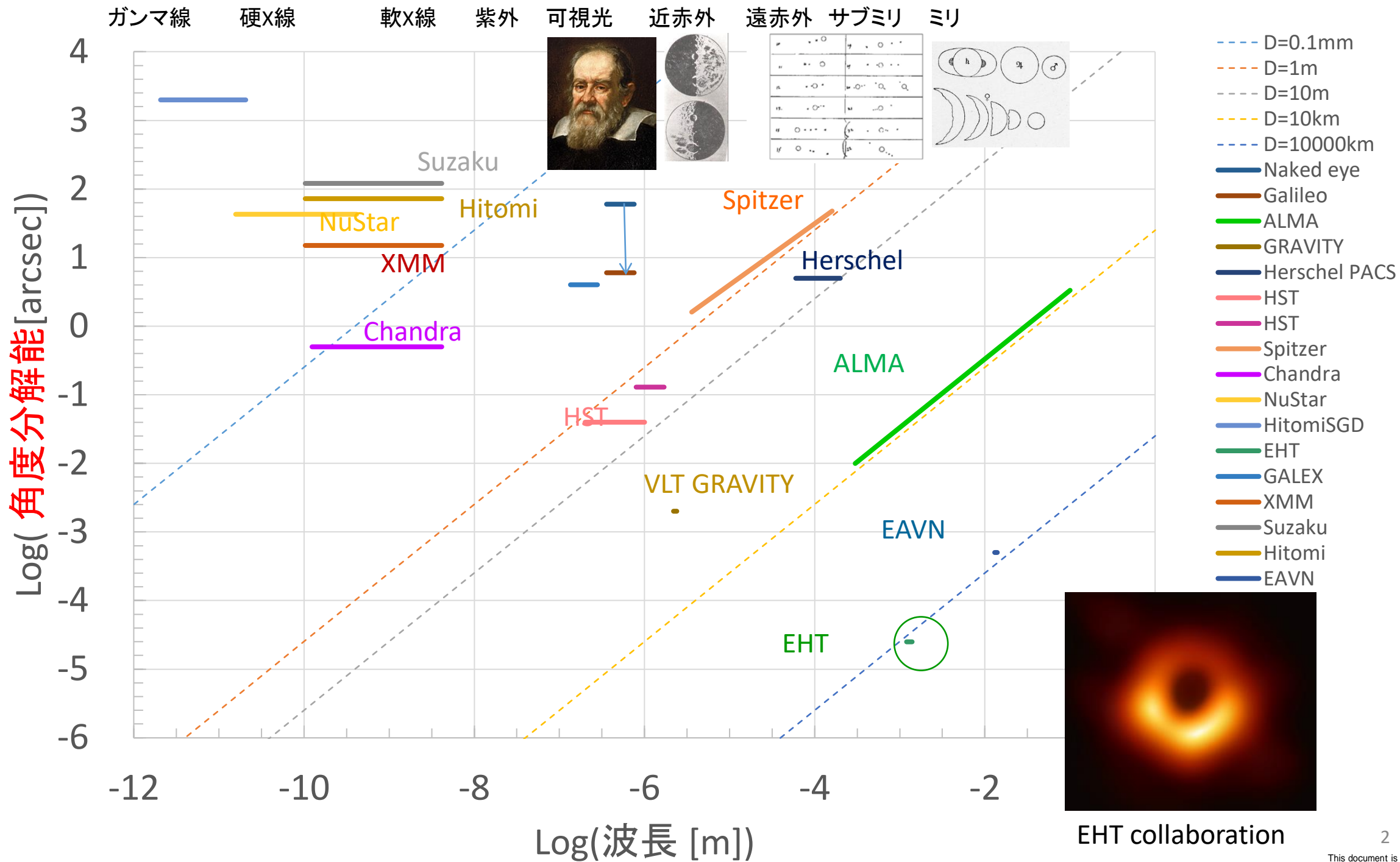
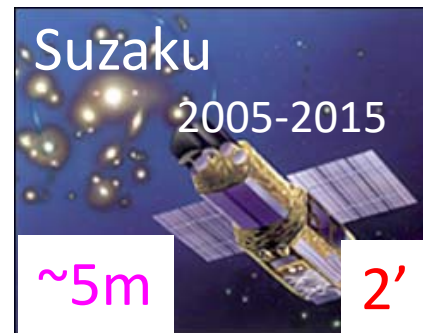
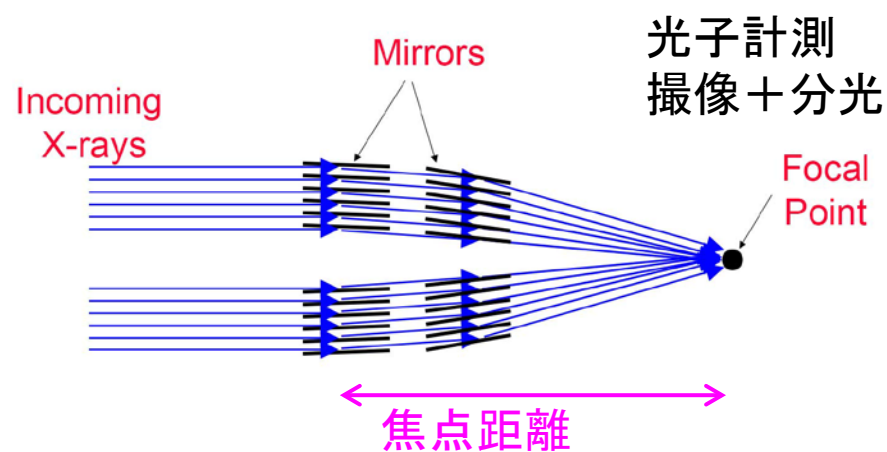
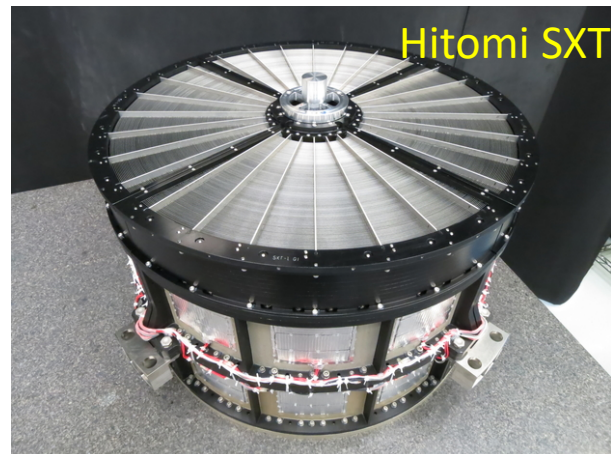


サブ秒角からマイクロ秒角のX線撮像 を実現する多重像X線干渉計MIXIM

林田 清 (大阪大学/JAXA)、
朝倉一統、佐久間翔太郎、石倉彩美、澤上拳明、鴨川航、
米山友景、野田博文、岡崎貴樹、花岡真帆、服部兼吾、
松下友亮、峯田大靖、善本真梨那、大出優一、袴田知宏、
松本浩典、常深博 (大阪大学)、
栗木久光、寺島雄一 (愛媛大学)、中嶋 大 (関東学院大学)、
川口俊宏 (尾道市大)



あすか衛星(1993-)以来、斜入射ミラー+ X線CCDはX線天文台の標準形



- 高い角度分解能にはX線反射鏡搭載の巨大衛星が必要
- Chandra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
- 天文用X線干渉計(変形マッハツェンダー型MAXIMなど)は非現実的

これらの常識に対する挑戦 → MIXIM

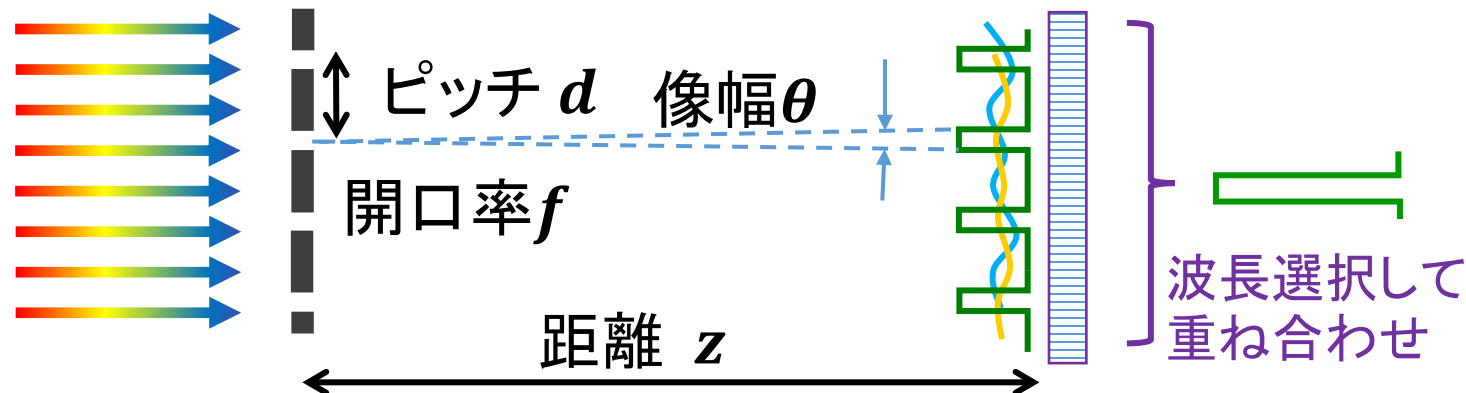
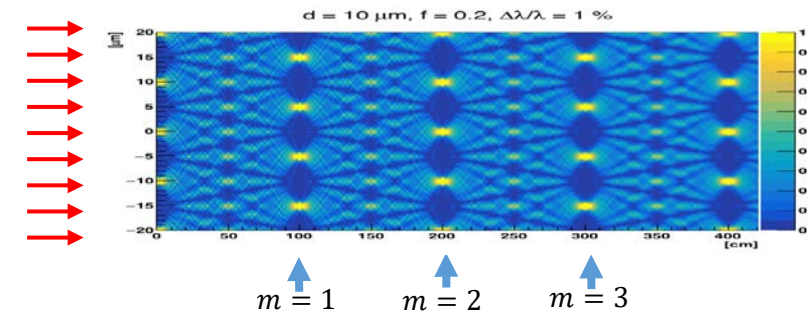
Multi Image X-ray Interferometer Method

Hayashida+ 2016,2018,2020

- タルボ効果を利用するマルチスリット(ピンホール)カメラ
- 格子とピクセル検出器で構成
- 波長 λ 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
- $z = md^2/\lambda = 0.5m \left(\frac{m}{2}\right) \left(\frac{d}{5\mu m}\right)^2 / \left(\frac{\lambda}{0.1nm}\right)$
- $\theta = \frac{fd}{z} = f\lambda/dm = 0.4'' \left(\frac{f}{0.2}\right) \left(\frac{\lambda}{0.1nm}\right) / \left(\frac{d}{5\mu m}\right) \left(\frac{m}{2}\right)$



<https://i.redd.it/chq39eybn4hz.jpg>

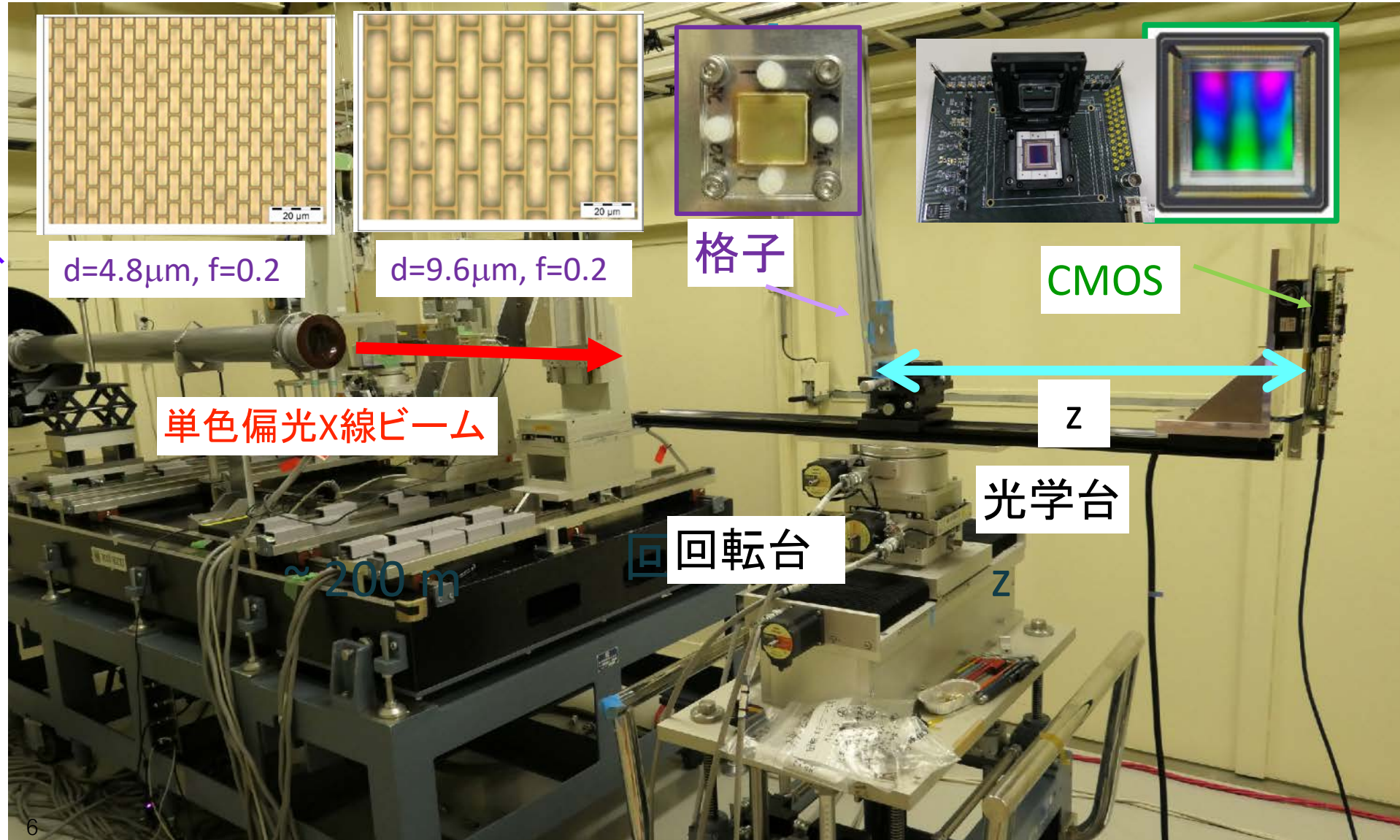


SPring-8 BL20B2 200m ビームライン

Gpixel GMAX0505
2.5 μm pixel 25M
室温動作でFWHM 176eV
See Asakura+2019 JATIS

2017 Nov- 2020 Jul. 複数回の地上実験
Hayashida+2018, Asakura+2020 etc.

microWorks
/ASICON
LIGAプロセス



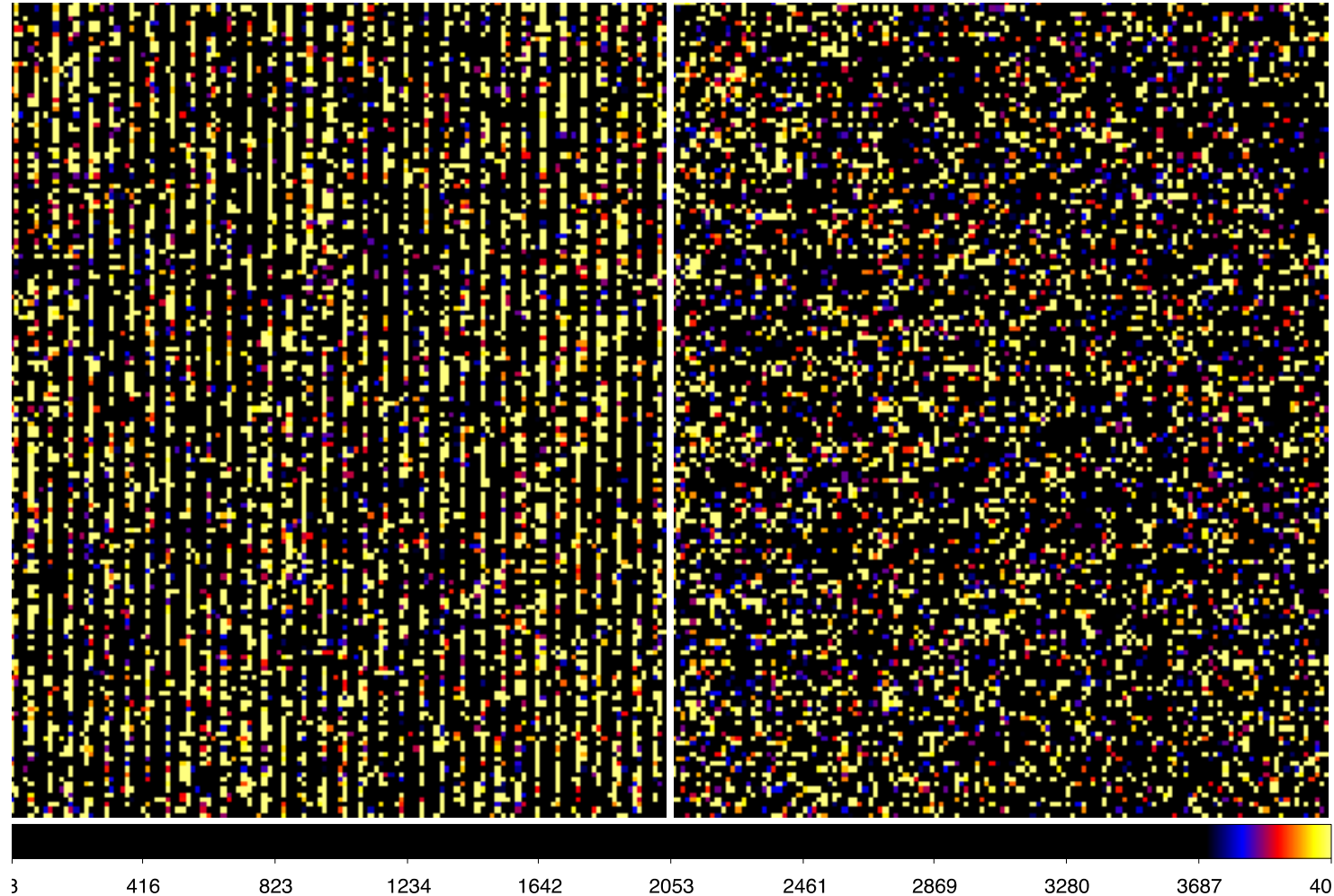
$d=9.6\mu\text{m}, f=0.2, z=92\text{cm}$ フレームイメージ 6s露出

$E_x=12.4\text{keV}$

$E_x=10.0\text{keV}$

($m=1.0$; タルボ条件満たす)

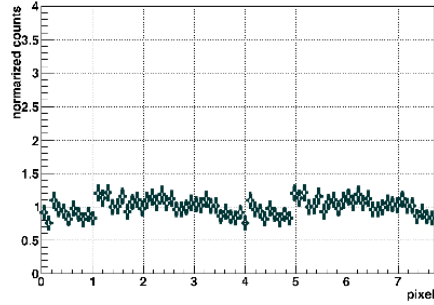
($m=1.24$; 満たさない)



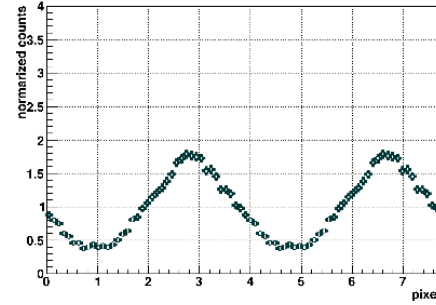
デモ目的以外のデータ取得では、減衰板を使用し露出時間を0.1-1sにしてパイルアップを避けている

Energy Dependence of Visibility $(\text{MAX}-\text{MIN})/(\text{MAX}+\text{MIN})$

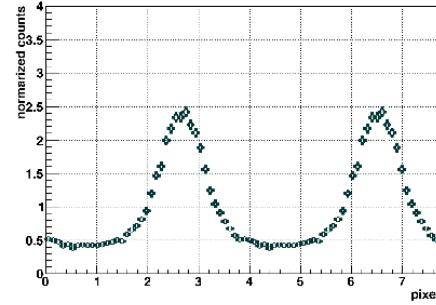
E = 10.0 keV



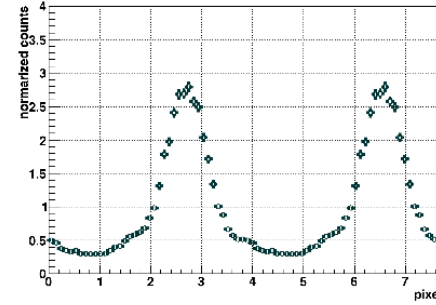
E = 11.6 keV



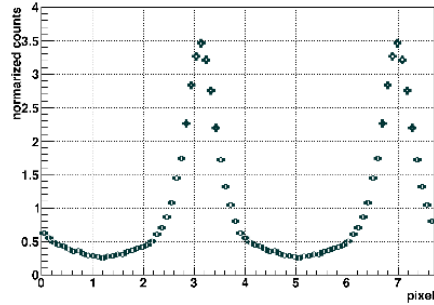
E = 11.8 keV



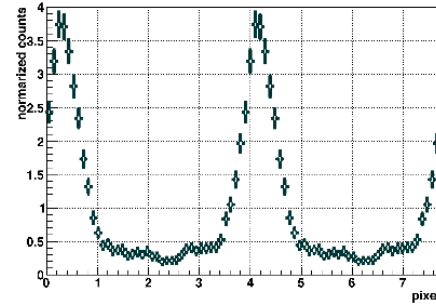
E = 12.0 keV



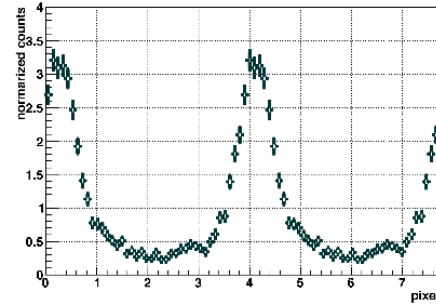
E = 12.2 keV



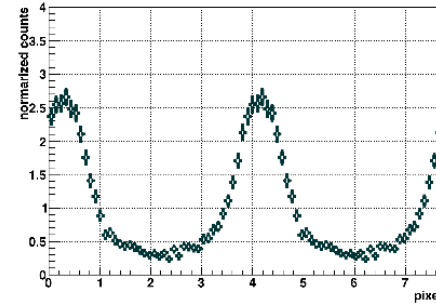
E = 12.4 keV



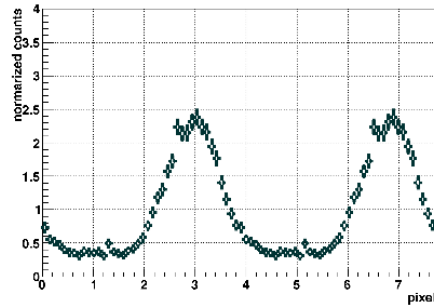
E = 12.6 keV



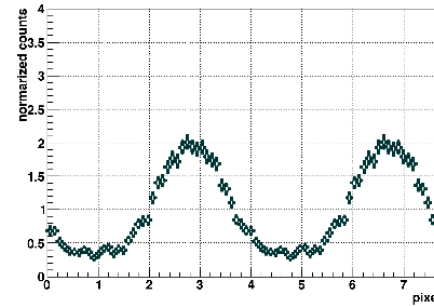
E = 12.8 keV



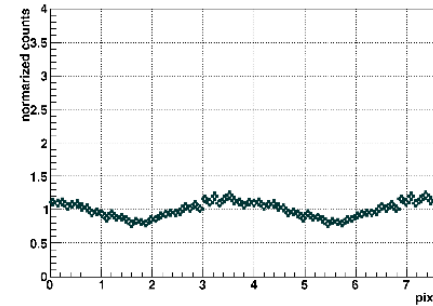
E = 13.0 keV



E = 13.2 keV

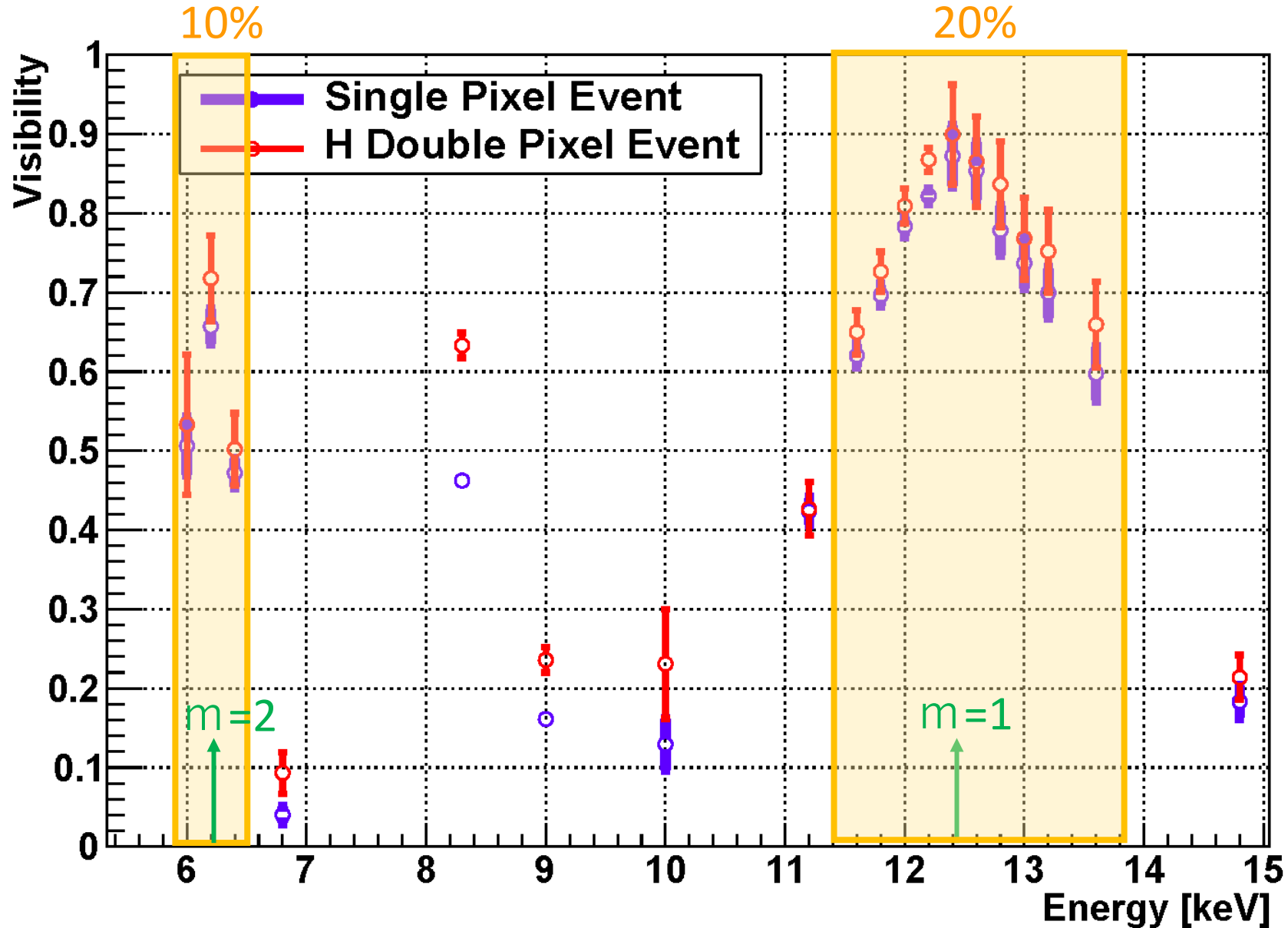


E = 14.8 keV



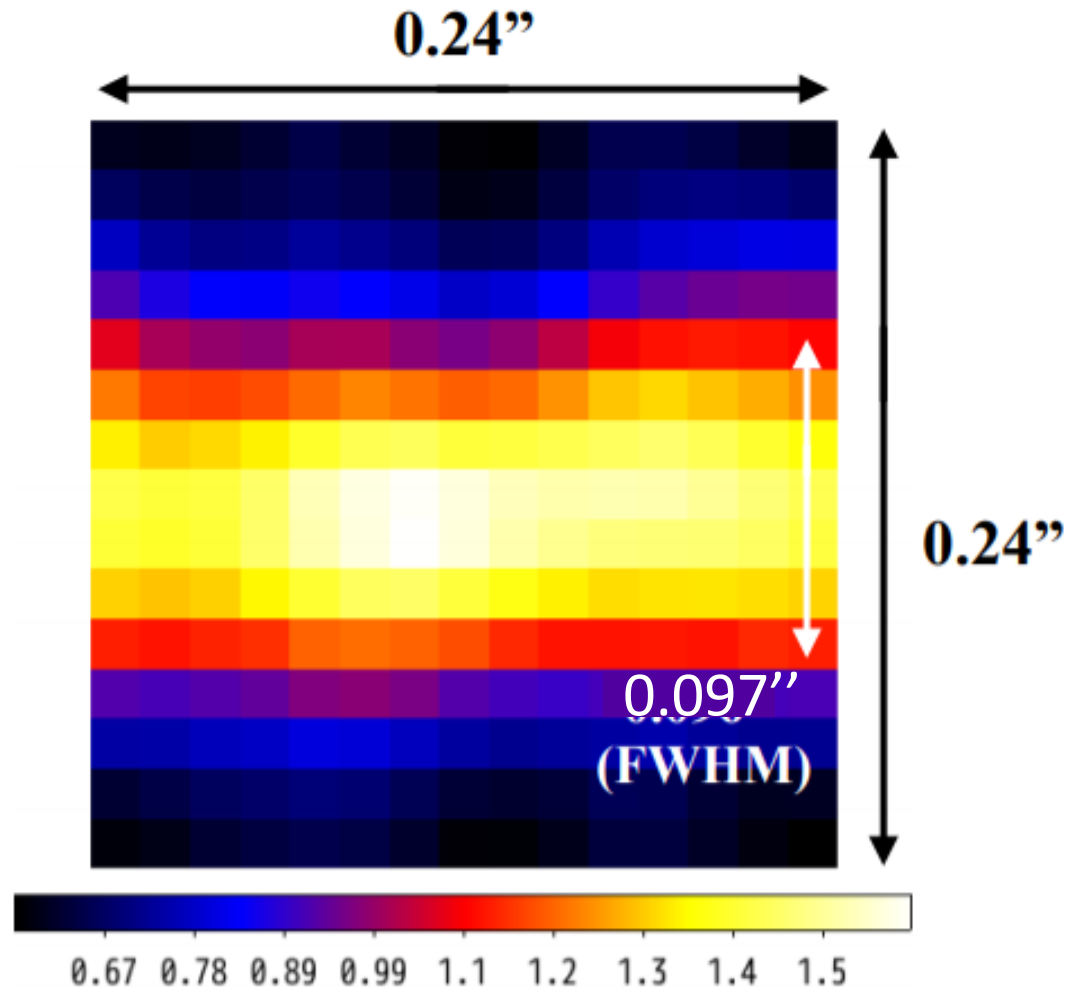
干渉縞コントラスト (Visibility) → バンド幅

$d=9.6\mu\text{m}, f=0.2, z=92\text{cm}$

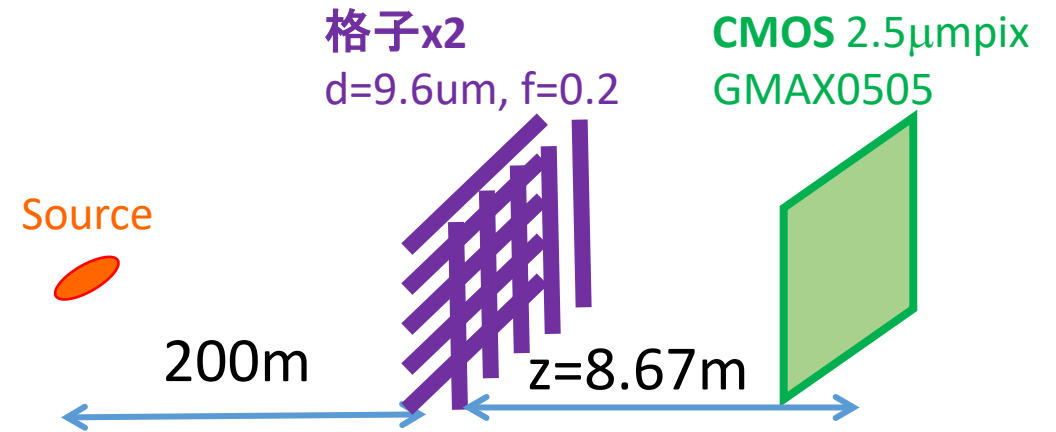


2Dイメージも取得

Ex=12.4keV, z=8.67m



Horizon elongation is intrinsic to the synchrotron source



FWHM 0.097''

シンクロトロン光源の広がり
0.06''を考慮すると

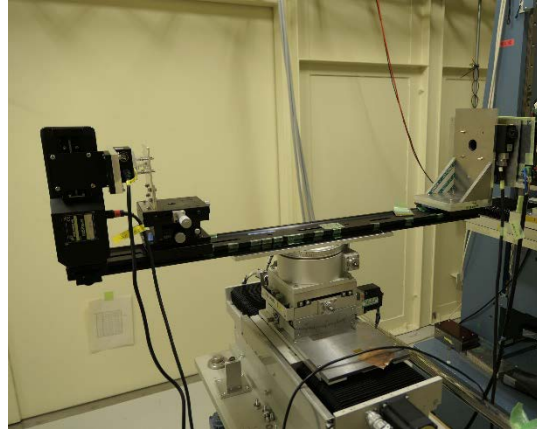
FWHM 0.075''

X線天文用broad band撮像系
として世界最高

二天体観測の“実験的”シミュレーション

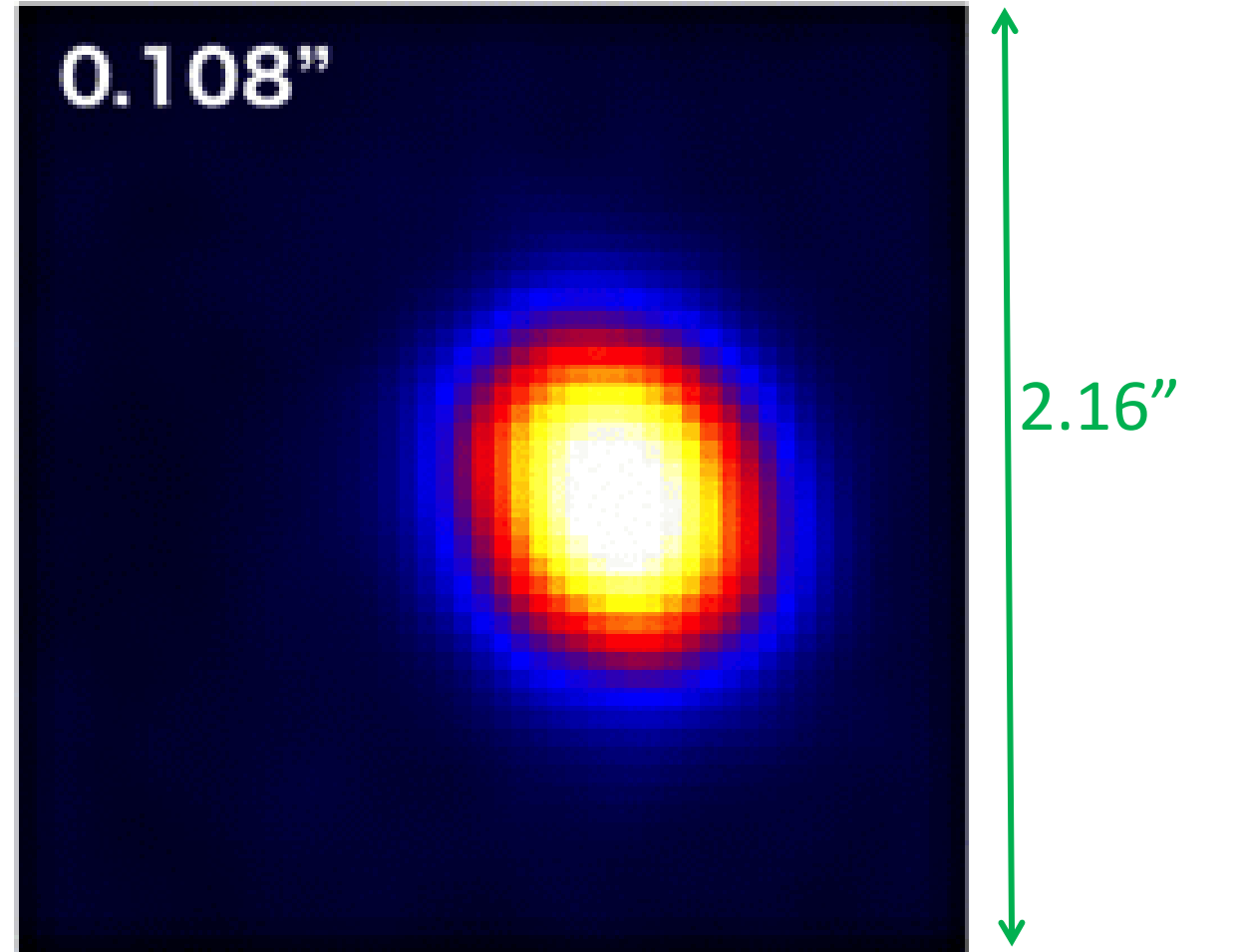
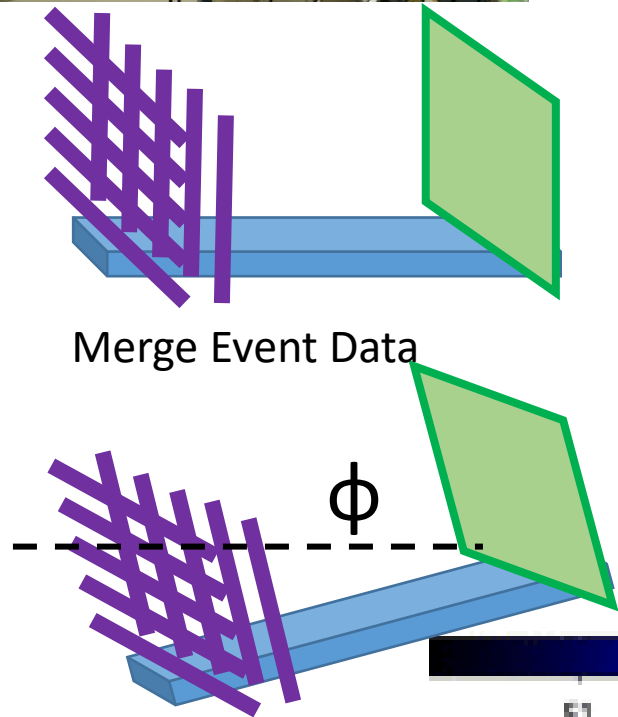
z=92cm, 光学台を回転

地上における8 GeV 電子ジェットの見測

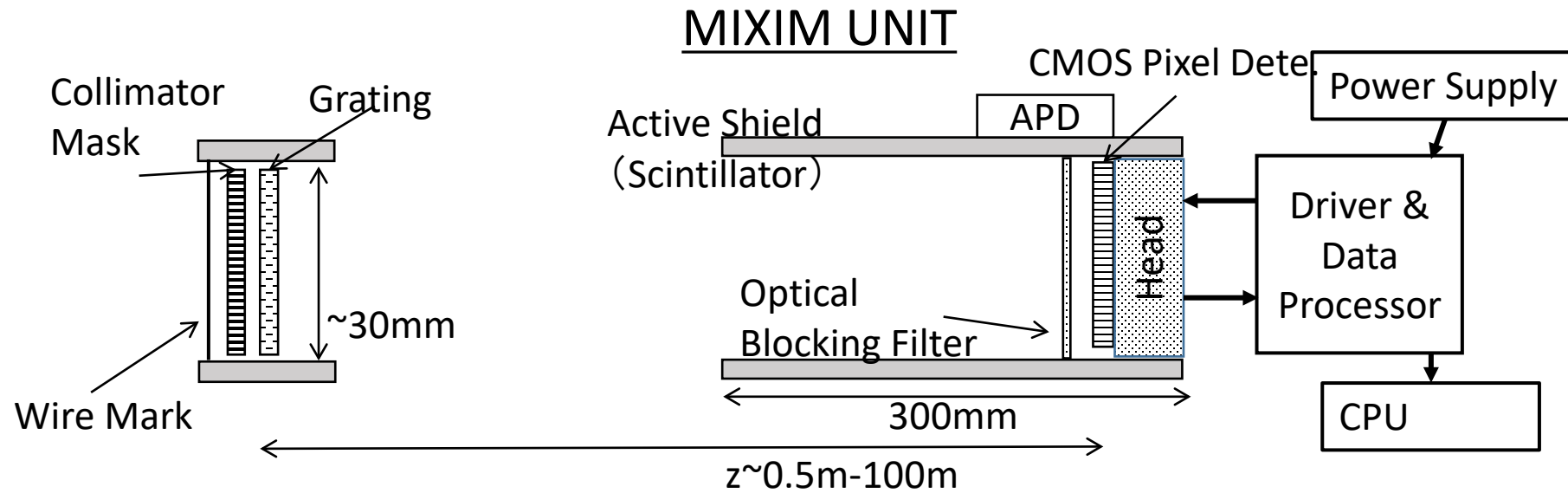


$\phi = 0.108''$

2.16''

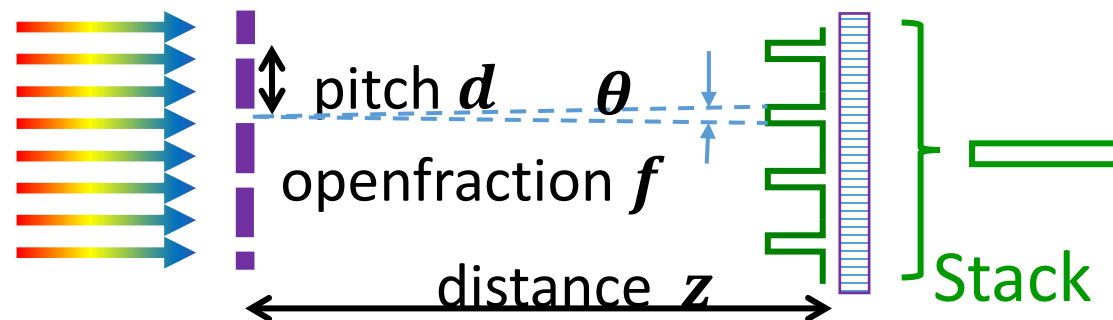


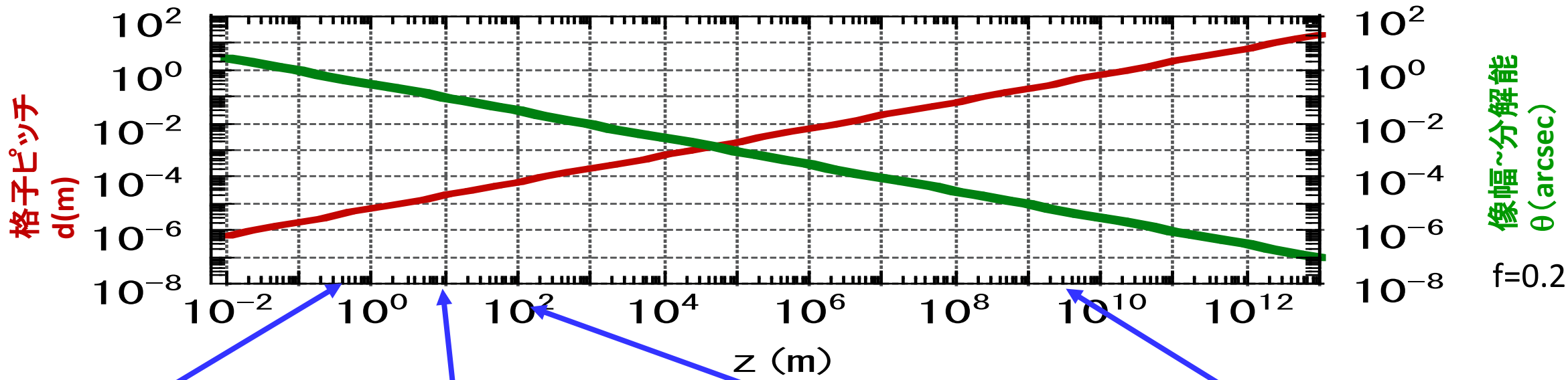
MIXIM は ユニット数も d&zも Scalable



- $z = md^2/\lambda = 0.5\text{m} \left(\frac{m}{2}\right) \left(\frac{d}{5\mu\text{m}}\right)^2 / \left(\frac{\lambda}{0.1\text{nm}}\right)$

- $\theta = fd/z = f\lambda/dm = 0.4'' \left(\frac{f}{0.2}\right) \left(\frac{\lambda}{0.1\text{nm}}\right) / \left(\frac{d}{5\mu\text{m}}\right) \left(\frac{m}{2}\right) = 0.4'' \left(\frac{f}{0.2}\right) \sqrt{\left(\frac{\lambda}{0.1\text{nm}}\right) / \left(\frac{z}{0.5\text{m}}\right) \left(\frac{m}{2}\right)}$





MIXIM-S (Small)

$z=0.5\text{m}$
 $\theta=0.4''$

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

-P (Parasite)

$z=10\text{m}$
 $\theta=0.09''$

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

-Z (Zoom)

$z=10\sim 1000\text{m}$
 $\theta=0.1''\sim 0.001''$

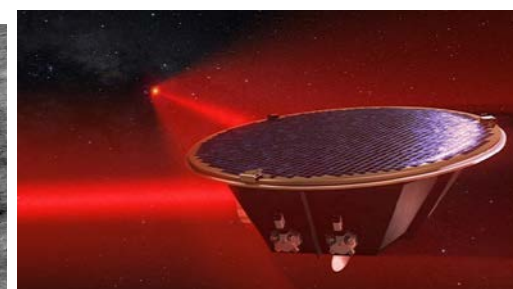
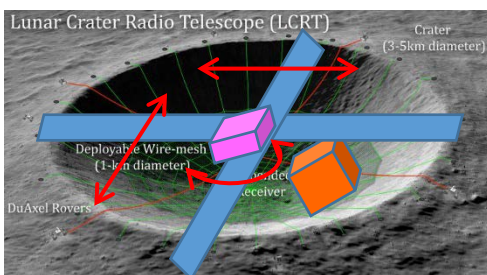
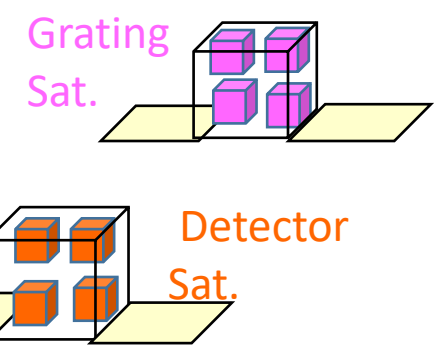
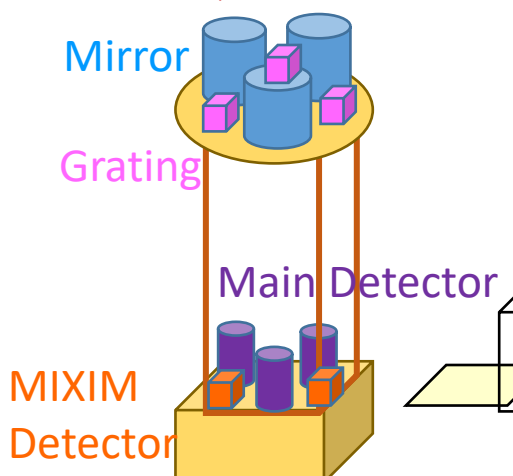
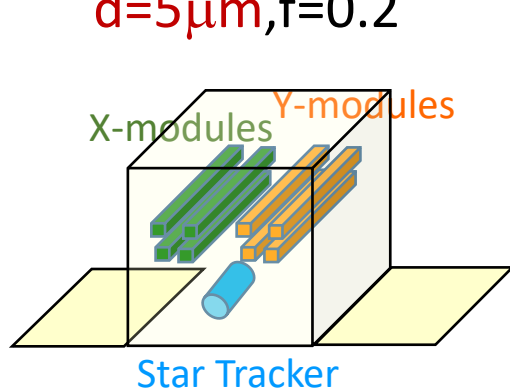
$d=71\mu\text{m}, f=0.1$

-L (Large/LISA)

$z=2.5\times 10^6\text{km}$
 $\theta=3\mu\text{arcsec}$

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

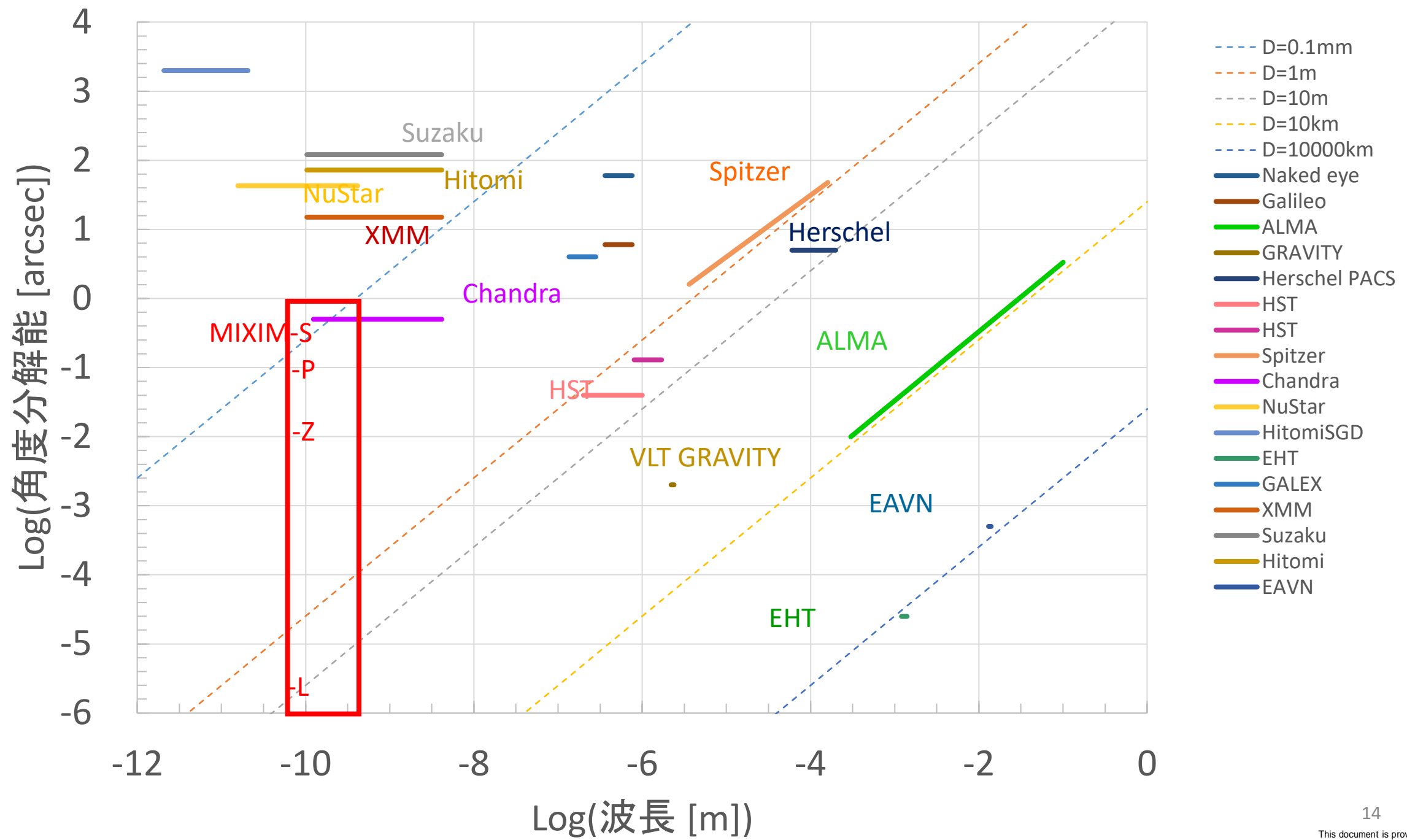
-M (Moon)



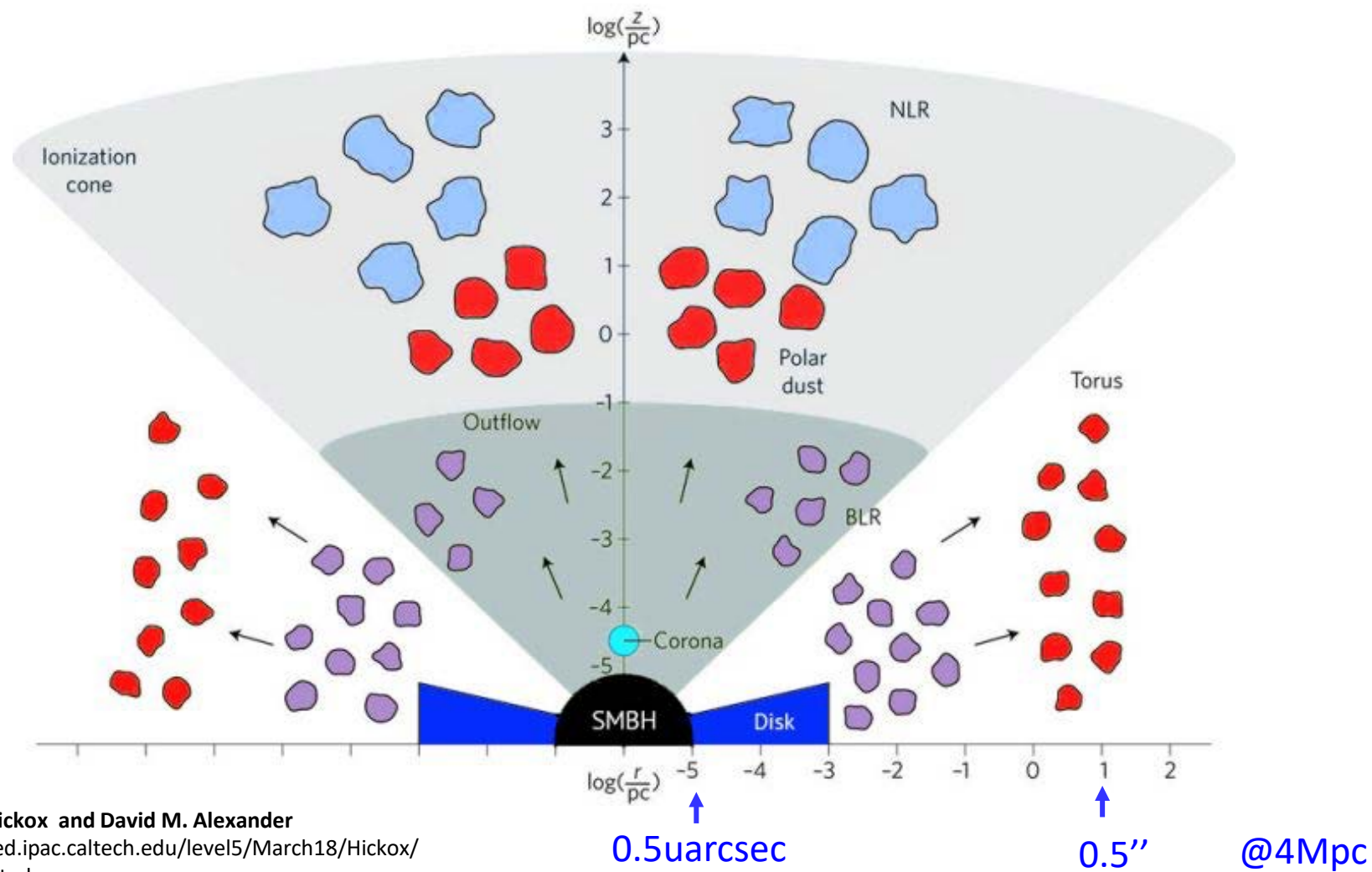
Background image LCRT by Saptarshi Bandyopadhyay

LISA mission Credit: AEI/MM/exozet

ガンマ線 硬X線 軟X線 紫外 可視光 近赤外 遠赤外 サブミリ ミリ

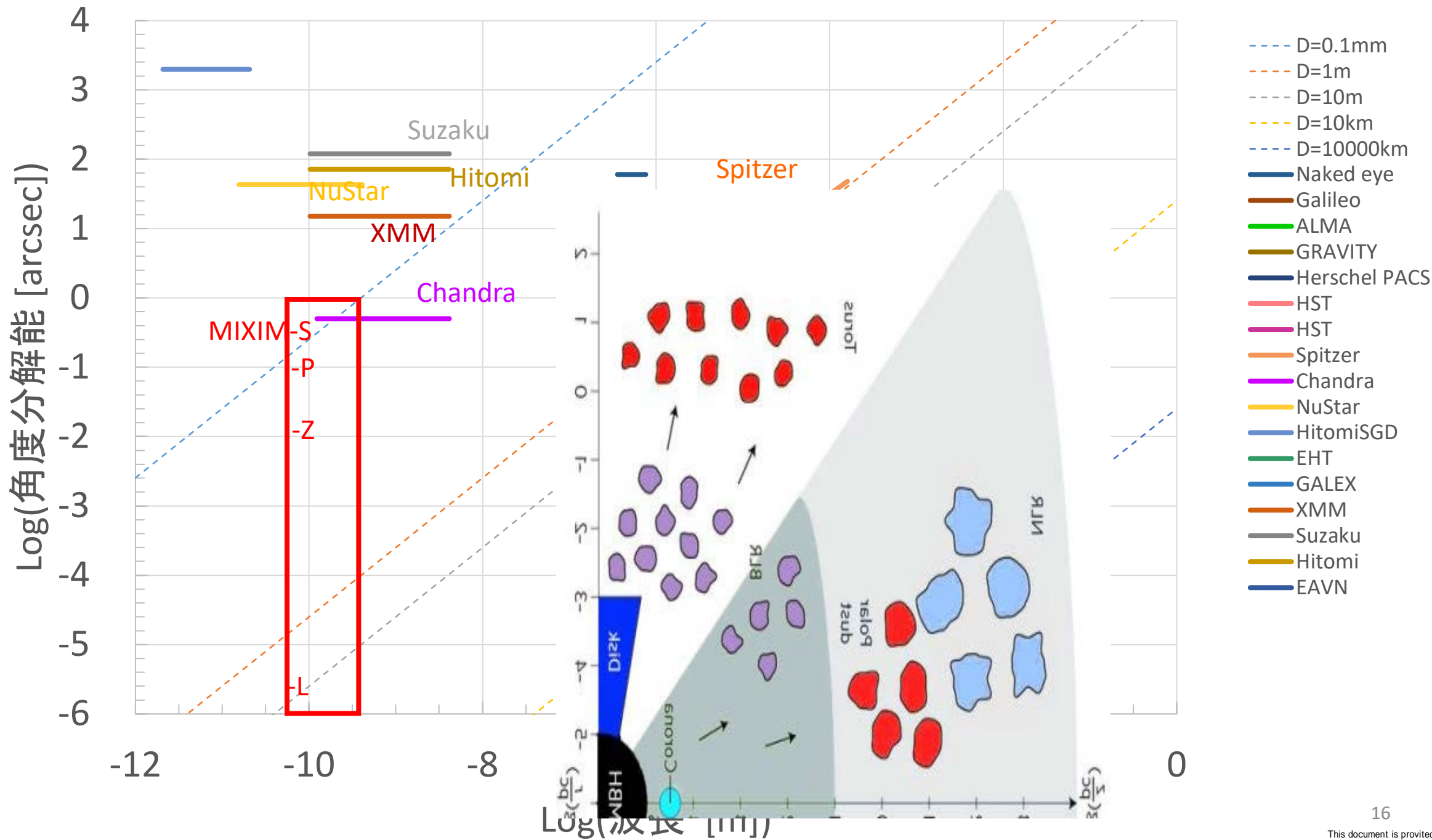


観測ターゲットの一つ 近傍AGNs の”想像”図



この図の6ケタのスケールの構造がMIXIMのターゲット

ガンマ線 硬X線 軟X線 紫外 可視光 近赤外 遠赤外 サブミリ ミリ



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) 必要
 - 有効面積=幾何学面積 x 検出効率
 - バックグラウンドはコリメータ衛星並み
- 狭い “1周期” FOV

明るい近傍AGNを長時間観測するのが目的の一つ
恒星フレアもターゲット

ミッション実現の技術的課題

- 姿勢決定精度 は、撮像解像度より良い必要がある
 - 一般的な星姿勢計では不十分→微小ピクセルCMOSで開発中
 - ただし、MIXIMに限らず、超高解像度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
- CMOS検出器の検出効率はより向上させたい
-

まとめ

- 斜入射ミラーとは全く異なる概念の撮像システムMIXIMを発明
- X線天文用broadband撮像系で、世界最高の0.1秒をきる分解能の二次元撮像を達成
- MIXIMはスケラブルで、サブ秒角からマイクロ秒角のミッションが可能
- メインターゲットの一つ近傍AGN:トーラスからコロナ、そして事象の地平線へ
- 電波、サブミリ、赤外と相補的に、SMBH周辺物質の分布、組成、速度を測定
- 1stステップは超小型衛星でSco X-1をChandra以上の分解能で観測
- Method, Module, Missionいずれの形態でも寄与可能
- 0.1秒角からマイクロ秒角には編隊飛行が必須
 - 高精度姿勢検出と格子衛星の軌道制御が課題
 - 超小型編隊飛行 & SILVIA関係者とも相談中

Simulation Circinus Galaxy(Sy2) @4Mpc

$z = 8.665$ m, $E_x = 6.2-6.5$ keV

Total Detector Effective Area = 10 cm^2 , Grating Efficiency = 0.5

$T = 1 \text{ Ms}$ yields about 1000 photons

Need Development

Input =

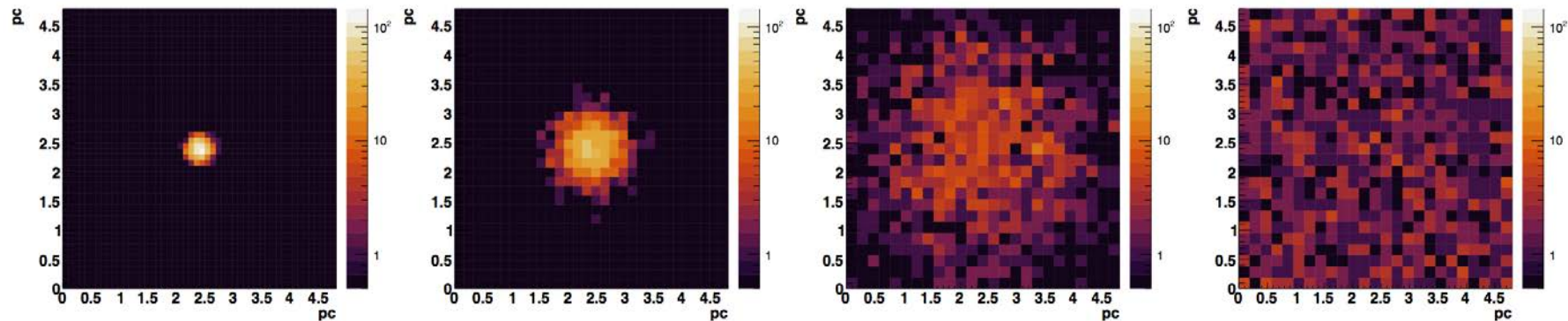
2D Gaussian Profile is assumed

(a) $\sigma \sim 0.1$ pc

(b) $\sigma \sim 0.3$ pc

(c) $\sigma \sim 1$ pc

(d) $\sigma \sim 3$ pc



(a) $\sigma \sim 0.1$ pc

(b) $\sigma \sim 0.3$ pc

(c) $\sigma \sim 1$ pc

(d) $\sigma \sim 3$ pc

If
Observed
with MIXIM

