



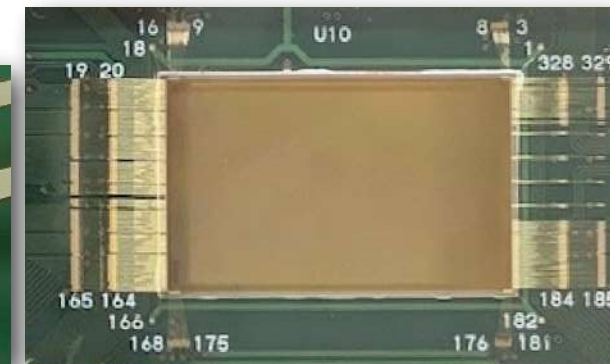
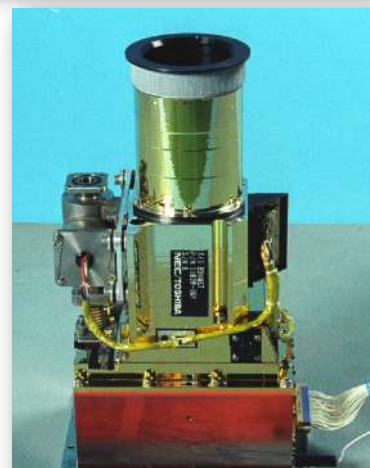
X線天文衛星用の X線CCD / X線SOI の開発

鶴 剛 (京大理)

tsuru@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp

Self Introduction

- Takeshi Go TSURU (鶴 剛 / ツル タケシ)
 - Cosmic Ray Group, Physics, Kyoto University (京都大学 理学部 物理)
 - X-ray Astronomy. Observational Study on High Energy Objects
 - Developments of X-ray Detectors and X-ray Satellites
 - <http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/member/tsuru/index.html>
 - tsuru@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp 075-753-3868



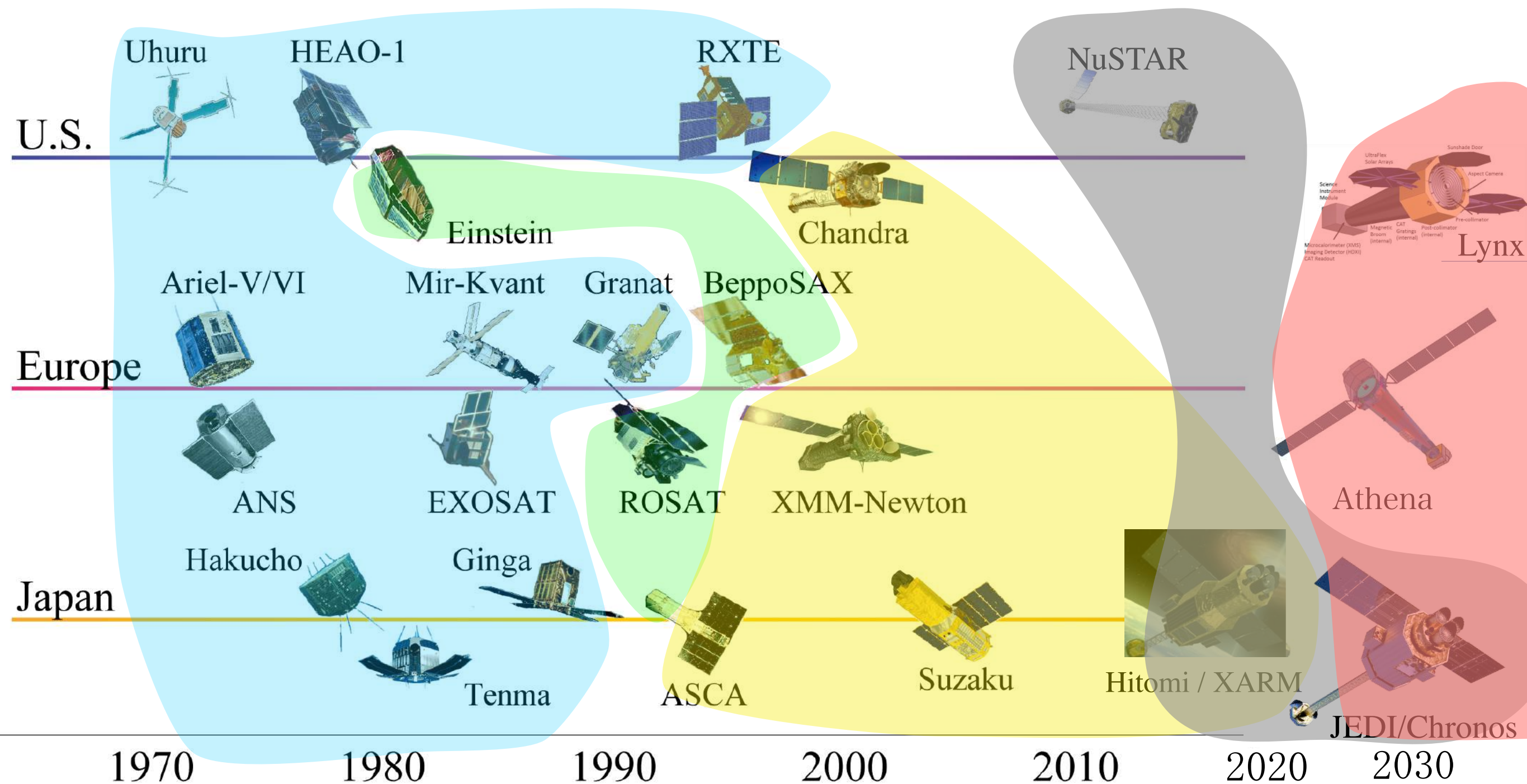
ASCA 「あすか」 (1993)
Imaging Scintillation
Proportional Counter

Suzaku 「すざく」
(2005)
X-ray CCD

XRISM 「クリズム」
(2023)
X-ray CCD

JEDI / Chronos
(~2033)
X-ray SOIPIX

Major X-ray Astronomical Satellites



**Gas counter
w/ Collimator**

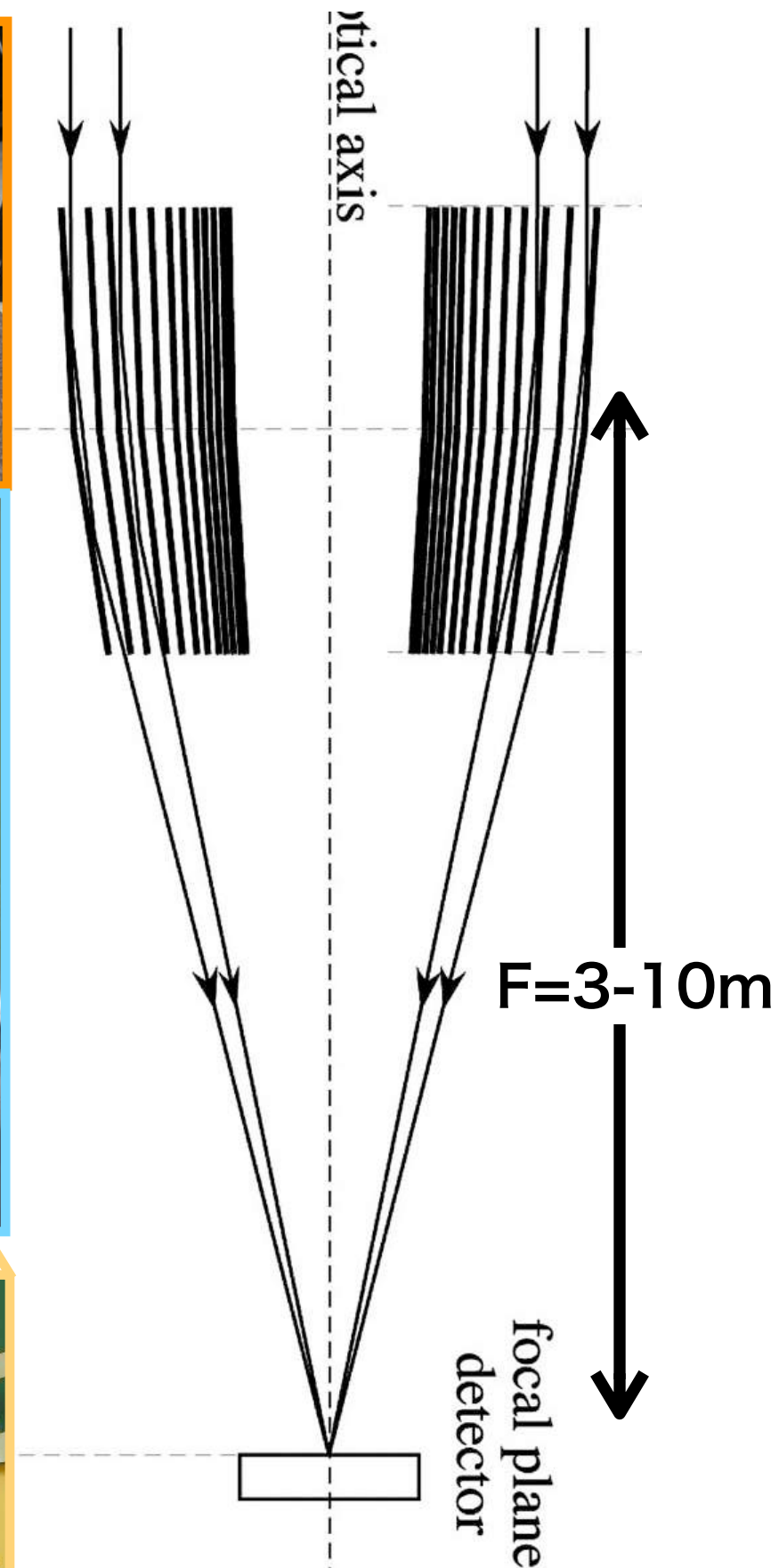
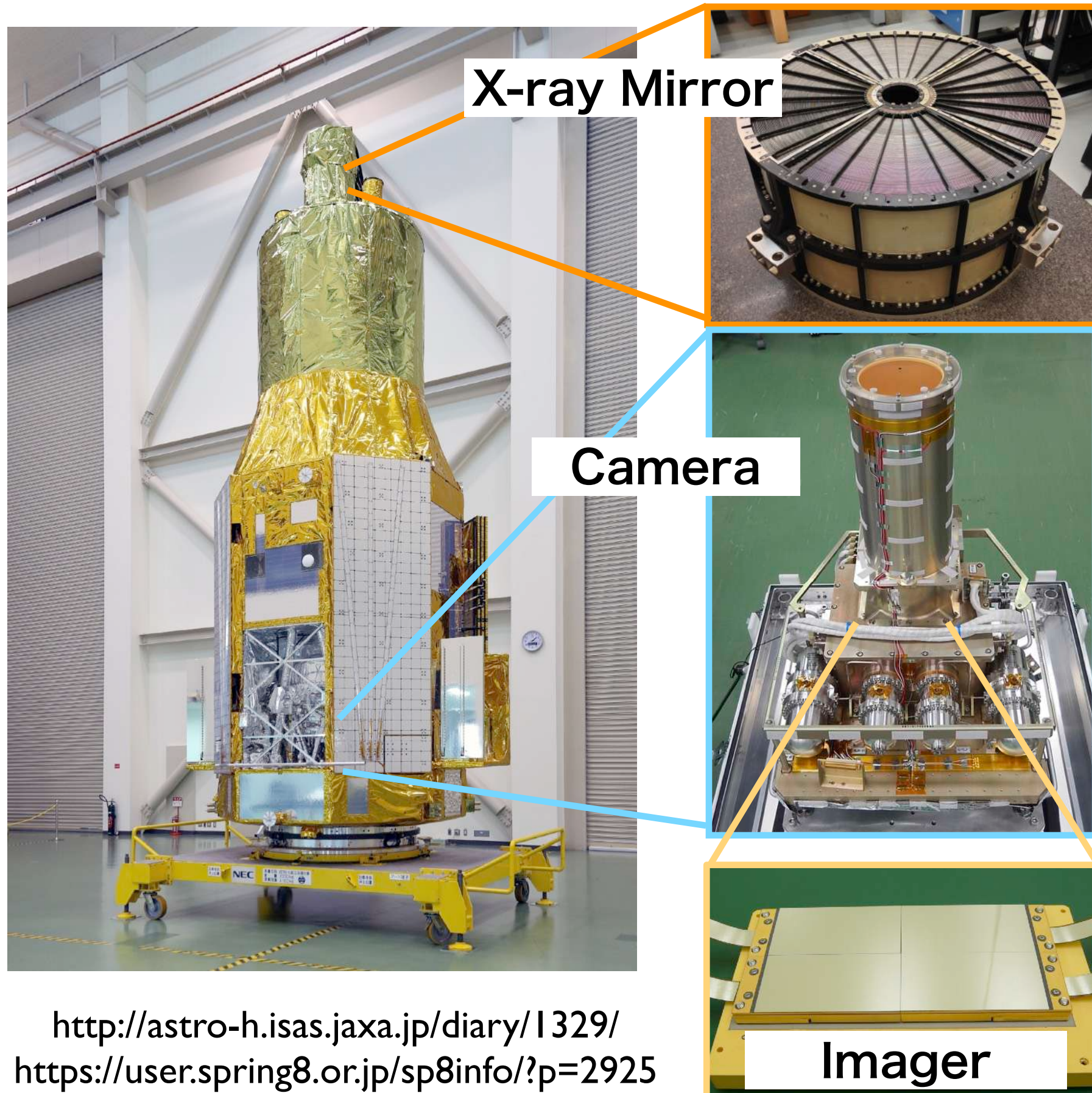
Gas Imager

CCD Imager

**High Speed
CCD, APS**

CdTe/GZT

X-ray Imaging System



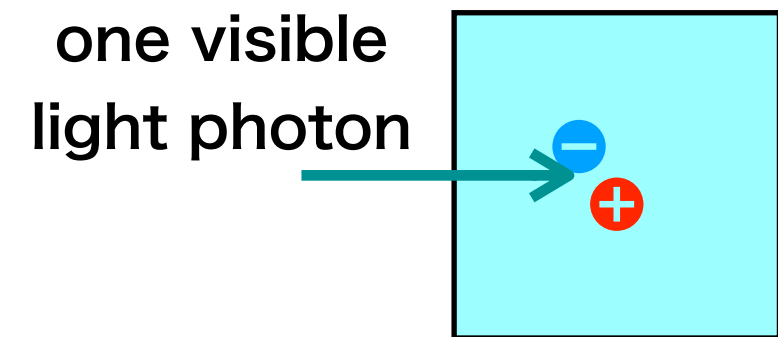
<http://astro-h.isas.jaxa.jp/diary/1329/>
<https://user.spring8.or.jp/sp8info/?p=2925>

Detection of Visible light and X-ray photon

- Both visible light and X-rays can be detected by silicon image sensors.
- However, there are differences.

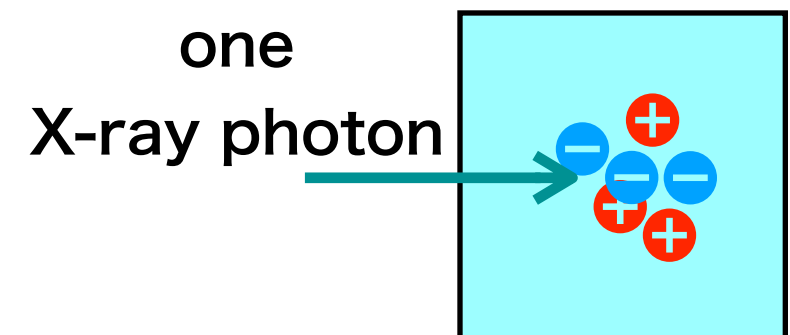
Visible light:

- One visible light photon $\Rightarrow$ one e-h pair.



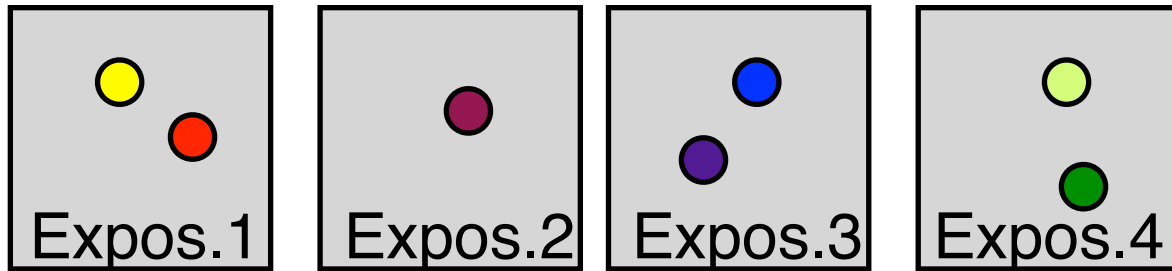
X-ray photon:

- One X-ray photon $\Rightarrow$ multiple e-h pairs.
- The number of e-h pairs $\propto$ X-ray energy (3.65 eV / 1 e-h pair).
- By measuring the signal charge, we can measure its energy.



Energy-resolved X-ray photon-counting

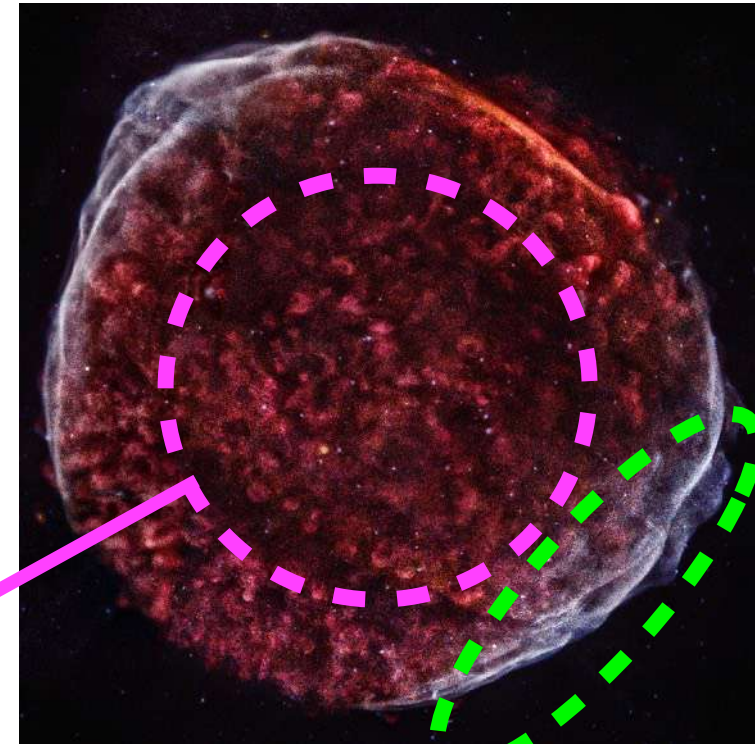
6



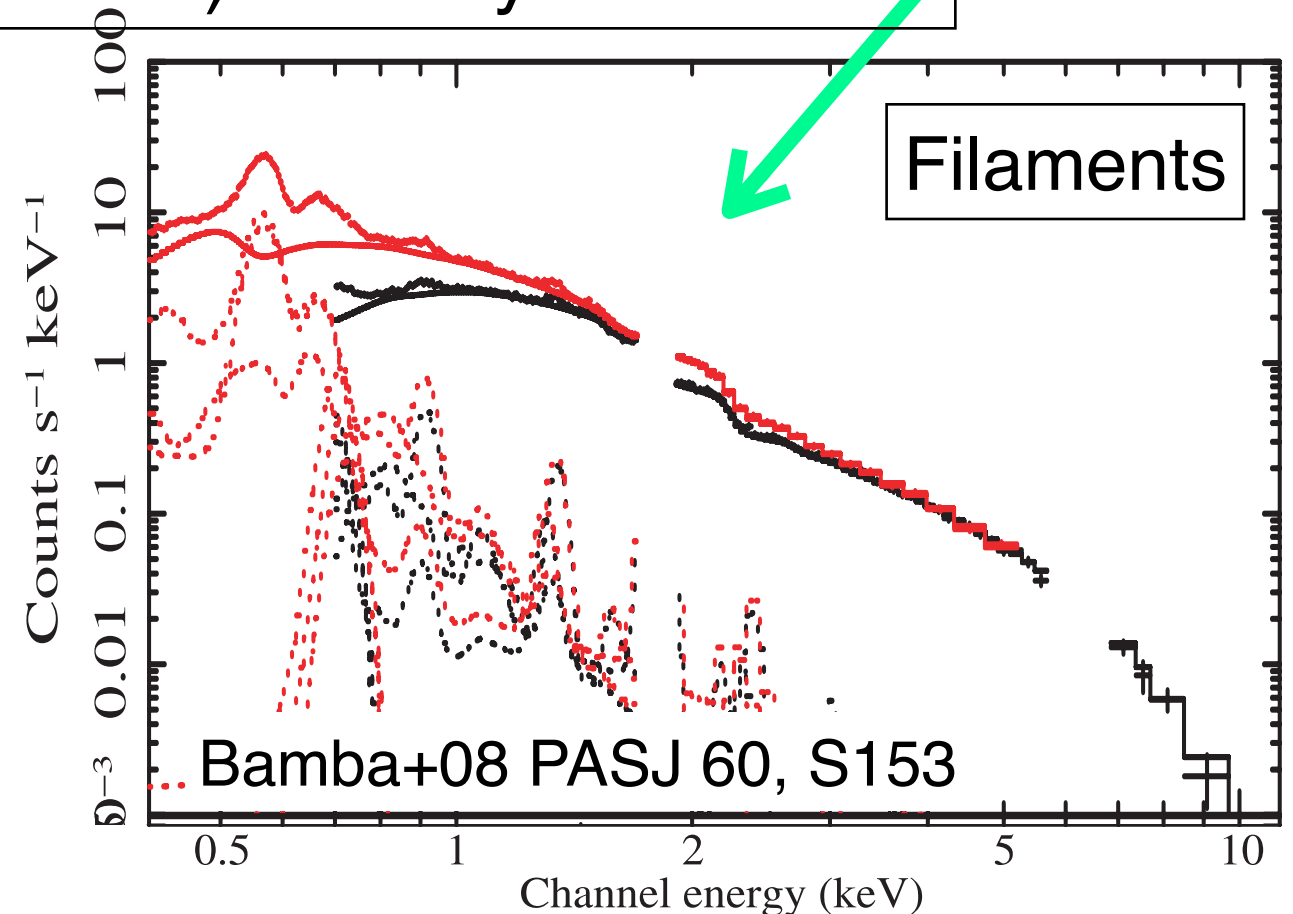
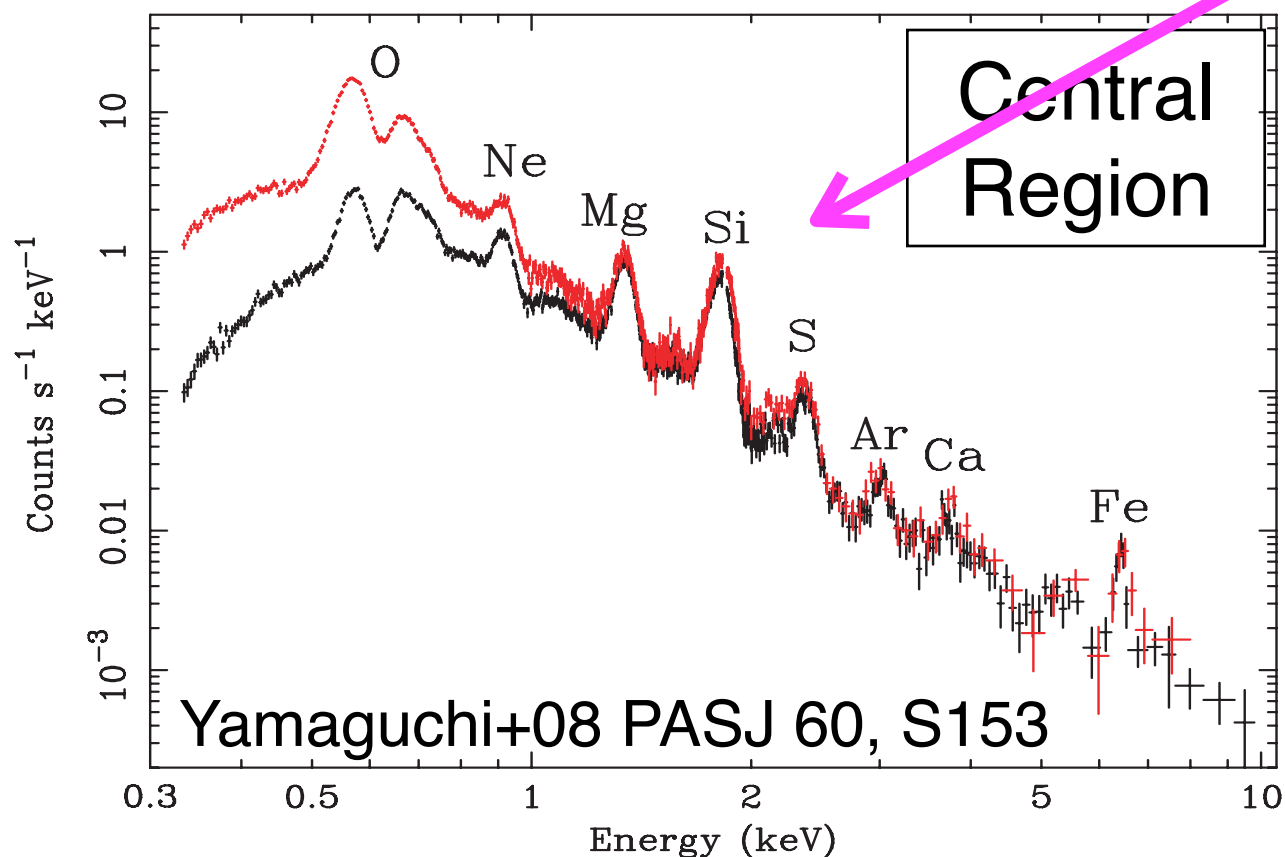
- Detect an X-ray photon as one-by-one event.
- Measure position, energy and time of each X-ray event.
- Typical observing time per object is one day.
- Make exposures of $\sim 10^4$ times.

Map of the number of X-ray events

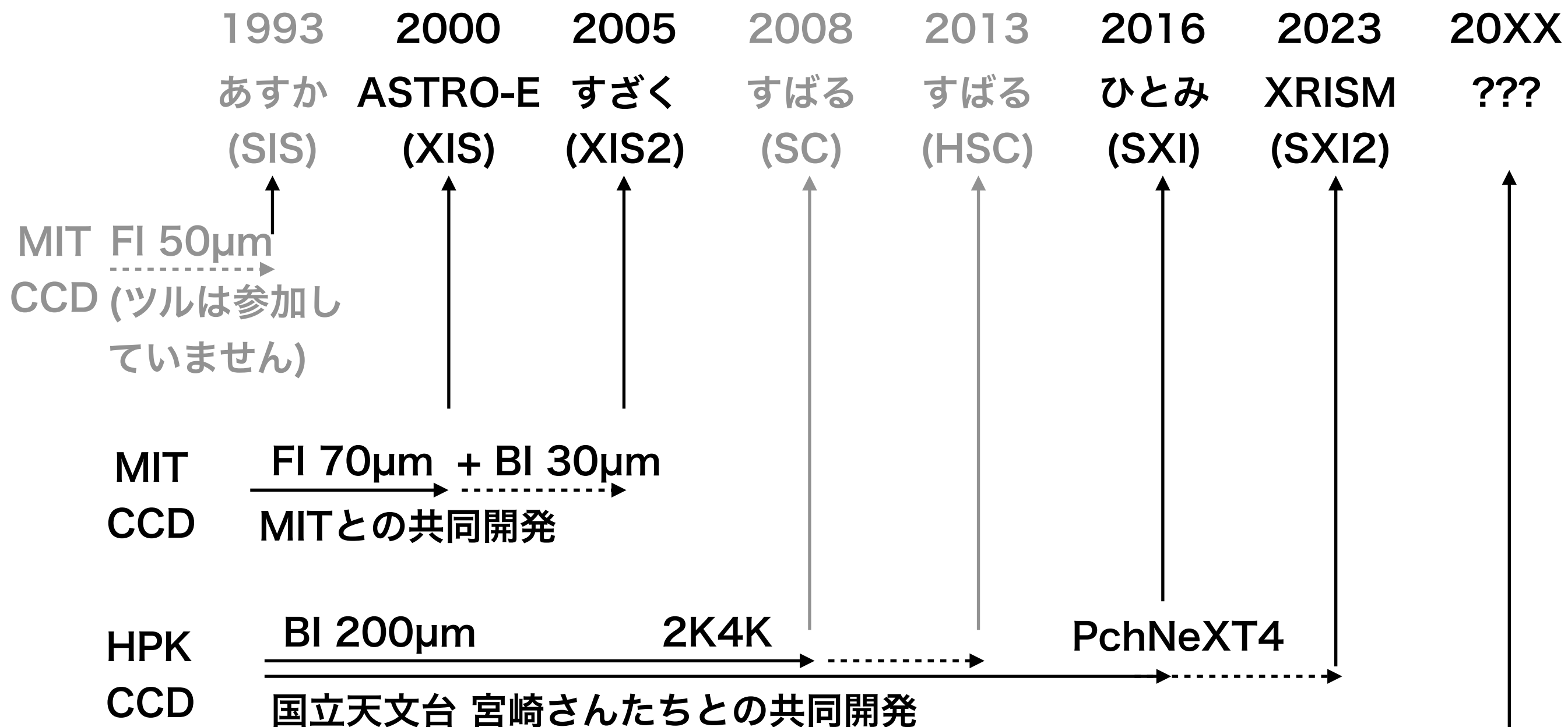
Histogram of energy (electron number) of X-ray events



<http://chandra.harvard.edu/photo/2013/sn1006/>



開発の歴史



- 段階ごとに学んできた
- XIS : CCDシステムとは何かを学んだ
- SXI : CCDセンサとは何かを学んだ
- SOI : イメージセンサを作るとは何かを学び中
デバイス, プロセス, 素子回路, パッケージ...

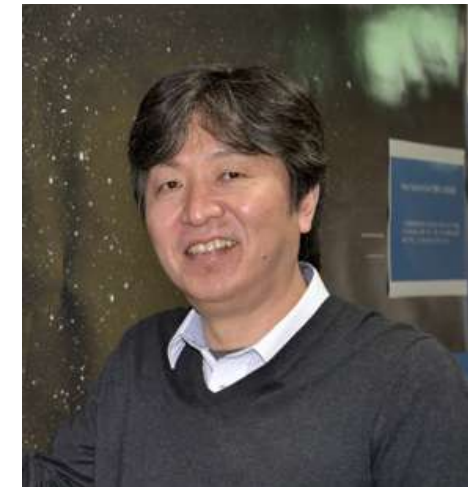
SOI $\xrightarrow{\text{XRPIX}}$

SOIグループ: 多分野が連携

素核・放射光・高エネ天文・赤外線
天文・医療・集積回路デバイス工学

厚い空乏層を持つ裏面照射型CCDの開発

- 2000年 or 2001年
宮崎さんとハワイ観測所でお話



- 鶴：僕たちは厚い空乏層のCCDを開発しているんですが、
宮崎さんはどんなCCDを？
- 宮：僕たちも厚い空乏層を持つ裏面照射型CCDを開発しているんですよ～
- 鶴：おー,それは素晴らしい！ X線天文用のを開発したいです！
- 宮 & 鶴：一緒にやりましょう！

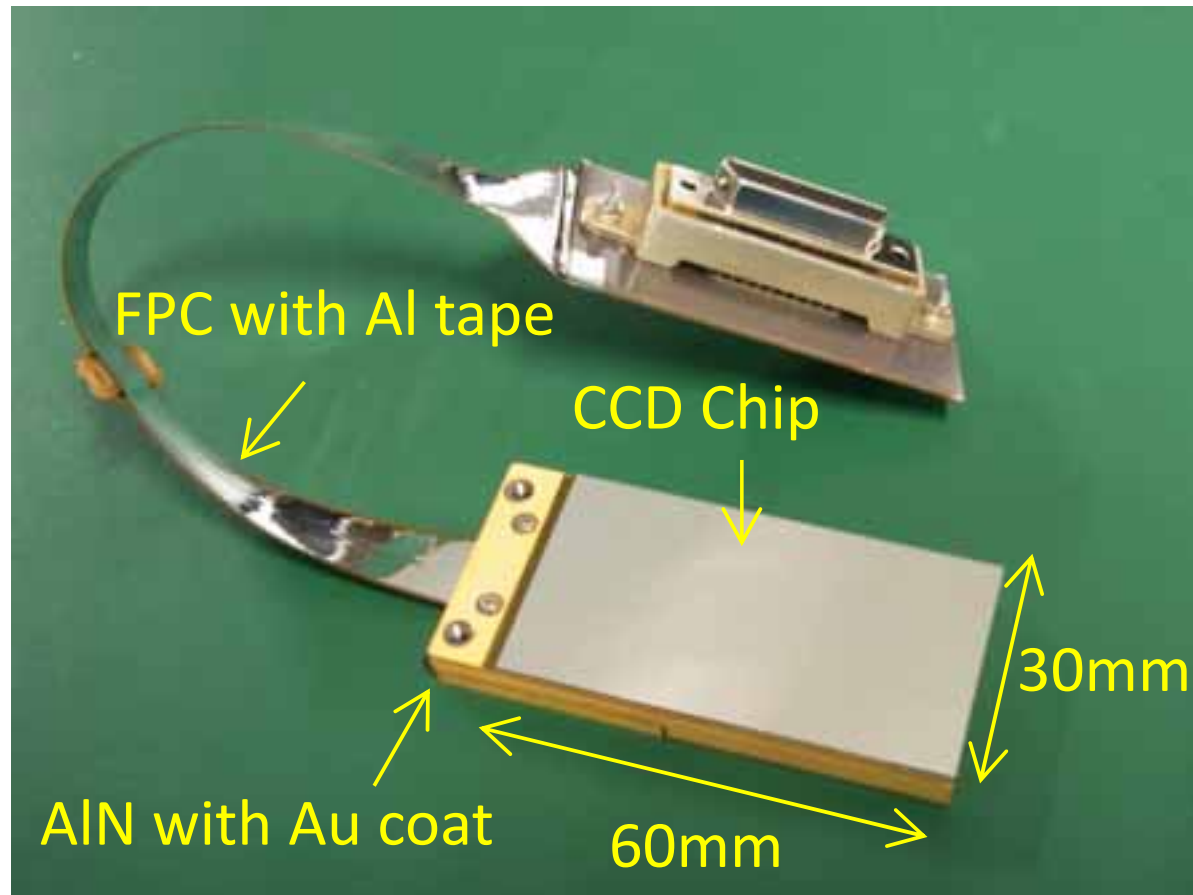
- (少なくともツルは)割と気楽な気持ちで「共同開発」を始めた
- 大まかなスペックを共有できることを確認
- 2015頃まで定期的にHPKでのmeetingを開催. 多分100回近い.
- 評価結果の共有がメイン.
- 特に開発の分担などは決めずに, ゆるい感じで行った

厚い空乏層を持つ裏面照射型CCD w/HPKさん

Sof X-ray Imager/ASTRO-H to Xtend/XRISM

HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

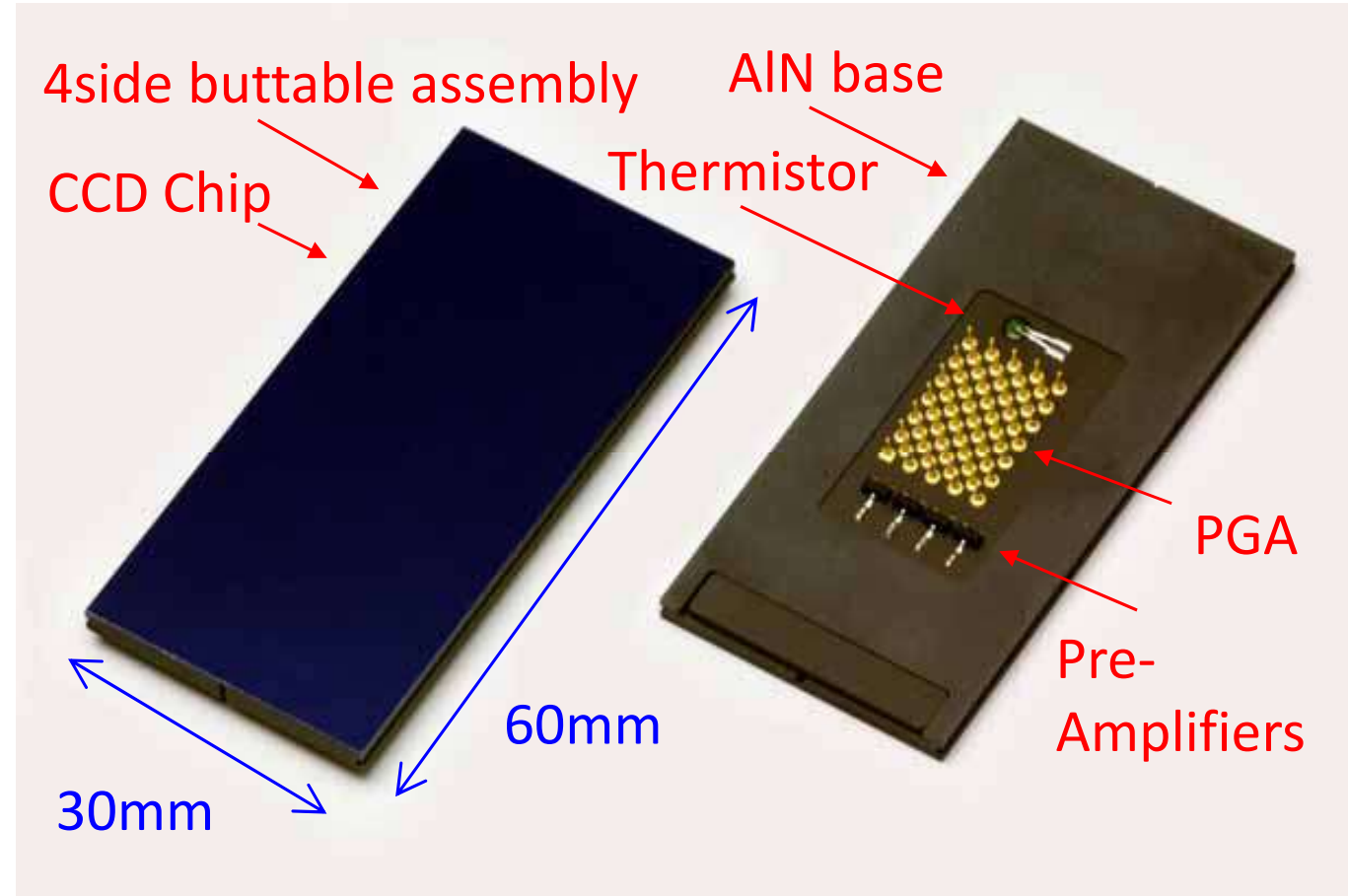
27



2kx4k CCD for Subaru Hyper Suprime-Cam

HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

28



- N型ウェハ（ホール収集）比抵抗 $>10\text{k}\Omega\text{cm}$
- バックバイアス 20~30V
- 空乏層厚み $200\mu\text{m}$ 裏面照射（ただし裏面の構造は違う）
- ピクセルサイズ X線用： $24\mu\text{m}\square$ 可視光： $12\mu\text{m}\square$



2008年11月20日 - 京都新聞(夕刊) -

京 都 新 聞 (夕刊) 2008年(平成20年)11月20日 木曜日 7版 8

第3種郵便物認可

京 都 新 聞 (夕刊)

開発したCCDは、波長の長いエックス線から波長の短いエックス線まで幅広くとらえることができ、二〇一三年の打ち上げを目指している次期エックス線天文衛星「ASTRO-H」への搭載を予定している。

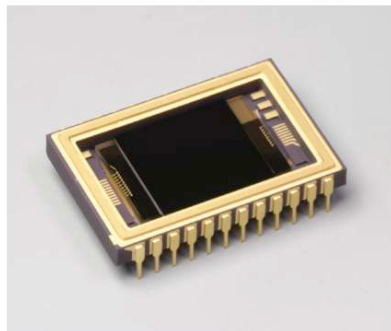
グループの鶴岡京大物理学研究科准教授(高エネルギー天体物理学)は「波長の短いエックス線を放つと考えられている誕生したてのブラックホールを見つけ、銀河中心にある巨大ブラックホールへの成長などの謎に迫りたい」と期待している。

HSCの2k4kBICCDとASTRO-HのPchNeXT4は兄弟
光赤外とX線 ⇒ 実は欲しい物は似ている。
(裏面照射, 厚い空乏層, 低ノイズ)

開発のC... 提供... 厚い空乏層... 低ノイズ... 二〇一... エックス線... 鶴岡京大... 物理学... 誕生したて... ルを見... いる... 謎に迫... してい

厚い空乏層・裏面照射

HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS



CCDエリアイメージセンサ

S10747-0909

完全空乏化技術により近赤外域で高感度を実現

S10747-0909は厚いSiを用い、バイアスを印加することで空乏層を厚くし、近赤外域の感度と軟X線の検出効率を飛躍的に向上させた裏面入射型CCDエリアイメージセンサです。

→ 量子効率: 70% ($\lambda=1000$ nm, $T_a=25^\circ\text{C}$)

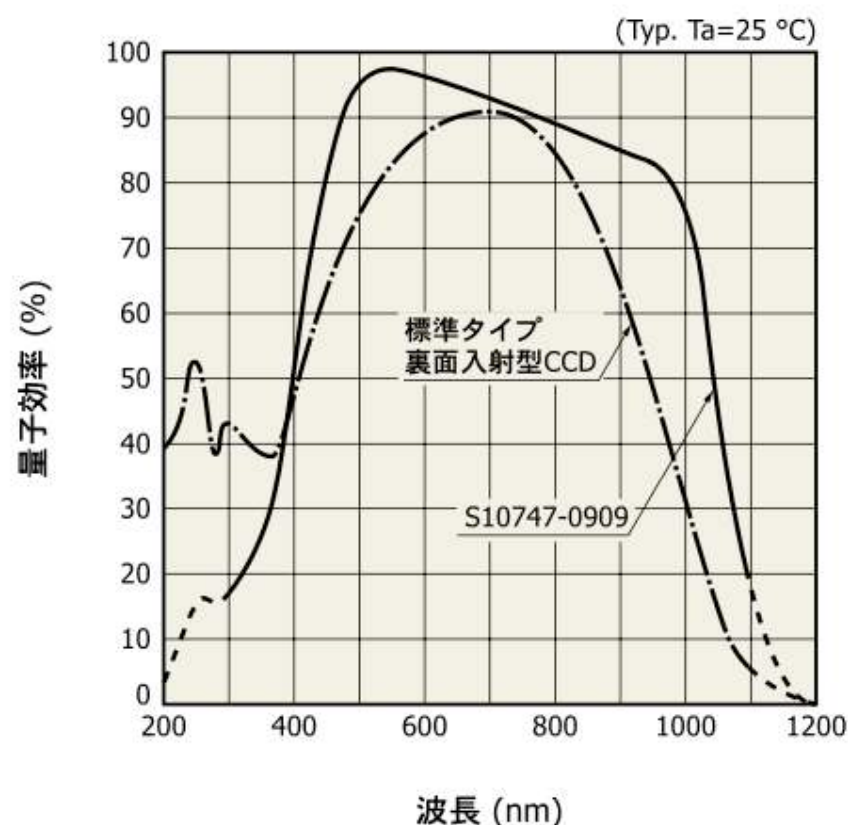
→ 画素サイズ: $24 \times 24 \mu\text{m}$

→ 512×512 画素

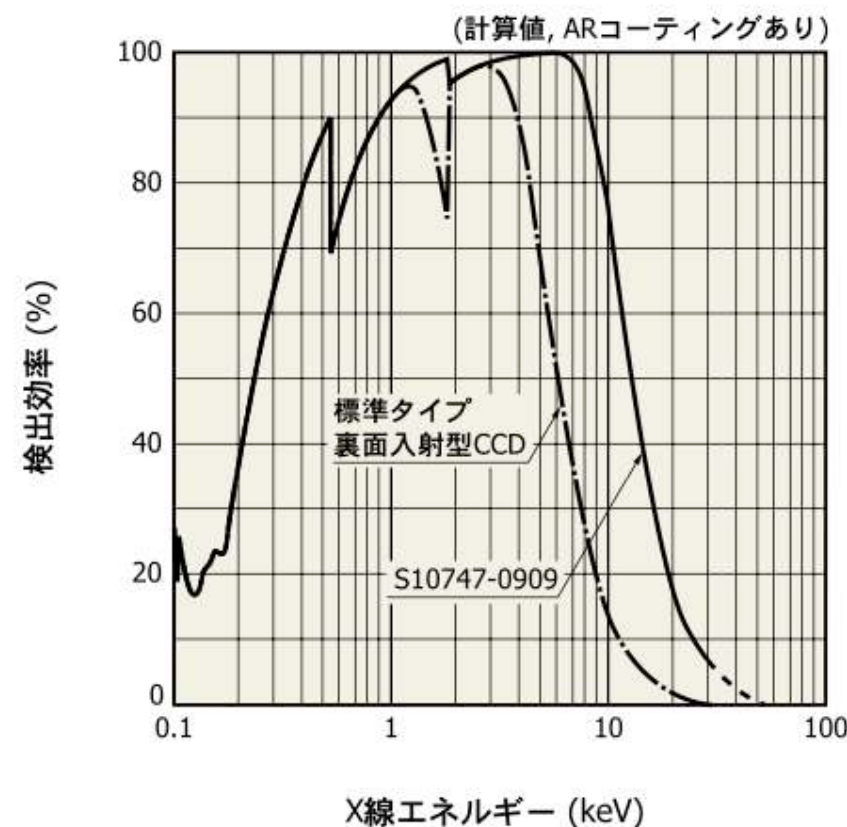
→ 低読み出しノイズ

→ 宇宙望遠鏡

分光感度特性 (窓なし時)



軟X線の検出効率



- ・ 空乏層厚みに対する要求は似ている。適切な厚みというものがある。
 - ・ 厚すぎると電荷が拡散。バックグラウンドが増加。
- ・ 裏面構造は違う。裏面からの暗電流が低いことは共通。
 - ・ 可視光はARコートが必要。X線は1個のイベントに対する100%の電荷収集効率

細かい違いはあるが
だいたい同じ

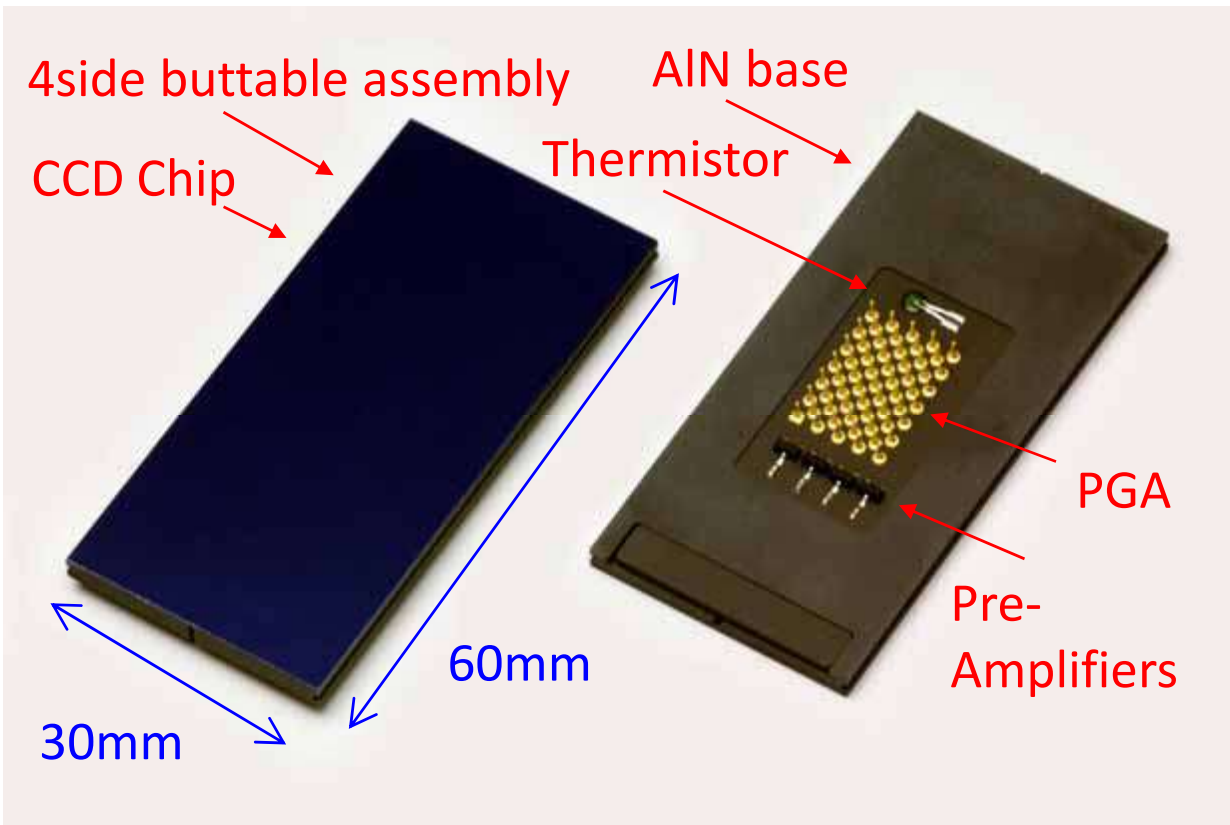
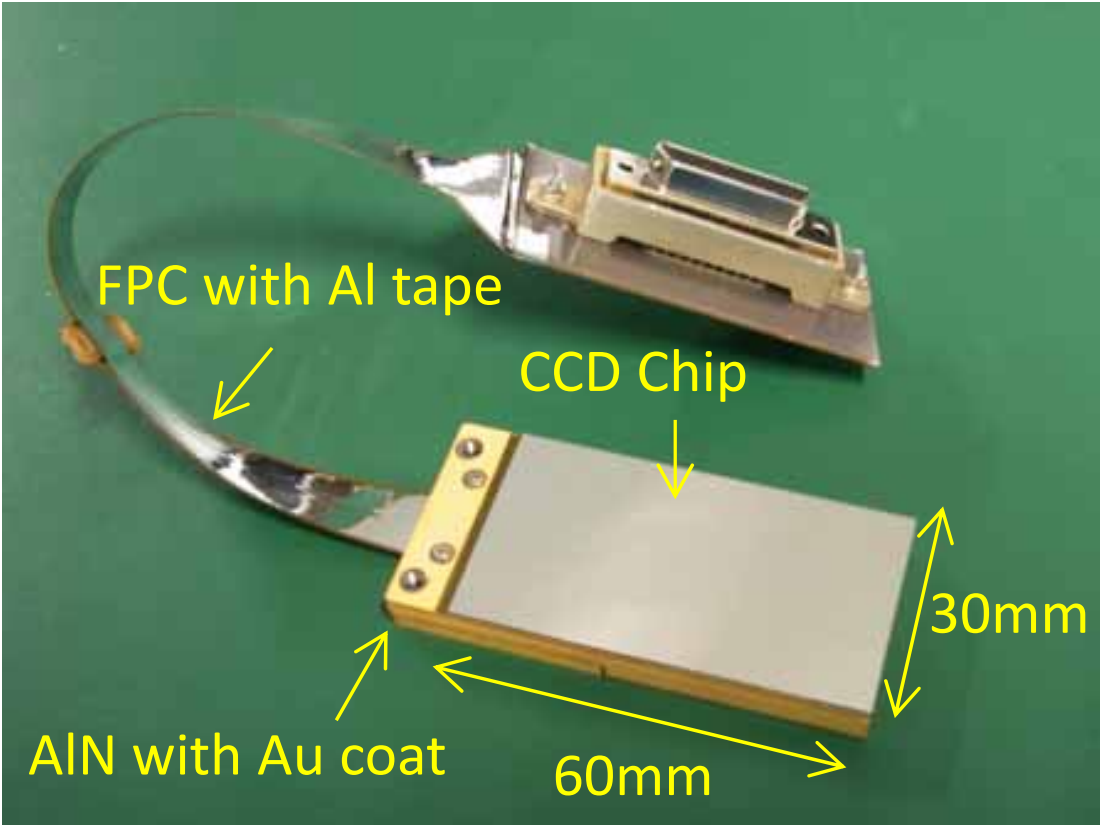
必要な性能

数字は目安です。実際の仕様と一般的な値が混ざっています

項目	決定要因	X線	可視光
エリア	(モザイク) 望遠鏡 (センサ) CCDプロセス (バタブル) モザイク・パッケージ	20 - 60mm□ 20 - 60mm 3サイド	D=540mm (HSC) 4サイド (HSC)
ピクセル	望遠鏡・チャージシェア 転送速度(CTE)・データ量	20 - 40 μ m	~15 μ m
ノイズ	エネルギー分解能 CCD読み出しアンプ	< 6e (rms)	似たような値。 X線の方が厳しい感触。 結局はプロセスで決まる
暗電流	1回の露光<<読み出しノイズ	< 0.1 e/pix/s	長露光時間 $\Rightarrow$ 厳しい要求 < 5e/pix/hr = 1e-3e/pix/s
フルウェル	40 keV X線が作る電荷量	10ke-	明るい星も暗い星を同時観測 大ダイナミックレンジ、~150ke-
転送速度	パイルアップしないサイクル (1-10秒)で読む必要がある	~100kHz	一般的には、もう少し 低い転送速度で良いはず
電荷転送	分光性能	CTI << 1e-5	値はほぼ変わらないと思うが、 低い転送速度で達成すれば良い

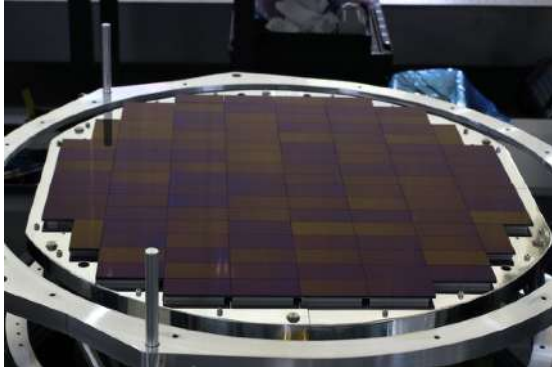
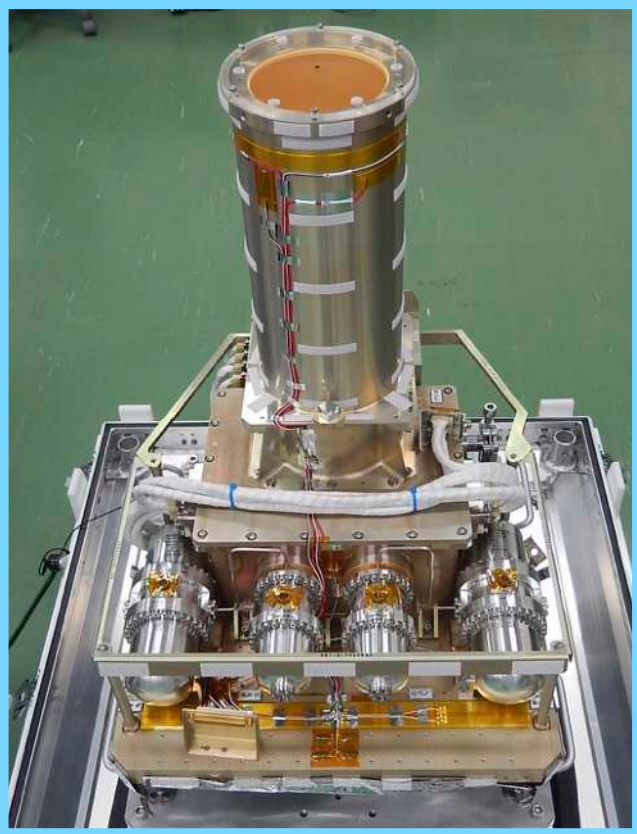
細かい違いはあるが、だいたい同じ

パッケージや読み出し



4枚

41kg



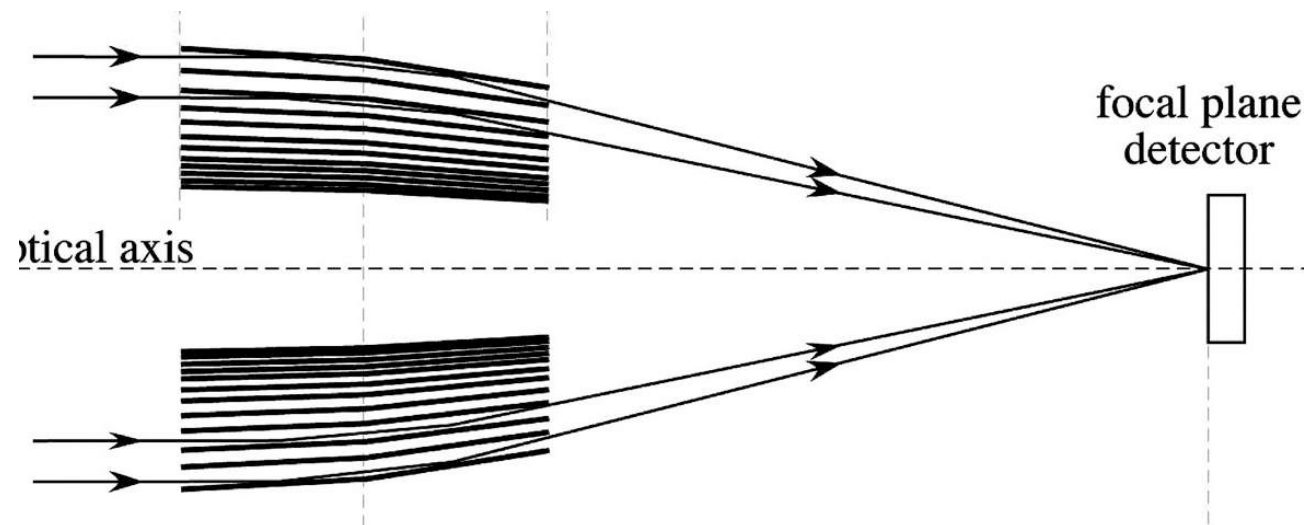
116枚



3m, 3t

全く違う

- Unable to take advantage of the performance of the latest X-ray telescope that provide large X-ray collecting area and high angular resolution.
 - Event pileup occurs due to slow readout. Energy-resolved photon counting is impossible.



- Unable to resolve fast variability of compact objects such as blackholes and neutron stars, which requires better than $30\mu\text{sec}$ ($=10\text{km/c}$).
- Unable to apply anti-coincidence technique using anti-counter
 - Unable to make use of the excellent performance of Si in the band above 10 keV due to the high detector background
 - The technique requires time resolution better than $10\mu\text{sec}$.

**High time resolution better than $10\mu\text{sec}$ is Key
to open the next generation of X-ray Astronomy**

X-ray SOIPIX - “XRPIX”

Developed in collaboration with
16 universities and organizations

Kyoto University,
University of Miyazaki,
Tokyo University of Science,
Hiroshima University,
Konan University,
Kindai University,
Nara University of Education,
Osaka University,

ISAS/JAXA,
Kanto Gakuin University,
University of Tokyo,
KEK,
Ibaraki University,
Sendai College,
Shizuoka University,
D&S Incorporated

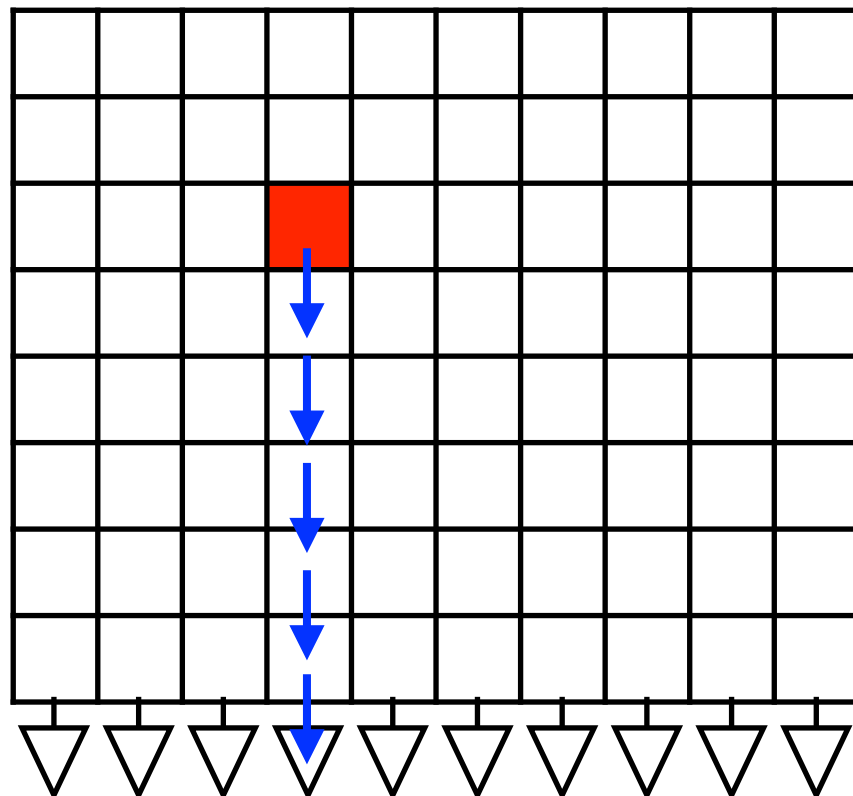


Trigger Output Event-Driven Readout

16

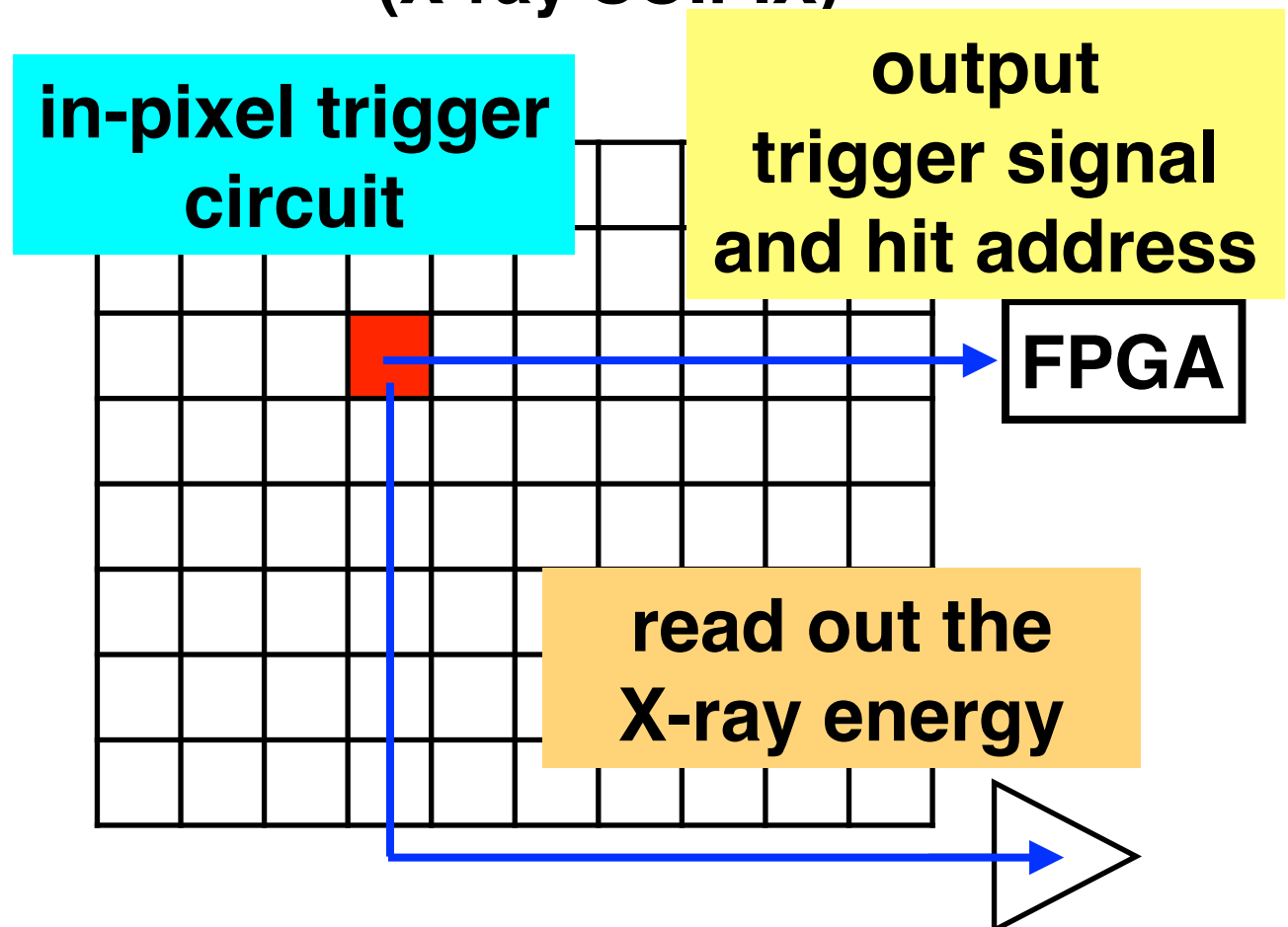
Conventional type of CCD and CMOS

Column readout (1kpixel)



- time resolution 1msec. dose not meet.
- only a few pixels have X-ray events
- almost all the pixels are empty
- However, must read out all the pixels
- data rate = pixel readout rate
⇒ reaches 1GHz

Trigger output Event Driven readout (X-ray SOIPIX)



- read out X-ray hit pixels only
- time resolution better than $10\mu\text{sec}$
- data rate = X-ray event rate
⇒ 1kHz at the maximum

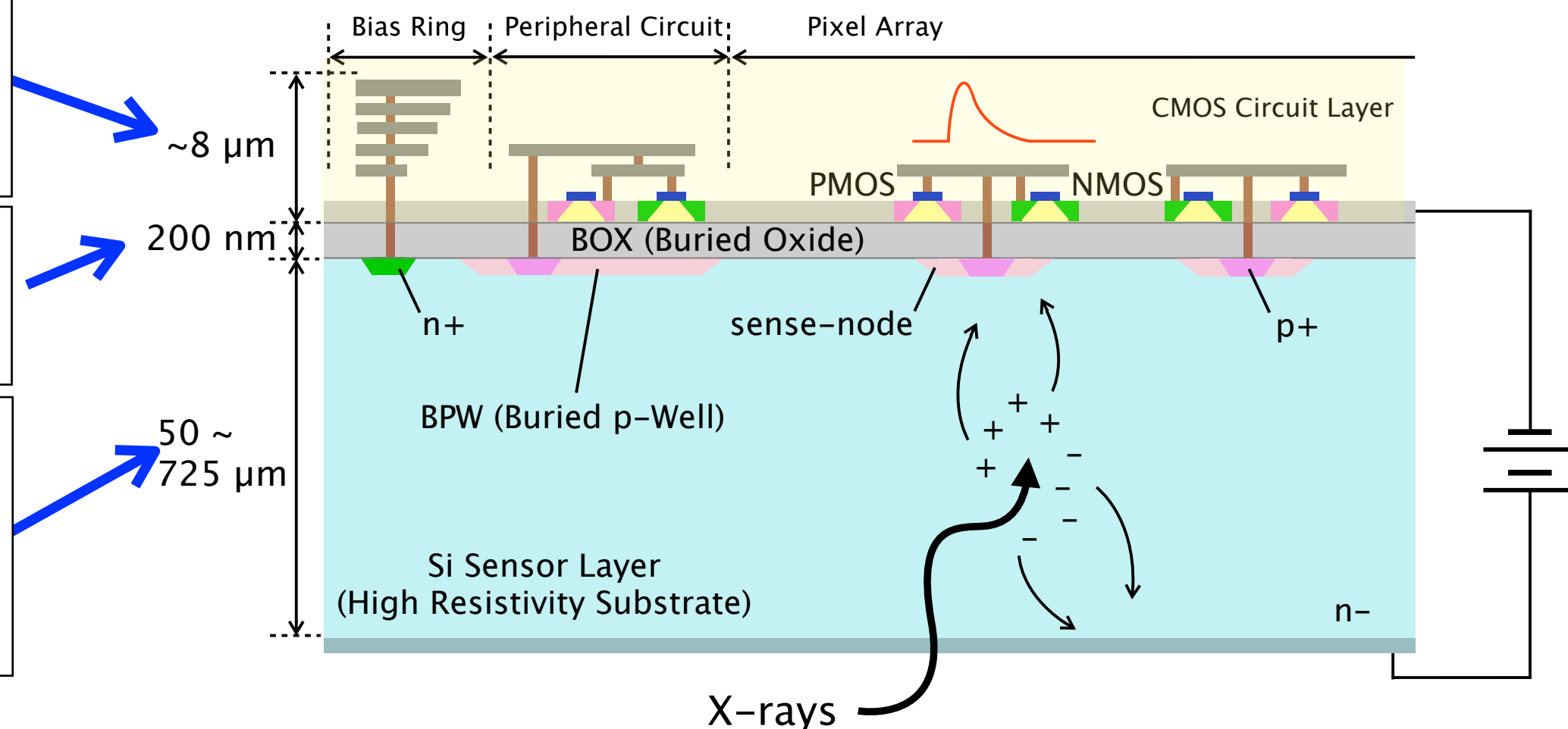
- Power consumption at post-stage data processing $\propto$ data rate
- Event Driven readout reduces power cost

SOI-CMOS image sensor (SOIPIX)

**Fast CMOS
(low ρ Si)**

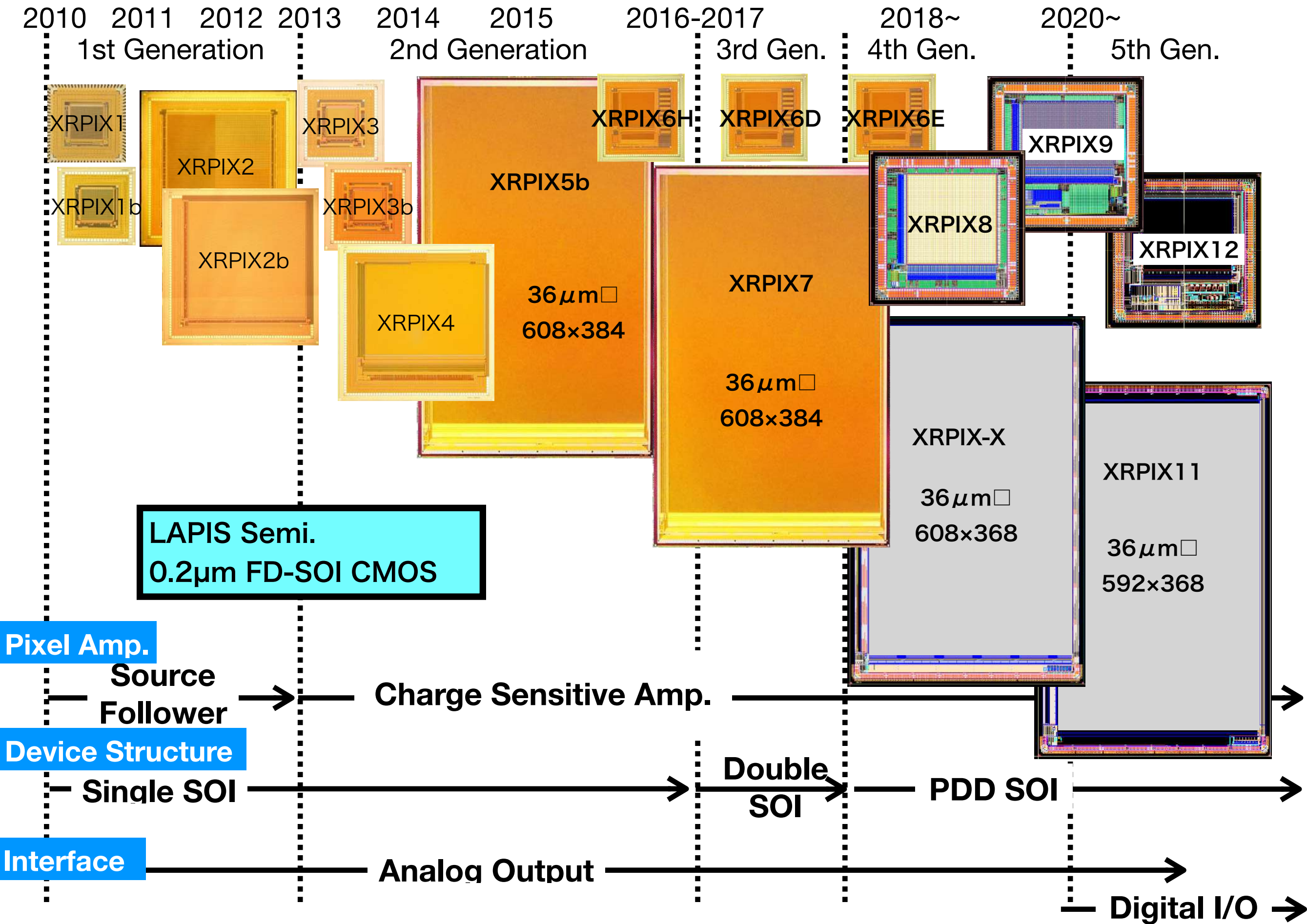
**Insulator
(SiO₂)**

**Sensor
(high ρ ,
depleted Si)**



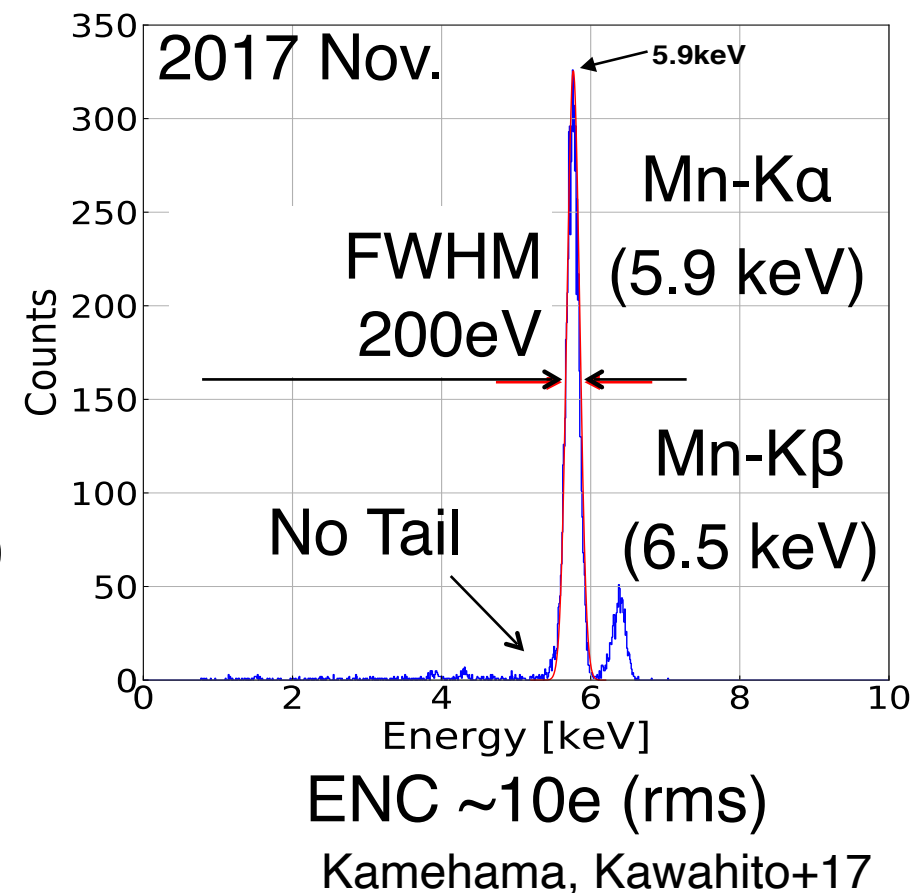
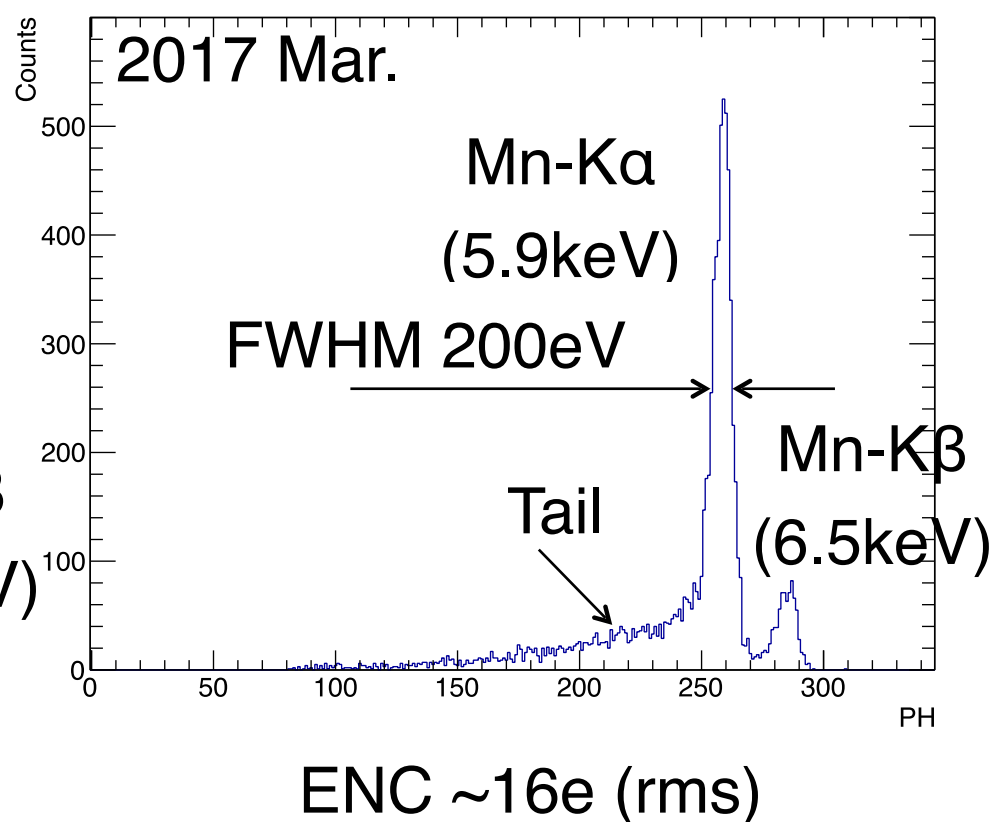
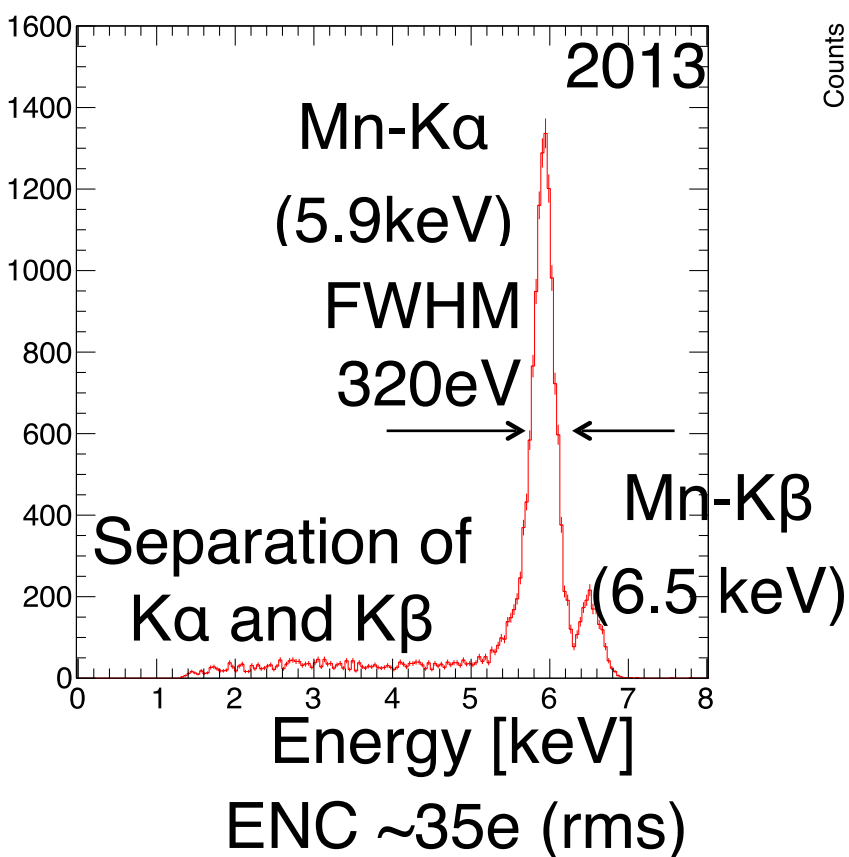
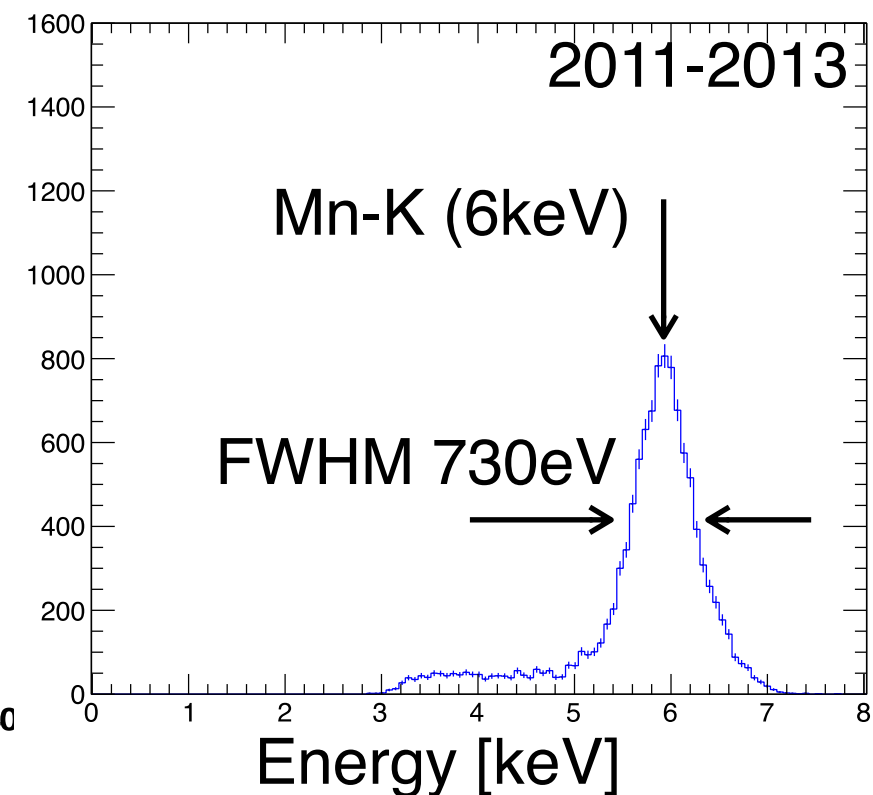
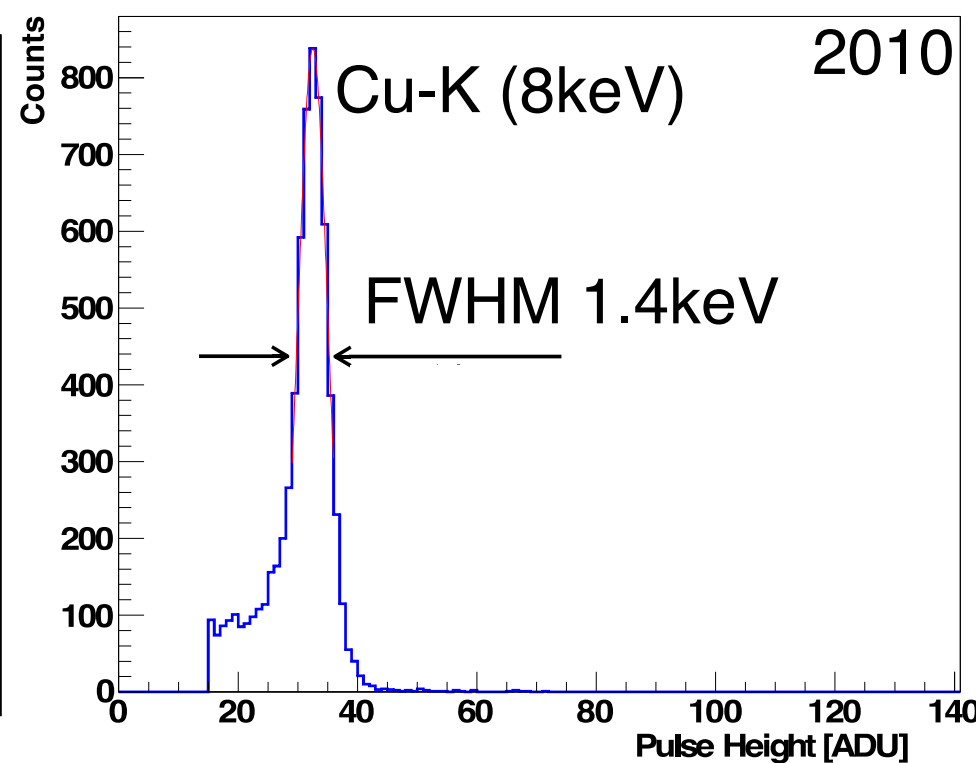
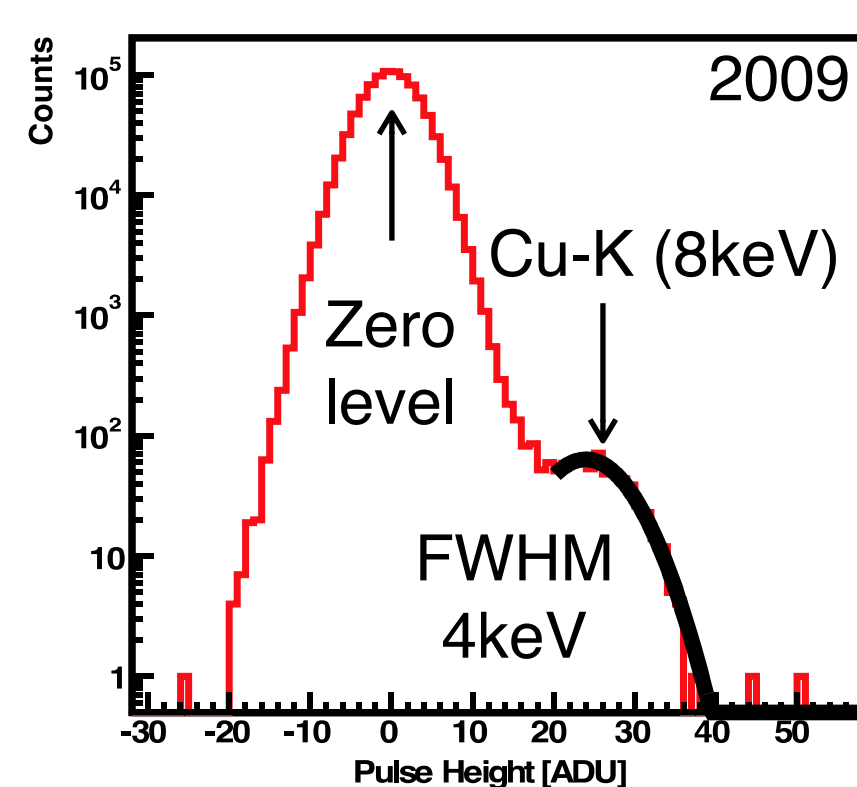
- fine imaging (small pixel size $\sim 20 \mu\text{m}$, large size $> 20 \text{mm}$)
- low noise ($< 10 \text{e rms}$),
- on-chip signal processing (high speed CMOS)
- wide-band, high quantum efficiency (thick depletion max $500 \mu\text{m}$, backside $< 1 \mu\text{m}$)

X-ray SOIPIX - “XRPIX”

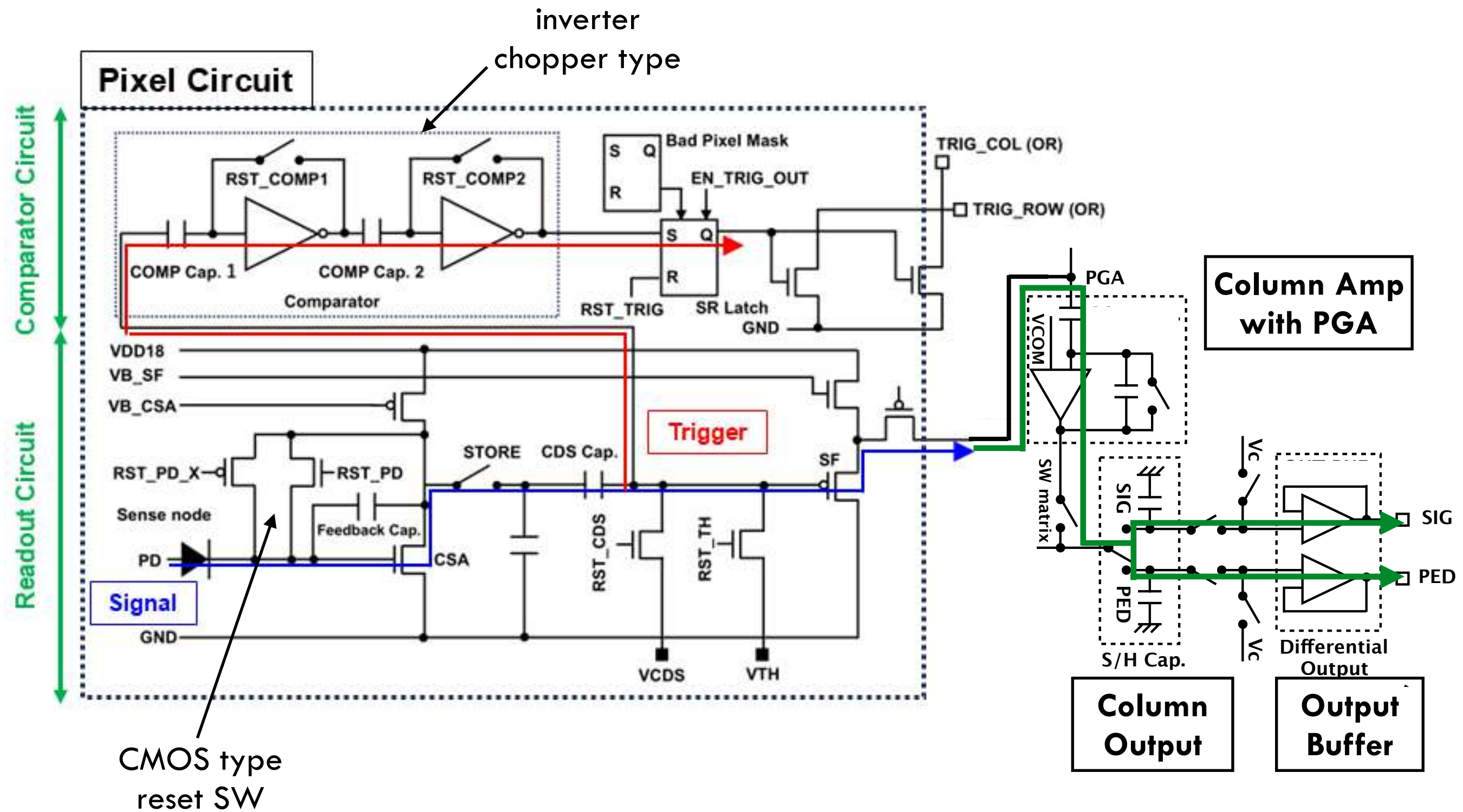


Improvement of Spectral Performance in **Frame** Mode

19

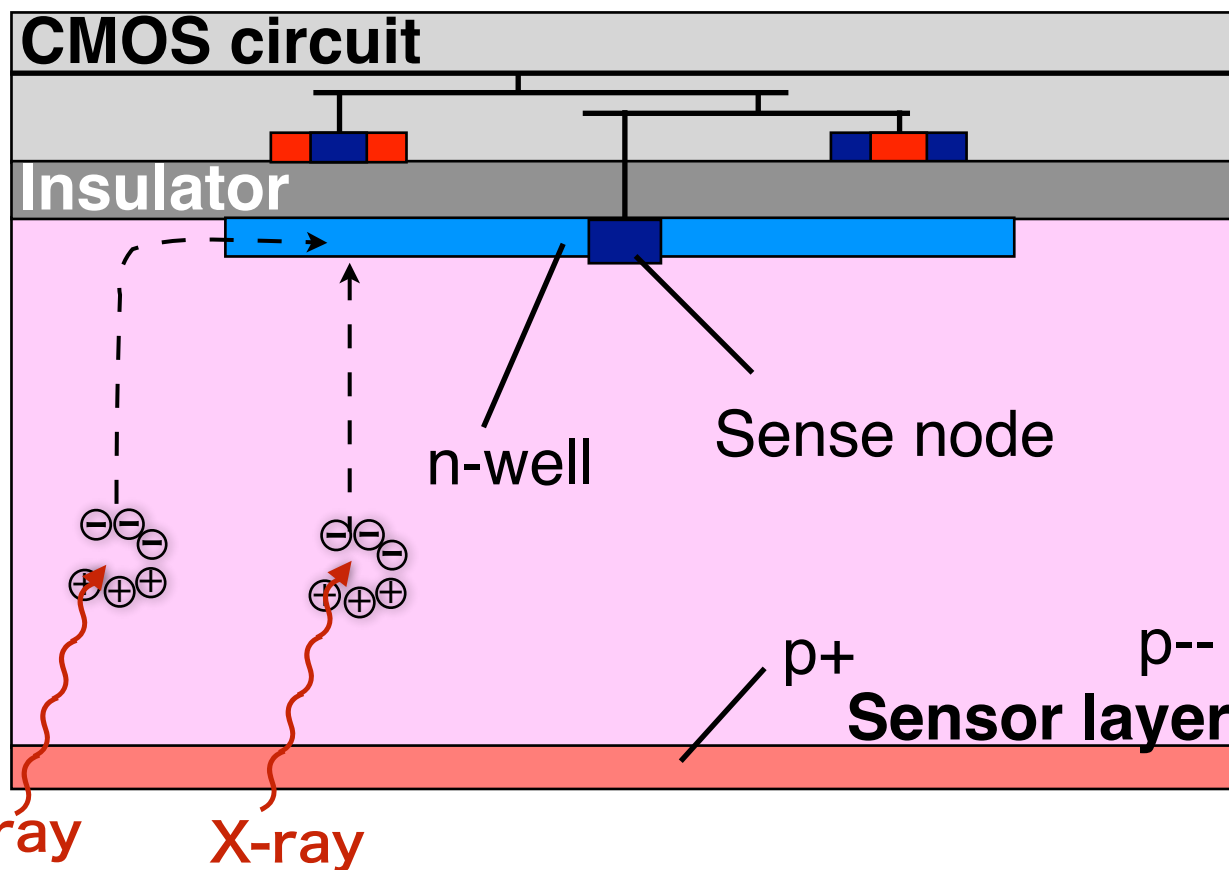


XRPIX: Pixel and Readout Circuits



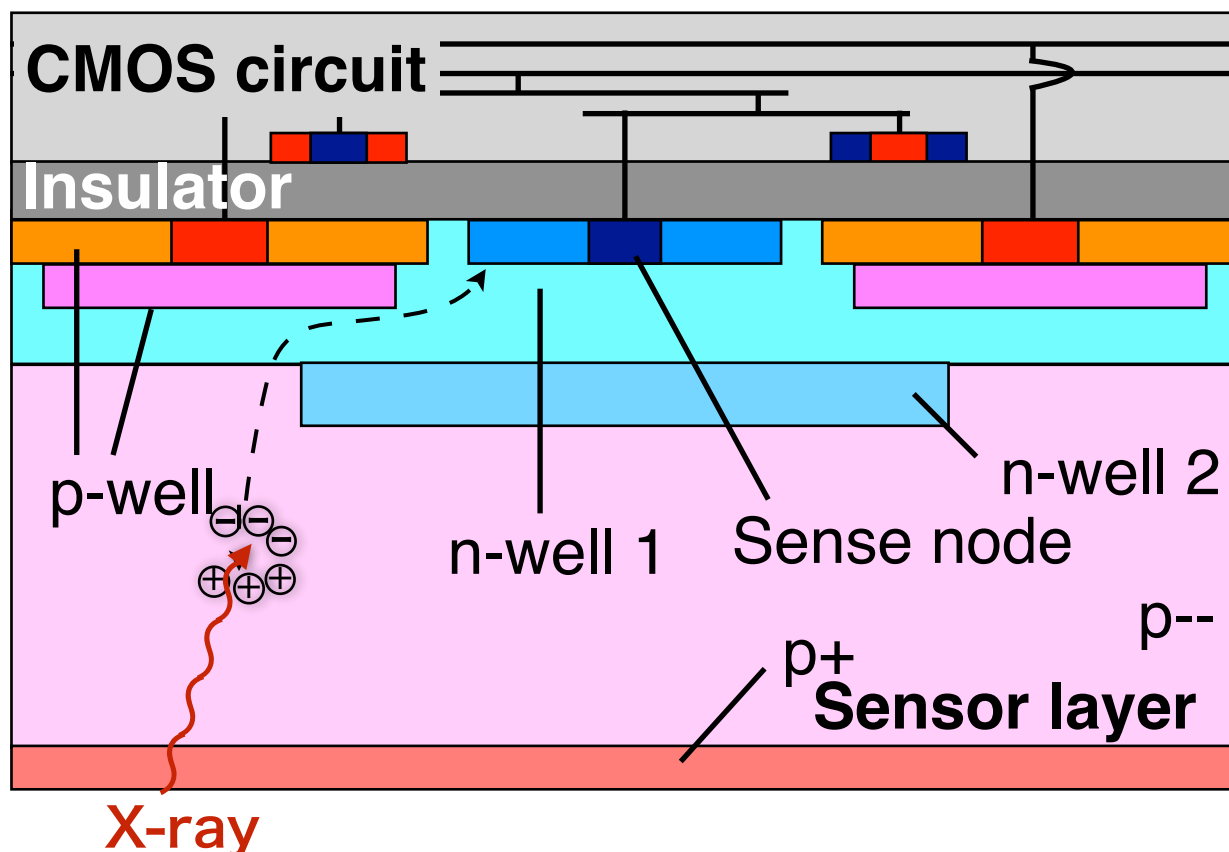
PDD (Pinned Depleted Diode) Structure

21



Conventional Single SOI

- large n-well connected to the sense node to collect signal charge, and to suppress the back-gate effect of Tr. against the high backbias voltage.
- a large sense node capacitance (C_{sense})
→ not easy to achieve low readout noise
- causes capacitive coupling and interference between pixel circuit and sensor layer
→ degrade spectroscopy performance



Pinned Depleted Diode (Kamehama+18)

- pinned p-well is formed under the interface of insulator and sensor layers
- the pinned p-well suppresses
 - interference between pixel circuit and sensor layers
 - dark current from the interface between the sensor and insulator layers
- small sense node capacitance (C_{sense})
→ easier to achieve low readout noise

透かし彫り栞/金

SIZE:W35×H85mm

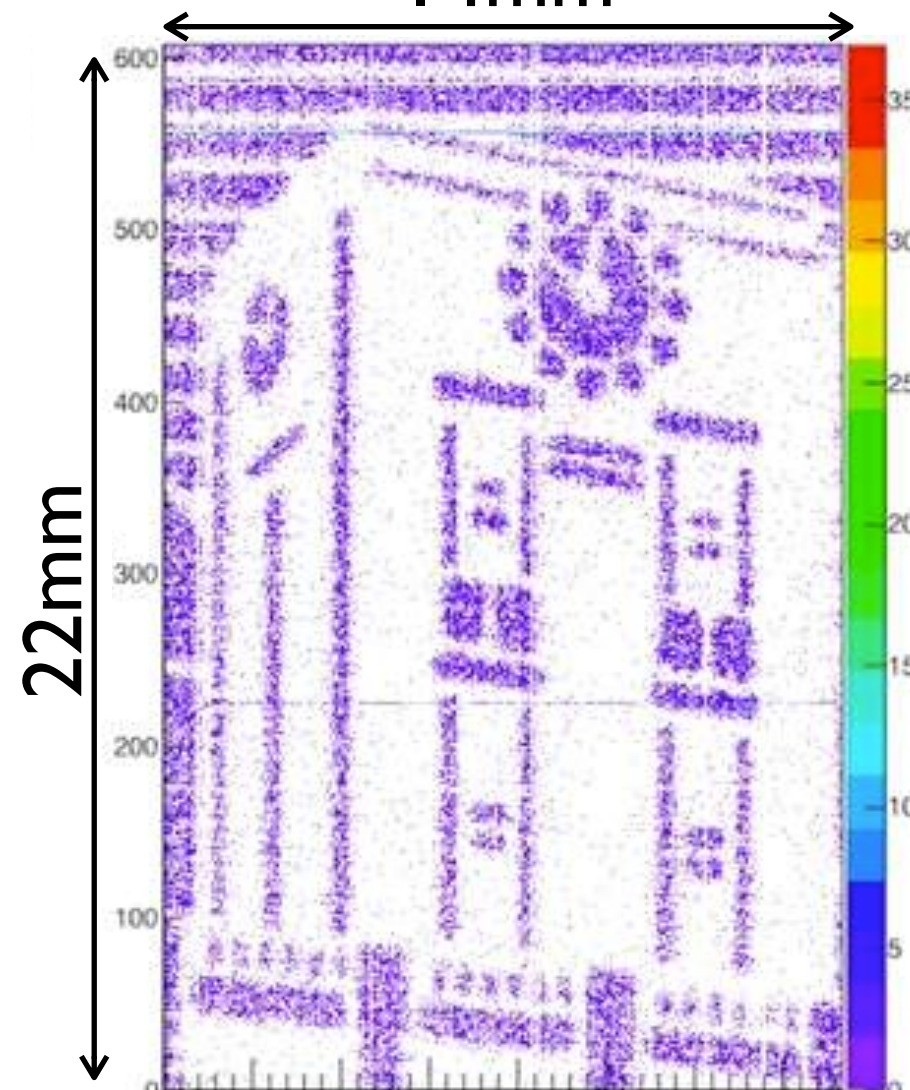
◆純金表面加工◆時計台を透かし彫りにした実用性の高いアイテムです。

<https://www.u-coop.net/kyodai/goods/indicate.php?mode=detail&id=27&category=6>

860 円

36 μ m $\square$, 608 $\times$ 384 pixel
14mm

Hayashi+2018
NIM A



```
Data Set # 77550
header = 43605 , evnum = 77551 , time = 777.397[s],
int_time = 8.36[us]
hit_info_row : 0, hit_addr_row_high : 382
hit_info_col : 0, hit_addr_col_high : 13
median = 397.5
center_pixel_PH = 238.5
Data Set # 77551
header = 43605 , evnum = 77552 , time = 777.405[s],
int_time = 8.24[us]
hit_info_row : 0, hit_addr_row_high : 353
hit_info_col : 0, hit_addr_col_high : 99
median = 411
center_pixel_PH = 254
Data Set # 77552
header = 43605 , evnum = 77553 , time = 777.421[s],
int_time = 10.04[us]
hit_info_row : 0, hit_addr_row_high : 436
hit_info_col : 0, hit_addr_col_high : 233
median = 411.5
center_pixel_PH = 223.5
Data Set # 77553
header = 43605 , evnum = 77554 , time = 777.436[s],
int_time = 9.36[us]
hit_info_row : 0, hit_addr_row_high : 576
hit_info_col : 0, hit_addr_col_high : 93
median = 415.5
center_pixel_PH = 253.5
Data Set # 77554
header = 43605 , evnum = 77555 , time = 777.443[s],
int_time = 6[us]
hit_info_row : 0, hit_addr_row_high : 545
```

Cd-I09, Vbb=10V, Room Temp.

(movie in 10 times speed)

Capability of event rate > 500Hz

Trigger delay and time resolution better than 10us using laser.

Spectral Performance of Large Device

XRPIX11 - the latest large device

Imaging Area : 21.3mm x 13.2mm

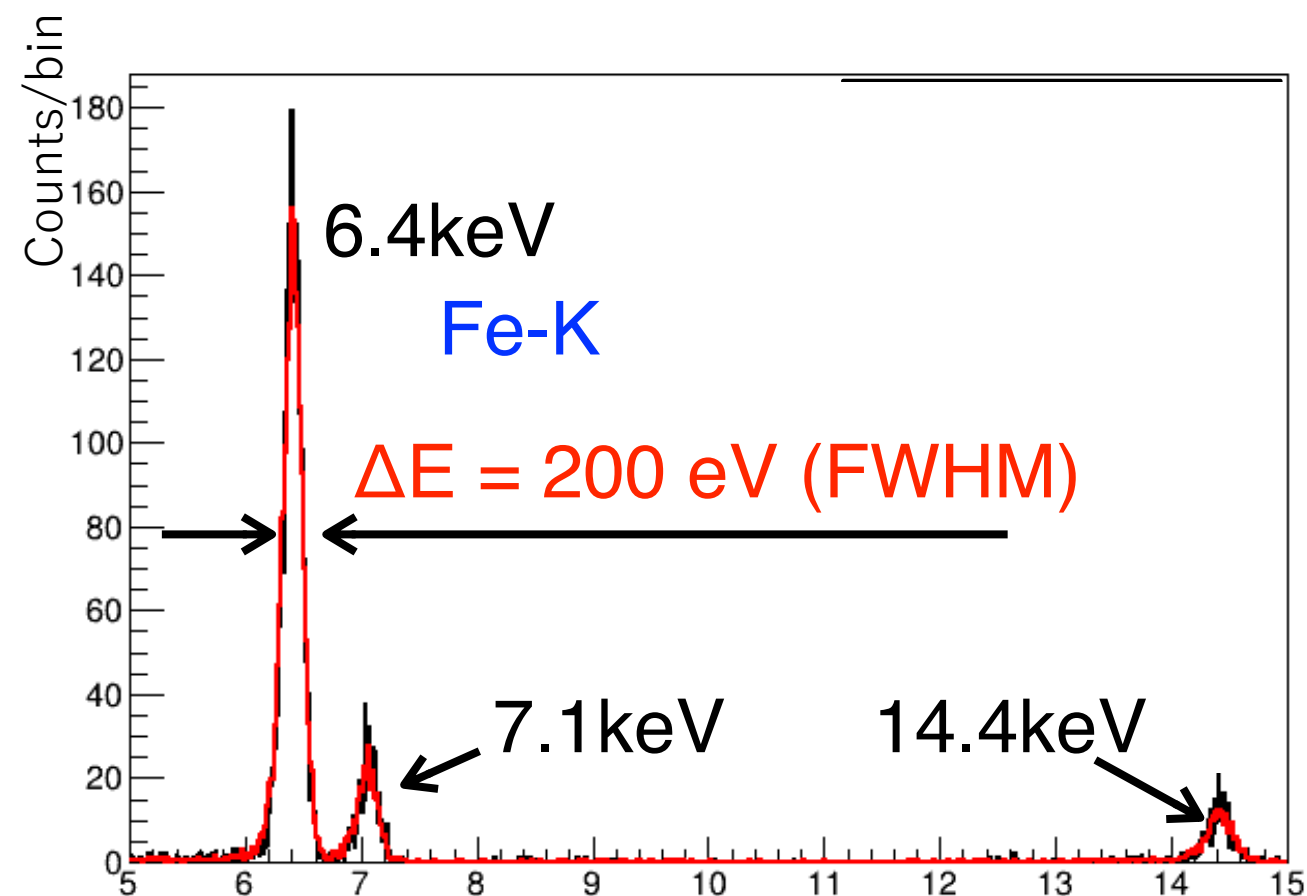
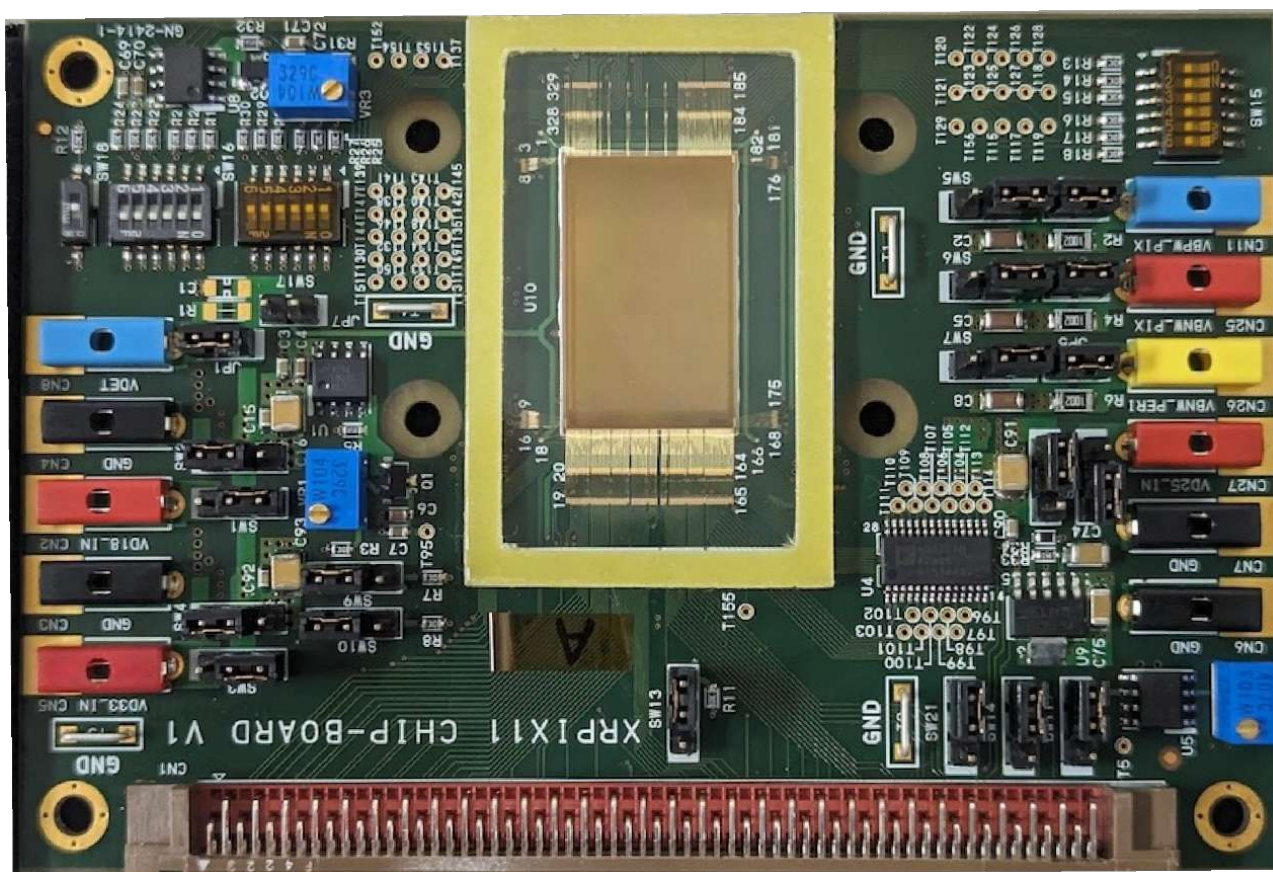
Pixel Size : $36\mu\text{m} \times 36\mu\text{m}$

Format : 592 (H) x 368 (V)

$T = -20^\circ\text{C}$

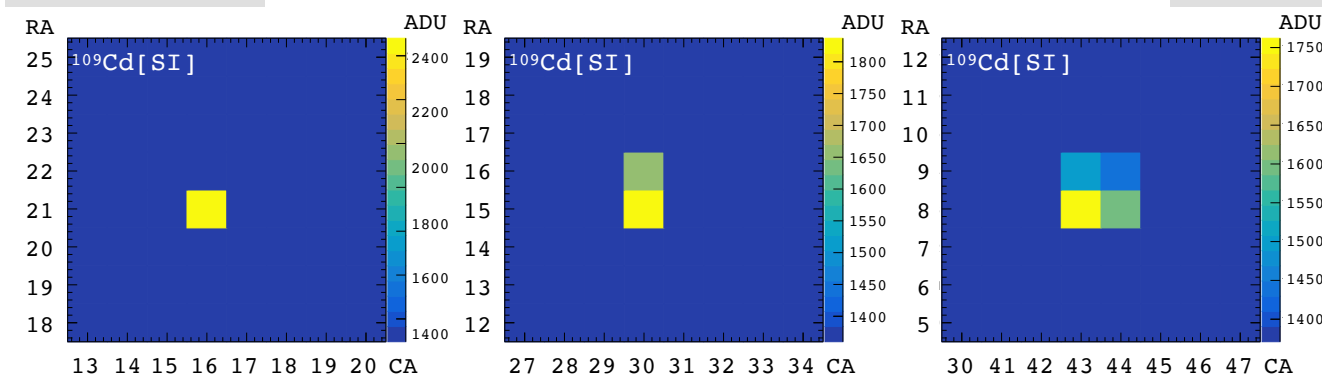
$V_{\text{BB}} = -300\text{V}$

full depletion of $300\mu\text{m}$

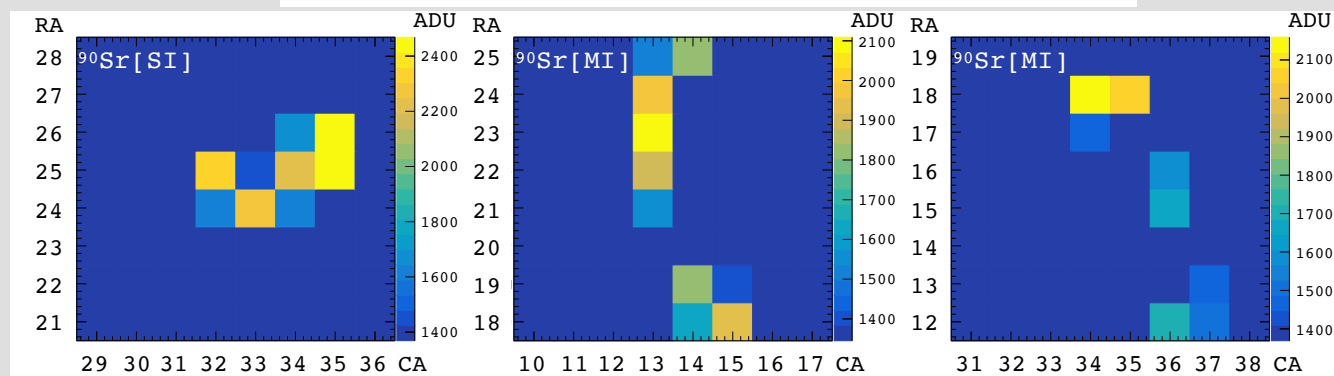


オンチップパターンプロセスによる非X線判定²⁴

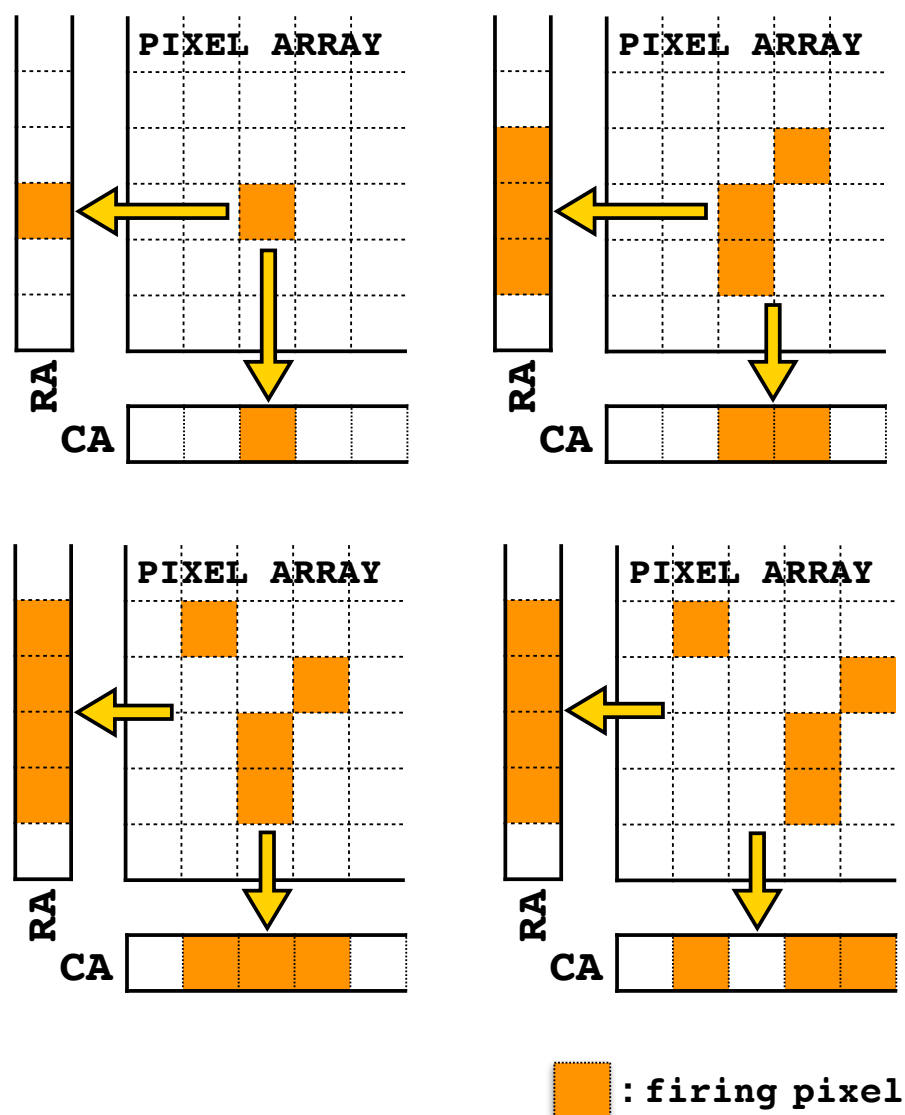
X線が作る電荷雲はコンパクト



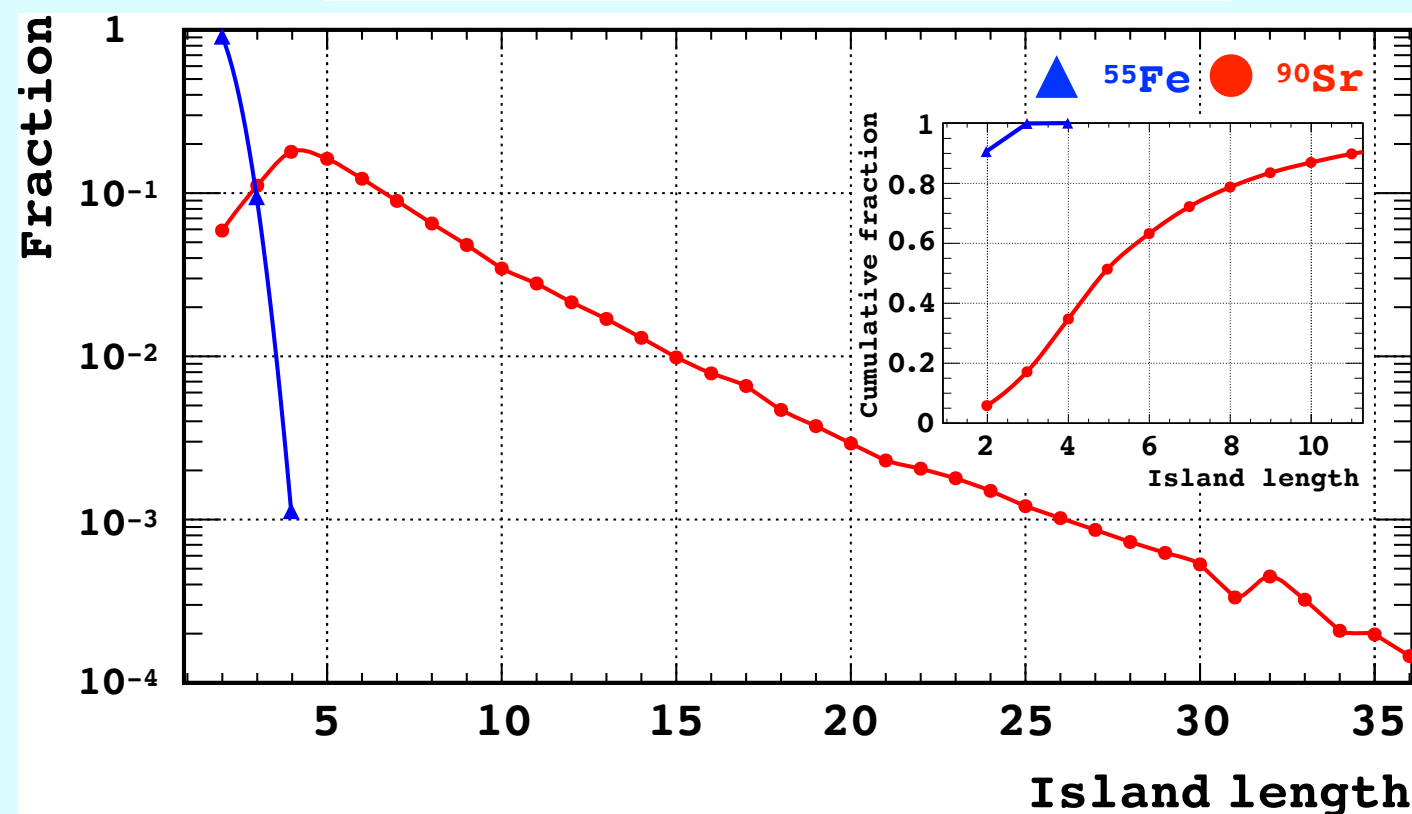
荷電粒子線はトラックを作る



オンチップでヒットパターン判定



オンチップで非X線除去が可能



「アイランド」の長さが長い
or
「アイランド」が複数ある

⇒ 非X線

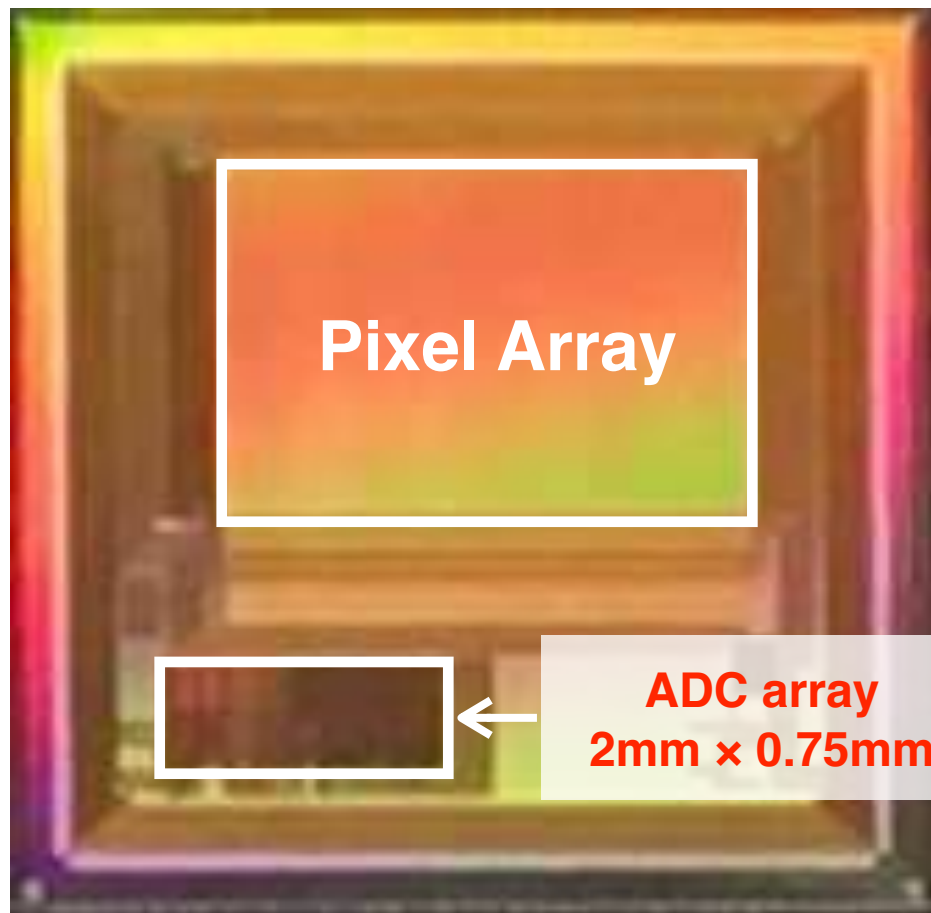
on-chip ADC for “digital X-ray SOIPIX”

25

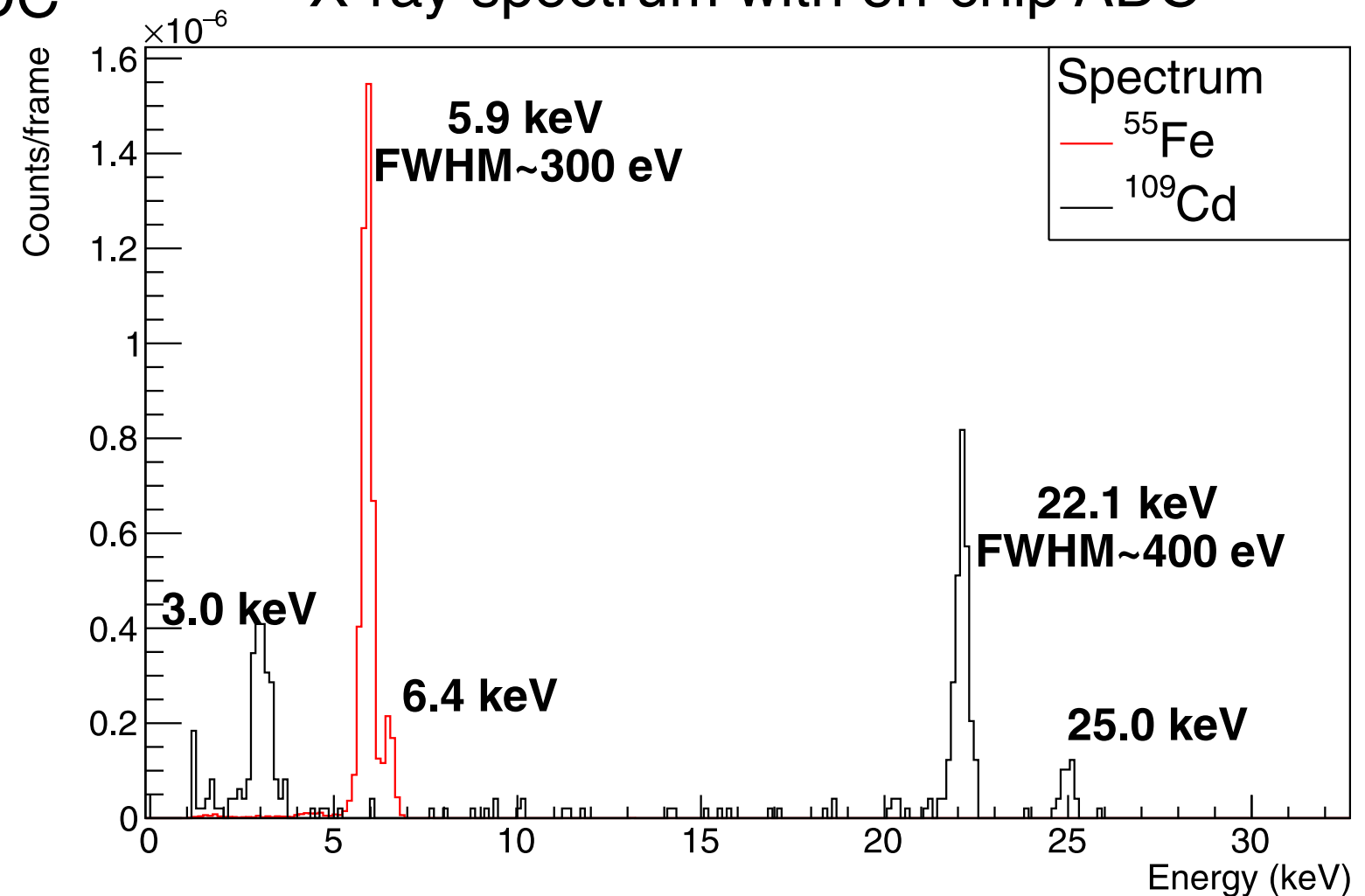
14-bit 1-stage Cyclic ADC

- Small Size: 20 μm $\times$ 2 mm width/1ch
- Fast Conversion : 5.96 μsec
- Low Current Consumption : 125 μA / 1ADC
- Voltage Range : 0.4 - 1.5V (67 μV / LSB)

XRPIX9 equipped with on-chip ADC



X-ray spectrum with on-chip ADC



- The energy resolution is almost identical to that with an external ADC.
- The on-chip ADC has sufficient performance.
- Developing new devices equipped with DACs and pattern generator.

科学的目的 ⇒ ミッションコンセプト検討 ⇒ システムの概念設計・センサの概念設計

設計

マスク製造

ベアウェハ製造

回路

デバイス

CADデータ

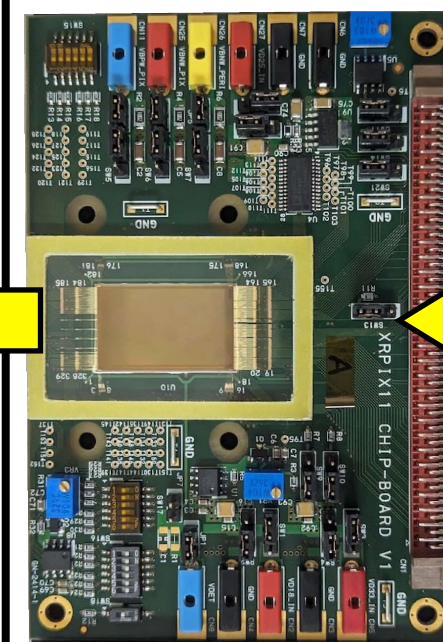
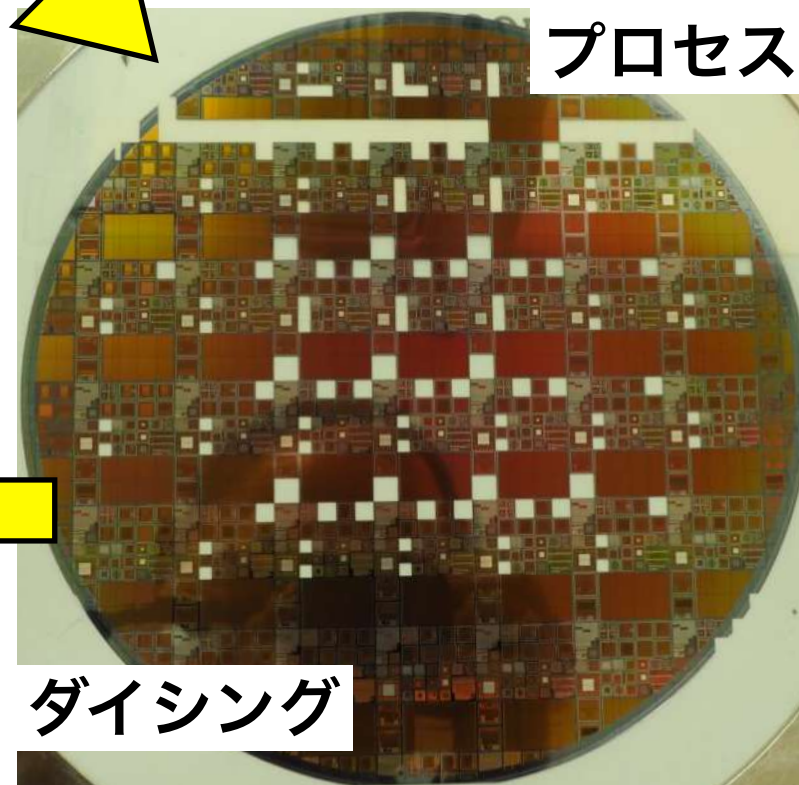
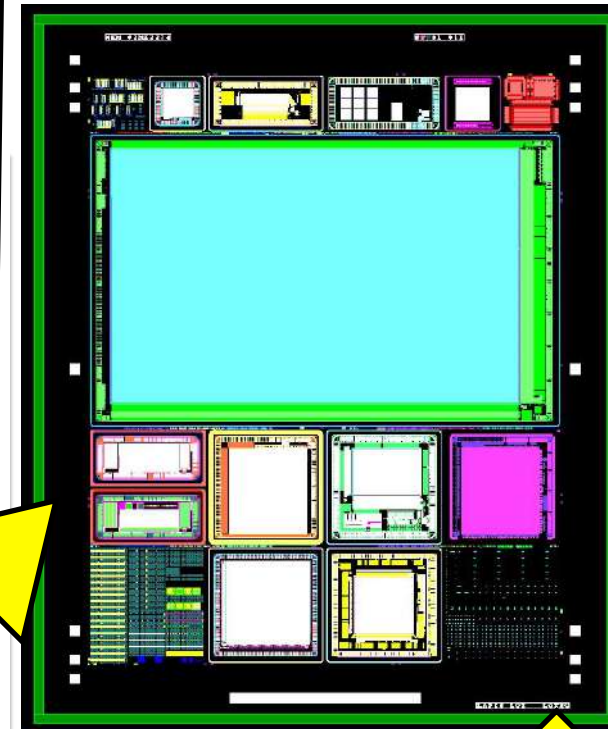
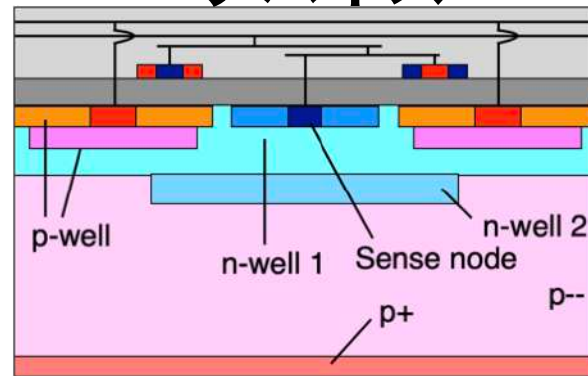
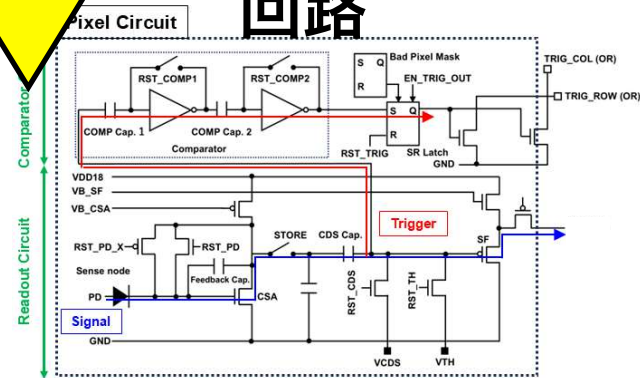
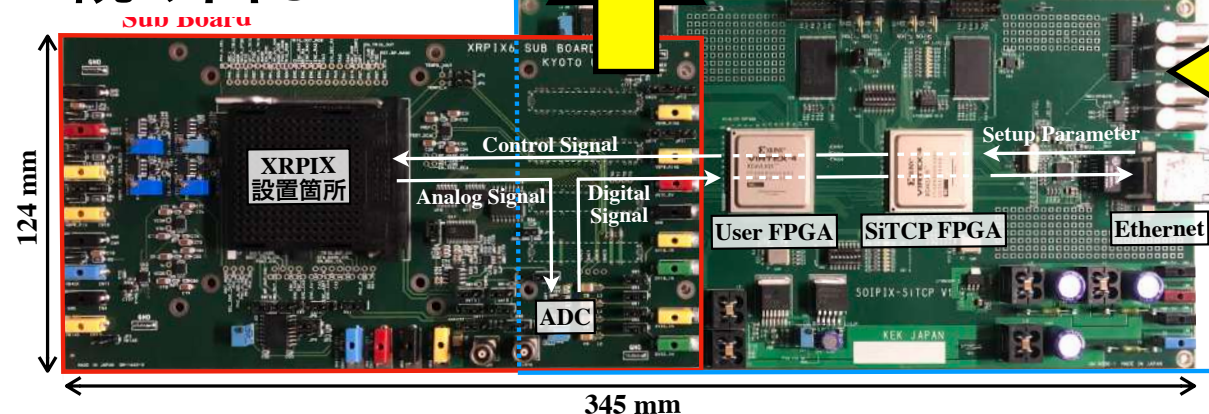
組み立て

プロセス

ダイシング

評価 (羅針盤) ⇒ 改良部分の洗い出し

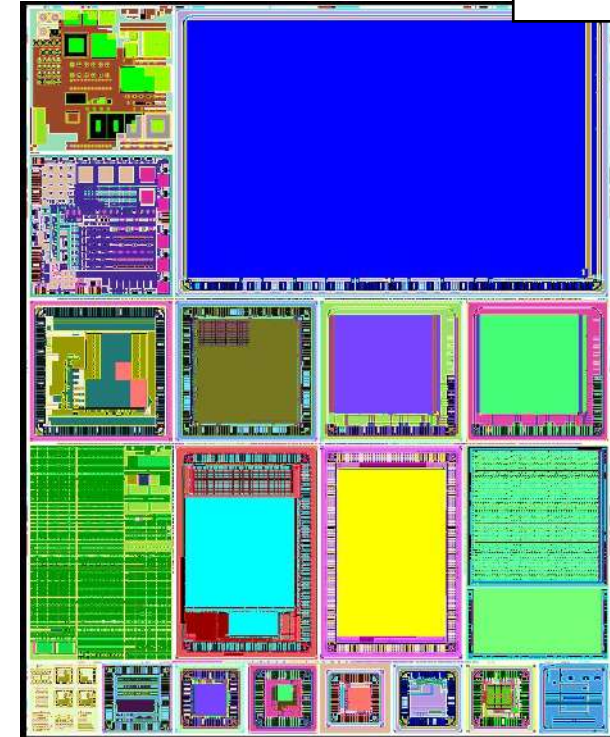
読み出し



SOIの経緯

SOIPIXコラボレーション

- 2005年からKEK新井先生が開始
 - 素核半導体検出器：Strip → Pixel, Hybrid → Monolithic
 - CCD, バルクCMOS, DEPFET等と比較し, SOIを選択
- 2007年からツルは参加
- 2013-17年度 新学術領域「量子イメージング」多分野が結集
 - 素核, 放射光, 天文・宇宙, 質量分析, プロセス, 集積回路
- 年1回のMPWラン: それぞれ予算と設計を持ち寄り, 合同で素子プロセスを行う
 - 要素回路, デバイス構造などを情報交換し, 自分の素子を設計する
- 2-3ヶ月に1回のLapis Meeting, 年1回のf2fのSOI研究会, 2週毎の zoom Meeting...



X線SOI「XRPIX」の開発

- 2008年 既存の素子を借りての評価からはじめた
- 2010年 科研費をとって自分の素子 XRPIX1 を作った
- KEKに相当助けて頂いた. 汎用の読み出し回路が準備されているのは大きかった
- 12モデル, 20近い設計を投入. 30本以上の投稿論文 (2.5本/年)
- 現在 XRPIX collaboration 16機関, 61名
- X線天文 + MeVコンプトン (医療用, 宇宙用) + 暗黒物質 + 中性子・ミュオン...

共同開発はどんな感じだったか

CCD: X線・光赤外 + HPKの共同開発

- 素子のスペックは大体同じ
- 「特定のセンサ」の共同開発
- 設計と製造はHPKさん
⇒ リスクは低い

研究者間の協力関係

- 評価をそれぞれの観点で行う
 - 空乏層をX線 or 赤外で決める
- 不得意な評価をお互い補う
- 困ったときの相談相手
- 似て非なる部分の勉強になった

SOI: 異分野間の共同開発

- SOIは未知のデバイス・全く違う素子
- 「SOIセンサの作り方」の共同開発
- 全部自分でやる・製造のみラピスさん
 - ウェハメーカーとの交渉も必要
- 好きにできるが、動作保証なし
⇒ ハイリスク・コスト大

研究者間の協力関係

- MPWラン ⇒ コスト削減の鍵
- 設計データ・知見の共有
- 様々な評価方法
- 半導体工学とのコラボレーション
- 違う粒子・違う測定量・違う回路
- 言葉が違う

SOIは大変だった。やって良かったし、とっても楽しい(まだ終わっていないけど)

- 基本的に全部自分で行う
- 研究者人生の全てを掛ける気概が必要
- 色々なバックグラウンドの仲間が必要
- 多くの様々な分野の方と知り合えた
- 勉強になったし、知識も増えた
- 新しいアイディアも出てくる

違う分野の人との共同開発ってなんだろう？

- やりたければやれば良いし，無理に行うこともないと思う
- 結局は人間関係じゃないかなあ
 - Win - Win で Give & Take
 - 大きく妥協しなければいけないものは，共同開発できない.
 - 相手を尊重し，自分の出来ることをやる.
 - お金はその時に持っているほうが出す.
 - お金は一部. ソフト，回路，評価，色々できることはある
 - 学生同士の交流 ← 研究会の飲み会
- 軽いところで，相手のものを借りてスタートで良いと思う.
- 予算を一緒に取る. 研究会を一緒にする. 論文を一緒に書く.
- X線と光赤外で共同開発できるか？
 - 断言：少なくともイメージセンサは間違いなく「できます」
 - 出会いの場も作っています



山田研究会

第6回量子線イメージング研究会 (QBI2024)

日時：2024年9月26日-27日

会場：東京理科大学神楽坂キャンパス
森戸記念館

- イメージング検出技術を議論する分野横断の研究会
- 可視光、赤外線、X線、ガンマ線などの光子、電子、中性子、分子、イオンなどの量子線の検出・解析技術を議論
- 素粒子・原子核物理学、宇宙物理学、物質科学から生命科学、医学まで幅広い分野をカバー
- 理学・工学や産官学の連携を深化し、新たな展開を生む
- 学生の優れた発表には、優秀発表賞を授与する
- 2018年から6回目。大体毎年9月後半の2日間。QBI2024 115名参加
- 来年(7回目)は静岡大学(浜松)で開催予定。tennet や天文月報でもアナウンスしています

SOC

常深博（大阪大学, チェア）

新井康夫（KEK）

大久保雅隆（産総研）

片山晴善（JAXA）

倉知郁生（ディーアンドエス）

幸村孝由（東京理科大学）

高橋忠幸（東京大学 IPMU）

鶴 剛（京都大学）

中村哲（東京大学）

初井宇記（理研）

松本浩典（大阪大学）

宮崎聡（国立天文台）

安富啓太（静岡大学）

山谷泰賀（QST）