

# 超巨大BH周辺の X 線空間分解 : Chandra による観測と MIXIM の開発

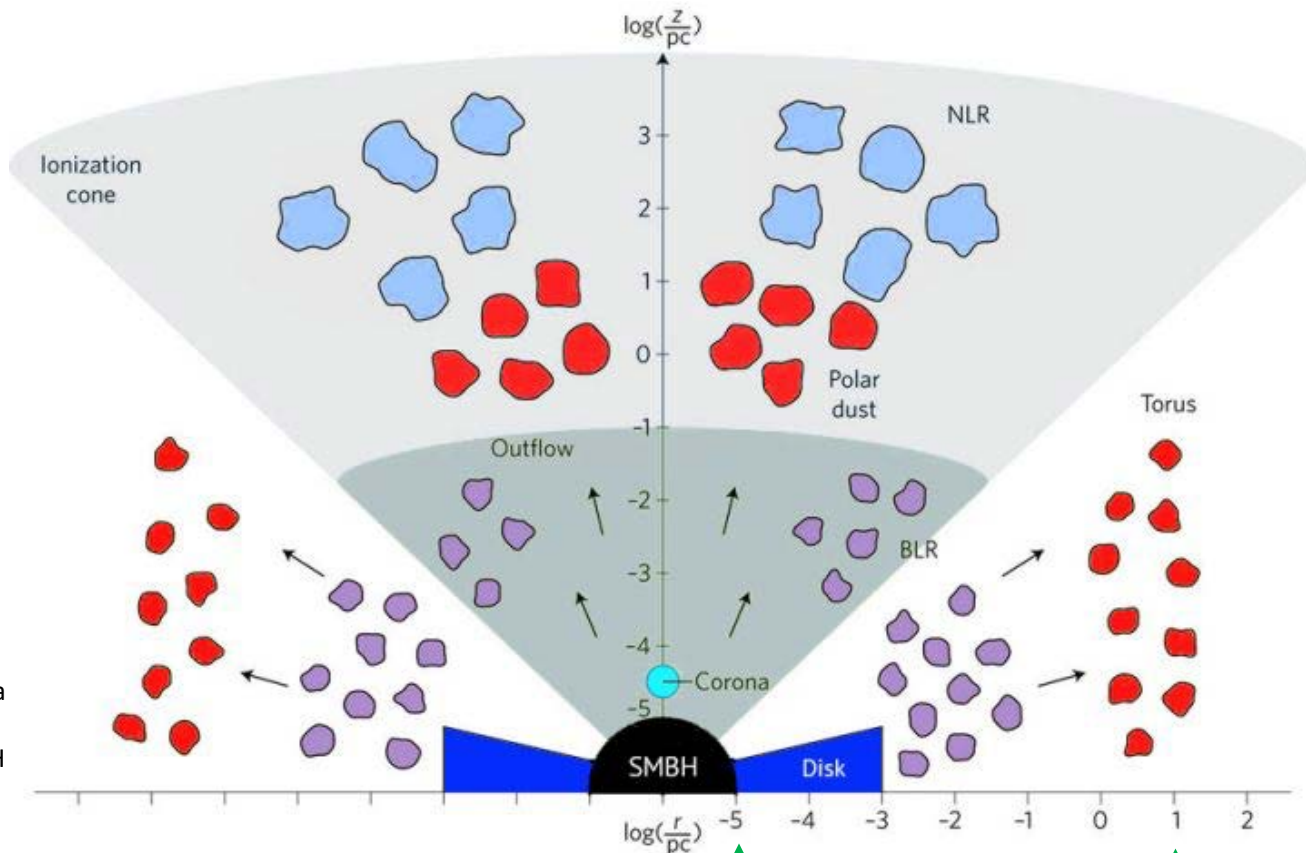
2020.03.03

林田 清 (大阪大学)

共同研究者

朝倉一統、佐久間翔太郎、石倉彩美、米山友景、野田博文、  
岡崎貴樹、井出峻太郎、服部兼吾、花岡真帆、中田諒、  
澤上拳明、松下友亮、峯田大靖、松本浩典、常深博 (大阪大)、  
栗木久光 (愛媛大) , 中嶋大 (関東学院) , 平賀純子 (関西学院)

# AGNの想像図



Ryan C.  
Hickox and David  
M. Alexander  
<https://ned.ipac.caltech.edu/level5/March18/Hickox/Hickox1.html>

0.5uarcsec

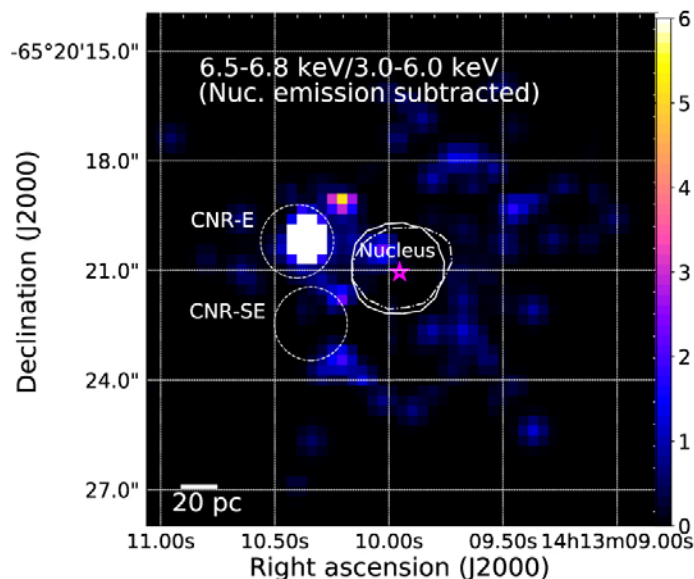
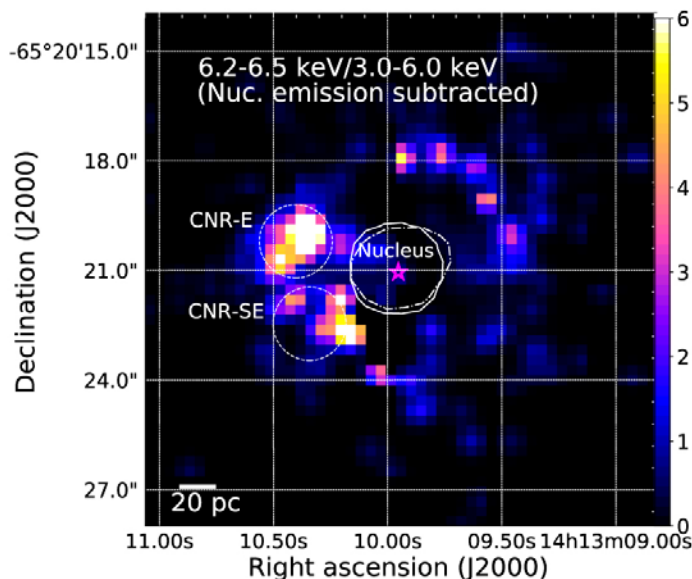
0.5''

@4Mpc

Chandra衛星でもAGNの空間分解はできないはず

# AGN ≠ X線点源

- 広がった軟X線放射 (ROSAT HRI、Chandra)
  - e.g. NGC1068 ~kpcスケール光電離(+ 衝突電離?)ガス
- 空間的に広がったFe K輝線 (中性及びHe-Like) e.g.
  - NGC1068: ~20''(1.4kpc)の広がり (Young+2001), 2''(140pc)以遠が30%の強度 (Bauer+2015)
  - NGC4945: ~11''(200pc)の範囲に複数Fe-K輝線クランプ、~40pcにHe-like Fe-Kクランプ (Marinucci+2012,2017)
  - Circinus Galaxy: 反射成分~30''(600pc)の広がり (Arevalo+2014)、~5''(100pc)でFe K輝線が分子雲と空間的反相関 (Kawamuro+2019)



Circinus  
Galaxy

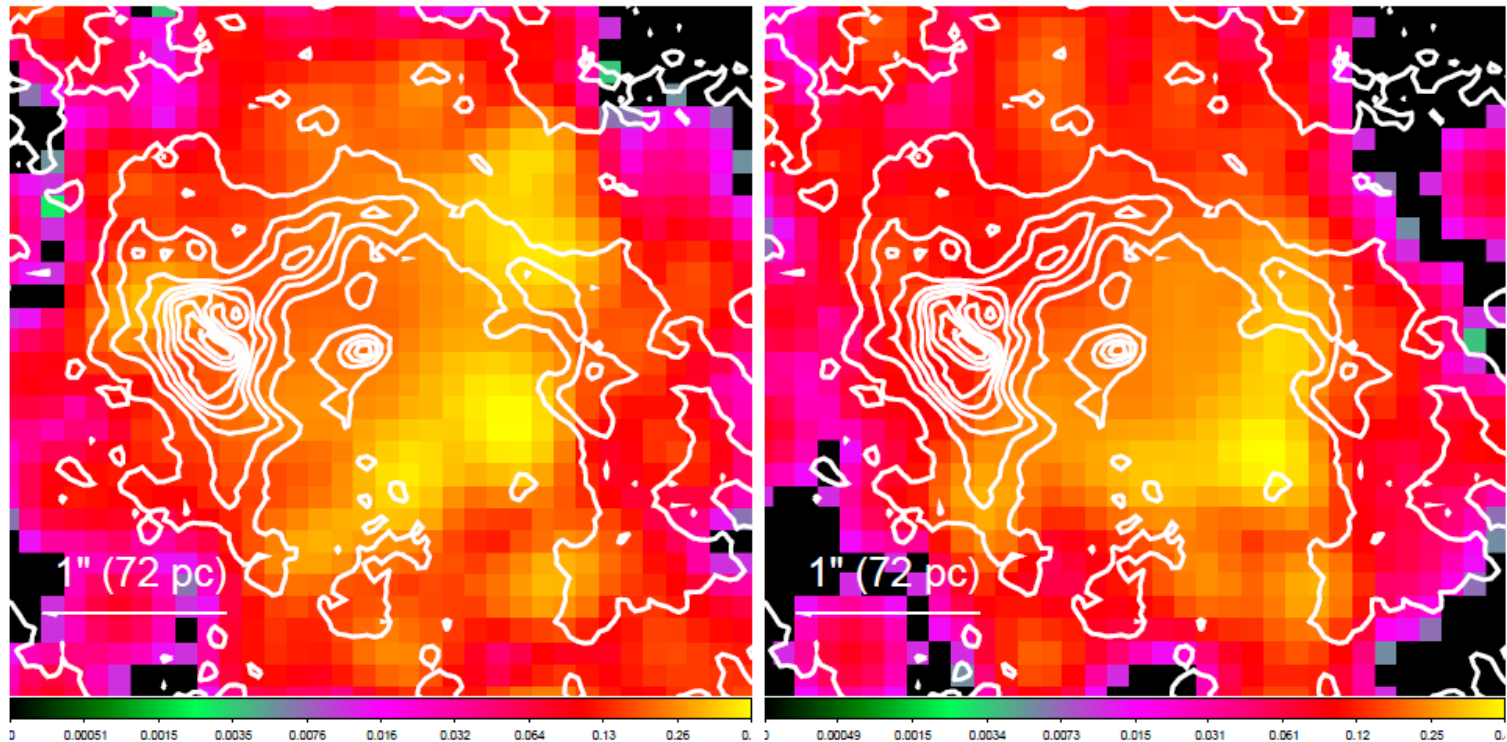
Kawamuro+  
2019

# NGC1068 Chandra HETGO 次光の解析

中田M論2020, Nakata+2020 in prep.

6.3-6.5keV/3-6keV強度比マップ

6.6-7.0keV/3-6keV強度比マップ



白コントア: ALMAで観測したHCN J=3-2の強度図(Imanishi et al. 2018)

各“鉄輝線クランプ”のスペクトル解析、定量評価の結果

- 中性鉄輝線は、中心からの連続X線で照らされた16~170個/ccの密度の雲からの蛍光X線として説明できる
- 光電離パラメータ $\xi$ は18~190で、 $\xi=10^3$ - $10^4$ 必要な高階電離鉄輝線は中心からの連続X線の光電離では説明できない

# 現実想像図よりは複雑

- 数10pcスケールの鉄輝線クラump、Circum Nuclear Diskと、トーラスを同一視すべきではないが、そもそも明確な境界があるわけではない
- X線鉄輝線観測は超巨大BH周辺の物質分布を探る強力な手段（EHTの観測、ALMAの分子観測、近赤外干渉計GRAVITYとは相補的）
- XRISMによる空間積分した速度プロファイル観測と、Chandraの空間分解観測も相補的
- 将来的には、X線でもさらに細かく空間分解することが求められる

# Multi Image X-ray Interferometer Module

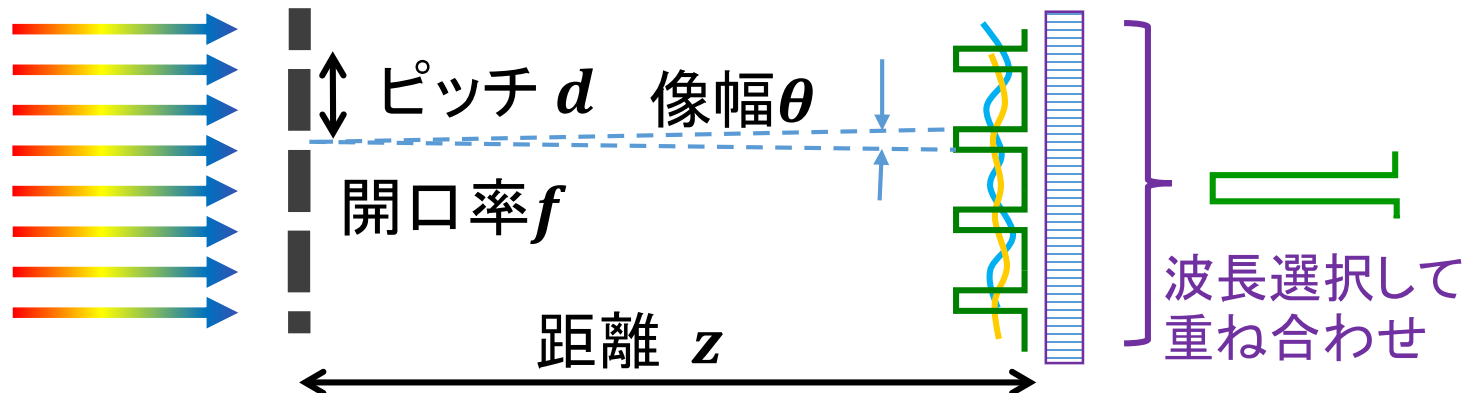
MIXIM: ESA Voyage2050白書でもmentionされている

Hayashida+ 2016,2018

- タルボ干渉効果を利用するマルチスリット(ピンホール)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 $\lambda$ が**タルボ干渉条件**( $z = m \frac{d^2}{\lambda}$ )を満たすイベントを選択
  - バンド幅 $\Delta\lambda/\lambda$ は $\sim 10-20\%$  ; 分解能2-3%のシリコン検出器でOK
- **重ね合わせイメージ**=X線源**プロフィール**

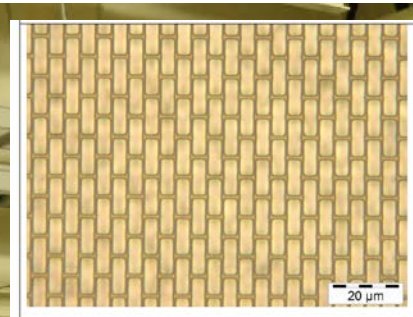
$$\bullet \quad z = md^2/\lambda = 50\text{cm} \left(\frac{m}{2}\right) \left(\frac{d}{5\mu\text{m}}\right)^2 / \left(\frac{\lambda}{0.1\text{nm}}\right)$$

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

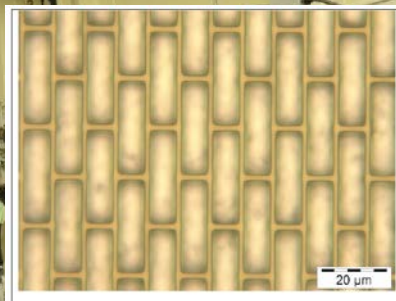


# SPring-8 BL20B2 200m ビームライン

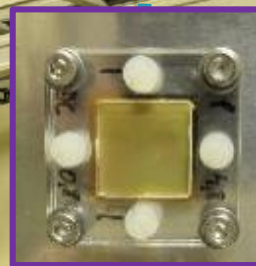
Gpixel GMAX0505 2.5 $\mu$ mピクセル  
常温で176eV@5.9keV (Asakura+2019)



$d=4.8\mu\text{m}$ ,  $f=0.2$



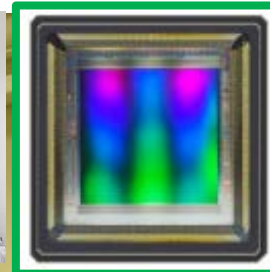
$d=9.6\mu\text{m}$ ,  $f=0.2$



格子



CMOS



単色偏光X線ビーム

z

光学ベンチ

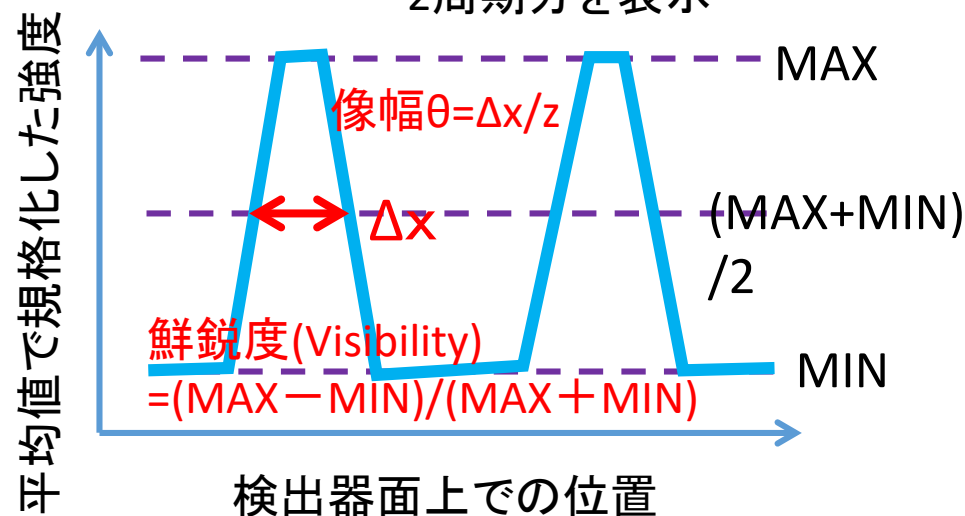
回転ステージ

~200 m

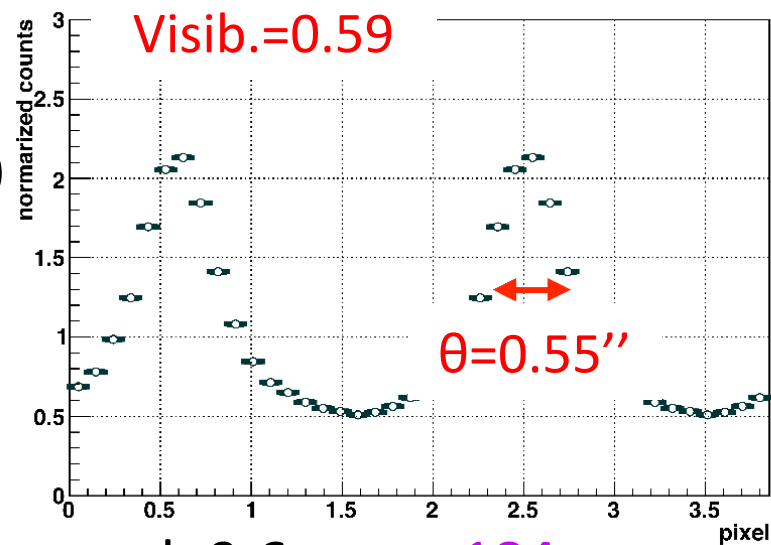
z

# イベント選別→射影プロファイル→重ね合わせ

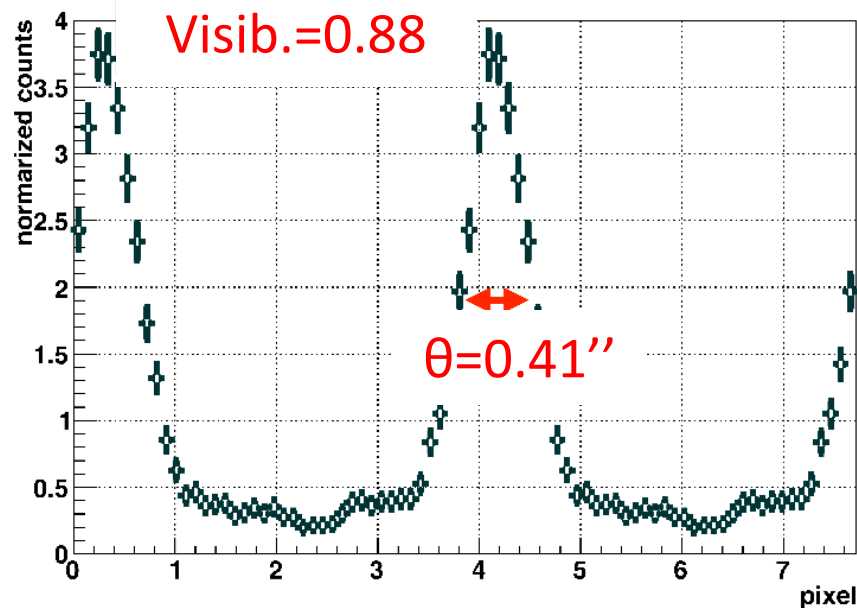
2周期分を表示



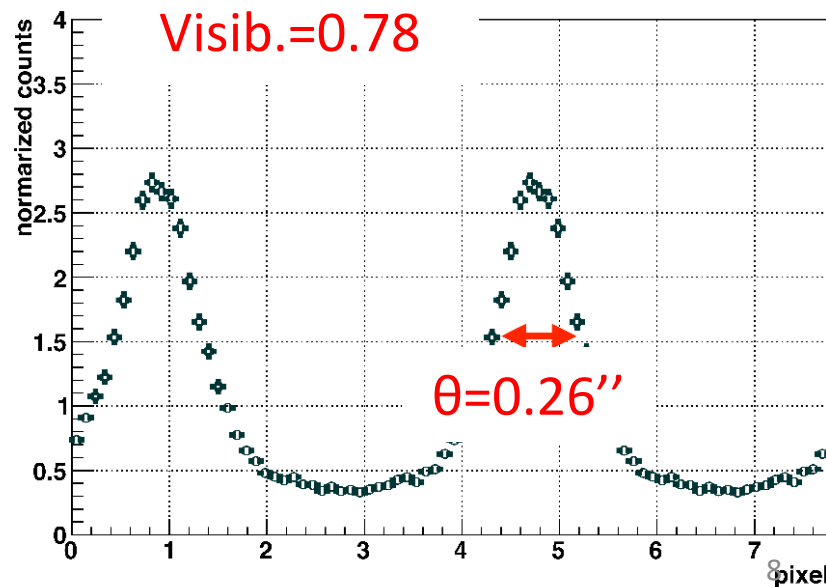
$d=4.8\mu\text{m}$ ,  $z=46\text{cm}$  花坂M論2019



$d=9.6\mu\text{m}$ ,  $z=92\text{cm}$

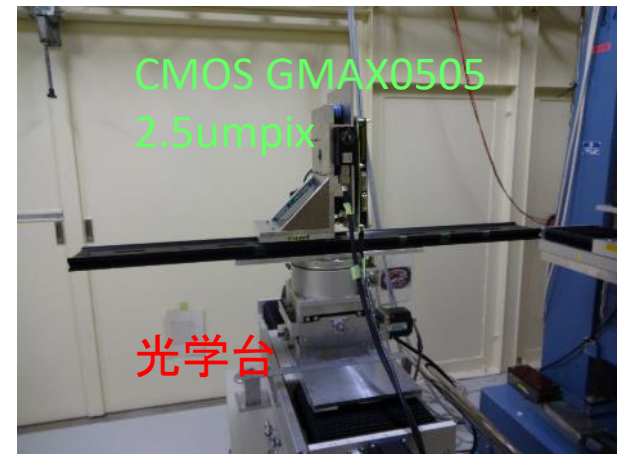
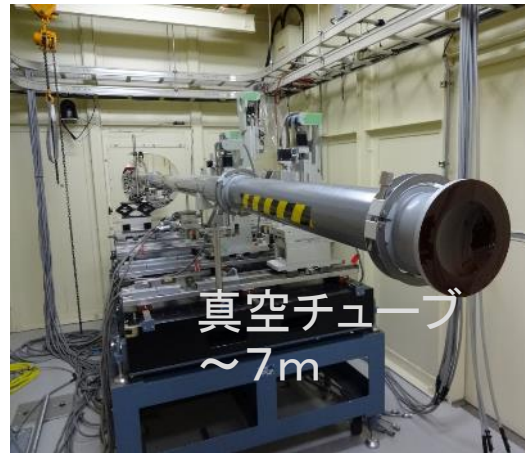
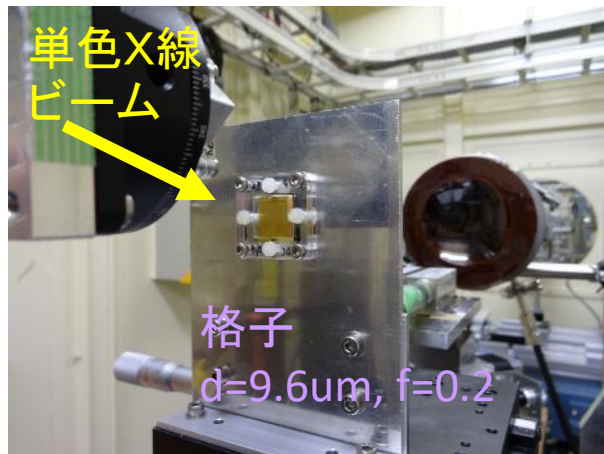


$d=9.6\mu\text{m}$ ,  $z=184\text{cm}$



# SPring-8 BL20B2 2019.07.13-16

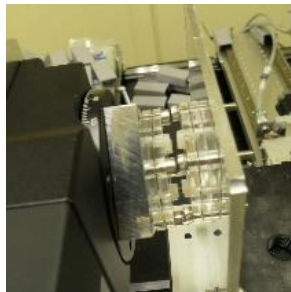
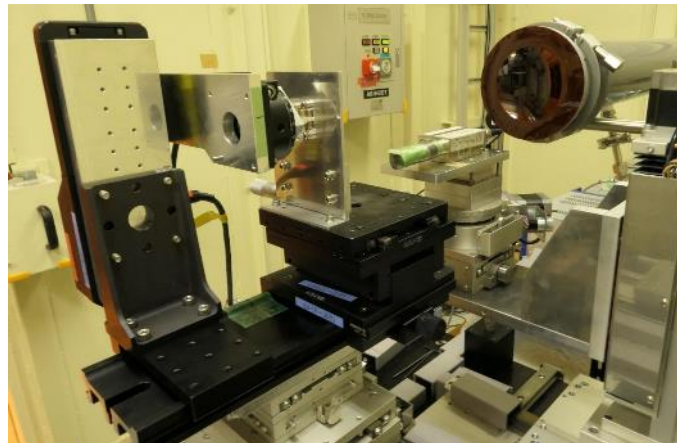
$z=8.67\text{m}$



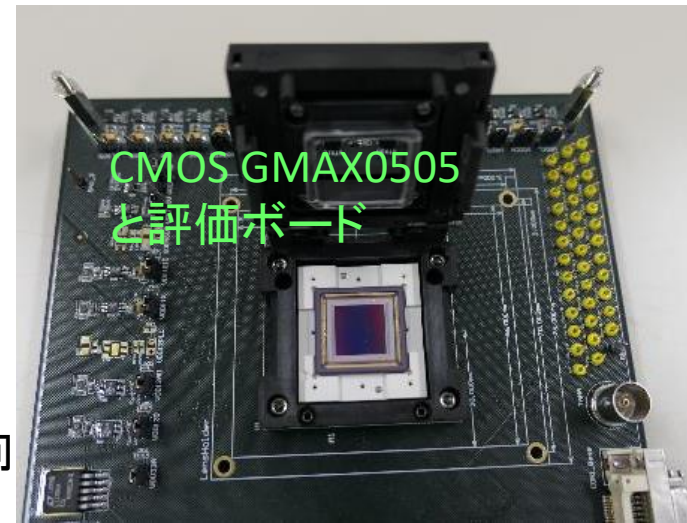
## 一次元格子の実験

This Image is flipped horizontally to explain the configuration

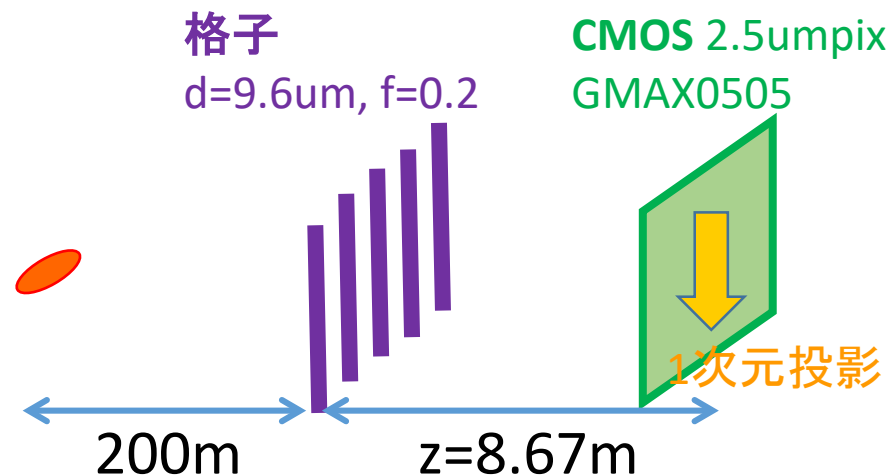
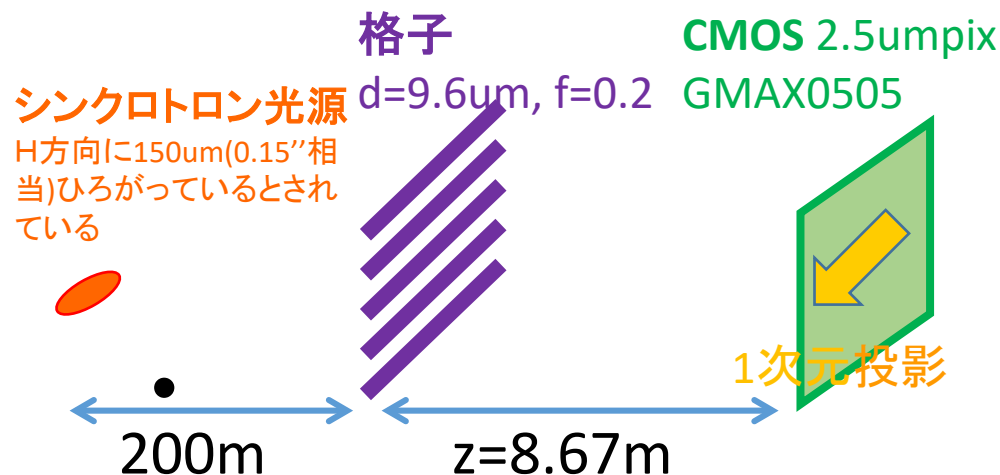
## 一次元格子2枚で二次元格子を実現



格子2枚のうち1枚を  
小型回転ステージに  
取り付け、スリット方向  
を直交させている

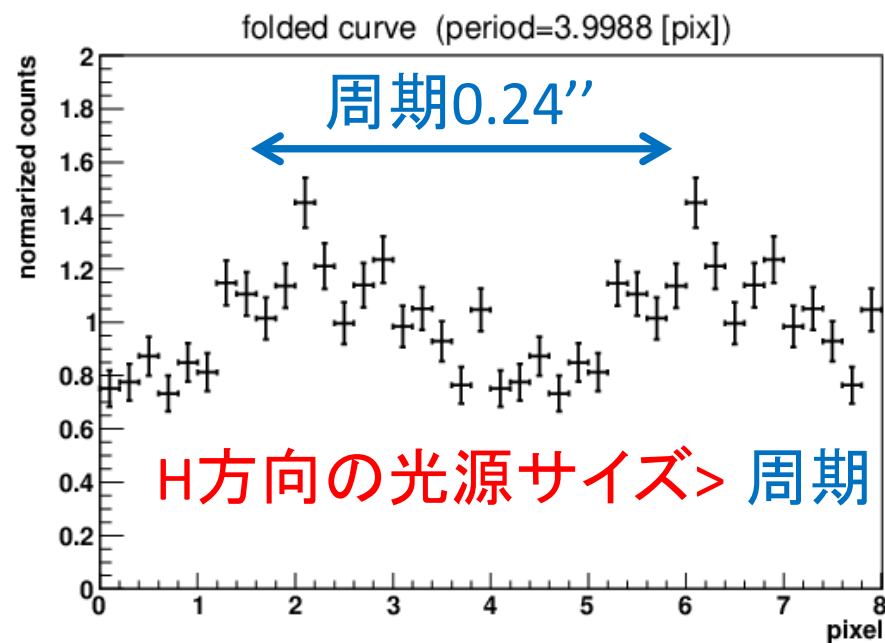
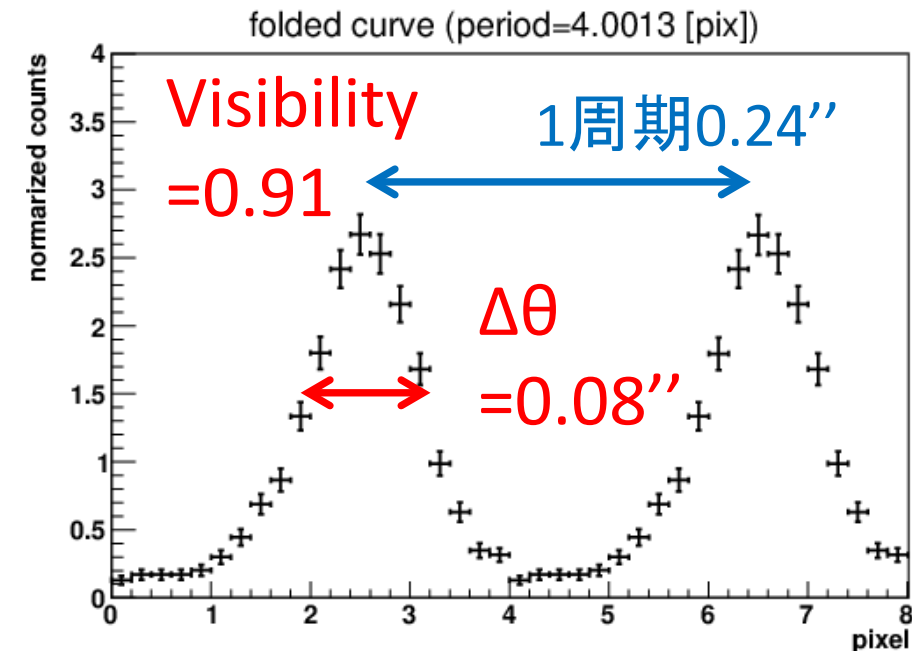


# 0.1秒角を切る角度分解能を達成！X線天文用撮像系として世界記録



Ex=12.4keV

Ex=12.4keV



1pixelは2.5 $\mu\text{m}$

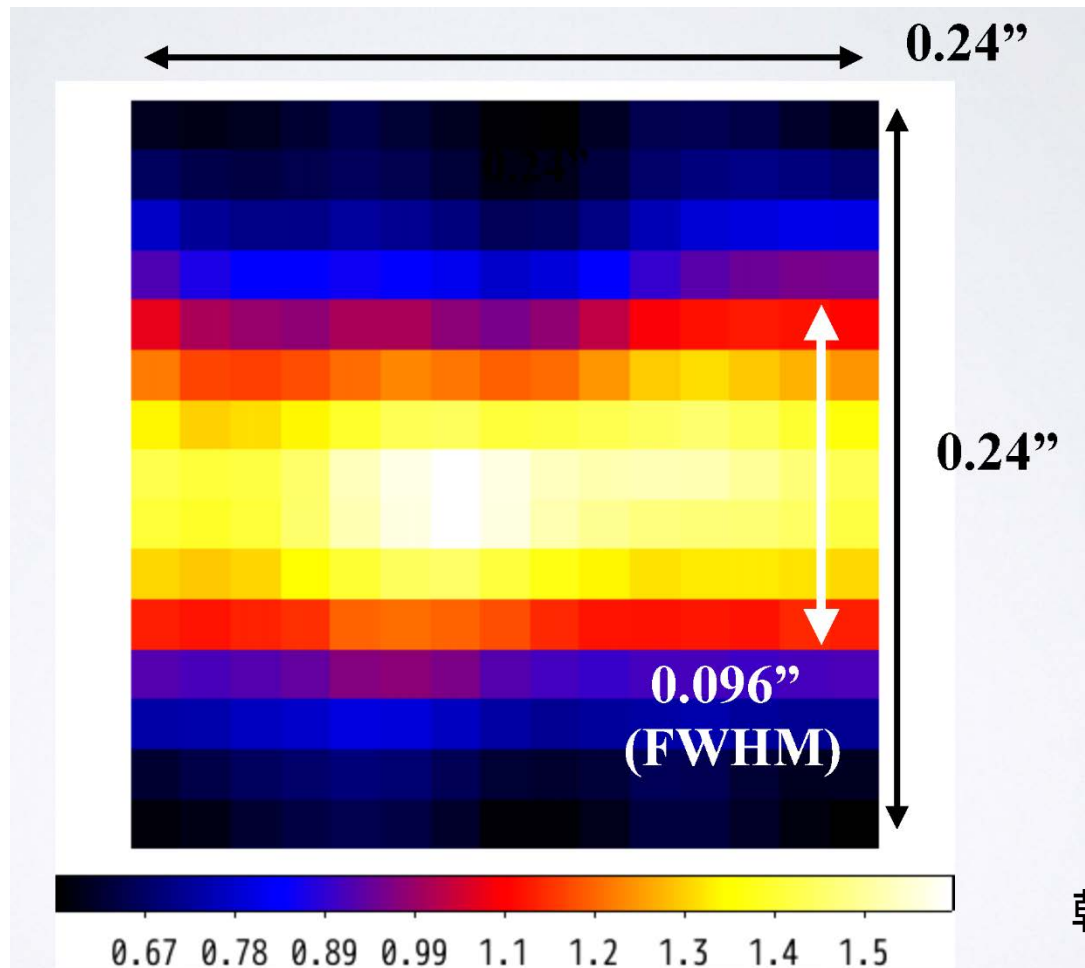
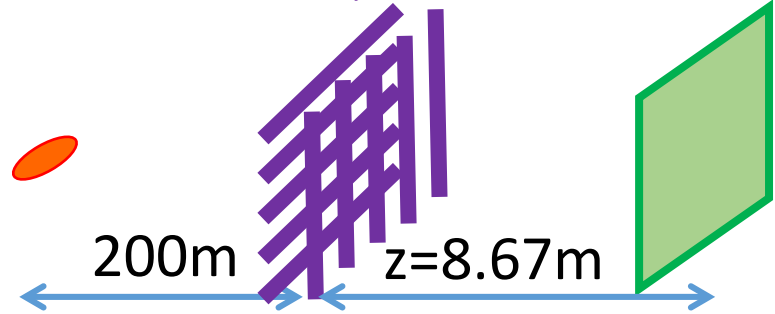
# 2次元撮像にも成功

$E_x = 12.4 \text{ keV}$ ,  $z = 867 \text{ cm}$



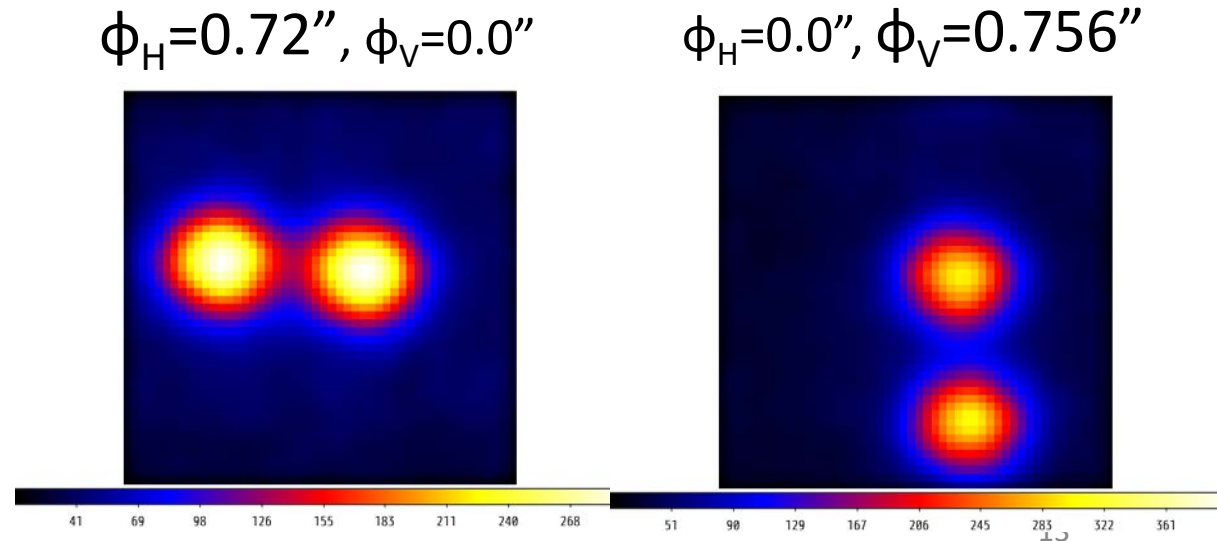
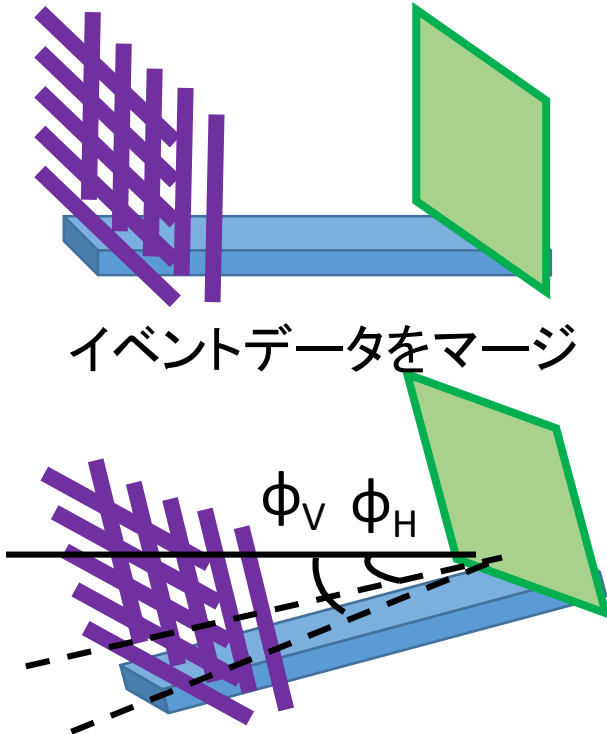
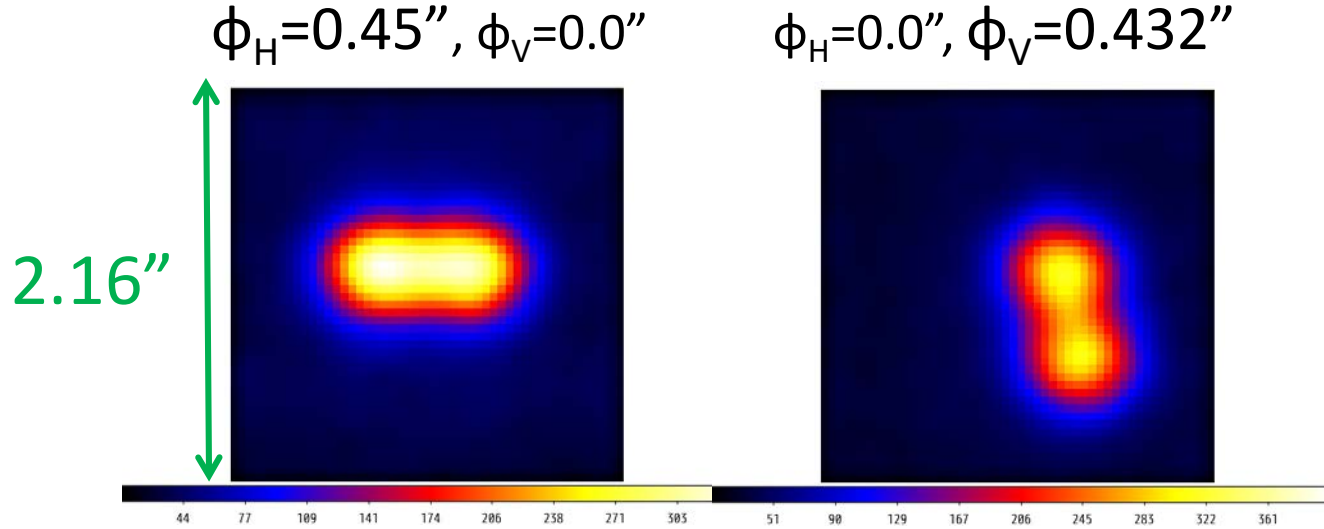
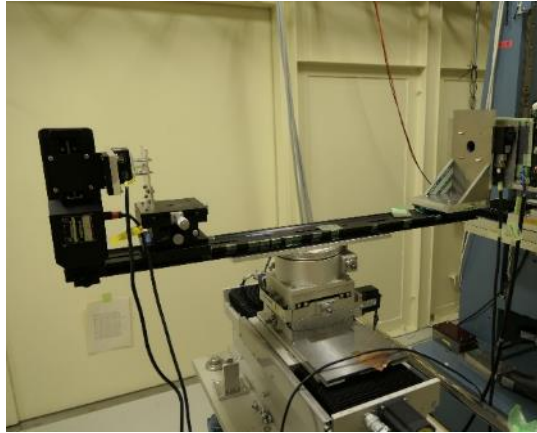
Gratingx2  
 $d = 9.6 \mu\text{m}$ ,  $f = 0.2$

CMOS 2.5  $\mu\text{m}$  pix  
GMAX0505



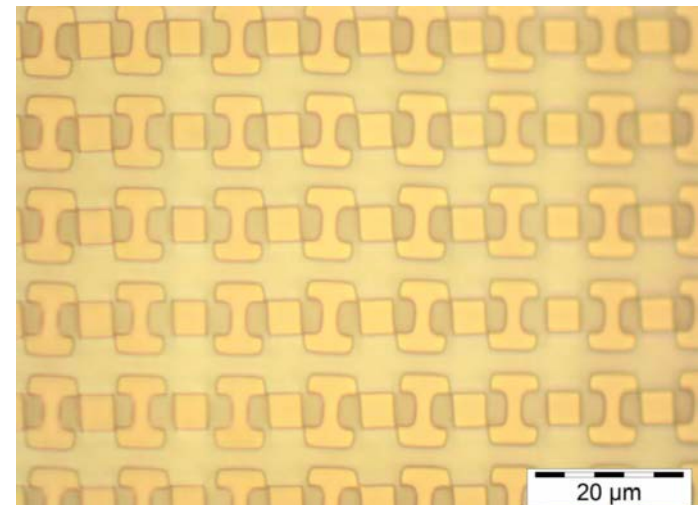
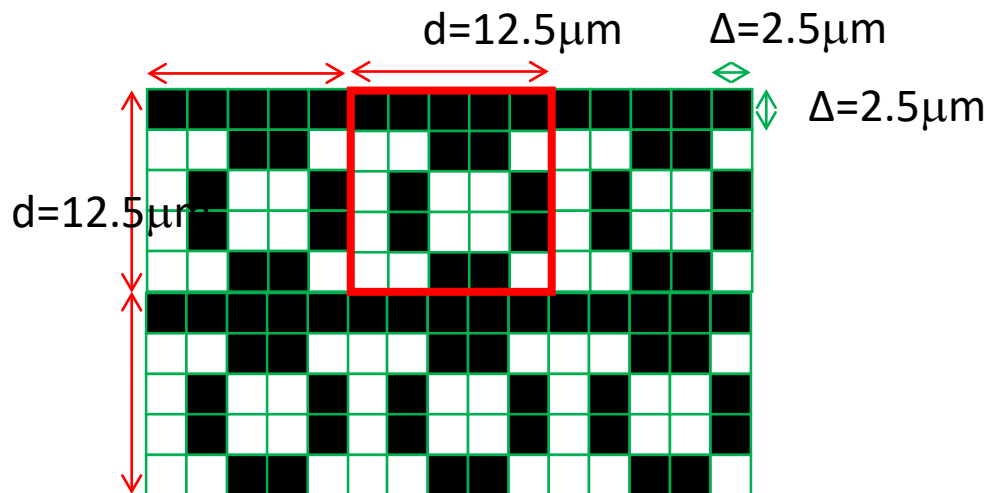
光源の拡がり  $0.06''$  を考慮すると  $0.075''$   
いずれにせよ過去最高

# z=0.92m 光学台の向きを変えてデータ取得 イベントデータをマージ=2個の天体の観測模擬

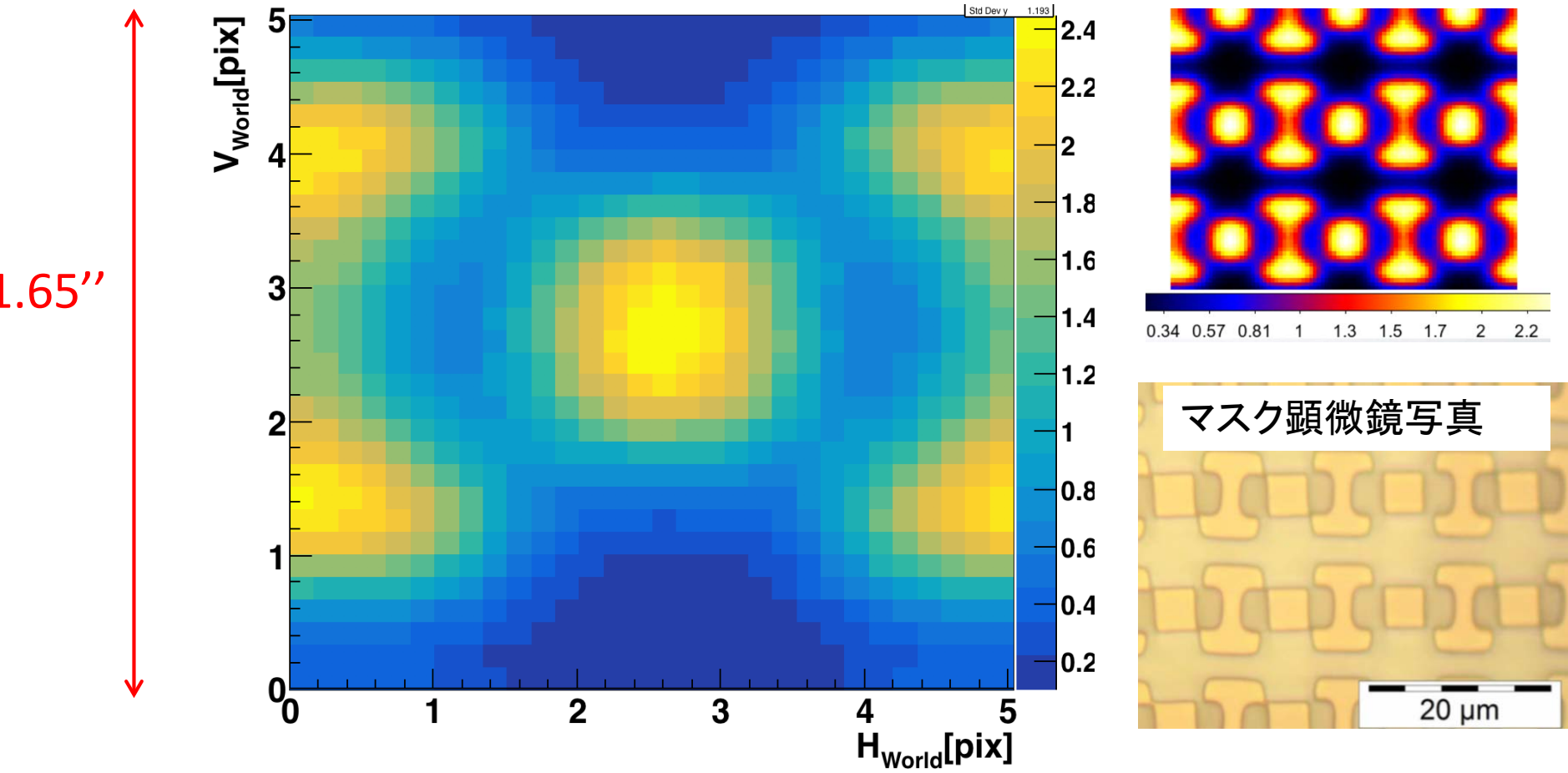


# さらに新提案：多重化コード化マスク

- 開口率 $f=0.2$ の格子を2枚重ねてピンホールをつくると、透過率は $f^2=0.04$ まで劣化する
- 集光力のないMIXIMの場合、致命的
- 解像度と有効面積を両立するために、ピンホールに置き換える手法といえは、、、コード化マスク！
- 単純なスリット、ピンホールの代わりに**コード化マスクを多数並べて干渉像**は得られないか？

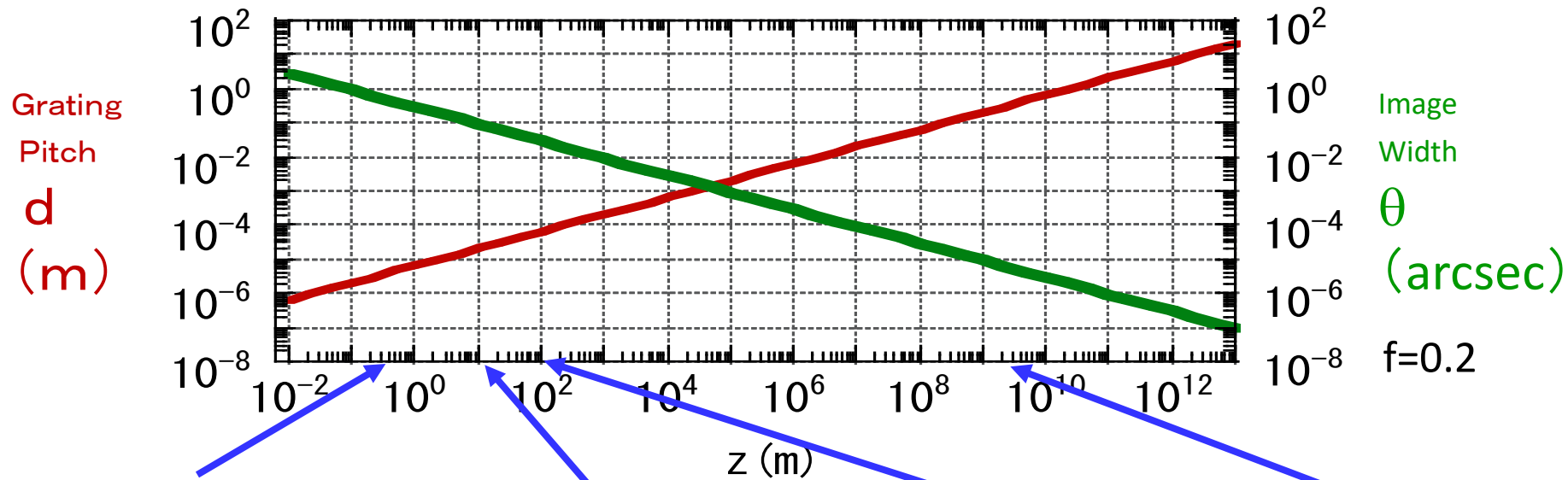


## X線イベント2D重ねあわせマップ preliminary



多重化コード化マスクでもTalbot干渉像が得られた!

干渉像を(普通に)decodeすれば分解能と有効面積を両立できるはず



MIXIM-S (Small)

$z=50\text{cm}$

$\theta=0.4''$

$d=5\mu\text{m}, f=0.2$

-P (Parasite)

$z=10\text{m}$

$\theta=0.09''$

$d=22\mu\text{m}, f=0.2$

-Z (Zoom)

$z=10\sim 100\text{m}$

$\theta=0.1''\sim 0.01''$

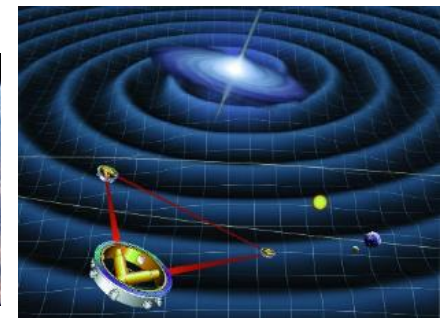
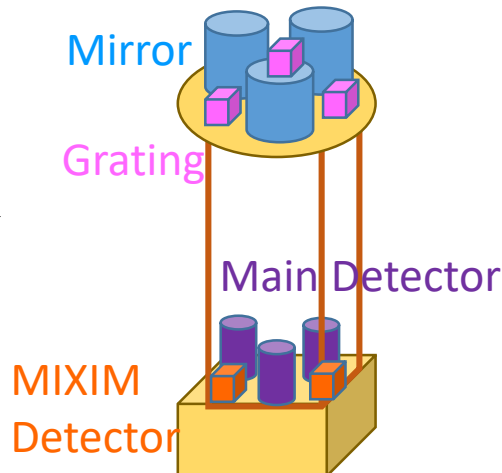
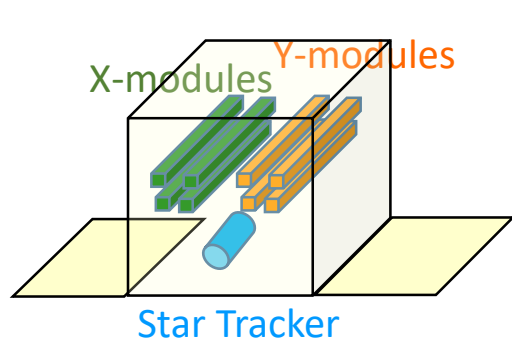
$d=71\mu\text{m}, f=0.1$

-L (Large/LISA)

$z=2.5\times 10^6\text{km}$

$\theta=3\mu\text{arcsec}$

$d=35\text{cm}, f=0.1$

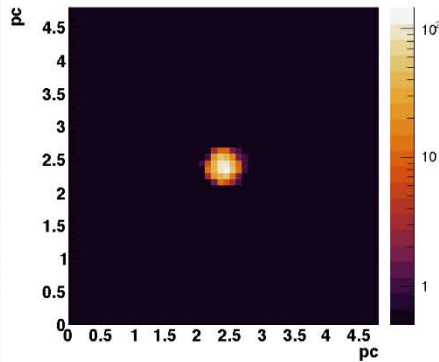


# 《観測シミュレーション》

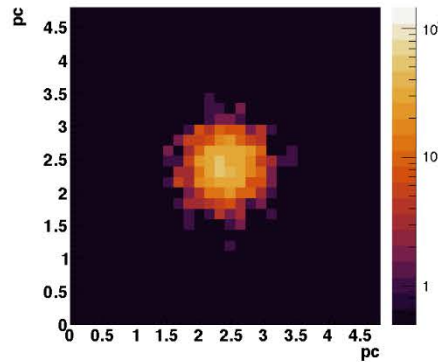
朝倉M論2020

$z = 866.5$  cm の MIXIM で Circinus Galaxy を観測する場合を想定  
6.2-6.5keVのバンドを使用、検出器の総有効面積 $10\text{cm}^2$ 、マスクの透過率0.5を仮定  
T=1Msの観測で1000 photonが得られる

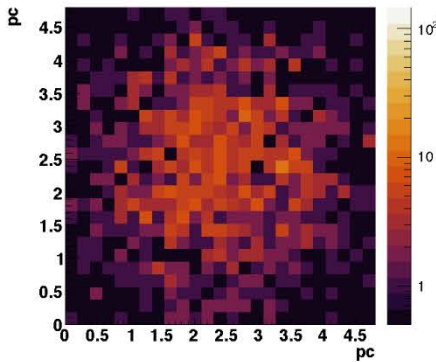
(a)  $\sigma \sim 0.1$  pc



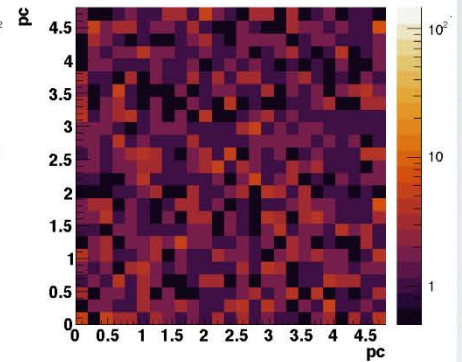
(b)  $\sigma \sim 0.3$  pc



(c)  $\sigma \sim 1$  pc

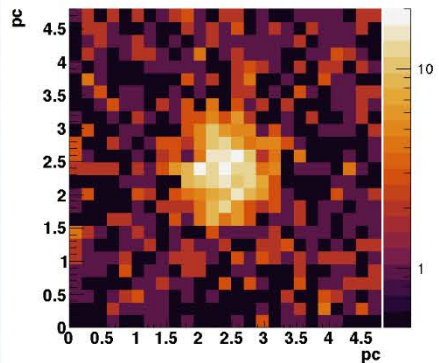


(d)  $\sigma \sim 3$  pc

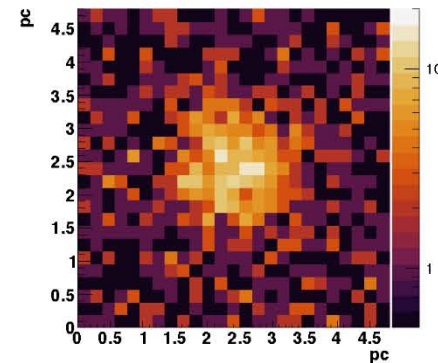


MIXIMで観測すると、

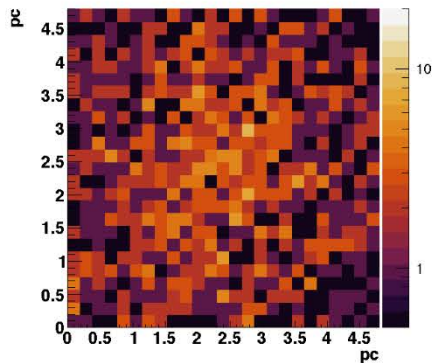
(a)  $\sigma \sim 0.1$  pc



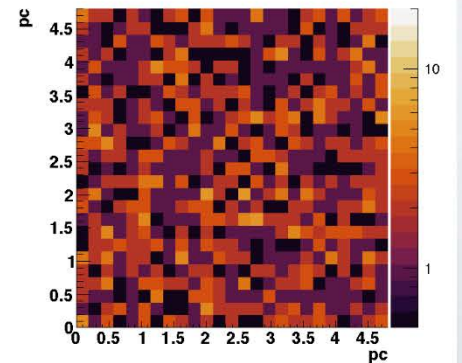
(b)  $\sigma \sim 0.3$  pc

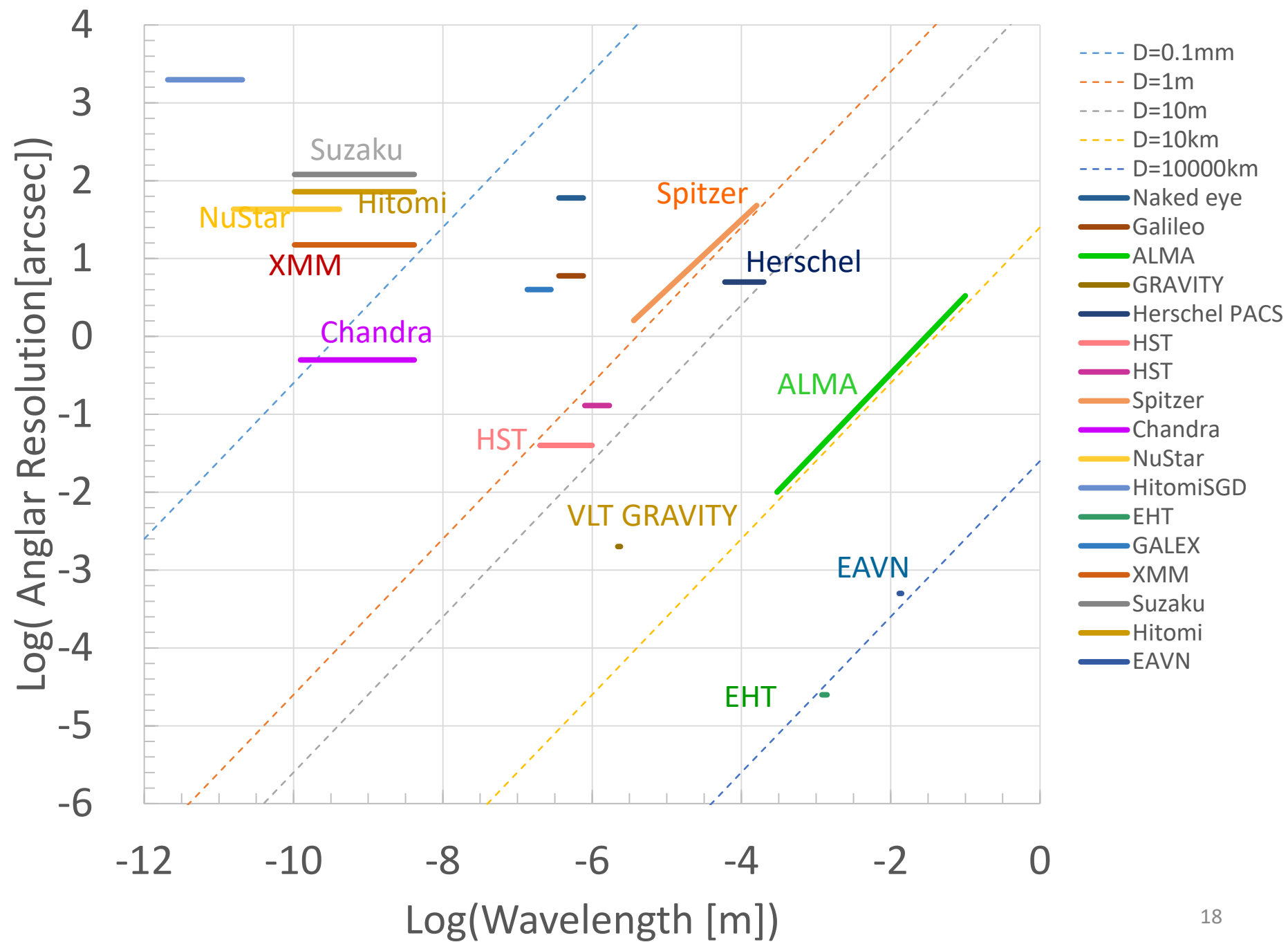


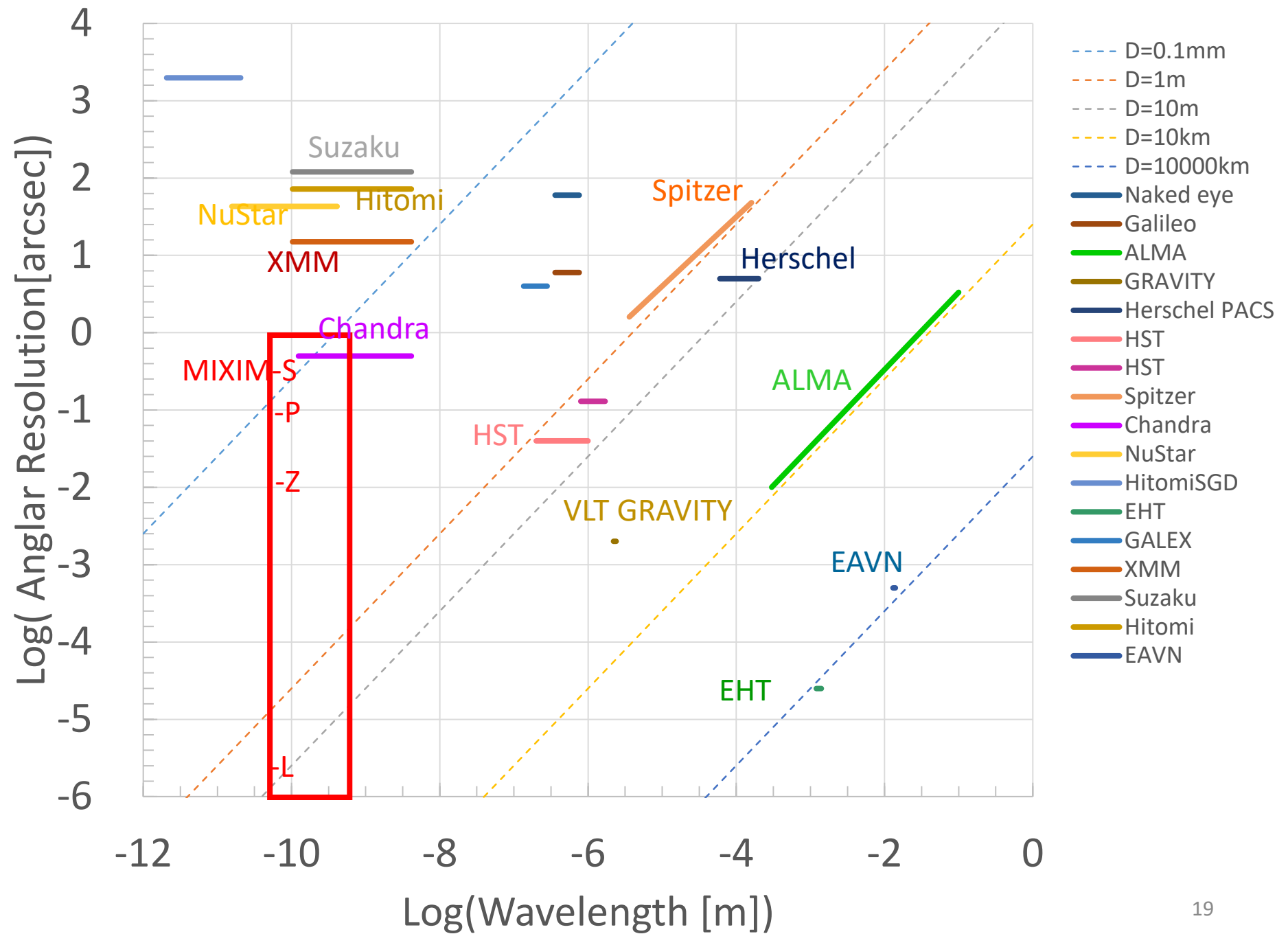
(c)  $\sigma \sim 1$  pc

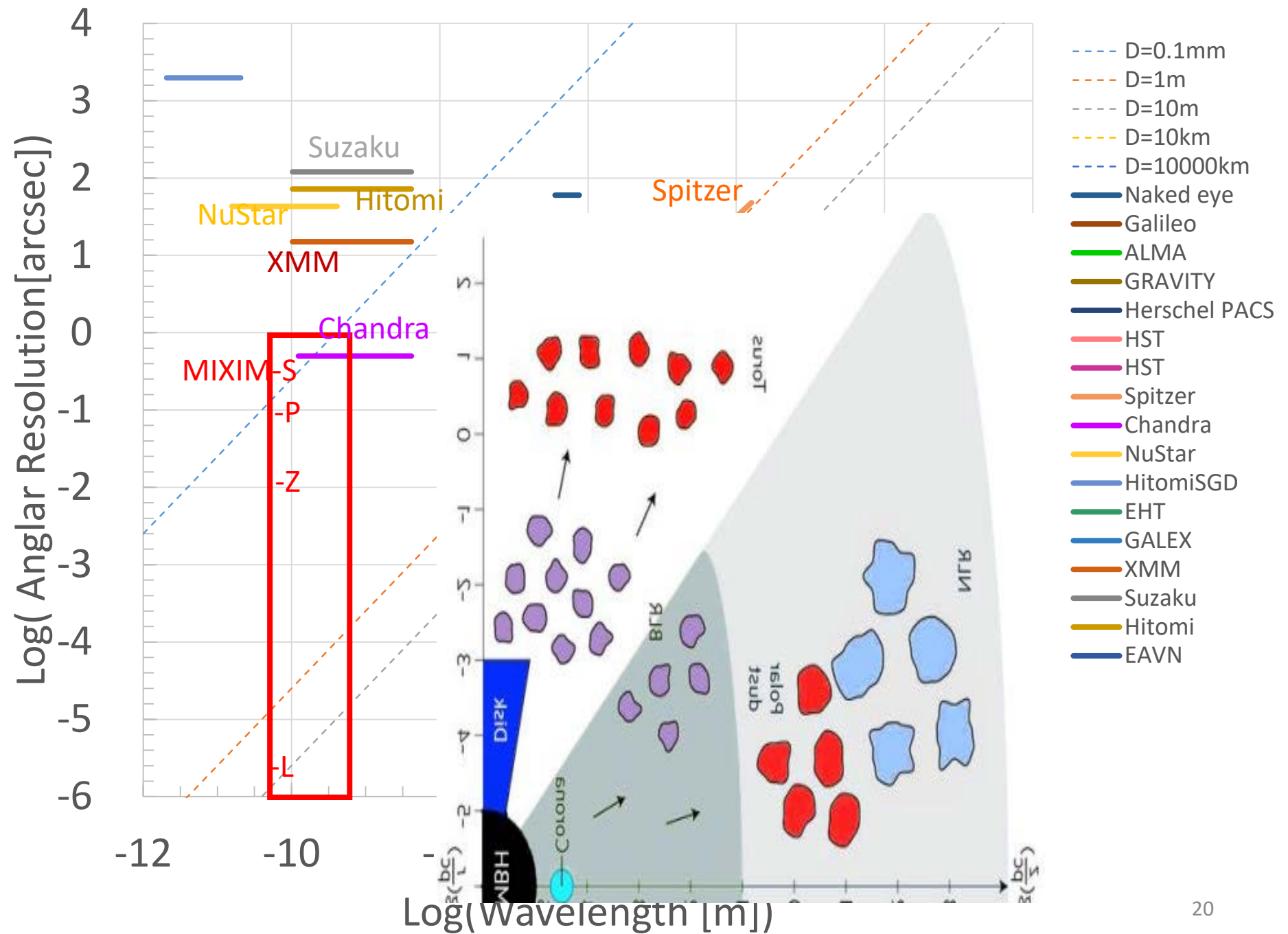


(d)  $\sigma \sim 3$  pc









# 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 (0.1-1deg) が必要
- 有効面積=幾何学面積  $\times f \times$  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

>mCrab ほぼ点源を  
総露光時間を長く  
とって観測するのが  
ベースライン

- 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
- 位置天文のノウハウが参考になるかも; 相談中
- X線に限らず、超高解像度の観測装置共通の問題

- 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の検出層厚は現状では薄い, e.g. 5um; ただし20umくらいのCMOSは製作されだしている。

- .....