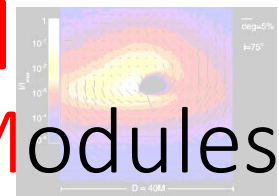
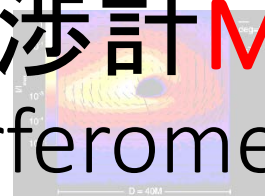
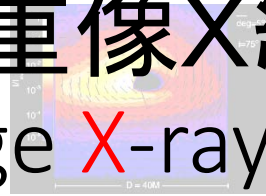
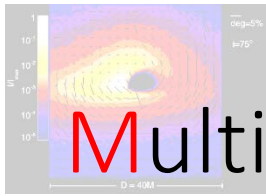


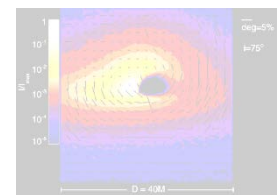
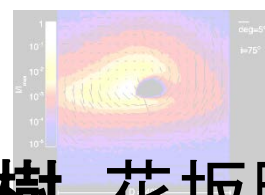
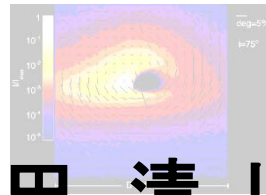
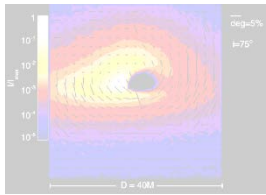
# サブ秒角でX線天体を撮像する

## 多重像X線干渉計MIXIM

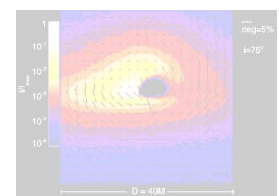
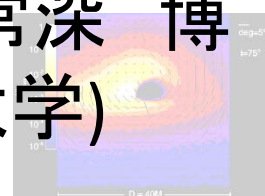
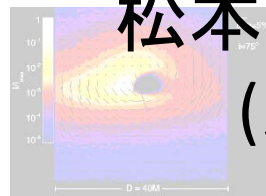
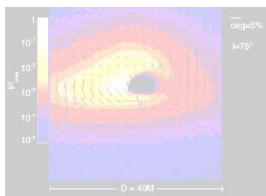
Multi Image X-ray Interferometer Modules



(サブ秒角X線撮像 & 偏光測定による近傍AGNトーラスの観測)



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



# X線天文衛星の観測装置

ぎんが 1987-1991



視野絞りor望遠鏡	検出器 位置検出	視野	角度分解能
コリメータ(ぎんが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	
コード化マスク(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
<b>斜入射反射鏡</b>	あり	0.1~1度	<b>0.5秒角~2分角</b>

MAXI 2009- ~1m



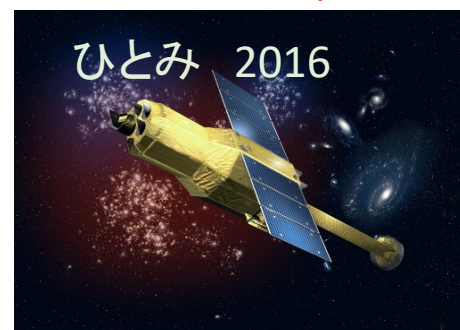
10m 0.5秒角



5m 2分角



6m/12m 1.3/1.7分角



12m 5秒角

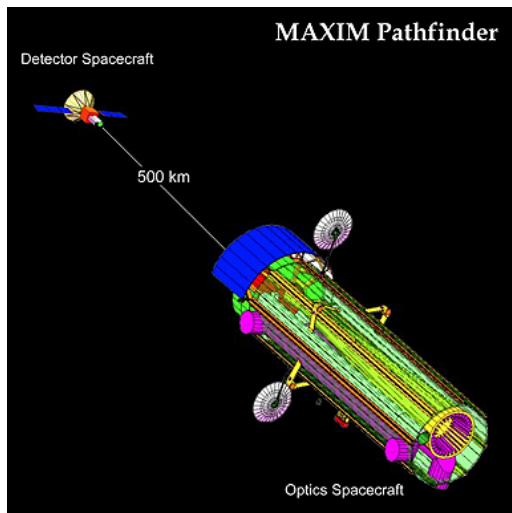


- 高い角度分解能を達成するためにはX線反射望遠鏡搭載の**巨大衛星**が必要
- Chandra衛星の角度分解能**0.5秒角**を再現する/超えるのは非常に難しい<sub>2</sub>

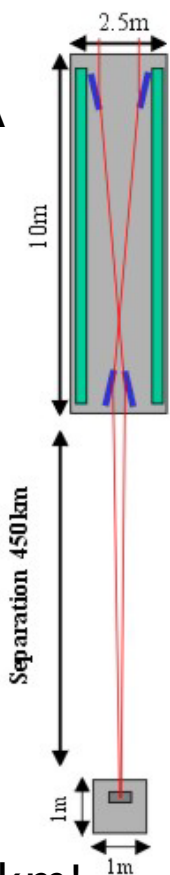
# X線天文用干渉計の提案

## ①MAXIM(Pathfinder)

Cash+2000 コロラド大、NASA

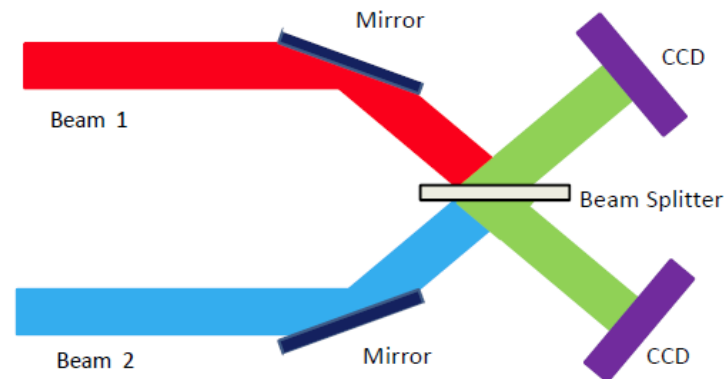


角度分解能 0.1 marcsec  
エネルギーバンド 0.4-2.0+6keV  
有効面積 100cm<sup>2</sup>  
ミラー衛星と検出器衛星の距離450km!



## ②半透膜を用いた干渉計

北本+2011,2014

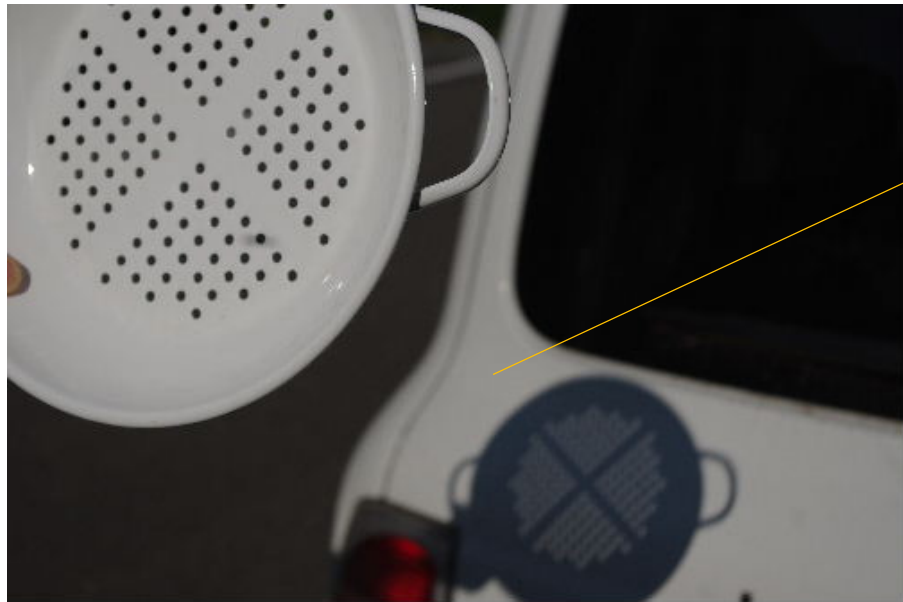


エネルギーバンド 0.57keV付近  
角度分解能0.04marcsec(?)  
焦点距離 10m (?) 1個の衛星  
CCDはカロリメータに代替する必要  
(X線干渉縞検出の報告はまだ)

- 離れて入射した2本のX線ビームを干渉させて 1個の干渉縞(像)を得る
- 主に軟X線対象
- 高精度のミラー必要

本日紹介するMIXIM→多数の像、主に硬X線対象、ミラー不要

# アイデアのベースはマルチピンホール(スリット)カメラ

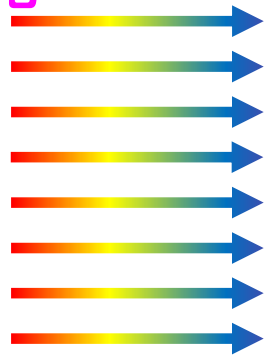


<http://blog.goo.ne.jp/hanahana-haru04/e/a8ef27218dee3713136a89943109a431>

多数の像を解析で  
重ねあわせる

# 多重像X線干渉(撮像)計

ほぼ  
平行光



格子

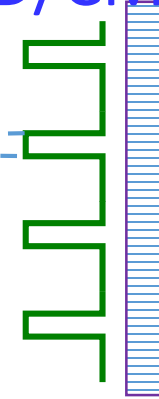


ピッチ  $d$   
開口率  $f$

像幅  $\theta$

距離  $z$

X線ピクセル検出器  
(CCD/CMOS)



重ね合わせ

- X線吸収格子と X線ピクセル検出器
- イメージプロフィールは光源の形状を反映している
- 解析で像を周期  $d$  で重ね合わせると統計誤差の小さい光源プロフィールが得られる

• 像幅は  $\theta = fd/z = 0.4'' \left( \frac{f}{0.2} \right) \left( \frac{d}{5\mu m} \right) / \left( \frac{z}{50cm} \right)$

Chandra衛星の分解能を50cmの超小型衛星で凌駕できる?

# 実際は回折が効く

$d=5\mu\text{m}$

$f=0.2$

$z=0.5\text{m}$

$\lambda=0.115\text{nm}$

$N=1$

(Single Slit)

$N=2$

(Double Slit)

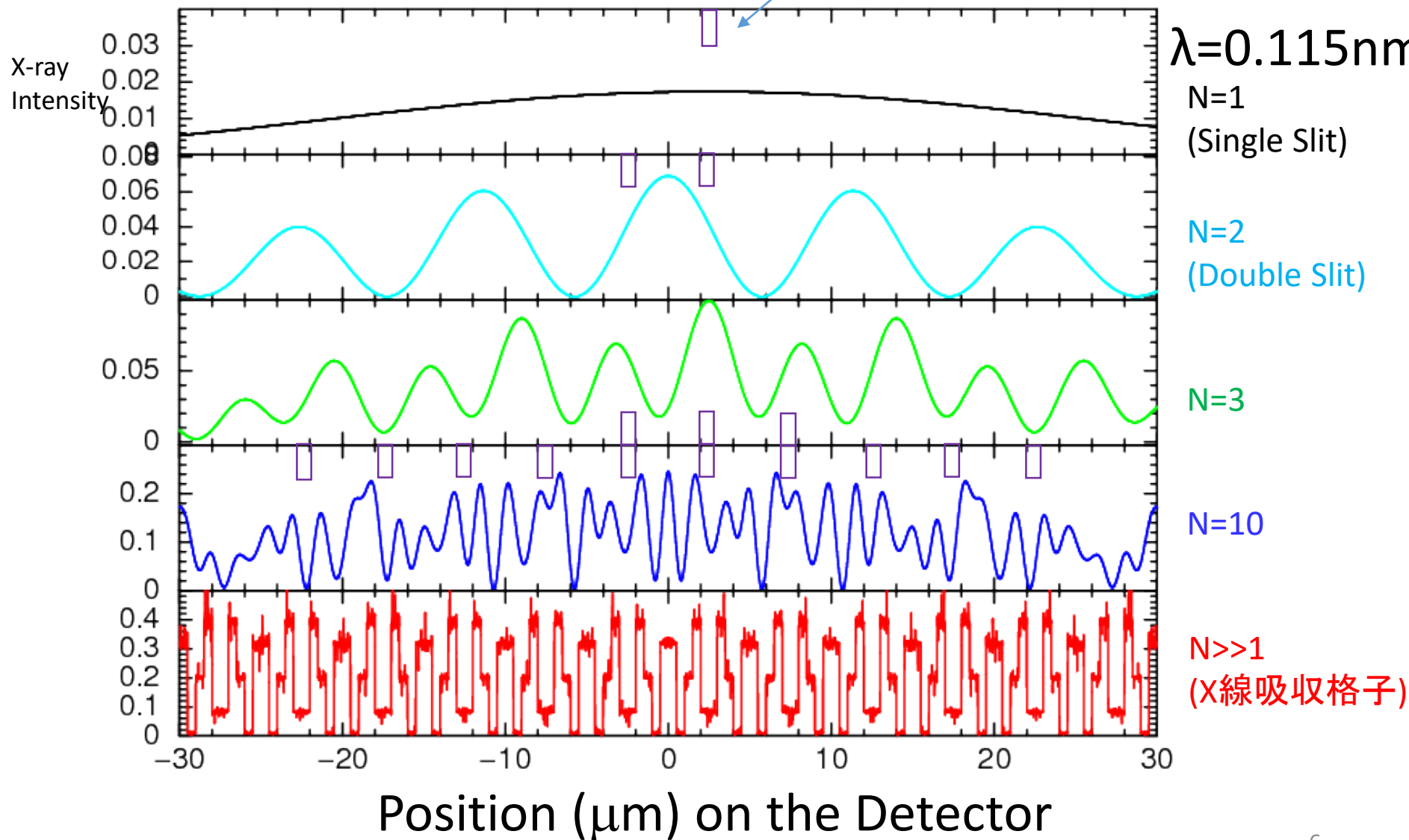
$N=3$

$N=10$

$N \gg 1$

(X線吸収格子)

Simulated Image Profile with Fresnel Approximation (not stacked)



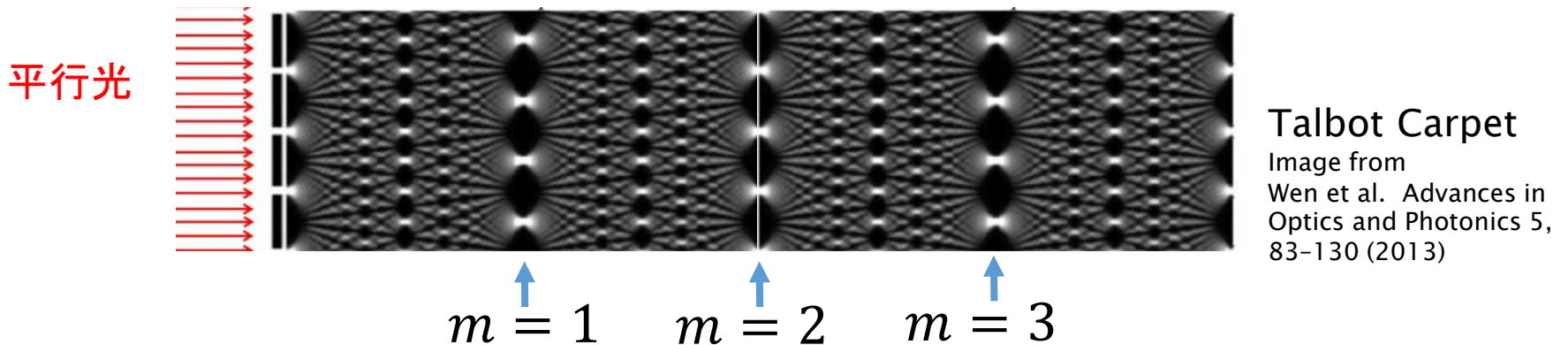


# しかし、**タルボ効果**が利用できる

## • **タルボ効果**

- 格子を通過した平行光が周期的な距離に格子の**自己像**をつくる (H.F.Talbot, 1836)
- 回折/干渉で説明(Rayleigh, 1881)
- 硬X線領域でのタルボ効果の実証 (P. Cloetens, 1997)

## • **タルボ距離** $z_T = m \frac{d^2}{\lambda}$



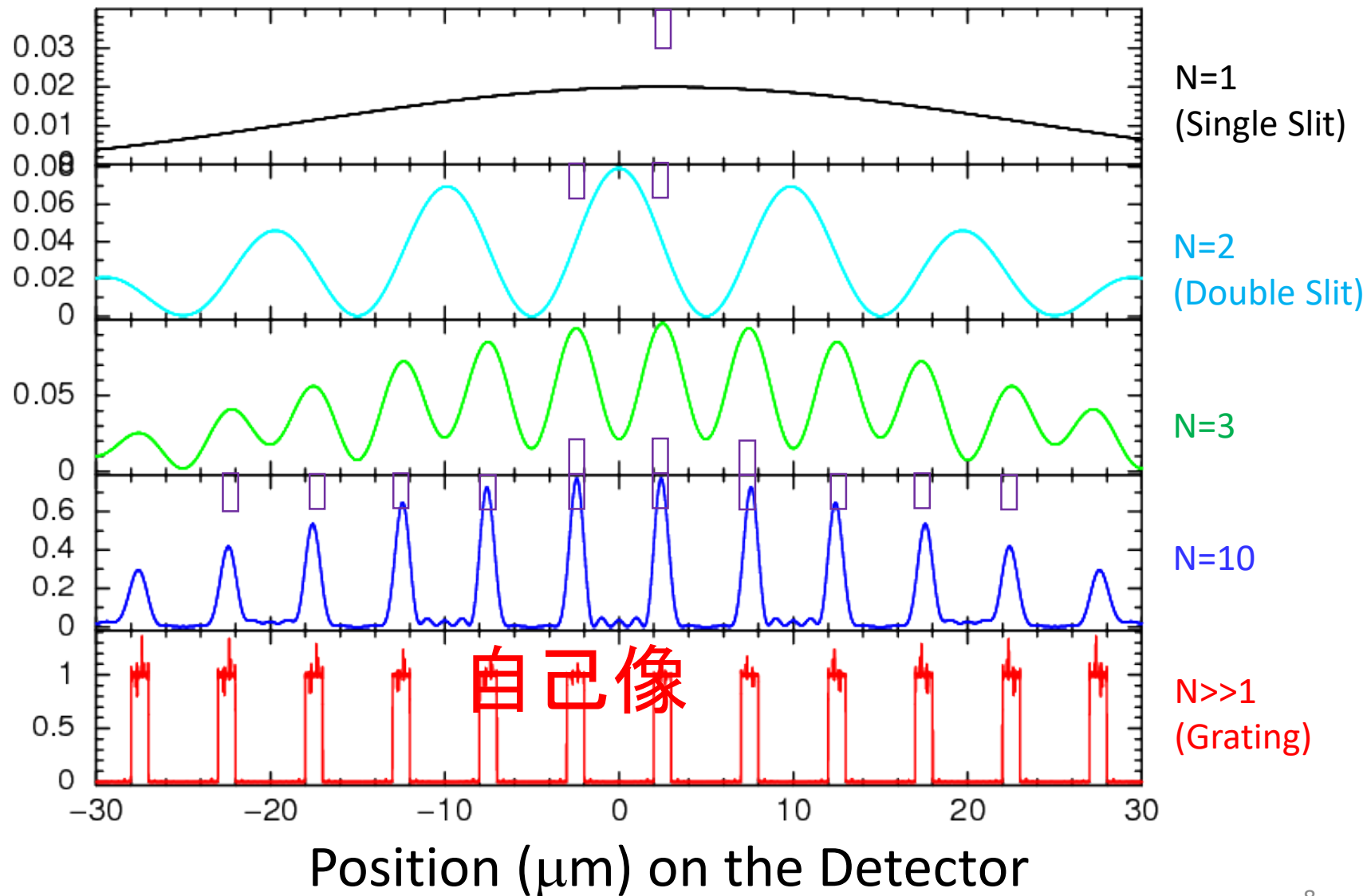
$\lambda=0.1\text{nm}$ (12keV) のX線, ピッチ $d=5\mu\text{m}$ の格子に対して  
 $m=2$ の  $z_T$  が 50cm

# タルボ距離では

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

$$z=0.5\text{m} \quad \lambda=0.100\text{nm} \quad (m=2)$$

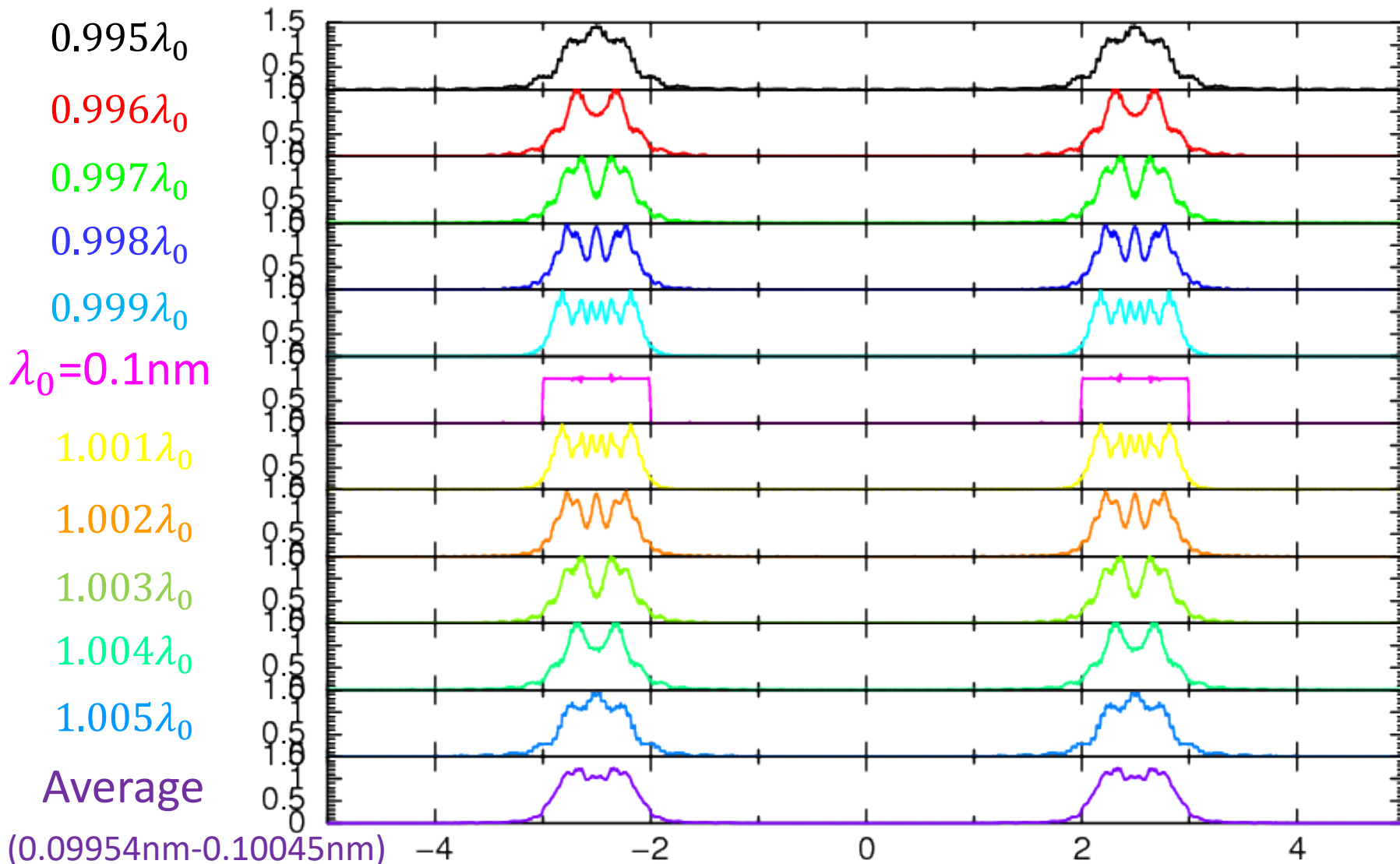
Simulated Image Profile with Fresnel Approximation (not stacked)





# $\lambda$ dependence at a fixed setup

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

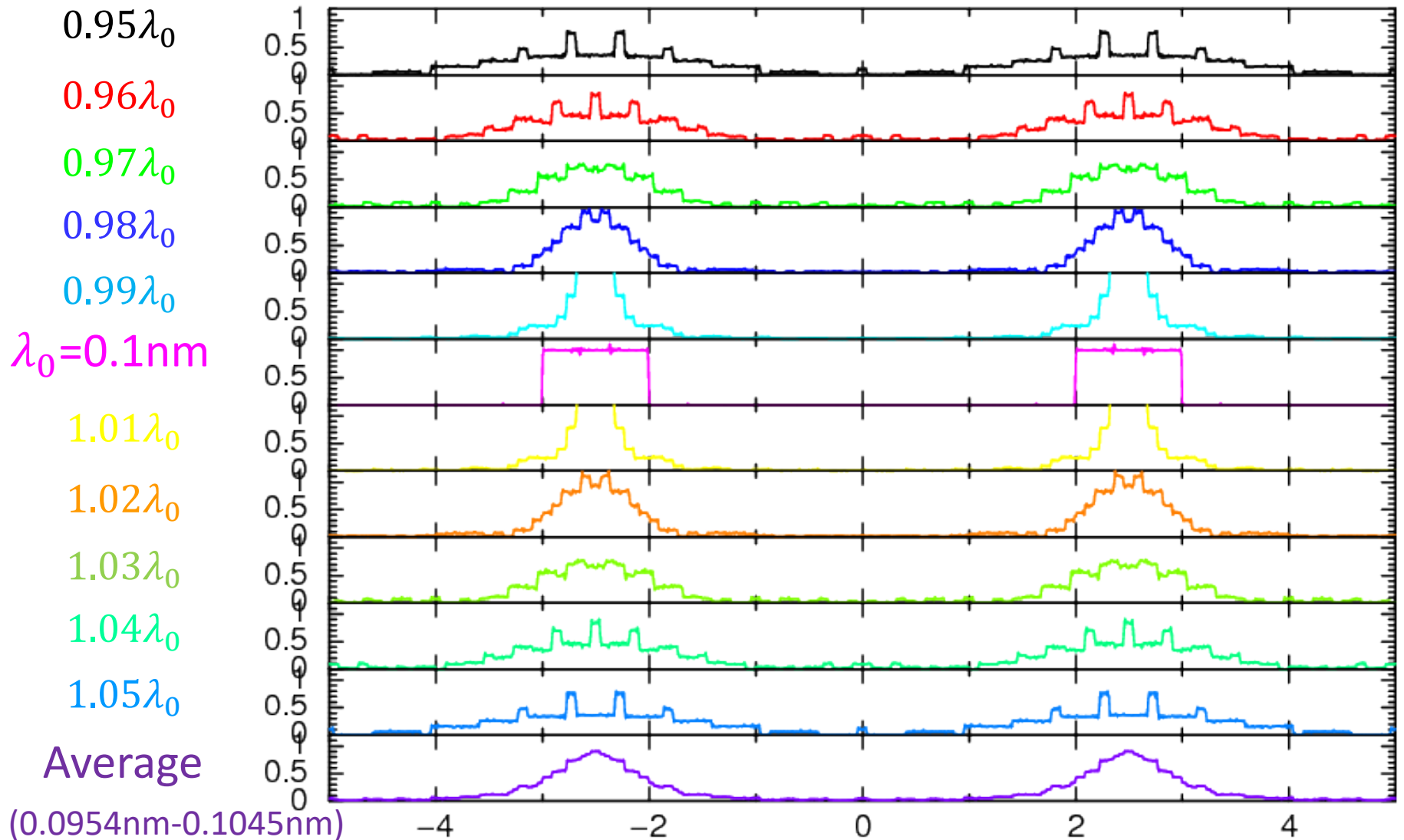


Band width ( $\Delta\lambda/\lambda$ ) = 1%

Position ( $\mu\text{m}$ ) on the Detector<sub>9</sub>

# $\lambda$ dependence at a fixed setup

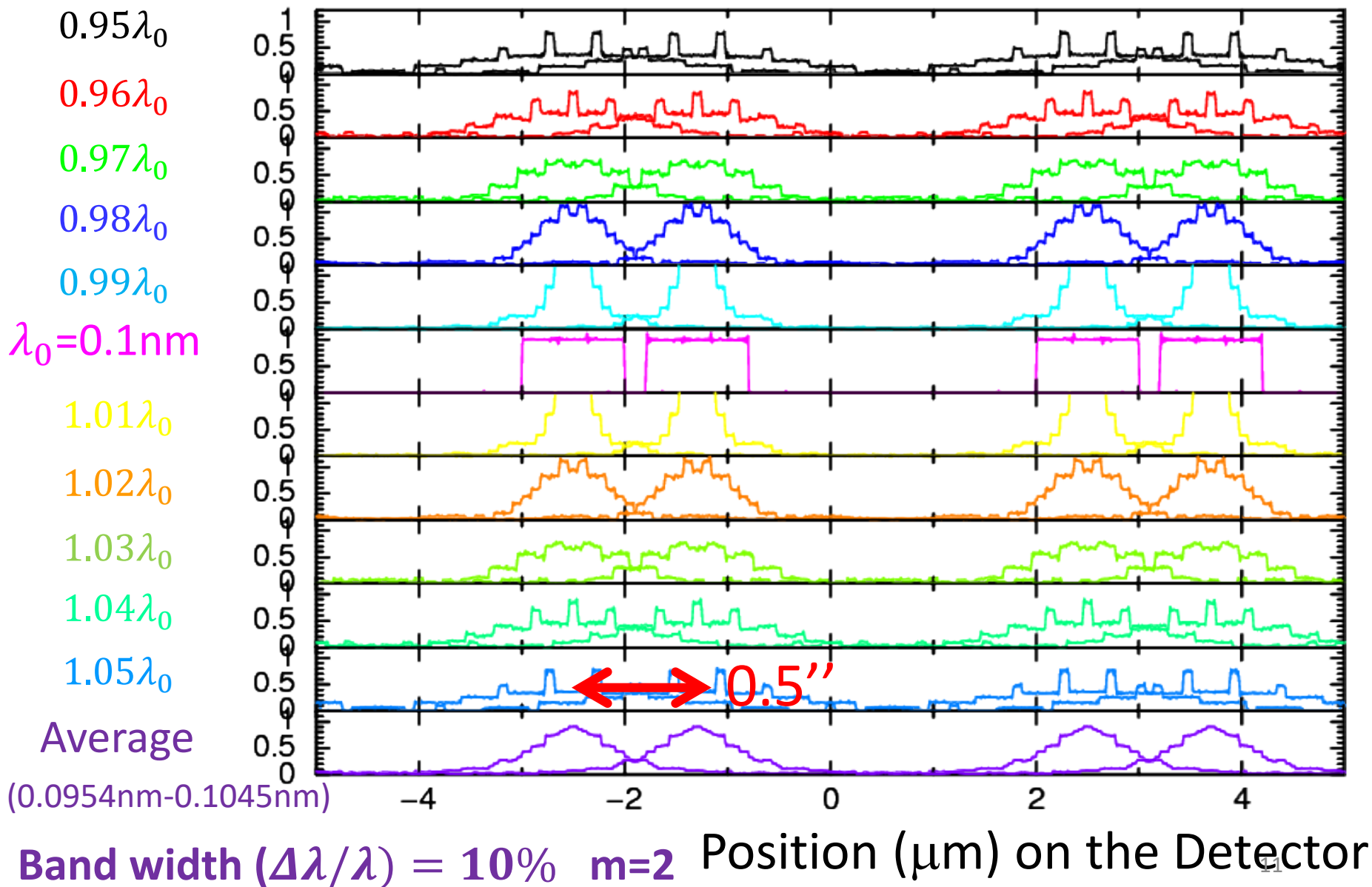
$d=5\mu\text{m}$   $f=0.2$   
 $z=0.5\text{m}$   $m=2$



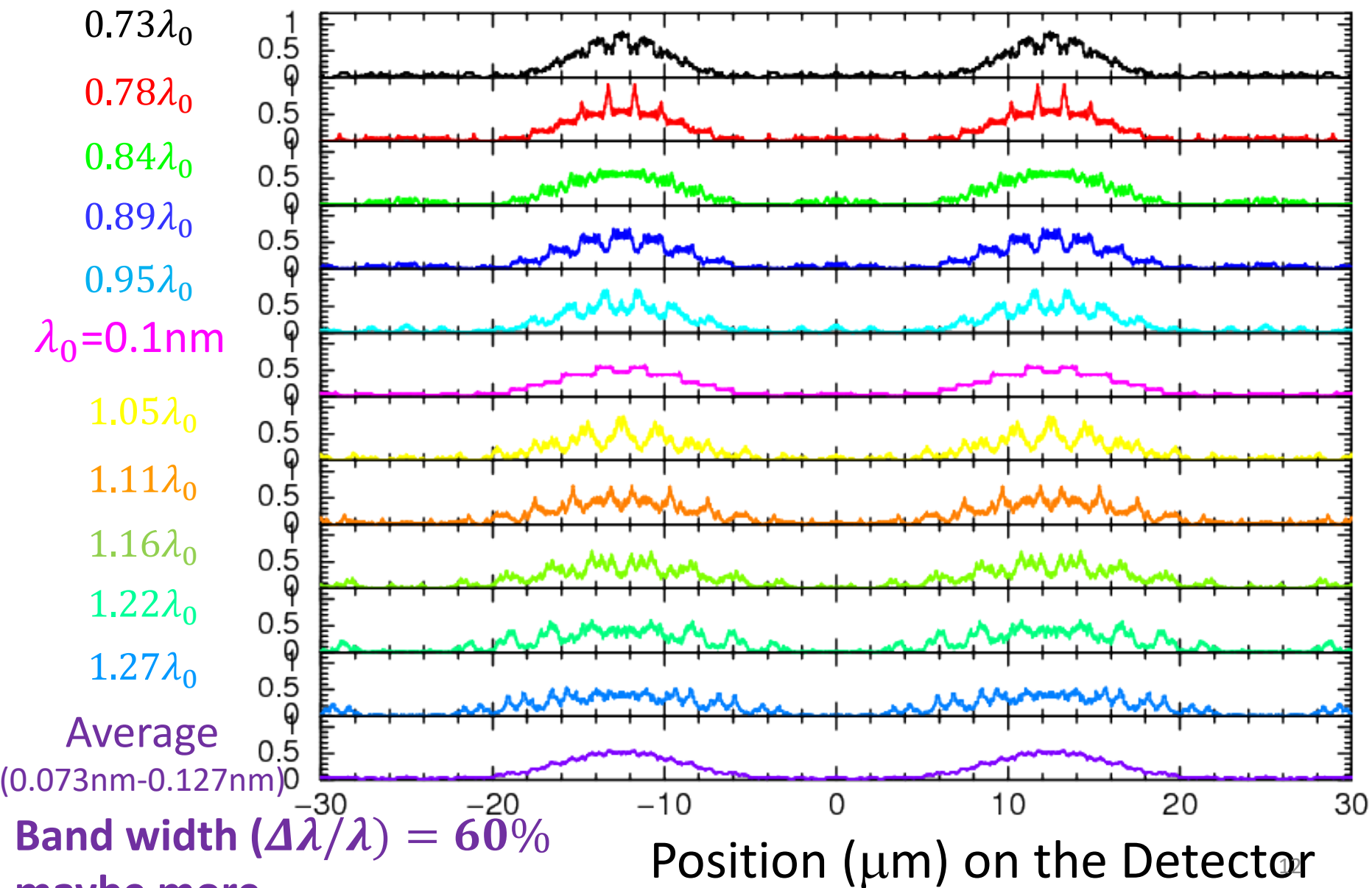
**Band width ( $\Delta\lambda/\lambda$ ) = 10%**  **$m=2$**  Position ( $\mu\text{m}$ ) on the Detector

Another X-ray beam incidence from **0.5arcsec** offset direction

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



Near Field  $z \ll z_T$   $d=25\mu\text{m}$ ,  $f=0.2$ ,  $\lambda_0=0.1\text{nm}$   
 $z=0.5\text{m} \ll z_T (m=1) = 6.25\text{m}$



# Multi Image X-ray Interferometer Module

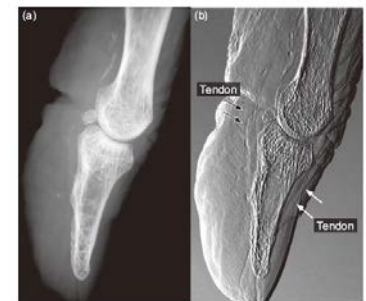
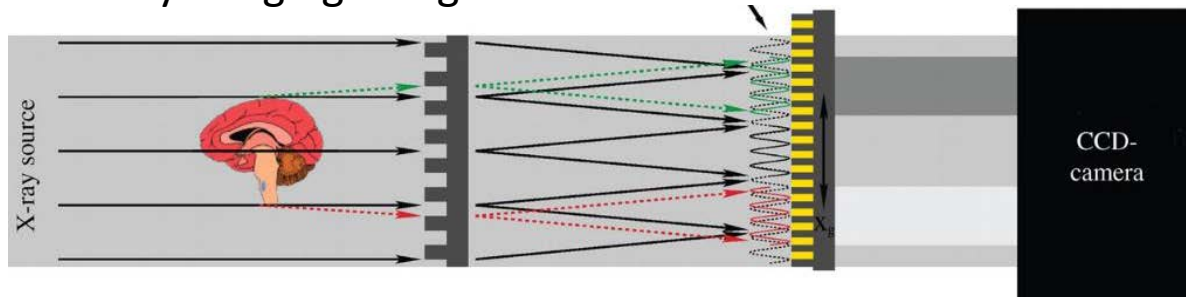
(or Mission) = MIXIM

Hayashida+ X-ray Universe2017

## 位相コントラストイメージングのX線タルボ干渉計との比較

- タルボ効果を使用する原理と構成は基本的に同じ
- 干渉縞のゆがみから格子の前の試料の構造を測定するか、重ねあわせた干渉縞のプロファイルから光源の構造を測定するか
- MIXIMでは 光子計数、エネルギー測定が本質的
- G2格子は使わずモアレでなく直接プロファイルを測定
- 格子の開口率 $f < 0.5$ の使用を想定

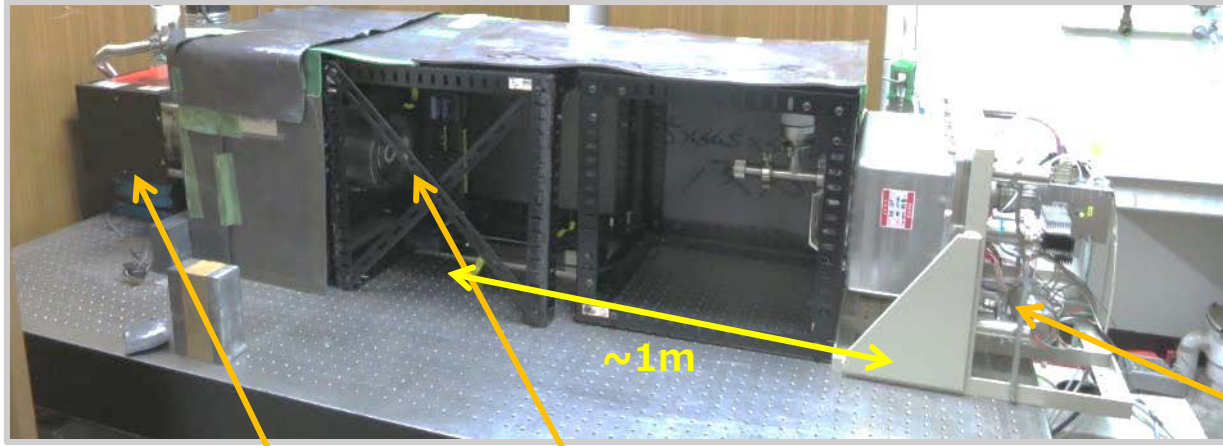
c.f. X-ray Talbot (-Lau) Interferometer Momose+(2003), Pfeiffer+(2006) for Phase Contrast X-ray Imaging of Light Material



Hoshino+ 2014 KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT Vol11

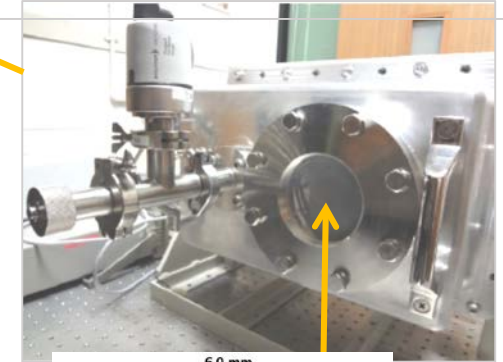


# 基礎実験 点光源/球面波使用



X-ray CMOS  
(XRPIX2b)

inside Vacuum Chamber  
Cooled -40degC  
Window=0.2mm Thick Al



microFocusX-ray

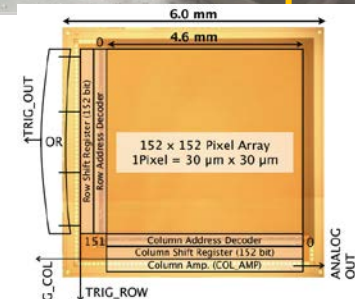
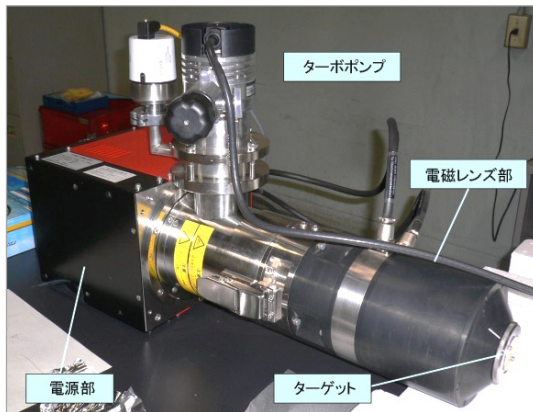
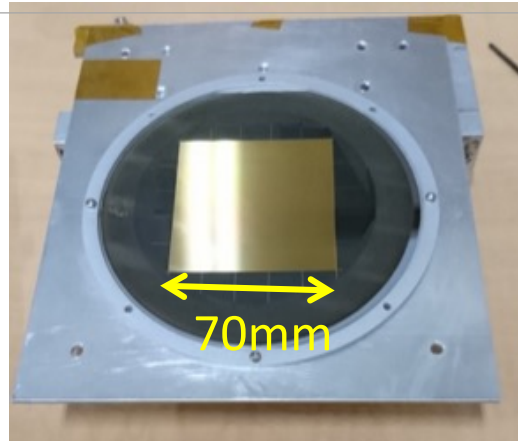
60kV, 100 $\mu$ A, Target=W  
Source Size=3~5 $\mu$ m

X-ray Grating KIT製

Pitch  $d=4.8\mu\text{m}$

Open frac.  $f=0.5$

17 $\mu$ m thick Au on Si



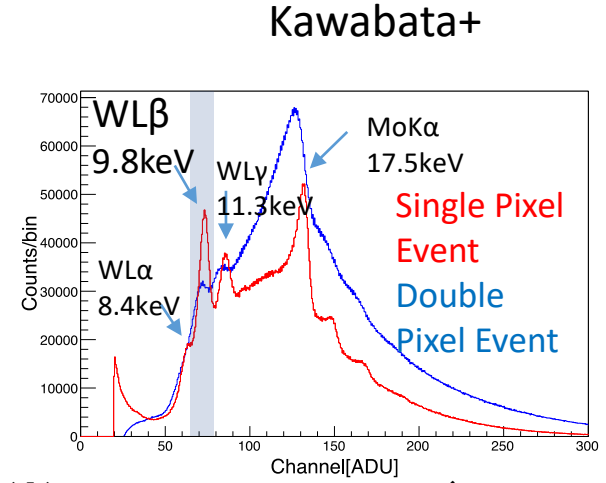
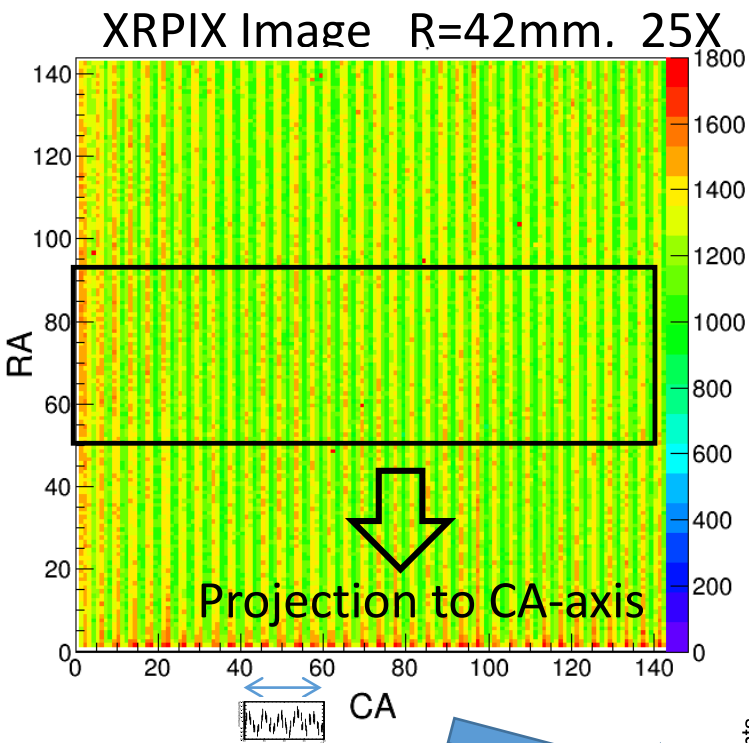
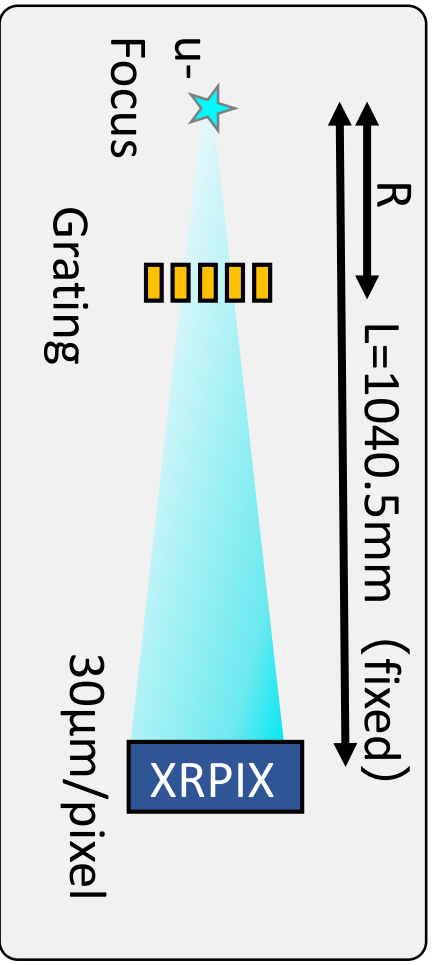
XRPIX2b (Tsuru+2014)

pixel size 30 $\mu$ m

152x152 pix 14

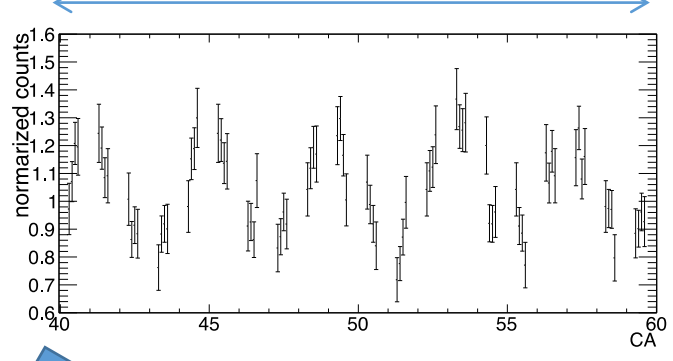


# 基礎実験 結果 1/2

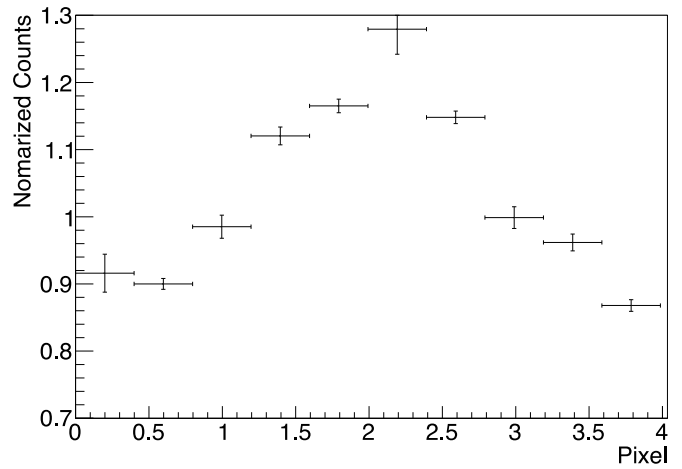


✖ Only Double Events (split along CA direction) are employed with charge sharing analysis

## Projected Profile



## Stacked Profile



# 基礎実験 結果2/2

## Projected Profile (One Part)

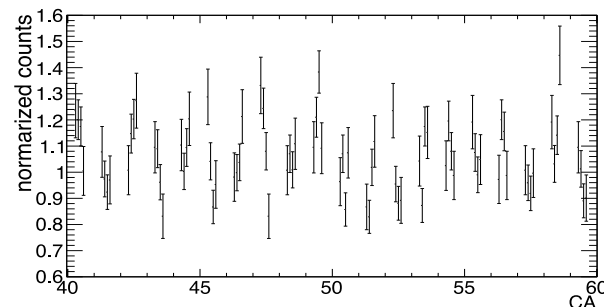
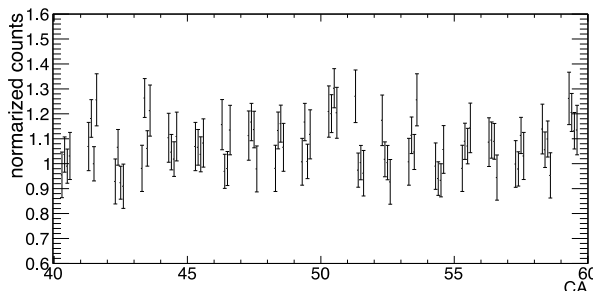
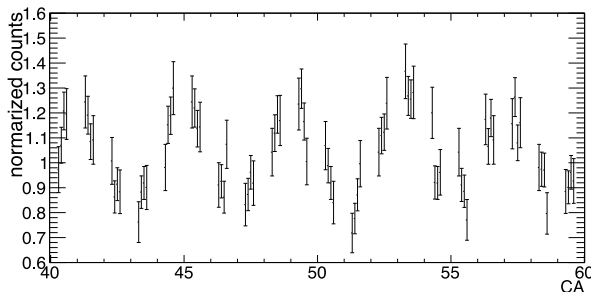
R=42mm, Mag. =25x

R=102mm, Mag.=10x

Talbot Distance for a Spherical Wave

$$z_T = \frac{L}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4md^2}{\lambda L}} \right)$$

R=235mm (correspond to **Talbot Condition**),  
Mag.=4.4x

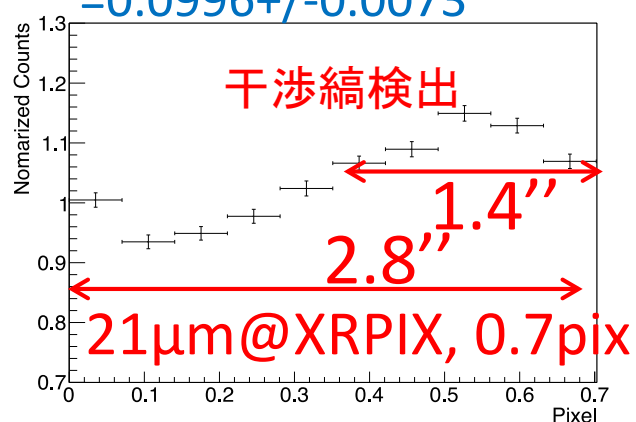
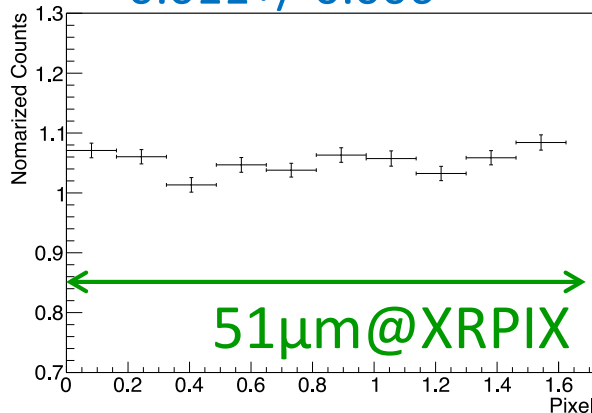
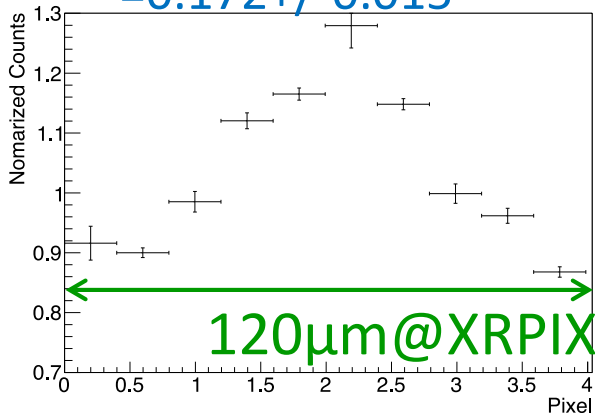


## Stacked Profile

Fractional Amplitude  
=0.172+/-0.015

Fractional Amplitude  
=0.011+/-0.006

Fractional Amplitude  
=0.0996+/-0.0073



• しかし、これは4.4x拡大撮影に助けられている

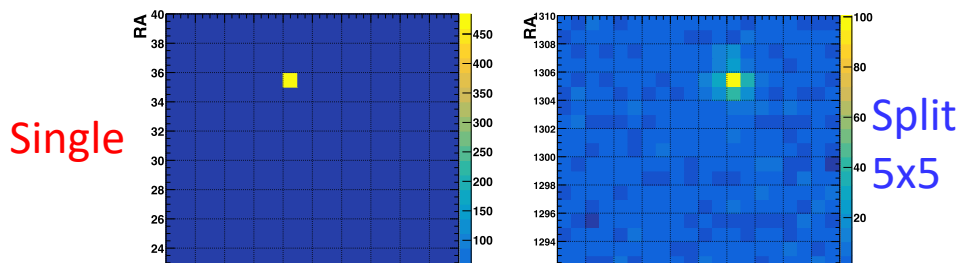
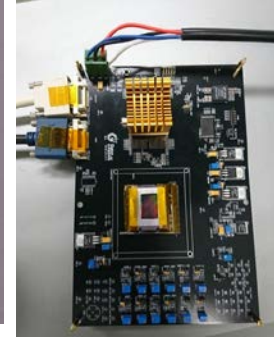
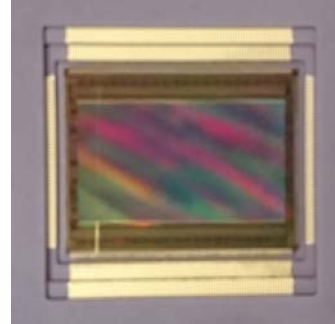
• 平行光、拡大率1xには4um以下の位置分解能が必要

Gpixel GSENSE5130 4.25um x 15Mpix

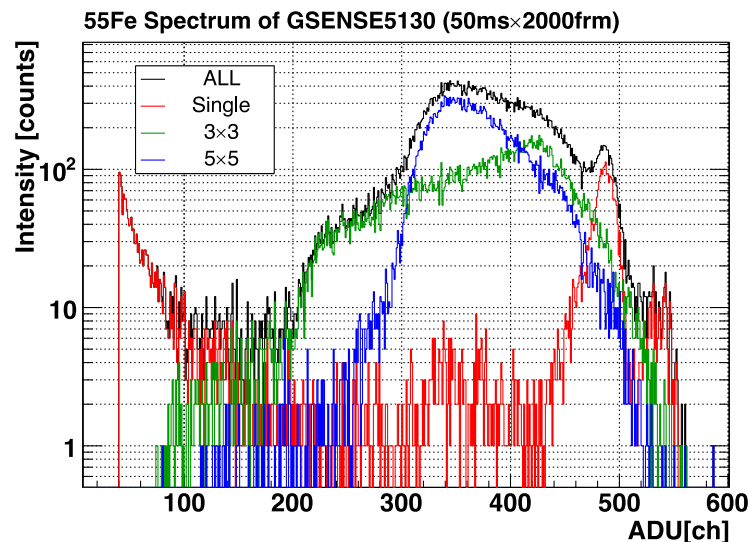
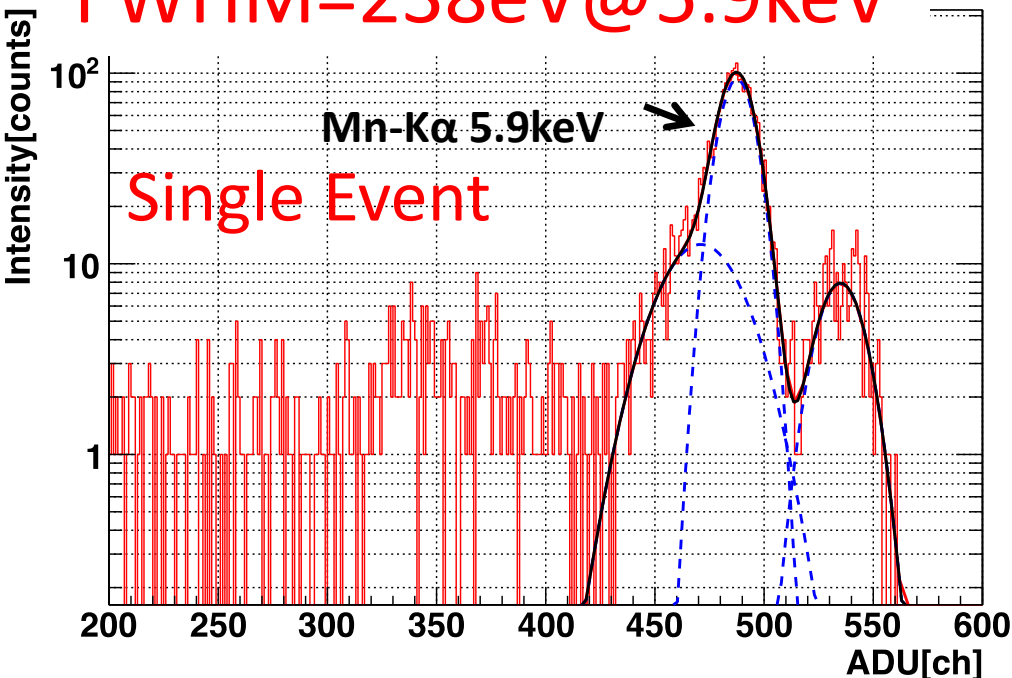
可視光科学計測用 FI CMOS

X-ray <sup>55</sup>Fe Test

• +25degC! Open Air!



FWHM=238eV@5.9keV



Readout noise=7.1e-  
(High Gain Data 1.5e-)

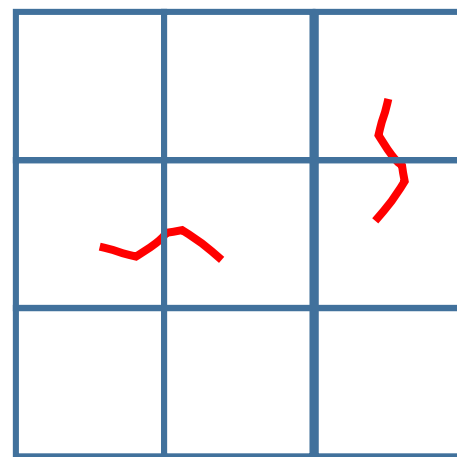
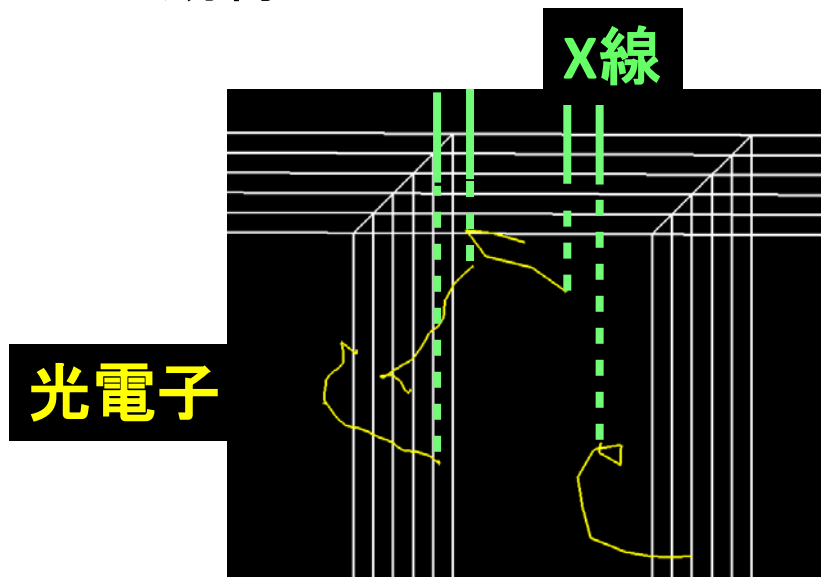
Dark 3e-/s/pixel @+25degC  
←50ms Frame time, but the 1s Frame Time  
result is similar @+25degC!

Single Event Layer 0.9um  
All Event Layer 26um

Preliminary

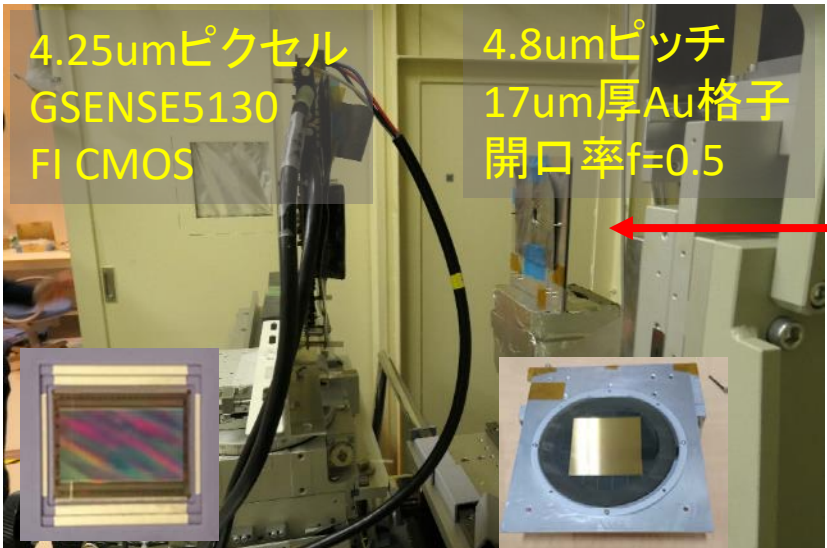
# 微小ピクセルの検出器使用による特典

- 微小ピクセルは実用的感度での**偏光検出**を可能にする
  - 10keVの電子のSi中での飛程は1.5 $\mu\text{m}$ 程度
  - 入射X線の電場ベクトルの方向に光電子が出やすい  
→その方向にまたがる2ピクセルイベントが多い
  - (CCDを使用した実証Tsunemi+1992, 最適化Hayashida+1998)
  - 12 $\mu\text{m}$ 、30 $\mu\text{m}$ のピクセルサイズだと感度が低いが、4.25 $\mu\text{m}$ だと期待がもてる

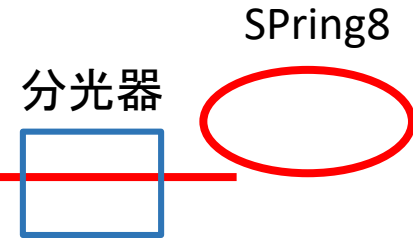


4.25 $\mu\text{m}$ ピクセル、24.8keV入射

# SPring8 BL20B 2017Nov/Dec 0.5day x2



ほぼ平行光  
ビーム広がり  
0.04''(V)  
0.28''(H)



Ex=12.4keV,24.8keVで実験

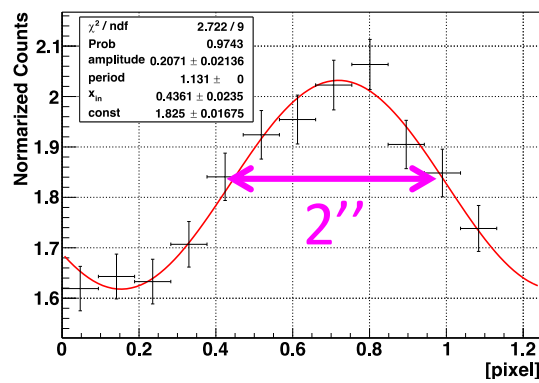
拡大率1

干渉縞重ねあわせprofile検出!

X線偏光検出感度もあり!

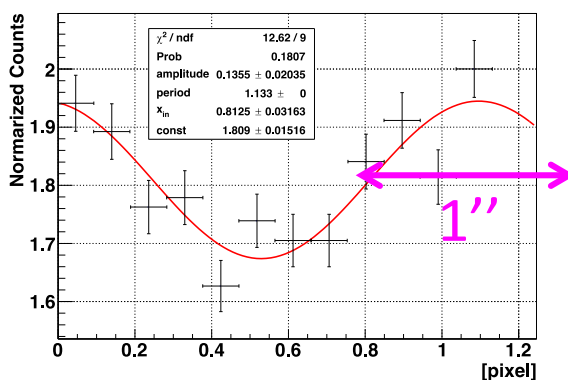
Ex=12.4keV, z=23cm

period=1.131000 folded curve



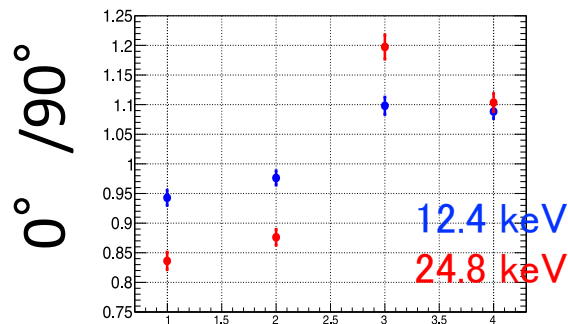
Ex=12.4keV, z=46cm

period=1.133000 folded curve



M=7% for 12.4keV

M=15% for 24.8keV

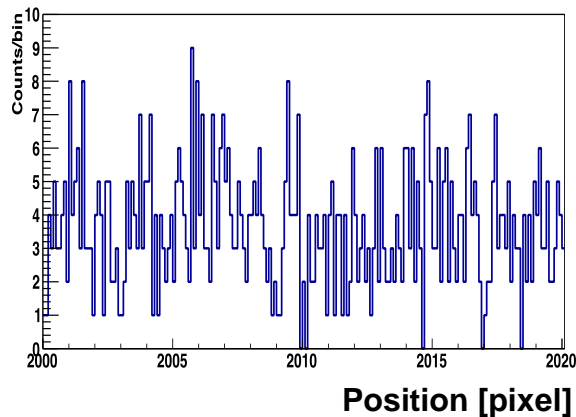


上 下 左 右

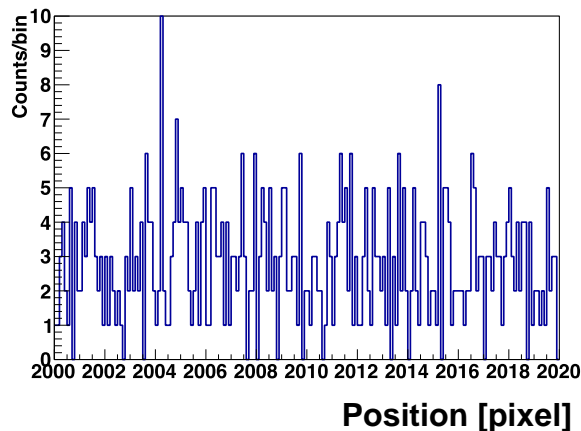
# 準平行光による Talbot 干渉縞の検出

$z=23\text{cm}$  ( $m=1$ )

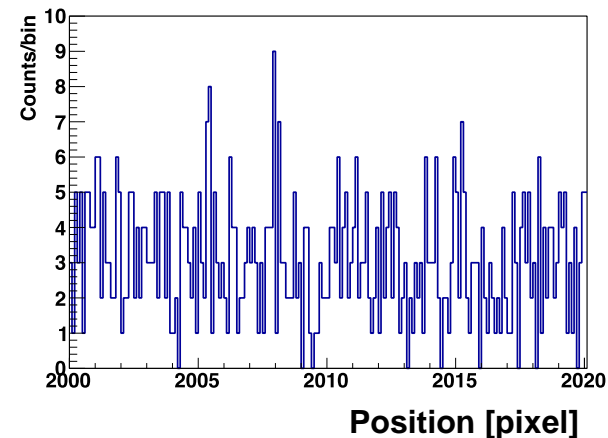
1次元プロファイルの一部



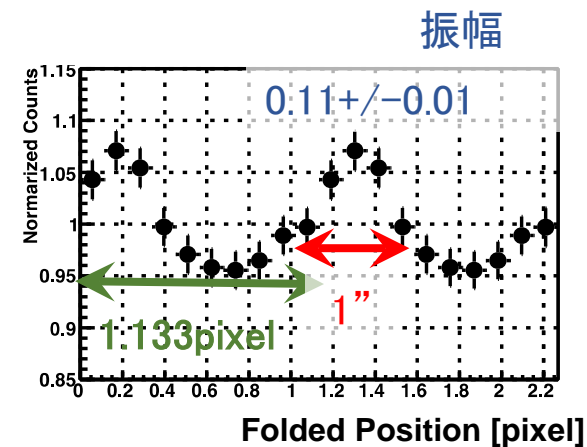
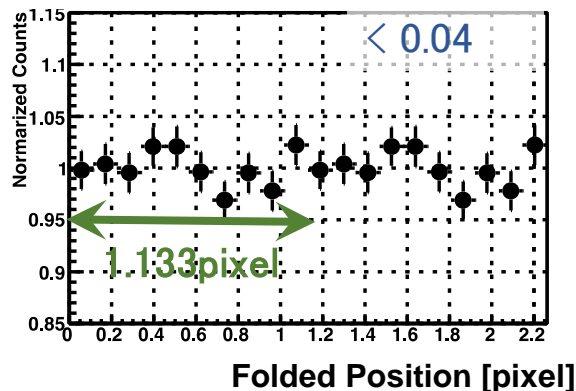
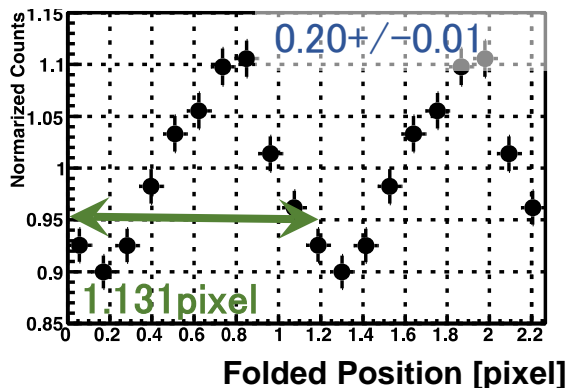
$z=35\text{cm}$  ( $m=1.5$ )



$z=46\text{cm}$  ( $m=2$ )



重ね合わせプロフィール(2周期分表示)



⇒50cmサイズで1秒角の角度分解能を達成できることを実証

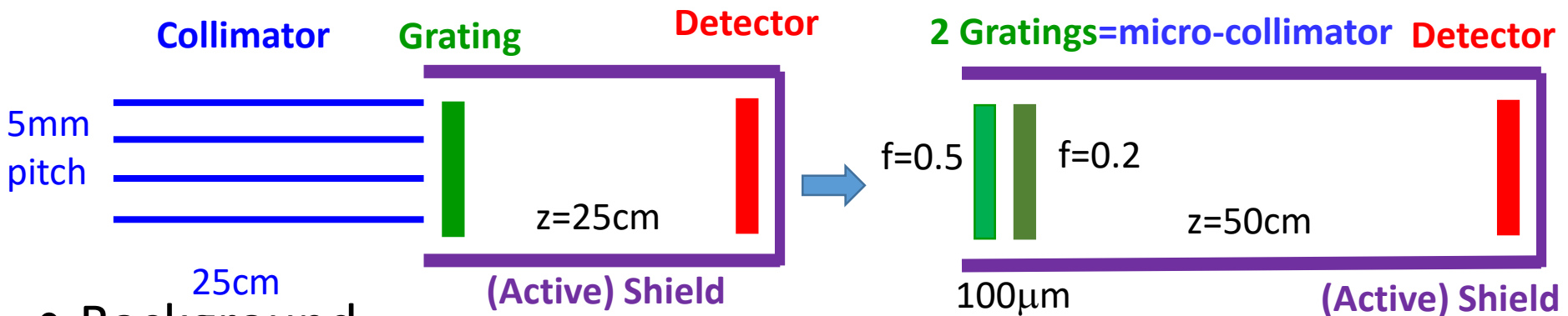


# Preliminary Design of MIXIM

$\theta$  :Image Width  
 $d$  :Pitch  
 $f$  :Open. Frac.  
 $z$  :Distance  
 $m$  :Talbot Order

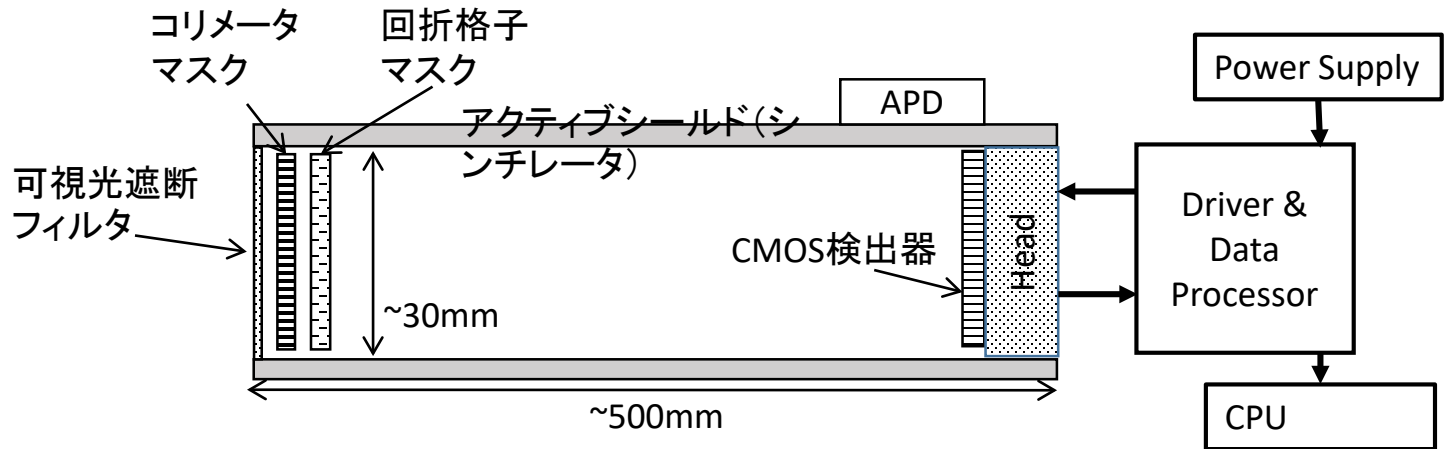
- $z = md^2/\lambda = 50\text{cm} \left(\frac{m}{2}\right) \left(\frac{d}{5\mu\text{m}}\right)^2 / \left(\frac{\lambda}{0.1\text{nm}}\right)$
- $\theta = \frac{fd}{z} = f\lambda/dm = 0.4'' \left(\frac{f}{0.2}\right) \left(\frac{\lambda}{0.1\text{nm}}\right) / \left(\frac{d}{5\mu\text{m}}\right) \left(\frac{m}{2}\right)$ 
  - 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  $\sim 1\text{deg}$ .



- Background
  - Imaging capability reduce the CXB and NXB factor of  $f$ .
  - Rough estimate CXB=0.2 mCrab, NXB=4mCrab    Very preliminary<sup>21</sup>

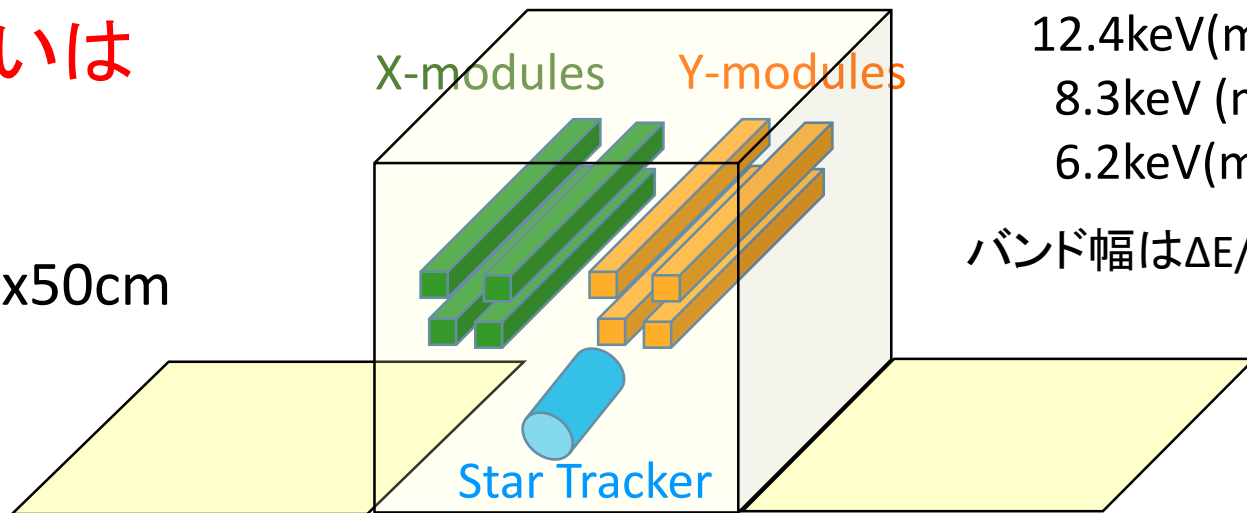
# MIXIMモジュール for 超小型衛星



- こんなモジュールを複数並べる。冷却不要であれば、数kg, 数W/1moduleで現実的。

Shortあるいは  
MIXIM-S

50cmx50cmx50cm  
~50kg?  
~50W?



Ex=24.8keV(m=1)  
12.4keV(m=2)  
8.3keV (m=3)  
6.2keV(m=4)

バンド幅は $\Delta E/E \sim (10/m)\%$

# MIXIM options

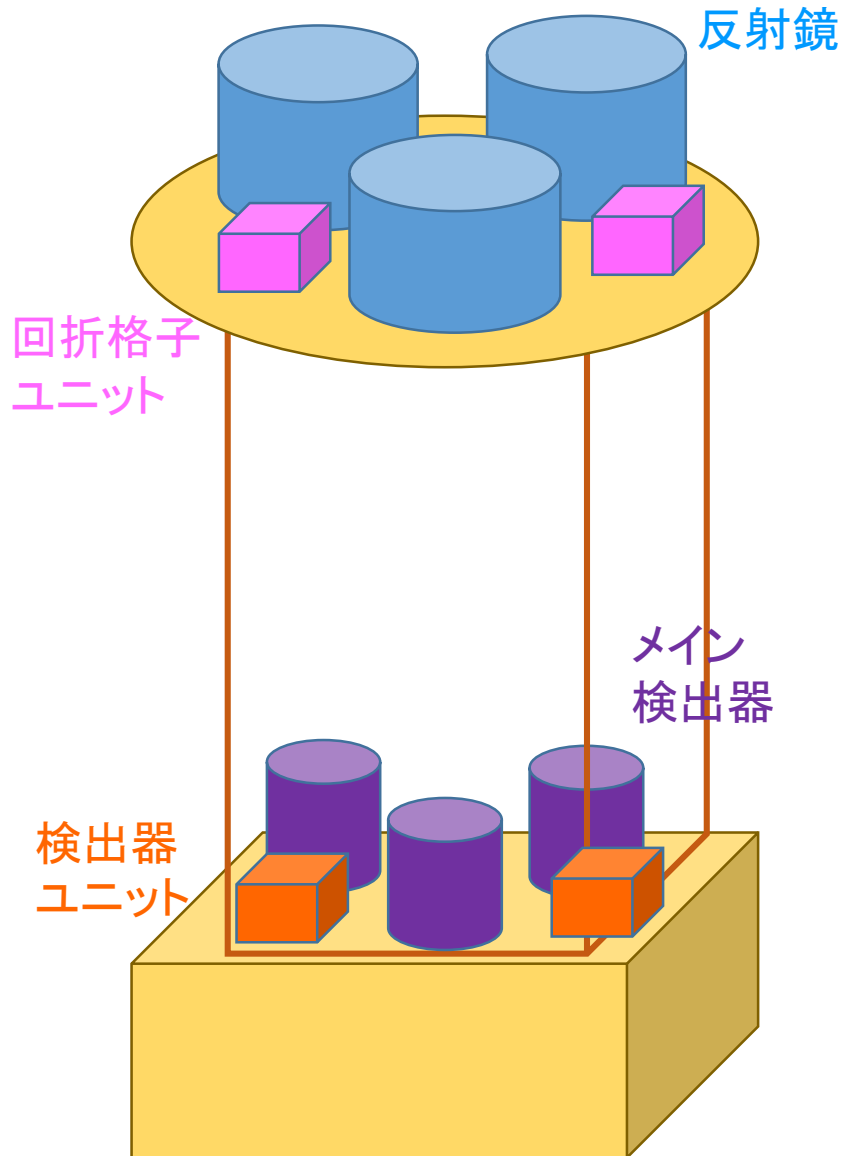
v20180302

Mission Size	Sampler	Short	Tall	Grande
Distance $z$	<b>0.5m</b>	<b>0.5m</b>	12.5m	100m
Pitch $d$	25 $\mu$ m	5 $\mu$ m	25 $\mu$ m	100 $\mu$ m
Open. Frac. $f$	0.2	0.2	0.2	0.1
Talbot Order $m$ for 0.1nm X-ray	(0.1)	2	2	2
$\theta$	<b>2''</b>	<b>0.4''</b>	<b>0.08''</b>	<b>0.01''</b>
$\Delta\lambda/\lambda$	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	10+10	25+25
$\eta_{det}$ at 10keV (200 $\mu$ m Si assumed)	0.78	0.78	0.78	0.78
Effective Area (@10keV)	<b>3cm<sup>2</sup></b>	<b>2.5cm<sup>2</sup></b>	<b>6cm<sup>2</sup></b>	<b>8cm<sup>2</sup></b>

1Crab source 1c/s/cm<sup>2</sup>/5-20keV

1mCrabx50ksx3cm<sup>2</sup>  $\sim$ 150c/day<sup>23</sup>

# TallあるいはMIXIM-Parasite 中大型X線天文衛星に間借り



# Grande あるいはMIXIM-Zoom 国際宇宙ステーション KIBO-FF



- KIBO側に検出器、FFで回折格子
- z可変のズーム機能
- 視野&対象X線エネルギー可変
- 広域探査も兼ねられる？

# MIXIM options

v20180302

Mission Size	Sampler	Short	Tall	Grande
Distance $z$	0.5m	0.5m	12.5m	100m
Pitch $d$	25 $\mu$ m	5 $\mu$ m	25 $\mu$ m	100 $\mu$ m
Open. Frac. $f$	0.2	0.2	0.2	0.1
Talbot Order $m$ for 0.1nm X-ray	(0.1)	2	2	2
$\theta$	2''	0.4''	0.08''	0.01''
$\Delta\lambda/\lambda$	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	10+10	25+25
$\eta_{det}$ at 10keV (200 $\mu$ m Si assumed)	0.78	0.78	0.78	0.78
Effective Area (@10keV)	3 $\text{cm}^2$	2.5 $\text{cm}^2$	6 $\text{cm}^2$	8 $\text{cm}^2$

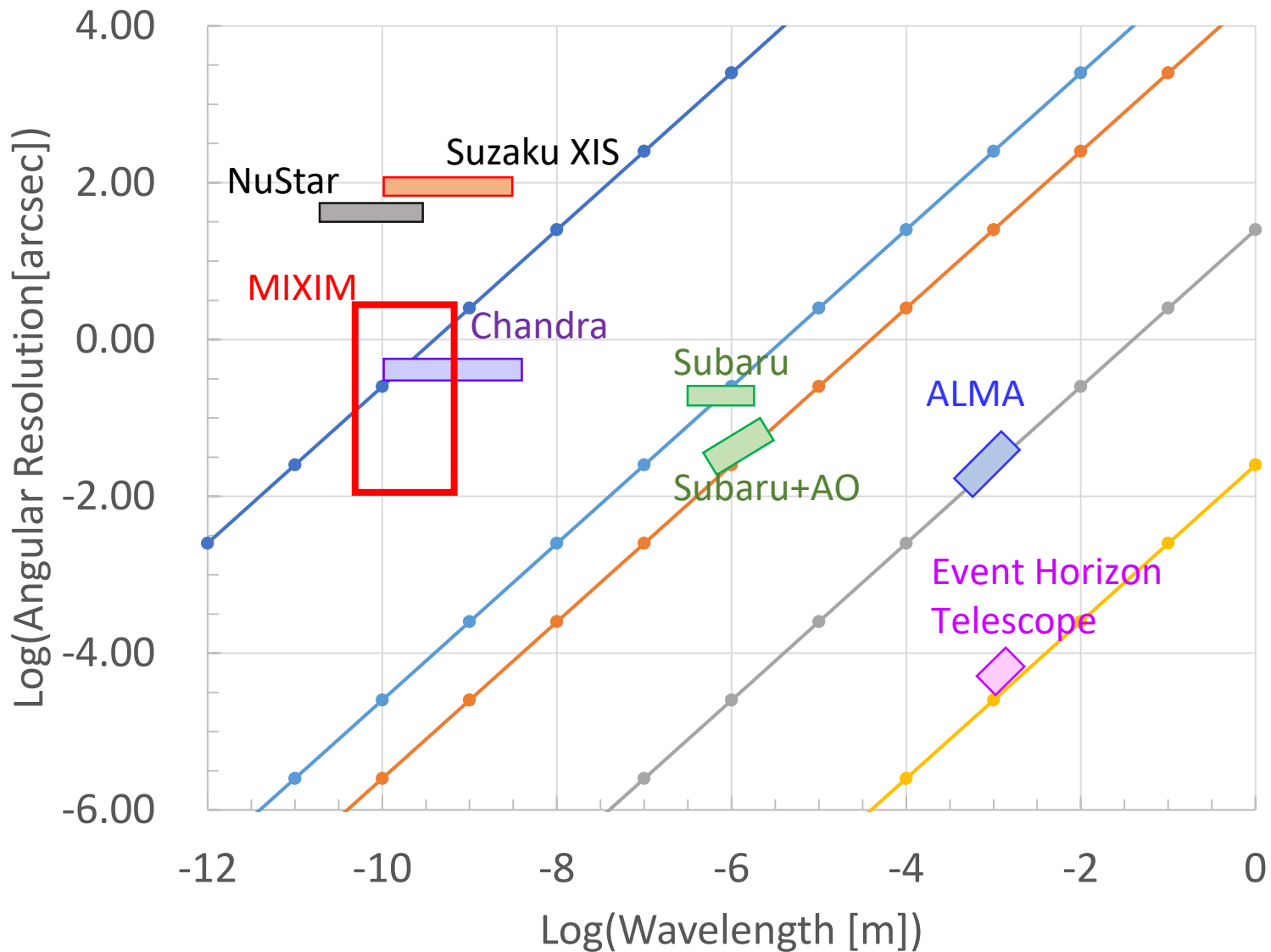
1Crab source 1c/s/cm<sup>2</sup>/5-20keV

1mCrabx50ksx3cm<sup>2</sup>  $\sim$ 150c/day<sup>25</sup>

# 角度分解能

直線: 回折限界  $1.2\lambda/D$  (Dは直径)

—●— D=1m —●— D=10m —●— D=10km —●— D=10000km —●— D=0.1mm





# 多重像干渉計の原理は他波長でも使えるか？

格子-検出器距離

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

像幅

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

ほぼ $\lambda/d$ の回折限界の式、  
回折限界を自然に達成する方法でもある

## 3ケタ波長が長い可視光だったら

5mmピッチの穴が数千個あいた格子を500m先に設置することに相当

- ・可視光で秒角達成するためにわざわざこんなことする人はいない
- ・1個の穴をにしたら回折で像が大きく広がることは実感されるはず

## 6ケタ波長が長いサブミリ波だったら

5mピッチの穴を数千個、数10kmの範囲に配置、検出器は500km先

- ・各穴で集光して検出器を近接させたのがALMAといえなくもない？

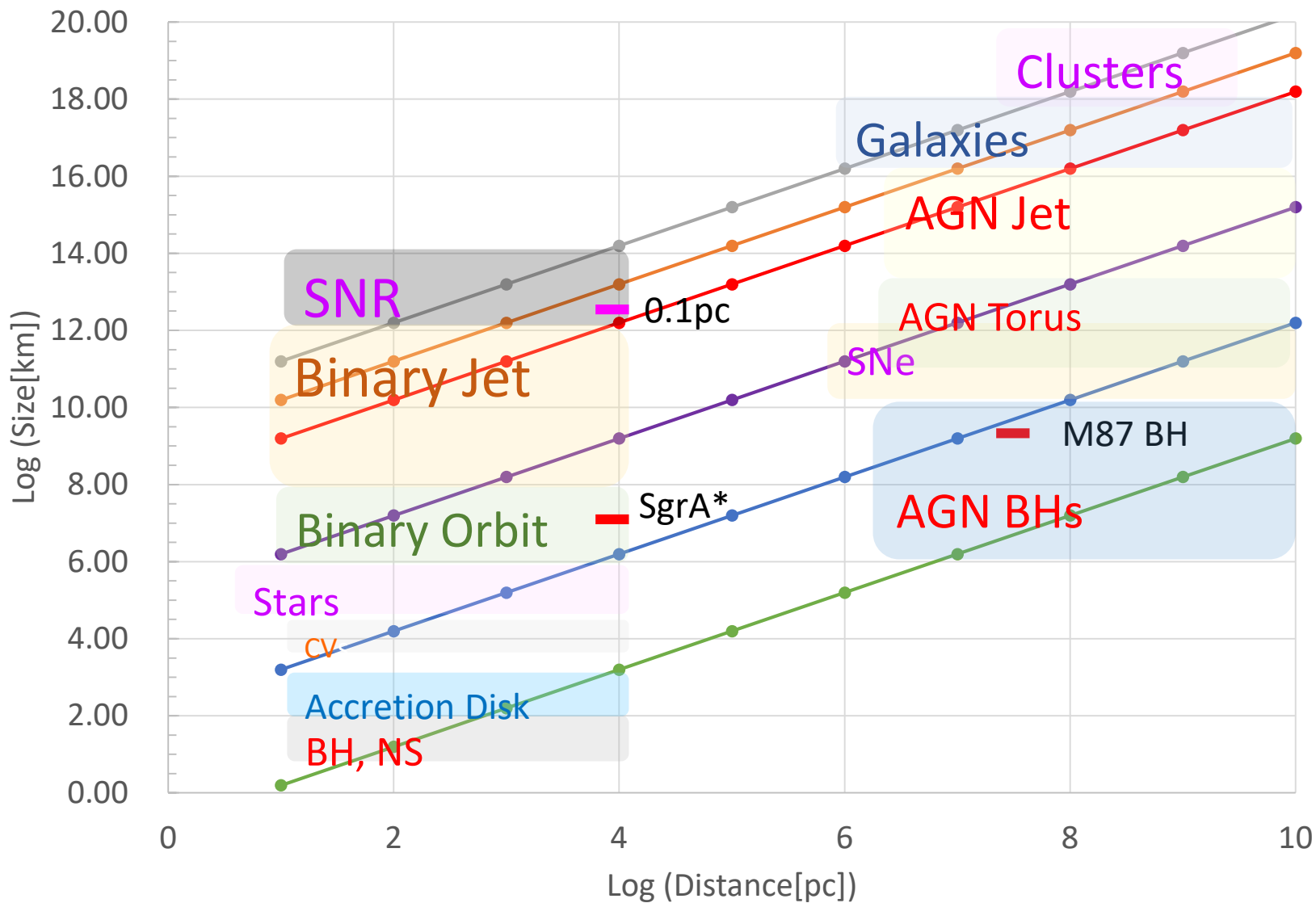
- ・ X線をブロックするための重金属(Au)数10um厚みの格子をつくれる限界のピッチが数um
- ・ 超小型衛星のサイズが50cm

→(硬)X線にこそ最適な方法

# 天体の距離、サイズとみかけの視半径

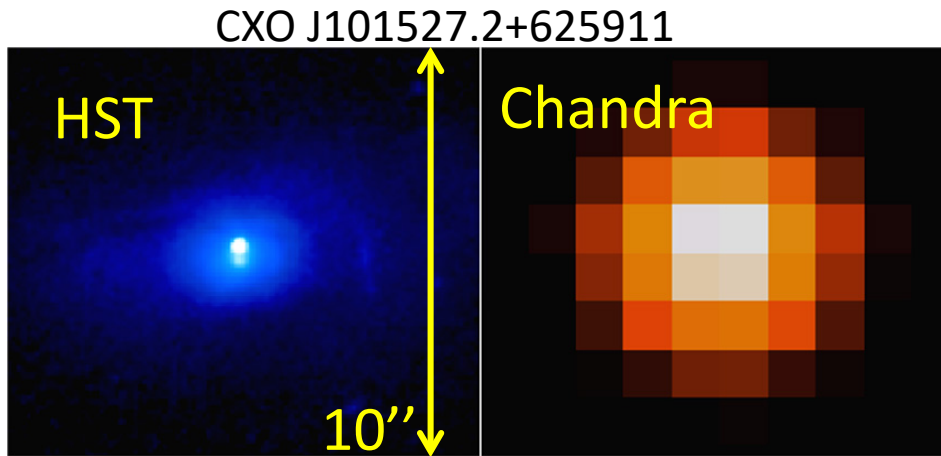
角度分解能

● 1as ● 10as ● 100as ● 1mas ● 1microas ● 1nas



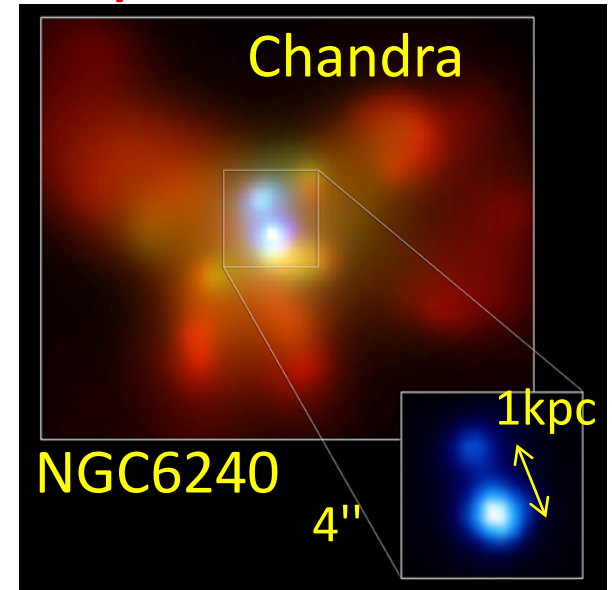
# MIXIM Targets : Detailed Structure of Bright (>~mCrab) Point-like Sources, i.e., (SM)BHs and NSs

## Recoiled SMBH candidates



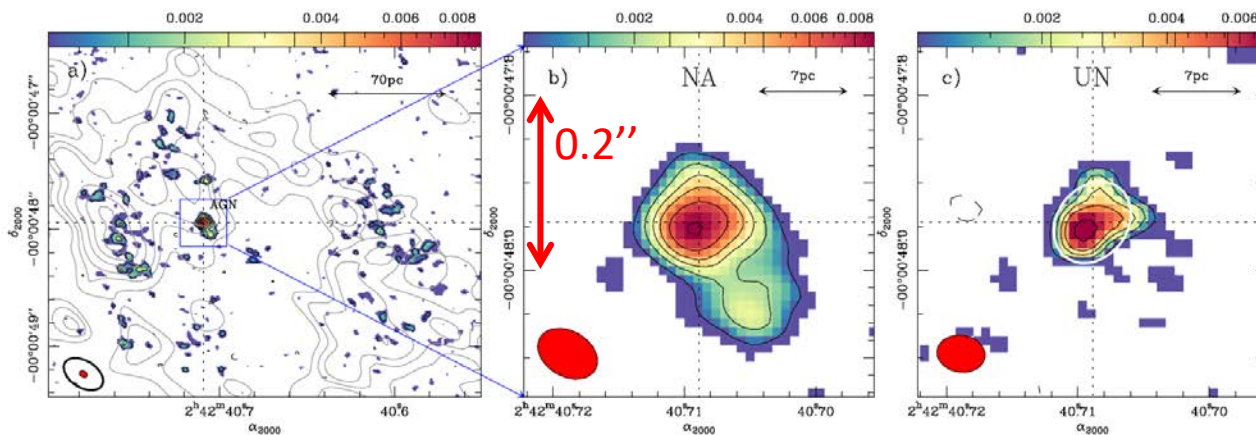
(X-ray: NASA/CXC/NRAO/D.-C.Kim; Optical: NASA/STScI)

## Binary SMBHs



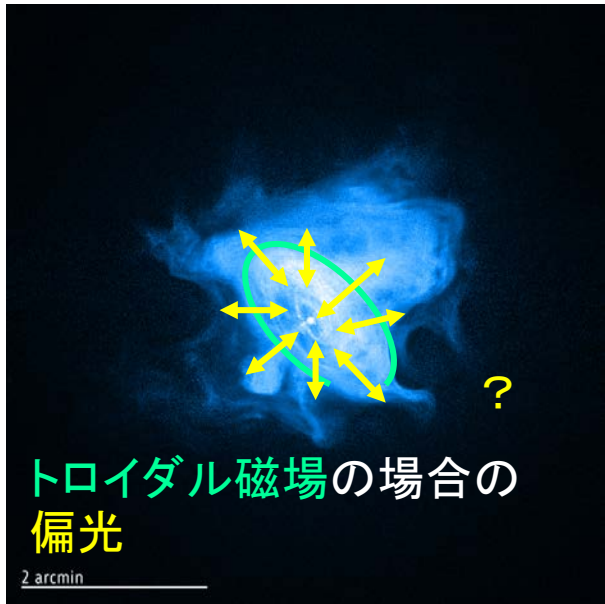
NASA/CXC/MPE/S.Komossa et al.

## Torus Type 2 and Type 1 AGNs



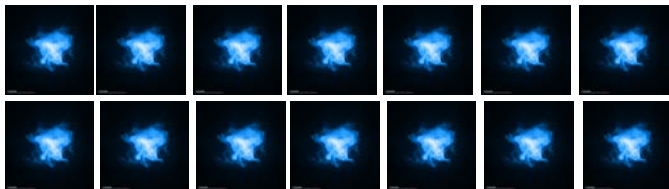
NGC1068  
(D=14Mpc,  
0.1'' が 7pc)  
ALMA image  
Garcia-Burillo+2016

# High Angular Resolution X-ray Polarimetry

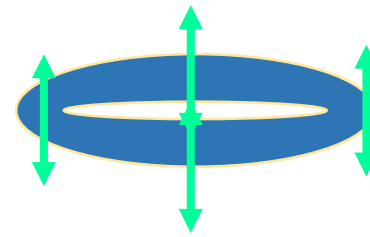


例えば3分角のかに星雲が対象なら

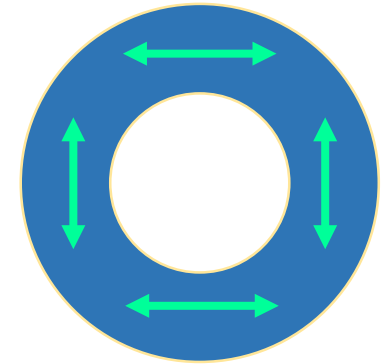
- 100um pitch
- $f=0.1 \times 0.1$ の2次元
- $z=0.1m$



重ねあわせ

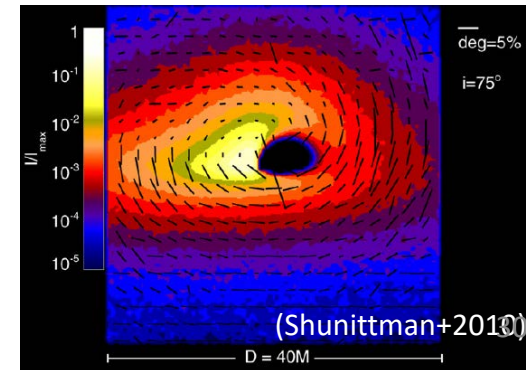
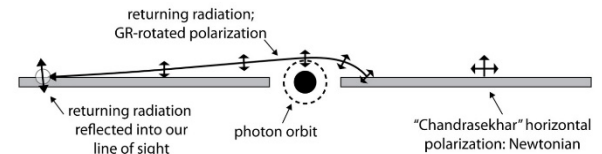


円盤が傾いていた  
らトータルでも大き  
な偏光度



フェイスオン円盤で  
はトータルでは偏  
光度ゼロ  
→場所ごとに測れ  
ば強い偏光

(かなり難しいが)  
さらにBHの近傍なら

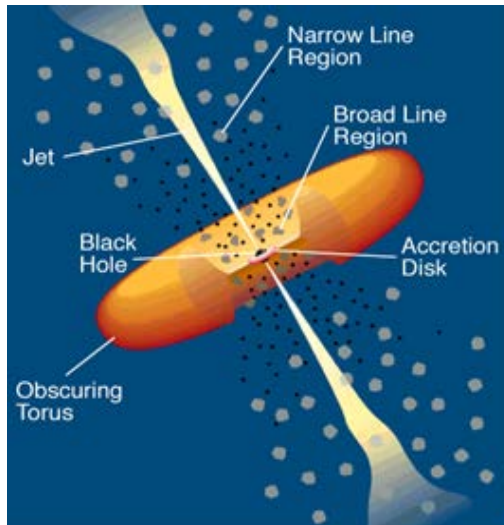


# 近傍超巨大BHトーラスのX線空間分解(撮像・偏光)

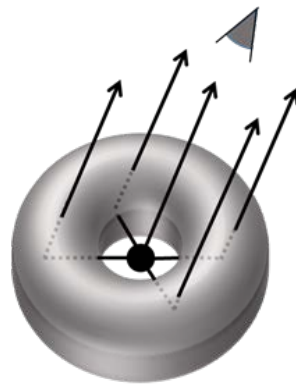
## →統一モデルの直接検証

観測バンドは $24.8\text{keV}(m=1)$ ,  $12.4\text{keV}(m=2)$ ,  $8.3\text{keV}(m=3)$ ,  $6.2\text{keV}(m=4)$ ,  $5.0\text{keV}(m=5)$ のそれぞれ10/m%程度

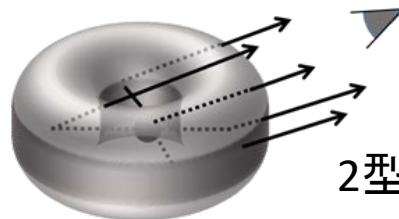
鉄輝線の分布も測る



トーラス想像図



1型



2型

### X線画像、偏光マップ

濃淡はX線強度の強さ

⇔はX線偏光の方向と偏光度の強さ

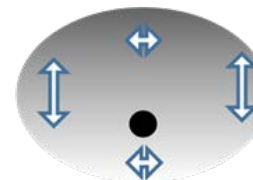
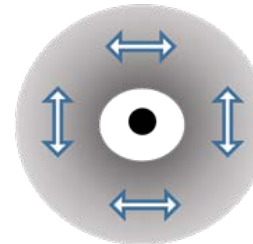


図2 トーラス想像図(左)と0.1秒角あるいはそれ以下の角度分解能でX線観測した予想図(右)。中心SMBH(●)は、1型では吸収を受けずに、2型では吸収を受けた連続成分が観測される。トーラスからは、連続光散乱成分、鉄の蛍光X線が図のような強度で検出される。また、⇔で示した方向、偏光度の偏光が検出される。1型の場合、各所での偏光は100%近い。

1型の場合、積分してしまうと偏光度ゼロだが空間分解できれば100%近い偏光がトーラス各所で得られるはず。

同時に、トーラスからの散乱を含まない、BH近傍からのX線放射も分離して検出できるはず

# まとめ

- 多重像X線干渉計(MIXIM)の原理を紹介
- 格子とピクセル検出器の単純な構成、50cm以下の超小型衛星サイズでChandra衛星を凌駕するサブ秒角の角度分解能を目指す
- マイクロフォーカスX線源とXRPIX使用で干渉縞検出
- 必要となるミクロンサイズの微小ピクセル検出器のパイロット版として、可視光用4.25ミクロンのGSENSE130を試験。常温でFWHM 240eV(ただしシングルピクセルの値)
- SPring8実験で平行光に対して**1秒角の像幅の干渉縞検出に成功**
- X線偏光検出にも成功
- 超小型MIXIM衛星、間借り型、FF使用Zoom型が可能
- 例えば、**近傍SMBHのトーラスの偏光撮像により統一モデルを直接検証**



# MIXIM FAQ

- 視野の広さは？
  - 他の干渉計と同様に狭いです。例えば $f=0.2$ の開口率なら像(ビーム)幅の5倍くらい
- 数 $\text{cm}^2$ の有効面積では実用にならないでしょうか？
  - 有効面積 $100\text{-}1000\text{cm}^2$ の望遠鏡で観測している対象は、 $>\mu\text{Crab}$ (Suzaku),  $>10\text{nCrab}$ (Chandra)
  - MIXIMのターゲットは $>\text{mCrab}$ 。
  - 集光系ではないのでBGDの除去にも限界があり、コリメータ衛星(Ginga、RXTE、Suzaku HXD)の観測ターゲットがベースライン。
- 2次元のイメージはどうやってとるの？
  - 1次元の格子を使ったユニットを複数用意し、直交する方向のプロファイルを得るのが出発点
  - 2次元の格子(ピンホールなど)が次の候補。