

サブ秒角からマイクロ秒角でX線撮像するMXIMのスケラブルなミッション計画

林田 清、朝倉一統、米山友景、野田博文、岡崎貴樹、石倉彩美、佐久間翔太郎、花岡真帆、井出峻太郎、服部兼吾、松本浩典、常深 博 (大阪大学)、栗木久光 (愛媛大学)、中嶋 大 (関東学院大)、平賀純子 (関西学院大)

我々は、光学系を用いない新しい原理のX線干渉計、X線多重像干渉計 (Multi Image X-ray Interferometer Module (Mission) : MIXIM)を提案している。構造は、規則的な周期の格子とX線分光撮像検出器を組み合わせた単純な形式で、天体からやってくる準平行光が格子を透過して作る像を撮影する。解析において、タルボ干渉条件をみたすエネルギーのイベントのみ選別し、格子と同じ周期で重ね合わせることで、X線天体のプロファイルを測定する。これまでSPRing-8 BL20B2において、4.8 μ m, 9.6 μ mピッチの格子と、可視光用にデザインされた微小ピクセル(2.5 μ m)CMOS検出器を用いたX線照射実験を行ってきた。2019年7月の実験では、0.08秒角という、天文用X線撮像器としては過去最高の角度分解能を達成し、2次元撮像にも成功した。

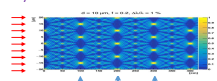
MIXIMのもうひとつの特徴は、スケラビリティにある。超小型衛星によるサブ秒角の撮像から、LISAと同等の250万kmの編隊飛行まで様々なミッションが可能である。もっとも重要なターゲットは、近傍活動銀河核の超大ブラックホールである。Chandra衛星でろうじてみえはじめているトラスの外縁から、事象の地平線まで6ケタ近いスケラをX線直接撮像で分解することが目標になる。

X線多重像干渉計(MIXIM)

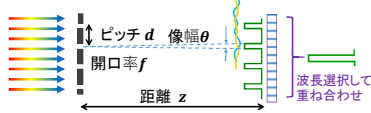
Multi Image X-ray Interferometer Module

Hayashida+ 2016, 2018

- タルボ干渉効果を利用するマルチスリットカメラ
- 格子とエネルギーでできるピクセル検出器で構成、ミラーなし
- 波長 λ がタルボ干渉条件($z = m \frac{d^2}{2\lambda}$)を満たすイベントを選別
 - バンド幅 $\Delta\lambda/\lambda$ は $\sim 10\text{-}20\%$; 分解能2-3%のシリコン検出器でOK



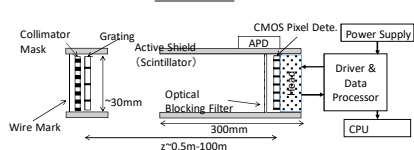
重ね合わせイメージはX線源プロファイル



スケラブルなミッション形態

MIXIMはスケラブル ユニット数もd、zも

MIXIM UNIT

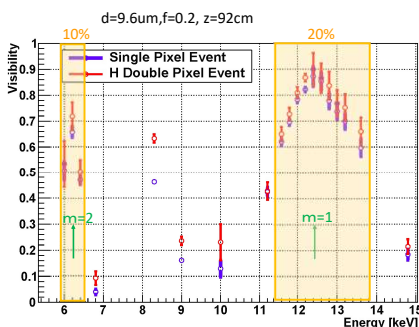


$$z = m d^2 / \lambda = 50 \text{cm} \left(\frac{m}{2} \right) \left(\frac{d}{5 \mu\text{m}} \right)^2 / \left(\frac{\lambda}{0.1 \text{nm}} \right)$$

$$\theta = \frac{f d}{z} = f \lambda / d m = 0.4'' \left(\frac{f}{0.2} \right) \left(\frac{\lambda}{0.1 \text{nm}} \right) / \left(\frac{d}{5 \mu\text{m}} \right) \left(\frac{m}{2} \right)$$

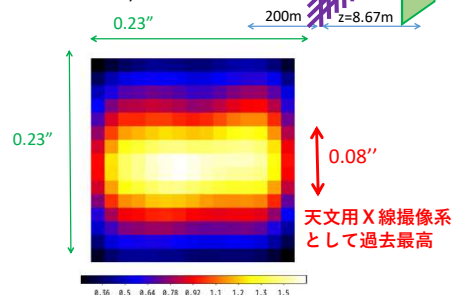
MIXIM基礎実験の結果より P2.51も参照のこと

コントラストのX線エネルギー依存性
→バンド幅20/m%

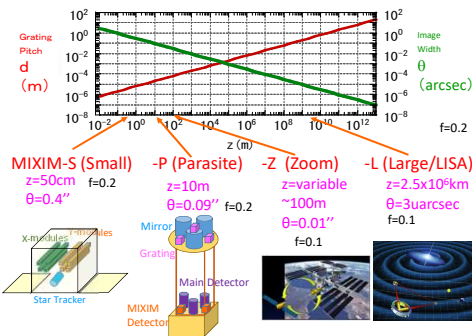


二次元撮像にも成功

Ex=12.4keV, z=867cm



横に広がっているのはシンクロtron光源の性質



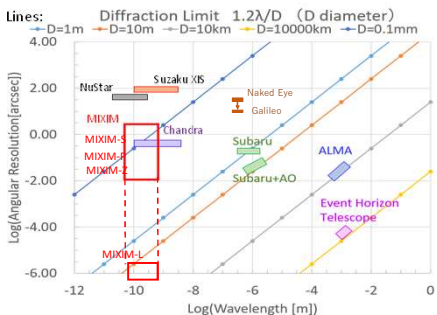
究極 MIXIM-Lのケース

- 格子衛星
 - 格子は5m角程度に広がる
 - 実際には二次元パターン格子
- 検出器衛星
 - 1m角程度
 - 位置分解能はcm

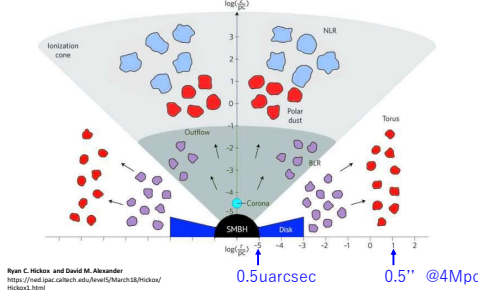


観測対象、近傍AGNのX線空間分解 (+分光偏光撮像)

Angular Resolution

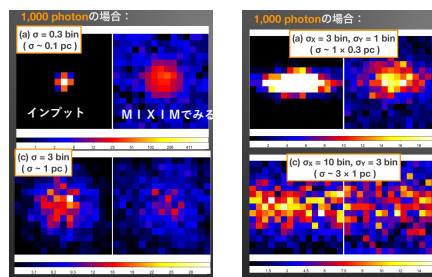


ターゲット >mCrab のみかけ上点源 e.g., 近傍AGN
~6ケタの領域を想像から実像へ

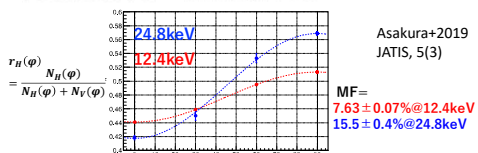
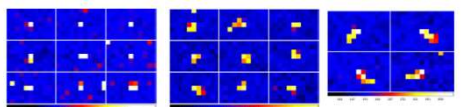


Cir銀河(Sy2)のFe-K α 輝線の観測シミュレーション

Very Preliminary バックグラウンドは含んでいない
 $A_{\text{Fe}} = 10 \text{ cm}^2$ (検出層20 μ mであれば $A_{\text{Fe}} = 24 \text{ cm}^2$)、 $T_{\text{exp}} \sim 1 \text{ Ms}$
開口率0.5、最小パターン0.2のマスク z=8.67m



微細ピクセル→光電子飛跡→X線偏光測定
12.4keV 24.8keV

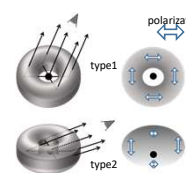


Asakura+2019 JATIS, 5(3)

MF = $7.63 \pm 0.07\% @ 12.4 \text{keV}$
 $15.5 \pm 0.4\% @ 24.8 \text{keV}$

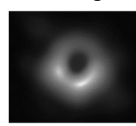
トラスのX線偏光撮像
→AGN 統一モデルの解答

$\theta = 0.01''$ is goal but we can do some with $\theta = 0.1''$



事象の地平線X線イメージ
(温度/組成/偏光も)

First Color Image of EH
 $\theta = \mu\text{arcsec}$
c.f. EHT image is B/W



制限、課題

制限 ミラーでない!

- 集光力がない
 - 格子とは別にコリメータ (0.1-1 deg) が必要
 - 有効面積=幾何学面積 x f x 検出器効率
 - NXBはGinga, RXTEなどのコリメータ検出器のそれと同レベル
- 狭い "1-period" FOV
- ミッション実現には技術的課題たくさん
 - 姿勢決定精度は撮像解像度より良い必要がある
 - 一般的なスタートラッカーでは不十分
 - X線に限らず、超高解像度の観測装置共通の問題
 - 微小ピクセルCMOSの応用して姿勢検出できないか検討開始
 - 注: 姿勢制御精度はシビアではない
 - 格子を通ったX線が検出器面内に届けばよいmm精度でOK
 - 編隊飛行では格子衛星が目標天体の方向に居続けるための燃料が課題
- 可視光用の微小ピクセルCMOSの検出器厚は現状では薄い, e.g. 5um; ただし20umくらいのCMOSは製作されたしている。

参考文献

Hayashida et al. 2016, SPIE proc. 9905, 990557
Asakura et al. 2019, JATIS, 5(3)

Hayashida et al. 2017, X-ray Universe2017
Hayashida et al. 2018, SPIE proc. 10699, 106990U