás e parte de suas energias são irradiadas como fóton de raios gama de "bremsstrahlung". Os raios gama

secundários então produzem mais pares elétron-pósitron. Desta forma, a energia do raio gama primário é dividida em um número geometricamente crescente de partículas e fótons. A cascata esgota-se quando a energia dos fótons individuais é tão pequena que outros processos de absorção competem com "bremsstrahlung" e produção de pares, como o espalhamento Compton e a absorção fotoelétrica.

Se o raio gama primário é um fóton de energia ultra-alta (10^{14} eV ou mais), a cascata pode atingir o solo e consistir em milhares de partículas e raios gama espalhados em centenas de metros quadrados. Elas podem ser detetadas por uma formação ou arranjo de contadores Geiger ou cintiladores. Quando a direção do raio gama primário é vertical, as partículas secundárias atingem simultaneamente todos os detetores do arranjo. Se o raio gama atinge a atmosfera com certo ângulo, sua direção de chegada pode ser deduzida pelas pequenas diferenças, tipicamente de um milionésimo de segundo, no tempo de chegada das partículas nos diferentes detetores. A energia do raio gama primário pode ser estimada pelo número de partículas que atingem os detetores.

A cascata produzida em decorrência de raios gama de energia muito-alta (entre 10^{11} a 10^{14} eV) não atinge a superfície da Terra. Antes, as partículas são absorvidas na atmosfera mas os flashes de luz visíveis produzidos podem ser detetados do solo. Esta luz, chamada radiação Cerenkov, é gerada quando uma partícula se move através de um meio com velocidade maior que a da luz no respectivo meio. É emitida por elétrons do próprio meio, que são perturbados pela passagem da partícula. Como a luz está na faixa visível, ela é fracamente atenuada pela atmosfera. Em noites sem lua, flashes de luz Cerenkov podem ser detetados com um sistema simples e barato que consiste em um espelho que focaliza a luz em um tubo fotomultiplicador. Um esquema simplificado dos dois tipos de cascatas é apresentado na Figura 1.3.

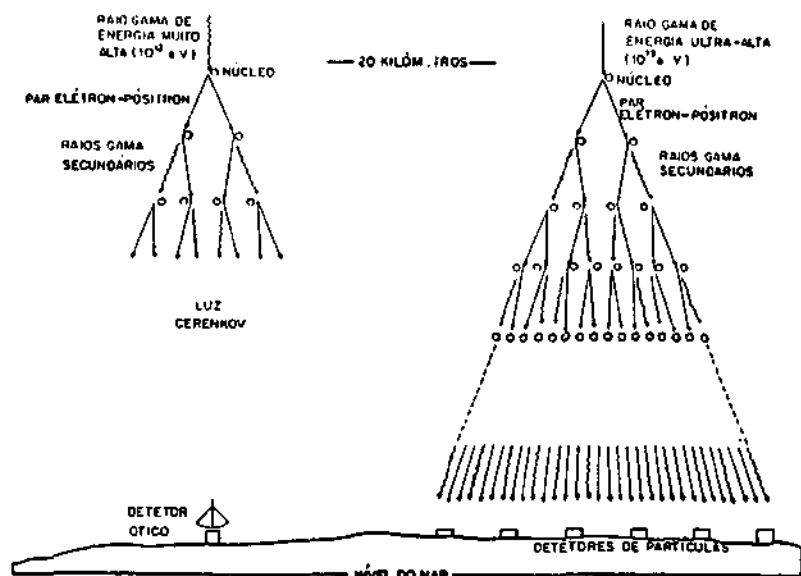


Fig. 1.3 - Cascatas de raios cósmicos secundários, produzidos por raios gama de energia muito alta (10^{12} eV) e por raios gama de energia ultra-alta (10^{15} eV).

FONTE: Mackeown e Weeks (1985).

Dispositivos mais elaborados consistem em muitos espelhos reunidos num prato. A luz é focalizada num conjunto de fototubos. Tais dispositivos, além de detetar a luz Cerenkov, também mapeiam sua intensidade. A direção de chegada do raio gama cósmico, que corresponde grosseiramente ao eixo do disco de luz Cerenkov, pode então ser determinada dentro de menos de um quarto de grau de arco. Em contraste, a resolução do arranjo de detetores de partículas é somente cerca de um grau de arco. Como os detetores de partículas podem ser usados 24 horas por dia e não somente em noites escuras, eles são o principal método de detecção indireta dos raios cósmicos com energias de 10^{15} eV ou mais.

Os dois dispositivos utilizados para estudar as cascatas possuem uma séria deficiência, pois não permitem afirmar que uma cascata foi iniciada por raios gama. Partículas carregadas dos raios cósmicos interagindo com núcleos da atmosfera também produzem cascatas similares às causadas pelos raios gama. Além disto, como um

resultado da influência do campo magnético galáctico, o fluxo de raios cósmicos carregados é essencialmente igual em todas as direções. Observa-se, entretanto, que uma fonte de raios gama cósmicos pode revelar-se por uma anisotropia direcional: um excesso de cascata vindo de uma direção particular. A anisotropia deve necessariamente ser instantânea, porque as partículas de raios cósmicos produzem milhares de vezes mais cascatas do que as produzidas por raios gama. Esta é uma das razões da necessidade de anos de coleta e análise de dados para identificar uma fonte de raios cósmicos.

1.2 - RAIOS CÓSMICOS SOLARES

O vento solar emitido pelo Sol é constituído principalmente de prótons, elétrons e partículas alfa que são evaporados pela corona solar. A gravidade solar é incapaz de retê-los e, assim, resulta um vento solar contínuo. A densidade diminui com o aumento da distância do Sol. A unidade característica de distância do sistema solar, a distância Sol-Terra, chamada unidade astronômica AU, corresponde a 150 milhões de quilômetros. Para comparação, a distância à estrela mais próxima é 4,3 anos-luz, que corresponde a 3×10^5 AU, enquanto o sistema solar inteiro possui um raio de 40 AU. A densidade do vento solar próximo à Terra (1 AU) é geralmente de 5 a 10 partículas cm^{-3} . Entretanto, em certas ocasiões, este número pode alcançar até 1000 átomos cm^{-3} . Isto acontece quando erupções solares ocorrem na atmosfera do Sol.

A fonte de partículas energéticas solares é geralmente uma erupção solar. Existe uma correlação de tempo entre a observação do aumento do fluxo de partículas no espaço interplanetário e a ocorrência da erupção solar. Existe uma correspondência entre o nível de atividade solar (o número de erupções) e o fluxo de partículas solares de baixa energia no espaço interplanetário. Algumas erupções produzem mais partículas energéticas do que outras. As geradoras mais abundantes geralmente são erupções solares ricas em raios X e emissões

de rádio de alta frequência (particularmente em comprimentos de onda de centímetros e milímetros).

Muitas das partículas aceleradas até altas energias, na erupção solar, escapam da corona solar para o meio interplanetário. À medida que se movem são guiadas ao longo do campo magnético espiral produzido pelo Sol. Como resultado, tanto a intensidade quanto o espectro observado na Terra dependem de alguma forma da posição relativa da Terra e da erupção no Sol. A maioria das erupções solares ocorrem de uma forma randômica, com uma frequência que varia de, aproximadamente, um evento a cada dois meses para um evento a cada dois anos. Consistem principalmente em fluxos de prótons e elétrons energéticos, bem como num pequeno e, aparentemente, variável fluxo de elementos mais pesados. A frequência dos eventos de emissão de partículas solares é correlacionada com o ciclo de atividade solar, havendo, entretanto, uma grande variância nesta distribuição. Eventos significativos têm ocorrido durante o mínimo solar enquanto pode haver períodos longos entre eventos significativos, durante o máximo de atividade solar.

A capacidade de prever uma erupção solar pode auxiliar a compreensão do processo que controla tal fenômeno. Os prótons solares são acelerados nas regiões ativas do Sol durante os eventos de erupções solares. As emissões de raios X, rádio e ótica durante as erupções solares fornecem uma indicação de que a aceleração da partícula está ocorrendo. Depois que as partículas energéticas são liberadas das regiões de aceleração, elas viajam através da corona solar e algumas se propagam ao longo do campo magnético interplanetário em direção à Terra.

CAPÍTULO 2

COMPOSIÇÃO DOS RAIOS CÔSMICOS

Partículas energéticas solares e galáticas constituem duas populações de partículas de alta energia originadas de diferentes fontes. As partículas energéticas solares são originadas na coroa, que possui uma composição provavelmente constante por muitos bilhões de anos. Os raios cósmicos galáticos permanecem em nossa galáxia por cerca de 20 milhões de anos e, conseqüentemente, podem carregar informações sobre recentes atividades de nucleossíntese em nossa galáxia.

A composição destes dois tipos de partículas é determinada por métodos diferentes. A composição de partículas solares é determinada pela medida de fluxos durante eventos randômicos de emissão de partículas, que podem variar drasticamente de evento para evento. Já a composição de raios cósmicos galáticos requerem observações básicas seguidas por estudos das mudanças que ocorrem durante o espalhamento das partículas no gás interestelar.

2.1 - RAIOS CÔSMICOS GALÁTICOS

A composição da radiação cósmica observada na órbita da Terra consiste em aproximadamente 83% de prótons, 13% de partículas alfa, 1% de núcleos com $Z > 2$ e 3% de elétrons e pósitrons. Esta composição se estende num intervalo de energia de poucas centenas de MeV para energias maiores de 10^{20} eV. Não existe fontes planetárias para os íons de alta energia da radiação cósmica, mas, a componente de elétrons abaixo de cerca de 20 MeV é dominada por elétrons provenientes de Júpiter. A intensidade dos raios cósmicos observados na órbita da Terra é dependente da modulação do ciclo solar, com o inverso do número de manchas solares do ciclo. O fluxo isotrópico de radiação cósmica galática, num mínimo de manchas solares, é em torno de $4 \text{ prótons cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, o que resulta numa exposição integrada anual de

$1,3 \times 10^8$ prótons cm^{-2} . O fluxo isotrópico de radiação cósmica num máximo de manchas solares é em torno de 2 prótons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, o que resulta numa exposição integrada anual de 7×10^7 prótons cm^{-2} . Raios cósmicos com $Z > 2$ são classificados em vários grupos de cargas, tais como leve (L), médio (M), pesado-leve (LH), pesado (H) e muito pesado (VH). O grupo L inclui aqueles com $3 \leq Z \leq 5$, o grupo M com $6 \leq Z \leq 8$, o grupo LH com $9 \leq Z \leq 14$, o grupo H com $15 \leq Z \leq 19$ e o grupo VH com $20 \leq Z \leq 28$. O grupo de cargas do manganês ($Z=25$) ao níquel ($Z=28$) é comumente chamado grupo do ferro.

Durante sua viagem desde as possíveis fontes até as vizinhanças da Terra, os raios cósmicos interagem com o meio interestelar e ocorrem algumas fragmentações que resultam numa diminuição dos raios cósmicos pesados e num aumento dos núcleos mais leves, quando comparados com a abundância universal mostrada na Figura 2.1.

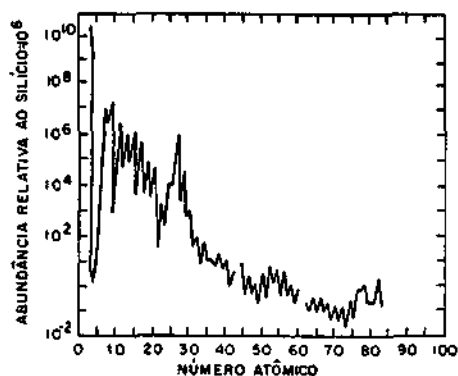


Fig. 2.1 - Abundância universal dos elementos químicos na natureza, em relação ao silício = 10^6 . Estes resultados foram obtidos do estudo de meteoritos, do Sol e de outras estrelas.

FONTE: Jursa (1985).

Como exemplo, observa-se que as abundâncias do lítio, berílio e boro no espectro de raios cósmicos galáticos são um milhão de vezes maiores, em relação a tais abundâncias universais, conforme observado na Figura 2.2.

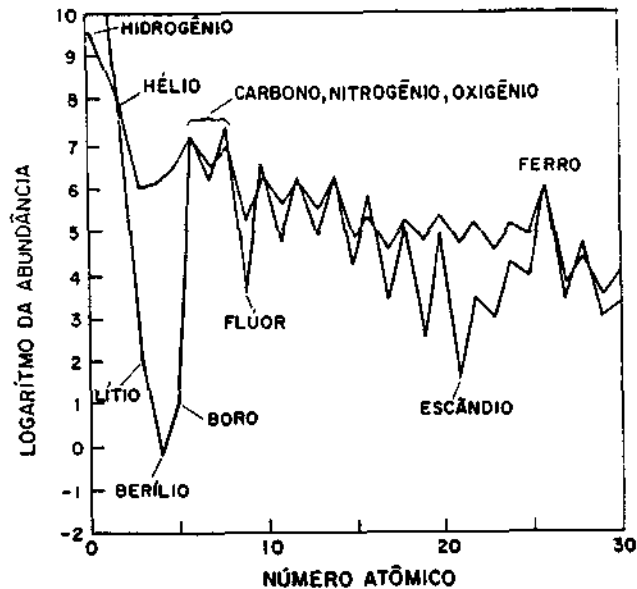


Fig. 2.2 - Abundâncias de elementos no sistema solar e dos constituintes dos raios cósmicos de altas energias. O lítio, o berílio e o boro são mais abundantes nos raios cósmicos, por um fator da ordem de 10^6 .

FONTE: Viola e Mathews (1987).

A abundância relativa dos vários núcleos observados na Terra para energia maiores que 0,45 GeV/núcleon são mostradas na Tabela 2.1. A abundância dos elementos N, Na, Al, S, Ar, Ca, Cr e Mn é aumentada na heliosfera (cujo limite, a heliopausa, estaria entre 100 e 150 AU) como resultado desta fragmentação no meio interestelar. Quase toda a ocorrência de elementos como Li, Be, B, F, Cl, K, Si, Ti e V é devida à fragmentação de núcleos pesados dos raios cósmicos (isto é, elementos com maior número de cargas) durante sua propagação através do meio interestelar.

TABELA 2.1 - COMPOSIÇÃO MÉDIA, RELATIVA AO OXIGÊNIO
DOS RAIOS CÔSMICOS OBSERVADA A 1 AU.

Carga	>450 MeV/Núcleo
He	44700 $\pm$ 500
Li	192 $\pm$ 4
Be	92 $\pm$ 2,5
B	329 $\pm$ 5
C	1130 $\pm$ 12
N	278 $\pm$ 5
O	1000
F	24 $\pm$ 1,5
Ne	158 $\pm$ 3
Na	29 $\pm$ 1,5
Mg	203 $\pm$ 3
Al	36 $\pm$ 1,5
Si	141 $\pm$ 3
P	7,5 $\pm$ 0,6
S	34 $\pm$ 1,5
Cl	9,0 $\pm$ 0,6
Ar	14,2 $\pm$ 0,9
K	10,1 $\pm$ 0,7
Ca	26 $\pm$ 1,3
Sc	6,3 $\pm$ 0,6
Ti	14,4 $\pm$ 0,9
V	9,5 $\pm$ 0,7
Cr	15,1 $\pm$ 0,9
Mn	11,6 $\pm$ 1,0
Fe	103 $\pm$ 2,5
Ni	5,6 $\pm$ 0,6

FONTE: Jursa (1985).

A porção de baixa energia do espectro de raios cósmicos é bastante variável, o que reflete sua dependência da modulação solar. Em 1972, durante o declínio do vigésimo ciclo de manchas solares, uma anomalia no espectro de energia e composição foram notadas em energias ≤ 70 MeV/núcleon. Estas diferenças persistiram através do mínimo de manchas solares e continuaram através da porção ascendente do vigésimo-primeiro ciclo de manchas solares. Desapareceu depois do máximo do vigésimo-segundo ciclo solar. Este comportamento sugere que a componente anômala pode ser dependente do ciclo magnético solar e presente somente durante ciclos alternados.

A abundância da maior parte dos elementos da componente anômala, em relação ao carbono, é comparada com a composição dos raios cósmicos galáticos na Tabela 2.2. Supondo que de 2-30 MeV/núcleon o carbono é predominantemente de origem cósmica durante períodos calmos, os elementos He, N, O, Ne e possivelmente o Fe são de 5 a 20 vezes mais abundantes na componente anômala do que na composição normal dos raios cósmicos. Dentro das incertezas estatísticas a composição dos outros elementos na região da componente anômala é comparável àquelas esperadas para o fluxo de raios cósmicos galáticos.

TABELA 2.2 - ABUNDÂNCIA DA COMPONENTE ANÔMALA DOS RAIOS CÔSMICOS GALÁTICOS EM RELAÇÃO AO CARBONO

Elemento	Componente Anômala (2-30 MeV/núcleo)	Raios Cômicos Galáticos (100 MeV/núcleo)
H	40 ± 4	275
He	90 ± 10	50
C	$\equiv 1$	$\equiv 1$
N	3 ± 1	0,225
O	18 ± 4	1,0
Ne	$1,3 \pm 0,4$	0,175
Mg	$0,3 \pm 0,2$ $+ 0,25$	0,23
Si	0,2	0,17
	$- 0,15$	
Fe	$0,6 \pm 0,2$	0,12

FONTE: Jursa (1985).

Os elétrons energéticos dos raios cômicos de origem não-solar, medidos a 1 AU, possuem duas componentes: a componente galática e a componente devida ao planeta Júpiter. Todo fluxo de elétrons na heliosfera, abaixo de aproximadamente 25 MeV, é originado em Júpiter. Na órbita da Terra, para energias maiores que 100 MeV, o fluxo de elétrons dos raios cômicos de origem galática domina. A magnetosfera de Júpiter é uma fonte de elétrons relativísticos que podem ser observados através de toda a heliosfera. Dentro de algumas AU do planeta Júpiter, o fluxo é modulado com a característica do período de rotação planetária de 10 horas. O fluxo de elétrons provenientes de Júpiter e observado na Terra possui uma característica sazonal de 13 meses. Este efeito sazonal resulta da posição relativa da Terra e de Júpiter, à medida que os planetas giram em torno do Sol

magnetosfera de Júpiter (estando a uma distância mínima de 5 AU), a propagação de elétrons de Júpiter para a Terra é mais eficiente.

2.2 - RAIOS CÔSMICOS SOLARES

As componentes das partículas provenientes do Sol mais comumente medidas são prótons e elétrons. A primeira medida com sucesso de nêutrons solares ocorreu em 1980. Fluxos de nêutrons solares na Terra são extremamente fracos por causa da meia-vida de aproximadamente 11,7 minutos, o que implica no decaimento de quase todos os nêutrons antes de atingir a órbita da Terra. A uma distância de 1 AU do Sol, partículas emitidas por erupções solares são uma importante fonte de núcleos com $E > 300$ MeV/Núcleon, como visto na Figura 2.3, comparando o fluxo de prótons dos raios cósmicos galácticos com o fluxo médio temporal de prótons solares.

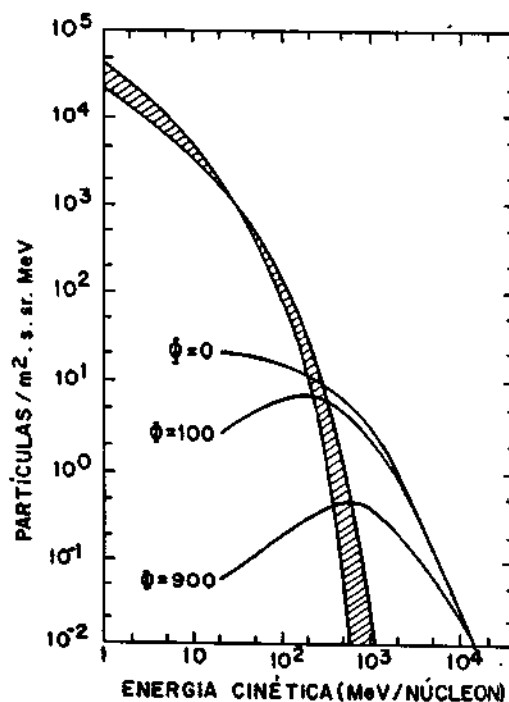


Fig. 2.3 - O fluxo de prótons solares, determinado a partir de dados lunares, é muito maior do que o fluxo de prótons de GCR, para diferentes níveis de modulações. ($\phi=0$ refere-se à ausência de modulação e $\phi=900$ é típico do fluxo durante o máximo solar).

FONTE: Reedy et al. (1983).

Mais de 100 eventos de raios cósmicos solares foram observados desde 1942. A fluência dos prótons com $E > 10$ MeV tem variado de menos de 10^5 para quase 10^{11} prótons cm^{-2} . Umas poucas e grandes erupções solares produzem a maior parte das partículas de raios cósmicos solares emitidos durante o ciclo solar de 11 anos. Poucas partículas são observadas quando a atividade solar é baixa, de acordo com a Figura 2.4. Eventos solares individuais duram tipicamente um par de dias e possuem fluxos médios temporais de algumas ordens de magnitude maiores do que o fluxo total de GCR, como visto na Tabela 1.

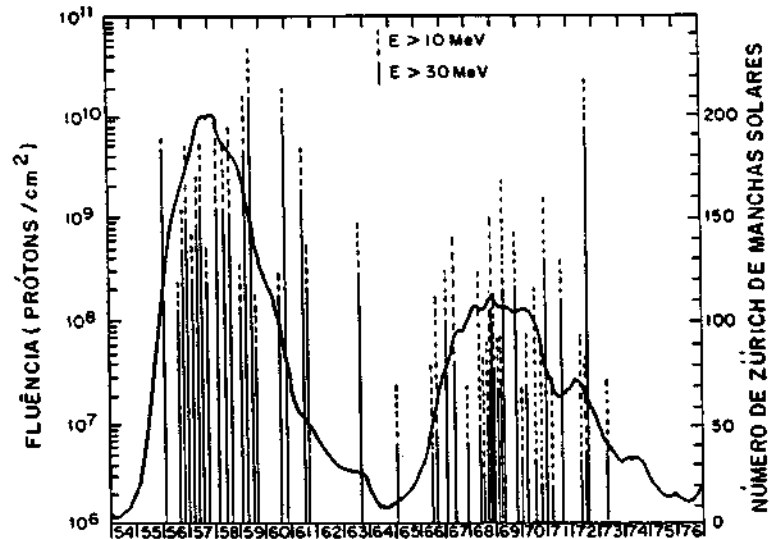


Fig. 2.4 - Número de Zürich de manchas solares (curva sólida contínua) e diferentes fluxos integrais de prótons, acima de 10 e 30 MeV, emitidos por erupções solares de 1954 a 1976. Para as erupções que ocorrem muito próximas uma das outras, as fluências foram combinadas.

FONTE: Reedy et al. (1983).

O espectro de energia de partículas solares é suave, com muitas partículas de $E > 10$ MeV e poucas com $E > 100$ MeV. Em geral, o espectro de partículas dos SCR pode ser bem representado pela lei de potência $E^{-\gamma}$, onde E é a energia cinética por núcleon. Para energias de prótons entre 20 e 80 MeV, o valor de γ está no intervalo de 2 a 4, com um valor médio de 2,9 no momento de máxima intensidade de prótons. De 1967 a 1972, os valores de γ para prótons e partículas alfa foram similares, com as partículas alfa tendo um valor levemente maior. A razão do fluxo das partículas alfa para o fluxo de prótons, para energias de 3-8 MeV/núcleon, foi cerca de 0,03.

Os dados para elétrons solares começaram a ser obtidos somente a partir de sua identificação em 1965, devido à dificuldade de medir elétrons num alto fluxo de prótons. Os elétrons solares estão presentes na maioria dos eventos solares separados em dois grupos: elétrons de baixa energia (energia de dezenas de keV) e elétrons de alta energia (energia na faixa de MeV). Desde que a massa de repouso de um elétron é 0,511 MeV, elétrons com energia cinética na faixa de MeV são relativísticos. Elétrons de baixa energia são emitidos por todas as erupções solares, mesmo pelas menores, e são altamente correlacionados com a sua frequência de ocorrência através do ciclo de manchas solares. Os elétrons solares de alta energia possuem um perfil temporal diferente dos elétrons solares de baixa energia, sendo similar ao perfil temporal de intensidade de prótons de 90 a 100 MeV. Chegam a 1 AU depois da observação e detecção dos elétrons de baixa energia, emitidos pela mesma erupção solar. Os valores médios da abundância de partículas solares com $E \geq 1$ MeV/núcleon em erupções solares relativamente grandes (com intensidade de pico que excede em torno de $100 \text{ prótons cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{MeV}^{-1}$) e com uma composição "normal" são dados na Tabela 2.3.

TABELA 2.3 - ABUNDÂNCIAS MÉDIAS, RELATIVAS AO OXIGÊNIO, DE
PARTÍCULAS ENERGÉTICAS NO MEIO INTERPLANETÁRIO

Elemento	Erupções solares		Material solar	
	Normal (1-20 MeV)	Rica em Fe (1-5 MeV)	Corona	Fotosfera
H	4600	300	1780	1445
He	70	40	150	91*
Li	~ 0,0005			~ $1,4 \cdot 10^{-8}$
Be	0,0007			~ $2 \cdot 10^{-8}$
B	0,0007			$1,8 \cdot 10^{-8}$
C	0,54	0,23	1,0	0,6
N	0,13		0,2	0,126
O	≡ 1	≡ 1	≡ 1	≡ 1
F	0,002			
Ne	0,16	0,39	0,063	0,054
Na	0,016		0,005	0,0028
Mg	0,18	0,54	0,079	0,050

(continua)

Tabela 2.3 - Continuação

Al	0,016		0,005	0,0048
Si	0,13	0,44	0,079	0,065
P	< 0,002		0,0005	0,0005
S	0,026	0,33	0,025	0,023
Ar	~ 0,004		0,01	0,0015
Ca	0,012		0,0045	0,0032
Fe	0,15	1,3	0,093	0,05

*Nota: A abundância de He na fotosfera não é uma medida correta e existe uma grande variância entre os resultados obtidos a partir de diferentes métodos de medida.

FONTE: Jursa (1985).

A composição básica das partículas oriundas de uma erupção solar é similar à composição da corona e fotosfera solar, cujas abundâncias também são dadas na Tabela 2.3. Existe uma concordância geral nas abundâncias de He, C, N, e do S até o Fe. Os elementos Li, Be, B, F e P são raros, e os elementos com Z ímpar N, F, Na, Al e P são menos abundantes do que seus vizinhos com Z par. A composição parece enriquecida nos elementos do Ne ao Si, e a razão C/O para a erupção solar, embora consistente com a abundância da fotosfera solar, é menor do que o valor correntemente aceito para a corona. Atualmente pouco se sabe acerca de elementos mais pesados que o Fe, exceto que suas abundâncias são muito pequenas.

A composição elementar do fluxo de partículas solares é basicamente similar em eventos pequenos, médios e grandes. Entretanto, existe uma tendência da razão He/O ser maior (70 a 90 vezes) para eventos pequenos e médios do que a correspondente razão para os grandes eventos.

CAPÍTULO 3

MODULAÇÃO DO FLUXO DE RAIOS CÓSMICOS

Observações feitas durante muitas décadas revelaram que o fluxo de raios cósmicos é modulado pelo ciclo solar de 11 anos, alcançando um máximo durante o período calmo do ciclo solar e um mínimo próximo do pico da atividade solar.

A atividade solar e, conseqüentemente, a emissão solar pode ser analisada por três componentes, de acordo com a Figura 3.1.

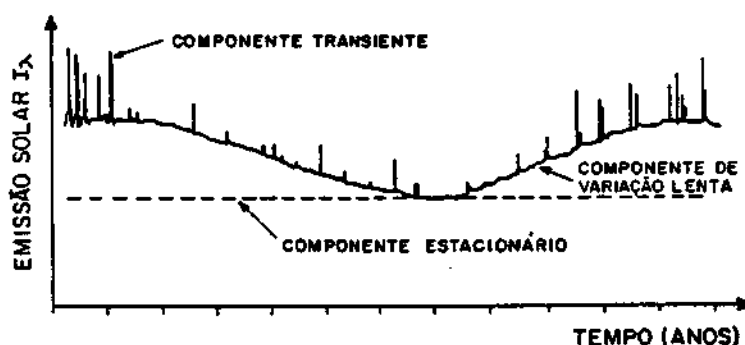


Fig. 3.1 - Componentes (estacionária, de lenta variação e transiente) da emissão solar para um certo comprimento de onda λ . As intensidades relativas destas componentes são dependentes do comprimento de onda.

FONTE: Papagiannis (1978).

O primeiro componente é o componente estacionário que representa o fluxo constante de radiação solar que determina os aspectos básicos (temperatura, densidade de elétrons etc.) do domínio terrestre. Este fluxo também determina a natureza básica (vento solar, campos magnéticos etc.) do espaço interplanetário. O segundo componente da emissão solar, que varia lentamente, é sobreposto ao nível estacionário da emissão solar, sendo responsável pelo termo de mudanças periódicas de tempo maior, nas propriedades físicas da atmosfera terrestre, ionosfera e magnetosfera. O período destas

variações é o ciclo de 11 anos na atividade solar. Poder-se-ia incluir também nesta categoria a periodicidade de 27 dias devido à rotação do Sol. O reaparecimento periódico de centros ativos na face do Sol causa a flutuação de 27 dias e, em consequência, nas condições do espaço interplanetário na vizinhança da Terra.

O número relativo de manchas solares R (ou número de Wolf ou Zürich) permanece o mais importante índice geral da atividade solar, calculado de acordo com a fórmula:

$$R = k (n + 10g) , \quad (3.1)$$

onde n é o número de manchas individuais visíveis no disco solar, g é o número de grupos de manchas solares e k é uma constante da estação, ou "equação própria" para cada observatório particular. Registros do número de manchas solares têm sido feitos desde a metade do século dezessete, de acordo com a Figura 3.2. O comportamento cíclico de R com um período médio de 11 anos é o mais evidente comportamento dos registros históricos, embora uma periodicidade de aproximadamente 80 anos pode também estar presente. O período anômalo de baixa atividade, chamado Mínimo de Maunder (1645 a 1700) é reconhecido como uma possível redução no nível de atividade solar. Sua existência tem sido investigada, independentemente, por medidas do conteúdo de carbono-14 nos anéis de árvores formados naquela época. Talvez ainda exista uma periodicidade da ordem de centenas de anos, quando um novo período anômalo, semelhante ao Mínimo de Maunder, pode ocorrer no futuro.

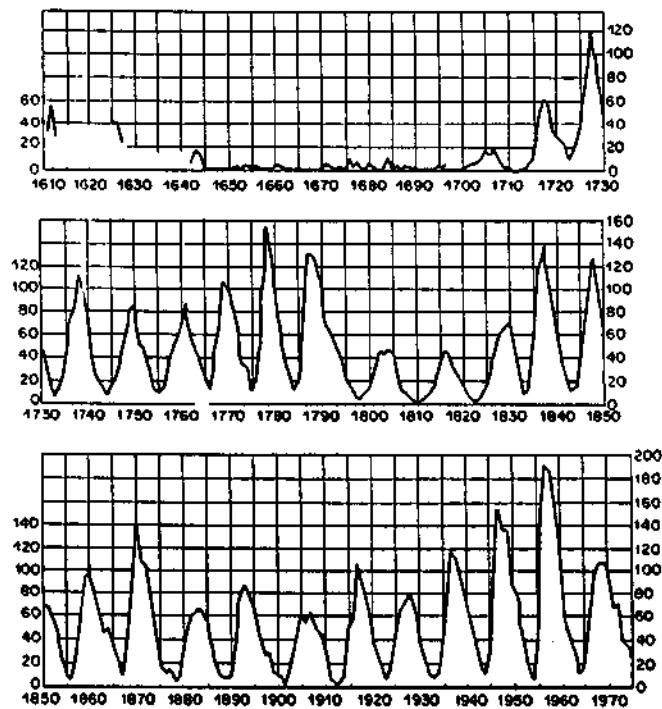


Fig. 3.2 - Número médio anual de manchas solares de 1610 a 1975.
FONTE: Jursa (1985).

A maioria das manchas solares ocorrem em grupos que são formados pela mancha guia no lado oeste do grupo e uma ou mais manchas seguidoras no lado leste, de acordo com a Figura 3.3. A mancha guia é freqüentemente a mais larga mancha do grupo, com campos magnéticos da ordem de 3.000 gauss. A mancha guia e as seguidoras geralmente possuem polaridades opostas. Durante um ciclo de 11 anos, todas as manchas guias no hemisfério norte do Sol possuem uma mesma polaridade, enquanto as do hemisfério sul do Sol possuem polaridade contrária. Este padrão persiste através do crescimento e declínio do ciclo.

Durante o novo ciclo, entretanto, todo o padrão de polaridade é trocado. Conseqüentemente, o ciclo fundamental da atividade magnética solar possui cerca de 22 anos de duração. Durante o ciclo número 21, com máximo em 1979-1980, a mancha guia no hemisfério norte tinha uma polaridade positiva (vetor campo magnético que saía da superfície do Sol).

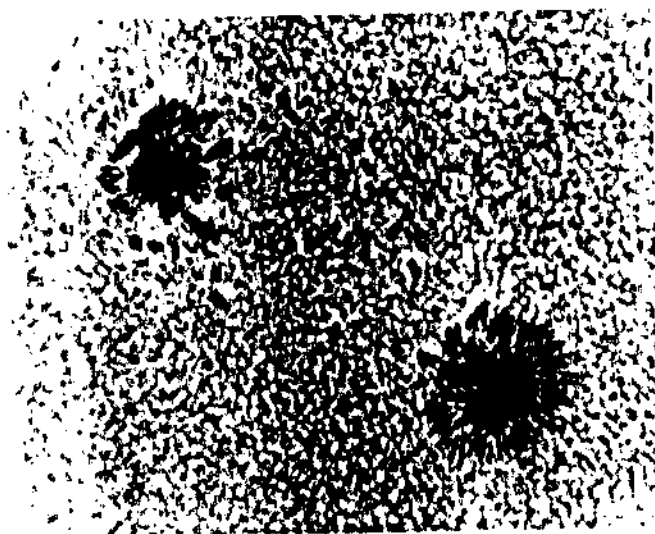


Fig. 3.3 - Grupo dipolar de manchas solares que mostram a mancha guia, à direita, e a mancha seguidora. O padrão de granulação do background é também visível.

FONTE: Jursa (1985).

As primeiras manchas solares de um novo ciclo aparecem tipicamente em latitudes de 20° a 25° em ambos os hemisférios. A medida que o ciclo prossegue, manchas adicionais aparecem em menores latitudes, até que estejam mais concentradas perto do equador, no final do ciclo, de acordo com a Figura 3.4.

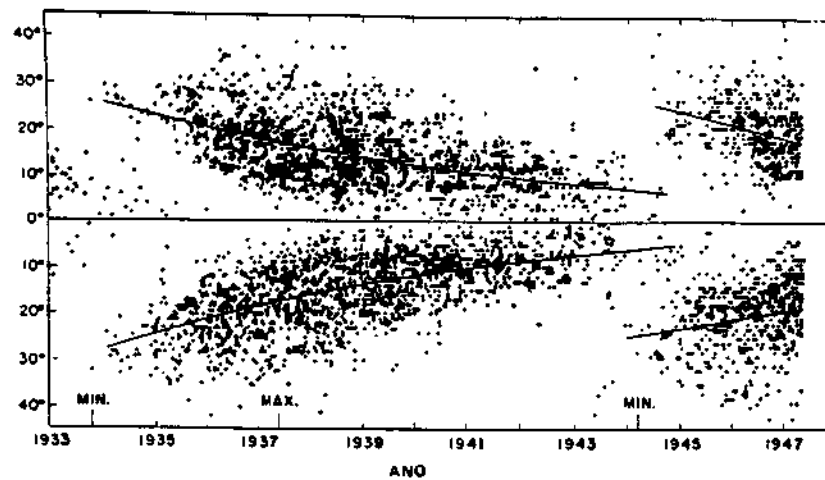


Fig. 3.4 - Diagrama típico (forma de borboleta) que mostra a variação na distribuição de manchas solares com o tempo. Durante o ciclo de manchas solares, a distribuição desloca-se para o equador solar.

FONTE: Jursa (1985).

Certamente a atmosfera e a ionosfera a uma dada latitude estão sujeitas também a variações sazonais, mas estas são devidas, principalmente, à rotação da Terra em torno do Sol e, conseqüentemente, não estão relacionadas com o nível de atividade solar.

O terceiro componente da emissão solar é um transiente, componente explosivo que leva de alguns minutos a poucas horas de duração. A capacidade de detetar a ocorrência e magnitude destes eventos é ainda muito limitada, embora alguns deles causem sérios problemas, tais como interferência de rádio, danos de radiação em seres humanos no espaço etc. Um esforço bem coordenado é feito atualmente para desenvolver a capacidade de detetar o pequeno e longo termo das erupções solares.

A explicação para este efeito de modulação é que durante o período ativo do ciclo solar, o maior número de erupções solares empurram o campo magnético solar no espaço interplanetário, produzindo uma blindagem adicional contra os raios cósmicos. Na passagem pelo meio interplanetário, as partículas dos raios cósmicos desviam-se devido à interação de suas cargas nucleares com o campo magnético do vento solar. Esta energia perdida é aproximadamente independente da energia cinética dos raios cósmicos galáticos incidentes e proporcional à sua carga, comportando-se como se os raios cósmicos estivessem sob a influência de um campo elétrico com um potencial igual à energia perdida em um dado ponto.

Todo o fluxo com energia abaixo de 50 GeV/núcleon está sujeito a modulação pelo meio interplanetário. A Figura 3.5 mostra o espectro de prótons em 1965, quando o Sol estava numa fase quieta de seu ciclo de 11 anos e, em 1969, quando estava na sua fase ativa. O fluxo diferencial abaixo de 300 MeV é reduzido por um fator em torno de cinco. O espectro de partículas alfa varia similarmente, sendo previsto que núcleos mais pesados comportem-se de forma análoga.

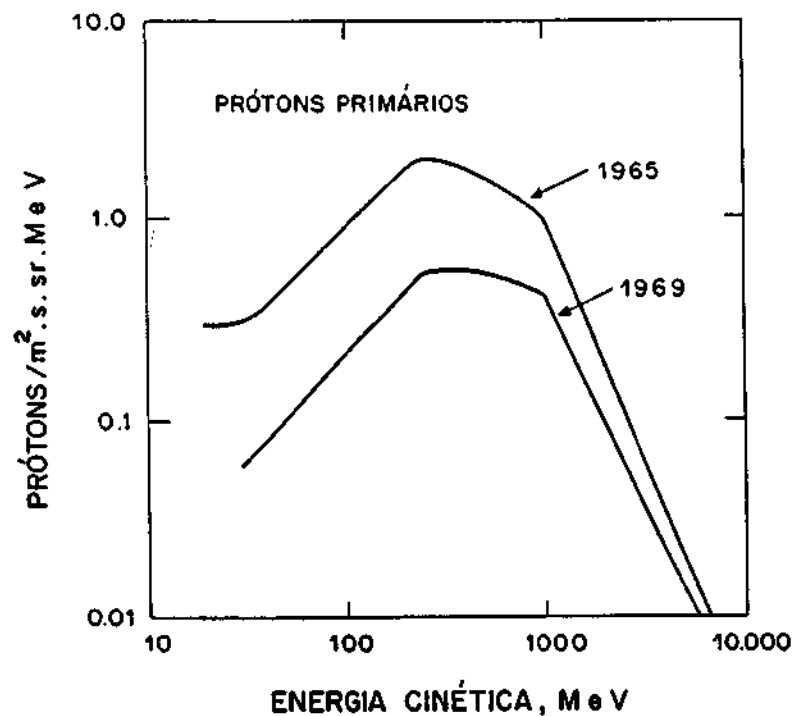


Fig. 3.5 - Espectro diferencial de prótons galácticos primários próximo ao mínimo de atividade solar (1965) e máximo de atividade solar (1969).

FONTE: Anderson (1972).

O espectro de elétrons comporta-se de forma diferente, embora o fluxo varie na mesma fase, como o fluxo nuclear. A variação máxima ocorre entre cerca de 20 a 500 MeV com, por exemplo, uma mudança de um fator de oito a 100 MeV de 1965 a 1968. Entretanto, abaixo de 10 MeV a variação é menor que isto, com um fator de variação de 1,8, de 1965 a 1970.

Ocorre ainda uma modulação, de 27 dias, do fluxo de raios cósmicos porque o campo magnético interplanetário sofre uma corotação com as regiões ativas do Sol, das quais ele provém.

Existe também decréscimos súbitos ocasionais no fluxo de raios cósmicos com período de recorrência de muitos dias. Após a

descoberta do Dr. Scott E. Forbush, este fenômeno foi chamando Decréscimo de Forbush. Este intervalo de decrescimento de um pouco a mais de 25 por cento do espectro de raios cósmicos integrados relativisticamente estende-se a partículas com rigidez magnética além de 50 GeV.

Os dois modelos que têm sido propostos para explicar o Decréscimo de Forbush são mostrados na Figura 3.6. De acordo com o primeiro modelo, Figura 3.6A, uma nuvem de plasma ejetada por uma grande erupção solar pode modificar o campo magnético do Sol, formando uma grande "garrafa" magnética. Sob certas circunstâncias, esta "garrafa" pode envolver a Terra e promover a blindagem adicional no fluxo de raios cósmicos.

De acordo com o segundo modelo, Figura 3.6B, seguindo a grande erupção solar, uma forte e repentina onda desenvolve-se e propaga-se no espaço interplanetário, causando um aumento súbito do campo interplanetário. Esta "concha" de campo de intensidade maior produz a proteção extra contra os raios cósmicos.

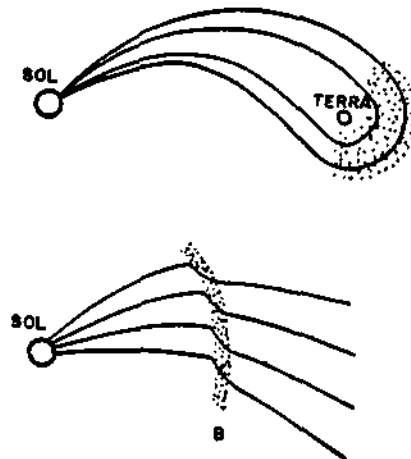


Fig. 3.6 - Modelos para o crescimento do campo magnético interplanetário que produz o decréscimo de Forbush no fluxo de raios cósmicos na Terra.

FONTE: Papagiannis (1978).

Em adição ao ciclo de 11 anos e às variações de 27 dias, o fluxo de raios cósmicos apresenta também uma anisotropia diurna com um máximo próximo ao pôr-do-Sol e um mínimo próximo ao nascer do Sol. A magnitude da anisotropia depende da latitude e é máxima no equador onde a variação de amplitude é 0,8% do nascer do Sol, ou 0,4% de cada extremo para o meio-dia ou para a meia-noite. À medida que a Terra se move em sua órbita em volta do Sol, o pôr-do-Sol e, conseqüentemente, o máximo do fluxo de raios cósmicos ocorre no setor da cauda da Terra. Esta observação fornece uma boa evidência da causa da anisotropia diurna.

Os raios cósmicos, em adição à sua velocidade randômica W , que é próxima à velocidade da luz, têm também uma velocidade de deriva V porque deslocam-se de acordo com o campo magnético interplanetário à medida que este roda com o Sol. A velocidade tangencial a 1 AU, para uma rotação rígida com o Sol, é $V = 4 \times 10^7$ cm/s = 400 km/s. A Terra, por sua vez, move-se em torno do Sol com uma velocidade orbital de aproximadamente 3×10^6 cm/s = 30 km/s, desprezível quando comparada com V . Como resultado, uma nuvem de raios cósmicos alcança continuamente a Terra e, neste caso, pode ser considerada como praticamente estacionária.

Um observador quando alcançado por esta nuvem pensará que as partículas de raios cósmicos possuem a velocidade:

$$W' = W + V = W (1 + V/W) . \quad (3.2)$$

Para as partículas que se aproximam, o ângulo do cone de aceitação θ dos contadores de raios cósmicos será:

$$\theta' = \theta (1 + V/W) , \quad (3.3)$$

e o ângulo sólido de aceitação dos contadores,

$$\Omega' = (\theta')^2 \approx \theta^2 (1 + V/W)^2 = \Omega (1 + V/W)^2. \quad (3.4)$$

Desde que a taxa de contagem dos raios cósmicos é proporcional à velocidade das partículas W' e ao ângulo sólido dos contadores Ω' , o fluxo de raios cósmicos medidos F' será:

$$F' = W' \Omega' = W \Omega (1 + V/W)^2 = F (1 + V/W)^2, \quad (3.5)$$

e como $W \gg V$,

$$F' \approx F (1 + 2V/W), \quad (3.6)$$

onde F é o fluxo correspondente próximo ao meridiano do meio-dia ou da meia-noite, cuja nuvem de raios cósmicos move-se tangencialmente ao solo e seu movimento não afeta a taxa de contagem. A partir da Equação 3.6 segue-se que,

$$(F' - F)/F = 2V/W = 3 \times 4 \times 10^7 / 3 \times 10^{10} = 0,4\%. \quad (3.7)$$

Este resultado teórico está em boa concordância com as observações experimentais existentes e confirmam a hipótese de que os raios cósmicos participam da corotação do campo magnético interplanetário com o Sol.

Medidas anuais da anisotropia diurna, com um máximo próximo das 18:00 horas, mostram variações que estão bem correlacionadas com a atividade magnética e com ciclo solar. O máximo anual ocorre próximo ao máximo das manchas solares e é 0,4 - 0,5% contra 0,3 - 0,4% para o mínimo que ocorre no período solar mínimo. A diferença é devida a intensificação do campo magnético interplanetário que permite a prisão de raios cósmicos de altas energias e, conseqüentemente, aumenta a fração dos raios cósmicos que rodam com o campo magnético interplanetário.

CAPÍTULO 4

O CONCEITO DE RIGIDEZ MAGNÉTICA

Os raios cósmicos sendo partículas altamente energéticas, suas trajetórias são modificadas, na vizinhança da Terra, pelos campos magnéticos que a envolvem. Alguns destes campos podem impedir algumas partículas de alcançar a superfície da Terra.

Dada a direção de aproximação, a latitude geomagnética λ , a massa m , e a carga Ze das partículas de raios cósmicos, pode-se calcular o momento crítico P_c que a partícula precisa ter para não sofrer a deflexão pelo campo magnético da Terra. As partículas que incidem na mesma direção do campo geomagnético não sofrem desvios, independentemente, de suas cargas e velocidades. Para incidência vertical, num campo de dipolo magnético, o momento mínimo necessário é:

$$P_c = mV = ZeM \cos^4 \lambda / 4R_0^2 c, \quad (4.1)$$

onde $M = 8,05 \times 10^{25}$ Gauss.cm³ é o momento de dipolo do campo magnético da Terra e R_0 é o raio da Terra. A Equação 4.1, mostra que o momento crítico requerido decresce à medida que a latitude cresce. Como resultado, pode-se esperar um fluxo de raios cósmicos muito maior nas regiões polares do que em qualquer outro local da Terra. A Equação 4.1 é válida também para partículas relativísticas, para as quais o momento relativístico p pode ser expresso em termos da energia total E_T e a energia cinética E_k , através das seguintes expressões,

$$\begin{aligned} (pc)^2 &= (m_0vc)^2 = E_T^2 - (m_0c^2)^2 = (E_k + m_0c^2)^2 - (m_0c^2)^2 \\ &= E_k^2 + 2E_k m_0c^2 . \end{aligned} \quad (4.2)$$

As energias das partículas são expressas em eletrovolts, $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J} = 1,6 \times 10^{-12} \text{ ergs}$; desde que pc representa uma quantidade de energia, ela pode ser expressa também em eV. Em consequência, pc/e pode ser expresso em volts. Para partículas de raios cósmicos, é conveniente usar um parâmetro chamado rigidez P , momento por unidade de carga, definido pela seguinte relação:

$$P = pc/Ze, \quad (4.3)$$

que descreve a habilidade de penetração das partículas carregadas num campo magnético.

A partir das Equações 4.1 e 4.3, encontra-se a rigidez magnética de corte, "cut-off rigidity", das partículas chegando verticalmente a uma latitude geomagnética λ , a saber:

$$P_c = pc/Ze = M \cos^4 \lambda / 4R_0^2 = 14,9 \cos^4 \lambda \text{ GV}. \quad (4.4)$$

A latitude geomagnética λ , é aproximadamente relacionada a coordenadas geográficas (λ_g latitude e ϕ_g longitude) por

$$\sin \lambda = \sin \lambda_g \cos 11^\circ + \cos \lambda_g \sin 11^\circ \cos(\phi_g - 290^\circ), \quad (4.5)$$

onde o pólo norte magnético é tomado na colatitude de 11° e longitude de 290° . A localização do pólo magnético pode deslocar-se até 2° em uma década.

A rigidez magnética e a energia cinética de uma partícula podem ser relacionadas através das Equações 4.4 e 4.2. Para um próton que incide verticalmente, por exemplo, no equador

magnético, $\lambda = 0$, têm-se $P_c = 14,0$ GV e $E_k = 14,0$ GeV, enquanto para $\lambda = 60^\circ$ encontram-se $P_c = 931$ MV e $E_k = 384$ MeV.

Na Figura 4.1, são mostrados os valores de corte da rigidez magnética para o zênite e para os horizontes leste e oeste como uma função da latitude geomagnética.

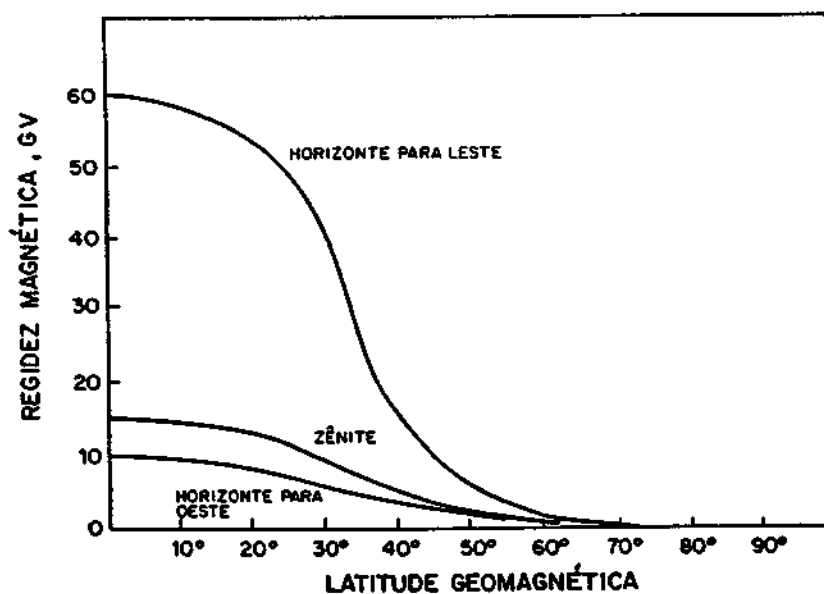


Fig. 4.1 - A variação Leste-Oeste da rigidez geomagnética de corte em função da latitude geomagnética é comparada com a rigidez efetiva de corte para um detetor isotrópico.

FONTE: O'Brien (1972).

CAPÍTULO 5

INTERAÇÃO DOS RAIOS CÔSMICOS COM A ATMOSFERA TERRESTRE

O termo "radiação cósmica" caracteriza o fluxo de partículas carregadas que alcança a Terra, provenientes de fora da magnetosfera, com energias acima da energia do vento solar, de alguns poucos keV. Existem duas fontes para este fluxo de partículas. Esporadicamente o Sol produz tais partículas, em geral dentro do intervalo de energia 1-200 MeV. Estes raios cósmicos solares alcançam a Terra em um intervalo de tempo que varia de horas até dias. Pode existir também um pequeno, porém constante, fluxo de partículas provenientes do Sol, mas a parte principal do fluxo constante origina-se de fora da órbita da Terra. As partículas galáticas possuem energias no intervalo de alguns MeV para ao menos 10^{13} MeV. Supõe-se que preenchem a nossa galáxia ou, pelo menos, o seu disco de uma forma mais ou menos uniforme. Entretanto, o fluxo com energias abaixo de poucos GeV, que alcança a órbita da Terra, é modulado pelo meio interplanetário, de modo que este número varia inversamente com a atividade solar e é sempre menor que o fluxo interplanetário.

O estudo da radiação cósmica tem importância em numerosos campos de pesquisa. A distribuição geográfica do fluxo de partículas é usada para mapear o campo geomagnético. O entendimento da Física de Alta Energia começou com o esforço para explicar a interação dos raios cósmicos primários com a atmosfera, e o pósitron, o múon e o píon foram primeiramente observados na radiação cósmica secundária. Ainda, os raios cósmicos produzem isótopos radioativos usados como traçadores e para datação, de grande importância atual. Os nêutrons de baixas energias, também produzidos como partículas secundárias da radiação cósmica, interagem com os núcleos alvos e são removidos do equilíbrio difusivo por processos de captura. Para nêutrons na atmosfera, a maior seção de choque é caracterizada por processos (n,p) com o nitrogênio, que leva à formação de C^{14} , isto é, $^{14}N(n,p)C^{14}$. Este é um emissor beta com meia-vida de 5560 anos, segundo $C^{14} \rightarrow N^{14}$

$+ \beta + \bar{\nu}_e$, que retorna ao nitrogênio ordinário. O teor de carbono-14 depende da intensidade da radiação cósmica, que varia pouco. Entra nos vegetais através da fotossíntese e seu uso em datação arqueológica e também geofísica é atualmente bem conhecido. O fluxo de nêutrons secundários na atmosfera são responsáveis pela geração de muitos outros isótopos cosmogênicos como Al^{26} , com meia-vida de $7,4 \times 10^5$ anos, e o Be^{10} , com meia-vida de $2,5 \times 10^6$ anos. Quando a matéria é exposta a raios cósmicos, uma grande variedade de núclídeos cosmogênicos estáveis e radioativos são produzidos. Ver a Tabela 5.1.

**TABELA 5.1 - RADIONUCLÍDEOS PRODUZIDOS POR RAIOS CÔSMICOS
FREQUENTEMENTE MEDIDOS EM MATERIAL TERRESTRE OU EXTRATERRESTRE.**

Radionuclídeo	Meia-Vida ^a	Principais alvos ^b	Partículas ^c
^3H	12,323	O, Mg, Si	GCR, SCR
^{10}He	$1,6 \times 10^6$	O, Mg, Si, (N)	GCR
^{14}C	5730	O, Mg, Si, (N)	GCR, SCR
^{22}Na	2,602	Mg, Al, Si	SCR, GCR
^{26}Al	$7,16 \times 10^5$	Al, Si, (Ar)	SCR, GCR
^{32}Si	105	(Ar)	GCR
^{36}Cl	$3,0 \times 10^5$	Ca, Fe, (Ar)	GCR
^{37}Ar	35,0 dias	Ca, Fe	GCR, SCR
^{39}Ar	269	K, Ca, Fe	GCR
^{40}K	$1,28 \times 10^9$	Fe	GCR
^{46}Se	83,82 dias	Fe, Ti	GCR
^{48}V	15,97 dias	Fe, Ti	GCR, SCR
^{53}Mn	$3,7 \times 10^6$	Fe	SCR, GCR
^{54}Mn	312,2 dias	Fe	SCR, GCR
	2,7	Fe	SCR, GCR
^{56}Co	78,76 dias	Fe	SCR

(continua)

Tabela 5.1 - Continuação

^{39}Ni	$7,6 \times 10^4$	Fe, Ni	GCR, SCR
^{60}Co	5,272	Cr, Ni	GCR
^{81}Kr	$2,1 \times 10^5$	Si, Zr	GCR, SCR
^{129}I	$1,6 \times 10^7$	Te, Ba, La, Ce	GCR

- ^a As meias-vidas são dadas em anos, a menos que sejam indicadas de modo diferente.
- ^b Elementos alvos dos quais resultam a maior produção. Os alvos listados entre parênteses são da atmosfera da Terra.
- ^c Tipos de partículas de raios cósmicos que produzem grandes quantidades de radionuclídeos. GCR = raios cósmicos galáticos, SCR = raios cósmicos solares.

FONTE: Reedy et al. (1983).

Os raios cósmicos ao nível do solo são bastante diferentes, tendo sofrido alterações ou modificações significativas na colisão com o sistema solar, com o campo magnético terrestre e com a atmosfera do planeta.

As partículas de raios cósmicos incidentes no topo da atmosfera são chamadas raios cósmicos primários. Estas partículas interagem com os núcleos das moléculas atmosféricas e produzem os raios cósmicos secundários. Estes, por sua vez, interagem com outros núcleos produzindo mais partículas secundárias e assim por diante. Assim, os raios cósmicos secundários causam uma cascata de raios cósmicos secundários, chamada por "cosmic ray shower". A produção de partículas secundárias torna-se significativa a cerca de 55 km de altitude e atinge um máximo a uma altitude em torno de 20 km. Abaixo desta altitude, até o solo, a intensidade das partículas secundárias diminui à medida que estas perdem energia através de colisões, até que grande parte delas decaem ou são absorvidas. Somente partículas primárias com $E_k > 500$ MeV possuem a chance de atingir o solo. Porém, o fluxo primário que atinge o topo da atmosfera com esta energia é somente de $0,2 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ para prótons e $0,03 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ para partículas alfa.

A Figura 5.1 mostra os principais modos de interação dos raios cósmicos com os núcleos da atmosfera, as partículas secundárias e a radiação produzida, bem como as vidas-médias e os modos de decaimento das partículas instáveis e uma estimativa da fração de energia carregada por cada modo. A produção de nêutrons de alta energia e de prótons por cascata nuclear corresponde a 20% da energia da radiação primária incidente. Após repetidas interações dentro da atmosfera, estes núcleons ainda possuem suficiente energia ao nível do mar para produzir cascatas adicionais em materiais densos. A produção de píons carregados, com uma massa 273 vezes a do elétron e vida-média de $2,5 \times 10^{-8} \text{s}$, corresponde a cerca de 30% da energia. Os múons resultantes de seus decaimentos constituem a mais penetrante radiação cósmica secundária ao nível do mar. Em torno de 18% da energia incidente corresponde a produção da partícula neutra π^0 , cujo decaimento ocorre com vida-média de $0,8 \times 10^{-16} \text{s}$, com a emissão de dois gamas de alta energia. Estes são os principais contribuintes para a cascata de elétrons e prótons. Reações fotonucleares podem transferir alguma energia para os componentes nucleares. A produção de kaons e lambdas é muito menos provável e, pelo seu decaimento, levam à produção de píons, múons, elétrons, neutrinos e radiação gama.

Os raios cósmicos secundários mais comumente medidos na superfície da Terra são os mésons π e múons, nêutrons, prótons, elétrons e fótons de raios gama. A radiação cósmica secundária é frequentemente classificada em três componentes principais. A componente mais penetrante ou dura, composta principalmente de múons relativísticos, a componente nuclear, composta de prótons e nêutrons produzidos localmente, e a componente menos penetrante ou leve, composta de elétrons e raios gama. Nêutrons e múons são as partículas secundárias usualmente medidas na superfície da Terra para obter informações sobre o fluxo e o espectro de energia das partículas primárias. Câmaras de ionização são usadas para a contagem de múons. Monitores de nêutrons são, em geral, mais indicados para o estudo de

variações no fluxo primário porque eles são os mais sensíveis indicadores da radiação primária com energia na faixa de 0,5 a 10 GeV.

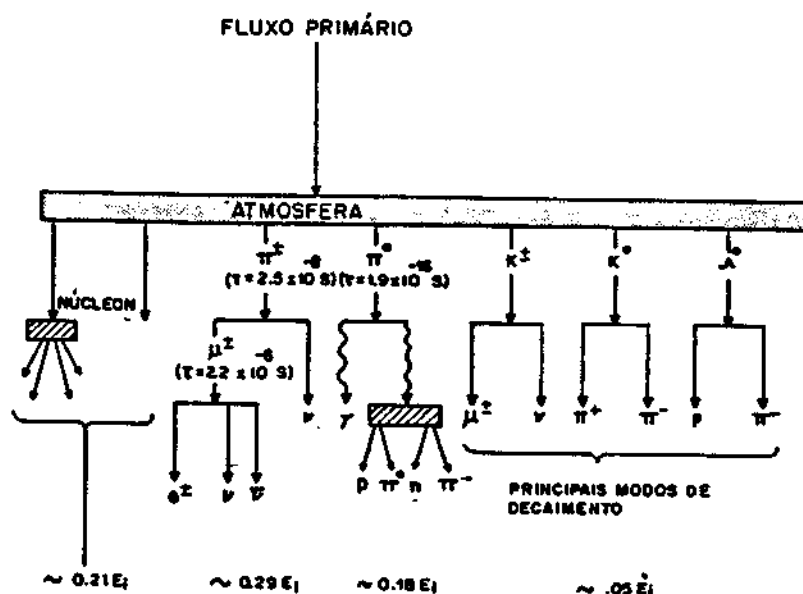


Fig. 5.1 - Relação geral e parcela de energia carregada pelas partículas de raios cósmicos secundários produzidos na atmosfera da Terra.

FONTE: May e Marinelli (1964).

Condições atmosféricas, especialmente pressão barométrica, tem um efeito apreciável na intensidade medida. Assim, as intensidades dos raios cósmicos secundários são usualmente fornecidas em termos de profundidade atmosférica (massa de ar por unidade de área acima do ponto de observação) ou pressão do ar no ponto de observação, ao invés da altitude de observação. Desse modo, todas as medidas feitas no solo precisam ser corrigidas devido à variação no tempo da espessura da atmosfera, sua variação com a latitude e a altitude. Conseqüentemente, para comparar as medidas de raios cósmicos em toda a Terra, precisa-se primeiro normalizá-las para uma atmosfera padrão.

Prótons, que representam o mais intenso fluxo de partículas de raios cósmicos na galáxia, são reduzidos de cerca de $10 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ para cerca de $2 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. As partículas alfa são

totalmente eliminadas. Partículas instáveis tal como nêutrons e múons, estão presentes e excedem em número o fluxo de prótons de 50 e 100 por 1, respectivamente. O fluxo de píons é 10% do fluxo de prótons. Em adição, elétrons e fótons, a pequena percentagem do fluxo galático, estão presentes com intensidades entre os píons e os prótons. O fluxo é altamente anisotrópico, tendo um máximo intenso oriundo da direção vertical.

Ao invés de uma relativa constância na escala de milhões de anos, os raios cósmicos atmosféricos variam periodicamente com ciclo de 11 anos. Em adição a este longo termo de modulação, ocorrem decréscimos súbitos de poucas horas, conhecido como decréscimo de Forbush, que são seguidos por um período de recuperação lento, tipicamente cerca de duas semanas. A própria atmosfera, como já visto, também produz mudanças na intensidade do campo de radiação ao nível do solo alterando as taxas de decaimento de partículas e os graus de atenuação a uma dada altitude.

Na passagem pelo meio interplanetário, as partículas dos raios cósmicos perdem energia devido às interações de suas cargas com os campos magnéticos do vento solar. O ciclo de 11 anos da atividade solar, como é indicado pelo ciclo de manchas solares, está relacionado com as mudanças na intensidade da energia perdida pelos raios cósmicos que penetram no meio interplanetário. Maior atividade solar corresponde à maior energia perdida e uma redução na intensidade dos raios cósmicos na órbita da Terra. Existe também uma modulação de 27 dias no fluxo dos raios cósmicos, porque o campo magnético interplanetário sofre uma co-rotação com as regiões ativas no Sol, das quais ele se origina. Os raios cósmicos aproximando-se da Terra não podem penetrar a atmosfera, a menos que eles possuam uma rigidez magnética, momento por unidade de carga, alta o suficiente para penetrar o campo magnético da Terra. Na direção vertical, por exemplo, sua rigidez precisa exceder a $15 \cos^4 \lambda$ GV, onde λ é a latitude geomagnética.

CAPÍTULO 6

DETEÇÃO DA RADIAÇÃO CÓSMICA

A existência de radiação, sua natureza, intensidade e energia são medidas por detetores de radiação apropriados. No detetor ocorre a interação da radiação que é, geralmente, transformada num sinal elétrico possível de ser analisado por diversos meios eletrônicos. Os detetores mais empregados são os detetores baseados na ionização gasosa, os cintiladores e os detetores semicondutores. Utiliza-se também combinações de tais detetores com dispositivos eletrônicos adequados e outros tipos de sistemas de detecção para fins especiais.

6.1 - DETETORES CONVENCIONAIS

6.1.1 - DETETORES BASEADOS NA IONIZAÇÃO GASOSA

Dentre os detetores de radiação que empregam câmaras de gás, podem-se citar as câmaras de ionização, os detetores proporcionais e os detetores Geiger-Müller. Estes foram os primeiros a serem desenvolvidos mas continuam ainda sendo muito utilizados. Todos eles funcionam a partir da ionização do gás contido em uma câmara. Em geral, têm-se um cilindro condutor cheio de gás, ou mistura de gases, a uma pressão relativamente baixa e um fio coaxial bem isolado das paredes do cilindro. Aplica-se uma diferença de potencial entre a parede do cilindro e o eletrodo central, de acordo com a Figura 6.1. Supõe-se que alguma ionização ocorra no gás por causa da passagem de uma partícula carregada. Cada par de íons consiste em um íon positivo e um elétron, e deseja-se saber, para uma dada ionização, quantos pares de íons são coletados, ou quantos elétrons alcançam o eletrodo central à medida que se varia a voltagem aplicada.

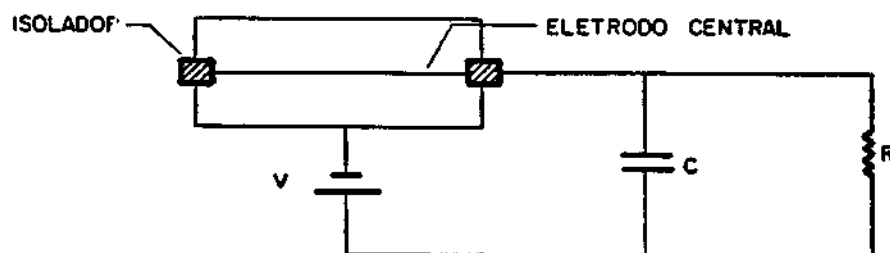


Fig. 6.1 - Detetor baseado na ionização gasosa.

FONTE: Schuch e Nordemann (1990).

Como resultado do comportamento dos íons do gás no campo eletrostático, três instrumentos de detecção foram desenvolvidos.

- A câmara de ionização, que opera em voltagens entre 10 e 200 V aproximadamente, é caracterizada pelo completo recolhimento, sem amplificação gasosa, de todos os elétrons inicialmente liberados pela passagem da partícula. Em certas condições, ela vai dar um impulso proporcional ao número destes elétrons.

- O contador proporcional, que opera na região de voltagens de 200 a 800 V aproximadamente, caracteriza-se pela multiplicação gasosa, independentemente do número de elétrons iniciais. Portanto, apesar da multiplicação gasosa ser utilizada, o impulso é sempre proporcional à ionização inicial. O uso deste contador permite tanto a contagem como a determinação da energia das partículas que não produzem íons suficientes para fornecer um impulso detetável na câmara de ionização.

- O contador Geiger-Müller funciona na região de operação entre 900 e 1300 V aproximadamente. Os pares de íons produzidos poderão ser acelerados se o campo elétrico for grande, produzindo novos pares de íons. Esses novos pares podem estar num estado excitado, no qual não podem permanecer indefinidamente, e retornam então ao estado fundamental emitindo fótons. Esses fótons podem, por sua vez, arrancar elétrons do catodo, por efeito fotoelétrico. Esses elétrons produzem

os mesmos efeitos de uma partícula carregada incidente. Essa avalanche, iniciada por uma radiação ionizante, espalha-se ao longo do detector. Os elétrons, sendo mais leves, propagam-se mais rapidamente do que os íons positivos, os quais, aglomerados junto ao anodo, vão formando uma capa que constitui uma blindagem eletrostática. Com isto, o potencial entre os eletrodos diminui e não existe mais campo elétrico suficiente para acelerar os elétrons, cessando, portanto, a descarga. A carga constituída pelos íons positivos move-se em direção ao catodo. Ao chegar ao catodo, os íons podem arrancar elétrons secundários de sua superfície, os quais começarão nova avalanche, independente da radiação incidente. Para evitar isto, pode-se usar um circuito eletrônico ou um gás poliatômico que servem para extinguir a avalanche. Como os tamanhos de pulso no tubo GM são independentes da ionização primária, não se pode medir a energia das partículas, nem é possível discriminar tipos diferentes de radiações através da sensibilidade do circuito eletrônico.

6.1.2 - DETETORES CINTILADORES

A partir de 1947, o uso de contadores de cintilação foi muito ampliado por causa da descoberta de novos fósforos que são também sensíveis aos raios beta e gama, e do desenvolvimento de tubos fotomultiplicadores muito eficientes. O tubo fotomultiplicador converte as cintilações do fósforo em impulsos elétricos amplificados, que podem ser contados ou analisados com equipamento eletrônico conveniente. O moderno contador de cintilação pode detetar muitos milhões de flashes por segundo e ser usado com radiações intensas. Um diagrama esquemático de um tubo fotomultiplicador é mostrado na Figura 6.2. A luz vinda do fósforo atinge o catodo, que é usualmente de antimônio ou césio, e libera elétrons, por efeito fotoelétrico. O tubo tem diversos eletrodos chamados dinodos, aos quais são aplicados potenciais progressivamente maiores. Os fotoelétrons são acelerados num campo eletrostático entre o catodo e o primeiro dinodo, que está num potencial positivo em relação ao do catodo.

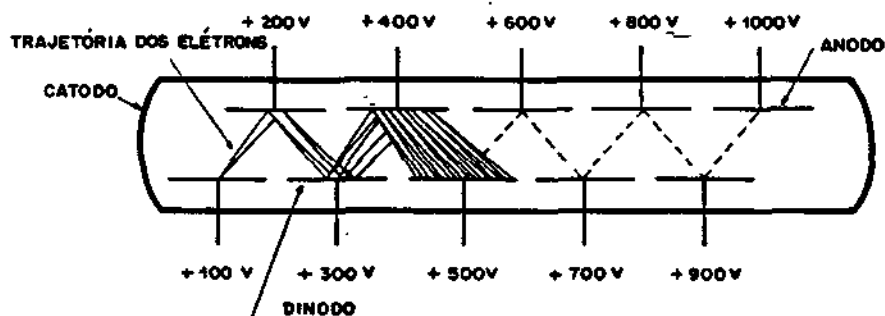


Fig. 6.2 - Tubo fotomultiplicador.

FONTE: Schuch e Nordemann (1990).

Um diagrama esquemático do detector de cintilação é mostrado na Figura 6.3. A radiação interage com o detector, o que resulta na ionização e excitação do detector e, portanto, na produção de luz. Esta luz é transmitida eficientemente para o fotocatodo da válvula fotomultiplicadora, diretamente ou por meio de reflexão, causando a emissão de fotoelétrons do fotocatodo. Esses elétrons são, por sua vez, acelerados e focalizados nos dinodos da válvula através de um campo elétrico. Cada elétron arranca de dois a três novos elétrons. Portanto, o ganho de corrente para uma fotomultiplicadora típica de dez estágios é da ordem de 10^6 . Quando os elétrons chegam ao anodo, a corrente flui através de uma resistência e causa uma queda na tensão, através de um capacitor.

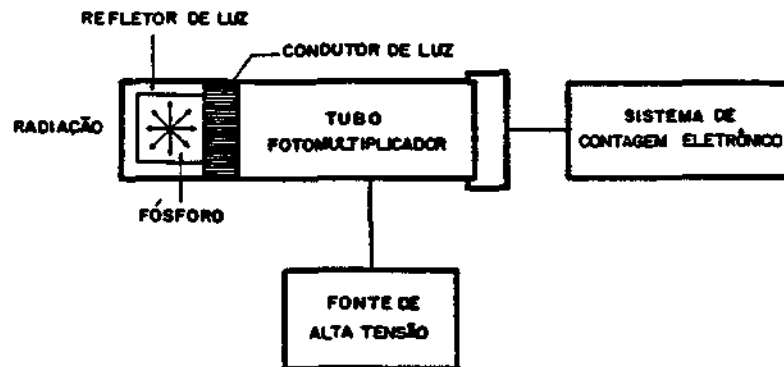


Fig. 6.3 - Diagrama esquemático de um detector de cintilação.

FONTE: Schuch e Nordemann (1990).

A contribuição mais importante da moderna técnica de cintilação é no campo de detecção de radiação gama. A alta densidade dos cintiladores sólidos lhes dá maior poder de absorção para fótons do que os detectores a gás. É razoavelmente fácil preparar cristais cintiladores grandes o suficiente para absorver completamente uma grande fração dos raios gama incidentes. Assim, é possível medir não somente a quantidade de raios gama, mas também o espectro de energia e as intensidades relativas. Para ser efetivo na detecção da radiação gama, um cintilador deve ter alta densidade e alto número atômico. Essas exigências são melhor satisfeitas pelos cintiladores inorgânicos. Embora haja muitos cintiladores inorgânicos, somente alguns crescem até atingir um tamanho grande e, ainda, possuir transparência para a luz. O iodeto de sódio ativado com 0,1% de tálio é utilizado largamente. A luz emitida tem sua intensidade máxima de $4100 \text{ \AA}$, comprimento de onda compatível com as respostas de fotomultiplicadoras padrões. A montagem de um cristal de NaI(Tl) na fotomultiplicadora envolve considerações sobre a deliquescência do cristal, suas propriedades óticas e cuidados para evitar espalhamento de raios gama.

Nos cintiladores orgânicos o processo de cintilação aparece devido às transições na estrutura dos níveis de energia de uma simples molécula e, conseqüentemente, pode ser observada a partir de uma dada espécie molecular independente do seu estado físico. Por exemplo, o antraceno fornece fluorescência como um material sólido policristalino, como vapor, ou como parte de uma solução. Este comportamento está em contraste marcante com os cintiladores inorgânicos cristalinos, tal como o iodeto de sódio, que requer um retículo cristalino regular como base para o processo de cintilação. Uma útil categoria de cintiladores é produzida pela dissolução de um cintilador orgânico num solvente apropriado. Os cintiladores líquidos geralmente são comercializados em recipientes de vidro selados e podem ser manuseados da mesma maneira que os cintiladores sólidos. Em certas aplicações são necessários detetores de grandes volumes, com dimensões lineares da ordem de metros. Neste caso, o cintilador líquido é geralmente a única escolha prática do ponto de vista econômico. Em muitos líquidos, a presença de oxigênio dissolvido é um forte agente de extinção da cintilação, levando a uma redução substancial da eficiência de fluorescência; assim, é necessário que a solução esteja selada num volume fechado do qual a maior parte do oxigênio é retirado. Os cintiladores líquidos são também amplamente aplicados na contagem de atividade de materiais que podem ser dissolvidos na solução de cintilação. Desta forma, todas as radiações emitidas pela fonte passam imediatamente através de alguma porção do contador, e a eficiência de contagem pode ser quase 100%. Tal técnica é amplamente usada para contagem de baixos níveis de atividade beta como a proveniente do carbono-14 ou trítio.

Se o cintilador orgânico é dissolvido num solvente que pode ser subseqüentemente polimerizado, o equivalente a uma solução sólida pode ser produzida. O exemplo mais comum é um solvente que consiste em "styrene", o qual é então polimerizado para formar um plástico sólido. Devido à facilidade com que eles podem ser fabricados, os plásticos têm-se tornado uma forma extremamente útil de cintiladores orgânicos. Cintiladores plásticos são disponíveis

comercialmente em inúmeras formas e tamanhos padronizados de barras, cilindros ou placas planas. Como o material é relativamente barato, os plásticos são geralmente a única escolha prática quando os cintiladores sólidos de grandes volumes são necessários. Nestes casos, a absorção própria de luz pelo cintilador pode não ser desprezível e alguma atenção deve ser dada às propriedades de atenuação do material. A distância na qual a intensidade será atenuada por um fator de dois pode ser maior que muitos metros embora comprimentos de atenuação muito menores são observados em certos cintiladores plásticos.

6.1.3 - DETETORES SEMICONDUTORES

A melhor resolução em energia possível, atualmente, é fornecida por detetores semicondutores. Os portadores básicos de informações são pares elétron-lacuna criados ao longo do caminho percorrido pela partícula carregada (radiação primária ou partícula secundária) dentro do detetor. O par elétron-lacuna criado é, de certa forma, análogo ao par de íons criados em detetores a gás. Seu recolhimento, pelos eletrodos, após sua locomoção num campo elétrico aplicado, gera o sinal elétrico básico do detetor. Em adição à superior resolução em energia, os detetores de estado sólido (ou detetores de diodo semicondutores) possuem outras qualidades desejáveis. Entre elas estão a densidade elevada, em comparação com a dos gases, as características que permitem uma regulação relativamente rápida e uma espessura efetiva que pode ser variada para satisfazer os requisitos da aplicação. As desvantagens podem incluir a limitação do tamanho, ao qual é associado a capacidade equivalente do detetor, e a degradação do desempenho por danos da radiação. Dos materiais semicondutores disponíveis, o silício predomina nos diodos detetores usados principalmente em espectrometria de partículas carregadas. O germânio, por possuir uma massa específica maior, é mais usado para medidas de raios gama.

Os detetores semicondutores são usados tanto para contagens como para análise da energia de partículas carregadas e fótons. Um detetor semicondutor é, em essência, um diodo semicondutor. É formado pela união de um material do tipo n a um material do tipo p, como mostrado na Figura 6.4. No material do tipo p, as cargas negativas estão fixadas na estrutura do cristal e os buracos se movem sobre a influência de qualquer campo elétrico aplicado. No material do tipo n, ao contrário, as cargas positivas estão fixas e os elétrons estão livres para se deslocarem.

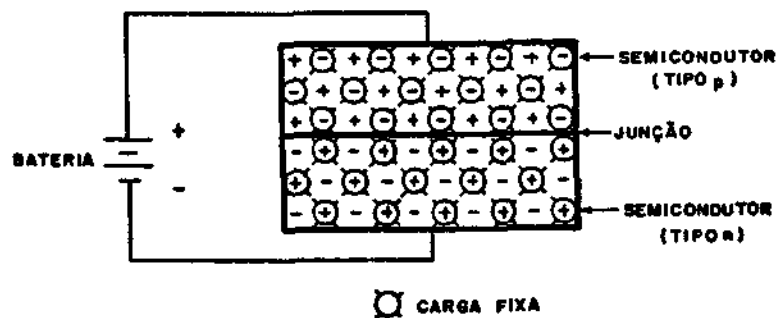


Fig. 6.4 - Diagrama esquemático de um diodo semicondutor.

FONTE: Schuch e Nordemann (1990).

Quando é aplicado um potencial elétrico os buracos e os elétrons se movem para a junção do diodo, onde ocorre sua recombinação e flui a corrente. Quando, porém, se reverte o potencial externo aplicado, os elétrons e os buracos se afastam da junção, não ocorrendo recombinação nem fluxo de corrente. A região nas vizinhanças da junção fica então esvaziada de portadores de carga pois eles se afastam até criar uma força contra-eletromotriz igual ao potencial externamente aplicado, conforme a Figura 6.5. Assim, usa-se como detetor de partículas carregadas um diodo semicondutor com polarização reversa. Quando uma partícula ionizada passa na região de depleção, ela produz pares elétron-buraco, os quais se movem para seus respectivos eletrodos dando origem a um fluxo momentâneo de corrente.

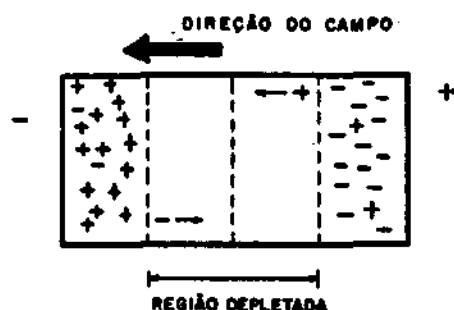


Fig. 6.5 - Detetor de silício.

FONTE: Schuch e Nordemann (1990).

Assim, vê-se que os detetores semicondutores funcionam de maneira análoga às câmaras de ionização, porém, o tempo de coleção de pares é muito rápido comparado com o recolhimento de íons. Nos detetores semicondutores são produzidos pares elétron-buraco, enquanto nos detetores a gás têm-se elétrons e íons pesados positivos. A mobilidade do elétron no silício é da ordem de $1400 \text{ (cm/s)/(V/cm)}$ e a do buraco é de $500 \text{ (cm/s)/(V/cm)}$. Outra razão para este rápido tempo de coleção é a pequena espessura de material semicondutor necessária para freiar uma partícula carregada em comparação com a distância relativamente grande entre os eletrodos de uma câmara de ionização. Outra vantagem é a eficiência de produção de pares, que no silício exige 3,5 eV por par, sendo 10 vezes menor que nas câmaras de ionização. Assim, a eficiência dos detetores semicondutores, para produção de portadores de carga elétrica, é 10 vezes maior. Para efeitos práticos, se a partícula incidente perder sua energia antes de chegar à região de depleção, não se terá a coleção de carga correta, nem a indicação correta da energia. Usa-se então, normalmente, uma camada n muito fina, conforme a Figura 6.6.

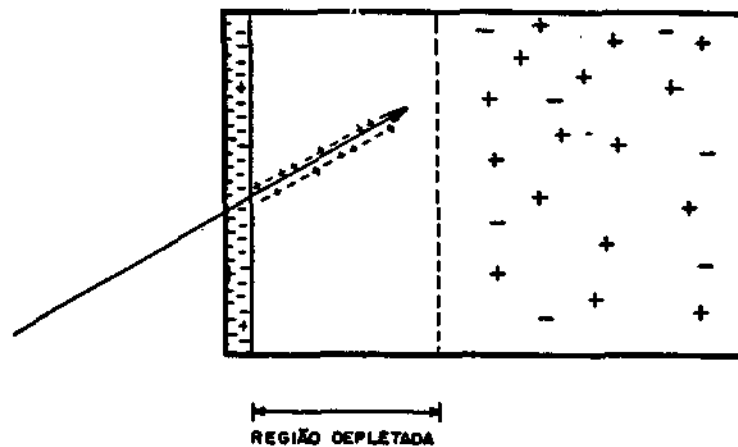


Fig. 6.6 - Detetor de silício com a camada n reduzida.

FONTE: Schuch e Nordemann (1990).

Existem inúmeros tipos de detetores semicondutores. Entre eles os mais utilizados são os detetores de barreira de superfície, os detetores de lítio difundido, Ge(Li), e os detetores de germânio de alta pureza, HPGe.

6.2 - EMULSÕES NUCLEARES

Emulsões nucleares especiais têm sido desenvolvidas para o estudo de traços nucleares. Seu conteúdo de brometo de prata corresponde a 80% de seu peso. Seus grãos possuem diâmetros de 0,1 a 0,6 μ m e suas espessuras são da ordem de 500 μ m, para permitir o registro de todo o traço, de muitas partículas. A espessura e a composição não usual requerem o uso de procedimentos mais elaborados para assegurar uniformidade. Os traços de ionização são visíveis ao microscópio. O comprimento do traço pode ser usado como uma medida da energia da partícula e a sua densidade serve para distinguir radiações de diferentes dE/dx . Em algumas emulsões, um valor mínimo de dE/dx é necessário para o desenvolvimento de um traço visível. Assim, uma discriminação pode ser obtida contra radiações fracamente ionizantes.

Outras formulações produzirão traços para partículas com baixo dE/dx , incluindo elétrons rápidos.

Embora com uso limitado a situações nas quais um sinal imediato não seja necessário, as emulsões nucleares oferecem certas vantagens. Não é necessário equipamentos associados, de forma que elas podem ser usadas em experimentos remotos onde os métodos convencionais não são aplicáveis. O traço pode ser armazenado por prolongados períodos, como uma imagem latente dentro da emulsão. Uma vez revelada, produz um registro permanente. Emulsões carregadas com núcleos alvos especiais, tais como boro ou urânio, podem se tornar sensíveis a nêutrons térmicos. Nêutrons rápidos induzem traços pelo registro de prótons de recuo gerados dentro da própria emulsão.

As emulsões nucleares têm encontrado muitas aplicações em pesquisa de raios cósmicos, devido ao seu pequeno tamanho e ao longo período de sensibilidade, sendo facilmente adaptáveis a vãos de balões. Em adição, os detalhes das partículas registradas, que tornam possível sua identificação, são particularmente vantajosos em situações nas quais um grande número e tipos de partículas estão envolvidas, como no caso das radiações cósmicas. A Figura 6.7 apresenta os traços deixados, em uma emulsão nuclear, por núcleos relativísticos.

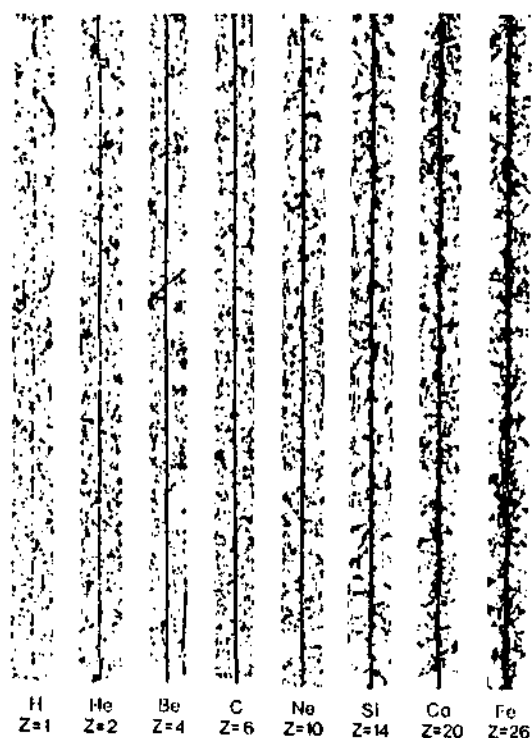


Fig. 6.7 - Traços em emulsões nucleares deixados por núcleos relativísticos com $Z = 1$ a $Z = 26$, obtidos a partir de vôos de balões a grandes altitudes e por exposições em satélites. Estes traços, correspondentes a partículas primárias, mostram menos de 0,5 mm de percurso. Supõe-se que a perda de energia por ionização, que leva à ativação dos grãos de brometo de prata na emulsão, é $\propto Z^2$. Quando esta dependência não puder ser estabelecida pelo exame minucioso dos traços, sabe-se que o escurecimento aumenta mais rapidamente do que $\propto Z$.
FONTE: Wilson (1976).

6.3 - SISTEMAS ESPECIAIS DE DETECÇÃO

6.3.1 - MÉTODO DE ANTICOINCIDÊNCIA

Como forma de eliminar radiações indesejáveis da resposta do detetor, usam-se sistemas de blindagem de antikoincidência. O detetor primário é rodeado por um segundo detetor (ou arranjo de detetores), e o sinal originado no detetor primário só é aceito quando ele não for acompanhado por um pulso coincidente no detetor externo. Num exemplo de aplicação, a fonte a ser contada é orientada e blindada de forma a produzir interações somente no detetor primário. Assim, no mais simples caso, os pulsos não são afetados se ocorrer absorção completa da radiação da fonte dentro de detetor primário. Entretanto, as radiações cósmicas penetrarão facilmente em ambos os detetores e serão eliminadas da resposta do detetor primário através do sistema de antikoincidência. Como vantagem adicional, a blindagem antikoincidente também suprimirá o contínuo Compton do espectro fornecido, porque um espalhamento Compton de raios gama, a partir do detetor primário, também interagirá com o detetor em sua volta. Como arranjo de antikoincidência pode-se considerar um detetor de Ge(Li) rodeado por um cintilador de NaI(Tl), um grande cintilador plástico, um anel de tubos Geiger ou quaisquer outras configurações de detetores.

6.3.2 - MÉTODO DE COINCIDÊNCIA

A maior parte do contínuo Compton de um espectro consiste em um simples espalhamento Compton seguido pelo escape do raio gama espalhado. Em eventos de energia total, a energia dos raios gama típicos sofrem múltiplos espalhamentos Compton seguidos por absorção fotoelétrica. A razão pico para Compton pode ser aumentada exigindo que um evento a ser registrado corresponda a mais do que uma interação dentro do detetor antes de sua aceitação. Esta seleção é usualmente realizada pela subdivisão do detetor em muitos segmentos (ou considerando vários detetores independentes e adjacentes),

procurando pulsos coincidentes de dois ou mais dos segmentos independentes. Quando são encontradas coincidências, os pulsos de todos os segmentos do detetor são somados e registrados. O espectro resultante é constituído somente de picos de energia total caindo acima do contínuo Compton que é grandemente suprimido, não apresentando o degrau abrupto.

Ainda, para medir um radioisótopo que emite, em coincidência, mais de uma radiação distinta, o background pode ser grandemente reduzido através do uso de técnicas de coincidência. Um exemplo comum é o decaimento beta que prontamente emite, pelo menos, um raio gama. Um arranjo apropriado pode ser constituído de detetores separados de partículas beta e raios gama, com a fonte posicionada de forma a maximizar as taxas de interações correspondentes em cada detetor. Por exigência de coincidência entre os pulsos dos dois detetores, muitos eventos de background podem ser eliminados porque eles ocorrerão em somente um detetor em cada momento.

6.4 - DETETORES DO TIPO TELESCÓPIO

Quando detetores cintiladores ou Geiger são dispostos linearmente um sobre o outro, pode-se determinar a direção de incidência da partícula ou fóton. Em tais telescópios, uma partícula é registrada somente quando produz pulsos em coincidência em todos os elementos. A combinação de cintiladores de pequenas espessuras, intercalados com absorvedores, e um espesso cintilador pode fornecer todos os dados necessários para determinar tipo, fluxo, energia e direção de chegada das partículas. A Figura 6.8 apresenta um esquema simplificado deste tipo de detetor.

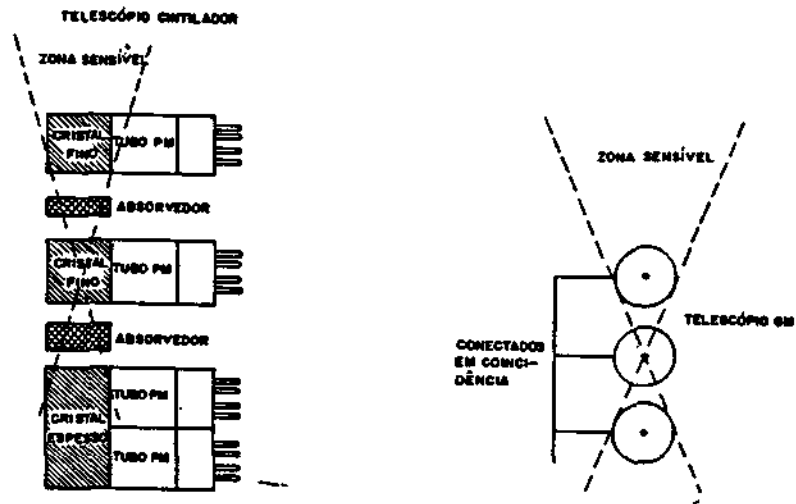


Fig. 6.8 - Esquema simplificado de telescópios constituídos de detetores cintiladores e Geiger Müller (GM).

FONTE: Corliss (1968).

Os instrumentos usados nos experimentos de astronomia nuclear de baixa energia são, essencialmente, telescópios contruídos com detetores de raios gama. Esses telescópios são compostos por um ou vários detetores centrais (principais), circundados por outros detetores externos, formando o efeito de telescópio com uma determinada abertura angular. A espessura dos detetores externos assegura uma blindagem eficiente contra a incidência de partículas carregadas diretamente nos detetores centrais. Geralmente, os detetores centrais funcionam em anticoincidência com os detetores externos. Este modo de operação contribui para diminuir o efeito dos raios gama de alta energia, que conseguem atravessar a blindagem nos espectros de raios gama medidos pelos detetores centrais.

No caso de observações a bordo de balões estratosféricos, todos os equipamentos de bordo, em geral sensores de pressão e temperatura, sensores de altitude, telemetria e telecomando, inclusive baterias elétricas, o próprio telescópio e sua eletrônica associada, são acondicionados dentro de uma estrutura de alumínio

(gôndola), que é acoplada ao balão. O telescópio é, comumente, fixado a uma montagem que permite fazer apontamento na direção da fonte. Um sistema de barras inerciais mantém a estabilidade da gôndola, com respeito à rotação sobre si mesma. Os sensores de atitude (solar, estelar ou magnético) são, em geral, utilizados para corrigir automaticamente a direção do apontamento do telescópio e o movimento das barras inerciais. A telemetria de bordo é responsável pela transmissão e recepção de sinais entre a posição do balão e a estação de telemetria de terra. O telecomando de bordo é utilizado para executar mensagens transmitidas da Terra. As baterias asseguram energia elétrica para todos os equipamentos. Em vista das fracas intensidades dos fluxos de raios gama cósmicos, os experimentos a bordo de balões são planejados para realizar observações durante o maior intervalo de tempo possível. Os tempos de voo são, geralmente, limitados pela disponibilidade de energia elétrica a bordo, velocidade dos ventos, alcance da telemetria e condições dos locais para recuperação da gôndola no fim do experimento

Os detetores mais usados nos experimentos de astronomia de raios gama de baixa energia têm sido de dois tipos, que se diferenciam, basicamente, pelos detetores centrais utilizados. Um usa cristais de NaI(Tl) de grandes dimensões como os detetores centrais. Em ambos os tipos, os detetores centrais (principais) são circundados por um sistema de blindagem ativa (anticoincidência) de cintiladores orgânicos ou inorgânicos, que visa: realizar o efeito de telescópio, diminuir a contribuição do background de raios gama locais e suprimir a contribuição do efeito Compton no espectro medido. O primeiro tipo desses telescópios, com cristais de NaI(Tl) como detetores principais, é indicado para a detecção de fluxos contínuos de raios gama e, também, de linhas de raios gama, que tenham larguras de pico de várias dezenas de keV. O segundo tipo, que utiliza diodos de germânio, é indicado para a detecção de linhas de raios gama com larguras de pico estreitas.

A Figura 6.9 mostra uma visão esquemática de um telescópio de raios gama de baixa energia, construído pelo grupo da Universidade de New Hampshire para voar a bordo de balão. O detetor central consiste em um conjunto de sete cristais NaI(Tl). O sistema de blindagem em antikoïncidência é constituído, lateralmente, por pequenos cristais de NaI(Tl), imersos em óleo silicone e acondicionados dentro de recipientes de alumínio. Um cristal de NaI(Tl) de 8" por 4" fecha o fundo do sistema de antikoïncidência. A abertura do telescópio é protegida contra a incidência de partículas carregadas, por um cintilador plástico de 1,3 cm de espessura. Dados obtidos com este telescópio durante um vôo a bordo de balão em 21-22 de novembro de 1977, a partir de Alice Springs, Austrália, permitiram estabelecer o limite superior do fluxo como $8,1 \times 10^{-4}$ fótons $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, para a linha de desexcitação do O^{16} (6,13 MeV), proveniente da direção do centro galáctico.

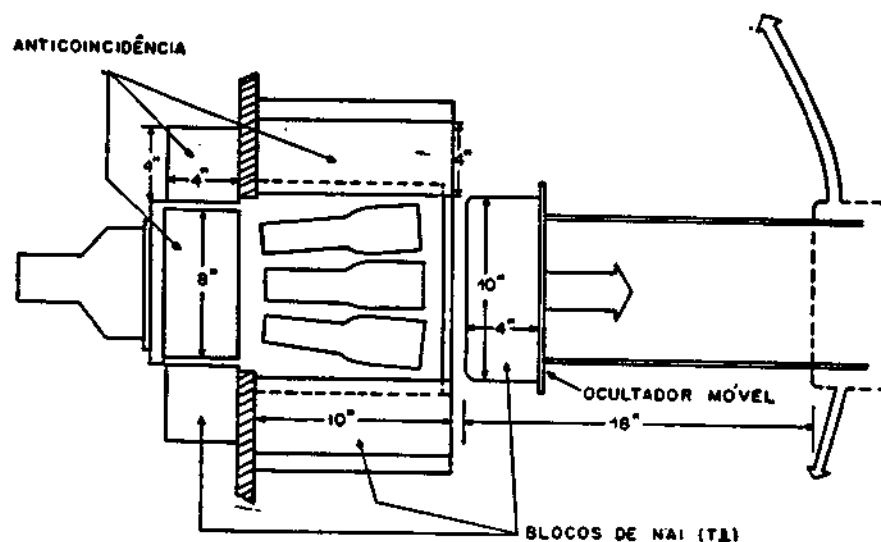


Fig. 6.9 - Visão do telescópio de raios gama da Universidade de New Hampshire.

FONTE: Da Costa (1981).

Um telescópio semelhante ao descrito acima, que também utiliza vários cintiladores inorgânicos, pode ser utilizado a bordo de satélites para observar, por exemplo, raios gama solares.

Há, também, um tipo muito peculiar de instrumento que é, geralmente, conhecido pela denominação de telescópio Compton. Estes instrumentos usam, normalmente, dois conjuntos de cintiladores, que perfazem grandes áreas, de cerca de 10^4 cm^2 , separados por uma distância de 100 a 120 cm. O princípio básico de detecção de um raio gama com energia E , por este tipo de telescópio, é a exigência de que o raio gama espalhado E' , pelo efeito Compton em um dos cintiladores do primeiro conjunto (conversor), seja detetado, também, por um dos cintiladores do segundo conjunto (absorvedor). As técnicas de tempo de voo, de coincidência retardada, e de discriminação da forma dos pulsos são usadas para rejeitar os eventos provocados por nêutrons. A Figura 6.10 apresenta um esquema simplificado deste tipo de detetador.

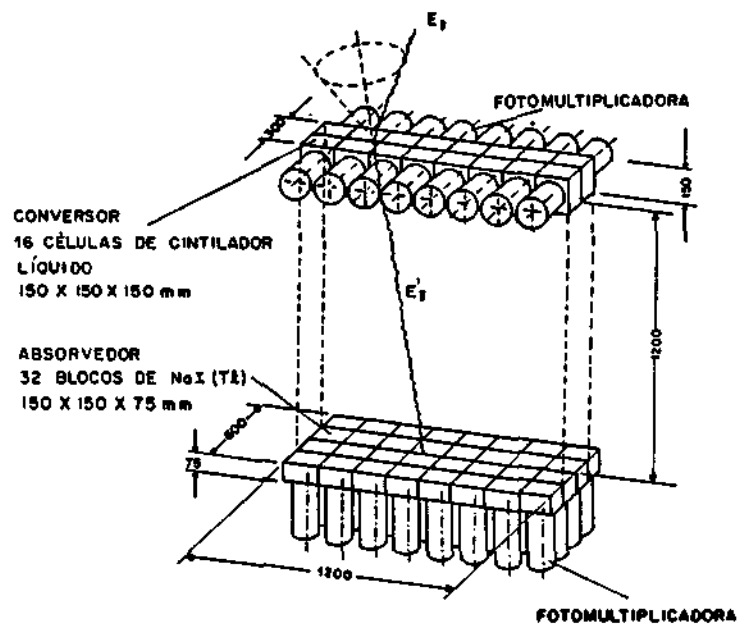


Fig. 6.10 - Esquema simplificado do telescópio Compton do Instituto Max-Planck.

FONTE: Da Costa (1981).

6.5 - DETEÇÃO DE CASCATAS DE RADIAÇÃO CÔSMICA SECUNDÁRIA

Quando raios cósmicos primários como prótons, núcleos carregados ou raios gama atingem a atmosfera superior, eles iniciam uma cascata de partículas secundárias. Se o raio cósmico primário for um próton ou núcleo mais pesado, a cascata gerará numerosos píons produzidos na colisão com os núcleos atmosféricos. Muitos dos píons decaem para múons, que podem penetrar consideráveis profundidades de ar, ou mesmo rocha, porque os múons, ao contrário dos píons, não são hádrons e conseqüentemente são impróprios para interações nucleares. Se, de outra forma, a partícula do raio cósmico primário é um fóton, a cascata de partículas secundárias deve se constituir quase que inteiramente de elétrons, pósitrons e fótons, a partir de produção de pares e interações "bremsstrahlung" com os campos coulombianos dos núcleos da atmosfera. A cascata eletromagnética contém uma ordem de magnitude a menos de múons.

Raramente estas cascatas de raios cósmicos secundários, hadrônica ou eletromagnética, possuem energia suficiente para alcançar o solo. Isto requer um próton ou fóton primário de, pelo menos, 10^{14} eV para ativar um conjunto de detetores de partículas ao nível do mar.

Prótons ou gamas com energias de cerca de 10^{12} eV, embora não possam alcançar o solo, são detetados por telescópios de radiação Cerenkov, que funcionam em noites escuras sem núvens. Como as partículas secundárias energéticas excedem a velocidade de luz na atmosfera superior, elas geram um feixe estreito de luz Cerenkov. Um telescópio é essencialmente um conjunto de espelhos com tubos fotomultiplicadores sensíveis em seus focos. Devido ao fato de o feixe estreito de luz Cerenkov ser altamente direcional, ocorre somente cerca de um grau de desvio da direção de incidência da radiação primária. Assim, o telescópio Cerenkov pode ser utilizado para detetar fontes pontuais, podendo se ver a luz no solo, em cerca de 100 m da direção original de incidência da radiação primária.

Arranjos de detetores para cascatas extensas de radiação secundária (extensive-air-shower array), em contraste, usualmente possuem áreas de coleção muito maiores, direcionados para todo o céu ao mesmo tempo, dia e noite. A direção da cascata é determinada eletronicamente pelo tempo diferencial de chegada da cascata de partículas em diferentes partes do conjunto de cintiladores no chão. Um telescópio Cerenkov pode, em princípio, detetar raios cósmicos primários com energias bem acima de 10^{12} eV, mas suas necessidades de observação e área limitada de coleção de luz o tornam impraticável quando cresce o espectro de energia dos raios cósmicos.

Um exemplo de telescópio de luz Cerenkov, o Fred Lawrence Whipple no Arizona, Figura 6.11, consiste em muitos espelhos reunidos em um grande prato que focaliza a luz num conjunto de tubos fotomultiplicadores.

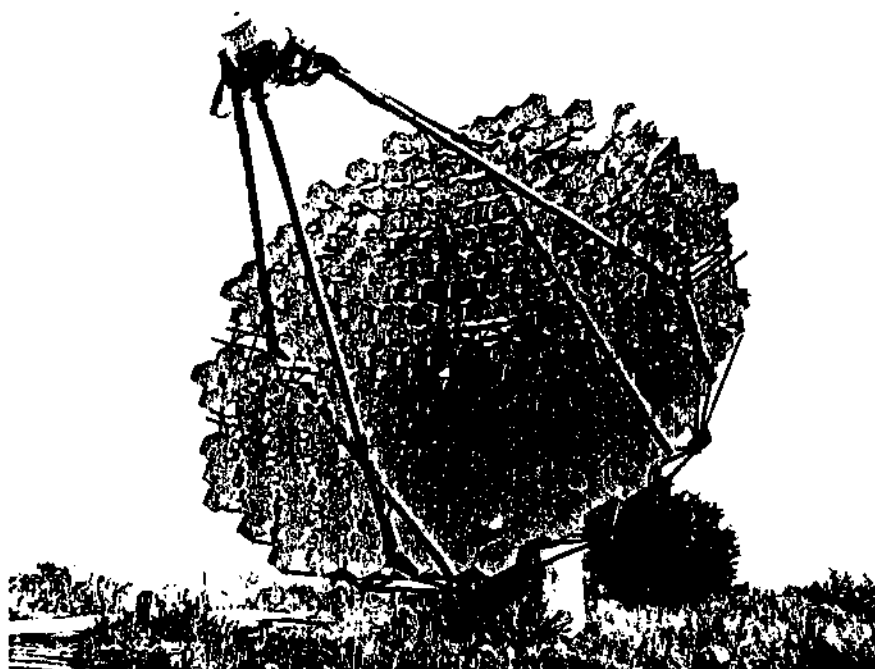


Fig. 6.11 - Telescópio de luz Cerenkov usado no Observatório "Fred Lawrence Whipple", no Arizona. Consiste num refletor de 10 m de diâmetro, com 248 espelhos que focalizam a luz num arranjo hexagonal de 37 fototubos.

FONTE: Mackeown e Weeks (1985).

Tais dispositivos, além de detetar a luz Cerenkov, mapeiam sua intensidade, de acordo com a Figura 6.12.

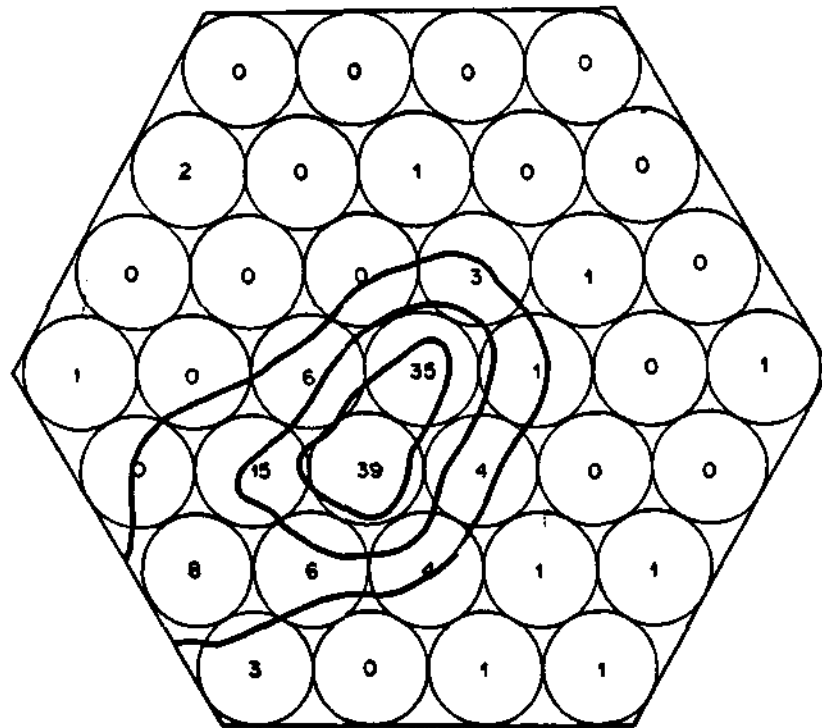


Fig. 6.12 - Mapa da luz Cerenkov, de uma cascata de raios cósmicos secundários, produzido pelo refletor de 10 m do Observatório "Fred Lawrence Whipple". Os círculos representam os fototubos. Os números são proporcionais à intensidade da luz registrada por cada fototubo. As linhas são contornos de intensidade. A partir do mapa, o eixo da cascata e a direção de chegada dos raios cósmicos podem ser calculados. Neste caso, o eixo da cascata é paralelo ao eixo do detetor e distanciado dele em direção ao lado esquerdo inferior.

FONTE: MacKeown e Weeks (1985).

Como exemplo de um conjunto de detetores para detetar cascatas secundárias de raios cósmicos, pode-se citar o LEDA (Large Experiment for Detecting Air-Shower) localizado no Macdonald College, filiado a McGill University, aproximadamente 40 km a oeste do centro de Montreal. De acordo com a Figura 6.13, este conjunto consiste em 19

contadores dispostos na forma de um hexágono regular, com uma cabana ao centro, para a aparelhagem eletrônica. O espaço entre os contadores é de 43 m, fixado pelos limites do terreno onde está situado. O terreno é plano (± 1 m) e não existe obstrução em qualquer direção com ângulo menor que 30° na direção vertical. Os detetores são todos idênticos, feitos de cintiladores líquidos de 1 m^2 de área e espessura nominal de 5 cm. O líquido é contido em um prato de acrílico branco com uma janela no topo, sendo visualizado de cima por um fototubo semi-esférico de 5". Toda a construção é montada numa plataforma de madeira e o sistema é protegido da luz e intempéries por uma pirâmide de aço galvanizada. O cintilador líquido é especialmente desenvolvido para permanecer claro independentemente das baixas temperaturas (-40°C) que podem ocorrer em Montreal.

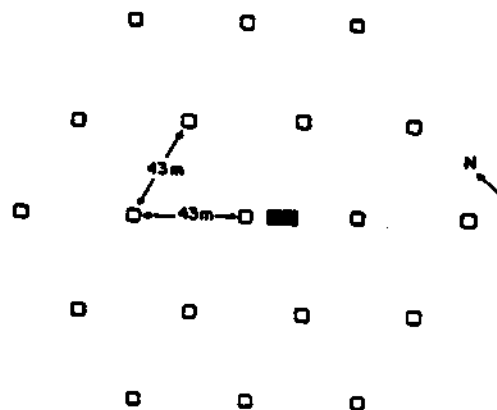


Fig. 6.13 - Vista plana do arranjo de detetores LEDA. Dezenove contadores cintiladores são dispostos numa matriz hexagonal, afastados 43m entre si. A cabana de instrumentação eletrônica é colocada no centro do arranjo. FONTE: Bultena et al. (1990).

Finalmente, na Tabela 6.1 são fornecidos alguns dados importantes para uma cascata típica iniciada com prótons de $5,6 \times 10^{15}$ eV.

TABELA 6.1 - DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA PARA CASCATAS PRODUZIDAS
POR PRÓTONS DE ENERGIAS ULTRA-ALTAS ($\times 10^{15}$ e V).

Ionização acima do nível do mar	4,4
Componente leve ($e^- + h\nu$) ao nível do mar	0,14
Hádrons (núcleons + píons) ao nível do mar	0,08
Energia dos múons ao nível do mar	0,64
Energia dos neutrinos ao nível do mar	0,33
TOTAL	5,6

FONTE: Nagle et al. (1988).

Na Tabela 6.2 as propriedades apresentadas são relevantes para cascatas induzidas por fótons: o número de elétrons no máximo da cascata, a altitude do máximo, o número de observações (a 2,5 km acima do nível do mar, neste exemplo) e a densidade a 30 m do centro da cascata. Nota-se que para cascatas com energias muito menores do que 50 TeV, a densidade é muito pequena para observações com um arranjo de detetores. Existe, entretanto, partículas suficientes no máximo da cascata para produzir um sinal que pode ser visto por um telescópio sensível à luz Cerenkov atmosférica.

TABELA 6.2 - CASCATAS INDUZIDAS POR FÓTONS COM $\theta = 30^\circ$ E
A 2,5 KM ACIMA DO NÍVEL DO MAR

Energia (TeV)	$N_{\max}$ (no.e ⁺ , -)	Altitude(max) (km)	N (2,5) (no.e ⁺ , -)	ρ (30 m) (e ⁺ , - m ⁻²)
0,1	150	11,3	~ 0	~ 0
1	1300	9,5	13	~ 0
10	$1,1 \times 10^4$	7,8	480	0,014
100	10^5	6,4	$1,5 \times 10^4$	0,6
1000	$9,6 \times 10^4$	5,5	3×10^5	14
10^4	$8,9 \times 10^6$	4,3	6×10^6	250

FONTE: Nagle et al. (1988).

CAPÍTULO 7

O ESPECTRO DA RADIAÇÃO CÔSMICA

O campo magnético da Terra deflete raios cósmicos incidentes dependendo de sua rigidez magnética e de seu ângulo de incidência. Para cada ângulo de incidência existe uma rigidez magnética crítica abaixo da qual as partículas incidentes não podem interagir com a atmosfera da Terra. A Figura 4.1 apresenta o cálculo da rigidez magnética efetiva de corte por um detector isotrópico exposto ao espectro primário de raios cósmicos no topo da atmosfera. Este corte no horizonte para o leste, para o oeste e para o zênite é mostrado em função da latitude magnética.

Para efeitos de propagação dos raios cósmicos atmosféricos, a atmosfera é considerada como uma placa horizontal com 1033 g/cm^2 de espessura, com uma escala de altura constante de 6,7 km, composta de uma única espécie nuclear com peso atômico de 14,48, um número atômico de 7,22 e um potencial de ionização de 92,8 V. Como o oxigênio e o nitrogênio estão próximos na tabela periódica, esta suposição apresenta resultados satisfatórios.

$$\text{A densidade da atmosfera é } \rho = r/H, \quad (7.1)$$

onde: ρ é a densidade em g/cm^3 ,
 r é a profundidade na atmosfera em g/cm^2 , e
 H é a escala de altura em cm.

Desde que o livre caminho médio para o decaimento de uma partícula instável é:

$$\lambda_q = P_q c c \zeta_q \rho / m_q c^2, \quad (7.2)$$

onde: λ_q é o livre caminho médio para o decaimento em g/cm^2 , da partícula do tipo q,
 m_q é a massa da partícula em MeV/c^2 ,
 P_q é o momento em MeV/c ,
 c é a velocidade da luz, e
 ζ_q é a meia-vida no referencial de repouso, em segundos.

Fazendo,

$$C_q = m_q c^2 H / c \zeta_q, \quad (7.3)$$

tem-se:

$$\lambda_q = P_q c r / C_q. \quad (7.4)$$

Cálculos de propagação dos raios cósmicos são mais usuais quando se representa a atmosfera como uma placa horizontal com profundidade, a partir do topo, em g/cm^2 . Mas, para interpretação e uso, a altitude verdadeira acima do nível do mar é freqüentemente necessária. Assim, para facilidade de uso e referência, uma curva de altitude em quilômetros versus profundidade em g/cm^2 é apresentada na Figura 7.1.

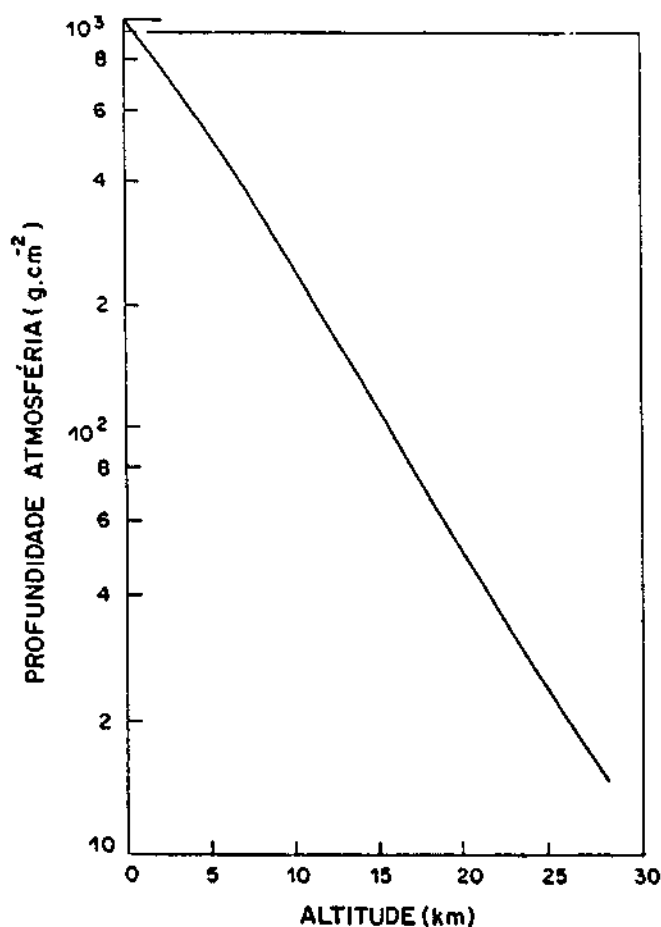


Fig. 7.1 - Profundidade atmosférica em g/cm^2 em função da altitude em km.

FONTE: O'Brien (1972).

A Figura 7.2 apresenta o espectro primário de prótons de raios cósmicos durante o período de 28 de junho a 4 de agosto de 1965, próximo ao período solar mínimo, medindo o perfil de ionização na atmosfera da Terra em sucessivas latitudes geomagnéticas. Por comparação com a energia dissipada pelos raios cósmicos em função da rigidez magnética, construiu-se o espectro primário. Na formação do espectro primário considerou-se 70% de prótons livres e 30% de prótons e nêutrons ligados.

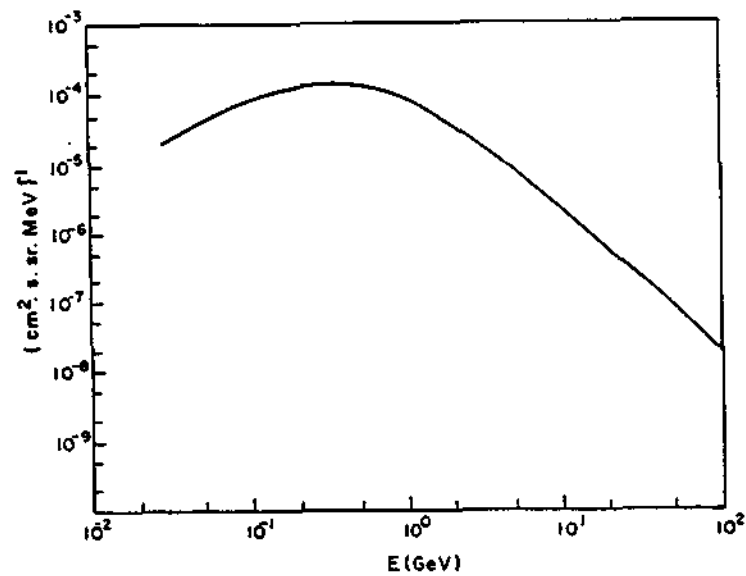


Fig. 7.2 - Medida do espectro primário de prótons de raios cômicos, obtido no período de 28 de junho a 4 de agosto de 1965.
FONTE: O'Brien (1972).

A Tabela 7.1 apresenta as medidas do espectro de energia de prótons, núcleos de He e núcleos pertencentes aos grupos M, H e VH na faixa de energia de 2×10^{12} a 10^{14} eV. As medidas foram efetuadas a bordo dos satélites COSMOS-1543 e COSMOS-1713 com um aparato de detecção denominado "SOKOL", constituído de detetores Cerenkov e calorímetros de ionização.

TABELA 7.1 - MEDIDAS DA COMPOSIÇÃO RELATIVA DE PRÓTONS, NÚCLEOS DE He E NÚCLEOS PERTENCENTES AOS GRUPOS M, H E VH, NA FAIXA DE ENERGIAS DE $2,5 \times 10^{12}$ A 10×10^{12} eV, FEITA PELO SISTEMA DE DETECÇÃO "SOKOL".

Faixa de energia TeV	>2,5 (%)	> 10 (%)
p	39 ± 3	36 ± 7
He	28 ± 2	25 ± 6
M	13 ± 1	14 ± 4
H	10 ± 1	15 ± 4
VH	10 ± 1	10 ± 3

FONTE: Ivanenko et al. (1990).

Com relação aos espectros calculados e medidos ao nível do mar, a Figura 7.3 apresenta o espectro de prótons e nêutrons e a Figura 7.4 apresenta o espectro de píons.

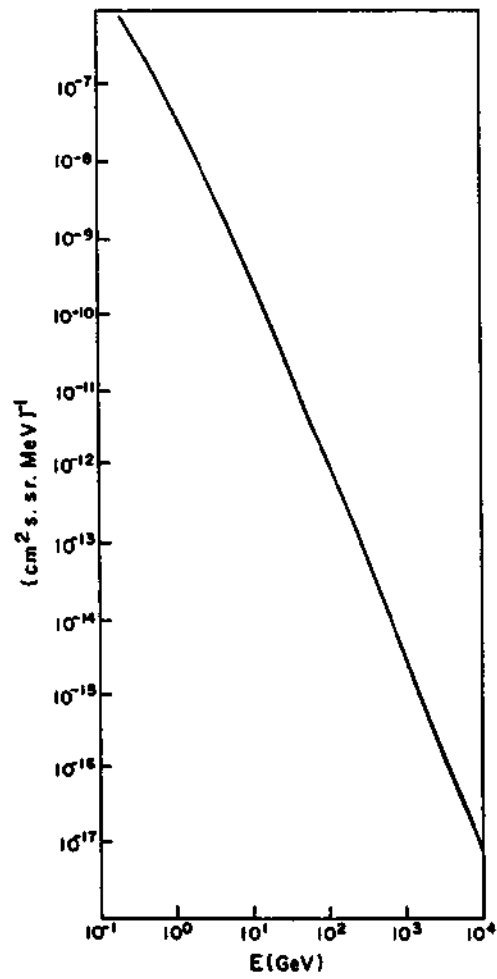


Fig. 7.3 - Componente vertical do fluxo de núcleos (prótons e nêutrons) de raios cósmicos secundários ao nível do mar.
FONTE: O'Brien (1972).

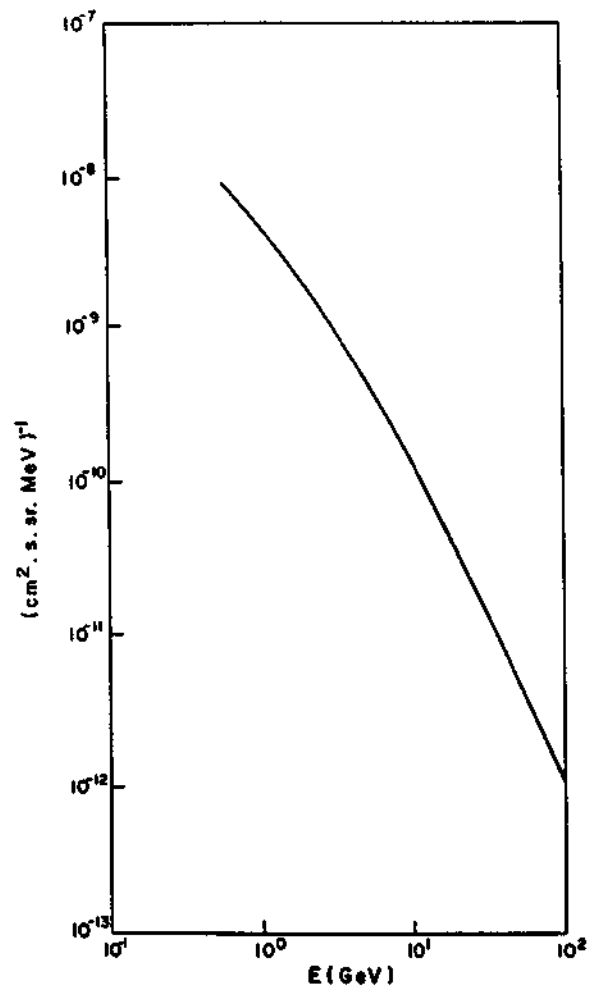


Fig. 7.4 - Componente vertical do fluxo de píons de raios cósmicos secundários ao nível do mar.

FONTE: O'Brien (1972).

O espectro de múons medido ao nível do mar para um ângulo zenital de 0° é mostrado na Figura 7.5. A concordância deste valor com os valores teóricos é muito boa na faixa de 1 a cerca de 1000 GeV. Todas as medidas e todos os cálculos foram efetuados a 57° de latitude geomagnética com rigidez magnética de corte, dada na Figura 4.1.

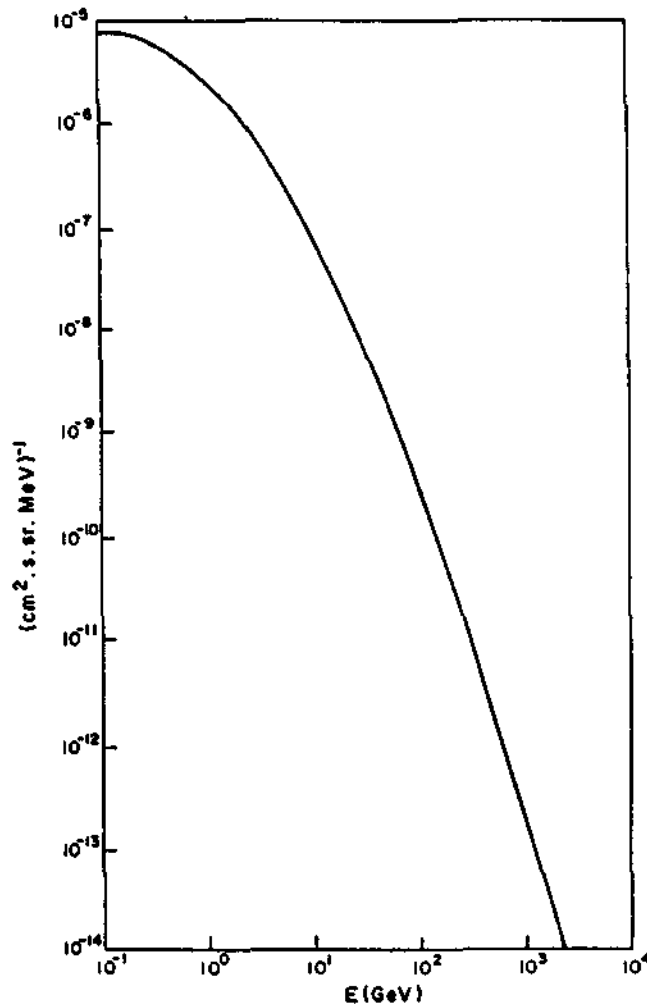


Fig. 7.5 - Componente vertical do fluxo de múons de raios cósmicos secundários ao nível do mar.

FONTE: O'Brien (1972).

As ionizações de prótons, píons e múons são calculadas pela multiplicação da distribuição de energia fornecida pelas Figuras 7.3, 7.4 e 7.5, respectivamente, pelos poderes de frenagem, "stopping-powers", aproximados. O limite mais baixo para a distribuição de energia de prótons, píons carregados e nêutrons é 100 MeV, abaixo do qual a teoria falha. Os múons podem atingir 10 MeV e, abaixo deste

valor, possuem uma contribuição muito pequena. Foi necessário usar empiricamente um limite superior de 10^4 GeV para incluir todas as contribuições de ionização.

A Figura 7.6 fornece a ionização, em unidades de I, o número de pares de íons por cm^3 nas CNTP do ar, em latitudes geomagnéticas de 55° . Neste caso, a rigidez magnética de corte foi usada. O perfil de ionização corresponde precisamente à medida do espectro da Figura 7.2 que foi usado nos cálculos. Existe uma boa concordância entre os valores experimentais obtidos por diversos pesquisadores.

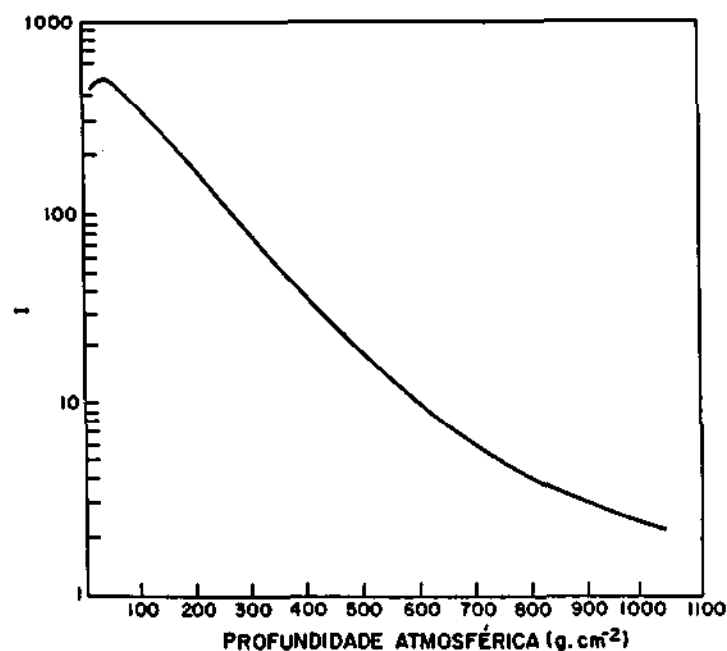


Fig. 7.6 - Perfil de ionização atmosférico de raios cósmicos a uma latitude geomagnética de 55° .

FONTE: O'Brien (1972).

A composição da ionização total é mostrada na Figura 7.7. Devido ao fato do fluxo secundário interagir diferentemente com a atmosfera, cada componente possui um diferente perfil. A dobra na curva do elétron em cerca de $850 \text{ g}/\text{cm}^2$ é uma consequência da transição

da produção devido ao decaimento do píon neutro a baixas profundidades e à produção resultante do decaimento dos múons a grandes profundidades.

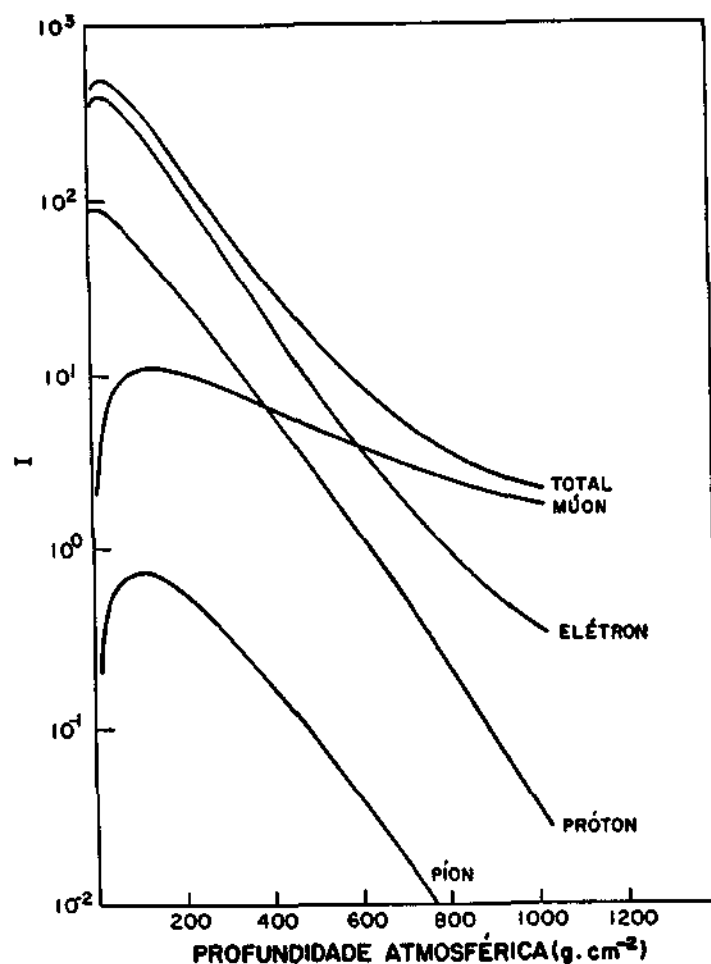


Fig. 7.7 - Perfis de ionização atmosférica dos diferentes componentes dos raios cósmicos secundários para latitude geomagnética de 55°.

FONTE: O'Brien (1972).

A Figura 7.8 mostra a ionização em duas profundidades desde 1954 e, para comparação com o nível geral de atividade solar, é fornecida a média anual do número de manchas solares. A natureza inversa entre a taxa de ionização e o número de manchas solares

apresenta grande interesse, embora este último seja um indicador bastante bruto da atividade solar.

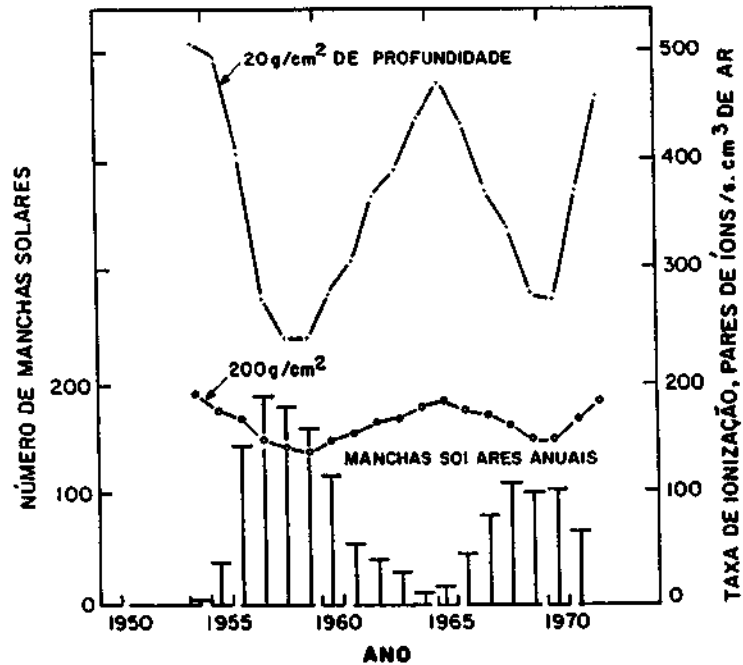


Fig. 7.8 - Taxa total de ionização de raios cósmicos a duas profundidades na atmosfera, referenciada no ar a 24° C e 74 cm de Hg. O número médio de manchas solares até 1971 é fornecido.

FONTE: Anderson (1972).

CAPÍTULO 8

EFEITOS DOS RAIOS CÔSMICOS SOBRE A ATMOSFERA TERRESTRE

A concordância entre a periodicidade das variações dos raios cósmicos galáticos e das respostas meteorológicas e climáticas nas escalas de tempo de 11 anos e de centenas de anos, e as indicações desta concordância na escala de dia a dia, tem sido discutida na literatura por 30 anos. Sobre a escala de tempo centenária, a década de 1690 na parte mais fria da "pequena idade do gelo" coincide com o pico na produção de ^{14}C e ^{10}Be devido aos raios cósmicos galáticos e com o "Mínimo de Maunder" de manchas solares que ocorreram no período de 1645 a 1715. O ^{10}Be esteve 70% acima dos níveis antes e depois do Mínimo de Maunder, de acordo com as medidas de concentrações em amostras de gelo na Groelândia.

Até o momento todas as tentativas feitas para encontrar uma ligação entre o ciclo solar e o clima da Terra falharam. Quando se observa o clima de um ano para outro, a temperatura, a pressão do ar e muitos outros parâmetros variam sem nenhuma correlação aparente com o ciclo solar. Embora alguns estudos apresentem resultados razoáveis, sob certas condições e para locais específicos, falham completamente para outras áreas. A história não muito confiável da procura de uma correlação entre o clima da Terra e o ciclo solar, tem tornado os cientistas muito cuidadosos na divulgação de novos resultados. Não se pode ainda explicar o mecanismo desta correlação e muitos se admiram de como pequenas oscilações nas propriedades de muitos ciclos solares podem exercer uma influência tão dramática no clima da Terra. Muitos pesquisadores acreditam que no futuro tal correlação ajudará a previsão do clima, quando estiver melhor compreendido o mecanismo físico da interação dos raios cósmicos com a atmosfera da Terra.

Os raios cósmicos, através da produção de pares e colisões, produzem uma certa ionização na atmosfera, com contribuição

importante na formação da ionosfera polar. O fluxo de raios cósmicos é muito maior nas calotas polares, enquanto o fluxo de radiação ultravioleta e raios X nestas regiões é bem pequena. A taxa de ionização devido aos raios cósmicos podem ser tão alta quanto muitas centenas de íons por cm^3 por segundo. Grande parte destes, entretanto, são produzidos em altitudes em torno de 30 km, onde a densidade da atmosfera é suficientemente alta para causar recombinação quase instantânea.

Um grande fluxo de raios cósmicos pode causar nas regiões polares um aumento significativo na ionização da baixa ionosfera e especialmente na camada D. Esta intensificação produzirá uma forte atenuação das ondas de rádio que passam por ela, especialmente nas baixas frequências. A forte absorção de ondas de radiofrequência produzidas pelo súbito fluxo de raios cósmicos nas regiões polares é chamada de Absorção pela Calota Polar, "Polar Cap Absorption", PCA. O nível de absorção é usualmente medida com riômetros que monitoram continuamente a intensidade dos ruídos de rádio galático ambiental, em diferentes frequências.

A maior parte dos raios cósmicos possui energia de uns poucos MeV a poucas centenas de MeV e, conseqüentemente, não possui rigidez magnética para passar através do campo magnético da Terra fora da região compreendida pela calota polar. Por esta razão, um evento PCA é um meio prático de detectar raios cósmicos ao nível do solo. Como resultado, raios cósmicos solares podem ser observados diretamente apenas com detectores acoplados a satélites.

Ocasionalmente, algumas erupções solares muito fortes produzem um fluxo significativo de raios cósmicos solares com energias maiores do que 500 MeV, que pode ser detectado com monitores de nêutrons no solo. Estes eventos raros são chamados eventos ao nível do mar ou eventos ao nível do solo. Em torno do máximo solar eles ocorrem a uma taxa de 2 a 3 por ano, mas são praticamente ausentes em torno do mínimo solar.

Foi sugerido que a origem da ionização residual na camada F₂ poderia ser parcialmente devida ao decaimento beta de nêutrons de raios cósmicos. Tomando a meia-vida do nêutron com cerca de 11,7 minutos e considerando uma densidade de nêutrons de 1 cm^{-3} , a energia do elétron em cerca de 0,5 MeV e um fator de recombinação para a camada F₂, à noite, com $2 \times 10^{-10} \text{ seg}^{-1}$, encontrou-se um valor de equilíbrio da densidade de elétrons com $2,2 \times 10^4$ elétrons por cm^3 .

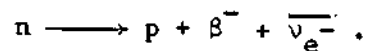
É conhecido o fato de que aumentos consideráveis no fluxo de radiação ultravioleta durante as erupções solares aumentam fortemente a ionização no lado iluminado da Terra, resultando numa deteriorização ou mesmo completa impossibilidade de comunicações de rádio em altas frequências.

As auroras são produzidas por elétrons energéticos, ~ 10 keV, e prótons, ~ 100 keV, que se precipitam da magnetosfera com fluxo da ordem de $10^{10} \text{ partículas cm}^{-2} \text{ seg}^{-1}$. A atividade auroral mostra uma forte correlação com todas as outras perturbações polares, tais como subtempestades magnéticas, absorção na calota polar (PCA), micropulsações, subtempestades ionosféricas etc. Mostra também uma boa correlação com o índice K_p e com o número de manchas solares.

A luz auroral é a soma de todos os quantums emitidos pelos átomos e moléculas excitadas, neutras e ionizadas, dos diferentes constituintes atmosféricos. A excitação destas partículas é o resultado de suas colisões com prótons energéticos e elétrons que espiralam para dentro da atmosfera ao longo das linhas do campo magnético solar. A mais forte linha espectral da aurora visível é a linha 5577 Å do oxigênio neutro. Esta linha está na região amarelo-verde do espectro e fornece à aurora polar sua cor mais familiar. Outra linha proeminente é o duplete, 6300 Å e 6364 Å, do oxigênio neutro, que ocorre na região vermelha do espectro.

Finalmente, pode-se considerar a formação dos cinturões de radiações que envolvem a interação entre a radiação cósmica e a atmosfera terrestre como a formação de nêutrons de albedo que, aparentemente, são a causa do cinturão interno. A remoção de partículas dos cinturões de radiação ocorre pela sua absorção em núcleos da atmosfera.

Os nêutrons são produzidos por prótons de raios cósmicos que colidem com núcleos de oxigênio e nitrogênio da atmosfera. Um próton de raios cósmicos de 5 GeV produzirá cerca de 7 nêutrons na atmosfera; destes, 10% difundem-se no espaço. Esta fuga de nêutrons da atmosfera corresponde a cerca de 0,2 nêutrons/cm²s no equador e cerca de 2 nêutrons/cm²s nos pólos. Poucos nêutrons provenientes do Sol ou do espaço mais distante alcançam a Terra devido ao fato do nêutron livre ser radioativo com uma meia-vida de aproximadamente 11,7 minutos, decaindo pela reação:



O próton e o elétron resultante são muito importantes na formação do cinturão de radiação, conforme a Figura 8.1.

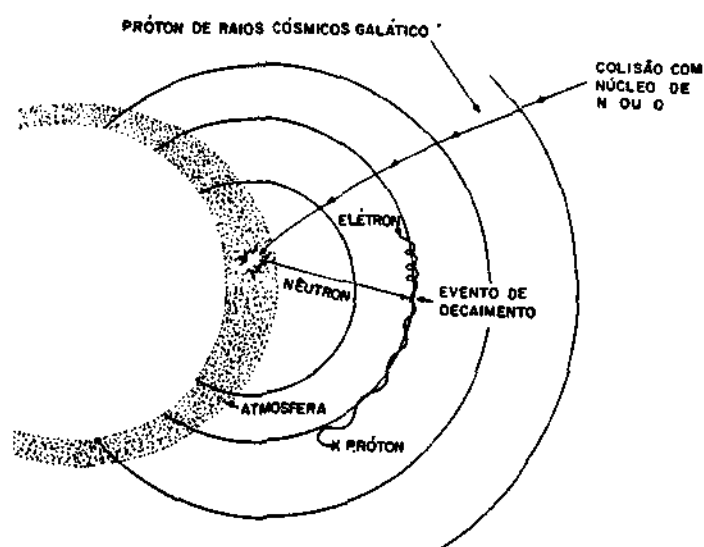


Fig. 8.1 - Modo de decaimento de nêutrons de albedo de raios cósmicos, para a produção da zona interna do cinturão de radiação. Um próton incidente sofre uma colisão com a atmosfera da Terra, produzindo um nêutron que ao se afastar da Terra decai produzindo elétron e próton.
FONTE: Hess (1969).

CAPÍTULO 9

EFEITOS BIOLÓGICOS CAUSADOS PELOS RAIOS CÔSMICOS

O alto fluxo de raios cômicos solares emitidos por grandes erupções podem produzir graves efeitos biológicos sobre viajantes do espaço. De acordo com a Figura 9.1 e Tabela 1, o espectro de energia de um evento solar típico não se estende até altas energias como ocorre com o espectro de raios cômicos galáticos. Em torno de 100 MeV, entretanto, o fluxo de raios cômicos solares podem exceder o fluxo galático por muitas ordens de magnitude e, conseqüentemente, ser muito perigosos para os viajantes do espaço.

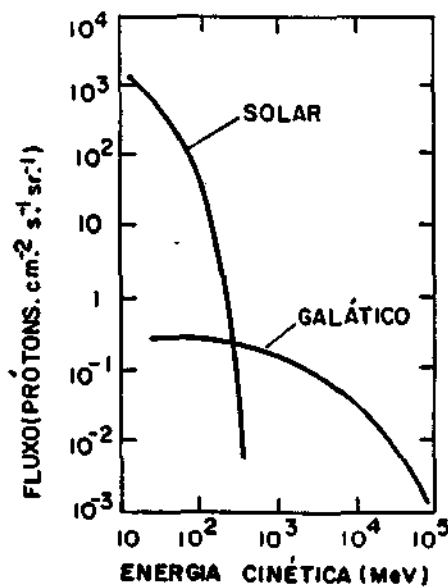


Fig. 9.1 - Fluxo de prótons de uma erupção solar típica e de raios cômicos galáticos, durante um período de mínima atividade solar.

FONTE: Papagiannis (1978).

O rad é a unidade usada freqüentemente para a medida da radiação absorvida. A definição desta unidade é que 1 rad = 100 ergs de radiação absorvida por grama de material absorvedor. O efeito

biológico depende da dose total absorvida, do tipo de radiação e da taxa na qual ela é absorvida.

As fontes naturais de radiação consistem, além dos raios cósmicos, de radiações alfa, beta (elêtron e pósitron) e gama, provenientes de emissores radioativos naturais, sobretudo o urânio-238, o urânio-235 e o tório-232. Estes três elementos radioativos de longas meias-vidas decaem através de longas cadeias radioativas. A cadeia radioativa do urânio-238 é de importância particular devido ao rádio-226, com meia vida de 1620 anos, que possui uma alta solubilidade e, por esta razão, é encontrado na água e em alimentos. Além destes, o potássio-40 com meia-vida de $1,26 \times 10^9$ anos é encontrado também no solo e em materiais de construção, bem como no próprio corpo humano, principalmente nos músculos. Existe, ainda, a radioatividade do ar, devido ao radônio-222, com meia-vida de 3,8 dias, proveniente do decaimento do rádio-226, e o radônio-220, ou torônio, decorrente da série radioativa do tório, com meia-vida de 51,5 segundos. Finalmente, em adição aos radionuclídeos naturais, existem radionuclídeos que são produtos de fissão, originados da precipitação atmosférica, "fallout", produzidos nos testes nucleares passados, pela operação de reatores nucleares e pela utilização de técnicas nucleares especiais, bem como aqueles decorrentes de acidentes nucleares diversos. Entre os radionuclídeos liberados em condições normais de operação de reatores estão o trítio, com meia-vida de 12,3 anos, o kriptônio-85, com meia-vida de 10,7 anos, e o carbono-14, com meia-vida de 5560 anos.

A Tabela 9.1 fornece as fontes de irradiações de fundo com as suas respectivas doses de radiações.

TABELA 9.1 - FONTES DE IRRADIAÇÃO DE BACKGROUND

FONTES DE IRRADIAÇÃO		DOSE (mrad/ano)
EXTERNA	Raios cósmicos (ao nível do mar)	30 a 50
	Solo e edificações	25 a 75
	Ar(sobretudo partículas suspensas de rádio e tório)	2
INTERNA	Potássio 40	20
	Carbono 14	0,7 a 1,6
	Rádio, Tório e seus produtos de desintegração	2 a 6
TOTAL		80 a 150

FONTE: Da Rocha (1976).

Em alguns lugares do mundo, notadamente na província de Kerala, na Índia, nas costas do Espírito Santo e no Morro do Ferro, Minas Gerais, no Brasil, os solos são tão ricos em tório e urânio que a radiação de fundo vai além de 2 rem por ano.

Em medicina e biologia, define-se dose equivalente, rem, como igual ao produto da dose absorvida, em rad, pela Eficácia Biológica Relativa, EBR. Em certos casos considera-se também o Fator de Distribuição, FD, e outros modificadores necessários. O rem caracteriza a dose de qualquer radiação ionizante, liberada no homem

(ou mamífero), e é biologicamente equivalente a 1 rad de raios X ou gama.

Entende-se por EBR de uma dada radiação a razão entre a dose absorvida de raios X de 250 keV e a dose de radiação considerada necessária para produzir um determinado efeito biológico. Por exemplo: Se a dose de 1 rad de raios X de 250 kV produz o mesmo efeito biológico que 0,1 rad de prótons, então o EBR para essas partículas é:

$$1 \text{ rad} / 0,1 \text{ rad} = 10 .$$

A Tabela 9.2 apresenta os valores do EBR para vários tipos de radiações.

TABELA 9.2 - VALORES DE EBR

RADIAÇÃO	EBR
X, gama e beta de qualquer energia	1
próton até 10 MeV	10
nêutrons lentos	5
nêutrons rápidos até 10 MeV	10
alfa natural	10

FONTE: Da Rocha (1976).

Esses diferentes valores são justificados pelo conceito de Transferência Linear de Energia (LET), isto é, a energia liberada no meio, em média, por unidade de espaço percorrido pela partícula ionizante. O LET, além de depender do tipo de radiação, é função da energia. Quanto menor a energia da radiação, maior será a

probabilidade de interação com os átomos do meio absorvedor, por permanecer próxima destes por mais tempo.

A distribuição de um radioisótopo num órgão nem sempre é homogênea e, possivelmente, o efeito biológico esteja em função da uniformidade desta distribuição. Diante disto, com o objetivo de resolver essa dificuldade, foi introduzido o fator de distribuição FD.

Por outro lado, a atmosfera age como obstáculo contra os raios cósmicos. Assim, os que vivem ou trabalham em grandes altitudes recebem quantidades muito maiores de radiação do que os que estão ao nível do mar, conforme se pode observar na Tabela 9.3.

TABELA 9.3 - DOSES EQUIVALENTES DE RADIAÇÕES DEVIDAS AOS RAIOS
CÓSMICOS EM LOCAIS DE ALTITUDES ELEVADAS

ÁREAS	ALTITUDE	LATITUDE	DOSE EQUIVALENTE (mrem/ano)
La Paz, Bolívia	3 630	16°S	270
Quito, Equador	2 850	0°	160
Bogotá, Colômbia	2 640	4°N	150
Cerro de Pasco, Peru	4 259	10°S	330
Lhasa, Himalaia	3 684	30°N	310

FONTE: Da Rocha (1976).

Para os residentes nas grandes cidades, pode-se esquematizar a radiação natural provinda do meio ambiente de acordo com a Figura 9.2.

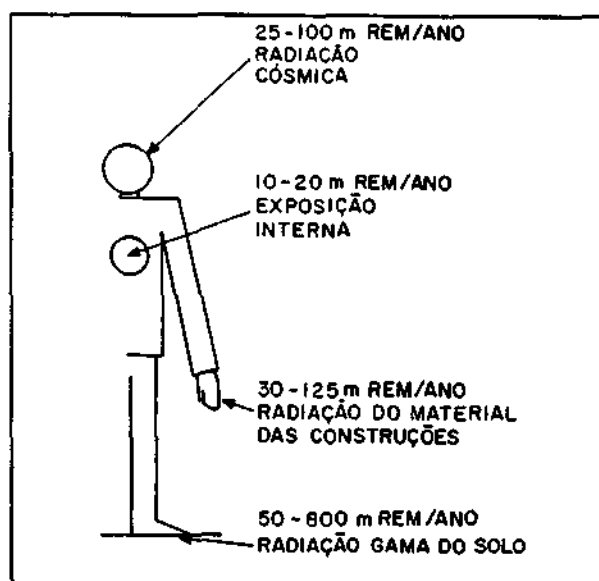


Fig. 9.2 - Contribuição das diversas radiações do background para a radiação recebida por um ser humano normal.

FONTE: Da Rocha (1976).

Considera-se que uma pessoa exposta a um grande evento solar no espaço, de forma desprotegida, pode receber uma dose integrada de aproximadamente 1000 rads em poucas horas. Esta dose está muito acima de qualquer limite tolerável. Por esta razão, um grande esforço de pesquisa tem sido feito para determinar os efeitos biológicos da radiação e decidir a blindagem mais econômica, porém efetiva, para tais viajantes do espaço.

O problema de proteger viajantes do espaço contra os raios cósmicos solares e não-solares é altamente complexo. Além da possível previsão de eventos solares, o uso de blindagens é necessário, o que envolve um grande número de áreas distintas de pesquisa, ou seja:

- a Radiobiologia, pelo estudo dos efeitos biológicos da radiação sob os seres vivos;

- a Física Nuclear, pela estimativa da atenuação da radiação incidente em função da espessura da blindagem;

- a Física de Plasma, na estimativa do fluxo de raios cósmicos em cada energia e para diferentes tipos de partículas; e

- as diferentes áreas de Engenharia, pelo projeto de blindagens práticas que levam em conta uma proteção efetiva, bem como limitações técnicas e econômicas.

Uma série de questões deverão ser ainda respondidas; entre outras poder-se-ia citar:

- Qual é o fluxo de raios cósmicos em função da energia, do tempo e do local do espaço?

- Qual é o campo de radiação no recinto fechado ocupado pelo viajante em função da espessura da blindagem?

- Qual é o campo de radiação dentro do corpo do viajante, que ocupa uma posição específica dentro do recinto fechado, em função da espessura da blindagem?

- Sabendo o campo de radiação dentro do corpo do viajante do espaço, qual é a dose de radiação recebida e qual o dano biológico causado?

Os efeitos sobre o homem exposto a doses de radiações durante poucas horas são os seguintes:

- 25 rems - não existe efeitos clínicos;
- 50 rems - pequenas mudanças na composição sanguínea;
- 100 rems - náuseas e fadigas;
- 200 rems - náuseas e fadigas mais acentuadas;
- 300 rems - 20% de morte em um mês;

400 rems - 50% de mortes no primeiro mês;
600 rems - morte segura.

Observa-se que tais dados referem-se a irradiações agudas generalizadas, isto é, sobre todo o organismo e num curto intervalo de tempo. Consequentemente, não se referem a irradiações localizadas como ocorre normalmente em tratamentos radioterápicos, quando somente uma pequena parcela do organismo é irradiado.

De acordo com recomendações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica, ICRP, a unidade de dose absorvida, o rad, definido como 100 ergs/g, e a unidade de dose equivalente, o rem, gradualmente deverão ser substituídas por suas equivalentes no SI, isto é, o gray (símbolo Gy) definido como 1 joule/kg e pelo sievert (Sv), respectivamente. Assim,

1 Gy = 100 rads e,
1 Sv = 100 rems.

Segundo recomendações da ICRP, adotadas em janeiro de 1977, a proteção radiológica deve ser entendida como proteção ao indivíduo, seus descendentes e à espécie humana (população) como um todo, enquanto existirem atividades das quais resultem exposições às radiações.

Justificando as razões acima expostas, a ICRP recomenda um sistema de limitação de dose cujos principais itens são:

- a) Não adotar nenhuma nova técnica que não seja comprovadamente benéfica.
- b) Toda exposição deve ser tão baixa quanto possível, devendo ser levado em conta fatores econômicos e sociais.
- c) A dose equivalente individual não deve exceder os limites recomendados pela ICRP.

A ICRP estabeleceu doses máximas permissíveis tanto para o trabalhador que opera com radiações ionizantes como para o público em geral. Em relação ao corpo todo, órgãos de reprodução e órgãos formadores de sangue, as doses de radiação permissíveis são limitadas em 0,05 Sv/ano (5 rem/ano); para ossos, tireóide e pele, em 0,3 Sv/ano (30 rem/ano); para as mãos, antebraços, pés e tornozelos, em 0,75 Sv/ano (75 rem/ano); e para os demais órgãos, em 0,15 Sv/ano (15 rem/ano). Os limites estabelecidos para os trabalhadores citados são 10 vezes maiores do que os permitidos para o público em geral. Isto ocorre porque o trabalhador deverá, obrigatoriamente, durante seu período de trabalho estar constantemente avaliando a dose de radiação recebida. É a chamada monitoração pessoal. Além disto, a legislação obriga a um rígido controle das condições de saúde de tais trabalhadores, incluindo exames de sangue periódicos.

Para orientação do trabalhador que lida com radiações ionizantes, são utilizados valores derivados dos máximos permissíveis, chamados "limites derivados do trabalho", que são 0,004 Sv/mês (400mrem/mês), 0,001 Sv/semana (100 mrem/semana) ou $2,5 \times 10^{-5}$ Sv/hora (2,5 mrem/hora). Para efetuar estas medidas, utilizam-se monitores especiais de maior porte que os empregados em monitoração pessoal, chamados monitores de área.

Pesquisas têm sido também direcionadas ao desenvolvimento de um sistema de previsão confiável para os grandes eventos solares. Existem indicações, por exemplo, de que o desenvolvimento da penumbra nos primeiros estágios das diferentes manchas solares podem fornecer informações valiosas nesta direção. Presumivelmente, o desenvolvimento da penumbra está diretamente relacionada com os campos magnéticos presentes, e, ao que se sabe, a dimensão e a configuração do campo magnético na região da mancha são os fatores decisivos que determinam a ocorrência e a magnitude das erupções solares. Os raios cósmicos solares são, em geral, muito mais perigosos do que os raios X emitidos durante a erupção solar. A razão básica é que enquanto as explosões, "bursts", de raios X usualmente

duram menos de uma hora, os raios cósmicos solares podem permanecer chegando por mais de um dia. Como resultado eles são capazes de liberar uma dose muito maior de radiação a uma pessoa que esteja viajando no espaço desprotegida.

Assim, são necessários cuidados na monitoração e segurança de trabalhadores sujeitos a altos níveis de radiações. Para enfatizar a importância destes cuidados, pode-se descrever os danos que a radiação pode causar à tripulação de certos vôos comerciais, exposta a níveis significativamente maiores do que aqueles a que estão expostos trabalhadores de centrais nucleares. As maiores exposições à radiação cósmica ocorre durante vôos internacionais a altas latitudes, que passam pelos pólos. Algumas tripulações que voam por algumas destas rotas recebem uma dose de radiação anual que ultrapassa o limite recomendado, por exemplo 500 mrem para mulheres grávidas. Os riscos de ocorrerem defeitos, induzidos pela radiação, em crianças nascidas de mulheres que trabalham nestes vôos é sensivelmente maior, sendo o desenvolvimento do feto mais sensível entre a oitava e décima-quinta semana de gestação. Além disto, entre a tripulação que passa 960 horas no ar a cada ano, por um período de 20 anos, ocorrem 1020 mortes adicionais por câncer devido ao excesso de radiação para cada 100.000 trabalhadores.

CAPÍTULO 10

EFEITOS DOS RAIOS CÔSMICOS SOBRE SISTEMAS ESPACIAIS

Entre os efeitos conhecidos da radiação cósmica, sobre sistemas espaciais, estão os fenômenos de eletrificação e penetração da radiação nos materiais. Efeitos específicos incluem mal funcionamento e degradação de detetores, degradação de sistemas óticos, alterações de sistemas de memória e mal funcionamento ou falha de sistemas de controle. Para operações realizadas pelo homem, os efeitos biológicos são da maior importância, como foi abordado no capítulo anterior.

Uma medida superficial do dano produzido por radiação energética é a dose de radiação absorvida em rads. Esta definição não distingue os diferentes tipos de radiação incidente e os diferentes efeitos sobre os materiais. Assim, é necessário um exame específico das seções de choque de interações quando se estuda tais efeitos. A energia é depositada através de interações químicas (mudança nas ligações moleculares, excitação de elétrons ligados e ionização) e nucleares (transmutação, excitação nuclear e radioatividade induzida).

Os efeitos macroscópicos são evidentes nas falhas dos dispositivos após receberem um nível crítico de exposição. Frequentemente este nível crítico depende diretamente da natureza e energia da radiação incidente. Uma grande preocupação é o "tempo de vida" em órbita do dispositivo microeletrônico, que é projetado para um nível específico de radiação, tal como 10^4 ou 10^5 rads. Em muitos casos, existe um compromisso entre a escolha da órbita e o "tempo de vida" ou de funcionamento correto do dispositivo espacial.

10.1 - MAL FUNCIONAMENTO DE DETETORES

Em média, o efeito de uma partícula energética incidente em materiais de detetores, como alumínio e silício, é a geração de um par elétron-lacuna para cada 3,5 eV de energia depositada. Assim, um rad de radiação incidente em um grama de material cria $1,74 \times 10^{13}$ pares elétron-lacuna. Mesmo uma partícula de energia moderada (1 MeV) do cinturão de radiação criará um grande número de elétrons livres que podem levar a um falso sinal. Exposições prolongadas a partículas energéticas prejudicam a performance do detetor pela acumulação de danos na estrutura microcristalina do material. Por exemplo, detetores de estado sólido do tipo Al - Si - Au possuem um fator de 10 a mais no tempo de vida quando o lado de alumínio está voltado para a radiação. Um próton incidente fará com que o núcleo de silício-28 emita uma partícula alfa que possui um pequeno percurso. O núcleo de recuo é freado numa distância ainda menor. O efeito combinado pode depositar dezenas de MeV num pequeno elemento de volume ($10 \times 20 \times 20 \mu\text{m}$), criando um erro de informação.

10.2 - ALTERAÇÃO DA MEMÓRIA

Certos circuitos microscópicos usados correntemente em instrumentação de dispositivos espaciais têm-se mostrado muito sensíveis aos efeitos de íons pesados energéticos dos cinturões de radiação e da radiação cósmica. "Chips" de memória e microprocessadores freqüentemente possuem seus estados lógicos e seus conteúdos de informações severamente alterados pelos processos de deposição de energia localizada. Efeitos similares podem resultar da emissão de partículas alfa provenientes de interações nucleares e da própria radioatividade natural ou induzida

Se as irradiações ocorridas são infreqüentes, os projetos de engenharia, que enfatizam a redundância dos componentes críticos, podem evitar o problema. Entretanto, quando os efeitos são freqüentes e/ou persistentes, este recurso pode não ser utilizado.

10.3 - FAZHAS NOS SISTEMAS DE CONTROLE

Erros induzidos por radiação em circuitos eletrônicos podem ser particularmente danosos quando ocorrem em circuitos críticos como os sistemas de controle. Enquanto outros circuitos não críticos podem continuar a funcionar com informações falsas, opções de controle podem ser ligadas de modo indesejável para o qual pode não haver meios de retorno, ou danificar o dispositivo espacial. Certas ligações de circuitos podem causar a queima de sistemas elétricos, ou mesmo efeitos piores, principalmente quando sistemas de propulsão, altitude ou bombas estão envolvidos. Assim, por estes motivos, é imperativo que salvaguardas próprias e projetos redundantes sejam adotados nos projetos de engenharia espacial.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho procura fornecer uma visão abrangente da origem e da composição dos raios cósmicos, sua modulação relacionada com a atividade solar, sua interação com o campo magnético e com a atmosfera da Terra, e seu espectro de energia ao nível do mar.

No Capítulo 1, descreveu-se a complexidade que envolve o estudo da origem da radiação cósmica, procurando distinguir claramente entre radiação cósmica galáctica, proveniente de fora do sistema solar, e radiação cósmica solar.

Tal distinção também foi empregada no Capítulo 2, que trata da composição da radiação cósmica.

A radiação cósmica ao nível do mar é bastante diferente dos raios cósmicos primários por terem sofrido alterações ou modificações significativas na colisão com o sistema solar, com o campo magnético e com a atmosfera da Terra.

Assim, no Capítulo 3, modulação do fluxo de raios cósmicos, aborda-se a atividade solar, caracterizada pelo número relativo de manchas solares com periodicidade de 11 anos, a modulação do fluxo de raios cósmicos com período de 27 dias, sua anisotropia diurna e o decaimento de Forbush.

O Capítulo 4, conceito de rigidez magnética, trata essencialmente da interação dos raios cósmicos com o campo magnético da Terra.

O Capítulo 5, interação dos raios cósmicos com a atmosfera terrestre, aborda a interação da radiação cósmica primária com a atmosfera da Terra, causando uma cascata de raios cósmicos secundários que pode ser detectada na superfície da Terra.

No Capítulo 6, detecção da radiação cósmica, descreveu-se sucintamente, os detetores baseados na ionização gasosa (câmara de ionização, detetor proporcional e contador Geiger-Müller), os detetores cintiladores (inorgânicos e orgânicos, sólidos e líquidos) e os detetores semicondutores. Com a utilização apropriada destes detetores, juntamente com o uso de técnicas de coincidência e anticoincidência, pode-se projetar detetores do tipo telescópio, muito empregados a bordo de balões e satélites. Ainda, descreveram-se as emulsões nucleares, empregadas para o estudo de traços nucleares que oferecem uma série de vantagens em certas utilizações especiais, em comparação com os detetores anteriormente citados. Além disto, abordou-se a detecção de cascatas de radiação cósmica secundária, com a descrição de detetores de radiação Cerenkov e arranjos de detetores destinados à detecção de cascata secundária de partículas.

No Capítulo 7, espectro da radiação cósmica, estudou-se o espectro das partículas mais abundantes ao nível do mar, originadas das cascatas de raios cósmicos secundários, ou seja, o espectro de prótons, nêutrons, elétrons, píons e múons.

No Capítulo 8, efeitos dos raios cósmicos sobre a atmosfera terrestre, tratou-se da dificuldade de correlacionar as variações da intensidade dos raios cósmicos e o clima da Terra, sua contribuição na formação da ionosfera polar, especialmente a camada D, a ionização residual da camada F₂, a produção de auroras, a contribuição na formação dos cinturões de radiação e a atenuação de ondas de rádio.

No Capítulo 9, efeitos biológicos causados pelos raios cósmicos, tratou-se do perigo oferecido pela radiação cósmica aos viajantes do espaço, especialmente durante as erupções solares, quando o fluxo de raios cósmicos solares pode exceder o fluxo galático por muitas ordens de magnitude. Definiu-se a unidade de dose absorvida e de dose equivalente, as demais fontes naturais de radiação, os efeitos causados por doses agudas de radiação, bem como os limites máximos de

doses recomendadas pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica.

Finalmente, no Capítulo 10, foram tratados os efeitos dos raios cósmicos sobre sistemas espaciais, entre eles, o mal funcionamento e a degradação de detetores, degradação de sistemas óticos, alteração de sistemas de memória e mal funcionamento ou falha de sistemas de controle.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, H.R. The primary cosmic radiation. In: International Symposium on the Natural Radiation Environment, 2., Houston, Aug. 7-11, 1972. Proceedings. Springfield, NTIS, 1972, p. 1-13.
- BULTENA, S.; BLATT, R.; HANNA, D.; MERCURE, P.; MURTHY, K. The LEDA extensive air shower array. Nuclear Instruments and Methods, A286: 317-322, 1990.
- CORLISS, W.R. Space radiation. Oak Ridge, U.S. Atomic Energy Commission, 1968.
- DA COSTA, J.M. Técnicas observacionais da astronomia de raios gama de baixa energia. São José dos Campos, INPE, 1981. (INPE 2333-MD/ 018).
- DA ROCHA, A.F.G. Medicina nuclear. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 1976.
- HESS, W.N. The radiation belt and magnetosphere. Toronto, Blaisdell, 1969.
- IVANENKO, I.P. et al. Energy spectrum and cosmic ray composition in the region of energies higher than 1 TeV investigated onboard the "COSMOS1543" and "COSMOS1713" satellites. International Cosmic Ray Conference, 21., Adelaide, Austrália, 1990.
- JURSA, A.S. Handbook of geophysics and the space environment. Springfield, Air Force Geophysics Laboratory, United States Air Force, 1985.
- MACKEOWN, P.K.; WEEKES, T.C. Cosmic rays from cygnus X-3. Scientific American, 253(5):60-69, Nov. 1985.

- MAY, H.; MARINELLI, L.D. Cosmic-ray contribution to the background of low-level scintillation spectrometers. In: Adams, J.A.S.; Lowder, W.M. The natural radiation environment, Illinois, University of Chicago Press, 1964. Part 1, p. 463-480.
- NAGLE, D.E.; GAISSER, T.K.; PROTHEROE, R.J. Extensive air shower associated with discrete astrophysical sources. In: Annual Review of Nuclear and Particle Science, Palo Alto, Annual Review, 1988. v. 38, p. 609-657.
- O'BRIEN, K. The cosmic ray field at ground level. In: International Symposium on the Natural Radiation Environment, 2., Houston, Aug. 7-11, 1972. Proceedings. Springfield, NTIS, 1972, p. 15-54.
- PAPAGIANNIS, M.D. Space physics and space astronomy. New York, Gordon and Breach Science, 1978.
- REEDY, R.C.; ARNOLD, J.R.; LAL, D. Cosmic-ray record in solar matter. In: Annual Review of Nuclear and Particle Science. Palo Alto, Annual Review, 1983. v. 33, p. 505-537.
- SCHUCH, L.A.; NORDEMANN, D.J.R. Detetores de radiações nucleares. São José dos Campos, INPE, 1990. (INPE 5090-MD/44).
- VIOLA, V.E.; MATHEWS, G.J. The cosmic synthesis of lithium, beryllium and boron. Scientific American, 256(5): 34-41, May 1987.
- WILSON, J.G. Cosmic rays. London, Wykeham Publications, 1976.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- BULTENA, S.; HANNA, D.; MURTHY, K. Development of low cost liquid scintillator counters for cosmic ray experiments. Nuclear Instruments and Methods, A260:247-253, 1987.
- COWEN, R. Cosmic radiation creates unfriendly skies. Science New, 137(8):118, Feb. 1990.
- DORMAN, L.I. Cosmic rays. Amsterdam. North Holland, 1974.
- EISENBUD, M.; PACHOA, A.S. Environmental radioactivity. Nuclear Instruments and Methods, A280:470-482, 1989.
- GIBSON, E.G. Description of solar structure and Process. Reviews of Geophysics and Space Physics, 10(2):395-461, May 1972.
- GONZALEZ, W.D.; PINTO JUNIOR, O.; GONZALEZ, A.L.C.; CHIAN, A.C.L.; PINTO, I.R.C.; TSURUTANI, B.T. Auroras. Ciência Hoje, 10(60):27-31, Dez. 1989.
- KNOLL, G.F. Radiation detection and measurements. New York, John Wiley, 1979.
- LUJANAS, V. Cosmogenic radionuclides in investigations of some atmospheric process. Nuclear Geophysics, 4(1):33-43, 1990.
- MADDOX, J. Cosmic rays lose dramatic quality. Nature, 344(6261):15, Mar. 1990.
- MASON, G.M. The composition of galactic cosmic rays and solar energetic particles. Reviews of Geophysics, 25(3):685-696, Apr. 1987.

MONASTERSKY, R. Solar cycle linked to weather. Science News, 132(25/26):388-389, Dec. 1987.

NORDEMANN, D.J.R. Emission gamma de quelques météorites et roches terrestres - evolution de la radioactivité du sol lunaire. (Theses de Docteur) - Faculté des Sciences de L'Université de Paris, 1986.

OLIVEIRA TORRES, C.A.P.C. Manchas Estrelares. Ciência Hoje, 2(9):42-50, Nov./Dez. 1983.

PINTO JÚNIOR, O.; GONZALEZ, W.D. Anomalia magnética brasileira. Ciência Hoje, 9(52):31-35, Abr. 1989.

PRICE, W.J. Nuclear radiation detection. New York, McGraw-Hill Book, 1964.

SCHECHTER, B. Gravitation, cosmology and cosmic-ray physics. Physics Today, 39(4):43-47, Apr. 1986.

SCHUCH, L.A.; CANTO, O.A.M. Energia nuclear: usos e cuidados. In: Tópicos de Física Contemporânea, Santa Maria, 2-5 Dez. 1987, UFSM, 1988, p. 109-134.

SHEA, M.A. Solar-planetary relationship: cosmic rays, solar and interplanetary physics. Reviews of Geophysics, 25(3):641-650, Apr. 1987.

SHEN, S.P. Symposium on Aerospace Radiobiology. II. On the Shielding of Cosmic Rays. Aerospace Medicine, 32(10):901-908, Oct. 1961.

TINSLEY, B.A.; BROWN, G.M.; SCHERRER, P.H. Solar variability influences on weather and climate: possible connections through cosmic ray fluxes and storm intensification. Journal of Geophysical Research, 94(D12):14783-14792, Oct. 1989.

VENKATESAN, D. Cosmic rays, the pulse of the interplanetary medium.
Physics in Canada, p. 4-9, Jan. 1990.

WILSON, J.G.; WOUTHUYSEN, S.A. Progress in elementary particle and
cosmic ray physics. Amsterdam, North Holland, 1963. v. 7.

_____ 1967. v.9.

WILSON, J.W.; TOWNSEND, L.W.; FARHAT, H. Cosmic-ray neutron albedo dose
in low-earth orbits. Health Physics, 57(4):665-668, 1989.

YOCK, D.C.M. Heavy cosmic rays at sea level. Physical Review D,
34(3):698-706, Aug. 1986.



AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO

TÍTULO					
INTRODUÇÃO AO ESTUDO DOS RAIOS CÔSMICOS E SUA INTERAÇÃO COM A ATMOSFERA TERRESTRE					
AUTOR					
LUIZ ALEXANDRE SCHUCH					
TRADUTOR					
EDITOR					
ORIGEM	PROJETO	SÉRIE	Nº DE PÁGINAS	Nº DE FOTOS	Nº DE MAPAS
CEA/DGE	QUIATM		132		
TIPO					
☒ RPQ	☐ PRE	☐ NTC	☐ PRP	☐ MAN	☐ PUD
☐ TAE					
DIVULGAÇÃO					
☒ EXTERNA	☐ INTERNA	☐ RESERVADA	☐ LISTA DE DISTRIBUIÇÃO ANEXA		
PERIÓDICO/EVENTO					
CONVÊNIO					
AUTORIZAÇÃO PRELIMINAR					
21 / 02 / 91			Daniel Jean Roger Nordemann		
			ASSINATURA		
REVISÃO TÉCNICA					
☒ SOLICITADA			☐ DISPENSADA		
			Daniel Jean Roger Nordemann		
			ASSINATURA		
RECEBIDA 02 / 01 / 91			DEVOLVIDA 20 / 02 / 91		
			Osmar Pinto Junior		
			ASSINATURA DO REVISOR		
REVISÃO DE LINGUAGEM					
☒ SOLICITADA			☐ DISPENSADA		
			Daniel Jean Roger Nordemann		
			ASSINATURA		
Nº 59					
RECEBIDA 2 / 8 / 90			DEVOLVIDA 16 / 8 / 90		
			Neusa Maria Dias Bicudo		
			ASSINATURA DO REVISOR		
PROCESSAMENTO/DATILOGRAFIA					
RECEBIDA 07 / 11 / 90			DEVOLVIDA 22 / 02 / 91		
			Patricia Marciano Leite		
			ASSINATURA		
REVISÃO TIPOGRÁFICA					
RECEBIDA 22 / 02 / 91			DEVOLVIDA 04 / 03 / 91		
			Luiz Alexandre Schuch		
			ASSINATURA		
AUTORIZAÇÃO FINAL					
08 / 03 / 91			V.W.J.H. Kirchhoff		
			ASSINATURA		
PALAVRAS-CHAVE					
Radiação Cósmica			Raios Cósmicos e Atmosfera		
Detecção de Raios Cósmicos					