

将来X線偏光観測に向けた シンチレータ+MPPPCでの 低エネルギー応答の評価

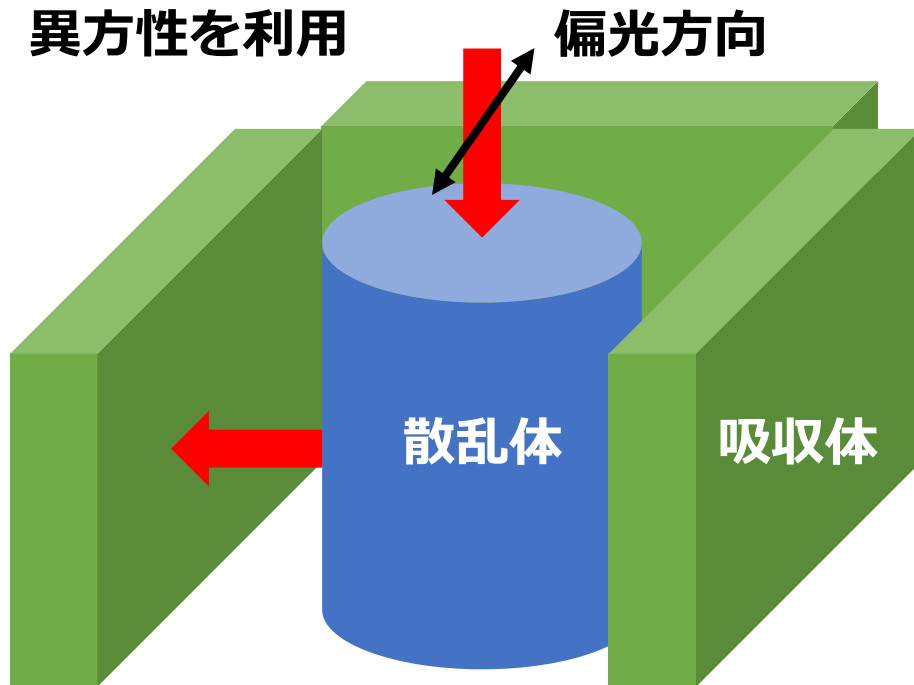
鳥越健斗、内田和海、水野恒史、高橋弘充、深沢泰司
(広大理)

背景(X線偏光観測の概要)

X線偏光観測の利点

他の観測方法では見られない
磁場構造、幾何学的構造の理解
(パルサー、降着円盤など)

コンプトン散乱による
異方性を利用



コンプトン偏光計の概念図



かにパルサーX線写真

(Credit: NASA/CXC/ASU/J. Hester et al.)

原理上多数の検出器が必要

- 消費電力、サイズによる制限
- 観測例が少ない

背景(これまでの観測と課題)

これまでの観測結果(かに星雲)

	エネルギー (keV)	偏光度 (%)	偏光方位角 (deg)
OSO-8 (1976-78)	2.6	19.2 ± 1.0	156.4 ± 1.4
	5.2	19.5 ± 2.8	152.6 ± 4.0
INTEGRAL (2002~)	数100-1000	46 ± 10	123 ± 11
PoGO+ (2016)	20-160	20.9 ± 5.0	131.3 ± 6.8

**> 数10 keVで測定誤差大
観測を増やす必要**

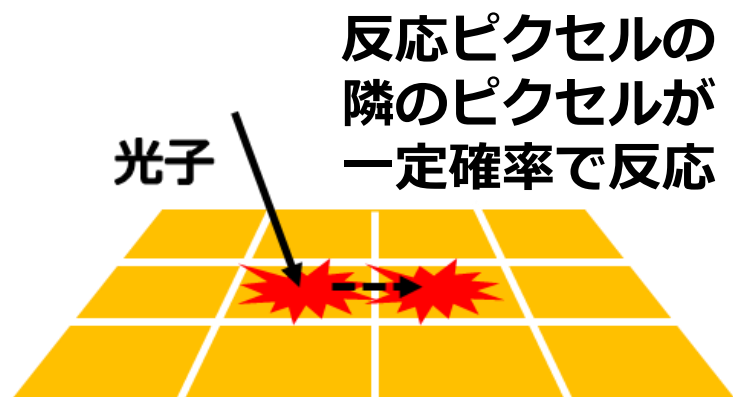
背景(MPPPCの特徴)

MPPPCとPMTの性能比較

	ゲイン	動作電圧 (V)	サイズ (mm)	量子効率 (%)	磁場による 影響	暗電流 発生率
PMT	$10^5 - 10^8$	800- 1000	10-760	20-30	大	低
MPPPC	$10^5 - 10^6$	50-70	1-6	20-50	小	高

課題: **暗電流低減、低エネルギースレッシュホールド達成**

PMTと同等の性能、かつ扱いやすい検出器の実現



クロストークの概念図

**MPPPC特有のノイズ
クロストークを要補正**

目的と手法

散乱体: プラスチックシンチレータ

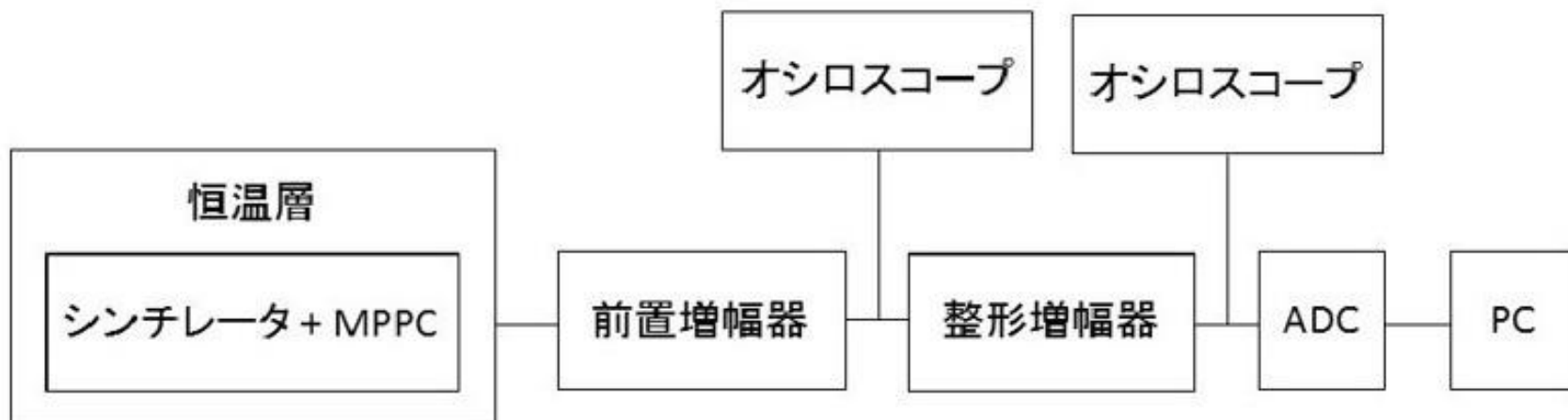
プラスチックシンチレータ+MPPCシステムでの
低エネルギー応答
(スレッシュホールド・リニアリティ)の評価

暗電流低減のための
実験条件模索

^{55}Fe (5.9 keV)に対応する平均光子数を決定

クロストークを加味した
ポアソン分布でフィット

セットアップ



プラスチック
シンチレータ (S13360-3050CS
($4 \times 4 \times 15 \text{ mm}^3$))

MPPC
($3 \times 3 \text{ mm}^2$)

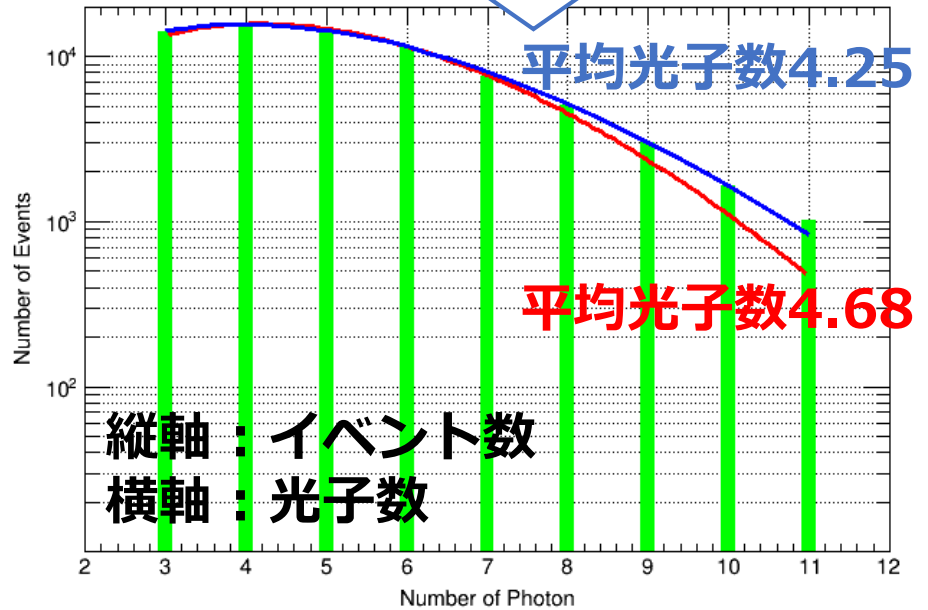
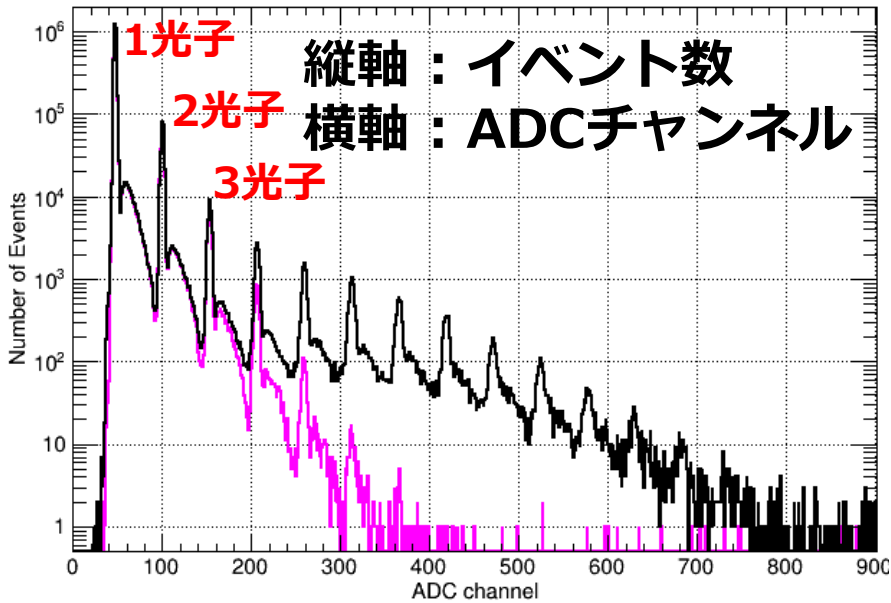
(Eljen Technology EJ-204)

暗電流低減のための実験条件

- オーバー電圧: 3.65 V
- 整形時定数: 50 ns
- 動作温度: $-20 \text{ }^\circ\text{C}$
- 最新モデルのMPPC使用
- MPPCの受光面に合ったサイズのシンチレータ使用

結果(スレッショルド)

精度向上、値は
9%下がった



黒：⁵⁵Fe+暗電流のスペクトル
桃：暗電流のスペクトル

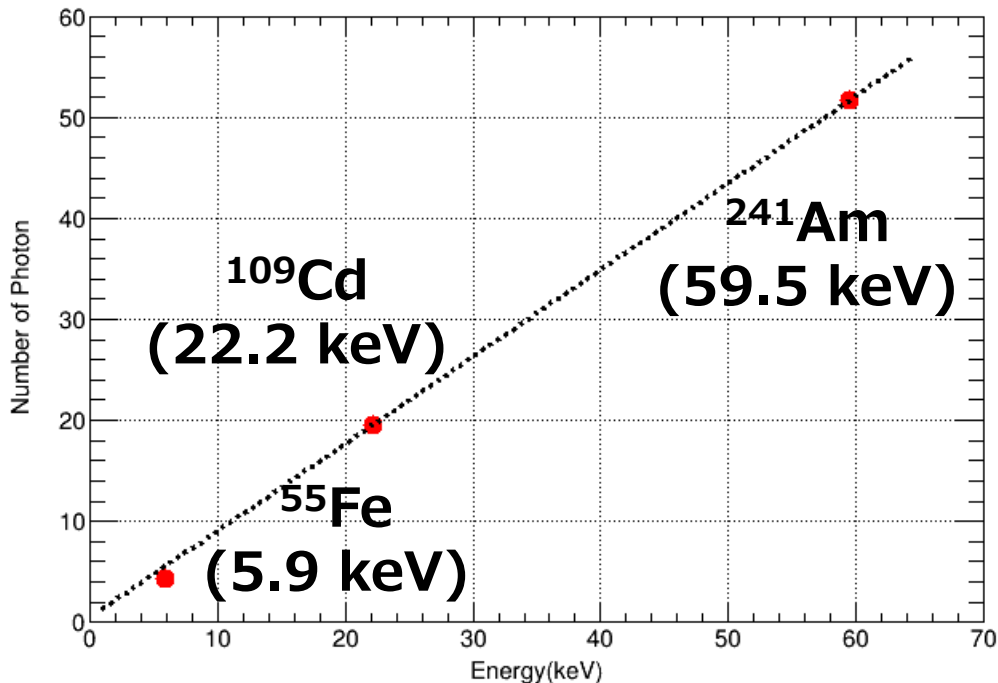
緑：⁵⁵Feの光子数分布
青：ポアソン分布
(クロストークを加味)
赤：ポアソン分布

1. 暗電流イベントを差し引く
2. 隣のピークへの漏れこみ
(分解能による広がり)を補正
3. 離散的な光子数分布を作成

クロストーク回数	1	2
確率(%)	8.5	1.0

スレッショルド~5 keV達成(~100 Hz)

結果(リニアリティ)



(光子数)-(エネルギー)較正直線

縦軸：光子数

横軸：エネルギー(keV)

PMTを用いた
単色光での測定値

^{109}Cd , ^{241}Am においては
1光子と光電吸収ピークの
チャンネル比から光子数を導出

本来の光子数は
9%小さい

22.2 keV, 59.5 keVに対応する
データ点で線形フィット

- 非線形性を確認
(24%のずれ)
- クエンチングの影響
(文献値: ~20%)

さらなる暗電流低減に向けて

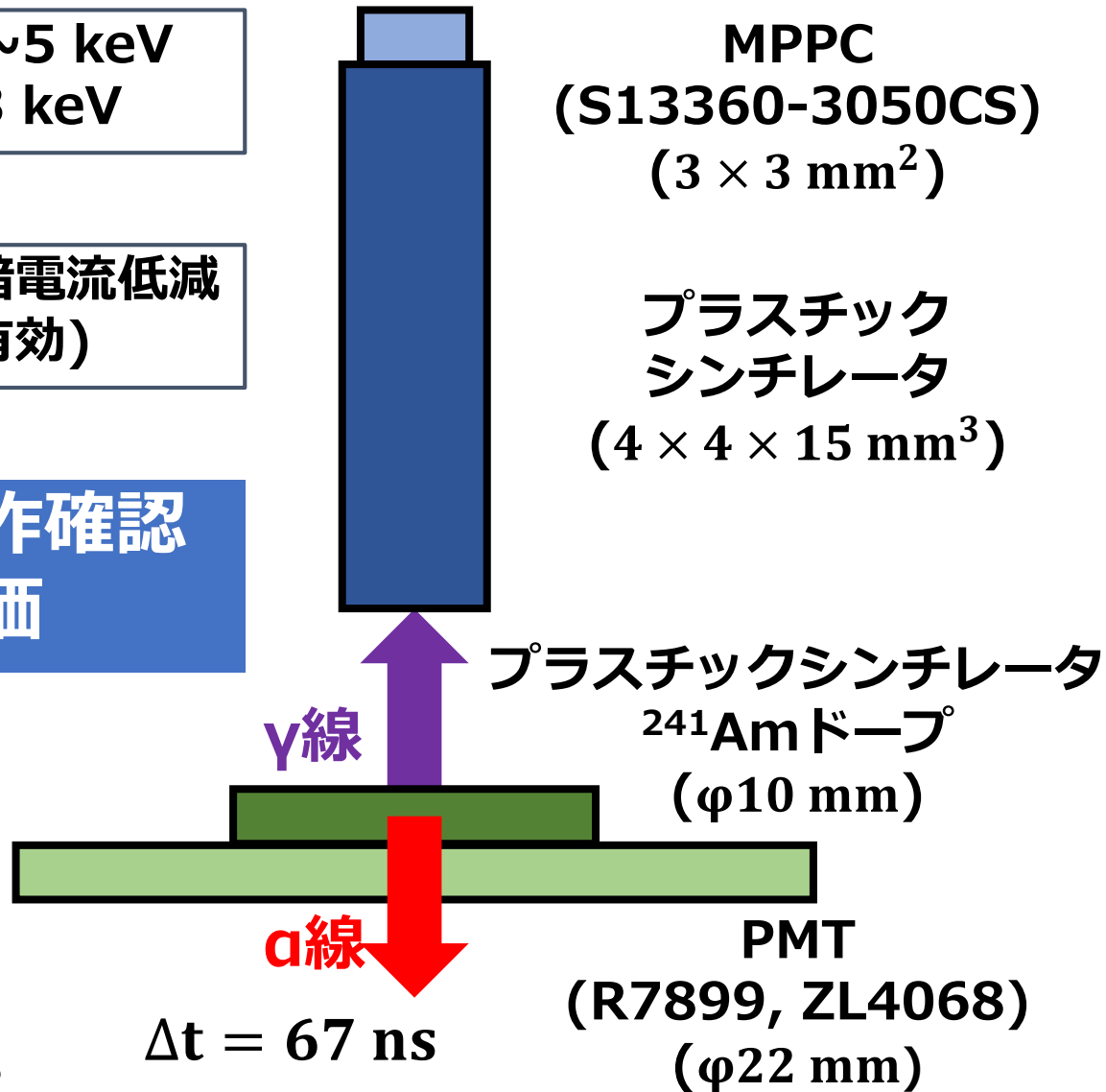
達成したスレッショルド: ~5 keV
目標スレッショルド: ~3 keV



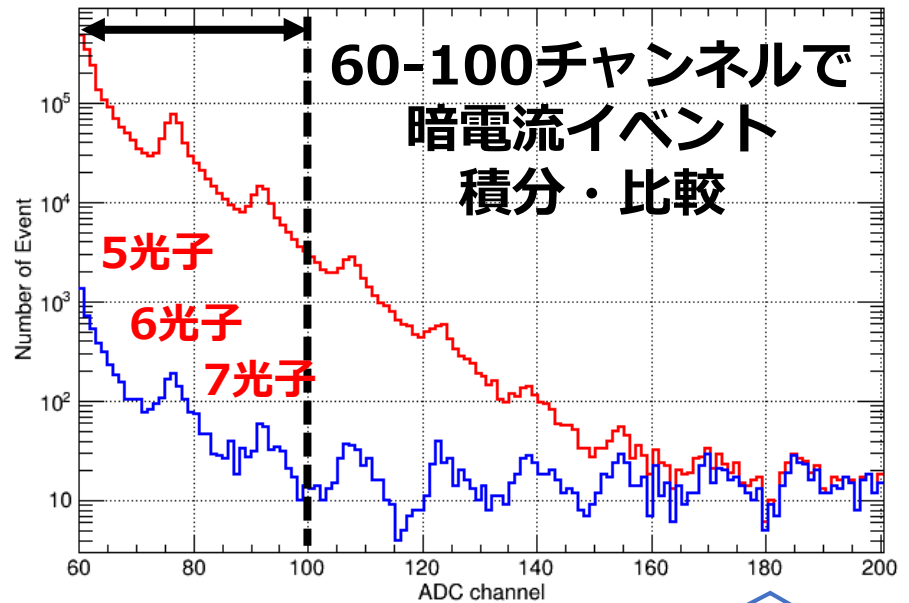
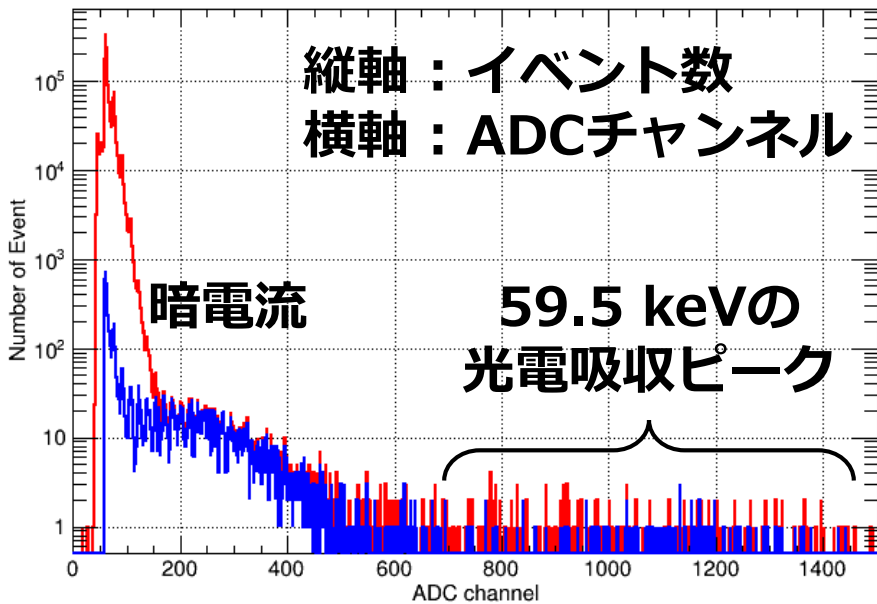
コインシデンス法を用いて暗電流低減
(コンプトン偏光計で有効)

- 読み出し装置の動作確認
- 暗電流削減率の評価

読み出し装置: FADC Board
MPPCオーバー電圧: 4.15 V
PMT印加電圧: 1125 V
整形時定数: 2.2 μ s
動作温度: 20 $^{\circ}$ C
コインシデンス時間幅: 500 ns



結果(コインシデンス実験)



赤： ^{241}Am のスペクトル(コインシデンス法不使用)

青： ^{241}Am のスペクトル(コインシデンス法使用)

信号のレート
~10 Hz

暗電流削減率

測定値： 2.6×10^{-3}

理論値： 3.7×10^{-3}

暗電流削減の動作原理を確認

削減率の理論式： $2 \times (\text{コインシデンス時間幅}) \times (\text{PMTで検出される信号のレート})$ 10

まとめと今後

プラスチックシンチレータ+MPPCシステムでの低エネルギー応答の評価

- スレッシュホールド \sim 5 keV達成(\sim 100Hz)
- プラスチックシンチレータの非線形性を確認
(5.9 keVにおいて24 %のずれ)

コインシデンス法使用時

暗電流削減の動作原理を確認

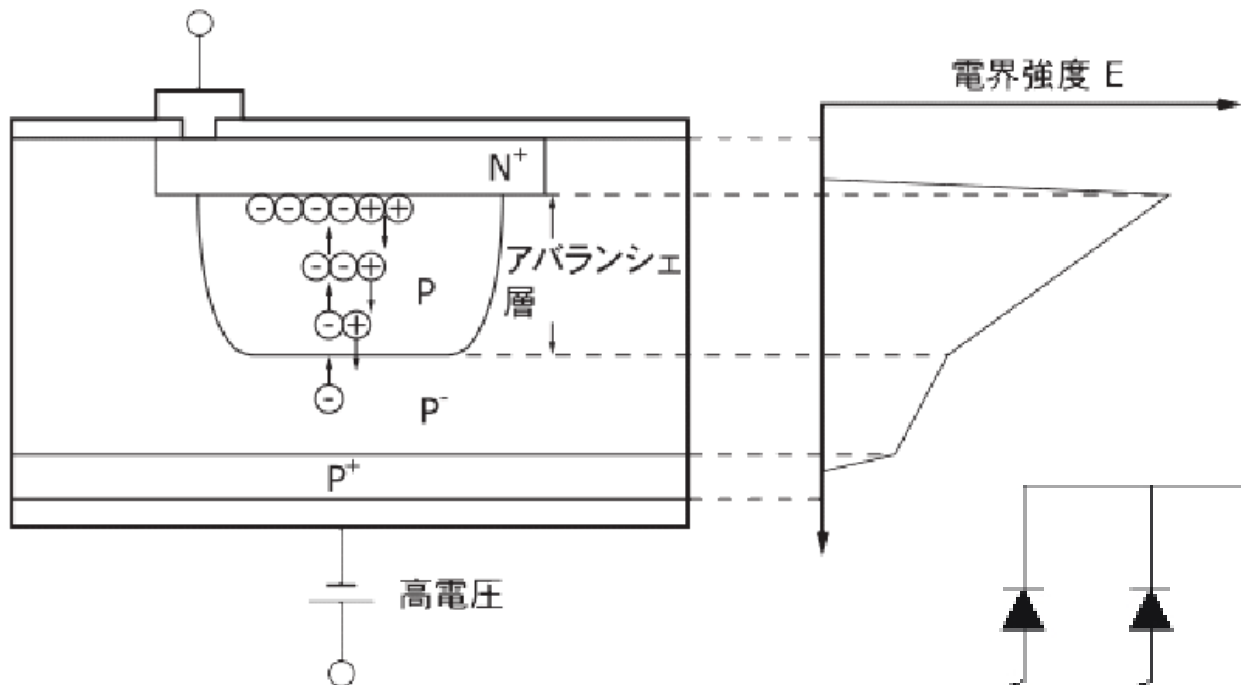
今後はコインシデンス法使用時のスレッシュホールドを定量評価

参考文献

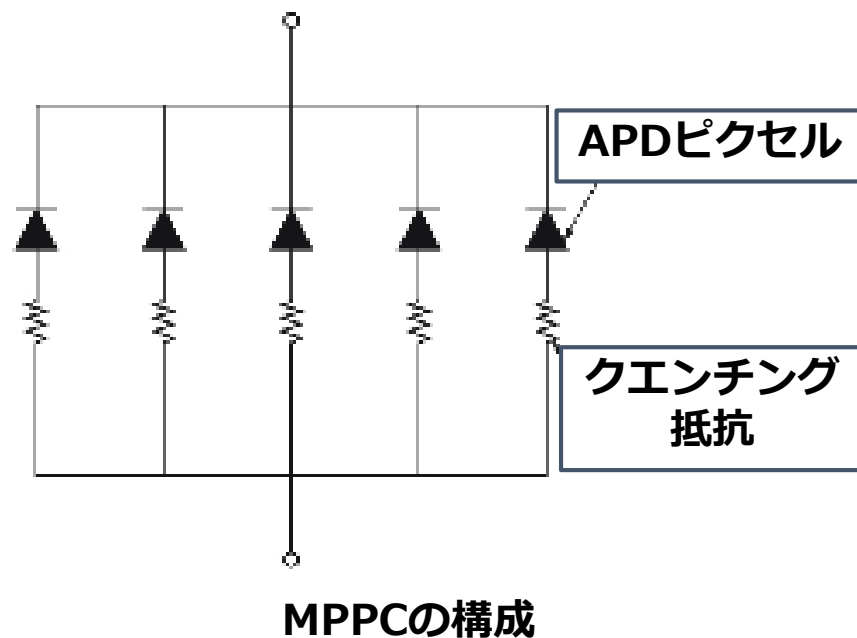
- **M.C Weisskopf, et al., 1977, ApJ 220, L117**
- **M. Forot, et al., 2008, ApJ 688, L129**
- **M. Chauvin, et al., 2017, Scientific Reports 7: 7816**
- **T. Mizuno, et al., 2009, NIMA 600, 609-617**

予備スライド

MPPCの光子数検出原理



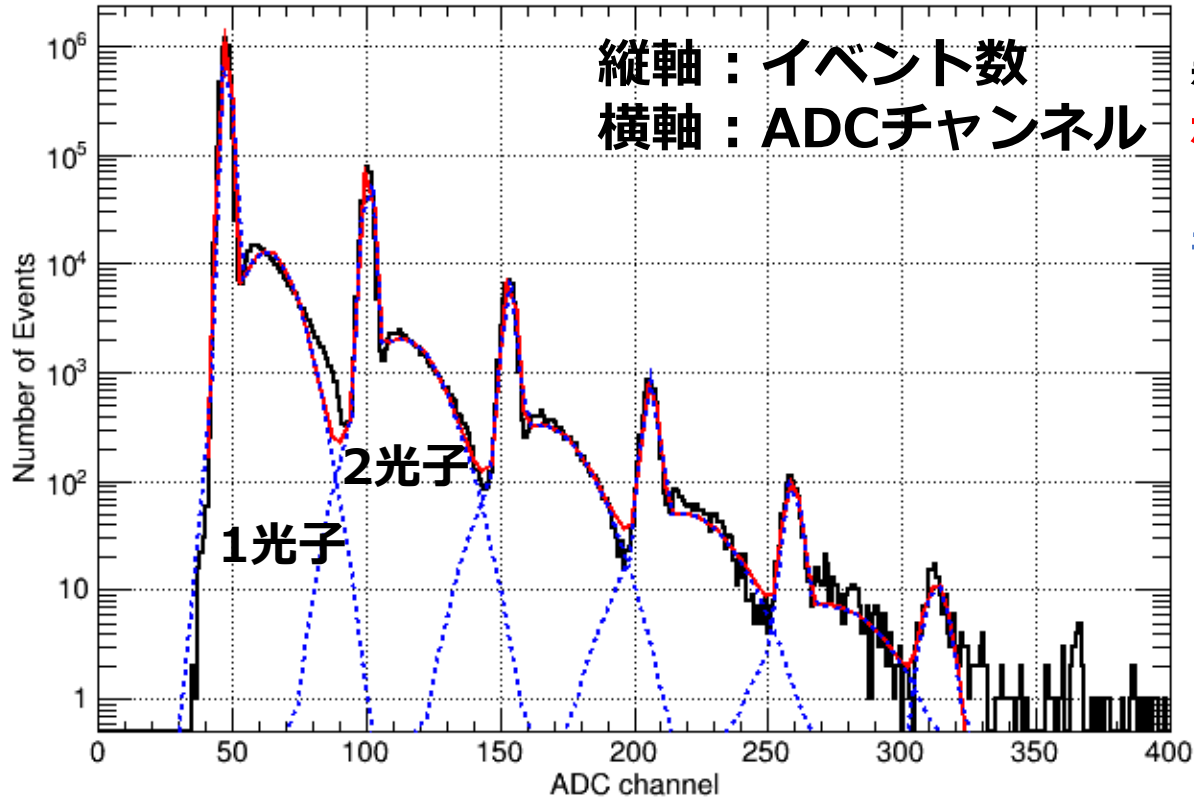
アバランシエ増大の模式図



光子数検出原理

1. ひとつのピクセルに光子入射
2. 放電(印加電圧が降伏電圧超過時)
3. 抵抗に電流が流れ、電圧降下
4. 放電終了

漏れこみ補正とクロストーク確率



黒：暗電流のスペクトル
赤：複数のガウシアン
和でのフィット結果
青：各光子数の
イベントに対応する
ガウシアン

離散的な光子数分布の作成手順

1. 全体を複数のガウシアン
の和でフィット(赤)
2. 各光子数のイベント
に対応するガウシアンに
分離、積分(青)

$$\left(\begin{array}{c} \text{クロストーク回数} \\ \text{1回の確率} \end{array} \right) = \frac{\text{(2光子以上のイベント)}}{\text{(1光子以上のイベント)}}$$

クロストークの補正方法

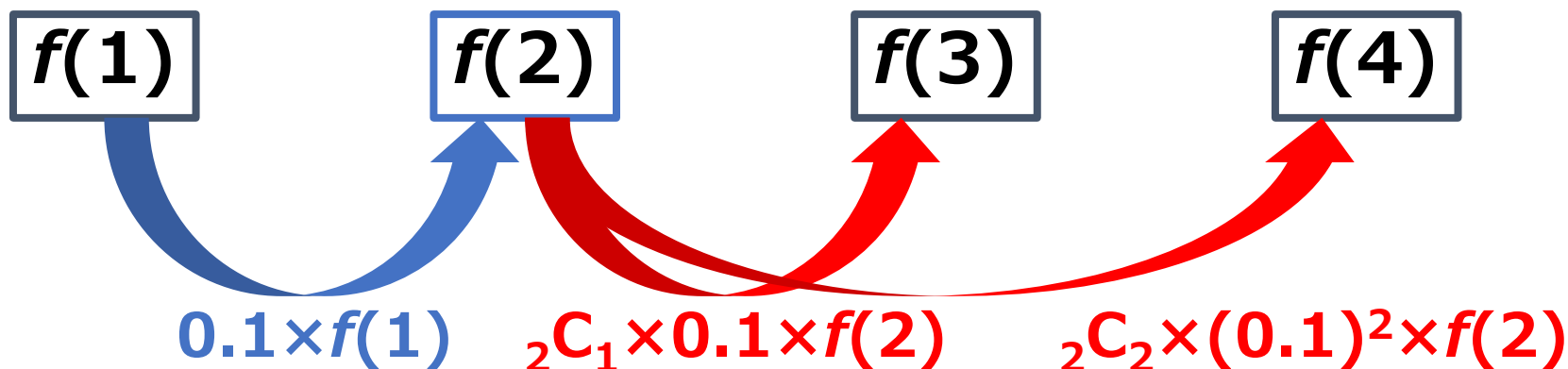
簡単のため、以下の仮定を行なう

- クロストークは2回以上起こらない
- クロストーク確率は10 %

ポアソン分布関数: $f(n) = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!}$

例として、2光子として検出されるイベントに注目する

クロストークが起こらない場合の各光子数 n におけるイベント数



(2光子として検出されるイベント)

$$= f(2) + 0.1 \times f(1) - {}_2C_1 \times 0.1 \times f(2) - {}_2C_2 \times (0.1)^2 \times f(2)$$

削減率の理論式

コインシデンス法使用時の暗電流のレート: r_C

コインシデンス法未使用時の暗電流のレート: r_{NC}

MPPCの暗電流のレート: r_{dark}

放射線源のレート: r_{source}

コインシデンス時間幅: τ

$$r_{NC} = r_{\text{dark}}$$

r_C はPMTで検出される放射線源からのイベントと、MPPCで検出される暗電流イベントの偶然同時であるから

$$r_C = 2\tau r_{\text{dark}} r_{\text{source}}$$

削減率は r_C を $r_{NC} = r_{\text{dark}}$ で割った値

$$\frac{r_C}{r_{NC}} = 2\tau r_{\text{source}}$$