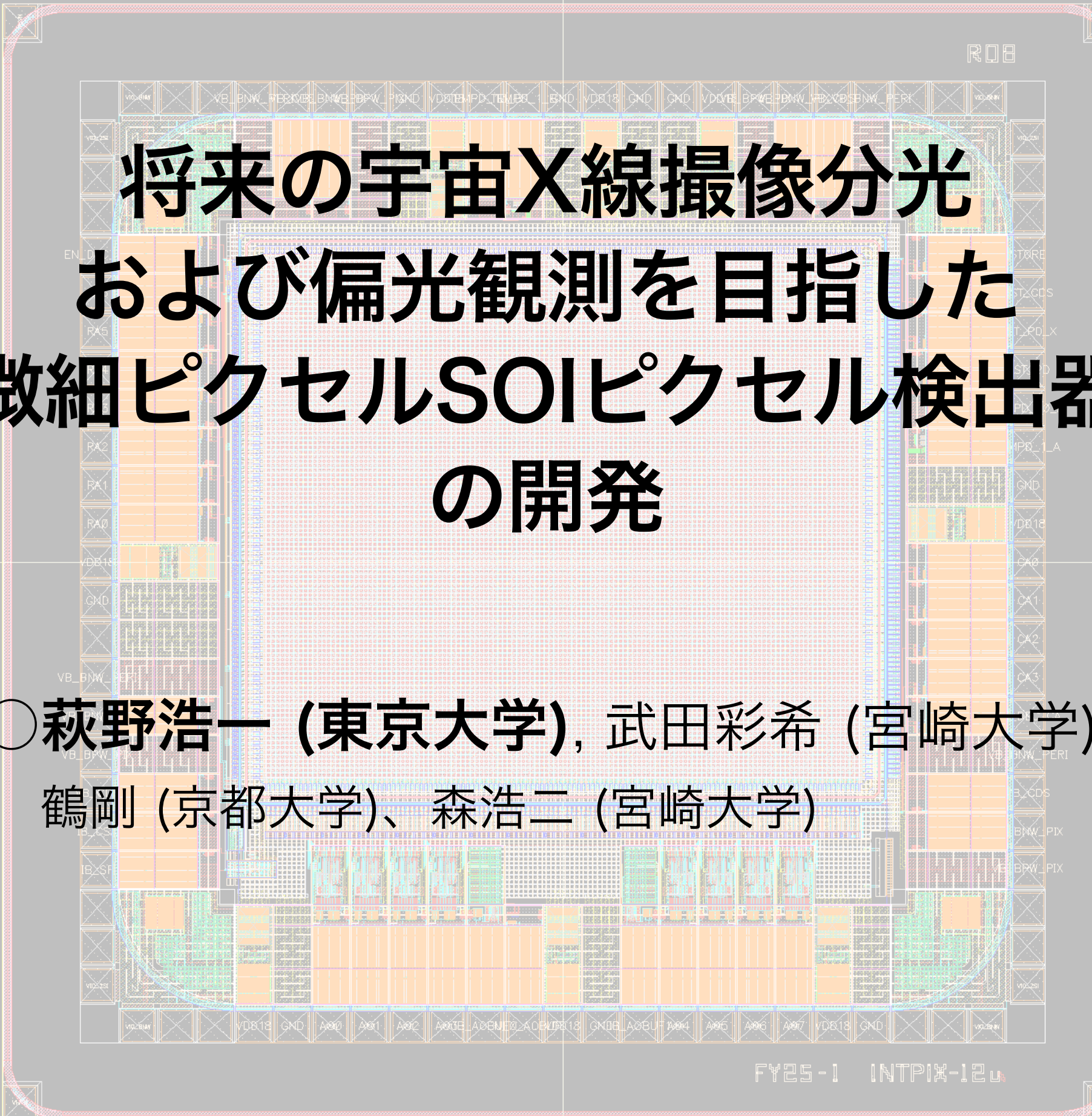
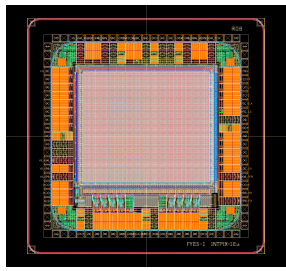


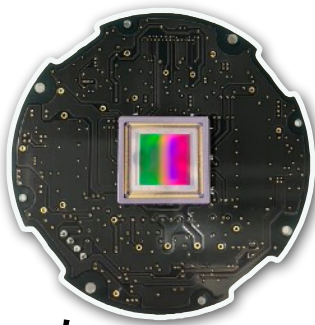


将来の宇宙X線撮像分光 および偏光観測を目指した 微細ピクセルSOIピクセル検出器 の開発

○萩野浩一 (東京大学), 武田彩希 (宮崎大学)
鶴剛 (京都大学)、森浩二 (宮崎大学)



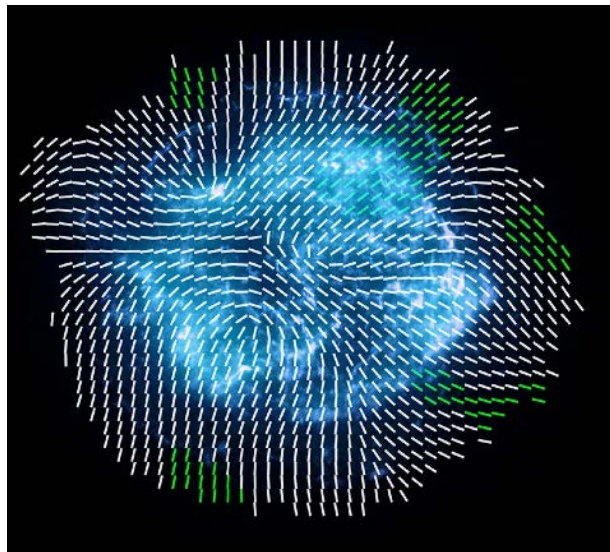
宇宙X線「偏光」観測



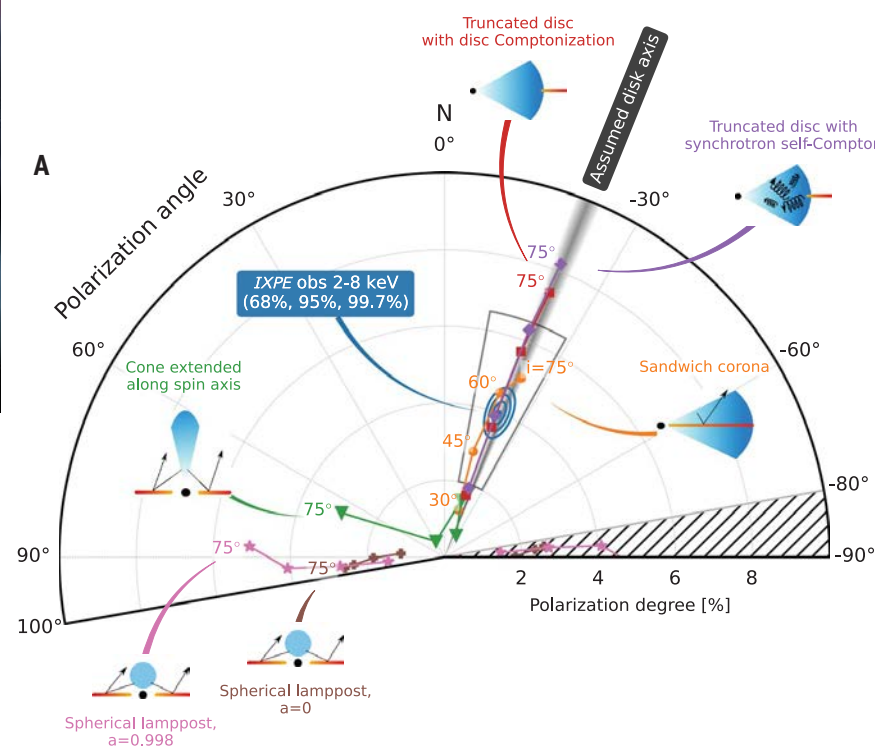
- **X線偏光観測:** 従来のX線観測 (エネルギー/位置/時間) では得られない「異方性」を探る新しい観測量



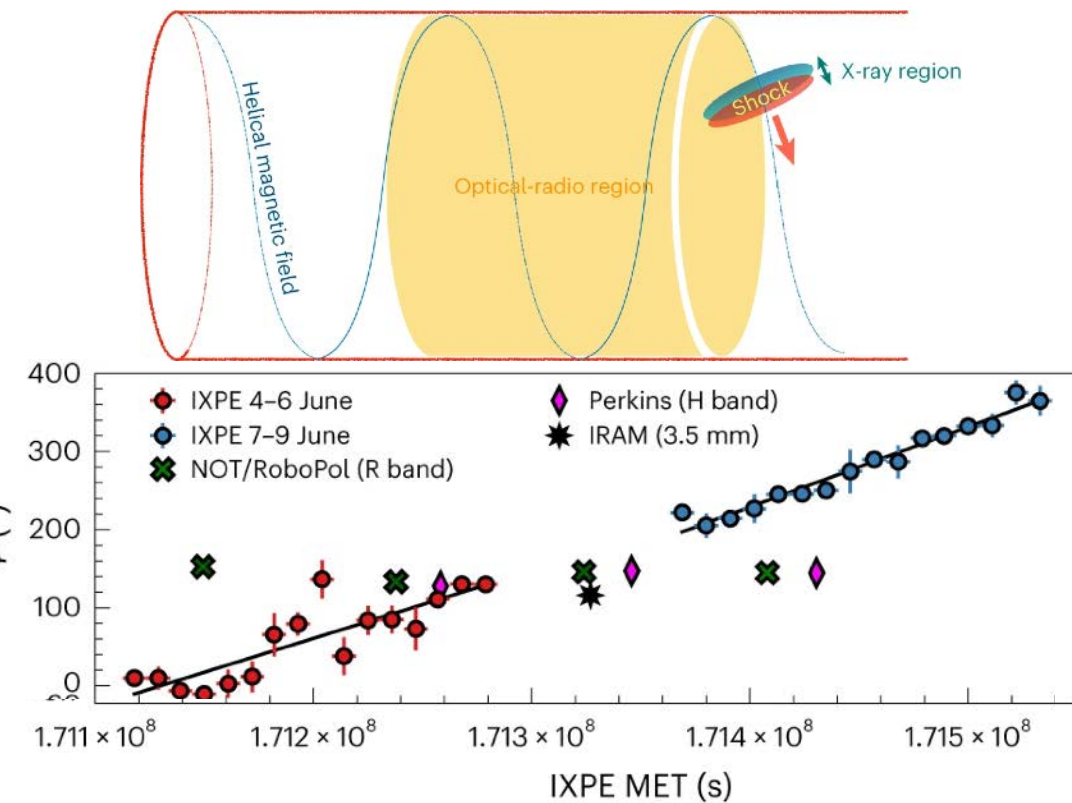
超新星残骸の磁場構造 (Vink+22)



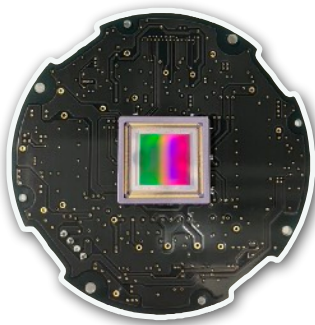
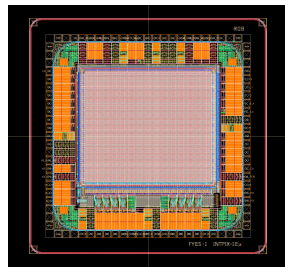
ブラックホール周辺物質の幾何学構造 (Krawczynski+22)



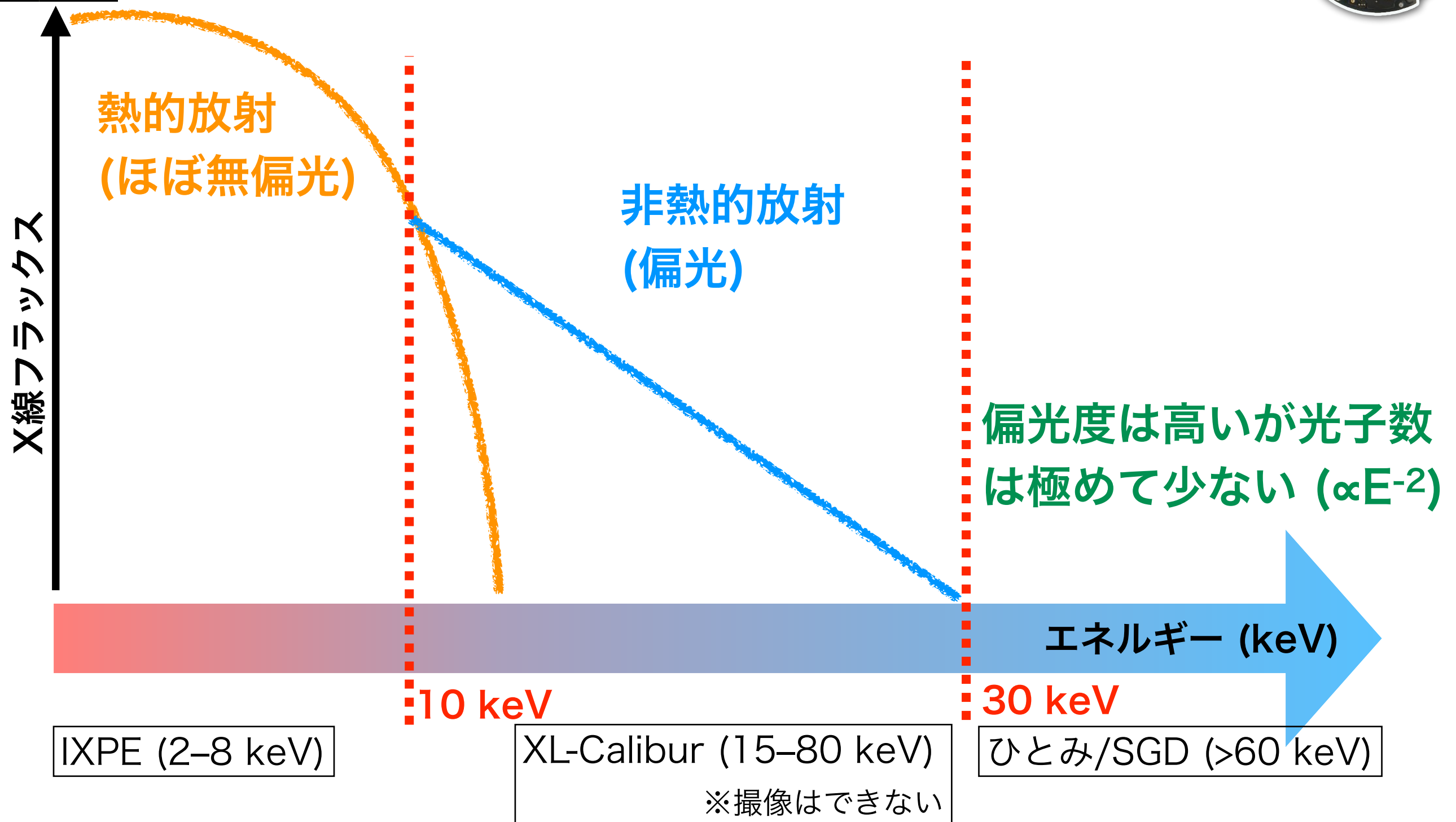
ジェット内部磁場に沿った衝撃波伝搬 (Di Gesu+23)



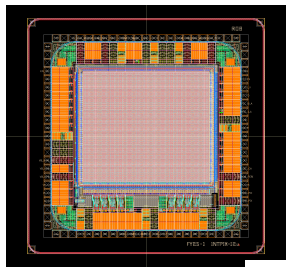
- 2021年に打ち上がった世界初のX線偏光撮像専用衛星「IXPE (Imaging X-ray Polarimetry Explorer)」は、X線天文分野で多数の画期的な成果を出してきた



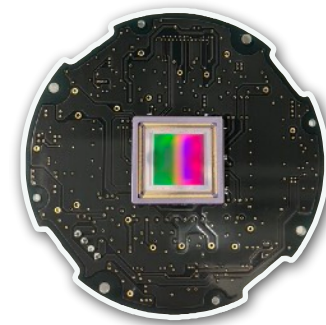
硬X線偏光観測の重要性



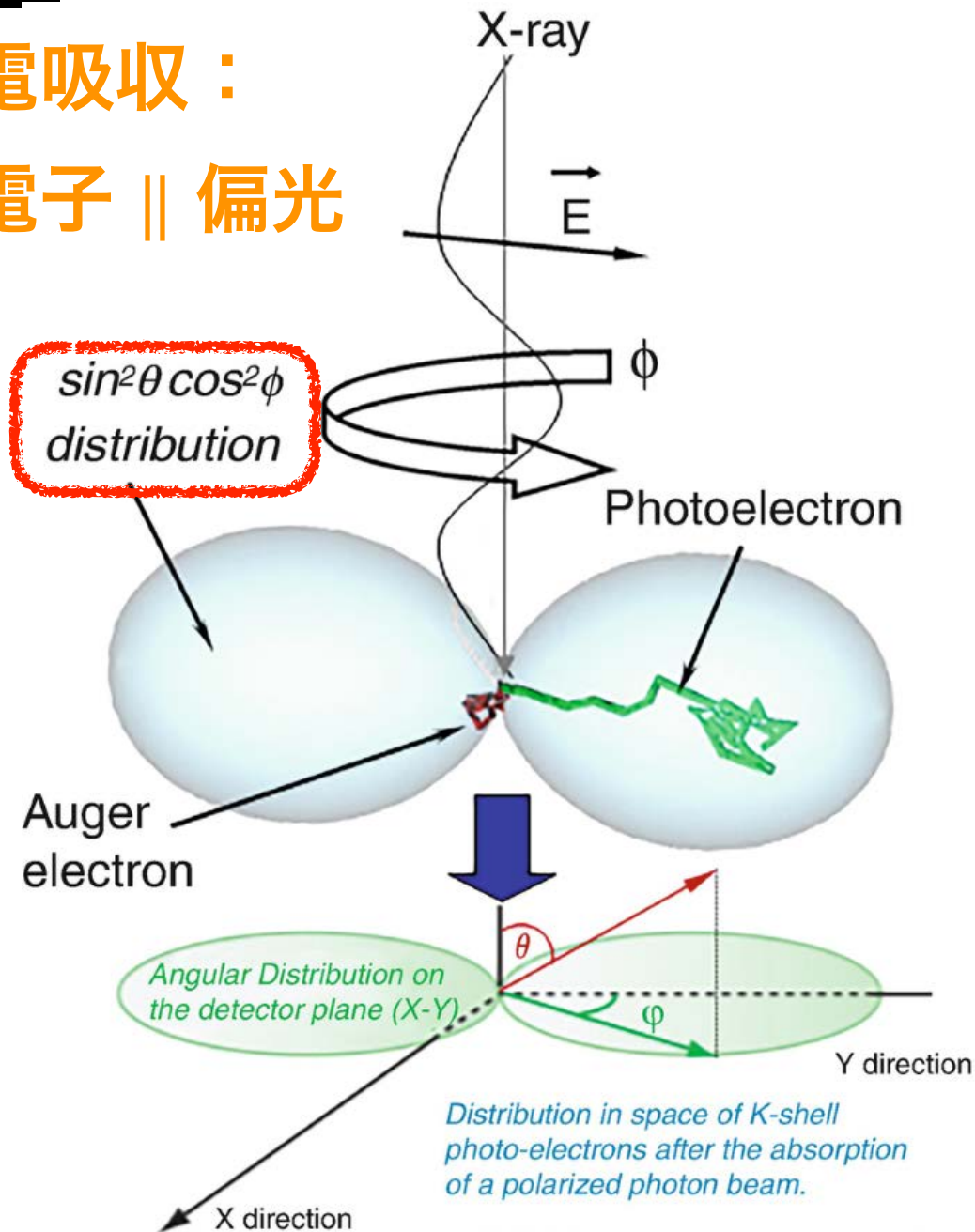
◆10–30 keVの硬X線偏光観測は、偏光度 & 光子統計が高く極めて重要



X線偏光の観測方法

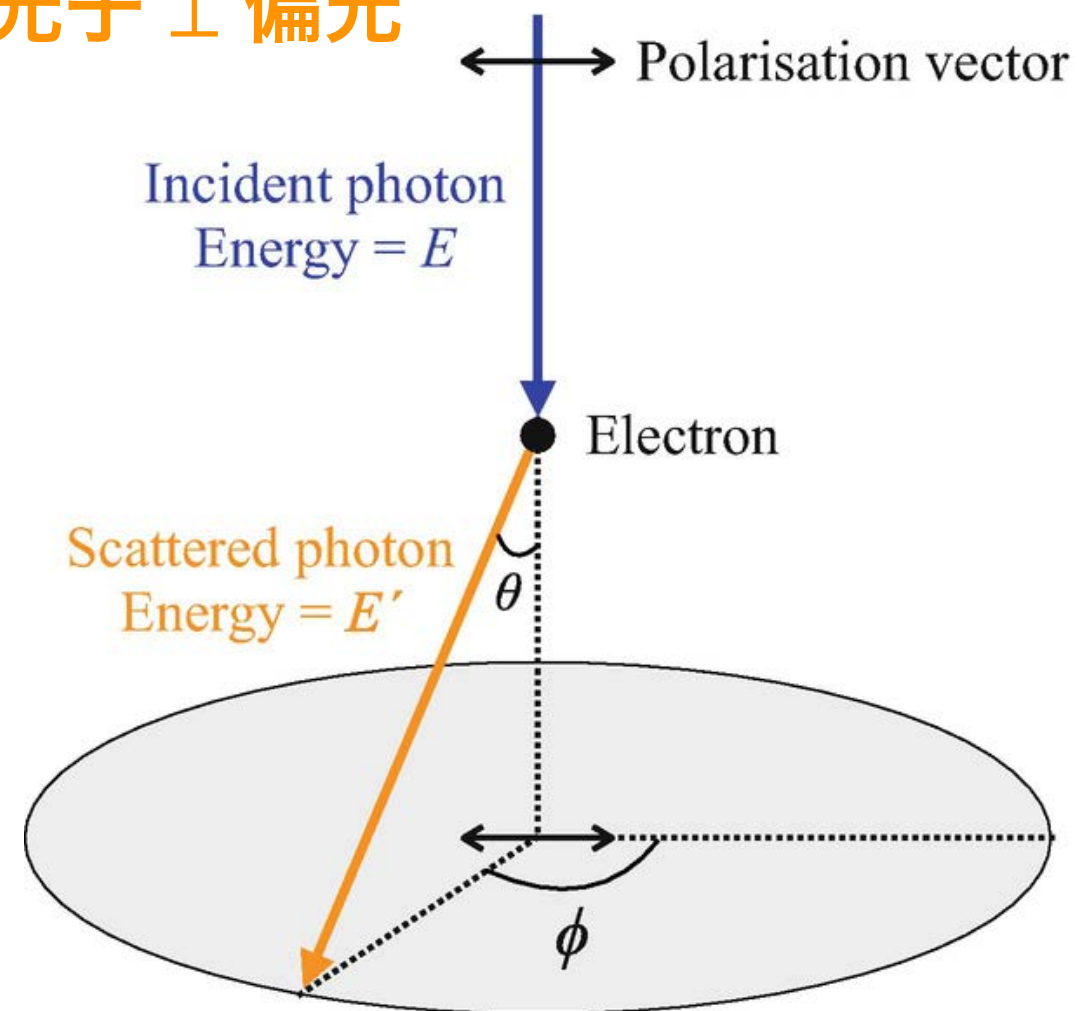


光電吸収：
光電子 $\parallel$ 偏光

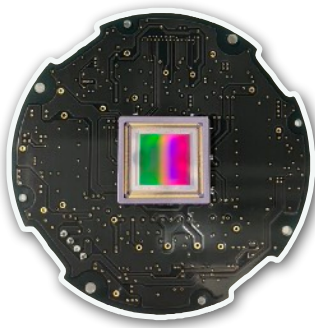
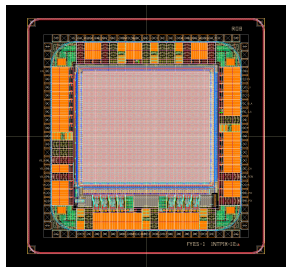


IXPE (ガス; 2–8 keV)

コンプトン散乱：
散乱光子 $\perp$ 偏光



ひとみ/SGD
(Si+CdTe; >60 keV)
XL-Calibur
(Be柱+CZT; 15–80 keV)

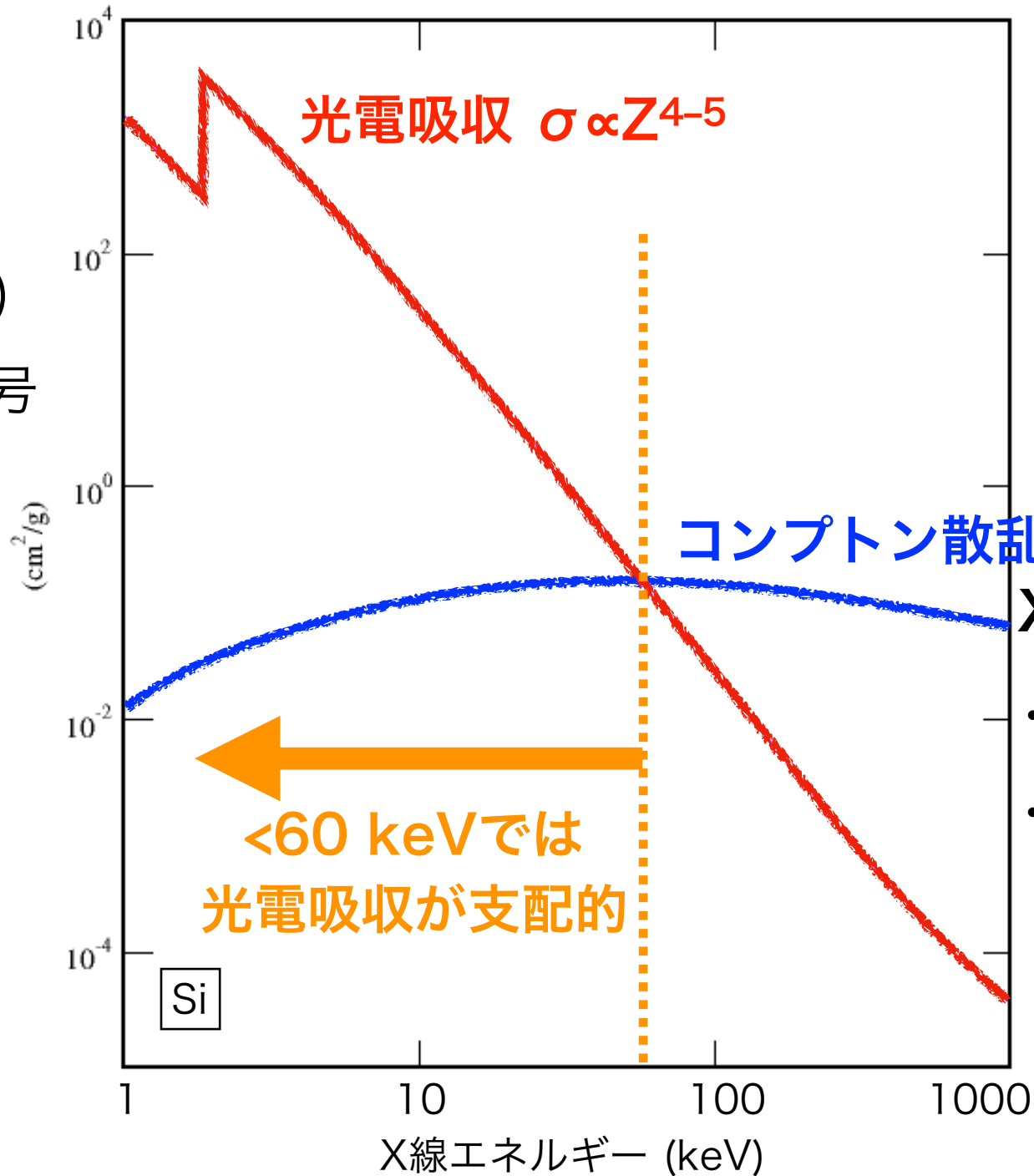
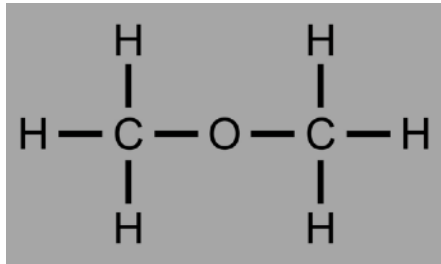


光子と物質の反応断面積

IXPE (2–8 keV)

- ・ ガス検出器
(ジメチルエーテル)
- ・ 低密度・低原子番号

➡硬X線では
検出効率が低い



ひとみ/SGD (>60 keV)

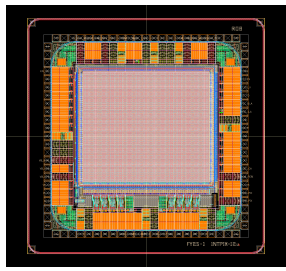
- ・ Si (散乱) + CdTe (吸収)
- ➡<60 keVでは
散乱確率が低い

XL-Calibur (15–80 keV)

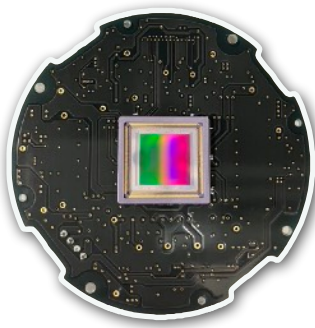
- ・ Be (散乱) + CZT (吸収)
- ・ Be (Z=4) なら>15 keVで
コンプトン散乱が支配的

➡>15 keVで偏光観測
可能だが、passiveな散乱
体なので撮像は難しい

- ・ Siで光電吸収を使うことで、10–30 keVでの偏光撮像観測を目指す

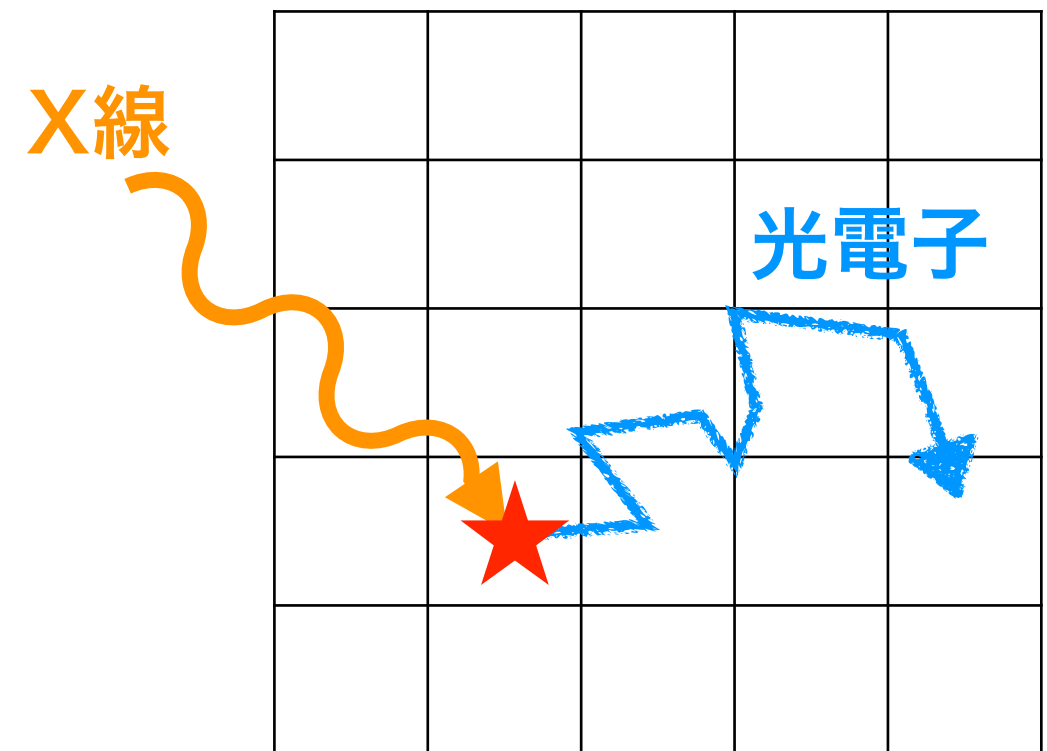
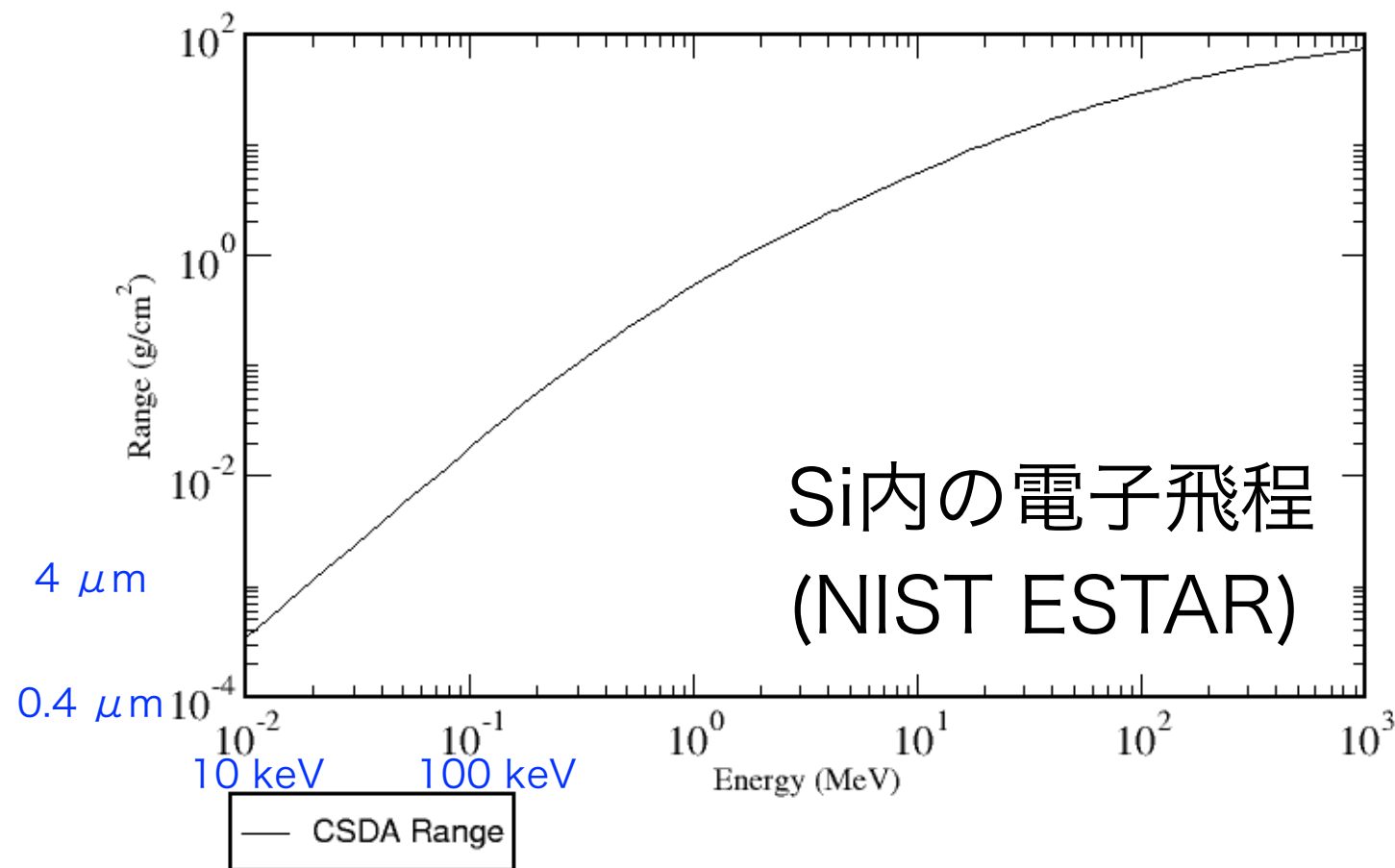


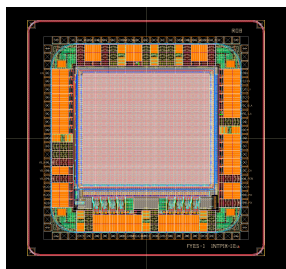
Siセンサーによる硬X線偏光測定



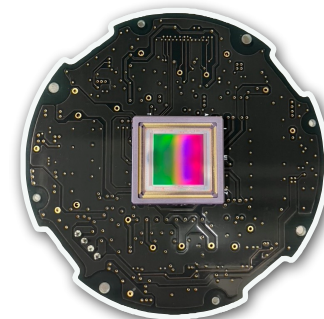
- $\rho \sim \text{mg}/\text{cm}^3$ のガス (ex. IXPE) の代わりに $\rho \sim \text{g}/\text{cm}^3$ の Si 半導体検出器を用いると
 - ✓ 反応確率が高く、**高エネルギー**で観測可能
 - ✓ 光電子の飛程が小さく ($1.5 \mu\text{m}@10 \text{ keV}$, $5 \mu\text{m}@20 \text{ keV}$)、**高い位置分解能**が必須

➡ピクセルサイズ $\sim \mu\text{m}$ のCMOSセンサなら、硬X線偏光観測が実現可能



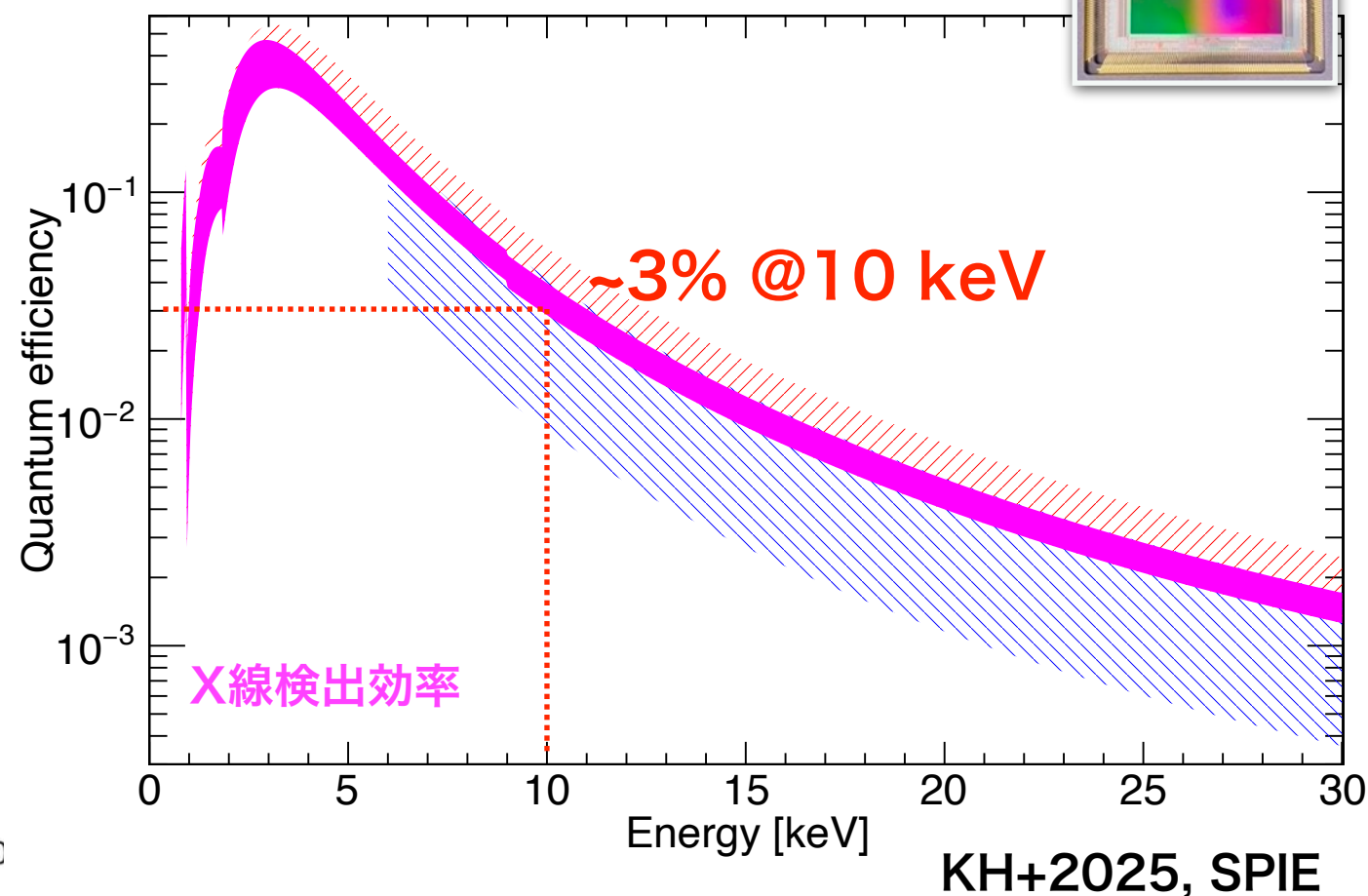
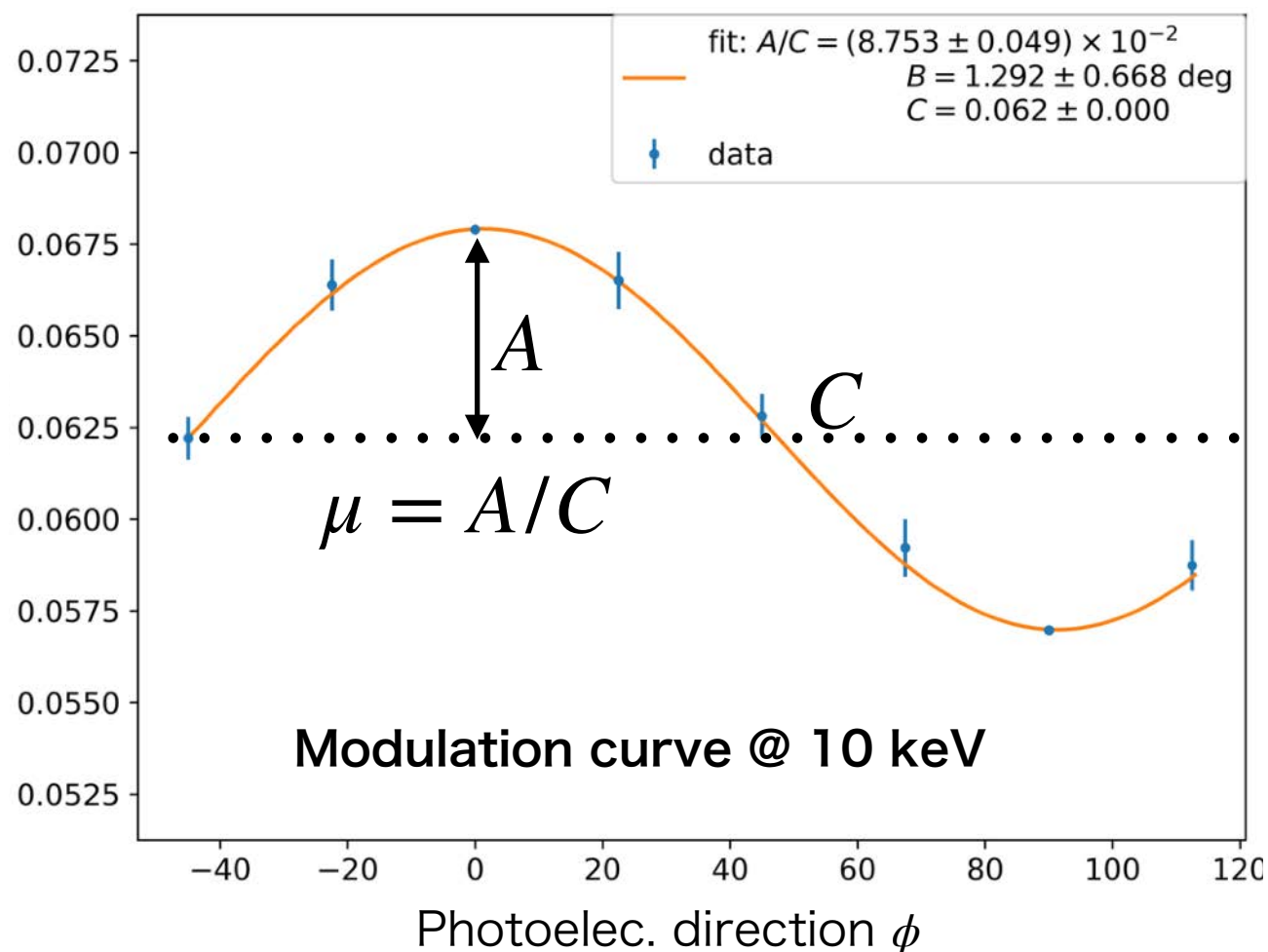
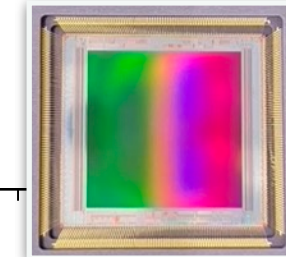


可視光用CMOSセンサでの実証

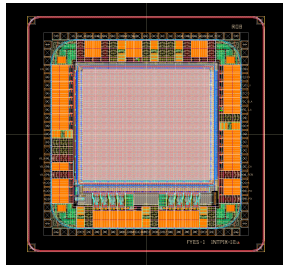


- ピクセルサイズ $2.5 \mu\text{m}$ の可視光用CMOSセンサGMAX0505を使って、10 keV (6 keVでも) の硬X線偏光の測定に成功

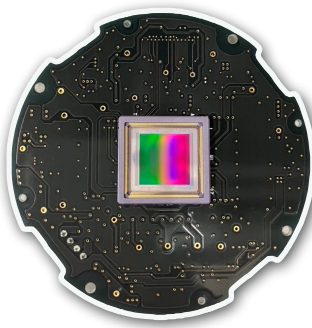
GMAX0505



- 可視光用CMOSセンサは、空乏層が $\sim 5 \mu\text{m}$ と薄く、硬X線の検出効率が極めて低い
➡ピクセルサイズが小さい & より厚い空乏層のセンサが欲しい



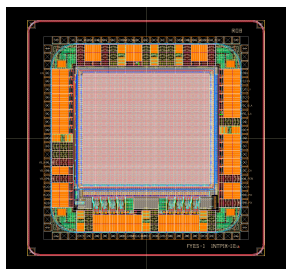
X線専用CMOSセンサ



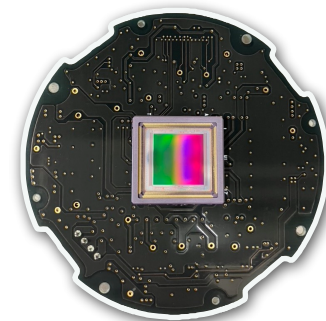
- SOI技術を使って、
 - ✓ 小さなピクセルサイズ
 - ✓ 厚い空乏層のCMOSセンサを作る

- 基本方針：

- ✓ XRPIXで実現した優れたX線観測性能を引き継ぐ
- ✓ XRPIXのトリガー機能を削除することで、ピクセルサイズを縮小
- ✓ 最初の試作品はとにかく「動くもの」



R08 INTPIX12u (仮称)



◆基本スペック

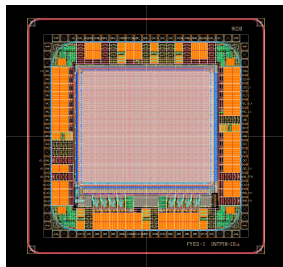
- ▶ ピクセルサイズ：12 μm $\times$ 12 μm
- ▶ ピクセル数：112 (V) $\times$ 128 (H)
- ▶ チップサイズ：2.9 mm $\times$ 2.9 mm
- ▶ 出力数：8ch
- ▶ ピクセル部：
 - ✓ PDD構造
 - ✓ CSA + CDS による増幅&読み出し
 - ✓ Global shutter

当然ながらXRPIXと同じように回路を組むと全く入らない。

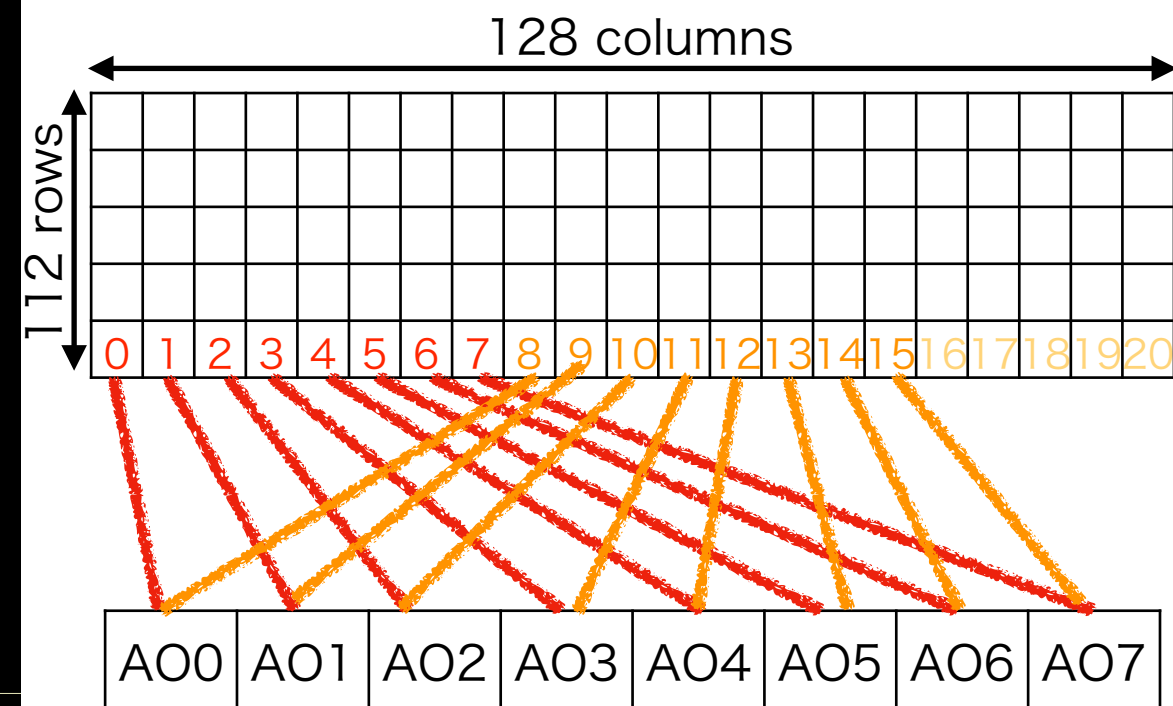
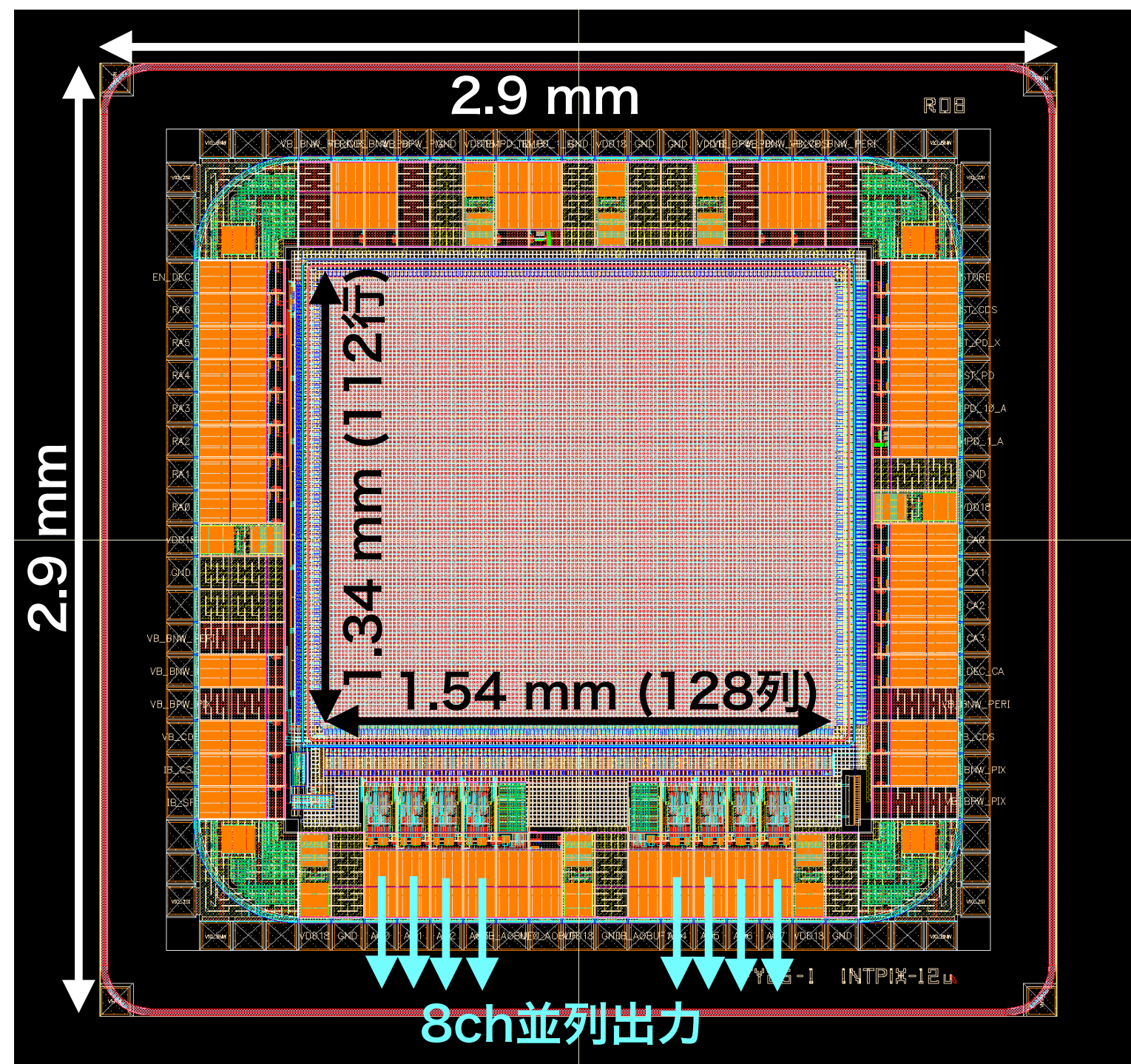
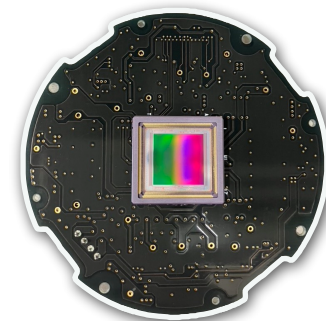
- Tr型の妥協
(BtをやめてNormalにする)
- Capの妥協
(容量減らす・DMOS/MIM使用)
- PDDのBPWへのコンタクトを間引く
- 隣接画素と配線を共有する
などして何とか成立させた。



設計：武田彩希 先生 (宮崎大)

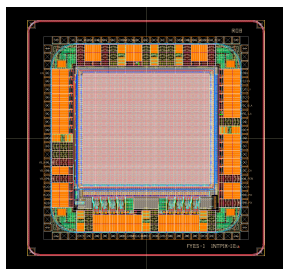


レイアウト

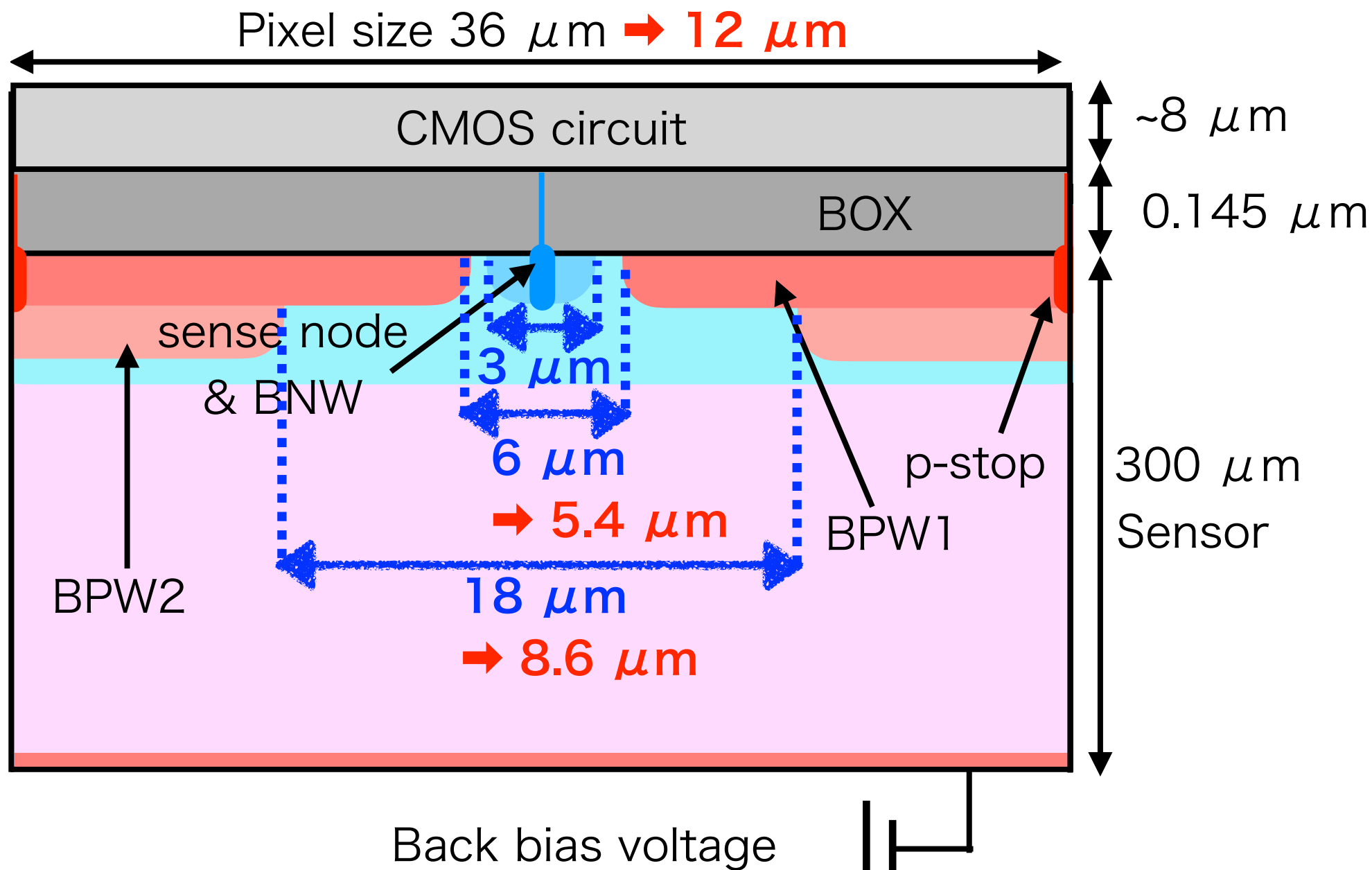
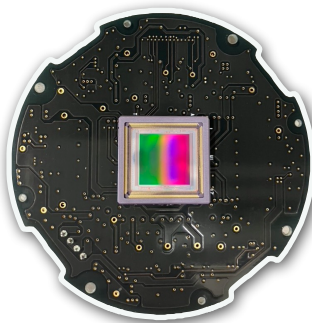


- 連続する8列を同時に選択し、計16回切り替えて128列 (8×16) を読み出す

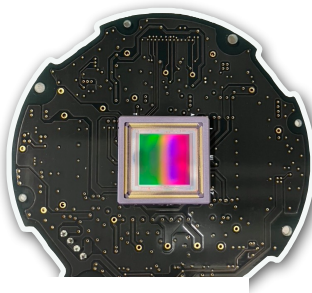
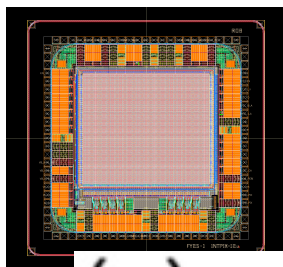
➡ $2 \mu\text{s}$ /ピクセルで読むと、約280 frame/sで読み出し可能



PDD構造

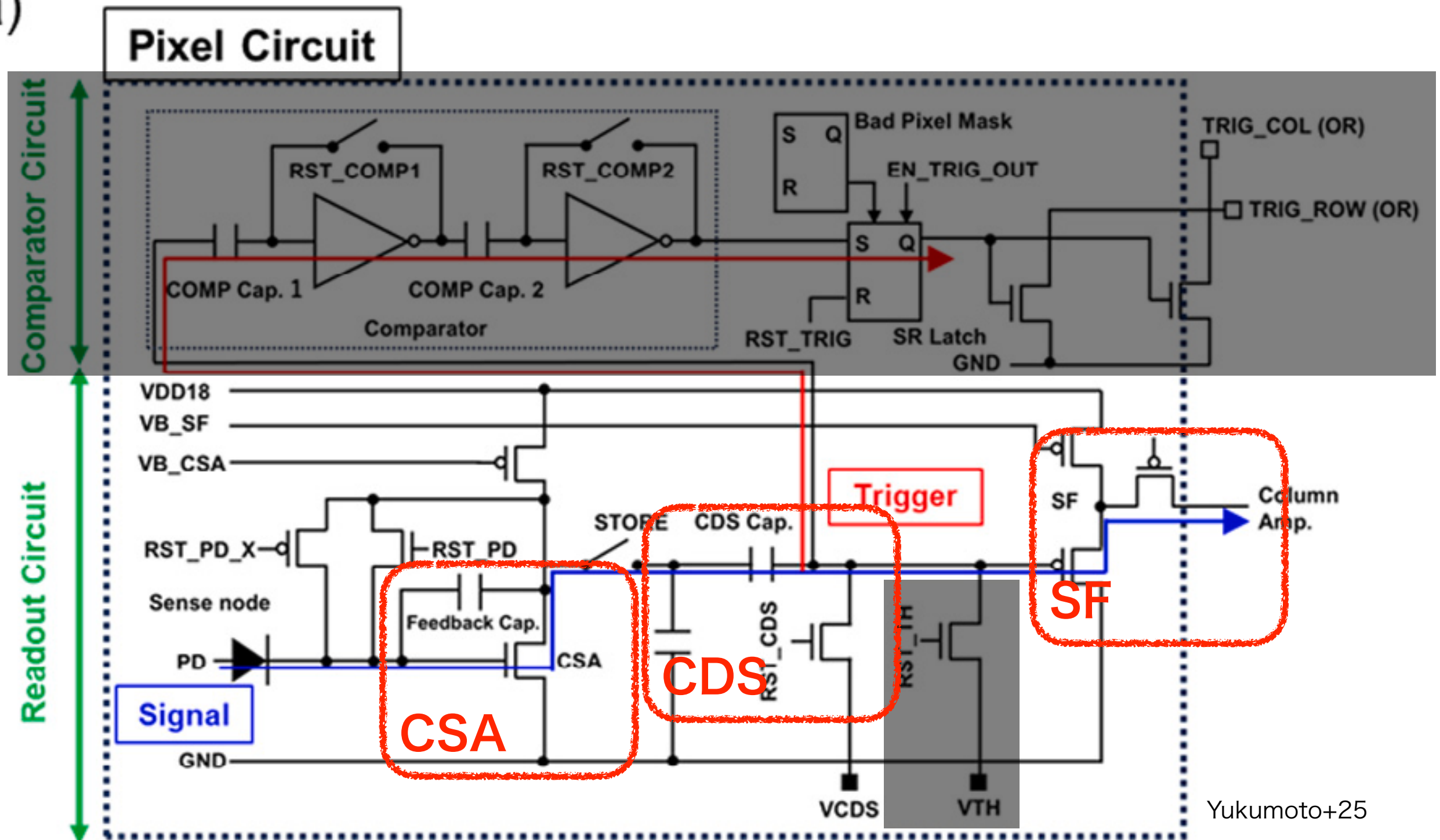


- ・ ピクセルサイズの縮小に伴い
 - ✓ BPW1&2の内縁を縮小
 - ✓ p-stopを4角から対角の2箇所

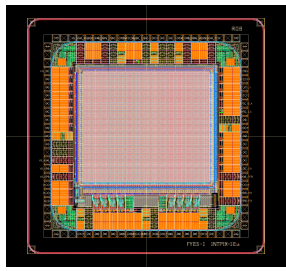


ピクセル回路

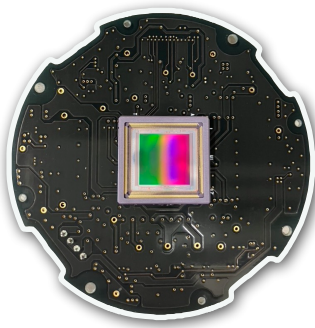
(a)



- XRPIXの回路からトリガー関係を削除



硬X線偏光測定の実現性

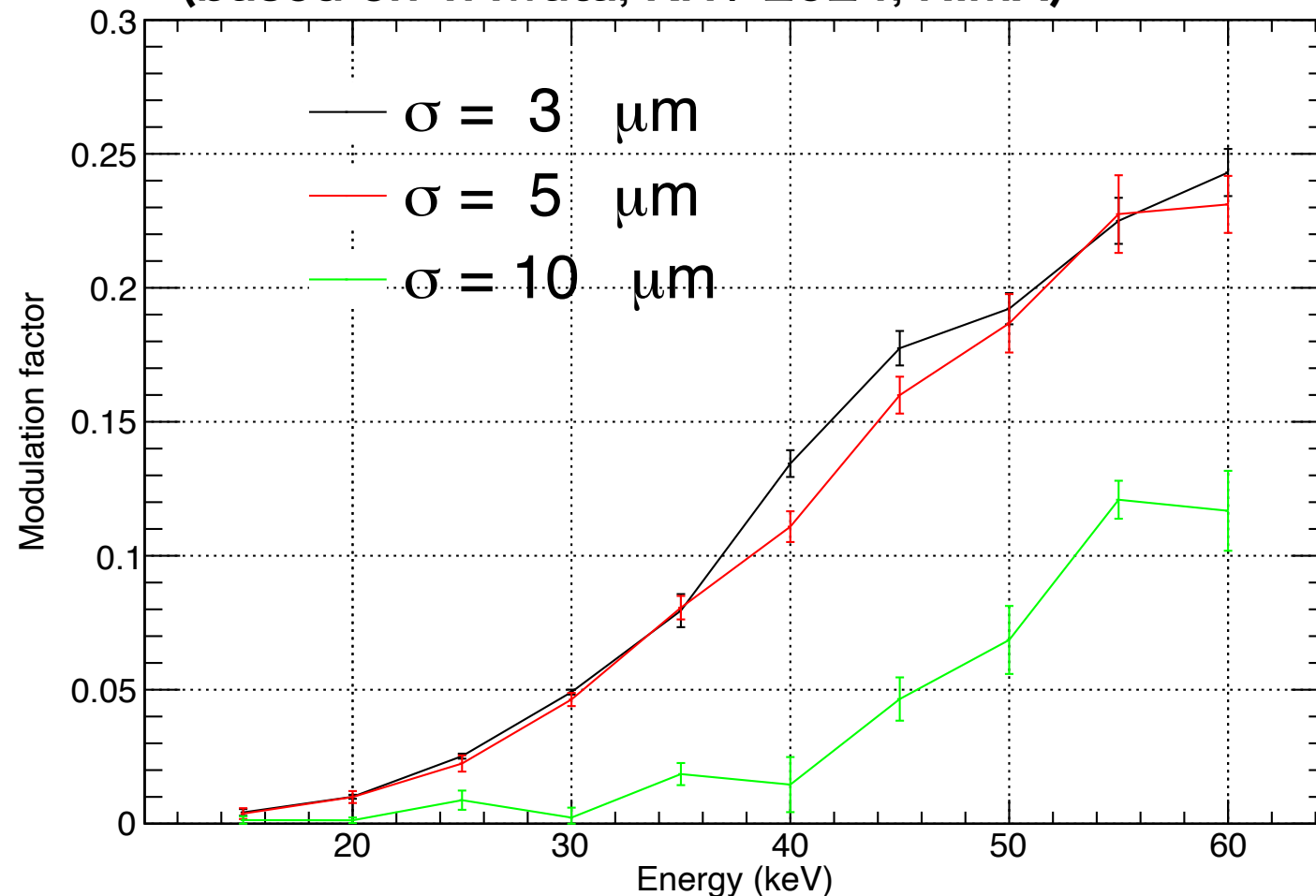


- 可視光CMOS：2.5 μm ピクセルで10 keV (飛程1.5 μm)

➡INTPIX12u (仮称)：

12 μm ピクセルで25 keV (飛程7 μm) の偏光測定ができる？

10 μm ピクセルを仮定した簡易シミュレーション結果
(based on T. Iwata, KH+ 2024, NIMA)

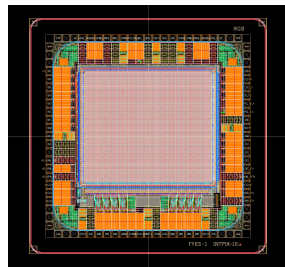


- キャリアのドリフト中の拡散を5 μm 程度に抑えることが重要

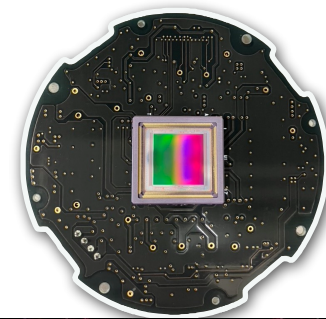
$$\sigma = \sqrt{2 \frac{\mu k T}{e} t}$$

$$\simeq 4.4 \mu\text{m} \times \left(\frac{W_{\text{dep}}}{300 \mu\text{m}} \right)^2 \left(\frac{V_{\text{BB}}}{200 \text{ V}} \right)^{-1}$$

➡>200 V程度の逆電圧でOK



X線偏光だけじゃない



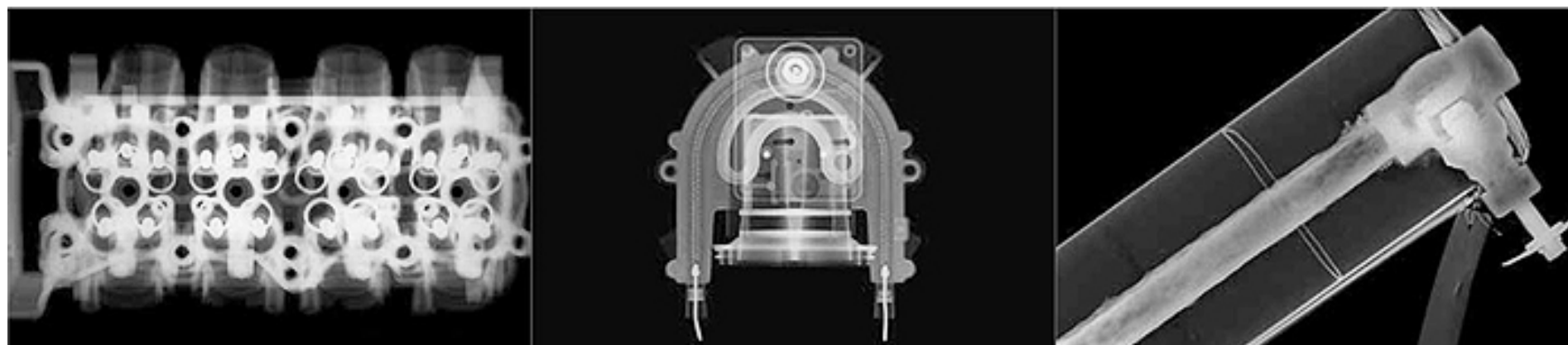
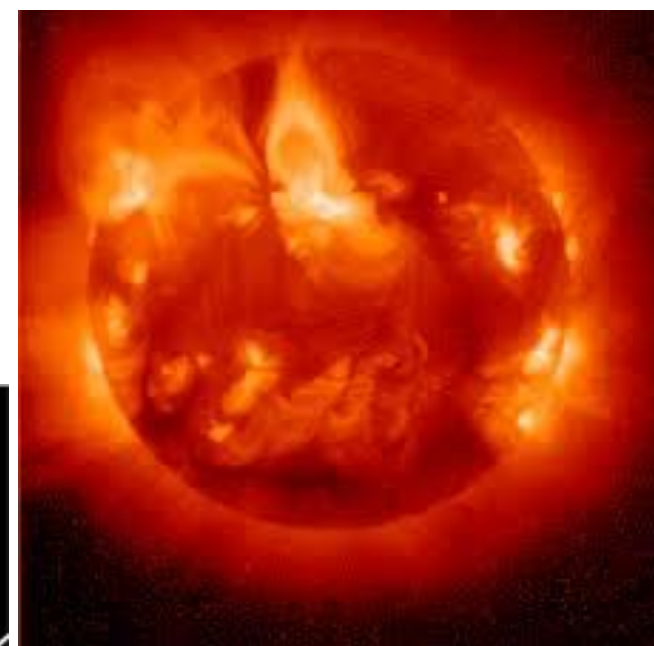
- X線偏光観測以外にも幅広い用途があり得る

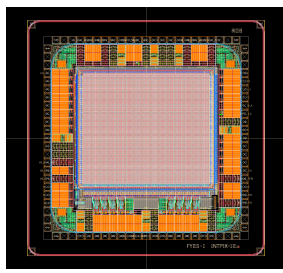
◆X線天文観測で高速版X線CCD的な使い方

- ▶ 高空間分解能観測でパイルアップ低減

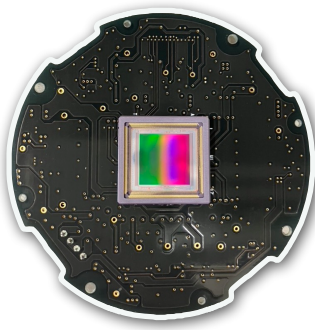
◆1度に多数のX線光子が到来する環境での測定 (太陽フレア, 加速器, 非破壊検査, etc)

- ▶ イベント駆動よりも効率よくデータ取得可能





まとめ & 今後



◆宇宙硬X線偏光観測を目指して、小さなピクセルサイズと厚い空乏層を備えたX線CMOSセンサを開発したい

- ・ピクセルサイズ $12\ \mu\text{m}$ 、 $112\ (\text{V}) \times 128\ (\text{H})$ ピクセルのシンプルなPDD素子を設計し (by 武田さん)、FY2025のMPW runに投入
- ・この試作素子でも、十分な逆電圧をかければ、 $25\ \text{keV}$ の偏光検出ができる見込み

◆今後

- ・素子の動作試験 & 偏光検出能力の実証
- ・次回MPWでピクセルサイズのさらなる縮小 (Rolling shutter? CDSの簡略化?)
- ・(カッコいい名前もつけたい)