

Astronomia de altas energias

João Braga (DAS/INPE/MCTI)

Desde as primeiras observações a bordo de balões estratosféricos na década de 1970, o Brasil, através do INPE, passou a construir seus próprios experimentos espaciais e atualmente desenvolve instrumentação para satélites científicos. Mais recentemente, a comunidade astronômica brasileira passou a se envolver mais diretamente em missões internacionais em satélite, provendo estações de recepção e recursos humanos especializados, além de participar em seus comitês científicos. A inserção do Brasil na área de astronomia espacial é extremamente estratégica para o país, dadas a importância crucial do caráter multiespectral da astrofísica moderna e as limitações observacionais impostas pela atmosfera terrestre. Neste Capítulo é feita revisão histórica do desenvolvimento da astronomia espacial no Brasil, mais especificamente na área de raios X e raios γ (gama).

Introdução

As primeiras atividades de pesquisa no Brasil que podem ser caracterizadas como de “astronomia espacial” ocorreram na década de 1970, com uma cooperação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em São José dos Campos, SP, com a França em experimentos destinados a captar raios X e **raios γ** (gama) de objetos cósmicos a bordo de balões estratosféricos. Esta colaboração propiciou aos pesquisadores e tecnólogos do INPE a obtenção de capacitação em instrumentação para astronomia de raios X e **raios γ** , uma área extremamente importante em **astrofísica** moderna iniciada na década de 1960 com experimentos embarcados em foguetes de sondagem dos EUA.

Desde então, o INPE passou a construir seus próprios experimentos em balões e atualmente desenvolve instrumentação para satélites científicos. Mais recentemente, a comunidade astronômica brasileira passou a se envolver mais diretamente em missões internacionais em satélite, provendo estações de recepção e recursos humanos especializados, além de participar em seus comitês científicos. Um exemplo paradigmático foi a participação brasileira na missão francesa CoRoT (*CO*nvection *RO*tation et *TR*ansits *pl*anétaires), para a qual o país contribuiu com uma estação terrena de recepção de dados na cidade de Alcântara, MA, adquirida e operada pelo INPE, e com o trabalho de engenheiros especialistas que desenvolveram *software* para diversos subsistemas da missão.

Outra iniciativa importante foi a participação do INPE no satélite americano HETE-2 (*H*igh *E*nergy *T*ransient *E*xplorer 2), a primeira missão inteiramente dedicada ao estudo dos enigmáticos *bursts*¹ de **raios γ** . Foi montada uma estação de recepção de dados do satélite na unidade do INPE em Natal, RN, que fez parte de uma rede de estações ao longo do equador da Terra, estabelecida para permitir a rápida disseminação das posições de ocorrências dos surtos no céu.

Numa época em que a astronomia mundial é cada vez mais dependente de observações em todos os comprimentos de onda possíveis, é fundamental que a astronomia brasileira passe a conceber e desenvolver projetos espaciais, sob pena de ficar fortemente defasada a médio e longo prazos. A astronomia feita a partir do solo (**astronomia terrestre**), nas faixas do **óptico** e de rádio (ver **radioastronomia**), ainda é extremamente relevante e vários projetos instrumentais de ponta estão sendo concebidos e construídos por diversos países, principalmente através de grandes colaborações internacionais (ver o Capítulo

¹ Surtos.

“Desenvolvimento de instrumentação” neste Volume). No entanto, em outras faixas importantes do **espectro** eletromagnético, é preciso observar o universo a partir do espaço ou de altitudes extremamente elevadas, já que a atmosfera do nosso planeta absorve essas radiações.

Nesse contexto, é crucial para o Brasil desenvolver capacitação e instrumentação próprias em outras áreas da astronomia, tais como raios X e **raios** γ , infravermelho distante e ultravioleta. Ademais, na própria faixa do visível é importante conduzir observações em plataformas colocadas no espaço para superar as limitações impostas pela turbulência e espalhamento atmosféricos. A Figura 1 mostra o quanto a radiação eletromagnética vinda do espaço é capaz de penetrar na atmosfera nas diversas faixas do **espectro** eletromagnético. Vê-se claramente na Figura que, em altitudes típicas de balões estratosféricos (25 a 50 km), ainda se pode observar o universo numa faixa do infravermelho de comprimentos de onda em torno de 1 mm e em raios X a partir de energias da ordem de 30 keV (keV: mil elétron-Volt). Na maior parte das faixas do ultravioleta e dos raios X, no entanto, somente instrumentos em satélite ou sondas espaciais podem detectar radiação eletromagnética de origem extraterrestre.

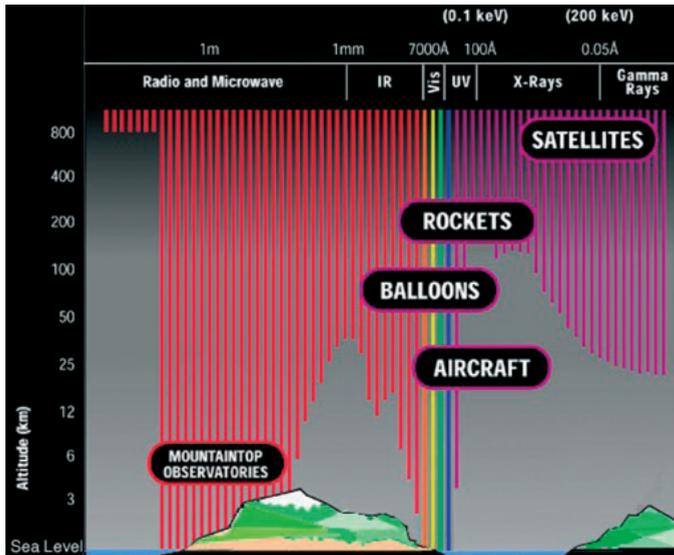


Figura 1. Diagrama da penetração da radiação eletromagnética na atmosfera da Terra. Acima da identificação (em inglês) das faixas do **espectro** eletromagnético mostra-se os comprimentos de onda típicos associados a elas ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$). Na primeira linha mostra-se as energias dos fótons, nas faixas de raios X e **raios** γ , em keV (Fonte: http://migall.fastmail.fm/astronomy/telescopes_detectors/emr/)

O principal projeto atual do Brasil na área de astronomia espacial é o projeto MIRAX (Monitor e Imageador de Raios X), em desenvolvimento no INPE. Trata-se de um conjunto de câmaras de raios X que farão um levantamento sem precedentes das fontes transientes² de raios X na nossa **Galáxia**. Os instrumentos serão montados numa plataforma de satélite com um sistema de controle de atitude³ de alta precisão e colocados em baixa órbita equatorial para uma missão de 4 anos. O estudo do universo na faixa de energia que o MIRAX irá operar tem sido relativamente pouco explorado, o que faz com que a missão tenha grande oportunidade de contribuir para o conhecimento a respeito de fenômenos físicos altamente energéticos e muitas vezes explosivos que ocorrem em diversos tipos de sistemas em **astrofísica**.

Objetos astrofísicos que emitem raios X e **raios γ** são de grande interesse, uma vez que a emissão de radiação eletromagnética nessas energias se dá através de processos físicos que só ocorrem em regiões singulares onde reinam condições físicas extremas. Nesses objetos, parâmetros físicos relevantes, tais como temperatura, campo gravitacional, densidade de matéria e campo magnético atingem valores elevadíssimos. Em particular, a maioria dessas regiões está associada à presença de **objetos colapsados**, tais como **estrelas de nêutrons** e **buracos negros**, e representam laboratórios impossíveis de se reproduzir na Terra.

A missão MIRAX será a primeira missão espacial do Brasil na área de astronomia; com ela, o país dará enorme passo na direção de desenvolver a área de astronomia espacial e entrar no seleto rol de nações que têm a capacidade de desenvolver instrumentos astrofísicos e colocá-los no espaço.

Neste Capítulo é feito levantamento histórico e análise da situação atual da astronomia de raios X e **raios γ** no Brasil.

Primeiros experimentos

Na década 1960, quando o INPE iniciou suas pesquisas e atividades, vários experimentos na área de pesquisas atmosféricas e geofísica espacial foram concebidos e lançados a bordo de foguetes de sondagem a partir da base de lançamentos da Barreira do Inferno, em Natal, RN, operada pelo Centro Técnico Aeroespacial (CTA, hoje DCTA: Departamento de Ciência e Tecnologia

² Transiente refere-se a fenômeno momentâneo, de curta duração.

³ Controle de atitude é um sistema eletromecânico que permite obter informações e atuar sobre a orientação espacial de uma estrutura colocada no espaço.

Aeroespacial, ligado ao Comando da Aeronáutica do Ministério da Defesa). Essas foram as primeiras atividades científicas do INPE que, com o intuito de organizar e institucionalizar as atividades científicas nessa área, criou um Departamento de Ciência Espacial.

A partir de 1967, o INPE recebeu alguns pesquisadores e técnicos franceses num programa relacionado ao serviço militar francês, que permitia que jovens cidadãos franceses trocassem o serviço militar na França por um período de intercâmbio técnico-científico no exterior. Foi nesse contexto que o pesquisador François Albernhe, da Universidade Paul Sabatier, de Toulouse, chegou ao INPE e trouxe informações a respeito de um programa de balões científicos que existia na França. Pesquisadores do INPE, incluindo Inácio M. Martin, sugeriram colocar um detector em um balão para medir a emissão de raios X produzida por elétrons aprisionados na Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS). Este fenômeno de diminuição da intensidade do campo magnético terrestre na região do Atlântico Sul (e sobre o território brasileiro) faz com que partículas carregadas aprisionadas pelo campo precipitem-se para regiões mais próximas da superfície, e uma medida da radiação X produzida pelo processo *bremstrahlung*⁴ por elétrons é importante para caracterizar a região.

Teve início então um programa no INPE de treinamento técnico e científico visando à implementação de uma linha de pesquisa em balões científicos para aplicações em geofísica espacial e **astrofísica de altas energias** (raios X duros⁵ e **raios γ**). Pesquisadores deram início ao desenvolvimento de instrumentação para experimentos científicos lançados a bordo de balões estratosféricos. Esses balões são fabricados com filmes extremamente finos (alguns μm de espessura) e são capazes de levar cargas úteis a altitudes que podem superar 40 km, já na camada atmosférica conhecida como estratosfera. A pressão atmosférica nessas altitudes é da ordem de 2% a 3% da pressão ao nível do mar. Para um experimento de astronomia de **altas energias** a bordo desses balões, a absorção atmosférica residual da radiação proveniente do espaço é significativamente diminuída, sendo praticamente desprezível nas faixas de raios X duros e **raios γ** de baixa energia. Na Figura 2 mostra-se uma operação de lançamento noturno de um balão estratosférico na cidade de Timon (MA).

⁴ *Bremstrahlung*, termo alemão, significa radiação de freamento e designa a produção de radiação eletromagnética pela deflexão da trajetória de uma carga elétrica pelo campo elétrico de outra, enquanto estas se agitam num gás aquecido.

⁵ Raios X duros (energias $> \sim 10 \text{ keV}$) são os mais energéticos, ao contrário dos raios X moles.



Figura 2. Operação de lançamento de um balão estratosférico utilizando a técnica de balão auxiliar (Fonte: Eduardo Piacsek). Esta técnica é utilizada para suavizar o início da ascensão da carga útil, que fica inicialmente sustentada pelo balão auxiliar, de pequeno porte. Ambos os balões são conectados à carga útil por cabos. Quando a inflagem⁶ do balão principal é completada, ele é solto e se movimenta na direção do balão auxiliar, empurrado pelo vento de superfície. Ao se aproximar do balão auxiliar, este por sua vez é solto, levando a carga útil. Desta forma o balão principal passa a carregar a carga útil de forma suave, sem súbitas acelerações. O último passo da operação é o rompimento do cabo do balão auxiliar por um comando via rádio.

No fim de década de 1960 e início da década seguinte, pesquisadores e tecnólogos do INPE realizaram pós-graduação e treinamento técnico na Universidade Paul Sabatier e no CNES (*Centre National d'Études Spatiales*), a agência espacial da França, em Toulouse. Técnicos do INPE obtiveram treinamento específico em técnicas de manuseio, inflagem e lançamento de balões estratosféricos e engenheiros foram treinados em sistemas de eletrônica embarcada e telemetria. A direção do INPE na época (1970) negociou com o CNES a compra de 10 balões estratosféricos de volume da ordem de 35 mil m³, e foram trazidos da França detectores de **raios γ** de NaI (iodeto de sódio), fotomultiplicadoras e cintiladores plásticos.

O primeiro lançamento de um balão científico em solo brasileiro ocorreu em 1972, no campo de futebol do INPE em São José dos Campos, com uma

⁶ Jargão do balonismo, significa o ato de encher o balão de gás.

carga útil montada no INPE com um experimento para medir raios X atmosféricos. As medidas mostraram aumento de ~20% no fluxo de raios X em relação a outras regiões, em virtude da precipitação de elétrons na AMAS, e houve a oportunidade também de medir uma perturbação solar durante o voo. O balão sobrevoou o atlântico sul e foi recuperado com sucesso próximo à cidade de Pretória, na África do Sul.

Na década de 1970, diversos experimentos franceses foram lançados do Brasil em cooperação com o INPE. Por volta de 1980, pesquisadores do INPE iniciaram cooperação técnica com a *National Atmospheric Balloon Facility* (NSBF), com sede na cidade de Palestine, TX. Através dessa cooperação, diversos experimentos de **astrofísica de raios γ** dos EUA, Inglaterra, França e Austrália foram lançados de diversas localidades no Brasil para observar alvos astrofísicos no hemisfério sul.

Esses desenvolvimentos resultaram na criação do Departamento de Astrofísica (DAS), no INPE, chefiado por Inácio Martin, em 1980. O DAS era constituído por 3 divisões: a Divisão de **Astrofísica de Alta Energia**, chefiada por Udaya Jayanthi, a Divisão de Balões e Cargas Úteis, comandada pelo engenheiro Renato Senador, e a Divisão de **Radioastronomia** e Física Solar, que funcionava na cidade de São Paulo sob a chefia de Pierre Kaufmann (ver o Capítulo “Radioastronomia” neste Volume). Os pesquisadores e estudantes de pós-graduação da Divisão de **Astrofísica de Alta Energia** desenvolveram instrumentos para observar raios X duros e **raios γ** de baixa energia (até alguns MeV) de objetos astrofísicos na região do centro galáctico, utilizando para isso detectores criogênicos (77 K) de Ge(Li) (germânio dopado com lítio), de alta **resolução** espectral, mas baixa sensibilidade devido ao pequeno volume (Braga, 1984; BuiVan *et al.*, 1987), e cintiladores de NaI de grande área (BuiVan *et al.*, 1984). Um resultado importante dessa época foi a detecção, pela primeira vez em raios X duros, do período de pulsação de uma **estrela de nêutrons** num sistema binário de raios X, no caso o **pulsar** (ver também **pulsar binário**) de raios X denominado GX 1+4 (Jayanthi *et al.* 1987).

Durante a década de 1980, alguns experimentos altamente competitivos foram trazidos ao Brasil e lançados em balões em cooperação científica e técnica com o INPE. Entre esses, vale destacar um experimento de **raios γ** do instituto alemão Max Planck que utilizava a técnica de imageamento por efeito Compton⁷. O experimento era na verdade um protótipo do experimento COMPTEL (*COMPton TELEscope*), um dos 4 experimentos do satélite CGRO (Observató-

⁷ No efeito Compton um fóton colide com uma carga livre, geralmente um elétron, ocorrendo transferência de quantidade de movimento e energia para este último.

rio de Raios Gama Compton — na sigla em inglês —, da NASA⁸, lançado em 1991; vide Braga, 1993 para uma descrição do CGRO).

Outro experimento importante foi um radiômetro da Universidade de Berkeley, EUA, que fez medidas da **Radiação Cósmica de Fundo** em micro-ondas (Lubin *et al.*, 1985). Este projeto foi o protótipo de um dos experimentos do satélite COBE (*Cosmic Background Explorer*), da NASA, que acabou por medir as minúsculas flutuações de temperatura no céu, que deram enorme respaldo à teoria do *Big Bang*. Grupos da Universidade de Princeton, nos EUA, do *Imperial College*, de Londres, e da Universidade da Tasmânia também lançaram experimentos astrofísicos a partir do Centro de Lançamento de Balões do INPE em Cachoeira Paulista, SP.

No fim de década de 1980, houve reestruturação na organização institucional do INPE, sendo criada a Coordenadoria-Geral de Ciências Atmosféricas (CEA). O Departamento de Astrofísica (DAS), mantendo a mesma sigla, passou a se chamar Divisão de Astrofísica que, nessa época, já contava com grupos atuando em outras áreas da **astrofísica**, tais como astronomia **óptica**, **radioastronomia**, **cosmologia** experimental e observacional, e física de **ondas gravitacionais** (ver o Capítulo “Ondas gravitacionais” neste Volume).

Colaboração com o Japão

Um programa importante do INPE na área de astronomia espacial foi uma cooperação científica e técnica com o Japão, envolvendo o ISAS (*Institute of Space and Astronautical Science*) e diversas universidades (Universidade de Tóquio, Universidade de Nagoya e outras). Durante aproximadamente uma década, iniciando-se em 1990, diversos grupos de cientistas japoneses lançaram diversas cargas úteis com experimentos de astronomia de raios X duros e **raios γ** . Estes experimentos, além do objetivo científico de observar objetos do hemisfério sul, testaram novas tecnologias de detectores e continham em alguns casos protótipos de instrumentos para a série de satélites ASTRO do Japão em astronomia de raios X. Pesquisadores do INPE participaram de vários desses experimentos e publicaram resultados importantes em cooperação com os grupos japoneses. Exemplos que merecem destaque foram a medida do **espectro** de raios X duros da radiogaláxia Centaurus A (Miyazaki *et al.*, 1996), a observação de raios X duros e **raios γ** pulsados do **pulsar** PSR1509-58 (Gunji *et al.*, 1994) e a obtenção de um limite superior para o fluxo da linha do Co^{57} da **supernova** 1987A (Gunji *et al.*, 1992).

⁸ NASA: *National Aeronautics and Space Administration*.

Além da colaboração científica altamente frutífera, houve também nessa cooperação com o Japão, intercâmbio técnico de grande valor para o Setor de Lançamento de Balões do INPE. Equipes japonesas de lançamento de balões estiveram no INPE durante vários anos promovendo intercâmbio com a equipe do INPE, que teve a oportunidade de se atualizar e desenvolver novas técnicas de lançamento e rastreamento dos balões, além de procedimentos de recuperação das cargas úteis lançadas. Houve inclusive a construção, coordenada e financiada pelos japoneses, de um novo hangar nas instalações do INPE em Cachoeira Paulista para abrigar experimentos e realizar testes em gôndolas de balões estratosféricos.

MASCO

No final da década de 1980, o grupo de **astrofísica de altas energias** do INPE decidiu iniciar projeto de um telescópio competitivo de raios X duros e **raios γ** de baixa energia (30 keV a 5 MeV) para ser lançado em balão estratosférico. O experimento, denominado MÁScara COdificada (MASCO) e coordenado por Thyrso Villela, utilizou a técnica de “máscara codificada” para produzir imagens do céu nessa faixa de energia. Essa técnica permite a produção de imagens através da codificação espacial do fluxo de radiação incidente, o que é feito através do uso da máscara, uma placa de material opaco à radiação perfurado com orifícios seguindo um padrão adequado (Braga, 1989; Braga, 1990 e referências aí citadas).

O diagrama da Figura 3 mostra o princípio básico desse tipo de imageamento, que foi e ainda é utilizado em muitos experimentos de balões e satélites em **astrofísica** acima de aproximadamente 15 keV. O método permite que se produzam imagens acima do limite prático do uso de lentes e espelhos, já que fótons com energias muito elevadas são muito penetrantes na matéria e não podem ser refletidos ou refratados facilmente.

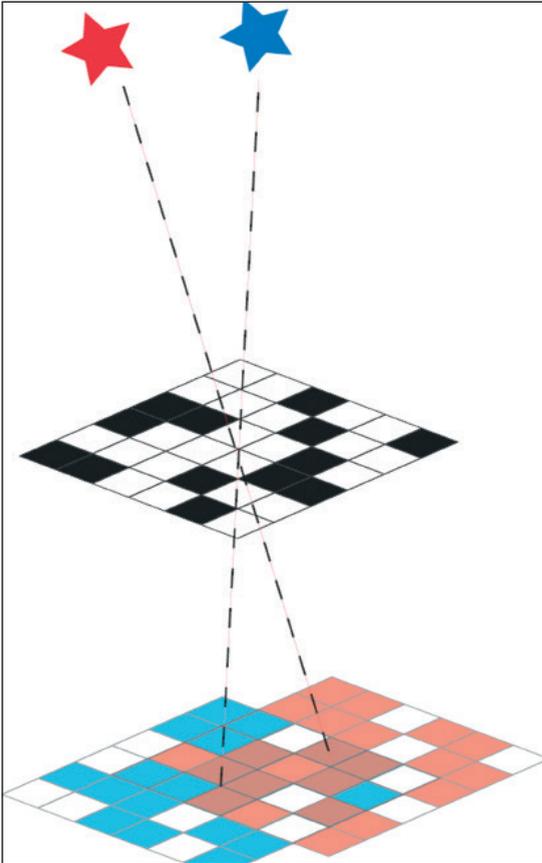


Figura 3. O princípio da “máscara codificada”. Fluxos que incidem em diferentes ângulos em uma máscara composta de elementos opacos e transparentes à radiação X ou γ , projetam diferentes diagramas de sombra em um detector sensível à posição. Métodos de deconvolução⁹ permitem obter a posição e intensidade de cada fonte, formando uma imagem do campo de visada observado. (Fonte: ru.wikipedia.org)

Um experimento precursor do MASCO foi o TIMAX (Telescópio Imageador de Raios X), que utilizou um plano detector formado por 35 cintiladores de NaI (cilindros de 3,8 cm de diâmetro e 2 mm de altura), dispostos num arranjo 7 x 5, e uma máscara codificada com elementos de chumbo formando um padrão URA (*Uniformly Redundant Array*) de dimensões 7 x 5 repetido ciclicamente (Braga *et al.*, 1991; Braga *et al.*, 1994 e 1995). Este tipo de padrão permite que a imagem reconstruída tenha relação sinal-ruído máxima e seja livre de artefatos¹⁰ (lobos secundários) (Fenimore and Cannon,

⁹ Convolução é a aplicação de um operador matemático sobre duas funções, que gera uma terceira. A deconvolução é um processo algorítmico muito usado no tratamento de sinais e de imagens, que inverte a convolução restituindo as funções iniciais.

¹⁰ Artefato aqui é tradução literal de *artifact* e significa resultado indesejado de uma interferência humana.

1978). O TIMAX utilizou técnica inovadora de uso de uma “antimáscara” para eliminar os efeitos de variações sistemáticas do nível de ruído de fundo no plano detector (Jayanthi and Braga, 1991), propiciando ganho significativo na relação sinal-ruído.

O experimento MASCO utilizou dois detectores de NaI de grande volume (41 cm de diâmetro e 5 cm de espessura), cada um acoplado a 19 fotomultiplicadoras, num arranjo conhecido como câmara de Anger. O grupo do INPE desenvolveu técnica de calcular a posição de incidência dos fótons de **raios** γ no detector a partir da análise do sinal de cada fotomultiplicadora (Braga *et al.*, 2002). Com uma máscara codificada com elementos de chumbo de 1,25 cm de lado e 2 cm de espessura, colocada a 3 m de distância do detector principal, o instrumento era capaz de obter imagens com resolução de 14' de arco num campo de visada de 23° de diâmetro. Um desenvolvimento inovador foi a descoberta de propriedades de simetria importantes e úteis do arranjo uniformemente redundante modificado (o MURA, *Modified Uniformly Redundant Array*), que permitiram a disponibilização de uma antimáscara através de uma simples rotação da máscara de 90° (Braga *et al.*, 2002). Isso evitou ter que incluir no experimento uma estrutura separada para a antimáscara, com os elementos fechados e abertos invertidos em relação à máscara, o que aumentaria significativamente o peso e a complexidade mecânica do instrumento, uma vez que teria que ser implementado um sistema eletromecânico que colocasse alternadamente a máscara e a antimáscara em frente aos detectores. A máscara codificada do MASCO foi montada em uma estrutura giratória, que girava a 1 rpm, e foi desenvolvido um algoritmo de reconstrução de imagens levando-se em consideração o giro da máscara (Mejía, 2002). A rotação constante da máscara tinha como objetivo, além da eliminação de variações espaciais sistemáticas de ruído de fundo no plano detector através das observações alternadas com máscara e antimáscara, a eliminação de ambiguidades na posição das fontes no campo de visada ocasionadas pela repetição cíclica (necessária para um imageamento sem artefatos) do padrão de aberturas na máscara codificada (Braga *et al.*, 2002). Uma imagem de laboratório de uma fonte radioativa de ^{241}Am (fótons de 60 keV) colocada a 30 m de distância da máscara, no centro do campo de visada, pode ser vista na Figura 4.

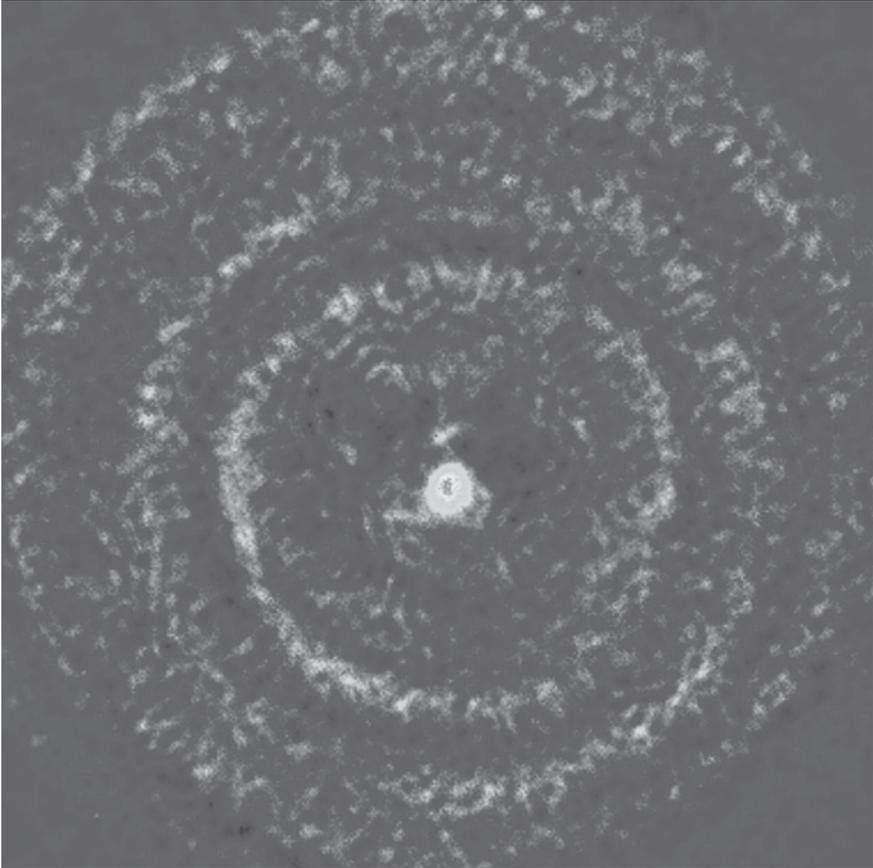


Figura 4. Imagem de uma fonte radioativa de ^{241}Am (fótons de 60 keV) colocada a 30 m de distância da máscara, no centro do campo de visada. Esta imagem simula uma observação de um objeto astrofísico pelo telescópio MASCO.

Um dos desenvolvimentos mais importantes do projeto MASCO foi a construção, pela primeira vez no país, de cintiladores plásticos de grande volume. Isso foi realizado pelo IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares) em cooperação com o INPE. Esses detectores funcionaram como blindagem ativa para os detectores principais de NaI do telescópio (D'Amico *et al.*, 1999). Na Figura 5 mostra-se o telescópio em testes no hangar do aeroporto de Nova Ponte, MG, antes do lançamento.



Figura 5. O telescópio MASCO montado em um eixo horizontal na gôndola de balão estratosférico; o movimento em torno desse eixo permite o apontamento do telescópio em diferentes **elevações**. Para o movimento em **azimute**, a gôndola inteira gira em torno de seu eixo vertical através de um sistema que, ao mesmo tempo em que a prende aos cabos que levam ao balão, permite que ela gire de forma independente com um mínimo de atrito. Este sistema é denominado desacoplador. A estrutura no alto à esquerda é a máscara codificada giratória, constituída de elementos de chumbo colados em uma placa de fibra de carbono. Tubos de alumínio conectam a máscara com os detectores na outra extremidade. A gôndola tinha 6 m de altura e uma seção de 2 m x 2 m na base. O peso total do experimento era de 2 t.

A gôndola (plataforma) de balão que abrigou o telescópio MASCO era estabilizada e possuía um sistema eletrônico de controle de atitude inédito no país (Villela *et al.*, 2000). Na verdade, o sistema desenvolvido teve várias características que o aproximam de um sistema de controle de atitude de satélites de 3 eixos, ainda não inteiramente desenvolvido no Brasil. O telescópio foi colocado numa configuração **altazimutal** controlada que permitia apontamentos contínuos para os objetos astrofísicos de interesse com uma precisão média de 6' de arco. Uma vez apontado para o alvo, o sistema entrava em modo inercial para acompanhamento com o auxílio de giroscópios eletrônicos. O instrumento empregava dois sensores estelares com detectores CCD (*Charge Coupled Device*) para reconhecimentos do campo estelar e guiagem, desenvolvidos

especialmente para este projeto (Mejía *et al.*, 2000), além de magnetômetros. Durante o período diurno, eram utilizados um sensor solar e um rastreador solar. Na Figura 6 vê-se o experimento pendurado num guindaste para testes do sistema de controle.



Figura 6. O telescópio MASCO em um guindaste para a realização de testes do sistema de controle e apontamento, no aeroporto da cidade de Nova Ponte, MG.

O MASCO foi lançado em 1º de abril de 2004 em Nova Ponte, às 2h4 (horário de Brasília), e voou por aproximadamente 11 horas a uma altitude média de 39,5 km. O lançamento, voo, separação da carga útil e descida de paraquedas ocorreram sem problemas e a carga útil foi recuperada praticamente intacta. Durante o voo, o sistema de controle de atitude funcionou bem e as operações de apontamento foram nominais. No entanto, o sistema de telemetria adquirido da empresa francesa ELTA apresentou problemas, posteriormente atribuídos a um cabo, que impediu um bom funcionamento a distâncias maiores do que ~150 km da estação, prejudicando significativamente a operação do sistema de controle devido às constantes perdas de comunicação. Ademais, um problema numa trilha condutora num circuito integrado do sistema de suprimento de energia para a eletrônica associada

ao sistema detector impediu a gravação dos dados provenientes do detector principal após 2 horas de voo, antes da chegada do telescópio à altitude de observações científicas. Considerando que este foi o primeiro voo do experimento, pode-se considerar o voo bem-sucedido, tendo retornado dados valiosos de engenharia a respeito do desempenho do detector e especialmente do sistema de controle de atitude. Infelizmente, os altos custos envolvidos e a perda de pessoal técnico especializado não permitiu que o experimento fosse lançado novamente em balão. É importante ressaltar que este projeto teve suporte financeiro significativo da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e do INPE.

HETE-2

O pequeno satélite HETE-2, concebido e operado pelo MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), e financiado e lançado pela NASA em 9 de outubro de 2000 por um foguete *Pegasus* (*Orbital Sciences Corporation*) foi o primeiro satélite inteiramente dedicado ao estudo dos enigmáticos surtos de raios γ (GRB: *Gamma Ray Bursts*), as maiores explosões que ocorrem no universo.

O principal objetivo da missão foi o de detectar e localizar no céu um grande número de GRBs, disseminando rapidamente as posições pela *internet* para que outros observatórios, em diversos comprimentos de onda, pudessem observar as regiões dos GRBs e estudar com o máximo de detalhes os chamados *afterglows* (ou brilhos posteriores), permitindo assim a identificação dos GRBs com objetos astrofísicos e um avanço do conhecimento sobre esses eventos. Na Figura 7 vemos o satélite sendo preparado para lançamento.



Figura 7. O satélite HETE-2 em preparação para lançamento por um foguete *Pegasus*. Este satélite contou com a colaboração científica do INPE e com uma estação de recepção em Natal, RN. As dimensões do satélite, excluindo os painéis solares, são de aproximadamente 2 m x 1 m x 1 m (Fonte: NASA)

O satélite abrigava 3 experimentos, sendo 2 de máscara codificada (SXC, *Soft X-ray Camera* e WXM, *Wide-field X-ray Monitor*, cobrindo a faixa de 0,5 a 25 keV) e um experimento de raios γ (FREGATE, *French Gamma-Ray Telescope*) que fazia a detecção inicial do GRB. Após a detecção inicial pelo FREGATE, a posição do GRB era calculada a bordo pelos outros dois instrumentos (se possível), e a informação era imediatamente enviada para a estação de solo mais próxima do satélite. Para isso, foi montada uma rede estações de VHF (*Very High Frequency*) ao longo de todo o equador terrestre (Figura 8) de forma que o satélite estivesse sempre ao alcance de pelo menos uma estação terrena. Uma dessas estações foi montada na unidade do INPE em Natal, RN, e foi estabelecida uma cooperação científica e técnica com o INPE, especialmente com o autor deste texto.

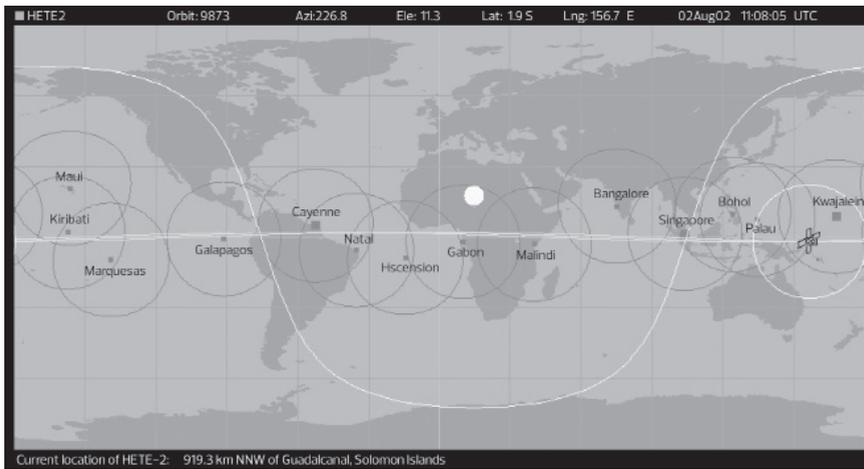


Figura 8. Rede de estações VHF do satélite HETE-2. Uma das estações foi montada no INPE, como parte de uma colaboração científica e técnica. A rede de estações permitia o envio em tempo quase real das posições de ocorrência no céu dos GRBs detectados pelo satélite.

A missão HETE-2 foi extremamente profícua em resultados. Exemplos dos mais significativos foram a confirmação de forma inequívoca da conexão entre GRB e **supernovas**, com a descoberta do evento GRB 030329 (Vanderspeck *et al.*, 2004), e a solução da origem e da natureza dos GRBs de curta duração (< 2 s) com a descoberta de GRB 050709, o primeiro GRB de curta duração para o qual um *afterglow* no **óptico** foi detectado (Villasenor *et al.*, 2005). Este resultado foi inclusive matéria de capa da revista *Nature* de 6 de outubro de 2005 (Figura 9).



Figura 9. Capa da revista *Nature* de 6 de outubro de 2005, dando destaque à descoberta, pelo satélite HETE-2, do GRB 050709, o primeiro GRB de curta duração para o qual um *afterglow* no *óptico* foi detectado.

MIRAX

O MIRAX (Monitor e Imageador de Raios X) é um projeto que surgiu em resposta a um anúncio de oportunidades interno no INPE em 1999. A ideia era proporcionar às divisões científicas do INPE a oportunidade de lançar experimentos no espaço (em satélites) uma vez que toda a infraestrutura disponível no INPE já permitia o desenvolvimento de plataformas de pequeno porte com um sistema de controle de atitude capaz de satisfazer aos requisitos típicos de missões científicas. Na DAS, o projeto selecionado foi o de uma missão de astronomia de raios X concebido e liderado pelo autor deste texto, com o objetivo de realizar um acompanhamento temporal e espectral (**espectro**) sem precedentes de fontes transientes de raios X na **Galáxia**.

Iniciado em 2000, o MIRAX possui importantes colaborações internacionais com a Universidade da Califórnia em San Diego (UCSD), o *Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics* (CfA), e o MIT, entre outras instituições. O principal objetivo científico da missão é estudar um grande número de fontes transientes e fenômenos variáveis em **estrelas de nêutrons** e **buracos negros** em sistemas binários de **acresção** com uma alta cadência temporal, além de investigar GRBs na faixa de raios X duros. O MIRAX será composto por um conjunto de câmaras imageadoras de raios X duros formado por telescópios de máscara codificada de alta **resolução** angular e amplo campo de visada operando na faixa de 5 a 200 keV. Esses instrumentos proverão **espectros** e séries temporais dos fluxos de um grande número de fontes transientes de raios X, o que será obtido através de estratégia de varredura de alta fração do céu a cada órbita. O satélite, na sua configuração atual (em revisão), deverá ter uma massa de cerca de 200 kg, proverá uma potência de 90 W para os instrumentos científicos e deverá ser lançado em uma órbita circular de baixa inclinação¹¹ (5°) e baixa altitude (~650 km) por volta de 2018. A Figura 10 mostra uma representação artística dos instrumentos do MIRAX a bordo de uma plataforma de satélite do INPE, a plataforma multimissão.

¹¹ A inclinação da órbita é em relação ao equador terrestre.

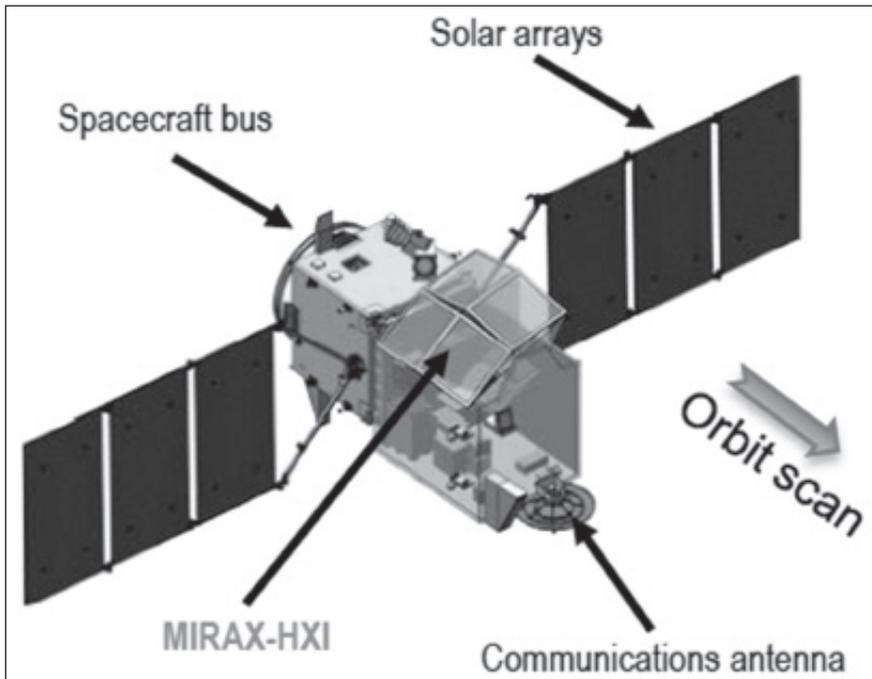


Figura 10. As 4 câmaras de raios X do MIRAX a bordo de uma plataforma multimissão do INPE. O eixo principal do instrumento é inclinado 25° em relação ao zênite na direção sul para maximizar a cobertura da região central do plano galáctico, onde a maior parte das fontes transientes de raios X se concentra.

O MIRAX irá realizar um levantamento sistemático em raios X duros (5-200 keV) do bojo e do plano galáctico para entender as distribuições e a natureza de **objetos colapsados** e descobrir novos transientes, além de fazer levantamento de **buracos negros** isolados obscurecidos e remanescentes de **supernovas** jovens nas nuvens moleculares gigantes no plano galáctico (Braga *et al.*, 2004; Braga, 2006).

A grande maioria dos fenômenos que ocorrem na faixa de energias abaixo de 10 keV são de natureza térmica, como a emissão do gás quente ($T \sim 10^7$ - 10^8 K) e difuso que permeia aglomerados de **galáxias**, ou de coroas estelares ($T \sim 10^5$ - 10^6 K), ou de um disco de **acresção** em torno de um **objeto colapsado** ($T \sim 10^6$ - 10^7 K). No entanto, espera-se que os objetos que emitem raios X com energias acima de 10 keV revelem uma série de fenômenos não térmicos. 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. O MIRAX será capaz de contribuir para o estudo de uma variedade de fenômenos e objetos em **astrofísica de altas energias**, especialmente nesse domínio não térmico, ainda relativamente inexplorado, das observações em raios X duros. Sua configuração possibilitará investigar no domínio temporal diversos tipos de fontes astrofísicas de **altas energias**, incluindo jatos de **buracos negros** com **acresção**, surtos oriundos de **estrelas de nêutrons**, emissão altamente variável de magnetares¹² e **núcleos ativos de galáxias**. Além disso, a missão MIRAX poderá realizar investigação conjunta pioneira de GRBs de curta duração em raios X duros e **ondas gravitacionais** que deverão ser observadas pelo detector *Advanced LIGO*¹³, já que este instrumento deve entrar em operação em 2015 (ver o Capítulo “Ondas gravitacionais” neste Volume). Uma detecção conjunta de um evento explosivo em raios X e um evento tipo surto em **ondas gravitacionais** dará enorme suporte à teoria de que os GRBs de curta duração são produzidos por coalescência de **objetos colapsados** (duas **estrelas de nêutrons** ou uma **estrela de nêutrons** e um **buraco negro**).

A geometria de varredura do céu do MIRAX, com direção de apontamento deslocada de 25° ao sul do zênite, foi escolhida principalmente para observar o bojo e o plano galáctico sul, mas também cobre uma grande porção do céu **extragaláctico**. A Figura 11 mostra a cobertura do céu que a missão irá propiciar e a respectiva sensibilidade em cada região.

¹² Magnetar é um tipo de **estrela de nêutrons** que se distingue por possuir um campo magnético extraordinariamente intenso.

¹³ LIGO: *Laser Interferometry Gravitational Wave Observatory*.

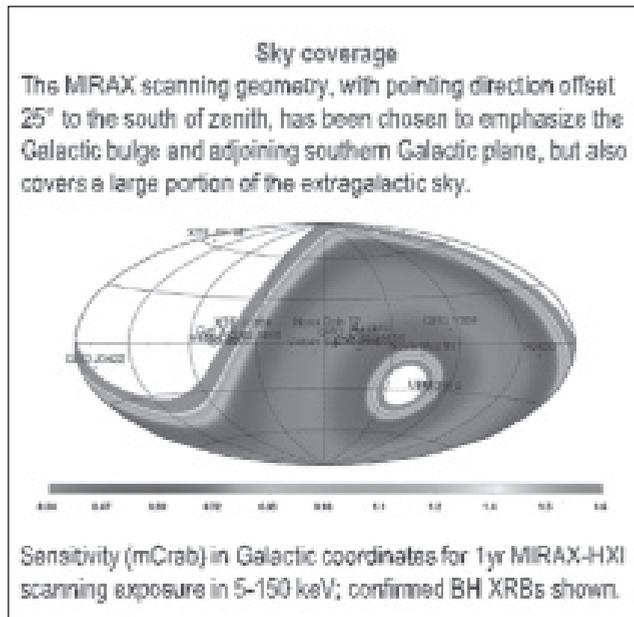


Figura 11. Cobertura do céu pelo MIRAX em coordenadas galácticas para um ano de observação entre 5 e 150 keV. A posição de **buracos negros** galácticos conhecidos é mostrada no mapa. A escala de cores fornece a sensibilidade do instrumento em unidades de *mCrab* (milésimo do fluxo da nebulosa do Caranguejo¹⁴, uma vela padrão em **astrofísica** de raios X duros).

Os detectores de raios X do MIRAX estão sendo desenvolvidos em uma parceria com o CfA e vão operar na faixa de energia de 5 a 200 keV (Rodrigues *et al.*, 2013). O conjunto instrumental será composto por quatro telescópios idênticos que empregam um plano detector (DM — *Detector Module*) composto por detectores de CdZnTe (conhecidos como CZT) de 256 cm² de área efetiva por telescópio, uma máscara de tungstênio de 48 x 48 cm², um sistema de blindagem passiva de Pb/Sn/Cu/Al e uma fonte radioativa para calibração em voo. Detectores de estado sólido CZT, constituídos de uma liga de CdTe (90%) e ZnTe (10%), possuem propriedades que favorecem altamente sua utilização em **astrofísica** de **altas energias**, como alta densidade (5,8 g/cm³) e alto número atômico médio (~50), que proporcionam alta eficiência fotoelétrica de detecção de fótons de raios X até centenas de keV, baixo custo, e boa **resolução** em energia à temperatura ambiente. Cada DM é formado por um arranjo 8 x

¹⁴ A nebulosa do Caranguejo é resto da **supernova** observada na constelação do Touro em 1054.

8 de cristais de CZT justapostos (de dimensões 19,5 mm x 19,5 mm x 5 mm) montados em uma placa com dispositivos eletrônicos que permite a leitura dos pulsos gerados pelas interações dos fótons nos detectores. Os detectores do MIRAX serão “pixelados”, ou seja, a informação de posição (x, y) da interação de cada fóton no material será conhecida com uma precisão de 600 μm através da leitura dos sinais de microeletrodos montados na placa.

O arranjo de múltiplos módulos detectores possibilita um campo de visada amplo e mínimo ruído de fundo cósmico em raios X, que é mais intenso em energias mais baixas (5-50 keV). A área da máscara codificada de cada telescópio corresponde a 9 vezes a área do plano detector, e foi determinada para cobrir um campo de visada de $25^\circ \times 25^\circ$ totalmente codificado pela máscara, de modo que o campo de visada do instrumento combinado (4 telescópios) é de $50^\circ \times 50^\circ$. O campo de visada de cada telescópio permite o posicionamento da máscara a 70 cm de distância focal do plano detector, propiciando uma **resolução** angular de $5,5'$. A fonte radioativa fornece fótons de 60 keV do ^{241}Am para monitorar o ganho de todos os detectores CZT continuamente ao longo da missão, e também durante os testes em solo dos 4 telescópios. A Figura 12 mostra um diagrama conceitual do conjunto de câmaras imageadoras do MIRAX.

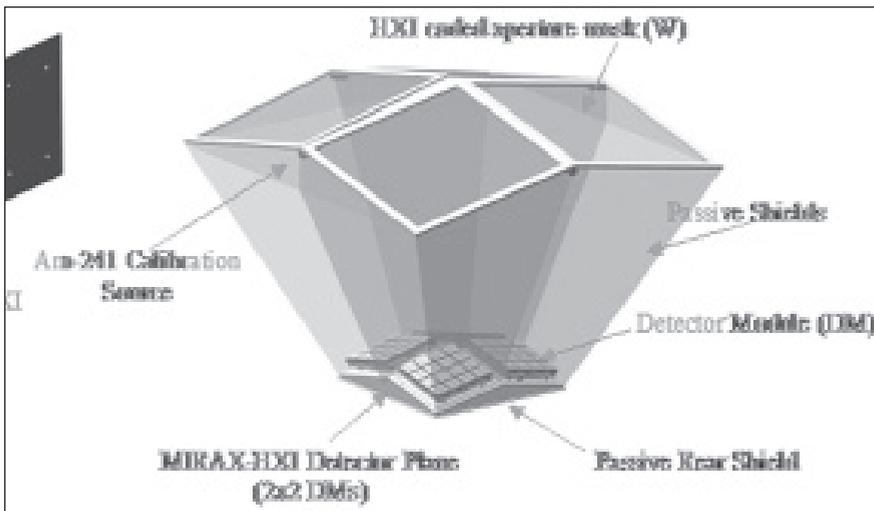


Figura 12. Visão conceitual do conjunto de câmaras de máscara codificada do MIRAX. O plano detector é formado pelos quatro DMs.

protoMIRAX

O protoMIRAX é um experimento científico que tem como objetivo principal testar e qualificar em voos de balão estratosférico vários subsistemas do MIRAX. O projeto irá testar, em ambiente quase-espacial, subsistemas tais como o computador de bordo e o sistema de aquisição e formatação de dados (incluindo *hardware* e *software*), o sistema de detecção de eventos (eletrônica associada aos detectores), e alguns aspectos dos sistemas de suprimento de energia e de telecomunicações. Um outro objetivo técnico é a obtenção de imagens de alvos astrofísicos para calibração e testes do sistema de imageamento por máscara codificada. Para esses testes, serão provavelmente observadas duas fontes intensas de raios X: a nebulosa do Caranguejo e seu **pulsar** e a fonte binária de raios X *Scorpius X-1*. Simulações detalhadas já realizadas mostram que o experimento terá boa sensibilidade na faixa de 30 a 200 keV e será capaz de obter imagens de fontes de raios X relativamente brilhantes.

O experimento é composto basicamente de uma câmara imageadora de raios X montada a bordo de uma gôndola de balão estratosférico. A câmara utilizará um arranjo de 196 detectores de CZT, cada um com uma área de 10 mm x 10 mm e espessura de 2 mm, numa configuração quadrada 13 x 13. Esses detectores são do mesmo material dos detectores do MIRAX e representam o estado-da-arte em detectores de raios X duros pela alta eficiência fotoelétrica até centenas de keV e boa **resolução** espectral à temperatura ambiente, como já foi mencionado acima. Em razão de restrições físicas de montagem da eletrônica associada a cada detector, haverá uma separação de 10 mm entre detectores adjacentes, de forma que o plano detector terá 625 cm² de área total e 196 cm² de área sensível. A faixa de energia de operações será de 30 a 200 keV. O limite inferior é imposto pela absorção atmosférica residual em altitudes de balão (~42 km) e o limite superior é determinado pela eficiência fotoelétrica de detectores CZT com essa espessura.

À frente do plano de detectores, será montado um colimador formado por paredes de 7 cm de altura e células de 20 mm de distância entre centros, de forma que cada detector ficará no fundo de uma célula do colimador. As paredes terão núcleo de chumbo (0,5 mm), ladeados por placas de cobre (0,3 mm), proporcionando uma absorção gradual de raios X (a fluorescência do chumbo é absorvida pelo cobre e a fluorescência do cobre cai abaixo da faixa de energia dos detectores).

O conjunto de detectores e a eletrônica associada serão colocados dentro de um recipiente pressurizado, que por sua vez será circundado (nas laterais e na parte inferior) por uma blindagem passiva para absorver raios X que

sejam provenientes de direções externas ao campo de visada determinado pelos colimadores. A 65 cm de distância do plano detector será montada uma máscara codificada construída a partir de um padrão MURA 13 x 13, repetido 4 vezes, com elementos de chumbo de 1 mm de espessura e dimensões de 2 mm x 2 mm.

Com essa configuração, a câmara de raios X terá um campo de visada total de $20^\circ \times 20^\circ$, definido pelo colimador e totalmente codificado pela máscara, e uma **resolução** angular de $1^\circ 43'$. A parte do campo de visada que terá sensibilidade máxima será de $4^\circ \times 4^\circ$.

A gôndola de balão estratosférico do protoMIRAX incluirá, além da câmara de raios X, vários outros subsistemas. A câmara será montada num sistema **altazimutal**, permitindo o apontamento e acompanhamento de alvos astrofísicos. O ângulo de **elevação** será conhecido através de um codificador de posição e o **azimute** será dado pela orientação da gôndola no espaço, determinada a partir de magnetômetros. Uma roda de reação e um sistema desacoplador entre a gôndola e a estrutura de cabos que a prende ao balão permite a movimentação em **azimute**, de forma semelhante ao sistema do telescópio MASCO. Um sensor estelar desenvolvido no INPE identificará padrões de estrelas no céu de modo a fornecer a orientação do telescópio de forma independente e mais precisa. A gôndola terá ainda três *racks* eletrônicos independentes, um para o sistema de aquisição de dados, outro para o sistema de controle de voo e o último para o sistema de telemetria e telecomando. A gôndola está sendo desenvolvida em parceria com a empresa COMPSIS, de São José dos Campos, SP, que está desenvolvendo o sistema de controle de atitude com forte herança do sistema utilizado no projeto MASCO. Na Figura 13 é mostrado o projeto mecânico do experimento.

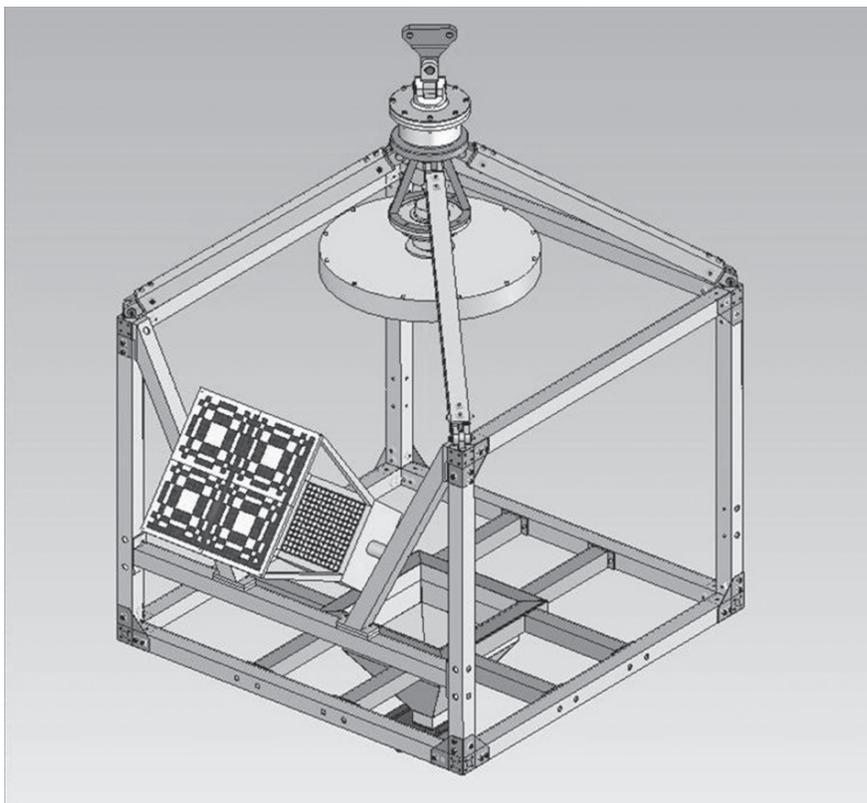


Figura 13. Projeto mecânico simplificado (para melhor visualização) da gôndola de balão estratosférico do projeto protoMIRAX, mostrando apenas o subsistema da câmara de raios X e a roda de reação.

O protoMIRAX deverá ser lançado em voos de balões estratosféricos em 2015 e 2016.

Considerações finais

A ciência brasileira, do ponto de vista de produtividade e relevância internacional, cresceu de forma significativa ao longo das últimas décadas. No caso da astronomia, houve acentuado aumento do número de trabalhos publicados e maior inserção de pesquisadores brasileiros em projetos internacionais. No entanto, é importante que o país faça investimentos em instrumentação científica e desenvolva projetos espaciais, uma vez que a astronomia feita a partir do solo será sempre limitada pela absorção e turbulência atmosféricas.

Para que o Brasil seja cada vez mais um *player* importante no cenário internacional, é necessário que a astronomia nacional ganhe profundidade com o desenvolvimento de instrumentos para observação em todos os comprimentos de onda e com a concepção e execução de missões espaciais. A astronomia é cada vez mais uma ciência que depende de combinação de mensageiros cósmicos de diversos tipos para caracterizar sistemas e objetos astrofísicos, e não mais de observações em um único canal ou faixa espectral. A **astrofísica** de partículas (astropartículas), de **neutrinos** e de **ondas gravitacionais** já são uma realidade. No domínio eletromagnético, a caracterização de objetos através de observações em diversas faixas espectrais tem importância crescente, e muitas dessas observações só podem ser realizadas em plataformas espaciais.

Referências

Braga, João (1984), “Medidas de Linhas Nucleares com um Telescópio Ge(Li) Duplo a Bordo de Balão Estratosférico”, *Tese de Mestrado em Astrofísica*, INPE.

Braga, João (1989), “Formação de Imagens em Astrofísica de Altas Energias”, *Boletim da Sociedade Astronômica Brasileira*, 11, 2, 45-58.

Braga, João (1990), “Técnicas de Imageamento em Raios X Duros com Máscaras Codificadas”, *Tese de Doutorado em Astronomia*, IAG/USP.

Braga, João (1993), “O Observatório Compton”, *Boletim da Sociedade Astronômica Brasileira*, 13, 1, 49-61.

Braga, João (2002), “Bursts de Raios Gama”, *Boletim da Sociedade Astronômica Brasileira*, 22, 2, 9-15.

Braga, João (2006), MIRAX Mission Overview and Status, *AIP Conference Proceedings*, 840, 3-7.

Braga, João; D’Amico, F. and Villela, T. (1994), Development of the hard X-ray imaging experiment TIMAX: Laboratory images and first balloon flight, *Experimental Astronomy*, 5, 269-278.

Braga, João; D’Amico, F. and Villela, T. (1995), Development of the balloon-borne hard X-ray imaging experiment TIMAX, *Advances in Space Research*, 15, 5, 157-160.

Braga, João; D’Amico, F.; Villela, T.; Mejía Cabeza, J.; Fonseca, R. A. and Rinke, E. (2002), Development of the Imaging System of the Balloon-Borne Gamma-Ray Telescope MASCO, *Review of Scientific Instruments*, 73, 10, 3619-3628.

Braga, João; Rothschild, R.; Heise, J.; Staubert, R.; Remillard, R.; D'Amico, F.; Jablonski, F.; Heindl, W.; Matteson, J.; Kuulkers, E.; Wilms, J. and Kendziorra, E. (2004), MIRAX: A Brazilian X-ray Astronomy Satellite Mission, *Advances in Space Research*, 34, 2657-2661.

Braga, João; Villela, T.; Jayanthi, U. B.; D'Amico, F. and Neri, J. A. (1991), A new mask-antimask coded-aperture telescope for hard X-ray astronomy, *Experimental Astronomy*, 2, 2, 101-113.

BuiVan, N.; Braga, J. and Jardim, J. O. D. (1987), Gamma-ray background induced in a double Ge(Li) spectrometer at balloon altitudes in the Southern Hemisphere, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A*, 258, 132-140.

BuiVan, A.; Martin, I. M.; Blanco, F. G. and Braga, J. (1984), Pulsar: A Balloon Borne Experiment to Detect Variable Low Energy Gamma-Ray Emissions, *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 9, 85-89.

D'Amico, F.; Hamada, M.; Mesquita, C.; Maurovieira, J.; Costajr, N; Villela, T. and Braga, J. (1999), Development of large volume organic scintillators for use in the MASCO telescope, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A*, 422, 139-143.

Fenimore, E. E. and Cannon, T. M. (1978), Coded aperture imaging with uniformly redundant arrays, *Applied Optics*, 17, 337-347.

Gunji, S.; Hirayama, M.; Kamae, T.; Miyazaki, S.; Sekimoto, Y.; Takahashi, T.; Tamura, T.; Tanaka, M.; Yamasaki, N.; Yamagami, T.; Nomachi, M.; Murakami, H.; Braga, J. and Neri, J. A. (1994), Observation of pulsed hard X-rays/gamma-rays from PSR 1509-58, *The Astrophysical Journal*, 428, 284-292.

Gunji, S.; Kamae, T.; Miyazaki, S.; Sekimoto, Y.; Takahashi, T.; Tamura, T.; Tanaka, M.; Yamaoka, N.; Yamagami, T.; Nomachi, M.; Murakami, H.; Braga, J. and Neri, J. A. (1992), A limit on the Co-57 gamma-ray flux from SN 1987A, *The Astrophysical Journal (Letters)*, 397, L83-L86.

Jayanthi, U. B. and Braga, J. (1991), Physical implementation of an antimask in URA-based coded mask systems, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A*, 310, 685-689.

Jayanthi, U. B.; Jablonski, F. J. and Braga, J. (1987), Low-Energy Gamma Rays from Pulsar GX 1+4: Balloon Results, *Astrophysics and Space Science*, 138, 183-189.

Lubin, P.; Villela, T.; Epstein, G. and Smoot, G. (1985), A map of the cosmic background radiation at 3 millimeters, *The Astrophysical Journal (Letters)*, 298, L1-L4.

Mejía, J. (2002), “Astrofísica de Altas Energias: Desenvolvimento do Telescópio MASCO e Observações de GRO J1744-28 com o Telescópio SIGMA”, *Tese de Doutorado em Astrofísica*, INPE.

Mejía, J.; Villela, T. and Braga, J. (2000), The CCD stellar sensor of the MASCO telescope pointing system, *Advances in Space Research*, 26, 9, 1407-1410.

Miyazaki, S.; Takahashi, T.; Gunji, S.; Hirayama, M.; Sekimoto, T. K. Y.; Tamura, T.; Tanaka, M.; Yamasaki, N. Y.; Kano, H. I. T.; Yamagami, T.; Nomachi, M.; Murakami, H.; Braga, J. and Neri, J. A. C. (1996), X-Ray/Soft Gamma-Ray Observations of Centaurus A and its Implication on the Emission Mechanism, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 48, 801-811.

Rodrigues, B. H. G.; Grindlay, J. E.; Allen, B.; Hong, J.; Barthelmy, S.; Braga, J.; D'Amico, F. and Rothschild, R. E. (2013), The high resolution X-ray imaging detector planes for the MIRAX mission, *Journal of Instrumentation*, 8, P09010-P09010.

Vanderspek, R.; Sakamoto, T.; Barraud, C.; Tamagawa, T.; Graziani, C.; Suzuki, M.; Shirasaki, Y.; Prigozhin, G.; Villaseñor, J.; Jernigan, J. G.; Crew, G. B.; Atteia, J.-L.; Hurley, K.; Kawai, N.; Lamb, D. Q.; Ricker, G. R.; Woosley, S. E.; Butler, N.; Doty, J. P.; Dullighan, A.; Donaghy, T. Q.; Fenimore, E. E.; Galassi, M.; Matsuoka, M.; Takagishi, K.; Torii, K.; Yoshida, A.; Boer, M.; Dezalay, J.-P.; Olive, J.-F.; Braga, J.; Manchanda, R. and Pizzichini, G. (2004), Observations of the Gamma-Ray Burst GRB 030329: Evidence for an Underlying Soft X-Ray Component, *The Astrophysical Journal*, 617, 1251-1257.

Villaseñor, J. N.; Lamb, D. Q.; Ricker, G. R.; Atteia, J.-L.; Kawai, N.; Butler, N.; Nakagawa, Y.; Jernigan, J. G.; Boer, M.; Crew, G. B.; Donaghy, T. Q.; Doty, J.; Fenimore, E. E.; Galassi, M.; Graziani, C.; Hurley, K.; Levine, A.; Martel, F.; Matsuoka, M.; Olive, J.-F.; Prigozhin, G.; Sakamoto, T.; Shirasaki, Y.; Suzuki, M.; Tamagawa, T.; Vanderspek, R.; Woosley, S. E.; Yoshida, A.; Braga, J.; Manchanda, R.; Pizzichini, G.; Takagishi, K. and Yamauchi, M. (2005), Discovery of the short gamma-ray burst GRB 050709, *Nature*, 437, 855-858.

Villela, T.; Fonseca, R.; Souza, P.; Alves, A. M. R.; Mejía, J.; Correa, R. V. and Braga, J. (2000), Development of an attitude control system for a balloon-borne gamma ray telescope, *Advances in Space Research*, 26, 9, 1415-1418.