

CdTeピクセル検出器 とその周辺技術

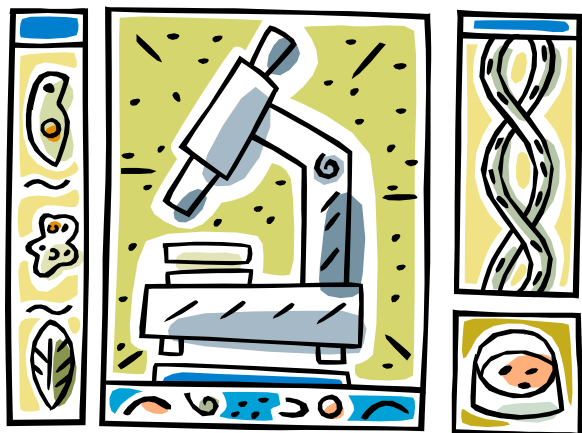
高橋忠幸

JAXA 宇宙科学研究本部 (ISAS)

ガンマ線イメージャー

キロ電子ボルト

ガンマ線で
細かな内部構造
を探る
～数百ミクロン



医療用
非破壊検査
放射性廃棄物検査
放射性物質探索（テロ対策）
（Homeland Security, US）
天体観測

メガ電子ボルト

ガンマ線望遠鏡

ガンマ線で
遠方のガンマ線
を探る

（数mm/数cm）

角度分解能

ピクセルサイズは、用途に
応じて100ミクロンから数mmまで



ACRORAD提供 The lightweight compact size of the camera allows for the capture of images from a variety of directions and positions.

CdTe/CdZnTe

ガンマ線を止める半導体

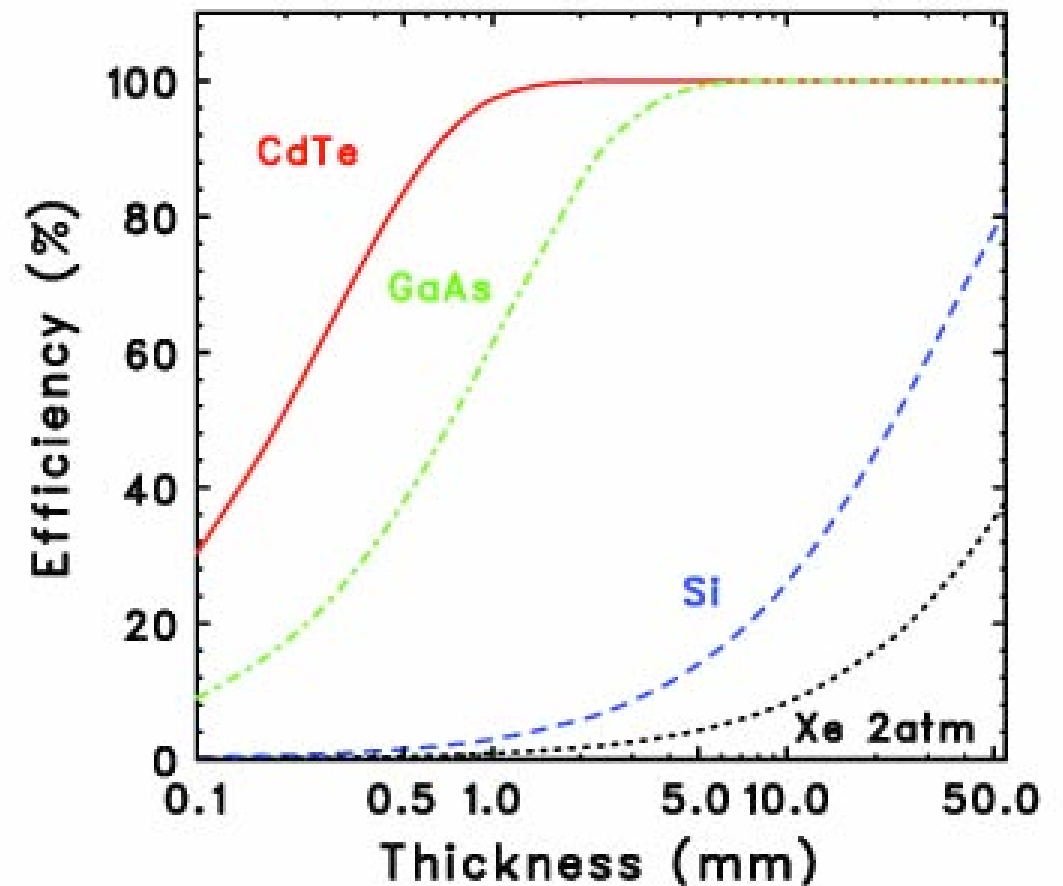
テルル化カドミウム／テルル化亜鉛カドミウム

PROPERTIES OF THE SEMICONDUCTORS

semi-conductor	density [g/cm ³]	Z	E_{gap} [eV]	ϵ [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 ₂	6.40	80,53	2.13	4.2	1.16
GaAs	5.32	31, 33	1.42	4.3	2.29

E_{gap} : band gap energy
 ϵ : an ionization potential
 X_0 : radiation length

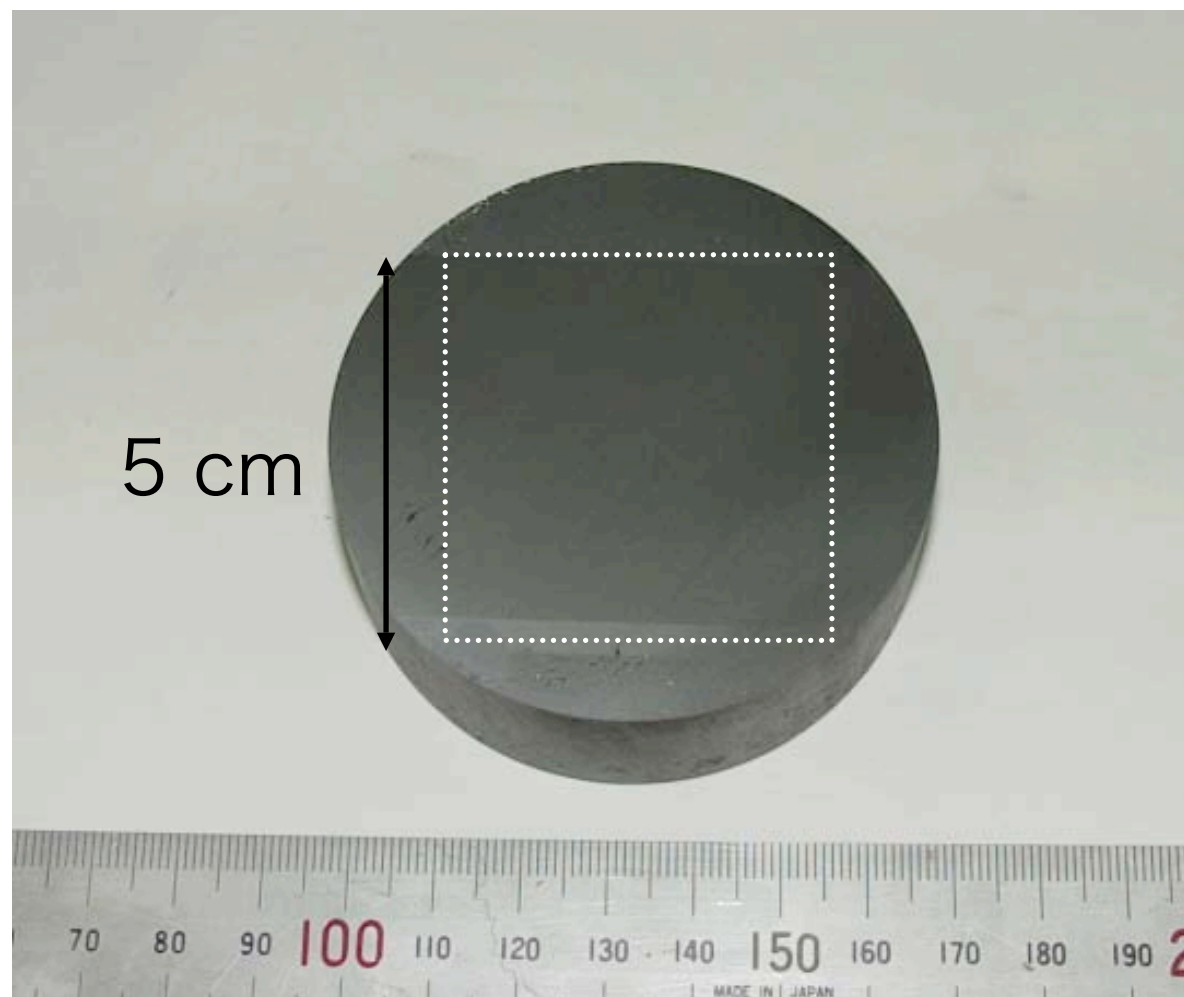
60keVのガンマ線に対する
吸収効率



CdTe/CdZnTe半導体

高橋、中澤
物理学会誌
2005年1月

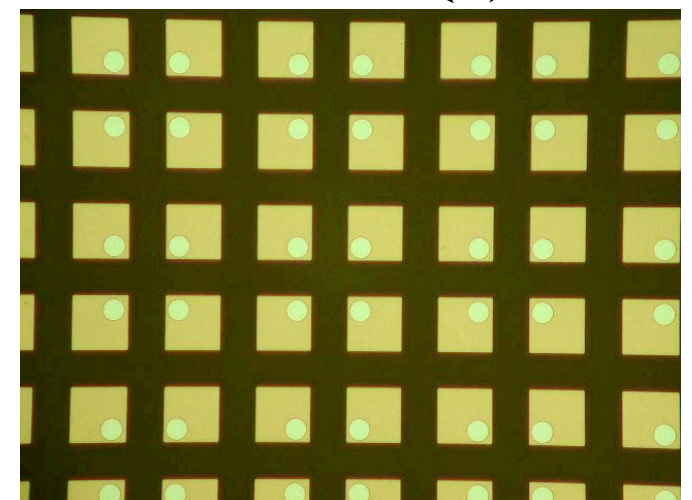
CdTe single crystal (ACRORAD)



- p型にもn型にもなる
- THM-CdTe (ACRORAD)では5cm角の単結晶Wafer可能（一様性、再現性がよい）（p型）
- HPB-CdZnTe (eV-Products)では大きなインゴットが得られるが1cm角以上の大きさの単結晶は難しい（比抵抗は高いが、一様性が悪い）（n型）
- 用途に応じた使い分けが必要

ピクセル電極の例

100マイクロン
↔

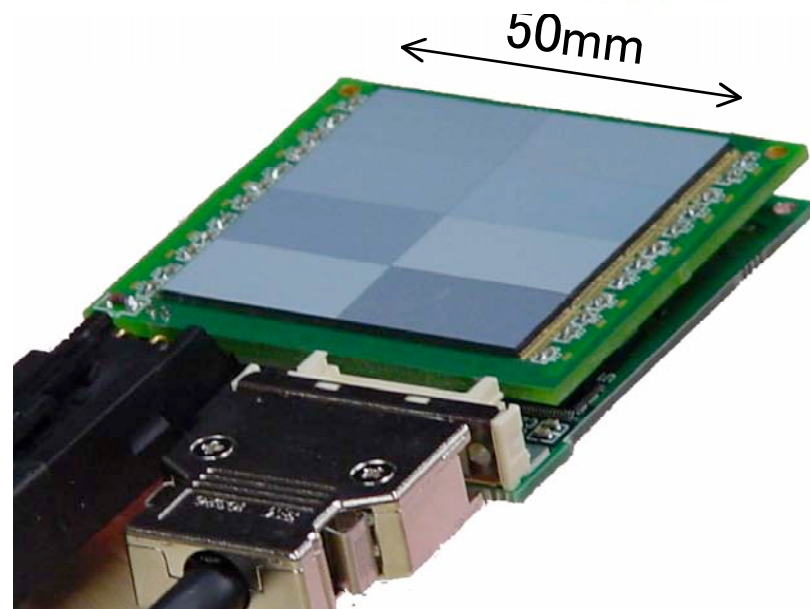


表面電極をつける技術も大切
電極素材（Pt、Auなど）
前処理、後処理

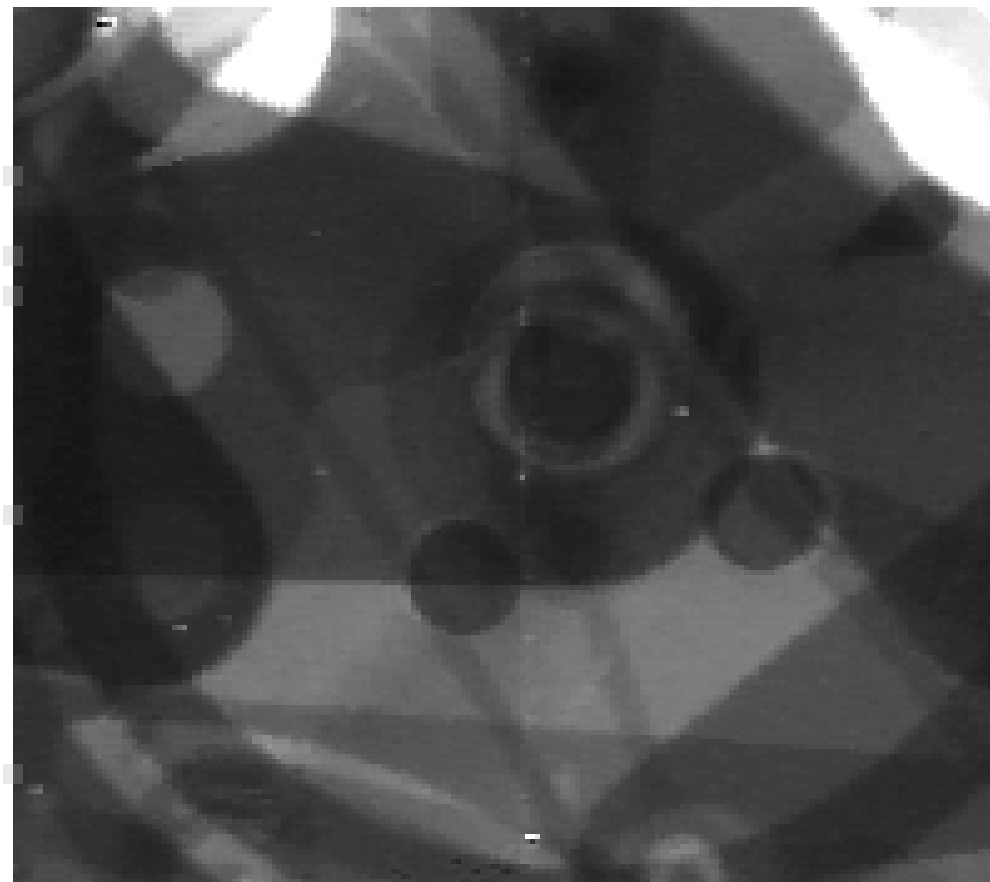
CdTe Imager



有効視野 50x50 mm
空間分解能 0.1 mm
フレーム 50 fr/秒



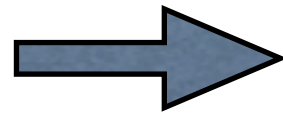
アクロアド提供



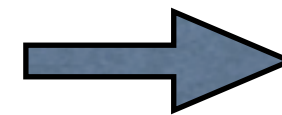
ただしスペクトル情報はない
このカラー版が求められている

高いエネルギー分解能を持つ CdTeダイオード検出器の開発 (宇宙研/ACRORAD)

- 薄型 (0.3-1.0 mm)
- ショットキーダイオード
(In/CdTe/Pt)
- ガードリング



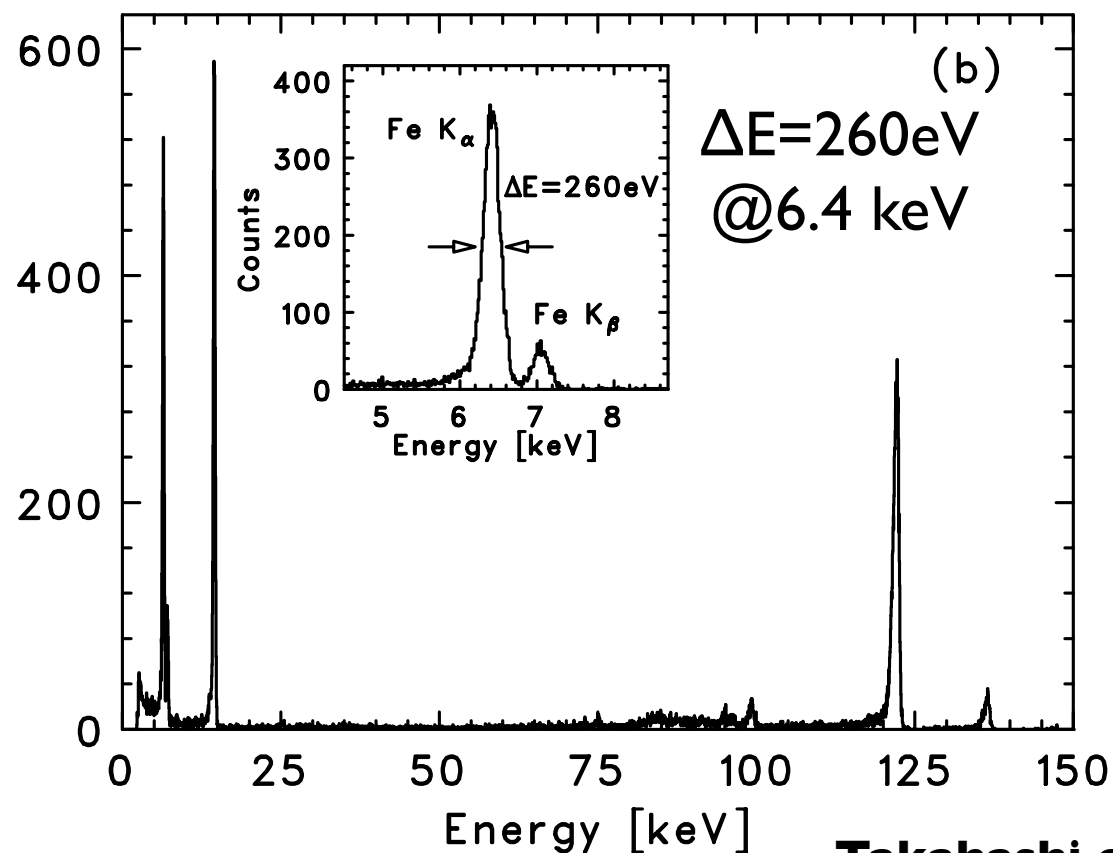
- 低いリーク電流
- 高いバイアス電圧



- 完全電荷収集
- 安定性

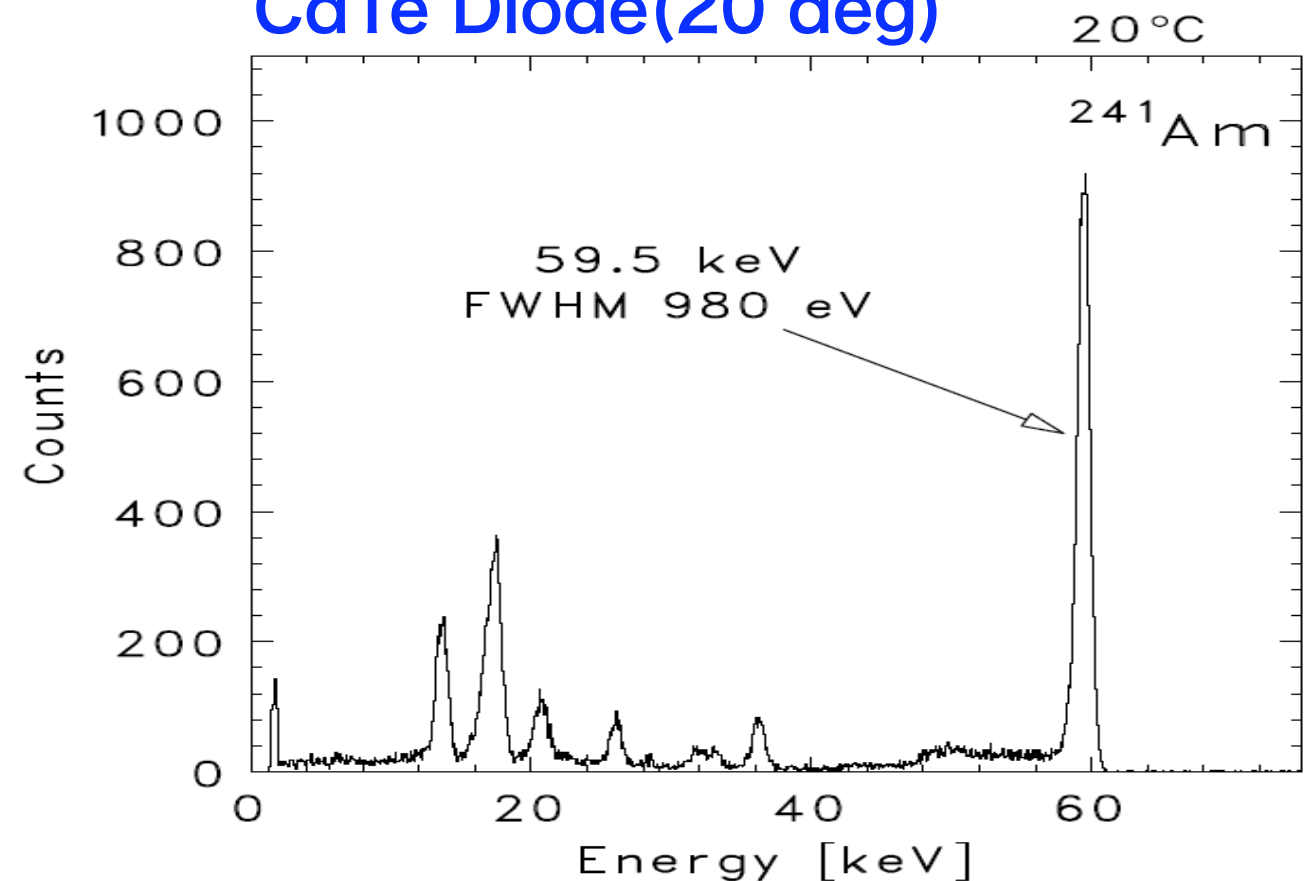
Amptek:ガンマ線プローブ等に採用

CdTe Diode(-40 deg.)



Takahashi et al. NIM A 2005

CdTe Diode(20 deg)



Tanaka et al. 2003

現在進めているプロジェクト

(www.astro.isas.jaxa.jp/~takahasi)

- すざく衛星による宇宙X線、ガンマ線観測
(硬X線検出器 - HXD -の開発：1993年から)
- 将来のX線・ガンマ線衛星のための検出器開発
 - 高いエネルギー分解能を持つ硬X線検出器とイメージャー
 - CdTe/CdZnTeを用いたピクセル検出器
 - シリコンストリップ検出器
(with 田島@SLAC, with 深沢@広大)
 - ガンマ線イメージャー
(Si/CdTe半導体コンプトンカメラ)
 - 組み込み型データ処理装置 (with 能町@阪大)
 - アナログLSI開発 (with 田島@SLAC, with 池田@ISAS)



HXD
one unit



産学連携プロジェクト (国内、合衆国、ヨーロッパへ技術移転)

CdTeガンマ線モジュール

医療、検査・探査装置

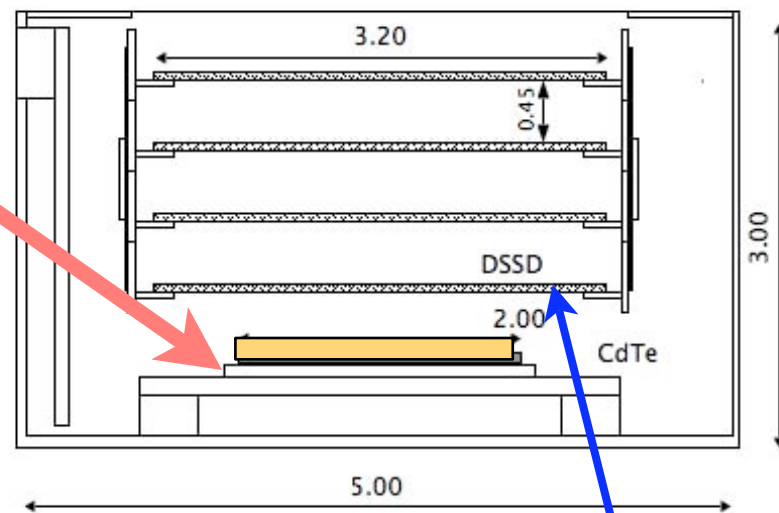
CdTeピクセル検出器

今、*NeXT*をめざして私たちが開発しているもの

2cm x 2cm から 3cm x 3cmの大きさのCdTe イメージャー

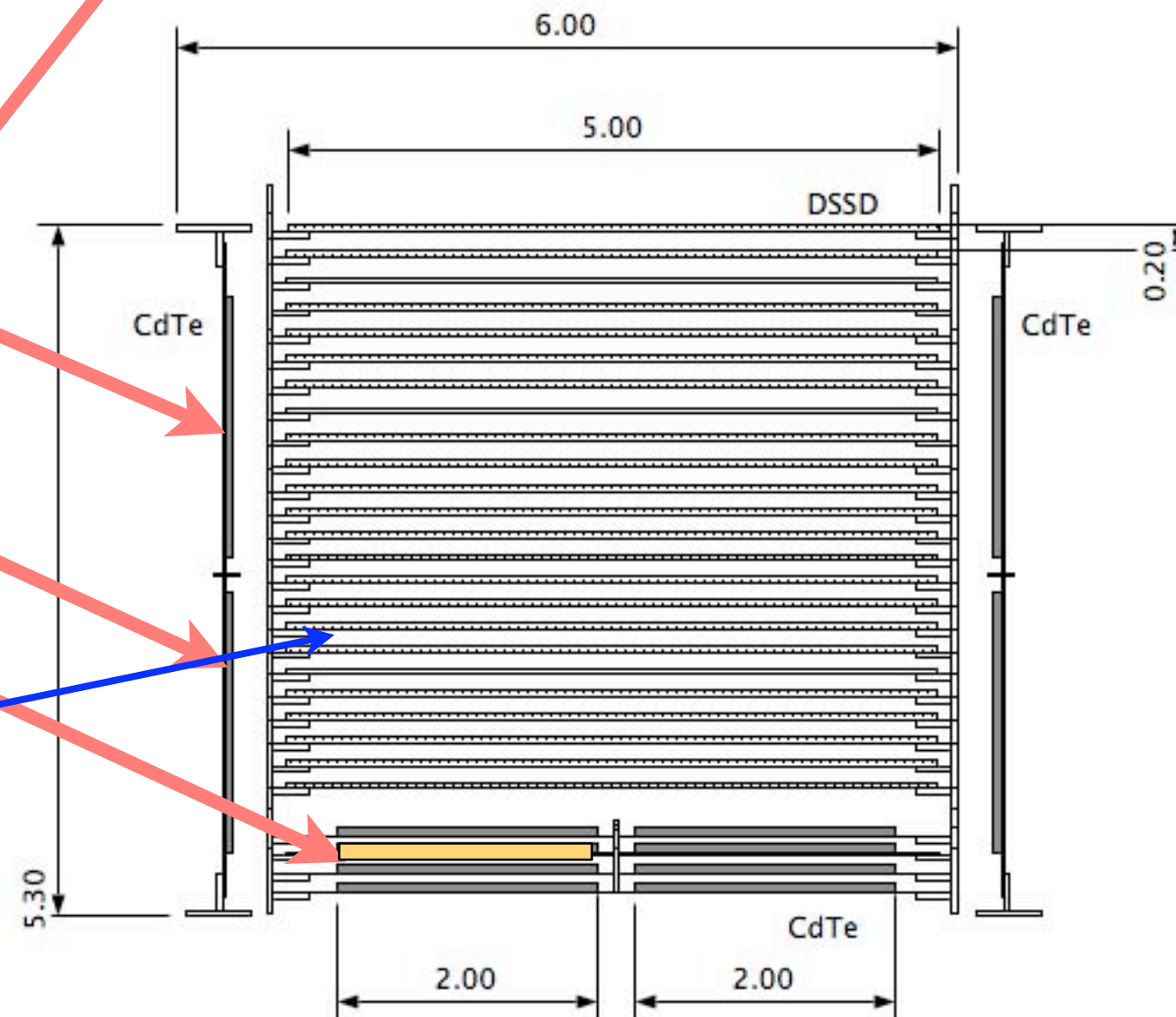
硬X線撮像検出器 (HXI)

(ピクセルサイズ 250-500 ミクロン角)



軟 γ 線撮像検出器 (SGD)

(ピクセルサイズ 1.5-2.0 mm)



宇宙は要求仕様が
高い上、壊れてはいけ
ないので、最初から
筋のよいやり方をしな
いといけない

Si/CdTe Compton Camera

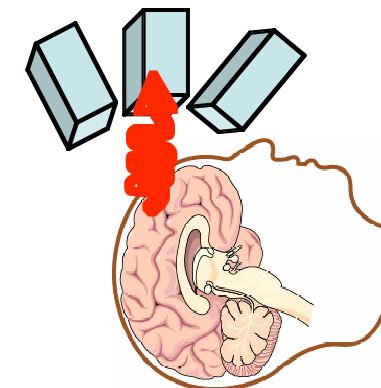
Takahashi et al. 2004

CdTeピクセル検出器

今、異分野から我々のチームが技術協力を求められているもの

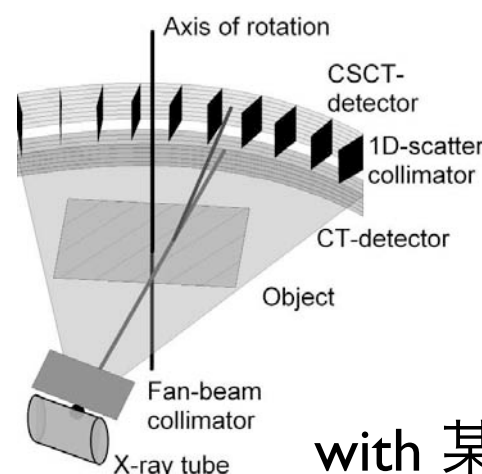
- ・ 150 keV程度まで、エネルギー分解能2keV以下、ピクセル分解能1.4 mm
- ・ 511 keVで、1%のエネルギー分解能、高効率、位置分解能は1-2 mm

医療



with 原子力機構 & 群馬大学

Energy Resolved Coherent Scatter CT



with 某海外メーカー

海外では

Homeland Securityの観点から、新しい検出器が求められている（核物質、放射性物質の違法所持、搬入の阻止）。

条件は：High Z, High Density, **High Energy Resolution**

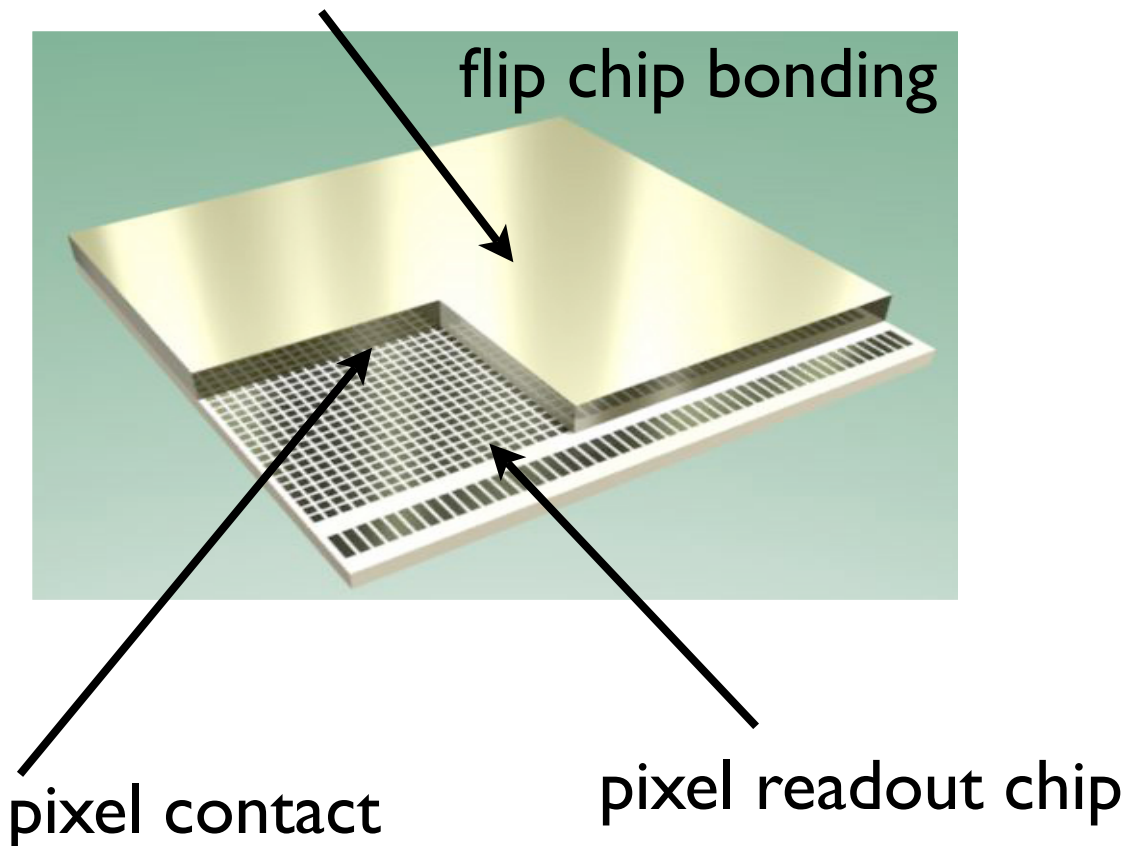
求む：これまでにない、性能の検出器を

（Department of Homeland Security, USA IEEE NS 2005基調講演から）

「核」となる検出器

ハイブリッド 픽セル検出器

semiconductor pixel
detector



必要となる技術

1. ガンマ線を止める半導体
(高品質のウェハー)
2. 半導体 픽セル化技術
3. 読み出し用アナログLSI
4. 実装技術
 - a) バンプ接合
 - b) フリップチップ技術
5. 読み出し、DAQ、RTOS
6. 大面積化
 - a) 大面積CdTeウェハー
 - b) バッタブルの技術
 - c) 大型ASIC、

Alternative

Detector substrates

- Si
- Diamond
- GaAs

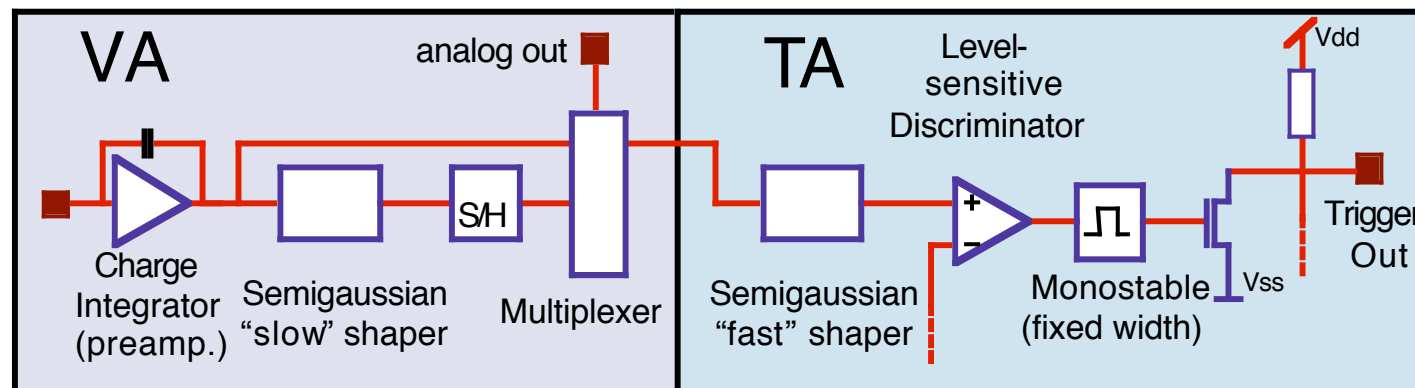
低雑音アナログVLSI

フォトンカウンティング型

- 1) ひとつひとつのフォトンを検出し、カウンタで数えて
イメージにする
 - 2) ひとつひとつのフォトンを検出し、リストモードで送り出し、
詳細な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、ガンマ線光子の検出を可能にする）
 - エネルギー情報を使えるので、ディスクリがかけられる
 - あるエネルギー範囲のみのイメージ、またカラー写真がとれる
 - ピクセルあたりのカウントレートは整形時定数によって制限される
（ $\tau = 1 \text{ microsec} \rightarrow \sim 100 \text{ kcnts/s/pixel}$ が最大）

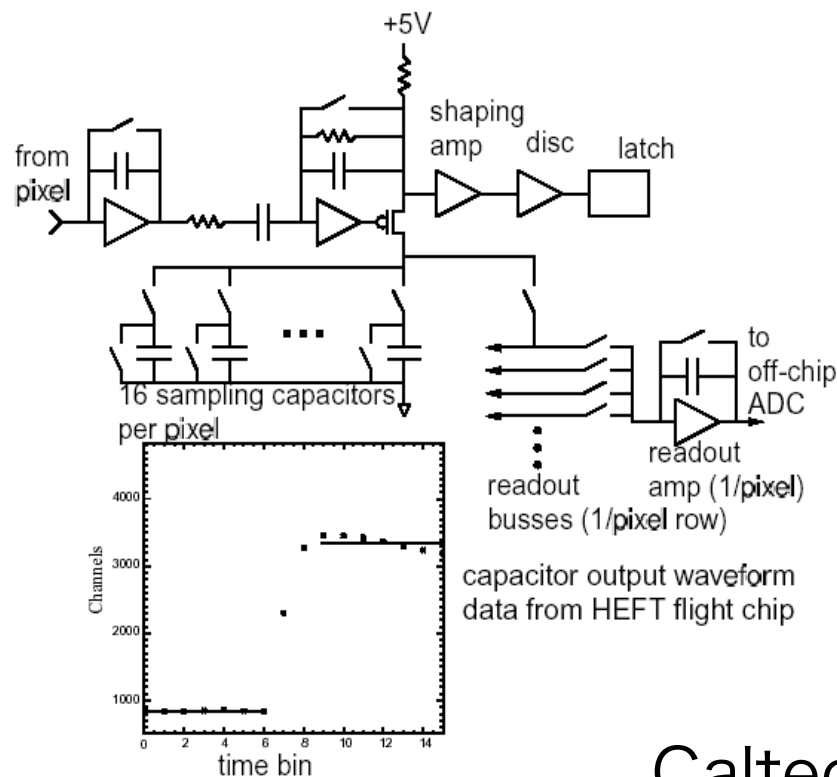
主なASICのアーキテクチャ

1. Fast-Shaper/Slow Shaper



VA/TA (IDEAS,宇宙研)
Medpix2 (Cern)
H02 (宇宙研)

2. Capacitor Array



Caltech

3. TOT

LBLと宇宙研の共同開発

HXI chip
(LBL/宇宙研)

Time Over Thresholdの

(ATLASの低雑音化)

(TOTで100 e⁻ は Challenging

結局、殆ど0から開発)

低電圧で、ダイナミックを稼げる

16x16完成、試験中

読み出し用アナログASICの開発

VDECにて

VLSI based on deep submicron CMOS Technology

- (a) Low Noise
(ENC ~ 50 e⁻ RMS at 0pF)
- (b) Low Power (~ 0.2 mW/pixel)
- (c) SelfTrigger Capability
- (d) Low Rate

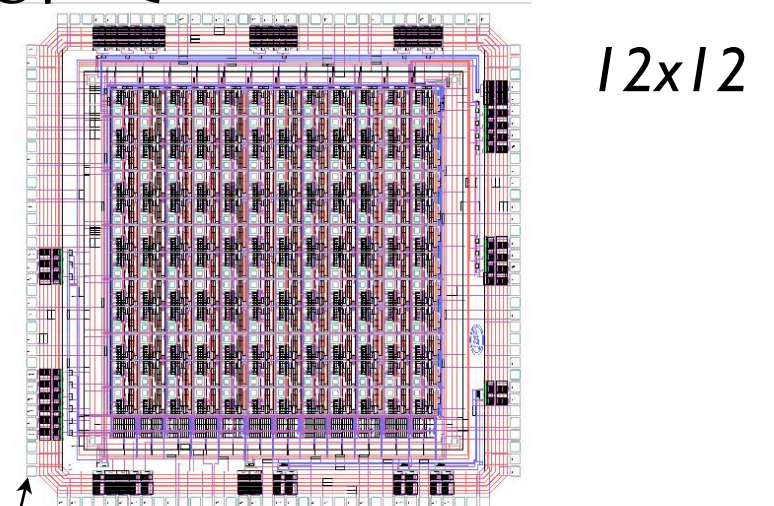
- 1. 低雑音化
- 2. 低消費電力
- 3. ピクセルへの対応

共同研究

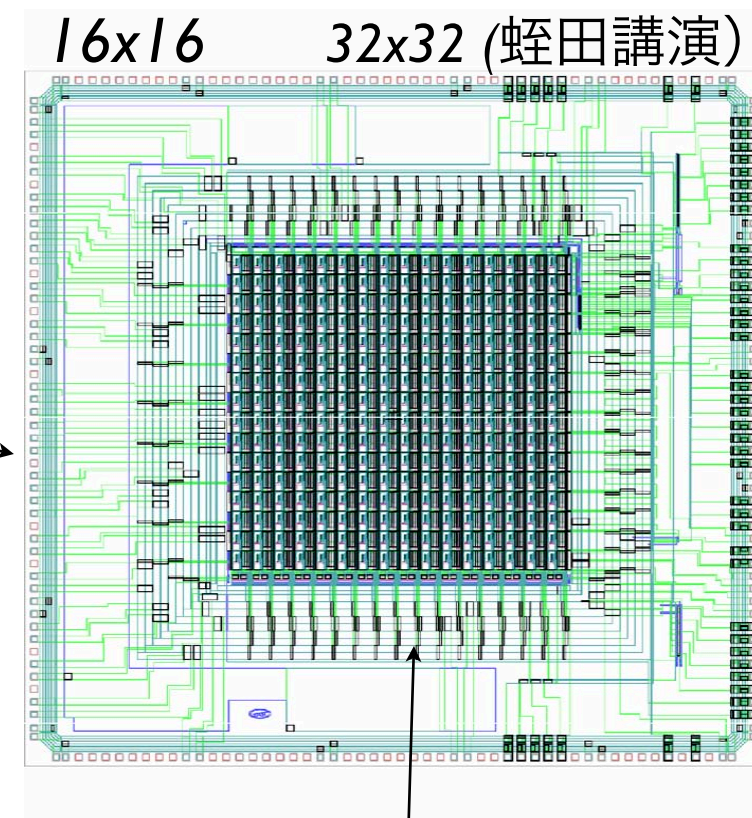
2000- IDEASと
2000- Bonn U.と
2003- LBNLと
2003 - Caltechと

2002- KEK (池田) と

2003-2004 経産省 Project
2004- JAXA Project



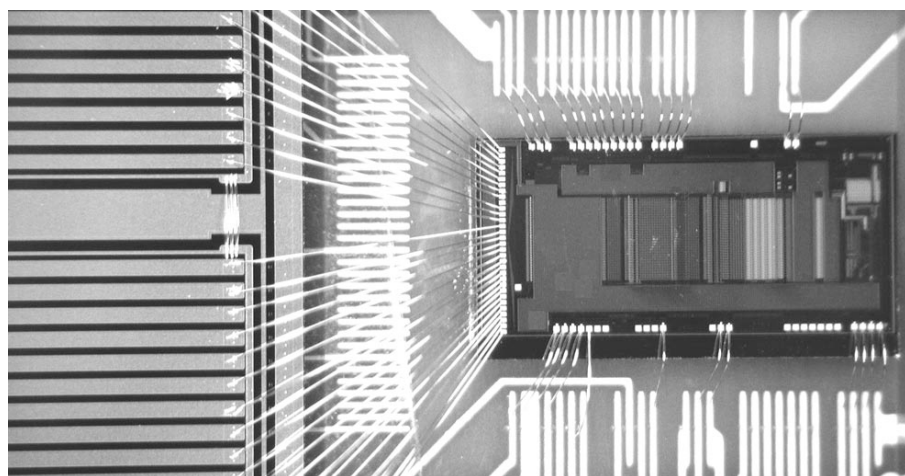
12x12



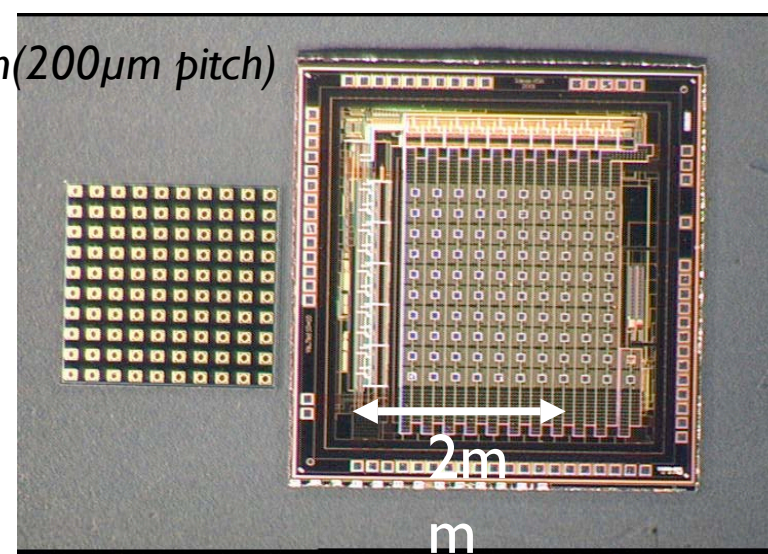
16x16

32x32 (蛭田講演)

with IDEAS



2dim version (200 μ m pitch)



GEMの

読み出しには電極
を大きくするだけ

Development for the Next Prototype: VA64TA

VA64TA: 64 channel analog ASIC

By ISAS, SLAC & Ideas ASA, Norway

Measured Power Consumption: 0.4 mW/ch

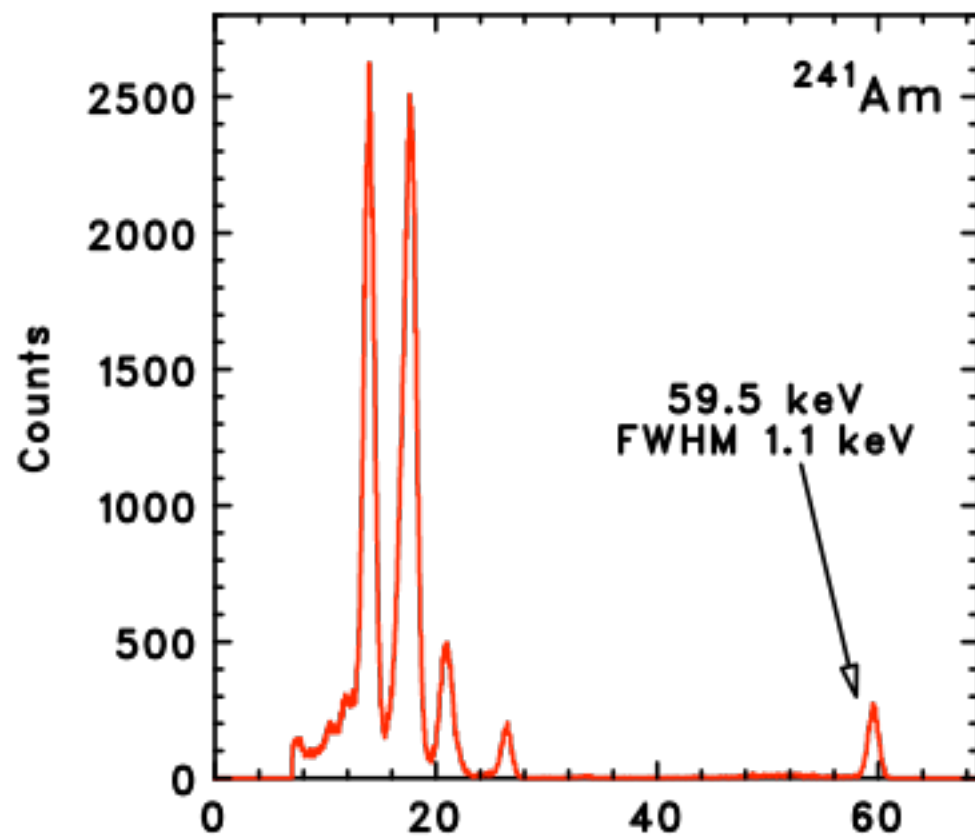
One order lower than VA32TA

Expected Noise: $(40 + 12 \times C_d) / \sqrt{\tau} e^-$ (rms)

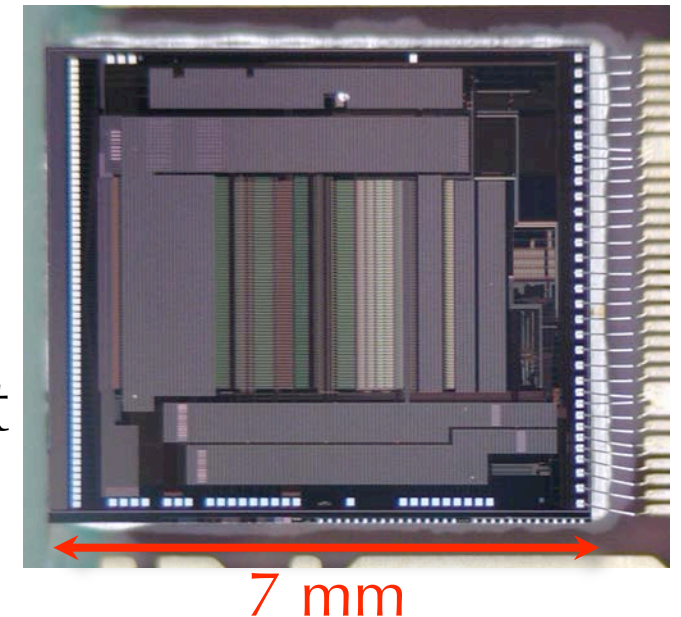
Majority selector circuit for the tolerance against

SEU

Si Stripによるスペクトル



2005

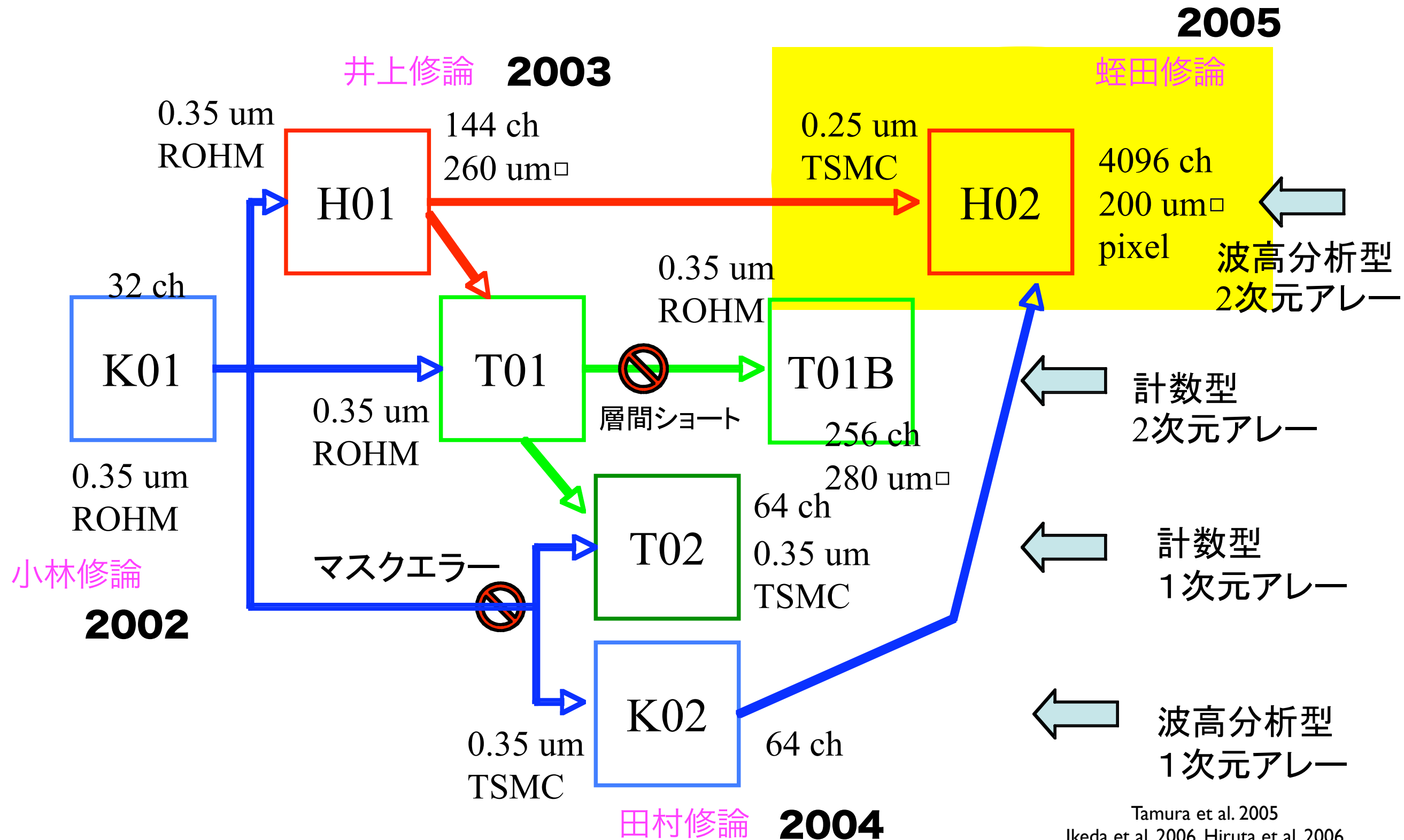


Energy resolution: 1.1 keV @ 60 keV
1.2 keV @ 122 keV

Same as VA32TA

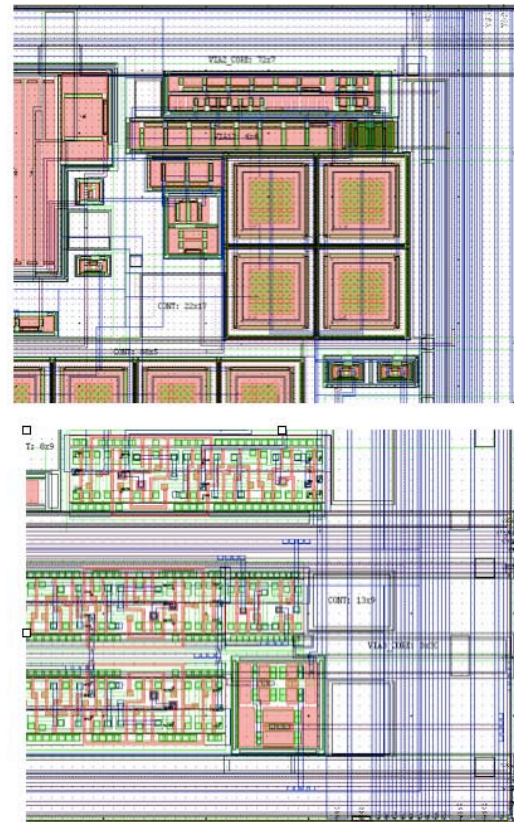
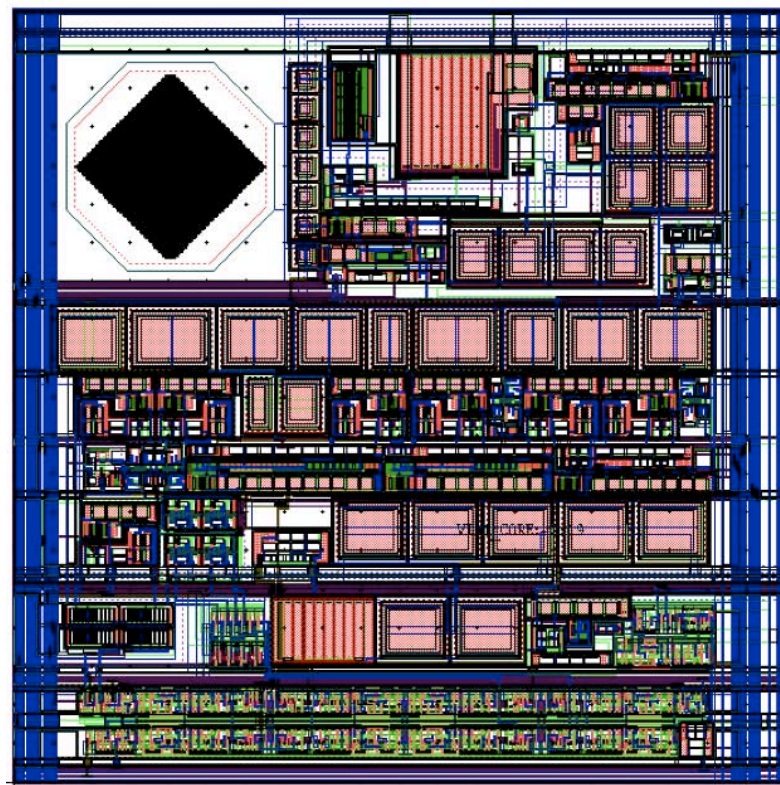
Energy threshold: ~ 4.0 keV

アナログLSIオープンIP プロジェクト @ ISAS/JAXA

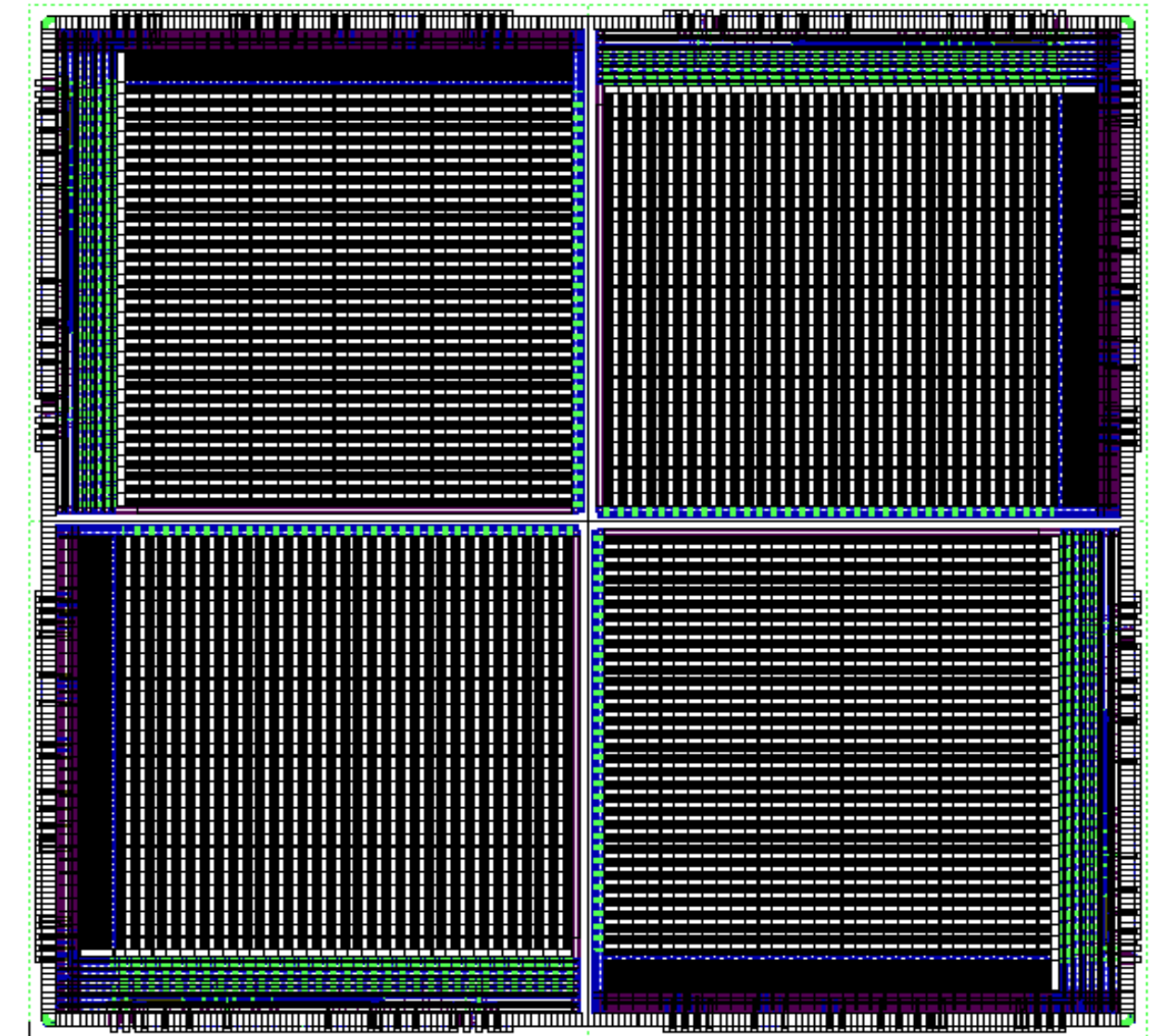


H02チップのレイアウト

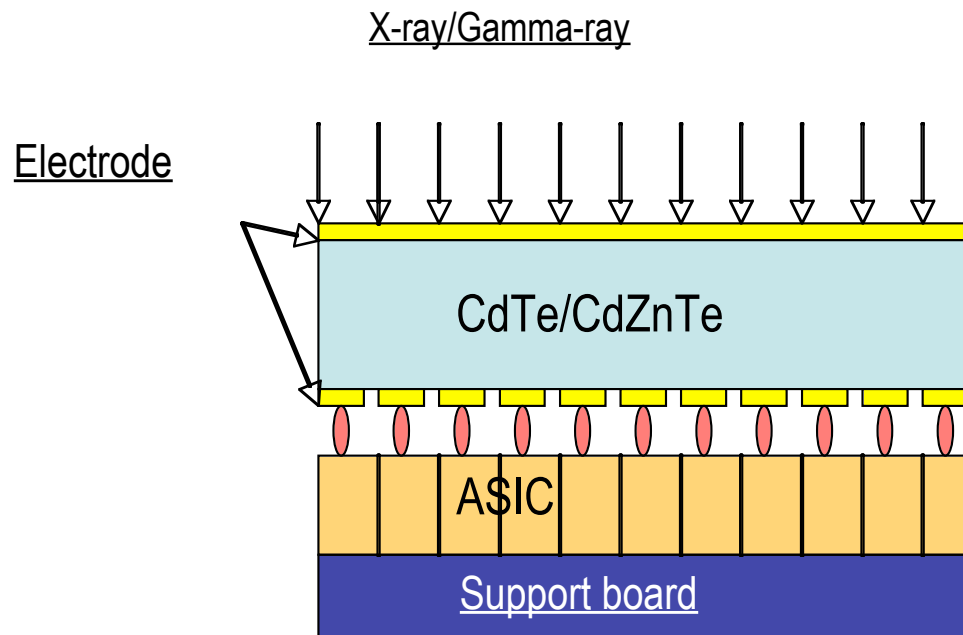
1ピクセルのレイアウト
(200ミクロン角)



64 x 64 (15mm角)
TSMC/0.25ミクロン
5層メタル配線
deep N-well



Bump Bonding



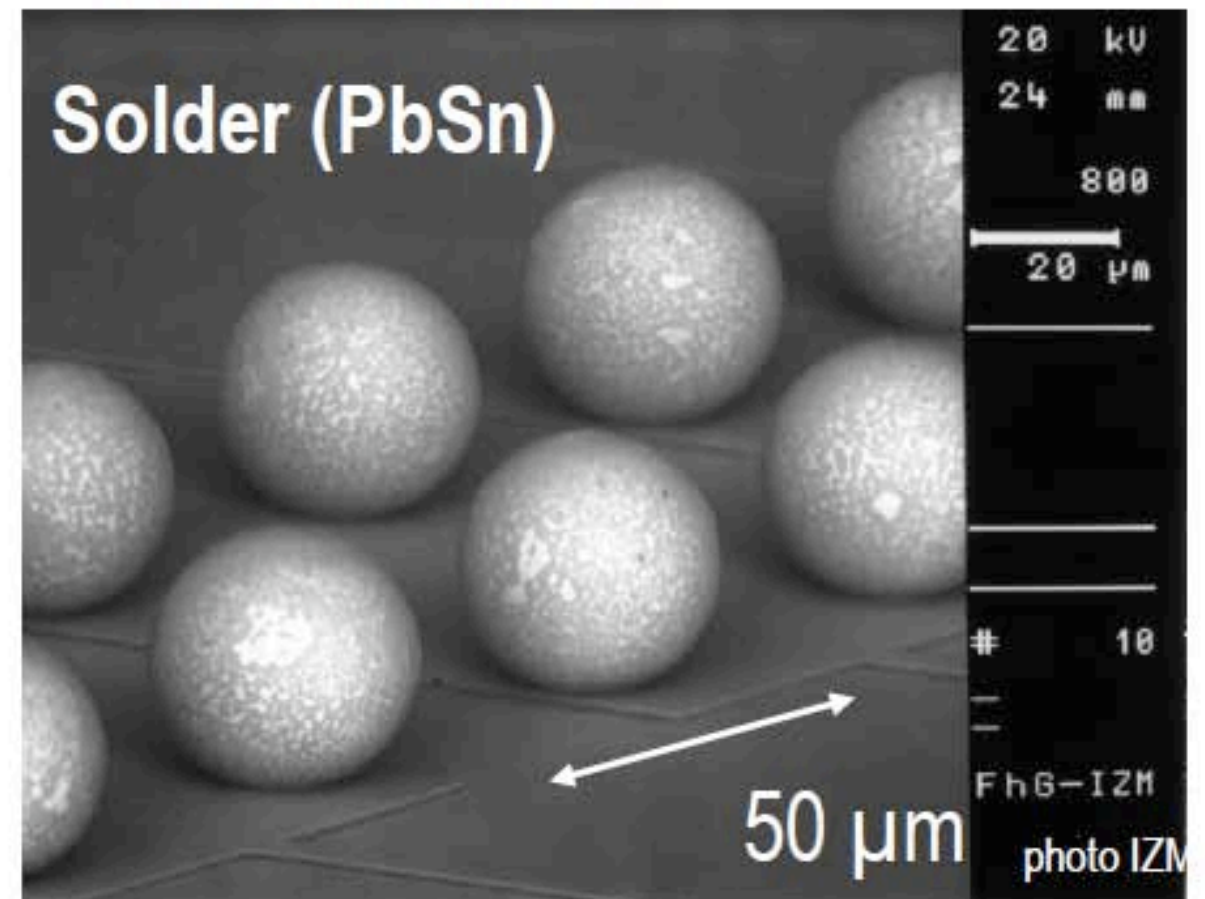
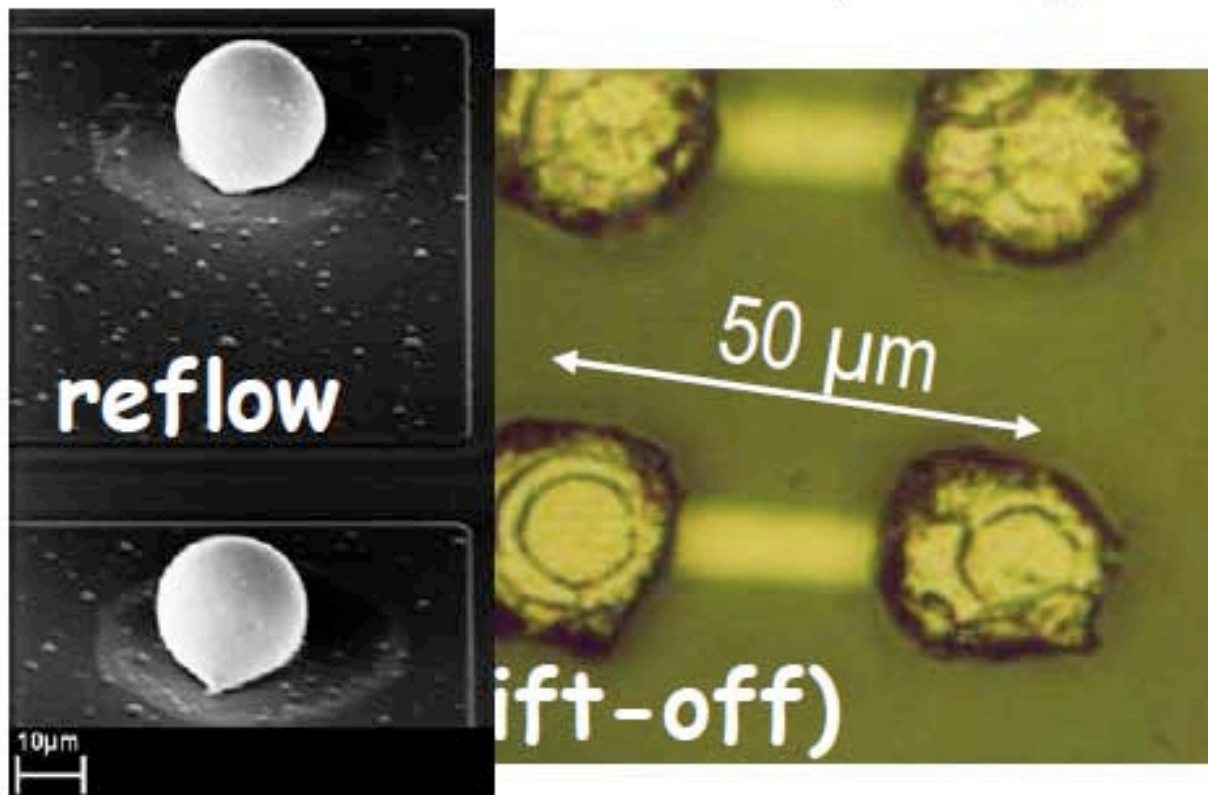
シリコンチップ用

(Waferを相手にしたプロセスであることが多く
使いにくい)

(CdTeには、うまく適応できなかった
：熱、圧力)

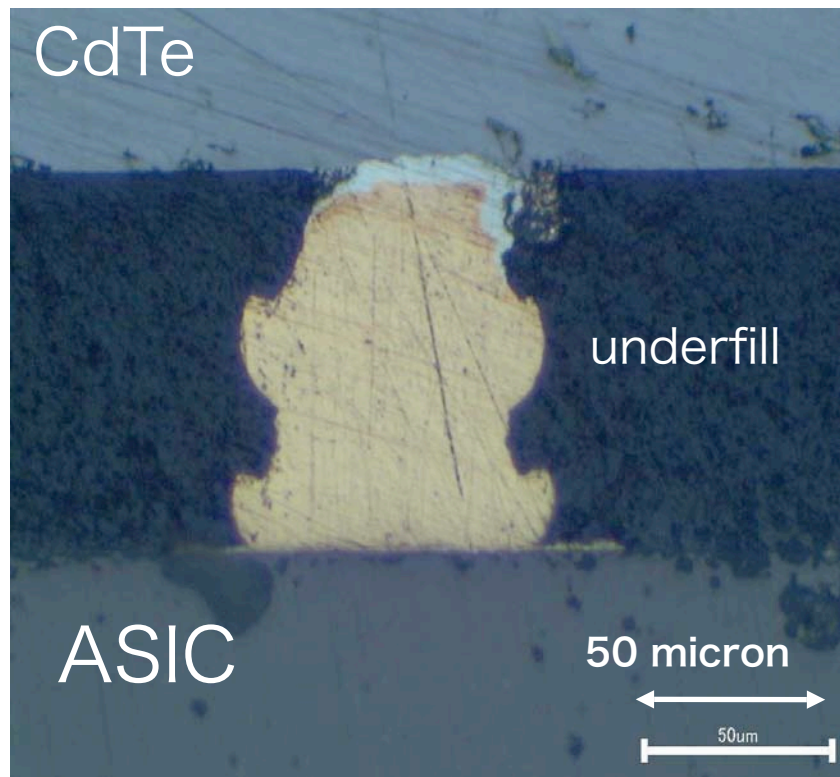
ATLAS / ALICE

ATLAS / ALICE / CMS (reflow)

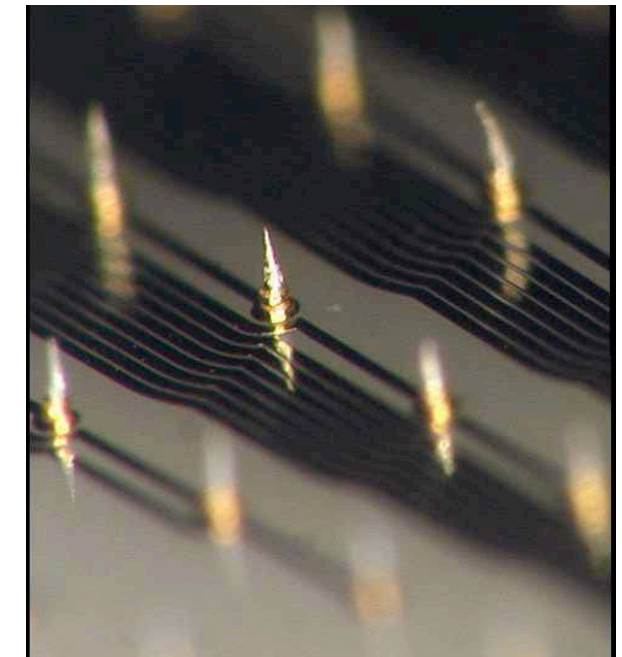


CdTeのために開発したIn/Au Stud

- ・ In/Au スタッドバンプ（背の高いバンプ） → 入力容量をさげる
- ・ CdTe/CZT に適している(低温、ソフト)

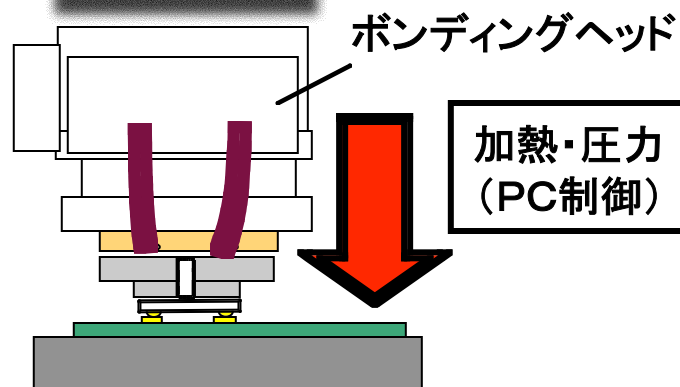


宇宙研&三菱重工業名古屋誘導システム
(民生の最先端実装技術、MEMS、ナノテク
LSI パッケージング、宇宙応用)



日本の実装マシンは世界一
(九州松下、澁谷工業他)

ボンディング

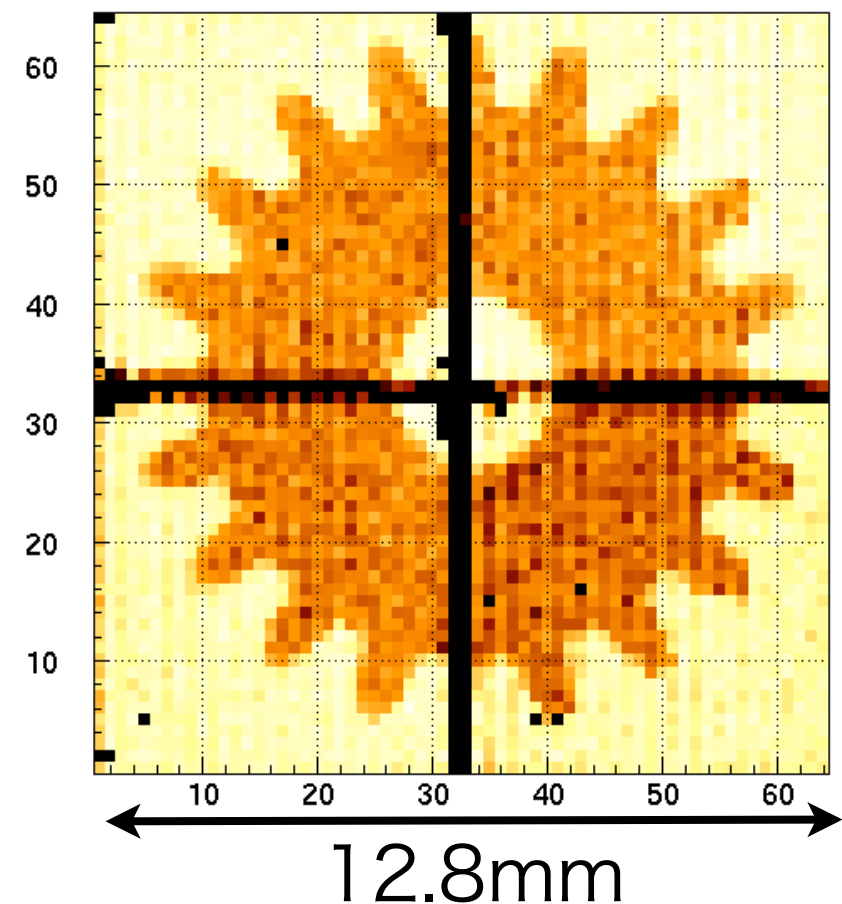
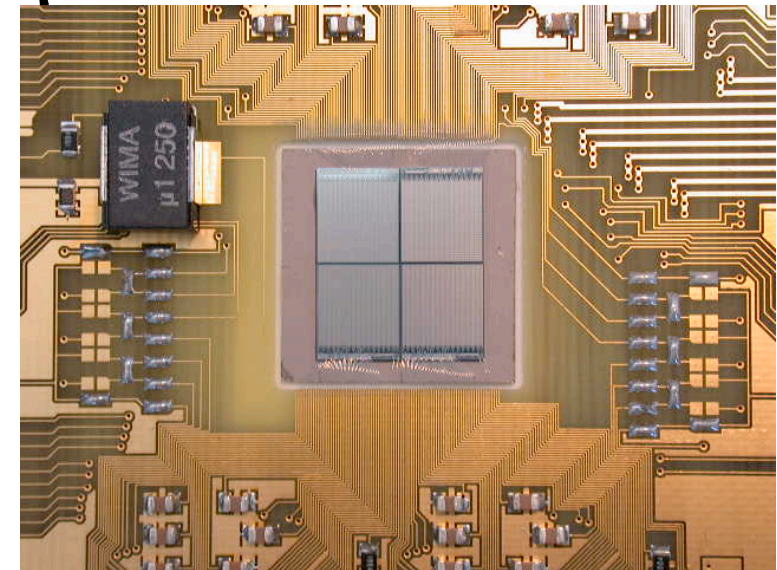
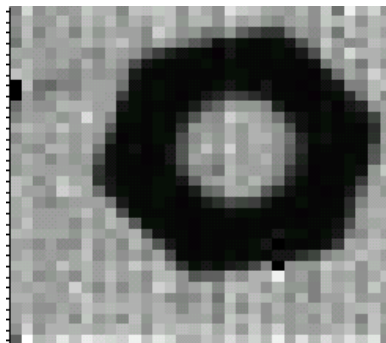
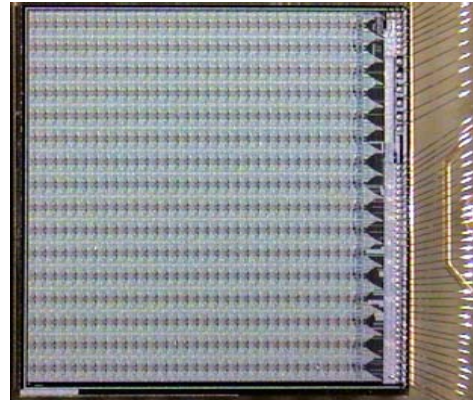


これが我々にとって一番の鍵の技術となった。
ISAS&MHI US特許、ヨーロッパ、
日本特許申請中
(Takahashi et al. IEEE NS. 2001)

例：カウンティング素子を用いた CdTeイメージャー

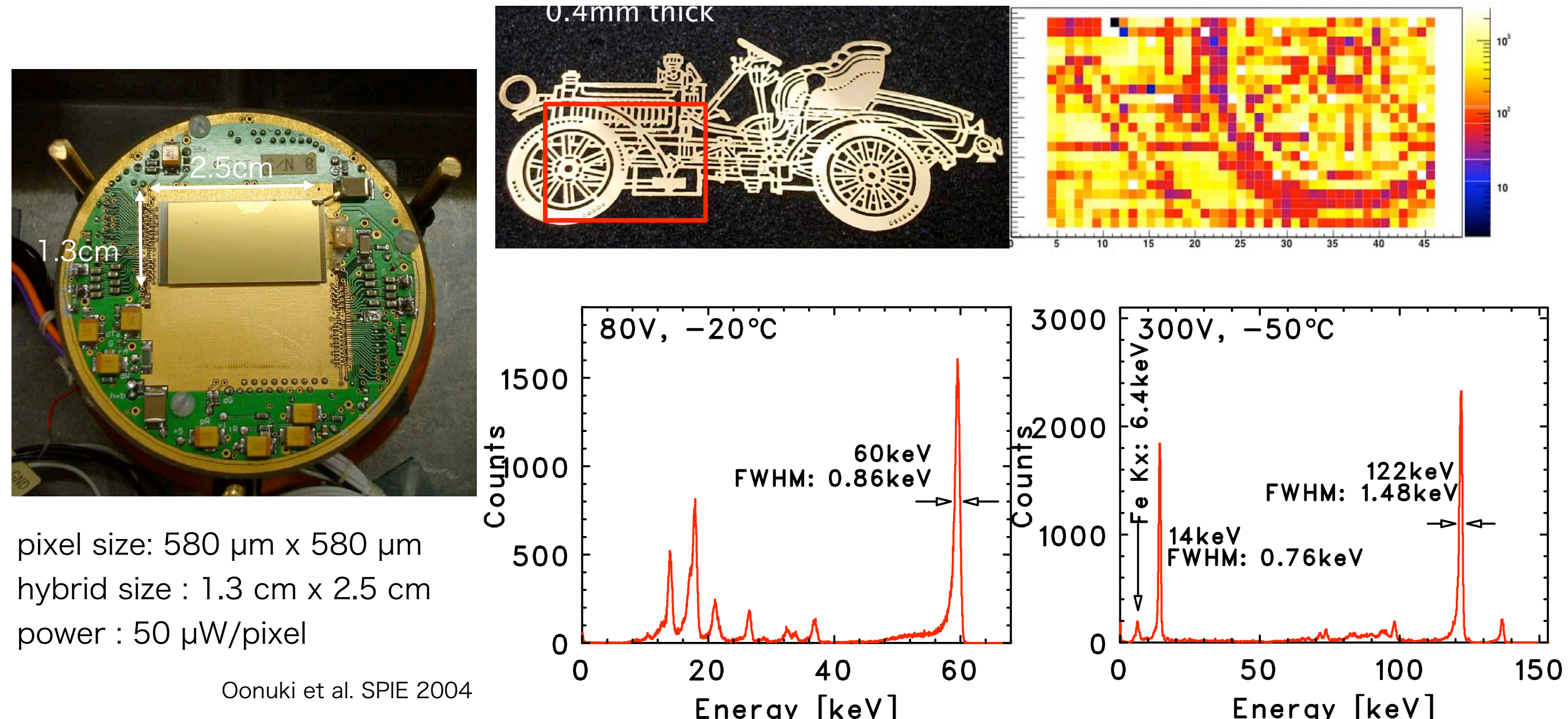
宇宙研／ボン大学
共同プロジェクト
(フォトカウントChip)

200 μ m角というような
細かなピクセル検出器の
実証を世界に先駆けて
行った (2001)

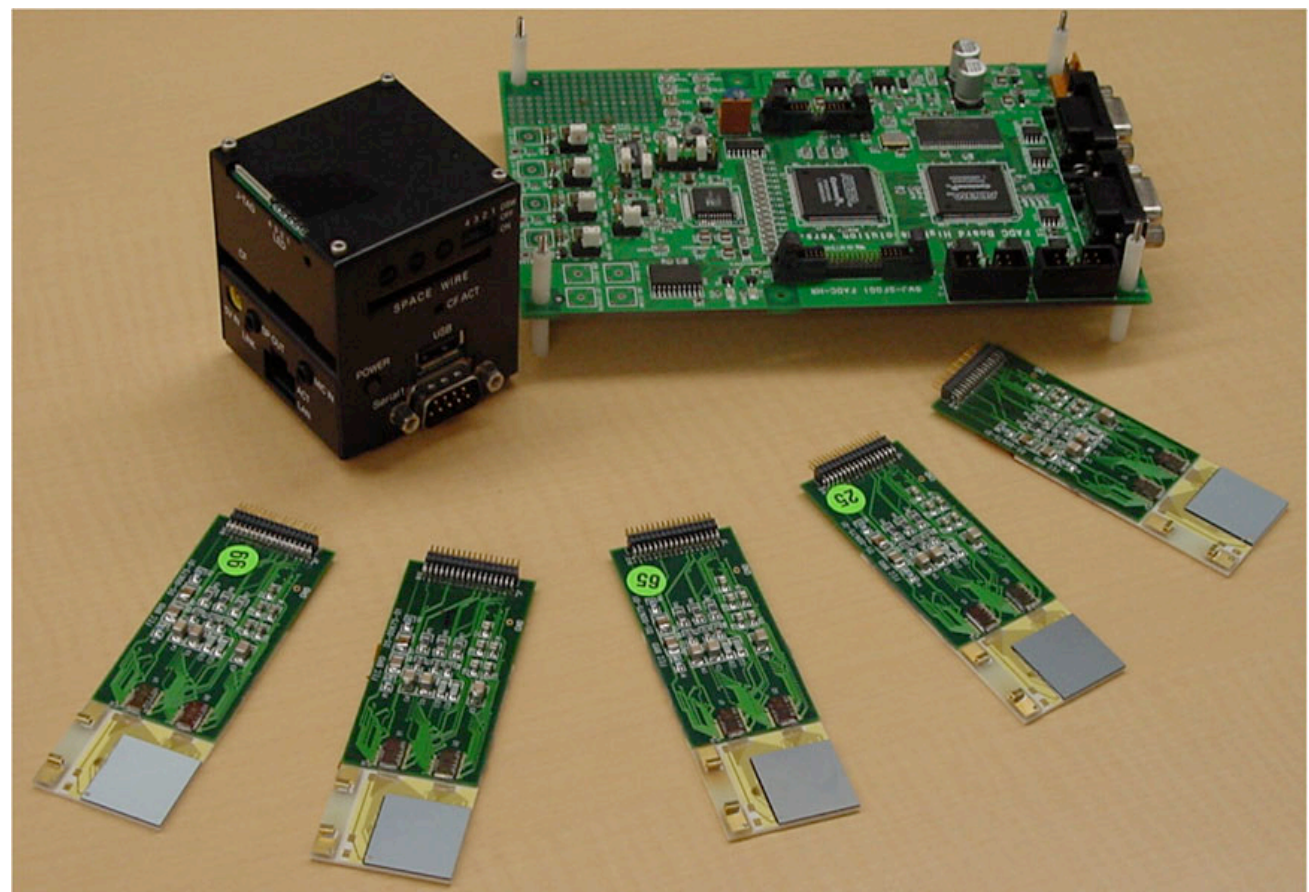


例：500 μ mピッチ 大面積CdTe 픽セル検出器

CdTe (Pt/CdTe/Pt) & バンプ接合 (**ISAS,ACRORAD,MHI**)
VLSIとDAQ (**Caltech**)

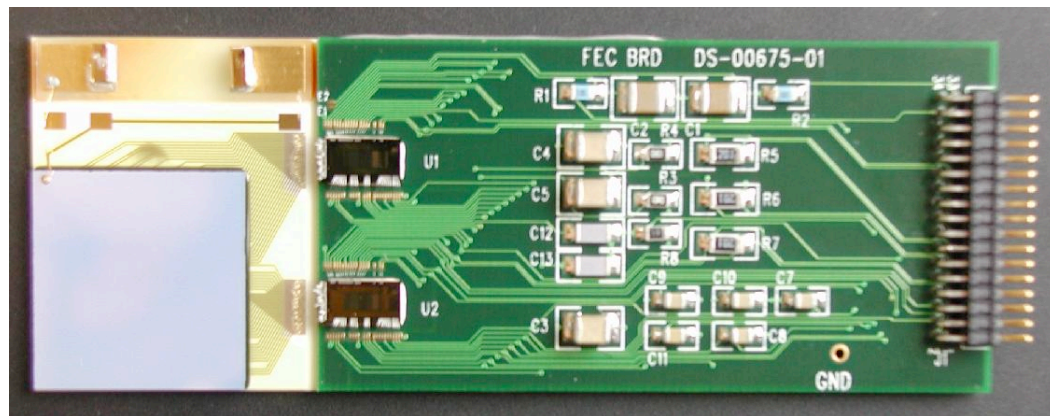


CdTeガンマ線モジュール

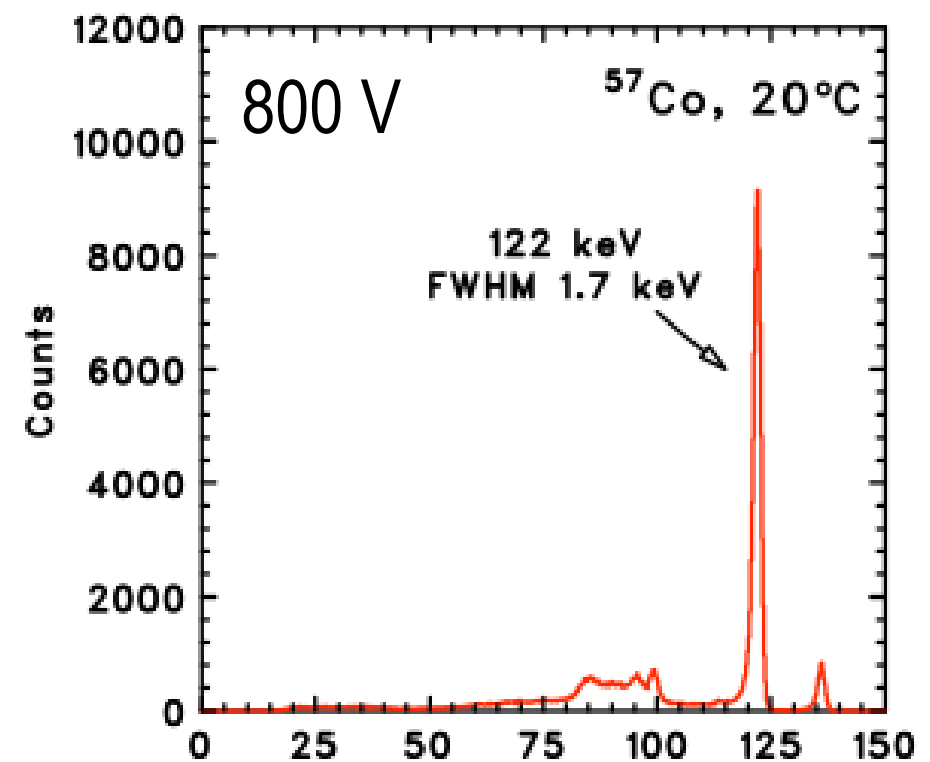


8x8 CdTe Pixel “Gamma-ray Module”

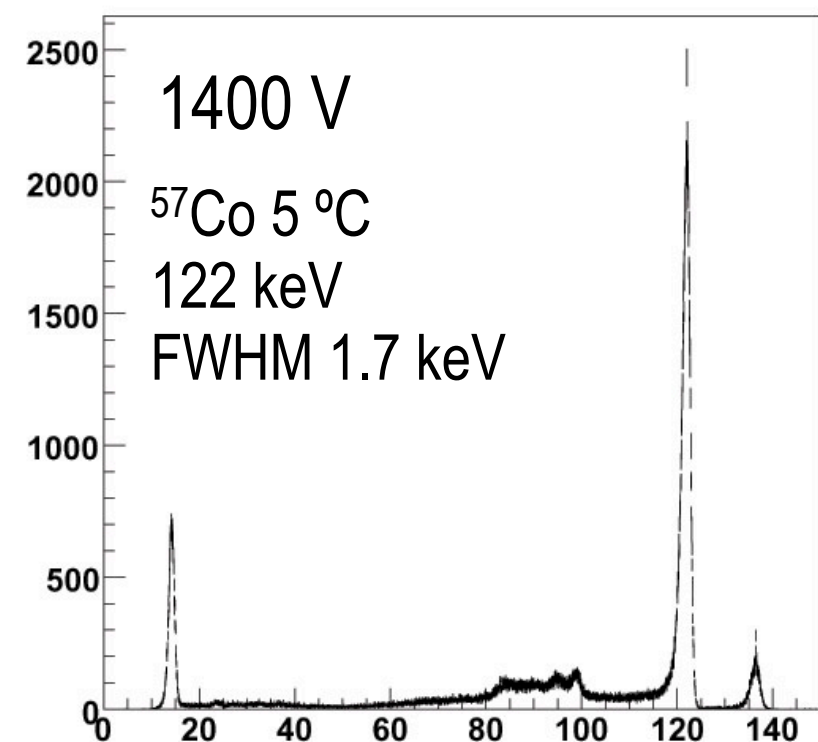
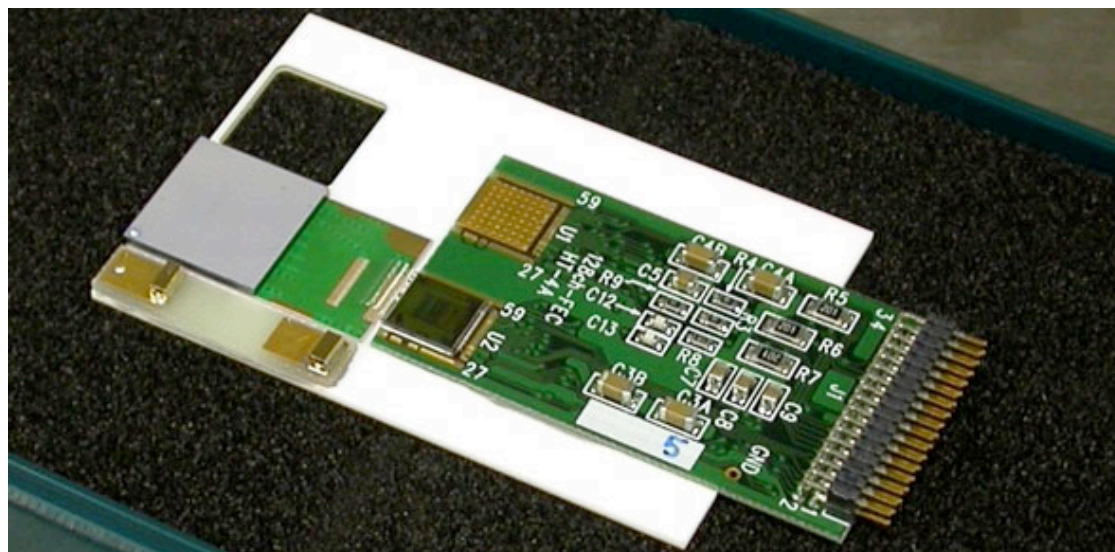
area: $18 \times 18 \text{ mm}^2$, thickness: 0.5 mm
pixel size: $2 \times 2 \text{ mm}^2$, 64ch, cathode side
guard ring : 1 mm width
backing : 200 micron thick Al_2O_3



64ch sum-spectrum



area: $11.2 \times 11.2 \text{ mm}^2$, thickness: 0.75 mm
pixel size: $1.35 \times 1.35 \text{ mm}^2$, 64 ch

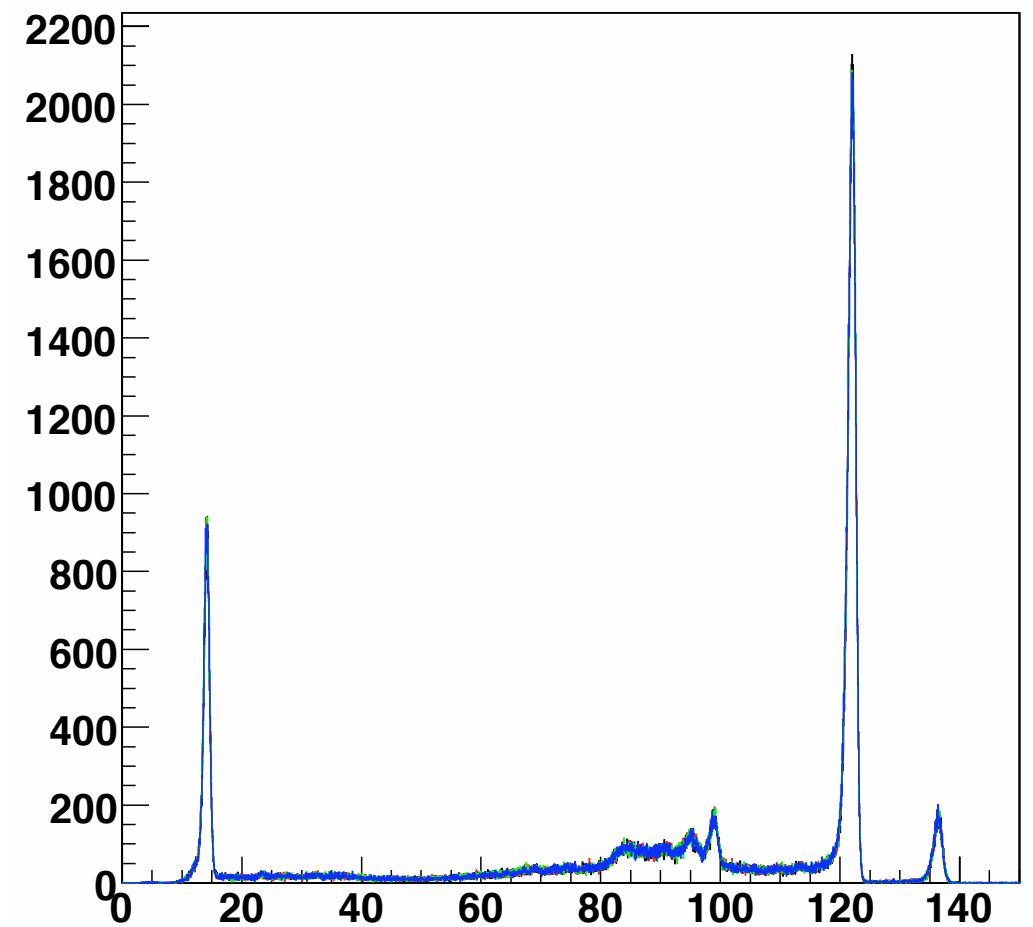
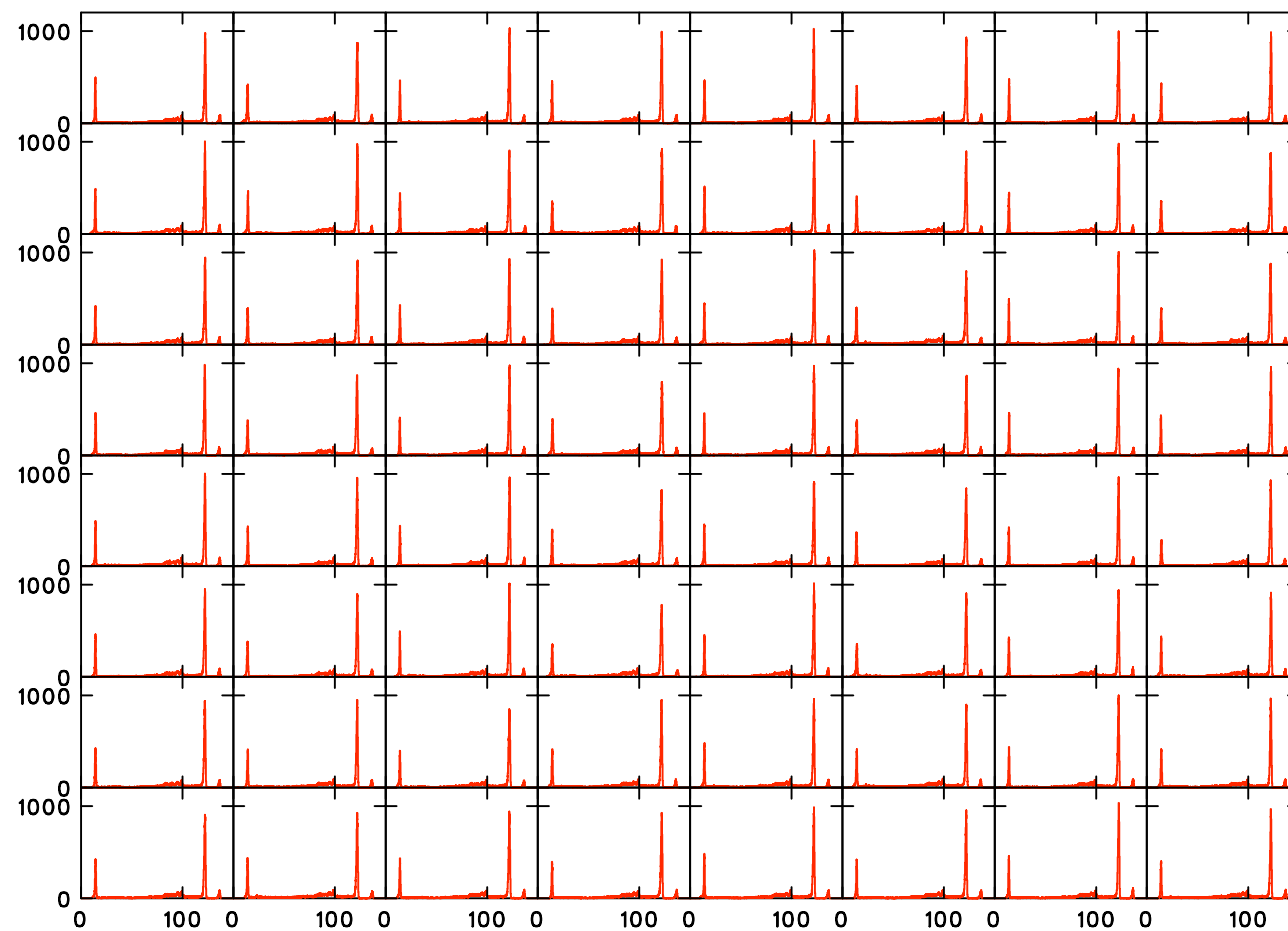


New ASIC (VA32TA/VA64TA) by ISAS/SLAC/IDEAS

Spectra from 64 pixels

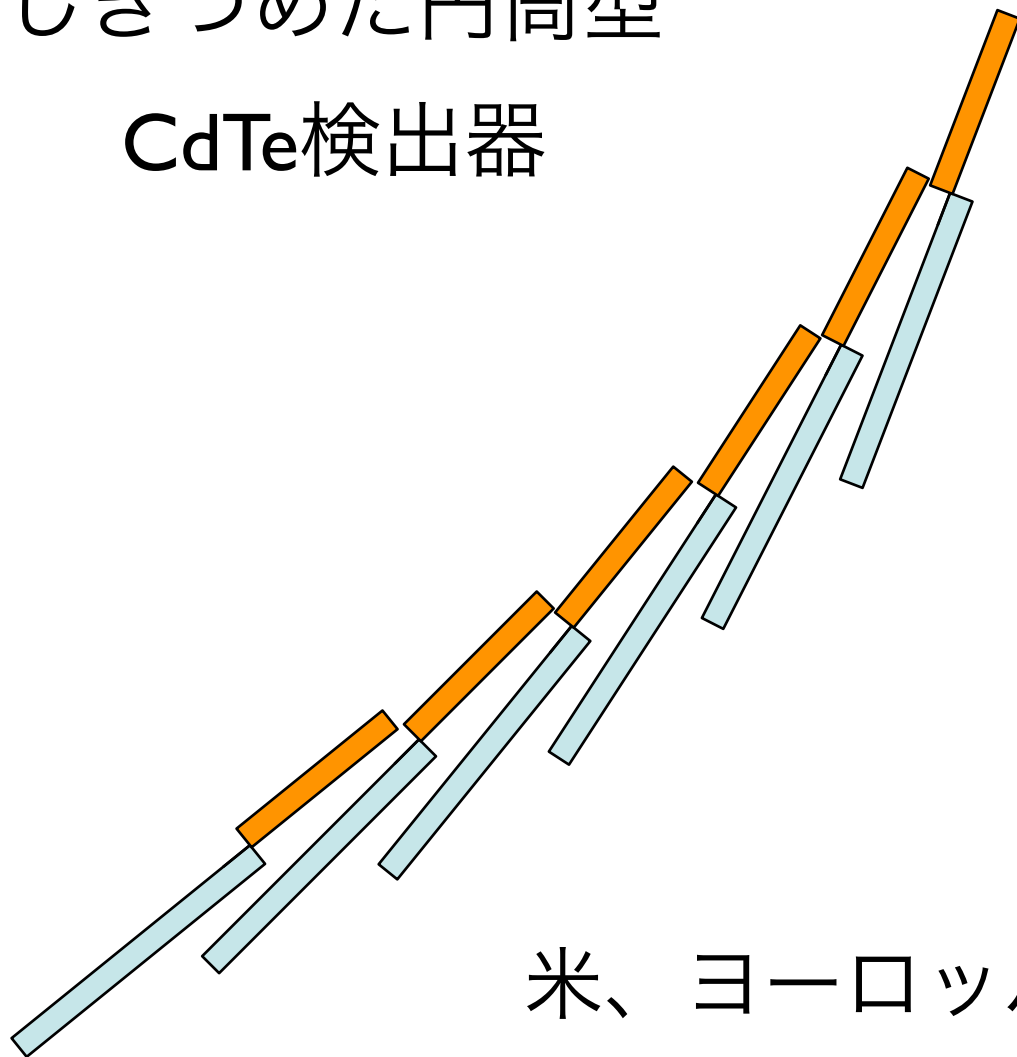
1.4 mm pitch
0.5 mm thick
module at 600 V

^{57}Co 5 °C 122 keV Av. FWHM 1.5 keV
High Uniformity, NO-TAIL, High- ΔE



大面積化

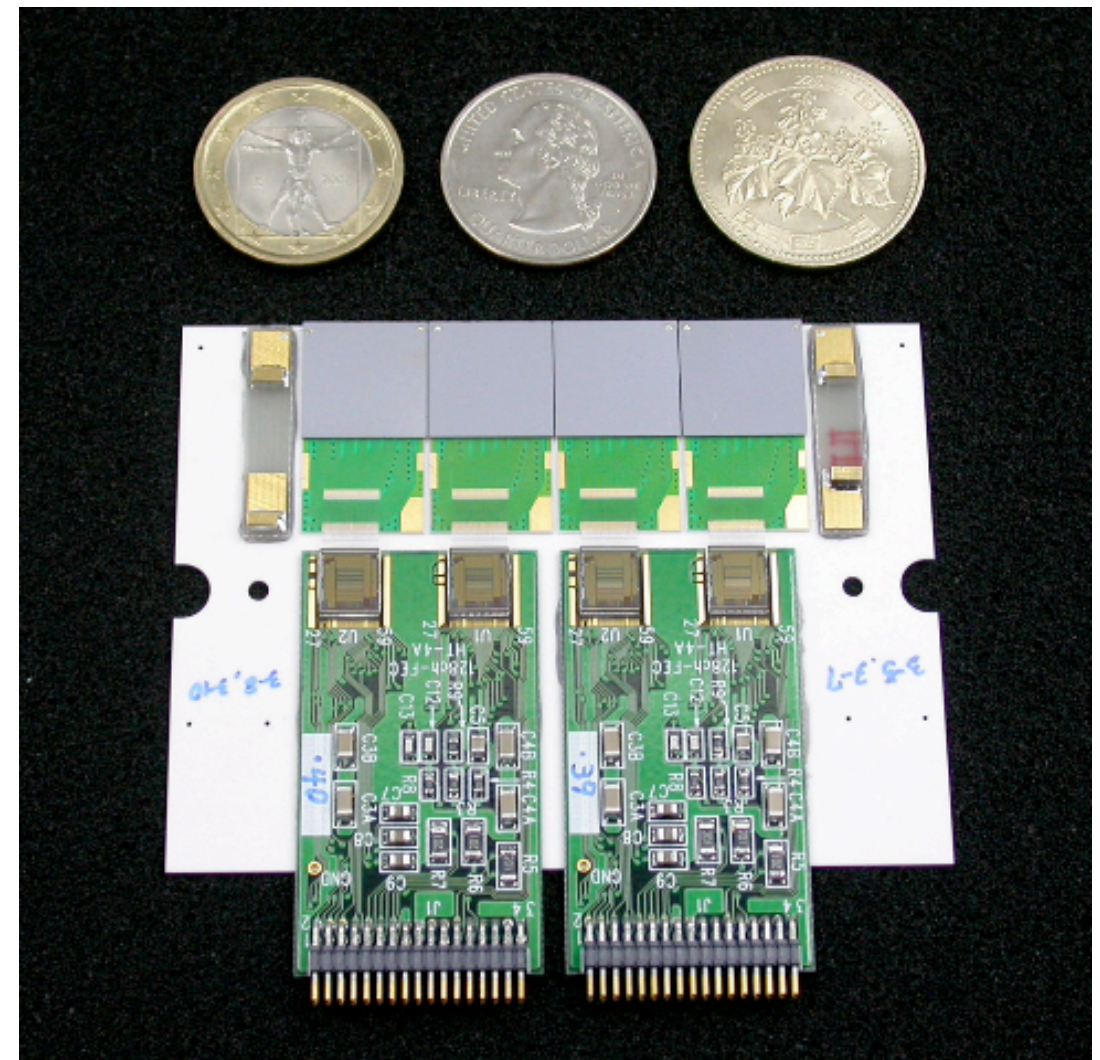
疑似バットブルで
しきつめた円筒型
CdTe検出器



米、ヨーロッパの
メーカーに技術移転



4.4 cm x 1.1 cm
1.4 mm Pitch



半導体イメージング素子の応用

Si/CdTeコンプトンカメラ

半導体のみで構成

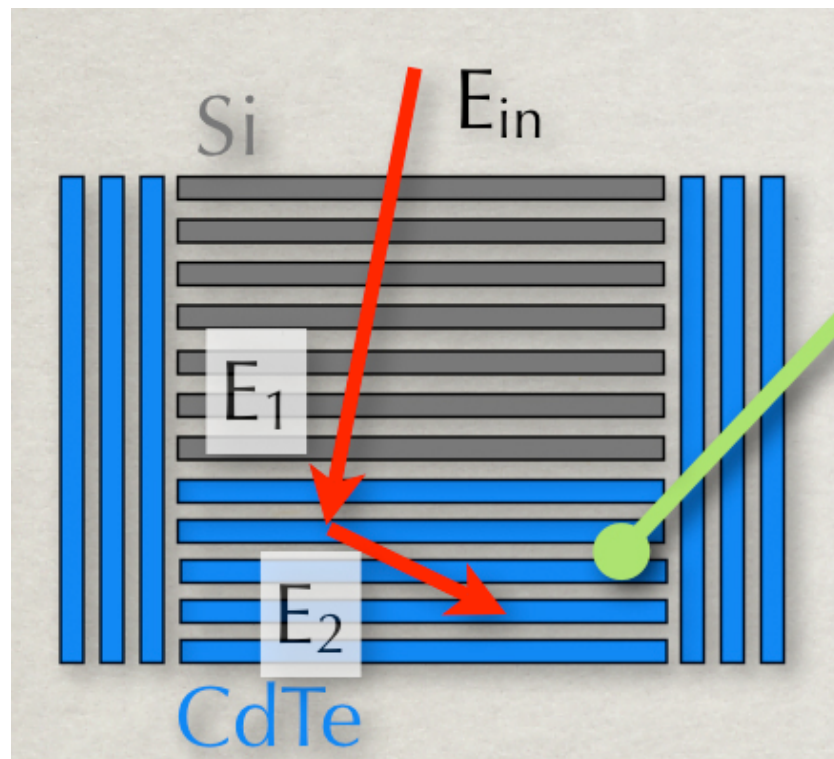


- ・優れたエネルギー分解能
- ・優れた位置(角度)分解能
- ・コンパクトな設計が可能

Si/CdTeの組合せ



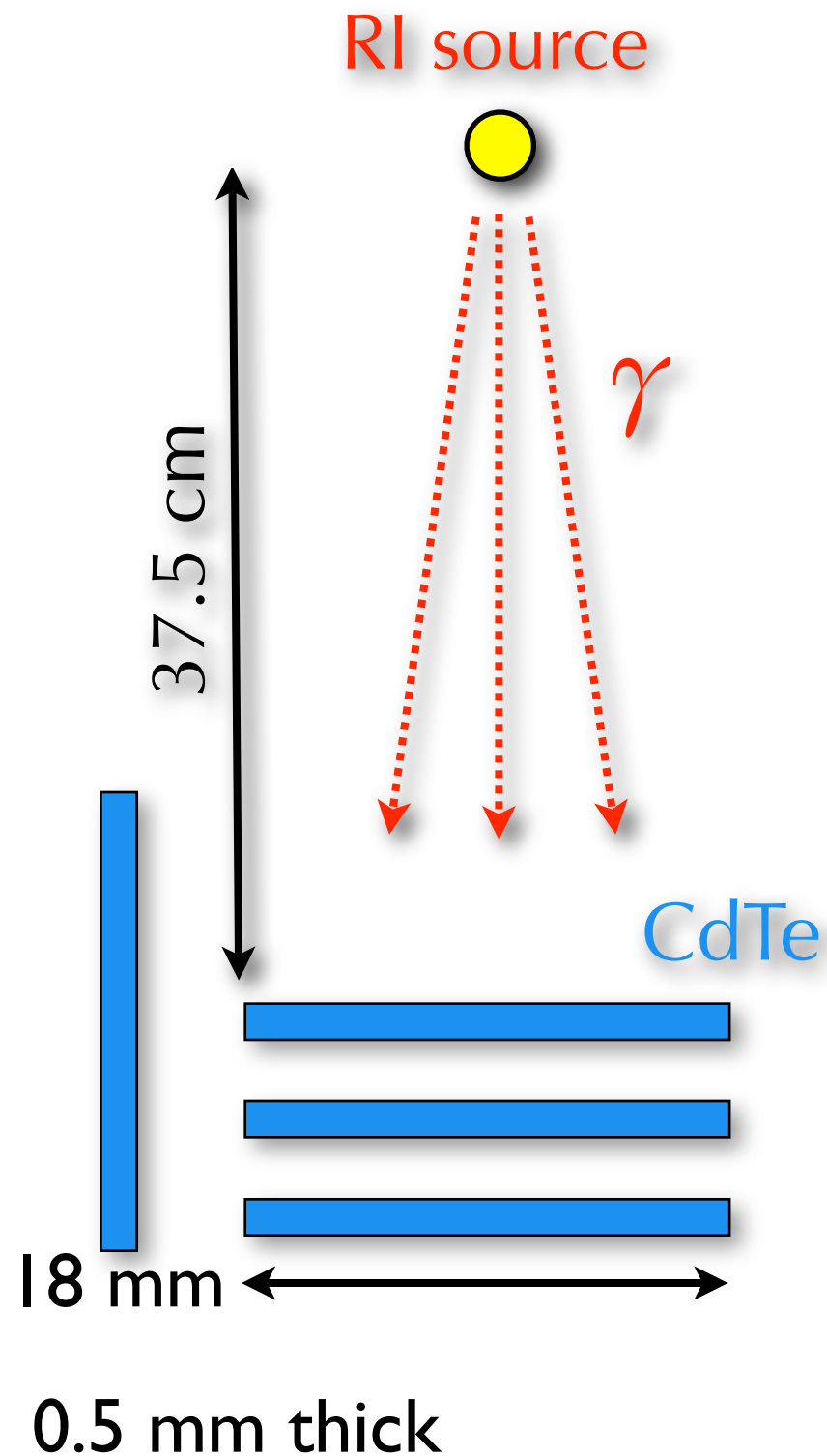
- ・100keV～MeVで高効率
- ・ドップラーの影響小



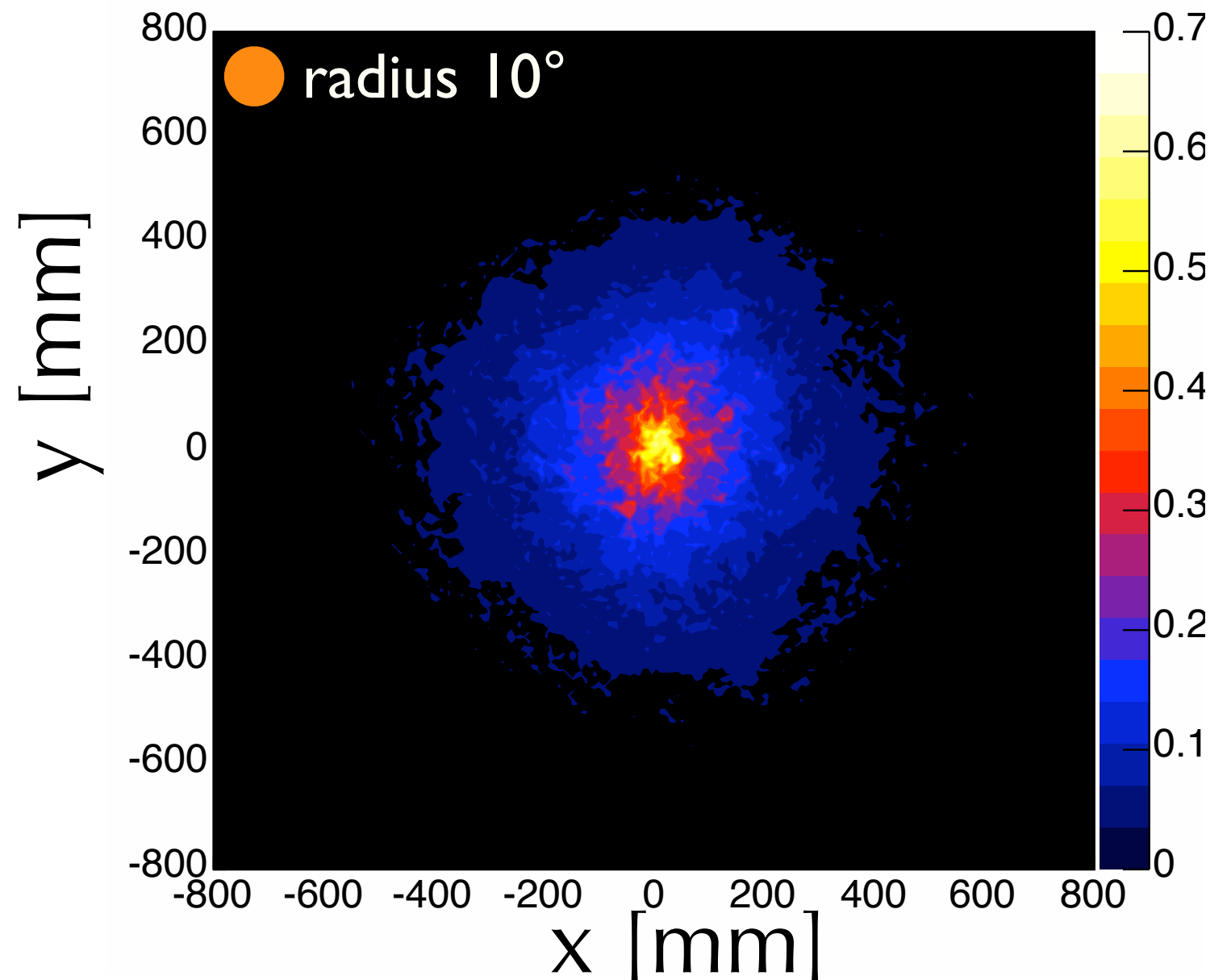
Si(Z小) → 散乱体

CdTe(Z大) → 吸収体

Prototype (I) - CdTe Compton -



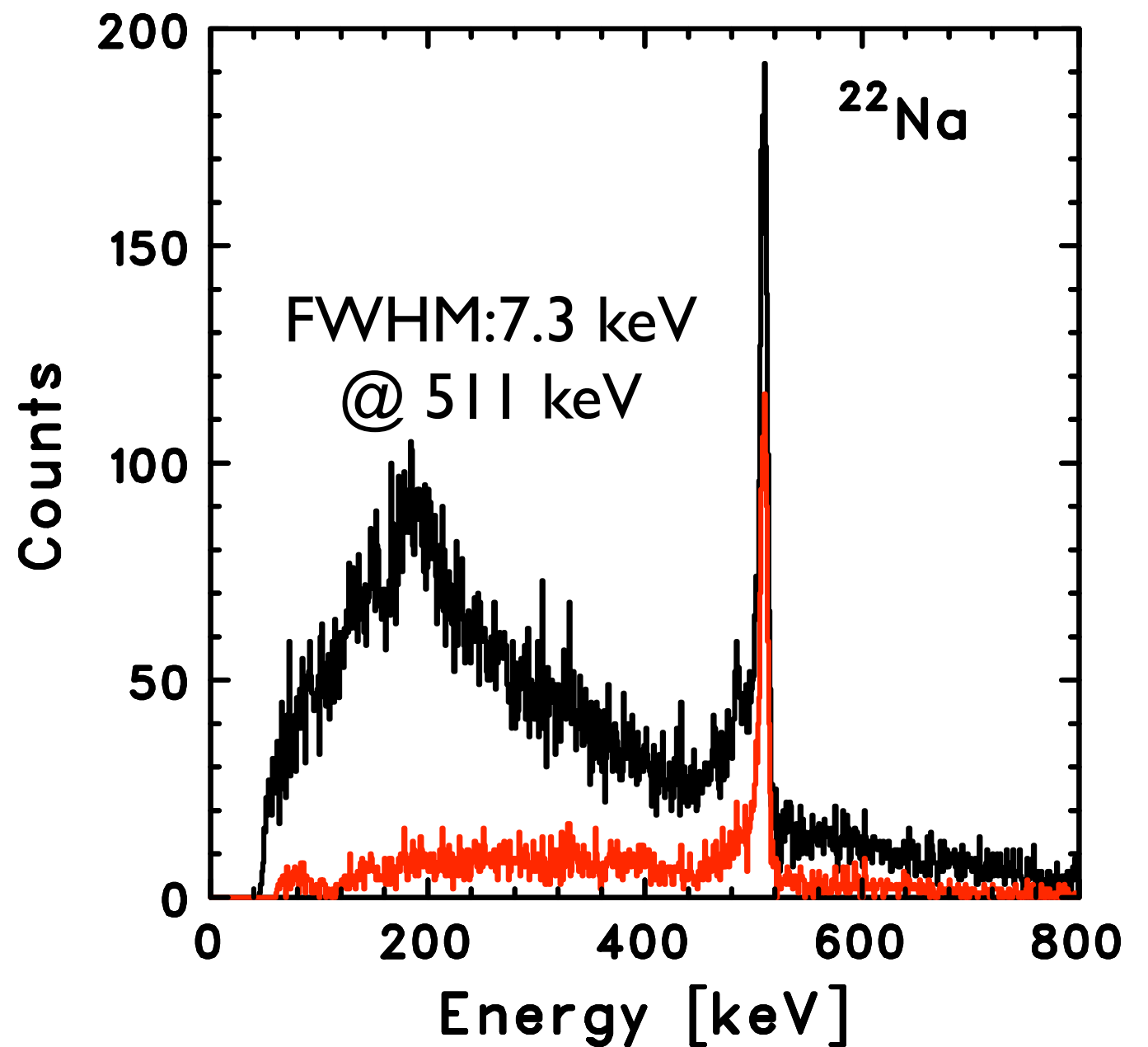
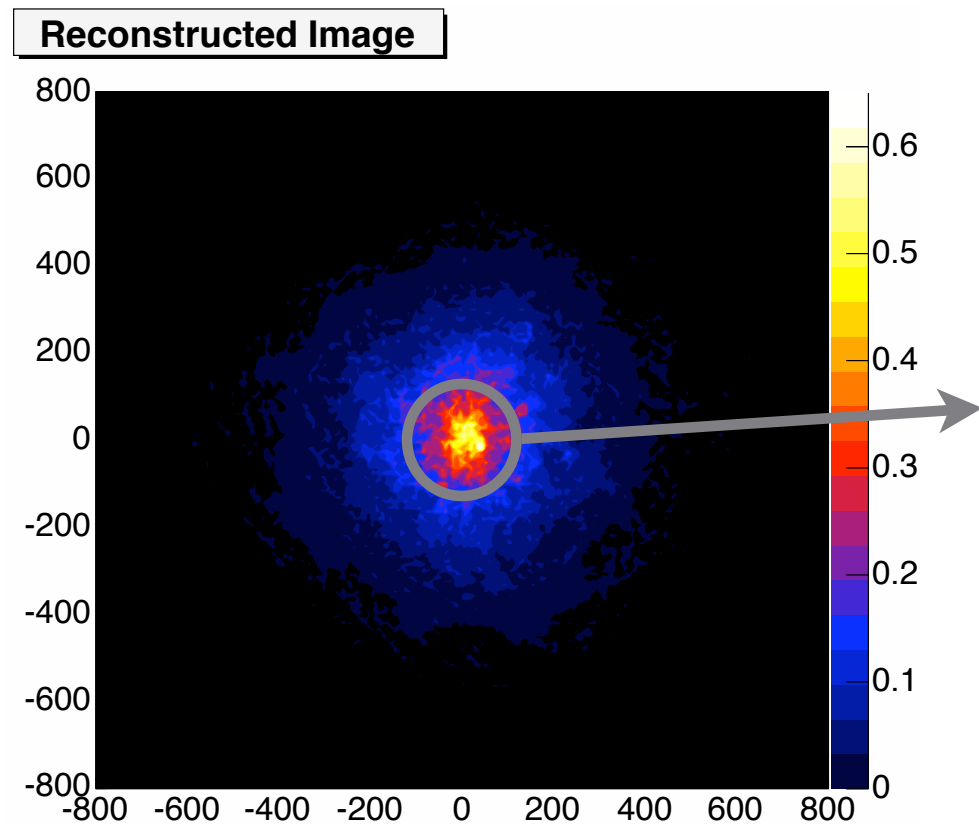
^{22}Na : 511 keV $\pm$ 10 keV



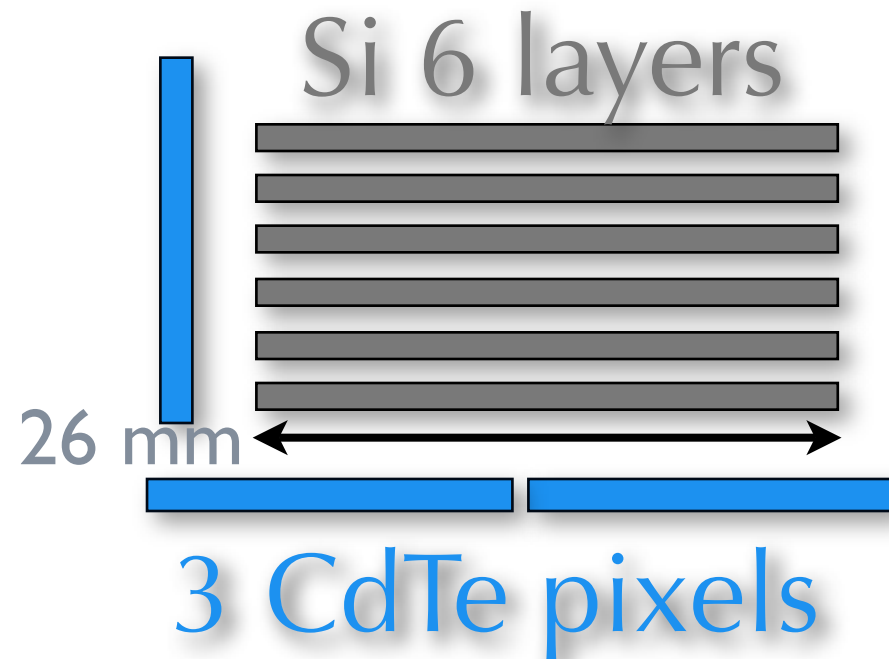
Tanaka et al. 2005

Spectrum Reconstruction

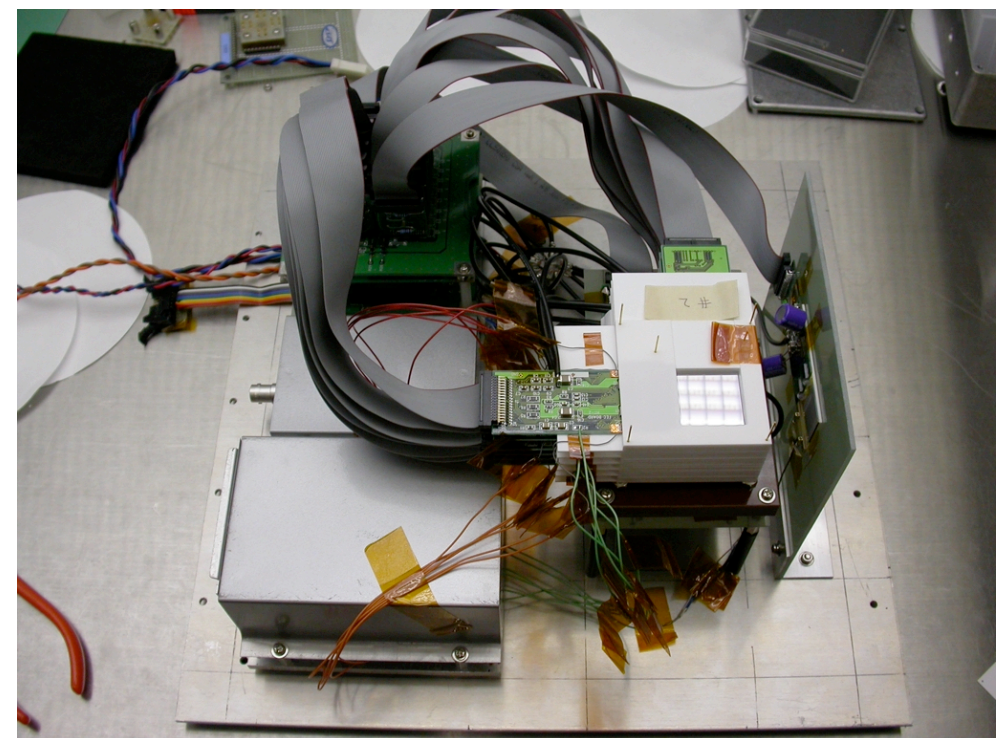
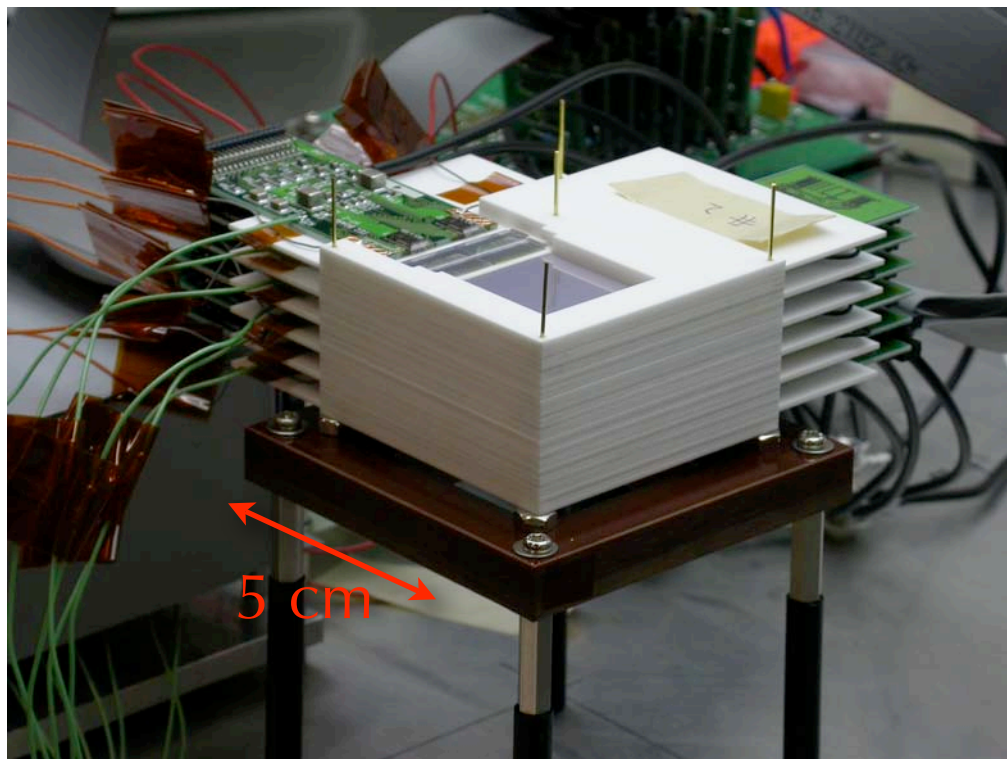
511 keV image



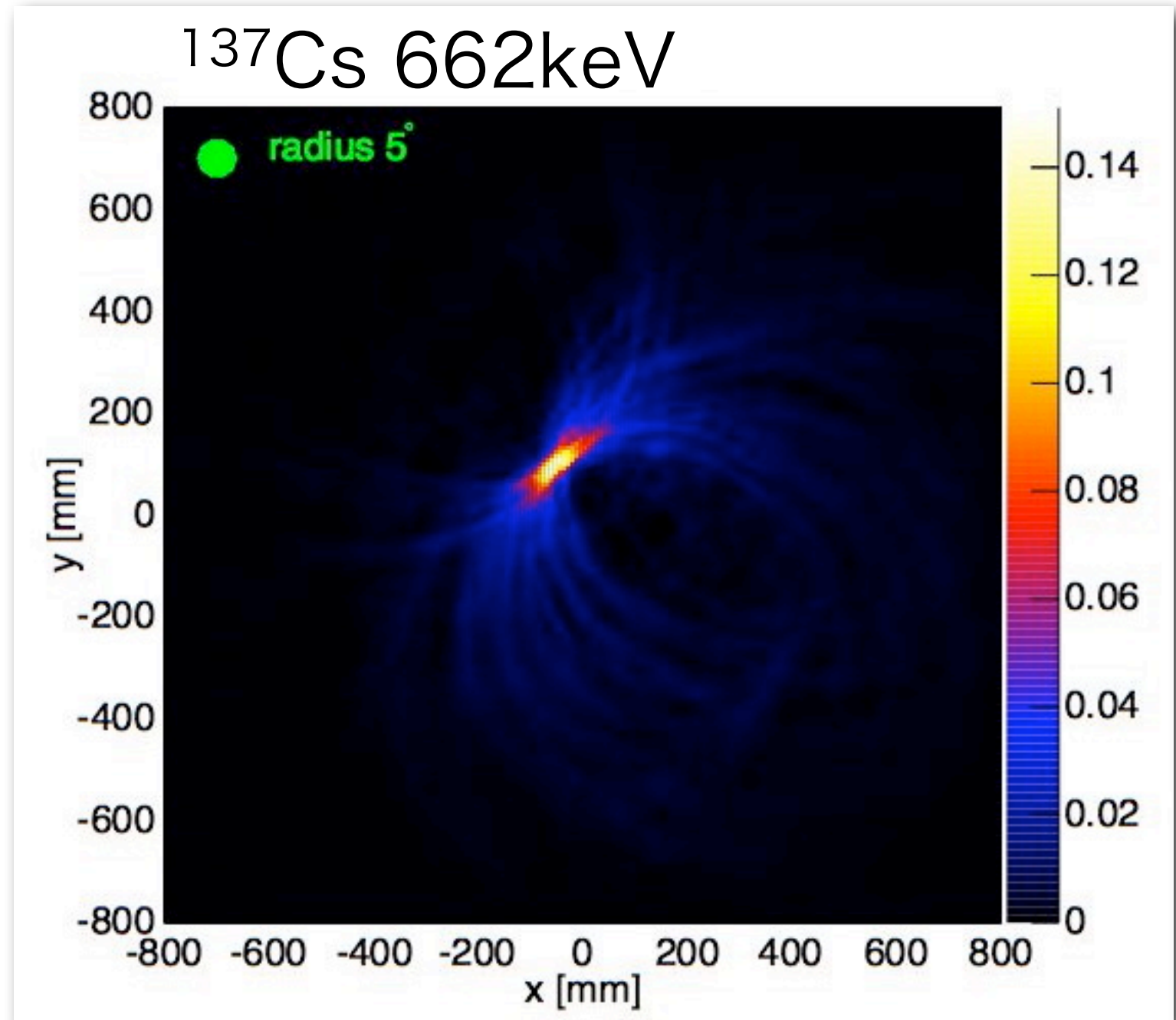
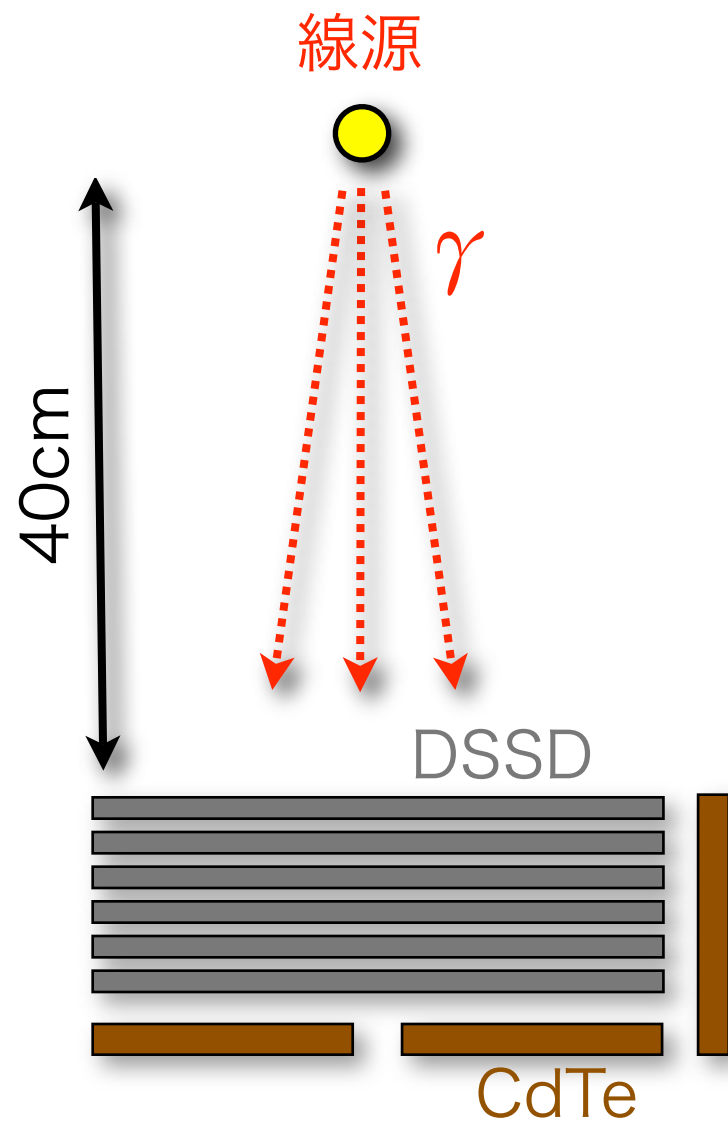
Prototype (2) - Si / CdTe --



- Si ($Z=14$) is much suitable as a scatterer.
- CdTe ($Z=48,52$) works better as an absorber



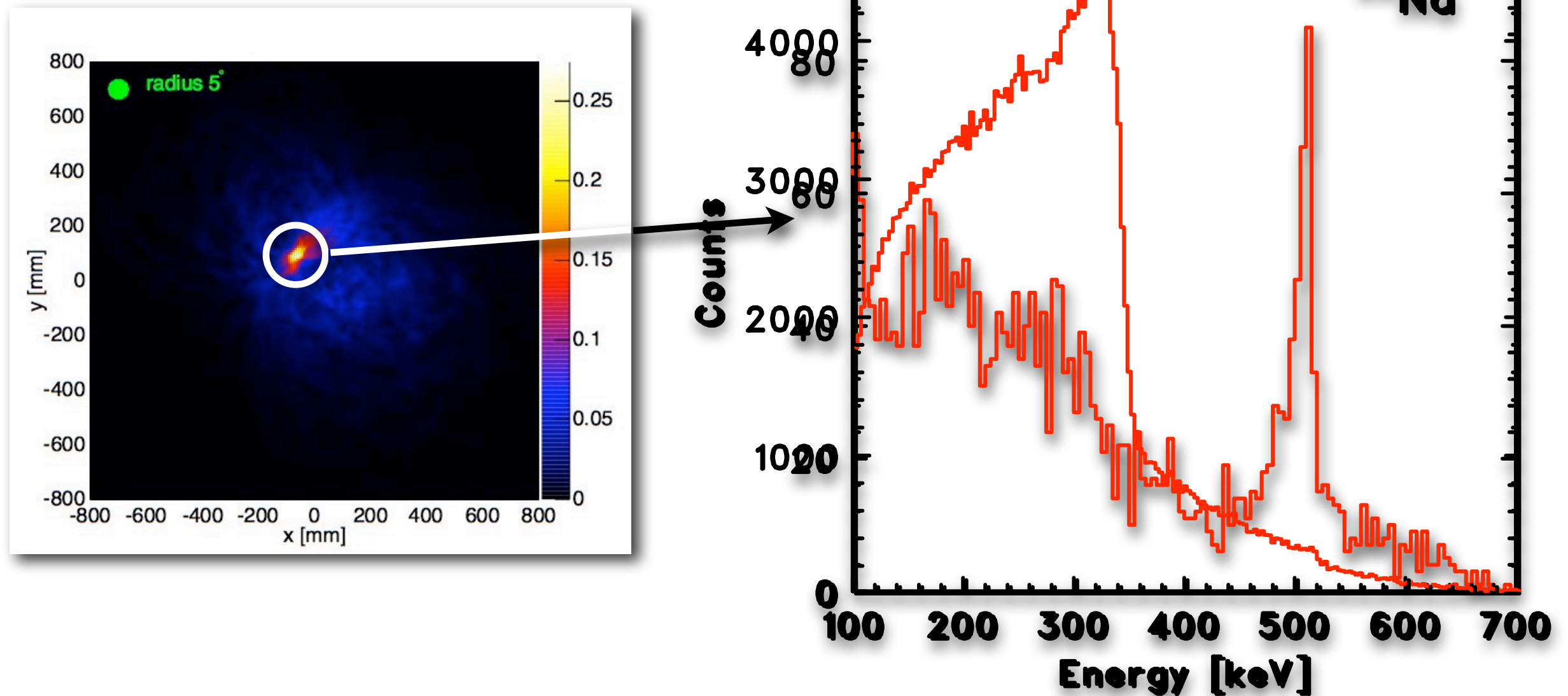
コンプトン再構成（イメージ）



81keV ～ 662keV でのコンプトン撮像に成功
理論限界（ドップラー限界）に近い分解能をはじめて実現

Reconstructed Spectra

Image of ^{22}Na



$E = 14 \text{ keV (FWHM) @ } 511 \text{ keV}$

まとめ

1. ガンマ線を止める半導体
(高品質のウェハー)
2. 半導体 픽셀化技術
3. 読み出し用アナログLSI
4. 実装技術
 - a) バンプ接合
 - b) フリップチップ技術
5. 読み出し、DAQ、RTOS
6. 大面積化 (20cm角、30cm角)
 - a) 大面積CdTeウェハー
 - b) バッタブルの技術
 - c) 大型ASIC

長期的な視野にたった開発が必要
(特にASIC)
一人ではできない。

픽셀検出器の技術開発を進めている

「民」の技術を使わないと、発展しない

(大量生産を行なう事を最初から考える)

「民」のニーズを知って、共同開発をすることが必要。

(民にとって魅力的なビジネスモデルを提示する)

宇宙オープンラボ



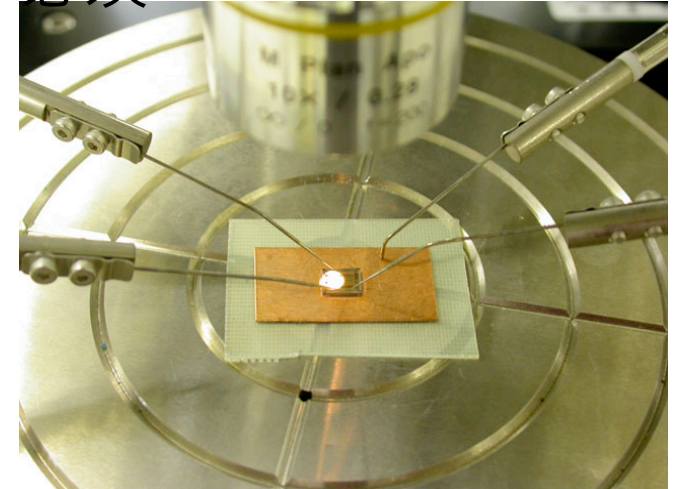
(JAXA産学官連携部)

@ISAS

必須



必須



蒸着装置





April 3 - 6, 2006
Stanford Linear
Accelerator Center
Stanford, California

in Particle, Astroparticle and Synchrotron Radiation

[Home](#) | [Program](#) | [Committees](#) | [Request Invitation](#) | [Registration/Abstract](#) | [Participants](#) | [Visa](#) |
[Payment Options](#) | [Accommodations](#) | [Transportation](#) | [Tourism](#) | [Author Instructions](#) |

First Announcement

The International Symposium on the Development of Detectors for Particle, Astroparticle and Synchrotron Radiation Experiments is scheduled to take place at the Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), April 3 - 6, 2006. This will be the ninth conference in a series that was started in 1977 jointly by experimenters at the SLAC and the Budker Institute for Nuclear Physics at Novosibirsk. These conferences initially focused on detectors for e+ e- colliding beam facilities, but more recently the focus has been enlarged to include instrumentation for proton colliders.

In recognition of the fact that the research program at many High Energy Physics laboratories is going to change dramatically in the years to come, the program for this Symposium will cover detector development for experiments in three different areas of research: Particle Physics, Astroparticle Physics, as well as experiments at Synchrotron Radiation Facilities. The emphasis will be on detectors and sensors that are based on fundamentally similar concepts and properties of matter. The goal of this Symposium is to bring together experts from these different communities to exchange information and stimulate interdisciplinary developments.

The Symposium program will be organized in plenary sessions with invited speakers, and will include longer overview talks and shorter oral presentations on specific applications or developments. A poster session will supplement the shorter presentations. We plan to hold sessions on

- Single photon detectors
- Silicon based detectors with high position or spectral resolution
- Semiconductor developments
- Imaging techniques
- Detection of dark matter and cosmic microwave background
- Instrumentation of particle and laser beams
- High energy calorimeters
- Charged particle identification devices

The attendance will be limited to 200 invited participants. If you are interested in attending this Symposium, you can select here to [request an invitation](#). Any questions about the symposium may be directed to the Conference Committee at snic@slac.stanford.edu.

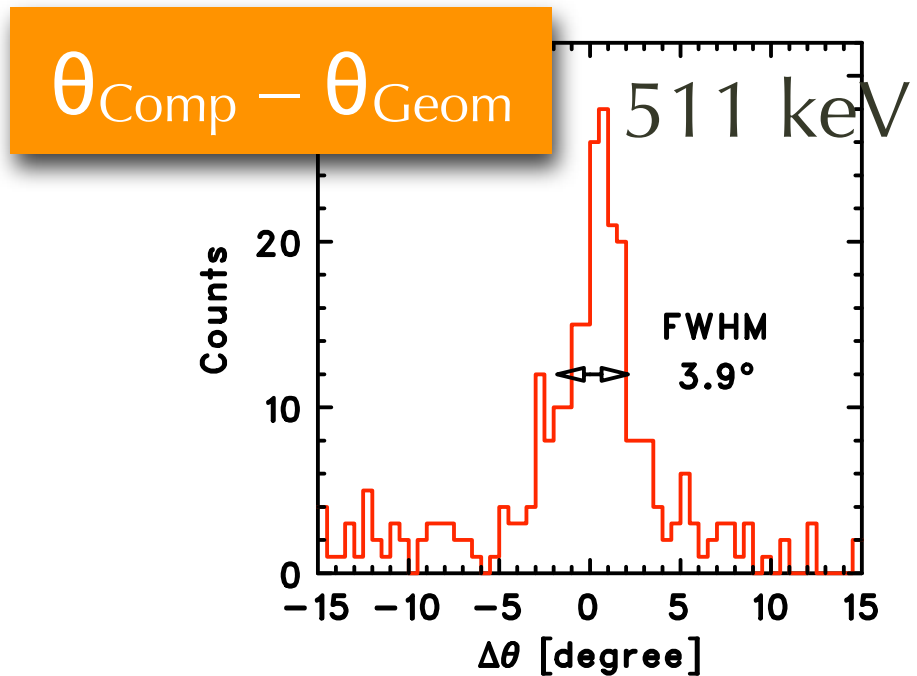
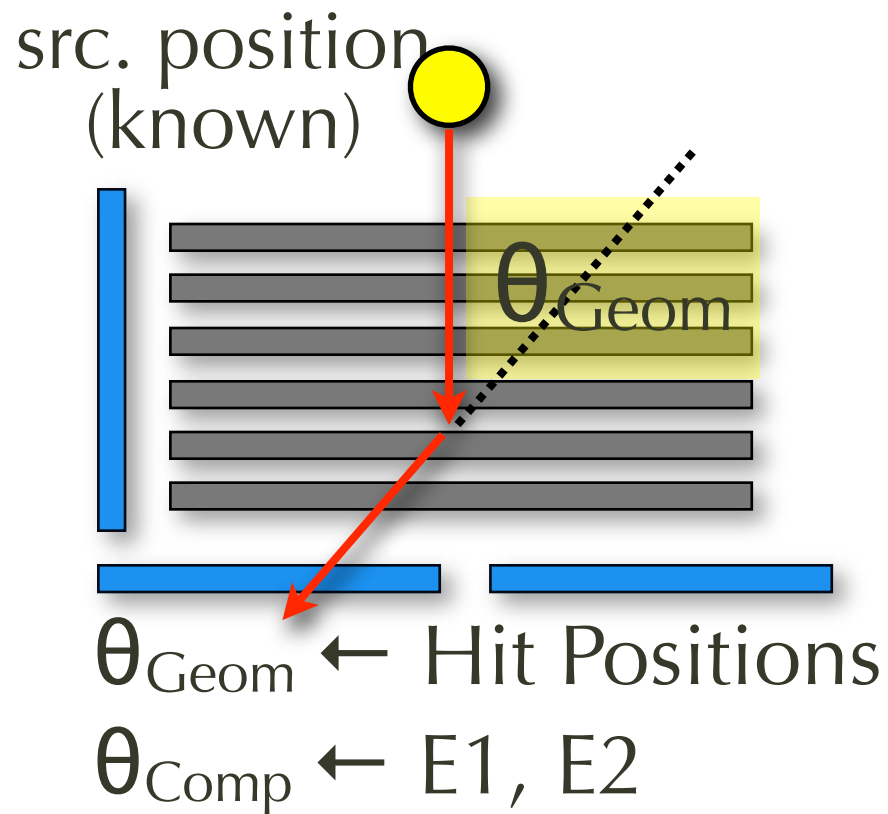
日本の技術の
発信を

検出器の会議で
もっと日本からの
招待講演が増えるように
ならないといけない

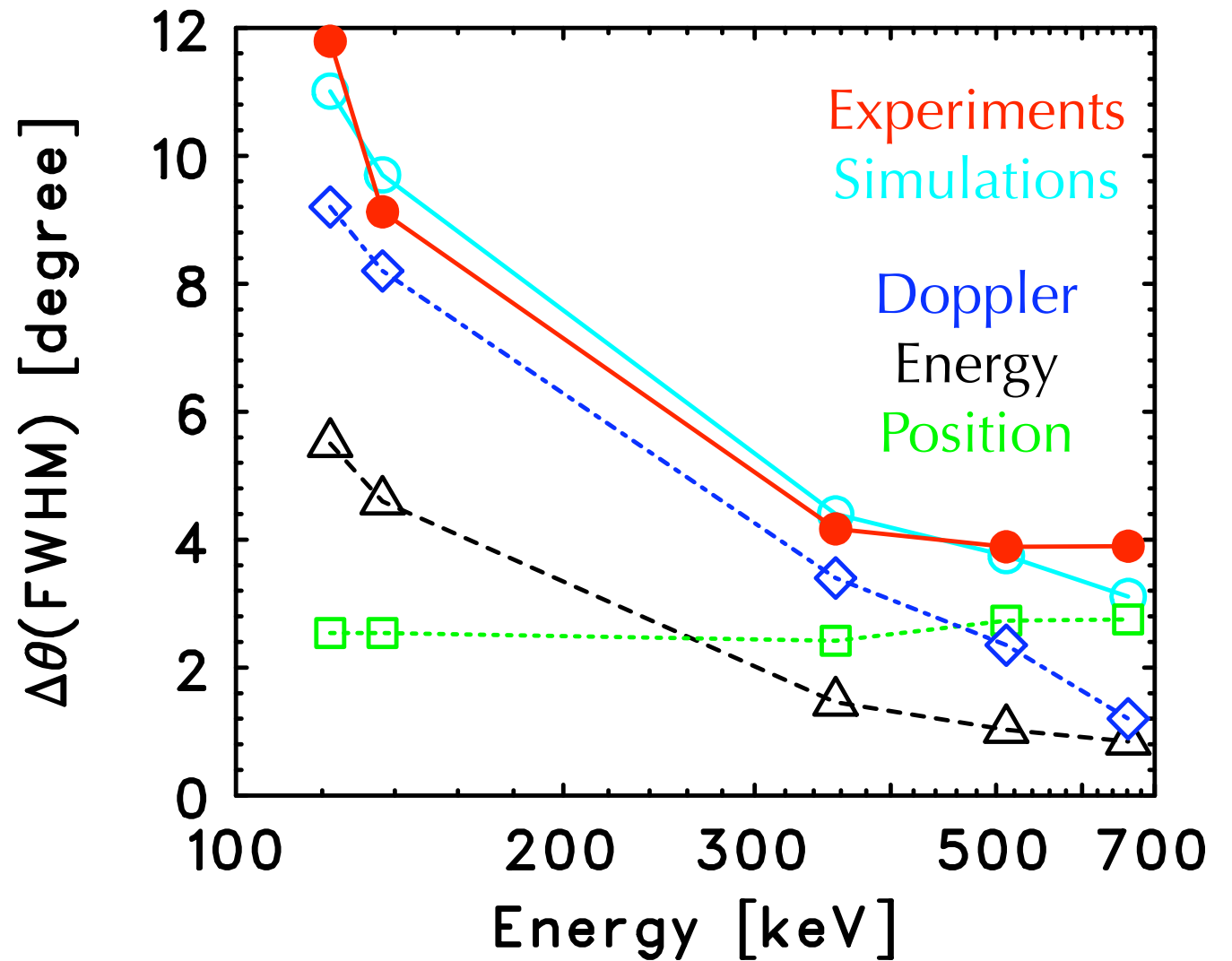
分野横断的
検出器会議
@SLAC

April 3-6, 2006

Angular Resolution



Si/CdTe Compton



CdTe-only Compton

12 degree at 511 keV
(Doppler Limited)
same situation for Ge