

# サブ秒角でX線天体を撮影する多重像X線干渉計MIXIM (1) 概念検討

林田 清、川端智樹、花坂剛史、朝倉一統、中嶋 大、松本浩典、井上翔太、常深 博 (大阪大学理)

我々は、光学系を用いない新しいタイプのX線撮像計、干渉計を提案している。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つくる像を撮影する。像は格子と同じ周期をもつので、それを解析で重ね合わせることでX線天体のプロファイルが測定できる。格子が十分な厚みがあればどのような波長のX線も利用できる。これをX線多重像撮像計(Multi Image X-ray Interferometer Module (Mission): MIXIM)と呼ぶことにする。ただし、回折が効く場合にはそれにより像が広がる。ところが、格子から特定の距離で光子の干渉自己像ができるというタルボ効果を利用すると、回折が効く場合でも格子の像を得ることができる。自己像ができる距離は、格子の周期を $d$ としてX線の波長を $\lambda$ すると、 $d^2/\lambda$ の整数倍である。検出器の位置を固定した場合、特定の波長のX線だけ選別する必要があるが、それが可能であれば単純な構造の干渉計として働く。これをX線多重像干渉計と呼んでいる。5 $\mu$ m ピッチ、開口率0.2の回折格子を使い、0.1nm(12keV)のX線を対象とすると、第二周期の像ができる距離は50cm、自己像の幅は0.4秒角に対応する。パラメータ最適化でChandra衛星を超える角度分解能を小型衛星で実現できる可能性もある。いずれの場合にも、集光はしないのでコリメータが必要で、対象も明るい天体に限られるが、超小型衛星でも成果が見込める。干渉計の場合、自己像のプロファイルを得るためには特定の波長の周囲どのくらいのバンド幅を使用できるかという問題もある。フレネル回折の計算で検討を行い、厳密な自己像ではなく格子幅程度のプロファイルを得ることを目標にすれば、10%のバンド幅は利用できる。近傍AGNのトーラスのX線空間分解などが期待できる。

## X線天文衛星の観測装置

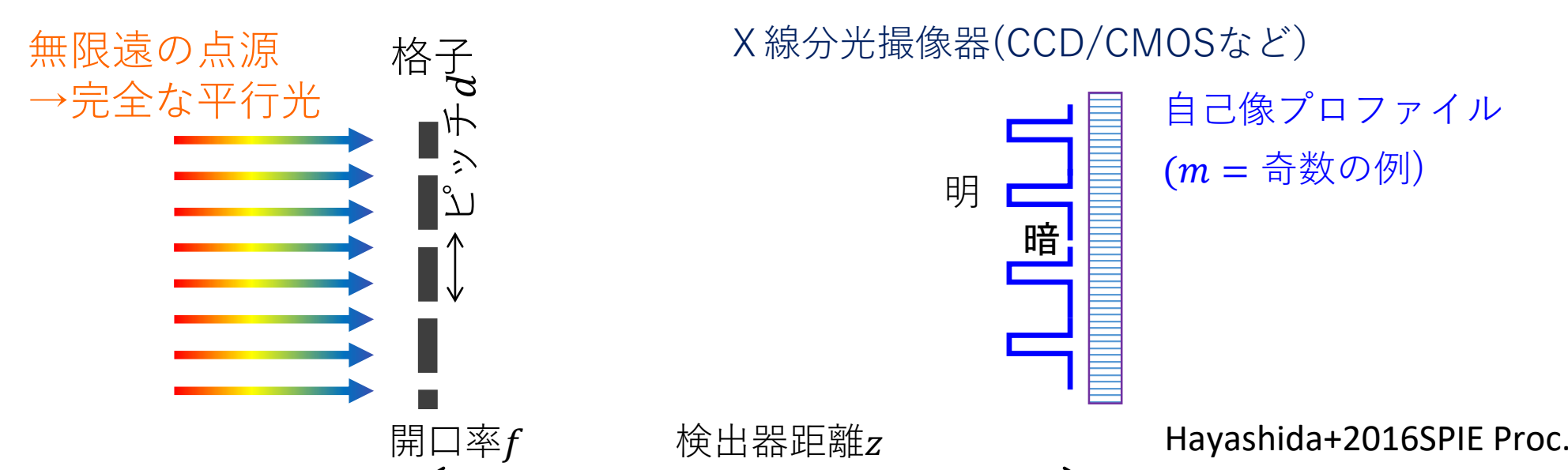
視野絞りor望遠鏡	検出器位置検出	視野	角度分解能	ざんが 1987-1991
コリメータ (ざんが LAC等)	無	1~10度	1~10度	
2枚すだれ (ようこう HXT)	無	~0.5度	~5秒角	
1枚すだれ (Kotoku+2003)	1次元	基礎実験		MAXI 2009- ~1m
コーディッドマスク (SwiftBAT の例)	2次元	~70度	17分角	
スリット (MAXIの例)	2次元	~90度	~0.1度	
斜入射反射鏡	あり	0.1~1度	0.5秒角~2分角	



- 高い角度分解能を達成するためにはX線反射望遠鏡搭載の**巨大衛星**が必要
- Chandra衛星の角度分解能**0.5秒角**を再現する/超えるのは非常に難しい

Multi Image X-ray Interferometer Module/Mission

## X線多重像干渉計(MIXIM)

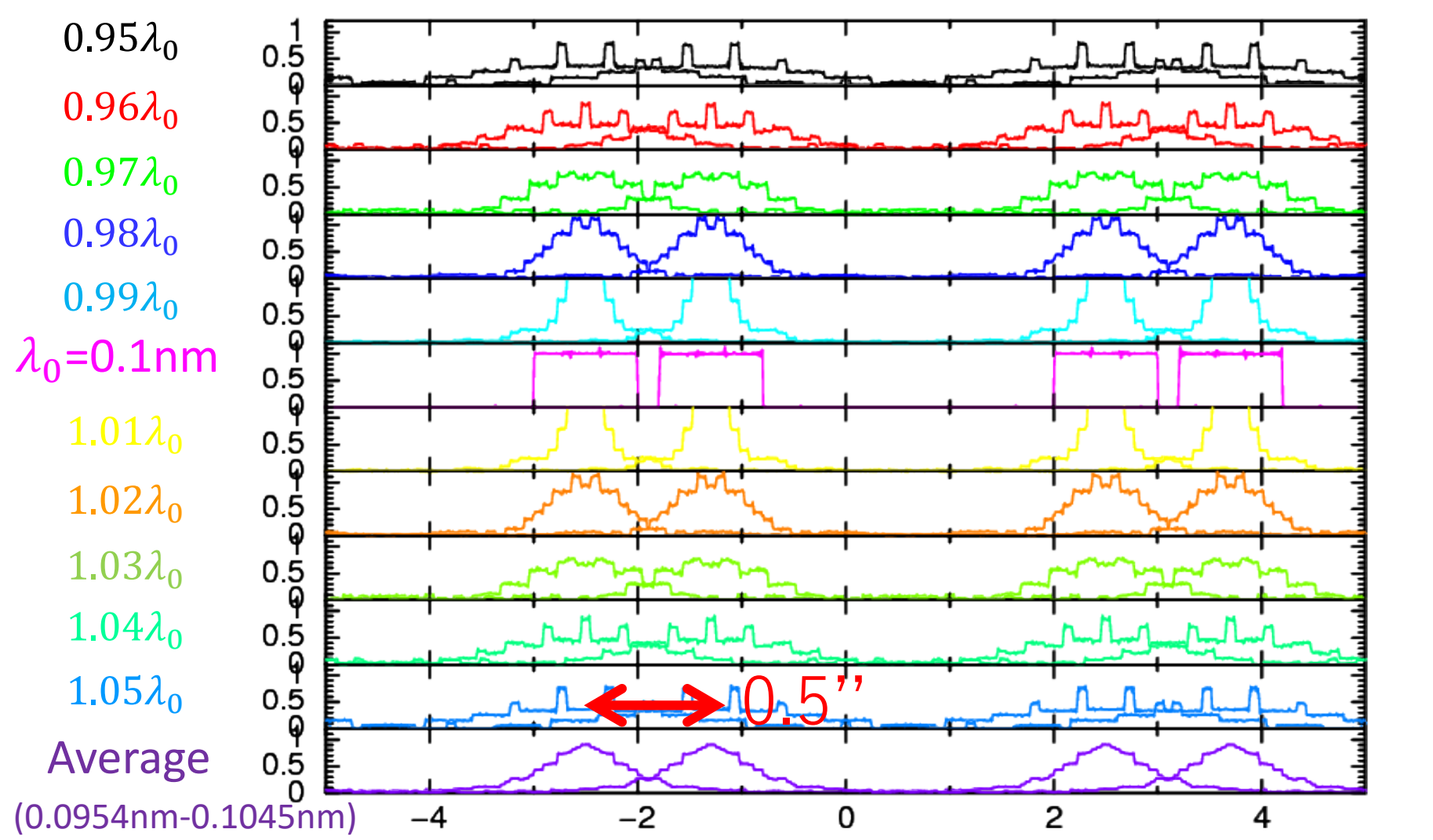


- 数~数十ミクロン周期の格子とX線分光撮像検出器を組み合わせるだけ。
- 格子穴の像は光源の形状を反映している。解析において、**周期 $d$ で重ねあわせ**れば精度の高い光源プロファイルが得られる。
- 像幅は $\theta = fd/z = 0.4'' \left(\frac{f}{0.2}\right) \left(\frac{d}{5\mu\text{m}}\right) / \left(\frac{z}{50\text{cm}}\right)$
- 50cmでChandra衛星に匹敵
- 回折が効く場合でも干渉によって特定距離に格子の自己像ができる**タルボ条件**を満たす波長のX線イベントだけ使用すれば、やはり自己像が得られる。 $m$ を整数として**タルボ距離 $z = m \frac{d^2}{\lambda}$**   
5 $\mu$ mのピッチの格子、0.1nm(12keV)のX線に対する第二タルボ距離が50cm

## バンド幅10%は確保、近接モードであればもっと広い

Two X-ray beams incidence from  
**0.5arcsec** offset direction

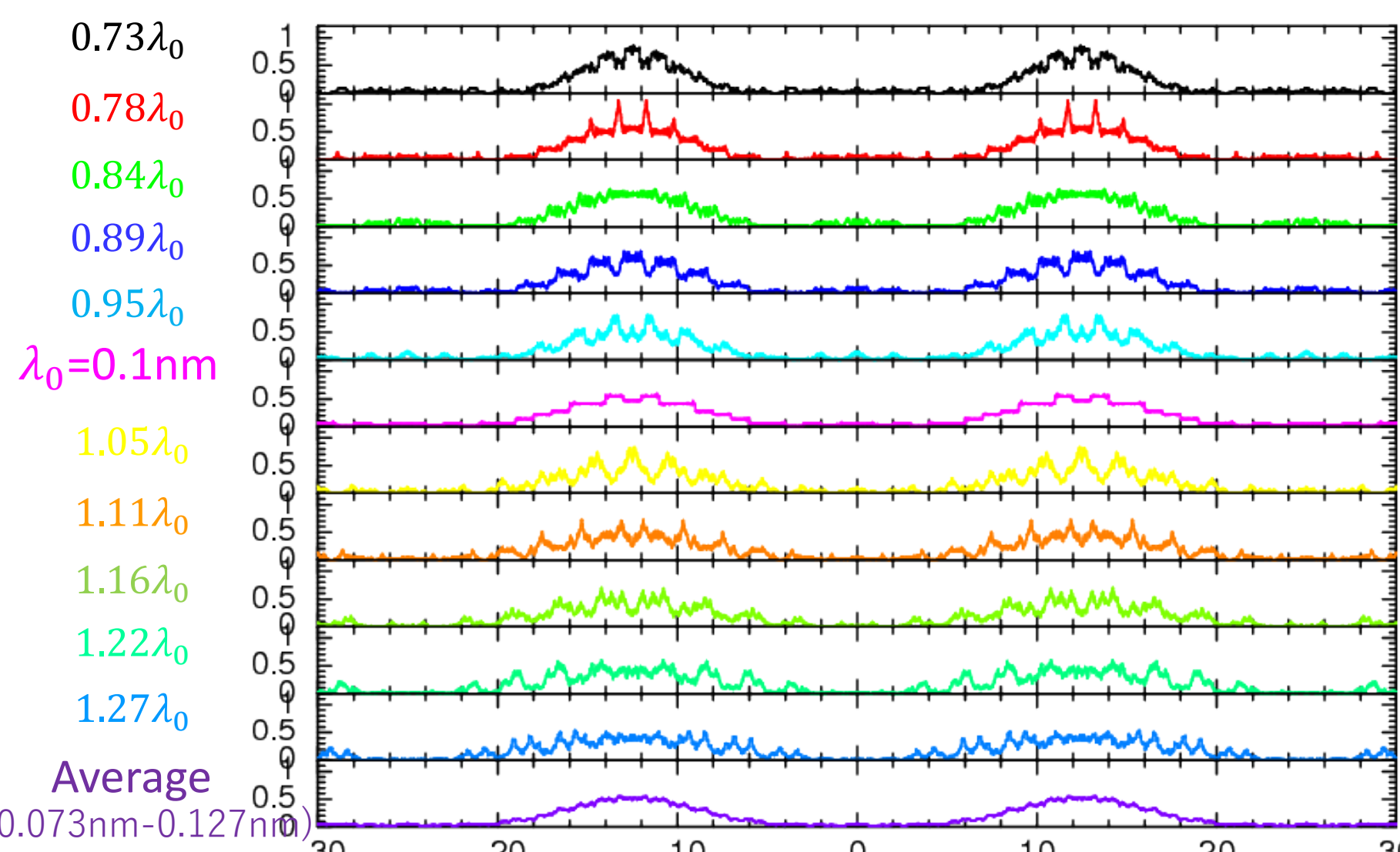
$d=5\mu\text{m}$   $f=0.2$   
 $z=0.5\text{m}$   $m=2$



Band width ( $\Delta\lambda/\lambda$ ) = 10% Position ( $\mu\text{m}$ ) on the Detector

Near Field  $z \ll z_T$

$d=25\mu\text{m}$   $f=0.2$   
 $z=0.5\text{m}$   $m \ll 1$

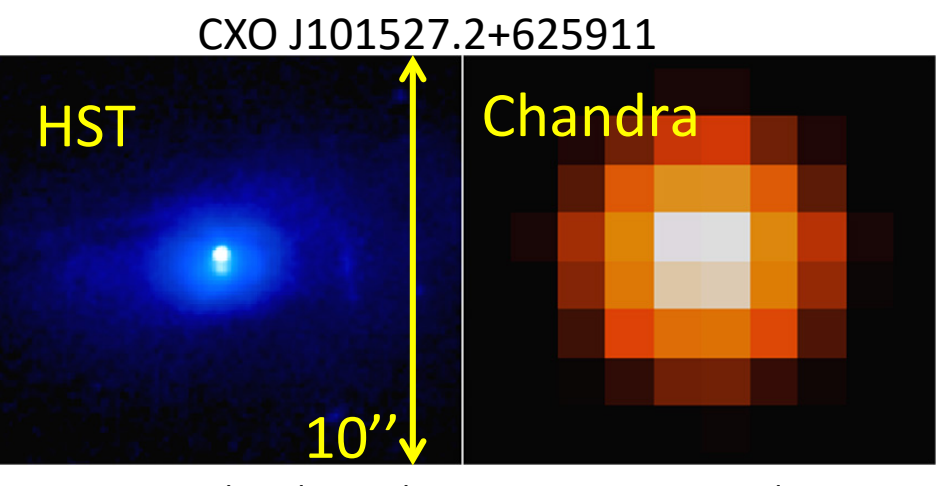


Band width ( $\Delta\lambda/\lambda$ ) = 60% maybe more Position ( $\mu\text{m}$ ) on the Detector

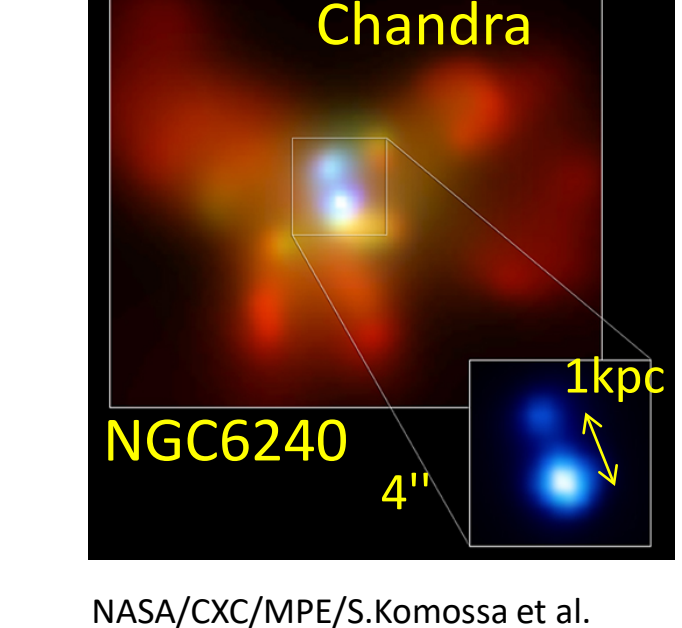
## 観測対象、特に近傍AGNのトーラスのX線空間分解+偏光測定

MIXIM Targets: Detailed Structure of Bright (>~mCrab) Point-like Sources, i.e., (SM)BHs and NSs

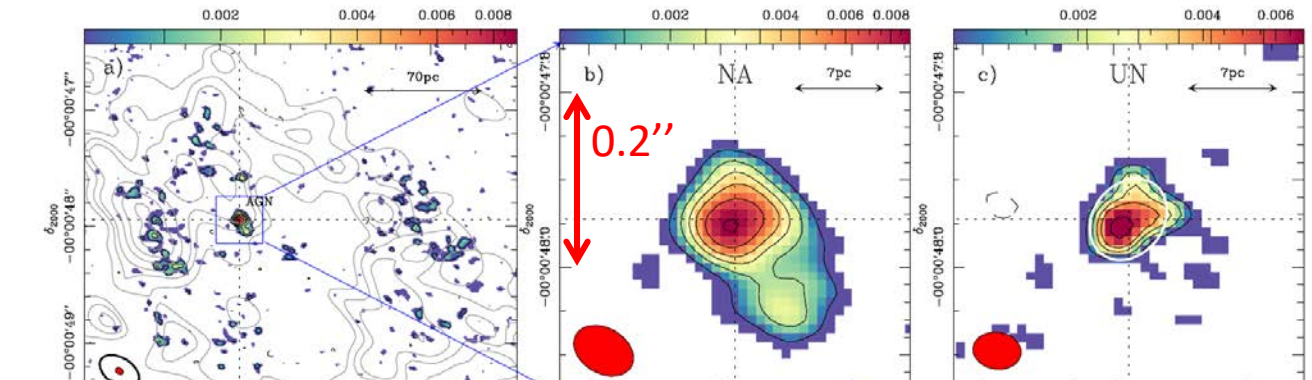
Recoiled SMBH candidates



Binary SMBHs

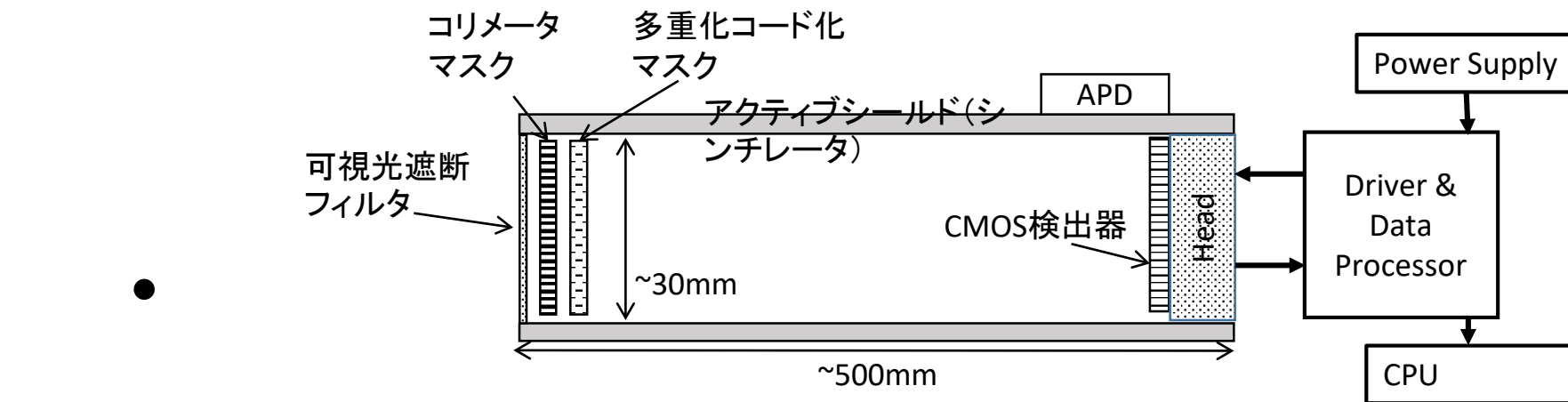


Torus Type2 and Type 1 AGNs



NGC1068  
(D=14Mpc, 0.1''が7pc)  
ALMA image  
Garcia-Burillo+2016

MIXIM-Sモジュール for 超小型衛星



目標: 近傍超巨大BHトーラスのX線空間分解→統一モデルの直接検証

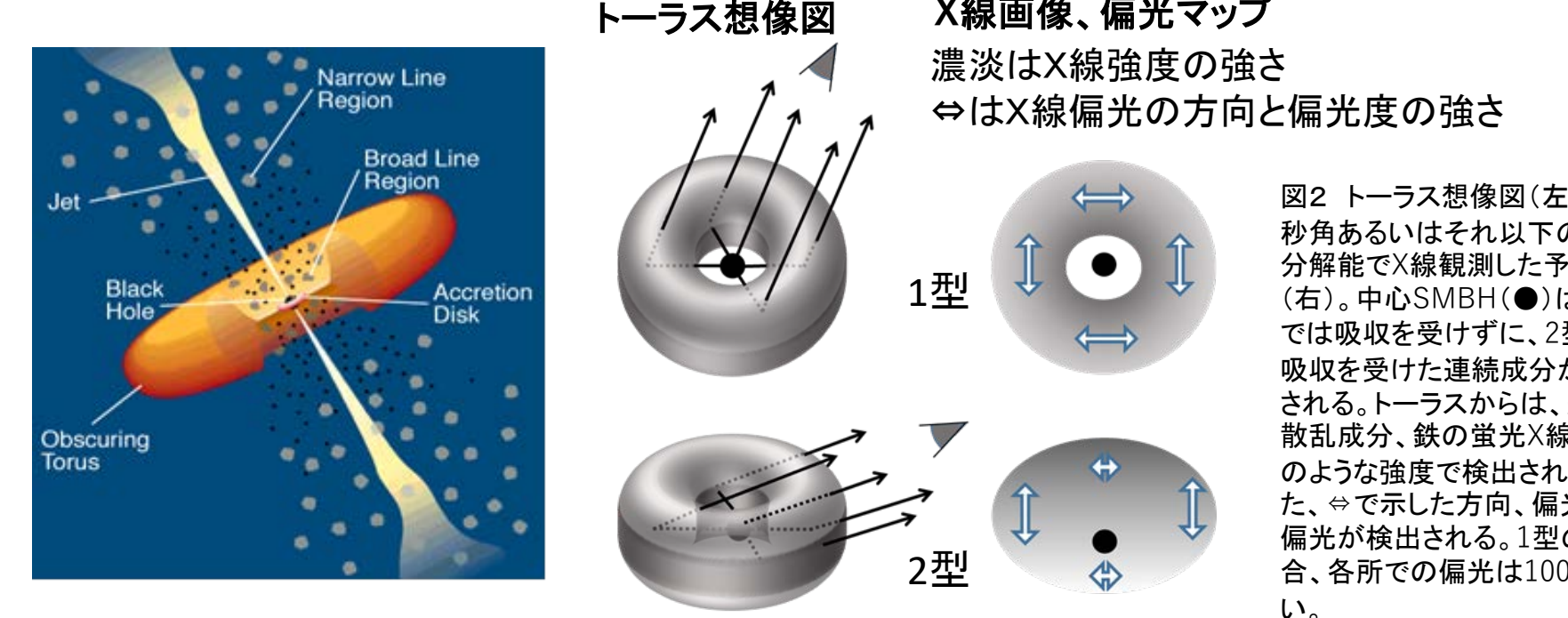
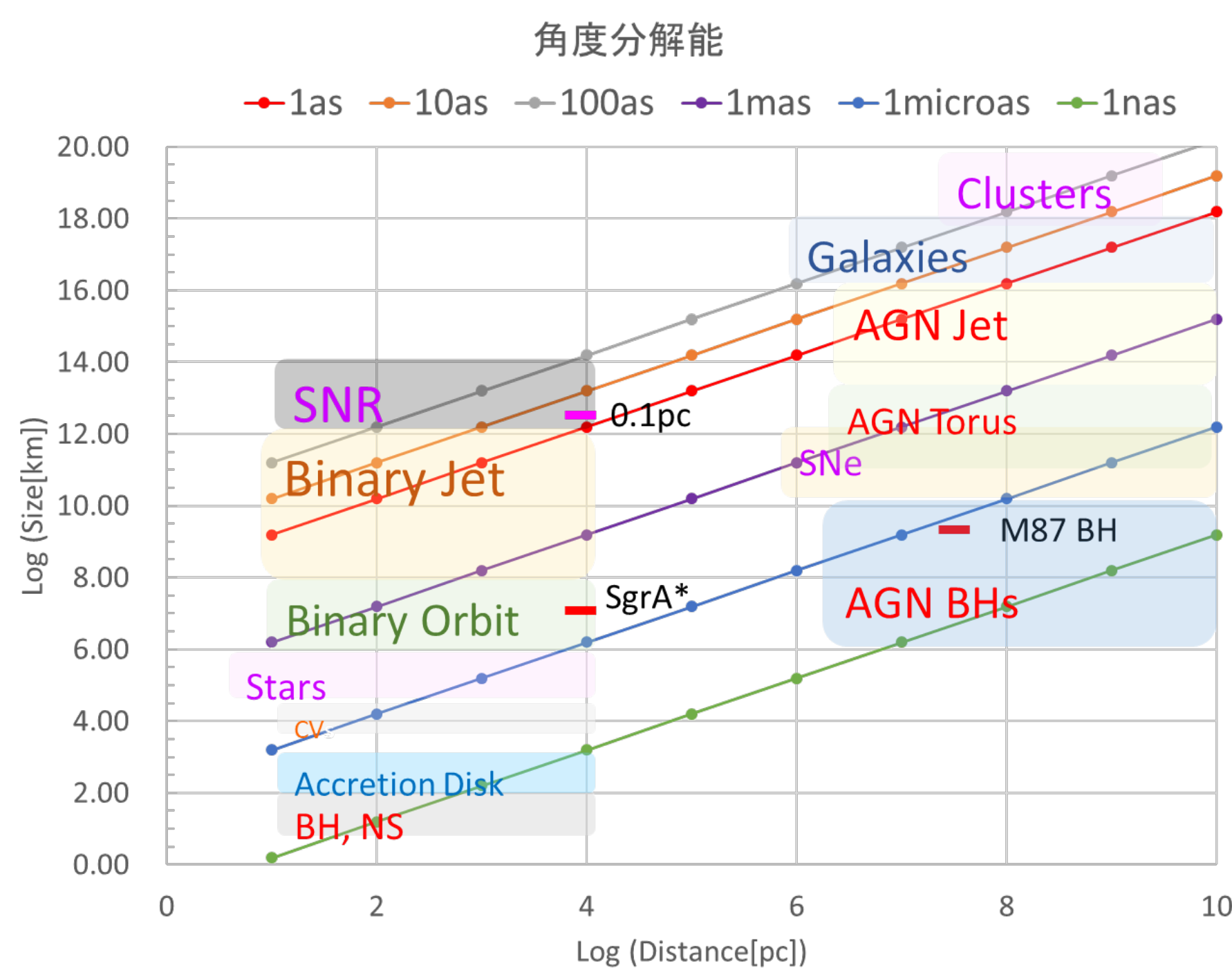


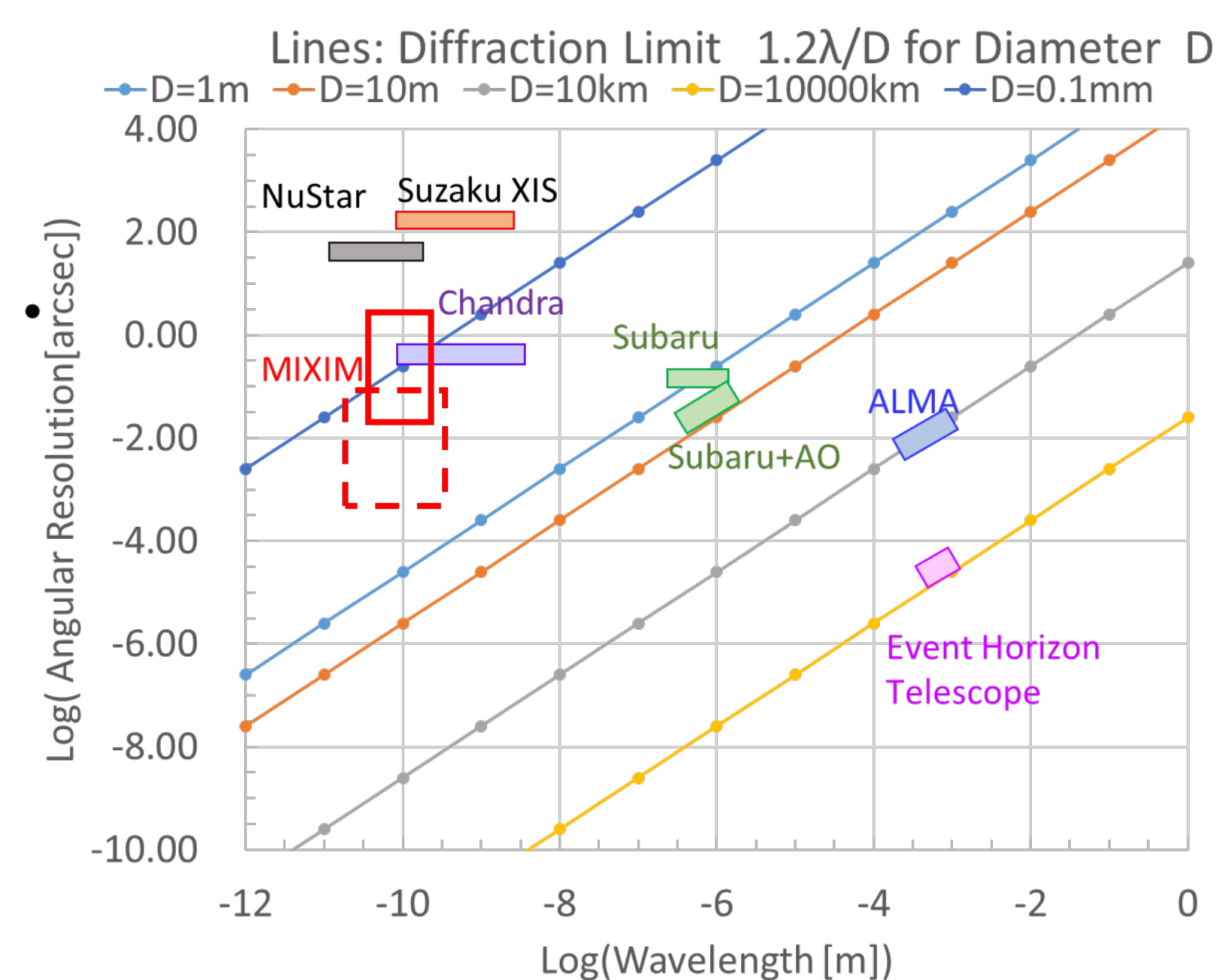
図2 トーラス想像図(左)と0.1秒角あるいはそれ以下の角度分解能でX線観測した予想図(右)。中心のM81(●)は、1型では吸収を受けた連続成分が観測される。トーラスからは、連続光散乱成分、核の集光X線が図のような強度で観測される。また、で示した方向、偏光強度の偏光が観測される。1型の場合、各所での偏光は100%近い。

## 秒角、サブ秒角の天文観測

天体の距離、サイズとみかけの視半径



## Angular Resolution

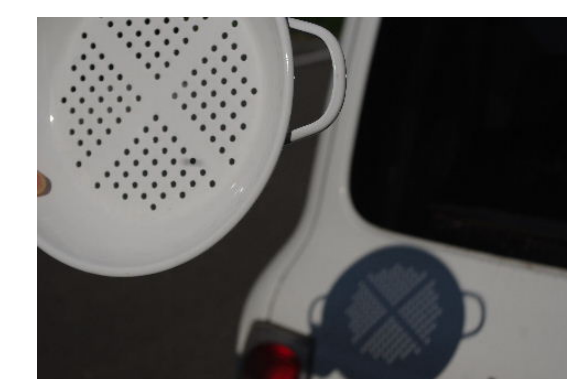


## 角度分解能の皮算用

Hayashida+2016SPIE Proc.

5 $\mu$ mのピッチの格子、0.1nm(12keV)のX線

- 格子と検出器の距離は $m$ を次数として
  - $z = mz_T = md^2/\lambda = 50\text{cm} \left(\frac{m}{2}\right) \left(\frac{d}{5\mu\text{m}}\right)^2 / \left(\frac{\lambda}{0.1\text{nm}}\right)$
- 自己像の幅 $\theta$ は、開口率を $f$ として
  - $\theta = \frac{fd}{z} = 0.4'' \left(\frac{f}{0.2}\right) \left(\frac{d}{5\mu\text{m}}\right) / \left(\frac{z}{50\text{cm}}\right)$
  - $\theta = \frac{fd}{z} = f\lambda/dm = 0.4'' \left(\frac{f}{0.2}\right) \left(\frac{\lambda}{0.1\text{nm}}\right) / \left(\frac{d}{5\mu\text{m}}\right) \left(\frac{m}{2}\right)$
- 像幅を角度分解能 $\Delta\theta$ とすると0.4''で、Chandra衛星(焦点距離10m)を超える
  - c.f. ひとみ衛星は100'', 2028年打ちあげのATHENAでも5''。
- ブラックホールの分解~10uarcsecは難しいが、 $m, f$ を調整することで、数10marcsecも可能。

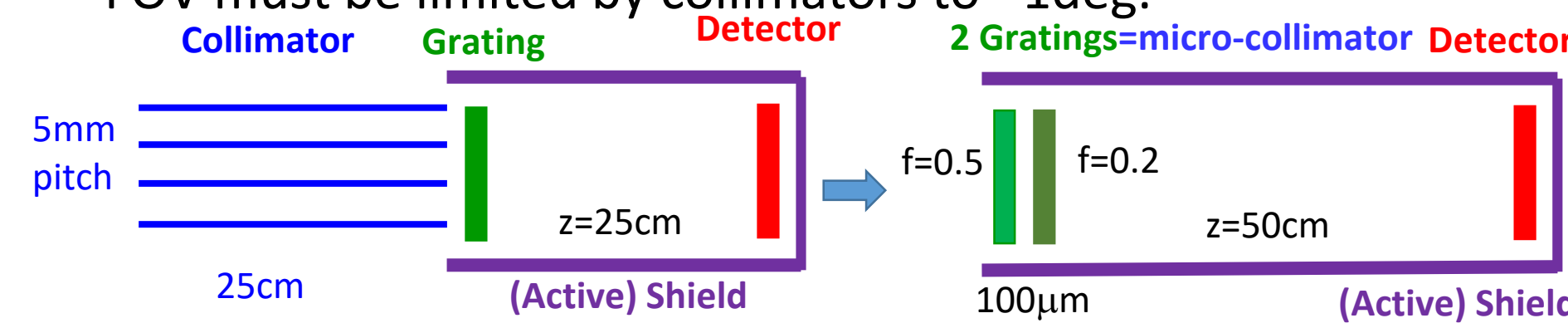


c.f. 日食のピンホール画像  
<http://blog.goo.ne.jp/nahanahanu04/e/a8e127218dee3713136a89943109a431>

## MIXIM概念デザイン

Hayashida+2016SPIE Proc. and Updates

- $z = md^2/\lambda = 50\text{cm} \left(\frac{m}{2}\right) \left(\frac{d}{5\mu\text{m}}\right)^2 / \left(\frac{\lambda}{0.1\text{nm}}\right)$
- $\theta = \frac{fd}{z} = f\lambda/dm = 0.4'' \left(\frac{f}{0.2}\right) \left(\frac{\lambda}{0.1\text{nm}}\right) / \left(\frac{d}{5\mu\text{m}}\right) \left(\frac{m}{2}\right)$ 
  - Positional Resolution of Pixel Detector is essential.
- Energy Range 5-20keV
  - Grating transmission  $\eta_{gra}$  at open (Si filled) part, and Detector efficiency  $\eta_{det}$  limits the range.
- Effective Area  $A_{eff} = A_{geo} \cdot \eta_{gra} \cdot \eta_{det} \cdot f \cdot \Delta\lambda/\lambda$
- FOV must be limited by collimators to ~1deg.



- Background
  - (1D) Imaging capability reduce the CXB and NXB factor of  $f$ .
  - Rough estimate CXB=0.2 mCrab, NXB=4mCrab Very preliminary

## MIXIM超小型、小型、中型衛星

Mission Size	Sampler	Short	Tall	Grande
Distance $z$	0.5m	0.5m	2m	10m
Pitch $d$	25 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$
Open. Frac. $f$	0.2	0.2	0.2	0.1(1D or 2D)
Talbot Order $m$ for 0.1nm X-ray	(0.1)	2	2	10
$\theta$	2''	0.4''	0.2''	0.02''
$\Delta\lambda/\lambda$	1	0.2	0.2	0.2
No. of X+Y unit ( $A_{geo}=10\text{cm}^2/\text{unit}$ assumed)	1+1	4+4	25+25	500(for2D) 100+100(for1D)
$\eta_{det}$ at 10keV (200um Si assumem)	0.78	0.78	0.78	0.78
Effective Area (@10keV)	3cm <sup>2</sup>	2.5cm <sup>2</sup>	16cm <sup>2</sup>	7cm <sup>2</sup> (2D) 31cm <sup>2</sup> (1D)

1Crab source 1c/s/cm<sup>2</sup>/5-20keV 1mCrabx50ksx3cm<sup>2</sup>~150c/day  
偏光測定optionも検討中

## 参考文献

Hayashida et al. 2016, SPIE proc. 9905, 990557

Hayashida et al. 2017, X-ray Universe2017