



PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS

AUTORES / AUTHORS: RAIOS GAMA;
IMAGENS;
MÁSCARA CODIFICADA

AUTORIZADA POR / AUTHORIZED BY

Volker W. J. H. Kichhoff
Diretor Ciên. Esp. Atmos.

AUTOR RESPONSÁVEL / RESPONSIBLE AUTHOR

João Braga

DISTRIBUIÇÃO / DISTRIBUTION

INTERNA / INTERNAL
 EXTERNA / EXTERNAL
 RESTRITA / RESTRICTED

REVISADA POR / REVISED BY

Osmar Pinto Júnior
Editor Ciên. Esp. Atmos.

CDU/UDC

523.03

DATA / DATE

Fevereiro 1990

TÍTULO/TITLE	PUBLICAÇÃO Nº / PUBLICATION NO INPE-5028-PRE/1567
	FORMAÇÃO DE IMAGENS EM ASTROFÍSICA DE ALTA ENERGIA
AUTORES/AUTHORSHIP	João Braga

ORIGEM / ORIGIN

DAS

PROJETO / PROJECT

ASTRO

Nº DE PAG. / NO OF PAGES

16

ÚLTIMA PAG. / LAST PAGE

13

VERSÃO / VERSION

Nº DE MAPAS / NO OF MAPS

RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

Neste trabalho são apresentadas, de maneira simplificada e introdutória, as idéias básicas do método de reconstrução de imagens pelo método de abertura codificada. Este método vem sendo aplicado em astronomia de raios-X duros e raios- γ nos últimos anos e constitui-se numa poderosa ferramenta para obtenção de imagens do céu em energias acima do limite de focalização de fótons. São discutidos resultados de simulações feitas pelo autor e são mostradas imagens obtidas por experimentos que utilizam máscaras codificadas.

OBSERVAÇÕES / REMARKS

Boletim da SAB, 11(2), 45-58, 1989.

RESUMO

Neste trabalho são apresentadas, de maneira simplificada e introdutória, as idéias básicas do método de reconstrução de imagens pelo método de abertura codificada. Este método vem sendo aplicado em astronomia de raios-X duros e raios- γ nos últimos anos e constitui-se numa poderosa ferramenta para obtenção de imagens do céu em energias acima do limite de focalização de fótons. São discutidos resultados de simulações feitas pelo autor e são mostradas imagens obtidas por experimentos que utilizam máscaras codificadas.

ABSTRACT

This paper is an introduction to coded-aperture imaging in hard x-rays and γ -rays. Coded-aperture techniques developed over the last few years have become a powerful tool in obtaining images of the sky at energies beyond the practical limit of focusing optics. We discuss results of simulations carried out by the author and we also show images of different regions of the sky obtained by coded-aperture x- and γ -ray telescopes.

Introdução

Praticamente toda a informação que se obteve até hoje sobre a natureza do Universo além das fronteiras do nosso Sistema Solar foi obtida através da detecção de ondas eletromagnéticas provenientes do espaço. Observações em diferentes faixas do espectro eletromagnético, desde ondas de rádio até raios gama, utilizando-se desde o olho humano até os mais sofisticados instrumentos, possibilitaram a construção de modelos para os mais variados e exóticos tipos de objetos que existem no Universo.

Um dos mais importantes meios de se obter informações sobre as regiões de onde está sendo emitida a radiação eletromagnética é a capacidade de se obter imagens. O mais primitivo dos instrumentos imageadores é o próprio olho, através do qual podemos ter uma idéia da distribuição angular das estrelas mais brilhantes no céu. Para se obter melhores imagens, no entanto, é preciso coletar mais fótons e armazenar a informação de alguma forma. No caso da faixa de luz visível, faz-se uso de grandes espelhos, de forma que uma grande quantidade de luz é captada e desviada para o foco de espelho, onde os fótons são captados por uma placa fotográfica, uma câmara CCD ou qualquer outro detector capaz de registrar a posição dos fótons que incidem sobre ele. Fontes de luz em diferentes posições no espaço impressionam diferentes posições no detector, de modo que o que se obtém no final é uma imagem da região de céu para a qual o telescópio estava apontado.

A focalização é, de uma maneira geral, a técnica empregada para se obter imagens do céu em uma grande faixa de comprimentos de onda do espectro eletromagnético. No entanto, à medida em que o comprimento de onda da luz torna-se pequeno, o poder de penetração dos fótons torna-se maior, e a reflexão dos mesmos por superfícies metálicas torna-se progressivamente mais difícil. Na faixa de raios-X moles ainda é possível refletir fótons incidentes em ângulos extremamente pequenos. A técnica de reflexão rasante foi empregada, por exemplo, no Observatório Einstein (o segundo da série dos "High-Energy Astronomical Observatories"). Este observatório detectou mais de mil fontes de raios-X entre novembro de 1978 e abril de 1981, e revolucionou a astronomia de raios-X. Os dados obtidos continuam sendo analisados até hoje.

Para comprimentos de onda menores do que aproximadamente 1.3×10^{-8} cm, correspondendo a energias acima de 10 mil elétron-Volts (keV), a focalização de fótons torna-se impraticável. Portanto, técnicas convencionais de imageamento não são aplicáveis em astronomia de raios-X duros e raios- γ . Imageamento nestas energias é de fundamental importância para uma melhor compreensão dos processos físicos que ocorrem em objetos como Núcleos Ativos de Galáxias, fontes binárias de raios-X com candidatos a buracos-negros e aglomerados de galáxias.

O Método de Abertura Codificada

Uma das técnicas de imageamento em altas energias que vem apresentando progressiva popularidade ao longo dos últimos anos utiliza o conceito de "abertura codificada". A idéia central do método pode ser visualizada imaginando-se uma placa de chumbo com um pequeno orifício no centro, colocada em frente a um detector de raios- γ plano e sensível à posição. Raios- γ vindos de diferentes direções irão incidir sobre diferentes regiões do detector. Portanto, estudando-se a distribuição espacial de eventos no detector, pode-se inferir a distribuição angular do fótons incidentes e obter-se uma imagem. A resolução angular obtida por um instrumento deste tipo é dada pela razão entre o diâmetro do orifício e a distância entre o orifício e o plano detector. Logo, quanto menor for o diâmetro da abertura, melhor será a resolução angular. Ocorre, no entanto, que quanto menor for o orifício, menor também será a área coletora de fótons e, conseqüentemente, a sensibilidade do telescópio.

A conceito de "abertura codificada" surgiu com o objetivo de se obter maior área coletora e preservar a resolução angular do caso anterior. A idéia de se empregar um padrão de elementos opacos e transparentes para imagear raios- γ foi inicialmente proposta por Dicke (1968). Ele percebeu que, se ao invés de apenas um orifício, utilizarmos um padrão de orifícios em uma placa (uma "máscara") (veja Fig. 1), a posição da "sombra" desta placa projetada no detector dependerá da direção de incidência dos raios- γ . Este método claramente preserva a resolução angular obtida no caso de apenas um orifício enquanto que aumenta a área coletora de um fator N , onde

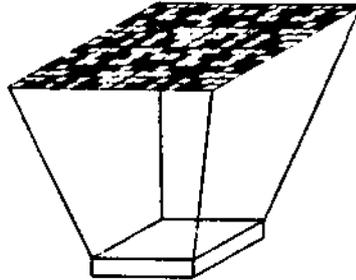


Fig. 1 - A "máscara codificada"

N é o número de orifícios da máscara. Se houver apenas uma fonte de raios- γ no campo de visada do telescópio, a posição angular da mesma é obtida simplesmente através da medida do desvio da sombra da máscara no detector em relação à posição central, que corresponde a fótons incidindo na direção perpendicular ao plano da máscara. Na presença de diversas fontes de diferentes intensidades e posições, a distribuição de fótons no detector corresponde a um padrão de sombras superpostas que não guarda praticamente nenhuma semelhança com o padrão de orifícios da máscara; no entanto, esta codificação do detector contém toda a informação necessária para que se obtenha a imagem original. No caso geral, portanto, para que sejam recuperadas a direção e a intensidade de cada fonte, faz-se necessária a utilização de métodos de reconstrução adequados.

Reconstrução de Imagens

Uma das maneiras mais simples de reconstruir imagens obtidas através de máscaras codificadas é através do uso de correlação direta. Neste método representa-se a máscara por uma matriz M na qual as aberturas são substituídas pelo

número 1 e os elementos opacos, por 0. A distribuição de fótons na superfície do detector é representada por uma matriz F na qual cada elemento representa o número de fótons que interagiram em uma subdivisão (pixel) da área do detector de dimensões iguais às dimensões da célula básica da máscara. A máscara deve ser construída de tal forma que o padrão básico de orifícios seja repetido ciclicamente quantas vezes sejam necessárias para cobrir inteiramente o campo de visada.

No caso de haver apenas uma fonte pontual no centro do campo de visada, ao multiplicarmos cada elemento de M pelo seu correspondente em F , e somarmos os resultados, obteremos o número de fótons provenientes da direção perpendicular ao eixo do telescópio (os fótons que não passaram pela máscara foram multiplicados por 0 e portanto não foram contados). O mesmo acontecerá se a fonte for desviada de um ângulo $\theta=d/D$, onde d é a dimensão da célula básica da máscara e D a distância máscara-detector, e o cálculo for feito com a matriz M permutada de uma linha na mesma direção para onde a fonte foi desviada. Matematicamente, isto significa que a imagem da fonte (I) é obtida pela função de correlação-cruzada entre o padrão da máscara e a distribuição de fótons detectados, ou seja:

$$I(i,j) = F * M = \sum_l \sum_k F(l,k) M(k+i,l+j)$$

onde $*$ é o operador correlação. No caso geral, portanto, o pixel (i,j) da imagem conterá a contribuição total da região do céu correspondente, adicionada à pequenas contribuições das outras fontes presentes no campo de visada (os lobos secundários). Estas lobos secundários constituem o chamado "ruído intrínseco" da imagem. Se as fontes forem intensas, no entanto, estas pequenas contribuições de outras regiões do céu são em geral desprezíveis.

Um fator importante para que o método seja eficiente é 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 localizadas em diferentes regiões do céu produzirão sombras idênticas no detector e, conseqüentemente, imagens indistinguíveis. Um padrão regular, como um tabuleiro de xadrez, é claramente não desejável, enquanto que, se se utilizarmos um padrão inteiramente aleatório, o coeficiente de correlação será grande quando houver uma

grande semelhança entre o padrão de sombras no detector e o padrão de aberturas da máscara, caracterizando uma fonte intensa, mas será pequeno e se confundirá com o ruído intrínseco se a fonte for fraca.

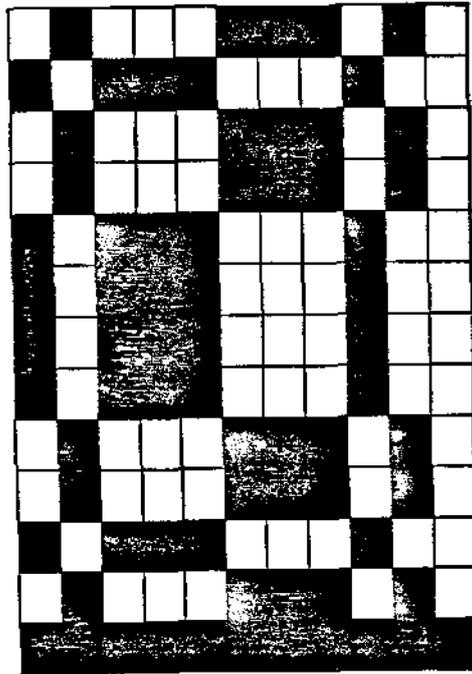


Fig. 2 - Arranjo Uniformemente Redundante (13 x11)

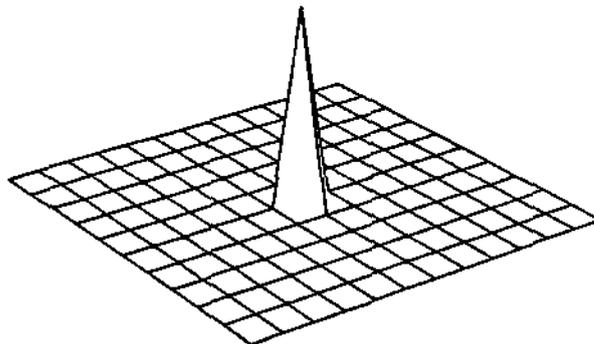


Fig. 3 - Autocorrelação de um AUR

No caso de uma observação astronômica real, existem diversos fatores que complicam a análise simples descrita acima. Observações na faixa de raios-X duros e raios- γ são em geral dominadas por intensos ruídos de fundo; consequentemente, o padrão de sombras da máscara é quase sempre imperceptível na distribuição de fótons na superfície do detector. Além disso, as flutuações estatísticas inerentes ao processo de contagem de fótons em cada pixel afetam significativamente a qualidade das imagens. Outro fator de extrema importância é a resolução espacial do detector utilizado e como esta varia em função da energia dos fótons. Um dos critérios básicos de escolha do tamanho da célula básica de um padrão para um determinado experimento é que este seja da ordem da resolução espacial do detector.

Estas considerações mostram que o padrão mais desejável é aquele que seja não-permutável, produza uma imagem com um máximo de contraste e tenha um mínimo de ruído intrínseco. Além disso, o número de aberturas deverá ser o maior possível, de forma a maximizar a área total de coleta de fótons. Uma classe de padrões com estas características é constituída pelos "Arranjos Uniformemente Redundantes" (AUR) (veja Ref. 2). Estes arranjos têm a propriedade de que o número de vezes em que uma determinada separação entre um par de orifícios ocorre é uma constante, independente de qual distância se considere; ou seja, as separações são uniformemente redundantes. As dimensões dos AUR retangulares (existem também AUR hexagonais) são dadas por r e s , onde r e s são números primos e $r-s=2$. Na Figura 2 mostra-se um AUR de dimensões 13×11 .

Os AUR possuem um número total de orifícios $N = (rs+1)/2$, portanto aproximadamente metade da área é aberta. O ruído intrínseco é exatamente igual a zero, ou seja, os lobos secundários de uma determinada fonte são inteiramente planos. A imagem de uma fonte pontual, portanto, é formada por um pico no pixel correspondente ao ângulo de incidência dos fótons superposto a um patamar constante. Matematicamente, isto significa que a função de auto-correlação (correlação de uma função com ela mesma) de um AUR é uma função delta a menos de um nível de removível. Quando várias fontes estão presentes, estes níveis constantes simplesmente se somam, sem no entanto produzir nenhuma irregularidade adicional na imagem. Uma maneira conveniente de tratar o problema é definir uma matriz G idêntica à matriz M , apenas com os zeros substituídos por -1 . Neste caso, $M * G$ é exatamente uma função

delta (nível dc igual a zero) e a imagem reconstruída por $F * G$ possui um ruído de fundo plano e exatamente igual a zero. Na Figura 3 representamos a função $M * G$ baseada em um AUR de dimensões 13 x 11.

Simulações

Para ilustrar o que foi descrito na seção anterior, fizemos cálculos por computador nos quais simulamos fótons passando por uma máscara codificada com um padrão AUR de dimensões 13 x 11, e interagindo em um detector de resolução espacial igual a 6 mm FWHM ("Full Width at Half Maximum") a 100 keV (a resolução espacial varia em função da energia). A célula básica da máscara é um quadrado de 13 mm de lado, e a distância máscara-detector é de 2 metros. Estes parâmetros são típicos de um telescópio de raios-X duros projetado para ser lançado em balão estratosférico.

Na Figura 4 mostra-se a "sombra" da máscara projetada no detector quando 20000 fótons de 100 keV interagem a um ângulo de 1° em relação à perpendicular ao plano da máscara e a 45° em relação aos eixos definidos pela orientação do padrão da máscara. Nota-se que a sombra corresponde a uma imagem ligeiramente "fora de foco": próximo às bordas das regiões opacas nota-se a presença de alguns fótons. Isto se deve ao fato da resolução espacial do detector não ser perfeita, o que faz com que o registro da posição de interação de um fóton no detector não seja exato, mas sim uma distribuição em torno da posição mais provável. A imagem reconstruída a partir desta distribuição está na Figura 5. De acordo com a estatística de Poisson, que regula a contagem de fótons, a relação sinal-ruído para esta imagem deveria ser de 141, que é simplesmente a raiz quadrada do número de fótons. No entanto, se dividirmos o valor do pico pelo desvio-padrão da região de fundo obtemos o valor 100; portanto, o efeito de desfocalização mencionado acima é responsável pela perda de ~ 40% do sinal que se deseja observar.

Se iluminarmos o detector com 20000 fótons vindos da mesma direção anterior, mas com energia de 20 keV (correspondendo a uma resolução espacial no detector de 14 mm), obtemos a distribuição da Figura 6. Nota-se que a desfocalização

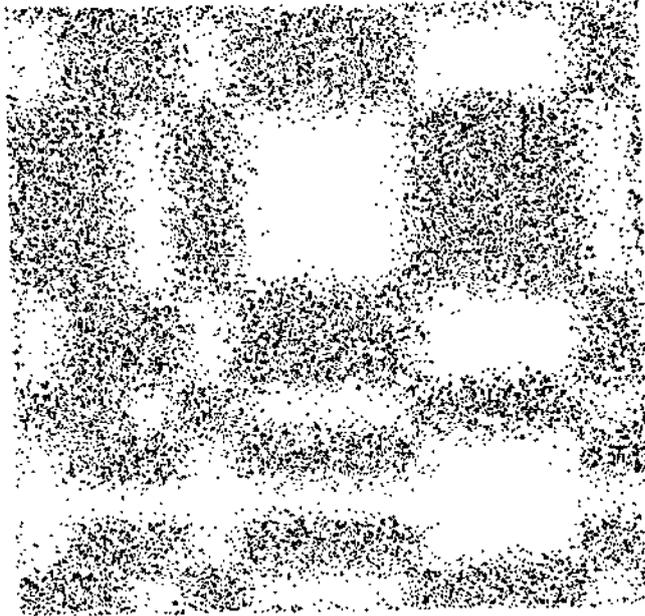


Fig. 4 - Distribuição de fótons no detector

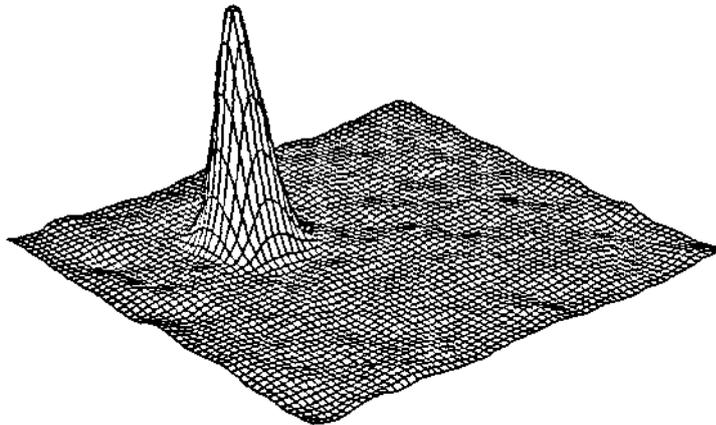


Fig. 5 - Imagem reconstruída por correlação

agora é bastante acentuada. A relação sinal-ruído da imagem correspondente a esta distribuição é cerca de metade da obtida para a distribuição anterior.

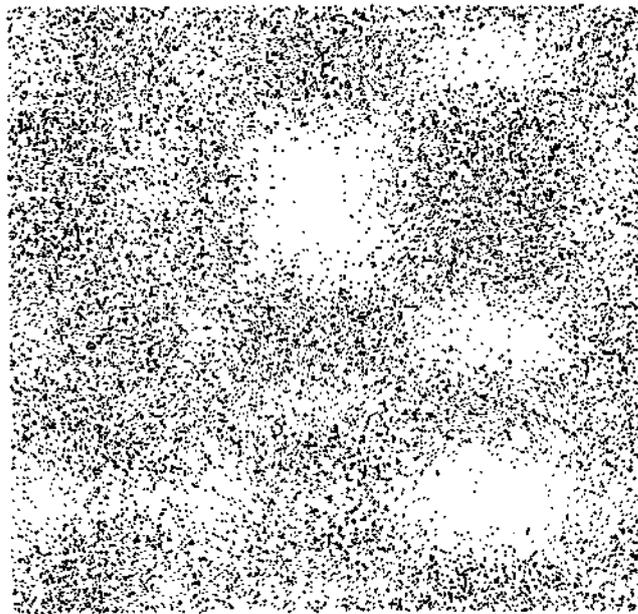


Fig. 6 - Distribuição de fótons de 20 keV

Na Figura 7 mostramos a superposição da Figura 4 à uma outra distribuição de 10000 fótons provenientes de uma direção defasada de 180° em azimute. Além disso, foi superposto um ruído de fundo uniforme de 10000 fótons. Nota-se que se torna difícil distinguir as diferentes sombras sobre o detector, mas a imagem reconstruída (Fig. 8) mostra claramente a posição e intensidade relativa das duas fontes. A presença do ruído de fundo faz com que as flutuações na parte plana da imagem sejam maiores do que no caso anterior. Pode-se mostrar que o desvio padrão da parte plana da imagem é igual à raiz quadrada do número total de fótons detectados (fonte + ruído de fundo).

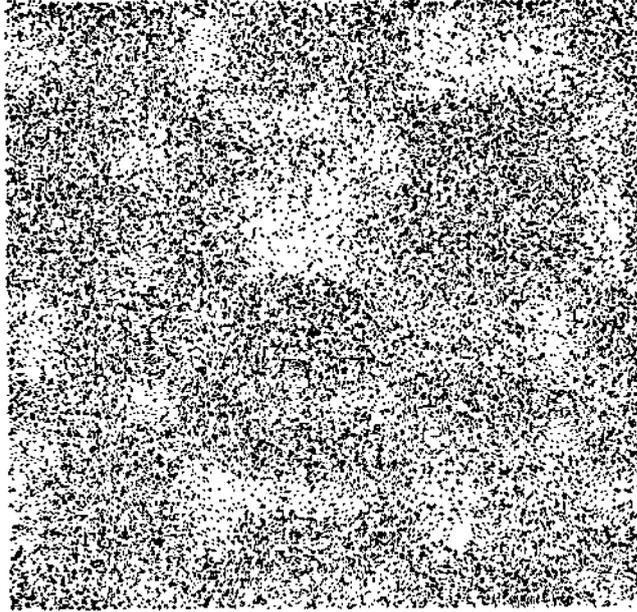


Fig. 7 - Distribuição de fótons vindos de 2 fontes

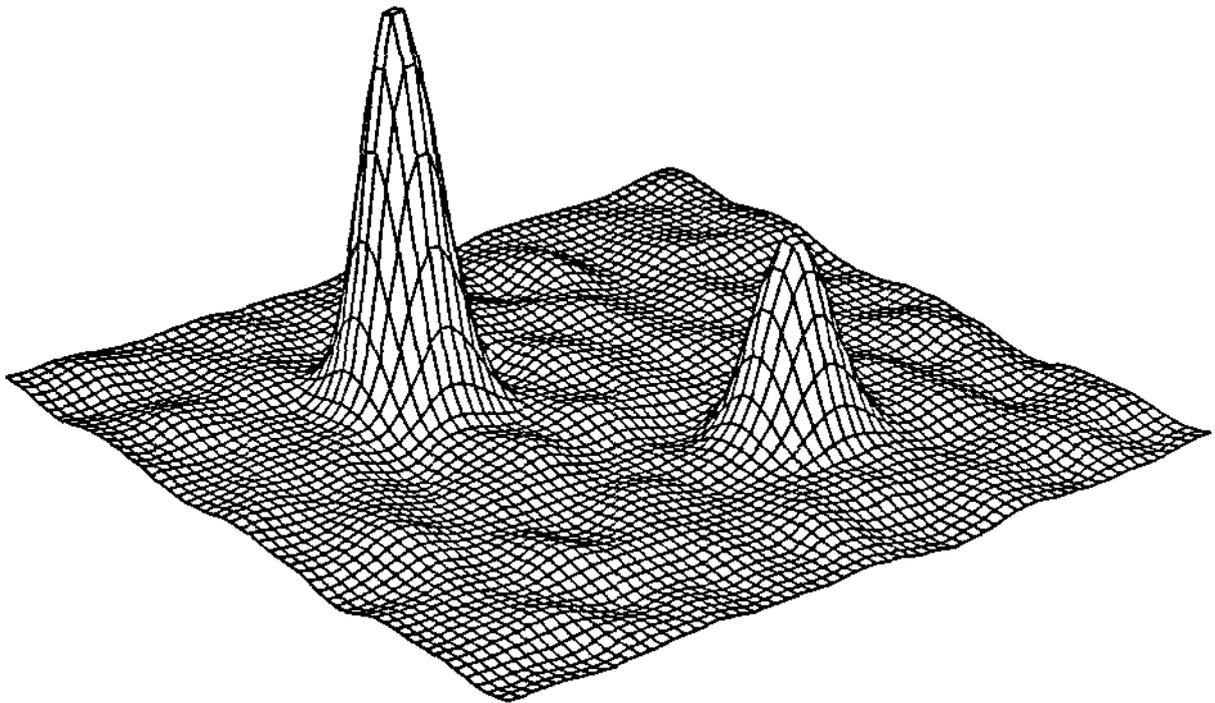


Fig. 8 - Imagem reconstruída

Imagens Reais

Vários experimentos de astronomia de alta energia desenvolvidos recentemente utilizam máscaras codificadas para imageamento em raios-X duros e raios- γ . Um grupo do Instituto Tecnológico da Califórnia, por exemplo, projetou e lançou em balão estratosférico um telescópio de raios- γ que utiliza uma máscara codificada cujo padrão básico é um AUR hexagonal. O instrumento, denominado GRIP ("Gamma-ray Imaging Payload") possui resolução angular de 1° FWHM. Na Figura 9 vê-se uma imagem da região do centro da Galáxia obtida por GRIP na faixa de 35 a 200 keV. Esta imagem mostra que, dentre as várias fontes de raios-X conhecidas nesta região, a fonte número 5 (cujo nome é 1E1740.7-2942) é provavelmente o local de origem da radiação de alta energia observada anteriormente por telescópios não-imageadores.

Um outro exemplo da eficácia do método é evidenciado na Figura 10, obtida pelo telescópio TTM a bordo da estação espacial soviética MIR. A imagem da Grande Nuvem de Magalhães mostra a presença de diversas fontes na faixa de 2 a 32 keV com uma resolução angular de 1.8 minutos de arco.

Em resumo, o método de abertura codificada tem-se estabelecido recentemente como uma importante ferramenta para o imageamento de fontes cósmicas de radiação eletromagnética em faixas de energia para as quais focalização de fótons é impraticável. Vários experimentos estão sendo projetados para utilização futura em balões e satélites. Entre eles destacamos: o telescópio ZEBRA, que será lançado em balão e imageará a faixa de 0.2 a 10 MeV com uma resolução de 1° utilizando uma máscara do tipo AUR; o "Energetic X-ray Imaging Telescope Experiment" (EXITE), sensível na faixa de 20 a 300 keV, e que também utiliza máscara com padrão AUR e possui resolução angular de 22 minutos de arco em um campo de visada de 3.4° ; e finalmente o satélite europeu GRASP, proposto para a década de 90, que utilizará uma máscara de padrão AUR hexagonal e produzirá imagens na faixa de 20 keV a 100 MeV com uma resolução angular menor do que 1° em um campo de 20° .

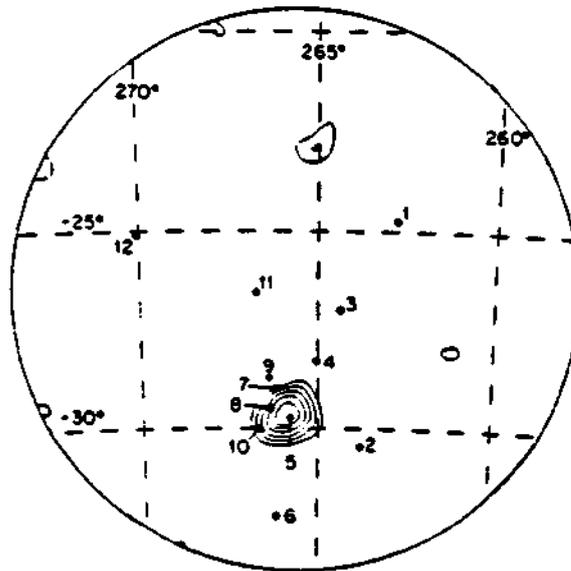


Fig. 9 - Imagem do Centro Galáctico obtida por GRIP (Ref.4)

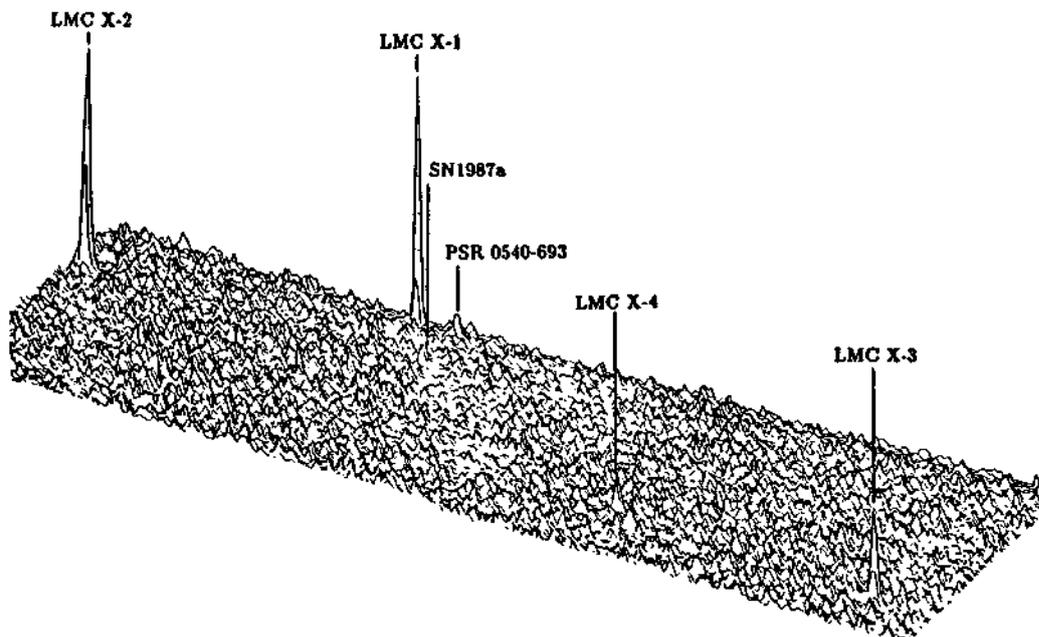


Fig. 10 - Imagem da Grande Nuvem de Magalhães obtida por TTM (Ref.5)

Referências Bibliográficas

- [1] Dicke, R. H. 1968, "Scatter-Hole Cameras for X-Rays and Gamma-Rays", *The Astrophysical Journal (Letters)*, vol. 153, pg. L101.
- [2] Fenimore, E. E.; Cannon, T. M. 1978, "Coded aperture imaging with uniformly redundant arrays", *Applied Optics*, vol. 17, pg. 337.
- [3] Skinner, G. K. "X-Ray Imaging with Coded Masks", *Scientific American*, Agosto de 1988, pg. 84.
- [4] Cook, W. R.; Palmer, D. M.; Prince, T. A.; Schindler, S. M.; Starr, C. H.; Stone, E. C. 1988, "Gamma-ray Imaging of the Galactic Center Region", California Institute of Technology, *preprint*.
- [5] Suniaev, R. et al. 1988, "Detection of Hard X-Ray Emission from SN1987a - Preliminary Results from the KVANT Module on the MIR Space Station", *Nature*, submetido.