

CdTe半導体検出器を用いた ミュオンX線の撮像

Nov. 27, 2020

桂川 美穂

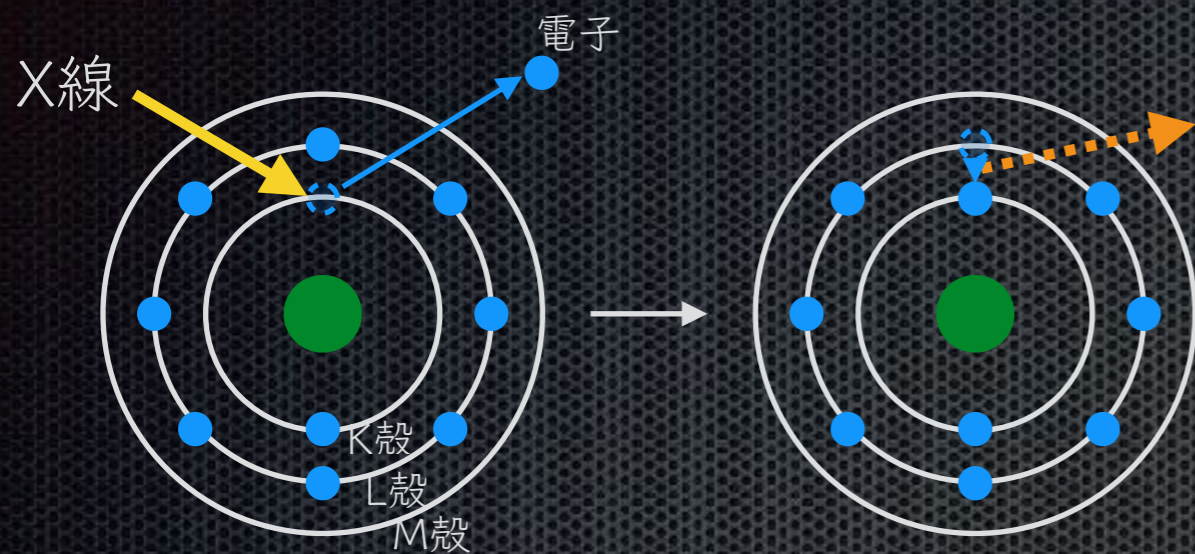
東京大学カブリIPMU

Outline

- * ミュオンX線を用いた非破壊分析の現状と課題
- * CdTe半導体検出器を用いた小型カメラの開発
- * J-PARCにおける実験
- * まとめ

非破壊分析

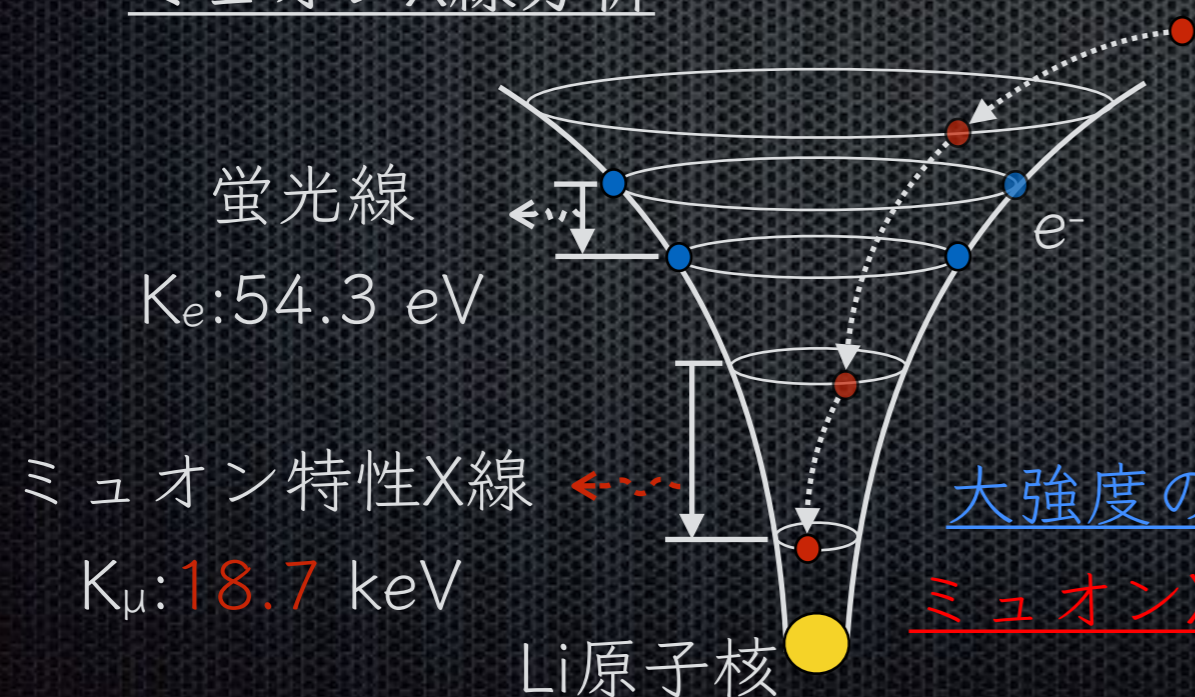
物質にダメージを与えることなく構成元素や量、分布を特定する分析手法
蛍光X線分析 (XRF)



- * 表面の物質
- * $\text{Na} (> 1 \text{ keV})$ よりも原子番号が大きい元素

軽元素からの蛍光X線は、
エネルギーが小さすぎる！！

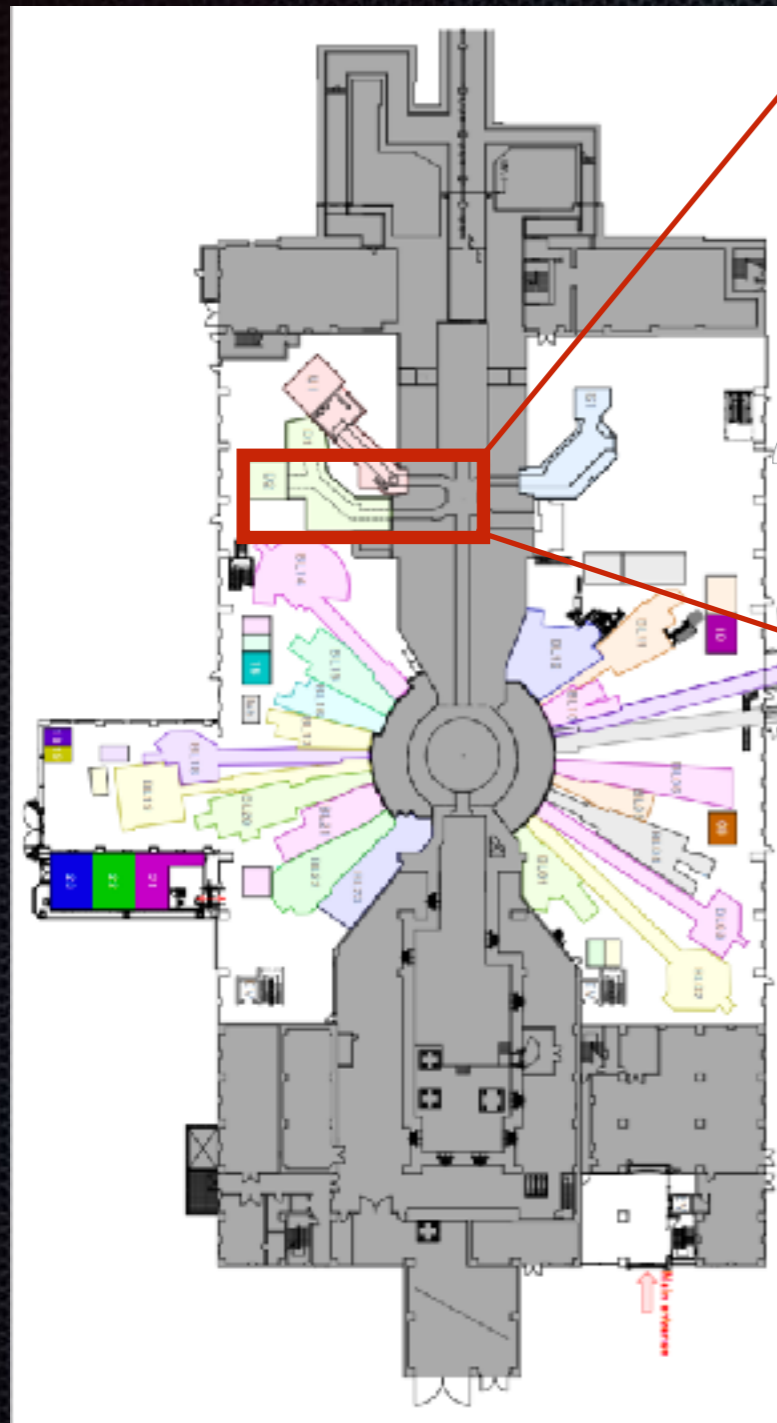
ミュオンX線分析



- μ^- : 負ミュオン
($m_\mu = 207 m_e$)
- * 軽元素の解析 (Li, Be, B, C, N, O, ...)
- * 深層部の解析

大強度の負ミュオンビームと硬X線撮像器があれば、
ミュオンX線を用いた3次元非破壊分析が可能になる。

ミュオンビーム@J-PARC



D2 area@MUSE/J-PARC

Muon Beam Line
Decay/Surface



D2

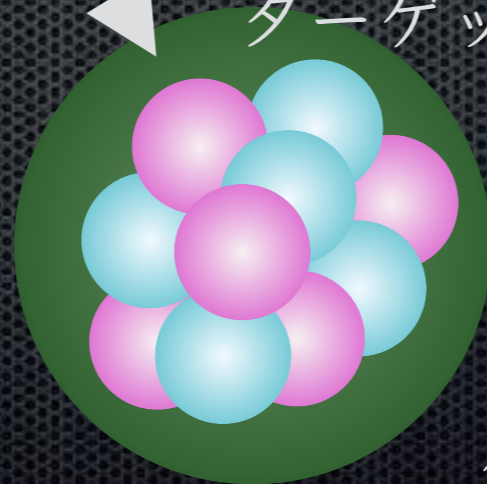
p

Neutron Source

陽子3GeV



グラフィット
ターゲット

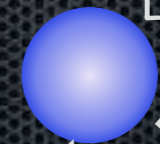


パイ中間子

Life time: 26 ns

ミュオン (10⁻⁶個/s)

Life time: 2.2 μs



電子



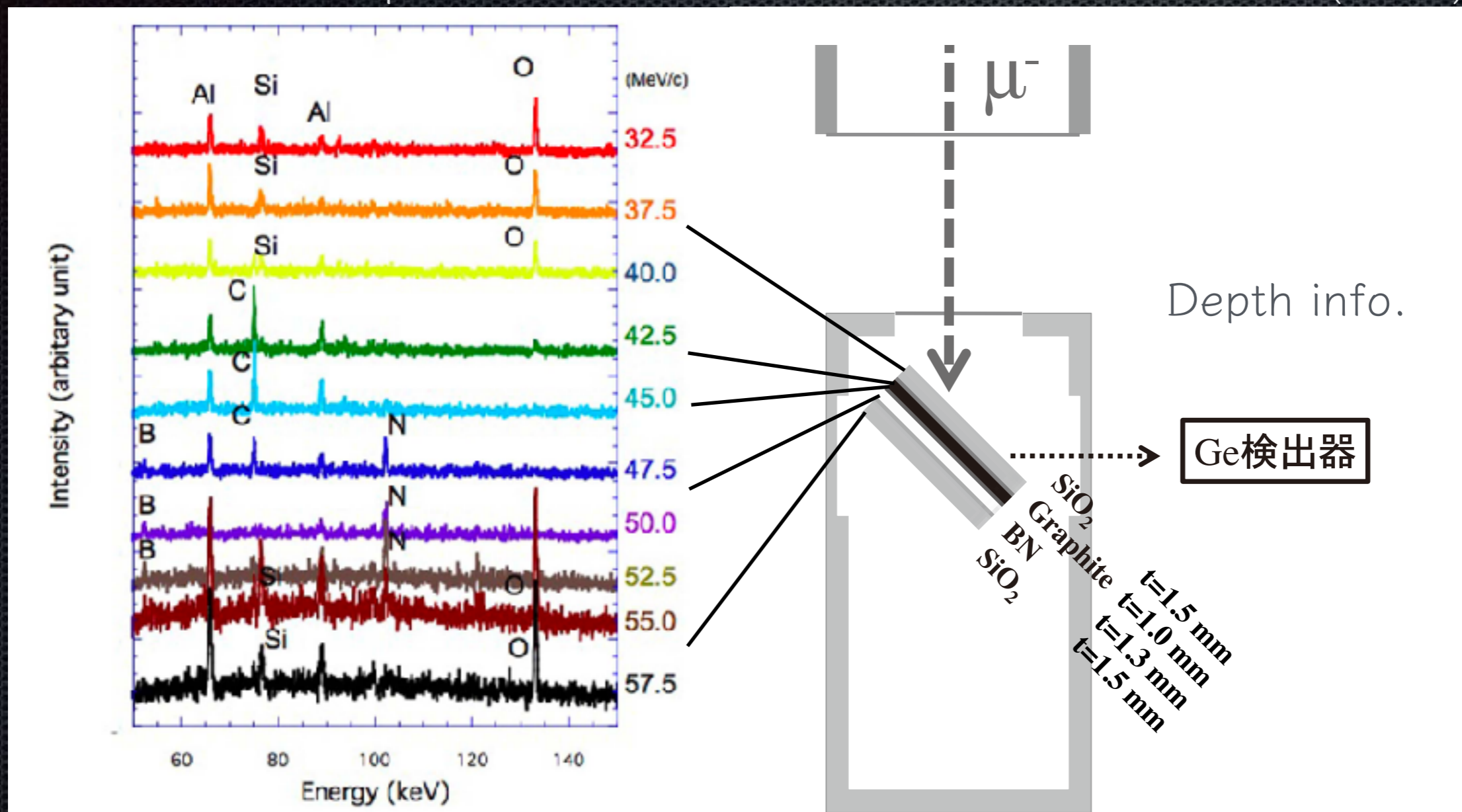
ミューニュートリノ

反電子ニュートリノ

ミュオンX線の1次元測定

Ge spectra

Terada et al. (2014)

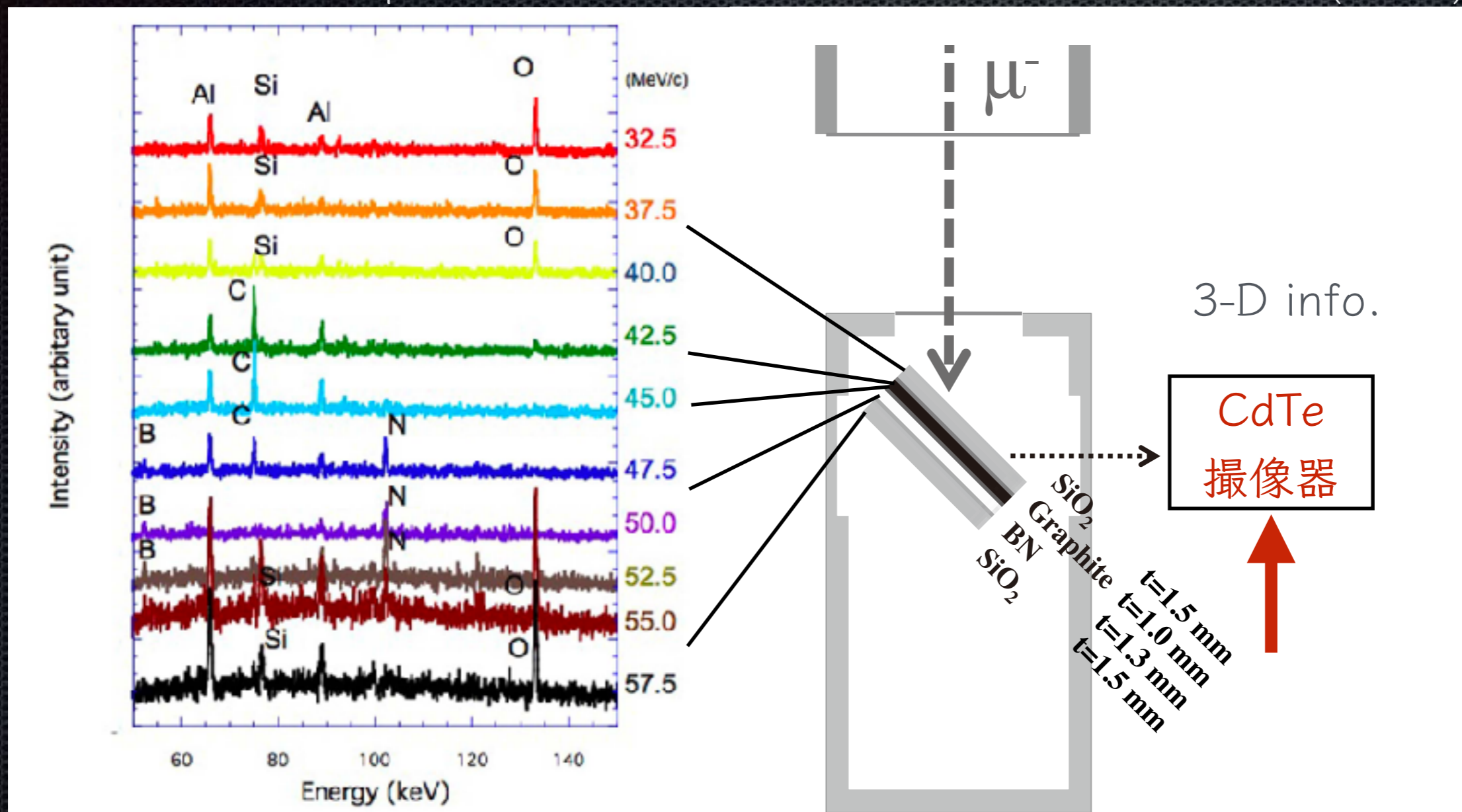


ただし、スペクトル情報のみ！

ミュオンX線の1次元測定

Ge spectra

Terada et al. (2014)



New approach

2次元情報（硬X線撮像）を取り入れて3次元撮像を可能にする。

宇宙観測用CdTe半導体検出器

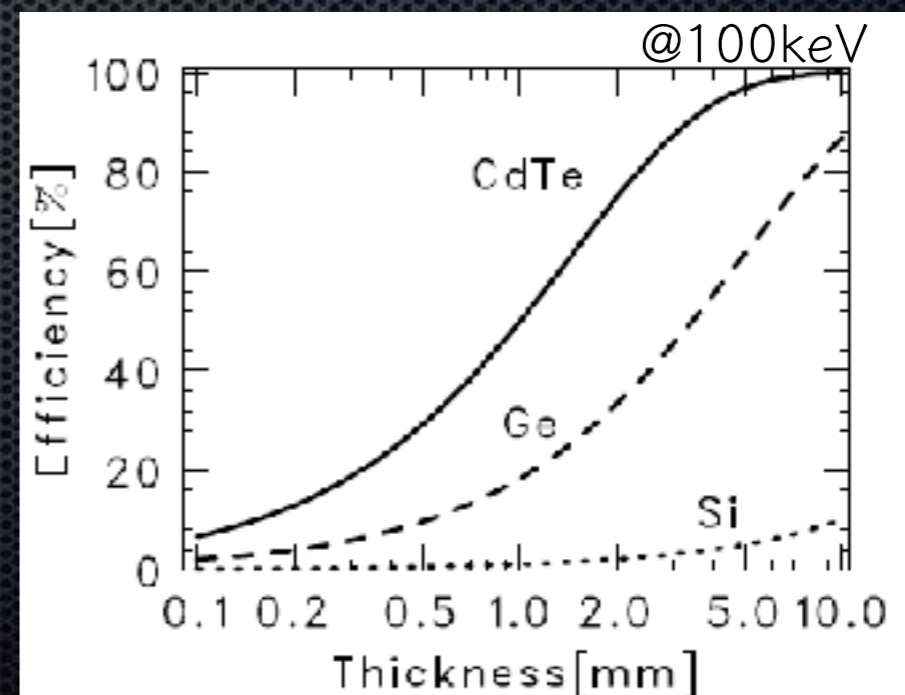
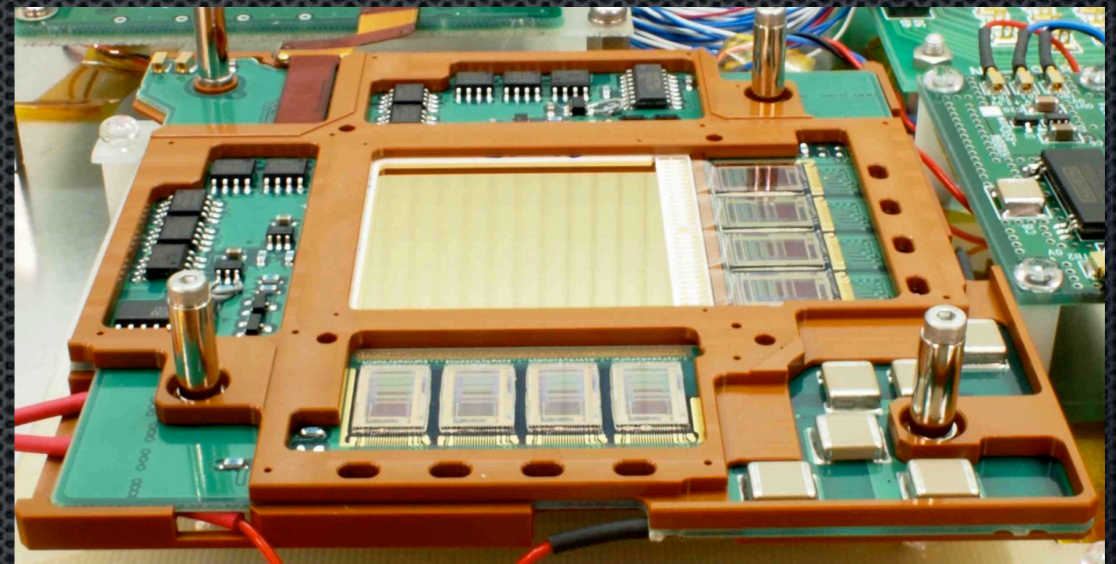
ASTRO-H (ひとみ衛星)



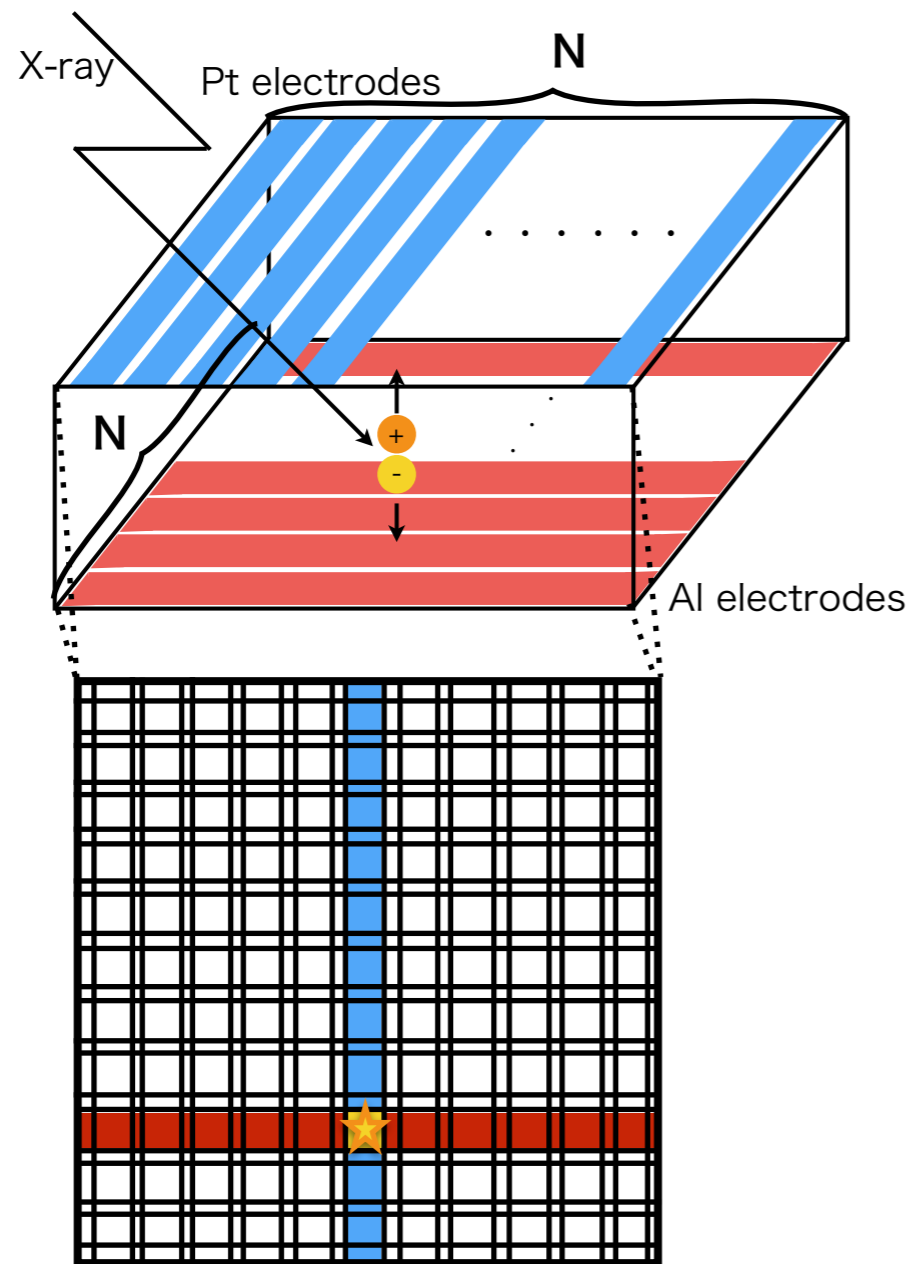
Hard X-ray Imager
(HXI)



両面ストリップ型CdTe検出器
CdTe double-sided strip detector
(CdTe-DSD)



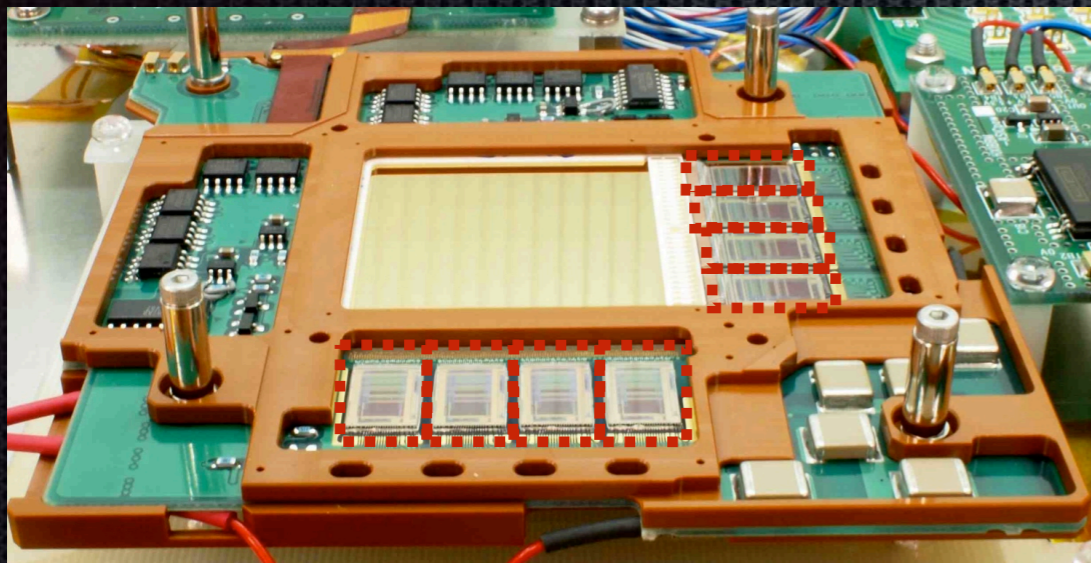
CdTe半導体素子



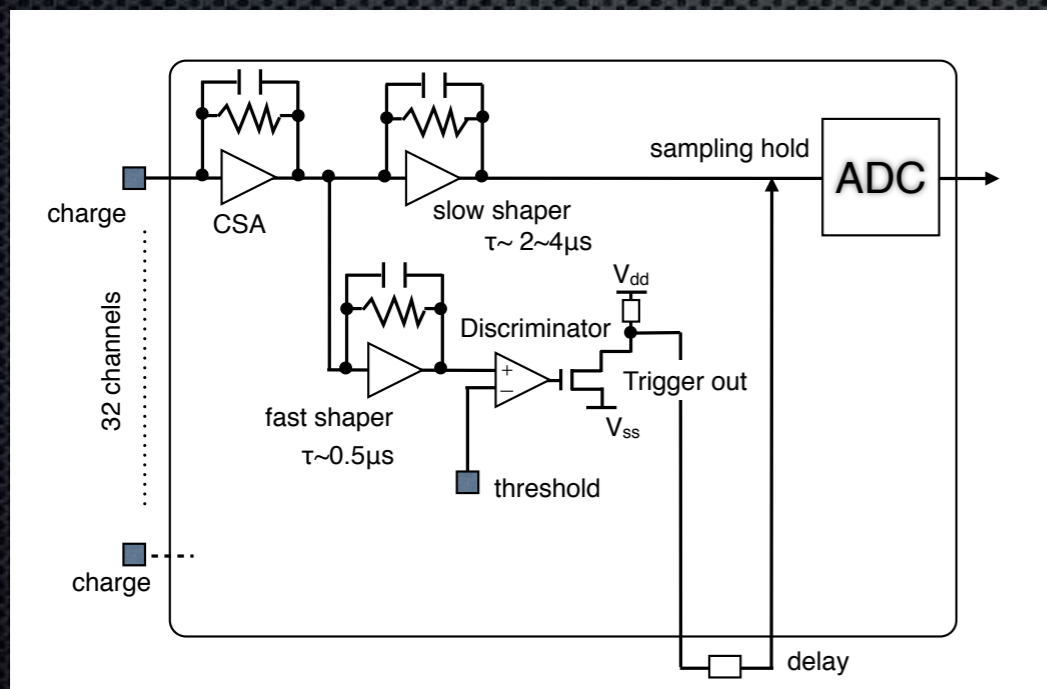
- ▶ At, Ptのストリップ電極を各面に直交する様にとりつけた両面ストリップ型検出器
-> 少ない読み出しチャンネルの減少による小型化
(Strip: $2N$, Pixel: $N \times N$)
- ▶ Al/p-CdTe構造によるCdTeダイオード
-> High energy resolution

ACRORADとの共同開発

読み出しASIC



- 64チャンネル読み出しASICx8
- Fast shaper
トリガーを生成
 $\tau \sim 0.5 \mu s$
- Slow shaper
サンプルホールド
 $\tau \sim \text{約} 2 \mu s$

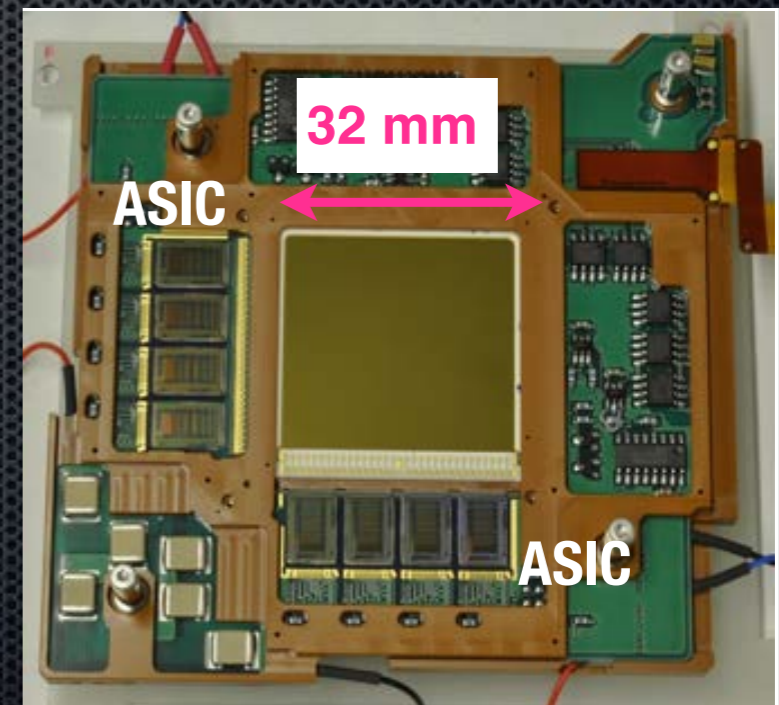
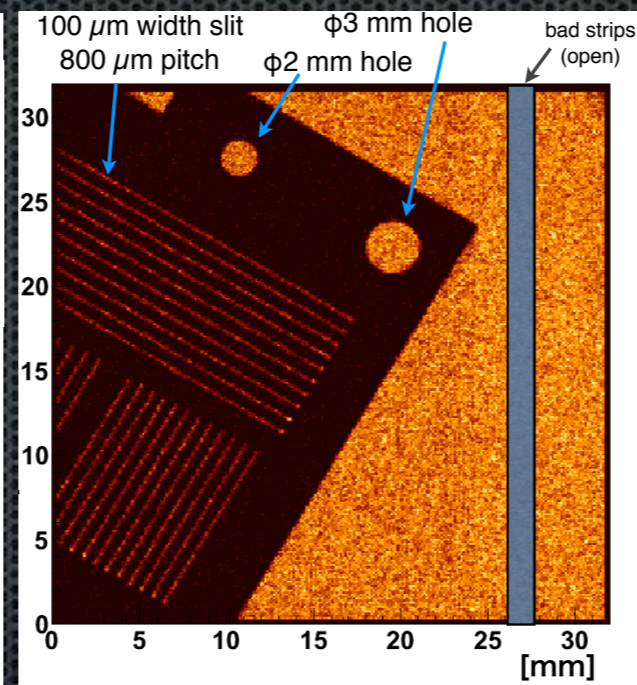
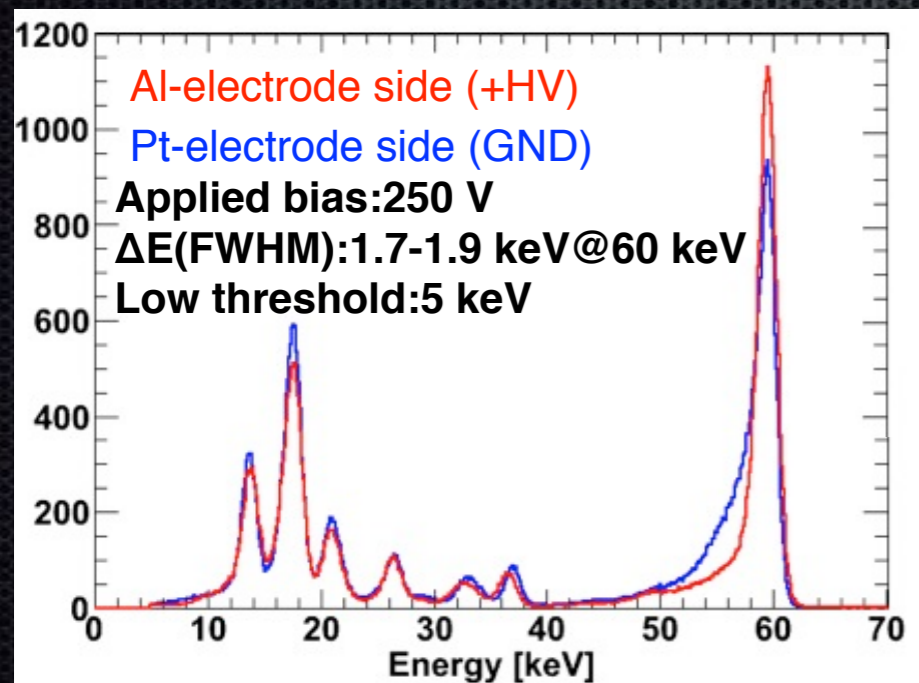


- Internal ADCによってASIC以降は
デジタル信号
Wilkinson type
Common mode Noise Subtraction

Tajima et al. (2010)

CdTe-DSD

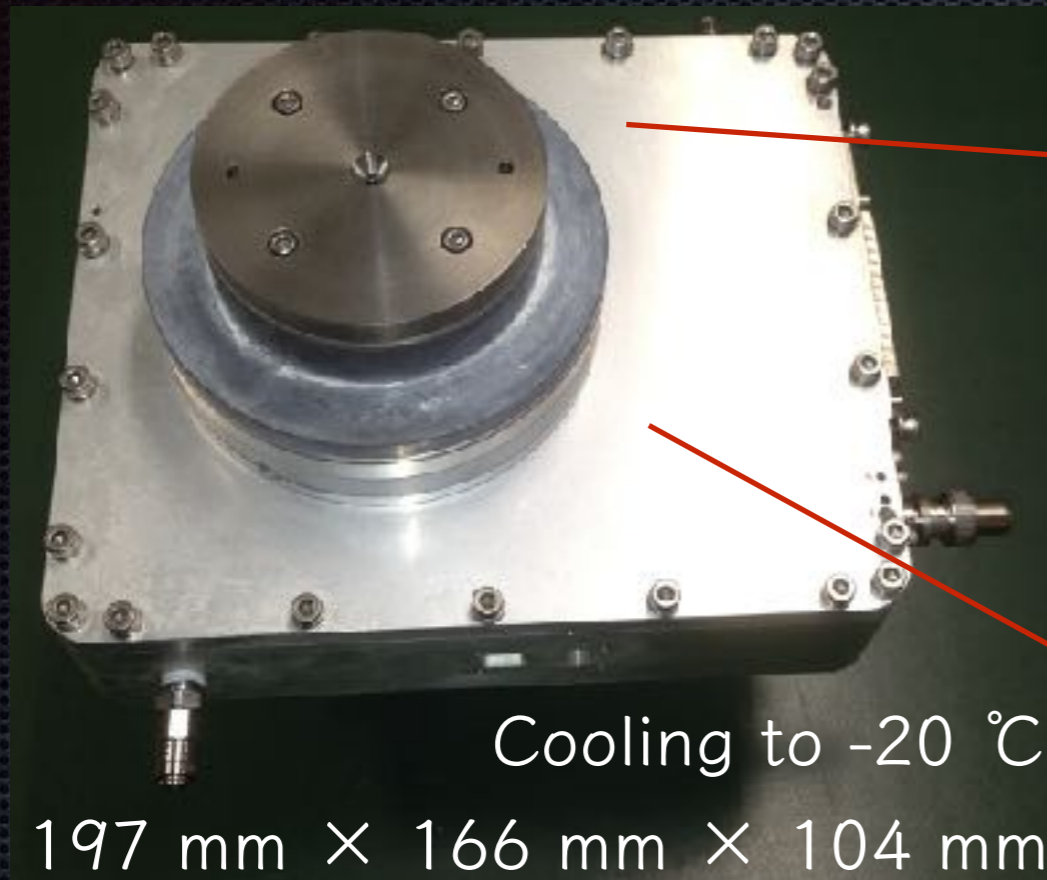
1. 高い検出感度 < 100 keV
2. 高いエネルギー分解能 $\sim 1-2$ keV@60 keV
3. 細かい電極幅 < 250 μm + 広い検出面積 (32 mm x 32 mm)
4. 小型/ 低バックグラウンド



Takahashi et al. 2001, Watanabe et al. 2011 with ACCORD

小型硬X線カメラ

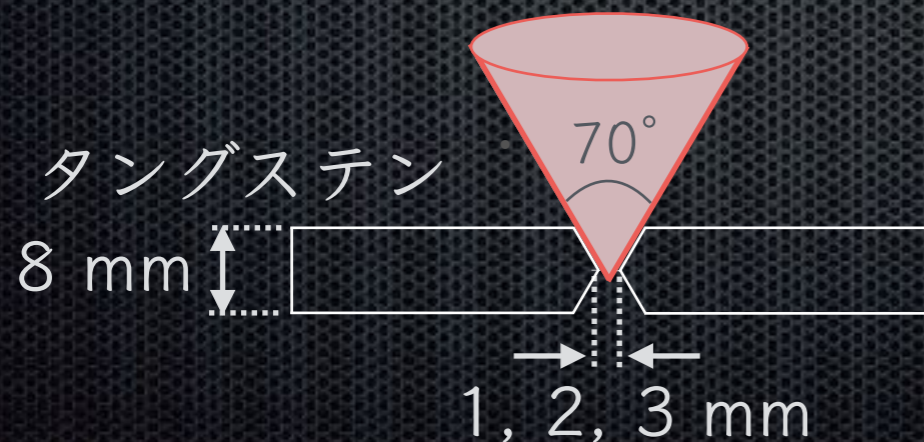
CdTe-DSD + Pinhole optics + Graded-Z shield + Peltier Cooler



CdTe-DSD

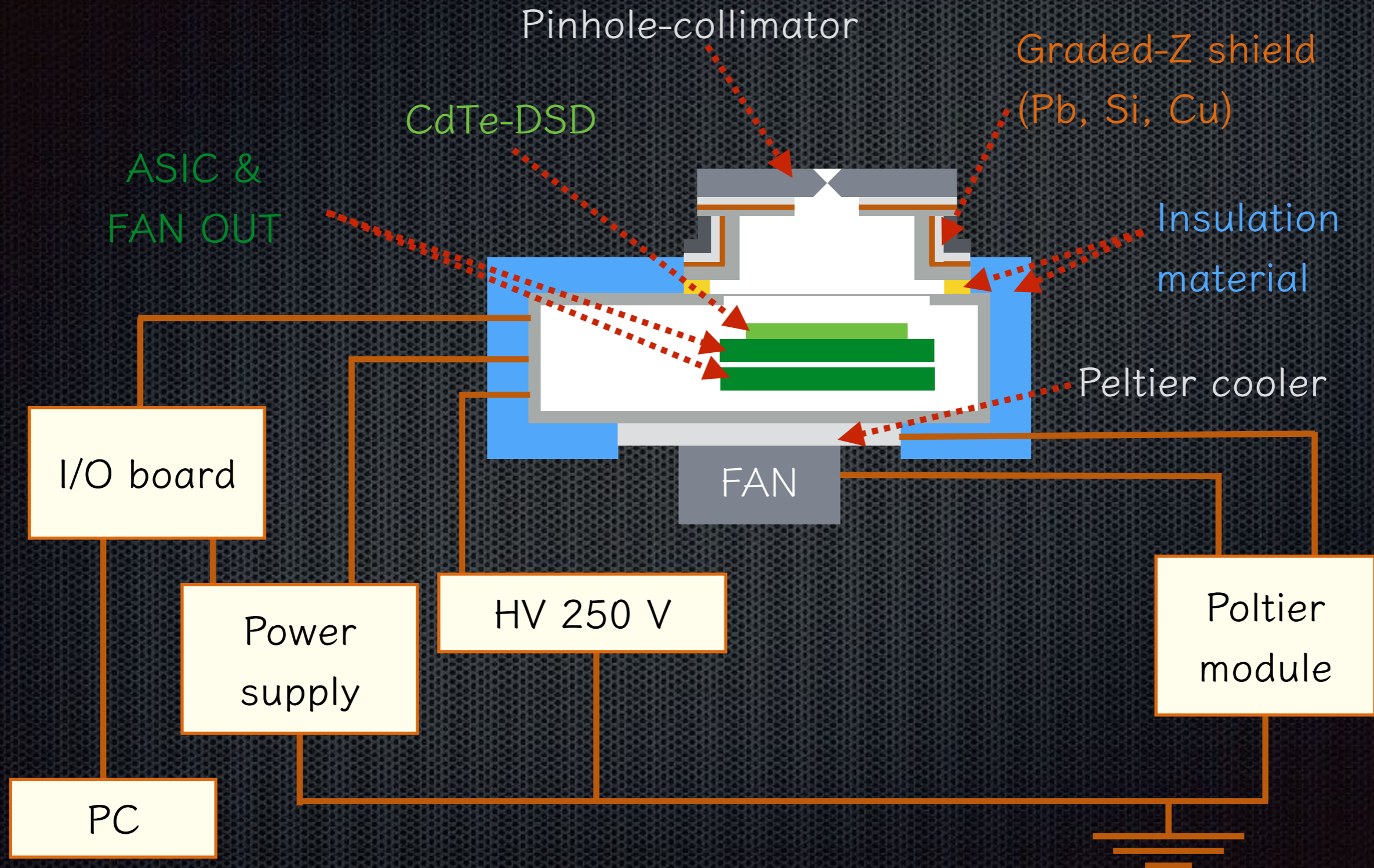


バックグラウンド低減のためのピンホール&シールド



- * ナイフエッジ加工による広視野の確保。
- * 視野外からの硬X線を遮蔽する
グレーデッドZシールド (Pb, Sn, Cu)。

小型硬X線カメラ

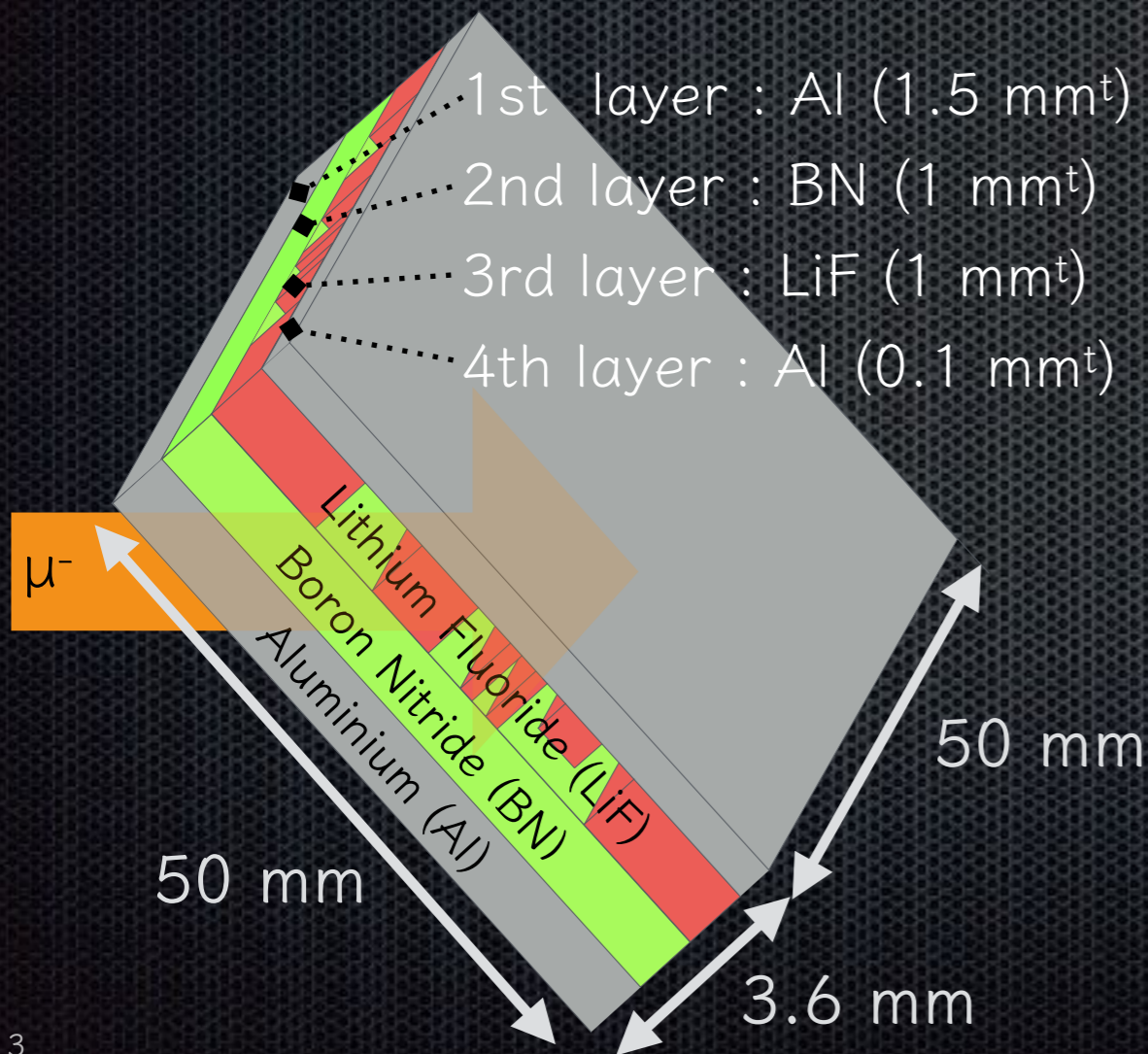
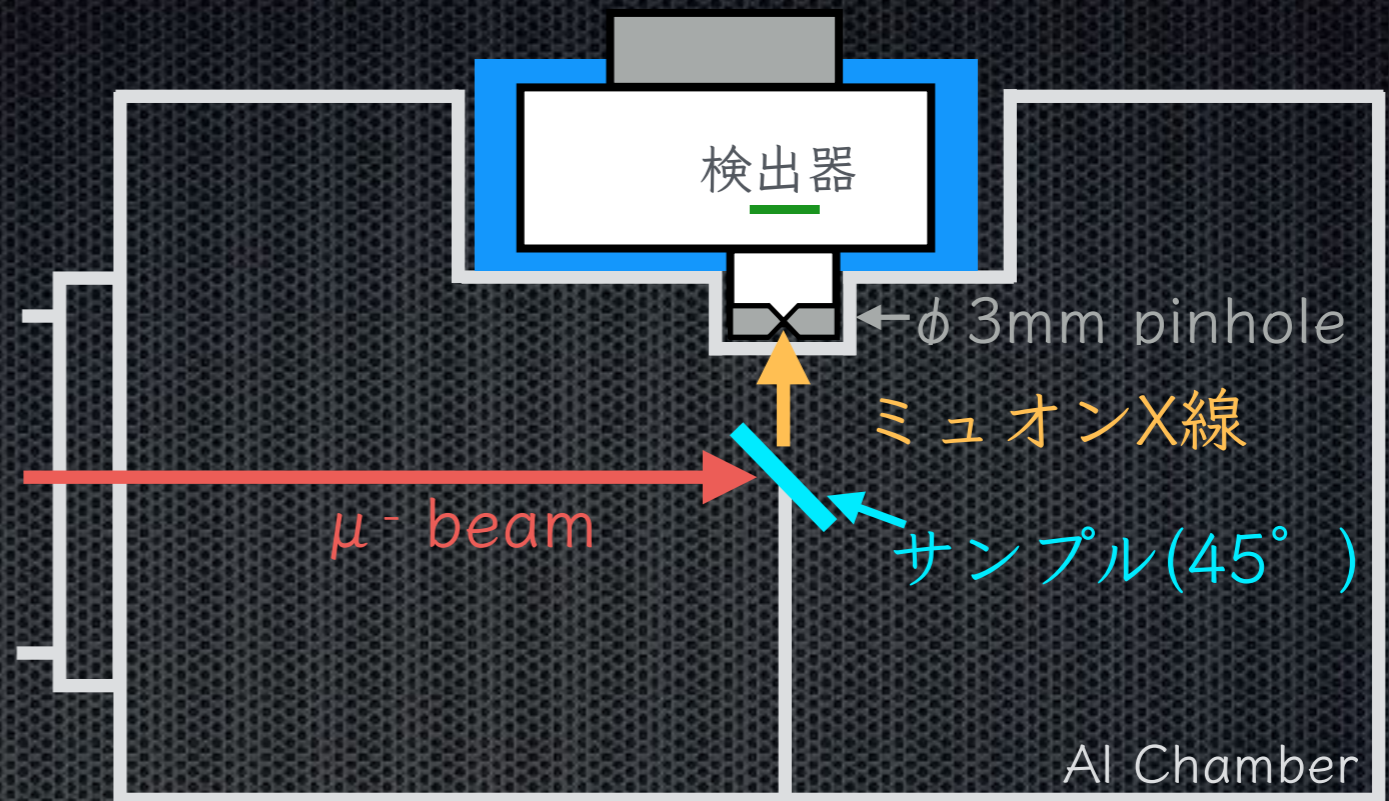


Setup

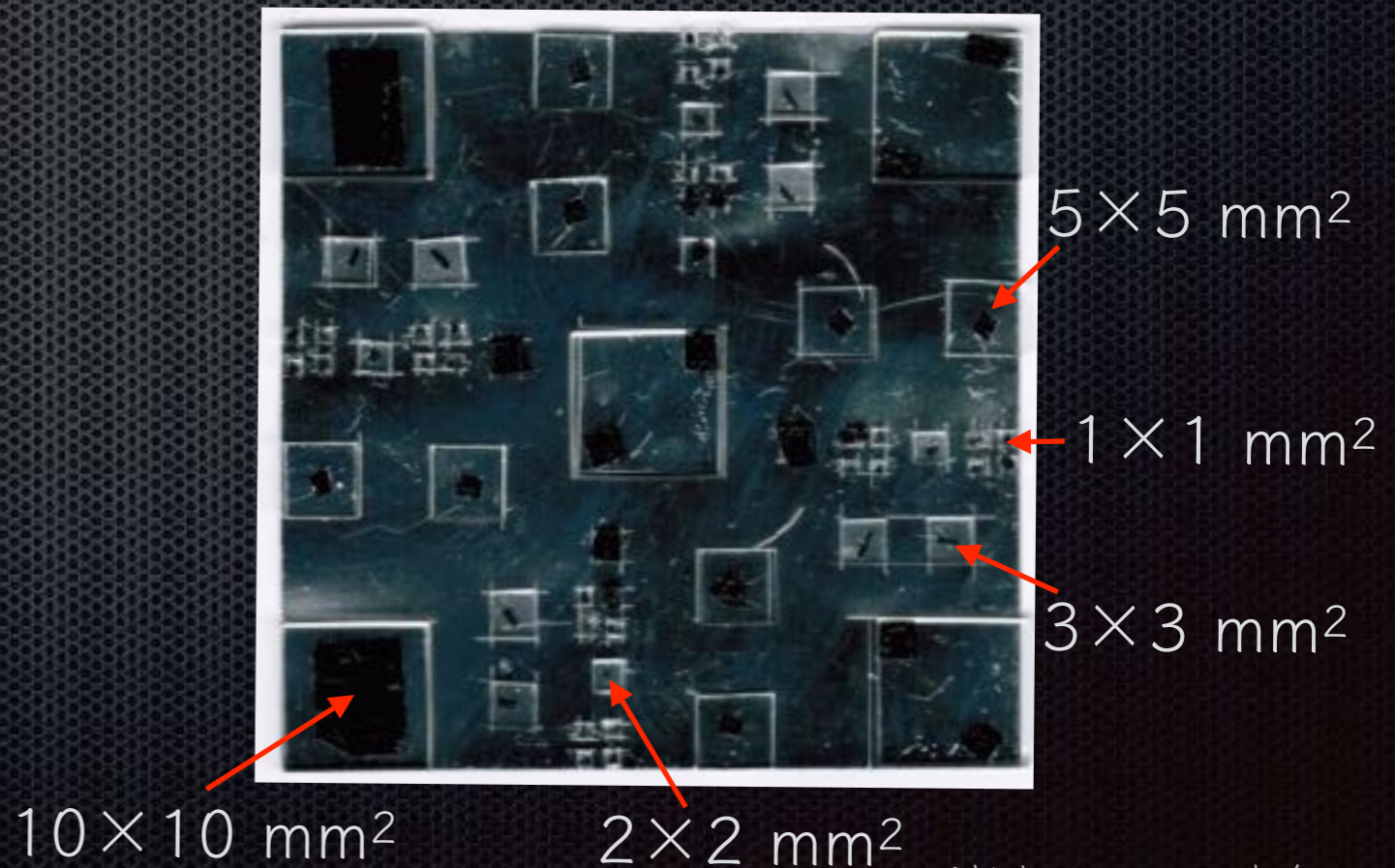
μ^- -beam運動量

45, 50 MeV/c

Al/BN/Al サンプル

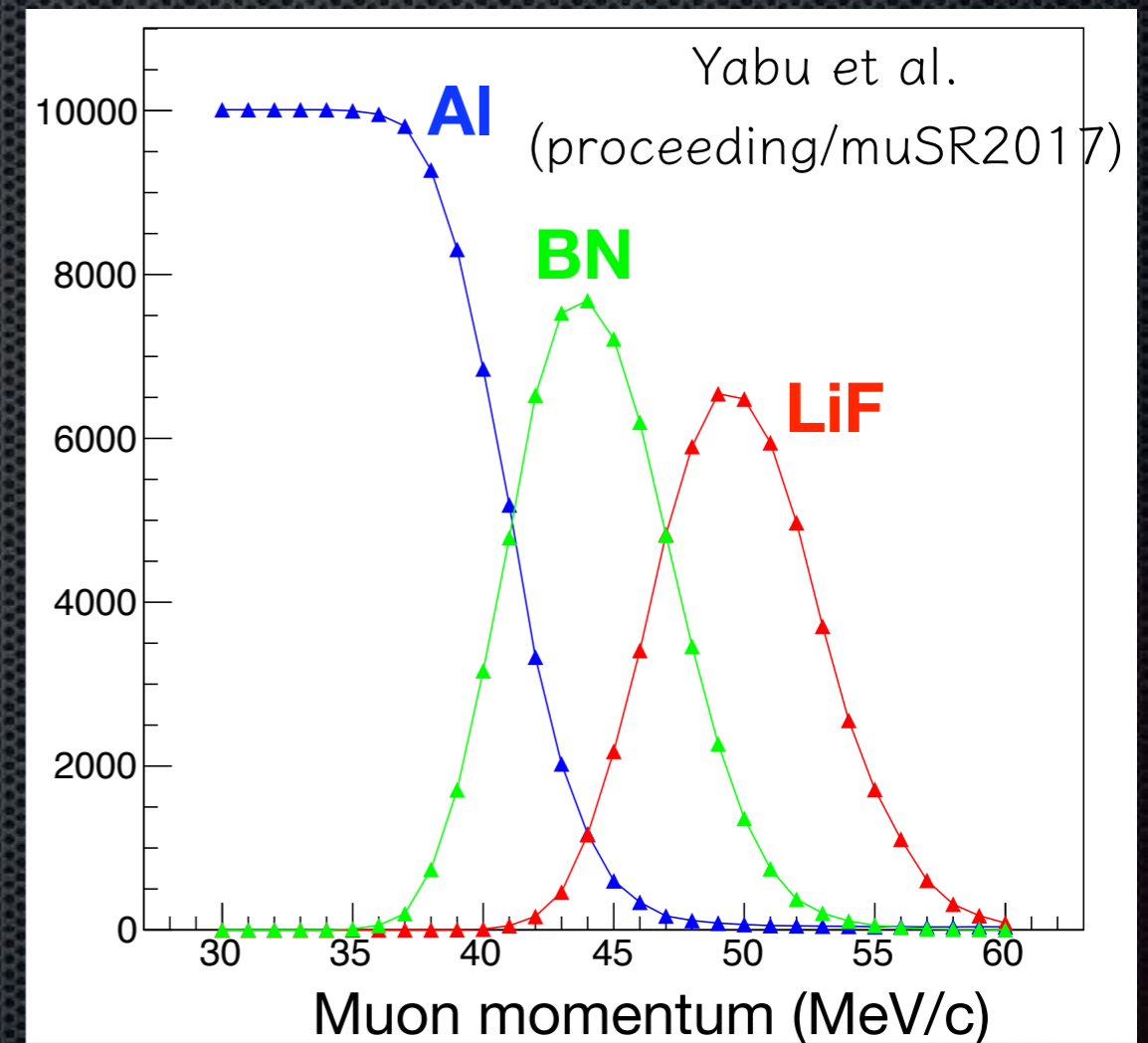
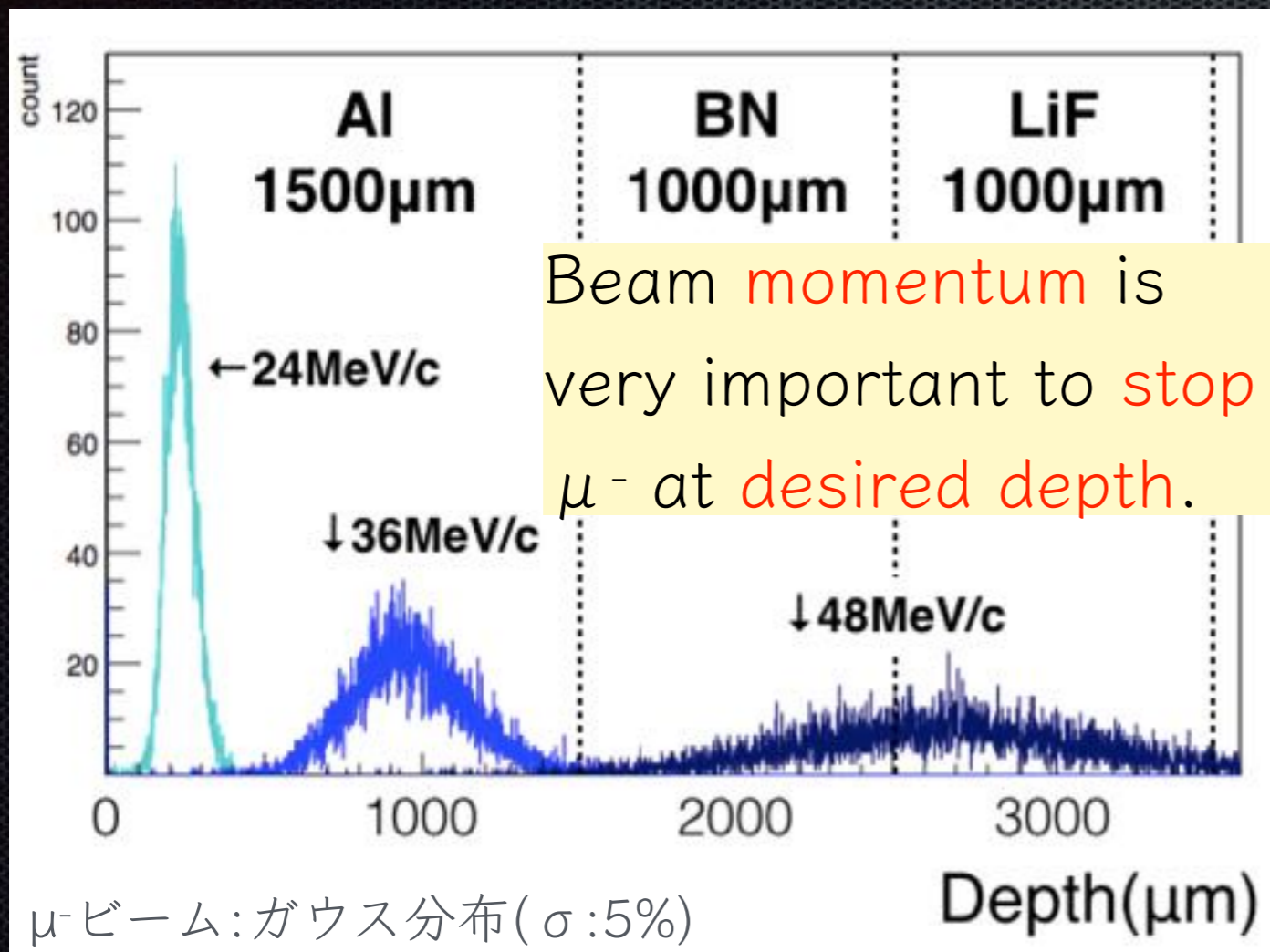


<< LiFの配置 >>



Momentum control

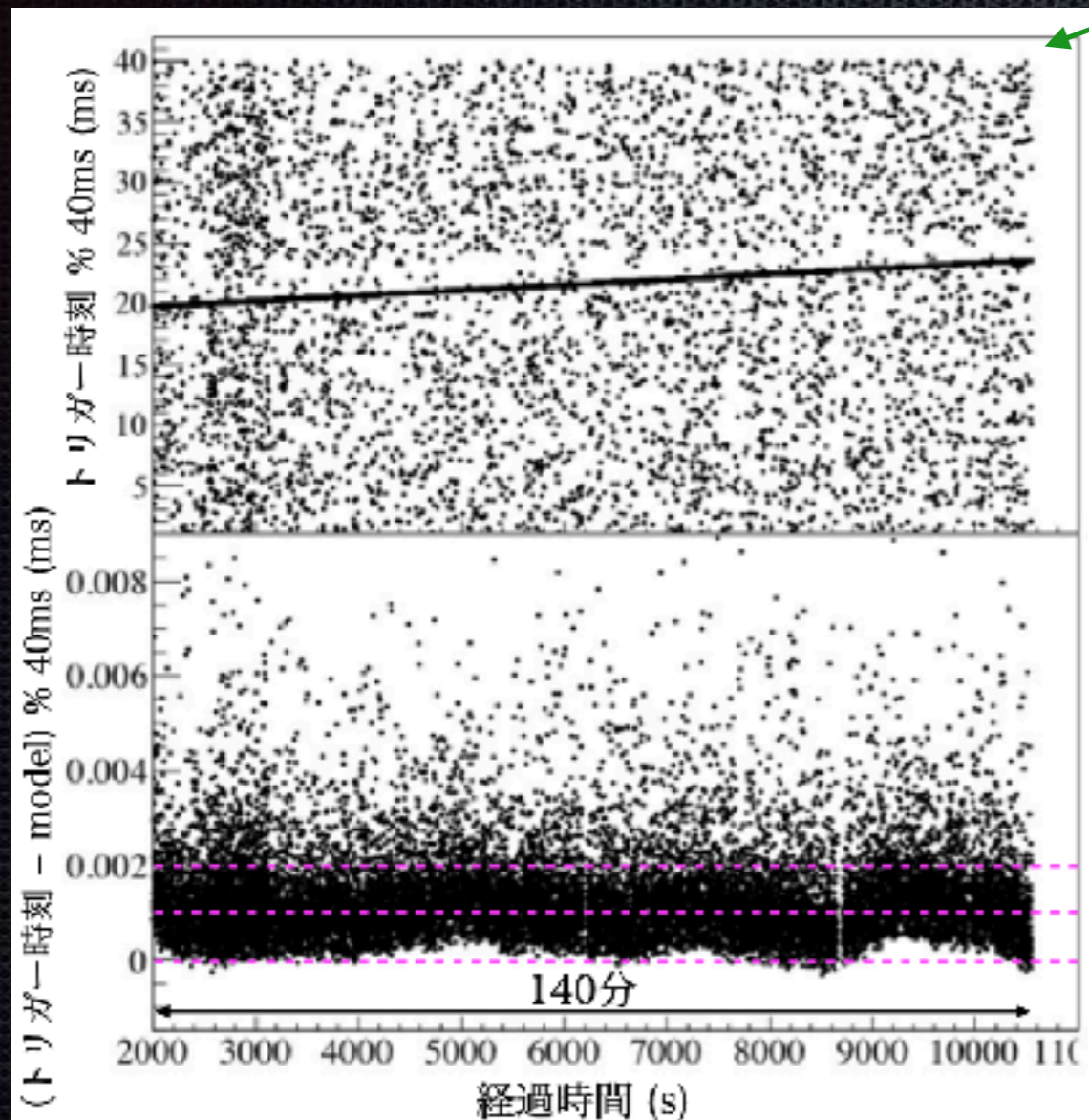
シミュレーション (TRIM) によって物質中の負ミュオンの停止位置を計算し、運動量を決定する。(TRIM : A MonteCarlo simulator built in SRIM)



各層に負ミュオンが最大量停止する運動量を採用 (e.g., LiFは50 MeV/c)。

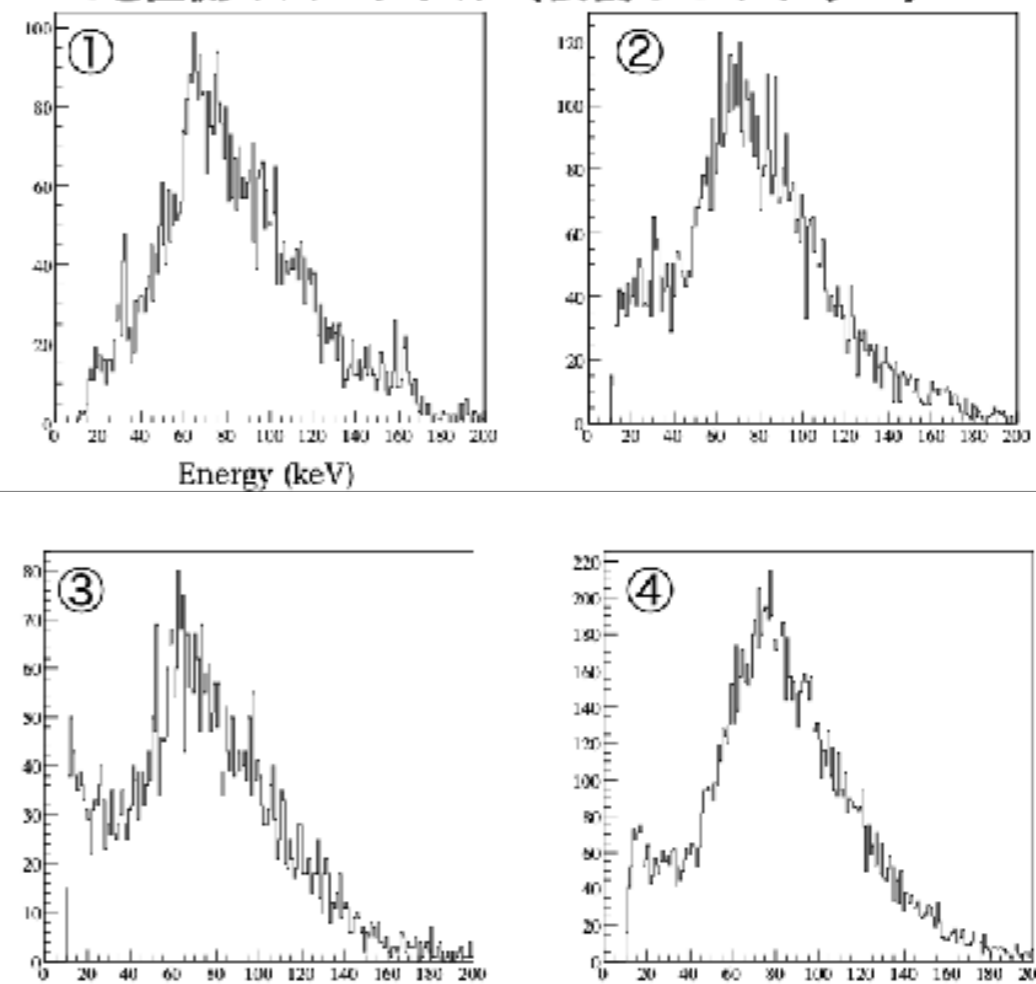
ビームの時間依存性

ビームの25Hz (40ms) に由来するイベントを確認。ただし40ms+ α 。



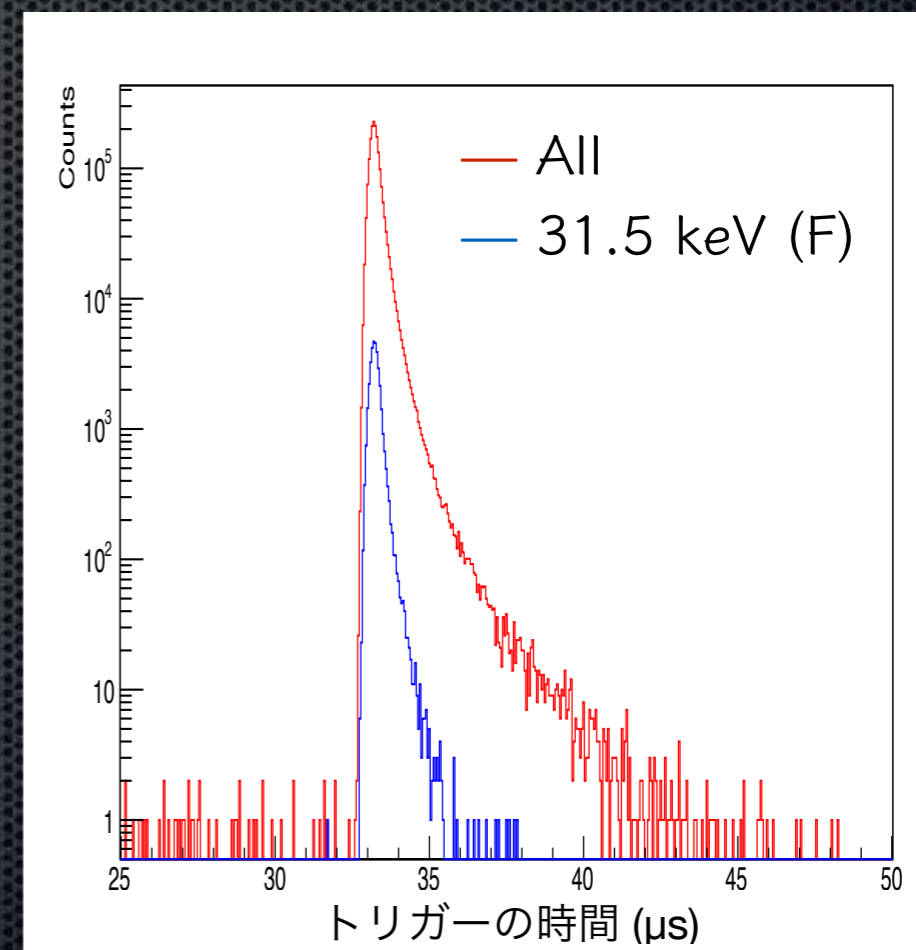
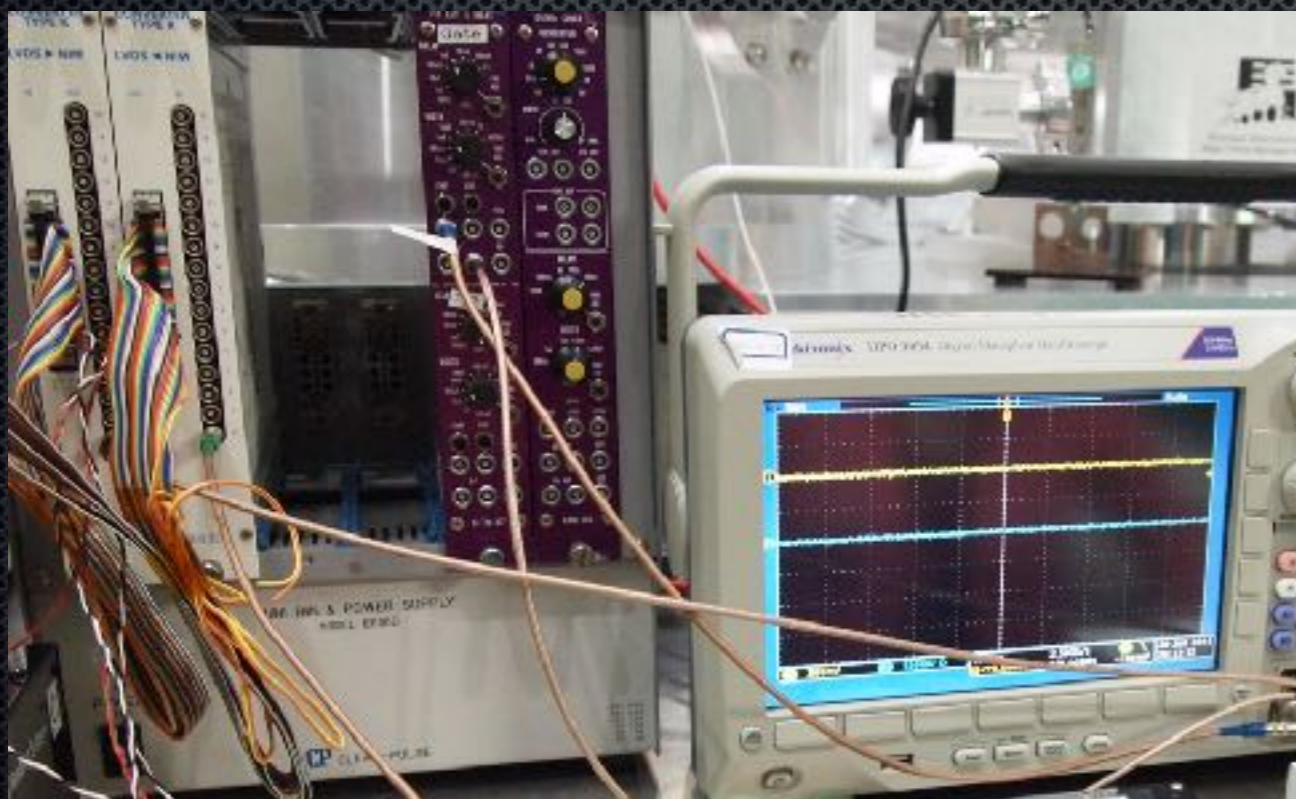
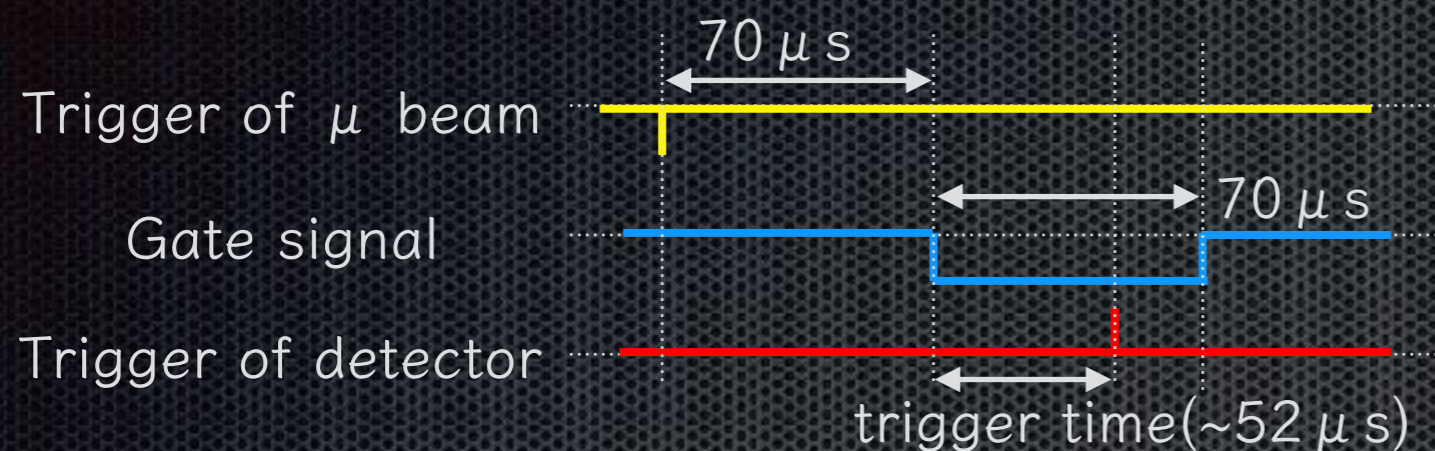
- ④ 20-40 μ s
- ③ 2-20 μ s
- ② 1-2 μ s
- ① 0-1 μ s

• Pt電極側のスペクトル (表裏1ヒットずつ)

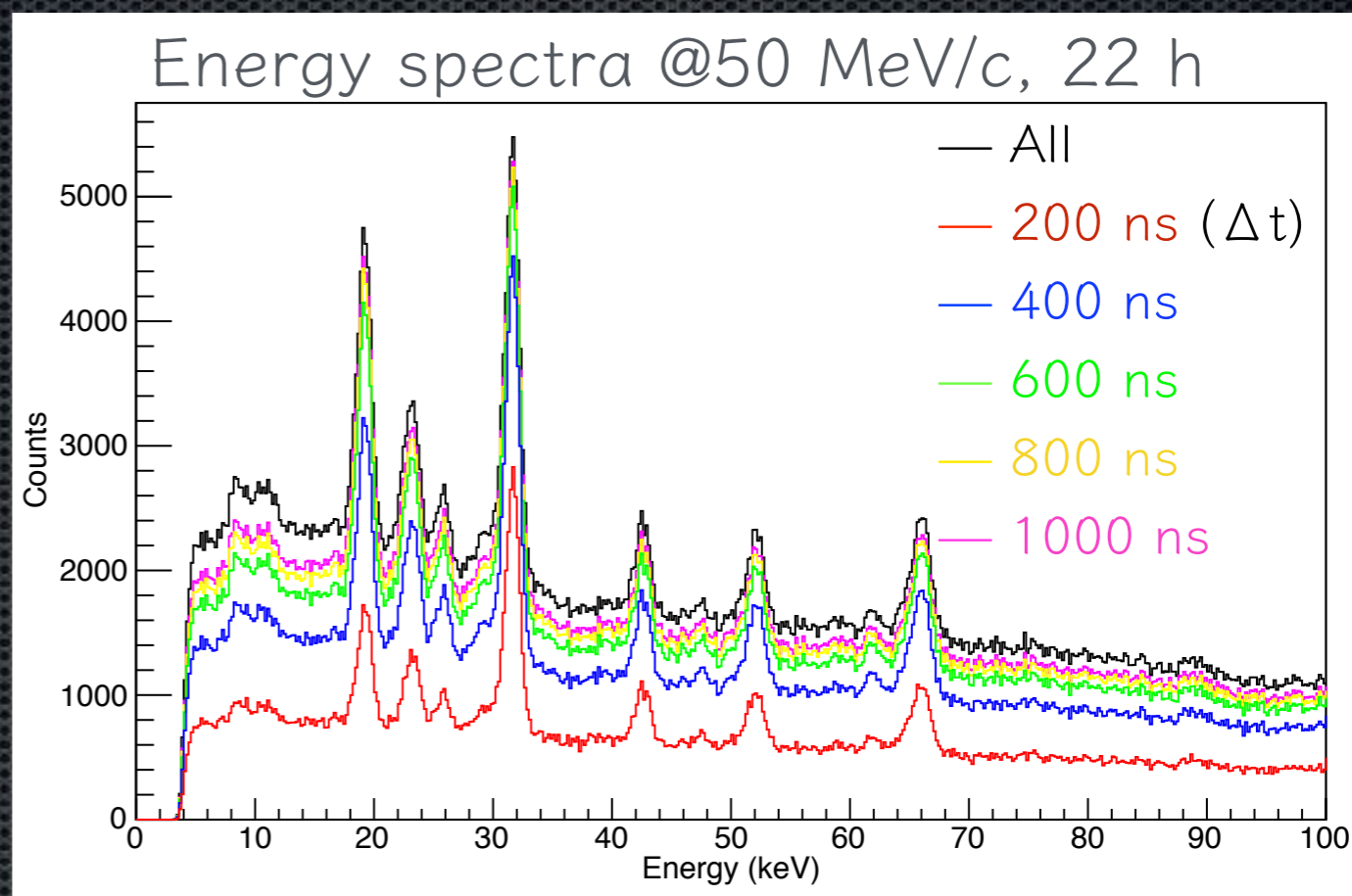
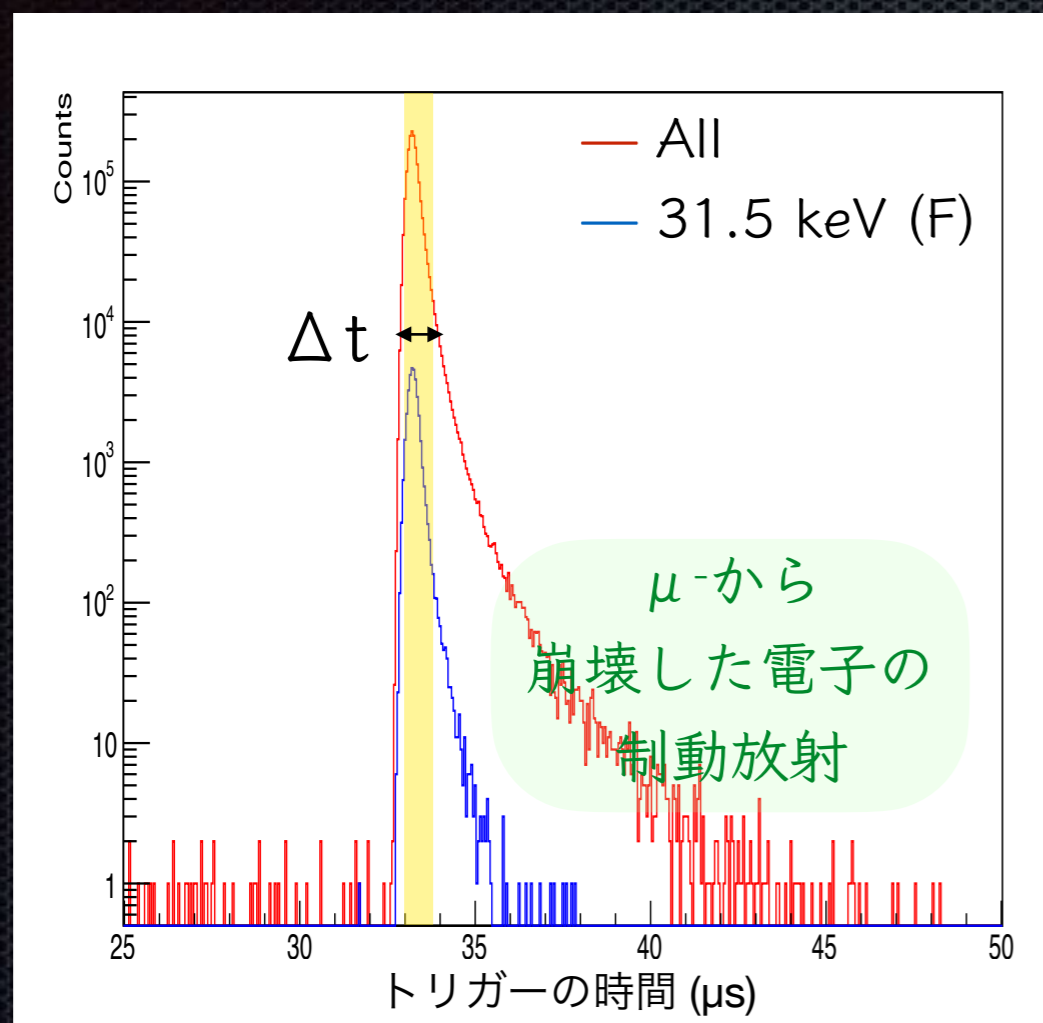


ビームの時間依存性

ビームラインからのゲート信号を用いて
イベント毎にトリガーの時間を記録。



ビームの時間依存性

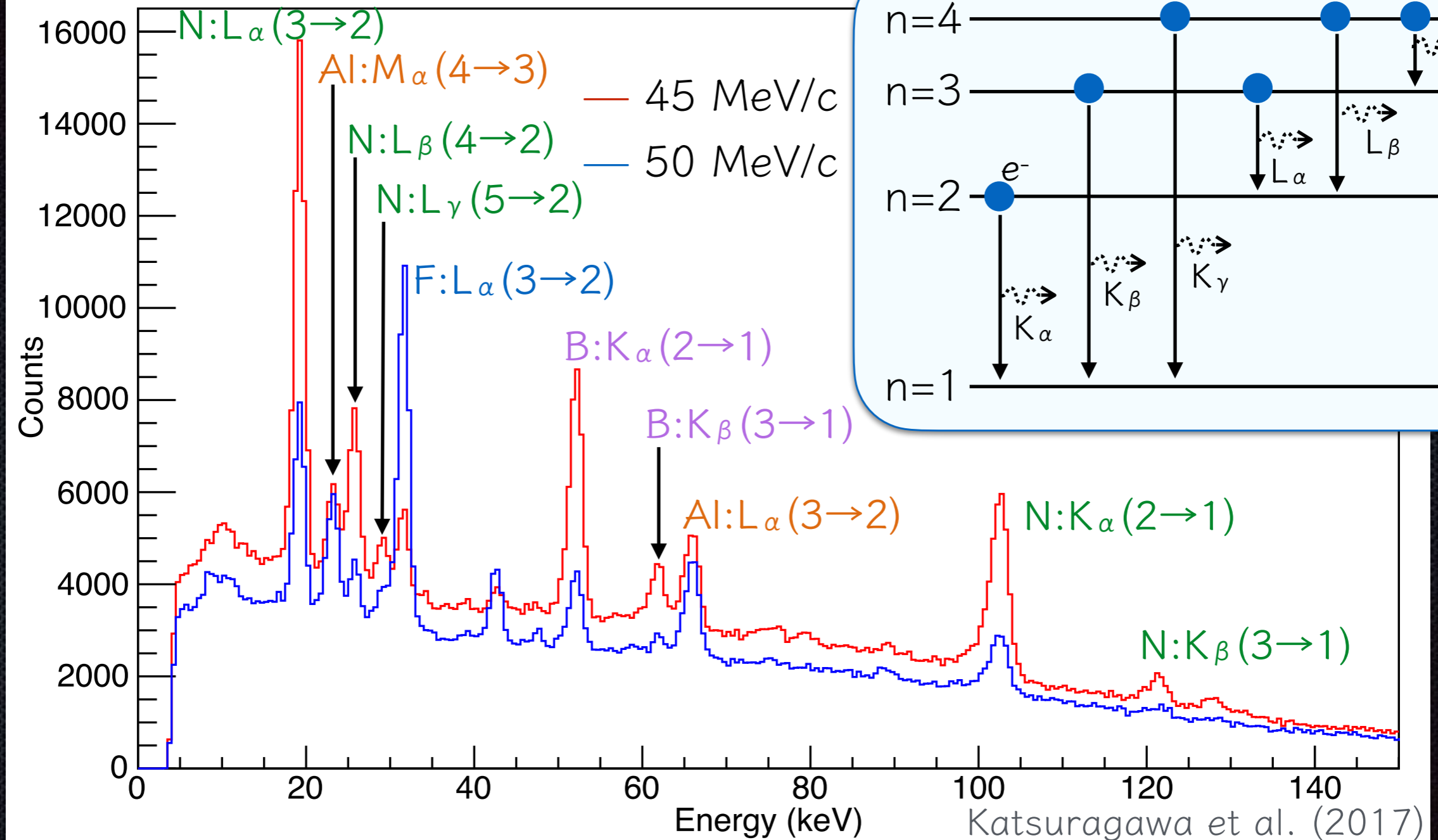


Δt を指定することで、連続成分のみを減らすことができる。

→ 400 ns

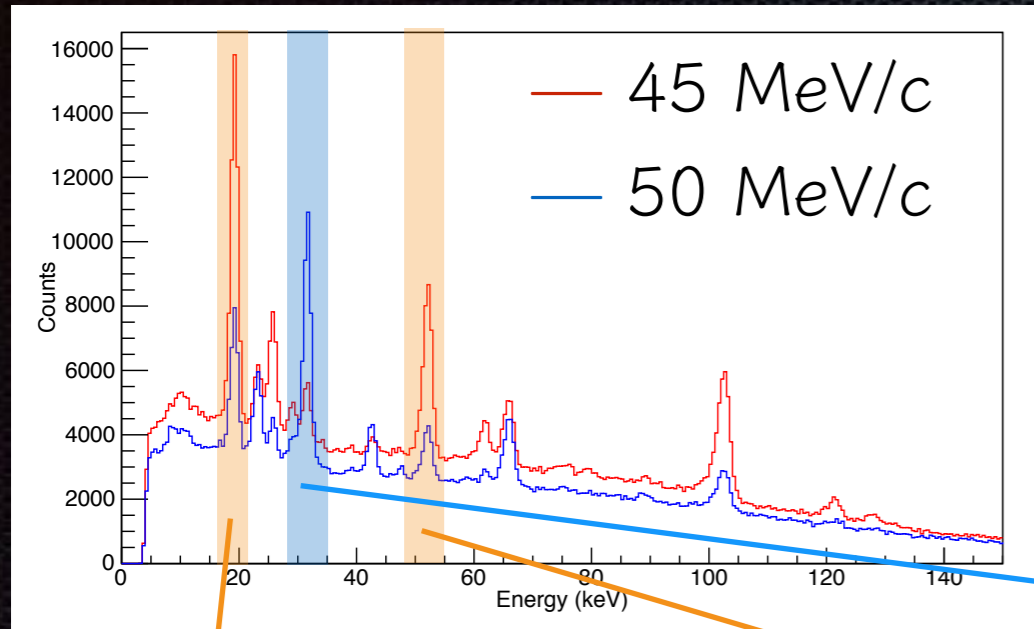
→ 現在は2バンチなので、2箇所 Δt_1 , Δt_2 を使用

ミュオンX線の検出と同定



各層からのミュオンX線を検出 (B, N, F)。

ミュオンX線イメージ



BNサンプル
50 x 50 mm

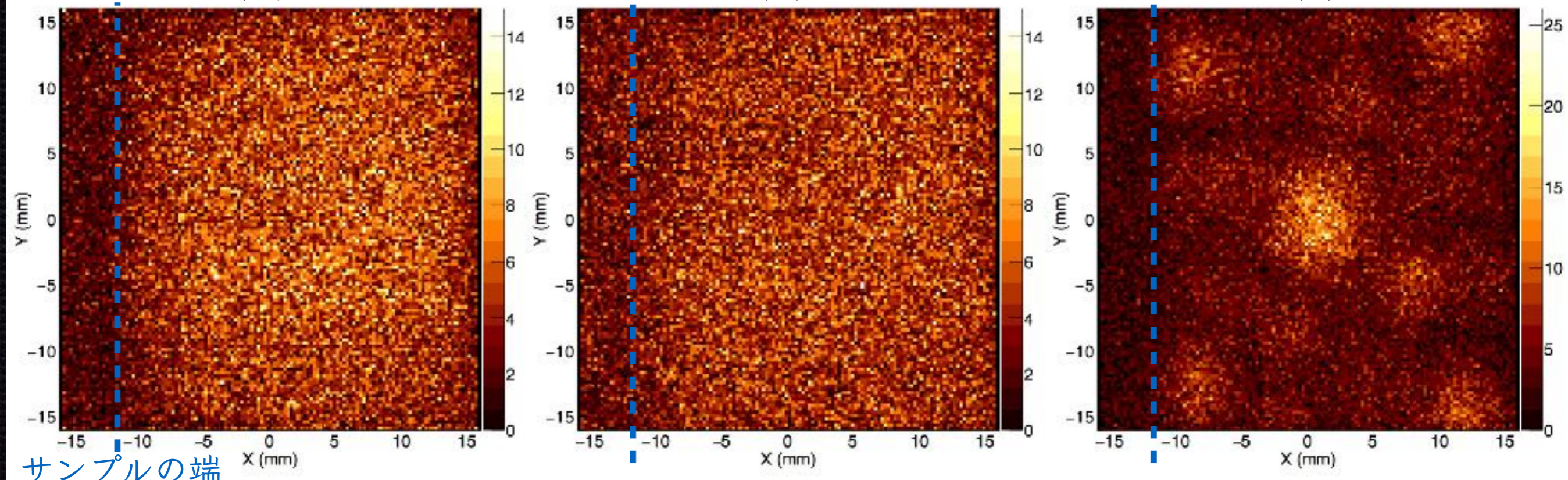
LiFサンプル
1x1 ~ 10x10 mm

Katsuragawa et al. (2017)

19.0 keV(N)@45 MeV/c

52.3 keV(B)@45 MeV/c

31.5 keV(F)@50 MeV/c

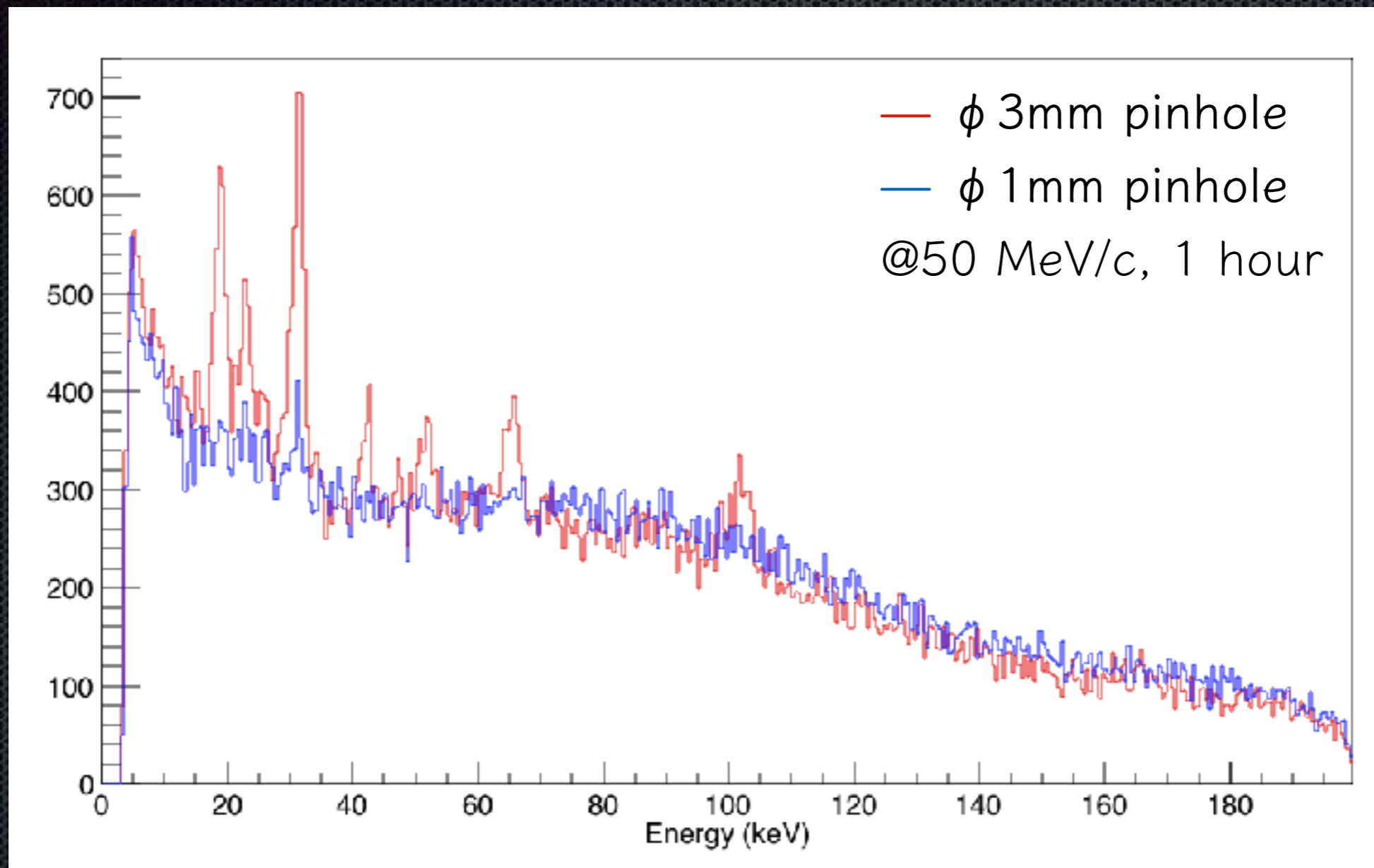


サンプルの端

各層のイメージングに成功。ただし、長時間の撮像が必要。

Background study

バックグラウンドのピンホール径への依存性を検証



連続成分とピンホール径に関係性はない。

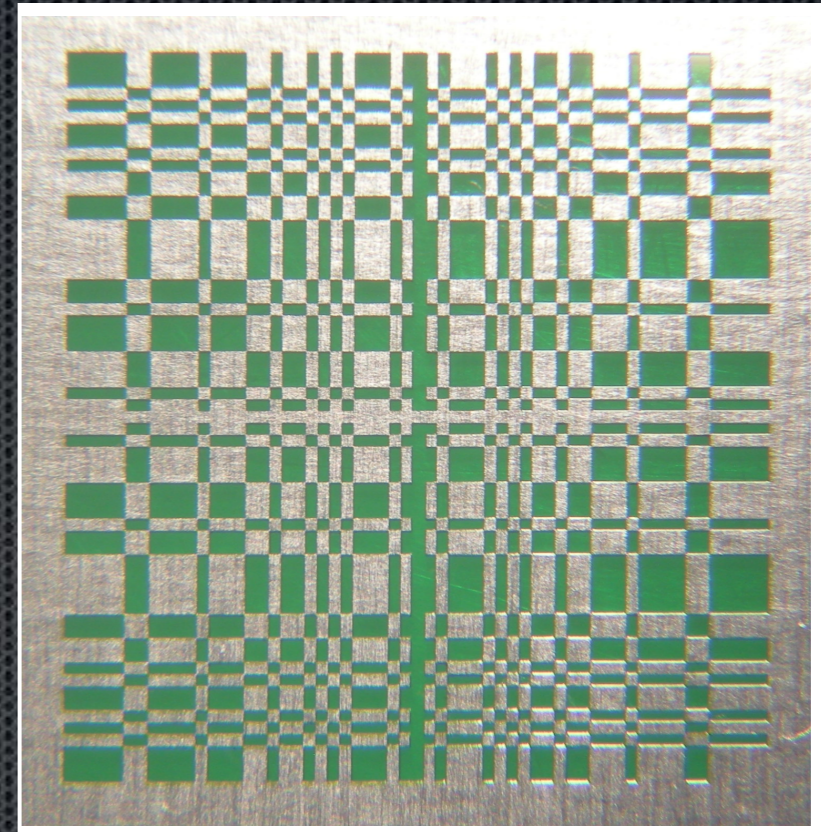
-> シールドの強化, Multi pinhole, Coded mask

コーデッドマスクによるイメージング

ピンホールコリメーターよりも開口面積が広く、検出効率の向上が可能。

	Value
Size (mm)	18.3 x 17.7 x 0.3
Material	Tungsten
Minimum element	300 μm
Mask pattern	URA*
Absorption rate	95%

*URA: Uniformly Redundant Array

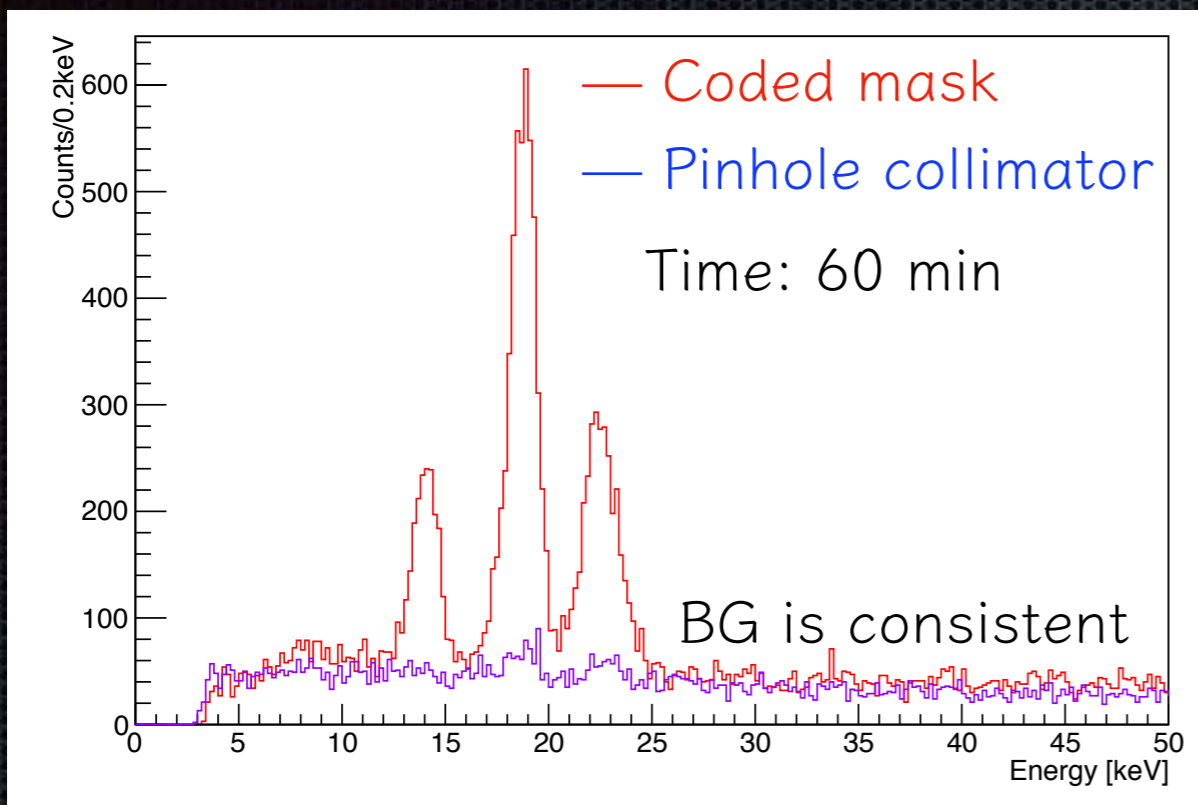


Li Sample

- $\varnothing 4$ mm x 2 mm
- $\varnothing 8$ mm x 2 mm
- $\varnothing 8$ mm x 0.5 mm
- $\varnothing 8$ mm x 1 mm



コーデッドマスクによるイメージング



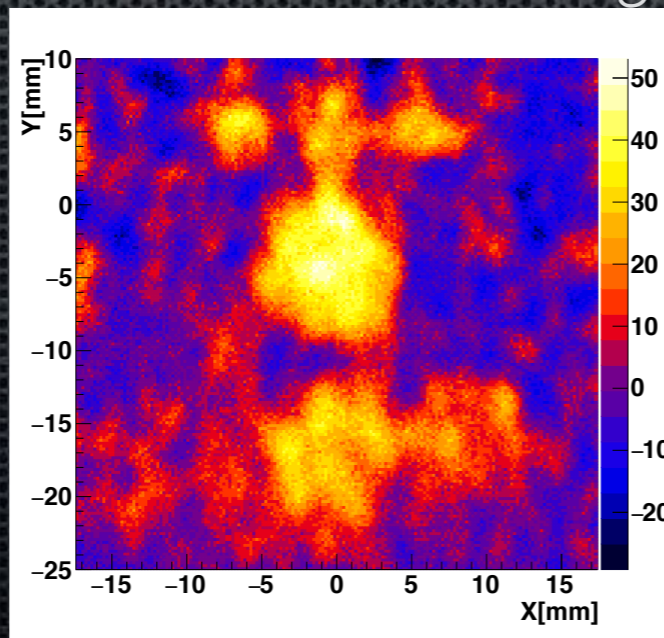
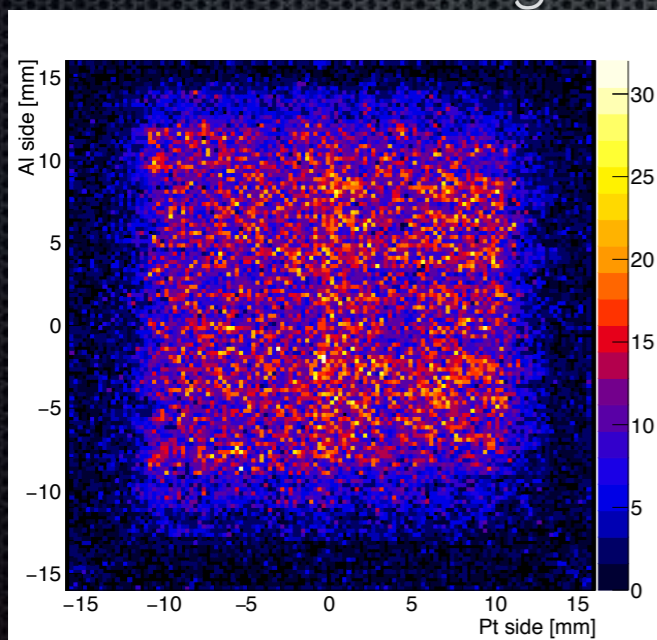
S/N比は大きく改善された（開口面積の差）が、イメージング性能が悪い。

- 視野外からのバックグラウンド成分が再構成の邪魔をしている。
- カウントレートが高く1回の読み出しで20~30 ch読み出すため位置の特定がうまくいっていない。

Coded mask

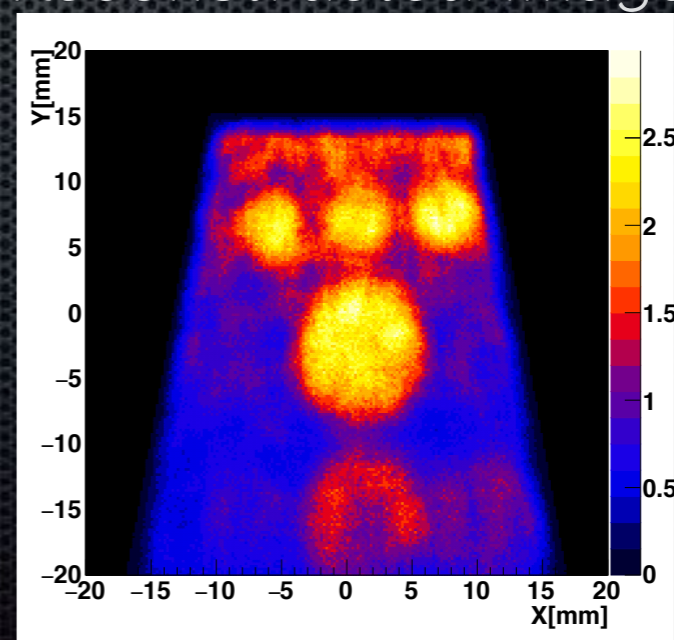
Detector image

Reconstructed image



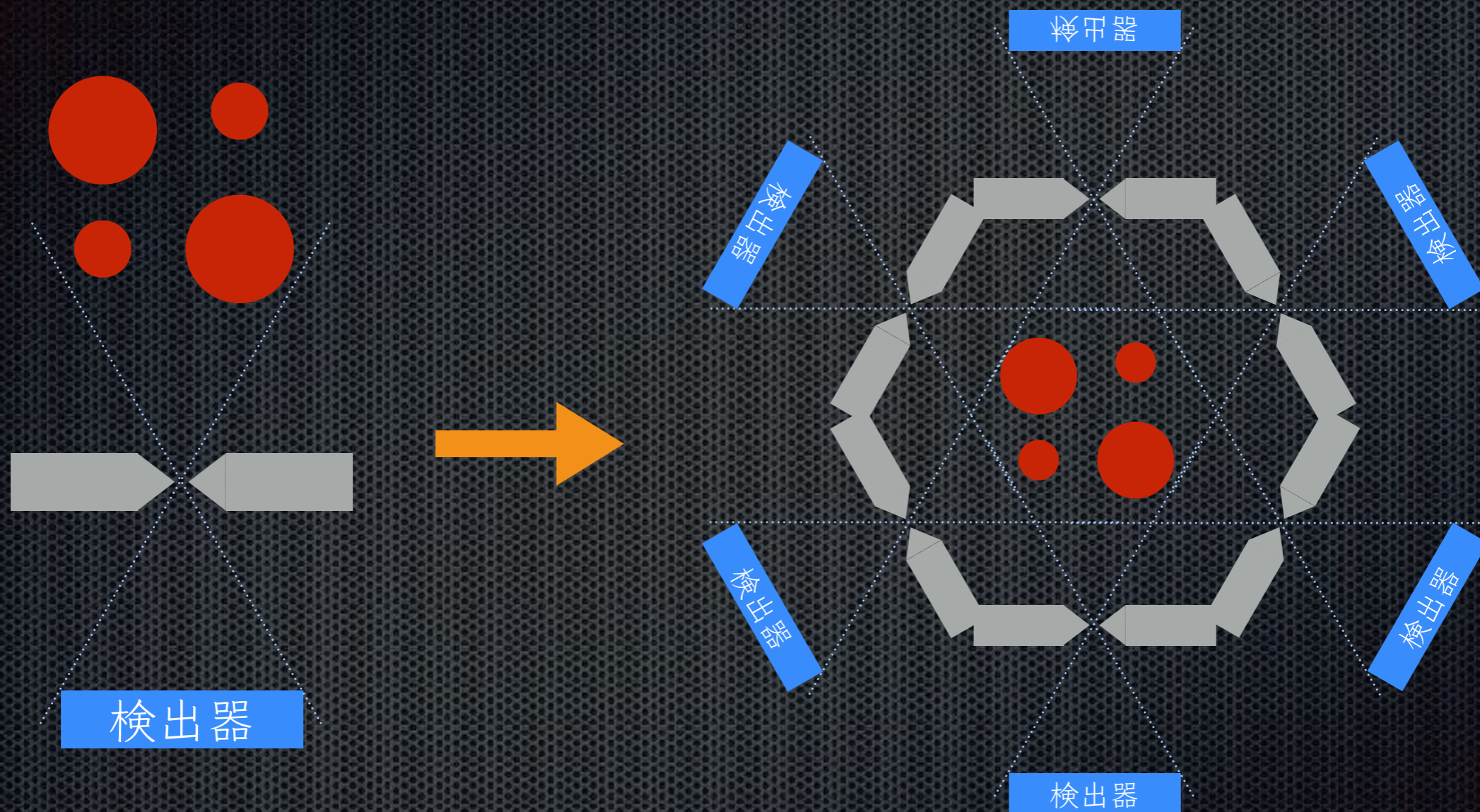
Pinhole collimator

Reconstructed image



Time: ~30h

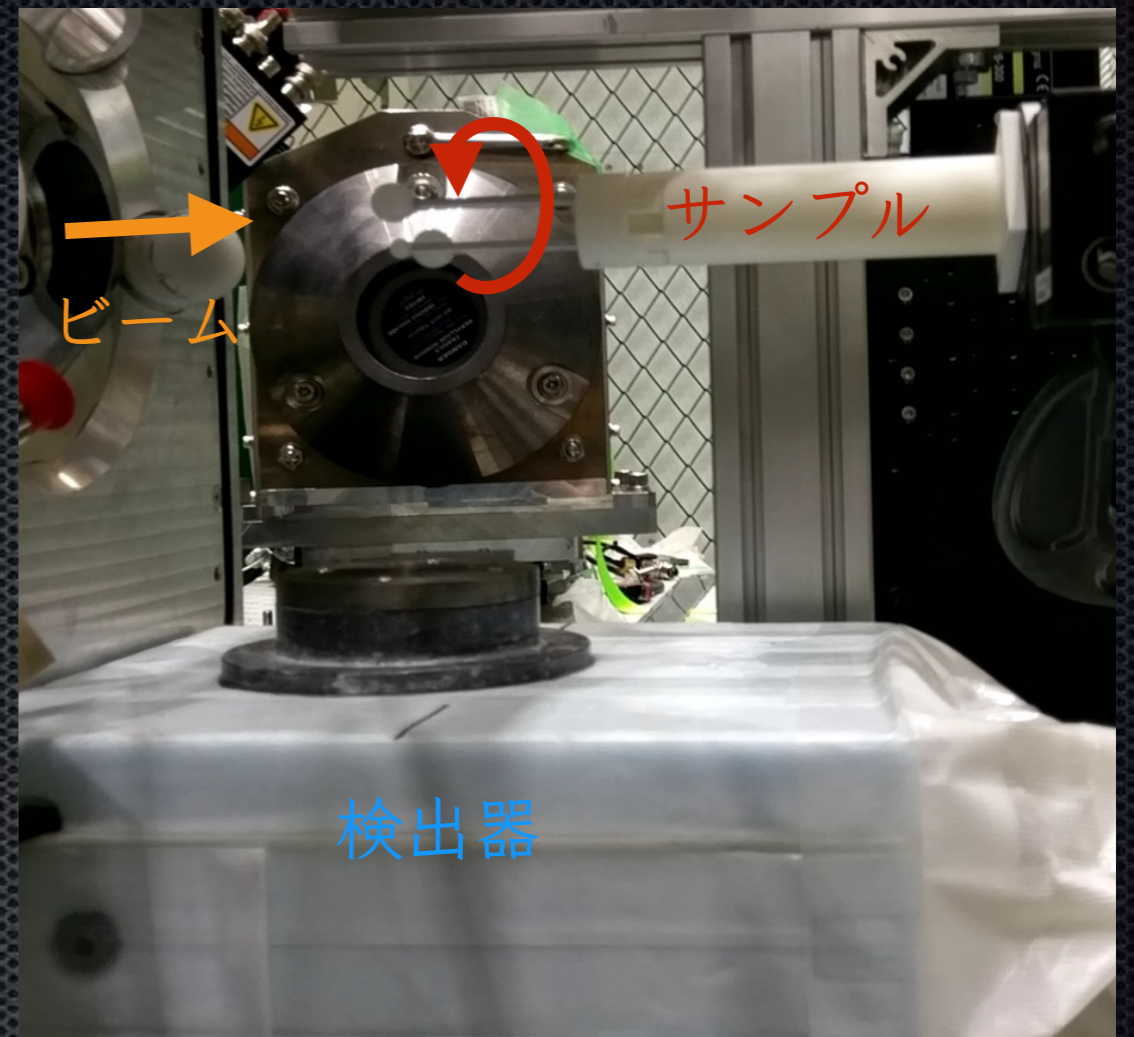
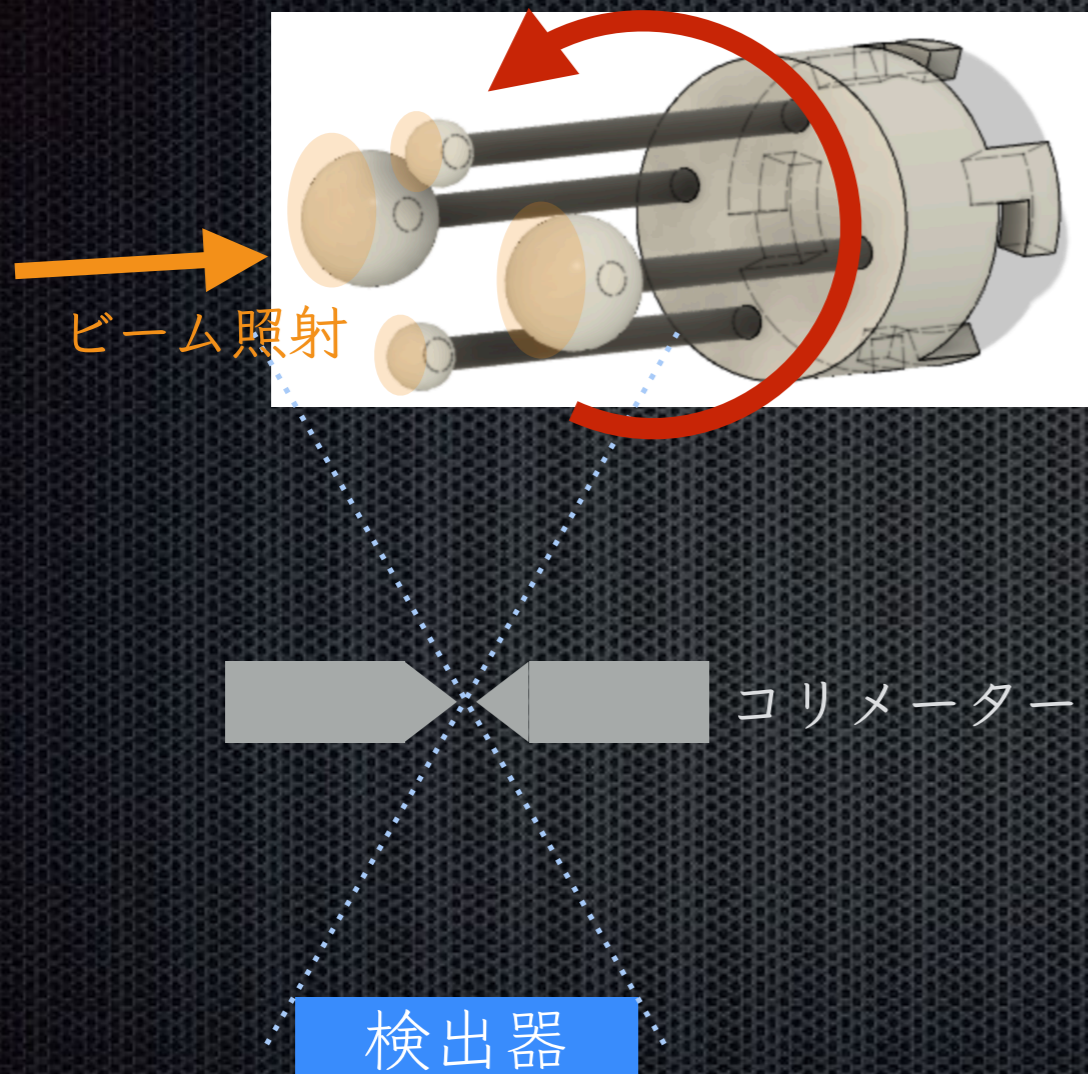
2-Dから3-Dイメージングへ



検出器を3次的に配置し、複数方向からの2-D画像をもとに3-D画像を再構成する。

模擬実験

3次元構造を持つサンプルを回転させることで、3-Dイメージングの模擬実験を行った。



ビームが当たる表層面の3-Dイメージングに成功

まとめ

- ◆ CdTe-DSDとピンホールコリメーターを用いた小型硬X線撮像器を開発。
- ◆ 世界で初めてのミュオンX線イメージングに成功。
- ◆ バックグラウンドの低減。
 - ・ Graded Zシールド
 - ・ 加速器に同期したトリガー用ゲート信号
- ◆ 今後の課題・取り組み
 - ・ 光学系の最適化（マルチピンホール等）
 - ・ さらなるバックグラウンド成分の低減（G4シミュレーション等）
 - ・ 3-Dイメージングシステムへ拡張
 - ・ はやぶさ2のサンプル撮像に向けた準備

共同研究者：

武田伸一郎、藪悟郎、高橋忠幸（カブリIPMU）、渡辺伸（ISAS/JAXA）、反保元伸、三宅康博（J-PARC）

謝辞：

新学術領域研究（研究領域提案型）「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」