Scalable Readout System を利用した GEM-TPC X線偏光計の開発および性能評価

北口 貴雄[1,2]

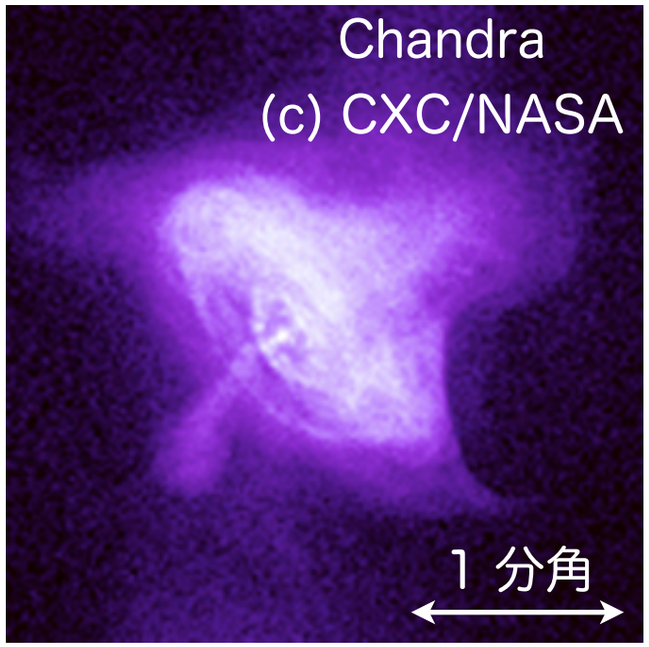
玉川 徹[2], 早藤 麻美[2], 榎戸 輝揚[2,3], 岩切 渉[2],
武内 陽子[2,4], 窪田 めぐ[2,4], 西田 和樹[2,4]

1. 広島大 CORE-U、2. 理研、3. 京都大、4. 東理大

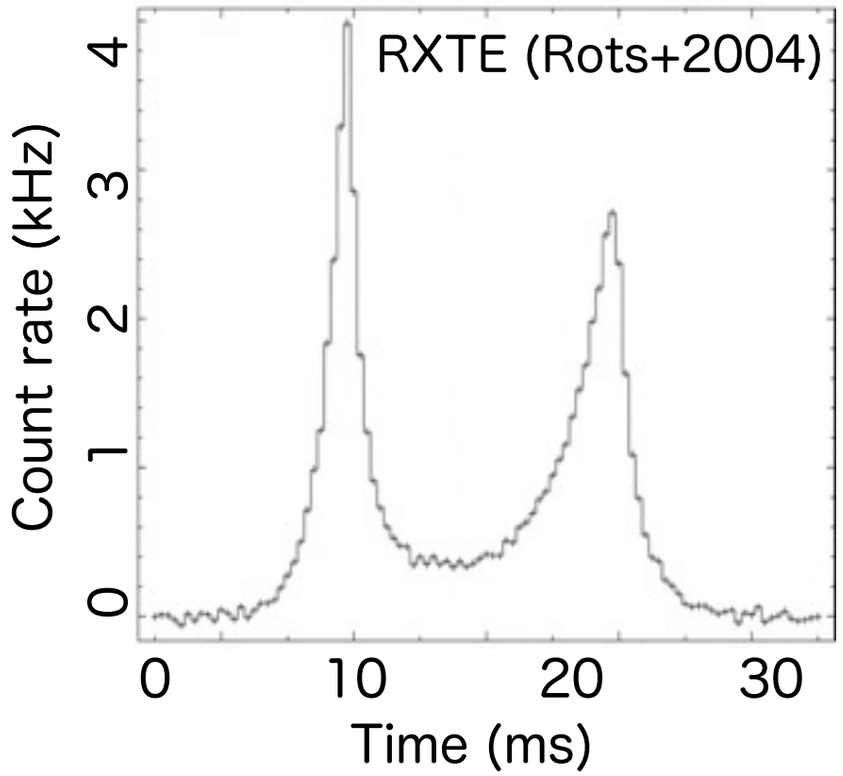
宇宙X線観測

4つの物理情報 (かに星雲を例に)

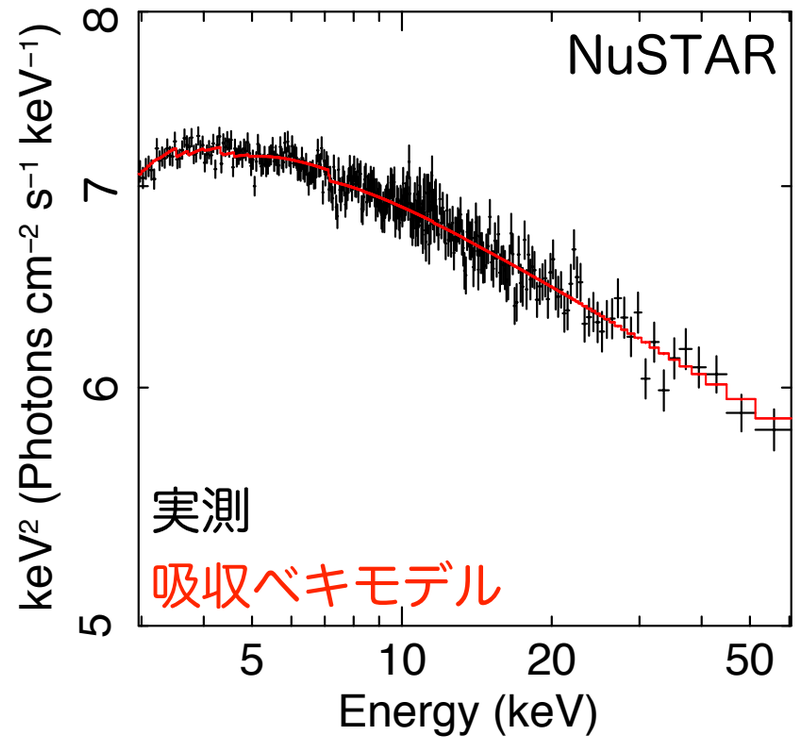
1. 到来方向



2. 到来時間



3. エネルギー

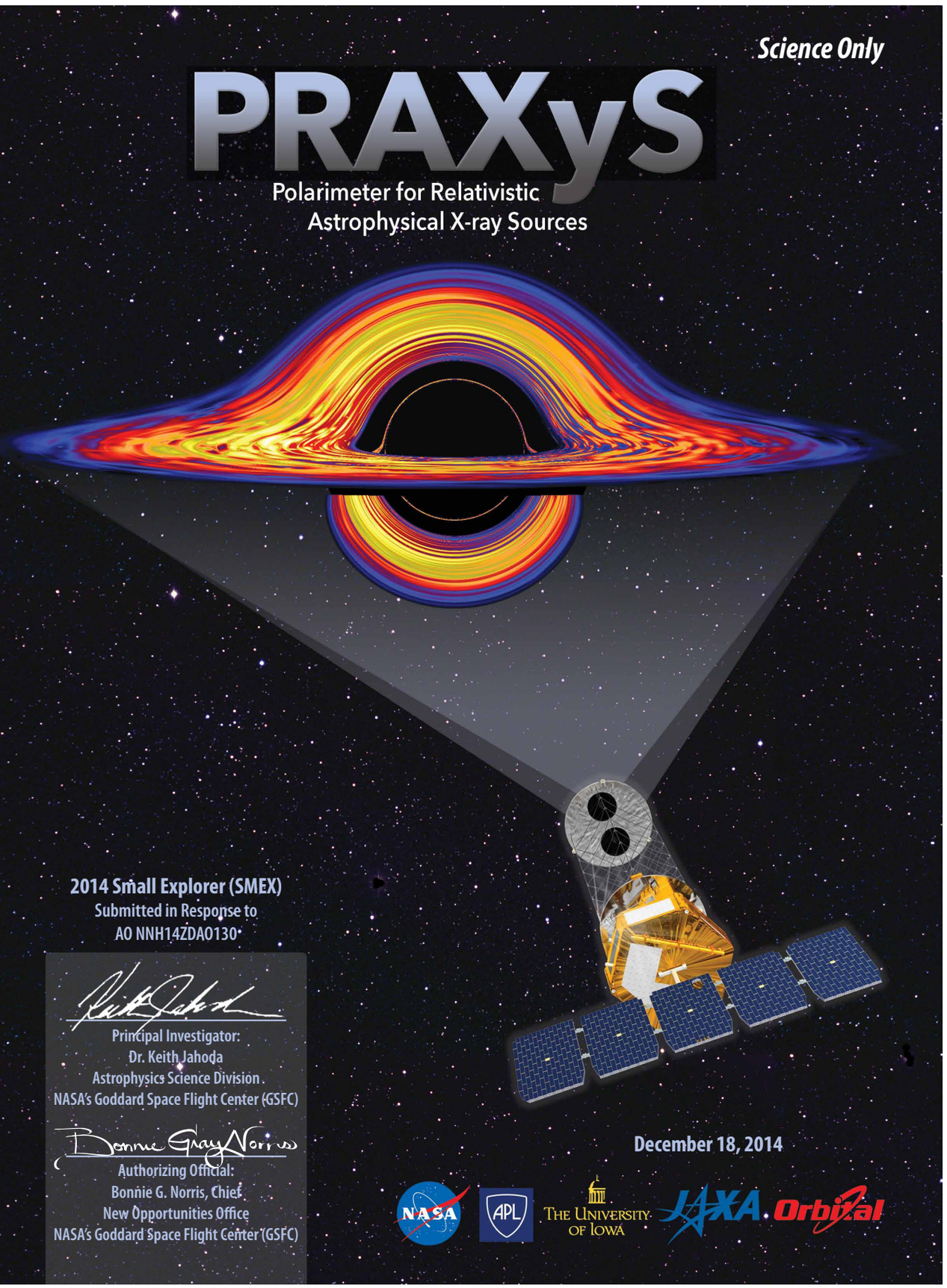


4. 偏光

?

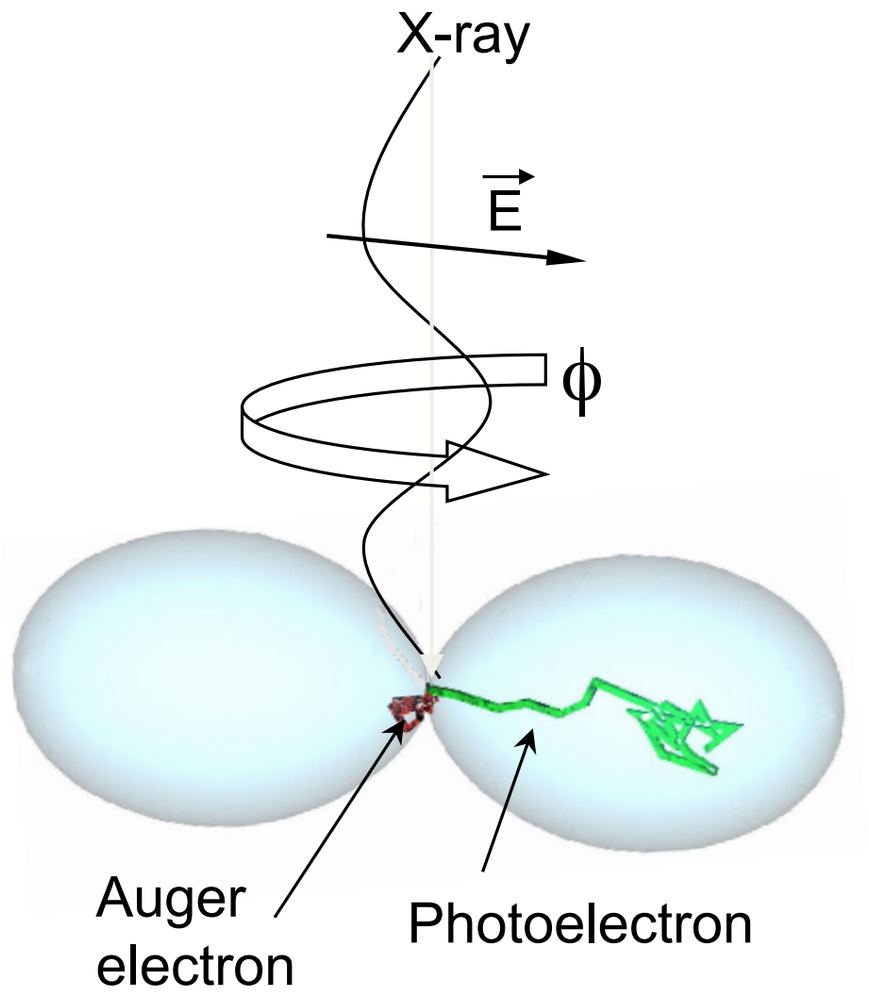
- X線偏光の検出は1例のみ (Weisskopf+72)
  - かに星雲 (拡がった高エネルギープラズマ)
  - 40 年以上前に OSO-8/ブラッグ偏光計で測定
  - かにパルサー (高速自転中性子) からは未検出 (上限 ~ 80%)、かに星雲がバックグラウンド放射 (フラックス比 9:1)
- 2015 年に3つの衛星計画が打ち上げ最終候補に
  - XIPE (ESA M-class)
  - IXPE (NASA SMEX)
  - PRAXyS (NASA SMEX)

宇宙X線観測衛星 PRAXyS

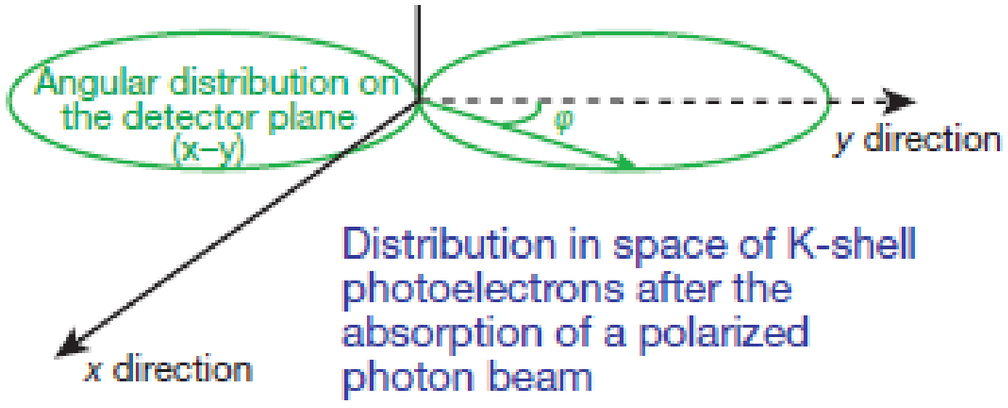


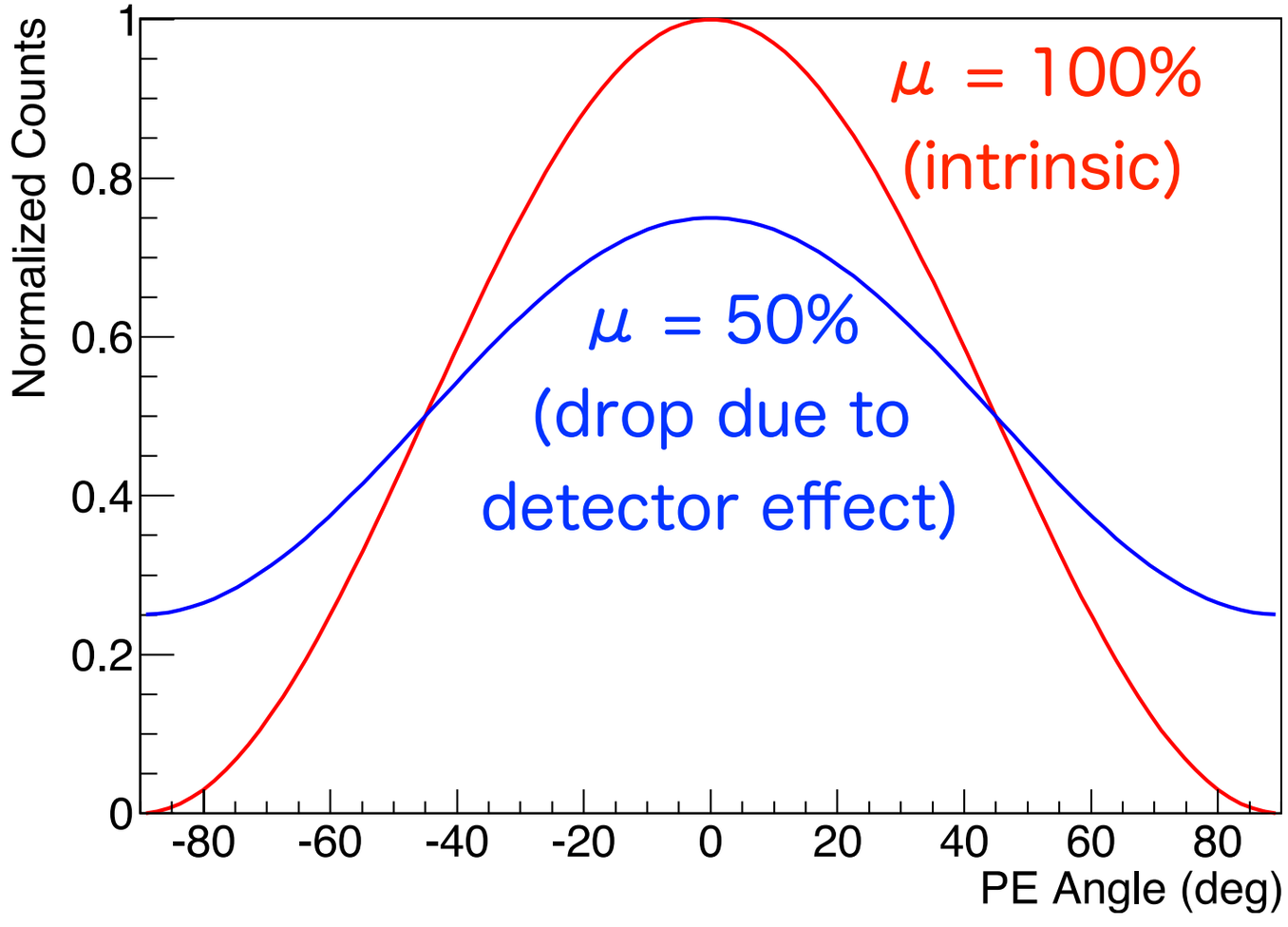
- PRAXyS
  - Polarimeter for Relativistic Astrophysical X-ray Sources
  - NASA の小型衛星計画 (SMEX)
  - 米日共同計画
  - 今夏に Phase A に選定
  - 2020 年に打ち上げ予定
- 偏光感度
  - エネルギー範囲: 2-10 keV
  - これまでより10 倍以上の感度向上
  - >2 mCrab フラックスの天体から >1% の偏光を検出可
  - 9 ヶ月で 23 天体を観測予定
- 期待されるサイエンスの white paper
  - ブラックホール (arXiv:1301.1957)
  - 中性子星 (arXiv:1301.5514)
  - ブレーザー (arXiv:1303.7158)

光電効果を用いた偏光の検出原理

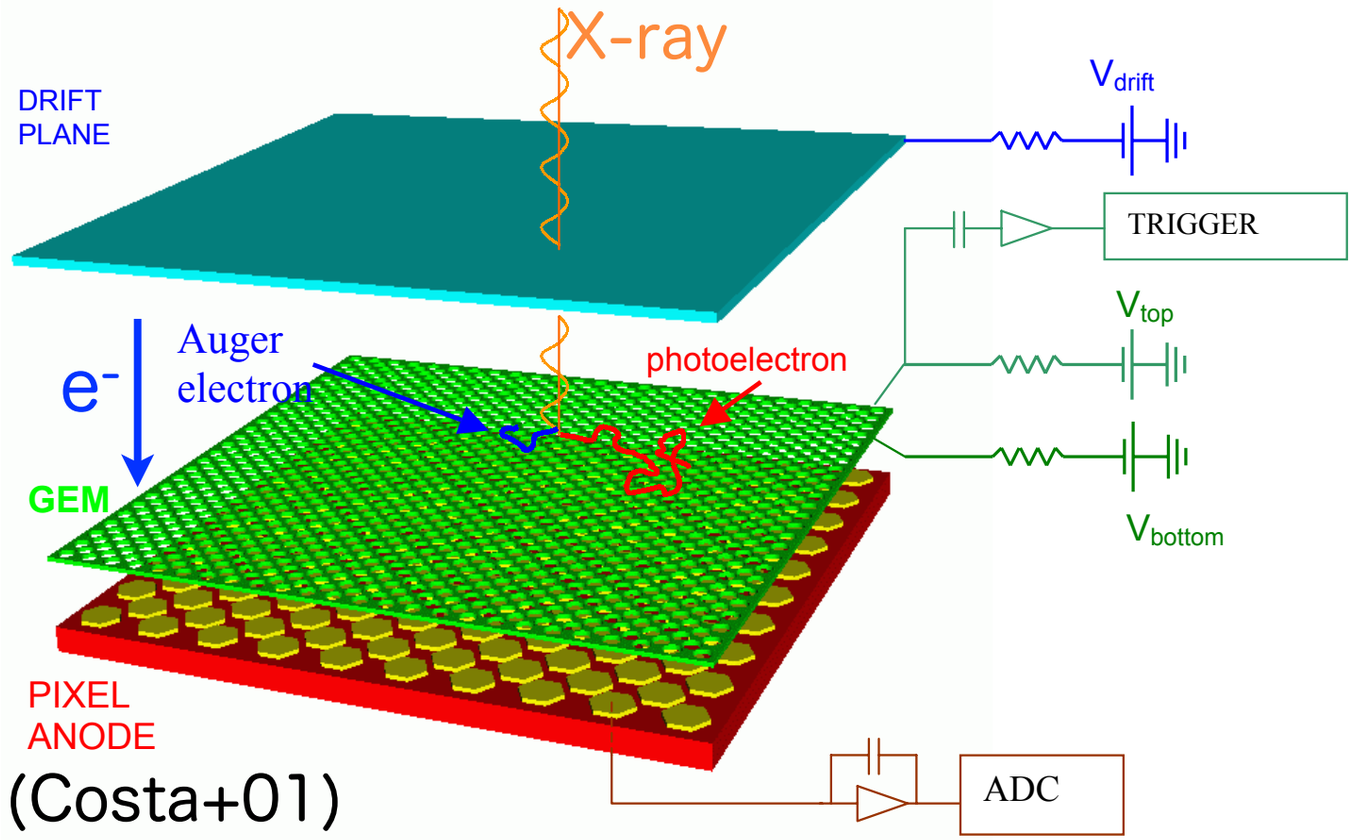


- 光電効果
  - X線帯域で支配的な相互作用
  - 光電子の放出角度分布は、入射X線の偏光方向に依存 ($d\sigma/d\Omega \propto \cos^2\Phi$)
  - 変調因子 (偏光計の analyzing power)
    $\mu = (C_{max} - C_{min})/(C_{max} + C_{min})$



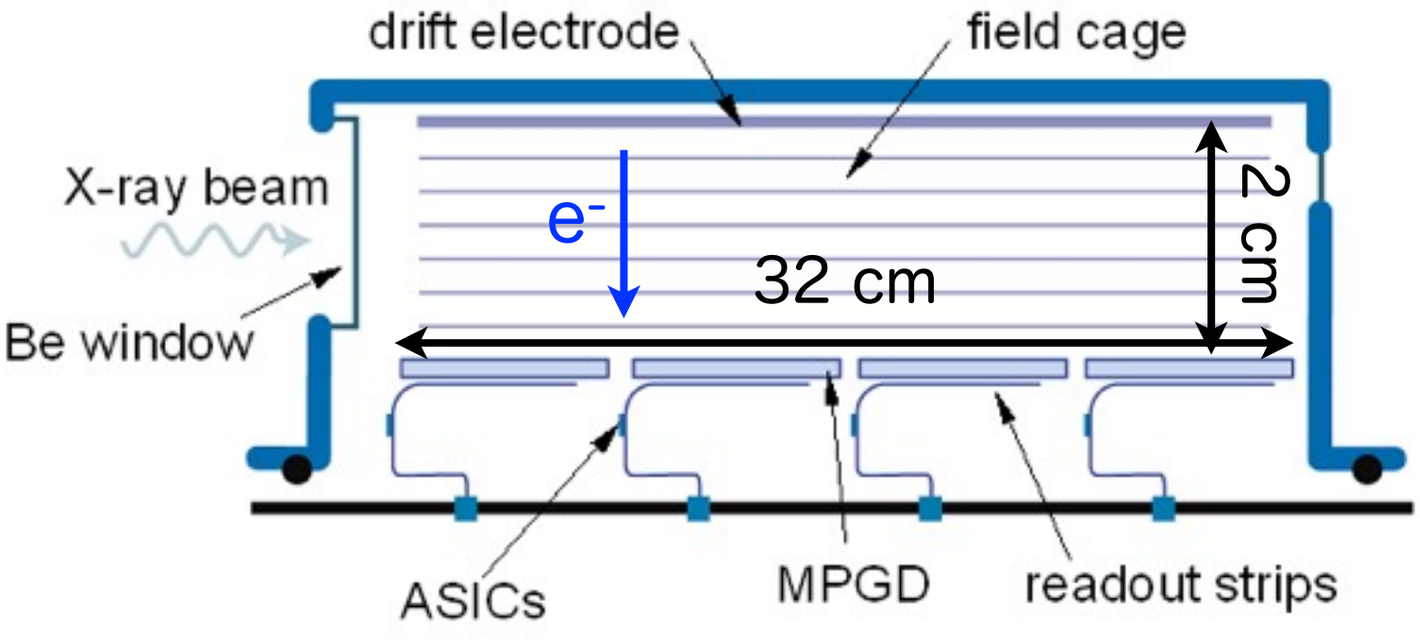


２つの光電子追跡型Ｘ線偏光計



(Costa+01)

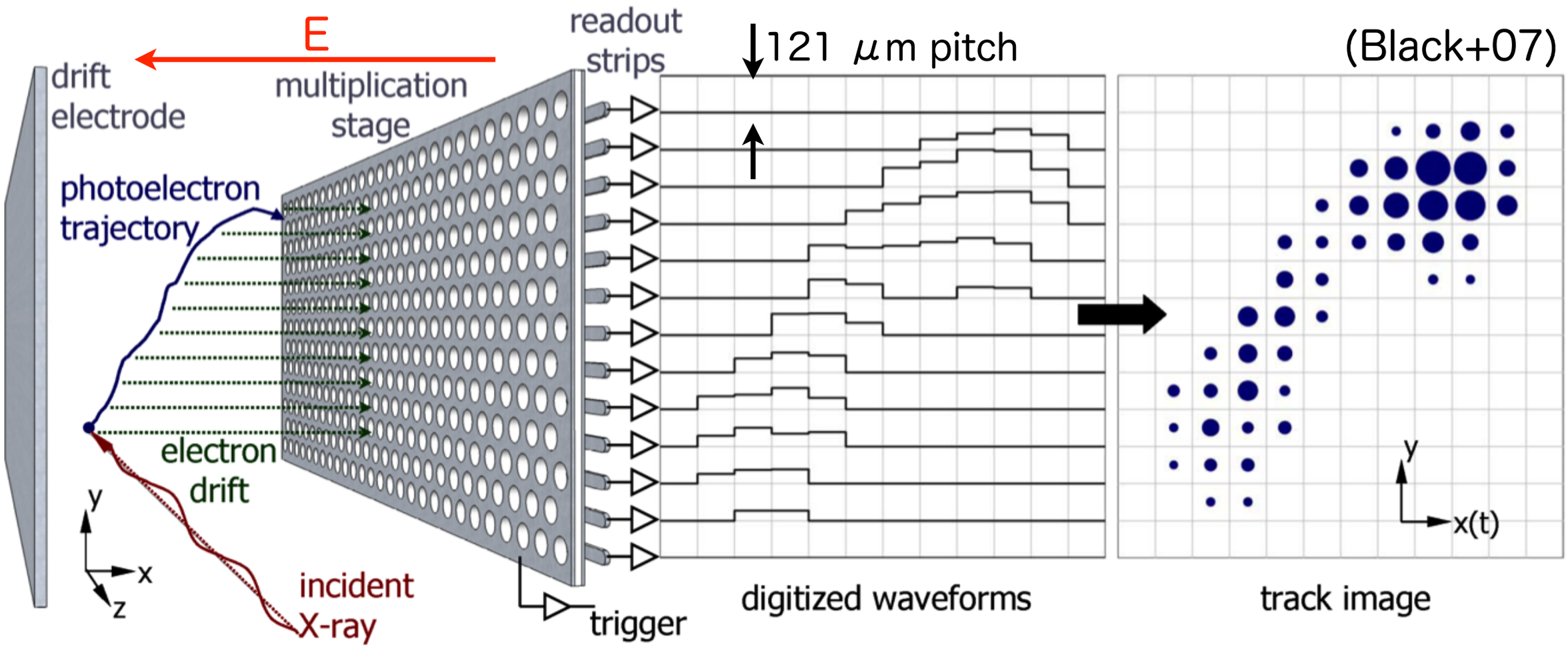
- 位置敏感型偏光計 (XIPE, IXPE)
  - 電子ドリフトとＸ線入射の方向が並行
  - ２次元読み出し
- 薄い吸収層 (低い検出効率)
  - 電子拡散による画像ボケを回避
- 拡がった天体にメリット (SNR, GC)



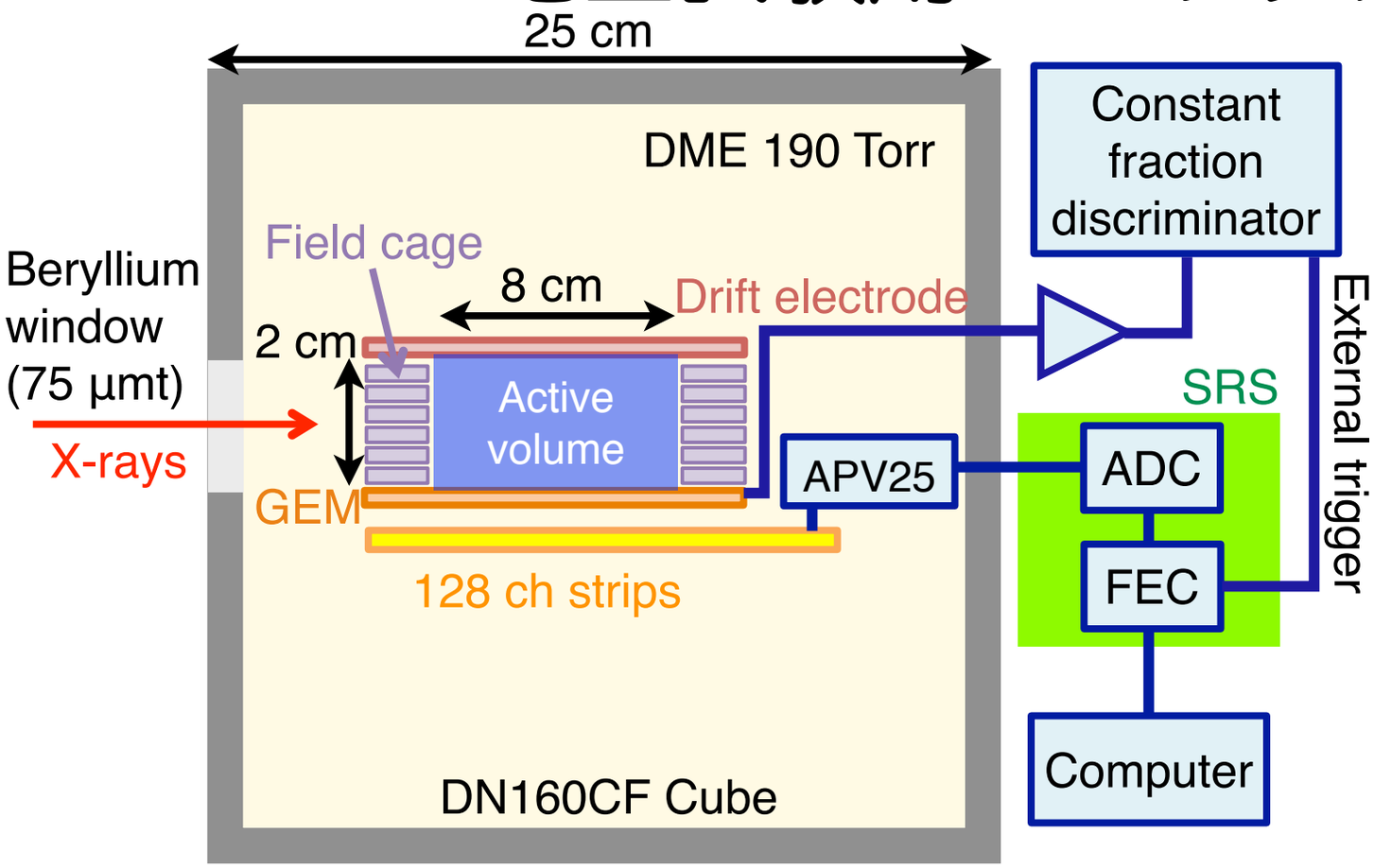
- 非位置敏感型偏光計 (PRAXyS)
  - 電子ドリフトとＸ線入射の方向が垂直
  - TPC 技術を使って 1 次元読み出しで２次元画像を取得
- 厚い吸収層 (高い検出効率)
  - Ｘ線入射方向に複数配置可
  - 高い冗長性
- 高密度天体にメリット (BH, NS, WD)

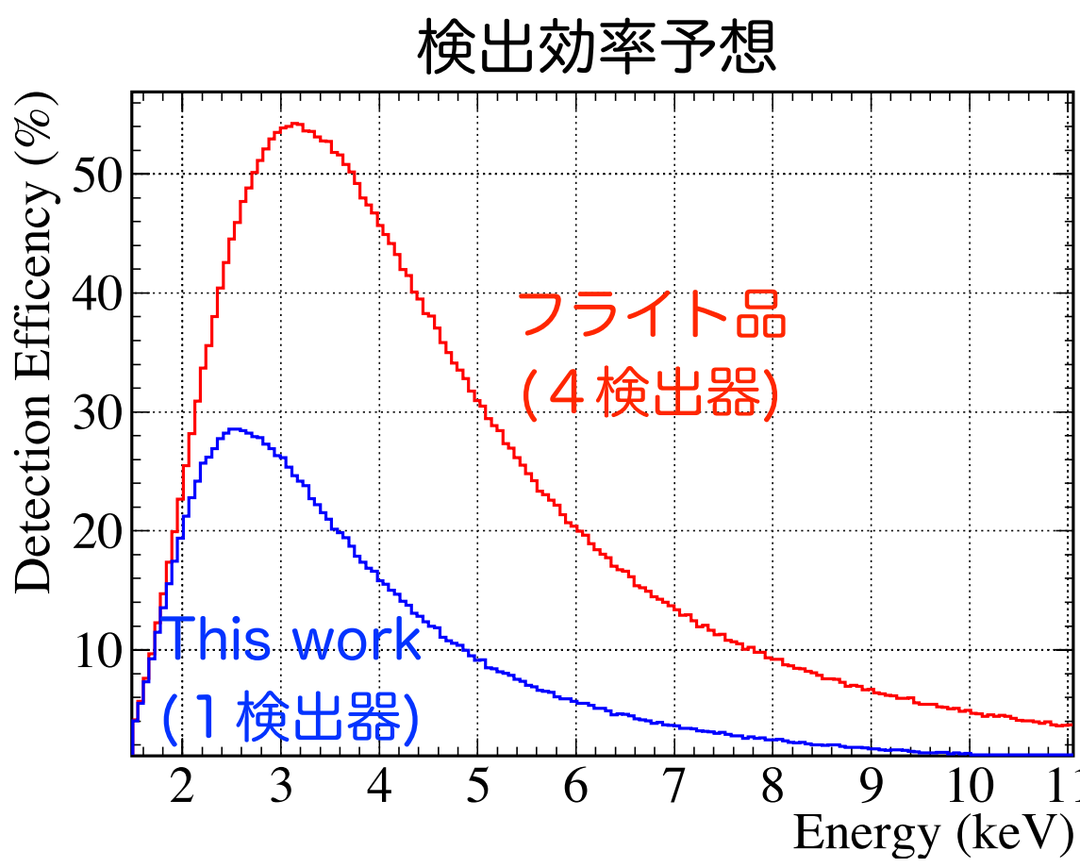
GEM-TPC 偏光計

- TPC 技術で光電子の飛跡を撮像
- 純 DME を 190 Torr で封入
  - コールドガス: ドリフト速度が遅く、拡散も小さい -> 細かい画像
  - オージェ電子のエネルギーが低い
- 理研/SciEnergy 製 GEM (Tamagawa+09)
  - 1500 以上の増幅度
  - トリガーはカソード信号から生成
- RD51 製 SRS/APV25
  - 128 ch のストリップ電極から信号読み出し



地上試験用のバックアップ偏光計

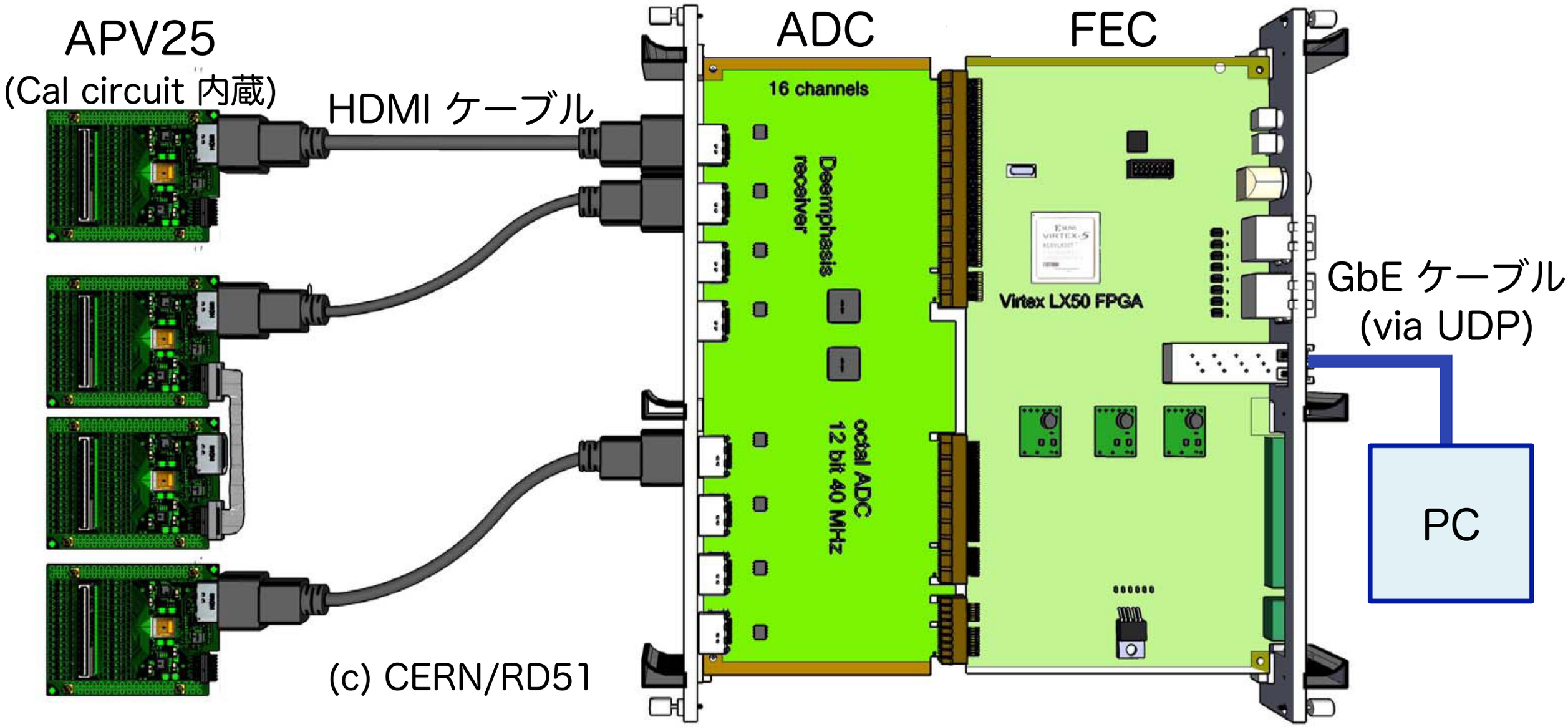




- バックアップ偏光計
  - 理研で製作
  - 迅速かつ柔軟な地上テスト
    - ガス圧や電場などの偏光計パラメータの最適化
- フライト偏光計との違い
  - 熱設計や耐震性など衛星搭載の基準は満たさない
  - Scalable Readout System (SRS) で信号読み出し
    - 連続サンプリングレート = 40 MHz (フライト品は 20 MHz)
    - サンプリング数 = 27、SRS/FPGAの送信データ長で制限 (フライト品は 30)
- 目標: フライト品と同程度の変調因子 $\mu \sim 50\%$

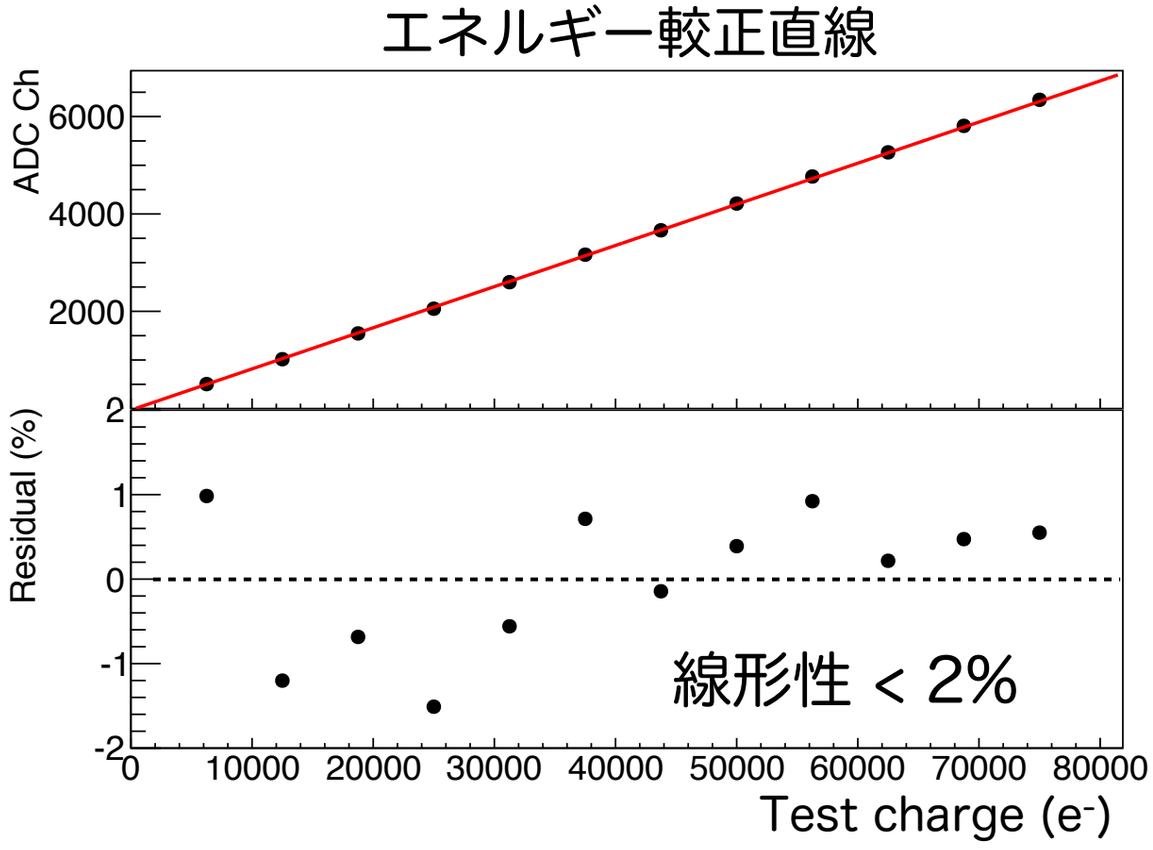
多信号読み出しシステム SRS/APV25

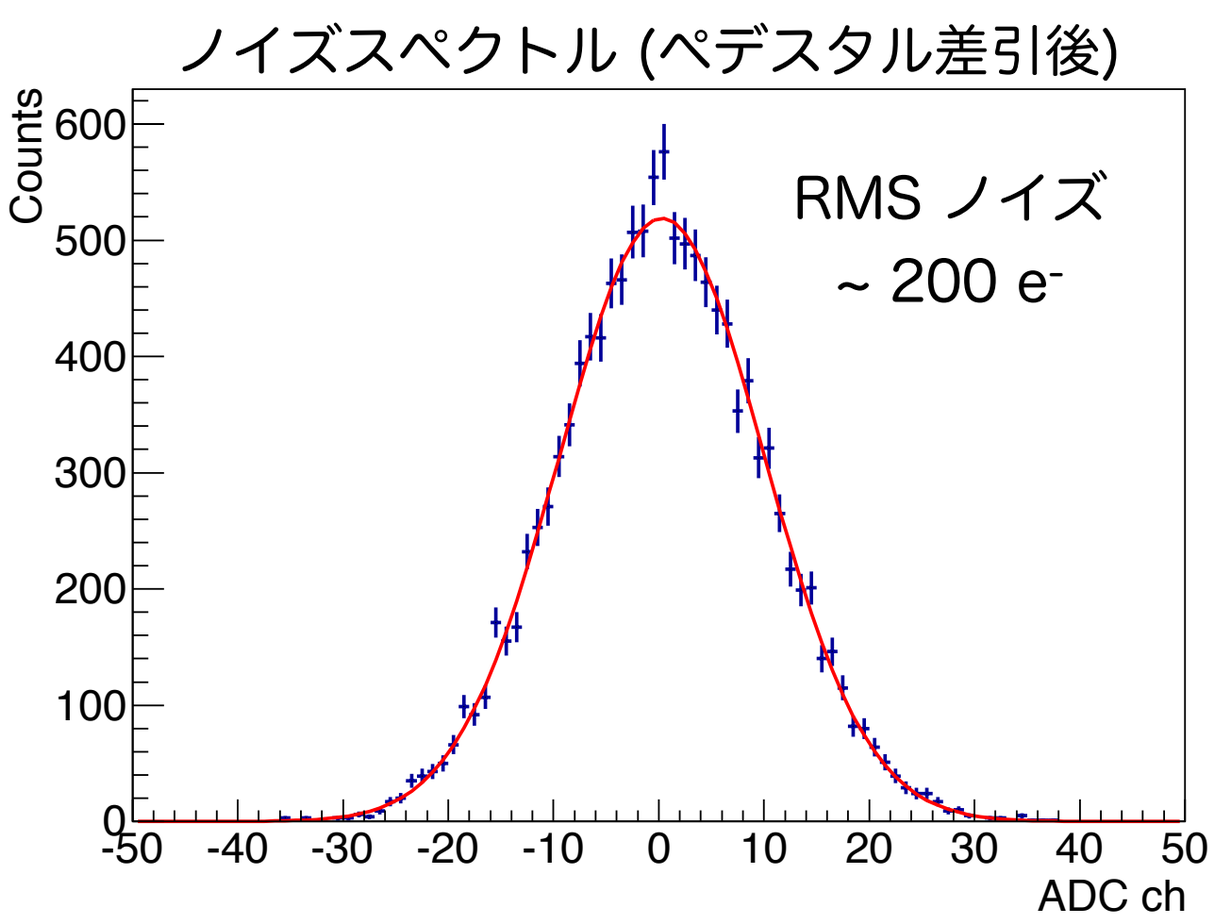
- CERN/RD51 が開発 (CERN ストアから購入可)
- 高いスケーラビリティ
  - 我々の用途では最小単位 (1 APV chip, 128 ch)
  - 1 台の SRS で最大 2048 ch = 128 ch x 16 APV chips
- 40 MHz のレートで最大 30 回の連続サンプリング (~8 kB/APV/event)
- UDP を使ってデータ転送

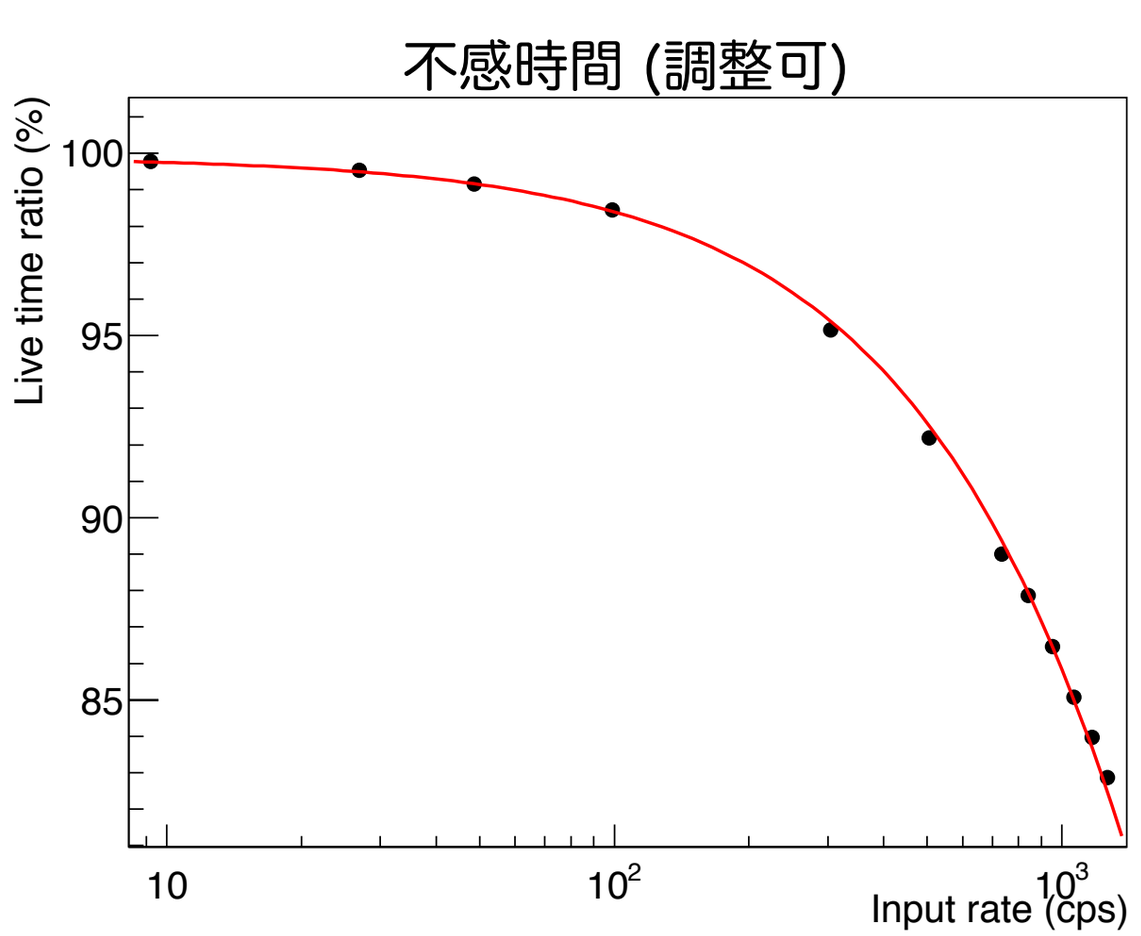


SRS/APV25 の基礎性能

- RMS ノイズ ~ 200 e^-
  - FEC/FPGA からの周期的トリガで測定
  - GEM の増幅により、１電子が測定可
- エネルギースケールの線形性 < 2%
  - APV25 のキャル回路からのテストパルス (電荷量調整可) で測定
- 不感時間 ~ 5% @ 300 cps
  - ランダムパルサー (BNC/DB-2) で測定

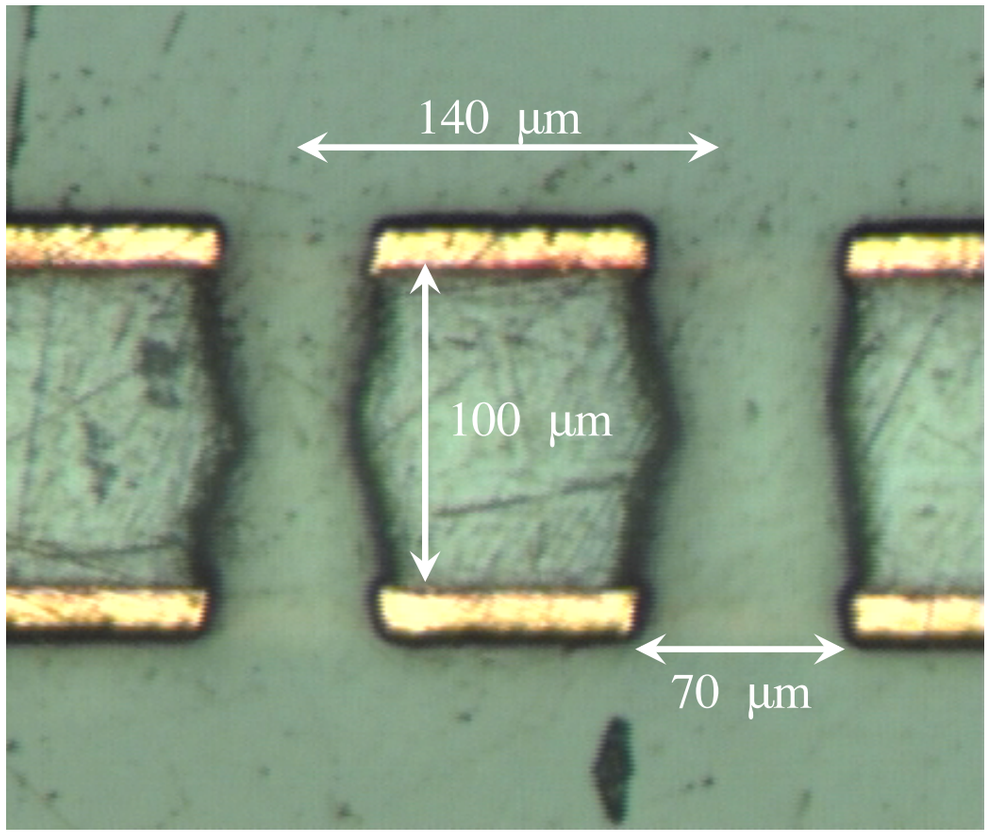


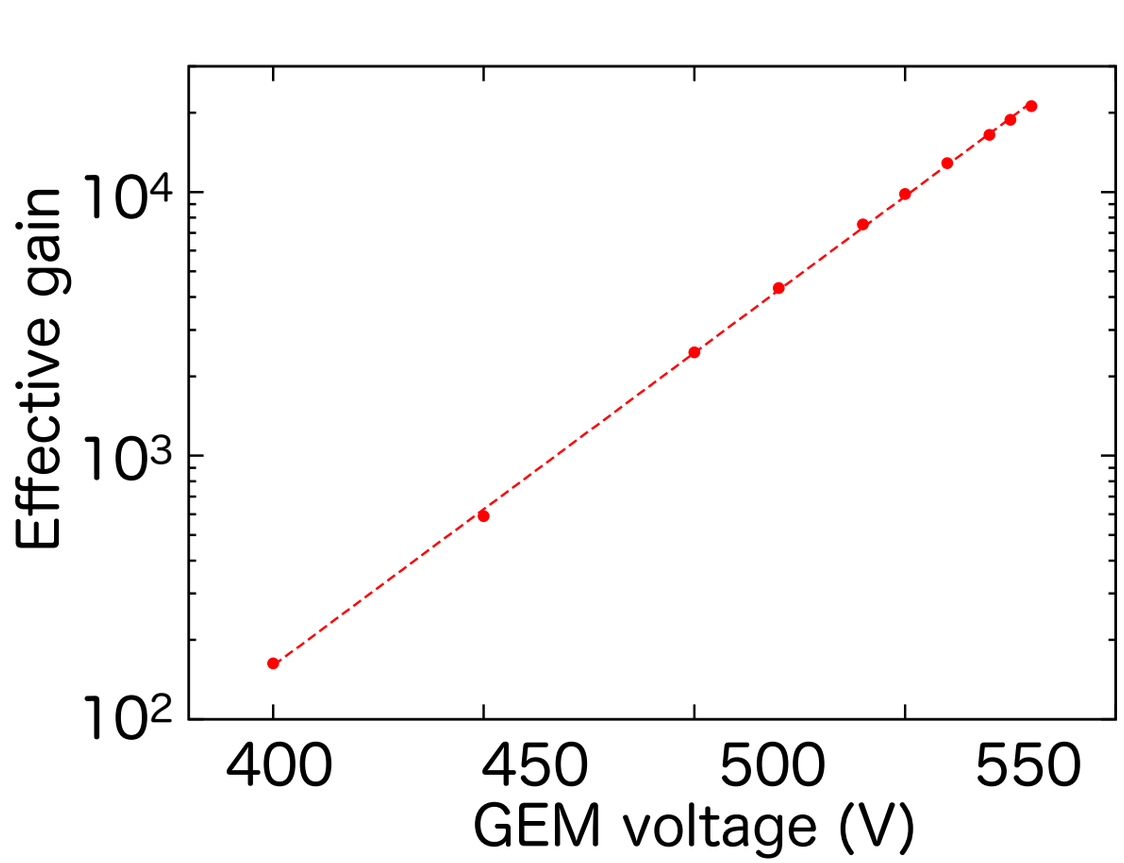


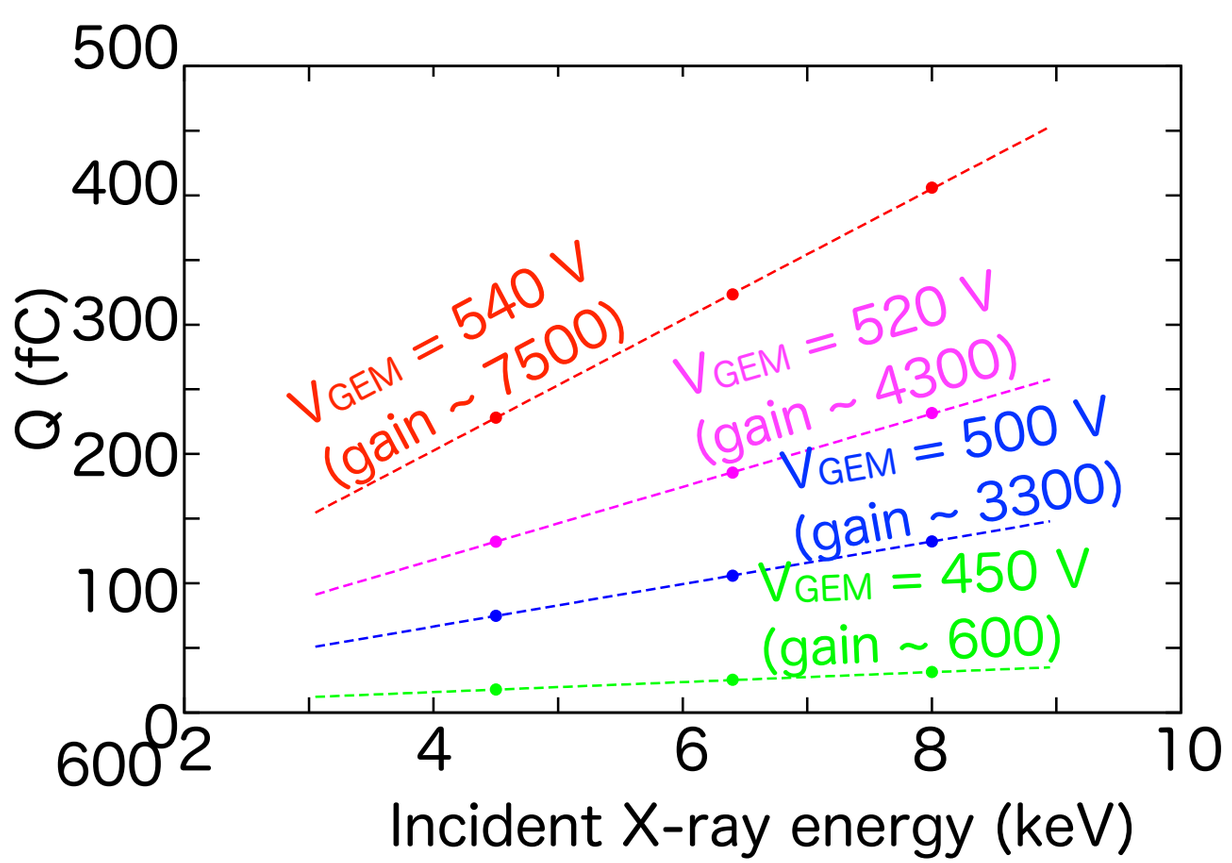


宇宙利用を目指した LCP-GEM (Tamagawa+09)

- サイズ: 3 x 8 cm^2 x 100 μmt
- 絶縁体に LCP
  - 少ないアウトガス
- レーザーエッチングによる円柱に近い穴
  - 孔径/ピッチ = 70/140 μm
- 放射線耐性 (Iwahashi+11)
  - 500 MeV/n Fe^+ および 160 MeV p^+ で劣化なし
- DME 190 Torr での動作 (Takeuchi+14)
  - 最大ゲイン ~ 2 x 10^4 (放電なし)
  - 線形なエネルギースケール



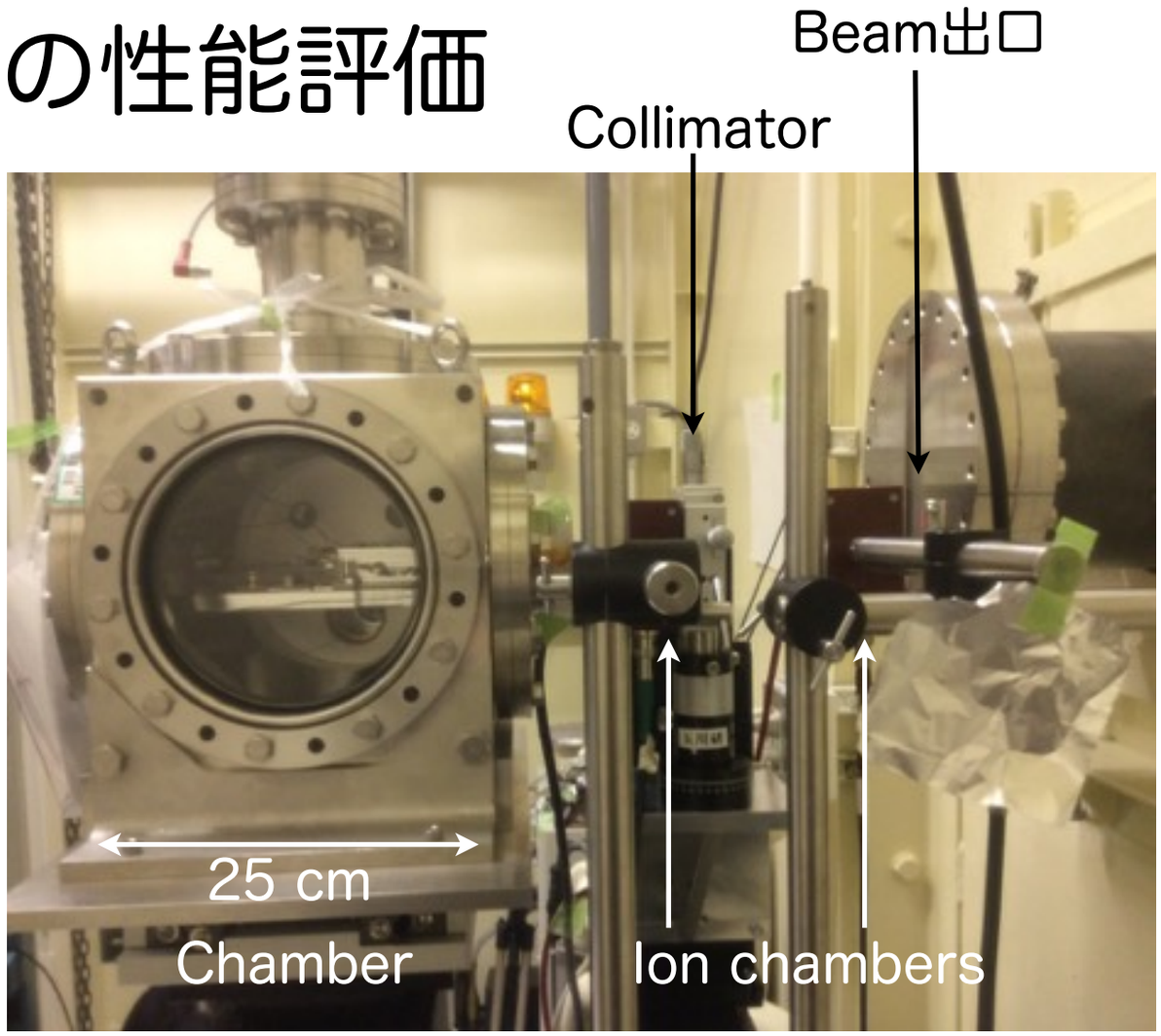




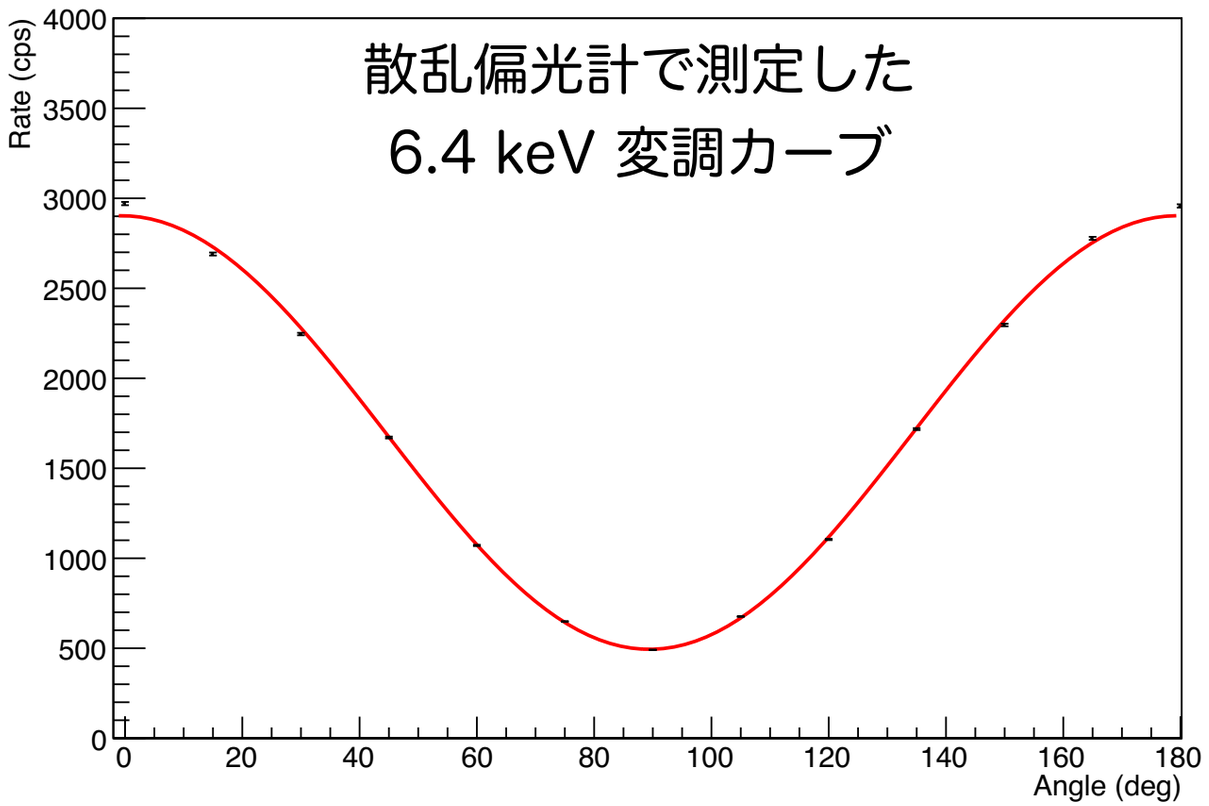
SPring-8 での性能評価

- ビームライン BL32B2
  - 偏向磁石
  - Si(111) の２結晶分光器
  - エネルギー範囲: 4.5-17 keV

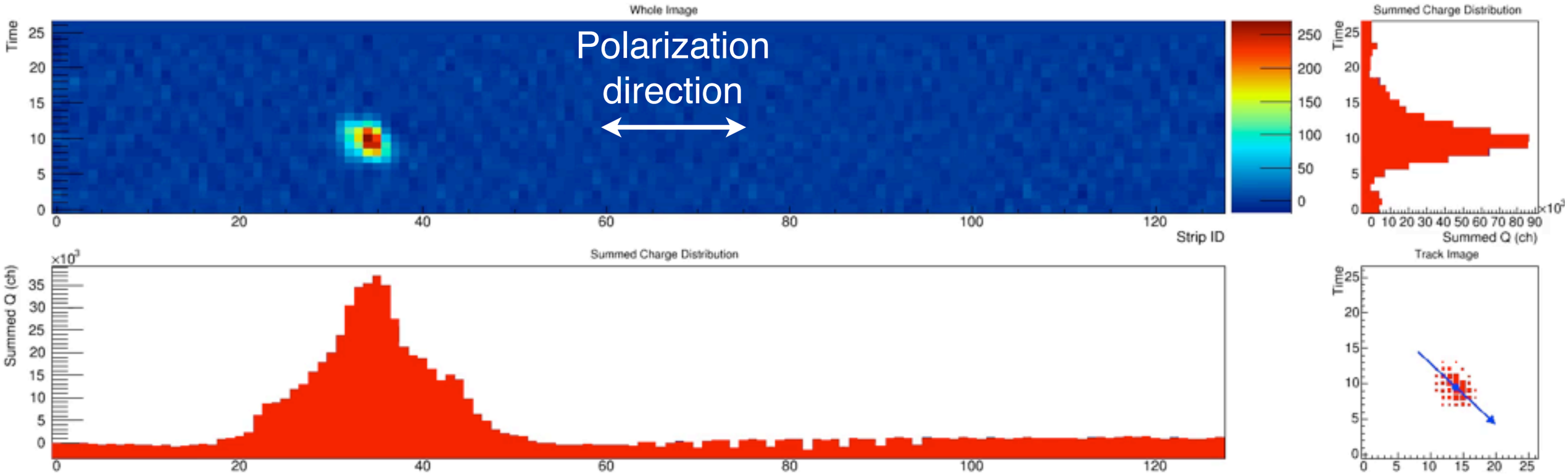
- 2014 年 12 月 7-15 日に実施
- 4 つのエネルギーで 6 つのドリフト距離
  - 4.5, 5.5, 6.4, および 7.5 keV
  - 2.6, 4.6, 7.6, 10.6, 13.6, および 16.6 mm



- ビーム偏光度 ~ 80%
  - 散乱偏光計で測定
    - 散乱体: Be 円柱 (厚み: 4 mm、直径 4 mm)
    - 吸収体: Amptek Si 検出器
  - 数 kHz までX線強度を減少
    - 低い偏光度は、絞ったビームが中心軸から外れたため

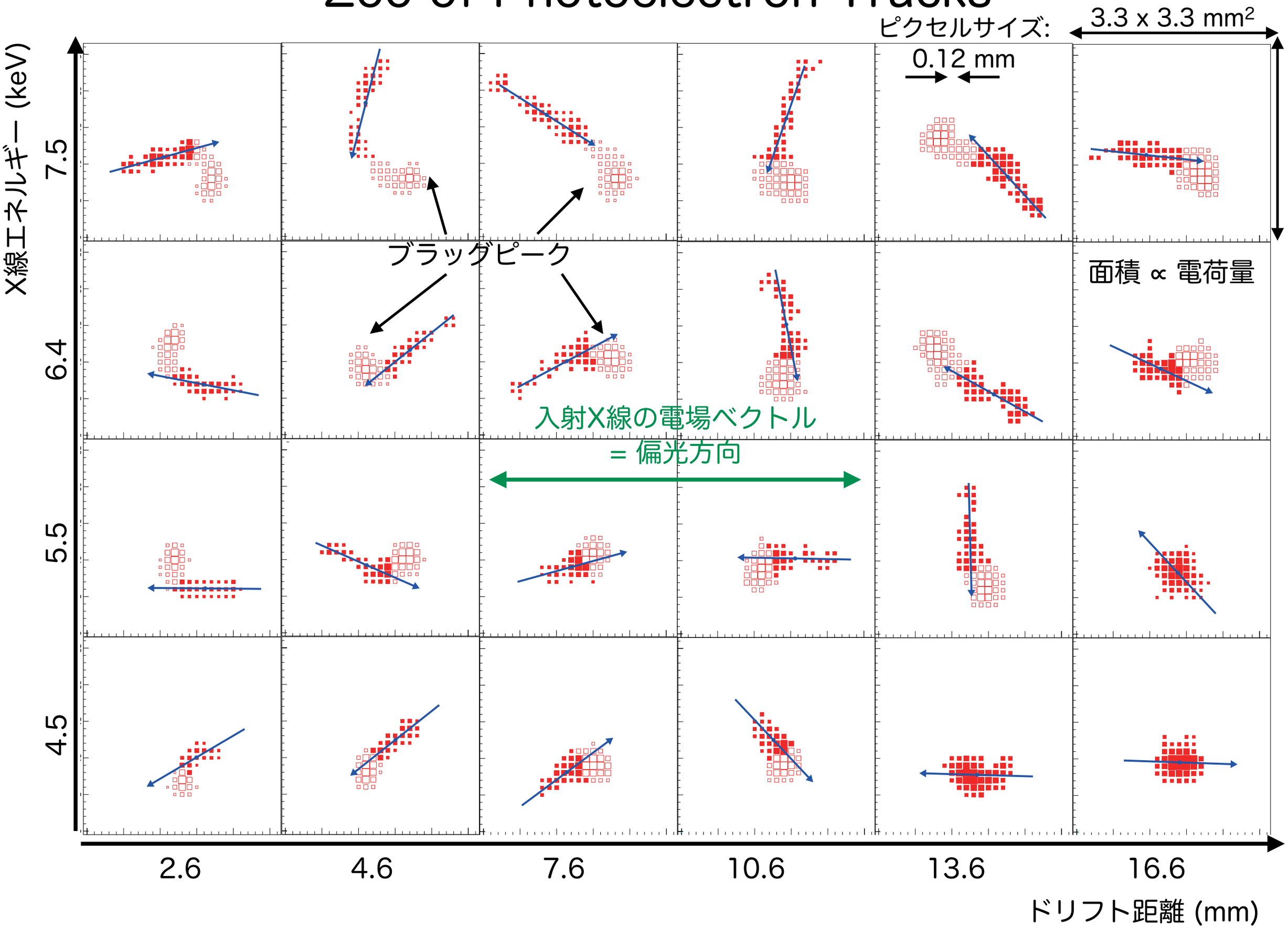


Online QL monitor (6.4 keV Polarized Beam)



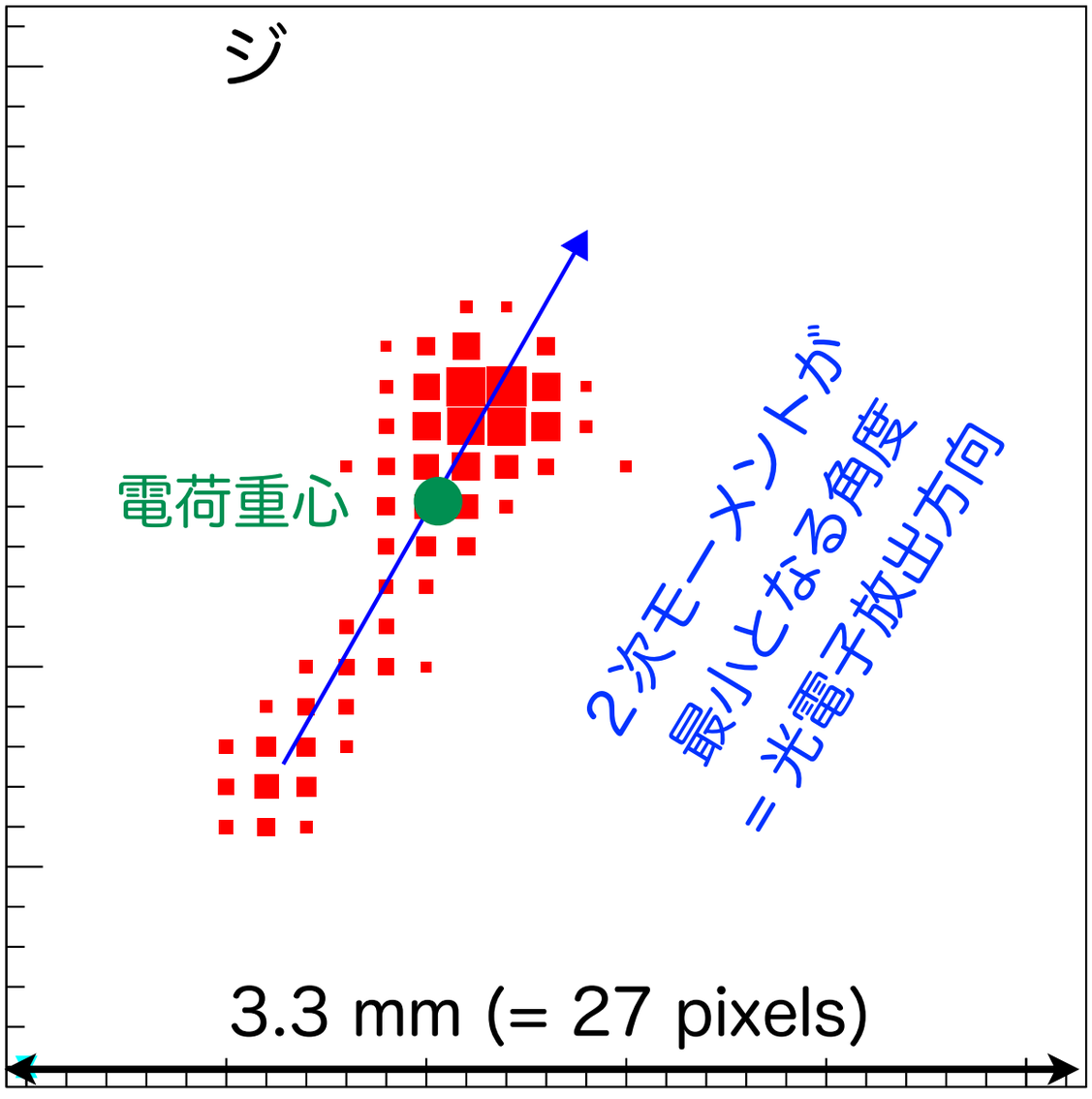
- ROOT-based software
- QL results of polarization measurement displayed

Zoo of Photoelectron Tracks

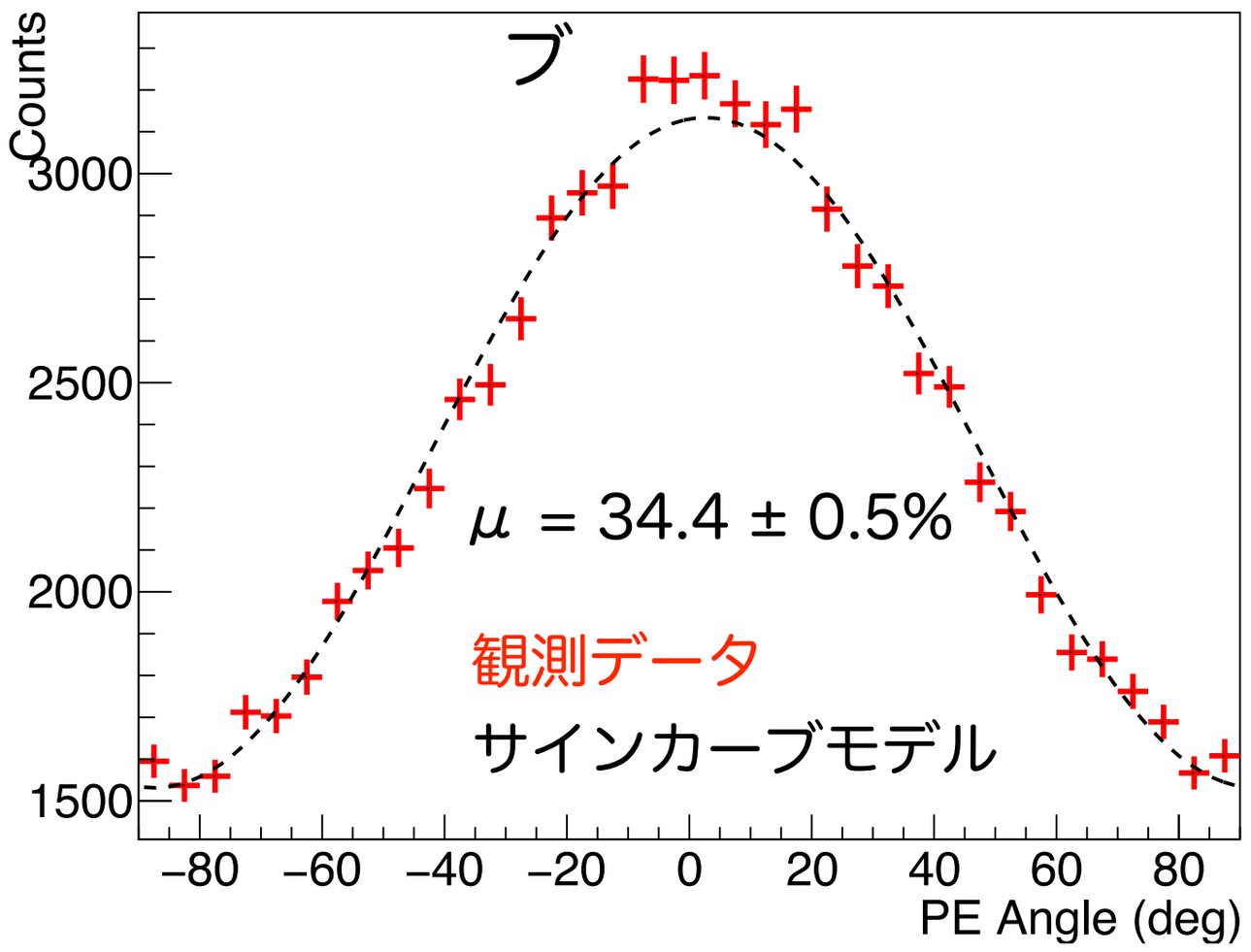


6.4 keV X線の偏光測定

光電子飛跡イメージ



変調カーブ



- 光電子放出方向の再構成
  1. 電荷重心の計算
  2. 電荷重心を中心に、２次モーメントを最小となる角度を導出

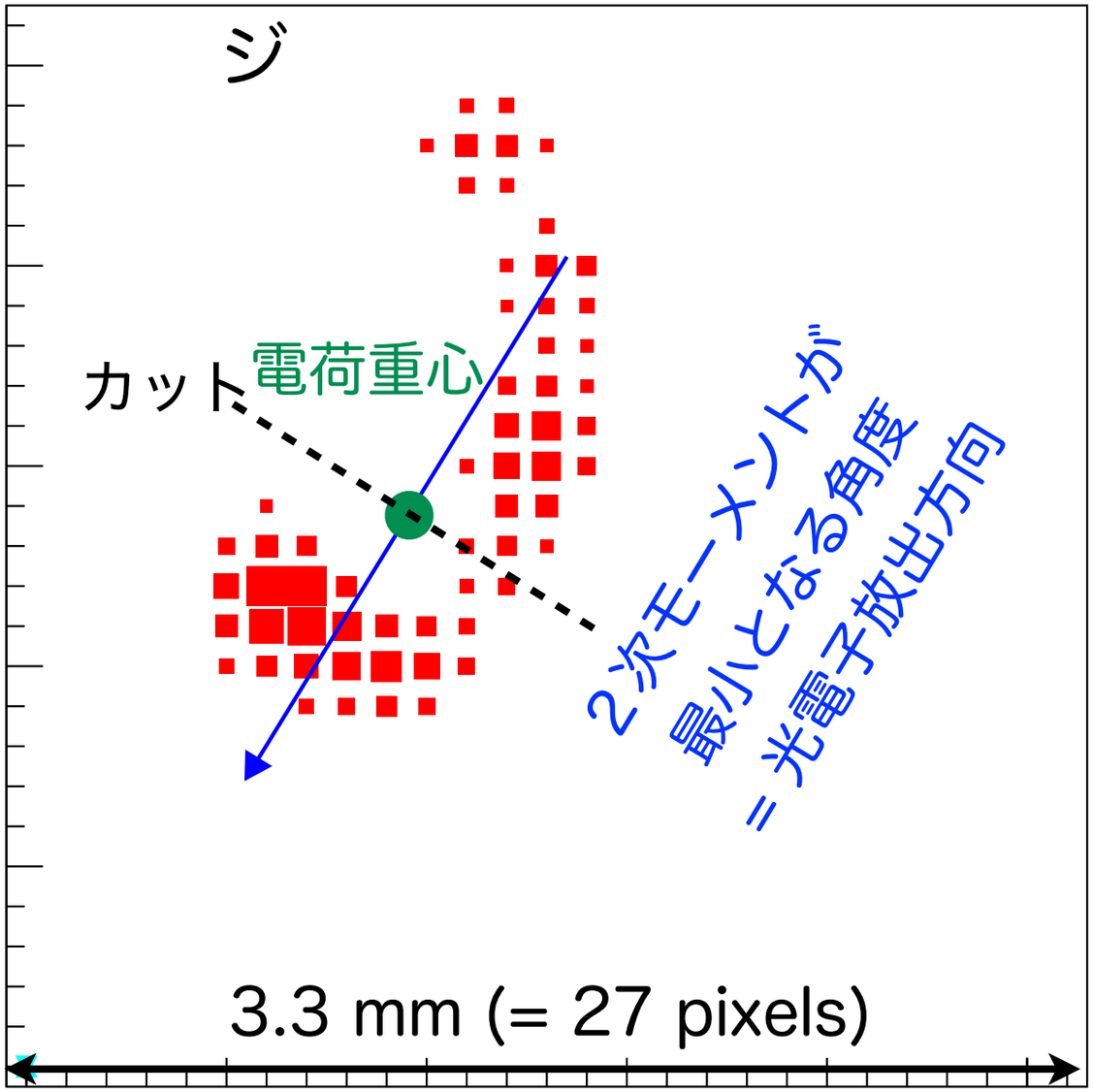
変調因子:

$$\mu = \frac{\text{サインカーブの高さ}}{\text{サインカーブのオフセット}} = 34.4 \pm 0.5\%$$

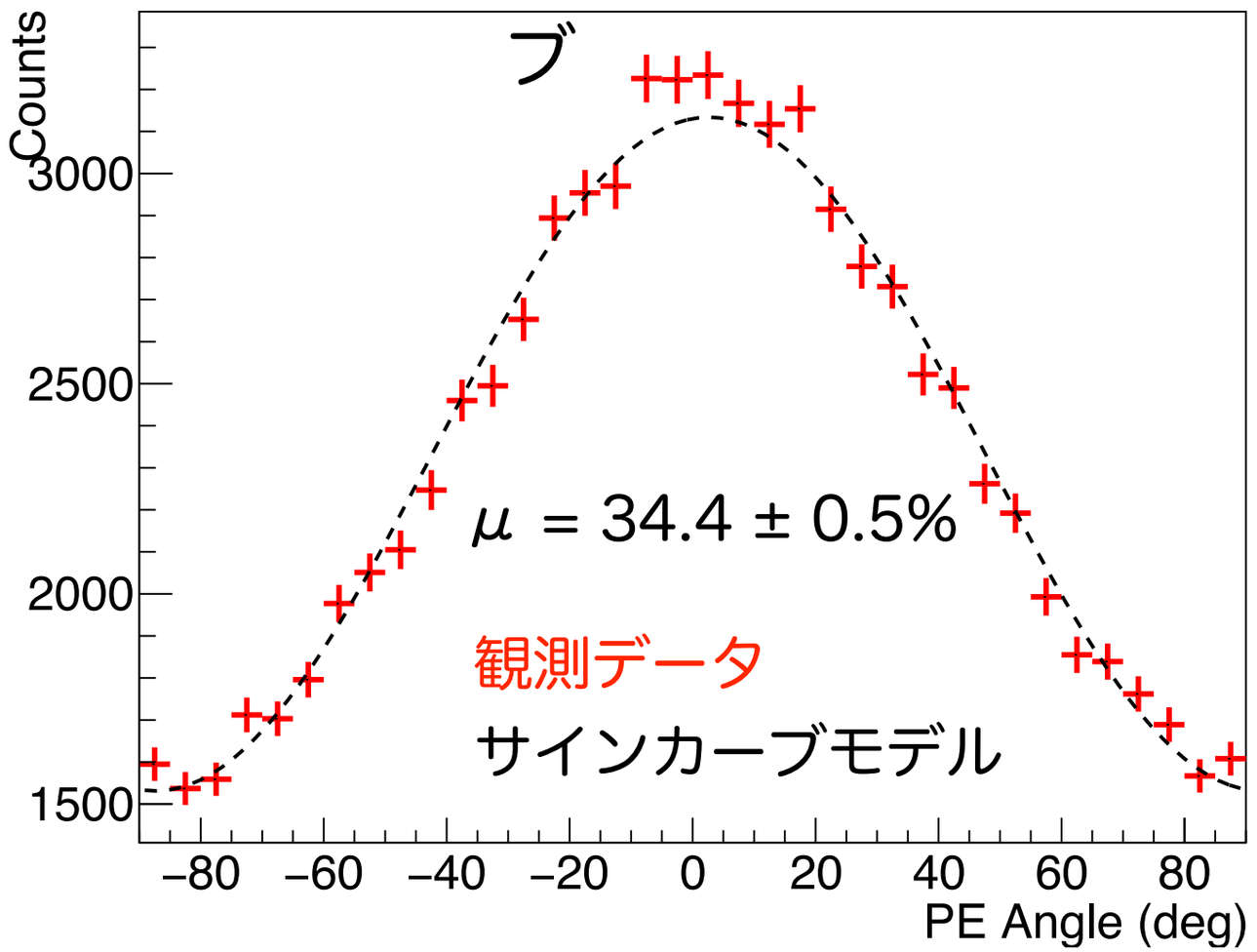
(ビーム偏光度を含む)

6.4 keV X線の偏光測定

光電子飛跡イメージ



変調カーブ



- 光電子放出方向の再構成
  1. 電荷重心の計算
  2. 電荷重心を中心に、２次モーメントを最小となる角度を導出
  3. ブラッグピークカット

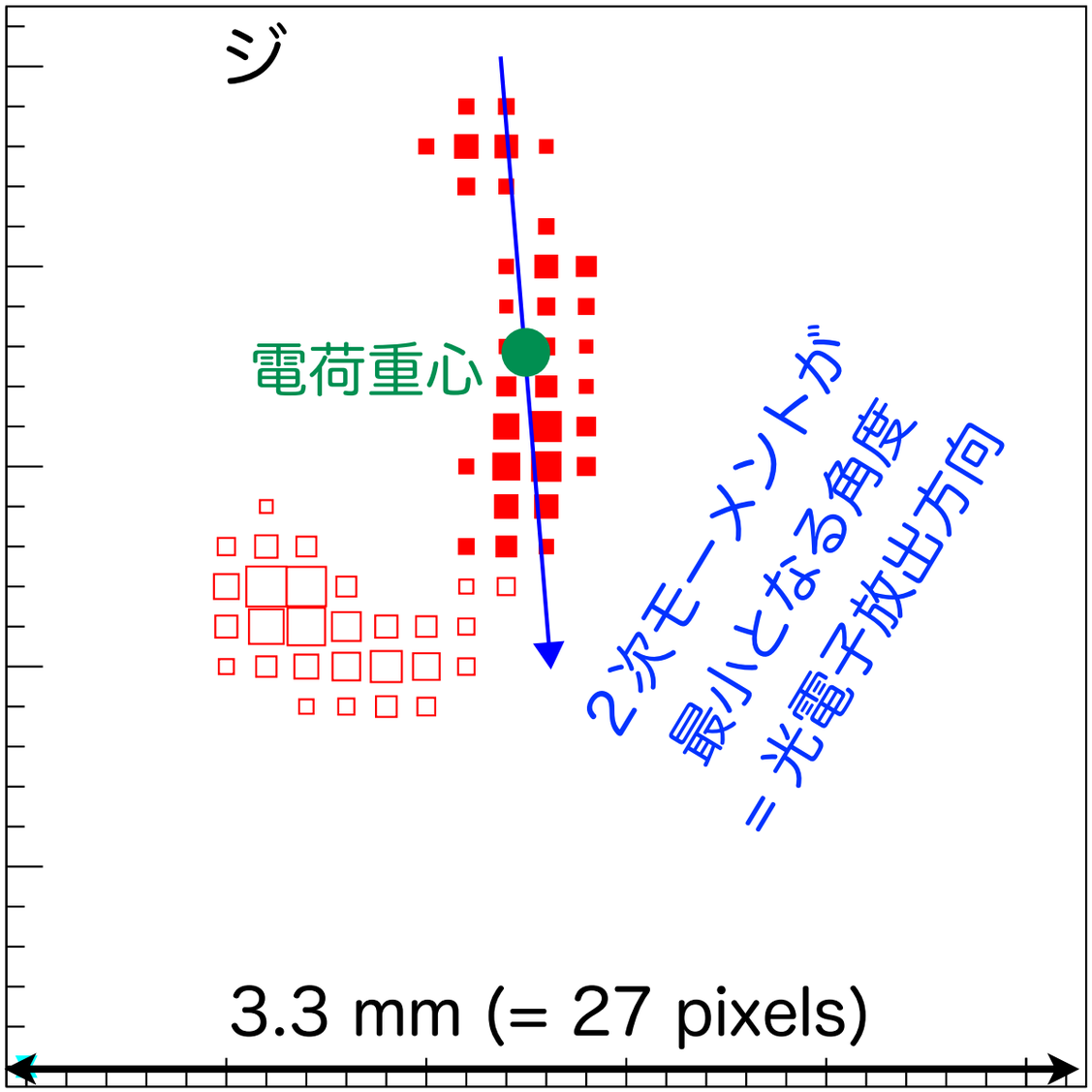
変調因子:

$$\mu = \frac{\text{サインカーブの高さ}}{\text{サインカーブのオフセット}} = 34.4 \pm 0.5\%$$

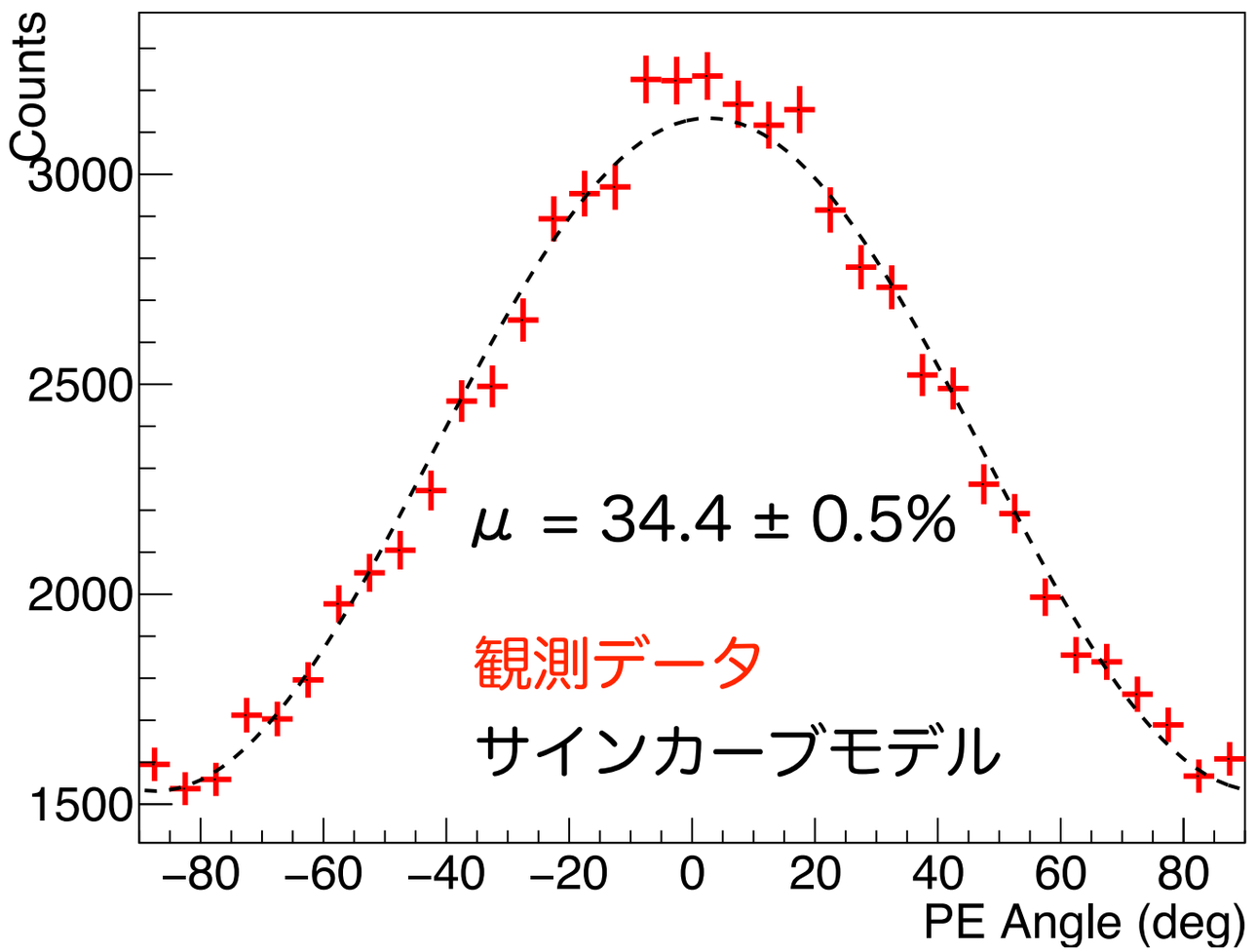
(ビーム偏光度を含む)

6.4 keV X線の偏光測定

光電子飛跡イメージ



変調カーブ



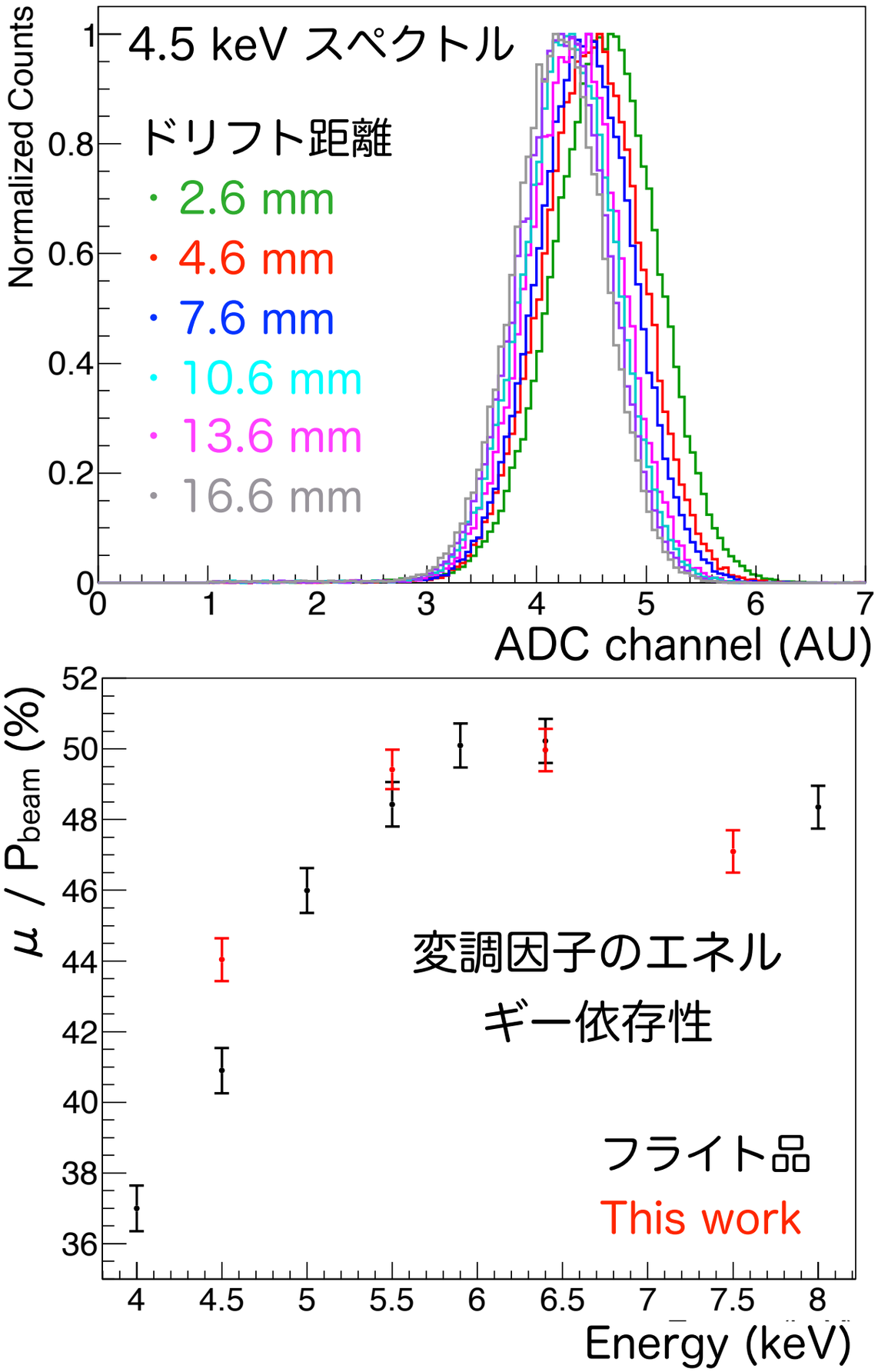
- 光電子放出方向の再構成
  1. 電荷重心の計算
  2. 電荷重心を中心に、２次モーメントを最小となる角度を導出
  3. ブラッグピークカット
  4. 残った電荷分布で 1, 2 を再計算

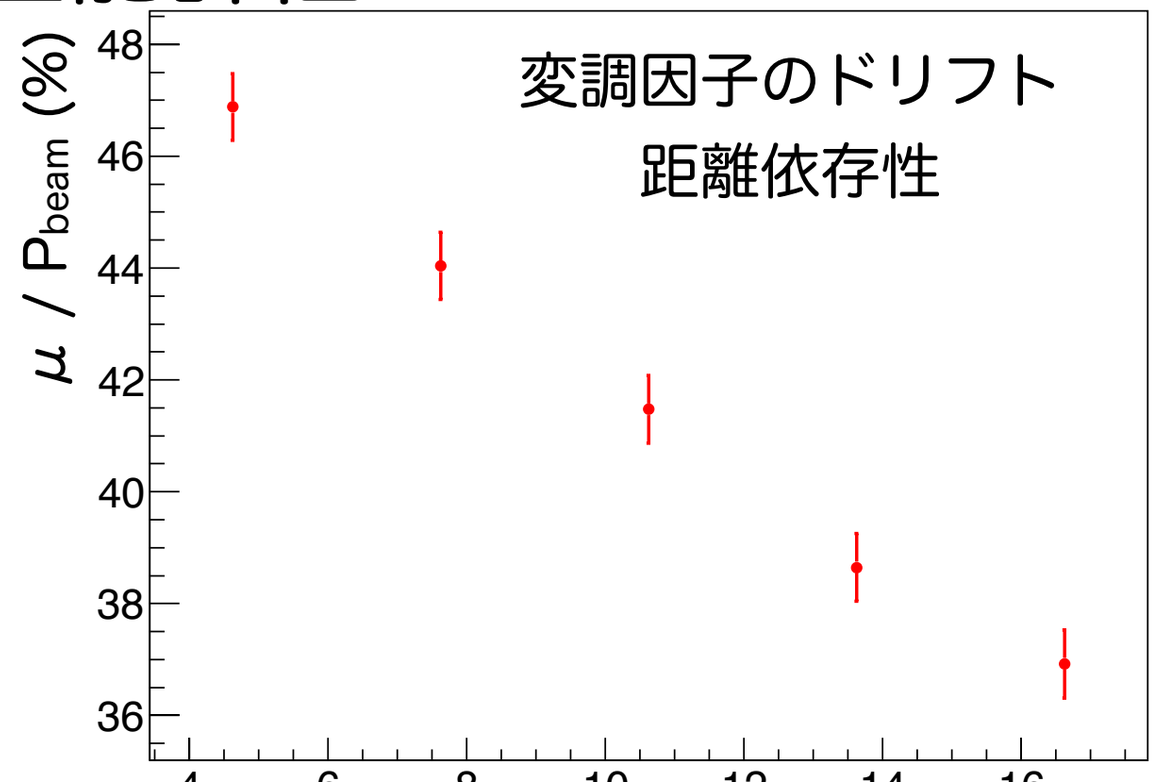
変調因子:

$$\mu = \frac{\text{サインカーブの高さ}}{\text{サインカーブのオフセット}} = 34.4 \pm 0.5\%$$

(ビーム偏光度を含む)

偏光計の性能評価



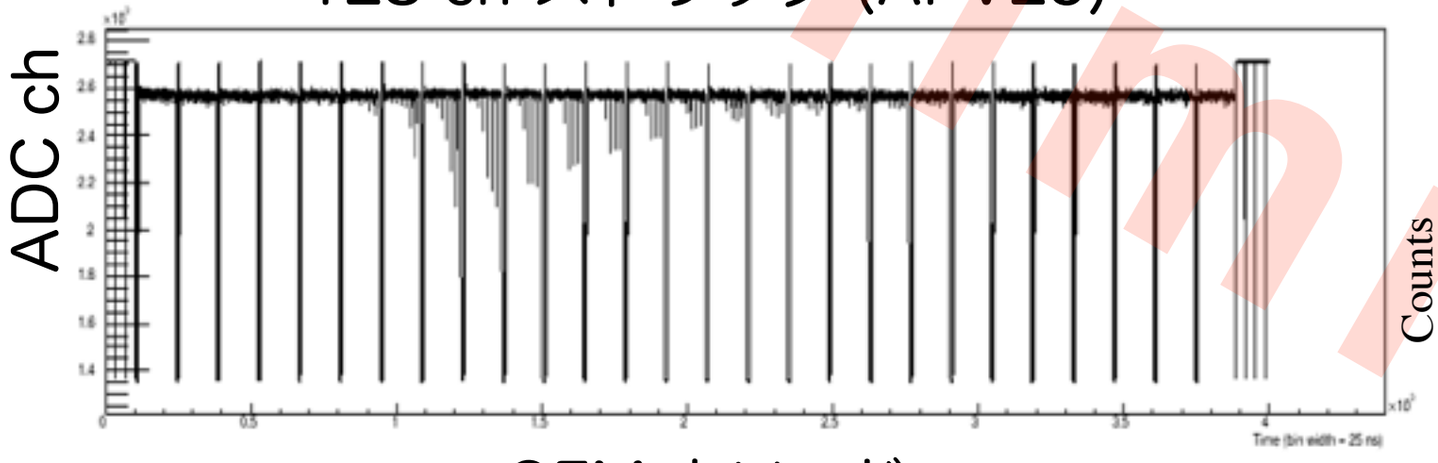


- エネルギー分解能 ~ 24% @ 4.5 keV
- ドリフト距離が長くなると低エネルギー側にピークがシフト
  - 不純ガスによる電子吸着
  - 長時間ベーキングで減少可
  - フライト品ではピークシフトなし (Hill+13)
- 変調因子 μ ~ 40-50%
- ドリフト距離が長くなると、10 %/cm で減少
  - 電子拡散によるイメージボケ
  - σ = 140 μm $\sqrt{}$ h/cm = 1.2 pixel $\sqrt{}$ h/cm
- μ (~ 50%) の最大値は、DME との電子散乱により制限

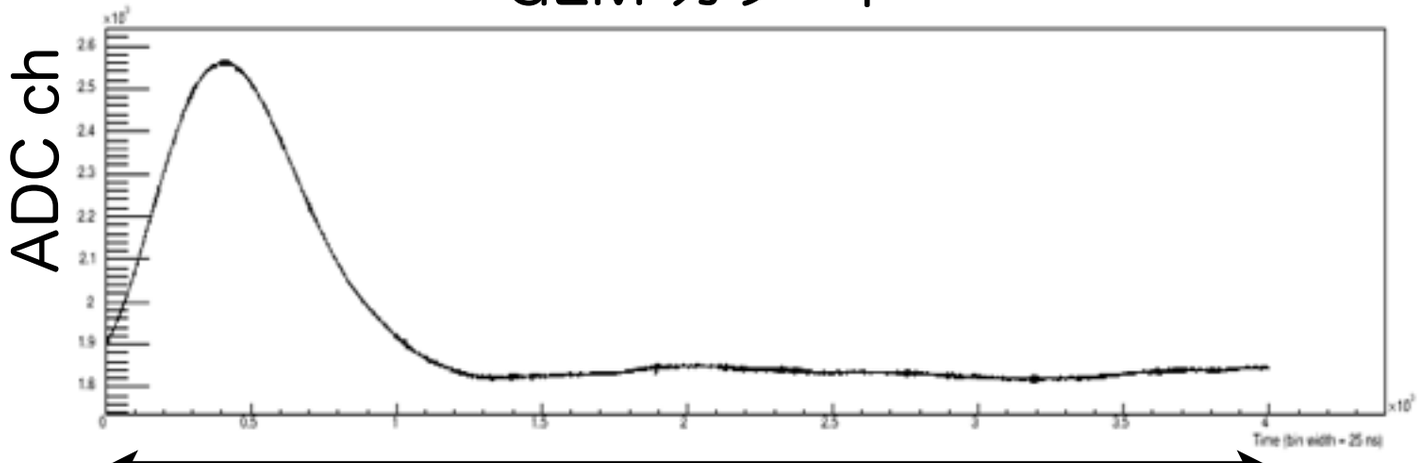
SRS を用いた GEM カソード信号の波形取得

- GEM カソード信号
  - トリガーの生成だけでなく、スペクトルも取得
  - Shaper 出力を LVDS ドライバに入力し、その出力を HDMI ケーブル経由で SRS に入力
  - 100 μs の波形取得に成功

128 ch ストリップ (APV25)

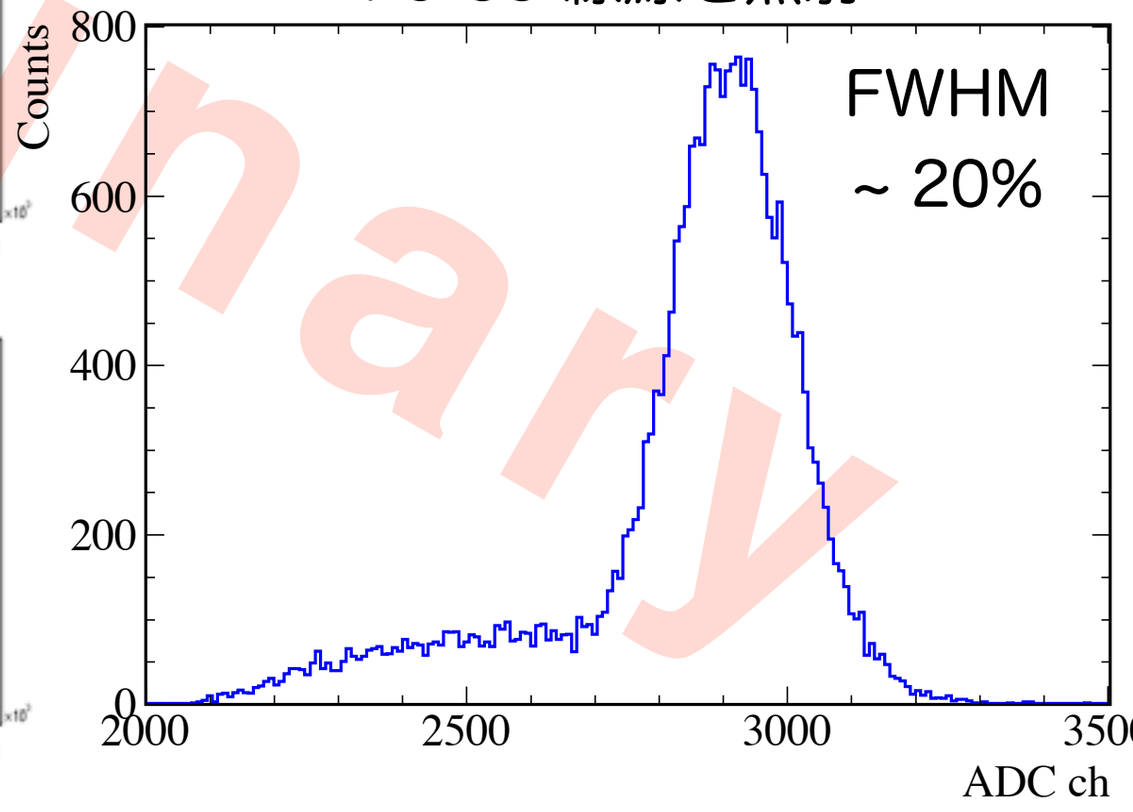


GEM カソード



100 μs (= 25 ns x 4000 ビン)

Fe-55 線源を照射



Preliminary

まとめ

- 宇宙Ｘ線の偏光観測のための GEM-TPC 偏光計を開発
  - PRAXyS 衛星計画を昨年末に NASA の小型衛星として提案
  - 今夏に３つの打ち上げ最終候補の１つとして選定
  - 来年度に最終選定
- 地上テスト用に SRS/APV25 を利用した偏光計を理研で開発
  - サンプリングレート = 40 MHz (フライト品では 20 MHz)
  - サンプリング数 = 27 (フライト品では 27)
- SPring-8 での性能評価
  - ビームライン BL32B2 を利用
    - ビーム偏光度 ~ 80%
  - 4.5/6.4 keV の偏光Ｘ線ビームに対して、
    - エネルギー分解能 ~ 24/20%
    - 変調因子 μ ~ 40/50%、フライト品と同等