

**SIMULAÇÕES DO RUÍDO DE FUNDO INSTRUMENTAL E
RECONSTRUÇÃO DE IMAGENS DO EXPERIMENTO
PROTOMIRAX**

Bárbara Heliodora Gonçalves Rodrigues

Dissertação de Mestrado em Astrofísica, orientada pelo Dr. João Braga.

INPE
São José dos Campos
2007

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:**Presidente:**

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

Membros:

Dr. Demétrio Bastos Netto - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dra. Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

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

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

Jefferson Andrade Anselmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Vinicius da Silva Vitor - Serviço de Informação e Documentação (SID) - bolsista

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Viveca Sant'Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**SIMULAÇÕES DO RUÍDO DE FUNDO INSTRUMENTAL E
RECONSTRUÇÃO DE IMAGENS DO EXPERIMENTO
PROTOMIRAX**

Bárbara Heliodora Gonçalves Rodrigues

Dissertação de Mestrado em Astrofísica, orientada pelo Dr. João Braga.

INPE
São José dos Campos
2007

00.000.00(000.0)

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Bárbara Heliodora .

Simulações do ruído de fundo instrumental e reconstrução de imagens do experimento protoMIRAX/ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Bárbara Heliodora . – São José dos Campos: INPE, 2007.

55p.; ()

1. Telescópios de raios X duros. 2. Ruído de fundo. 3. Imageamento. 4. MGGPOD. 5. Simulações. 6. Máscara Codificada. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO .

“Every now and then a man’s mind is stretched by a new idea or sensation, and never shrinks back to its former dimensions”.

OLIVER WENDELL HOLMES, SR.
from “The Autocrat of the Breakfast Table”, 1858

Ao meu pai ...

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Francisco Carlos Rodrigues e Luciney Gonçalves Ferreira, que sempre apoiaram minhas escolhas na carreira acadêmica.

Quero agradecer também a algumas pessoas que me ajudaram a desenvolver este trabalho: Dr. Jorge C. Mejía, por todas as discussões sobre teoria de obtenção de imagens em raios X, ruído de fundo e muitas outras coisas importantes sobre instrumentação, e por ter me ensinado a técnica que utilizei para fazer as simulações apresentadas neste trabalho; Dr. Odylio Denys de Aguiar, pela ajuda com alguns cálculos e pelas discussões sobre ruído de fundo; meus colegas de pós-graduação, Cláudio S. de Souza Brandão e Julio César T. Gálvez, por terem me ajudado com alguns programas que utilizei; e ao meu orientador, Dr. João Braga, o idealizador do trabalho.

Agradeço também a vários amigos que me ouviram nos momentos de crise, quando eu não sabia o que fazer.

Por fim, quero agradecer, em especial, grandes amigos que acreditaram em meu potencial e me incentivaram a seguir este caminho: Prof. Dr. Paulo Daniel Emmel (o melhor professor de Física que tive em todo meu um quarto de século de vida!), Prof. Dr. Wilton S. Dias e sua esposa, Elizabete A. Veiga Limeira, e meu amigo Yuri A. Ribeiro Silva.

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se o resultado de simulações computacionais realistas e detalhadas realizadas com o programa MGGPOD, um conjunto de rotinas Monte Carlo que simula a interação da radiação gama com a matéria, para estimar a resposta do experimento protoMIRAX ao campo externo de radiação. O protoMIRAX é um projeto do grupo de Astrofísica de Altas Energias do INPE, no qual está sendo desenvolvida uma câmara de raios X duros baseada na técnica de máscara codificada que utiliza detectores de estado sólido de Telureto de Cádmio e Telureto de Zinco (CZT). A câmara será sensível a raios X no intervalo de energias de 25 a 200 keV. O experimento será lançado em um balão estratosférico e deve atingir uma altura de $\sim 40\text{ km}$ para testes e observação de fontes cósmicas durante $\sim 10h$ de vôo. Esse projeto será uma plataforma de testes para o satélite MIRAX, um projeto brasileiro, com parcerias internacionais, que irá colocar em órbita telescópios de raios X para monitorar continuamente a região central do plano Galático. Os resultados das simulações mostram que a principal contribuição para o ruído de fundo instrumental é oriunda do campo difuso atmosférico de radiação atmosférica na faixa de raios X e γ . A contagem esperada no conjunto de detectores CZT para a faixa de 25 a 200 keV é de $\sim 41\text{ contagens/s}$. Com esse nível de ruído de fundo instrumental, o protoMIRAX será capaz de detectar um fluxo mínimo de $\sim 2 \times 10^{-5}\text{ fotons/cm}^2\text{ s keV}$ de uma fonte cósmica puntual, considerando um nível de confiabilidade estatística de 5σ e $5.5h$ de integração a uma altitude de $\sim 40\text{ km}$. Um alvo prioritário no vôo do proto-MIRAX será a nebulosa do Caranguejo e seu pulsar. Simulações da imagem obtida pela passagem meridiana da nebulosa do Caranguejo, vista a uma latitude de -23° , resultam em uma alta relação sinal-ruído de ~ 250 . As simulações mostram também que uma imagem do Caranguejo com um nível de 10σ poderá ser obtida com apenas 25s de integração. A curva de sensibilidade obtida neste trabalho mostra que o protoMIRAX será capaz de obter fluxos e espectros de algumas fontes de raios X brilhantes até $\sim 50 - 80\text{ keV}$.

SIMULATIONS OF THE INSTRUMENTAL BACKGROUND AND IMAGE RECONSTRUCTION OF THE PROTOMIRAX EXPERIMENT

ABSTRACT

In this thesis, the results of detailed and realistic simulations performed with a Monte Carlo simulation code for gamma-ray Astronomy (MGGPOD) to predict the response of protoMIRAX are presented. The protoMIRAX is a project under development by the High Energy Astrophysics group of INPE, in which a hard X-ray camera is being built based on the coded aperture technique using Cadmium-Zinc Telluride (CZT) solid state detectors. The camera is sensitive to X-rays in the energy range from 25 to 200 keV. The experiment will be launched in a balloon and will reach altitudes as high as $\sim 40\text{ km}$ for tests and observations of cosmic sources during a $\sim 10\text{ h}$ flight. This project will be a pathfinder for the MIRAX satellite, a Brazilian project, with international partnership, that will put X-ray telescopes in orbit to constantly monitor the central region of the Galactic plane. The simulation results show that the most important contribution to the instrumental background is due to the albedo radiation of the atmosphere in the energy range from X-rays to γ -rays. The expected counting rate on the CZT detector array in the energy range from 25 to 200 keV is $\sim 41\text{ counts/s}$. This level of instrumental background assures that the protoMIRAX will be able to detect a minimum flux of $\sim 2 \times 10^{-5}\text{ photons/cm}^2\text{ s keV}$ from a cosmic point source, considering 5σ of statistical significance and 5.5 h of integration time in an altitude of $\sim 40\text{ km}$. The main target for observation during the first protoMIRAX flight will be the Crab Nebula and its pulsar. Image simulations obtained by the meridian passage of the Crab Nebula, seen at a latitude of -23° , show a high signal-to-noise ratio of ~ 250 . The simulations also show that a Crab image with a level of significance of 10σ can be obtained with only 25s of integration. The sensitivity curve obtained shows that the protoMIRAX will be capable of measuring fluxes and spectra from some bright X-ray sources up to $\sim 50 - 80\text{ keV}$.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	
1 INTRODUÇÃO	19
2 ASTROFÍSICA DE RAIOS X DUROS	21
2.1 O Universo em raios X	21
2.2 Fontes de raios X duros	22
2.3 Fontes que poderão ser observadas pelo protoMIRAX	23
3 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS	25
3.1 Detectores de Telureto de Cádmio e Telureto de Zinco (CZT)	25
3.2 Técnica de imageamento utilizando-se máscaras codificadas	27
3.3 Ruído de fundo	31
4 O EXPERIMENTO protoMIRAX	33
4.1 Descrição do protoMIRAX	33
4.2 Objetivos	35
5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	37
5.1 Simulações de ruído de fundo	37
5.2 Estimativa da curva de sensibilidade do protoMIRAX	41
5.3 Imagem simulada da Nebulosa do Caranguejo	43
6 CONCLUSÃO	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

LISTA DE FIGURAS

Pág.

3.1	Espectro do ^{241}Am obtido com um detector de CZT de 2 mm de espessura. A voltagem utilizada foi de 300 V e a temperatura de operação é 5°C . A linha tracejada é para raios γ irradiados na face dos catodos e a linha sólida é para raios γ irradiados na face dos anodos.	27
3.2	Esquema de um sistema imageador com máscara codificada. A máscara é um mosaico de um URA 5×7	28
4.1	Câmara de raios X duros do protoMIRAX.	34
4.2	Padrão básico da máscara codificada do ProtoMIRAX: MURA 13×13	34
4.3	Gôndola de balão.	35
5.1	Espectro de energias do ruído de fundo total.	40
5.2	Espectro de ruído de fundo sem linhas de fluorescência do ^{82}Pb	41
5.3	Distribuição de contagens ao longo do plano detector geradas pelo espetro de fótons.	41
5.4	Curva de sensibilidade do protoMIRAX. A curva contínua é o fluxo mínimo de uma fonte que poderá ser observado. São apresentadas 4 fontes que poderão ser observadas: Nebulosa do Caranguejo (espectro dado por Sizun et al. (2004)), GX1+4, GRS 1758-258, 1E1740.7-2942 (espectros dados por D'Amico (1997)).	42
5.5	Imagen reconstruída de Nebulosa do Caranguejo. Os contornos da imagem (a) correspondem a curvas de mesmo σ	44

1 INTRODUÇÃO

A primeira detecção de radiação de alta energia de uma fonte extra-solar ocorreu em 1962, quando raios X de uma fonte pontual na constelação de Escorpião (Sco X-1) foram detectados por contadores Geiger a bordo de um foguete (GIACCONI et al., 1962). Hoje sabe-se que esta é a fonte mais brilhante do céu em raios X, e consiste de um sistema binário contendo uma estrela de nêutrons.

Os primeiros telescópios de raios-X (UHURU (FORMAN et al., 1978), HEAO I (WOOD et al., 1984)) utilizavam contadores proporcionais com colimadores, tendo campos de visada e resoluções muito limitados. Com o desenvolvimento de telescópios de raios-X que usam a técnica de reflexão rasante (EINSTEIN (GIACCONI et al., 1979), ROSAT (PFEFFERMANN et al., 1987)) passou a ser possível a obtenção de imagens do céu em raios X, os quais podem ser focalizados por reflexão apenas se eles atingirem a superfície de reflexão em ângulos $\lesssim 1^\circ$. Portanto, as superfícies refletoras do telescópio de raios X devem estar posicionadas aproximadamente paralelas ao feixe de raios X. O formato mais utilizado para este tipo de telescópio é a combinação de vários anéis concêntricos de superfícies paraboloides e hiperboloides com um foco comum (KITCHIN, 2003; TUCKER; GIACCONI, 1985). Entretanto, nenhum destes telescópios é capaz de obter imagens com energias $\gtrsim 10$ keV (REVNIVTSEV et al., 2004b).

É muito difícil focalizar raios X com energias $\gtrsim 10$ keV devido a natureza penetrante da radiação. Assim, é necessário utilizar outra técnica para construir telescópios de raios X duros. Telescópios baseados na técnica de máscara codificada são capazes de obter imagens em energias bem maiores do que a técnica de reflexão rasante (FENIMORE; CANNON, 1978; SKINNER et al., 1987). Em imagens feitas com máscaras codificadas, cada fonte pontual projeta uma sombra da máscara no detector. Como cada fonte está localizada em uma distância praticamente infinita, os tamanhos das sombras da máscara são todos iguais. Cada sombra é caracterizada por sua posição, determinada pelo seu desalinhamento com o eixo do sistema máscara-detector, e sua intensidade (ZAND et al., 2005). Ao longo dos últimos anos foram construídos vários telescópios baseados nesta técnica (SIGMA (BOUCHET et al., 2001), BeppoSAX (JAGER et al., 1989), INTEGRAL (UBERTINI et al., 1997)), obtendo vários resultados importantes e permitindo-nos explorar melhor o universo em energias > 10 keV.

O grupo de Astrofísica de Altas Energias da Divisão de Astrofísica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) está desenvolvendo, com forte colaboração e parcerias internacionais, um projeto de um satélite astronômico de raios X, o Monitor e Imageador de RAios X (MIRAX), projetado para monitorar uma área extensa na região do plano Galá-

tico. O principal objetivo da missão é a caracterização completa de fenômenos transientes em um grande número de sistemas binários de raios X.

Os instrumentos do MIRAX serão três câmaras com abertura codificada, sendo duas imageadoras de raios X duros (10-200 keV), e uma câmara imageadora de raios X moles (2-18 keV), com sensibilidades de ~ 5 e ~ 2.6 mCrab/dia, respectivamente. As três câmaras serão apontadas para a região central do plano Galáctico durante ~ 9 meses por ano. Com um campo de visada de mais de 1000° quadrados e resolução angular de ~ 6 arcmin, o MIRAX será capaz de fornecer uma base de dados sem precedentes para se estudar em detalhes o fenômeno de variabilidade em raios X, desde novas rápidas de raios X até fenômenos variáveis de longa duração. Dentre os objetivos científicos do MIRAX, o de maior importância é a capacidade de fornecer simultaneamente uma cobertura temporal da evolução de vários buracos negros de acresção, incluindo uma caracterização detalhada dos estados de transição espectral destes sistemas ([BRAGA; MIRAX-TEAM, 2005](#)).

Para testar alguns dos sub-sistemas da missão MIRAX e também para implementar e testar várias partes do software da missão, a equipe do MIRAX está desenvolvendo um experimento, o protoMIRAX, composto por uma câmara imageadora de raios X duros, que será lançado em um balão estratosférico em 2008-2009. A câmara de raios X do protoMIRAX será apontada para o plano Galáctico e suas vizinhanças em busca de fontes brilhantes de raios X. O principal alvo a ser observado é a Nebulosa do Caranguejo, com o objetivo de testar, em um ambiente quasi-espacial, vários conceitos relacionados ao sistema imageador com abertura codificada do MIRAX.

Neste trabalho, apresento o resultado de simulações computacionais feitas com o pacote de rotinas Monte Carlo MGPOD, com o objetivo de estimar o ruído de fundo instrumental que se espera observar com o protoMIRAX. Apresento também a curva de sensibilidade do protoMIRAX, juntamente com algumas fontes que poderão ser observadas. E, por fim, mostro imagens simuladas da Nebulosa do Caranguejo e a relação sinal-ruído das mesmas.

2 ASTROFÍSICA DE RAIOS X Duros

2.1 O Universo em raios X

Desde o lançamento da primeira missão de raios X, o universo em raios X tem sido muito explorado, principalmente na faixa de energias até $\lesssim 10$ keV, mostrando uma enorme variedade de fontes e fenômenos interessantes.

A grande maioria dos fenômenos que ocorrem na faixa de energias abaixo 10 keV são de natureza térmica, como por exemplo a emissão do gás quente ($T \sim 10^7\text{--}10^8$ K) e difuso que permeia aglomerados de galáxias, ou de coroas estelares ($T \sim 10^5\text{--}10^6$ K), ou de um disco de acresção em torno de um objeto colapsado. No entanto, espera-se que os objetos que emitem raios X com energias acima de 10 keV revelem uma série de fenômenos não-térmicos. Quase todos os espectros em energias de processos não-térmicos de emissão de radiação podem ser escritos na forma de uma lei de potência:

$$P(E) \propto E^{-s} \quad (2.1)$$

onde E é a energia do fóton, e s é o índice espectral. Em muitos casos existe emissão significativa até centenas de keV. Por esta razão é importante construir telescópios com uma faixa dinâmica ampla para que se possa distinguir entre processos de emissão não-térmicos que competem entre si.

Alguns fenômenos térmicos também podem gerar emissão de raios X duros, como por exemplo a acresção em buracos negros estelares, que pode produzir um espectro de raios X que se estende até energias ~ 100 keV, ou a emissão do plasma de pares $e^- e^+$ a energias de ~ 500 keV em pulsares (BRAGA, 1990).

Pode-se dividir todas as fontes de raios X observadas de acordo com a intensidade de emissão ao longo do tempo em dois grandes grupos: fontes persistentes e fontes transitentes. Fontes persistentes emitem um fluxo de raios X detectável permanentemente desde que foram descobertas, e podem apresentar variações de intensidade de até duas ordens de grandeza numa escala de tempo de milisegundos até anos. A variabilidade ocorre devido ao fato de que a maioria dos raios X observados são gerados através do processo de acresção de matéria, e a própria natureza da acresção produz grande variabilidade no fluxo de raios X emitidos pela fonte ao longo do tempo. Estes fenômenos variáveis podem ocorrer em escalas de tempos de milisegundos até dias, como oscilações quasi-periódicas (Quasi-Periodic Oscillations-QPO), pulsações (pulsares de acresção), eclipses, bursts de raios X de tipo I e II, explosões, etc, ou na escala de meses até anos como variações orbitais

e ciclos de *outbursts*.

Fontes transientes são caracterizadas por longos períodos (meses ou anos) de inatividade, que são interrompidos por episódios de *outbursts*, durante os quais a intensidade de raios X aumenta de um fator de 1000 ou mais ([PSALTIS, 2004](#)).

A natureza das fontes transientes dificulta um estudo sistemático das mesmas, sendo necessário que haja um monitoramento destas fontes para se estudar suas propriedades. Desde 1990, as *Wide Field Cameras* (WFCs) a bordo do observatório BeppoSAX e o *All Sky Monitor* a bordo do RXTE ([BRADT et al., 1993](#)) descobriram e monitoraram um grande número de fontes transientes, o que permitiu resultados importantes como a distribuição de fontes binárias de raios X na Galáxia, e pôde-se inferir a eficiência do transporte de momento angular no disco de acresção a partir do tempo de subida e decaimento dos *outbursts* ([HAMEURY et al., 1998](#)). Entretanto, ainda não foi realizado um monitoramento contínuo destas fontes em energias $\gtrsim 10$ keV. A missão MIRAX, por apresentar uma proposta de observações contínuas da região central do plano Galáctico com boa sensibilidade e ampla faixa dinâmica, será capaz de detectar uma série de novos fenômenos e fontes transientes, possibilitando um estudo sistemático das propriedades destas fontes em energias de raios X duros.

2.2 Fontes de raios X duros

Nos últimos anos tem-se alcançado progresso substancial na área de Astronomia de raios X duros. Em particular, o telescópio SIGMA a bordo do observatório GRANAT publicou um levantamento completo do céu em raios X duros ([REVNIVTSEV et al., 2004a](#)) a partir de observações feitas no período de 1990–1998; e o telescópio IBIS/ISGRI a bordo do observatório INTEGRAL (ainda em órbita) já publicou um segundo catálogo de fontes de raios X duros ([BIRD et al., 2006](#)), onde apresenta 209 fontes detectadas na faixa de energias de 20–100 keV (das quais 43 foram identificadas como sendo fontes transientes), cobrindo $\sim 50\%$ do céu com sensibilidade limite de 1 mCrab.

A maioria das fontes Galácticas brilhantes de raios X são de natureza binária. Binárias de raios X são formadas por uma estrela compacta, uma estrela de nêutrons (EN) ou um buraco negro (BN), acretando matéria de sua estrela companheira (ou estrela secundária). A emissão de raios X destes objetos é principalmente térmica e ocorre via acresção de matéria. A cauda luminosa em raios X duros em EN ou candidatos a BN ocorre devido à presença de uma população de elétrons muito energéticos, ou na forma de um plasma híbrido ([COPPI, 1999](#)) ou em um fluxo quasi-radial de alta velocidade ([LAURENT; TITARCHUK, 1999](#)).

Nestes catálogos também foram detectados, dentre as fontes galácticas, um grande número de variáveis cataclísmicas (VCs), pulsares isolados, pulsares anômalos de raios X e remanescentes de supernova. E dentre as fontes extragalácticas foram detectados aglomerados de galáxias e núcleos ativos de galáxias (NAGs), que não são objetos deste trabalho.

2.3 Fontes que poderão ser observadas pelo protoMIRAX

O experimento protoMIRAX está sendo desenvolvido para testar e implementar os vários sistemas e partes do software da missão MIRAX. Por esta razão as observações que serão realizadas com o protoMIRAX não são baseadas em objetivos científicos. Serão realizadas observações de fontes brilhantes e bem caracterizadas para que possamos calibrar a câmara de raios X duros, bem como testar os sistemas de imageamento, aquisição e redução de dados.

Serão realizadas observações da nebulosa do Caranguejo como medida de calibração do fluxo de raios X das fontes observadas. A emissão de raios X pela nebulosa do Caranguejo é devida à emissão síncrotron das partículas de altas energias espiralando em torno das linhas de campo magnético da nebulosa. Esta é uma das fontes mais brilhantes de raios X e está bem separada de outras fontes vizinhas. Uma vez que a maior parte da emissão de raios X vem da parte difusa da nebulosa, espera-se que seu brilho não varie significativamente numa escala de tempo de alguns anos. De fato, o estudo das variações da emissão de raios X mostra que até energias de ~ 100 keV a intensidade de emissão pode ser considerada constante ([TOOR; SEWARD, 1974](#)), o que torna a medida do fluxo de raios X da nebulosa do Caranguejo um padrão de calibração do fluxo observado.

Outras fontes brilhantes em raios X duros que possivelmente serão observadas pelo protoMIRAX são GX 1+4, 1E 1740.7-2942, GRS 1758-258 (A realização destas observações está sujeita às condições do vôo em balão).

O objeto mais luminoso na região do CG acima de 40 keV é 1E 1740.7-2942 ([SUNYAEV et al., 1991](#)), uma fonte persistente candidata a buraco negro em um LMXB, e que domina a emissão de raios X duros da região do centro dinâmico da Galáxia. 1E 1740.7-2942 foi considerada um microquasar após a descoberta de dois jatos com emissão em rádio ([MIRABEL et al., 1992](#)). Na faixa de energias do IBIS/ISGRI, ela apresenta um espectro característico de um candidato a BN no estado de pouco brilho e espectro duro (*low hard state (LH)*) ([MCCLINTOCK; REMILLARD, 2003](#)), e o modelo teórico apresenta um corte em energias de ~ 40 keV ([SANTO et al., 2004](#)).

GX 1+4 é um dos mais brilhantes pulsares de raios X duros, e é um dos raros pulsares em binárias-X de baixa massa (LMXBs). Desde sua descoberta, ele apresenta uma história

interessante de variação de período de pulsação e tem uma relação torque-luminosidade incomum (JABLONSKI et al., 1997; PEREIRA et al., 1999). Atualmente ele passa por um período de *spin-down* estacionário e se encontra muito menos luminoso do que era na década de 70. Entretanto foi observado *spin-up* durante um estado de alta luminosidade do pulsar (FERRIGNO et al., 2007). A observação de *spin-down*, mesmo com uma taxa de acresção correspondente a uma emissão persistente de alguns $10^{37} \text{ ergs s}^{-1}$, sugere que a estrela de nêutrons tenha um campo magnético muito intenso, o que ainda deve ser confirmado a partir de medidas espectroscópicas. Nos estados de baixa e média luminosidades o perfil do pulso apresenta *dips* estreitos, os quais são atribuídos a eclipses causados pela coluna de acresção. A fonte também apresenta episódios de fluxo baixo associados a mudanças espetrais. O espectro de GX 1+4 é descrito por uma lei de potência, modificada em baixas energias por absorção e em altas energias por um corte exponencial. Outra característica espectral é a presença da linha $K\alpha$ do ^{56}Fe (PAUL et al., 2005).

GRS 1758-258, uma LMXB no qual a estrela compacta é uma candidata a BN, é uma fonte de raios X persistente muito brilhante (com exceção de raros estados de brilho muito fraco). A maioria do tempo a fonte apresenta características do estado canônico LH de BN binários na Galáxia. A contrapartida em rádio foi detectada (dois jatos de rádio e uma fonte puntual), o que faz com GRS 1758-258 seja considerada um microquasar (POTTSCHMIDT et al., 2006).

3 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

3.1 Detectores de Telureto de Cádmio e Telureto de Zinco (CZT)

Detectores de CZT sensíveis à posição, combinados com a técnica de máscara codificada, fornecem excelentes instrumentos para imageamento e espectroscopia de raios X duros até algumas centenas de keV. Isso ocorre em função das propriedades do CZT: alta eficiência de detecção, baixo ruído térmico, operação a temperatura ambiente, boa resolução em energia, e possibilidade de pixelização que pode propiciar excelente resolução espacial ([MCCONNELL et al., 2001](#)).

O processo de interação dominante na região de ~ 5 keV até algumas centenas de keV é a absorção fotoelétrica devido ao Z médio (~ 50) elevado. A separação relativamente grande entre as camadas de valência e condução (~ 1.4 eV) permite que o detector opere a temperatura ambiente, sem ruído térmico significativo.

CZT é um cristal semicondutor composto de CdTe (90%) e ZnTe (10%). Cd e Te têm *K edge* em ~ 25 keV e ~ 31 keV repectivamente, o que faz com que um raio X com energia maior do que 25 keV possa produzir um fotoelétron e um raio X característico. Geralmente o raio X característico será absorvido dentro de $\sim 100 \mu\text{m}$ da posição de interação, a menos que a interação ocorra próxima às fronteiras físicas do detector e escape. O fotoelétron perde energia criando pares elétron-buraco, e será parado completamente dentro de uma distância curta.

Quando se é aplicada uma tensão ($\sim 300\text{ V}$) entre o anodo e o catodo do detector, as cargas se deslocam ao longo das linhas de campo elétrico. Para campos de $\sim 10\text{ keV cm}^{-1}$ a velocidade de deriva dos elétrons e buracos é proporcional ao campo. Para campos mais altos, a velocidade de deriva é constante. Em CZT, os elétrons se movem muito mais rápido do que os buracos e as mobilidades são $\mu_e \sim 1000\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ e $\mu_b \sim 50\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ respectivamente.

As cargas podem ser aprisionadas nos sítios da estrutura do cristal. O aprisionamento pode ser quantificado pelo tempo de aprisionamento τ definido pelo tempo livre médio de deriva antes de o portador de carga ser aprisionado. Uma quantidade útil é o comprimento de aprisionamento definido por:

$$L(x) = \mu\tau E(x) \quad (3.1)$$

onde μ é a mobilidade, τ é o tempo de aprisionamento, e $E(x)$ é o campo elétrico entre

o anodo e o catodo. Uma vez que os buracos se movem muito mais lentamente do que os elétrons, eles são mais susceptíveis ao aprisionamento. Os valores típicos encontrados na literatura para o produto $\mu\tau$ para elétrons e buracos são $\sim 3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1}$ e $\sim 1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1}$ respectivamente ([KALEMCI et al., 1999](#)). Entretanto, tanto os elétrons como os buracos podem ser liberados, o que restaura a neutralidade do detector.

Outro fenômeno importante que ocorre no detector é a indução de cargas. Os pares elétron-buraco se separam por causa do campo externo aplicado, e, quando se movem, eles induzem cargas em cada eletrodo segundo a relação:

$$Q_{ind} = -Q(x)W(x) \quad (3.2)$$

onde $W(x)$, correspondente ao peso do potencial elétrico, é um número entre 0 e 1 que é obtido resolvendo-se a equação de Laplace para um sistema onde um potencial unitário é aplicado a uma das placas enquanto as outras estão aterradas. $Q(x)$ é a carga restante (não aprisionada) como função da distância d em um campo elétrico constante, e é dada por:

$$Q(x) = Q(0)\exp(-d/L(x)) \quad (3.3)$$

onde $Q(0)$ é o número total de pares elétron-buraco gerados. Por causa do aprisionamento de cargas, algumas delas não chegam aos eletrodos e a carga total induzida nos eletrodos é função da posição da interação. Para se obter a resolução limite do detector é muito importante coletar a informação completa transportada pelo par elétron-buraco. O deslocamento médio do portador de carga é expresso pelo produto $\mu\tau$. Devido a baixa mobilidade e curto tempo de vida dos buracos em relação aos elétrons, a espessura do detector deve ser menor do que $\mu_b\tau_b E$. Se um detector com espessura $l > \mu\tau E$ é utilizado, apenas uma fração das cargas geradas são induzidas no eletrodo. A fração e a altura resultante do pulso dependem da profundidade da interação. Essa dependência produz uma cauda nas linhas de raios X em direção a energias menores. Devido a estas distorções, a resolução em energia não atinge o limite esperado devido à flutuações estatísticas no número de pares elétron-buraco e no fator de Fano ([KNOLL, 1989](#)). A altura do pulso como função da profundidade de interação em um detector plano é dada pela equação de Hecht ([HECHT, 1932](#)):

$$H(x) \propto Q(0) \left(L_e \left(1 - \exp \left[\frac{-(D-x)}{L_e} \right] \right) + L_b \left(1 - \exp \left[\frac{-x}{L_b} \right] \right) \right) \quad (3.4)$$

onde D é a espessura do detector. A interação ocorre a uma distância x do catodo. A redução da altura do pulso é severa quando o evento ocorre próximo ao anodo de um detector de 2 mm de espessura, onde o sinal é em grande parte devido ao trânsito de buracos. Este efeito é claramente observado no espectro do ^{241}Am obtido com um detector de CZT com espessura de 2 mm mostrado na [Figura 3.1](#).

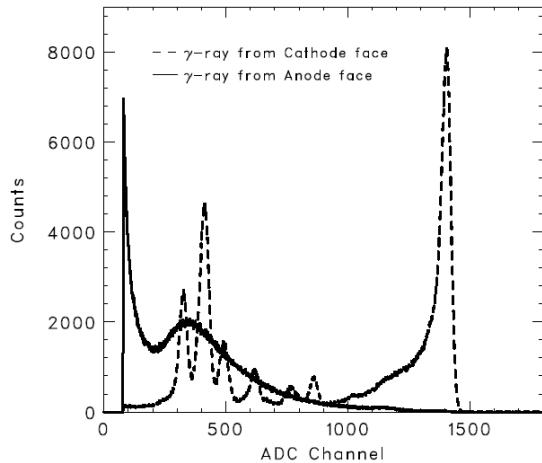


Figura 3.1 - Espectro do ^{241}Am obtido com um detector de CZT de 2 mm de espessura. A voltagem utilizada foi de 300 V e a temperatura de operação é 5°C. A linha tracejada é para raios γ irradiados na face dos catodos e a linha sólida é para raios γ irradiados na face dos anodos.

Fonte: [Takahashi e Watanabe \(2001\)](#).

Quando o detector é irradiado por raios γ na face dos catodos os picos são claramente resolvidos. A resolução em 60 keV é de 3.3 keV. Entretanto, se os raios γ são irradiados na face dos anodos, a estrutura dos picos é perdida ([TAKAHASHI; WATANABE, 2001](#)). Os picos em energias menores do que 60 keV são devidos a fluorescência do CZT ([LECLAIR et al., 2006](#)).

3.2 Técnica de imageamento utilizando-se máscaras codificadas

Em Astronomia de raios X acima de ~ 10 keV, uma técnica importante de obtenção de imagens envolve o uso de detectores de estado sólido sensíveis a posição e máscaras codificadas. Um avanço muito importante na técnica de máscaras codificadas ocorreu em 1978 com a descoberta dos Arranjos Uniformemente Redundantes (URA) ([FENIMORE; CANNON, 1978](#)), que permitem a obtenção de imagens sem ambigüidades e livres de ruído intrínseco.

No processo de imageamento com máscara codificada, esta é usada para modular espaci-

almente o fluxo incidente no sistema detector. A intensidade do fluxo modulado é medida no plano detector por um sistema detector sensível à posição (veja um esquema na [Figura 3.2](#)). Esse sistema pode ser composto por um detector apenas ou um conjunto de detectores.

A informação é registrada como um conjunto de números inteiros que correspondem ao número de fótons que interagiram em cada elemento definido no plano detector durante um certo tempo de aquisição. A resolução angular obtida por um instrumento deste tipo é dada pela razão entre o tamanho típico do orifício correspondente a um elemento do padrão da máscara e a distância entre a máscara e o plano detector.

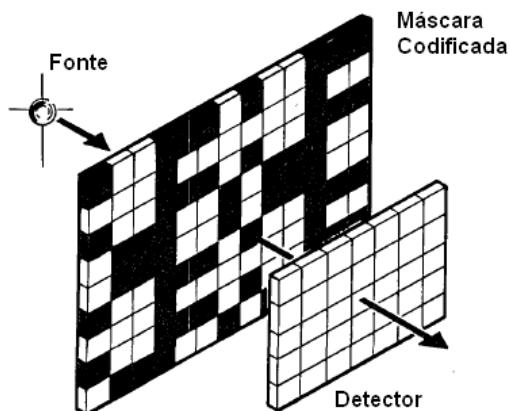


Figura 3.2 - Esquema de um sistema imageador com máscara codificada. A máscara é um mosaico de um URA 5×7 .

Fonte: Adaptado de [Gottesman e Fenimore \(1989\)](#).

É conveniente representar os dados registrados por uma matriz 2-D, D , cujos elementos D_{ij} correspondem ao número de interações registradas no elemento (i,j) do plano detector. A máscara também pode ser representada por uma matriz 2-D, onde os elementos A_{ij} são representados por 1 se o elemento (i,j) da máscara é transparente à radiação incidente (elementos abertos); e por 0 se são opacos (elementos fechados).

A área do campo de visada visível através de um único elemento da máscara (um *sky-bin*) é $\Delta\alpha\Delta\beta$ ster, onde $\Delta\alpha$ e $\Delta\beta$ rad são os ângulos subtendidos por um elemento da máscara em duas direções perpendiculares. A distribuição de fontes de raios X no céu pode ser representada por uma matriz S , cujos elementos S_{ij} contém o número de fótons observados que emanaram de um *sky-bin* centrado em $(i\Delta\alpha, j\Delta\beta)$. Com estas definições,

os dados registrados D são dados pela seguinte equação:

$$D = S * A + B \quad (3.5)$$

onde o símbolo $*$ é o operador de correlação, e o termo B é uma matriz que representa todas as contribuições não moduladas pela máscara ("o ruído de fundo"). Este termo inclui, por exemplo, raios cósmicos de altas energias, fótons que passam pela parte opaca da máscara, radiação produzida localmente nos materiais circundantes e nos próprios detectores, e ruído eletrônico.

A matriz D geralmente não guarda semelhança com a estrutura da fonte S. Entretanto, a estrutura da fonte pode ser obtida a partir de D por algoritmos de reconstrução computacional. A técnica de reconstrução de imagens é baseada na correlação ou convolução entre a matriz dos dados D e a matriz de correlação G, que é, em geral, uma réplica do padrão de aberturas da máscara exceto por um fator de escala. A matriz G é construída com dois vínculos iniciais: que ela seja a inversa correlacional de A, e que seja unimodular (todos os elementos são iguais em magnitude). Então, a imagem reconstruída I é dada por:

$$\hat{I} = D * G \quad (3.6)$$

onde o símbolo $\hat{\cdot}$ representa uma quantidade estimada. Substituindo-se a [Equação 3.5](#) na [Equação 3.6](#), temos:

$$\hat{I} = (S * A) * G + B * G \quad (3.7)$$

Por construção G é a inversa correlacional de A, e portanto $A * G = \delta$, onde δ é a função Delta de Kronecker. Logo, a [Equação 3.8](#) se reduz a:

$$\hat{I} = S + B * G \quad (3.8)$$

e a fonte é perfeitamente reconstruída, a menos do termo de ruído de fundo, que na maioria dos casos práticos é tão pequeno que pode ser desprezado ([GOTTESMAN; FENIMORE, 1989](#)).

Para que o método de reconstrução de imagens seja eficiente é importante que não haja

ambiguidades quanto à posição da fonte, ou seja, que o padrão da máscara seja tal que não possa ser repetido por nenhuma permutação de si mesmo, caso contrário fontes de diferentes regiões do céu produzirão sombras idênticas no detector, o que irá resultar em ambigüidades nas posições das fontes.

Em uma observação astronômica real, existem muitos fatores que complicam a análise dos dados. A observação na faixa de raios X duros e raios γ é em geral dominada por ruído de fundo, o que faz com que o padrão de sombra da máscara seja quase imperceptível na distribuição de fótons no detector. Além disso, as flutuações estatísticas inerentes ao processo de contagem de fótons em cada pixel do detector afetam significativamente a qualidade das imagens. A resolução espacial do detector e como ela varia com a energia também são fatores importantes no processo de análise de dados.

Estas considerações mostram que o padrão ideal dos orifícios da máscara é aquele que seja não-permutável, produza uma imagem com máximo de contraste e tenha o mínimo de ruído intrínseco. Além disso, o número de aberturas deverá ser o maior possível, de forma a maximizar a área total de coleta dos fótons. Todas estas características são obedecidas pelos URAs.

A imagem de uma fonte pontual utilizando-se um padrão URA é formada por um pico no pixel correspondente ao ângulo de incidência dos fótons superposto a um patamar constante, que pode ser removido. Quando várias fontes estão presentes no FOV, estes níveis se somam sem produzir nenhuma irregularidade na imagem ([BRAGA, 1989](#)).

Existe uma classe de arranjos chamados de *Modified Uniformly Redundant Arrays* (MURAs) ([GOTTESMAN; FENIMORE, 1989](#)) que se comportam de forma muito semelhante aos URAs em termos de suas características de imageamento. MURAs podem ser gerados em qualquer comprimento L que seja um número primo e da forma: $L = 4m + 1$, onde $m=1,2,3,\dots$, e são construídos em tamanhos (número de aberturas) diferentes dos URAs, criando novas possibilidades de escolha um de padrão que se ajuste melhor ao detector que será utilizado. MURAs podem ser construídos em arranjos lineares, hexagonais ou quadrados, e apresentam $\sim 50\%$ de sua área total aberta. Uma característica importante destes arranjos é a simetria que possuem, o que pode ser vantajoso na construção física da máscara.

A relação sinal-ruído (RSR) obtida com os MURAs ou URAs para um sinal $S_{i,j}$ gravado no elemento (i, j) do detector é dada por:

$$RSR_{(i,j)} = \frac{NS_{(i,j)}}{\sqrt{NS_{(i,j)} + N \sum S_{(k,l)} + \sum B_{(m,n)}}} \quad (3.9)$$

onde N é o número de aberturas da máscara ([GOTTESMAN; FENIMORE, 1989](#)). A primeira soma do denominador representa uma soma sobre todas as fontes no campo de visada e a segunda soma representa todas as contagens de ruído de fundo. Na verdade, essa expressão representa uma manifestação da estatística de Poisson aplicada às contagens registradas no detector ([BRAGA, 1990](#))

3.3 Ruído de fundo

O ambiente de radiação, que comprehende campos de radiação de fótons e partículas do ambiente, bem como suas distribuições espectral e espacial e histórias temporais, são funções da órbita ou trajetória da missão e do campo geomagnético. Os fótons e partículas que constituem o campo de radiação local interagem com o detector e o instrumento como um todo, gerando fótons e partículas secundárias. Estas partículas e radiação primárias e secundárias resultam em contagens no detector e constituem o ruído de fundo instrumental.

Em um dado campo de radiação, a intensidade e o espectro do ruído de fundo instrumental são influenciados pela estrutura do instrumento (como os materiais que compõem os detectores, a máscara, a blindagem ativa e passiva), e por sua geometria (distribuição dos materiais, campo de visada, etc).

Uma descrição detalhada do ambiente de radiação é fundamental para a estimativa do ruído de fundo instrumental. Os campos de radiação que são potenciais fontes de ruído de fundo instrumental em altitudes de balão e regiões de rigidez geomagnética alta são: raios cósmicos galácticos (p , α , e^-), radiação do albedo da Terra (n , γ), radiação X e gama difusa, e radiação secundária produzida localmente.

Raios cósmicos galácticos consistem principalmente de prótons (80%), partículas α (12%), e elétrons (2%), e o restante são núcleos mais pesados. Para energias cinéticas maiores do que 10 GeV por nucleon, a modulação solar não é mais efetiva e o espectro diferencial de energias de raios cósmicos pode ser aproximado pela lei de potência $E^{-2.7}$. Essas partículas são a fonte dominante de ruído de fundo instrumental em missões que passam a maior parte do tempo fora da magnetosfera da Terra ou acima dos cinturões de radiação, mas são pouco significantes para experimentos a bordo de balões ou missões em órbitas baixas, pois o campo magnético da Terra atua como filtro de energia, sendo necessário que a partícula tenha no mínimo a energia de corte geomanética (*geomagnetic cutoff rigidity*)

para penetrar numa certa região da magnetosfera. Em altitudes de balão, a energia de corte geomagnética e o chuveiro de partículas resultam em um fluxo de raios cósmicos altamente anisotrópico.

Ao entrar na atmosfera terrestre, os raios cósmicos interagem com os núcleos do ar, iniciando reações nucleares que dão origem a uma imensidão de partículas secundárias de menor energia, a radiação do albedo terrestre. Os mais importantes destes produtos secundários para raios X e gama em altitudes de balão são fótons e nêutrons. Dependendo da energia, a distribuição angular de fótons e nêutrons é altamente anisotrópica, e sua intensidade depende da energia de corte geomanética local e da profundidade atmosférica. A intensidade da radiação de albedo varia com a energia de corte geomanética e com o ciclo solar. A importância relativa dos fótons de albedo como fonte de radiação difusa cresce com a energia. A distribuição em energias dos nêutrons varia de nêutrons térmicos até algumas centenas de MeV. Tanto nêutrons quanto fótons de albedo são a maior fonte de ruído de fundo instrumental em altitudes de balão.

Radiação cósmica difusa gama e X constituem um *background* contra o qual todas as observações astronômicas são feitas. Para simulações computacionais esta componente pode ser considerada isotrópica, seu espectro em energias constante no tempo e invariante ao campo geomagnético. Em altitudes de balão, entretanto, há uma atenuação atmosférica dependente da direção, apesar de a radiação gama atmosférica geralmente ser dominante.

As partículas e os fótons dos campos de radiação externos descritos acima interagem com o instrumento e as estruturas da gôndola/espacóneve através de vários processos físicos, produzindo um grande número de partículas secundárias como fótons, pósitrons e elétrons, nêutrons, prótons, e núcleos mais pesados. Como essa radiação secundária produzida localmente é gerada por campos de radiação externos, ela não é parte do ambiente de radiação. Ela deve ser tratada como uma componente separada do ambiente externo de radiação, e é calculada de forma semi-empírica como ruído instrumental. Em cálculos *ab initio* Monte Carlo, estas partículas secundárias são derivadas da modelagem das interações dos campos de radiação externos, que são o único *input* para o programa MGPPOD ([WEIDENSPONTNER et al., 2005](#)).

Através de simulações computacionais de ruído de fundo é possível estimar o ruído de fundo instrumental, bem como a sensibilidade do instrumento à radiação das fontes astrofísicas.

4 O EXPERIMENTO protoMIRAX

4.1 Descrição do protoMIRAX

O experimento protoMIRAX consiste essencialmente de uma câmara de raios X duros ([Figura 4.1](#)) com dimensões similares às das câmaras que estarão a bordo do MIRAX ([BRAGA; MIRAX-TEAM, 2005](#)). A câmara terá 196 detectores de CdZnTe (composição: CdTe 90%, ZnTe 10%), cada um com dimensões $10mm \times 10mm \times 2mm$. Os detectores serão montados sobre um suporte plano num arranjo retangular de 14×14 elementos, separados por 5 mm um do outro, com área sensível total de 196 cm^2 . A faixa de energia operante será 25–200 keV. Uma máscara codificada de chumbo (^{82}Pb) será colocada a uma distância de 500 mm do plano do detector. As dimensões da máscara serão $375mm \times 375mm \times 2mm$. O padrão básico da máscara é um MURA 13×13 ([Figura 4.2](#)). Cada elemento da máscara terá o tamanho de $15mm \times 15mm$. Um arranjo de colimadores de ^{82}Pb com 7mm de altura será montado em torno de cada detector. Nesta configuração, a câmara terá resolução angular geométrica de $1^\circ 43'$ e um campo de visada totalmente codificado de $20^\circ 36'$.

Será montado um sistema de blindagem passiva, que consistirá de placas de ^{82}Pb - ^{29}Cu (2mm e 0.3mm de espessura, respectivamente) nas laterais e no fundo, que irá absorver a maioria dos fótons vindos de regiões externas ao campo de visada. A câmara não terá blindagem ativa (anti-coincidência) contra partículas carregadas. Esperamos que isso não afete tanto as contagens de ruído de fundo instrumental, uma vez que a maior redução de contagens de ruído de fundo abaixo de $\sim 200\text{ keV}$ é atingida por blindagem passiva ([DEAN et al., 1986](#)).

A câmara será colocada em um sistema de apontamento alt-azimutal em uma gôndola de balão ([Figura 4.3](#)). Um computador de bordo fará o pré-processamento de dados recebidos da câmara e construirá os pacotes que serão transmitidos para o solo através de um sistema de telemetria com sinal na banda L de 1.5 GHz a 500 kbps. Durante o pré-processamento dos dados ocorrem a correção de erros, processamento, gravação e redução dos dados, gerando um log de saída denominado *event packet*, que corresponde a um conjunto de dados contendo o tempo exato em que ocorreu a interação, o detector que foi atingido, e a altura do pulso (equivalente a energia do fóton) de cada fóton de raios X que interagiu com o plano detector. A taxa de contagem esperada é ~ 42 contagens por segundo. O balão será lançado do centro de lançamentos de balões do INPE em Cachoeira Paulista em 2008, em um vôo de 10 à 18 horas, dependendo das condições do vento estratosférico.

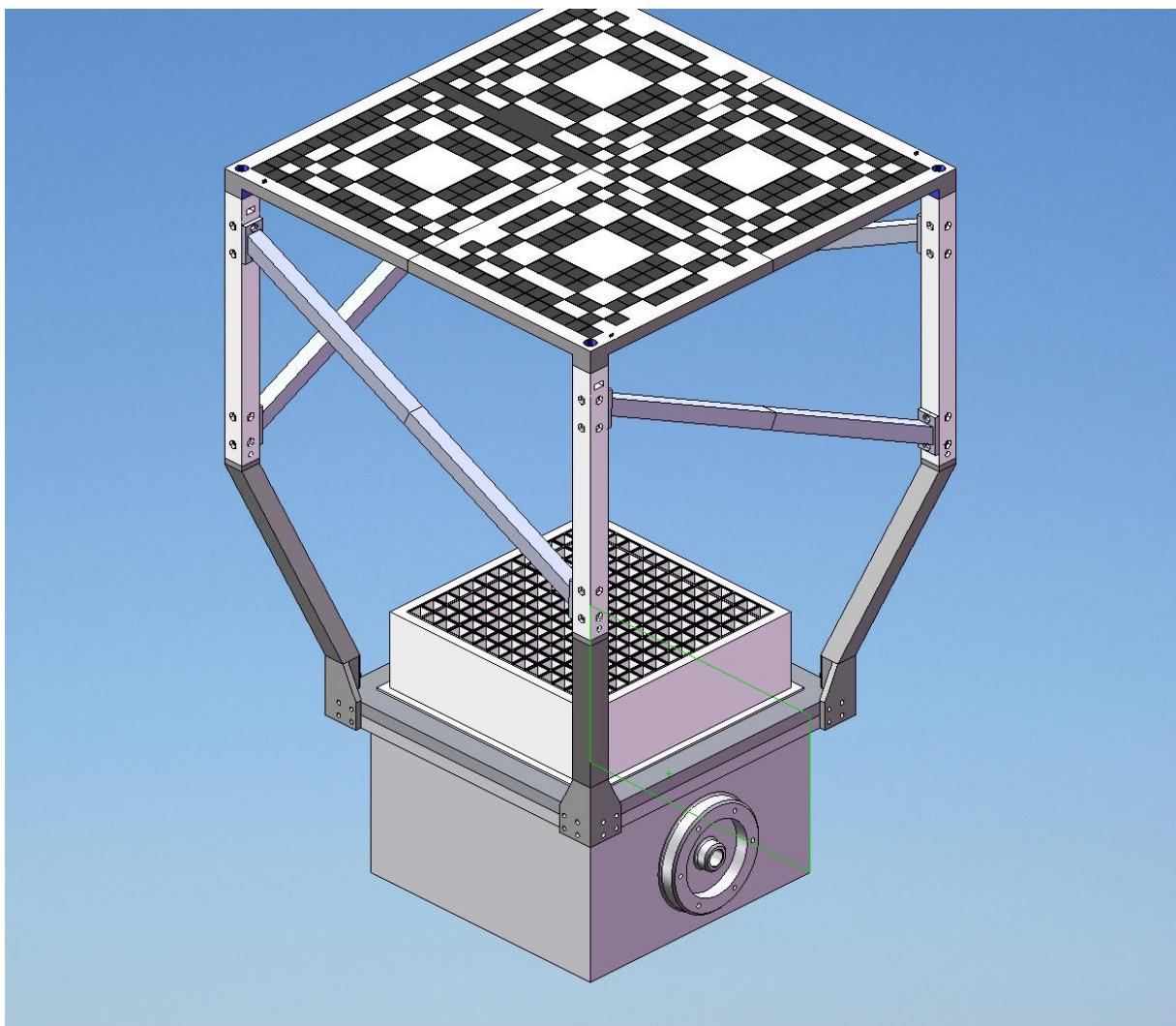


Figura 4.1 - Câmara de raios X duros do protoMIRAX.

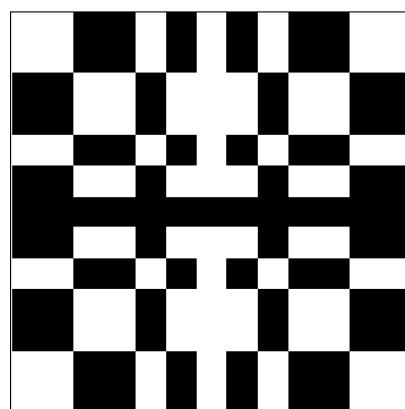


Figura 4.2 - Padrão básico da máscara codificada do ProtoMIRAX: MURA 13 × 13.



Figura 4.3 - Gôndola de balão.

4.2 Objetivos

O protoMIRAX é uma missão com objetivos tecnológicos. O principal objetivo deste experimento é testar alguns sub-sistemas da missão MIRAX, bem como testar e implementar várias partes do software da missão em um ambiente quase espacial. A partir de observações de fontes brilhantes seremos capazes de testar o sistema imageador, o software de aquisição de dados, e os algoritmos de reconstrução que serão utilizados na missão MIRAX. Estes testes irão fornecer dados de extrema importância para a construção e a configuração final das câmaras de raios X duros do MIRAX.

Uma contribuição científica importante deste experimento será a possibilidade de se obter o espectro de ruído de fundo na região sudeste do Brasil, uma região de baixas latitudes na Anomalia Magnética do Atlântico Sul, e com rigidez geomagnética em torno de 11 GV.

Há também a possibilidade de se obter dados científicos com o protoMIRAX, uma vez que poderão ser obtidos fluxos e espectros de raios X duros de algumas fontes brilhantes, os quais podem conter informações importantes para caracterização desses sistemas.

5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

5.1 Simulações de ruído de fundo

Para estimar o ruído de fundo que se espera observar com o protoMIRAX foram realizadas simulações utilizando o MGGPOD, um conjunto de rotinas Monte Carlo que simula a interação da radiação gama com a matéria (WEIDENSPONTNER et al., 2004). Foi montado um modelo de massa descrevendo os materiais que compõem cada parte da câmara, e sua geometria (foi criado um modelo apenas para a câmara de raios X duros; a gôndola e todo o restante da carga útil não foram inclusas no modelo de massa).

Em altitudes de balão, as componentes que geram maior quantidade de ruído de fundo são a radiação de albedo terrestre (γ , n), e raios cósmicos galácticos (p, e^-) (WEIDENSPONTNER et al., 2005). Adotamos como espectros de entrada para gerar o campo de radiação os que foram publicados em Swartz et al. (2000), com alguns ajustes para a região do sudeste do Brasil.

Sabe-se que o campo de radiação secundária local é função da profundidade atmosférica $\chi (g/cm^2)$, e da rigidez geomagnética. Considerando-se que o balão que carregará o proto-MIRAX seja lançado de Cachoeira Paulista-SP (lat= -22.7° , long= 45.0°), onde a rigidez magnética é $\sim 11\text{ GV}$, a intensidade do espectro será reduzida por um fator ~ 2 em relação ao espectro obtido em regiões de baixo valor de rigidez geomagnética (DEAN et al., 1989). O balão voará a uma altitude de 40km, o que corresponde a uma profundidade atmosférica de $\chi = 2.8\text{ g/cm}^2$, enquanto os espectros dados por Swartz et al. (2000) correspondem a uma profundidade atmosférica de $\chi = 3.5\text{ g/cm}^2$. O tipo de feixe incidente sobre a câmara de raios X escolhido foi feixe isotrópico, por simplicidade, o que pode ser considerado correto por até um fator 2 (SWARTZ et al., 2000; BLOSER et al., 2002). Assim, o fator de correção aplicado aos espectros é $4\pi \times (2.8/3.5) \times 0.5 = 5.03$, de modo que os espectros utilizados para fazer as simulações de ruído de fundo foram os seguintes:

a) **Espectro de fótons atmosféricos:**

$$\frac{dN}{dE} = 5.03 (9.2E^{-1.78}) = 46.24E^{-1.78} \text{ fotons/cm}^2 \text{ s keV} \quad (5.1)$$

onde E é a energia em keV, que varia de $10 < E < 10^6$ keV.

b) **Espectro de nêutrons:**

$$\frac{dN}{dE} = 5.03 (0.069E^{-0.88}) = 0.35E^{-0.88} \text{ neutrons/cm}^2 \text{ s keV} \quad (5.2)$$

para $10^{-4} < E < 6.0 \times 10^4$ keV.

$$\frac{dN}{dE} = 5.03 (5.75E^{-1.94}) = 28.90E^{-1.94} \text{ neutrons/cm}^2 \text{ s keV} \quad (5.3)$$

para $6.0 \times 10^4 < E < 10^7$ keV.

c) **Espectro de prótons:**

$$\frac{dN}{dE} = 5.03 (0.073E^{-1.8}) = 0.37E^{-1.8} \text{ protons/cm}^2 \text{ s keV} \quad (5.4)$$

para $5.0 \times 10^6 < E < 10^8$ keV.

Foram feitas simulações *prompt* com tempos de integração diferentes para cada espectro: 90 segundos para o espectro de fótons, 60 seg para o primeiro intervalo de energias do espectro de nêutrons, 100 segundos para o segundo intervalo de energias do espectro de nêutrons, e 7 horas para o espectro de prótons. Os diferentes tempos de integração se devem aos diferentes tempos de processamento do MGGPOD para cada espectro.

O espectro de fótons é a principal fonte de ruído instrumental, gerando uma taxa de contagens de $0.202721 \text{ cont/cm}^2 \text{ s}$. O espectro de nêutrons também é uma componente importante para o ruído instrumental, gerando uma taxa de contagem imediata de $0.0115414 \text{ cont/cm}^2 \text{ s}$, além de produzir ativações no Cd e no Te, as quais posteriormente irão decair gerando contagens no detector. Reações *prompt* de n e γ em CZT podem ser uma importante fonte de ruído de fundo devido a secção de choque para captura de nêutrons no Cd ser alta ([BLOSER et al., 2002](#)). Como o espectro de nêutrons gera muitas ativações nos materiais devido a interações dos nêutrons com as diversas partes do instrumento, esperamos que a taxa de contagens aumente significativamente quando se considera os decaimentos dos núcleos ativados. Entretanto, não foi possível realizar simulações para se quantificar a contribuição destes decaimentos ao longo do tempo.

A simulação *prompt* com o espectro de prótons gerou apenas duas contagens no detector, o que indica que, mesmo não tendo blindagem ativa, o instrumento não é afetado significativamente pelo campo de raios cósmicos. Esse resultado pode ser justificado de forma simples pois, a 40 km de altitude, o espectro de raios cósmicos é praticamente o espectro primário, compostos por partículas muito energéticas. Ao passarem pelos componentes da câmara de raios X, como todos são muito finos, os prótons não interagem com eles, ou se interagem, depositam energias maiores do que a faixa de energia do protoMIRAX, o que pode ser demonstrado fazendo-se uma estimativa da energia depositada por um próton em um detector idêntico ao do protoMIRAX: Suponhamos que a energia cinética do próton

incidente seja 5.0×10^6 keV, e que incida perpendicularmente à superfície, de modo que ele irá percorrer uma distância de 0.2 cm ao longo do detector. A densidade média do CZT é $\sim 7.4 \text{ g/cm}^3$. Logo, o próton atravessa $\sim 1.5 \text{ g/cm}$ do material detector. Segundo a figura 27.3 do *Booklet* de Física de partículas ([PARTICLE...](#), 2004), a energia depositada por um próton em um material com desidade $\sim 7.3 \text{ g/cm}^3$ é $\sim 1.5 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$. Assim, a energia depositada no CZT de 0.2 cm de espessura é:

$$E \sim [(1.5 \text{ g/cm}) \times (1.5 \text{ MeV cm}^2/\text{g})] / 0.2 \text{ cm} = 11.25 \text{ MeV} \quad (5.5)$$

e que, portanto, não será detectada pelo protoMIRAX. As contagens registradas são, mais provavelmente, o resultado da interação de nêutrons secundários gerados pelos prótons no próprio detector, ou na blindagem, liberando um fóton de raio X que foi detectado.

Embora nossos resultados indiquem que os prótons não são uma fonte importante de ruído de fundo, a literatura explicita a necessidade de haver uma blindagem para vetar partículas carregadas por anti-coincidência, devido às partículas secundárias geradas pela interação de raios cósmicos com o instrumento imageador, que podem dar origem à contagens no detector. Em [Bloser et al. \(2002\)](#) é apresentado um estudo sobre a importância da blindagem ativa em um experimento que voou em balão com um detector idêntico ao do protoMIRAX. Os resultados mostram que ao se ligar o sistema de anti-coincidência há uma redução de ~ 4.5 na taxa de contagens de ruído de fundo a 100 keV. Esperamos, portanto, que a taxa de contagem estimada para o protoMIRAX seja um pouco maior devido ao resultado da interação de partículas secundárias geradas pelo campo externo de raios cósmicos.

A taxa de contagem total de ruído de fundo instrumental resultante das simulações de interações instantâneas é $0.214241 \text{ cont/cm}^2 \text{ s}$. O espectro em energias obtido apresenta linhas intensas de fluorescência do ^{82}Pb (72.80, 74.96, 84.45, 84.93 keV ([DIETZEL, 2000](#))) [Figura 5.1](#)¹.

Tal resultado mostra que deve-se utilizar algum tipo de material que absorva a radiação emitida pelo ^{82}Pb , tanto na blindagem quanto na máscara e nos colimadores. A configuração atual prevista para o protoMIRAX possui uma camada de ^{29}Cu de 0.03 cm de espessura na caixa de blindagem passiva, o que se mostrou ineficiente para absorver a radiação de fluorescência do ^{82}Pb , pois absorve apenas $\sim 19\%$ da radiação incidente. Pode-se estimar a razão entre o fluxo incidente sobre o material e o fluxo que o atravessa pela

¹Todos os dados foram extraídos, tratados e analisados a partir de programas escritos em linguagem IDL.

equação a seguir:

$$\frac{I}{I_0} = \exp \left[-\frac{\mu}{\rho} \rho x \right] \quad (5.6)$$

onde μ/ρ é o coeficiente de atenuação em cm^2/g e ρ é a densidade. Para o ^{82}Pb , $\mu/\rho(80\text{ keV})$ foi obtido através de uma tabela fornecida por [NIST \(1998\)](#). Seria necessário uma camada de ^{29}Cu de 0.3 cm de espessura para bloquear $\sim 87\%$.

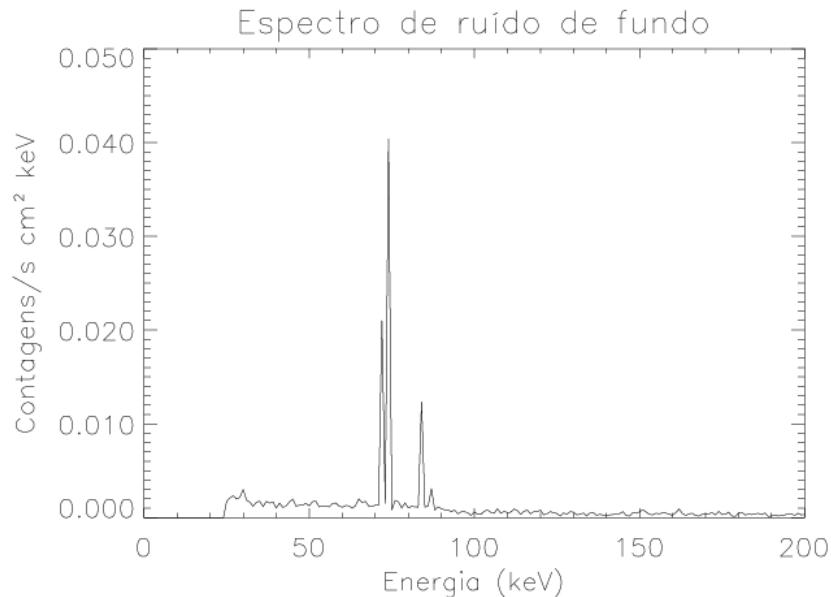


Figura 5.1 - Espectro de energias do ruído de fundo total.

Outra solução seria utilizar uma camada de estanho (^{50}Sn) de 0.1 cm, o que absorveria $\sim 89\%$ da radiação incidente proveniente da fluorescência do ^{82}Pb . Entretanto, seria necessário adicionar uma camada de ^{29}Cu no interior da lâmina de ^{50}Sn para absorver a radiação emitida pela fluorescência deste. Nesse caso, 0.03 cm de ^{29}Cu seria suficiente para absorver $\sim 90\%$ das linhas do ^{50}Sn .

Eliminando-se as linhas de fluorescência do ^{82}Pb , o espectro de energias do ruído de fundo total ([Figura 5.2](#)) mostra uma dependência decrescente com a energia.

As distribuições de contagens obtidas a partir das simulações mostram uma tendência de acumular um maior número de contagens nas bordas do plano detector [Figura 5.3](#). Esse resultado pode ser explicado pela distribuição de materiais em torno do detector, pois existem muito mais materiais nas bordas da câmara, o que gera mais radiação secundária.

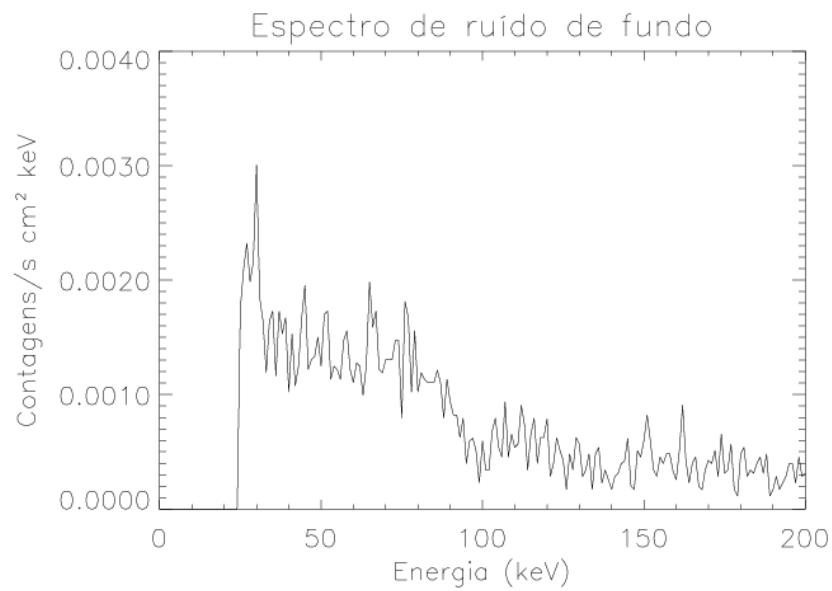


Figura 5.2 - Espectro de ruído de fundo sem linhas de fluorescência do ^{82}Pb .

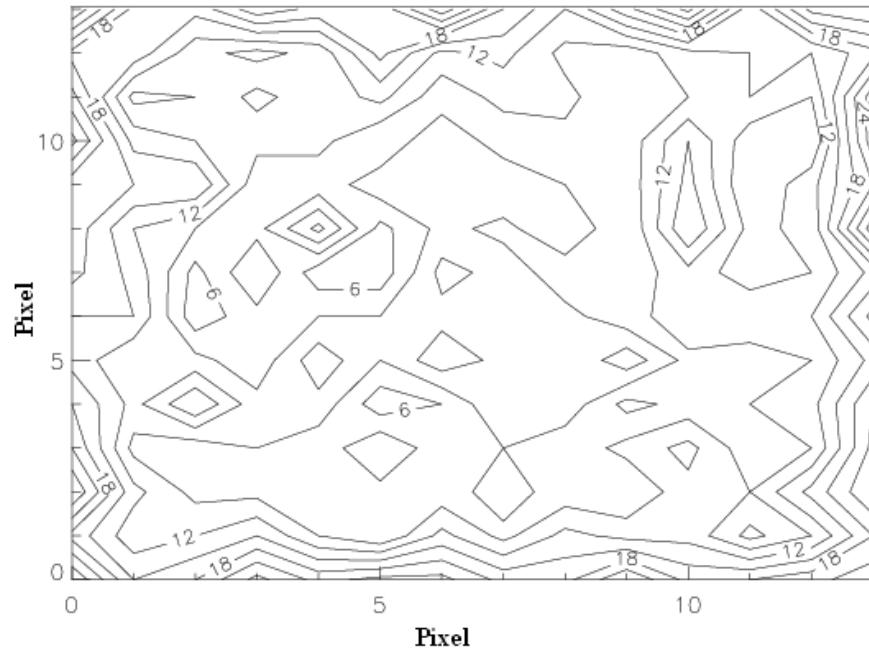


Figura 5.3 - Distribuição de contagens ao longo do plano detector geradas pelo espectro de fótons.

5.2 Estimativa da curva de sensibilidade do protoMIRAX

A partir da taxa de contagens de ruído de fundo obtida pela simulação é possível estimar o fluxo mínimo detectável de uma fonte astrofísica através da equação a seguir:

$$F_{min} = \frac{2k\sqrt{c}}{\epsilon\sqrt{\Delta E t A}} \text{contagens}/\text{cm}^2 \text{s keV} \quad (5.7)$$

onde c é a taxa de contagens em unidades de $\text{cont}/\text{cm}^2 \text{s keV}$, k é o número de σ 's de confiabilidade estatística, ϵ é a atenuação atmosférica em 100 keV à 40 km de altitude, ΔE é o intervalo de energias, t é o tempo de integração, e A é a área do detector. Para o protoMIRAX, considerando 5 σ 's, $\Delta E = 10$, e 5.5 h de integração, temos:

$$F_{min} = 2.47 \times 10^{-3} \sqrt{c} \text{contagens}/\text{cm}^2 \text{s keV} \quad (5.8)$$

Utilizando, agora, o espectro de ruído de fundo (Figura 5.2) é possível obter uma taxa de contagens aproximada para intervalos de 10 keV. Substituindo estas taxas de contagens na Equação 5.8, chegamos a curva de sensibilidade esperada para o protoMIRAX, apresentada na Figura 5.4.

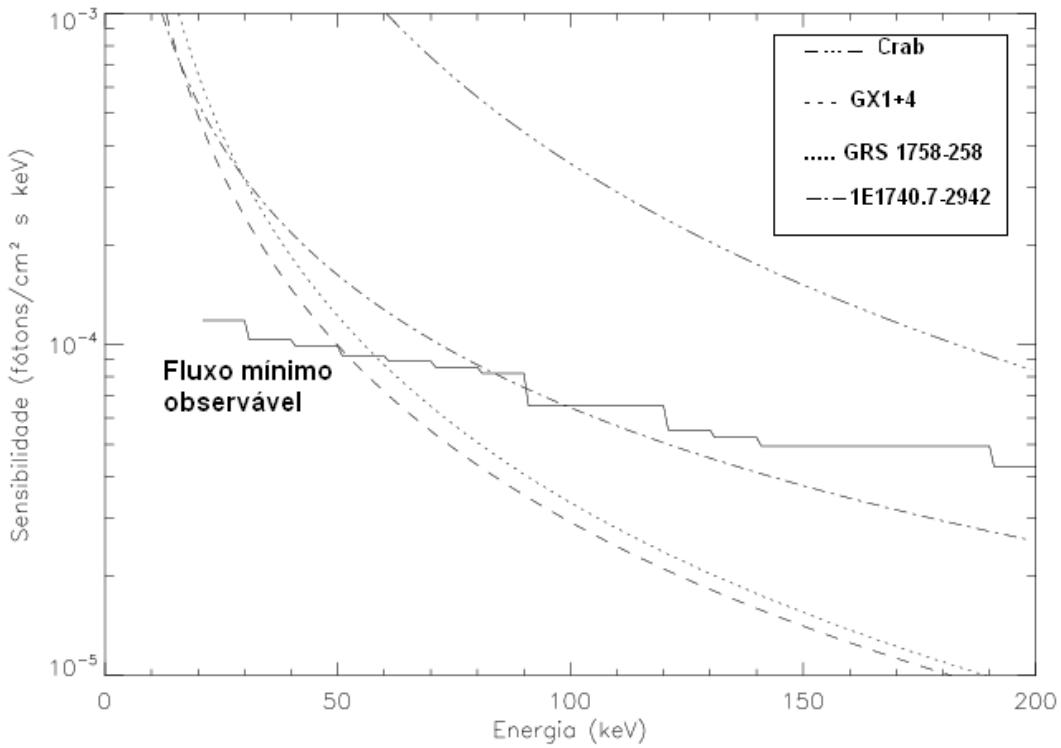


Figura 5.4 - Curva de sensibilidade do protoMIRAX. A curva contínua é o fluxo mínimo de uma fonte que poderá ser observado. São apresentadas 4 fontes que poderão ser observadas: Nebulosa do Caranguejo (espectro dado por Sizun et al. (2004)), GX1+4, GRS 1758-258, 1E1740.7-2942 (espectros dados por D'Amico (1997)).

O protoMIRAX será capaz de observar Nebulosa do Caranguejo em toda sua faixa espectral com uma relação sinal-ruído muito boa. As fontes GX1+4 e GRS 1758-258, poderão ser observadas com boa relação sinal ruído até energias ~ 50 keV, enquanto 1E1740.7-2942 poderá ser observada até energias ~ 80 keV.

5.3 Imagem simulada da Nebulosa do Caranguejo

A partir dos resultados das simulações, foi possível escrever um programa de Monte Carlo em IDL para simular imagens da Nebulosa do Caranguejo a serem obtidas pelo protoMIRAX através da técnica de máscara codificada. Para isso foi feito um estudo da trajetória no céu e da atenuação atmosférica do fluxo da nebulosa do Caranguejo durante um vôo de balão do protoMIRAX a uma latitude de -23° .

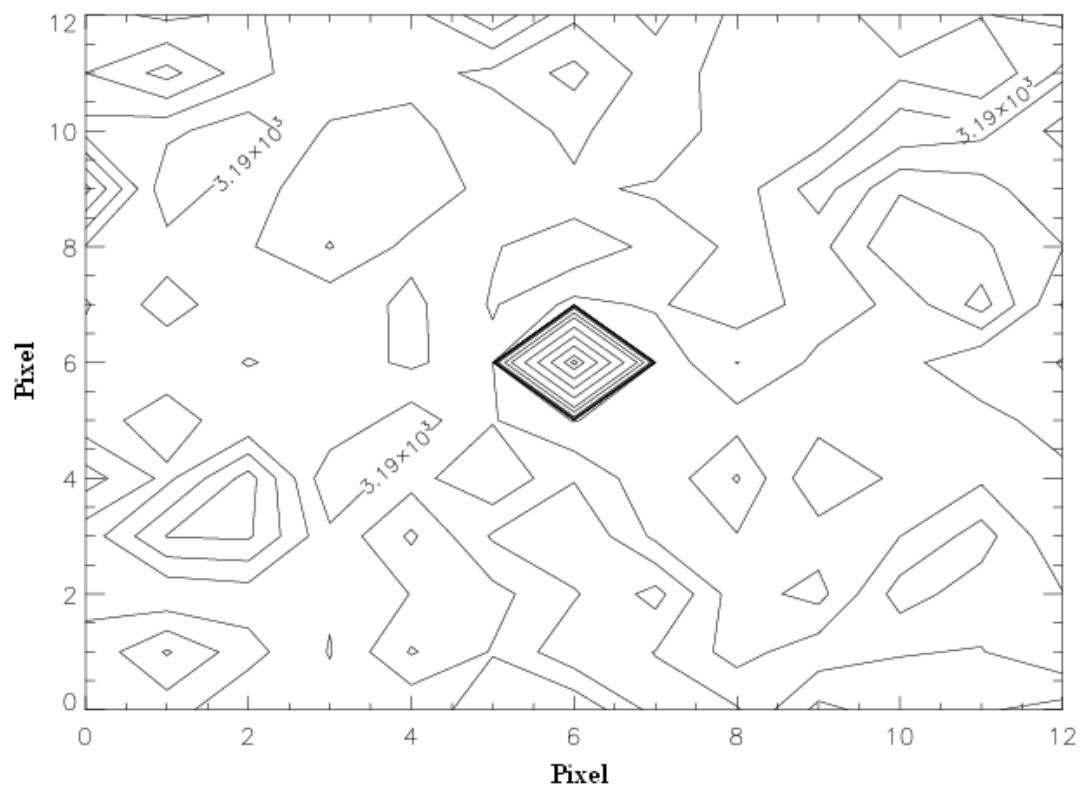
Foi feita uma imagem de Nebulosa do Caranguejo ([Figura 5.5](#)) a partir do seu espectro integrado em 5.5h, e corrigido pela absorção atmosférica em função da elevação e da energia. O programa para simular a imagem de uma fonte astrofísica toma como dados de entrada a taxa de contagens de ruído de fundo, a taxa de contagens da fonte astrofísica, e o tempo de integração. O programa retorna a imagem da fonte para o dado tempo de integração e a relação sinal-ruído dada pela razão entre as contagens do pico e o desvio padrão dos demais pixels.

A relação sinal-ruído obtida pela [Equação 3.9](#) é: $RSR = 288$, enquanto o valor da relação sinal-ruído calculada diretamente da imagem simulada é $RSR = 250$. As relações sinal-ruído das imagens simuladas são, portanto, compatíveis com o que se espera obter a partir do espectro do ruído de fundo simulado e das flutuações estatísticas das contagens nos detectores.

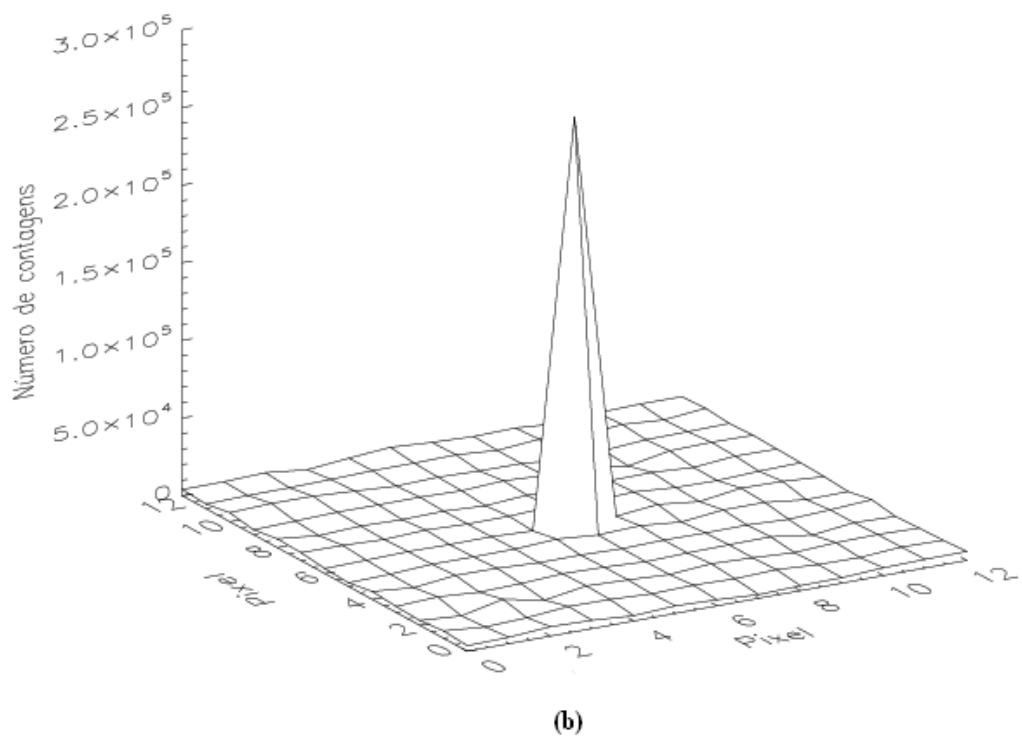
Este resultado mostra que o protoMIRAX será capaz de observar Nebulosa do Caranguejo com uma excelente relação sinal-ruído, como pode ser visto na [Figura 5.5](#), o que será de grande valia para a calibração e testes do sistema imageador.

Alternativamente, levando-se em conta a depaendência da relação sinal-ruído com a raiz quadrada do tempo de integração (consequência da [Equação 3.9](#), obtem-se que serão necessários apenas 24s para obtenção de uma imagem do Caranguejo com uma $RSR=10$.

Estes resultados e os valores de sensibilidade obtidos mostram que o protoMIRAX será capaz de obter imagens do Caranguejo e de outras fontes brilhantes com RSR significativas em diferentes faixas de energia.



(a)



(b)

Figura 5.5 - Imagem reconstruída de Nebulosa do Caranguejo. Os contornos da imagem (a) correspondem a curvas de mesmo σ .

6 CONCLUSÃO

O experimento protoMIRAX possui um sistema imageador baseado na técnica de máscara codificada e que utiliza detectores de estado sólido, muito semelhante ao sistema que irá compor as câmaras do satélite MIRAX. Por esta razão todo o desenvolvimento da câmara de raios X duros e seus resultados serão muito importantes para a missão MIRAX, pois servirão de teste para a construção das câmaras deste.

A missão MIRAX desempenhará um papel muito importante no estudo de fontes de raios X duros e fenômenos transitentes, uma vez que irá monitorar continuamente a região central do plano Galáctico, onde estas fontes são abundantes.

A construção de telescópios de raios X duros requer uma técnica especial de obtenção de imagens devido ao fato de a física de reflexão de feixes de radiação eletromagnética não funcionar para fótons de raios X com energias $\gtrsim 10$ keV, pois estes penetram na matéria. A técnica de imageamento utilizando-se máscaras codificadas permite a obtenção de imagens de raios X duros em duas etapas: armazenamento do sinal modulado pela máscara, e decodificação dos dados armazenados.

Uma observação na faixa de raios X duros e raios γ é em geral dominada por ruído de fundo, o que faz com que o padrão de sombra da máscara seja quase imperceptível na distribuição de fótons no detector. Este fato mostra a necessidade de se conhecer o campo de radiação da atmosfera terrestre, responsável pelo ruído de fundo direto e instrumental observado, e de se desenvolver técnicas de blindagem para evitar que o sistema detector seja ativado por um fóton de ruído de fundo.

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre o ruído de fundo esperado para o proto-MIRAX. Para isso foram realizadas simulações de ruído de fundo utilizando o software MGGPOD, nas quais foram fornecidos um modelo de massa da câmara de raios X duros, e o espectro do ambiente de radiação (γ , n, p) como dados de entrada.

Os resultados das simulações mostram que as componentes do campo de radiação mais importantes são a radiação de albedo terrestre e os nêutrons atmosféricos, em concordância com a literatura.

As simulações também possibilitaram o desenvolvimento das rotinas de extração de dados a partir do log gerado pelo computador de bordo do protoMIRAX, e das rotinas de reconstrução de imagens e obtenção do espectro de energias das fontes observadas.

Um resultado muito importante obtido através das simulações foi a verificação da neces-

sidade de se utilizar uma blindagem de cobre mais espessa, ou talvez usar outro material (preferencialmente estanho), para absorver as linhas intensas de fluorescência do chumbo que aparecem no espectro do ruído de fundo.

Com a estimativa do ruído de fundo que se espera observar com o protoMIRAX foi possível fazer o cálculo do fluxo mínimo de uma fonte astrofísica que o protoMIRAX poderá identificar. E a partir deste fluxo mínimo, foi estimada a curva de sensibilidade do instrumento, mostrando que a Nebulosa do Caranguejo poderá ser observada com excelente sinal-ruído em todo seu espectro (dentro da faixa sensível da câmara), e que fontes como GX1+4, GRS 1758-258, e 1E1740.7-2942 poderão ser observadas dentro de uma faixa do espectro.

É importante ressaltar que os resultados deste trabalho são preliminares, pois ainda não completamos o estudo o ruído de fundo que se espera observar com o protoMIRAX. Ainda é necessário realizar simulações que considerem os efeitos das partículas e radiação secundárias geradas nos materiais que compõem o instrumento. Esperamos que estas simulações resultem num aumento das contagens geradas pelos espectros de prótons e nêutrons, principalmente pelo fato de o Cádmio ter secção de choque de absorção de nêutrons alta. Isto poderá alterar a curva de sensibilidade e a relação sinal-ruído das imagens obtidas. Entretanto, este trabalho proporcionou o desenvolvimento de ferramentas de grande importância para simulações realistas e detalhadas da intensidade e espectro da radiação detectada por telescópios de raios X em ambiente quase espacial, o que será de grande valia para o desenvolvimento da missão MIRAX.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIRD, A. J.; BARLOW, E. J.; BASSANI, L.; BAZZANO, A.; BÉLANGER, G.; BODAGHEE, A.; CAPITANIO, F.; DEAN, A. J.; FIOCCHI, M.; HILL, A. B.; LEBRUN, F.; MALIZIA, A.; MAS-HESSE, J. M.; MOLINA, M.; MORAN, L.; RENAUD, M.; SGUERA, V.; SHAW, S. E.; STEPHEN, J. B.; TERRIER, R.; UBERTINI, P.; WALTER, R.; WILLIS, D. R.; WINKLER, C. The Second IBIS/ISGRI Soft Gamma-Ray Survey Catalog. *Astrophysical Journal*, v. 636, p. 765–776, jan. 2006. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2006ApJ...636..765B>>. Acesso em: 04 jun. 2007. [22](#)

BLOSER, P. F.; NARITA, T.; JENKINS, J. A.; PERRIN, M.; MURRAY, R.; GRINDLAY, J. Balloon flight background measurement with actively-shielded planar and imaging CZT detectors. In: FLANAGAN, K. A.; SIEGMUND, O. H. (Ed.). **Proc. SPIE Vol. 4497, p. 88-99, X-Ray and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy XII**, Kathryn A. Flanagan; Oswald H. Siegmund; Eds. [s.n.], 2002. (Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference, v. 4497), p. 88–99. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2002SPIE.4497..88B>>. Acesso em: 11 dez. 2007. [37](#), [38](#), [39](#)

BOUCHET, L.; ROQUES, J. P.; BALLET, J.; GOLDWURM, A.; PAUL, J. The SIGMA/Granat Telescope: Calibration and Data Reduction. *Astrophysical Journal*, v. 548, p. 990–1009, fev. 2001. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2001ApJ...548..990B>>. Acesso em: 12 jun. 2007. [19](#)

BRADT, H. V.; ROTHSCHILD, R. E.; SWANK, J. H. X-ray timing explorer mission. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, v. 97, p. 355–360, jan. 1993. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1993A%26AS...97..355B>>. Acesso em: 28 jun 2007. [22](#)

BRAGA, J. Formação de Imagens em Astrofísica de Alta Energia. **Boletim da SAB**, v. 11, p. 45–58, dez. 1989. [30](#)

BRAGA, J. **Técnicas de imageamento em raios-X duros com máscaras codificadas**. Tese (Doutorado) — Instituto de Astronomia e Geofísica da Universidade de São Paulo, 1990. [21](#), [31](#)

BRAGA, J.; MIRAX-TEAM. Mirax mission overview and status. In: THE TRANSIENT MILKY WAY: A PERSPECTIVE FOR MIRAX, 840., 2005, São José dos Campos. **AIP proceedings**. São José dos Campos: INPE, 2005. p. 03–07. [20](#), [33](#)

COPPI, P. S. The Physics of Hybrid Thermal/Non-Thermal Plasmas. In: POUTANEN, J.; SVENSSON, R. (Ed.). **High Energy Processes in Accreting Black Holes**. [s.n.], 1999. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series, v. 161). Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1999ASPC..161..375C>>. Acesso em: 11 jun. 2007. [22](#)

D'AMICO, F. **Desenvolvimento dos sistemas detector e de imageamento do telescópio MASCO**. 63 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1997. [17](#), [42](#)

DEAN, A. J.; DIPPER, N. A.; LEWIS, R. A. The background counting rates in a balloon borne hard X-ray telescope. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, v. 242, p. 342–345, 1986. Disponível em:
<<http://adsabs.harvard.edu/abs/1986NIMPA.242..342D>>. Acesso em: 14 dez. 2007. [33](#)

DEAN, A. J.; FAN, L.; BYARD, K.; GOLDWURM, A.; HALL, C. J. The gamma-ray emissivity of the earth's atmosphere. **Astronomy & Astrophysics**, v. 219, p. 358–361, jul. 1989. Disponível em:
<<http://adsabs.harvard.edu/abs/1989A%26A...219..358D>>. Acesso em: 13 dez. 2007. [37](#)

DIETZEL, K. I. **On-line X-ray fluorescence analysis applied to industrial processes and environmental monitoring**. 46 p. Dissertação (Mestrado) — Department of Physics of The University of Bergen, Norway, 2000. Disponível em:
<<http://www.ub.uib.no/elpub/2000/h/404002/Hovedoppgave.pdf>>. Acesso em: 17 dez. 2007. [39](#)

FENIMORE, E. E.; CANNON, T. M. Coded aperture imaging with uniformly redundant arrays. **Applied Optics**, v. 17, p. 337–347, fev. 1978. [19](#), [27](#)

FERRIGNO, C.; SEGRETO, A.; SANTANGELO, A.; WILMS, J.; KREYKENBOHM, I.; DENIS, M.; STAUBERT, R. INTEGRAL observation of the accreting pulsar GX 1+4. **Astronomy & Astrophysics**, v. 462, p. 995–1005, fev. 2007. Disponível em:
<<http://adsabs.harvard.edu/abs/2007A%26A...462..995F>>. Acesso em: 17 jul. 2007. [24](#)

FORMAN, W.; JONES, C.; COMINSKY, L.; JULIEN, P.; MURRAY, S.; PETERS, G.; TANANBAUM, H.; GIACCONI, R. The fourth Uhuru catalog of X-ray sources.

Astrophysical Journal, v. 38, p. 357–412, dez. 1978. Disponível em:

<<http://adsabs.harvard.edu/abs/1978ApJS...38..357F>>. Acesso em: 12 maio 2007. 19

GIACCONI, R.; BRANDUARDI, G.; BRIEL, U.; EPSTEIN, A.; FABRICANT, D.; FEIGELSON, E.; FORMAN, W.; GORENSTEIN, P.; GRINDLAY, J.; GURSKY, H.; HARNDEN, F. R.; HENRY, J. P.; JONES, C.; KELLOGG, E.; KOCH, D.; MURRAY, S.; SCHREIER, E.; SEWARD, F.; TANANBAUM, H.; TOPKA, K.; SPEYBROECK, L. V.; HOLT, S. S.; BECKER, R. H.; BOLDT, E. A.; SERLEIMITSOS, P. J.; CLARK, G.; CANIZARES, C.; MARKERT, T.; NOVICK, R.; HELFAND, D.; LONG, K. The Einstein /HEAO 2/ X-ray Observatory. **Astrophysical Journal**, v. 230, p. 540–550, jun. 1979. Disponível em:

<<http://adsabs.harvard.edu/abs/1979ApJ...230..540G>>. Acesso em: 12 jun. 2007. 19

GIACCONI, R.; GURSKY, H.; PAOLINI, F. R.; ROSSI, B. B. Evidence for x Rays From Sources Outside the Solar System. **Physical Review Letters**, v. 9, p. 439–443, dez. 1962. Disponível em:

<<http://adsabs.harvard.edu/abs/1962PhRvL...9..439G>>. Acesso em: 01 jul. 2007. 19

GOTTESMAN, S. R.; FENIMORE, E. E. New family of binary arrays for coded aperture imaging. **Applied Optics**, v. 28, 1989. 28, 29, 30, 31

HAMEURY, J. M.; MENOU, K.; DUBUS, G.; LASOTA, J. P.; HURE, J. M. Accretion disc outbursts: a new version of an old model. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 298, p. 1048–1060, ago. 1998. Disponível em:

<<http://adsabs.harvard.edu/abs/1998MNRAS.298.1048H>>. Acesso em: 11 jun. 2007. 22

HECHT, K. Zum mechanismus des lichtelektrischen primärstromes in isolierenden. **Z. Physics**, p. 235, 1932. 26

JABLONSKI, F. J.; PEREIRA, M. G.; BRAGA, J.; GNEIDING, C. D. Discovery of Optical Pulsations in V2116 Ophiuchi equivalent to GX 1+4. **Astrophysical Journal Letters**, v. 482, p. L171, jun. 1997. Disponível em:

<<http://adsabs.harvard.edu/abs/1997ApJ...482L.171J>>. Acesso em: 27 jul. 2007. 24

JAGER, R.; ZAND, J. J. M. in 't; SCHUURMANS, J. J.; HEISE, J.; MELS, W. A. Coded mask cameras for SAX. In: HAILEY, C. J.; SIEGMUND, O. H. W. (Ed.). **EUV, X-ray, and gamma-ray instrumentation for astronomy and atomic physics; Proceedings of the Meeting, San Diego, CA, Aug. 7-11, 1989 (A90-50251 23-35)**. Bellingham, WA, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1989, p. 2-13. [S.l.: s.n.], 1989. (Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference, v. 1159), p. 2-13. [19](#)

KALEMCI, E.; MATTESON, J. L.; SKELTON, R. T.; HINK, P. L.; SLAVIS, K. R. Model calculations of the response of CZT strip detectors. In: JAMES, R. B.; SCHIRATO, R. C. (Ed.). **Proc. SPIE Vol. 3768, p. 360-373, Hard X-Ray, Gamma-Ray, and Neutron Detector Physics, Ralph B. James; Richard C. Schirato; Eds.** [S.l.: s.n.], 1999. (Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference, v. 3768), p. 360-373. [26](#)

KITCHIN, C. R. **Astrophysical Techniques**. 4. ed. UK: Institute of Physics Publishing, 2003. várias páginas p. [19](#)

KNOLL, G. F. **Radiation Detection and Measurements**. USA: John Wiley & Sons, 1989. várias páginas p. [26](#)

LAURENT, P.; TITARCHUK, L. The Converging Inflow Spectrum Is an Intrinsic Signature for a Black Hole: Monte Carlo Simulations of Comptonization on Free-falling Electrons. **Astrophysical Journal**, v. 511, p. 289-297, jan. 1999. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1999ApJ...511..289L>>. Acesso em: 11 jun. 2007. [22](#)

LECLAIR, R. J.; WANG, Y.; ZHAO, P.; BOILEAU, M.; WANG, L.; FLEUROT, F. An analytic model for the response of a CZT detector in diagnostic energy dispersive x-ray spectroscopy. **American Association of Physicists in Medicine**, 2006. Disponível em: <<http://scitation.aip.org/getabs/servlet/GetabsServlet?prog=normal\&id=MPHYA600003300005001329000001\&idtype=cvips\&gifs=yes>>. Acesso em: 10 jan. 2008. [27](#)

MCCLINTOCK, J. E.; REMILLARD, R. A. Black Hole Binaries. **ArXiv Astrophysics e-prints**, jun. 2003. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2003astro.ph..6213M>>. Acesso em: 08 jun. 2007. [23](#)

MCCONNELL, M. L.; HAMEL, L. A.; MACRI, J. R.; MCCLISH, M.; RYAN, J. M. The Development of Coplanar CZT Strip Detectors for Gamma-Ray Astronomy. In:

RITZ, S.; GEHRELS, N.; SHRADER, C. R. (Ed.). **Gamma 2001: Gamma-Ray Astrophysics**. [s.n.], 2001. (American Institute of Physics Conference Series, v. 587), p. 909–+. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2001AIPC..587..909M>>. Acesso em: 29 jun. 2007. 25

MIRABEL, I. F.; RODRIGUEZ, L. F.; CORDIER, B.; PAUL, J.; LEBRUN, F. A double-sided radio jet from the compact Galactic Centre annihilator 1E140.7 - 2942. **Nature**, v. 358, p. 215–217, jul. 1992. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1992Natur.358..215M>>. Acesso em: 17 jul. 2007. 23

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). **XCOM: Photon Cross Sections Database**: Nist standard reference database 8 (xgam). 1998. Gráfico de coeficiente de absorção do Cobre e do Estanho. Disponível em: <<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>>. Acesso em: 17 dez. 2007. 40

PARTICLE Physics Booklet. Berkeley, Julho 2004. 241 p. 39

PAUL, B.; DOTANI, T.; NAGASE, F.; MUKHERJEE, U.; NAIK, S. High-Resolution X-Ray Spectrum of the Accreting Binary X-Ray Pulsar GX 1+4. **Astrophysical Journal**, v. 627, p. 915–919, jul. 2005. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2005ApJ...627..915P>>. Acesso em: 17 jul. 2007. 24

PEREIRA, M. G.; BRAGA, J.; JABLONSKI, F. The Orbital Period of the Accreting Pulsar GX 1+4. **Astrophysical Journal Letters**, v. 526, p. L105–L109, dez. 1999. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1999ApJ...526L.105P>>. Acesso em: 27 jul. 2007. 24

PFEFFERMANN, E.; BRIEL, U. G.; HIPPmann, H.; KETTENRING, G.; METZNER, G.; PREDEHL, P.; REGER, G.; STEPHAN, K. H.; ZOMBECK, M. V.; CHAPPELL, J. The focal plane instrumentation of the ROSAT telescope. **NASA STI/Recon Technical Report N**, v. 87, fev. 1987. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1987STIN...8728474P>>. Acesso em: 28 jun 2007. 19

POTTSCHMIDT, K.; CHERNYAKOVA, M.; ZDZIARSKI, A. A.; LUBIŃSKI, P.; SMITH, D. M.; BEZAYIFF, N. INTEGRAL and RXTE monitoring of GRS 1758-258 in 2003 and 2004. A transition from the dim soft state to the hard state. **Astronomy & Astrophysics**, v. 452, p. 285–294, jun. 2006. Disponível em:

<<http://adsabs.harvard.edu/abs/2006A&26A...452..285P>>. Acesso em: 18 jul. 2007. 24

PSALTIS, D. Accreting Neutron Stars and Black Holes: A Decade of Discoveries. **ArXiv Astrophysics e-prints**, out. 2004. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2004astro.ph.10536P>>. Acesso em: 04 jun. 2007. 22

REVNIVTSEV, M. G.; SUNYAEV, R. A.; GILFANOV, M. R.; CHURAZOV, E. M.; GOLDWURM, A.; PAUL, J.; MANDROU, P.; ROQUES, J. P. A Hard X-ray Sky Survey with the SIGMA Telescope of the GRANAT Observatory. **Astronomy Letters**, v. 30, p. 527–533, ago. 2004. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2004AstL...30..527R>>. Acesso em: 04 jun. 2007. 22

REVNIVTSEV, M. G.; SUNYAEV, R. A.; VARSHALOVICH, D. A.; ZHELEZNYAKOV, V. V.; CHEREPASHCHUK, A. M.; LUTOVINOV, A. A.; CHURAZOV, E. M.; GREBENEV, S. A.; GILFANOV, M. R. A Hard X-ray Survey of the Galactic-Center Region with the IBIS Telescope of the INTEGRAL Observatory: A Catalog of Sources. **Astronomy Letters**, v. 30, p. 382–389, jun. 2004. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2004AstL...30..382R>>. Acesso em: 12 maio 2007. 19

SANTO, M. D.; BAZZANO, A.; SMITH, D. M.; BASSANI, L.; BIRD, A. J.; BOUCHET, L.; CADOLLE-BEL, M.; CAPITANIO, F.; CESARE, G. D.; FALANGA, M.; FRONTERA, F.; GOLDINI, P.; GOLDWURM, A.; HUOVELIN, J.; KUULKERS, E.; LUND, N.; MALAGUTI, G.; MALIZIA, A.; MIRABEL, I. F.; NATALUCCI, L.; PAIZIS, A.; PAUL, J.; REGLERO, V.; UBERTINI, P.; VILHU, O.; ZDZIARSKI, A.; WINKLER, C. INTEGRAL Monitoring of the Black-Hole Candidate 1E 1740.7-2942. In: Schoenfelder, V.; Lichti, G.; Winkler, C. (Ed.). **5th INTEGRAL Workshop on the INTEGRAL Universe**. [s.n.], 2004. (ESA Special Publication, v. 552), p. 201–+. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2004ESASP.552..201D>>. Acesso em: 17 jul. 2007. 23

SIZUN, P.; SHRADER, C. R.; ATTIE, D.; DUBATH, P.; SCHANNE, S.; CORDIER, B.; STURNER, S. J.; BOUCHET, L.; ROQUES, J. P.; SKINNER, G. K.; CONNELL, P. The INTEGRAL/SPI Response and the CRAB Observations. In: SCHOENFELDER, V.; LICHTI, G.; WINKLER, C. (Ed.). **5th INTEGRAL Workshop on the INTEGRAL Universe**. [S.l.: s.n.], 2004. (ESA Special Publication, v. 552), p. 815–+. 17, 42

SKINNER, G. K.; PONMAN, T. J.; HAMMERSLEY, A.; EYLES, C. J. Techniques for the analysis of data from coded-mask X-ray telescopes. **Astrophysics and Space Science**, 1987. 19

SUNYAEV, R.; CHURAZOV, E.; GILFANOV, M.; PAVLINSKY, M.; GREBENEV, S.; BABALYAN, G.; DEKHANOV, I.; YAMBURENKO, N.; BOUCHET, L.; NIEL, M.; ROQUES, J. P.; MANDROU, P.; GOLDWURM, A.; CORDIER, B.; LAURENT, P.; PAUL, J. Two hard X-ray sources in 100 square degrees around the Galactic Center. **Astronomy and Astrophysics**, v. 247, p. L29–L32, jul. 1991. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1991A&26A...247L..29S>>. Acesso em: 04 jun. 2007. 23

SWARTZ, D. A.; CHEN, Y. Z.; RAMSEY, B. D. Background simulation for a balloon-borne gas scintillation proportional counter. In: FLANAGAN, K. A.; SIEGMUND, O. H. (Ed.). **Proc. SPIE Vol. 4140, p. 520-531, X-Ray and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy XI, Kathryn A. Flanagan; Oswald H. Siegmund; Eds.** [s.n.], 2000. (Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference, v. 4140), p. 520–531. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2000SPIE.4140..520S>>. Acesso em: 12 dez. 2007. 37

TAKAHASHI, T.; WATANABE, S. Recent Progress in CdTe and CdZnTe Detectors. **ArXiv Astrophysics e-prints**, jul. 2001. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2001astro.ph..7398T>>. Acesso em: 02 jul. 2007. 27

TOOR, A.; SEWARD, F. D. The Crab Nebula as a calibration source for X-ray astronomy. **Astronomical Journal**, v. 79, p. 995–999, out. 1974. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1974AJ.....79..995T>>. Acesso em: 17 jul. 2007. 23

TUCKER, W.; GIACCONI, R. **Exploring the X-ray Universe**. USA: Harvard University Press, 1985. várias paginações p. 19

UBERTINI, P.; COCCO, G. di; LEBRUN, F. The IBIS Telescope On Board INTEGRAL. In: WINKLER, C.; COURVOISIER, T. J. L.; DUROUCHOUX, P. (Ed.). **ESA Special Publication**. [s.n.], 1997. (ESA Special Publication, v. 382), p. 599+. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1997ESASP.382..599U>>. Acesso em: 12 jun. 2007. 19

WEIDENSPONTNER, G.; HARRIS, M.; FERGUSON, C.; STURNER, S.; TEEGARDEN, B.; WUNDERER, C. MGPOD: A Monte Carlo Suite for Gamma-Ray

Astronomy. In: SCHOENFELDER, V.; LICHTI, G.; WINKLER, C. (Ed.). **5th INTEGRAL Workshop on the INTEGRAL Universe**. [s.n.], 2004. (ESA Special Publication, v. 552), p. 9. Disponível em:
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2004ESASP.552..905W>. Acesso em: 23 jul. 2007.

37

WEIDENSPONTNER, G.; HARRIS, M. J.; STURNER, S.; TEEGARDEN, B. J.; FERGUSON, C. MGPOD: a Monte Carlo Suite for Modeling Instrumental Line and Continuum Backgrounds in Gamma-Ray Astronomy. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 156, p. 69–91, jan. 2005. Disponível em:
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2005ApJS..156...69W>. Acesso em: 1 nov. 2007.

32, 37

WOOD, K. S.; MEEKINS, J. F.; YENTIS, D. J.; SMATHERS, H. W.; MCNUTT, D. P.; BLEACH, R. D.; FRIEDMAN, H.; BYRAM, E. T.; CHUBB, T. A.; MEIDAV, M. The HEAO A-1 X-ray source catalog. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 56, p. 507–649, dez. 1984. Disponível em:
<http://adsabs.harvard.edu/abs/1984ApJS...56..507W>. Acesso em: 12 jun. 2007.

19

ZAND, J. in't; MELS, W.; HEISE, J. A soft x-ray imager for mirax. In: THE TRANSIENT MILKY WAY: A PERSPECTIVE FOR MIRAX, 840., 2005, São José dos Campos. **AIP proceedings...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 08–17. 19

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

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

Notas Técnico-Científicas (NTC)

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

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

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

Publicações Seriadas

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

Pré-publicações (PRE)

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

Manuais Técnicos (MAN)

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

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

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

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Programas de Computador (PDC)

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