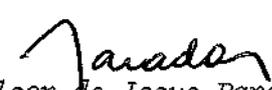
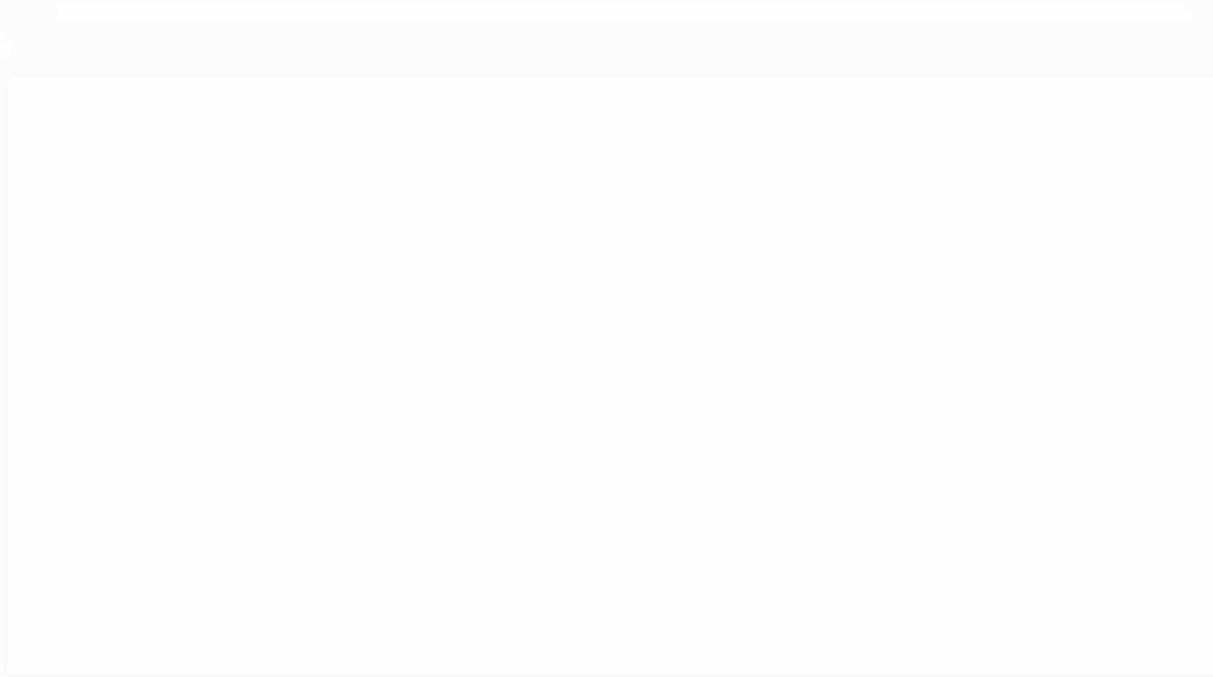
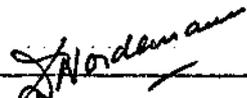


1. Publicação nº <i>INPE-2371-TDL/084</i>	2. Versão	3. Data <i>Abril, 1982</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DRH/DAS</i>	Programa <i>FRH-CEA</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>CENTRO GALÁTICO</i> <i>RAIOS GAMA</i>			
7. C.D.U.: <i>523.03</i>			
8. Título <i>MEDIDAS DE RAIOS GAMA ENTRE 0,3 E 3 MEV E DA LINHA DE ANIQUILAÇÃO 0,511 MEV NA REGIÃO DO CENTRO GALÁTICO</i>		10. Páginas: <i>74</i>	
		11. Última página: <i>A.4</i>	
9. Autoria <i>Maria Virginia Alves Jardim</i>		12. Revisada por  <i>Inácio Marmora Martin</i>	
Assinatura responsável <i>Virginia Alves Jardim</i>		13. Autorizada por  <i>Nelson de Jesus Parada</i> Diretor	
14. Resumo/Notas <p><i>A detecção do fluxo da linha de aniquilação pósitron-elétron, proveniente do Centro Galático, torna possível estimar a taxa de produção de pósitrons e a luminosidade correspondente. Neste trabalho, apresentam-se os resultados de medidas da intensidade da linha de aniquilação em 0,511 MeV, obtidas com um experimento a bordo de um balão estratosférico para medir raios gama entre 0,3 e 3 MeV. O detetor observou o disco galático no intervalo de longitude galática $-31^{\circ} < l_{II} < +45^{\circ}$, e o fluxo observado foi de $(6,70 \pm 0,85) \times 10^{-3}$ fótons $cm^{-2} s^{-1}$, o qual concorda muito bem com o valor do fluxo estimado, supondo-se que o CG seja uma fonte linear que emite uniformemente. Discutem-se também algumas possíveis fontes de pósitrons e regiões de aniquilação. Apresentam-se, ainda, resultados para o espectro contínuo na região de energia entre 0,3 e 0,67 MeV, emitido pelo Centro Galático, os quais são comparados com medidas realizadas por outros autores.</i></p>			
15. Observações <i>Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial aprovada em 18 de novembro de 1981.</i>			



Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisitos exigidos
para a obtenção do Título de Mestre
em Ciência Espacial

Dr. Daniel Jean Roger Nordemann



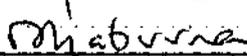
Presidente

Dr. Inacio Malmonge Martin



Orientador

Dr. Oscar Toshiaki Matsuura



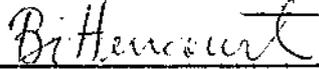
Membro da Banca
-convidado-

Dr. Walter Demétrio Gonzalez Alarcon



Membro da Banca

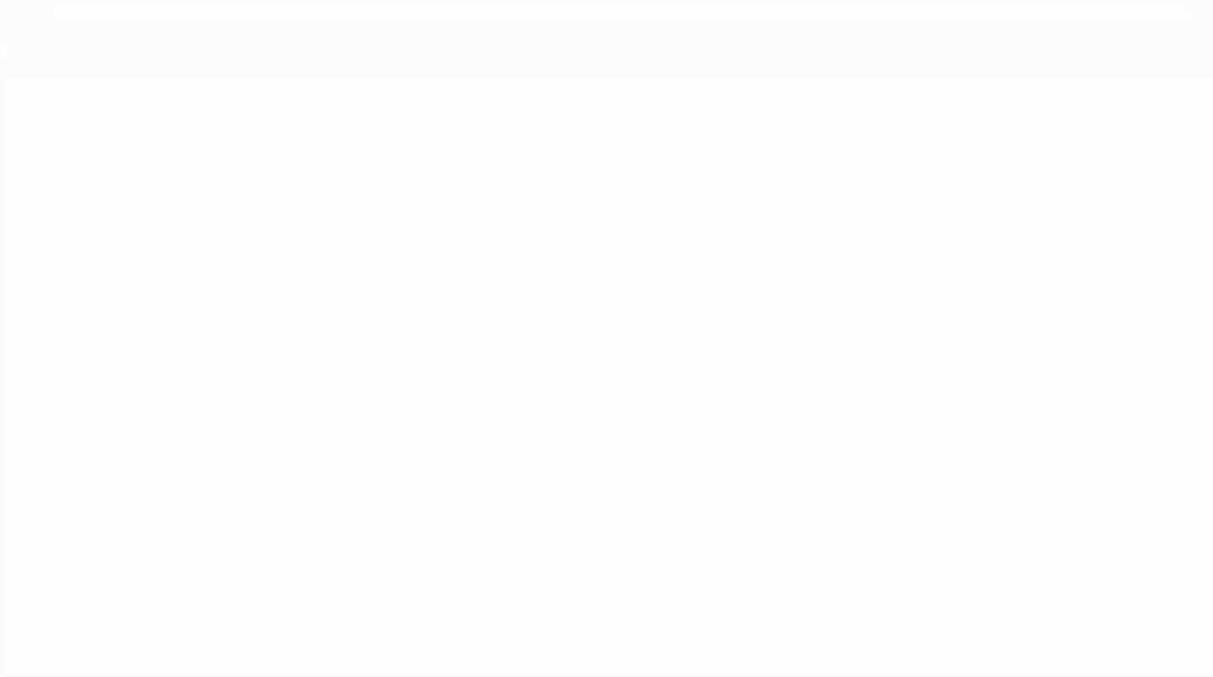
Dr. José Augusto Bittencourt



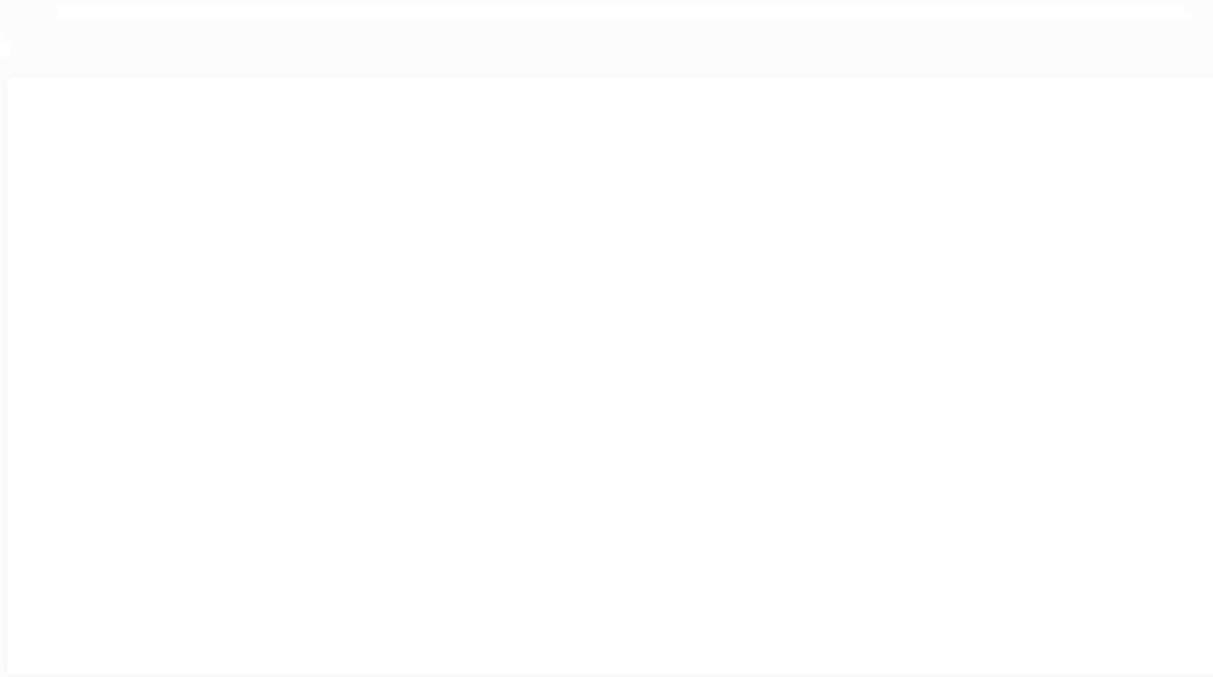
Membro da Banca

Candidata: Maria Virginia Alves Jardim

São José dos Campos, 18 de novembro de 1981



Para meu esposo, Jeronimo e minhas
filhas, Fabiana Augusta e Mariana.



AGRADECIMENTOS

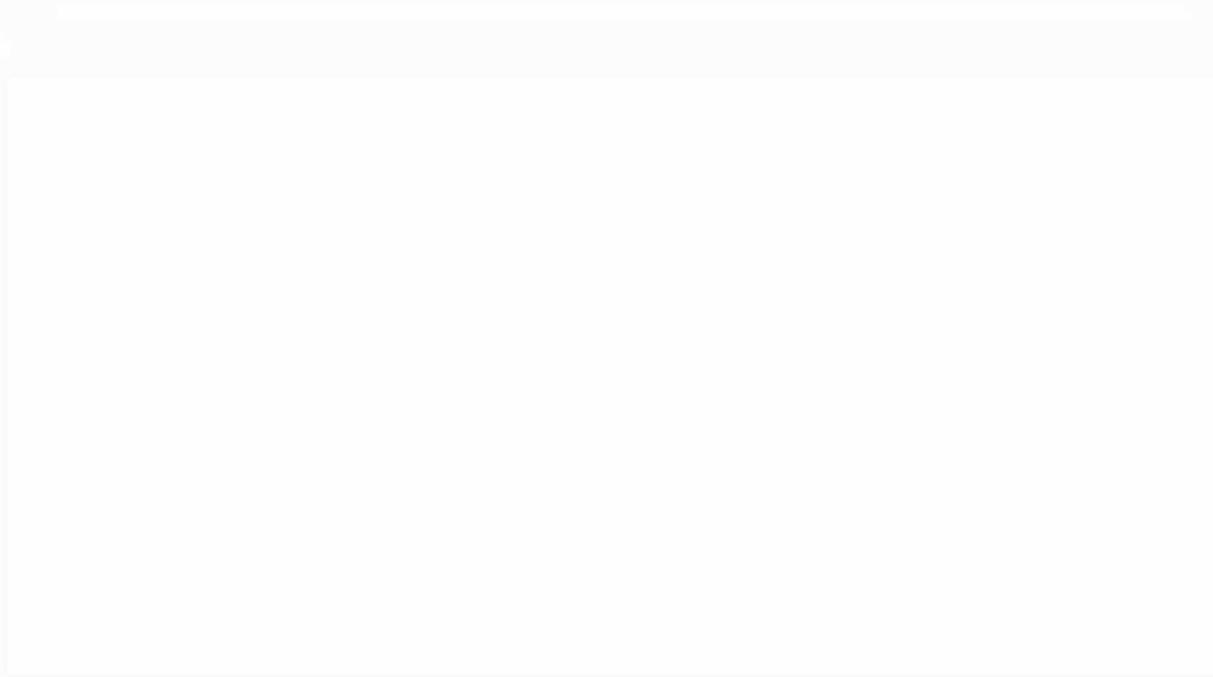
Agradeço ao CAPES e ao CNPq o apoio financeiro dado durante a realização deste trabalho.

Ao Dr. Inácio Malmonge Martin, a orientação e o apoio no desenvolvimento do trabalho.

Aos membros da banca examinadora, as sugestões apresentadas.

À Srta. Regina Lucia de Souza Bruno pelo paciente trabalho de datilografia, colagens e organização final.

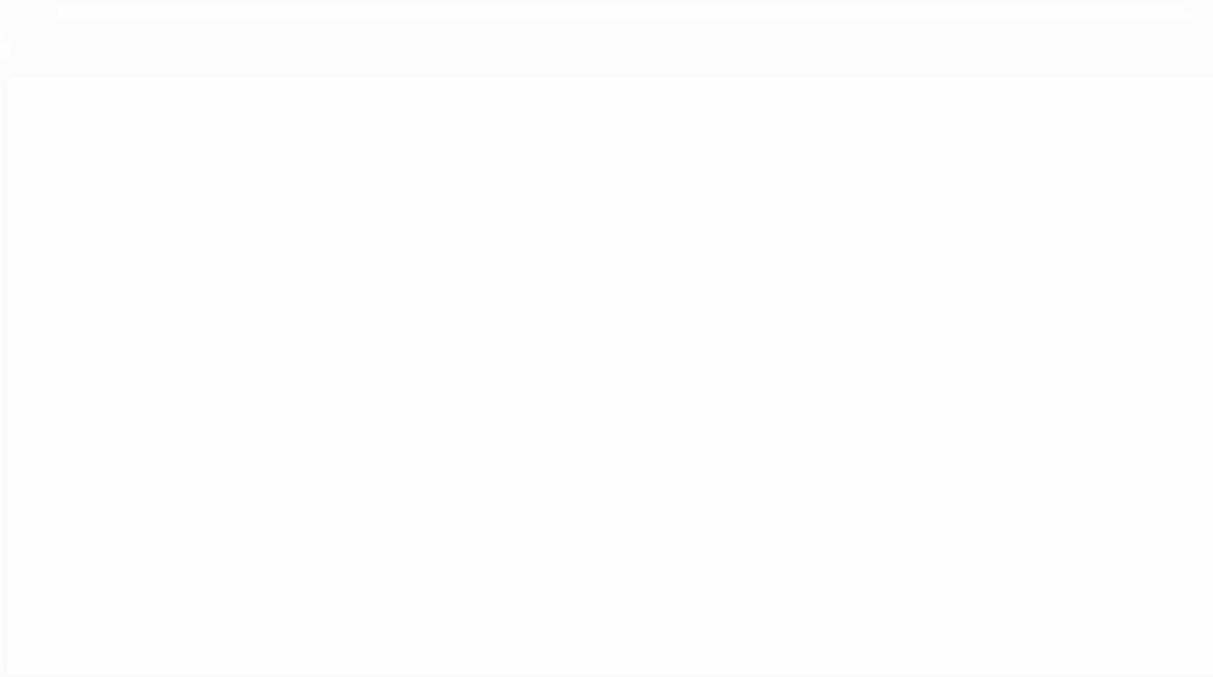
A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.



•
•

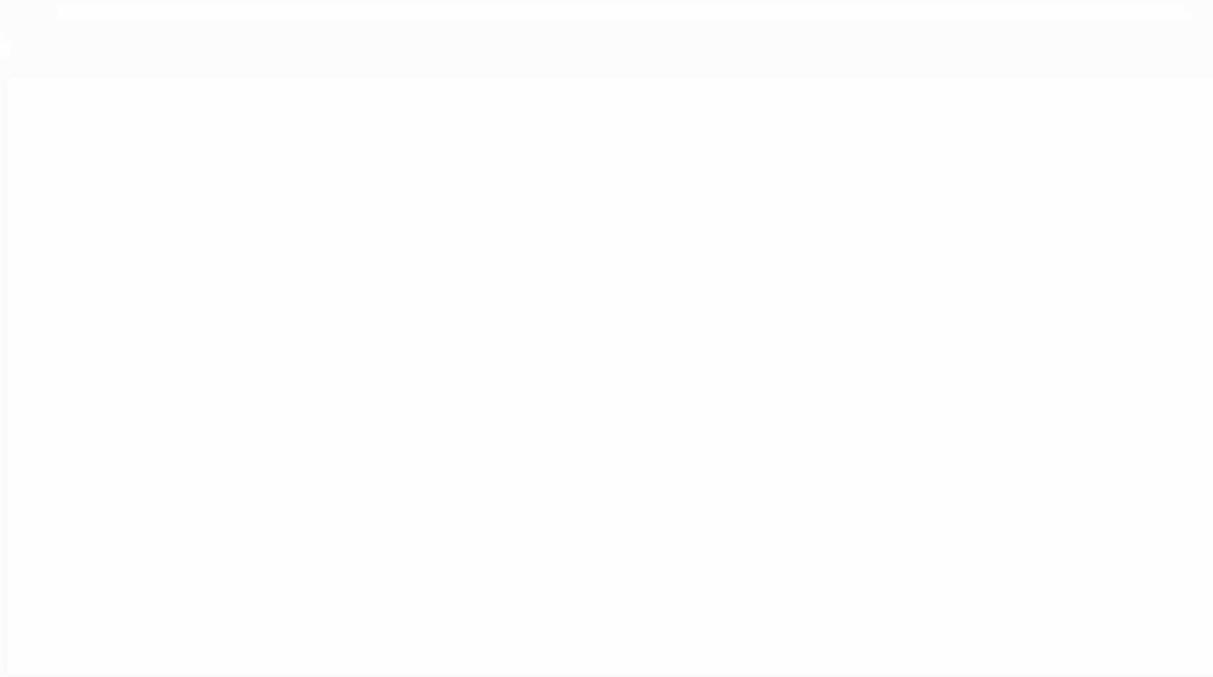
ABSTRACT

The detection of the flux of the electron-positron annihilation line coming from the Galactic Center direction allows one to estimate the rate of positrons production and the corresponding luminosity. In this work we present the results of measurements of the annihilation line flux intensity at 0.511 MeV, obtained with a balloon borne experiment to measure gamma rays in the energy interval 0.3 to 3 MeV. The detector looked at the galactic disk in the longitude interval $-31^\circ < l^{\text{II}} < +41^\circ$ and observed a flux intensity of $(6.70 \pm 0.85) \times 10^{-3}$ photons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, which is in good agreement with the flux value estimated assuming that the Galactic Center is a line source emitting uniformly. Some likely sources of positrons and annihilation regions are also discussed. The results for the continuum spectrum emitted from the Galactic Center in the energy interval 0.3 to 0.67 MeV are presented and compared with measurements made by other authors.



SUMÁRIO

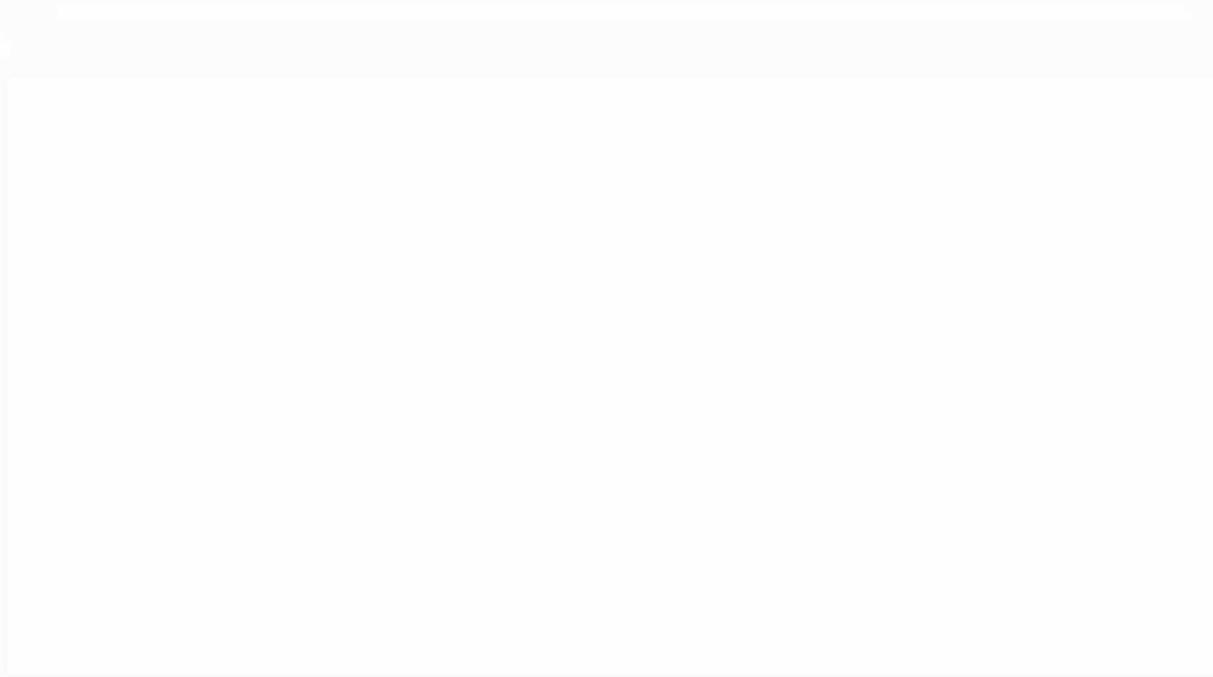
	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
<u>CAPÍTULO 2 - PRINCIPAIS PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE RADIAÇÃO GAMA</u> ..	5
2.1 - Radiação de freiamento ("bremsstrahlung")	6
2.2 - Radiação síncrotrônica ("magneto-bremsstrahlung")	7
2.3 - Efeito Compton Inverso	8
2.4 - Aniquilação pósitron-elétron	9
2.5 - Decaimento do méson π^0	11
2.6 - De-excitação nuclear	11
<u>CAPÍTULO 3 - DISPOSITIVO EXPERIMENTAL</u>	15
3.1 - Descrição do telescópio anti-colimado passivamente	15
3.2 - Calibração do telescópio	18
3.3 - Obtenção dos dados	21
<u>CAPÍTULO 4 - DESCRIÇÃO DO VÔO REALIZADO EM 29/MARÇO/1980 E RESULTADOS</u>	23
4.1 - Objetivos Científicos	23
4.2 - Descrição do vôo	24
<u>CAPÍTULO 5 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES</u>	35
5.1 - Discussão dos resultados	35
5.1.1 - Linha de Aniquilação do Pósitron-elétron, detetada na direção do centro galáctico	35
5.1.2 - Considerações teóricas quanto à origem da linha de aniquilação do pósitron na direção do CG	40
5.1.3 - Contínuo	45
5.2 - Conclusões	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
APÊNDICE A - PRINCIPAIS PROCESSOS DE INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA, COM ENERGIAS ENTRE 0,3 E 5 MeV, COM A MATÉRIA	



•
•

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Produção de raios gama por raios cósmico incidentes na atmosfera	6
2.2 - Efeito Compton Inverso	9
3.1 - Configuração básica do telescópio de raios gama SOURCE	16
3.2 - Resolução angular do telescópio SOURCE	17
3.3 - Energia (E) versus número de canal (N) (linearidade)	19
3.4 - Resolução em energia (R), para um cristal NaI 4" x 4"	20
4.1 - Trajetória do balão em coordenadas galáticas	25
4.2 - Taxa de contagens integrada entre os canais II e III, durante a subida do balão (corrigida para o tempo morto)	26
4.3 - Espectros observados num tempo de integração de 1 hora e meia, do ruído de fundo (RF) e da região em que o CG estava dentro do ângulo de abertura do detetor superior	28
4.4 - Espectro integrado para o intervalo de tempo entre 01:34-01:44 (TL), para o detetor superior	29
4.5 - Variação temporal da linha em 0,511 MeV, corrigida para absorção atmosférica	31
4.6 - Fluxos médios para a linha em 0,511 MeV e para o RF na direção do CG	32
4.7 - Espectro contínuo para a direção do CG	33
4.8 - Perfis em função do tempo das contagens integradas a cada dez minutos para os intervalos de energia: 0,4931 a 0,674 MeV (A) e 0,338 a 0,4931 MeV (B)	34
5.1 - Fluxos medidos até o presente para a linha em 0,511 MeV, na direção do CG, em função da abertura angular do telescópio usado	39
5.2 - Distribuição da radiação gama para energias superiores a 100 MeV	42
5.3 - Distribuição de restos de supernovas em função da distância galatocêntrica	43
5.4 - Distribuição de regiões HII gigantes em função da distância galatocêntrica	44
5.5 - Distribuição do CO no plano galático em função da distância galatocêntrica	44



•
•

LISTA DE SÍMBOLOS

- A_{ef} - Área efetiva
- Al - Alumínio
- a - Aceleração; espessura do cristal
- B_e - Energia de ligação do elétron
- B_k - Energia de ligação do elétron da camada K
- B_{\perp} - Componente do campo magnético na direção perpendicular ao movimento da partícula
- b_{II} - Latitude galática
- C - Carbono
- CG - Centro galático
- CO - Monóxido de carbono
- Co - Cobalto
- Cs - Césio
- c - Velocidade da luz
- cm - Centímetro
- D - Distância do Sol ao centro galático
- D1 - Detetor superior
- D2 - Detetor inferior
- E - Energia
- E_e - Campo elétrico
- E_0 - Energia da partícula antes da colisão
- E_1 - Energia da partícula depois da colisão
- E_{max} - Energia máxima
- E_{γ} - Energia do fóton incidente
- $E_{\gamma'}$ - Energia do fóton espalhado

e	- Carga eletrônica do elétron
eV	- Elétron-volt
e^+	- Pósitron
e^-	- Elétron
$F_{0,511}$	- Fluxo médio em 0,511 MeV
F_γ	- Fluxo
Fe	- Ferro
Ge	- Germânio
GeV	- Bilhões de elétron-volt
g	- Grama
HPGe	- Germânio hiperpuro
HII	- Região do meio interestelar constituída de hidrogênio ionizado
H ₂	- Hidrogênio molecular
h	- Constante de Planck; Altura do cristal
keV	- Mil elétron-volt
km	- Quilômetro
kpc	- Mil parsecs
Li	- Lítio
L_γ	- Luminosidade
l^{II}	- Longitude galática
M	- Massa da partícula
MeV	- Milhões de elétron-volt
Mg	- Magnésio
m	- Metro
mb	- Milibar

m_e	- Massa de repouso do elétron
m_{π^0}	- Massa de méson π^0
ms	- Milissegundo
N	- Nitrogênio; Núcleo; Número de Canal
Na	- Sódio
NaI(Tl)	- Iodeto de sódio ativado com tâlio
Ne	- Neônio
Ni	- Níquel
n	- Nêutron
n_e	- Densidade eletrônica
n_H	- Densidade do hidrogênio neutro
O	- Oxigênio
P	- Potência
PM	- Fotomultiplicadora
P	- Próton
Q_Y	- Taxa de aniquilação
R	- Resolução em energia; Taxa de contagens
RF	- Ruído de fundo
R_1	- Taxa de contagens no detetor 1
R_2	- Taxa de contagens no detetor 2
R_D	- Diferença entre R_1 e R_2
$R_{0,511}$	- Contagens/seg na energia de 0,511 MeV
Sc	- Escândio
Si	- Silício
s	- Segundos
TL	- Tempo local

Th	- Tório
t	- Tempo
Z	- Número atômico
α	- Partículas alfa; Ângulo de incidência
α_1	- Ângulo de recuo
β	- v/c
γ	- Raio gama; $(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$
ΔE	- Largura total da linha medida a meia intensidade
$\epsilon_{0,511}$	- Eficiência do detector NaI(Tl) na energia 0,511 MeV
θ	- Ângulo do espalhamento Compton
K^0	- Méson Kapa zero
K^+	- Méson kapa mais
K^-	- Méson kapa menos
λ	- Latitude geográfica
μ^\pm	- Méson mu
ν	- Frequência (s^{-1})
π^0	- Méson pi zero
π^\pm	- Méson pi carregado
σ_f	- Seção de choque para absorção fotoelétrica
σ_c	- Seção de choque para o efeito Compton
σ_{pp}	- Seção de choque para o processo de produção de pares

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A astronomia gama tem por objeto de estudo a observação da radiação gama extraterrestre num intervalo de energia de 100 keV a 1000 GeV (Trombka et alii, 1978). Devido à fraca absorção pela matéria e ser emitida durante processos eletromagnéticos de alta energia ou nucleares, a detecção da radiação gama pode fornecer importantes informações a respeito do seu local de origem e sobre o processo físico que a originou.

Na realidade, observações da radiação gama fornecem o meio mais direto de estudar a grande transferência de energia envolvida em processos astrofísicos. Estudos de sua distribuição espacial, temporal e em energia podem nos fornecer novas informações, fundamentais para o esclarecimento de problemas astrofísicos atuais, como processos de alta energia em objetos estelares (incluindo o Sol), dinâmica do gás interestelar, formação de nuvens e nebulosas, evolução galáctica e ainda certos aspectos de cosmologia e origem do universo.

Apesar do potencial da astronomia gama ser reconhecida mentalmente grande, seu desenvolvimento ainda está limitado por quatro grandes problemas experimentais:

- 1) Necessidade de detetar a radiação gama de origem astrofísica acima da atmosfera terrestre (por telescópios levados a bordo de balões ou satélites), devido à absorção da radiação gama pelo ar.
- 2) Ruído de fundo experimental, subdividido em intrínseco ao detector, induzido e atmosférico.
- 3) Fluxo de fótons extremamente baixo.

- 4) Falta de um telescópio gama "verdadeiro", ou seja, que forneça o espectro de fótons diretamente, sem necessidade de conversões (Chupp, 1976).

A detecção de radiação gama de baixa energia (0,3 a 10 MeV) é de particular interesse, já que neste intervalo de energia ocorre a maior parte das transições gama nucleares, importantes para a teoria de estrelas massivas e teorias cosmológicas. Este intervalo de energia engloba ainda a linha de aniquilação do pósitron em 0,511 MeV, objeto deste estudo, na direção do Centro Galáctico.

A detecção do fluxo da linha em 0,511 MeV proveniente do Centro Galáctico tem sido objeto de pesquisas de vários grupos, desde que Johnson (1972) e, posteriormente, Johnson and Haymes (1973) apresentaram os resultados acerca da detecção de um pico centrado em $(0,476 \pm 0,024)$ MeV, na direção do Centro Galáctico. Mais tarde, verificou-se existirem flutuações estatísticas nos dados, que provocaram o deslocamento do centro do pico (Leventhal et alii 1978b).

Posteriormente, Haymes et alii (1975), Leventhal et alii (1978a, 1980), Da Costa (1980) mediram fluxos provenientes do Centro Galáctico na linha de aniquilação do pósitron, com um bom nível de confiabilidade. Além disto, Mandrou et alii (1980) obteve um limite superior para o valor do fluxo.

Por outro lado, Johnson (1972) obteve alguns pontos para o espectro contínuo da radiação gama de baixa energia proveniente do Centro Galáctico, o que também foi obtido por Mandrou et alii (1980) e Gilman et alii (1978).

As explosões solares ("flares") ocorridas em 4 e 7 de agosto de 1972 proporcionaram a detecção de linhas gama de origem solar (Chupp, 1976), com implicações interessantes sobre escalas de tempo e densidades envolvidas em liberações de grandes quantidades de energia.

Além destas, observações de fontes conhecidas anteriormente em rádio podem possibilitar a detecção de linhas, provavelmente proveniente de pulsares. Por exemplo, linhas gama foram detetadas na direção da Nebulosa de Caranguejo (Kurfess, 1971; Leventhal et alii 1977; Ling et alii, 1977), assim como linhas ciclotrônicas (Jacobson et alii, 1978), detetadas também na direção de Hércules X-1 (Trümper, 1978, Dennis et alii, 1978).

Alguns "bursts" de raios gama também têm sido observados, o que levou à formulação de mecanismos que envolvem altas temperaturas para explicar os enormes valores de luminosidade para estes eventos. Kledesabel et alii (1973) detetaram "bursts" de raios gama, com um experimento que excluía a Terra e o Sol como fontes, o que os levou a associá-los com possíveis explosões estelares. Jacobson et alii (1978), durante um vôo de balão realizado em 1974 a bordo do qual estava um telescópio de alta resolução espectral, detetaram um "burst" com duração de 20 minutos; o espectro da radiação gama correspondente a este evento apresentou 4 linhas nucleares com energias de 0,41, 1,79, 2,22 e 5,59 MeV sobrepostas ao contínuo. Em 16 de agosto de 1976, durante a realização de um vôo transatlântico de balão com duração de 107 horas, "burst" com duração de 32 segundos foi observado por Sommer and Muller (1978). O instrumento detetor utilizado tinha uma boa resolução temporal e em energia, num intervalo de 100 KeV a 2 MeV, o que permitiu determinar sua característica espectral. Este foi o primeiro "burst" de radiação gama detetado por instrumentos a bordo de balão em coincidência com observações feitas por satélites. Mais tarde, Cline (1979) fez observações com auxílio de nove satélites, conseguindo assim uma alta resolução temporal, espectral e direcional de um evento transiente, fornecendo informações para a verificação de teorias de processos de não-equilíbrio, envolvidos na emissão de radiação gama de alta energia. O estudo de linhas gama em eventos transientes pode fornecer informações a respeito de reações nucleares que ocorrem nas vizinhanças de estrelas de nêutrons e buracos negros (Lingenfelter et alii, 1978; Ramaty et alii, 1980).

O estudo do ruído de fundo difuso da radiação gama, ou seja, o estudo da radiação gama contínua que não pode ser associada a nenhuma fonte galáctica ou extragaláctica conhecida, pode fornecer informações de aspecto cosmológicos, ou seja, a respeito de modelos de universo e evolução de galáxias (Trombka et alii, 1978; Cavallo and Di Fazio, 1980). Medidas do ruído de fundo difuso foram feitas, por exemplo, por Schönfelder et alii (1977); Damle et alii (1971); Trombka et alii (1977) e Vedrenne et alii (1971).

Neste trabalho, interessa-se particularmente pela região do Centro Galáctico e pela linha de aniquilação pósitron-elétron proveniente desta. Procura-se associar o fluxo medido desta linha a processos físicos envolvidos em sua emissão.

No Capítulo 2 apresenta-se uma breve descrição dos processos de formação da radiação gama.

O Capítulo 3 apresenta uma descrição do conjunto experimental utilizado para obtenção de dados, bem como de duas características principais.

No Capítulo 4 descreve-se o voo realizado com o telescópio SOURCE em 29 de março de 1980, bem como os objetivos científicos de tal voo e a redução de dados.

Finalmente no Capítulo 5 faz-se uma análise dos resultados obtidos e apresentam-se as conclusões acerca destes.

No Apêndice A descrevem-se os processos de interação da radiação gama com a matéria.

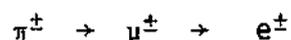
CAPÍTULO 2

PRINCIPAIS PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE RADIAÇÃO GAMA

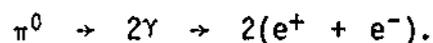
Os principais processos de produção de radiação X e gama podem ser, em geral, classificados como processos que envolvem interações fóton-elétron, ou como processos nucleares. O espectro da radiação gama medido a bordo de balões, em geral, mostra duas componentes: contínua e discreta (Schönfelder et alii, 1980).

A componente contínua da radiação gama de baixa energia tem sua origem associada predominantemente ao processo "bremsstrahlung" e ao efeito Compton inverso, sendo este último desprezível em relação ao primeiro, nesta faixa de energia (Ramaty et alii, 1975b). Em particular, o contínuo atmosférico da radiação gama no intervalo de energia compreendido entre 0,3 e 3 MeV é produzido predominantemente pelo processo "bremsstrahlung" de elétrons secundários, que por sua vez tem sua origem associada a três processos principais:

1) O decaimento de mésons carregados:



2) O decaimento de píons neutros (π^0), seguido do processo de produção de pares:



3) O processo "knock on", no qual um próton de alta energia colide com um núcleo, liberando um elétron.

Os processos acima são iniciados pela interação de raios cósmicos com a atmosfera. A Figura 2.1 mostra um esquema deste processo de cascata, iniciado por raios cósmicos muito energéticos.

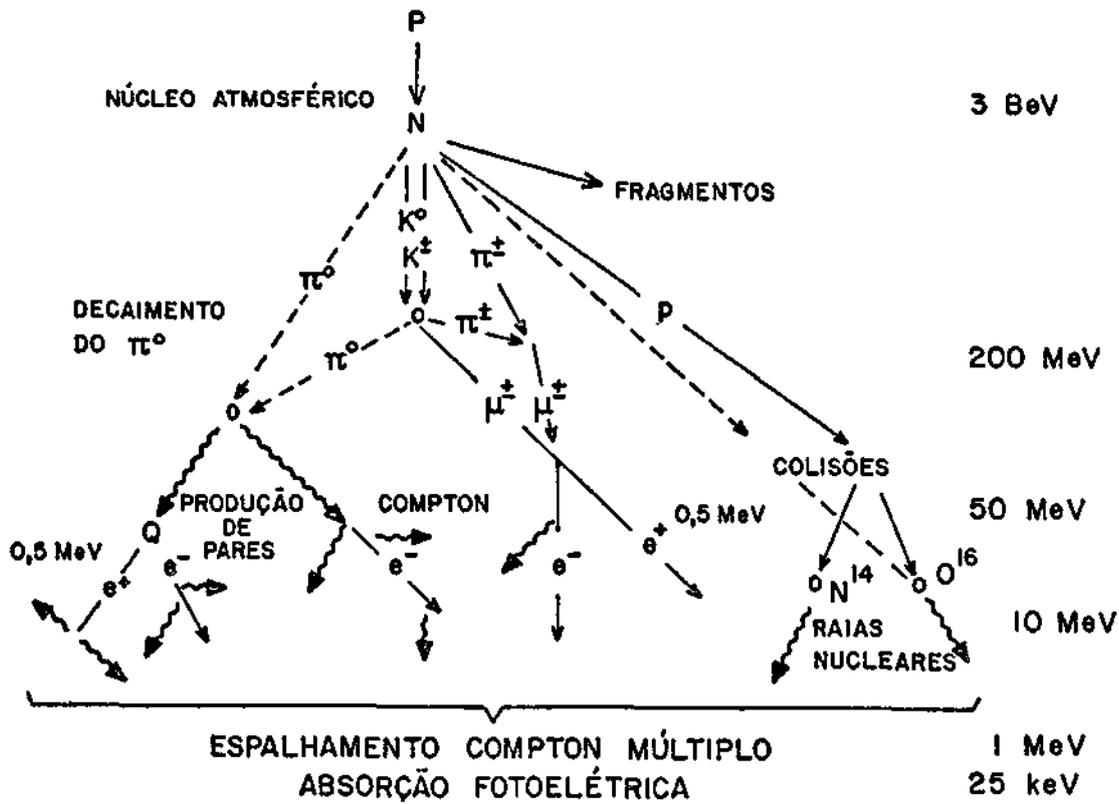


Fig. 2.1 - Produção de raios gama por raios cômicos incidentes na atmosfera.

A componente discreta é composta pela linha de aniquilação do pósitron (0,511 MeV) e por várias linhas de radiação gama emitidas via de-excitação nuclear de elementos do meio. No espectro medido, aparecem ainda linhas provenientes de de-excitação nuclear dos materiais próximos, ou pertencentes ao sistema de detecção.

A seguir, faz-se uma breve descrição dos processos responsáveis pela produção de radiação gama de baixa energia atmosférica e extraterrestre, a qual se propôs medir com o telescópio SOURCE.

2.1 - RADIAÇÃO DE FREIAMENTO ("BREMSSTRAHLUNG")

O processo "bremsstrahlung" consiste na difusão inelástica de elétrons no campo coulombiano de um núcleo, ou de um elétron.

Supõe-se que um elétron de massa m_e , com velocidade $\beta c \ll c$, move-se próximo a um núcleo de carga Ze . Como a massa do núcleo é muito maior que a massa do elétron, pode-se desprezar seu movimento durante a colisão. Ao passar perto do núcleo com carga Ze , o elétron é acelerado e emite energia. Sabe-se através da eletrodinâmica clássica que a energia emitida por unidade de tempo é dada pela fórmula de Larmor (Jackson, 1975):

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2 a^2}{c^3} \quad (2.1)$$

onde a é a aceleração da partícula dada por eE_e/m_e ; E_e é o campo elétrico; e e é a carga do elétron. Assim a intensidade, que é proporcional ao quadrado da aceleração (Ze^2/m_e), será proporcional a Z^2/m_e^2 (Evans, 1955). O processo "bremsstrahlung" de elétrons relativísticos é predominante na produção da componente contínua da radiação gama extra-terrestre, para energias até aproximadamente 10 MeV (Schönfelder et alii, 1980).

2.2 - RADIAÇÃO SINCROTRÔNICA ("MAGNETO-BREMSSTRAHLUNG")

A radiação sincrotrônica consiste na emissão de ondas eletromagnéticas, devido à deflexão de trajetórias de partículas carregadas em campos magnéticos. Se a velocidade de partícula é não-relativística, a taxa de perda de energia, por radiação, de uma partícula com carga Ze , que é igual a potência instantânea irradiada, é dada por (Rossi and Olbert, 1970):

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{2}{3} \frac{Z^2 e^2 a^2}{c^3}, \quad (2.2)$$

onde a é a aceleração instantânea da partícula.

A potência total emitida em todas as frequências para uma única partícula carregada de massa M e carga Ze é dada, num caso ultra-relativístico (Chupp, 1976), por:

$$-\frac{dE}{dt} = 0,98 \times 10^{-3} B_{\perp}^2 \left(\frac{Z^2 m_e}{M} \right)^2 \left(\frac{E}{Mc^2} \right)^2 \text{ eV/s} \quad (2.3)$$

onde B_{\perp} é a componente do campo magnético na direção perpendicular ao movimento da partícula em gauss (G), e m_e é a massa de repouso do elétron.

Para o caso de um elétron, ou seja, $M = m_e$ e $Z = 1$, a potência total emitida é dada por:

$$\frac{-dE}{dt} \approx 10^{-3} B_{\perp}^2 \gamma^2, \quad (2.4)$$

onde $\gamma = E/m_e c^2$.

2.3 - EFEITO COMPTON INVERSO

O efeito Compton inverso ocorre quando elétrons de alta energia colidem com fótons de baixa energia e fornecem energia a estes. Um esboço do processo é mostrado na Figura 2.2, onde $E = \gamma m_e c^2$ é a energia total do elétron, $m_e c^2$ é a energia de repouso deste e $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, sendo v a sua velocidade; α , o ângulo que o fóton incidente faz com o vetor velocidade do elétron; α_1 , o ângulo que o fóton de recuo faz com a trajetória do elétron; $\theta = \alpha + \alpha_1$, o ângulo de espalhamento do fóton; $E_0 = h \nu_0$, a energia do fóton antes da colisão; e $E_1 = h \nu_1$, a energia do fóton depois da colisão.

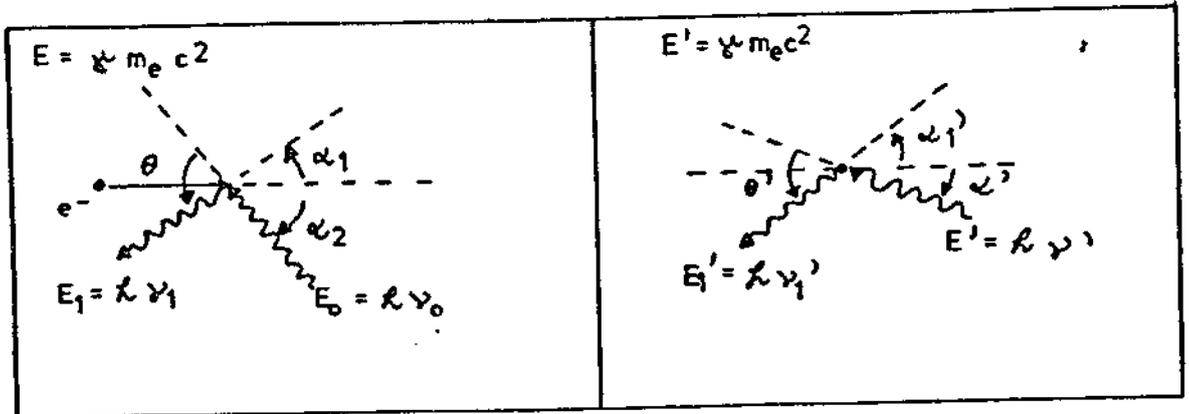


Fig. 2.2 - Efeito Compton inverso.

- a - Espalhamento Compton inverso, no referencial do laboratório.
- b - Espalhamento Compton inverso, no sistema de referência do elétron

A expressão exata para a energia do fóton espalhado no sistema de referência do laboratório (Chupp, 1976) é dada por:

$$E_1 = h\nu_1 = \frac{\gamma^2 E_0 (1 + \beta \cos \alpha) (1 - \beta \cos \alpha'_1)}{1 + (\gamma E_0 / m_e c^2) (1 + \beta \cos \alpha) (1 - \cos \theta')} \quad (2.5)$$

onde α'_1 é o ângulo que o fóton de recuo faz com a trajetória do elétron e θ' , o ângulo de espalhamento do fóton, no sistema de referência do elétron.

2.4 - ANIQUILAÇÃO PÓSITRON-ELETRON

O pósitron tem a propriedade de se combinar com um elétron, numa interação na qual a massa de repouso de ambos, pósitron e elétron, é transformada em radiação eletromagnética, chamada radiação de aniquilação. Os pósitrons podem se aniquilar com elétrons do meio, livres ou ligados a átomos ou moléculas. A aniquilação pode ser direta, ou através da formação intermediária do positrônio (ligação semelhante ao átomo de hidrogênio, com um pósitron no lugar do próton).

O principal modo de aniquilação direta ($e^+ + e^-$) é a interação eletromagnética, na qual são produzidos dois fótons, totalizando uma energia de $2 m_e c^2$. Se o momentum do centro de massa dos dois corpos é zero (no referencial do laboratório), os dois fótons terão direções opostas, cada um tendo uma energia de 0,511 MeV (Evans, 1955).

O pósitron pode também se aniquilar diretamente em três ou mais fótons:

$$e^+ + e^- \rightarrow \xi \gamma \quad \text{onde } \xi \geq 3.$$

Entretanto, a seção de choque para este processo é bem menor do que aquela para o processo emitido dois fótons, o que permite considerar que os pósitrons que se aniquilam diretamente com elétrons livres o fazem essencialmente através da emissão de dois fótons (Stecker, 1971).

Nas baixas energias (menores que alguns MeV), a seção de choque para a formação do positrônio torna-se muito maior que a seção de choque para a aniquilação livre, ou seja, a aniquilação via positrônio deve ser considerada. O positrônio apresenta-se em dois estados mais conhecidos:

- 1) *Parapositrônio* ("simpleto"): quando os spins dos elétrons são antiparalelos, apresentando uma vida média de 10^{-10} s.
- 2) *Ortopositrônio* ("triplete"): quando os elétrons têm spins paralelos, apresentando uma vida média de 10^{-7} s.

A aniquilação, por um ou outro estado, difere basicamente no número de fótons emitidos, que por sua vez, depende do momentum angular do estado estacionário (Chupp, 1976). O estado simpleto emite dois fótons, com energias 0,511 MeV, enquanto o estado triplete emite três fótons, que contribuem para o espectro contínuo no intervalo de energia compreendido entre 0 e 0,511 MeV ($0 < E < 0,511$ MeV). Uma vez formado no meio interestelar, em 75% das vezes o positrônio se aniqui

larã dando origem a três fôtons. A importância relativa dos dois processos de aniquilação depende diretamente da fração de pósitrons que forma o positrônio (Stecker, 1971). Esta linha gama está presente no espectro da radiação gama atmosférica com contribuição de origem extra terrestre.

2.5 - DECAIMENTO DO MÊSON π^0

Os mēsons são produzidos em interações nucleares e, em particular, na interação de raios cōsmicos com a matēria (atmosfērica ou interestelar). Os produzidos mais comumente sã os mēsons que podem ser neutros (π^0), ou carregados (π^+ ou π^-). Os mēsons π^0 decaem em dois fôtons, onde cada um tem uma energia de $m_{\pi^0} c^2/2 = 68$ MeV no sistema de referēncia do mēson. O tempo de vida de um mēson π^0 ē da ordem de 2×10^{-6} s (Rossi, 1964), e o processo de decaimento dos mēsons π^0 ē uma importante fonte de fôtons gama com energias superiores a 50 MeV, dando como caracterīstica do espectro para estas energias um pico (alargado), na regiã de aproximadamente 70 MeV, tanto na atmosfera como no espectro difuso cōsmico.

Os mēsons π^0 podem ser produzidos, por exemplo, por interações prōton-prōton (p-p), prōton-partīculas α (p- α), (α -p), ou ainda por interações prōton-antiprōton ou por interação de um fôton com um prōton, num processo dado basicamente por $\gamma + p \rightarrow p + \pi^0$, com posterior decaimento do mēson π^0 . Em condiçōes astrofīsicas, o prōton ē altamente energētico, enquanto o fôton tem baixa energia (Chupp, 1976).

2.6 - DE-EXCITAÇÃO NUCLEAR

A de-excitaçã de um nūcleo dã lugar a emissã de fôtons gama, produzindo as chamadas linhas nucleares, podendo ainda, atravēs de de-excitaçōes sucessivas ao estado fundamental, contribuir para um acrēscimo no ruīdo de fundo nas baixas energias. A excitaçã do nūcleo pode-se dar atravēs de interaçōes entre nūcleos constituintes da atmosfera ou meio interestelar e partīculas carregadas ou neutras. As inte

reações podem ser do tipo captura de prótons (p, γ), de nêutrons (n, γ), ou partículas mais pesadas ou espalhamento, ($p, p' \gamma$), ($n, n' \gamma$), que pode ser elástico ou inelástico. A captura de nêutrons pode ainda levar a um núcleo radioativo, resultando em ativação de raios gama. Reações com nêutrons rápidos, tais como:

(n, p) , (n, α) , $(n, \alpha n)$, podem também produzir ativação.

As linhas comumente produzidas estão associadas aos elementos mais abundantes presentes no meio. Na atmosfera, em geral, estão associadas ao C, N e O. No meio interestelar, as linhas mais prováveis são as produzidas pelos elementos Fe^{56} , Mg^{24} , Ne^{20} , Si^{28} , N^{14} , C^{12} e O^{16} excitados. Estes são resultantes de interações entre partículas altamente energéticas e o gás ou poeira interestelar (Lingenfelter and Ramaty, 1978; Ramaty, 1979).

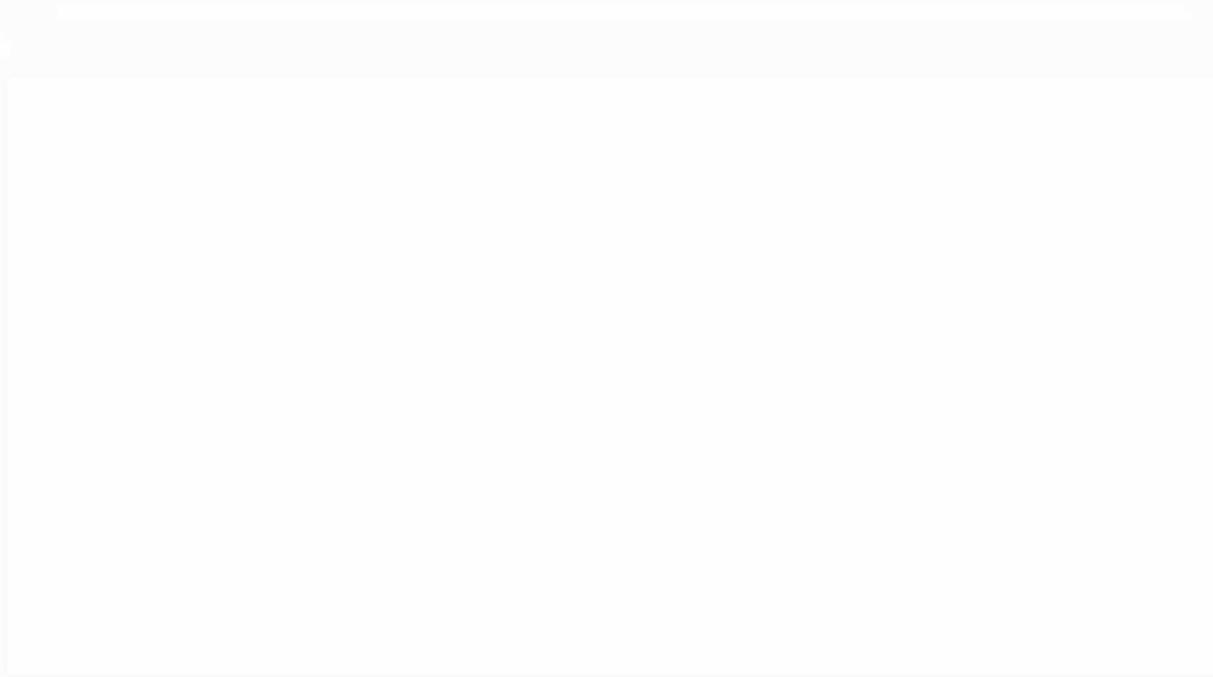
Linhas nucleares também são esperadas em observações de supernovas ou restos de supernovas, como resultado de certas cadeias de decaimento, como: Co^{60} , Sc^{44} , Ni^{56} , Al^{26} e Na^{22}

Na Tabela 2.1 mostra-se, de uma maneira sucinta, uma associação entre o processo que originou a radiação gama e a sua região de origem.

TABELA 2.1

ASSOCIAÇÃO ENTRE AS REGIÕES E OS PROCESSOS QUE DÃO ORIGEM À RADIAÇÃO GAMA

NATUREZA	PROCESSOS	ORIGEM	
		ATMOSFÉRICA	ASTROFÍSICA
Contínuo	Freiamento	SIM	SIM
	Efeito Compton Inverso	NÃO	SIM
	Efeito Compton	SIM	SIM
Linhas	Aniquilação $e^+ + e^-$	SIM	SIM
	Decaimento de mésons π^0	SIM	SIM
	De-excitação nuclear	SIM	SIM



•
•
•

CAPÍTULO 3

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

3.1 - DESCRIÇÃO DO TELESCÓPIO ANTICOLIMADO PASSIVAMENTE

O princípio fundamental da operação de um detetor de cintilação é a emissão de fótons ópticos pelo cristal do cintilador, como resultado da interação de fótons gama com o material do cristal (Apêndice A). Em cada um destes mecanismos, a energia do fóton incidente é eventualmente convertida num estado atômico excitado, cujo decaimento é acompanhado pela emissão de fótons ópticos, os quais podem ser detetados por fotomultiplicadoras. A corrente criada na fotomultiplicadora é diretamente proporcional à energia da radiação gama incidente, absorvida no cristal cintilador.

A configuração básica do telescópio de raios gama SOURCE, usado para obtenção de dados embarcado a bordo de balões estratosféricos, é mostrada na Figura 3.1. O telescópio é composto de dois cintiladores NaI(Tl) (detetores) de 4" x 4" (10,16 cm x 10,16 cm), separados por uma distância de 90 cm, e de uma blindagem de 20 cm (diâmetro) x 5 cm (espessura) de chumbo (Pb), equidistante e ao longo do eixo dos dois detetores, cuja função é bloquear fótons extraterrestres, antes que atinjam o ângulo de visada do detetor inferior. A parte frontal dos cristais é recoberta por 1,5 cm de cintilador plástico NE102A, cuja função é parar partículas carregadas: elétrons com energia de até 2,5 MeV e prótons com energias de até 35 MeV, aproximadamente. A cada detetor está associada uma fotomultiplicadora (PM), e a cada conjunto detetor-PM está conectado um codificador SEIN de 128 canais, dos quais 102 são canais úteis para obtenção do espectro no intervalo de energia de 0,3 a 3 MeV. Energias superiores a 3 MeV são registradas pelos canais superiores ao 113. O tempo morto deste conjunto detetor, ou seja, o tempo mínimo que deve separar dois eventos de modo que sejam registrados como pulsos separados é de 8,7 ms.

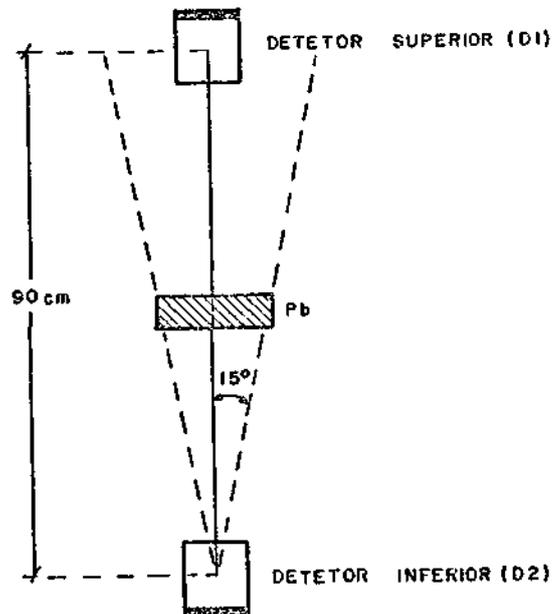


Fig. 3.1 - Configuração básica do telescópio de raios gama "SOURCE".

O detector inferior (D2) mede ruído de fundo (RF) atmosférico e difuso, exceto num cone de aproximadamente 30° (veja Figura 3.2), na energia de 1 MeV. O detector superior (D1) também mede ruído de fundo atmosférico e difuso, e quando existe uma fonte emissora gama em trânsito, ou seja, dentro do ângulo de visada do detector, apenas D1 irá medir sua contribuição. Chamando-se R_1 a taxa de contagens registradas em D1 e R_2 , a registrada em D2, em princípio, a diferença $R_D = R_1 - R_2$ (contagens por s) dá a contribuição da fonte num intervalo de energia E (keV). Na prática, é necessário subtrair para ambos os detectores as contagens de ruído de fundo, quando não existir fontes no ângulo de visada, ou seja, deve-se selecionar uma região onde haja apenas ruído de fundo.

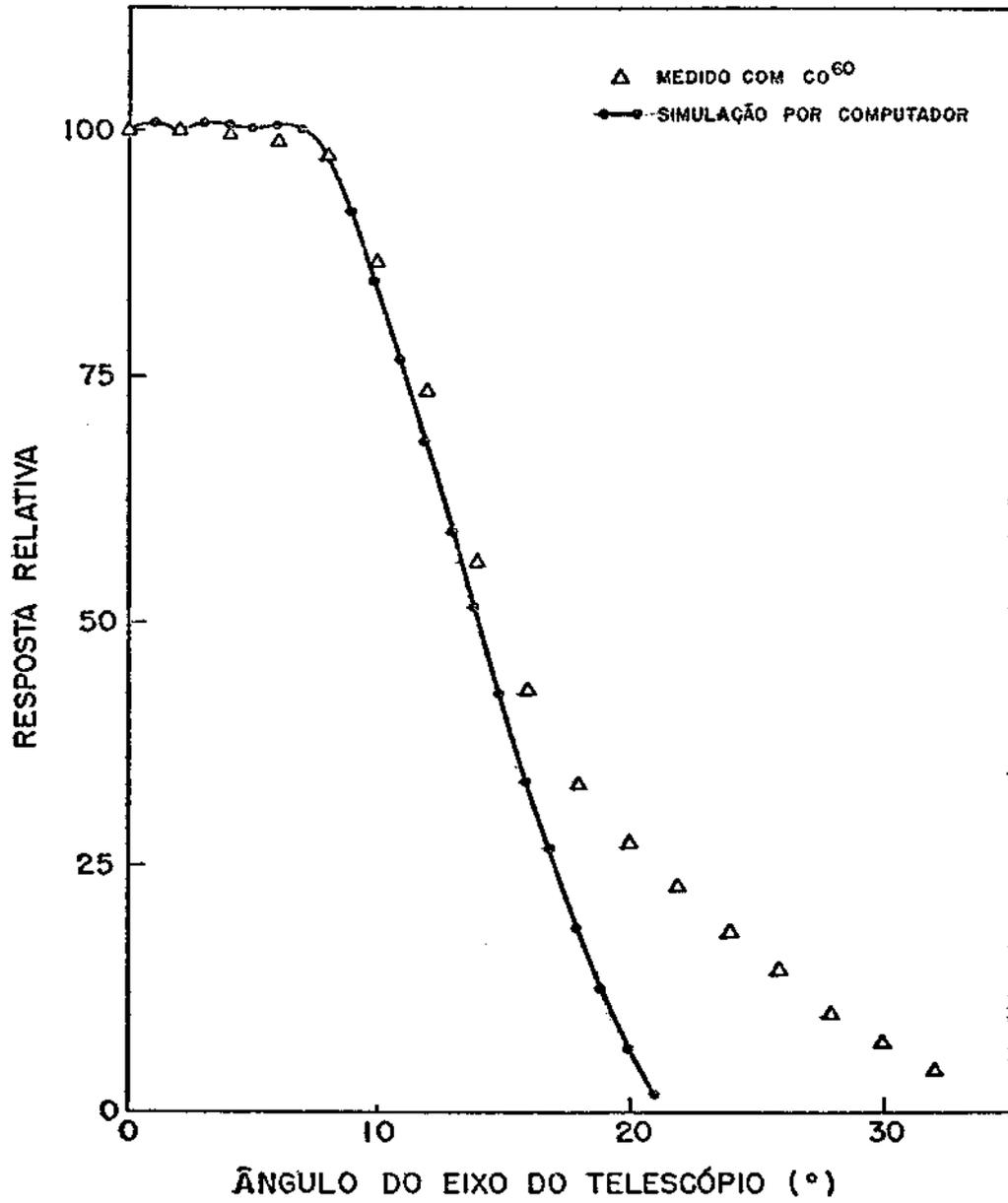


Fig. 3.2 - Resolução angular do telescópio SOURCE.
FONTE: Benson et alii (1981), p.613.

3.2 - CALIBRAÇÃO DO TELESCÓPIO

Vários testes foram feitos em laboratórios com o telescópio SOURCE, a fim de determinar sua resolução angular e em energia, sua eficiência e sua linearidade. Os testes de laboratório foram feitos, utilizando-se várias fontes radioativas: Na²²; Cs¹³⁷, Co⁶⁰, e Th²²⁴.

A linearidade foi analisada utilizando-se as diferentes fontes radioativas. Para uma única fonte, a resposta do instrumento é um pico de forma gaussiana, centrado na energia da radiação gama emitida pela fonte. A cada pico corresponde um número de canal que registra a taxa de contagens máxima. Pode-se ver pela Figura 3.3, a relação energia (E) versus número de canal (N), que obedece a seguinte equação:

$$E(\text{MeV}) = 0,0259 N + 0,0269 , \quad (3.1)$$

ajustada aos dados observados pelo método dos mínimos quadrados, cujo coeficiente de determinação é $r = 0,999$.

Por procedimento análogo, determina-se sua resolução em energia (R) para cada detetor, através de uma convenção definida por:

$$R(\%) = \Delta E/E , \quad (3.2)$$

onde E é a energia do pico, e ΔE é a largura total da linha medida a meia intensidade da taxa de contagens devido à fonte. A relação obtida para resolução em energia foi:

$$\left[\frac{\Delta E}{E} \right] = 782,44 \left[\frac{E}{\text{keV}} \right]^{-0,63} \quad (3.3)$$

com coeficiente de determinação $r = 0,964$. Esta curva é mostrada na Figura 3.4 e se apresenta de acordo com o esperado, ou seja, uma resolução de aproximadamente 10% em 1 MeV, prevista pelo fabricante.

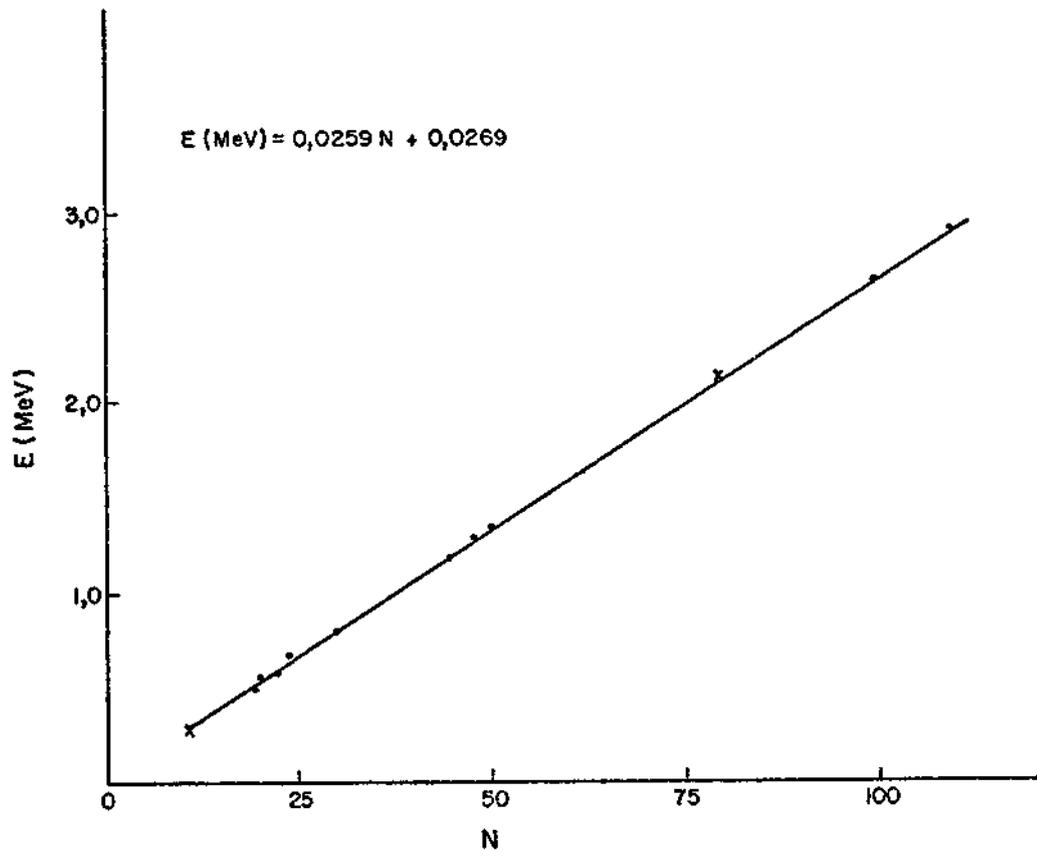


Fig. 3.3 - Energia (E) versus número de canal (N) (Linearidade).

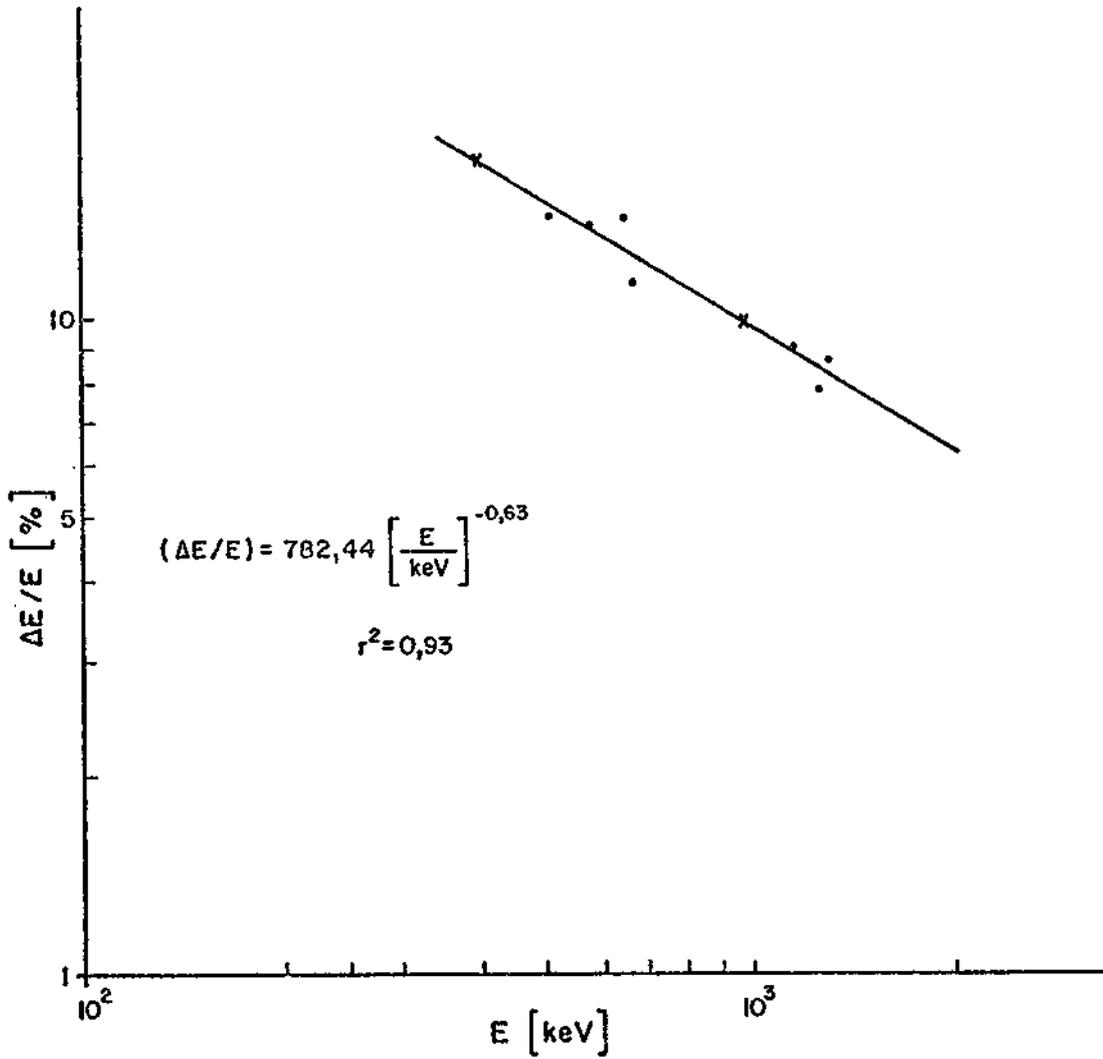


Fig. 3.4 - Resolução em energia (R), para um cristal NaI 4" x 4".

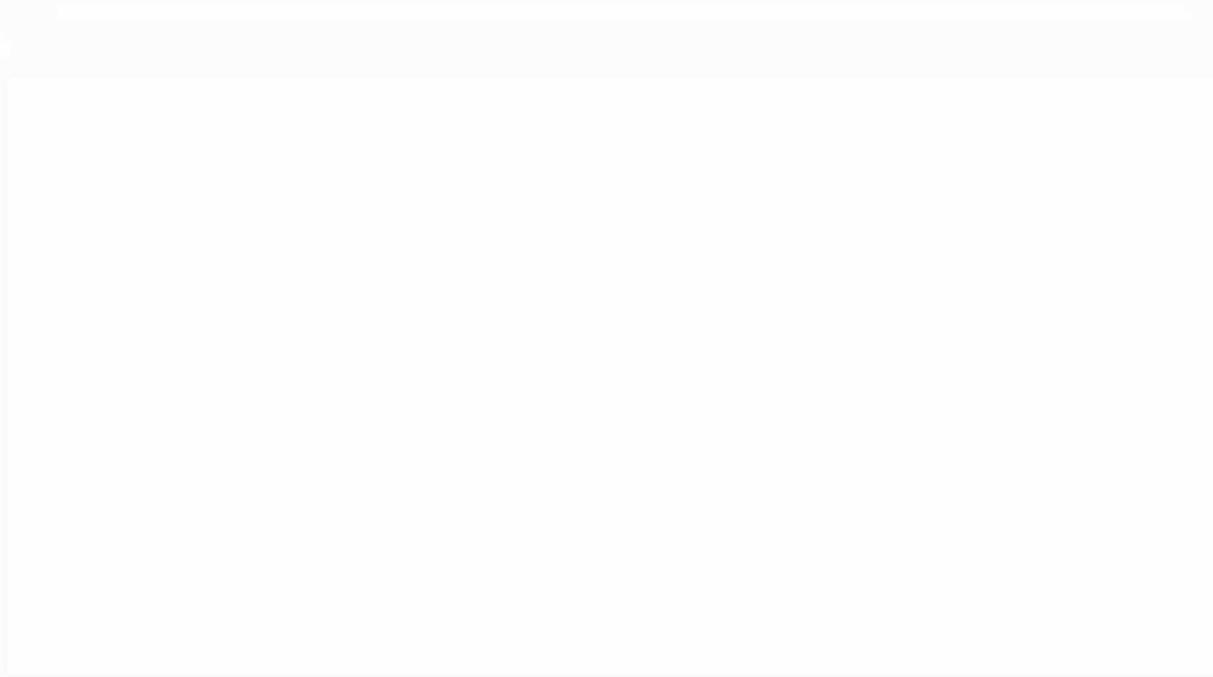
A resolução angular do telescópio é determinada pela distância que separa os cristais e pelas dimensões da blindagem. A Figura 3.2 mostra a resposta angular do telescópio com a configuração descrita anteriormente, obtida experimentalmente, usando-se as linhas em 1,17 e 1,33 MeV do Co^{60} , bem como a resposta do telescópio a um feixe paralelo, obtida por uma simulação em computador. Com isto determinou-se o FWHM (largura total a meia intensidade), obtendo-se um valor de 30° para energias da ordem de 1,2 MeV. A diferença entre a resposta medida e a resposta do modelo para ângulos maiores é devida à presença adicional de materiais absorvedores no telescópio, que não foi levada em conta no modelo (Benson et alii, 1981).

O Fluxo Mínimo detetável, para um nível de confiabilidade de de 3 σ , pelo telescópio SOURCE em sua configuração atual foi calculada como sendo $2,4 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para a energia de 0,662 MeV, onde foi utilizada uma fonte radioativa de Cs^{137} calibrada (Benson et alii, 1981).

3.3 - OBTENÇÃO DOS DADOS

Os eventos codificados a bordo do balão foram transmitidos para Terra por telemetria FM-FM e gravados inicialmente em fitas magnéticas analógicas. Posteriormente, os eventos analógicos passaram por um decodificador SEIN e por um analisador multicanal HP5400A, onde foram integrados, aproximadamente, de 5 em 5 minutos na subida do balão e de 10 em minutos durante o teto, salvo nas horas em que houve troca de fitas, onde o intervalo foi menor.

Os resultados saíram numa impressora de fita de papel, sendo em seguida analisadas.



CAPÍTULO 4

DESCRIÇÃO DO VÔO REALIZADO EM 29 DE MARÇO DE 1980 E RESULTADOS

4.1 - OBJETIVOS CIENTÍFICOS

Os principais objetivos do vôo teste, realizado em 29 de março de 1980 com o telescópio SOURCE a bordo de um balão estratosférico, lançado de Cachoeira Paulista na latitude $\lambda = 22^{\circ}40'S$ e longitude $45^{\circ}W$, foram observar a linha de aniquilação do pósitron em 0,511 MeV e detectar a radiação gama de baixa energia no contínuo, proveniente do Centro Galático. Além destes, houve o objetivo técnico de testar a eficiência de um telescópio anticolimado passivamente. Os resultados neste sentido são apresentados por Benson et alii (1981), enquanto os primeiros são mostrados neste trabalho.

A detecção do fluxo da linha de aniquilação do pósitron em 0,511 MeV, proveniente do CG, fornece condições de estimar a taxa de produção de pósitrons e de testar algumas fontes de pósitrons previstas teoricamente.

Atualmente, ainda existem poucas informações a respeito da radiação gama proveniente do Centro Galático. A primeira evidência quanto à existência de uma linha proveniente do CG foi obtida por Johnson (1972), que indica a existência de um pico no espectro na região de $(0,476 \pm 0,024)$ MeV. A provável origem da linha observada foi atribuída como sendo devida à de-excitação do Li^7 em 0,478 MeV; isto porque, para atribuí-la à aniquilação elétron-pósitron seria necessário que (Johnson, 1972):

- 1) o objeto emissor estivesse com velocidade radial de aproximadamente 450 km s^{-1} , isto é, escaparia da galáxia em 10^6 anos;

- 2) a aniquilação ocorresse na atmosfera de estrelas de nêutrons, porém com uma densidade de pósitrons muito alta. O que levou Johnson a concluir ser pouco provável sua hipótese. Mais tarde verificou-se haver flutuações estatísticas dos dados, o que explicaria o deslocamento do pico (Leventhal et alii 1978b).

Posteriormente, Haymes et alii (1975) confirmaram a existência de uma linha proveniente do Centro Galático, associada à linha de aniquilação elétron-pósitron. Observações do fluxo desta linha foram obtidas também por Leventhal et alii (1978a) e Da Costa (1980), além de um limite superior obtido por Mandrou et alii (1980).

4.2 - DESCRIÇÃO DO VÔO

O telescópio SOURCE foi lançado a bordo de um balão estratosférico de 74.000 m³, às 23:00 (TL) do dia 28 de março de 1980, de Cachoeira Paulista-SP, cuja latitude permite observar a região do Centro Galático próxima ao zênite. Este telescópio atingiu um teto de ~ 4 mb (~ 4 g/cm²) a 01:04 (TL), com todos os instrumentos a bordo funcionando bem. O vôo teve uma duração de 15 horas, mas apenas os dados obtidos até aproximadamente 08:00 (TL) do dia 29 de março de 1980 foram úteis para a análise. A Figura 4.1 mostra a trajetória seguida pelo balão em coordenadas galáticas, após ter atingido seu teto.

A Figura 4.2 mostra a taxa de contagem integrada entre os canais II e III, levando-se em conta a correção do tempo morto observada pelo detetor superior em função do tempo, durante a subida do balão, até este atingir seu teto. As contagens registradas pelo detetor inferior, durante a subida, foram prejudicadas pelo ruído introduzido quando da transmissão de dados pela telemetria, não sendo por isto apresentadas aqui.

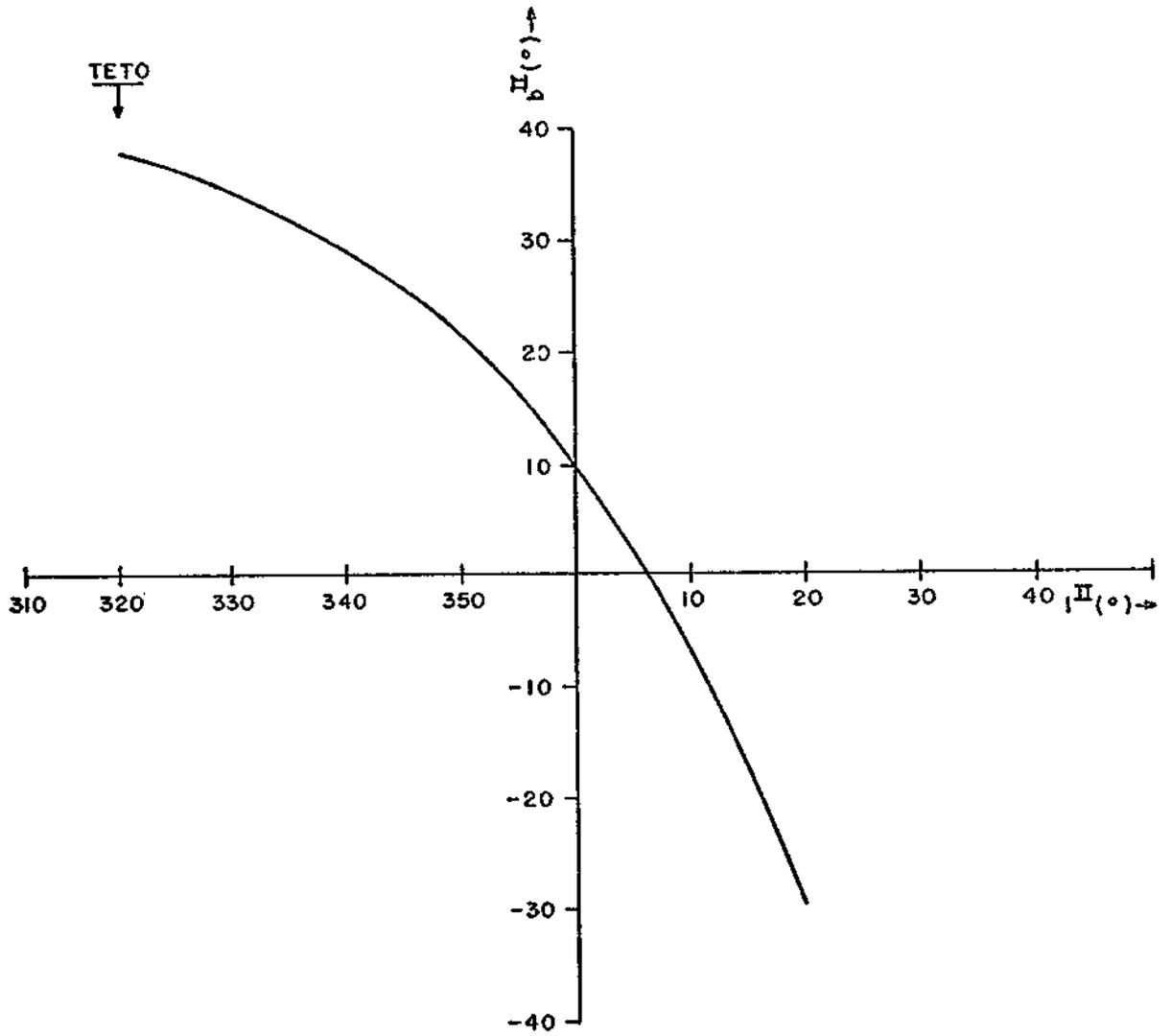
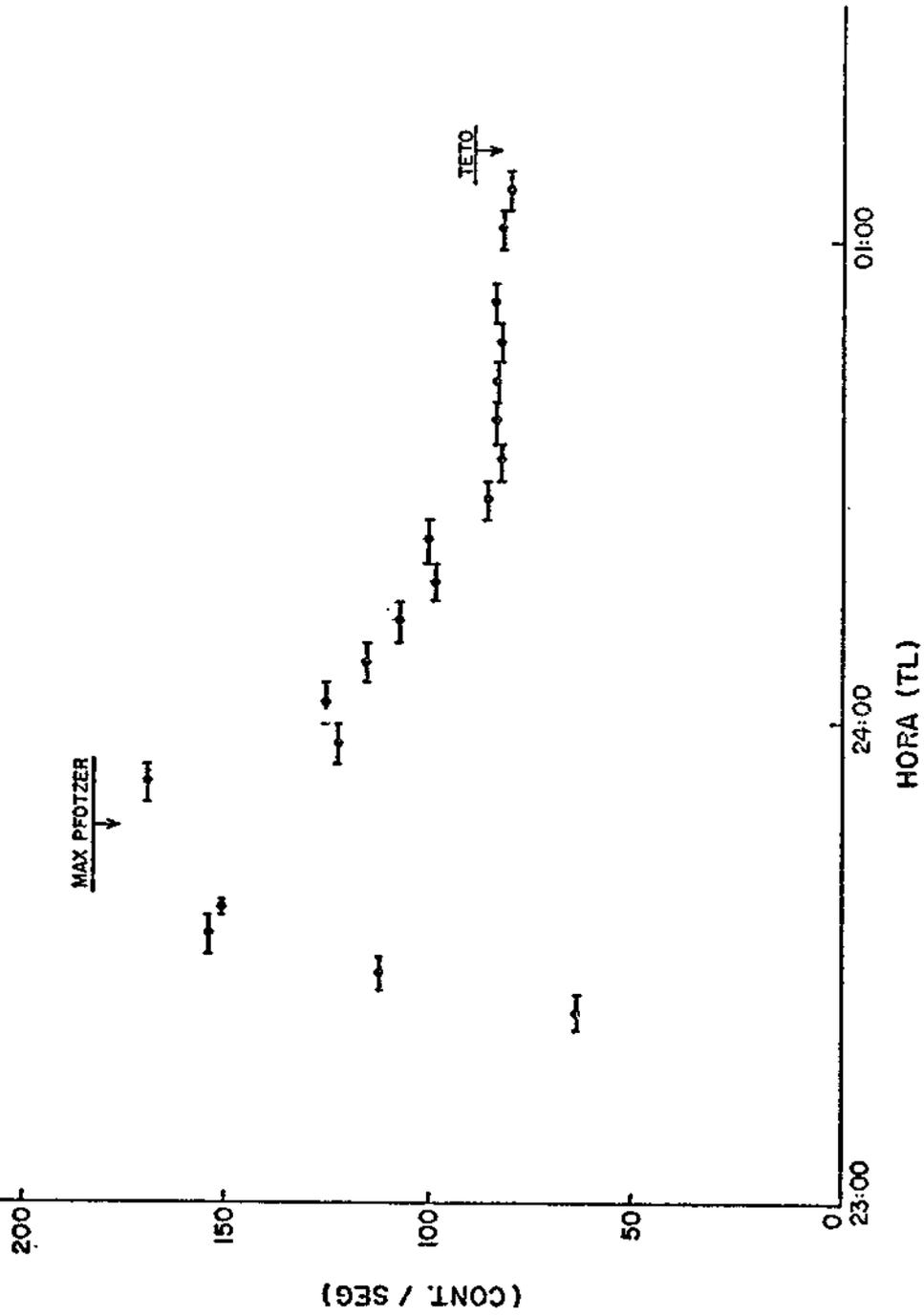


Fig. 4.1 - Trajetória do balão em coordenadas galáticas.



A Figura 4.3 mostra o espectro na região da passagem do Centro Galáctico superposto ao obtido para um mesmo tempo de integração (01:30 h) para o ruído de fundo pelo detetor superior, e apresenta um excesso de contagens, para a região que engloba a linha de aniquilação do pósitron em 0,511 MeV, quando da passagem do Centro Galáctico.

A variação temporal da linha em 0,511 MeV foi obtida por integrações sucessivas, inicialmente em intervalos de 10 em 10 minutos, supondo-se que o ruído de fundo (RF) obedece a uma lei de potência $R = aN^{-b}$ (ou $R = aE^{-b}$), onde R é a taxa de contagens e N é o número do canal (E é a energia) (veja por exemplo Beuermann, 1971; Ling, 1974), e utilizando-se apenas o detetor superior para a obtenção de uma melhor resolução em energia (~ 25 keV por canal). O ângulo de visada do detetor superior observou o disco galáctico no intervalo de longitude de $-31^{\circ} < l_{II} < +41^{\circ}$, quando $b_{II} \approx 0$.

Acima do contínuo, suposto para o RF, observa-se um excesso devido à contribuição da linha em 0,511 MeV. Como exemplo do método usado, pode-se observar a Figura 4.4 que apresenta o ajuste para o RF feito para o intervalo 01:34-01:44 (TL). O excesso devido à linha dá $R_{0,511}$ (contagens/s nesta energia). Sabendo-se que:

$$\left[\frac{F_{0,511}}{\text{fótons cm}^{-2} \text{ s}^{-1}} \right] = \left[\frac{R_{0,511}}{\text{cont/s}} \right] \left[\frac{1}{\epsilon_{0,511} \times A_{ef}} \right], \quad (4.1)$$

obtem-se o fluxo médio ($F_{0,511}$) da linha 0,511 MeV para o intervalo de tempo usado, no caso 10 minutos.

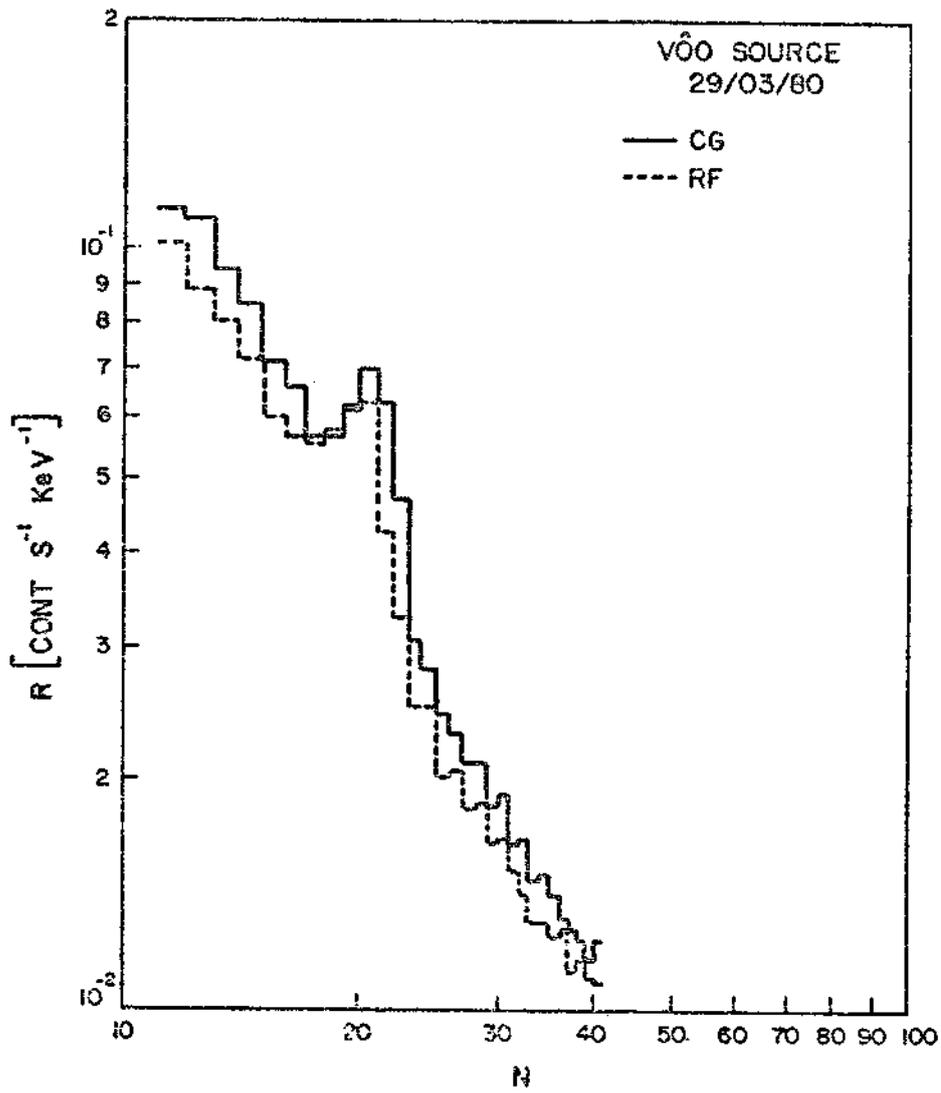


Fig. 4.3 - Espectros observados num tempo de integração de 1 hora e meia, do ruído de fundo (RF) e da região em que o CG estava dentro do ângulo de abertura do detetor superior.

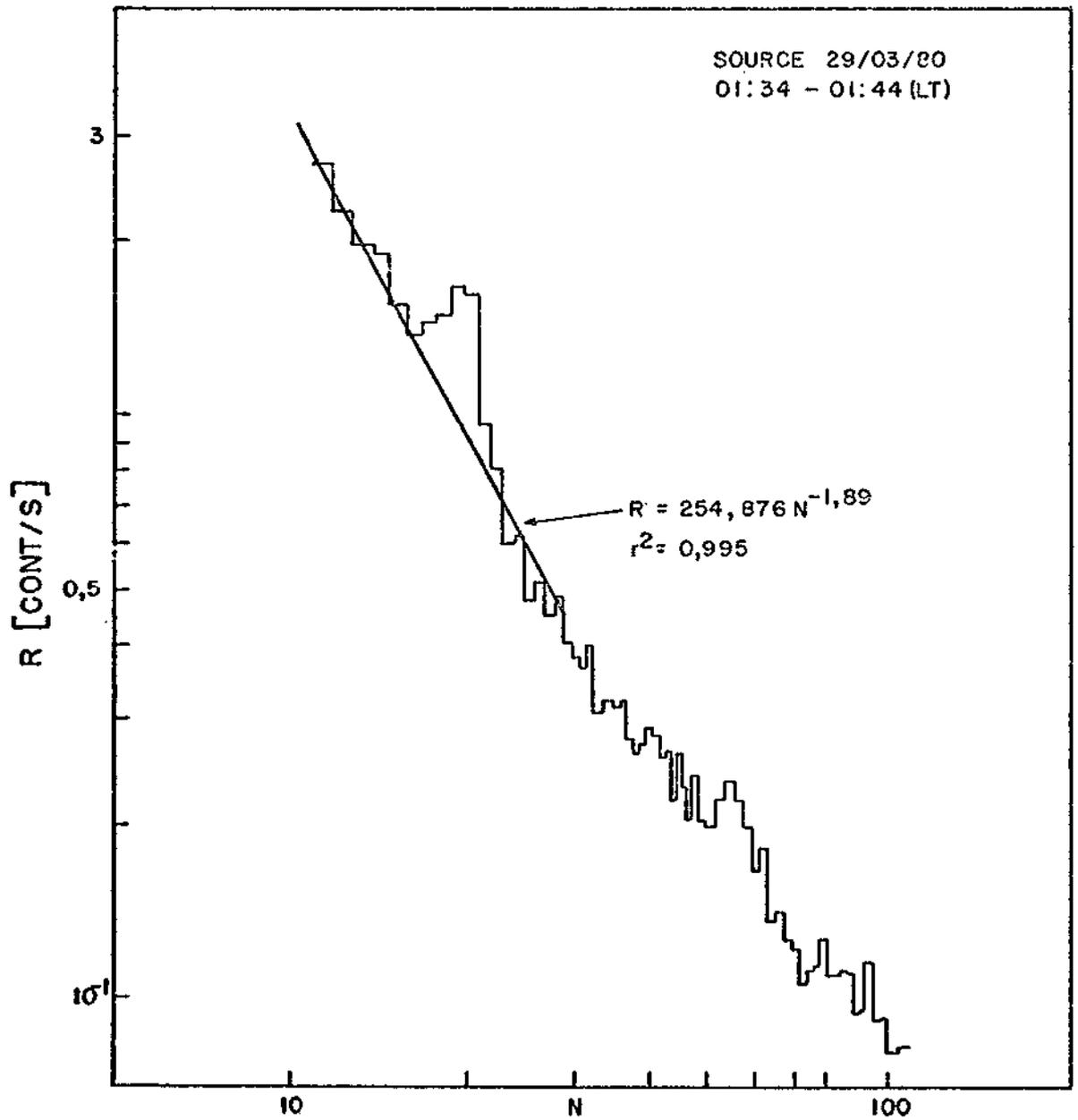


Fig. 4.4 - Espectro integrado para o intervalo de tempo entre 01:34-01:44 (TL), para o detetor superior.

Na Equação 4.1, $\epsilon_{0,511}$ representa a eficiência do detetor NaI(Tl) na energia de 0,511 MeV, no caso igual a 0,73 (veja Nuclear Enterprises, Ltd, 1977) e A_{ef} é a área efetiva do detetor dada por (Martin, 1970):

$$A_{ef} = \frac{\pi}{4} ah \left(1 + \frac{a}{2h} \right) \quad (4.2)$$

onde a e h são as dimensões do cristal. No presente caso, $a = h = 10,16$ cm, o que dá $A_{ef} = 121,61$ cm².

A Figura 4.5 mostra a variação temporal da linha em 0,511 MeV em intervalos de meias horas, obtido a partir da variação temporal em intervalos de 10 minutos, por médias estatísticas (Bevington, 1968).

A partir da variação temporal da linha em 0,511 MeV, pode-se estimar o fluxo desta linha proveniente do CG. A Figura 4.6 mostra os fluxos médios para o ruído do fundo (RF) e para a região onde o Centro Galáctico (CG) estava dentro do ângulo de visada do detetor. A intensidade do fluxo obtida para linha em 0,511 MeV, proveniente do CG, foi de $(6,70 \pm 0,85) \times 10^{-3}$ fótons cm⁻² s⁻¹ (Jardin et alii, 1981a e b).

A Figura 4.7 mostra os pontos obtidos por este experimento para o espectro de CG, assim como pontos obtidos por outros grupos; aqueles foram obtidos a partir do fluxo residual das curvas de contagens, por intervalo de energia, em função do tempo, ao longo do teto. Para isto, usaram-se as diferenças de contagens entre o detetor superior e inferior, que podem ser vistas na Figura 4.8, para os intervalos de energia, 0,338 a 0,4931 MeV e 0,4931 a 0,674 MeV. A partir das diferenças estimou-se uma média para o RF e para a região do CG, para um mesmo intervalo de tempo (1 hora e meia). Deve-se ressaltar que o excesso devida à linha em 0,511 MeV foi retirado ao se efetuarem os cálculos. A diferença entre as contagens registradas quando da passagem do CG e o RF dá o fluxo médio para os intervalos de energia citados acima. Com o procedimento utilizado, os resultados obtidos são de natureza estatística. Intensidades de fluxo para energias superiores a 600 keV não pu

deram ser obtidas, porque houve um aumento de contagens no detector inferior para energias desta ordem, devido às linhas induzidas no alumínio da gôndola e eletrônica associada.

Os resultados e conclusões a respeito dos dados apresentados anteriormente serão discutidos no capítulo seguinte.

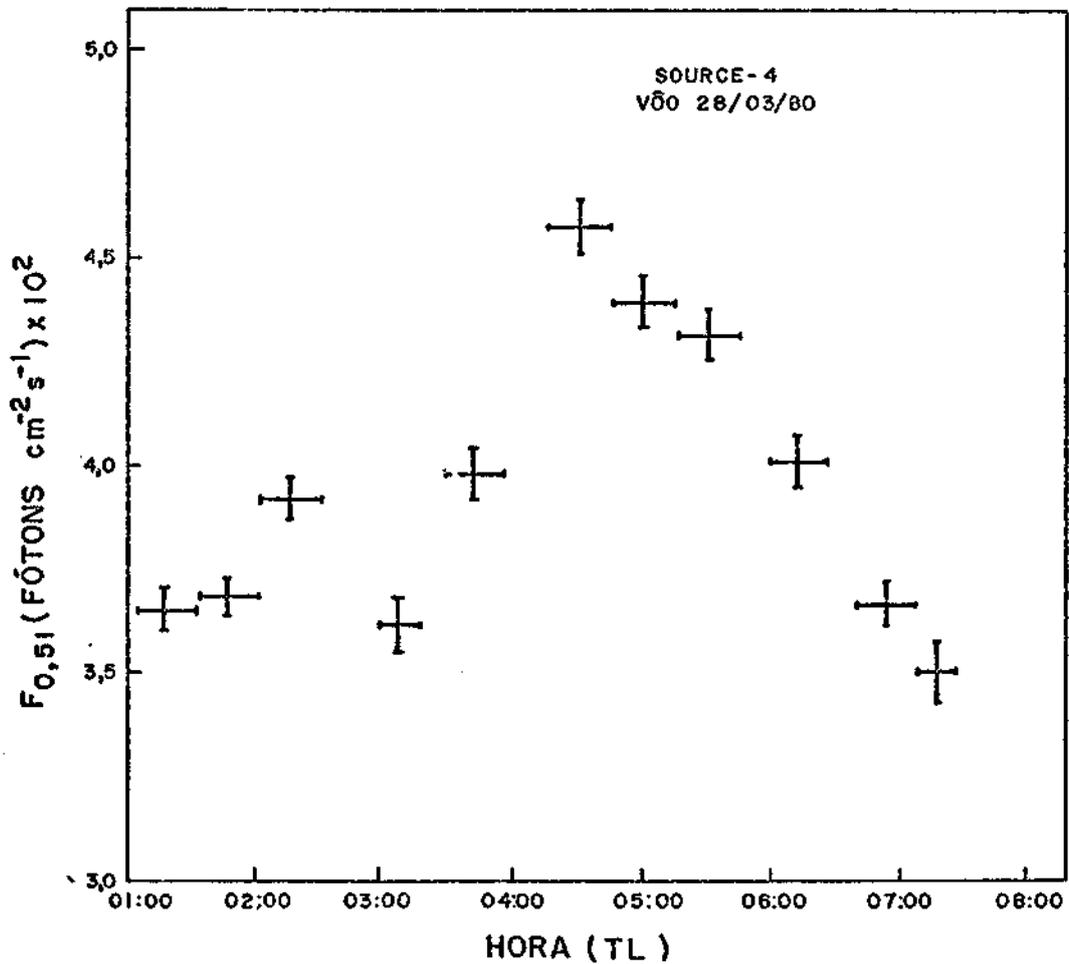


Fig. 4.5 - Variação temporal da linha em 0,511 MeV corrigida para a absorção atmosférica.

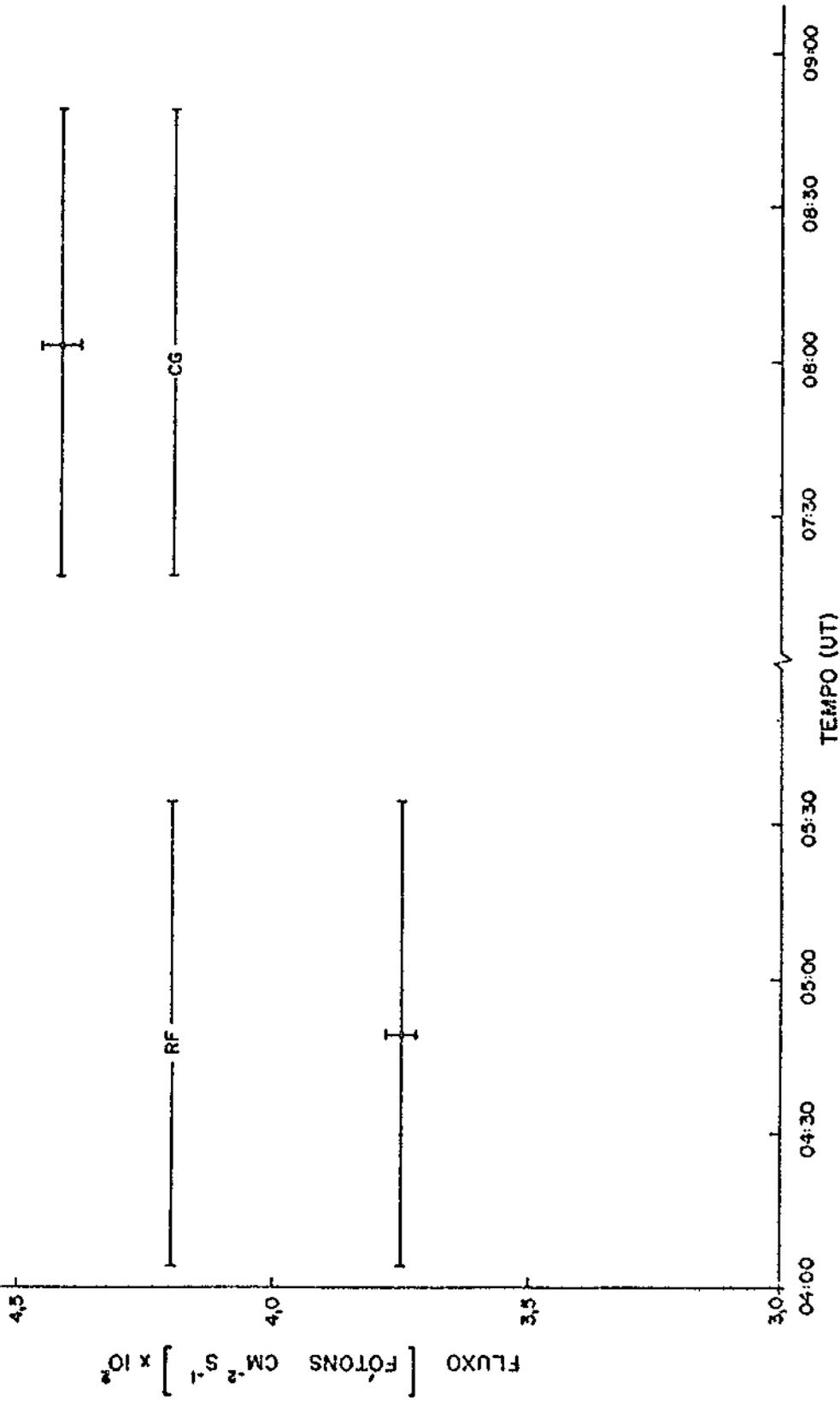


Fig. 4.6 - Fluxos médios para a linha em 0,511 MeV e para o RF na direção do CG.

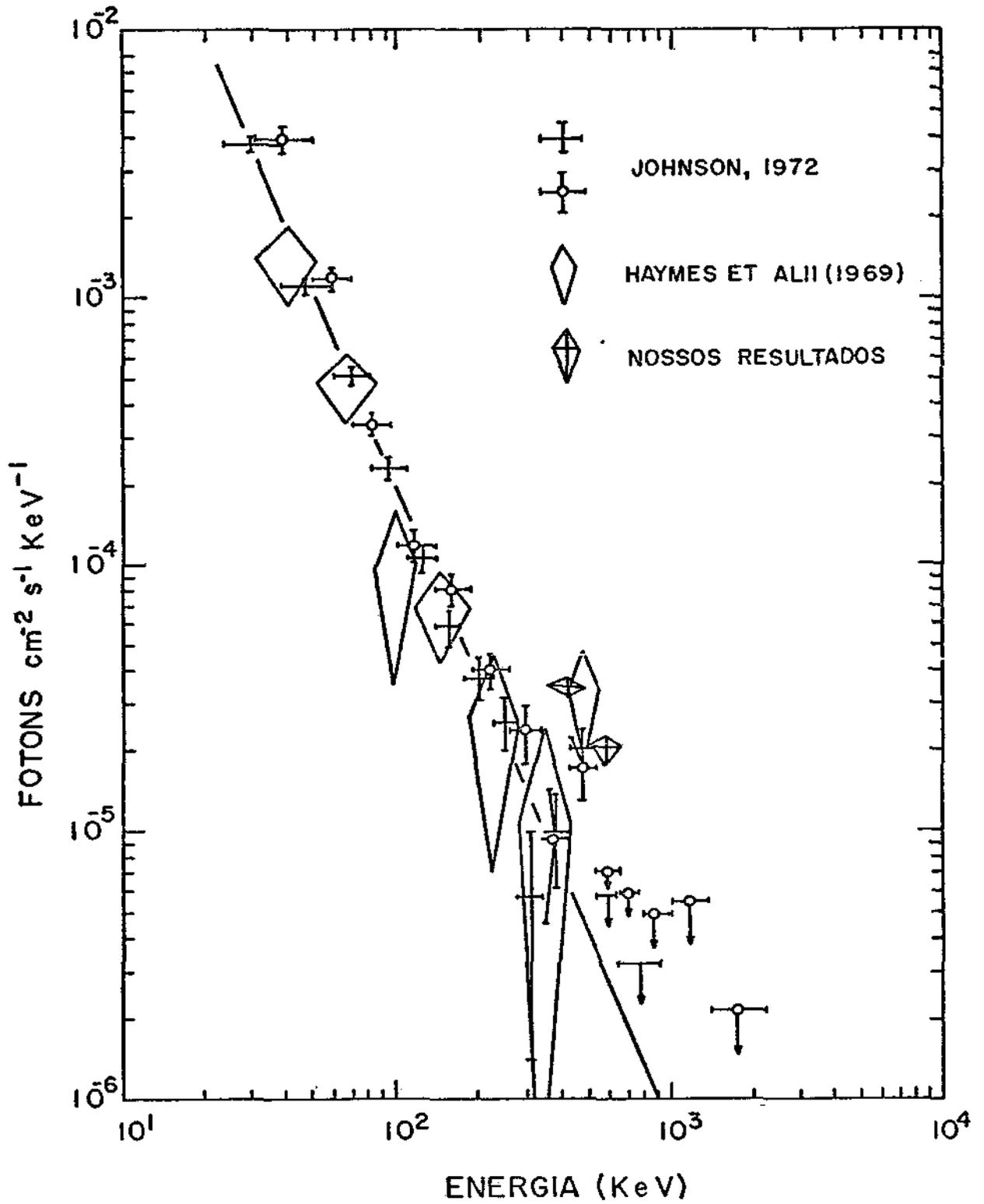


Fig. 4.7 - Espectro contínuo para a direção do CG.

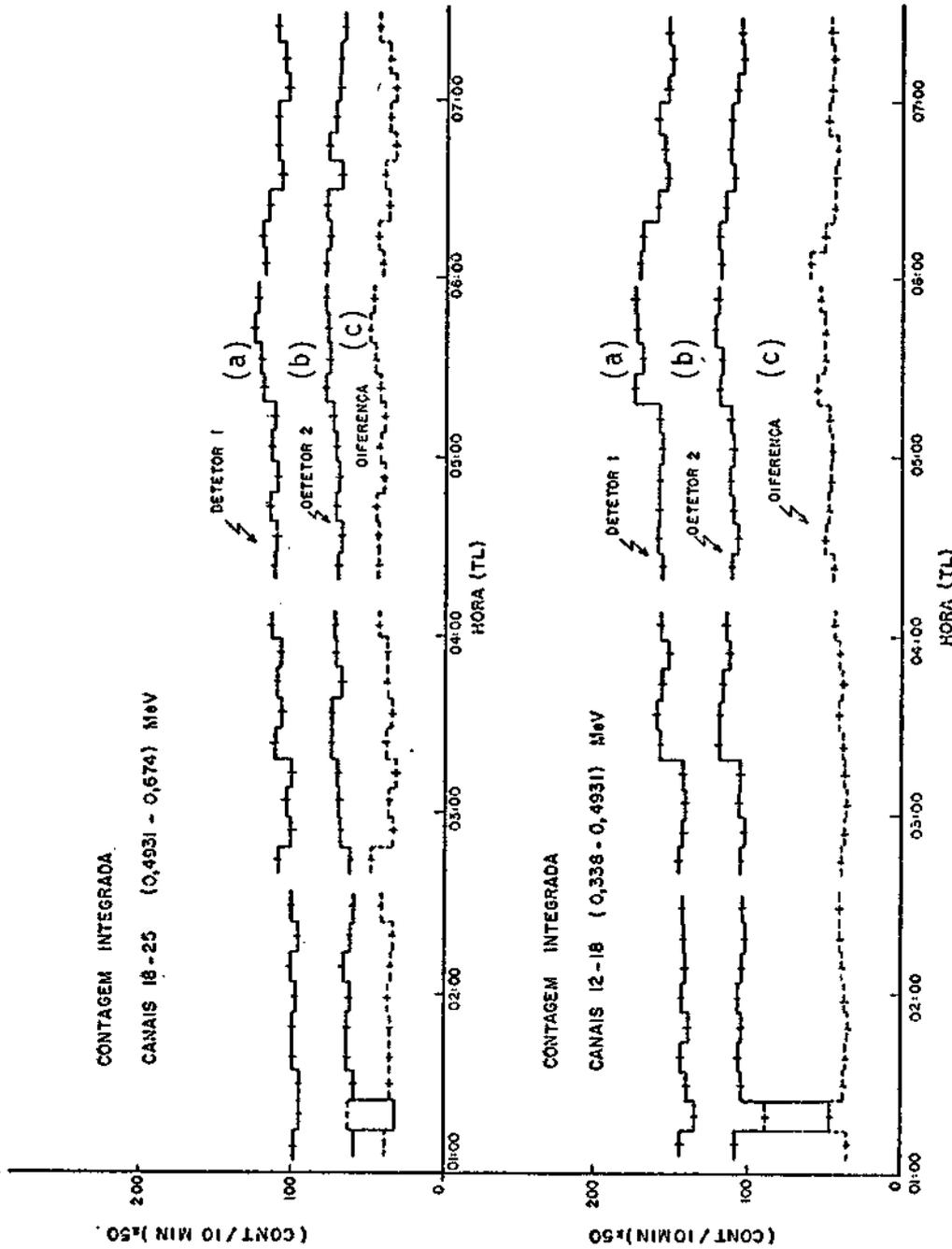


Fig. 4.8 - Perfis em função do tempo das contagens integradas a cada dez minutos para os intervalos de energia: 0,4931 a 0,674 MeV (A) e 0,338 a 0,4931 MeV (B).
- Os símbolos (a), (b) e (c) referem-se, respectivamente, a: detector superior, detector inferior e diferença entre ambos.

CAPÍTULO 5

DISCUSSÕES DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

5.1 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1.1 - LINHA DE ANIQUILAÇÃO DO PÓSITRON DETETADA NA DIREÇÃO DO CENTRO GALÁTICO

Como mencionado anteriormente, a detecção da intensidade de fluxo da linha de aniquilação pósitron-elétron em 0,511 MeV, proveniente do CG, pode fornecer informações importantes quanto aos processos físicos que ocorrem na região emissora, à extensão da região emissora e às estimativas com relação as densidades de matéria envolvidas.

A intensidade de fluxo desta linha foi medida pela primeira vez por Johnson and Haymes (1973), os quais usaram um telescópio com abertura angular (FWHM) = 24° . O fluxo medido foi de $(1,8 \pm 0,5) \times 10^{-3}$ fótons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ e, na época, foi atribuído a um pico centrado na energia de $(0,476 \pm 0,024)$ MeV. Mais tarde, verificou-se que este pico estava deslocado, devido a flutuações estatísticas nos dados (Leventhal et alii 1978b).

Posteriormente, Haymes et alii (1975) obtiveram uma intensidade de fluxo para a linha de aniquilação pósitron-elétron de $(8,0 \pm 2,3) \times 10^{-4}$ fótons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, analisando dados obtidos de um voo realizado na Argentina, com um telescópio de abertura angular FWHM = 13° . A região observada estava no intervalo de longitude galáctica - $4^\circ < l < + 6^\circ$.

Anos depois, Leventhal et alii (1978a) realizaram um experimento, usando um grande diodo de germânio hiperpuro (HPGe) de 130cm^3 , lançado a bordo de um balão estratosférico de Alice Springs (Austrália). O telescópio utilizado possui uma abertura angular de aproximadamente 15° , e o fluxo medido para linha em 0,511 MeV foi de $(1,22 \pm 0,22) \times 10^{-3}$ fótons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Da Costa (1980), analisando dados em dois vôos realizados em 1977 como resultado de uma colaboração entre Brasil e França, calculou uma intensidade de fluxo de $(4,19 \pm 1,56) \times 10^{-3}$ fótons $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, para a linha em 0,511 MeV, na direção do CG. O experimento utilizou como detetor principal um grande diodo Ge(Li) de 140 cm^3 , o qual foi lançado a bordo de um balão estratosférico de Guaratinguetã (SP). A abertura angular do telescópio era de $\approx 50^\circ$.

Em 1979, novamente o grupo de Sandia/Bell Labs lançou o mesmo telescópio de Alice Springs (Austrália). Das observações efetuadas neste vôo, Leventhal et alii (1980) calcularam o valor da intensidade de fluxo para a linha de aniquilação pósitron-elétron como sendo $(2,35 \pm 0,71) \times 10^{-3}$ fótons $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ na direção do CG.

Usando-se apenas o detetor superior, o que dá uma abertura angular de 72° , mediu-se um fluxo $(6,70 \pm 0,85) \times 10^{-3}$ fótons $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, mostrado na Figura 4.6. A região observada compreende o intervalo de longitude galática $-31^\circ < l_{II} < +41^\circ$ (Jardin et alii, 1981 a e b).

Medidas recentes, apresentadas por Riegler et alii (1981) e Lingenfelter et alii (1981), feitas utilizando-se um detetor de radiação gama a bordo do satélite HEAO-3, mostram uma diminuição da intensidade do fluxo da linha de aniquilação em 0,511 MeV, proveniente do CG, maior do que 50% num intervalo de tempo de seis meses. Tal variabilidade temporal, devidamente analisada e comprovada, pode levar a hipóteses mais concretas quanto às fontes de pósitrons. A Tabela 5.1 resume os resultados obtidos até agora a respeito da linha de aniquilação do pósitron em 0,511 MeV, na direção do CG.

Sem levar em consideração os resultados apresentados este ano, pode-se notar que os fluxos detetados parecem variar linearmente com a abertura angular do telescópio usado. A Figura 5.1 mostra os fluxos medidos, para a linha em 0,511 MeV na direção do CG, em função da abertura angular do telescópio usado, e a reta que melhor se ajusta a eles. Supondo-se que o disco galáctico é uma fonte linear que emite uniformemente na linha em 0,511 MeV, usando-se os resultados obtidos por Johnson and Haymes (1973), Haymes et alii (1975), Leventhal et alii (1978a) e Da Costa (1980) e levando-se em conta os ângulos de abertura, estima-se que o detetor utilizado deveria observar um fluxo de $(6,55 \pm 0,83) \times 10^{-3}$ fótons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, o qual concorda muito bem com o resultado aqui obtido.

Mandrôu et alii (1980), usando um telescópio com $\text{FWHM}=90^\circ$, determinou apenas um limite superior para a intensidade de fluxo da linha em 0,511 MeV, proveniente do CG, como sendo $(9,7) \times 10^{-3}$ fótons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. Um cálculo estimativo para uma abertura angular de 90° , que leva em consideração, além dos pontos anteriormente usados, os resultados aqui obtidos, conduz a um valor de $(9,1 \pm 0,8) \times 10^{-3}$ fótons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ para a intensidade de fluxo. Isto mostra que o resultado de Mandrôu et alii (1980) está de acordo com o esperado.

A partir do fluxo detetado, pode-se fazer algumas estimativas numéricas quanto à taxa de aniquilações e à luminosidade associadas à emissão.

TABELA 5.1

MEDIDAS DA INTENSIDADE DO FLUXO PARA A LINHA DE ANIQUILAÇÃO PÓSITRON-ELETRON
ATÉ O PRESENTE, NA DIREÇÃO DO C.G

AUTORES	FLUXO (FÓTONS CM ⁻² S ⁻¹)	DATA DA MEDIDA	FWHM	TELESCÓPIO USADO
Johnson and Haymes (1973)	(1,8 ± 0,5) x 10 ⁻³	novembro 1971		24°
Haymes et alii (1975)	(8,0 ± 2,3) x 10 ⁻⁴	abril 1974		13°
Leventhal et alii (1978a)	(1,22 ± 0,22) x 10 ⁻³	novembro 1977		15°
Da Costa 1980	(4,19 ± 1,56) x 10 ⁻³	fevereiro 1977		50°
Mandrou et alii 1980	9,7 x 10 ⁻³ (limite superior)	fevereiro 1977		90°
Leventhal et alii 1980	(2,35 ± 0,71) x 10 ⁻³	abril 1979		15°
Resultados deste trabalho - 1981	(6,70 ± 0,85) x 10 ⁻³	março 1980		72°
Lingenfelter et alii 1981	(1,84 ± 0,21) x 10 ⁻³ (0,59 ± 0,23) x 10 ⁻³	setembro 1979 março 1980		15°

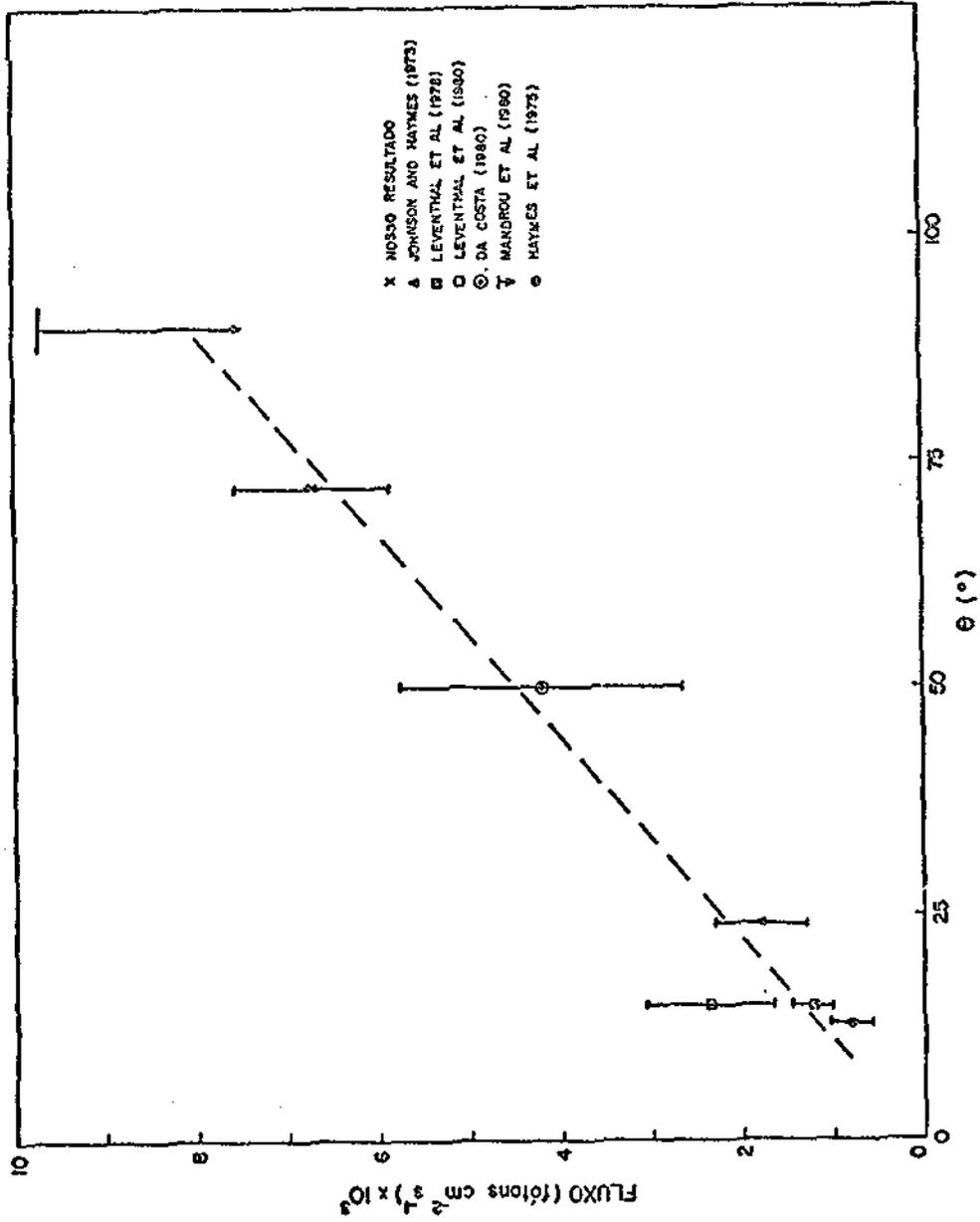


Fig. 5.1 - Fluxos medidos até o presente para a linha em 0,511 MeV na direção do CG, em função da abertura angular do telescópio usado.

Considerando-se que a linha de aniquilação em 0,511 MeV é produzida apenas por aniquilação livres, pode-se dizer que, para cada aniquilação são produzidos dois fótons. Neste caso, a taxa de aniquilação (Q_γ), necessária para explicar o fluxo (F_γ) em 0,511 MeV, aqui detetado, na direção do CG será dado por:

$$Q_\gamma = \frac{F_\gamma}{2} 4\pi D^2 \quad (5.1)$$

onde $D = 10$ Kpc é a distância do Sol ao CG. Deste modo, a taxa de aniquilações é de $4,0 \times 10^{43}$ aniquilações/s, o que implica numa luminosidade (L_γ) de $6,5 \times 10^{37}$ erg/s.

A partir dos resultados obtidos por Wheaton (Gilman et alii 1978), através do satélite OSO-7, pode-se estimar uma luminosidade para o intervalo de energia de 0,007 a 0,275 MeV, na direção do CG, de $L_\gamma = 2,21 \times 10^{39}$ erg/s. Dos resultados de Gilman et alii (1978), estima-se uma luminosidade para o intervalo de energia de 0,062 a 0,60 MeV, para a direção do CG, de $L_\gamma = 7,21 \times 10^{39}$ erg/s. Com isto pode-se estimar uma luminosidade total para a emissão do CG de aproximadamente 3×10^{39} erg/s, uma vez que, para energias superiores, a contribuição é bem menor. Verifica-se, assim, que a taxa de energia estimada para a emissão em 0,511 MeV, na direção do CG, não é desprezível, quando comparada com sua luminosidade total em X e gama.

5.1.2 - CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS QUANTO À ORIGEM DA LINHA DE ANIQUILAÇÃO DO PÓSITRON NA DIREÇÃO DO CG

Alguns estudos teóricos têm sido realizados a fim de determinar a origem dos pósitrons e as características da região de aniquilação compatíveis com as intensidades de fluxo em 0,511 MeV, medidas na direção do CG.

Ramaty et alii (1975a), tentando explicar o fluxo medido por Johnson and Haymes (1973) de $(1,8 \pm 0,5) \times 10^{-3}$ fótons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, na direção do CG, atribuíram a origem dos pósitrons a estrelas de nêutrons. Estes, por sua vez, seriam produzidos em colisões nucleares de partícu

las do material de acreção com o material da superfície da estrela de nêutrons (supostamente ^{56}Fe). A partir desta hipótese, estimaram o número provável de estrelas de nêutrons, capaz de explicar o fluxo como sendo de 10^6 a 10^{10} na região do GC. Estes números dependem de como ocorre a acreção: se ocorre em estrelas de nêutrons de sistemas binários, a taxa de acreção é de aproximadamente 10^{16} g/s; se ocorre do meio interestelar sobre uma estrela de nêutrons simples, ela é de 10^{11} g/s e corresponde, respectivamente, aos números citados acima.

Estudos teóricos realizados por Bussard et alii (1979) sugerem que as regiões de aniquilação sejam, provavelmente, restos de supernovas e regiões HII gigantes. Esta associação foi feita levando-se em consideração a temperatura e a razão de ionização (n_e/n_H) do meio, onde n_e é a densidade eletrônica e n_H é a densidade de hidrogênio neutro do meio, no qual os pósitrons se aniquilam. A distribuição observada destes objetos em função da distância galatocêntrica, como se pode observar nas Figuras 4.3 e 4.4, mostra uma concentração entre as longitudes galáticas $\pm 40^\circ$, isto é, uma região de aproximadamente 80° de extensão angular.

Estudos feitos até o presente mostram que as distribuições, no disco galático, do hidrogênio molecular (H_2), das regiões HII gigantes, da radiação gama acima de 100 MeV e de restos de supernovas são bem semelhantes (Burton, 1976). A Figura 5.2 mostra a distribuição da radiação gama para energias maiores que 100 MeV (Bennett et alii 1977). Esta distribuição relaciona-se com a origem dos pósitrons, pelo fato de que a maior parte da radiação gama com energias superiores a 100 MeV tem sua origem associada ao decaimento de píons neutros (π^0), que por sua vez dão origem aos pares elétron-pósitron (Fichtel et alii, 1977). A Figura 5.3 apresenta a distribuição de restos de supernovas, segundo Kodaira (1974) e Ilovaisky and Lequex (1972). A Figura 5.4 apresenta a distribuição de regiões HII gigantes, mostrada em Burton (1976). A Figura 5.5 apresenta a distribuição de CO, dada em Burton (1976). Essas figuras são de interesse pelo fato de reações com a componente de partículas carregadas da radiação cósmica produzir pósitrons.

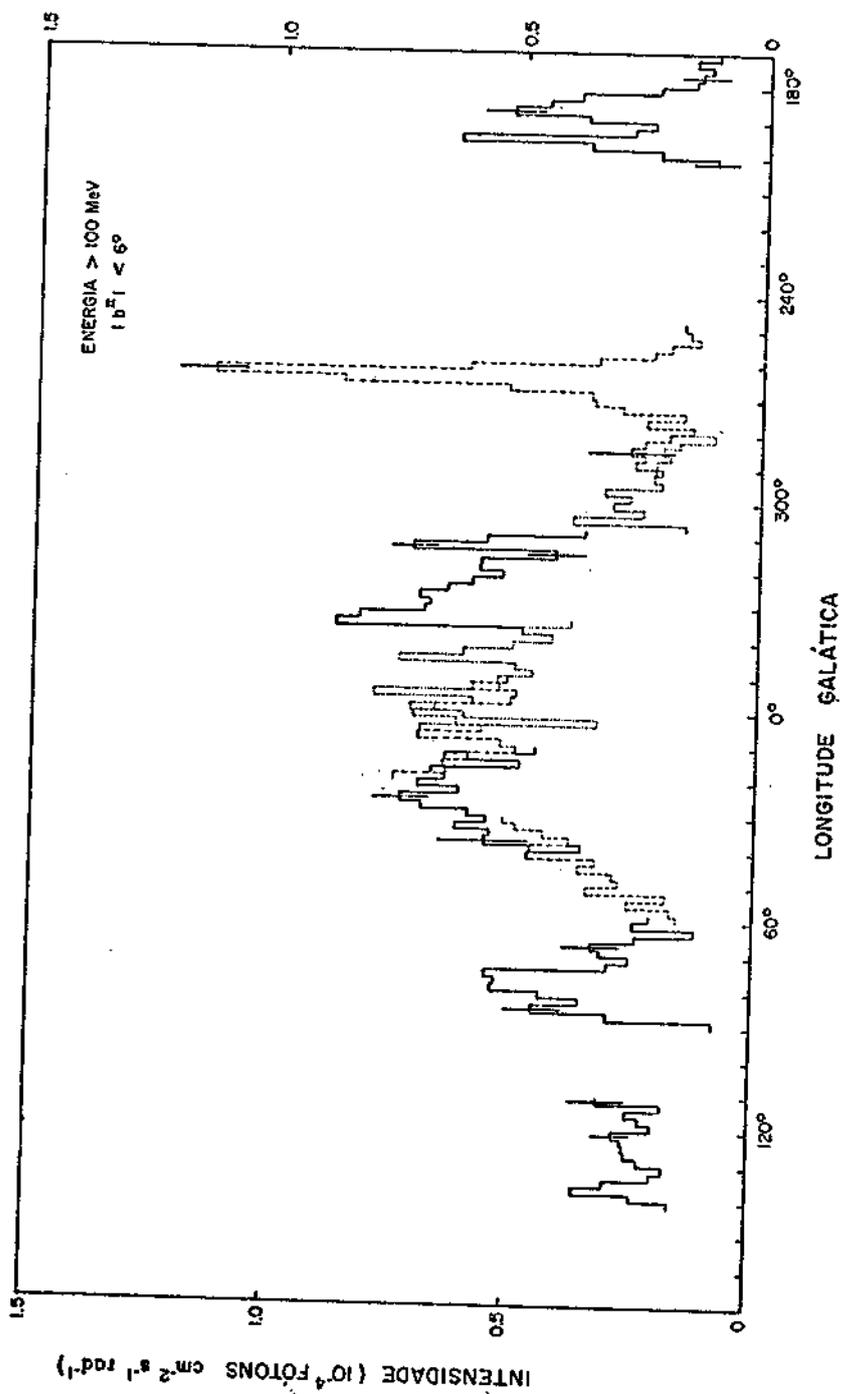


Fig. 5.2 - Distribuição da radiação gama para energias maiores que 100 MeV.

FONTE: Bennett et alii (1977) p. 90.

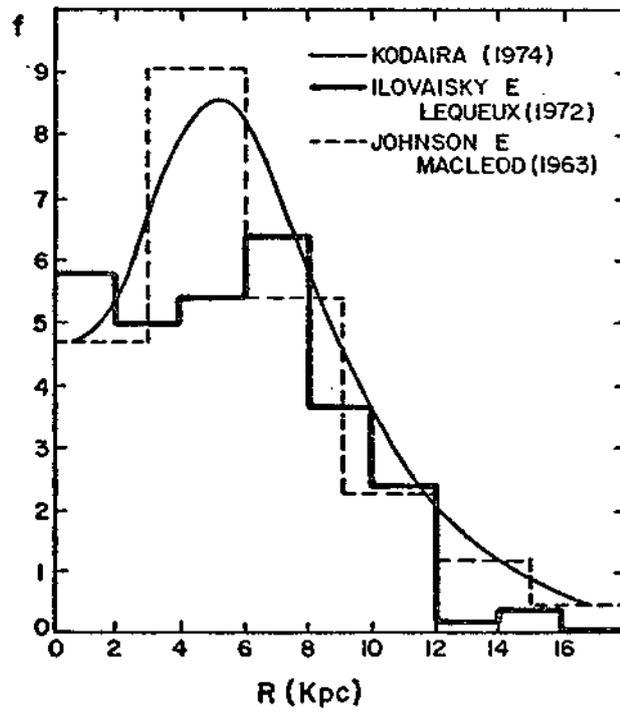


Fig. 5.3 - Distribuição de restos de supernovas em função da distância galatocêntrica.

FONTE: Kodaira (1974), p. 225.

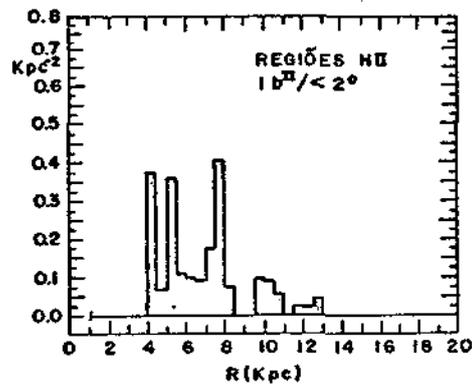


Fig. 5.4 - Distribuição de regiões HII gigantes em função da distância galatocêntrica.

FONTE: Burton (1976), p. 275.

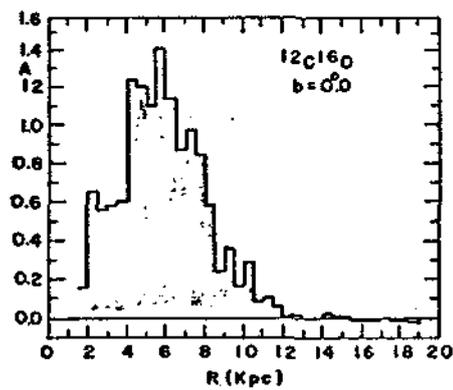


Fig. 5.5 - Distribuição do CO no plano galático em função da distância galatocêntrica.

FONTE: Burton (1976), p. 275.

Estas distribuições e o fato de Mandrou et alii (1980) terem observado apenas um limite superior com um telescópio de abertura angular 90° sugerem que as regiões de aniquilação, propostas por Bussard et alii (1979), podem explicar qualitativamente as intensidades de fluxo observadas para a linha em 0,511 MeV, na direção do CG. Por outro lado, a diferença entre os fluxos medidos por Leventhal et alii (1978a) e Leventhal et alii (1980), com o mesmo telescópio usando um diodo HPGe, parece indicar a não-uniformidade da fonte de emissão do disco galáctico, isto é, a presença de fontes discretas que, em determinadas longitudes, aumentariam a contribuição para a linha de aniquilação, uma vez que, do ponto de vista estatístico, os dados são confiáveis (Cherry et alii, 1980).

5.1.3 - CONTÍNUO

A obtenção de pontos para o espectro contínuo na direção do CG pode fornecer informações a respeito dos processos físicos responsáveis por esta emissão. Pode-se observar pela Figura 4.7 que os pontos obtidos, neste trabalho, na região do CG estão de acordo com as medidas efetuadas por Johnson (1972) e Haymes et alii (1969). Muitos estudos quantitativos têm sido feitos de modo a atribuir a intensidade observada a processos físicos. Para energias abaixo de 50 MeV, sabe-se que os processos predominantes são o "bremsstrahlung" de elétrons cósmicos e o efeito Compton inverso, que envolve elétrons de alta energia e radiação infravermelha. Para energias inferiores a 10 MeV, a componente contínua é predominantemente produzida por "bremsstrahlung" de elétrons relativísticos (Mandrou et alii, 1980; Schönfelder et alii, 1980).

5.2 - CONCLUSÕES

Dos dados obtidos e das comparações destes com os resultados obtidos por outros autores, pode-se dizer em síntese que:

- 1) Sem levar em conta os fluxos apresentados por Riegler et alii (1981) e Lingenfelter et alii (1981), que apontam uma variação temporal do fluxo em 0,511 MeV na direção do CG, os fluxos em 0,511 MeV, detectados até agora, na direção do CG parecem variar linearmente com a abertura angular do telescópio usado, o que justifica a suposição de que CG seja uma fonte linear que emite uniformemente.

De observações feitas utilizando-se detectores de alta resolução em energia (Leventhal et alii, 1978a e 1980), infere-se que a largura intrínseca da linha seja $\leq 3,5$ keV, sugerindo que as iniquilações ocorrem num meio morno e pelo menos parcialmente ionizado, ou seja, $n_e > 0,1 n_H$ (Bussard et alii, 1979).

O fato de Mandrou et alii (1980) terem medido apenas um limite superior utilizando um telescópio de abertura angular = 90° , e as distribuições de restos de supernovas e regiões HII gigantes também apresentarem um comportamento semelhante, sugerem que a região de emissão tenha uma abertura angular de $\pm 40^\circ$, centrada em $l_{II} = 0^\circ$.

- 2) A variação temporal do fluxo, medida pelo detetor de raios gama a bordo do satélite HEAO-3, pode sugerir como fonte de pósitrons um buraco negro existente no CG ou uma supernova tipo I (Lingenfelter et alii, 1981; Riegler et alii, 1981).
- 3) A emissão contínua do CG, observada em energias menores que 10 MeV, está de acordo com a emissão de raios gama originados pela radiação de freiamento de elétrons relativísticos, isto é, o fluxo medido segue aproximadamente uma lei de potência em função da energia (Mandrôu et alii, 1980).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENNET, K.; BIGNAMI, G.F.; BUCCHERI, R.; HERMSEN, W.; KANBACH, G.;
LEBRUN, F.; MAYER-HASSELWANDER, H.A.; PAUL, J.A.; PICCINOTTI, G.;
SCARSI, L.; SOROKA, F.; SWANENBURG, B.N.; WILLS, R.D. Cos-B
observations of galactic center gamma-ray emission (large escale).
In: ESLAB SYMPOSIUM ON RECENT ADVANCES IN GAMMA-RAY ASTRONOMY, 12,
Frascati, Italy, May 24-27, 1977. *Proceedings Paris, ESA, 1977,*
p. 83-93. (ESA SP 124).
- BENSON, J.L.; JARDIN, J.O.D.; MARTIN, I.M.; JAYANTHI, U.B.; AGUIAR, O.D.
Design, calibration and sensitivity of a Passively-Anti-Collimated
(PAC) gamma-ray telescope. *Nuclear Instruments and Methods,*
188(3):613-617, Oct. 1981.
- BEUERMANN, K.P. Secondary electrons and photons in the upper
atmosphere. *Journal Geophysical Research,* 76(19):4291-4310, June,
1971.
- BEVINGTON, P.R. *Data Reduction and Error Analysis for Physical Sciences.*
New York, NY, McGraw-Hill, 1969.
- BURTON, W.B. The morphology of hydrogen and of other tracers in the
galaxy. In: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Palo Alto,
CA, Annual Review, 1976. v.14, p. 275-306.
- BUSSARD, E.W.; RAMATY, R.; DRACHMAN, R.J. The annihilation of galactic
positrons. *The Astrophysical Journal,* 228(3):928-934, Mar. 1979.
- CAVALLO, G.; DI FAZIO, A. The γ -Ray background and the age of
protogalaxia formation. *Nature,* 228(5756):534-536, Apr. 1980.
- CHERRY, M.L.; CHUPP, E.L.; DUNPHY, P.P.; FORREST, D.J.; RAYN, J.M.
Statistical Evaluation of Gamma-Ray Line Observations, *The*
Astrophysical Journal, 242(3):1257-1265, Dec. 1980.
- CHUPP, E.L. *Gamma ray astronomy-nuclear transition region*, Palo Alto,
CA, Mc Cormac, 1976.

- CLINE, T.L. *The unique cosmic event of 1979 March 5*. Washington, DC, NASA, 1979. (NASA TM-80630).
- DA COSTA, J.M. *Observação da radiação de baixa energia (0,05 - 3,0 MeV) com telescópio Ge(Li) na latitude geomagnética $\lambda = 12^{\circ}S$* , Tese de Doutorado em Ciência Espacial. São José dos Campos, INPE, fev., 1980. (INPE-2002-TDL/43).
- DAMLE, S.V.; DANIEL, R.S.; JOSEPH, G.; LAVAKARE, P.J. Cosmic flux of low energy gamma-rays. *Astrophysics and Space Science*, 14(2):473-479, Dec. 1971.
- DENNIS, B.R.; MAURER, G.S.; CUTLER, E.P.; CRANNEL, C.J.; DOLAN, L.F.; FROST, K.J.; ORWIG, L.E. Upper limits on the cyclotron lines from Her X-1 as observed with OSO-8. In: CLINE, T.L.; RAMATY, R. ed. *Gamma ray spectroscopy in astrophysics*; Proceedings of a symposium held at Greenbelt, MD, Apr. 28-29, 1978. Greenbelt, MD, NASA, 1978. p. 371-385. (NASA TM 79619).
- EVANS, R.D. *The atomic nucleus*. New York, NY, McGraw-Hill, 1955.
- FICHEL, C.E.; KNIFFEN, D.A.; THOMPSON, D.J. SAS-2 gamma-ray results from the galactic plane and their implications for galactic structure and galactic cosmic ray dynamics. In: ESLAB SYMPOSIUM ON RECENT ADVANCES IN GAMMA RAY ASTRONOMY, 12, Frascati, Italy, May 24-27, 1977. *Proceedings Paris, ESA*, 1977, p. 95. (ESA SP 124).
- GILMAN, D.; METZGER, A.E.; PARKER, R.H.; TROMBKA, J.I. The galactic gamma-ray flux in the 0,06 to 5 MeV range. In: CLINE, T.L.; RAMATY, R., ed. *Gamma ray spectroscopy in astrophysics*; Proceedings of a Symposium held at Greenbelt, MD, Apr. 28-29, 1978. Greenbelt, MD, NASA, 1978. p. 190-204. (NASA TM 79619).
- HAYMES, R.C.; ELIIS, D.V.; FISHMAN, G.J.; GLENN, S.W.; KURFESS, J.D. Observation of hard radiation from the region the galactic center. *The Astrophysical Journal*, 157(3):1455-1459. Sep. 1969.
- HAYMES, R.C.; WALRAVEN, G.D.; MEEGAN, C.A.; HALL, R.D.; DJUTH, F.T.; SHELTON, D.H. Detection of nuclear gamma rays from the galactic center region. *The Astrophysical Journal*, 201(3):593-602, Nov. 1975.

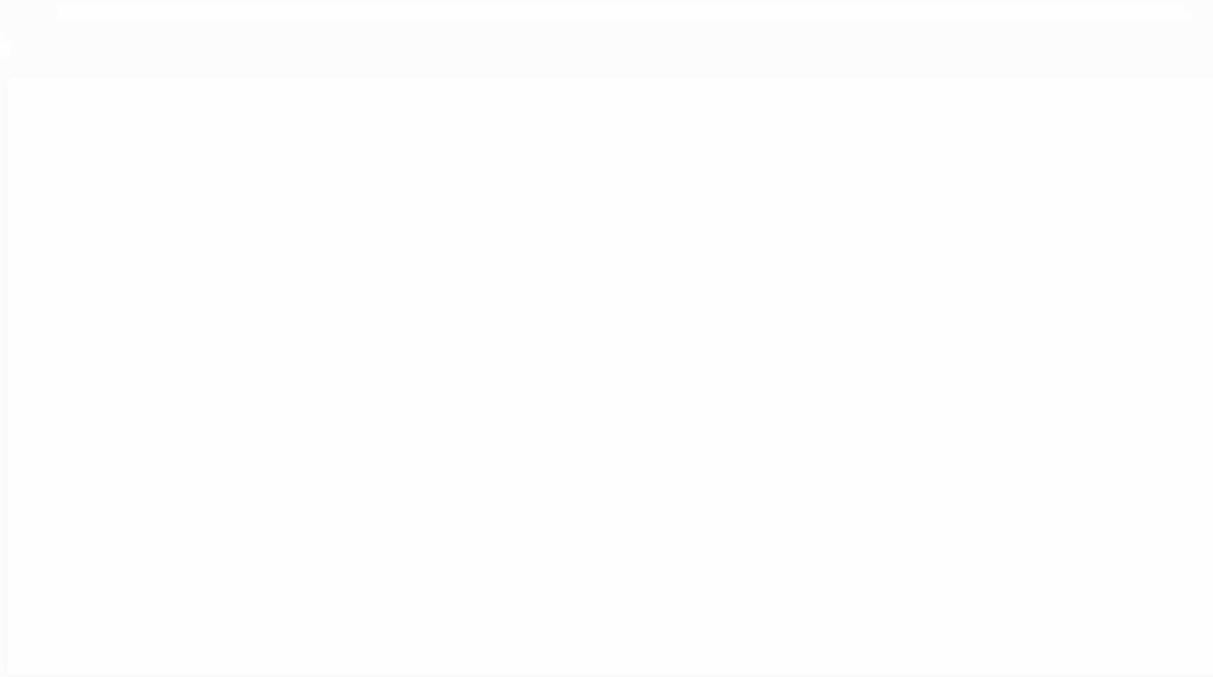
- ILOVAISKY, A.S.; LEQUEUX, J. A study of galactic supernova remnants. I. Distances, radio luminosity function and galactic distribution. *Astronomy & Astrophysic*, 18(2):169-185, May 1972.
- JACKSON, J.D. *Classical Eletrodynamics*. 2. ed. New York, NY, John Willey, 1975.
- JACOBSON, A.S.; LING, J.C.; MAHONEY, W.A.; WILLET, J.B. Observacional evidence for extraterrestrial gamma-ray line sources. In: CLINE, T. L.; RAMATY, R. ed. *Gamma ray spectroscopy in astrophysics*; Proceedings of a Symposium held at Greenbelt, MD, Apr. 28-29, 1978. Greenbelt, MD, NASA, 1978. p. 228-251. (NASA TM 79619).
- JARDIN, J.O.D.; BENSON, J.L.; JARDIN, M.V.A.; MARTIN, I.M. Measurement of the 0.511 MeV γ -ray line from the galactic center. Accepted for publication in *Revista Mexicana de Astrofísica*, 1981. INPE-2004-RPE/286.
- Medidas da linha de aniquilação elétron-pôsitron em 511 MeV emitida pelo centro galático. Aceito para publicação em *Ciência e Cultura*, 1981. INPE-2222-PRE/018.
- JOHNSON III, W.N. *Low-energy gamma radiation from the galactic center region*. Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in Space Science. Houston, TX, Rice University, 1972.
- KLEDESABEL, R.W.; STRONG, I.B.; OLSON, R.A. Observation of gamma ray bursts of cosmic origin. *The Astrophysical Journal*, 182(2):L85-L88, June, 1973.
- KNOLL, G.F. *Radiation detection and measurement*. New York, NY, John Willey, 1979.
- KODAIRA, K. Distribution of the galactic supernova remnants. *Publication of Astronomical Society of Japan*, 26(2):225-261, May 1974.
- KURFESS, J.D. Observations of low-energy gamma radiation from NP 0532. *The Astrophysical Journal*, 168(2):L39-L42, Sep. 1971.

- LEVENTHAL, M.; MCCALLUM, C.J.; WATTS, A.C. A search for gamma-ray lines from Nova Cygni 1975, Nova Serpentis 1970 and the Crab Nebula. *The Astrophysical Journal*, 216(2):491-502, Sep. 1977.
- LEVENTHAL, M.; MACCALLUM, C.J.; STANG, P.D. Detection of 511 KeV positron annihilation radiation from the galactic center direction. In: CLINE, T.L.; RAMATY, R. ed. *Gamma ray spectroscopy in astrophysics*; Proceedings of a Symposium held at Greenbelt, MD, Apr. 28-29, 1978. Greenbelt, MD, NASA, 1978. p. 169-189. (NASA TM 79619).
- Detection of 511 KeV positron annihilation radiation from the galactic center direction. *The Astrophysical Journal*, 225(1):L11-L14, Oct. 1978a.
- LEVENTHAL, M.; MACCALLUM, C.J.; HUTERS, A.F.; STANG, P.D. Gamma-ray lines and continuum radiation from the galactic center direction. *The Astrophysical Journal*, 240(1):338-345, Aug. 1980.
- LING, J.C. *Spectral and angular distributions of low energy atmospheric gamma rays at $\lambda = 40^\circ$* . Thesis for the Degree Doctor of Philosophy in Physics. La Jolla, CA, University of California, 1974. (UCSD-SP-74-06).
- LING, J.C.; MAHONEY, W.A.; WILLET, J.B.; JACOBSON, A.S. A search for the reported 400 KeV γ -ray line from Crab Nebula, *Nature*, 270(5632):36-37, Nov. 1977.
- LINGENFELTER, R.E.; RAMATY, R. Gamma-ray lines: a new window to the universe. *Physics Today*, 31(3):40-47, Mar. 1978.
- LINGENFELTER, R.E.; HIGDON, J.C.; RAMATY, R. Nuclear gamma rays from compact objects. In: CLINE, T.L.; RAMATY, R. ed. *Gamma ray spectroscopy in astrophysics*; Proceedings of a Symposium held at Greenbelt, MD, Apr. 28-29, 1978. Greenbelt, MD, NASA, 1978. p. 252-254. (NASA TM 79619).

- LINGENFELTER, R.E.; RAMATY, R.; LEITER, D. Origin of 0,511 MeV emission from the galactic center. In: CONFERENCE INTERNACIONALE SUR LE RAYONNEMENT COSMIQUE, 17, Paris, July 13-25; 1981. *Conference Papers*. Gif-sur-Yvette, CEN Saclay, 1981. V.1, session XG 3-5, p. 112-115.
- MANDROU, P.; BUIVAN, A.; VEDRENNE, G.; NIEL, M. Observation of the galactic disk between $-45^{\circ} < \ell^{\text{II}} < +45^{\circ}$ in the energy range 80 KeV - 8 MeV, *The Astrophysical Journal*, 237(2):424-431, Apr. 1980.
- MARMIER, P.; SHELDON, E. *Physics of nuclei and particles*. New York, Academic, 1969. v. 1; p. 113.
- MARTIN, I.M. *Variation du flux des neutrons et des rayons gamma d'origine cosmique en fonction de la latitude*. Thèse pour obtenir le grade de Docteur de Spécialité option Physique Spatiale. Toulouse. Université de Toulouse, 1970.
- NICHOLSON, P.W. *Nuclear Electronics*. New York, NY, John Willey, 1974.
- NUCLEAR ENTERPRISES. *Scintillator Catalogue*. San Carlos, CA, 1977. p. 20.
- PINKAU, K. Present status of γ -ray astronomy. *Nature*, 277(5691):17-21, Jan. 1979.
- RAMATY, R.; BONAZZOLA, S.; CLINE, T.L.; KAZANAS, D.; MÉSZAROS, P.; LINGENFELTER, R.E. Origin of the march 1979 γ -ray transient: a vibrating neutron star. *Nature*, 287(5778):122-124, Sep, 1980.
- RAMATY, R.; BORNER, G.; COHEN, J.M. Positron-annihilation radiation from neutron star. *The Astrophysical Journal*, 181(3):891-894, May, 1975a.
- RAMATY, R.; KOSLOVSKY, B.; LINGENFELTER, R.E. Solar gamma rays. *Space Science Reviews*, 18(3):341-388, 1975b.
- RAMATY,; LINGENFELTER, R.E. γ -ray line astronomy. *Nature*, 278(5700):127-132, Mar. 1979.

- RIEGLER, G.R.; LING, J.C.; MAHONEY, W.A.; WHEATON, W.A.; WILLET, J.B.; JACOBSON, A.S.; PRINCE, T.A. Variable positron annihilation radiation from the galactic center region. *The Astrophysical Journal*, 248(1):L13-L16, Aug. 1981.
- ROSSI, B. *Cosmic Rays*. New York, NY, McGraw-Hill, 1964.
- ROSSI, B.; OLBERT, S. *Introduction to the physics of space*. New York, NY, McGraw-Hill, 1970.
- SCHÖNFELDER, V.; GRAML, F.; PENNINSSFELD, F.-P. The vertical component of 1-20 MeV gamma-ray at ballon altitudes. *The Astrophysical Journal*, 240(1):350-362. Aug. 1980.
- SCHÖNFELDER, V.; GRASER, U.; DAUGHERTY, J. Diffuse cosmic and atmospheric MeV gamma radiation from ballon. *The astrophysical Journal*, 217(1):306-319, Oct. 1977.
- SOMMER, M.; MULLER, D. Energy spectrum, time structure and arrival direction of the 1976 August 16 cosmic gamma-ray burst: an observation at ballon altitude. *The Astrophysical Journal*, 222(1):L17-L20, May 1978.
- STECKER, F.W. *Cosmic gamma rays*. Washington, DC, NASA, 1971. (NASA SP 249).
- TROMBKA, J.I.; DVER, C.S.; EVANS, L.G.; BIELEFELD, M.J.; SELTZER, S.M., METEZGER, A.E. Reanalysis of the Apollo cosmic gamma-ray spectrum in the 0.3 to 10 meV energy region, *The Astrophysical Journal*, 212(3):925-935, Mar. 1977.
- TROMBKA, J.; FICHEL, C.; GRINDLAY, J.; HOFSTADER, R. Gamma-ray astrophysics: a new look at the universe. *Science*, 202(4371):933-938, Dec. 1978.
- TRUMPER, J. Cyclotron lines for HER/X-1. In CLINE, T.L.; RAMATY, R. ed. *Gamma-ray spectroscopy in astrophysics*, Proceedings of a Symposium held at Greenbelt, MD, Apr. 28-29, 1978. Greenbelt, MD, NASA, 1978 p.331-345. (NASA TM 79619).

VEDRENNE, G.; ALBERNHE, F.; MARTIN, I.M.; TALON, R. Extraterrestrial γ ray contribution between 0.7 MeV and 4.5 MeV at balloon altitude. *Astronomy and astrophysics*, 15(1):50-54, Nov. 1971.



•
•

APÊNDICE A

PRINCIPAIS PROCESSOS DE INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA, COM ENERGIAS ENTRE 0,3 E 5 MeV, COM A MATÉRIA

Quase todos os métodos de detecção usam a ionização ou excitação produzida num meio detetor, como resultado da absorção de toda ou parte da energia da partícula ou radiação incidente. No caso de detetor de fótons, a radiação incidente deve sofrer algum processo que transfira toda ou parte de sua energia para um elétron que, em resposta, produzirá um rastro de ionização ou excitação. Os três processos principais pelos quais a radiação (X ou γ) perde energia na matéria são: efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares.

A.1 - EFEITO FOTOELÉTRICO

Neste processo, toda energia do fóton ($h\nu$) é transferida para um elétron ligado a um átomo, sendo que o momentum é conservado pelo recuo do átomo. A probabilidade para absorção fotoelétrica é maior nas camadas K e L, e desde que $h\nu > B_K$ (onde B_K é a energia de ligação de um elétron da camada K), cerca de 80% das absorções fotoelétricas ocorrem nesta camada (Marmier and Sheldon, 1969).

O elétron ejetado do átomo, chamado fotoelétron, possui energia cinética dada (Evans, 1955) por:

$$T = h\nu - B_e, \quad (A.1)$$

onde B_e é a energia de ligação do elétron ejetado. Posteriormente, esta energia (B_e) irá aparecer como raio X ou elétron Auger, sendo em geral absorvida no cintilador.

O processo fotoelétrico é predominante em relação aos outros, para fótons de energias até 0,3 MeV. O processo depende ainda do

número atômico do material absorvedor. A seção de choque para absorção fotoelétrica pode ser dada de uma maneira aproximada (Knoll, 1979) por:

$$\sigma_f = \text{const.} \frac{Z^n}{(h\nu)^3}, \quad (\text{A.2})$$

onde o expoente n varia entre 4 e 5, dependendo da região de energia de interesse.

A.2 - EFEITO COMPTON

O efeito Compton consiste na interação entre um fóton incidente de energia $h\nu$ e um elétron, que se pode considerar em repouso em relação ao fóton, durante a qual parte da energia do fóton é transferida ao elétron, e o fóton é defletido de um ângulo θ , conforme a Figura A.1.

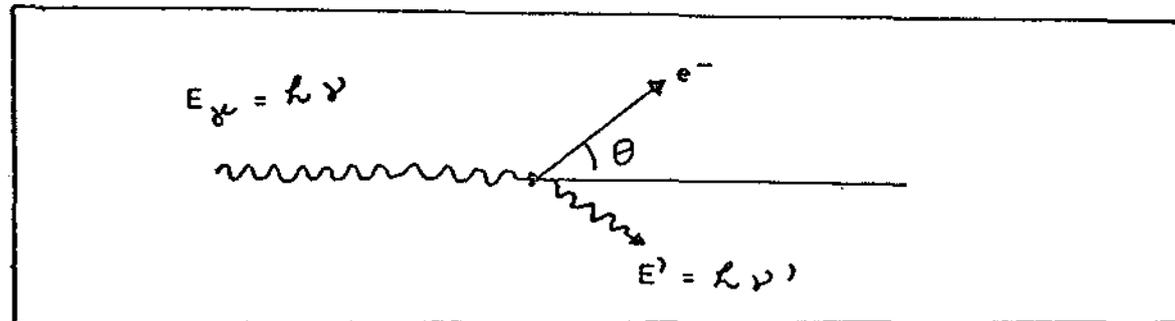


Fig. A.1 - Efeito Compton.

Desde que todos os ângulos de espalhamento (θ) do fóton são possíveis, a energia transferida para o elétron pode variar desde zero (0) até um valor máximo, $E_{\text{máx}}$, que corresponde ao caso em que o fóton é espalhado com $\theta = 180^\circ$ (retroespalhamento). A energia do fóton após a deflexão é dada (Knoll, 1979) por:

$$E_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + (E/m_e c^2)/(1 - \cos\theta)}, \quad (\text{A.3})$$

o que dá uma energia máxima de:

$$E_{\text{máx}} = \frac{E_{\gamma}}{1 + 2E_{\gamma}/(m_e c^2)} \quad (\text{A.4})$$

onde $m_e c^2$ é a energia de repouso do elétron (0,511 MeV).

Este processo é dominante em relação aos demais no intervalo de energia 0,3 a 10 MeV. A seção de choque para o efeito Compton é dada (Nicholson, 1974) por:

$$\sigma_C = \text{const.} \frac{nz}{h\nu} \quad , \quad (\text{A.5})$$

onde n é o número de átomos por cm^3 , e z é o número atômico do material.

A.3 - PRODUÇÃO DE PARES

O processo de produção de pares ocorre somente quando a energia $h\nu$ do fóton for maior do que $2m_e c^2$ (1,02 MeV). Na interação, que deve ocorrer na presença de um campo coulombiano, o fóton desaparece e em seu lugar aparece um par elétron-pósitron, que leva a energia resultante ($h\nu - m_e c^2$) sob a forma de energia cinética. O elétron e o pósitron perdem energia por colisões até pararem. Nesta fase, o pósitron se aniquila com um elétron vizinho e emite a radiação característica da aniquilação.

A seção de choque de absorção para a produção de pares para energia próxima a $2m_e c^2$ é dada, aproximadamente (Nicholson, 1974) por:

$$\sigma_{pp} = \text{const.} nZ^2 (h\nu - m_e c^2) \quad (\text{A.6})$$

A Figura A.2 apresenta os coeficientes de atenuação para a radiação gama no iodeto de sódio (NaI) em função da energia, para os três mecanismos descritos anteriormente.

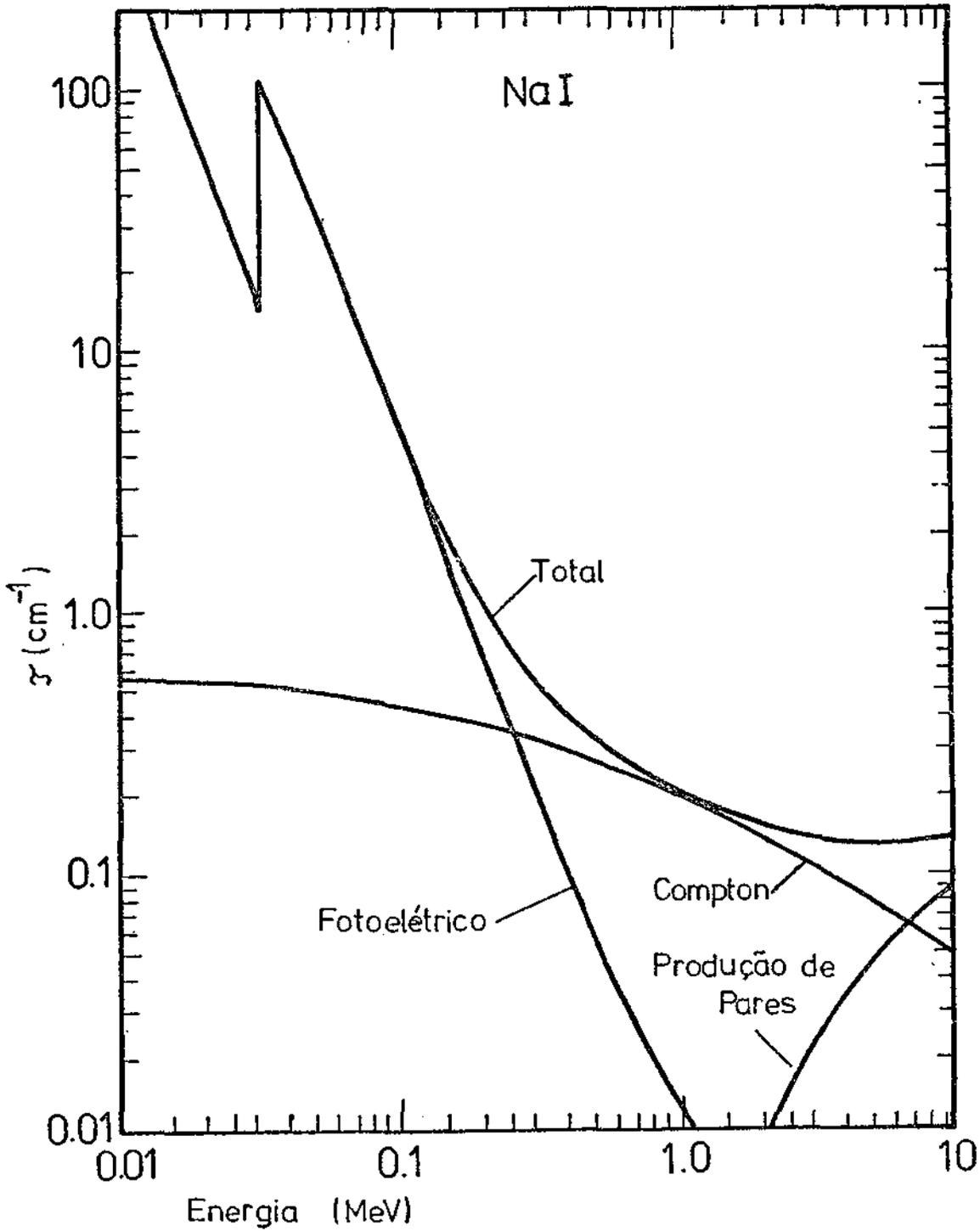


Fig. A.2 - Coeficientes de atenuação para a radiação gama no iodeto de sódio (NaI) em função da energia.

FONTE: Johnson (1972), p. 66.