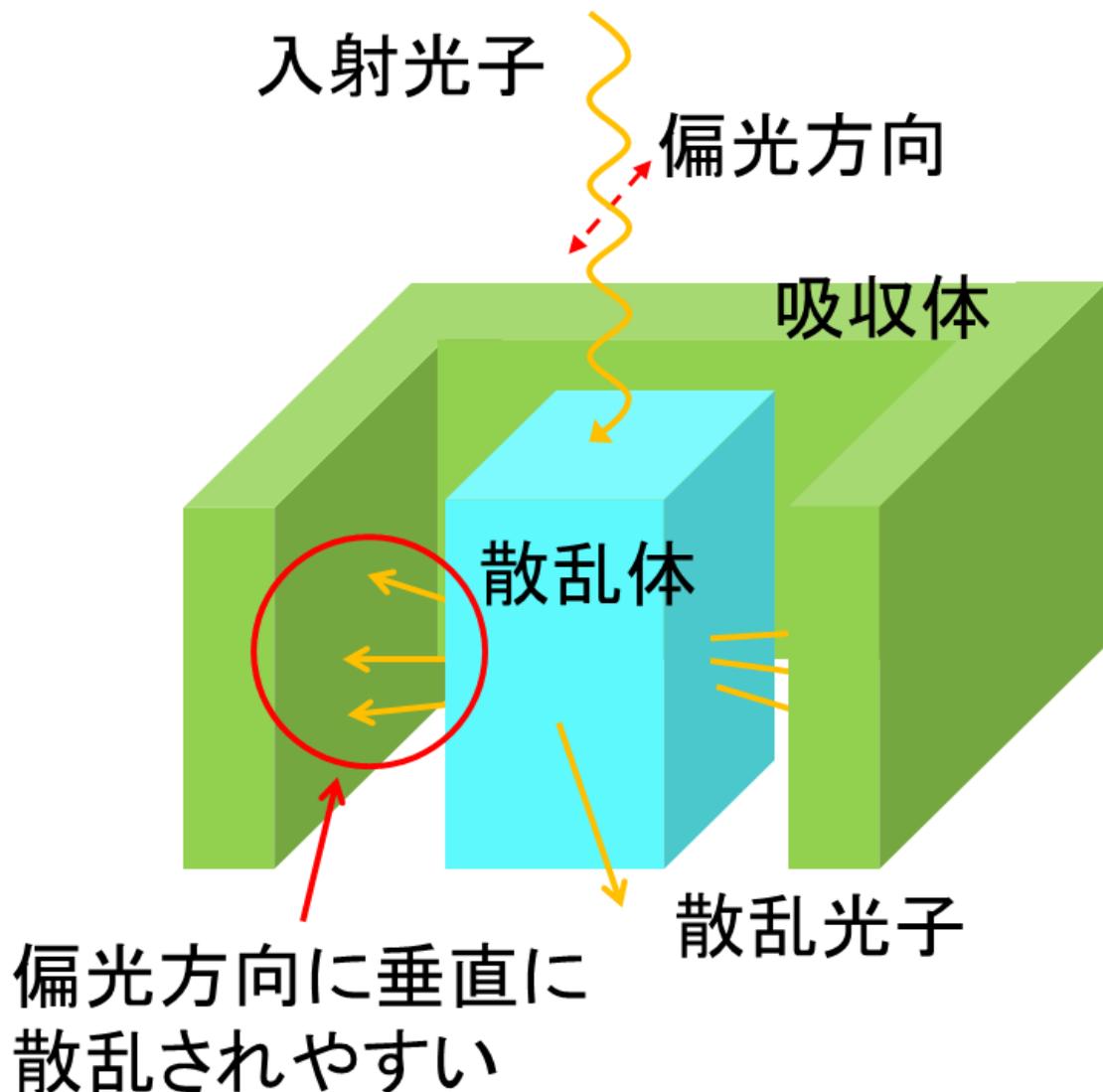


MPPCとプラスチックシンチ レータの組み合わせを用いた 天体偏光X線検出器の検討

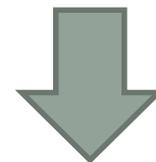
中岡 竜也、水野 恒史、
高橋 弘充、深沢 泰司(広島大学)

(W138)

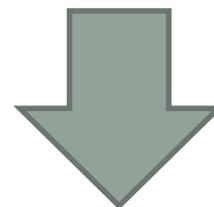
X線偏光計の原理



散乱体と吸収体のイベントを同時に測定



散乱体で落とすエネルギーは低い



低エネルギー(~数keV)まで測定する必要がある

X線偏光計の原理

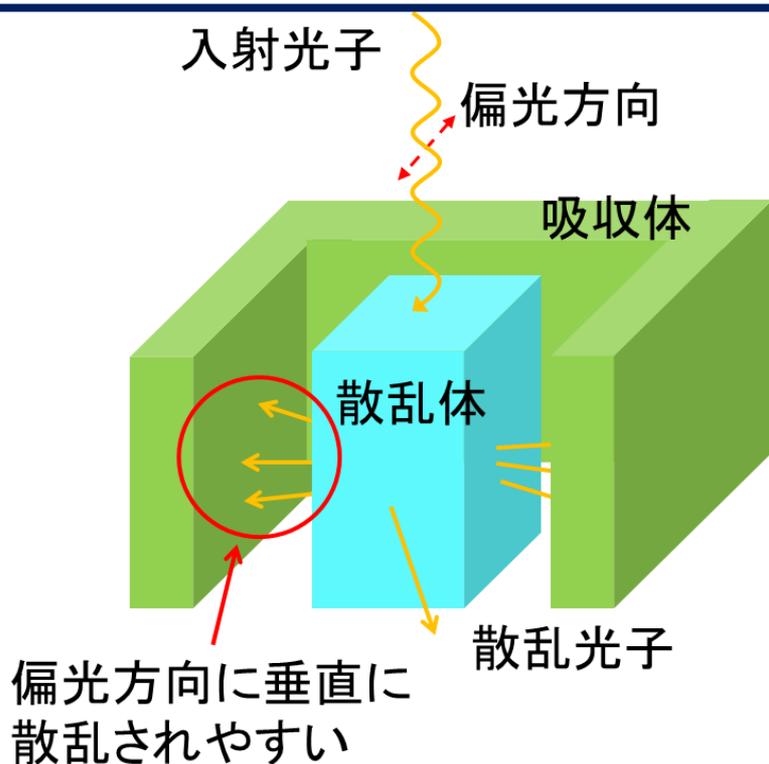
一般的な偏光X線検出器

プラスチックシンチレータ + PMT

- ・散乱しやすい
- ・安価

- ・ノイズが小さい
- ・増幅率が高い
- ・受光面が大きい

- ・サイズが大きい
- ・高電圧が必要
- ・量子効率が低い



低エネルギー(~数keV)まで測定する必要がある

X線偏光計の原理

一般的な偏光X線検出器

プラスチックシンチレータ + PMT

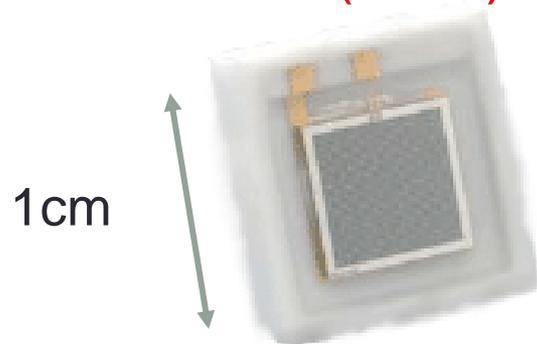
- ・散乱しやすい
- ・安価

- ・ノイズが小さい
- ・増幅率が高い
- ・受光面が大きい

- ・サイズが大きい
- ・高電圧が必要
- ・量子効率が低い

	MPPC (multi-pixel photon counter)
メリット 利点	<ul style="list-style-type: none"> ・コンパクト ・低電圧で動作 ・量子効率が高い
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> ・受光面が小さい ・ノイズが大きい

光検出器に
MPPC(PPD)を使用



今回用いた光検出器
浜松ホトニクス社
「S10985」

X線偏光計の原理

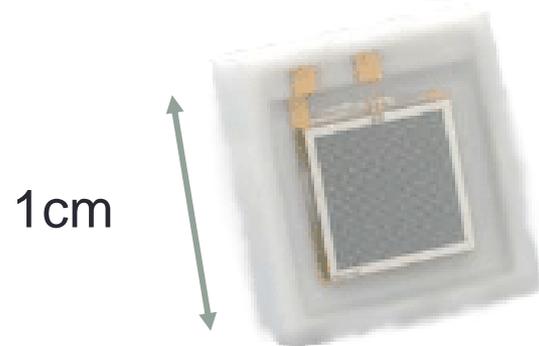
目的

従来と同等の性能で、
より柔軟な設計が可能なシステムを目指す

→ 30 keVのX線がコンプトン散乱した際に落とす
エネルギー(2 keV)の検出を目標とし、性能評価を行った

	MPPC (multi-pixel photon counter)
メリット 利点	<ul style="list-style-type: none">・コンパクト・低電圧で動作・量子効率が高い
デメリット	<ul style="list-style-type: none">・受光面が小さい・ノイズが大きい

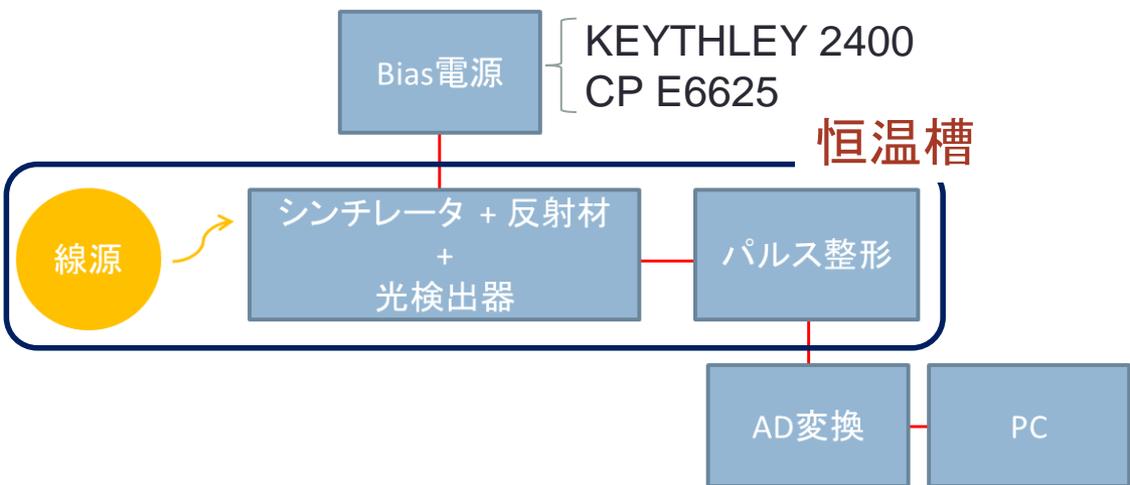
光検出器に
MPPCを使用



今回用いた光検出器
浜松ホトニクス社
「S10985」

1. 実験セットアップと評価基準

実験セットアップ



<恒温槽内の様子>

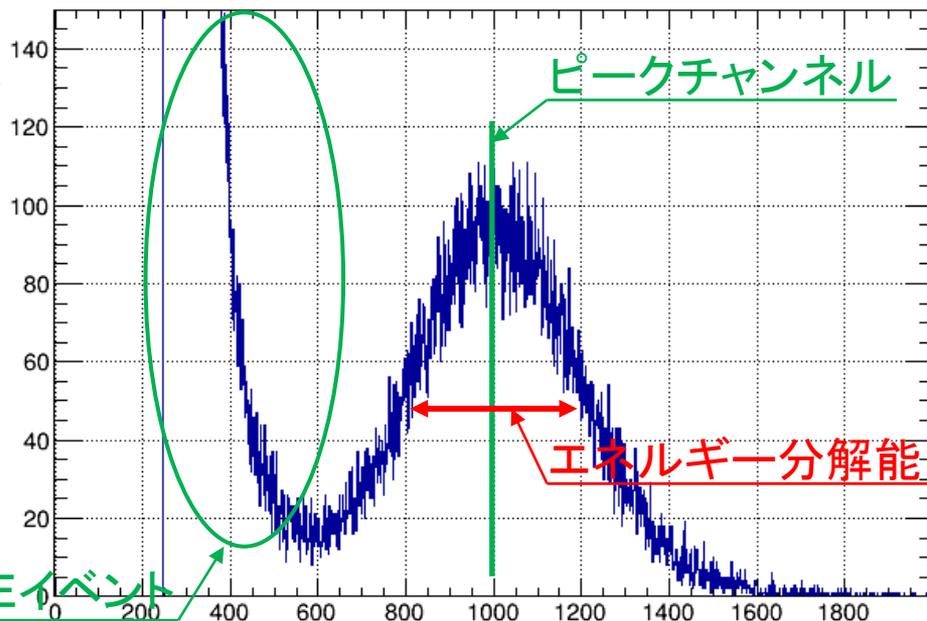


評価項目

以下の項目に分けて評価を行う

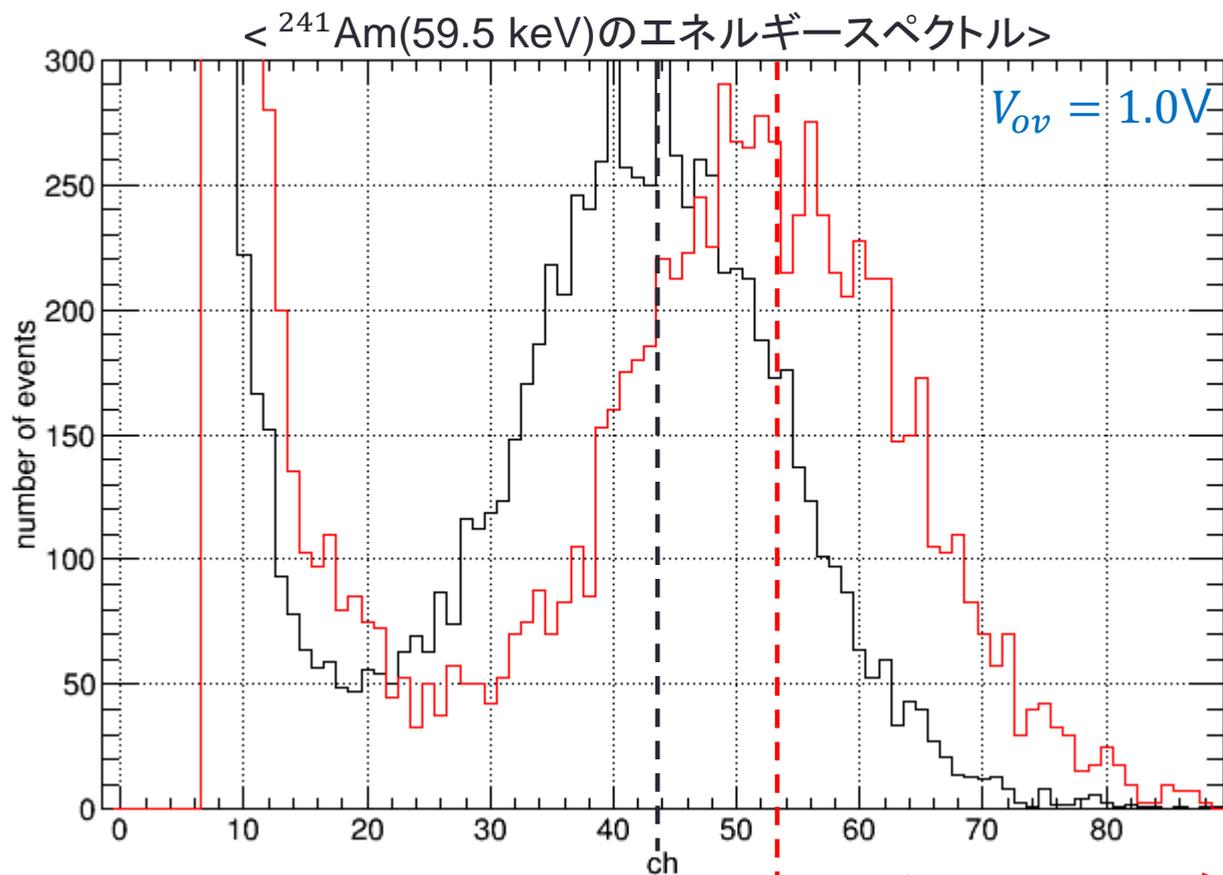
- ・シンチレータ部
 - ・MPPC部
 - ・読み出し回路
- MPPCとのマッチング
ピクセルサイズの評価
温度依存性
- 受光面の
デメリット改善
- ノイズのデメリット改善
ノイズ、低Eイベント

< ^{241}Am (59.5 keV)のエネルギースペクトル>



シンチレータのMPPCとのマッチング

MPPCの受光面のサイズ(6×6 mm)と比べて、
大きいシンチレータ(5×10 mm)と小さいシンチレータ(4×4 mm)で比較



5 × 10 × 15 mm

4 × 4 × 15 mm

エネルギー分解能
50.2% → 46.3%

光量が約20%増加 →

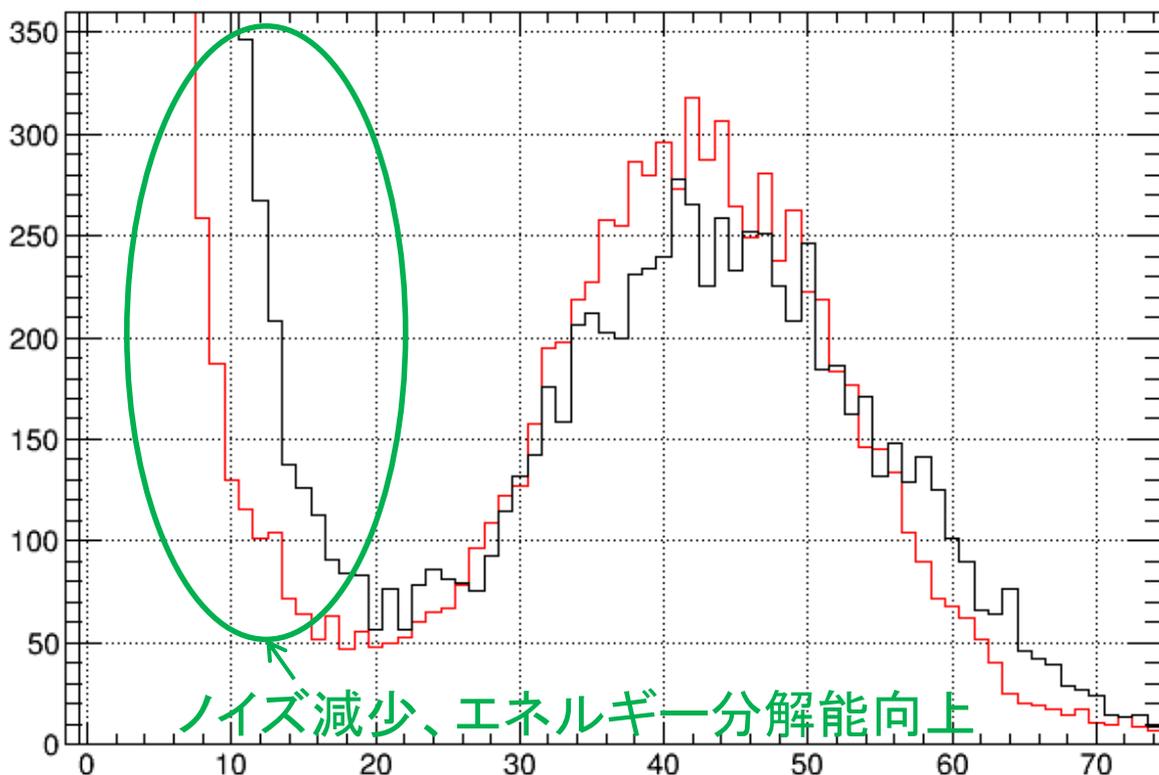
シンチレータのサイズ変更により、
エネルギー分解能が約8%改善

MPPCのピクセルサイズによる影響

MPPCのピクセルサイズ(開口率)
による違いを比較
(ピクセルサイズ100 μm でも線形性に問題ない)

ピクセルサイズ	50 μm	100 μm
開口率[%]	61.5	78.5
V_{ov} [V]	1.1	1.0

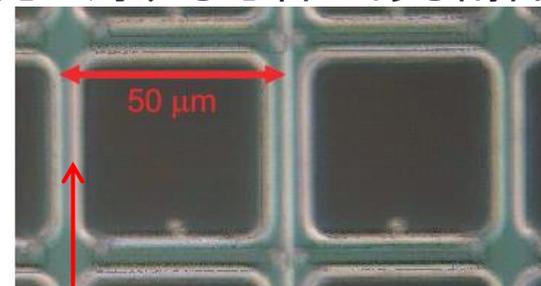
< ^{241}Am (59.5 keV)>



ノイズ減少、エネルギー分解能向上

<開口率>

MPPCの受光面のうち、
光に対する応答のある割合



不感部分
(ピクセル間で光子の伝播を防ぐ)

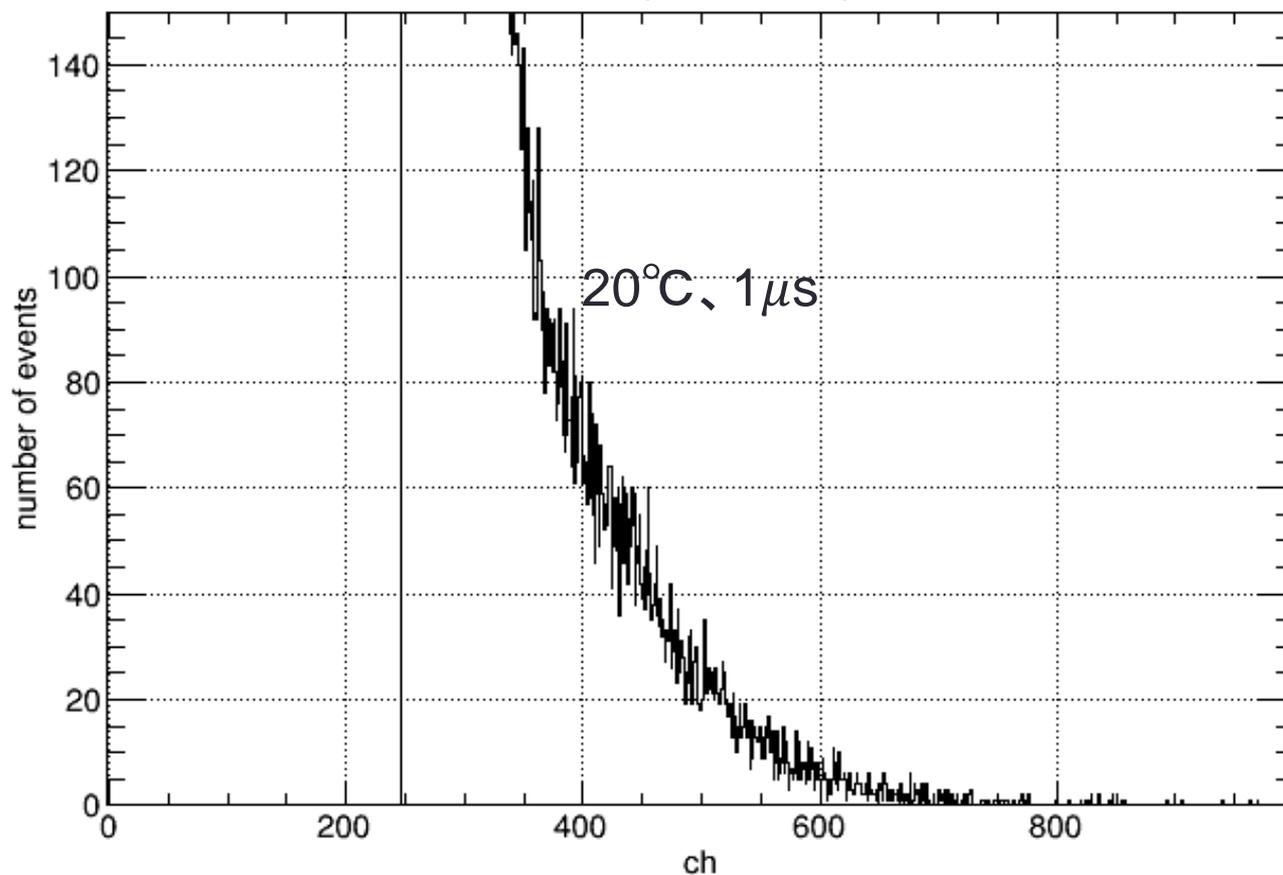
エネルギー分解能
54.8% \rightarrow 51.2%

ピクセルサイズの最適化によって、エネルギー分解能が約6%改善

MPPCの動作環境による影響

MPPCを動作させる温度を、 $20^{\circ}\text{C} \rightarrow -10^{\circ}\text{C}$ 、
整形時定数を $1\mu\text{s} \rightarrow 50\text{ns}$ に変化させて比較

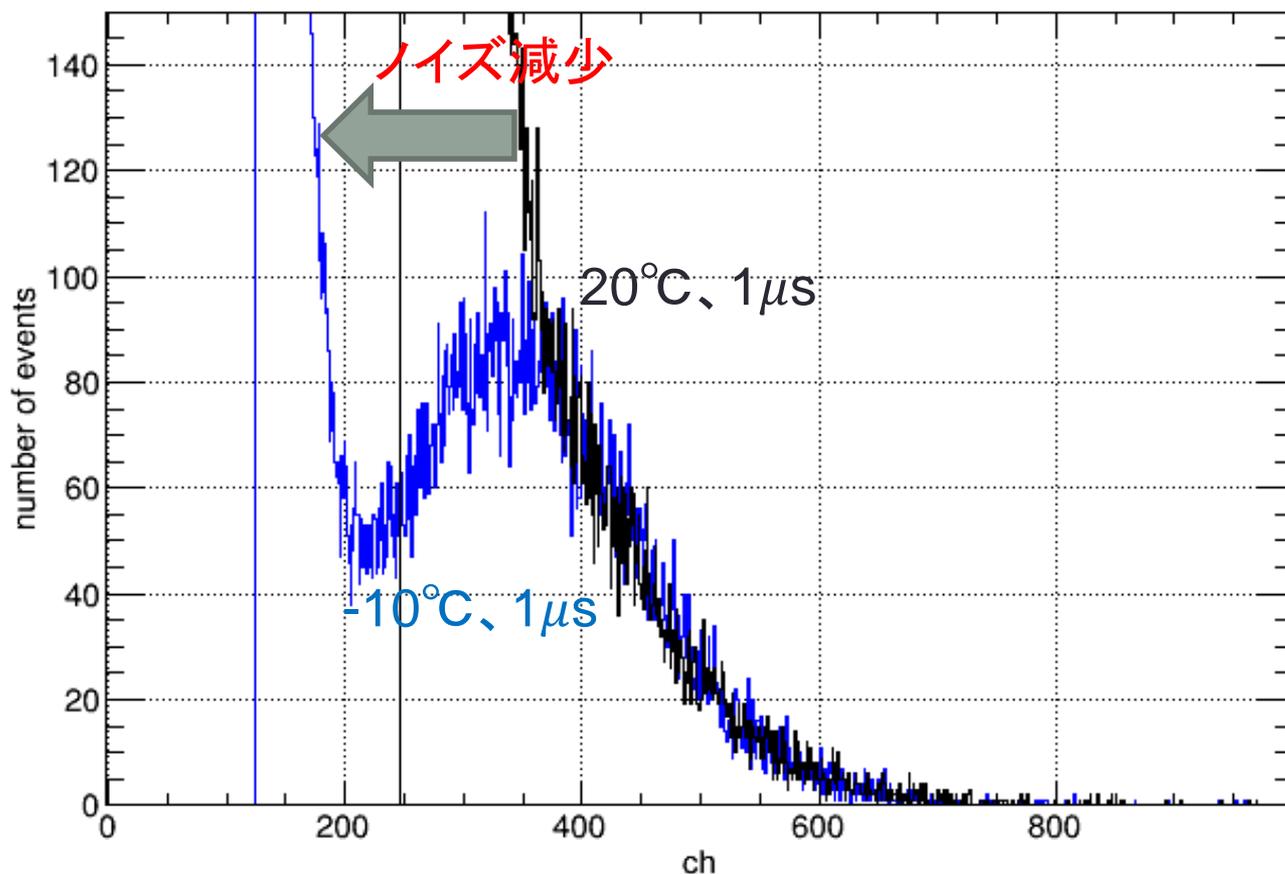
$\langle {}^{109}\text{Cd}(22.2\text{ keV}) \rangle$



MPPCの動作環境による影響

MPPCを動作させる温度を、 $20^{\circ}\text{C} \rightarrow -10^{\circ}\text{C}$ 、
整形時定数を $1\mu\text{s} \rightarrow 50\text{ns}$ に変化させて比較

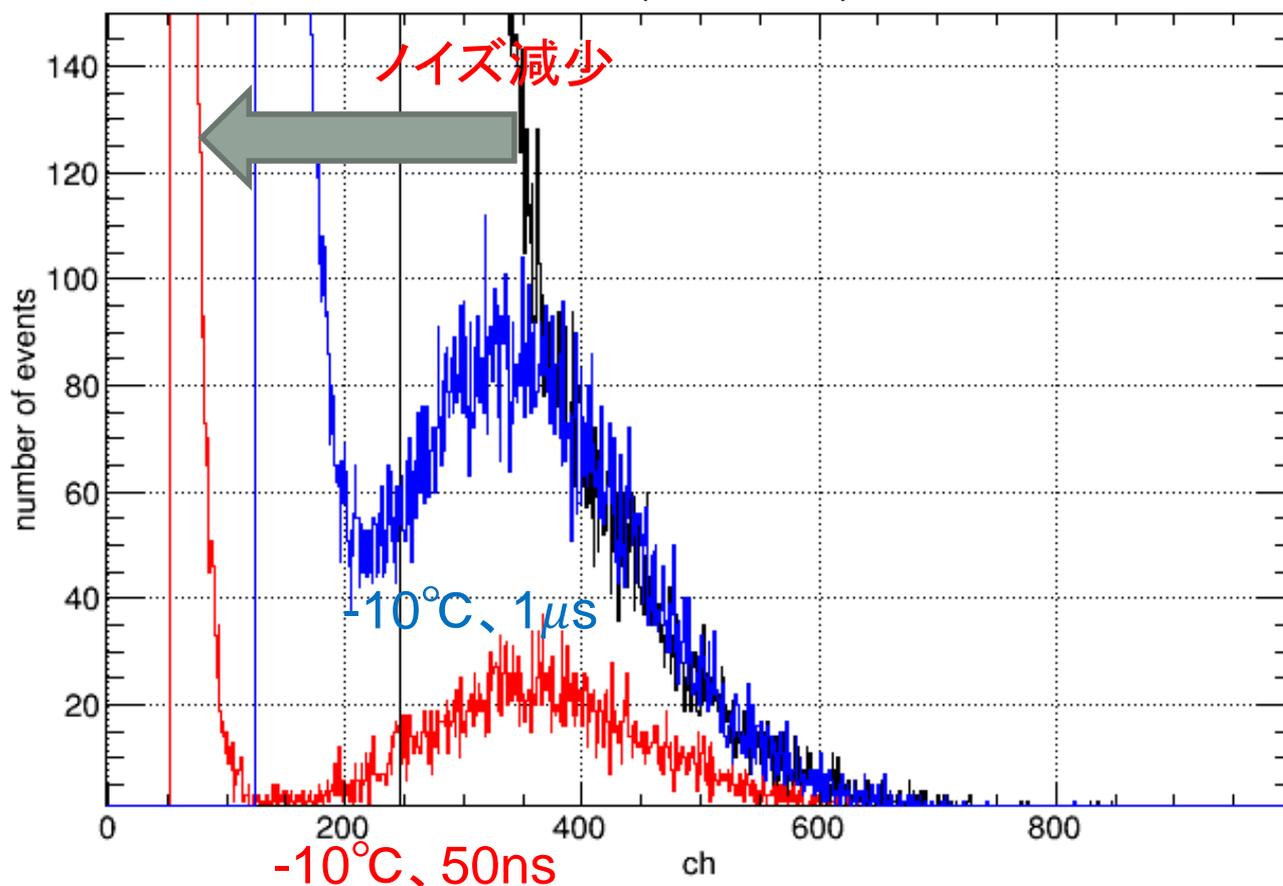
$\langle {}^{109}\text{Cd}(22.2\text{ keV}) \rangle$



MPPCの動作環境による影響

MPPCを動作させる温度を、 $20^{\circ}\text{C} \rightarrow -10^{\circ}\text{C}$ 、
整形時定数を $1\mu\text{s} \rightarrow 50\text{ns}$ に変化させて比較

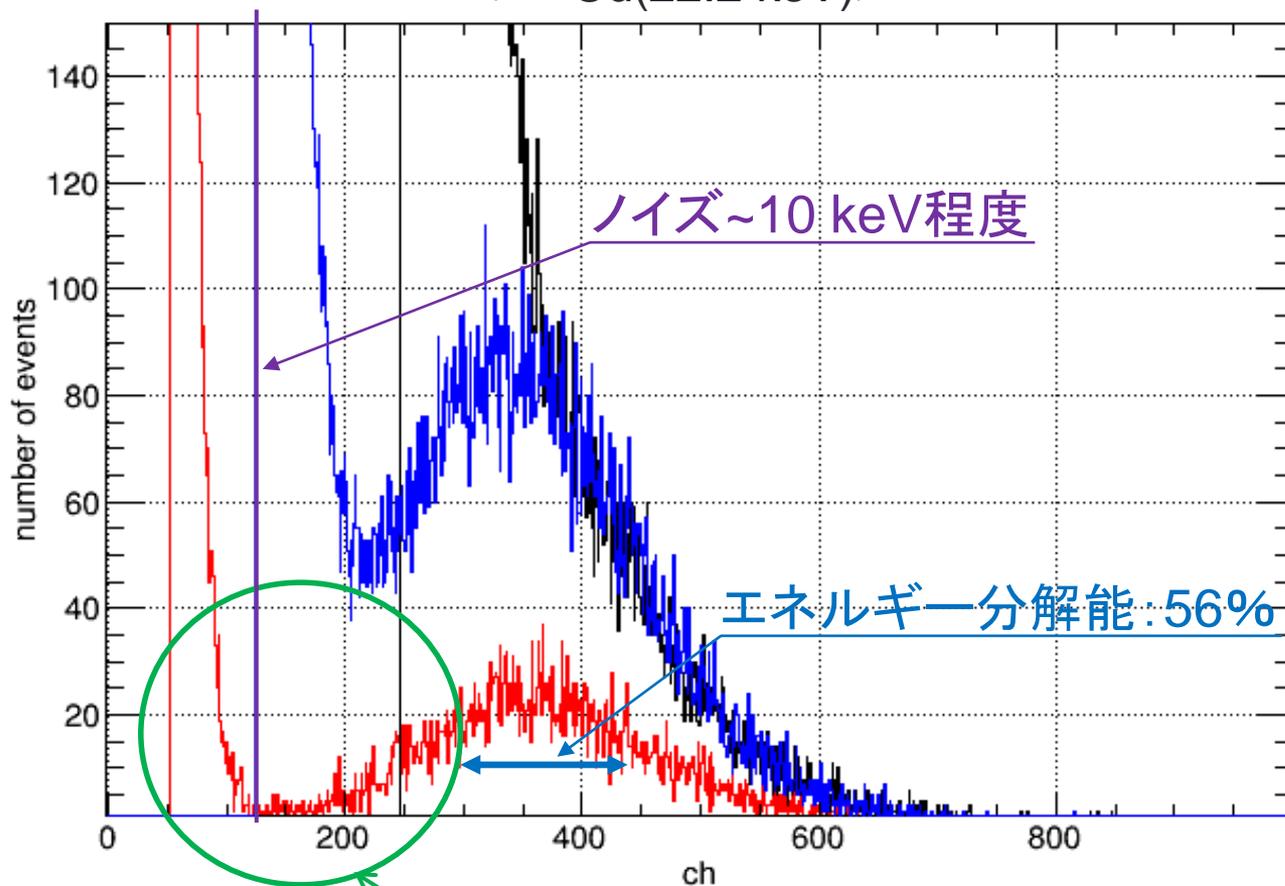
$\langle {}^{109}\text{Cd}(22.2\text{ keV}) \rangle$



MPPCの動作環境による影響

MPPCを動作させる温度を、 $20^{\circ}\text{C} \rightarrow -10^{\circ}\text{C}$ 、
整形時定数を $1\mu\text{s} \rightarrow 50\text{ns}$ に変化させて比較

$\langle {}^{109}\text{Cd}(22.2\text{ keV}) \rangle$

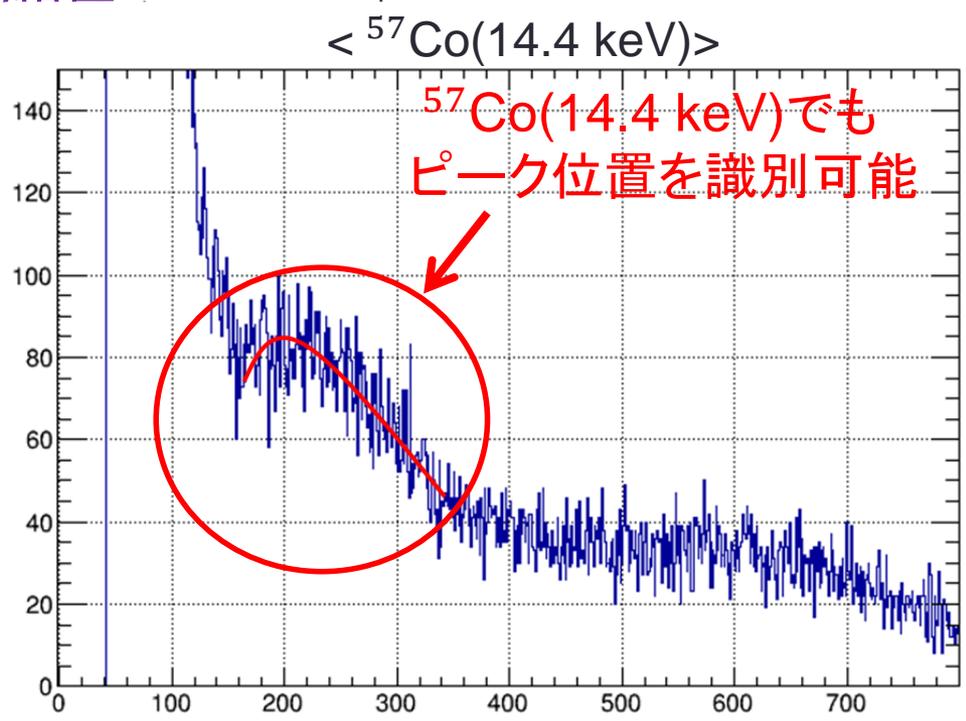
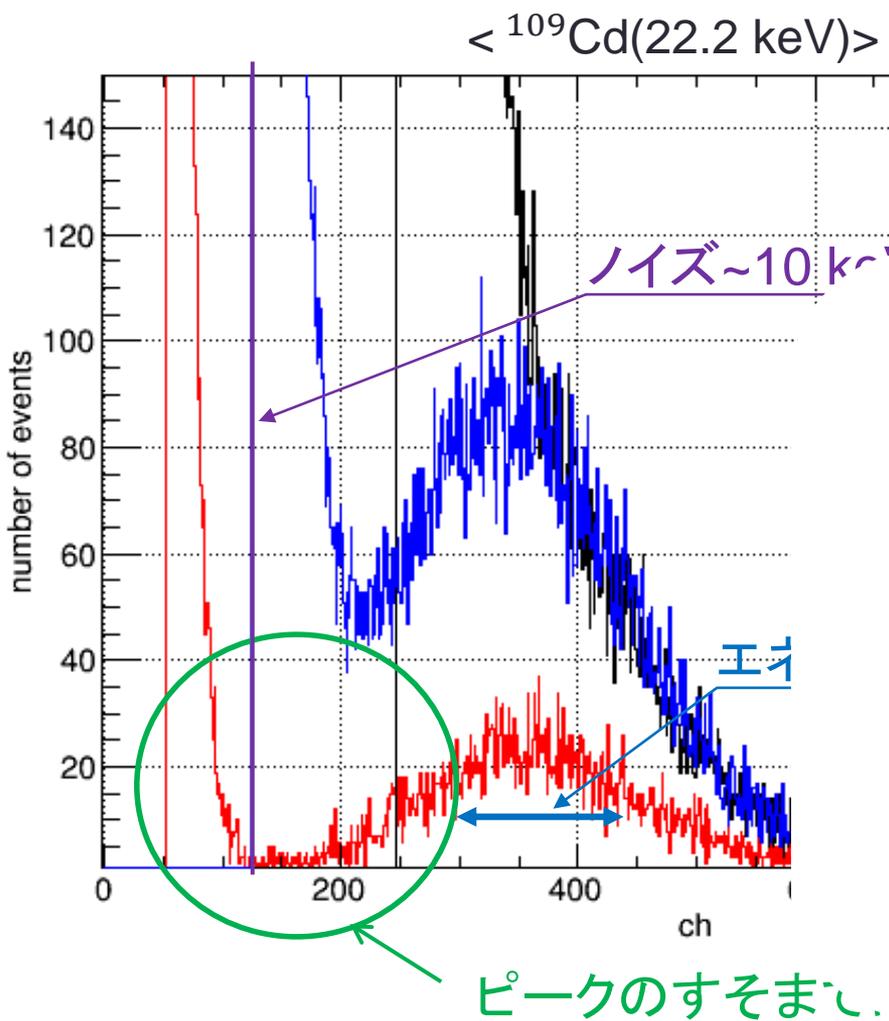


ピークのすそまではっきりと分離されている

動作温度	整形時定数	V_{ov}
20°C	$1\mu\text{s}$	1.0V
-10°C	$1\mu\text{s}$	0.86V
-10°C	50ns	0.86V

MPPCの動作環境による影響

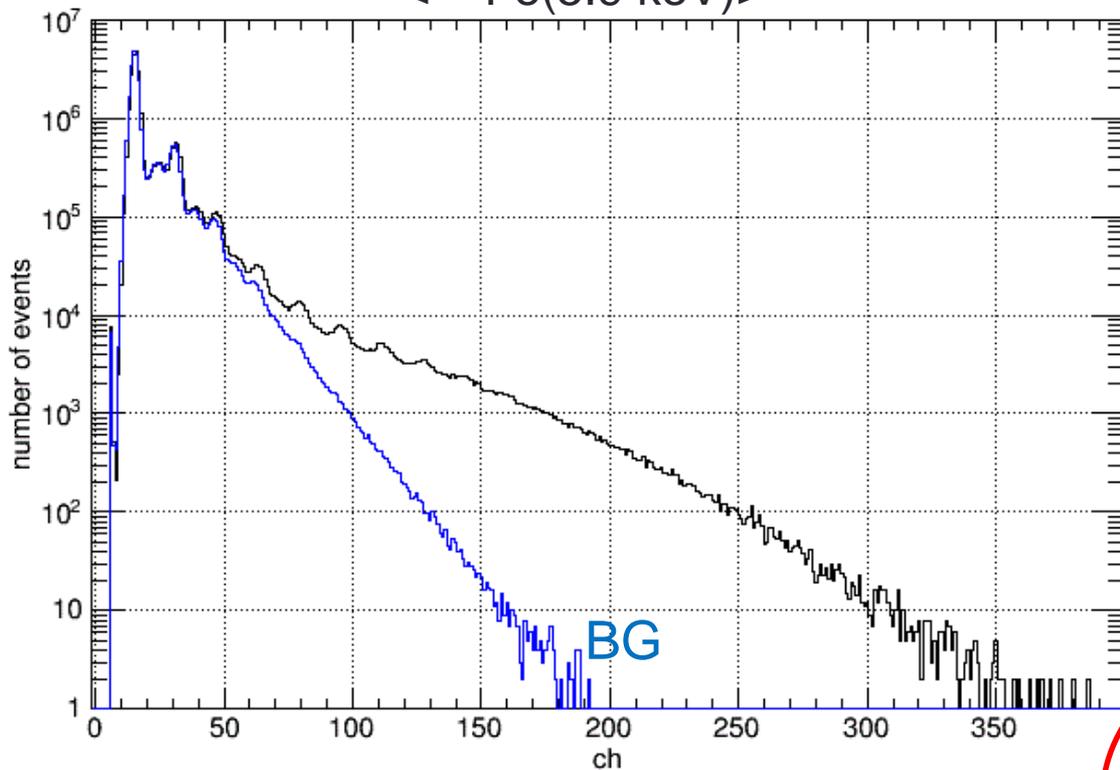
-10°C、50nsで動作



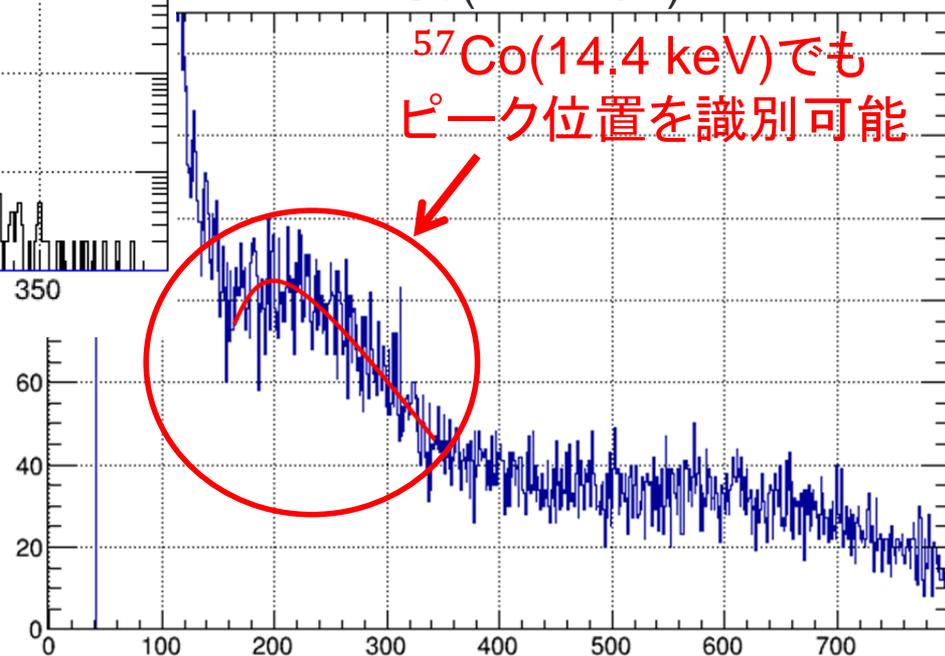
MPPCの動作環境よる影響

-10°C、50nsで動作

< ^{55}Fe (5.9 keV)>



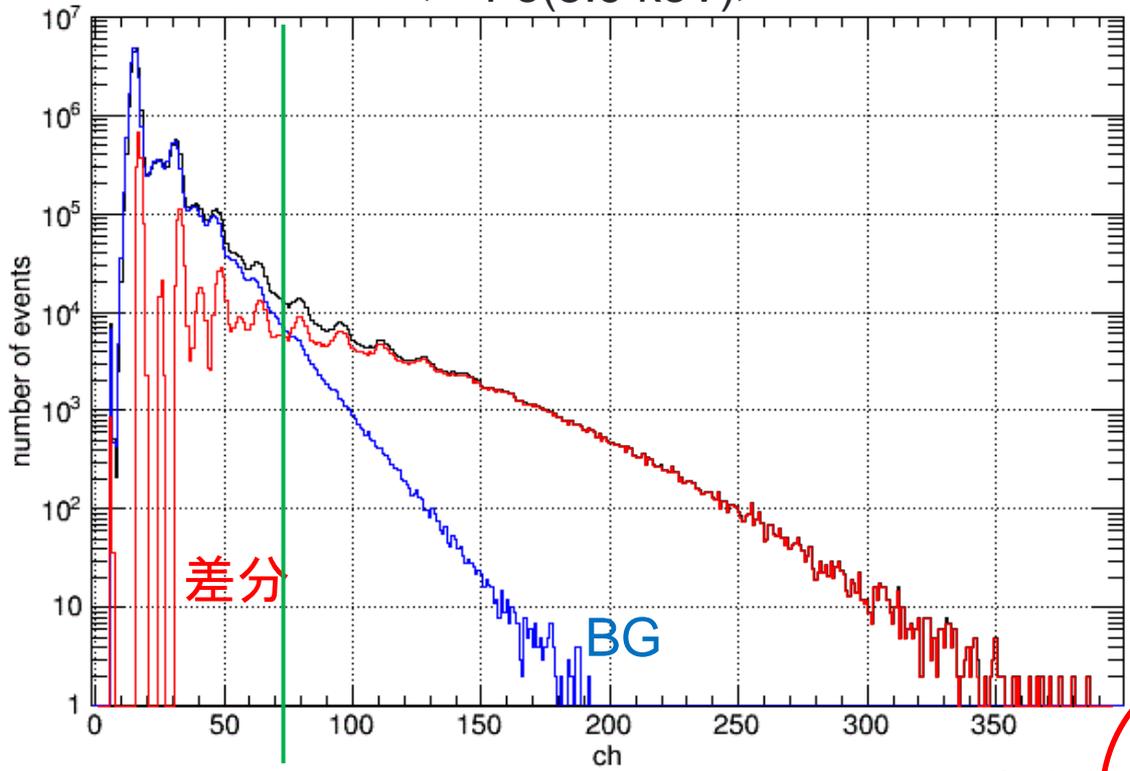
< ^{57}Co (14.4 keV)>



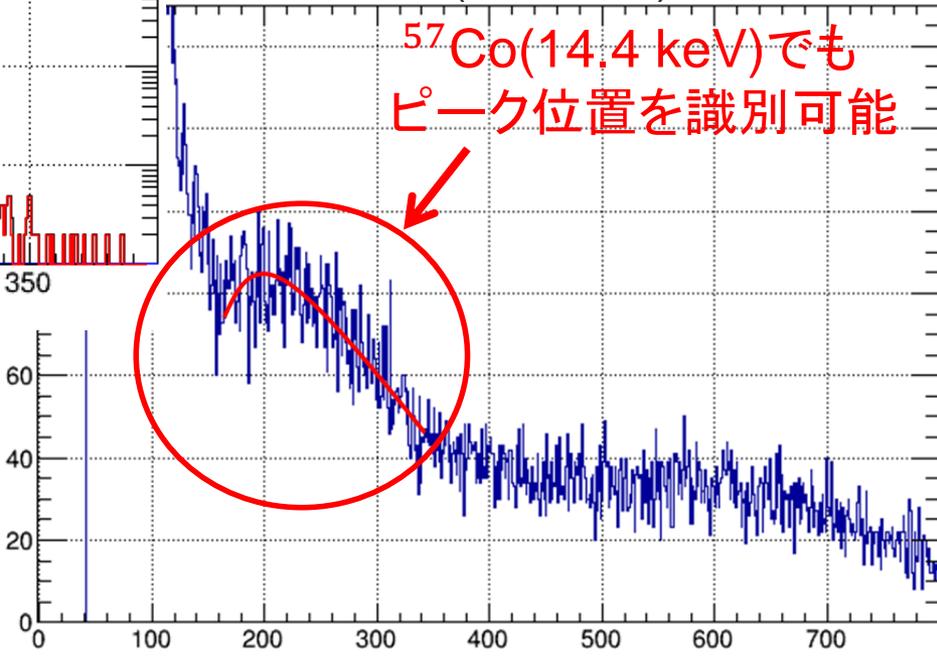
MPPCの動作環境による影響

-10°C、50nsで動作

< ⁵⁵Fe(5.9 keV)>



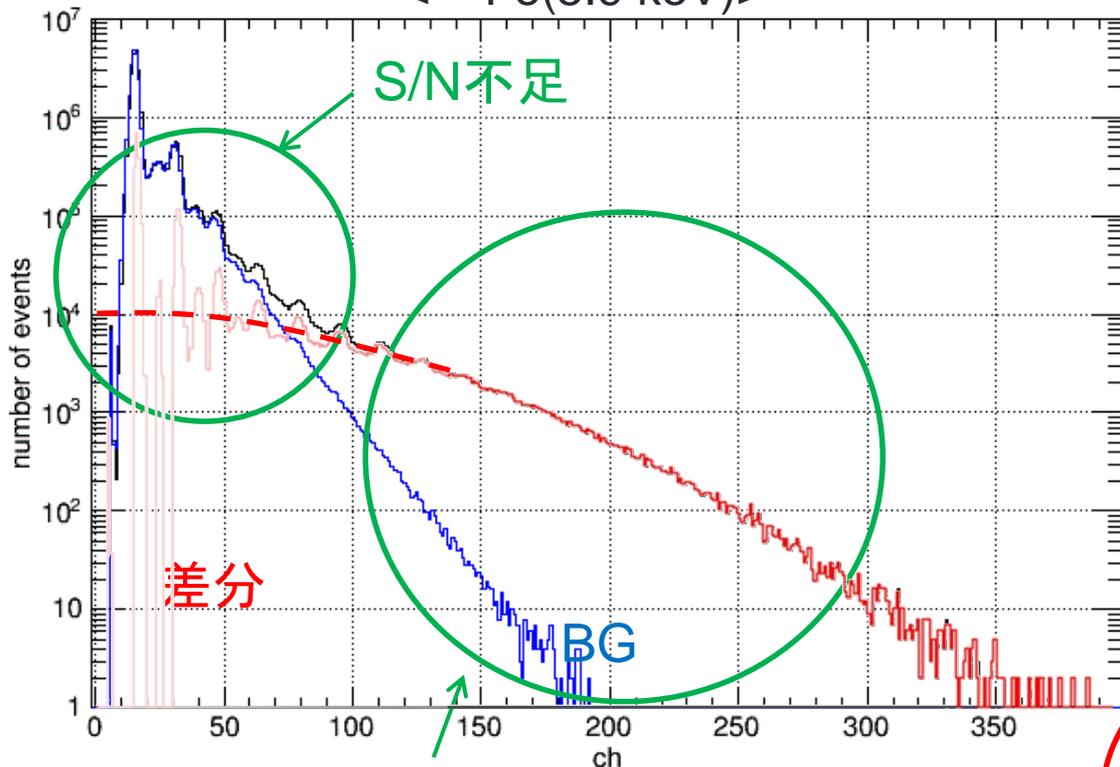
< ⁵⁷Co(14.4 keV)>



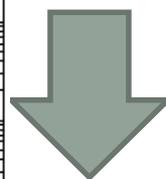
MPPCの動作環境よる影響

-10°C、50nsで動作

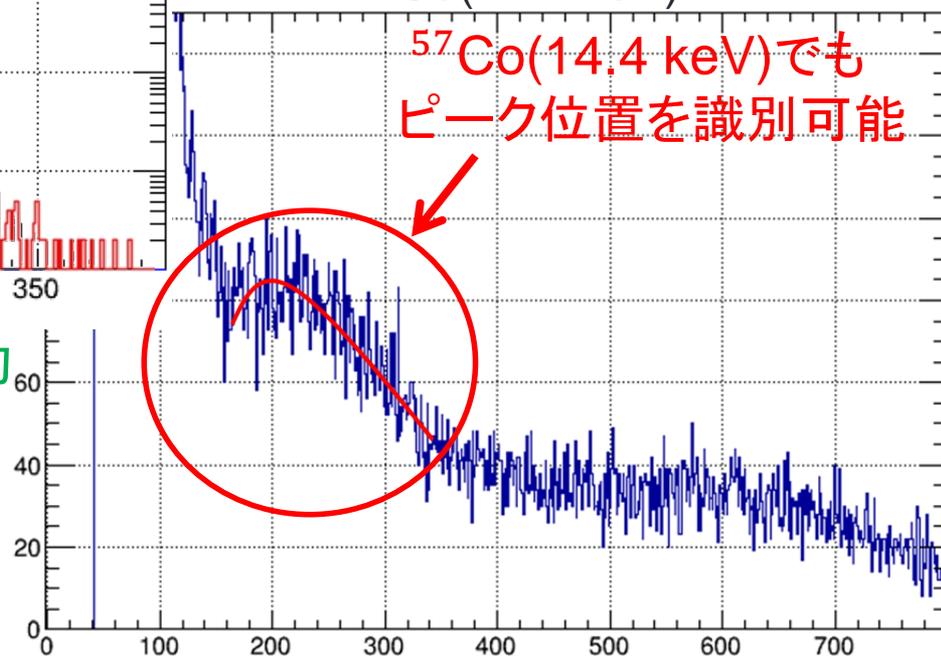
< ^{55}Fe (5.9 keV)>



信号の位置
有無を特定可能



< ^{57}Co (14.4 keV)>

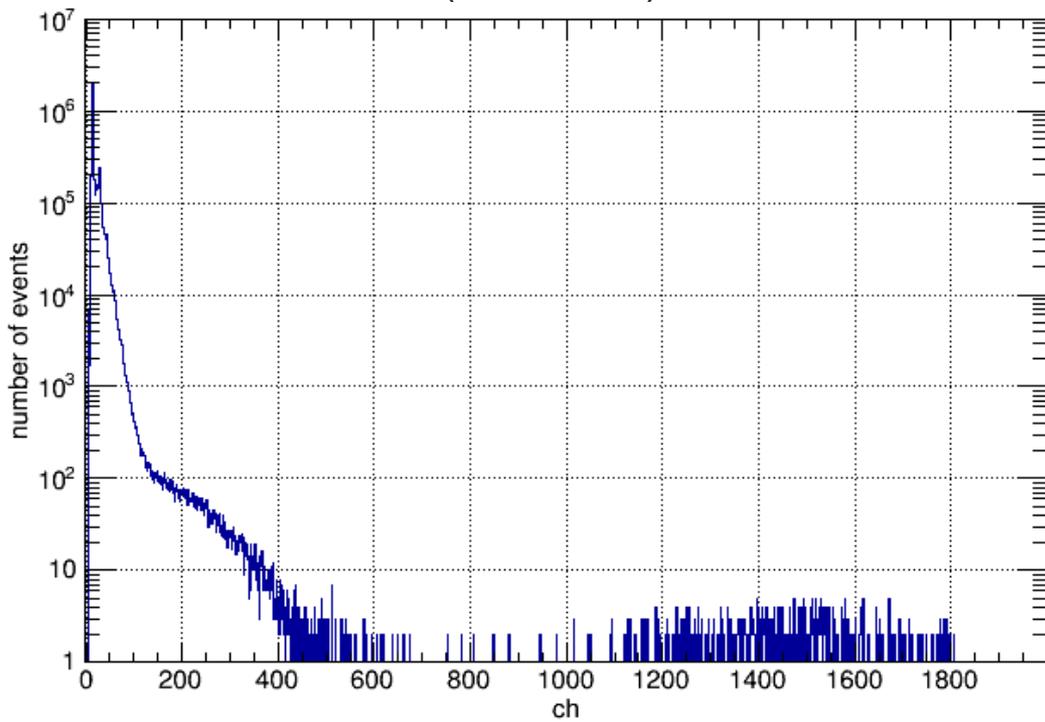


低エネルギー側はノイズに埋もれるが、信号の検出は成功

絶対光量の議論

光子1つ分のイベントに対し、
各信号がフォトン何個分か測定

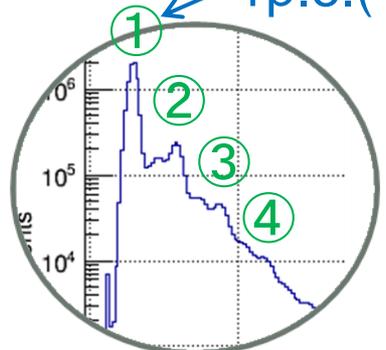
< ^{241}Am (59.5 keV)とBG>



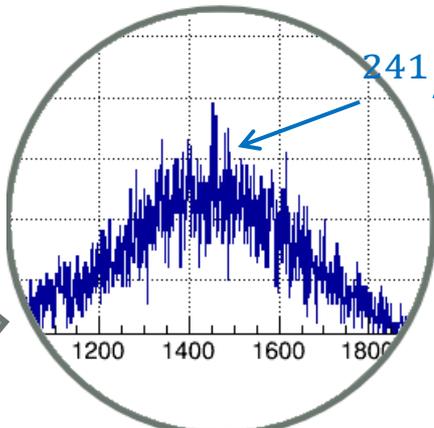
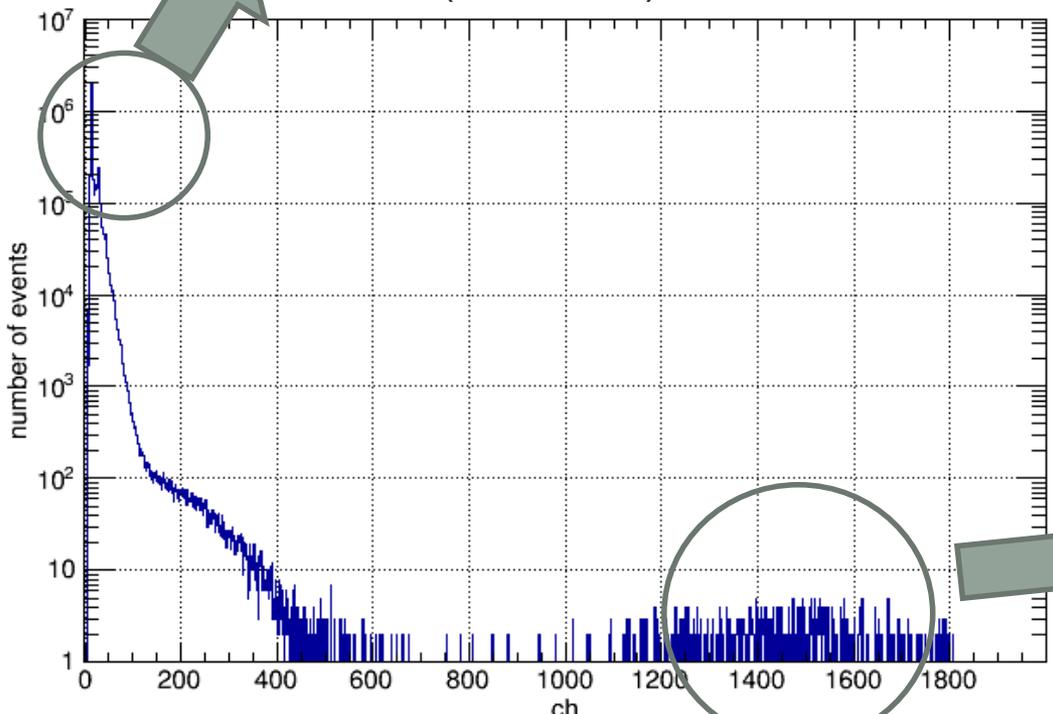
絶対光量の議論

光子1つ分のイベントに対し、
各信号がフォトン何個分か測定

1p.e.(1つのフォトエレクトロン)が増幅された際のイベント



< ^{241}Am (59.5 keV)とBG >



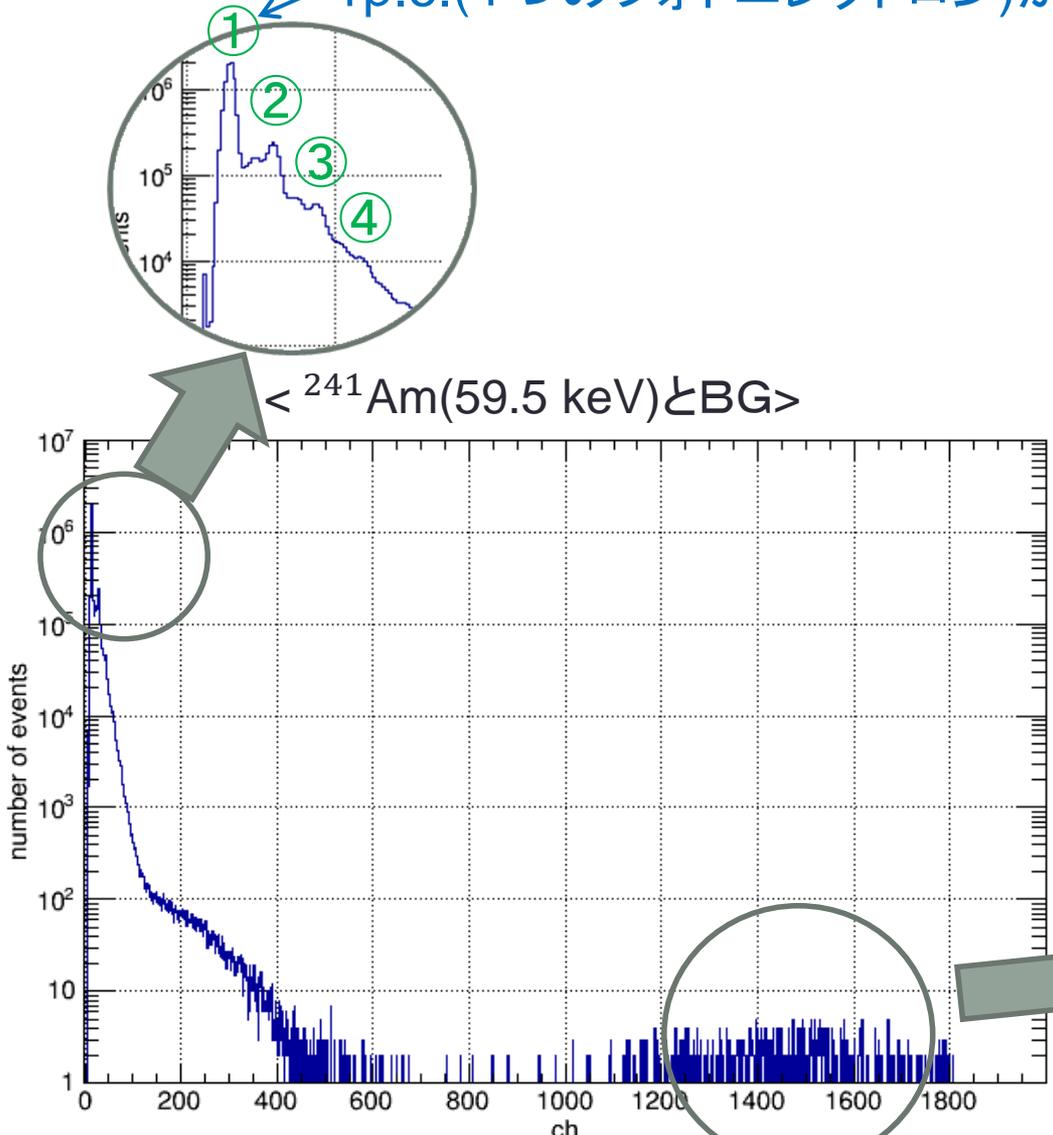
※左図より積分時間が長い

絶対光量の議論

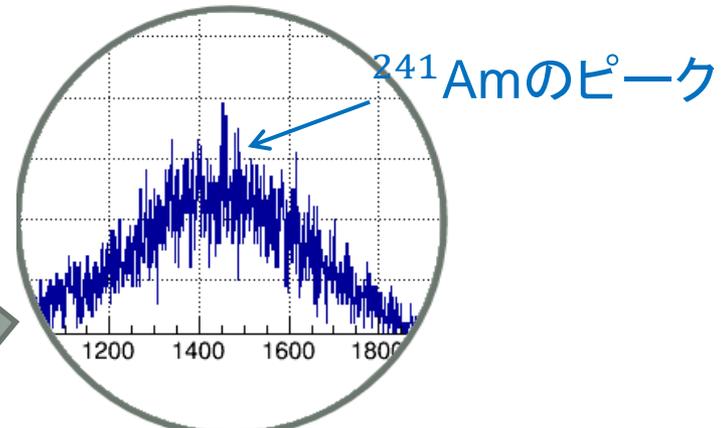
光子1つ分のイベントに対し、
各信号が光子何個分か測定

← 1p.e.(1つのフォトエレクトロン)が増幅された際のイベント

	MPPC	PMT
1p.e.[ch]	14.7	13.3
²⁴¹ Amのピーク[ch]	1441	1433
絶対光量 [p.e.]	98.7	87.8



~60 keVの読み出しでは
PMTと同性能である



※左図より積分時間が長い

まとめと今後

- ・プラスチックシンチレータとMPPCの組み合わせで信号の読み出しを行った

MPPCピクセルサイズ	100 μm
シンチレータ サイズ	4 × 4 × 15 mm
読み出し温度	-10 °C
整形時定数	50 ns

- ・ ^{57}Co のスペクトルを取得
➡ ~10 keVの信号の特定が可能
- ・ ^{55}Fe のスペクトル取得
➡ ~6 keVの信号の検出が可能

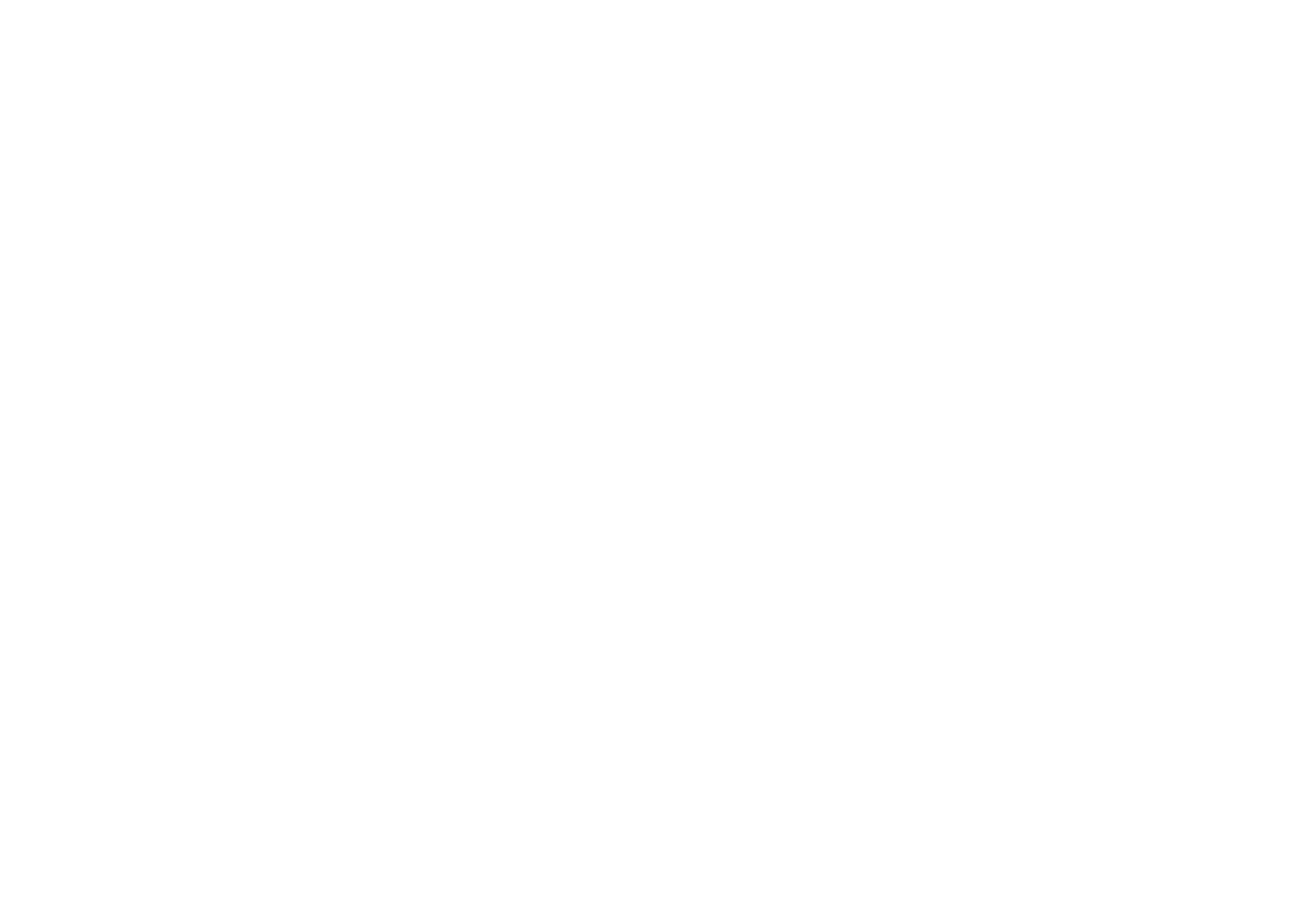
目標の2 keVには、あと5倍程度の改善が必要

- ・ ~60 keVの信号では、PMTと同程度の性能となることを確認

➡ 光量は十分稼いでいる

- ・ 目標の信号を読み出すために
 - ・ MPPCの新製品を使用(従来品よりノイズ低下)
 - ・ 読み出し速度の向上(プラスチックシンチレータの発光速度:~数ns)
 - ・ 吸収体との同時計数(ノイズ除去)





X線偏光計の原理

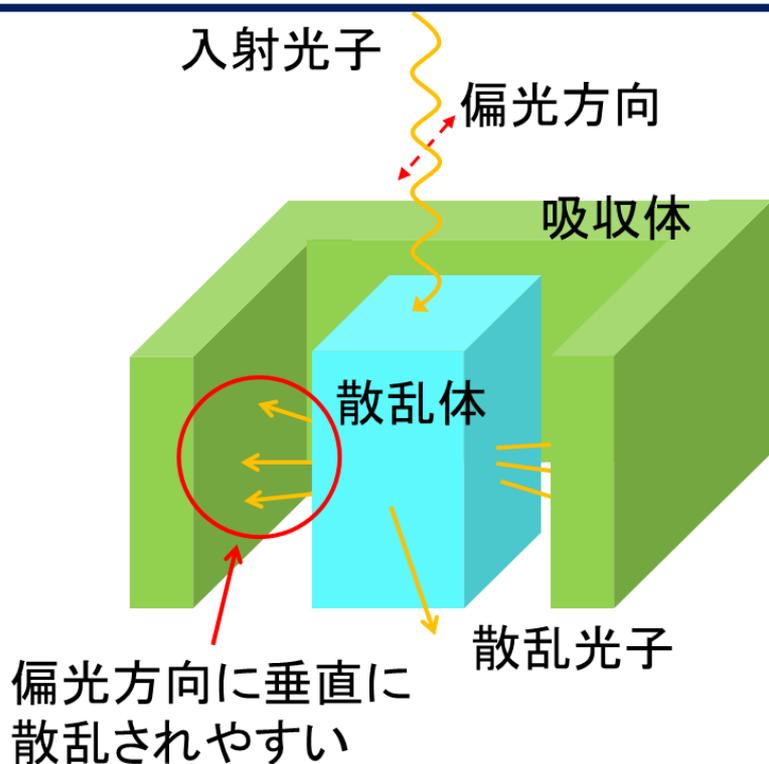
一般的な偏光X線検出器

プラスチックシンチレータ + PMT

- ・散乱しやすい
- ・安価

- ・ノイズが小さい
- ・増幅率が高い
- ・受光面が大きい

- ・サイズが大きい
- ・高電圧が必要
- ・量子効率が低い



低エネルギー(~数keV)まで測定する必要がある

X線偏光計の原理

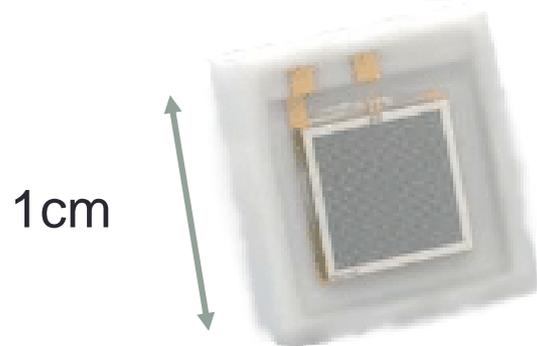
目的

従来と同等の性能で、
より柔軟な設計が可能なシステムを目指す

→ 30 keVのX線がコンプトン散乱した際に落とす
エネルギー(2 keV)の検出を目標とし、性能評価を行った

	MPPC (multi-pixel photon counter)
メリット 利点	<ul style="list-style-type: none">・コンパクト・低電圧で動作・量子効率が高い
デメリット	<ul style="list-style-type: none">・受光面が小さい・ノイズが大きい

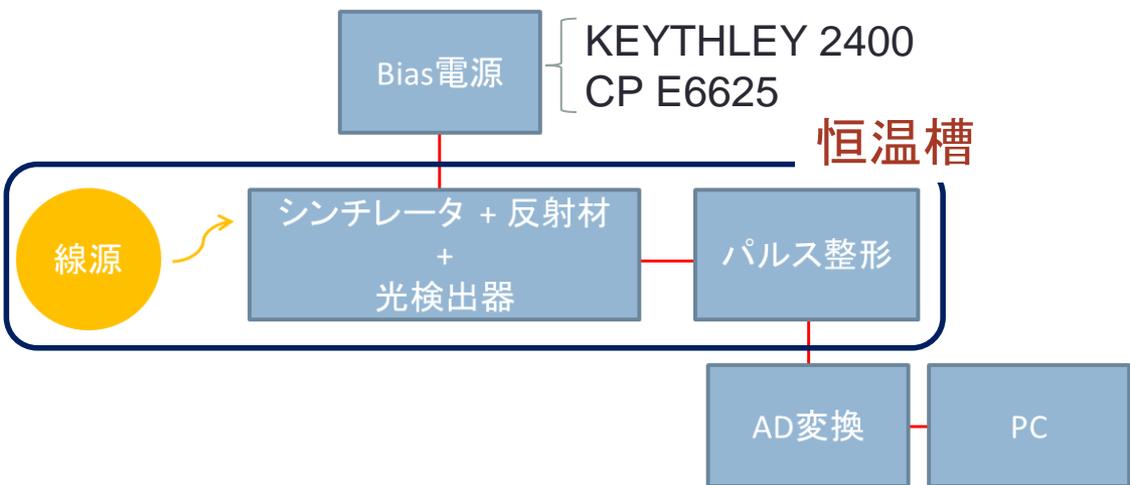
光検出器に
MPPCを使用



今回用いた光検出器
浜松ホトニクス社
「S10985」

1. 実験セットアップと評価基準

実験セットアップ



<恒温槽内の様子>

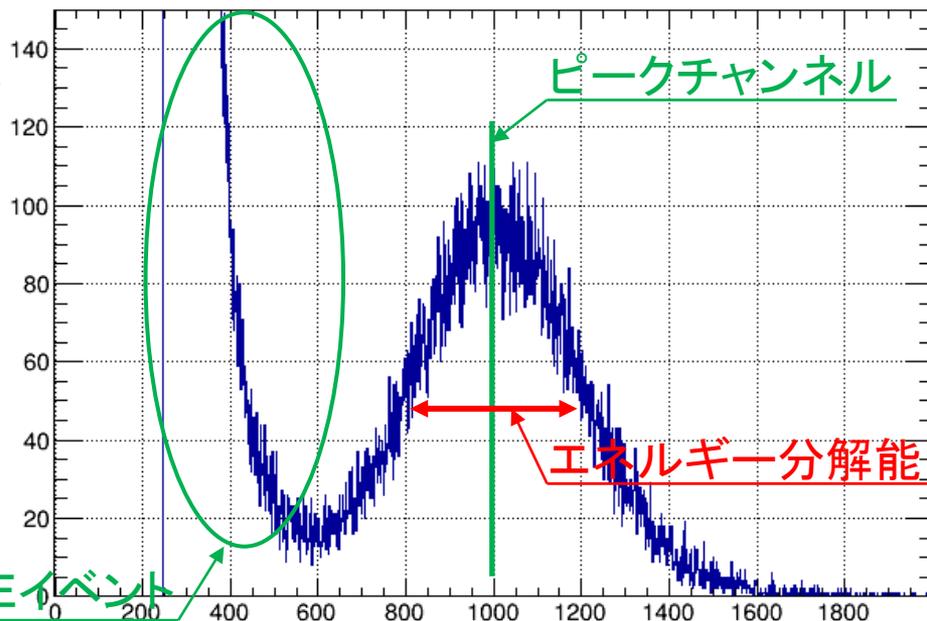


評価項目

以下の項目に分けて評価を行う

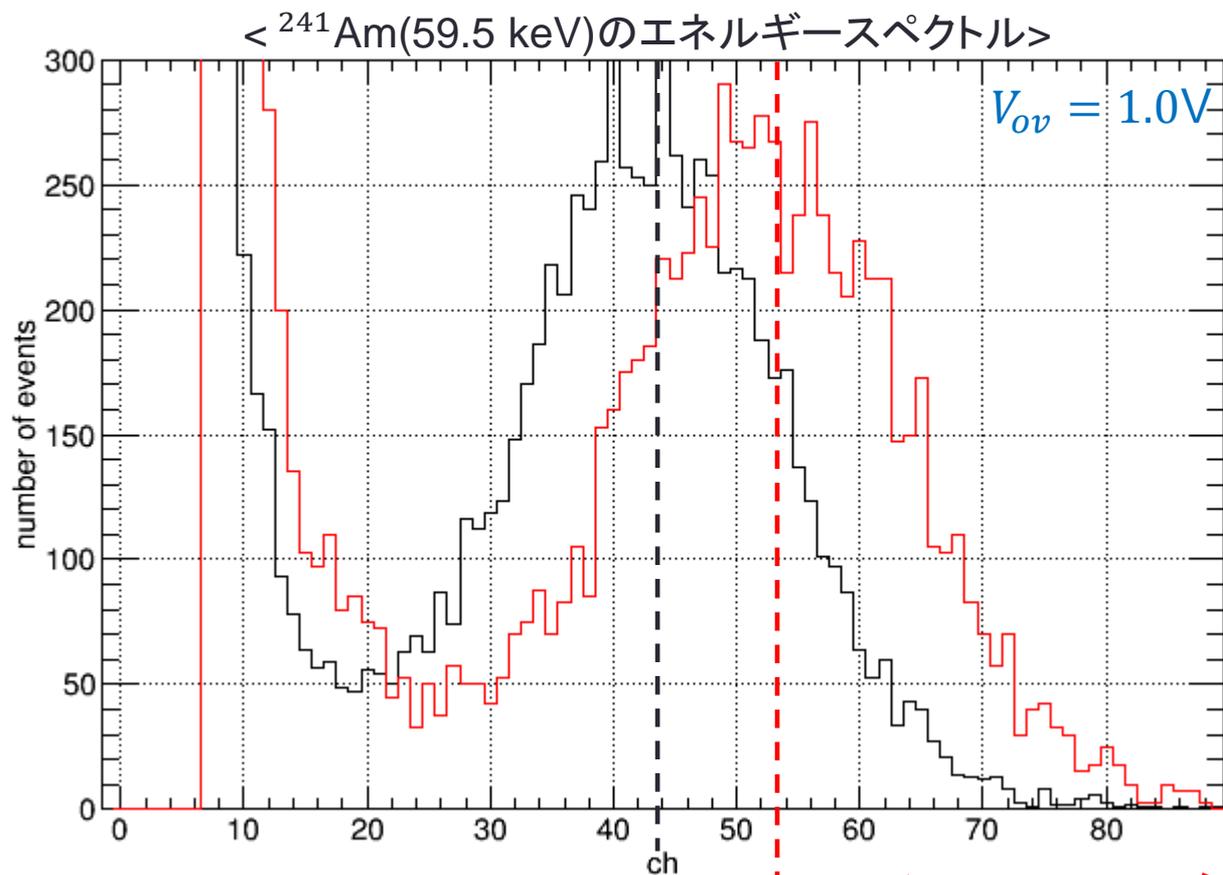
- ・シンチレータ部
 - ・MPPC部
 - ・読み出し回路
- MPPCとのマッチング
ピクセルサイズの評価
温度依存性
- 受光面の
デメリット改善
- ノイズのデメリット改善
ノイズ、低Eイベント

< ^{241}Am (59.5 keV)のエネルギースペクトル>



シンチレータのMPPPCとのマッチング

MPPPCの受光面のサイズ(6×6 mm)と比べて、
大きいシンチレータ(5×10 mm)と小さいシンチレータ(4×4 mm)で比較



5 × 10 × 15 mm

4 × 4 × 15 mm

エネルギー分解能
50.2% → 46.3%

光量が約20%増加 →

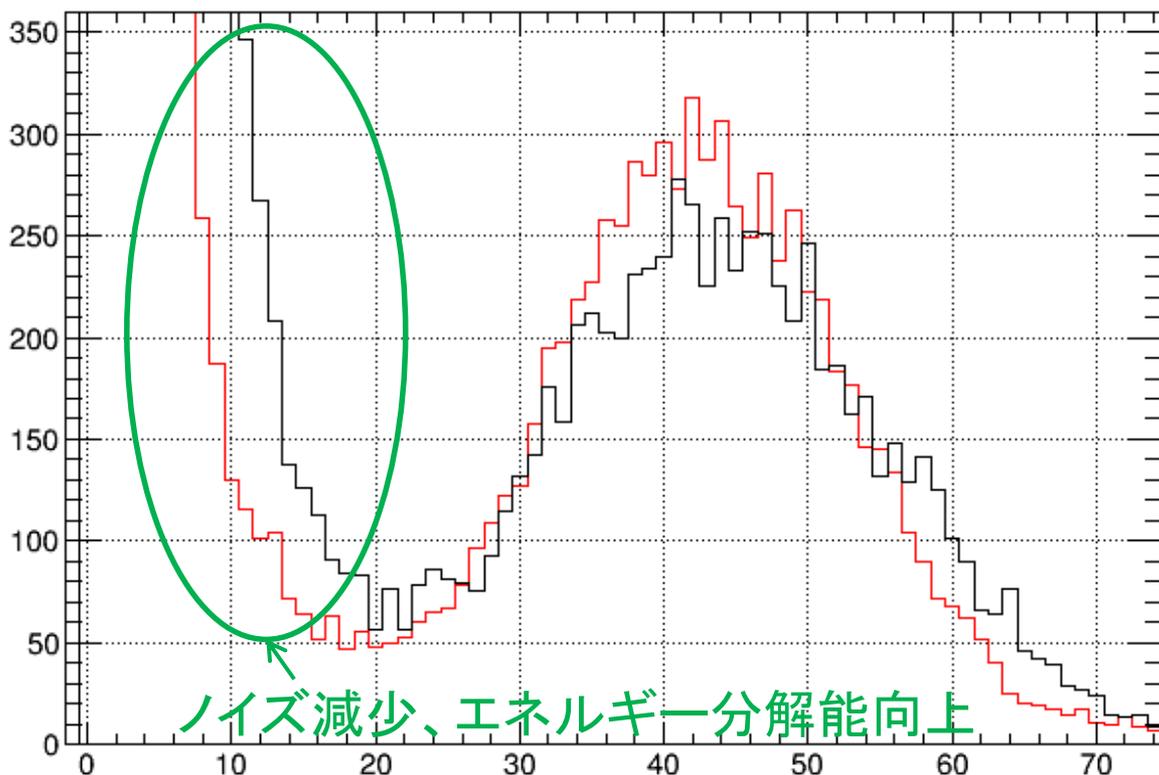
シンチレータのサイズ変更により、
エネルギー分解能が約8%改善

MPPCのピクセルサイズによる影響

MPPCのピクセルサイズ(開口率)
による違いを比較
(ピクセルサイズ100 μm でも線形性に問題ない)

ピクセルサイズ	50 μm	100 μm
開口率[%]	61.5	78.5
V_{ov} [V]	1.1	1.0

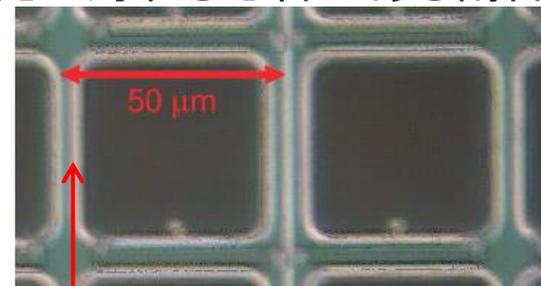
< ^{241}Am (59.5 keV)>



ノイズ減少、エネルギー分解能向上

<開口率>

MPPCの受光面のうち、
光に対する応答のある割合



不感部分
(ピクセル間で光子の伝播を防ぐ)

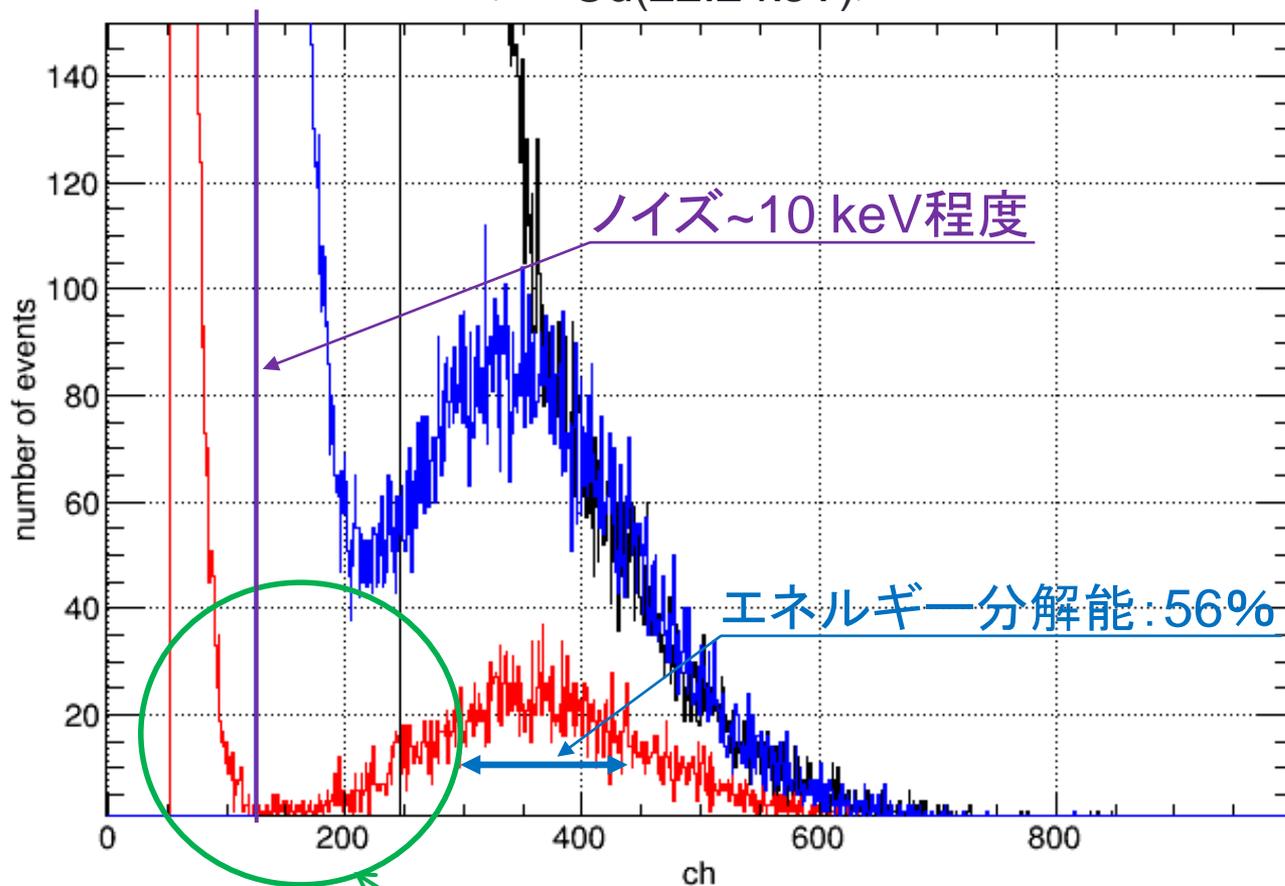
エネルギー分解能
54.8% \rightarrow 51.2%

ピクセルサイズの最適化によって、エネルギー分解能が約6%改善

MPPCの動作環境による影響

MPPCを動作させる温度を、 $20^{\circ}\text{C} \rightarrow -10^{\circ}\text{C}$ 、
整形時定数を $1\mu\text{s} \rightarrow 50\text{ns}$ に変化させて比較

$\langle {}^{109}\text{Cd}(22.2\text{ keV}) \rangle$

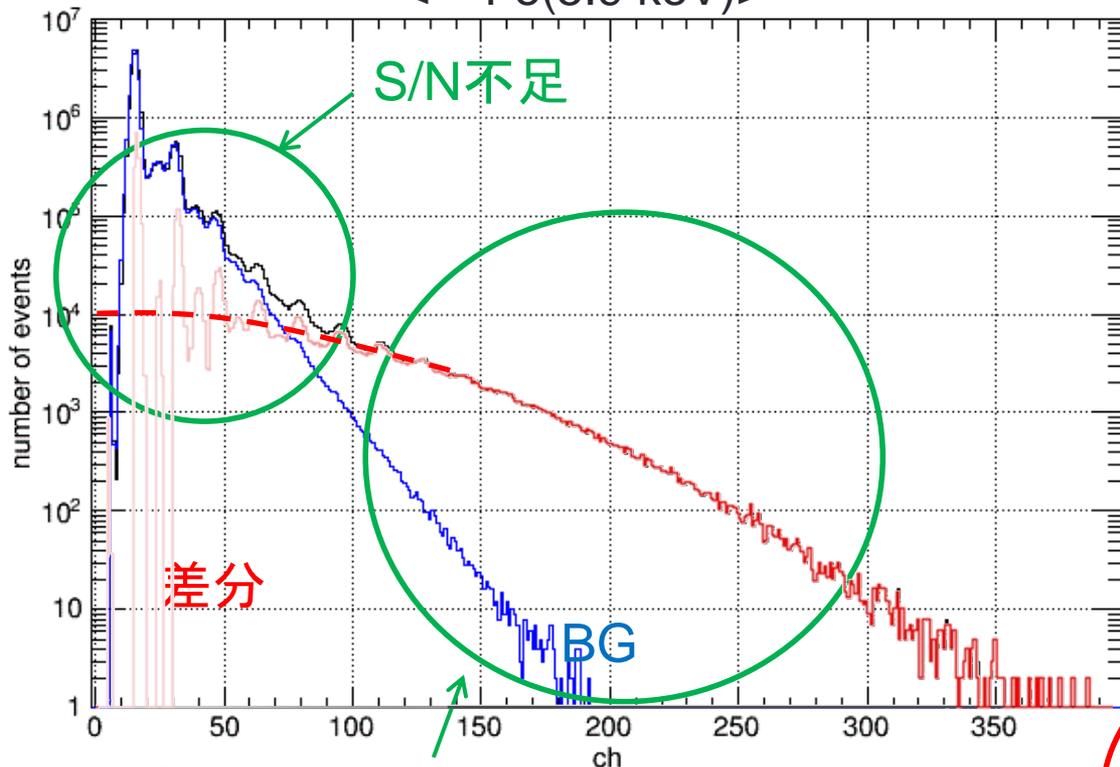


動作温度	整形時定数	V_{ov}
20°C	$1\mu\text{s}$	1.0V
-10°C	$1\mu\text{s}$	0.86V
-10°C	50ns	0.86V

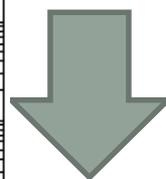
MPPCの動作環境による影響

-10°C、50nsで動作

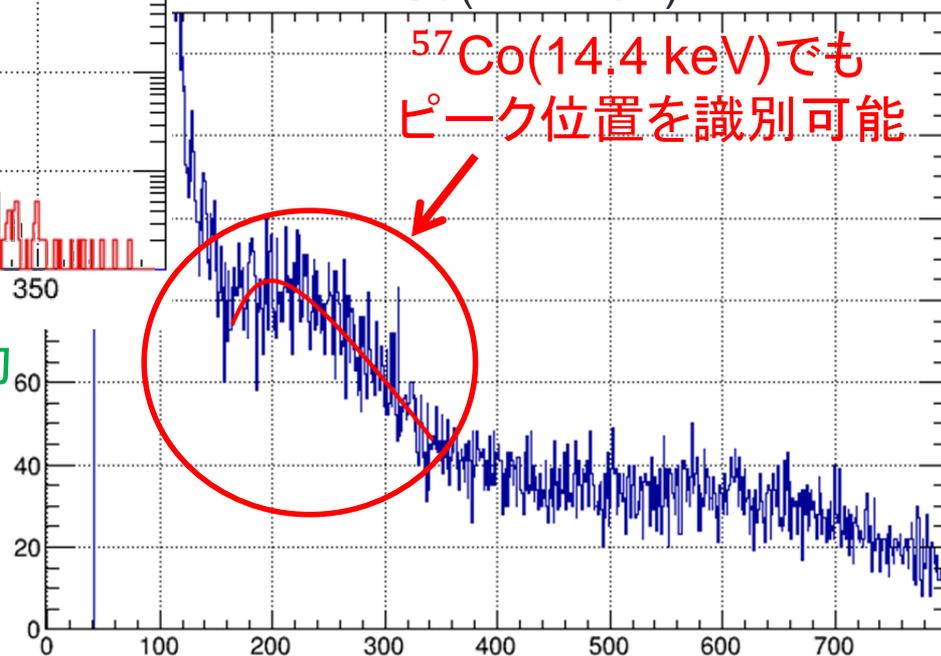
< ^{55}Fe (5.9 keV)>



信号の位置
有無を特定可能



< ^{57}Co (14.4 keV)>

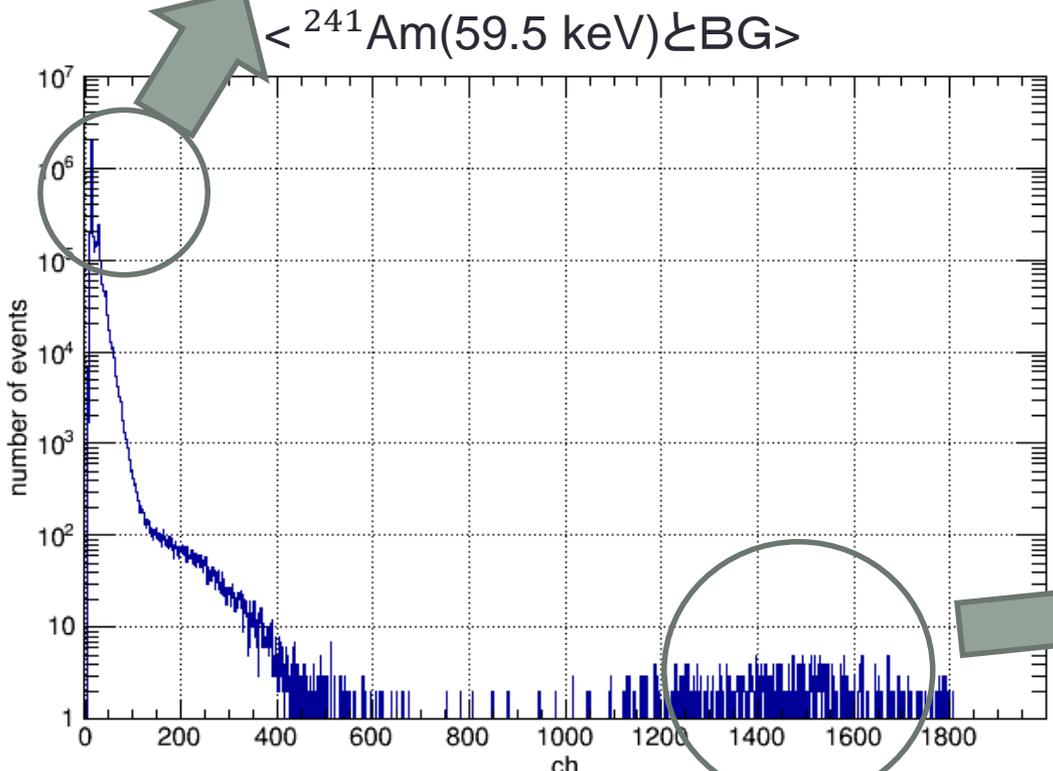
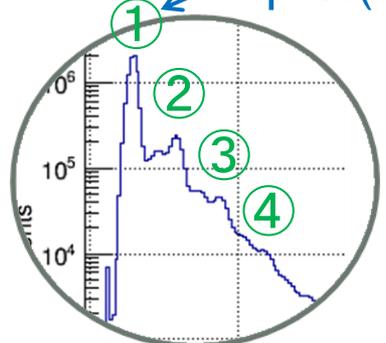


低エネルギー側はノイズに埋もれるが、信号の検出は成功

絶対光量の議論

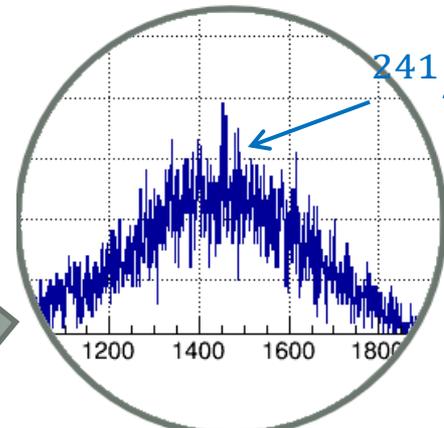
光子1つ分のイベントに対し、
各信号が光子何個分か測定

← 1p.e.(1つのフォトエレクトロン)が増幅された際のイベント



	MPPC	PMT
1p.e.[ch]	14.7	13.3
^{241}Am のピーク[ch]	1441	1433
絶対光量 [p.e.]	98.7	87.8

~60 keVの読み出しでは
PMTと同性能である



※左図より積分時間が長い

まとめと今後

- ・プラスチックシンチレータとMPPCの組み合わせで信号の読み出しを行った

MPPCピクセルサイズ	100 μm
シンチレータ サイズ	4 × 4 × 15 mm
読み出し温度	-10 °C
整形時定数	50 ns

- ・ ^{57}Co のスペクトルを取得
➡ ~10 keVの信号の特定が可能
- ・ ^{55}Fe のスペクトル取得
➡ ~6 keVの信号の検出が可能

目標の2 keVには、あと5倍程度の改善が必要

- ・ ~60 keVの信号では、PMTと同程度の性能となることを確認

➡ 光量は十分稼いでいる

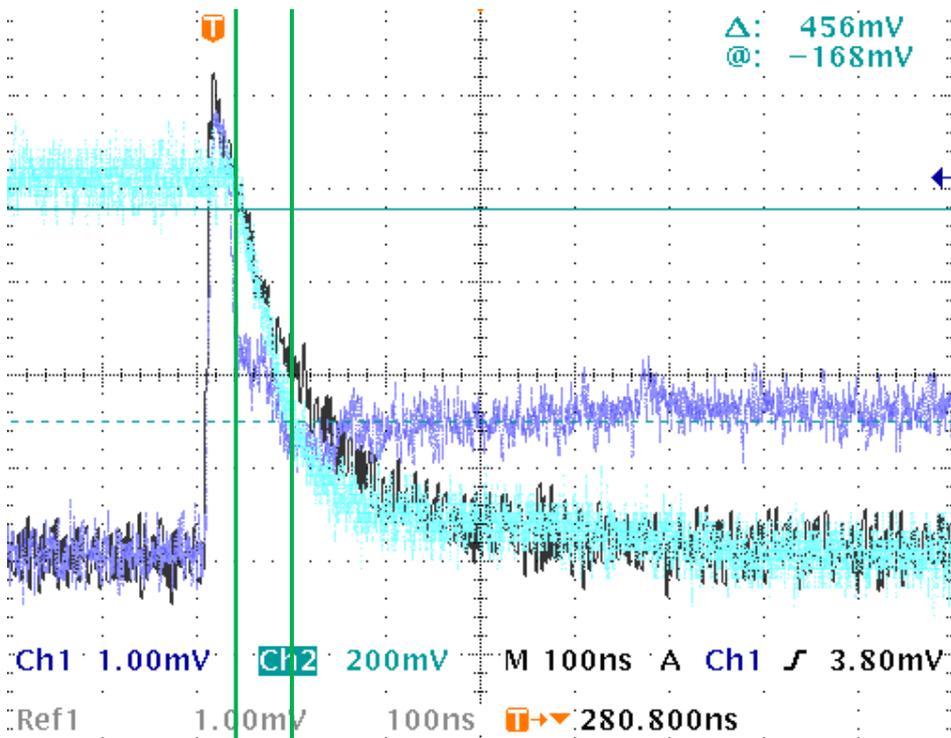
- ・ 目標の信号を読み出すために

- ・ MPPCの新製品を使用(従来品よりノイズ低下)

- ・ 読み出し速度の向上(プラスチックシンチレータの発光速度:~数ns)

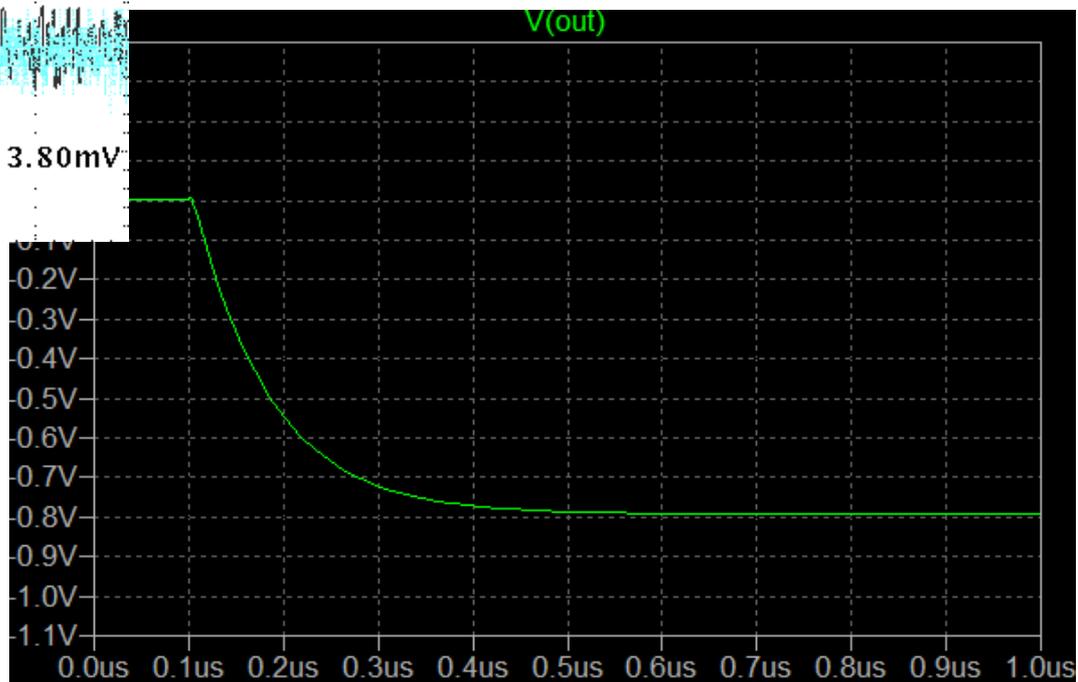
- ・ 吸収体との同時計数(ノイズ除去)

50nsで読み出した際の波形



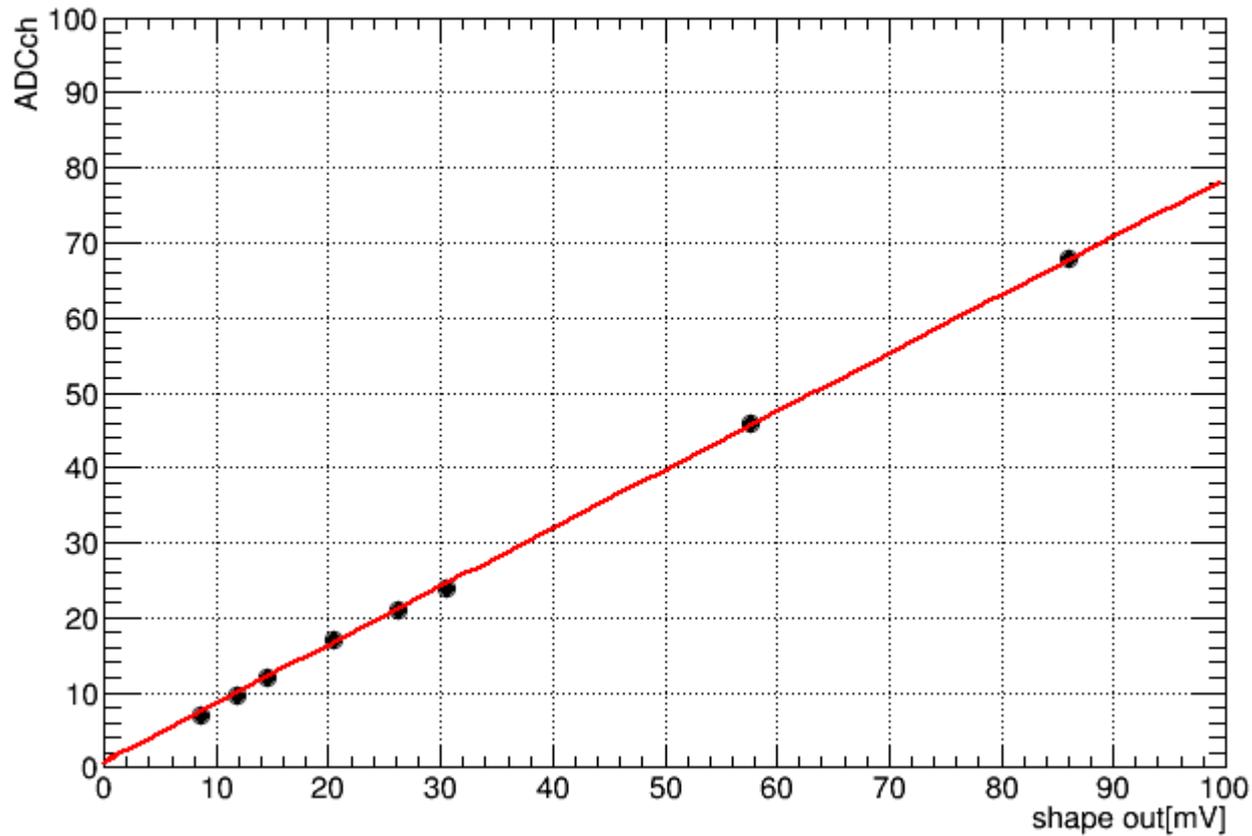
立ち上がりの時定数 ~50ns

シミュレーションでも
同様の結果が得られた



低chにおけるAD変換

shape out vs ADCch



シンチレーション検出器

X-ray / gamma-ray
from radioisotope

