

# CdTe/CdZnTe pixel センサーの今日と将来

高橋忠幸

JAXA 宇宙科学研究所

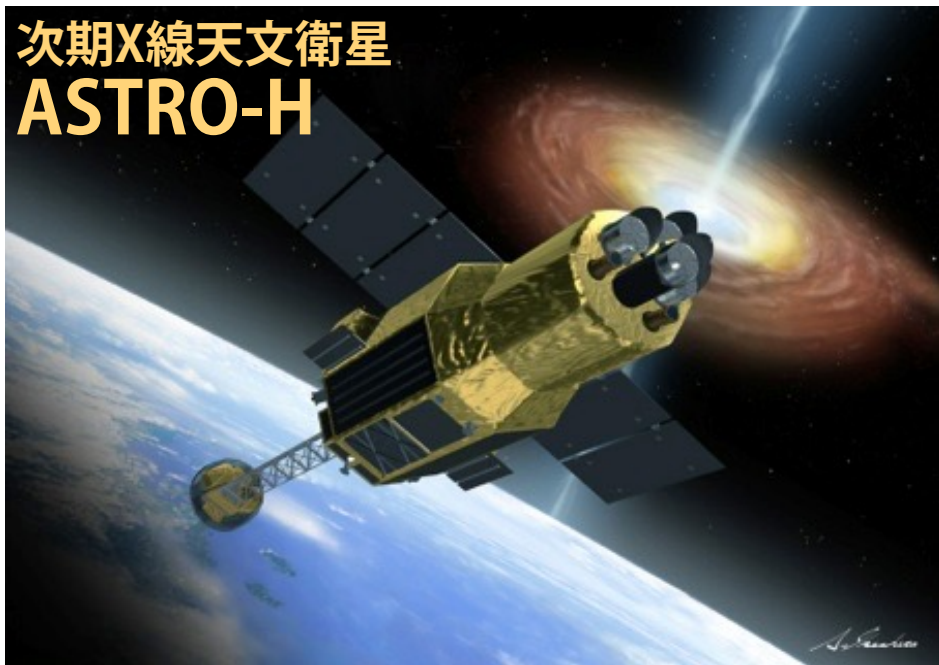


ASTRO-H



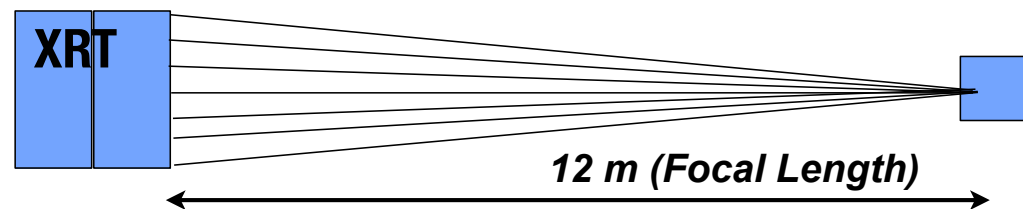
# CdTe/CdZnTe によるイメージャ (より高いエネルギーに)

次期X線天文衛星  
ASTRO-H



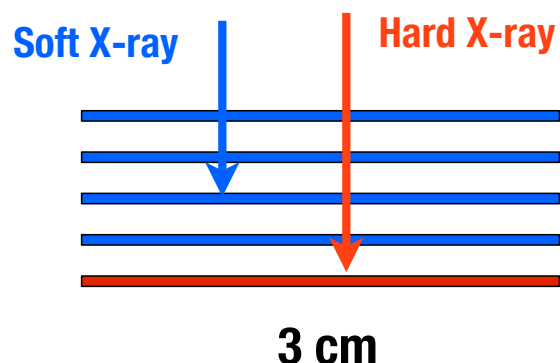
## 硬X線イメージャー

「硬X線望遠鏡」によって集められる  
5-80 keVの「光子」一つ一つを検出し、  
エネルギー、検出器上での位置、タイミング  
を記録し、イメージとスペクトルを得る。



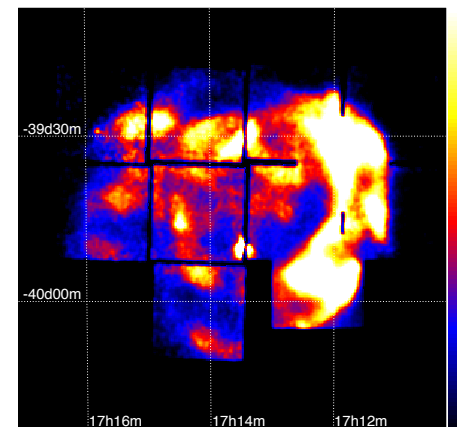
## 宇宙で必要なのはフォトカウンティング

Si and CdTe Hybrid Imager ( 5 - 80 keV):



Size 3cm x 3cm  
Resolution  
250  $\mu\text{m}$  pitch  
Double Side  
Si & CdTe

スペクトルの決定精度が大切



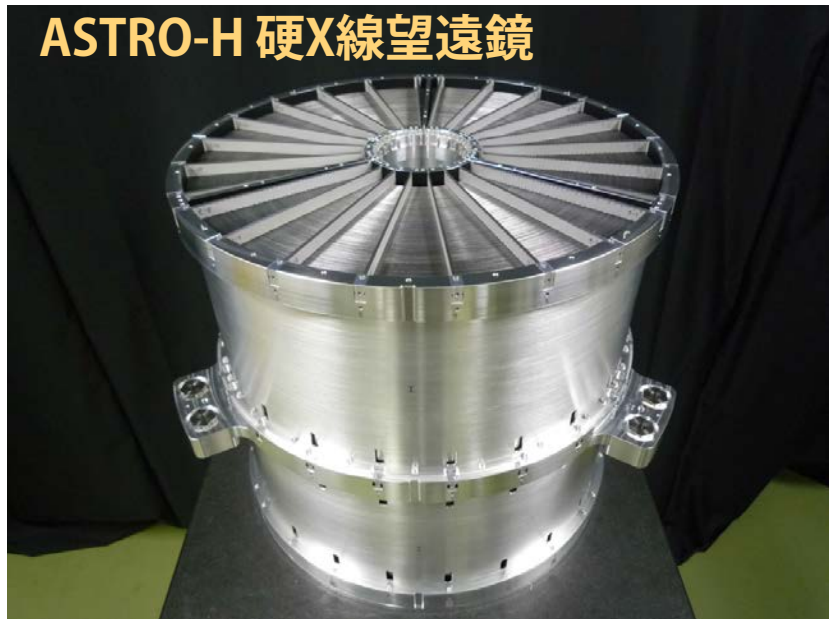
超新星残骸からのX線画像

(0.5 - 10 keV程度)

この画像を80 keVまで

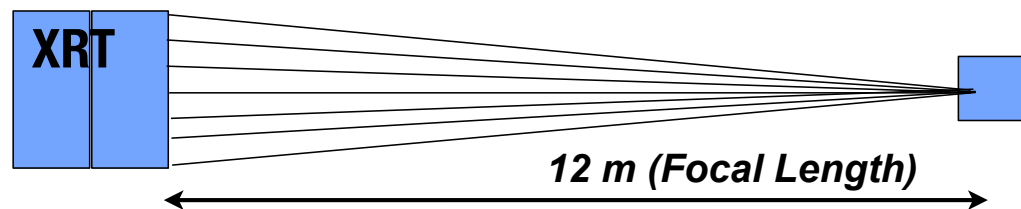
# CdTe/CdZnTe によるイメージャ (より高いエネルギーに)

ASTRO-H 硬X線望遠鏡



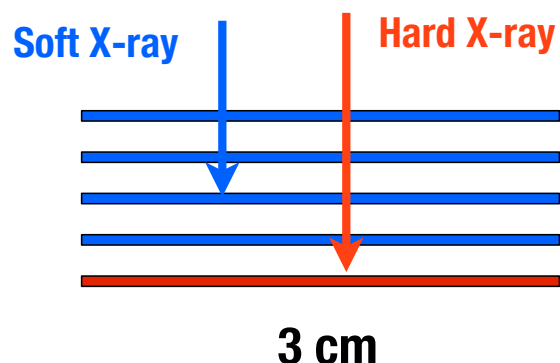
## 硬X線イメージャー

「硬X線望遠鏡」によって集められる  
5-80 keVの「光子」一つ一つを検出し、  
エネルギー、検出器上での位置、タイミング  
を記録し、イメージとスペクトルを得る。



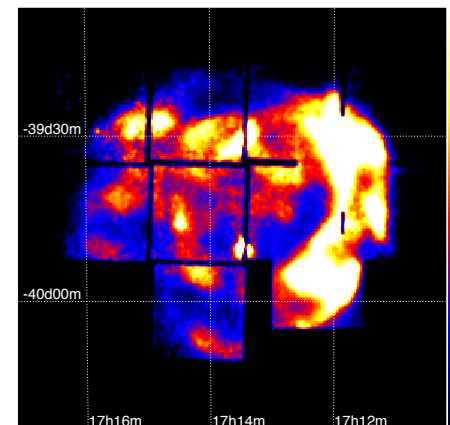
## 宇宙で必要なのはフォトカウンティング

### Si and CdTe Hybrid Imager ( 5 - 80 keV):



Size 3cm x 3cm  
Resolution  
250  $\mu\text{m}$  pitch  
Double Side  
Si & CdTe

スペクトルの決定精度が最も大切



超新星残骸からのX線画像

(0.5 - 10 keV程度、画像とスペクトル)

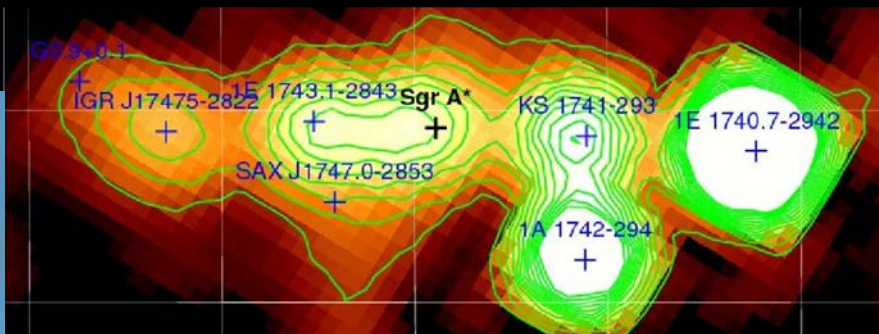
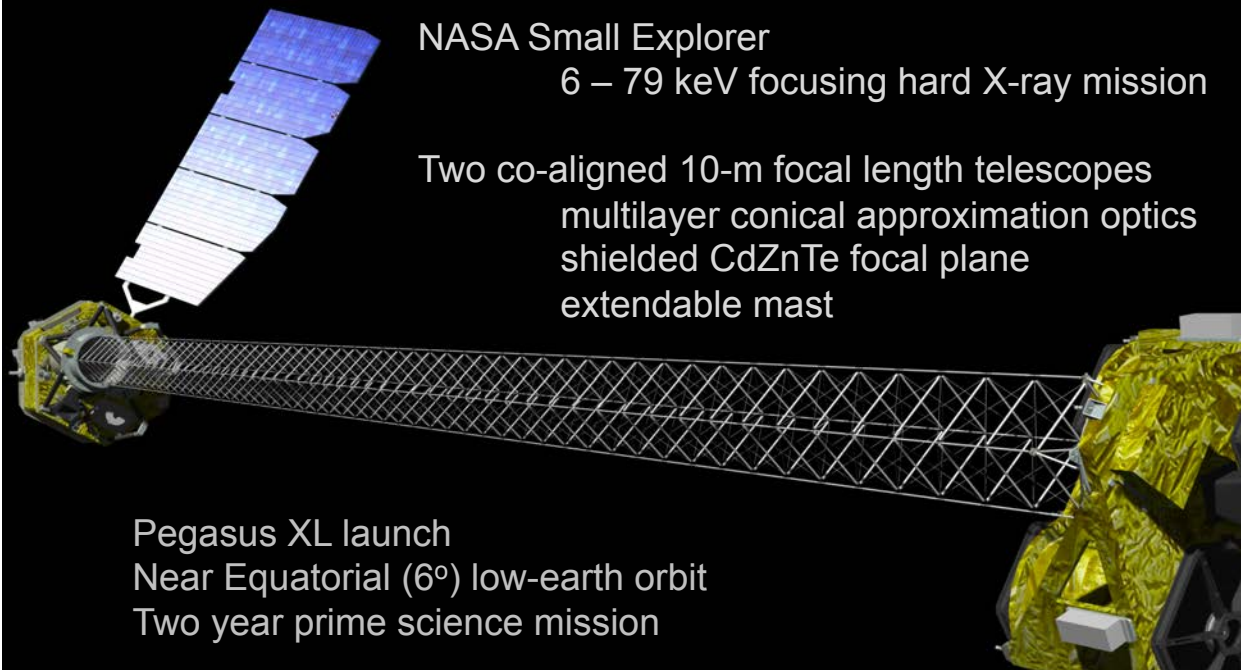
ASTRO-Hでは80 keVまで

# CdTe/CdZnTe によるイメージャ (NuSTAR衛星 2014-)

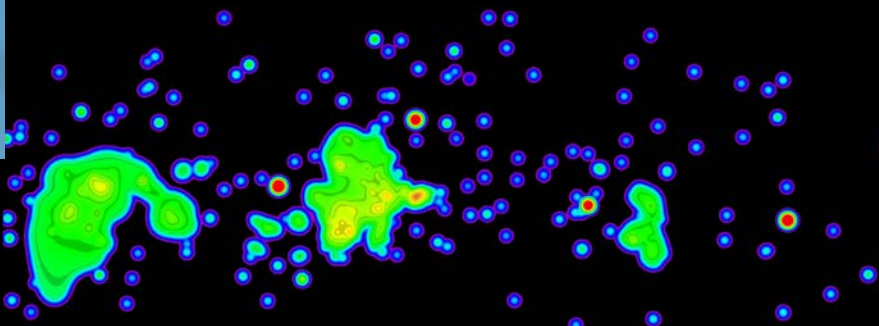
NASA Small Explorer  
6 – 79 keV focusing hard X-ray mission

Two co-aligned 10-m focal length telescopes  
multilayer conical approximation optics  
shielded CdZnTe focal plane  
extendable mast

Pegasus XL launch  
Near Equatorial ( $6^\circ$ ) low-earth orbit  
Two year prime science mission



*INTEGRAL*  
(data)

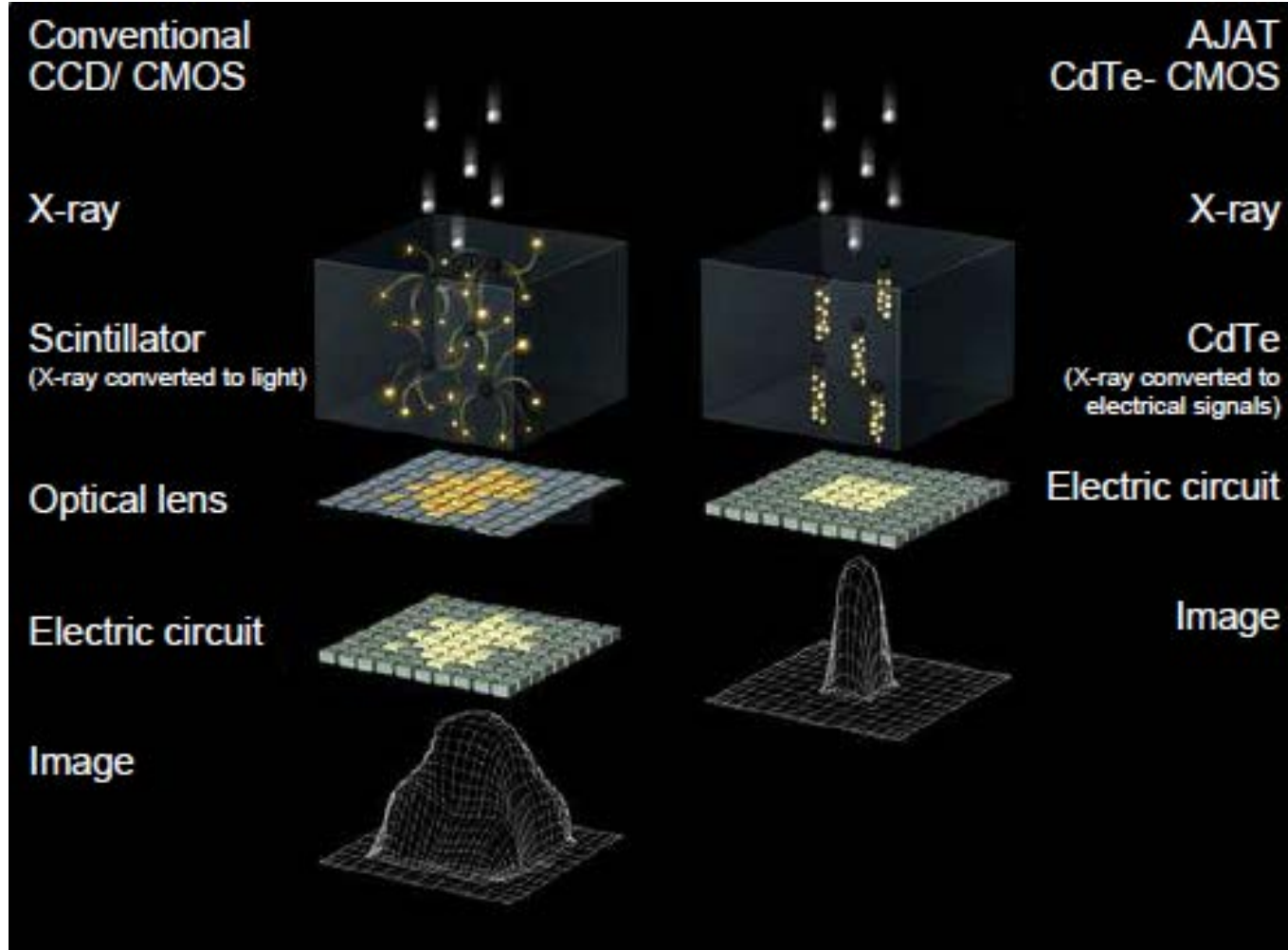


*NuSTAR*  
(simulation)

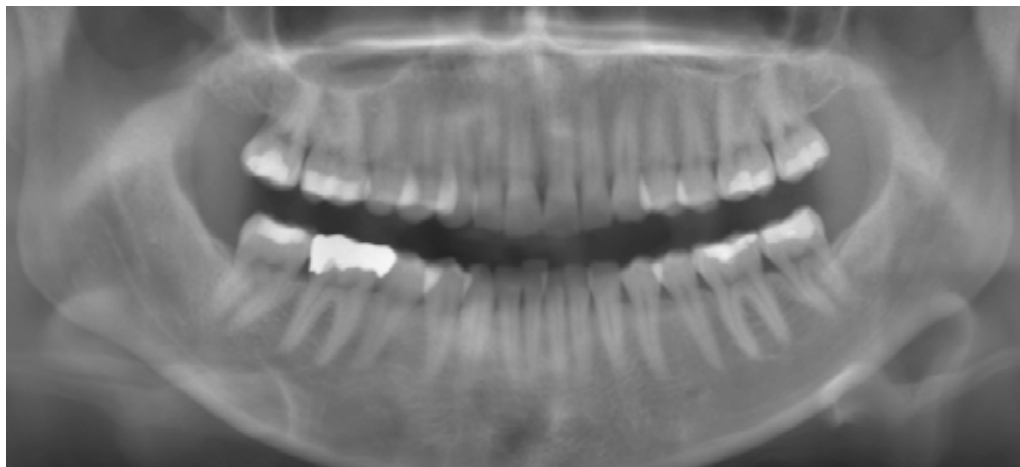
# Outline of the talk

- 1) CdTe/CdZnTe半導体のメリット、制約条件
- 2) CdTe/CdZnTe半導体の現状
- 3) フォトンカウンティングCdTe/CdZnTeピクセルの現状と課題と応用例  
(自分がやっていることと、人がやっていることの両方)
- 4) まとめ

# CCD Scintillator CMOS



# CdTe CMOS



Courtesy of AJAT (Finland)

T.Takahashi

# 「硬X線、ガンマ線」半導体

## ガンマ線光子の反応

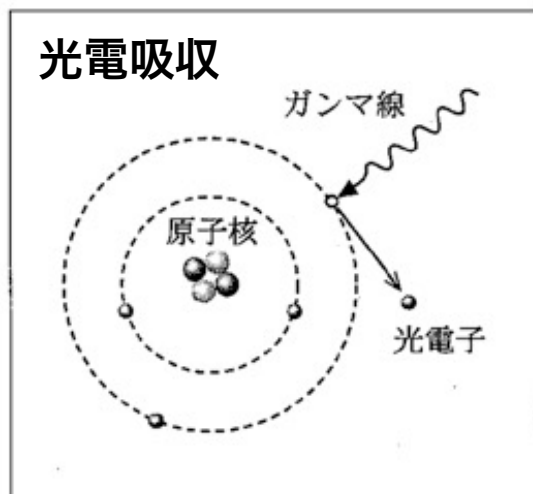
X線領域：光電吸収 (X線はその場で吸収される)

ガンマ線領域：コンプトン散乱 (ガンマ線が電子によって散乱される。)

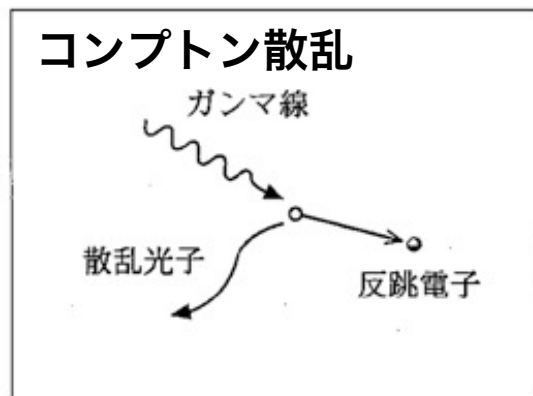
散乱したガンマ線はエネルギーが下がる)

数10 keVの領域で、できるだけ光電吸収の効率が高い半導体センサの研究が行なわれてきた。

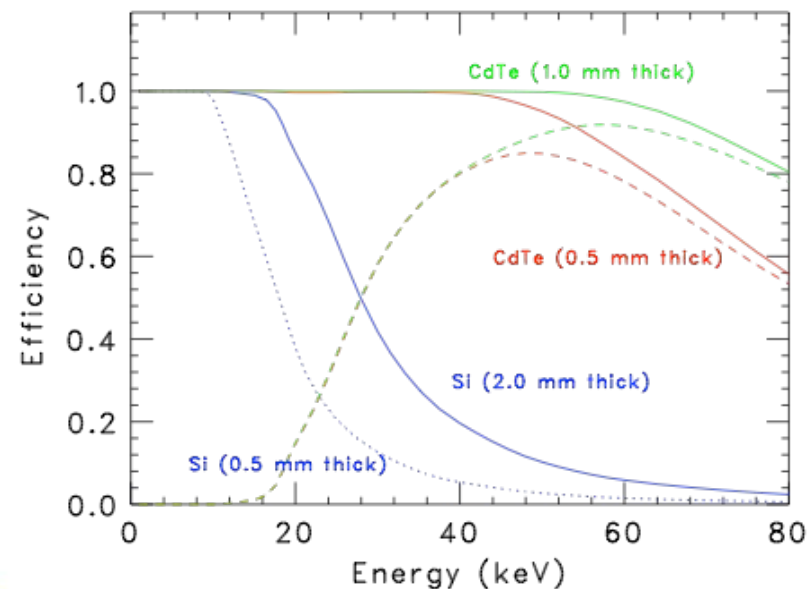
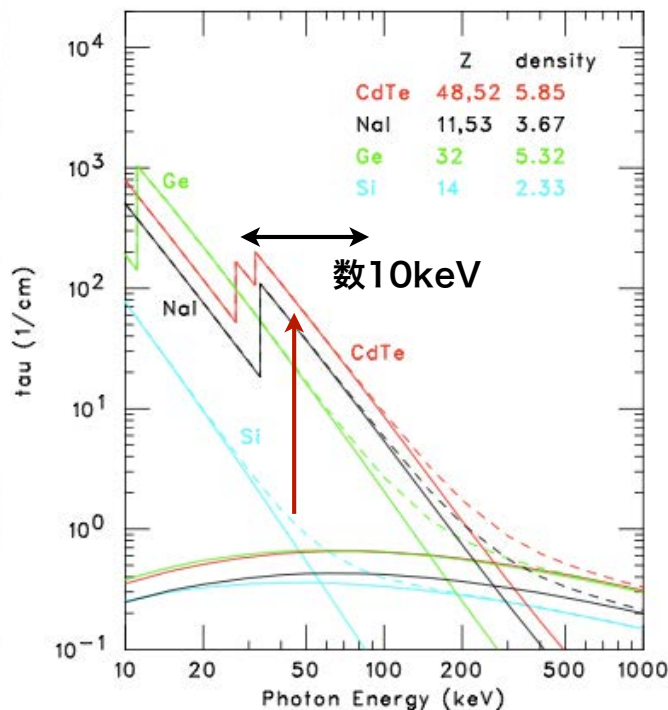
→現時点では、CdTe/CdZnTeが「結晶生成」、「電極形成」の観点から最も有望



光電吸収



コンプトン散乱



# CdTe/CdZnTe (テルル化カドミウム/テルル化亜鉛カドミウム)

Luke 2006

Material	Ge (77K)	Hgl <sub>2</sub>	CdTe	CdZnTe
Atomic number	32	80, 53	48, 52	48, 30, 52
Band gap (eV)	0.74	2.13	1.50	1.57
Energy per e-h pair (eV)	2.97	4.2	4.4	4.6
Fano factor	0.08	0.19	0.11	0.09
$\mu_e$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	40,000	100	1100	🤔1000
$\mu_h$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	40,000	4	100	10
$\tau_e$ (s)	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>
$\tau_h$ (s)	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>

現在開発が進む

「ガンマ線」半導体のゴール

高いエネルギー分解能

Ge半導体に迫る

(0.2%@662keV)

高い検出効率

10keV から 1MeVまで

位置分解能

数10-数100マイクロメートル

室温に近い動作環境

Si/Geに比べて電荷転送特性が悪い

Poor charge transport properties

平均自由行程

$$\lambda_e = (\mu\tau)_e E, \lambda_h = (\mu\tau)_h E \text{ [cm]}$$

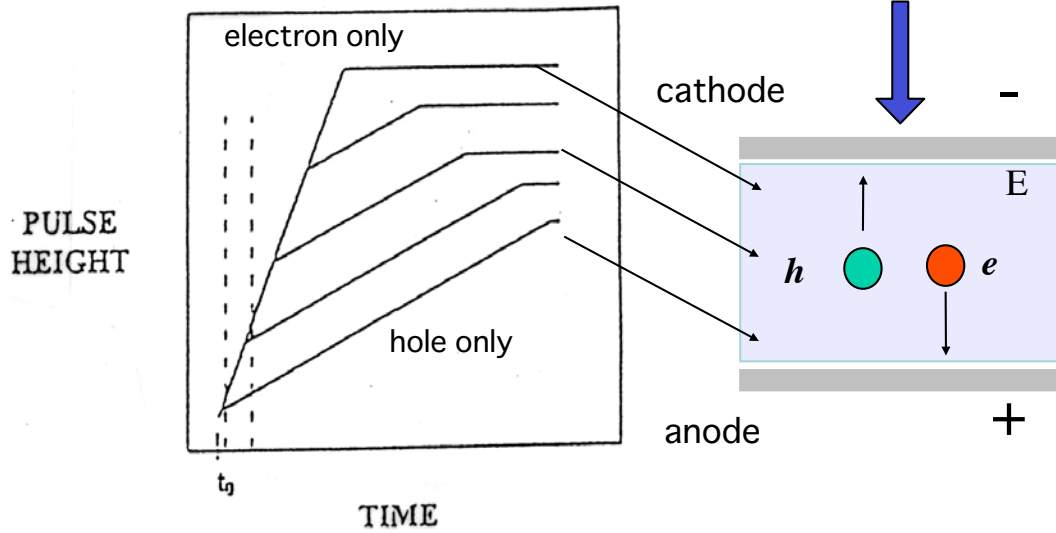
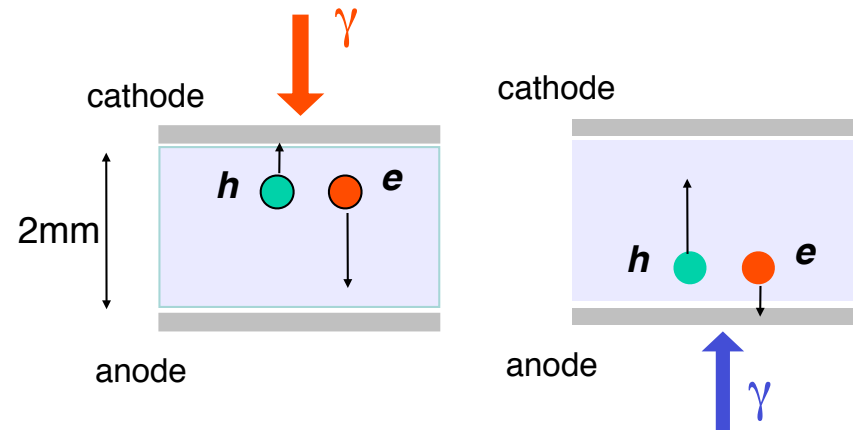
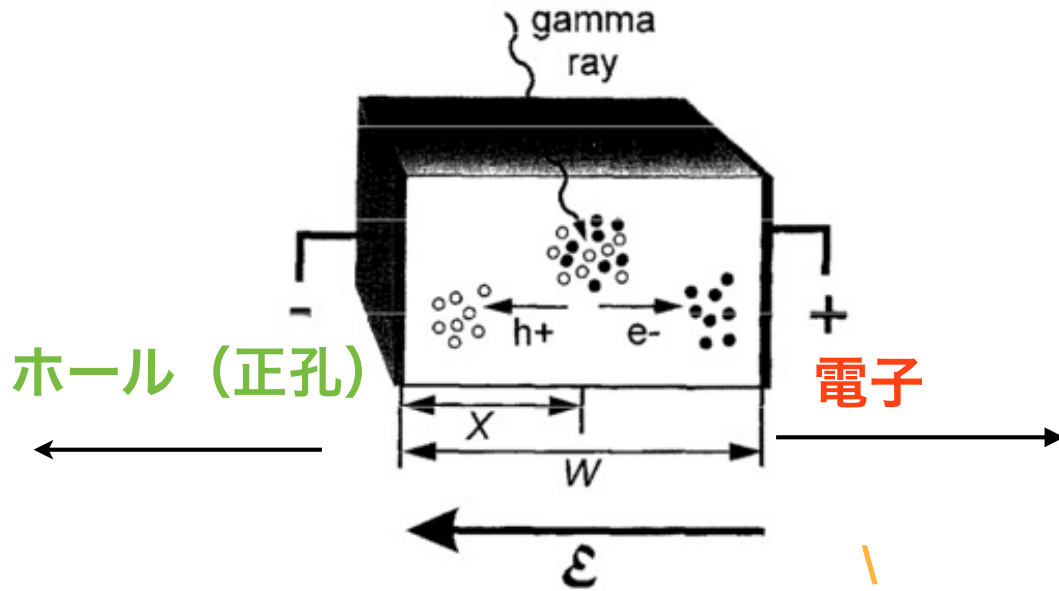
## CdTe/CdZnTe

- High Z semiconductor  
( $Z_{Cd} = 48, Z_{Te} = 52$ ),  $\rho = 5.9 \text{ g/cm}^3$

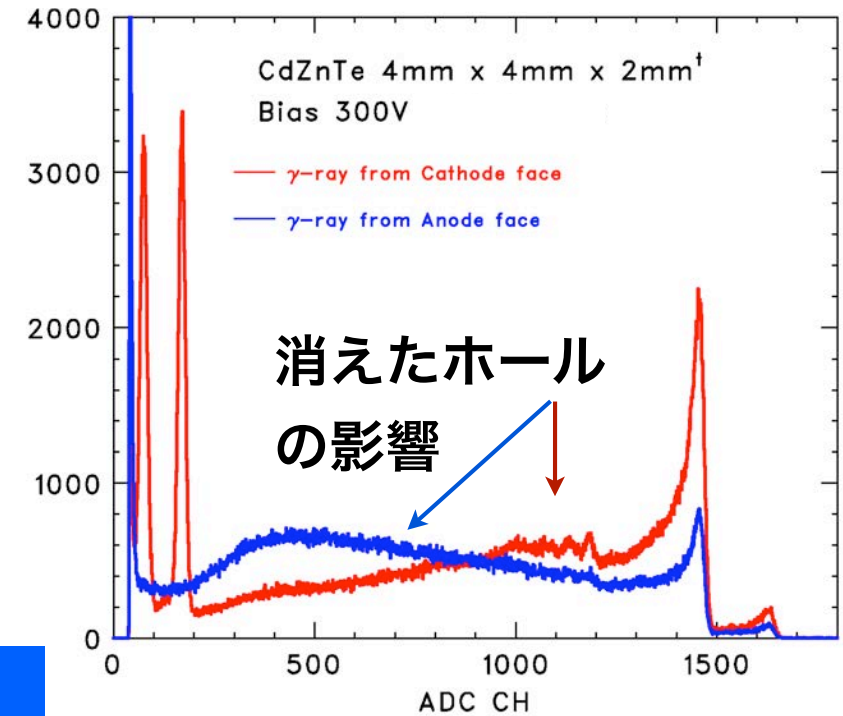
- Room Temperature Operation  
or Cool Environment



# CdTe/CdZnTe半導体の応答：特徴



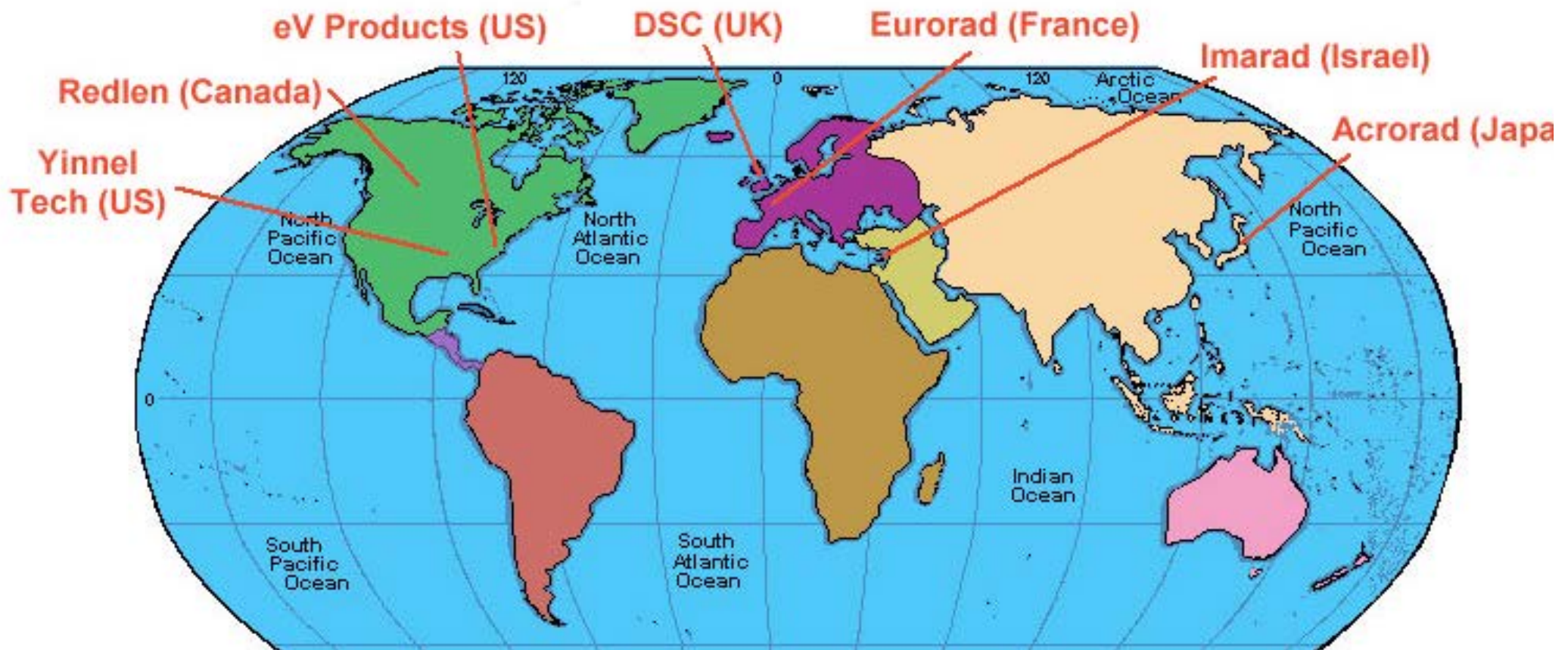
Pulse height depends on the interaction depth



## キャリアトラップの影響 (ポラリゼーション)

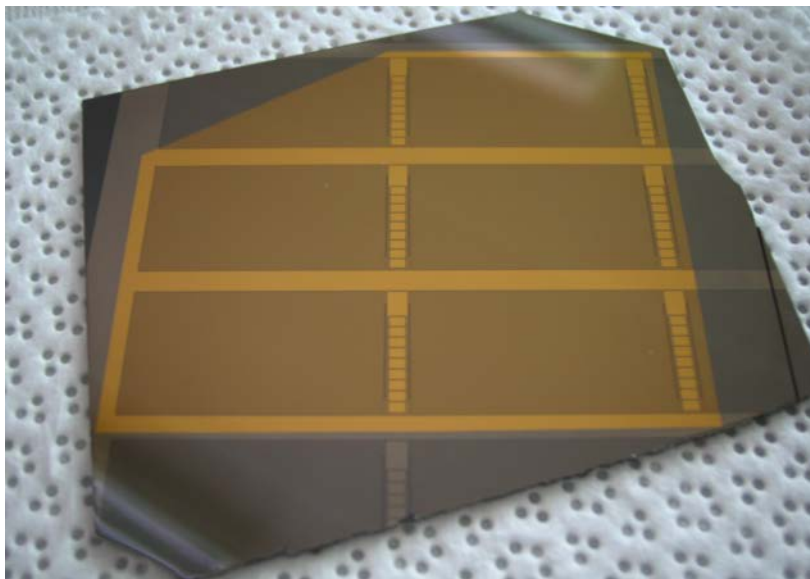
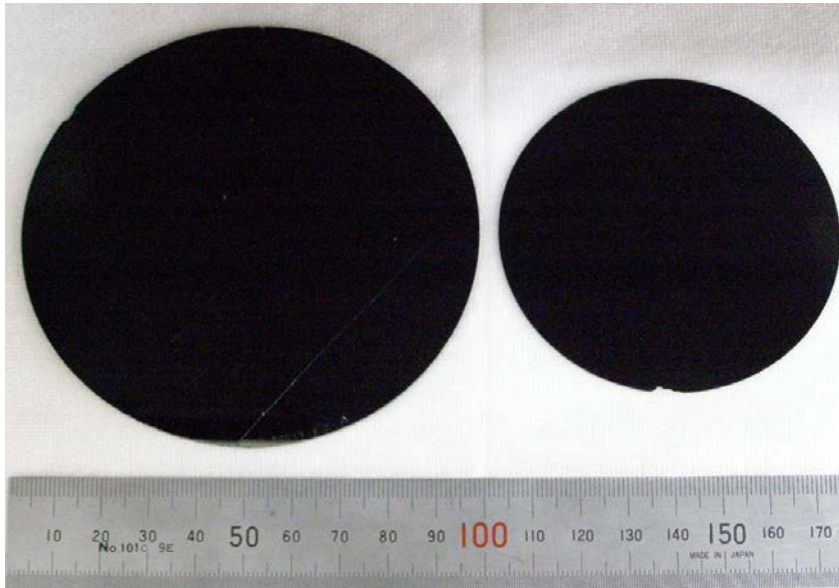
# Who makes CdTe/CdZnTe Crystal?

From a review talk by P.J. Sellin (2005)



# Recent Advances on Technologies

## ACRORAD (JAPAN) Large Single Crystal

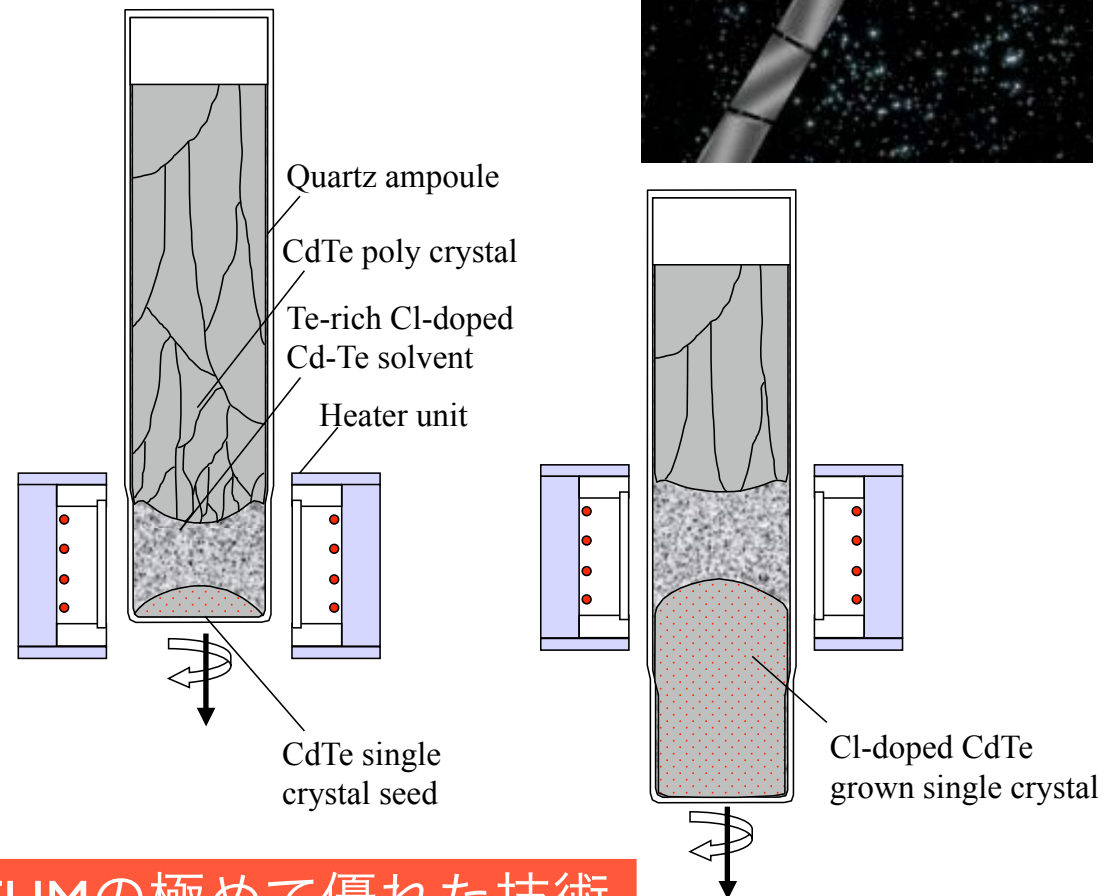
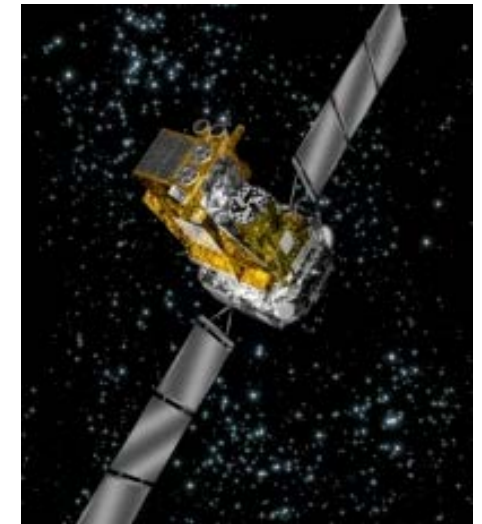


## 1st Large Scale CdTe Camera in Space (INTEGRAL)

Travel Heater Method  
(THM)

Careful treatment of  
post heating

Very uniform wafer



THMの極めて優れた技術

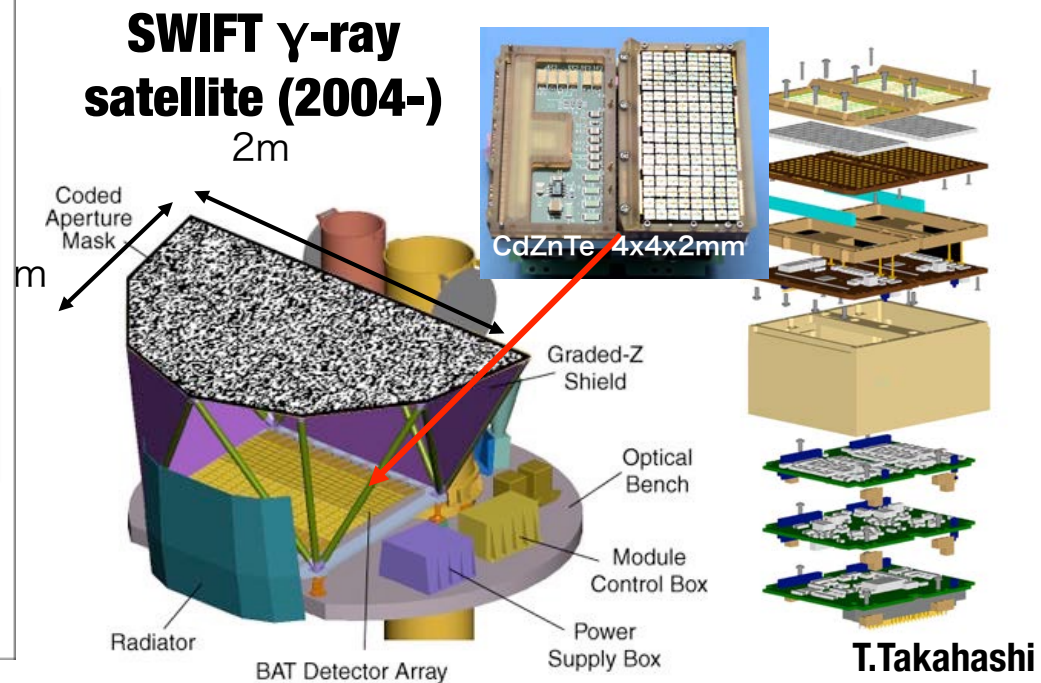
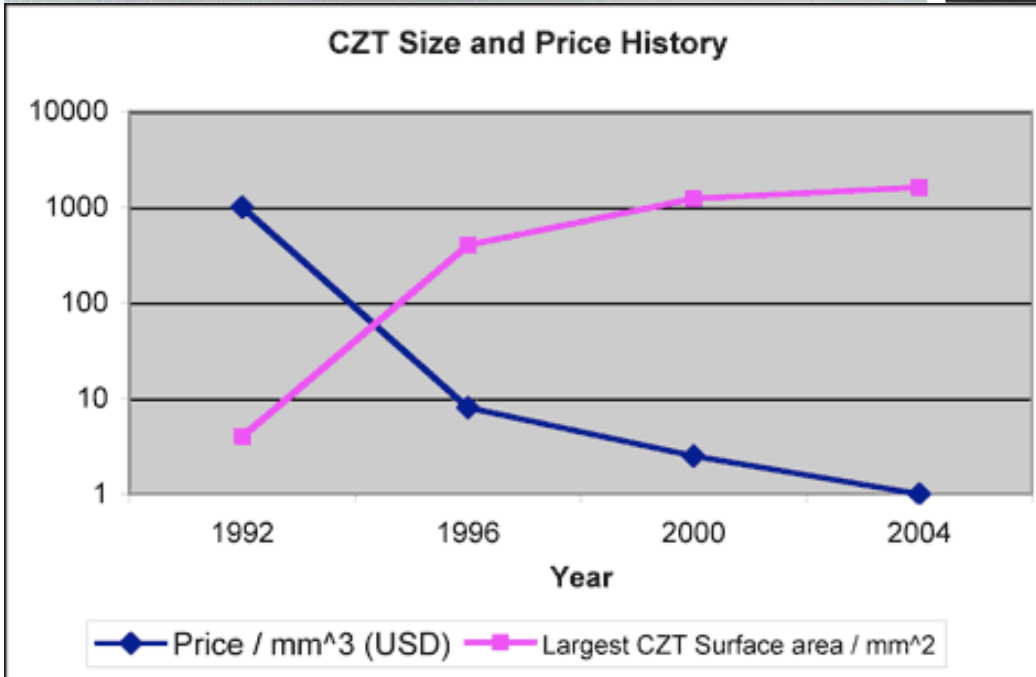
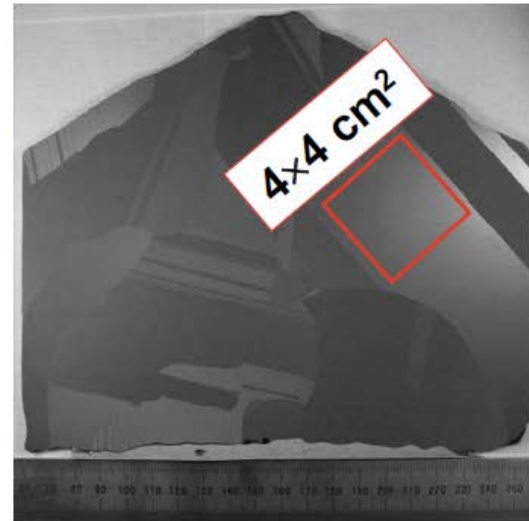
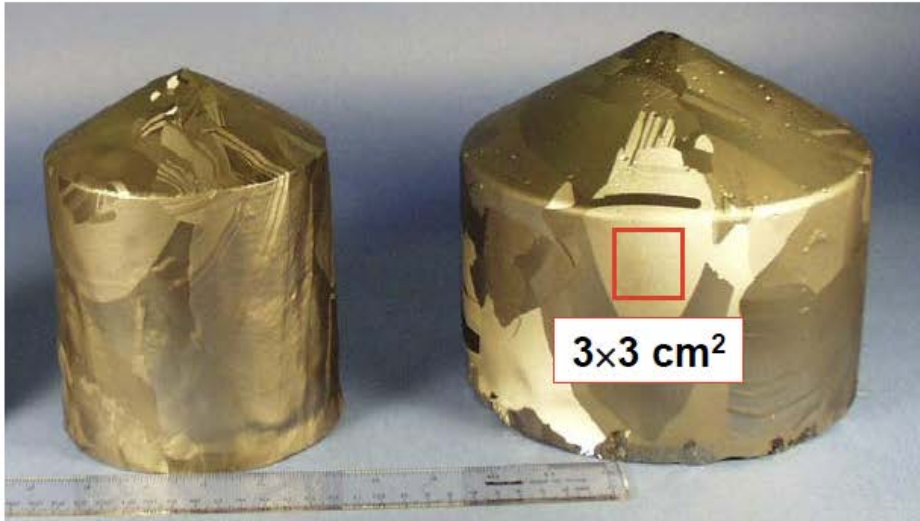
T.Takahashi

# Recent Advances on Technologies

## eV Products (High Pressure Bridgman and improved method)

### Large Crystal

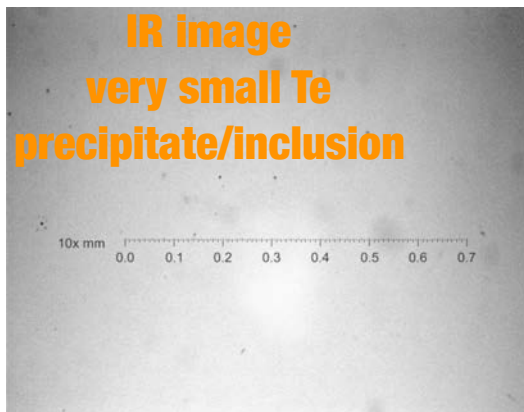
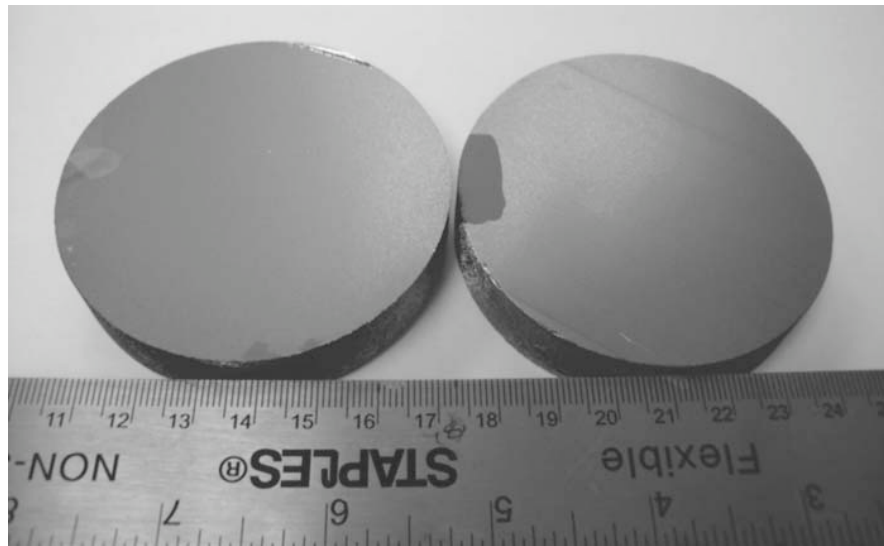
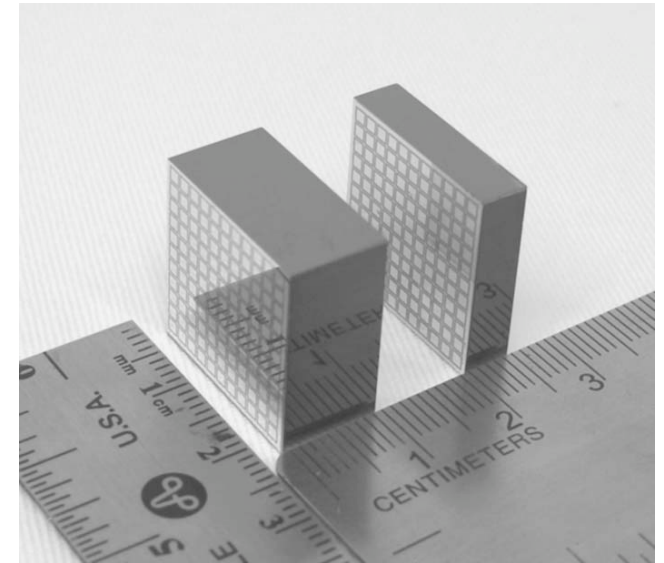
比抵抗は高いが均一性に難点



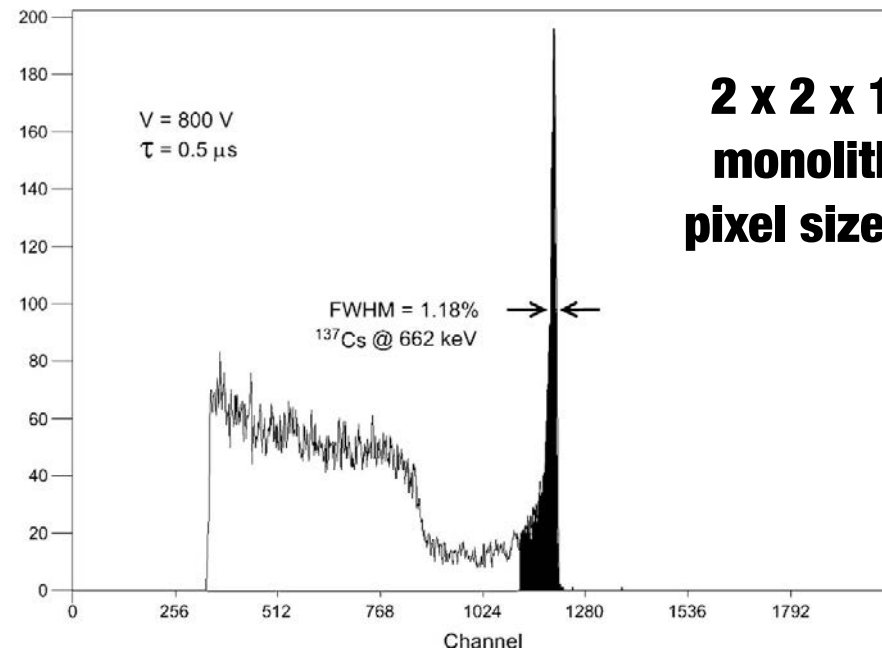
# Recent Advances of CdZnTe

## REDLEN

succeeded to make CZT by THM  
Large Single Crystal



**662 keV 1.18% (7.8 keV, FWHM)  
without additional signal correction)**



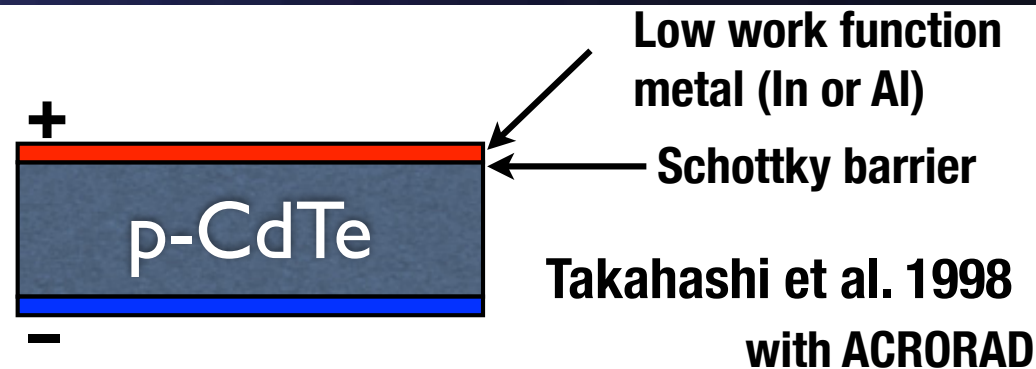
**2 x 2 x 1.05 cm<sup>3</sup>  
monolithic pixel  
pixel size 2.46 mm**

**Chen et al. JAP, 2008**

**T.Takahashi**

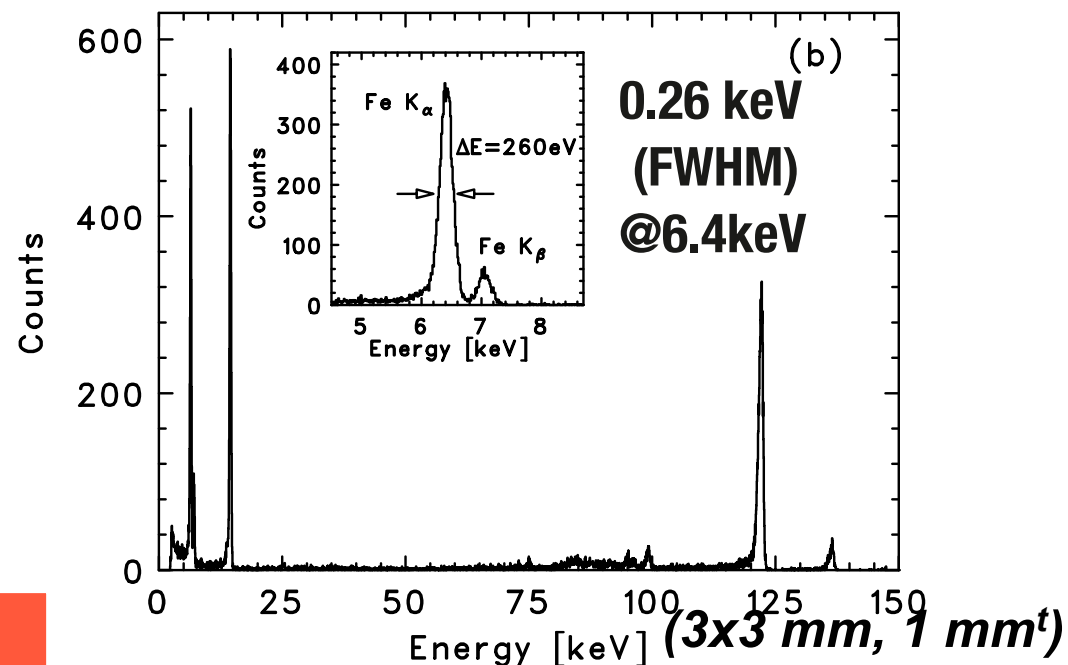
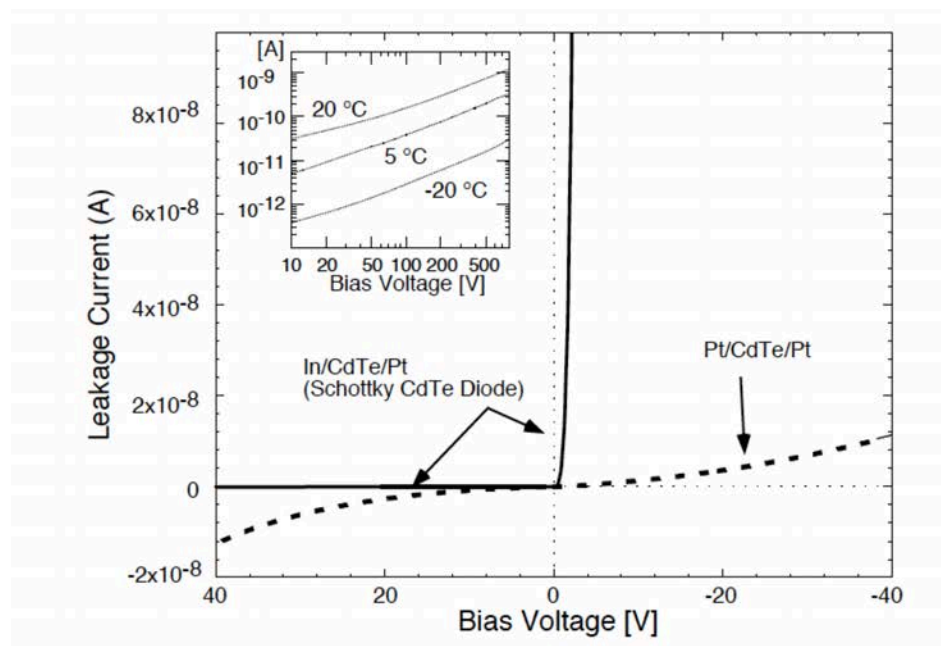
# 3. ショットキー CdTe diode

- 1. Thin device (0.5 – 2.0 mm)
- 2. Schottky diode
- 3. Guard ring



- Extremely low leakage current
- High bias voltage

- Full charge collection (NO TAIL)
- High Speed (High Bias: ~1000V/mm)

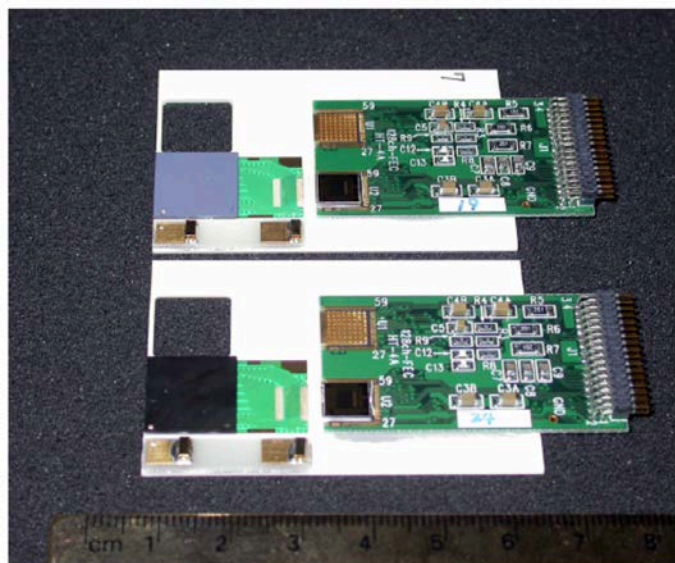


• 高いエネルギー分解能を獲得

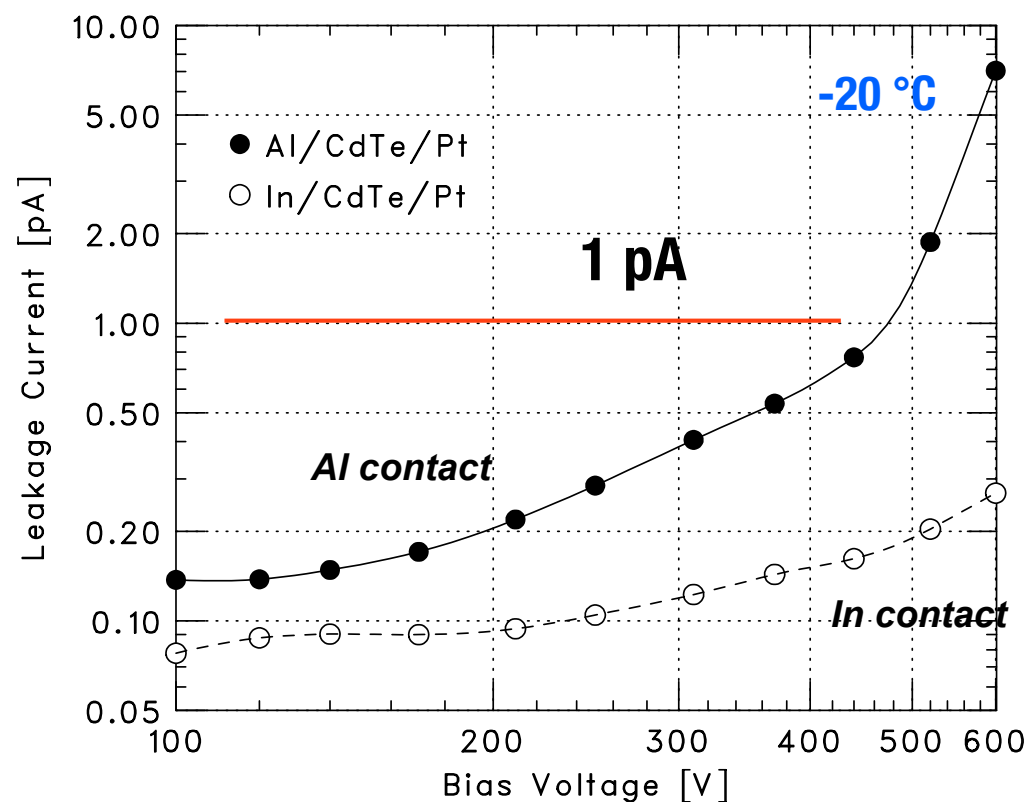
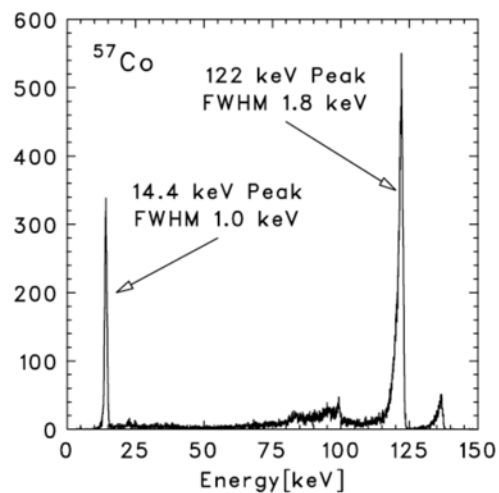
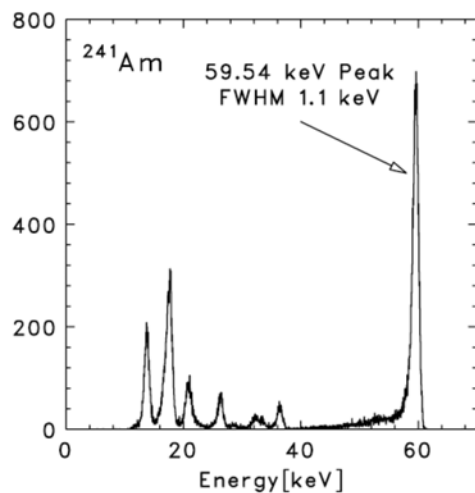
• 高いエネルギー分解能が必要なければ普通のオーミック電極 (Pt)

# 3. Schottky CdTe diode

- Inの代わりにAlをショットキー電極に用いる (Toyama et al. 2004)
- Al (陽極) をピクセル化→電子収集型が可能に (Watanabe et al. 2007)



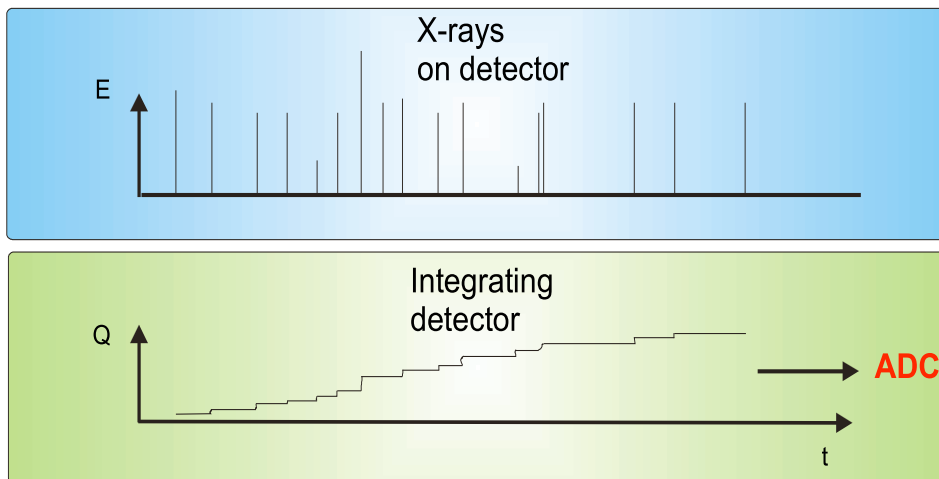
8x8 pixels  
pixel size 1.35x1.35 mm



# Commercial Products

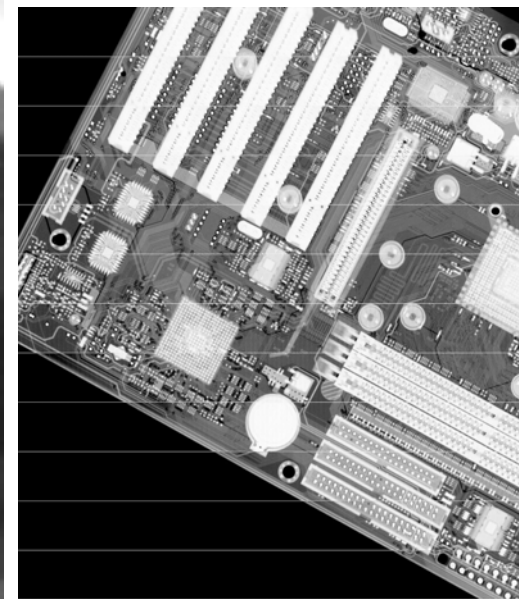
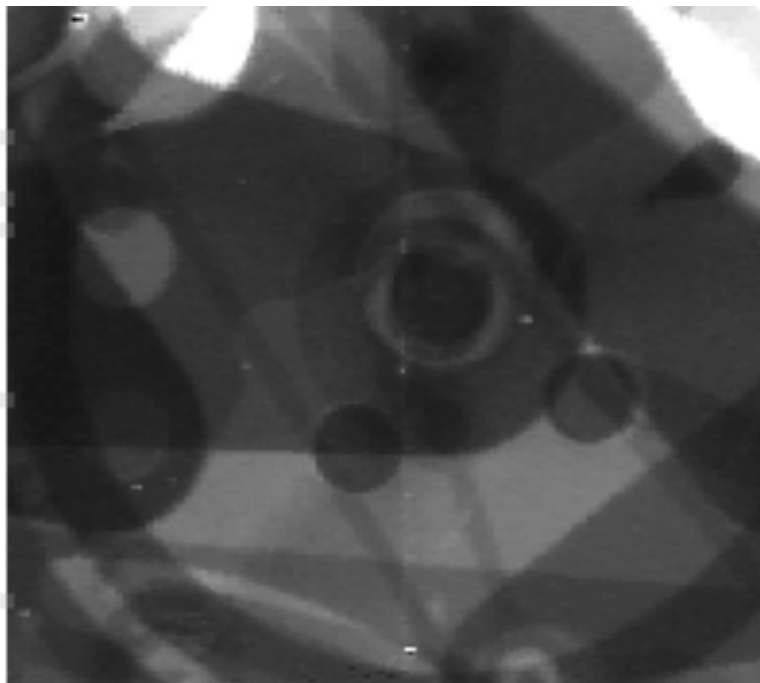
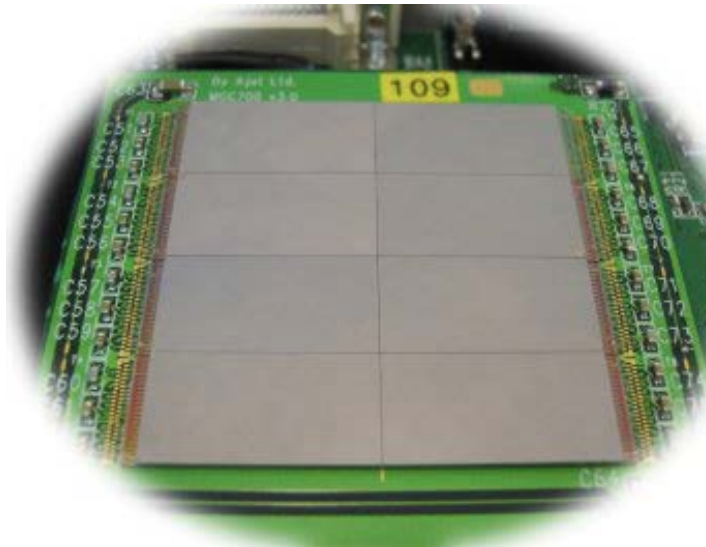
## Hard X-ray Imager

### 積分型



- アーキテクチャが簡単
- 50ミクロン以下のピクセルが可能
- 赤外線センサー用としてASIC確立
- 白黒写真
- 読み出しは固定レート（例：ビデオ）

100 micron pitch



AJAT, Finland

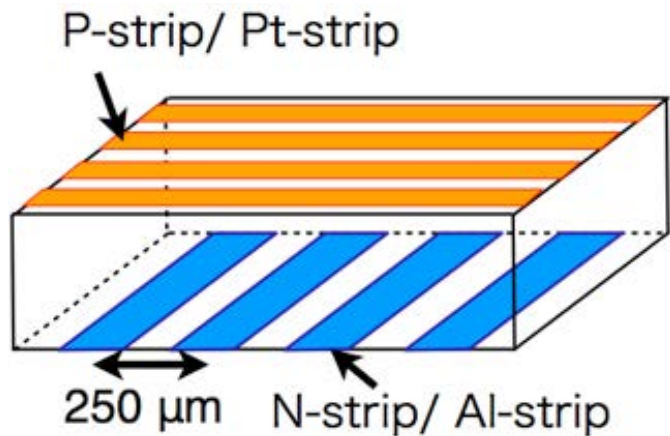
T.Takahashi



# フォトンカウンティングの技術

- 1) ひとつひとつのX線光子を検出し、カウンタで数えてイメージにする。
- 2) ひとつひとつのX線光子を検出し、パルス波高値、位置情報をリストモードで送り出し、スペクトルと同時にイメージを作る。
  - 高い感度（一つ一つのX線光子、ガンマ線光子を観測可能）
  - エネルギー情報を使えるので、「しきい値」を設定できる。
  - あるエネルギー範囲のみのイメージ、あるいはカラー写真がとれる。
  - 回路に必要な技術（総論技術分野）同時計測が可能
    - 1) 半導体ウェハー（大きさ、一様性、比抵抗）
    - 2) 電極
    - 3) 接合（バンプボンディング）
    - 4) ASIC
    - 5) 高速データ処理（数Gbps）

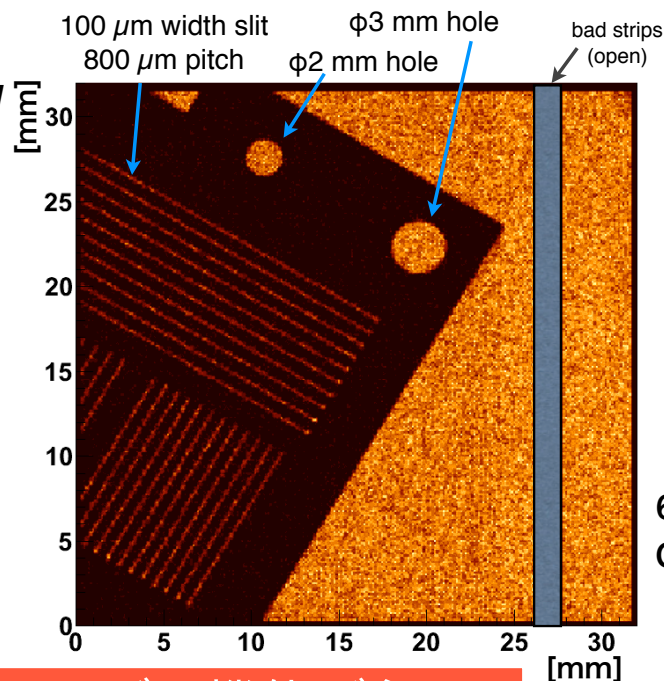
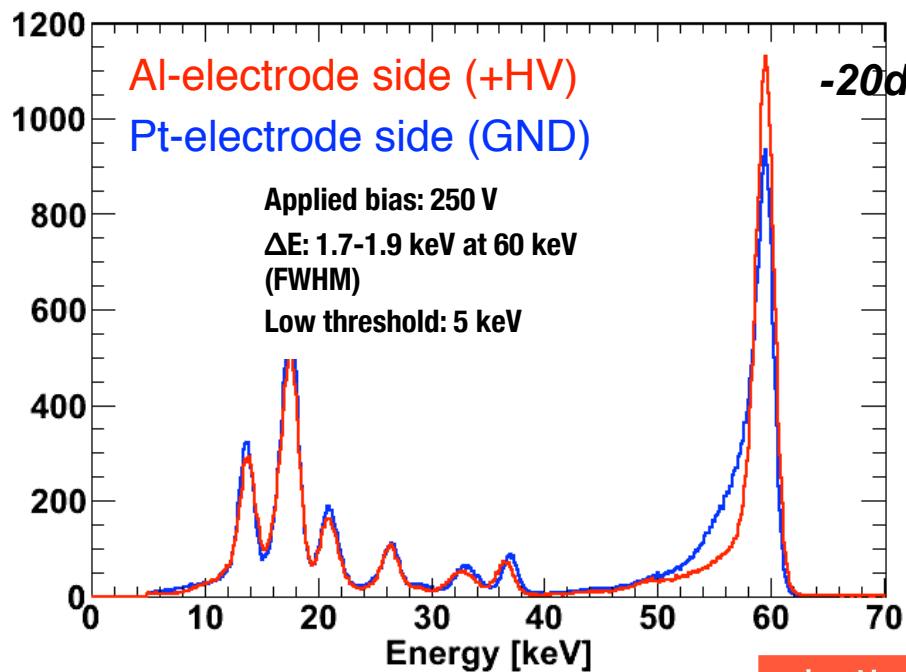
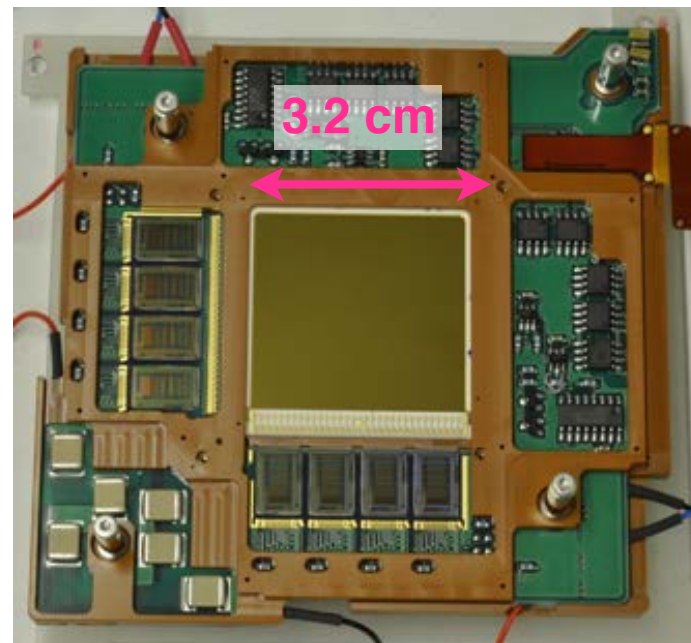
# 大面積CdTe両面ストリップ (初めて開発された)



250 micron  
pitch strips  
for both side

Al-strip (+)  
(Schottky barrier)

$2 \times 128 = 256$  channels  
( $\ll 128 \times 128 = 16,384$ )



60 μm ストリップピッチ  
CdTe両面ストリップ素子

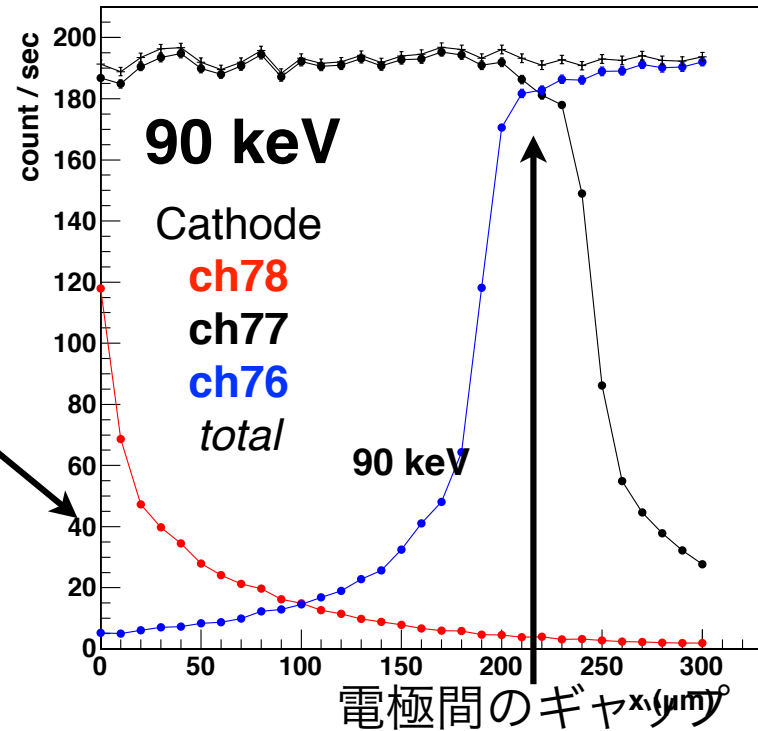
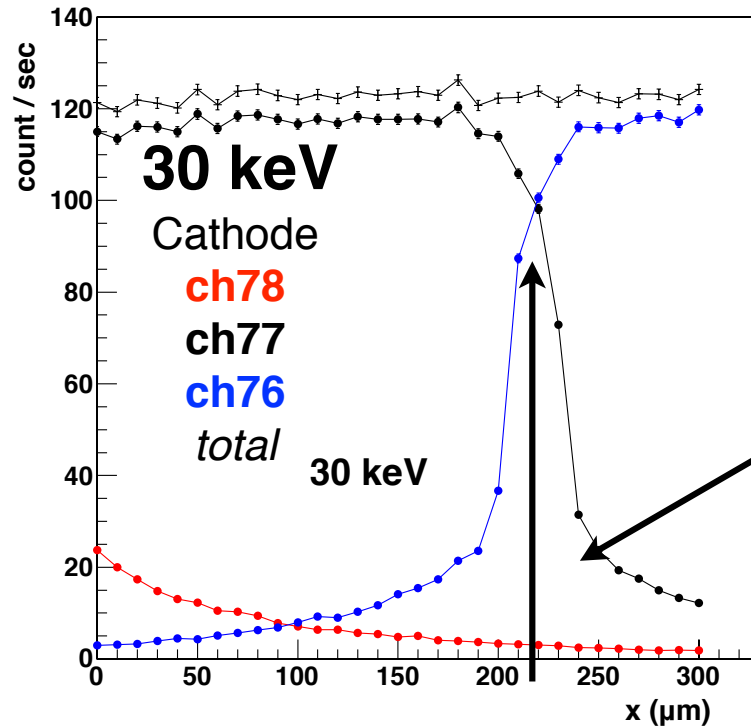
・セルフトリガの機能が必要

Watanabe et al., 2011

# Charge Sharing/一様性の研究 (SPring-8での実験)

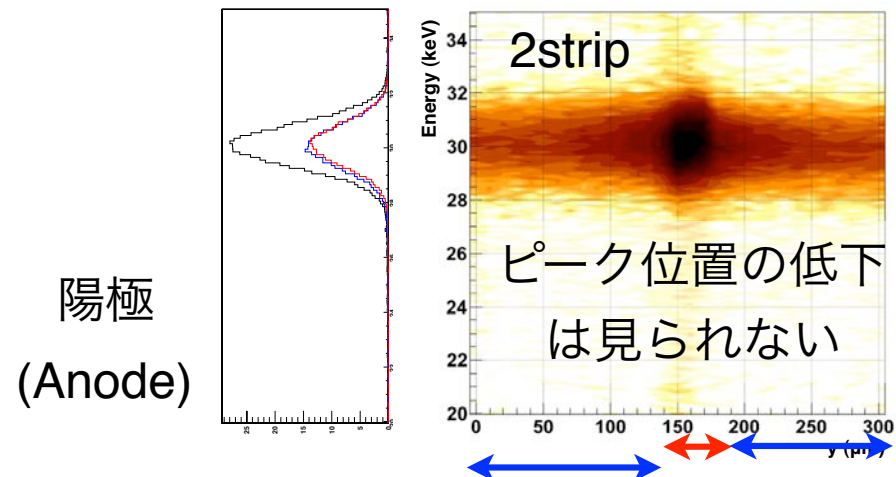
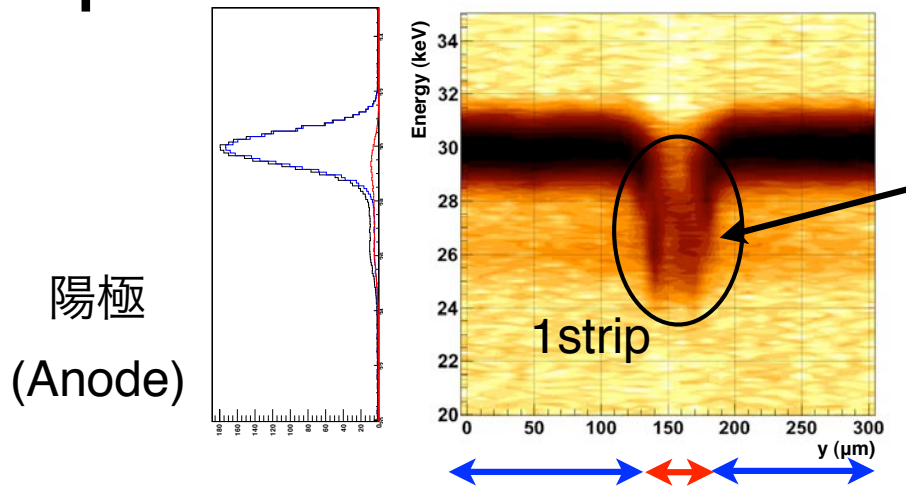
~6x6 μmのX線ビームでScan

萩野修論(2012)



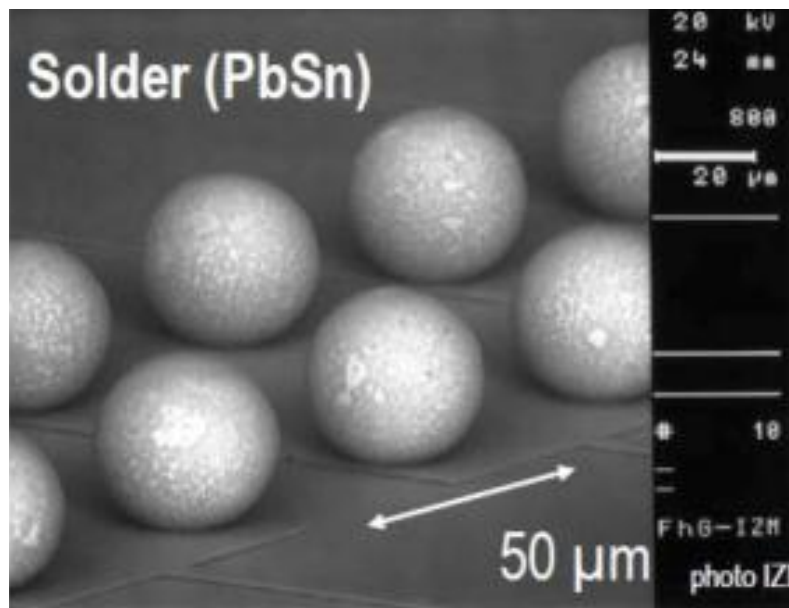
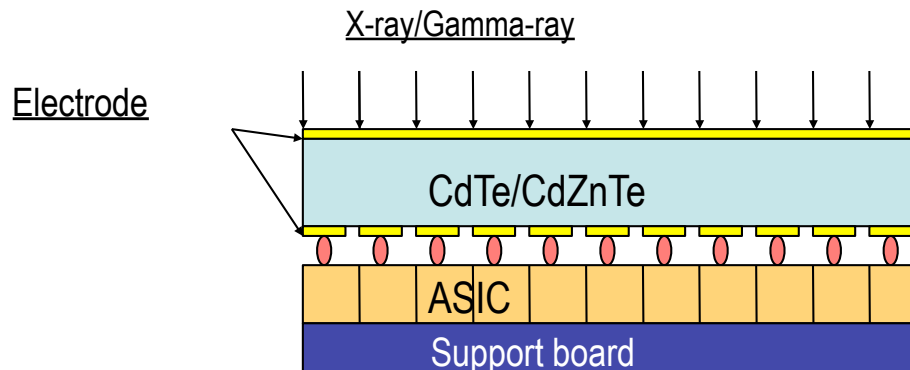
$\sigma \sim 1\%$

## Spectrum



※2stripのエネルギーの和をとっている

# 接合 (バンプボンディング) の技術

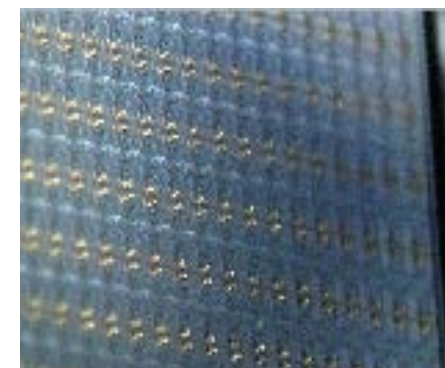
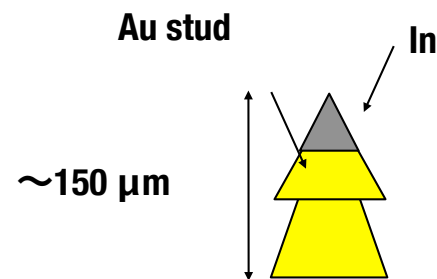
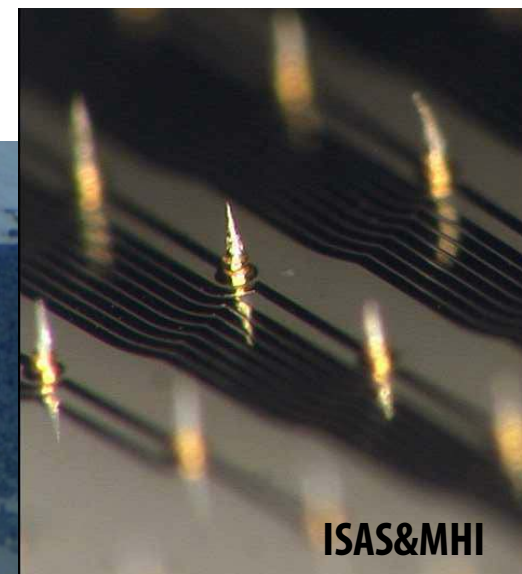
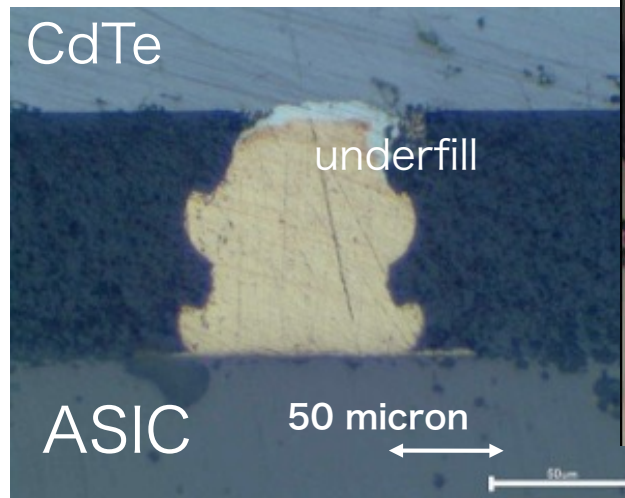


Wafer level process  
High temperature and high pressure

⊙ Si

△ CdTe

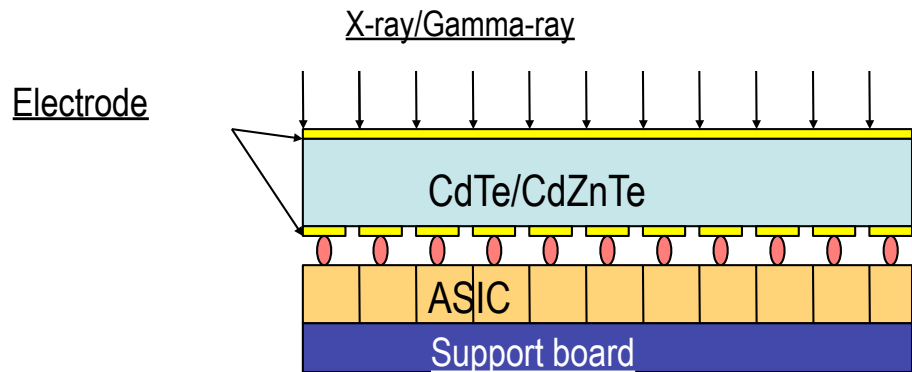
## In/Gold Stud Bump (Takahashi et al. 2000)



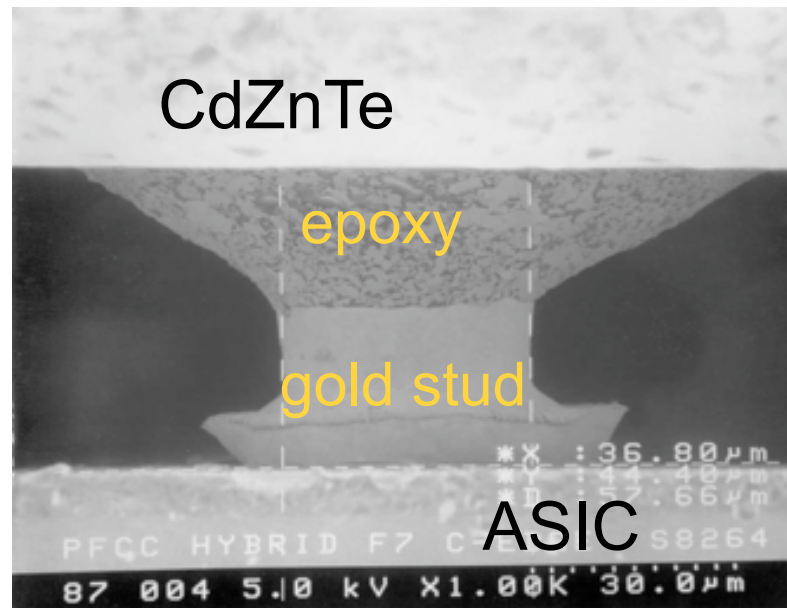
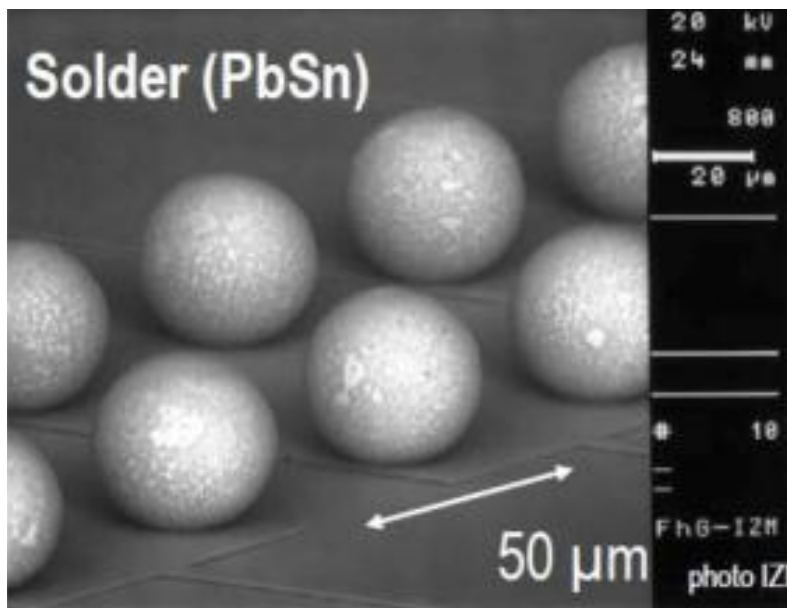
In/Au stud bump bonding (Developed by ISAS/MHI)  
Low Capacitance interconnect  
Chip level process  
low temperature and soft process

⊙ CdTe

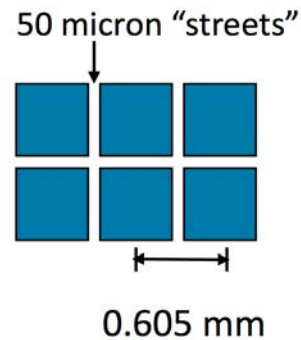
# 接合 (バンプボンディング) の技術



## NuSTAR/Caltech



CdZnTe eV products, 2mm thick  
 2.1 x 2.1 cm  
 Anode segmented into 32x32 pixels



高いバンプ  
 0.6 mm pixel : 300fF  
 雑音性能の観点から  
 数10ミクロン以上の高さが必要

Wafer level process  
 High temperature and high pressure

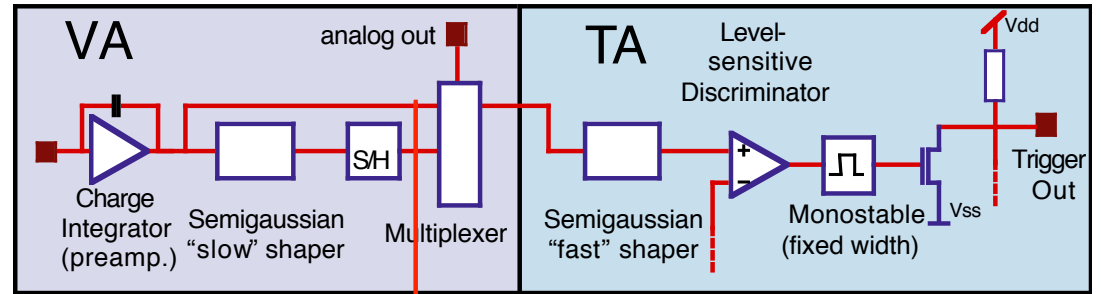
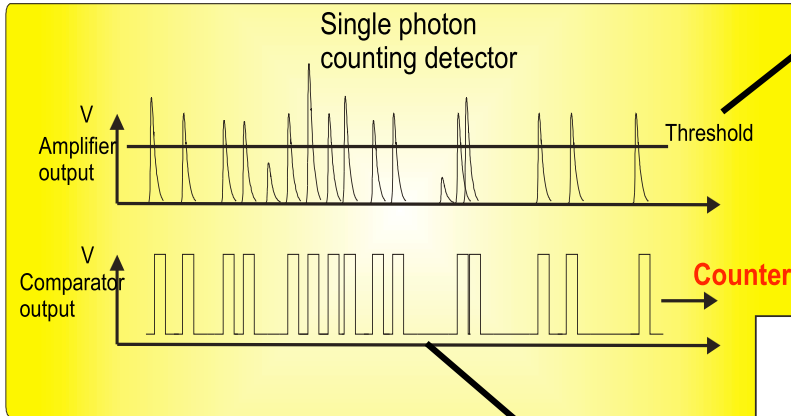
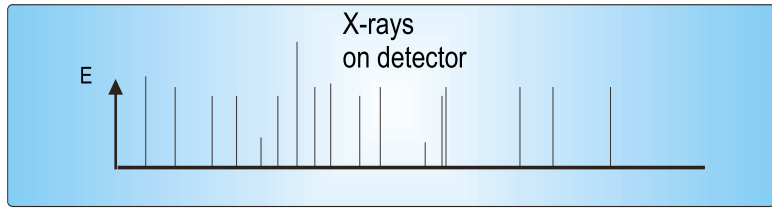
○ Si

△ CdTe

Mao et al. 2009

# We need ASIC :

## If you need CdTe/CdZnTe imaging detectors

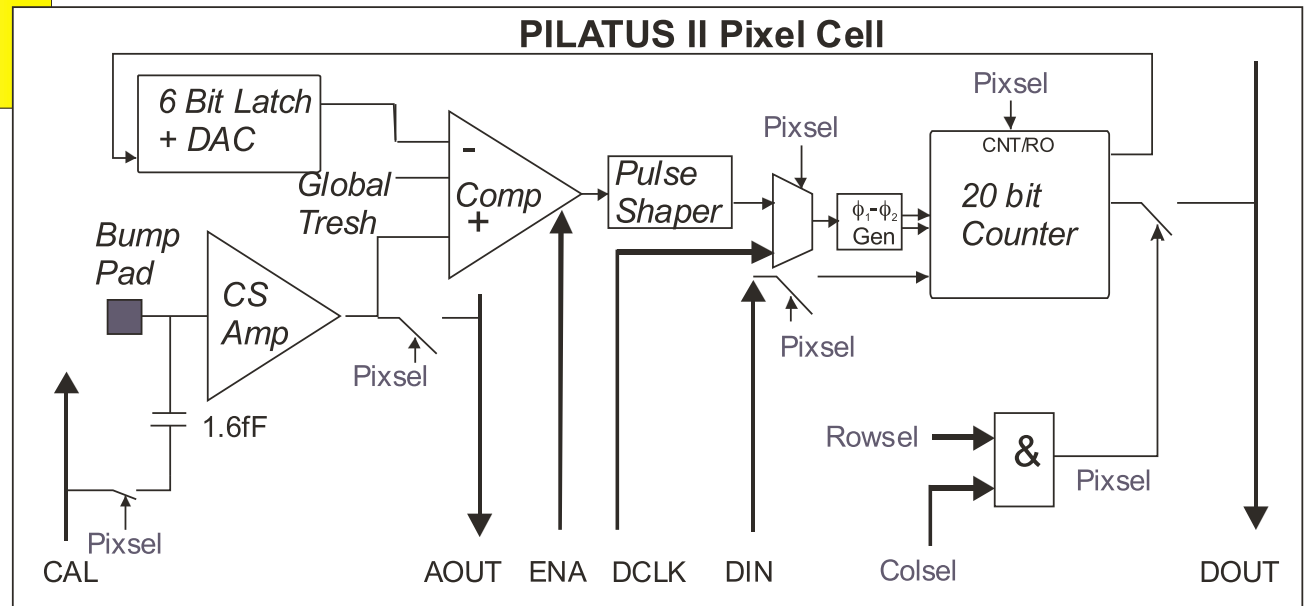


**Spectrum**

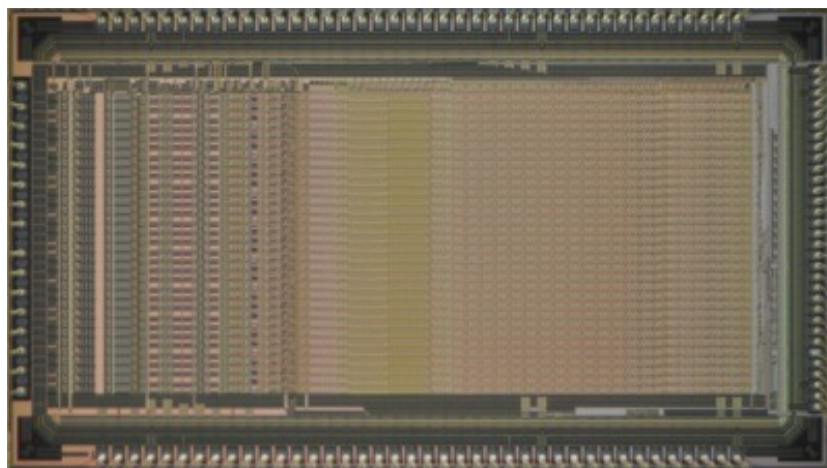
**ADC**

**Need 50 e- at OpF for both cases**

**Photon Counting**  
**エネルギー情報は**  
**コンパレータ**



# 高分解能ASICの技術 at ISAS/JAXA



32 ch

電源ライン:  $\pm 1.65$  V

~90  $\mu$ m pitch

消費電力: 90 mW

低雑音性能を維持しつつ下記の機能を追加。

- **ウィルキンソン型のAD変換回路**

X線イベントの波高値をデジタルで出力

=> 検出器をモジュール化することや、

それを多数組み上げることが容易になる。

- **Dual Interlocked storage Cell (DICE)**

宇宙線イベントによるSEU耐性の確保。

- **両極性対応**

- 検出器信号の極性によりADCとトリガー出力用コンパレータの動作の向きを変更

- **リーク電流補償回路**

- 入力部の電位を維持するように電流出力

- **ゲイン (ダイナミックレンジ) 調整**

- プリアンプの帰還容量をMOSスイッチで変更
- High gain mode: 0-4 fC

- Low gain mode: 0-8 fC

- **ベースライン電圧の調整**

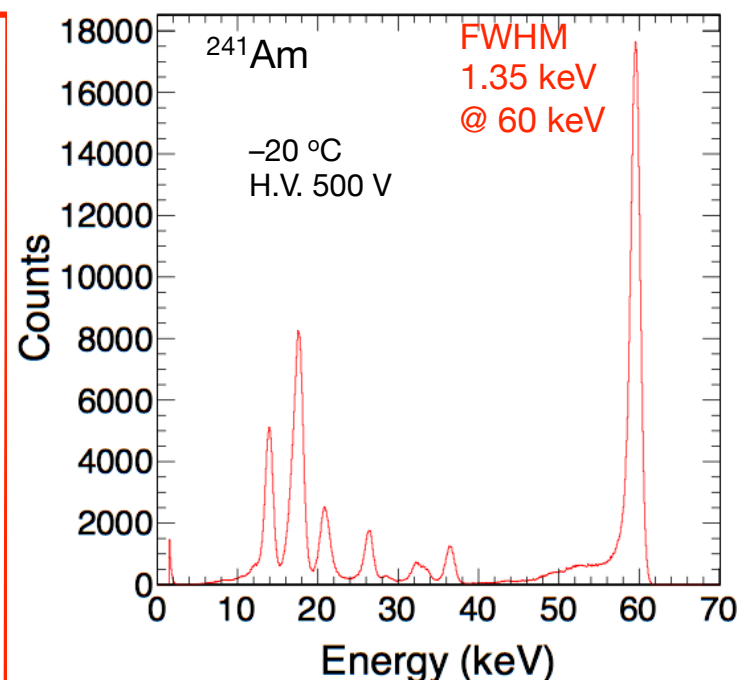
- 粗調: 抵抗回路の実効値を電流DACで調節
- 微調: 電流DACの出力を抵抗に流して調節

- **読み出しモード選択 (Full/Sparse)**

- 全ch読み出す
- トリガーしたchだけを読み出す

- **コモンモードノイズ演算機能**

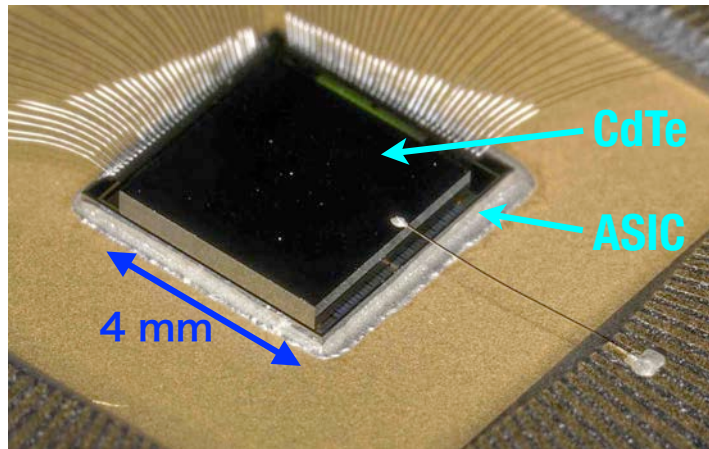
- **デジタル閾値機能**



佐藤、池田他 (2011)

# ピクセル検出器の技術 (ピクセル電極/ASIC/バンプ接合)

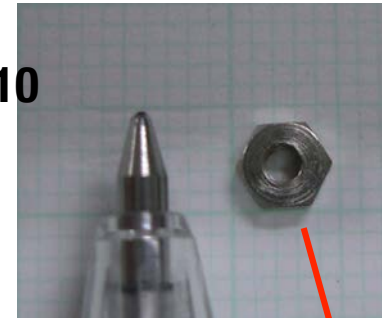
・セルフトリガの機能が必要



A hybrid  
CdTe/ASIC  
270  $\mu\text{m}$  pixels  
144 ch (Al/CdTe/Pt)

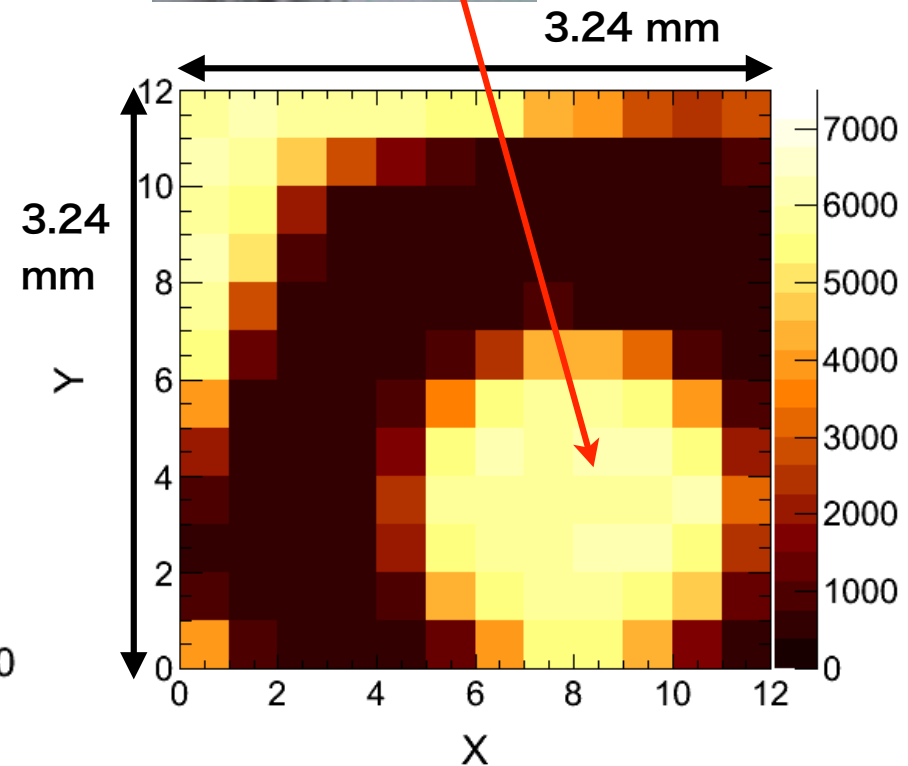
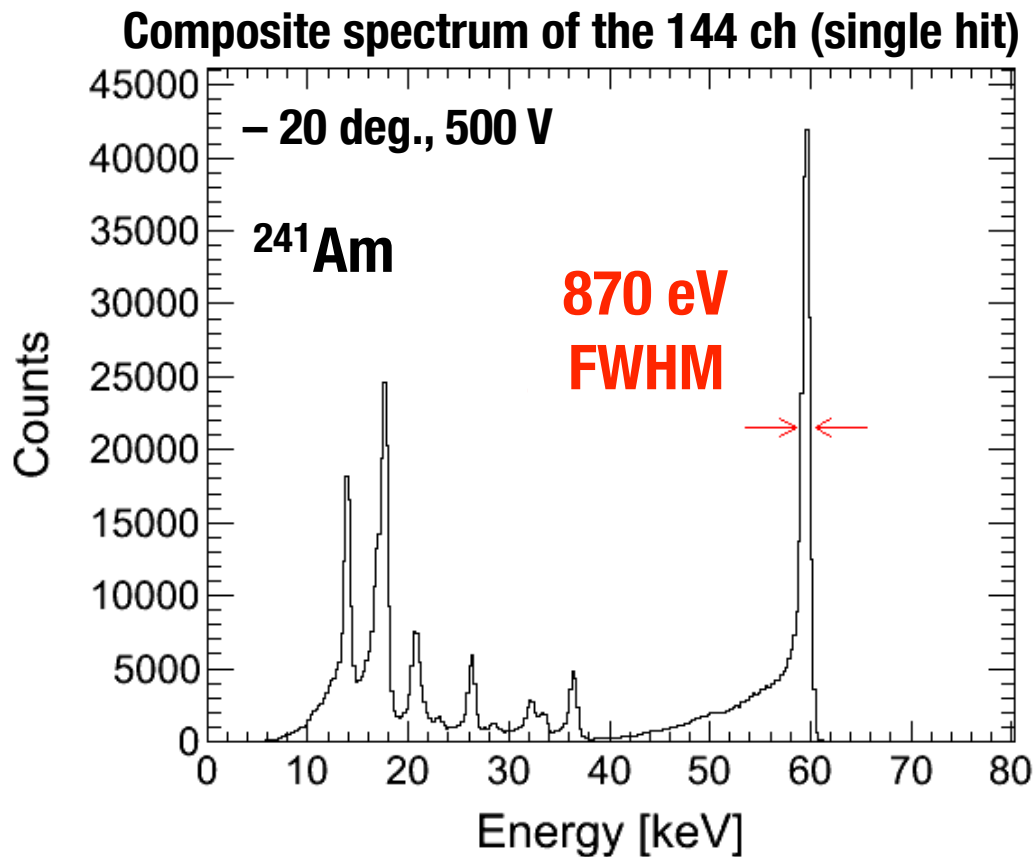
Sato et al. 2010  
IEEE TNS

Mean noise level  
<50  $e^-$  @ 0 pF



Nut  
 $\Phi$  2 mm

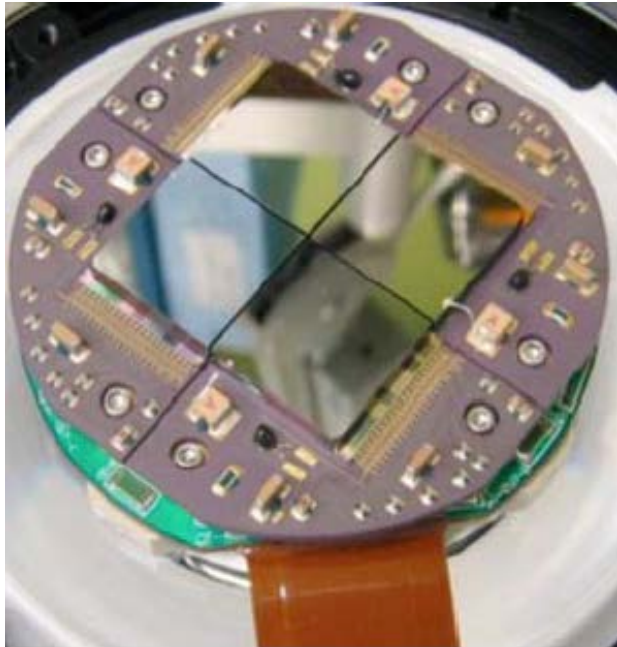
59.5 keV  
shadow image



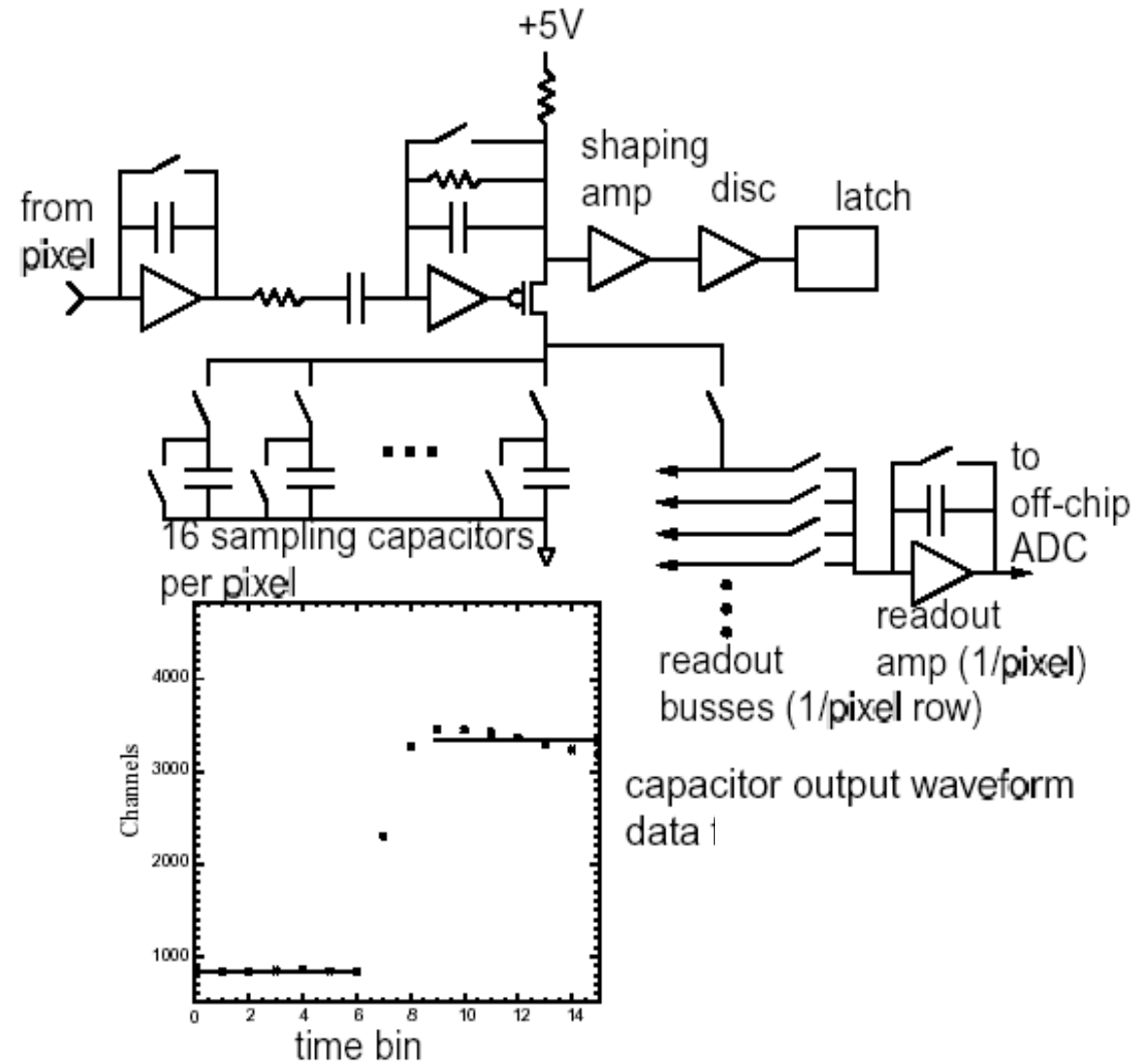
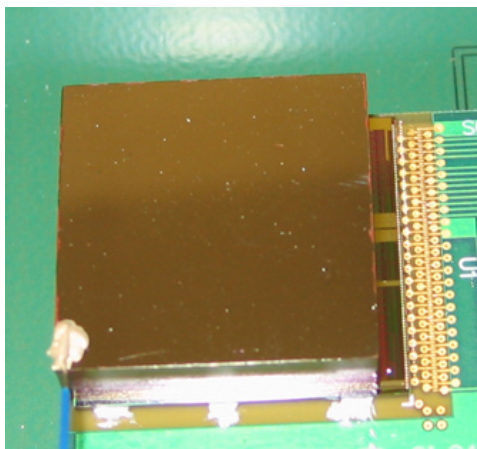


# CdZnTe Imager with Spectroscopic Capability for NuSTAR Satellite

NDIP08

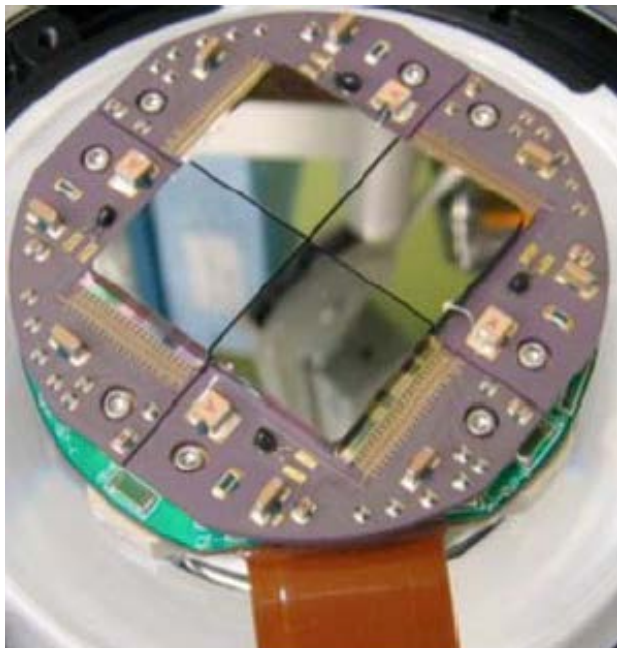


32 x 32 array, 0.6 mm pitch  
2 mm thick CdZnTe



# CdZnTe Imager with Spectroscopic Capability for NuSTAR Satellite

NDIP08



32 x 32 array, 0.6 mm pitch  
2 mm thick CdZnTe

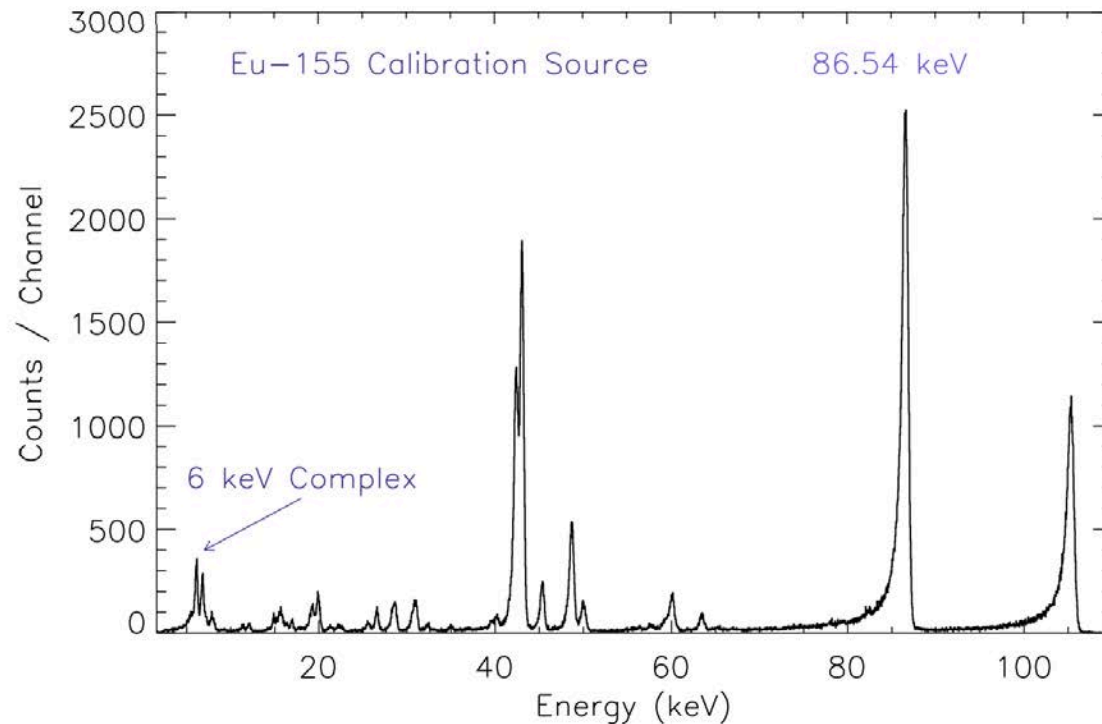
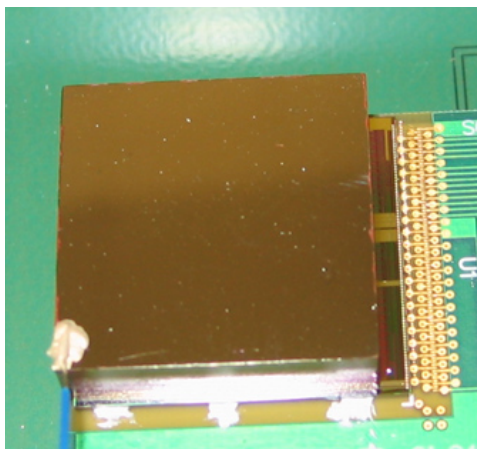


TABLE 4  
FOCAL PLANE PARAMETERS.

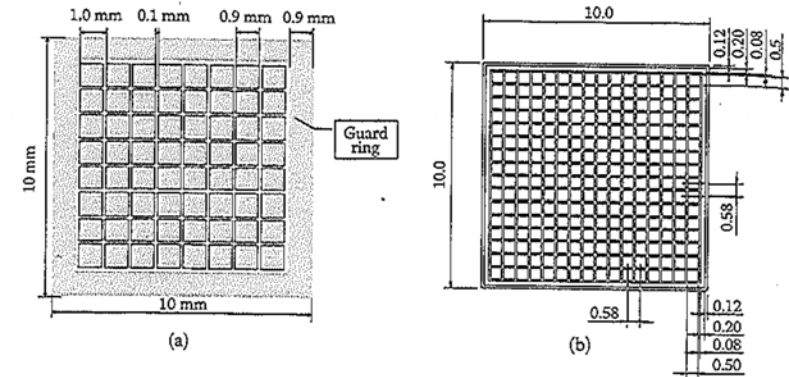
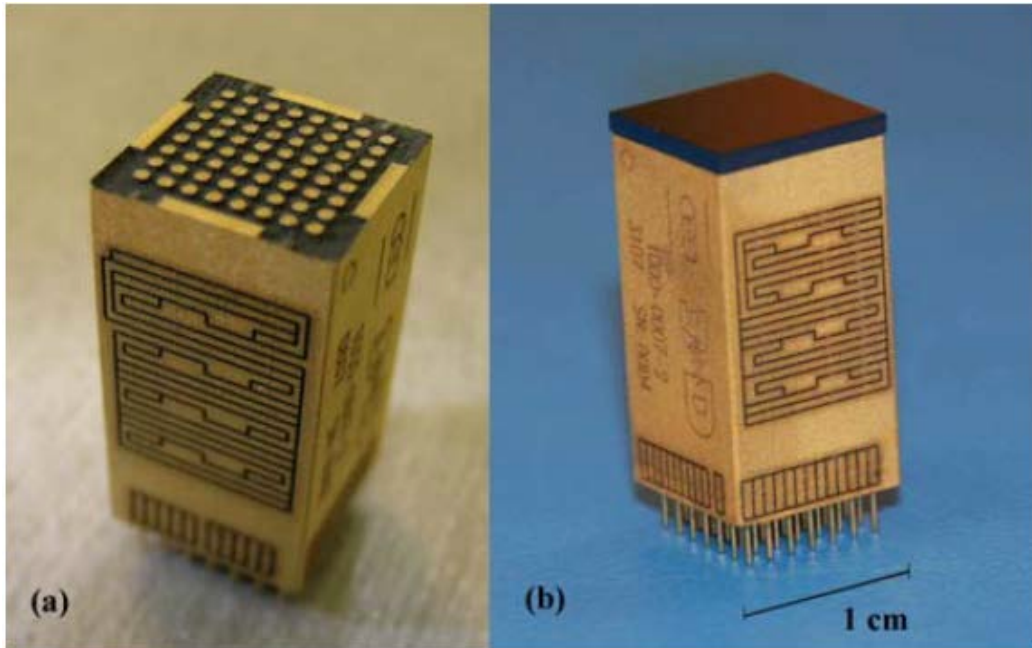
Focal Plane Parameter	Value	Focal Plane Parameter	Value
Pixel size	0.6 mm/12.3''	Max. processing rate	400 evt s <sup>-1</sup> module <sup>-1</sup>
Focal plane size	12' × 12'	Max. flux meas. rate	10 <sup>4</sup> cts s <sup>-1</sup>
Hybrid format	32 pix × 32 pix	Time resolution (relative)	2 μs
Energy threshold	2 keV	Dead time fraction (@ threshold)	5%

Harrison et al. 2013

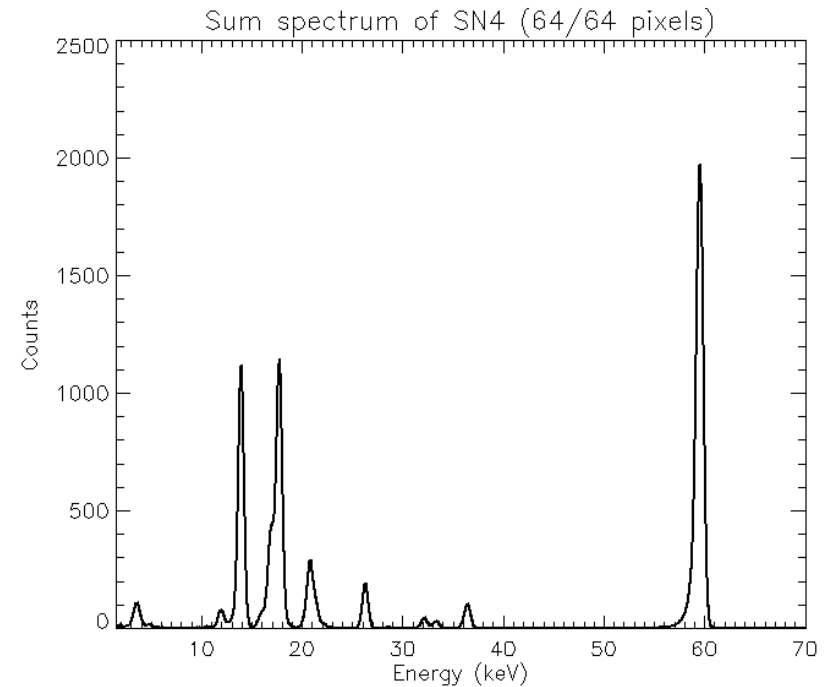
T.Takahashi

# CdTe Imager with Spectroscopic Capability

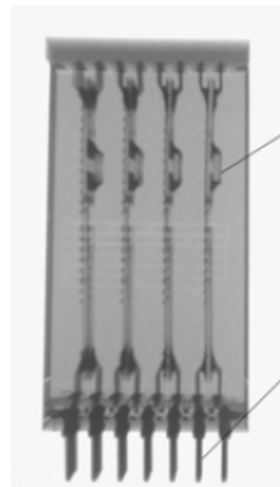
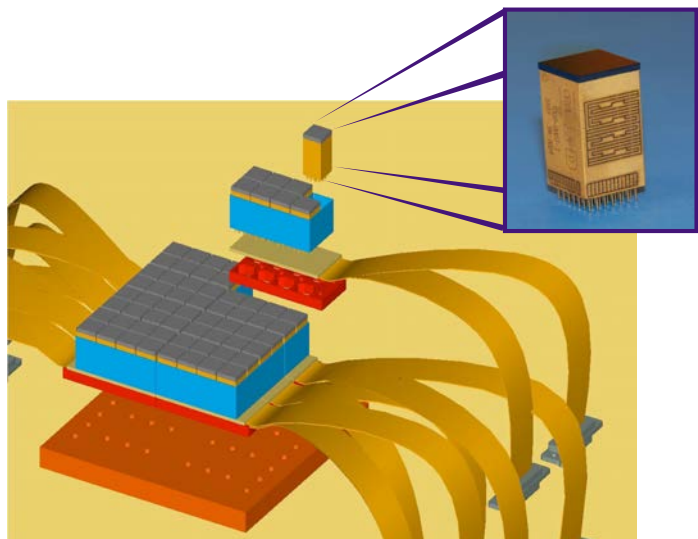
- Caliste64 (Caliste256)
- 1次元ピクセルを3次元実装



$^{241}\text{Am}$  spectrum at  $-10^\circ\text{C}$ , 500V with the single events of the 64 pixels



**0.66 keV fwhm @ 13.94 keV**  
**0.84 keV fwhm @ 59.54 keV**



Meuris, et al. 2008

# MEDPIX2 : PhotoCounting LSI from CERN

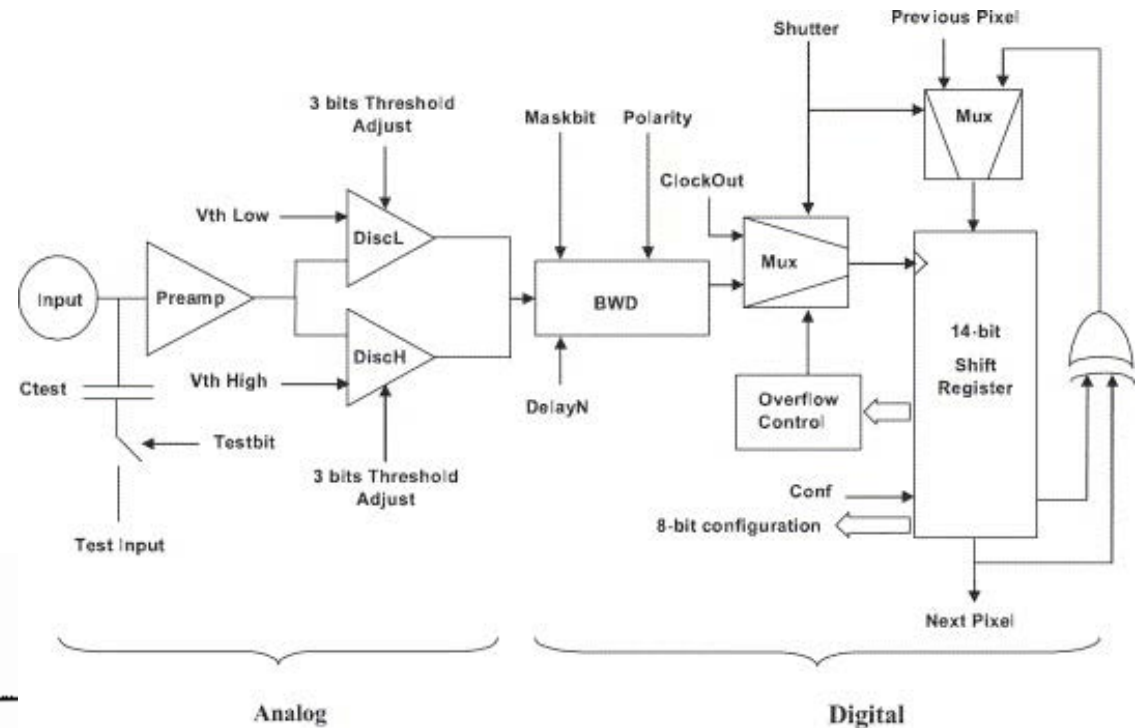
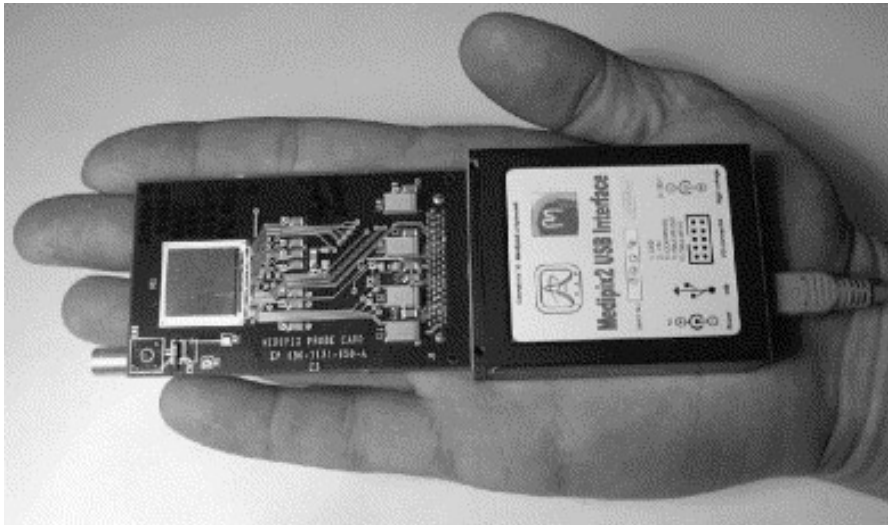


TABLE 10.1

## Medipix2 Family Parameters

Pixel size	$55 \times 55 \mu\text{m}$
Pixels per ROC	$256 \times 256$
ROC size	$16.12 \mu\text{m} \times 14.11 \text{ mm}$
Technology	0.25- $\mu\text{m}$ CMOS
Counter depth	14 bit
Threshold	Lower and upper level (MXR20)
Threshold adjust	3-bit DAC per pixel (+1 global $V_{th}$ )
Readout clock	200 MHz
Quad (2 × 2) module area	$512 \times 512 = 262,144$ pixels
Maxipix (5 × 1) module area	$1,280 \times 256 = 327,680$ pixels
Sensor	Silicon, GaAs, Cd(Zn)Te

55ミクロン角のピクセル

256x256 pixels

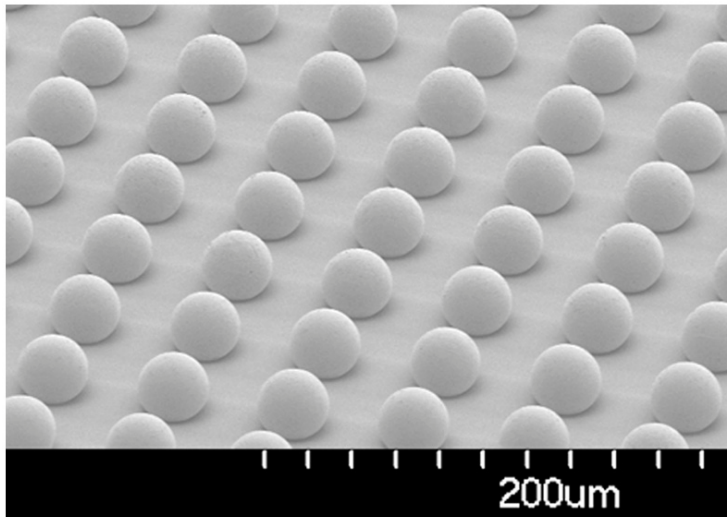
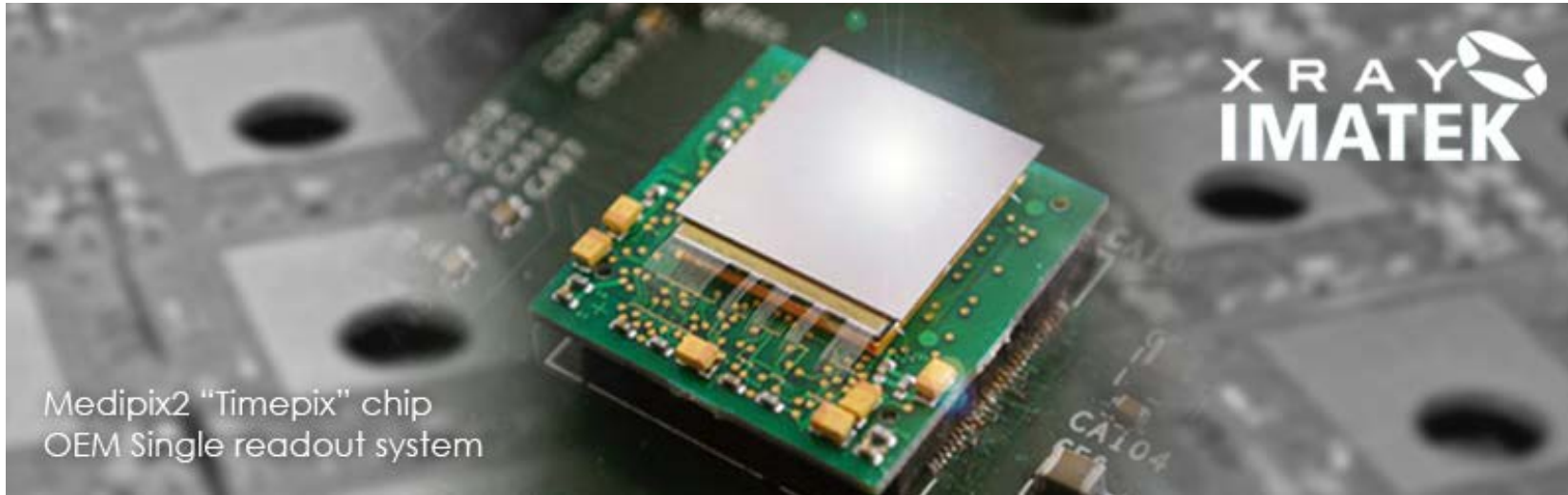
Readout 5 ms-300 microsec

minimum detectable charge  $900e^-$

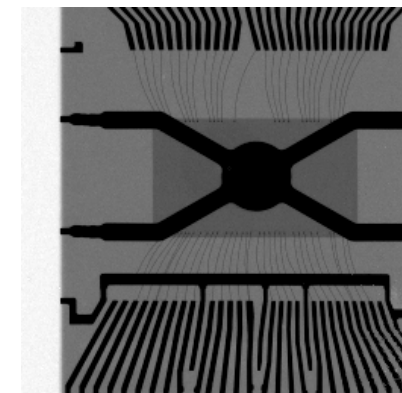
数百kRad

Lipart et al.

# Imatek (Medpix2を用いたCdTeセンサーの例)



Bumps on the readout side



# Medpix2を用いたSi+CdTeセンサーの例 (Vykydal etal. 2011)

Siを一層目に、CdTeを二層目に配置した  
複合型の検出器

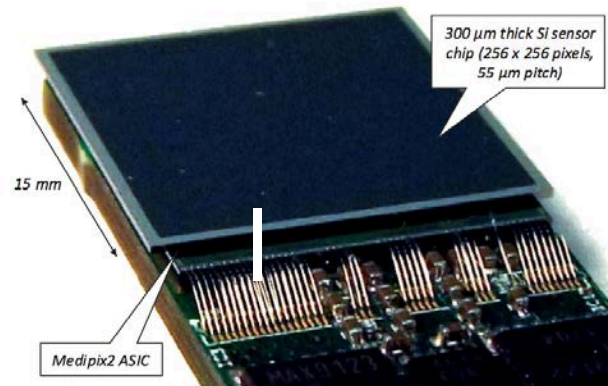


Fig. 1. Detail of the Medipix2 detector assembly with a 300 μm thick Si sensor chip.

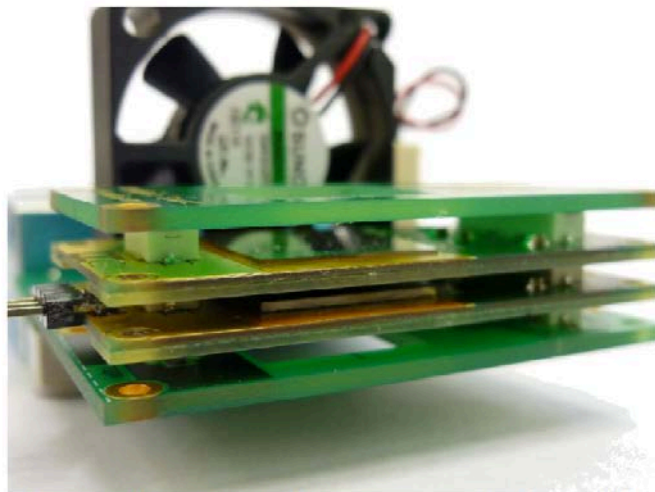
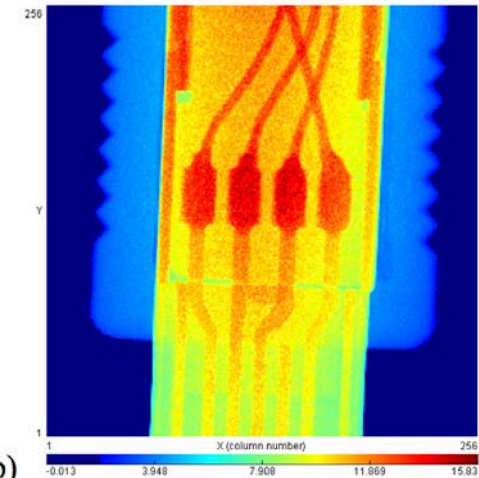


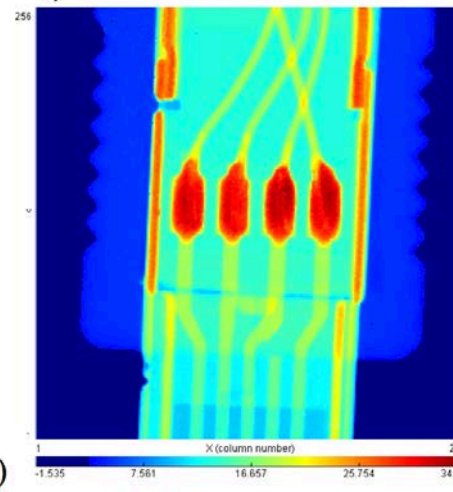
Fig. 3. Detail of the multilayer chip carrier board. Medipix2 chip with the 0.3 mm thick Si sensor is on the top layer and Medipix2 chip with the 1 mm thick CdTe sensor is on the second layer.



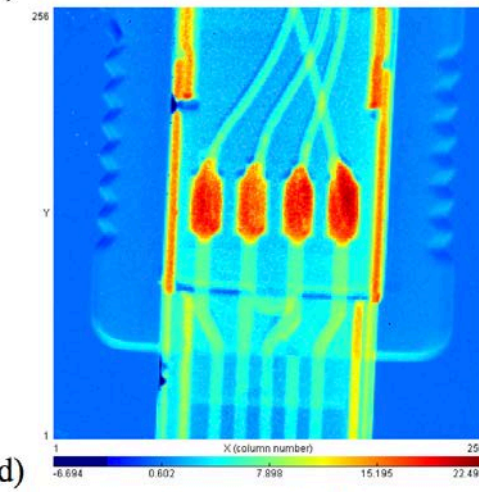
a)



b)



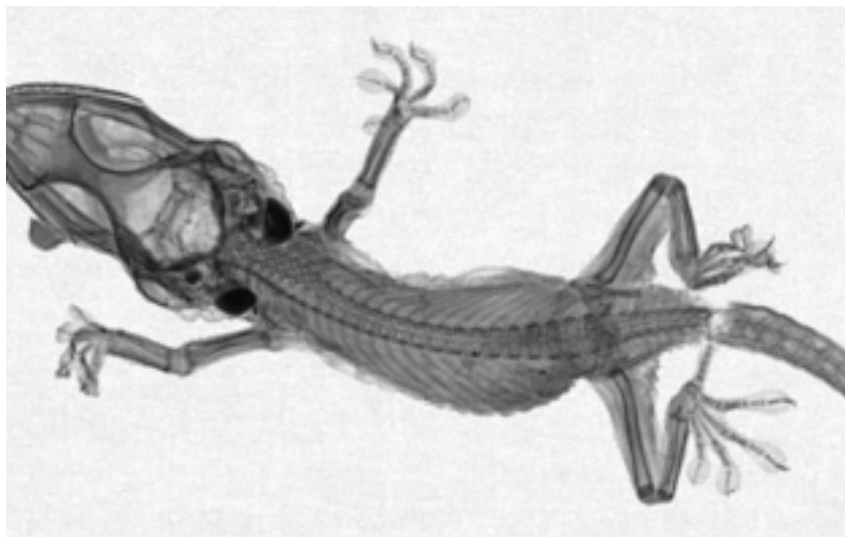
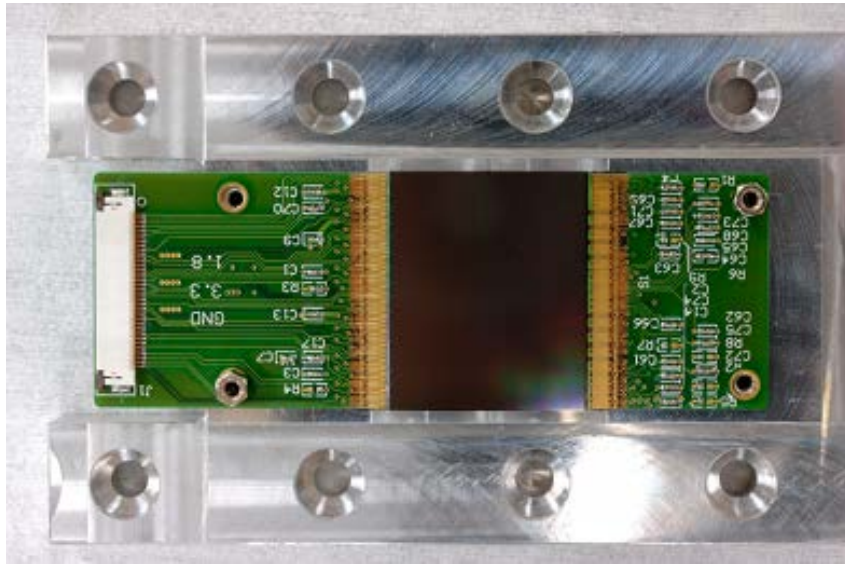
c)



d)

Fig. 6. USB mini connector sample object: a) photograph, b) image from the Si sensor layer, c) image from the CdTe sensor layer, d) subtraction of the CdTe - Si layer image (information about material difference).

イタリアのINFNのグループが立ち上げたPixirad



<b>Sensor specs:</b>	CdTe, 650 $\mu\text{m}$ , 30.9 $\times$ 25.0 $\text{mm}^2$ Schottky type diode Electron collection at pixel
ASIC+CdTe base block	512 $\times$ 476 pixels
Number of blocks	1
Global active area	31 $\times$ 25 $\text{mm}^2$
Total number of pixels	243712
Total number of counters	487424
Pixel size	60 $\mu\text{m}$ hexagonal arrangement
Pixel density	323 pixels/ $\text{mm}^2$ , equivalent to 55 $\mu\text{m}$ on square arrangement
Pixel rate capability	10 <sup>6</sup> counts/pixel/s (after dead-time correction)
Global rate capability	2.4 $\times$ 10 <sup>11</sup> counts/s
Pixel dead-time	300 ns
Position resolution	11 line pairs/mm at MTF 50%
Reading while taking data	possible
Energy range	1-100 keV
Detection efficiency @10 keV, 25 keV, 50 keV	100%, 100%, 98%
Counters depth	15 bits
Read-out time @50 MHz clock	5 ms/counter
Frame rate	200 readouts/s
Minimum applicable global threshold	200 electrons
Sensor bias voltage	200 $\div$ 400 V
Leakage current density	5 nA / $\text{cm}^2$ at 400 V, -20 $^{\circ}\text{C}$
Typical number of defective pixels	less than 1%
Number of independent thresholds (colors)	2 set of two (swappable in real time)
<b>Camera specs:</b>	
Size (W $\times$ L $\times$ H)	14 $\times$ 14 $\times$ 7 $\text{cm}^3$
Weight	< 2Kg
Power consumption	60 Watts (typical)
Cooling	liquid or forced air
Operating temperature	+40 -40 $^{\circ}\text{C}$

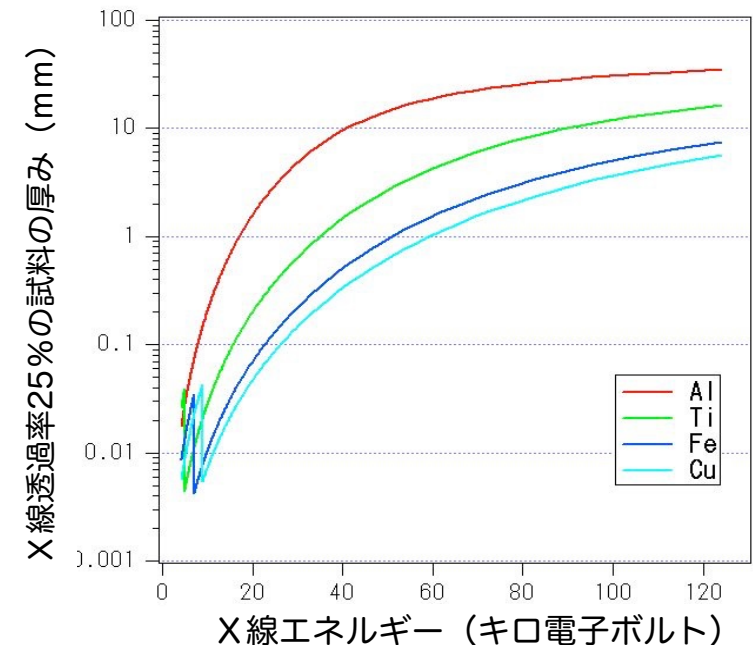
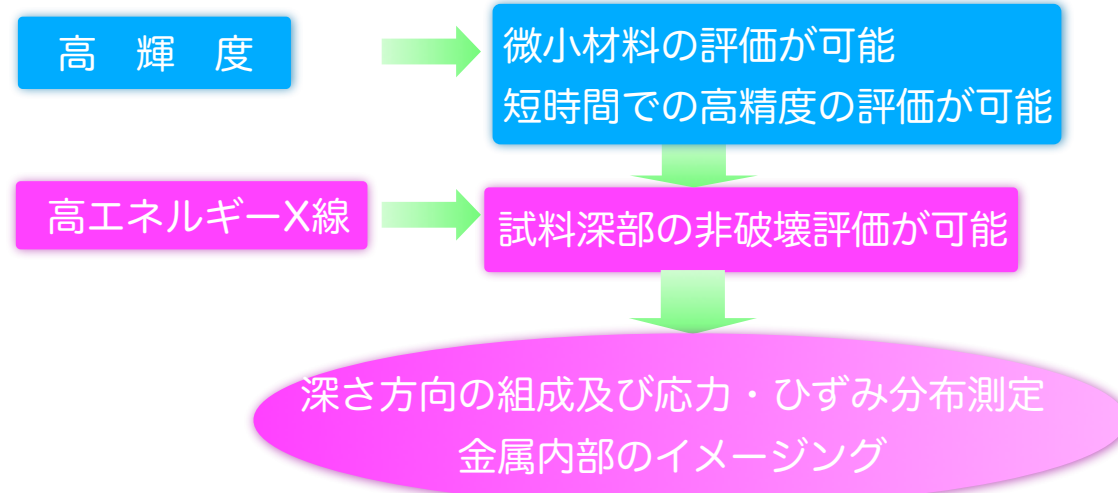
# SPring-8での高エネルギー放射光実験への展開



大型放射光施設 (SPring-8など) の大きな特徴は100キロ電子ボルト以上までの高エネルギーX線が利用できる点。SPring-8は蓄積電子エネルギーが20~30億電子ボルトの中規模放射光施設 (10キロ電子ボルト程度までの低エネルギーX線の利用が主) が世界中で建設され稼動し始めている現在、80億電子ボルトと現在でも世界一。今後、**高エネルギーX線の利用技術開発が大型放射光施設での重要課題。**

1 mm厚の鉄で25%透過させるには50keV以上の高エネルギーX線 (硬X線) が必要。シリコンでは透明。CdTeのような高い効率を持つ半導体検出器が必須。

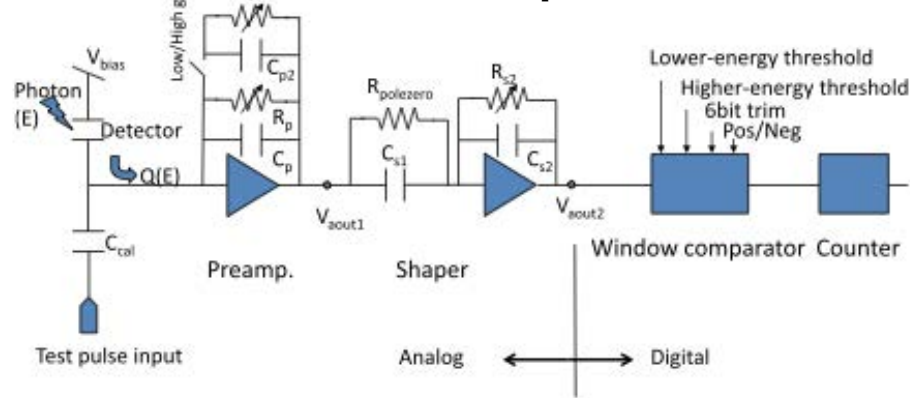
CdTe 2次元撮像検出器を、SPring-8の特徴である高輝度・高エネルギー放射光実験に応用 (豊川他+ISAS/JAXA)



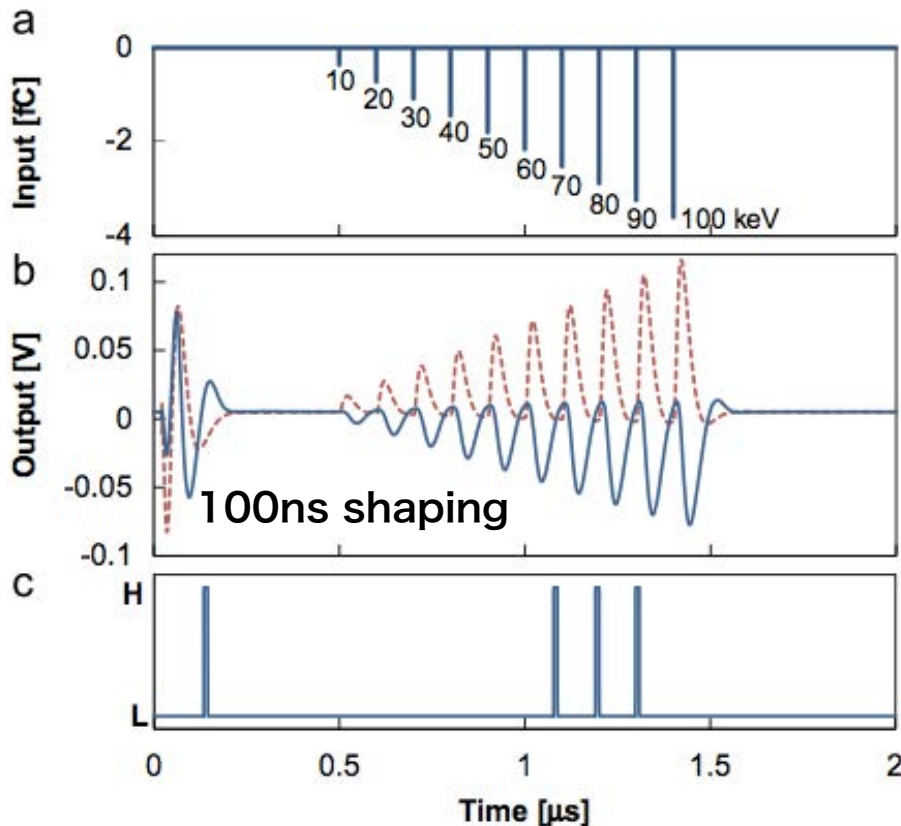


For SPring-8

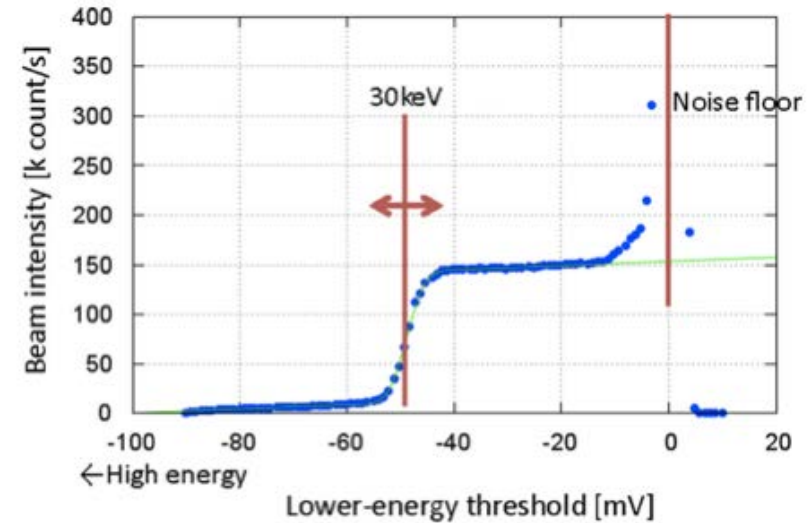
(シンクロトロン放射光) Experiment



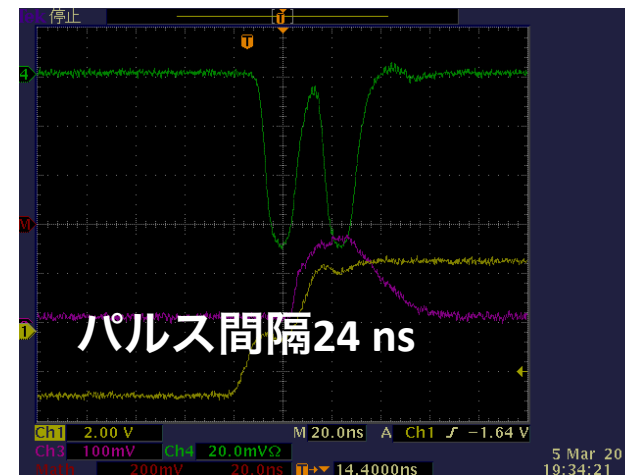
(Hirono, Toyokawa et al. 2010)



Goal:  $3 \times 10^9$  photons/s/mm<sup>2</sup>  
 $10^7$  photons/s/pixel (15-100 keV)



For Beam Monitoring

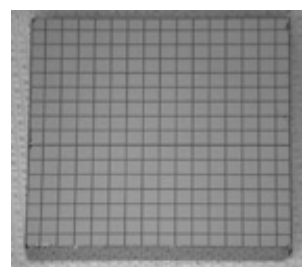
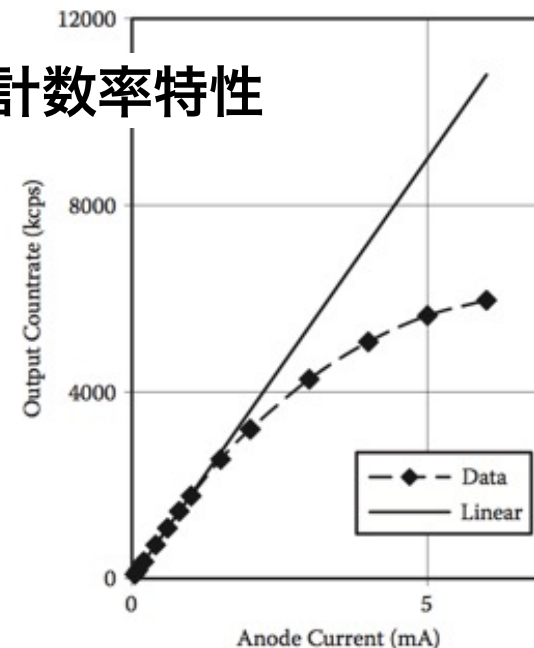


# 高速カウンティングに必要な技術 (半導体/ASIC/データ処理)

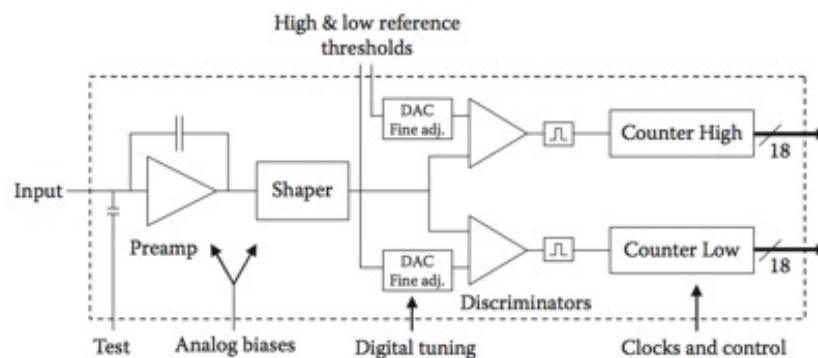
高い計数率 > 10 Mcnts/s/mm<sup>2</sup>  
 広いビーム面積 (スポット照射ではない)  
 スペクトル分解能の要求は必ずしも高くない (?)  
 均一な応答 (感度が一定) が必要。

Jan S. Iwanczyk et al. (2010)

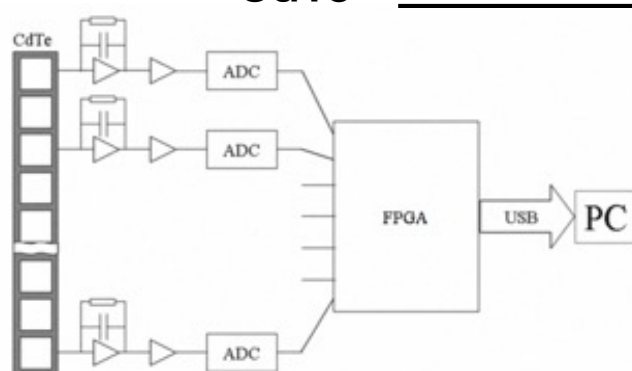
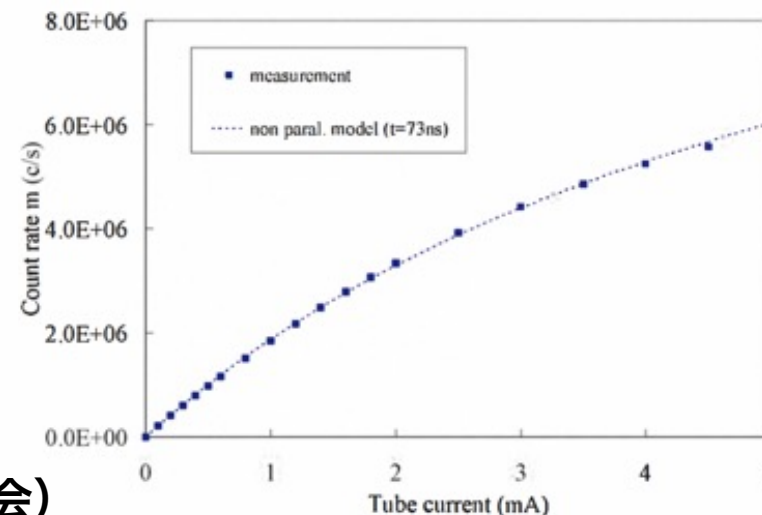
計数率特性



CdTe



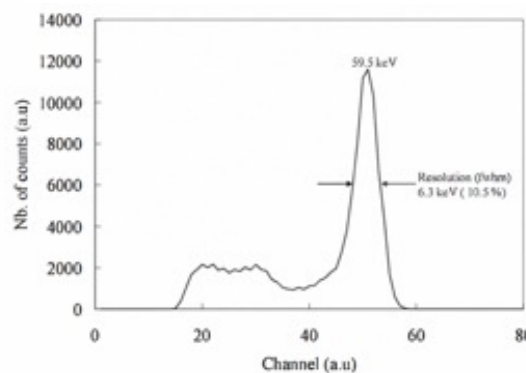
計数率特性 \ Brmbilla et al. (2011)



CdTe

100MHz ADC

波形サンプリング



(also see 東郷他 本学会)

# CdTe/CdZnTeピクセル検出器の課題

## スペクトロスコピーの課題

数100ミクロンから数mmのCdTe/CdZnTeピクセルの開発が急ピッチで進んでいる

- 1) 大面積 (半導体&ASIC & バンプ)
- 2) 半導体物性
- 3) 高精度化 (数10ミクロン)
- 4) 高速カウンティング (半導体物性+ASIC)

## 高速カウンティングの課題

高計数率に対応した半導体技術開発が急ピッチで進んでいる。

高い計数率を得るための課題は

チャージの不純物準位へのトラップ

高速ASIC

検出器応答の理解

フォトンカウントの過小評価/過大評価を避ける

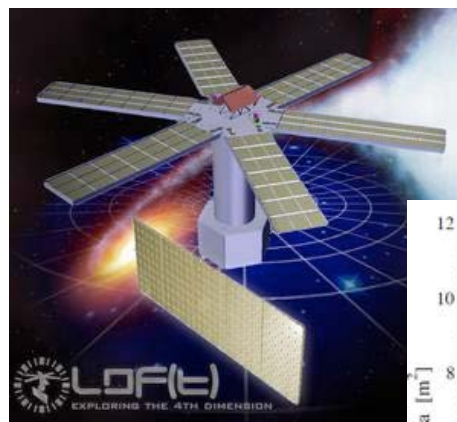
特に、複数のピクセルがヒットする場合の取り扱いが課題

1. チャージのシェアリング
2. 重み付きポテンシャルによるクロストーク  
(Small Pixel 効果).
3. 偶然に重なったイベント (パイルアップ)
4. キャリアの消失の場合の「誘導電荷の消失」

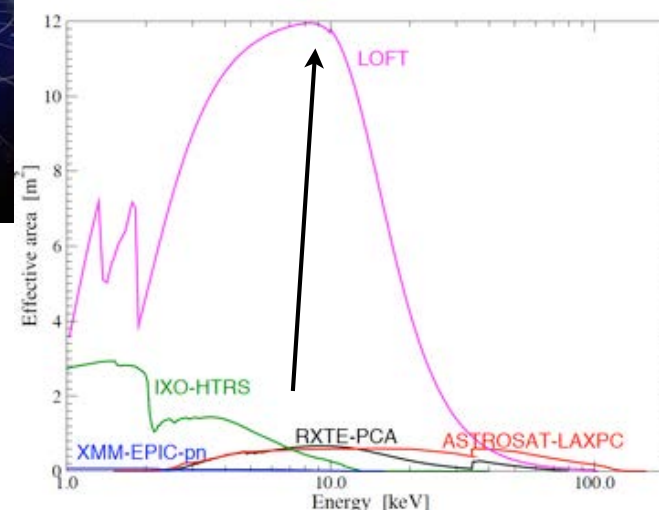
# まとめ

将来衛星に向けた開発:

中性子星などからの「バースト」を精度よく観測し、スペクトル中の特徴をとらえるためには、新しい装置が必要（高計数率の中で、スペクトルを精度よく求める検出器）



将来の観測 ( $10m^2$ )



課題を解決するために

テルル化カドミウム(CdTe)半導体技術

CdTe撮像検出器

低雑音シリコン(Si)撮像検出器

多チャンネル低雑音アナログ信号処理LSI(ASIC)

高密度実装技術

宇宙科学のセンサー技術

連携

素粒子

シンクロトロン

医療

センサー技術

TABLE I  
PROPERTIES OF THE SEMICONDUCTORS

semi-conductor	density [g/cm <sup>3</sup> ]	Z	$E_{\text{gap}}$ [eV]	$\epsilon$ [eV]	$X_0$ [cm]
Si	2.33	14	1.12	3.6	9.37
Ge	5.33	32	0.67	2.9	2.30
CdTe	5.85	48,52	1.44	4.43	1.52
CdZnTe	5.81		1.6	4.6	
HgI <sub>2</sub>	6.40	80,53	2.13	4.2	1.16
GaAs	5.32	31, 33	1.42	4.3	2.29

$E_{\text{gap}}$  : band gap energy  
 $\epsilon$  : an ionization potential  
 $X_0$  : radiation length