

# 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

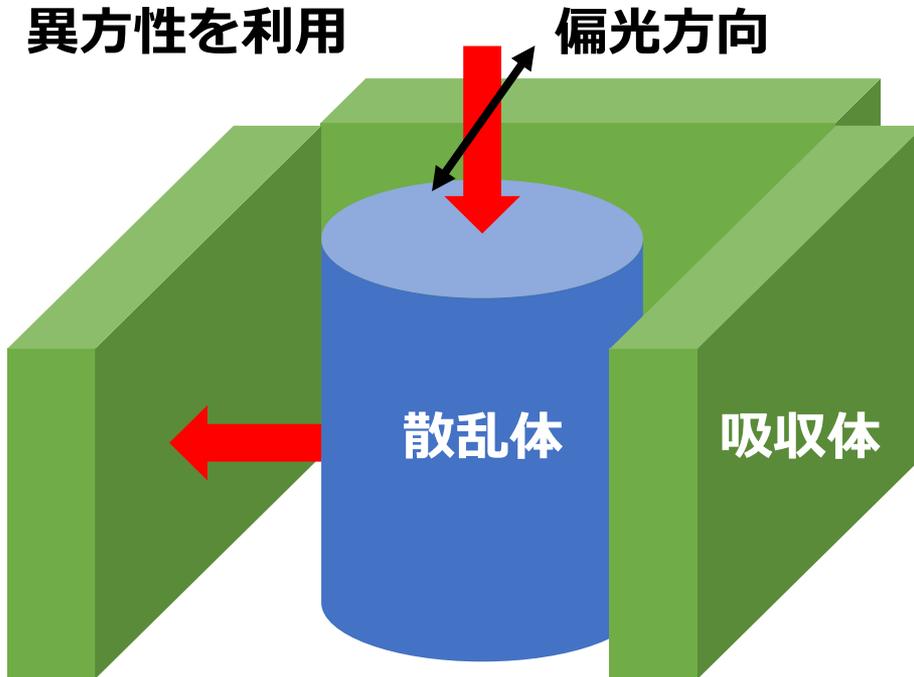
鳥越健斗、内田和海、水野恒史、高橋弘充、深沢泰司  
(広大理)

# 背景(X線偏光観測の概要)

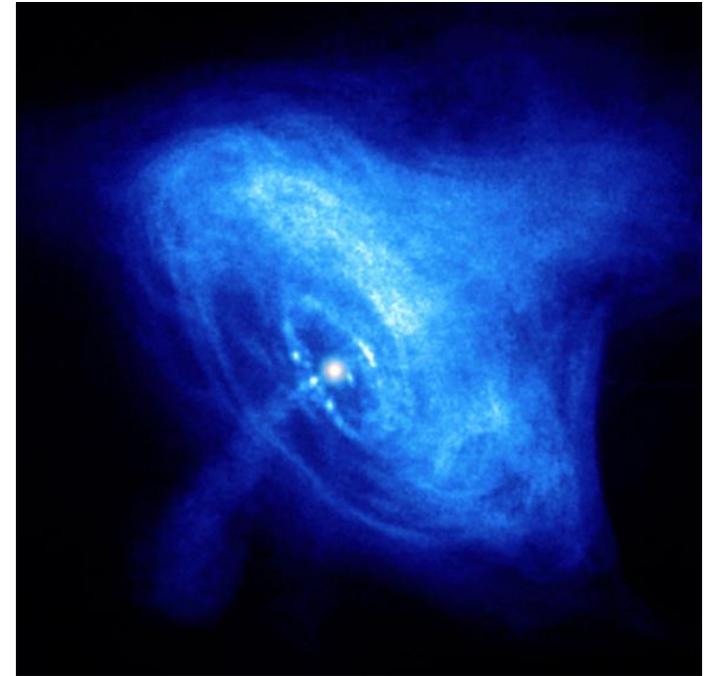
## X線偏光観測の利点

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	$19.2 \pm 1.0$	$156.4 \pm 1.4$
	5.2	$19.5 \pm 2.8$	$152.6 \pm 4.0$
INTEGRAL (2002~)	数100-1000	$46 \pm 10$	$123 \pm 11$
PoGO+ (2016)	20-160	$20.9 \pm 5.0$	$131.3 \pm 6.8$

> 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	$10^5 - 10^6$	<b>50-70</b>	1-6	<b>20-50</b>	<b>小</b>	<b>高</b>

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

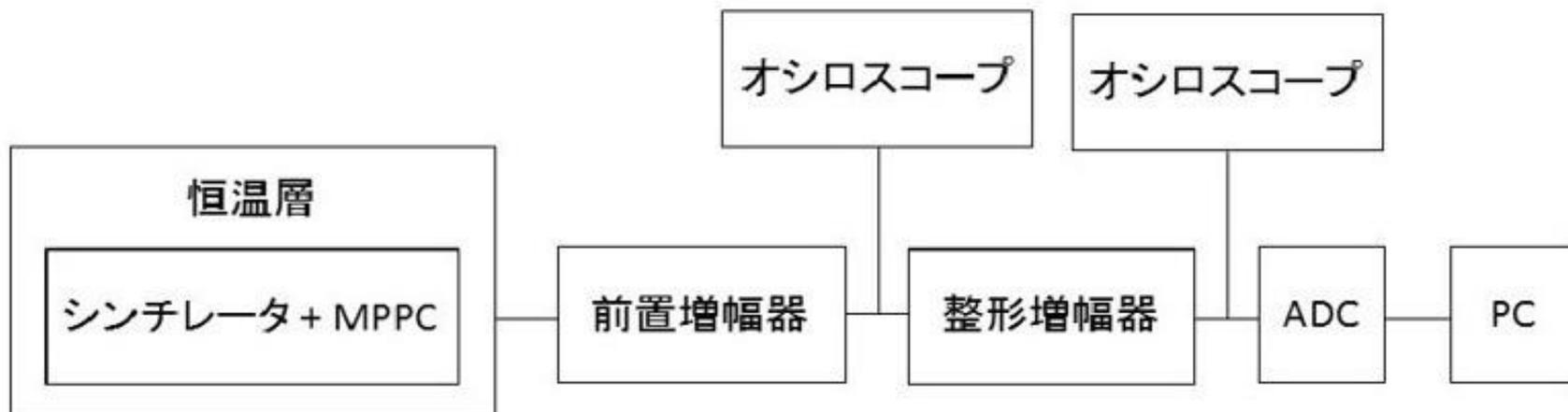
プラスチックシンチレータ+MPPCシステムでの  
低エネルギー応答  
(スレッシュホールド・リニアリティ)の評価

暗電流低減のための  
実験条件模索

$^{55}\text{Fe}$ (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  
( $3 \times 3 \text{ mm}^2$ )

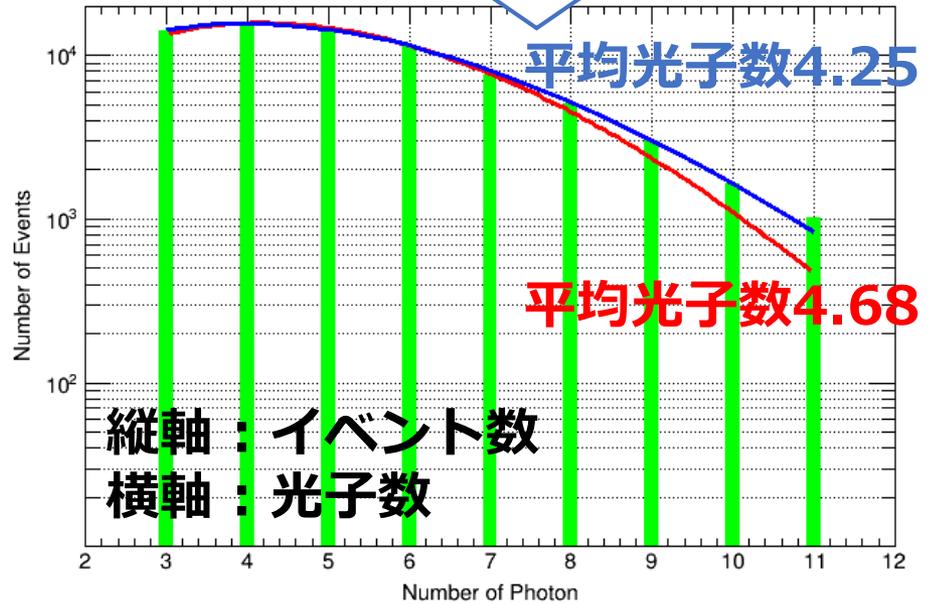
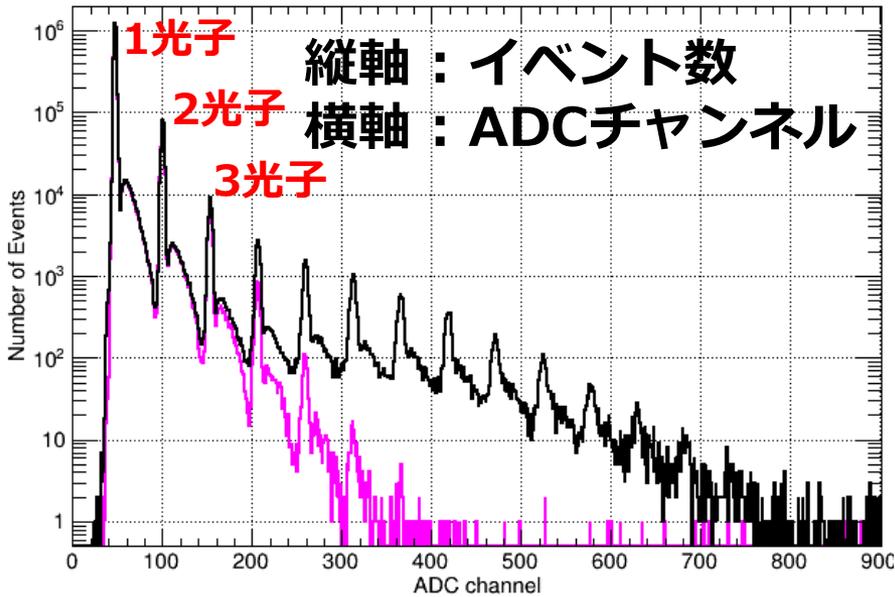
(Eljen Technology EJ-204)

## 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：<sup>55</sup>Fe+暗電流のスペクトル  
桃：暗電流のスペクトル

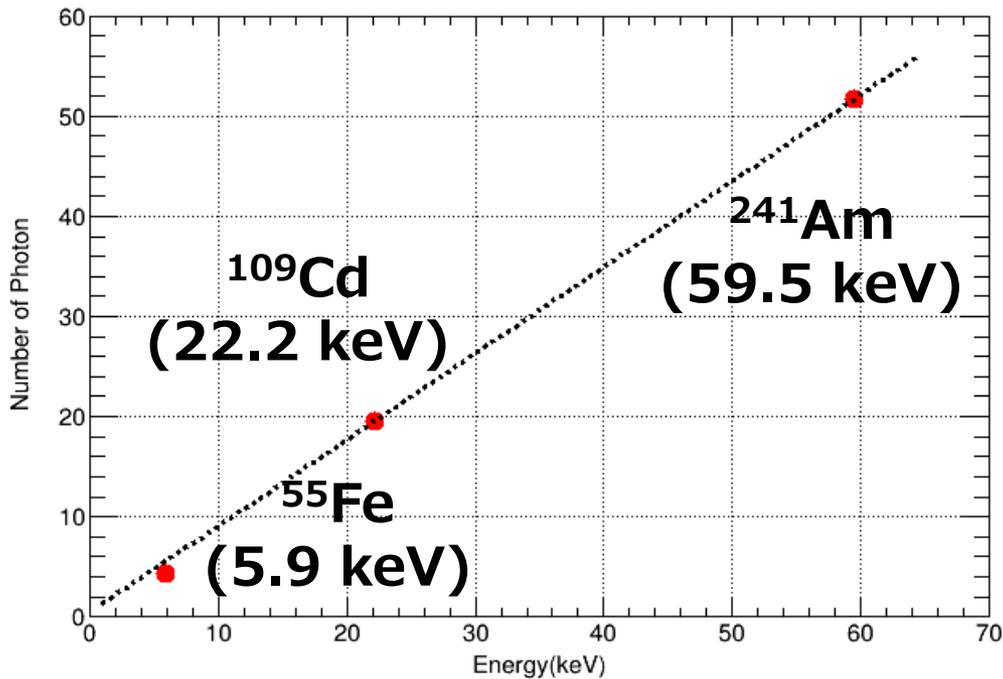
緑：<sup>55</sup>Feの光子数分布  
青：ポアソン分布  
(クロストークを加味)  
赤：ポアソン分布

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

$^{109}\text{Cd}$ ,  $^{241}\text{Am}$ 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

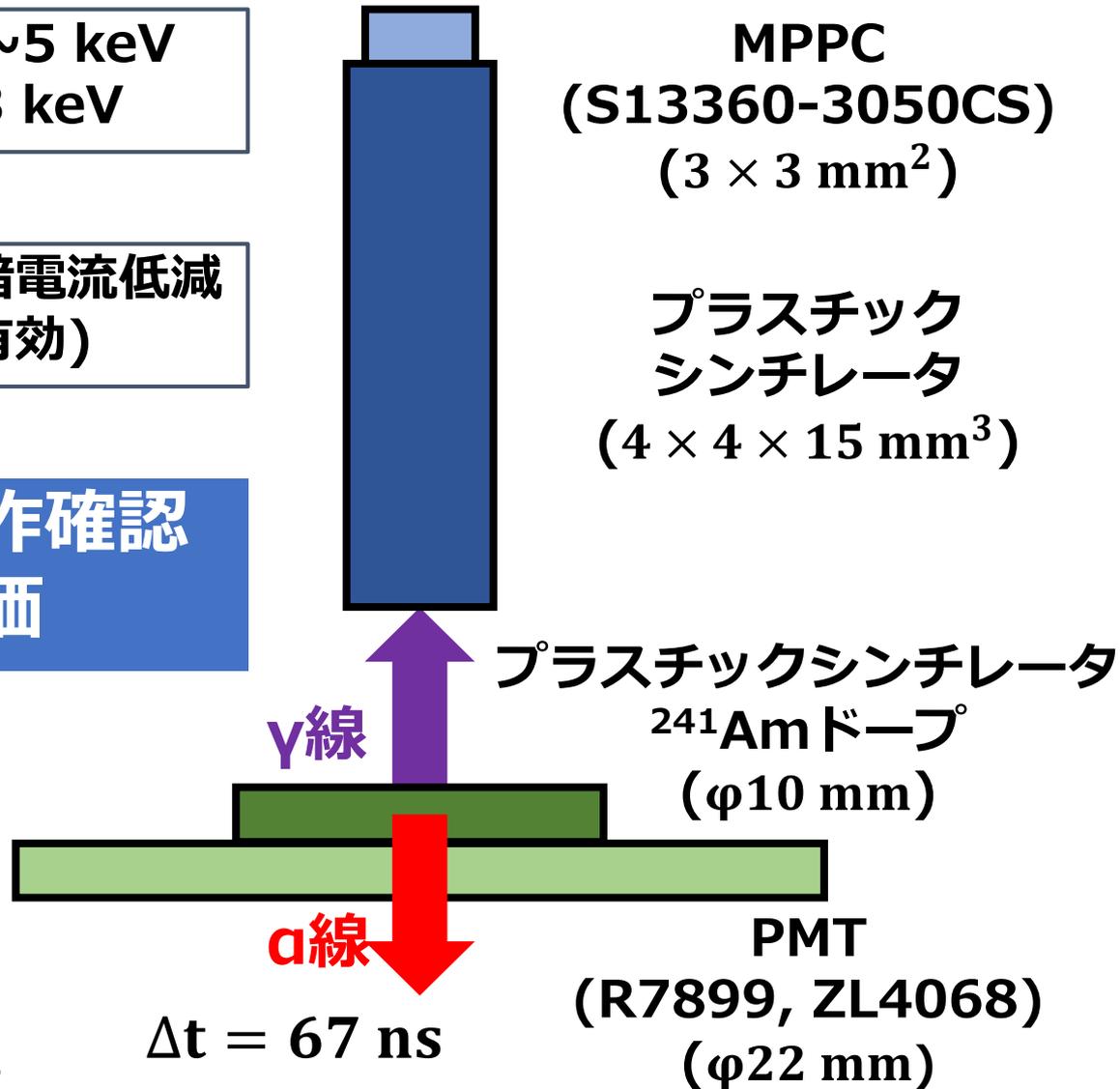
達成したスレッショルド: ~5 keV  
目標スレッショルド: ~3 keV



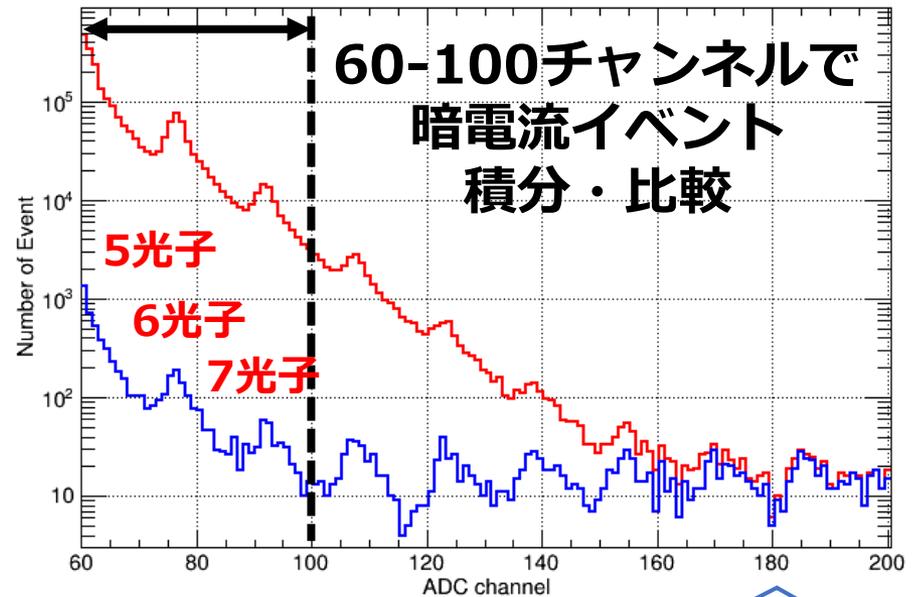
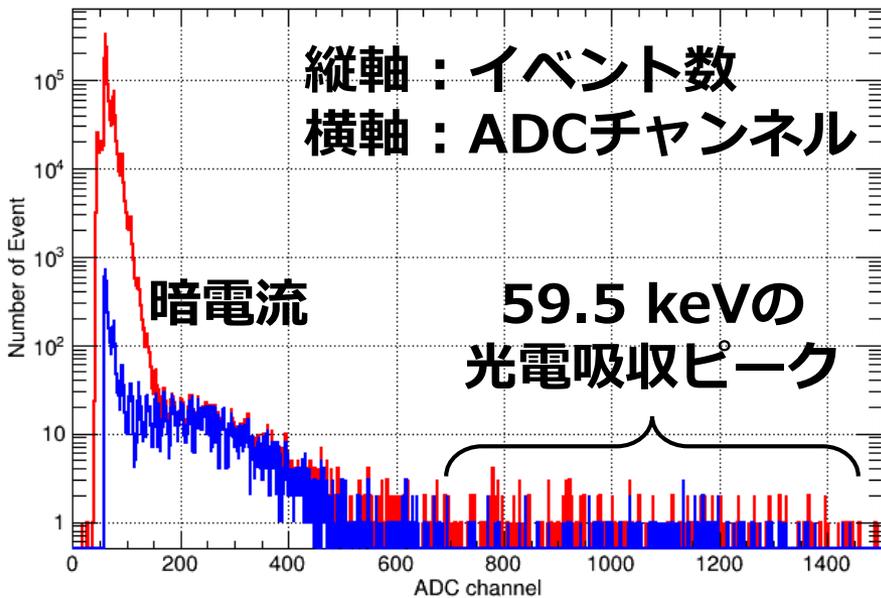
コインシデンス法を用いて暗電流低減  
(コンプトン偏光計で有効)

- 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  $\mu$ 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： $^{241}\text{Am}$ のスペクトル(コインシデンス法不使用)

青： $^{241}\text{Am}$ 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： $2.6 \times 10^{-3}$

理論値： $3.7 \times 10^{-3}$

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

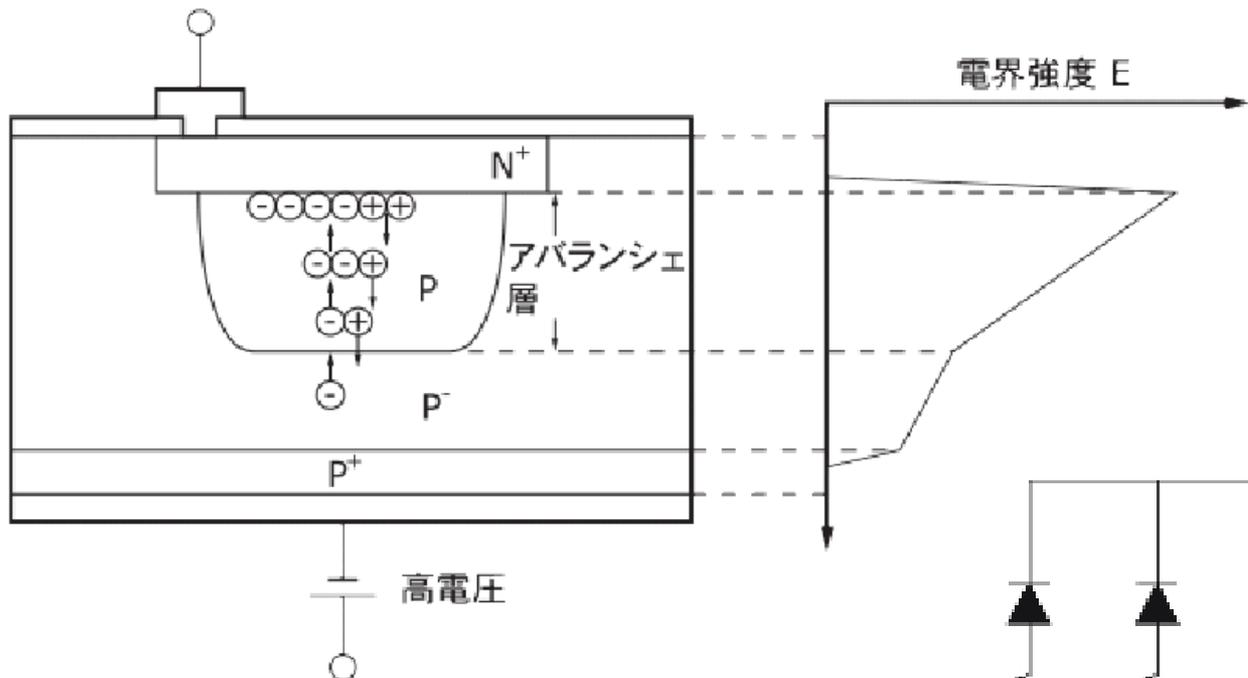
今後はコインシデンス法使用時のスレッシュホールドを定量評価

# 参考文献

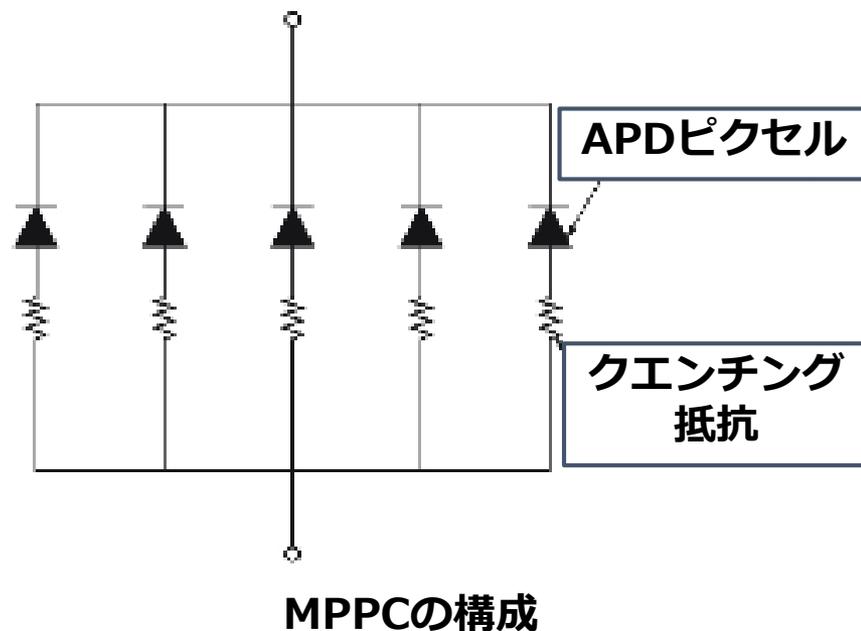
- **M.C Weisskopf, et al., 1977, ApJ 220, L117**
- **M. Forot, et al., 2008, ApJ 688, L129**
- **M. Chauvin, et al., 2017, Scientific Reports 7: 7816**
- **T. Mizuno, et al., 2009, NIMA 600, 609-617**

# 予備スライド

# MPPCの光子数検出原理



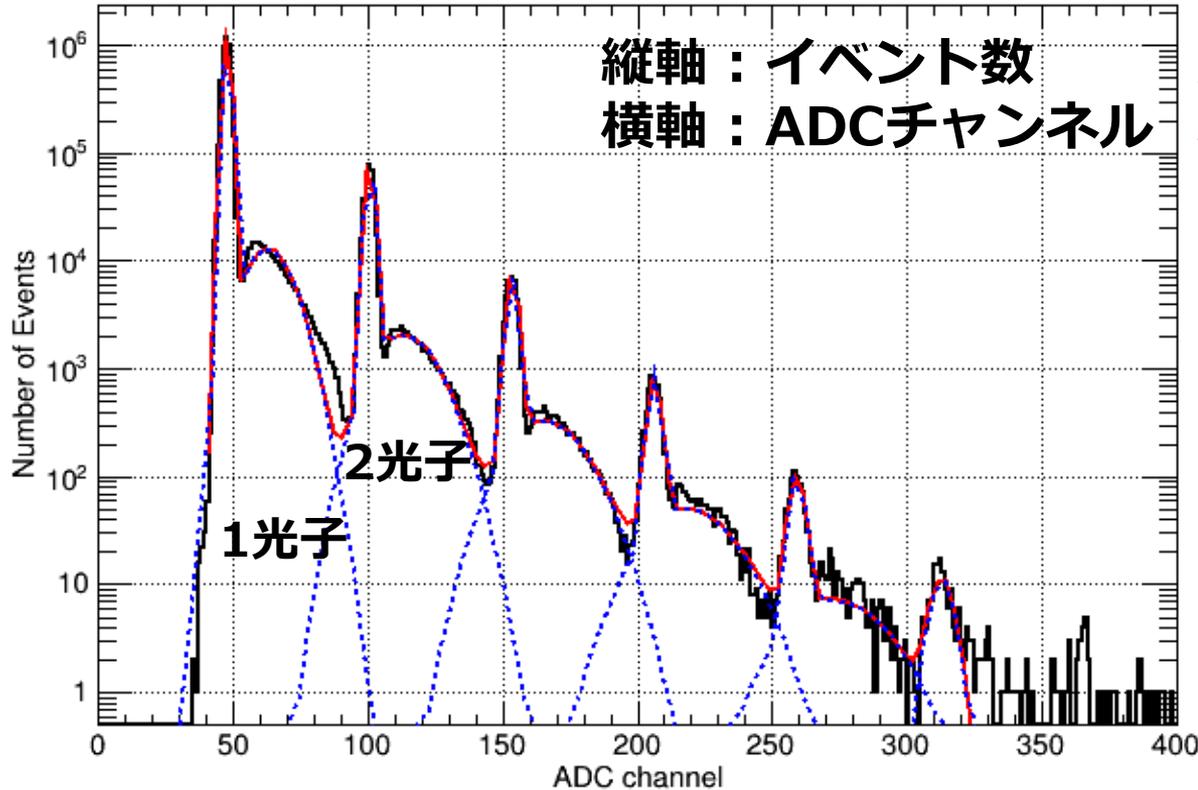
アバランシエ増大の模式図



## 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  
の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

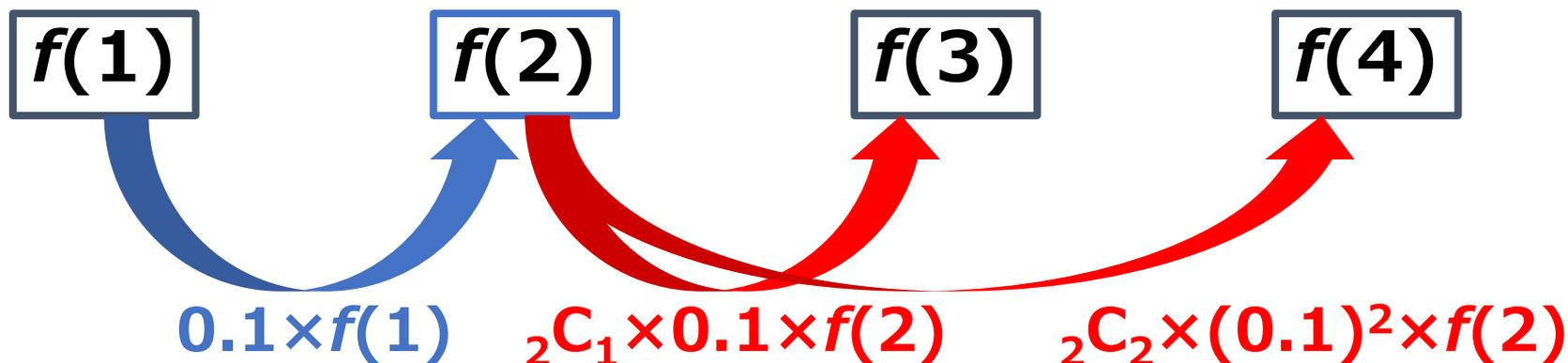
簡単のため、以下の仮定を行なう

- 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:  $r_{\text{dark}}$

放射線源のレート:  $r_{\text{source}}$

コインシデンス時間幅:  $\tau$

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

$r_C$ 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

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