

# 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

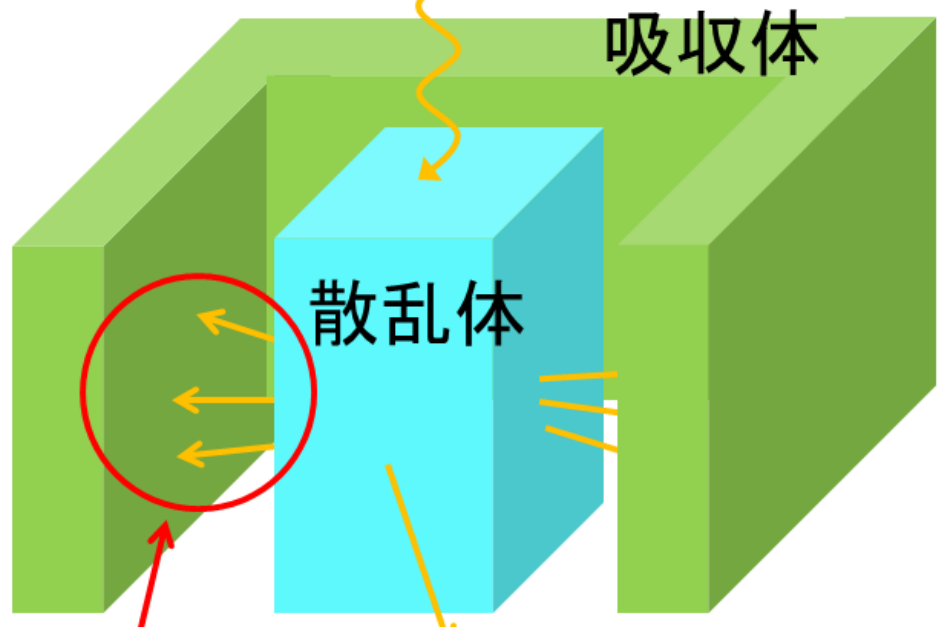
---

中岡 竜也、水野 恒史、  
高橋 弘充、深沢 泰司(広島大学)

(W138)

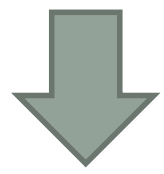
# X線偏光計の原理

入射光子  
偏光方向

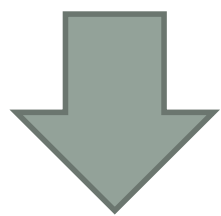


偏光方向に垂直に散乱されやすい

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

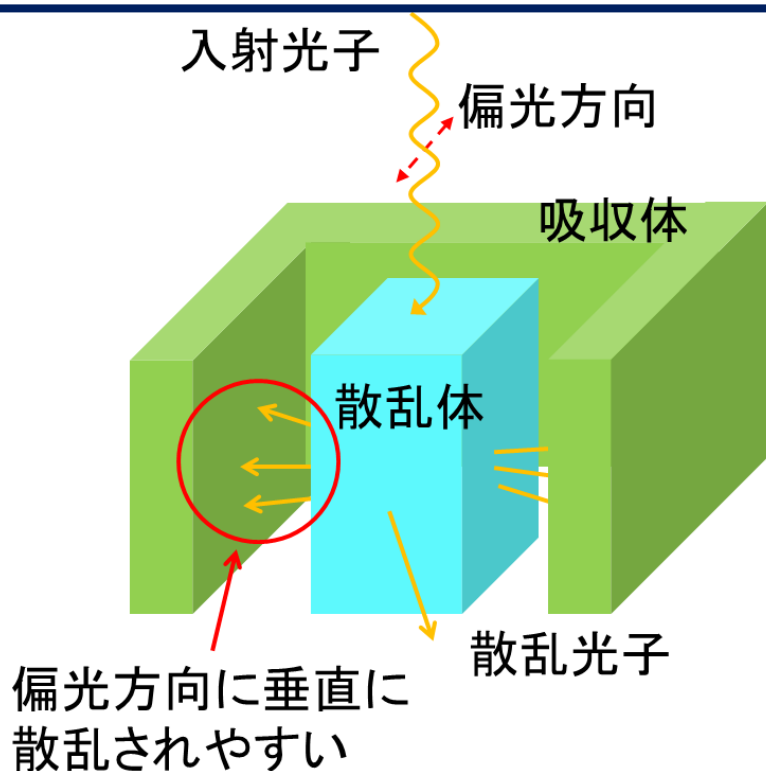
一般的な偏光X線検出器

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

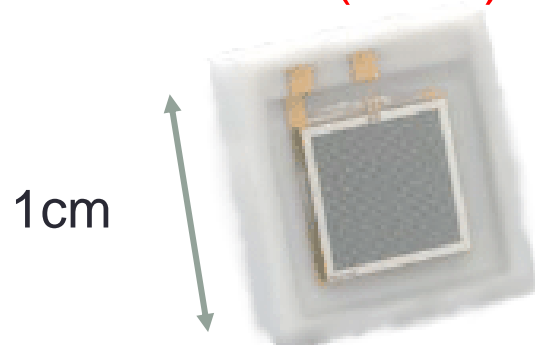
- ・散乱しやすい
- ・安価

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

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

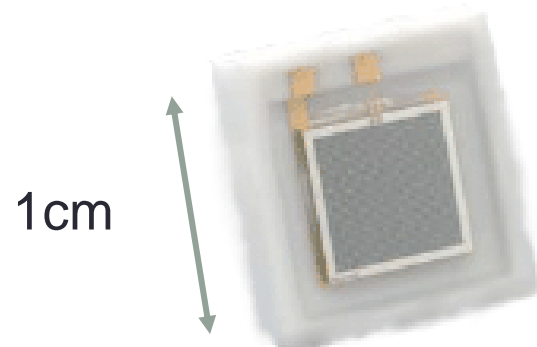
## 目的

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

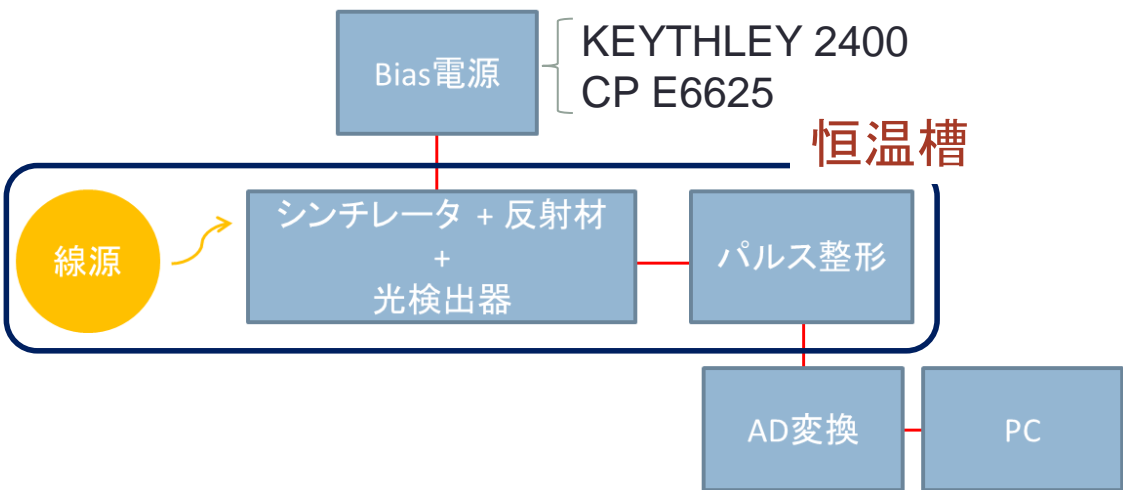
光検出器に  
MPPCを使用



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>

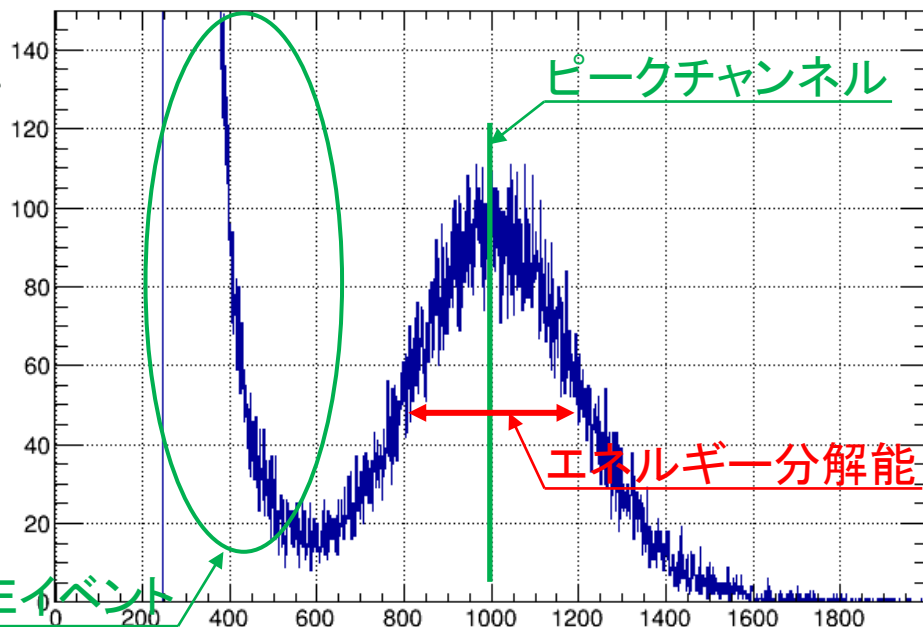


## 評価項目

以下の項目に分けて評価を行う

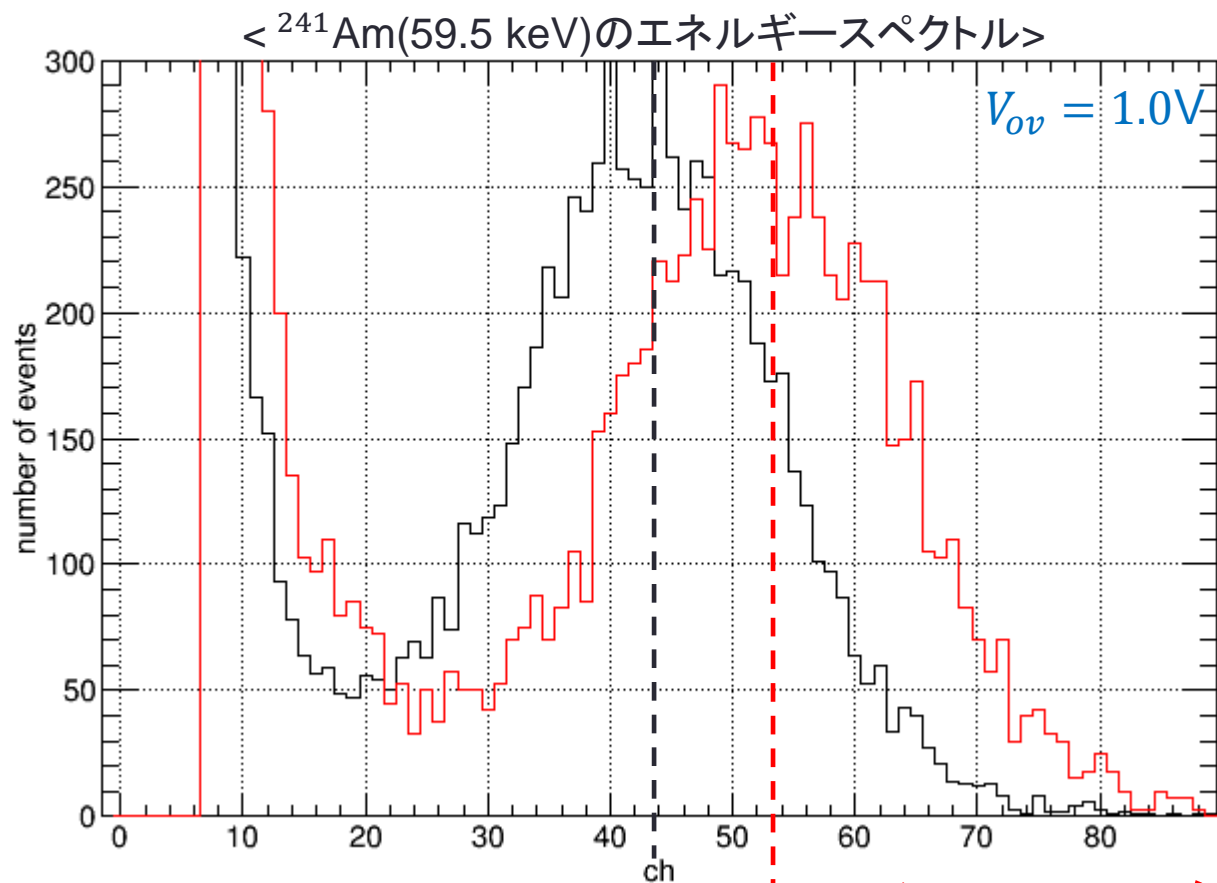
- ・シンチレータ部
  - ・MPPC部
  - ・読み出し回路
- MPPCとのマッチング  
ピクセルサイズの評価  
温度依存性
- 受光面の  
デメリット改善
- ノイズのデメリット改善  
ノイズ、低Eイベント

< $^{241}\text{Am}$ (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 →

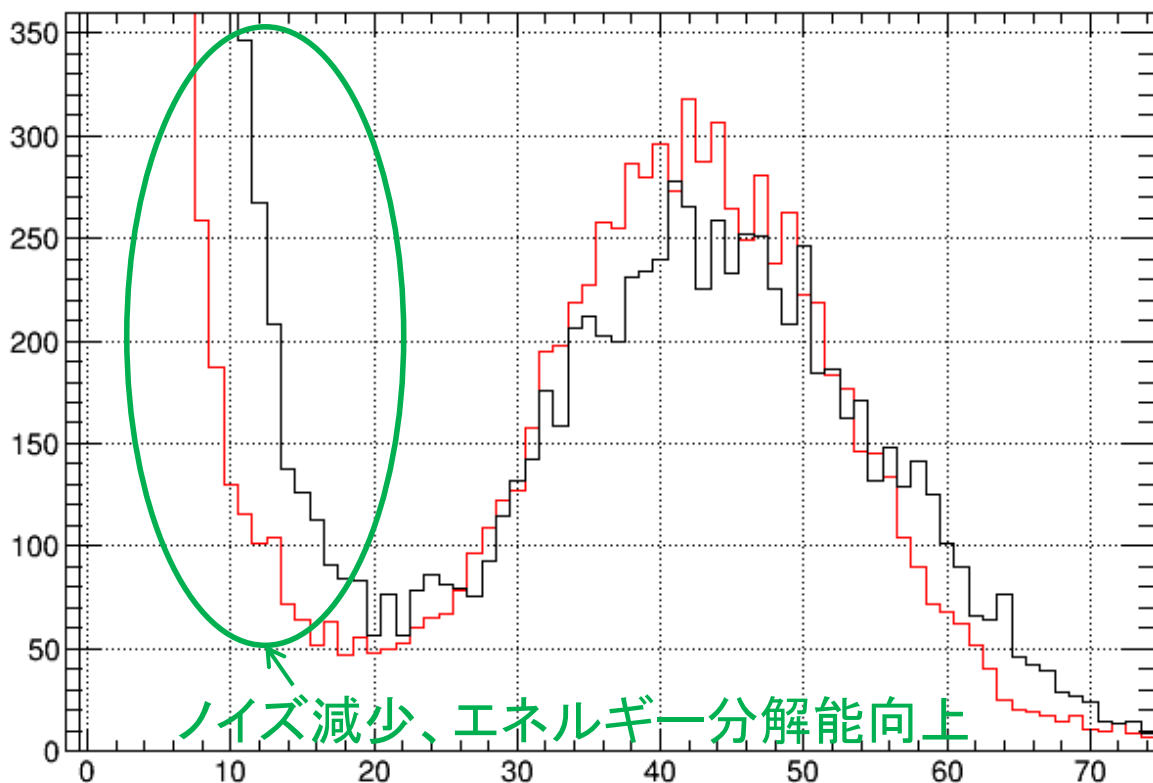
シンチレータのサイズ変更により、  
エネルギー分解能が約8%改善

# 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 $\mu\text{m}$ でも線形性に問題ない)

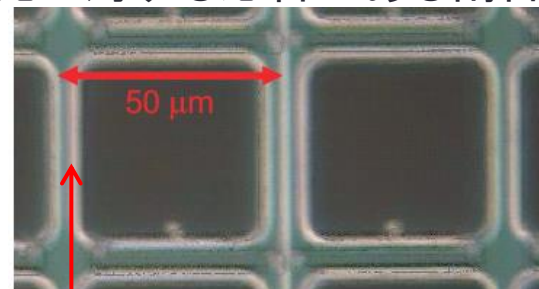
ピクセルサイズ	50 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$
開口率[%]	61.5	78.5
$V_{ov}$ [V]	1.1	1.0

<  $^{241}\text{Am}$ (59.5 keV)>



<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%

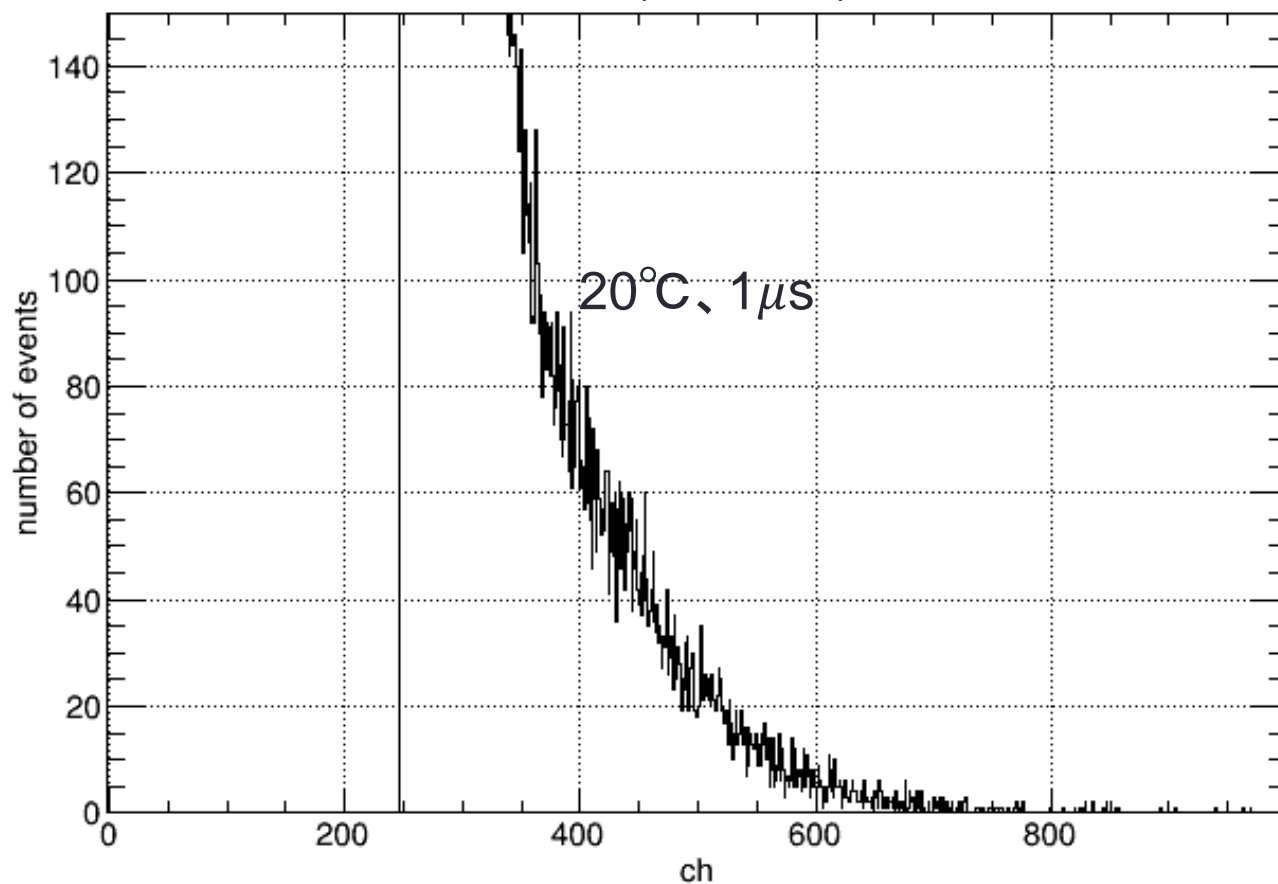
ピクセルサイズの最適化によって、エネルギー分解能が約6%改善



# 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

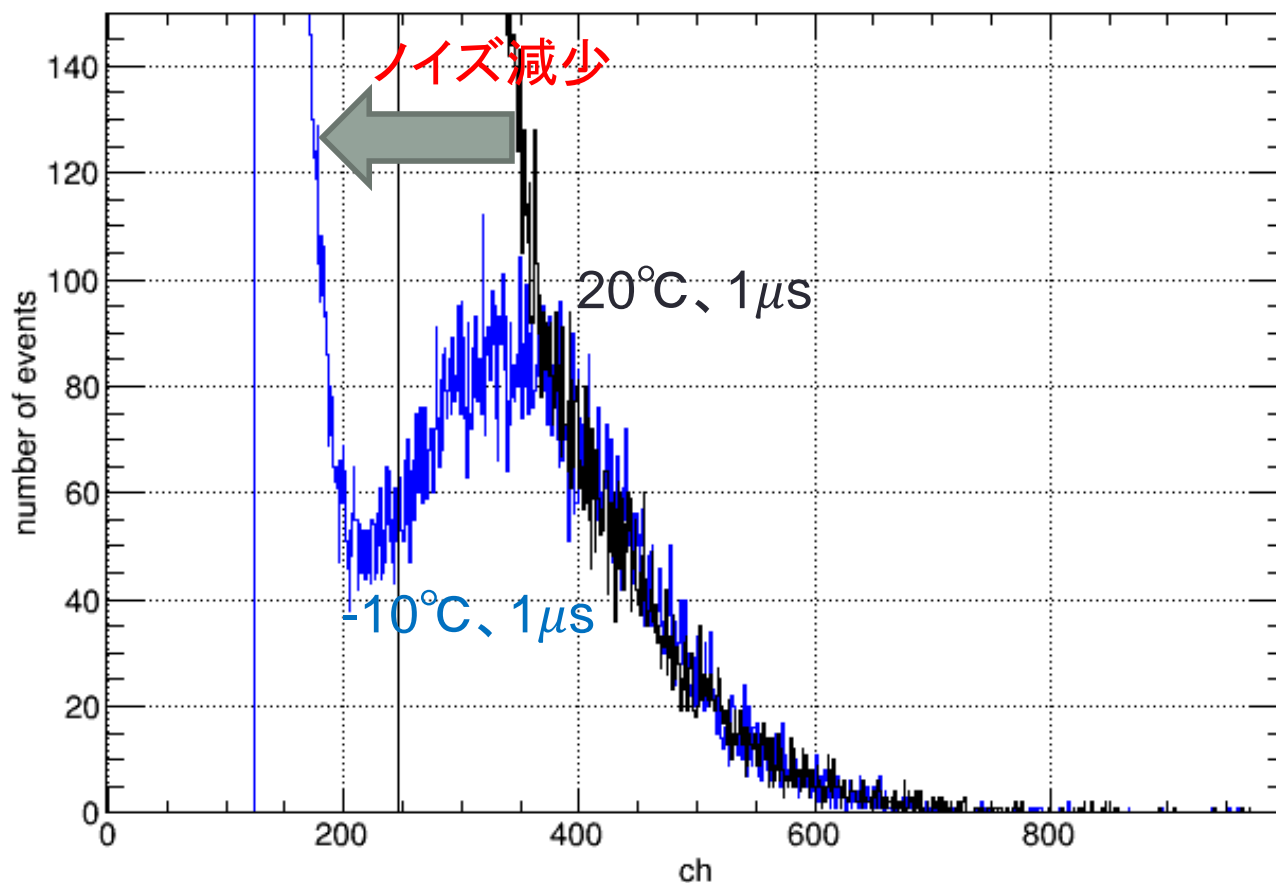
$\langle {}^{109}\text{Cd}(22.2\text{ keV}) \rangle$



# 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

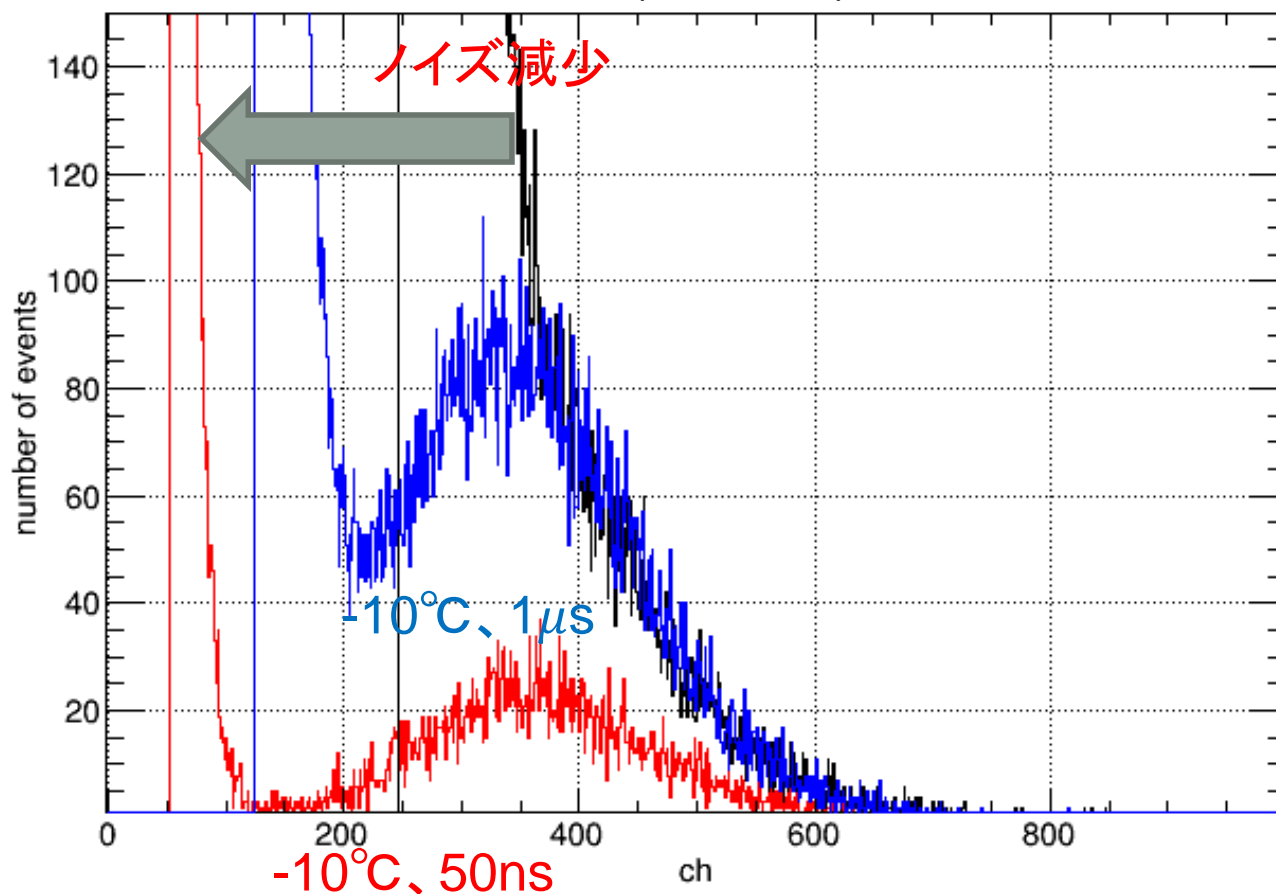
$\langle {}^{109}\text{Cd}(22.2\text{ keV}) \rangle$



# 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

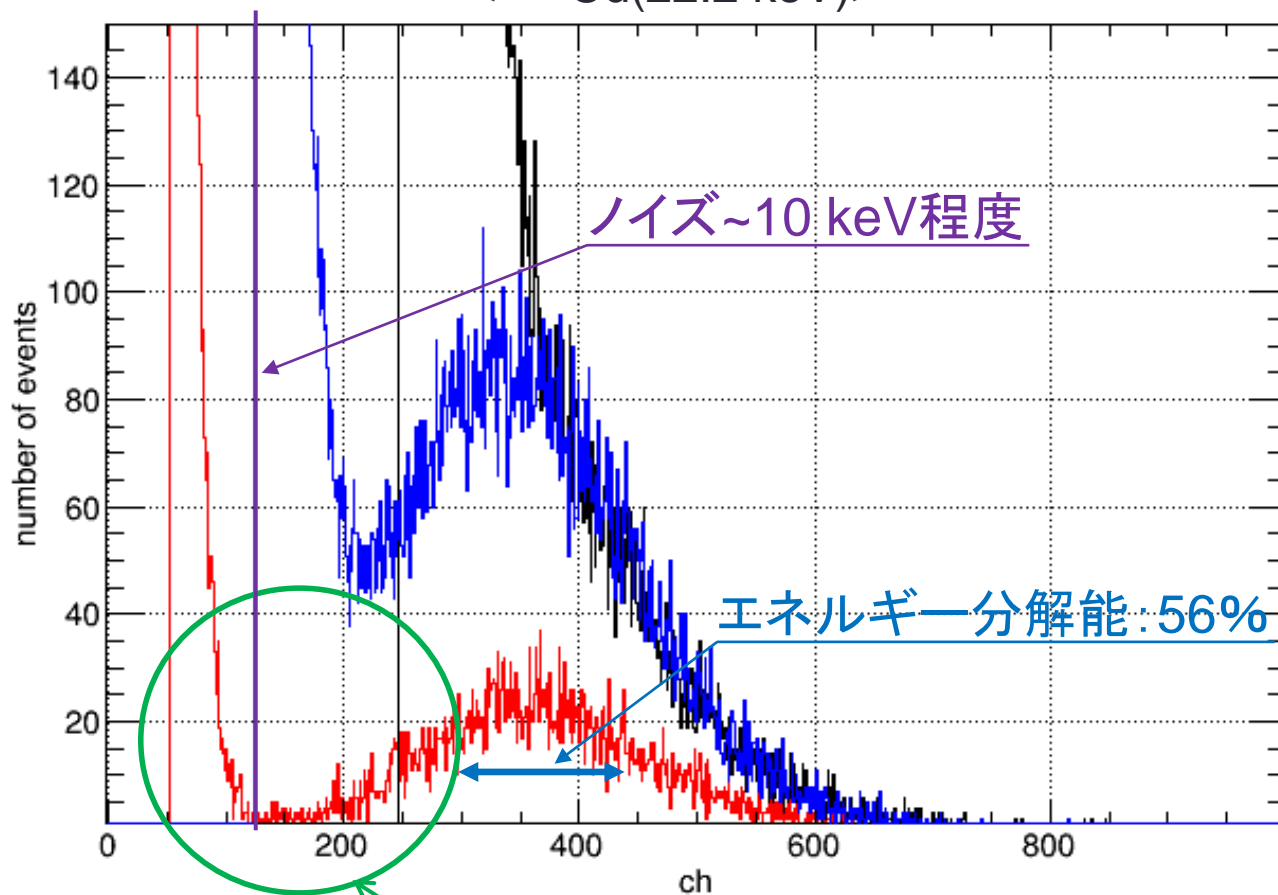
$\langle {}^{109}\text{Cd}(22.2\text{ keV}) \rangle$



# 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

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

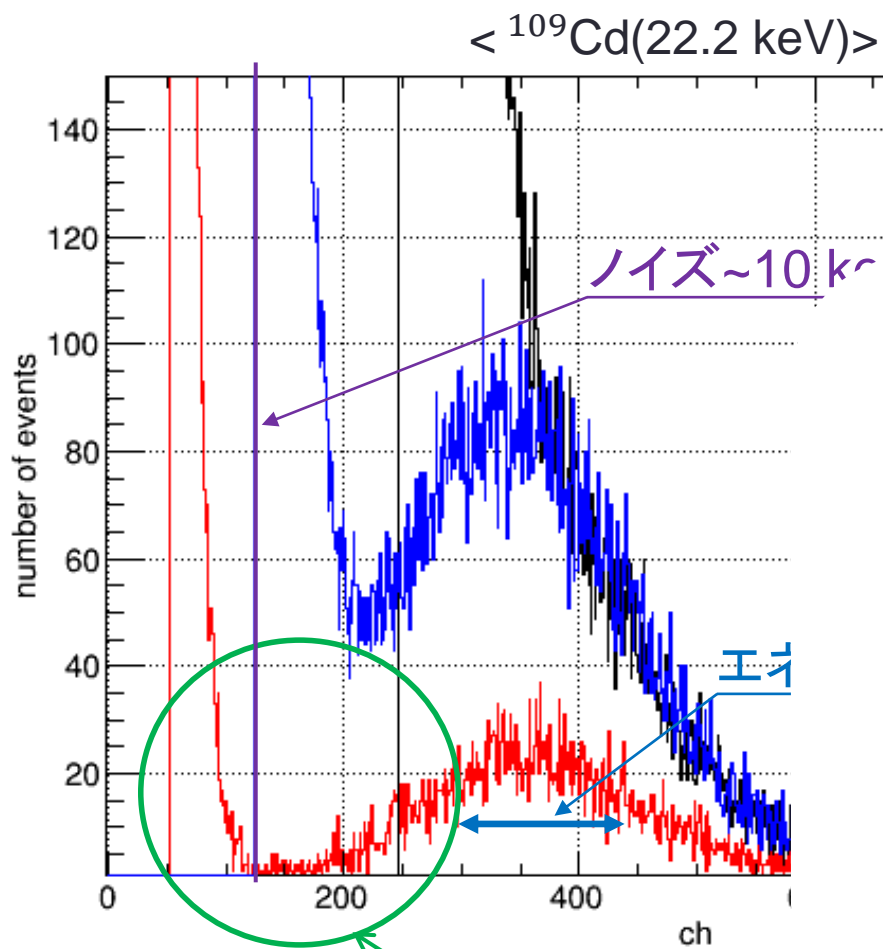


ピークのすそまではっきりと分離されている

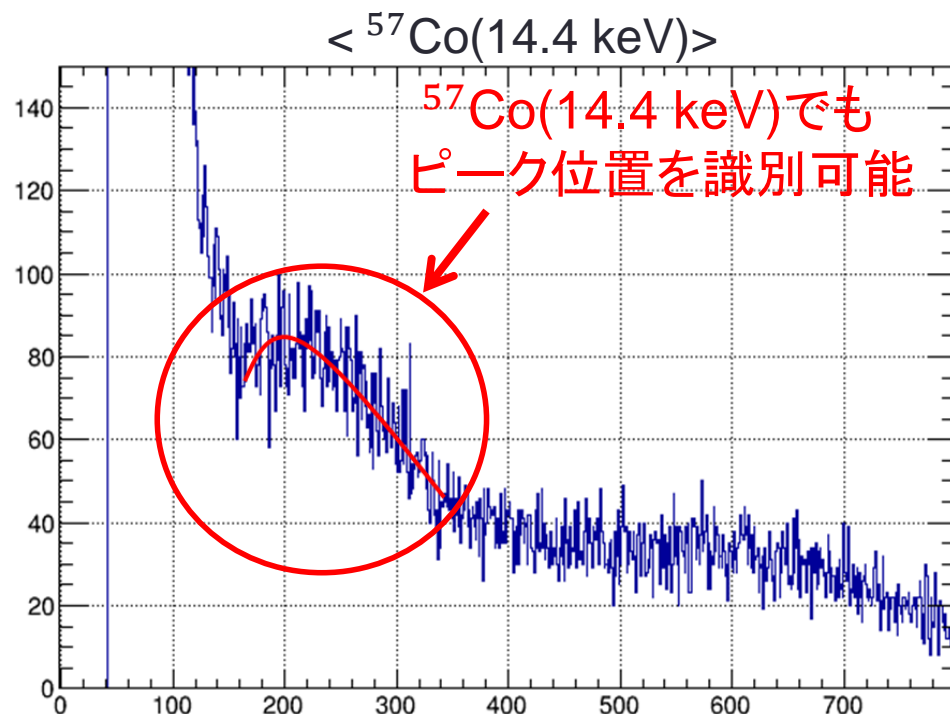
動作温度	整形時定数	$V_{ov}$
$20^{\circ}\text{C}$	$1\mu\text{s}$	1.0V
$-10^{\circ}\text{C}$	$1\mu\text{s}$	0.86V
$-10^{\circ}\text{C}$	50ns	0.86V

# MPPCの動作環境による影響

-10°C、50nsで動作



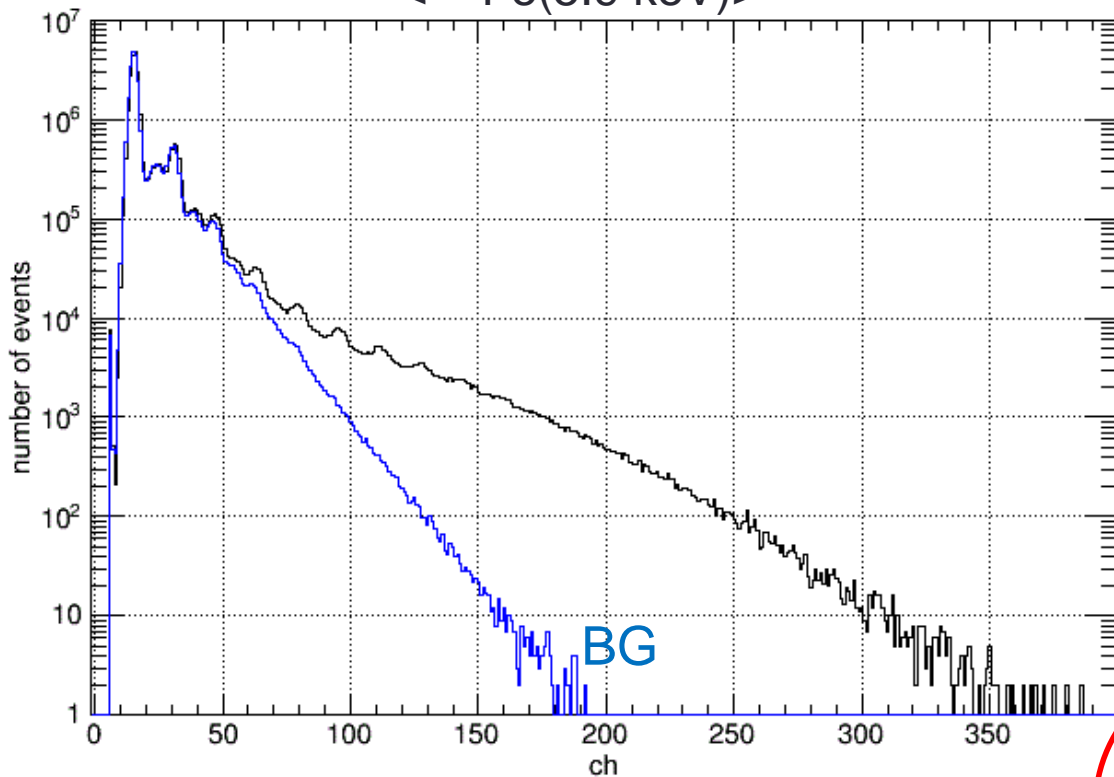
ピークのすそま...



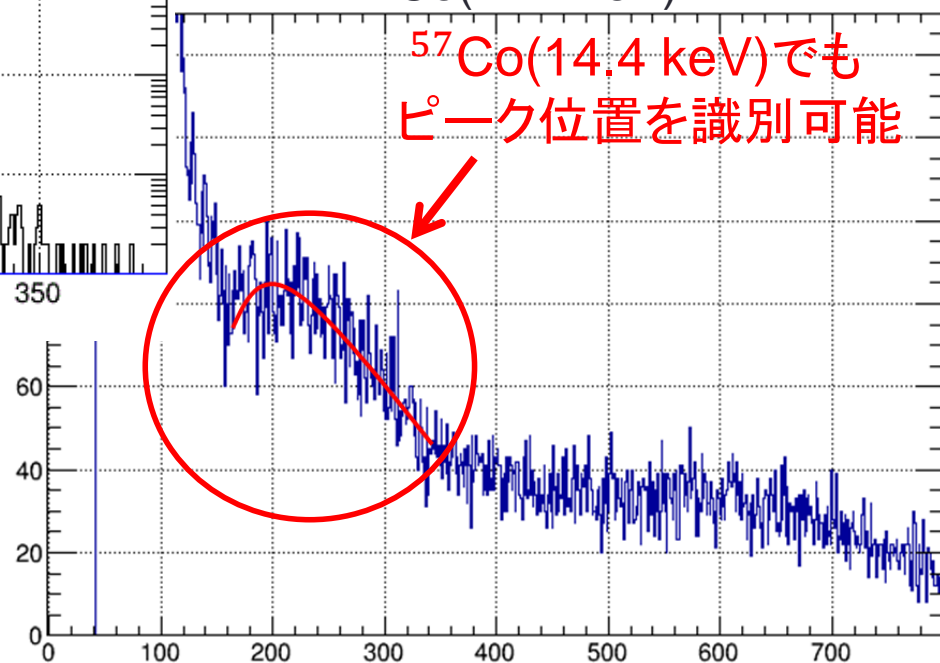
# MPPCの動作環境による影響

-10°C、50nsで動作

<  $^{55}\text{Fe}$ (5.9 keV)>



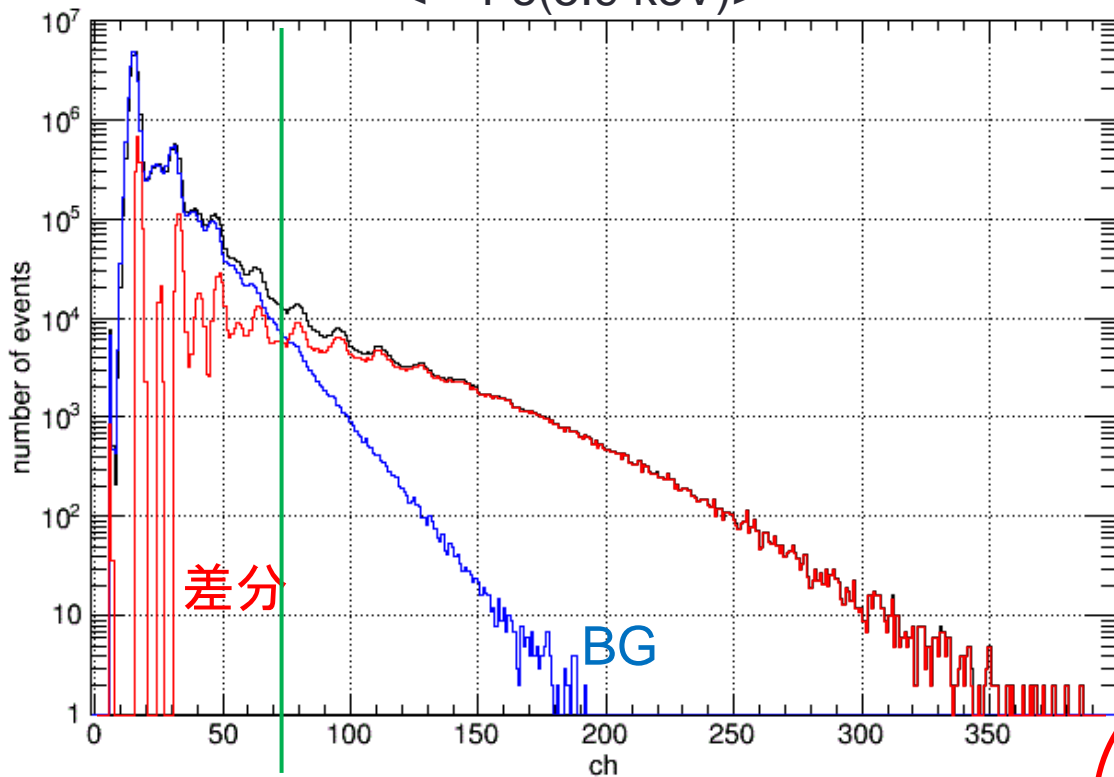
<  $^{57}\text{Co}$ (14.4 keV)>



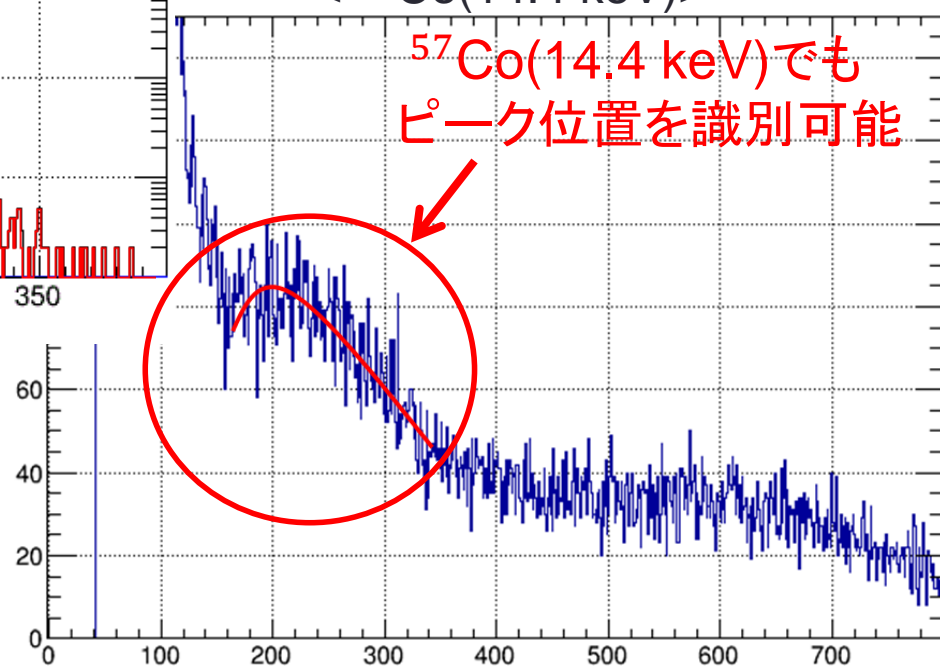
# MPPCの動作環境による影響

-10°C、50nsで動作

<  $^{55}\text{Fe}$  (5.9 keV) >



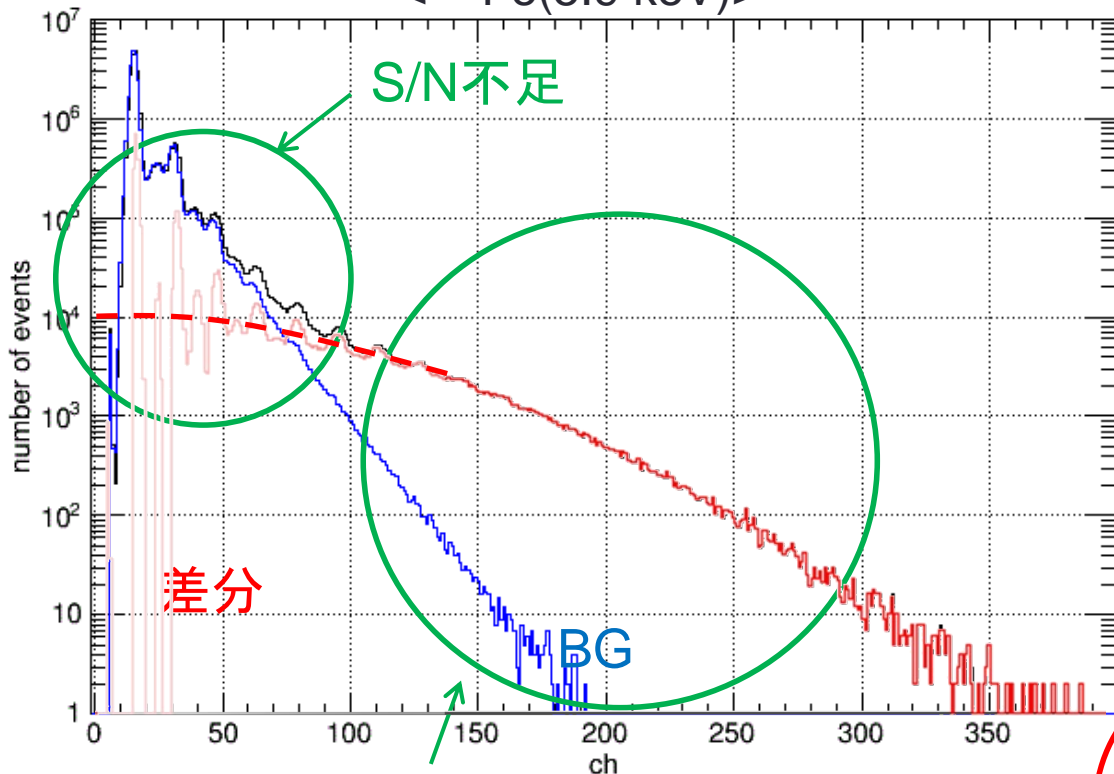
<  $^{57}\text{Co}$  (14.4 keV) >



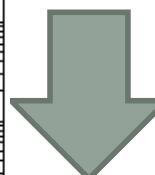
# MPPCの動作環境による影響

-10°C、50nsで動作

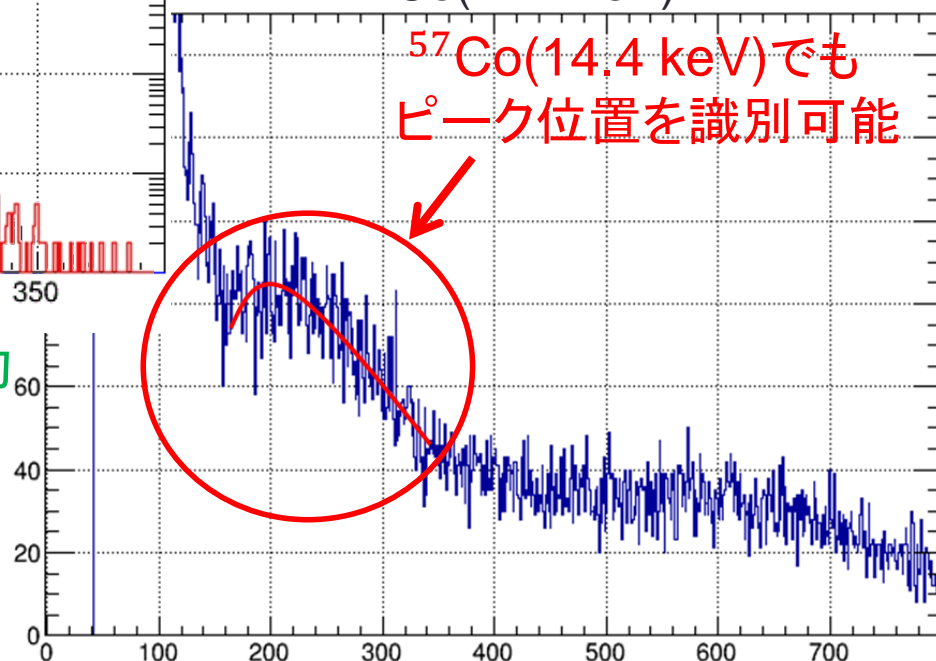
<  $^{55}\text{Fe}$ (5.9 keV)>



信号の位置  
有無を特定可能



<  $^{57}\text{Co}$ (14.4 keV)>



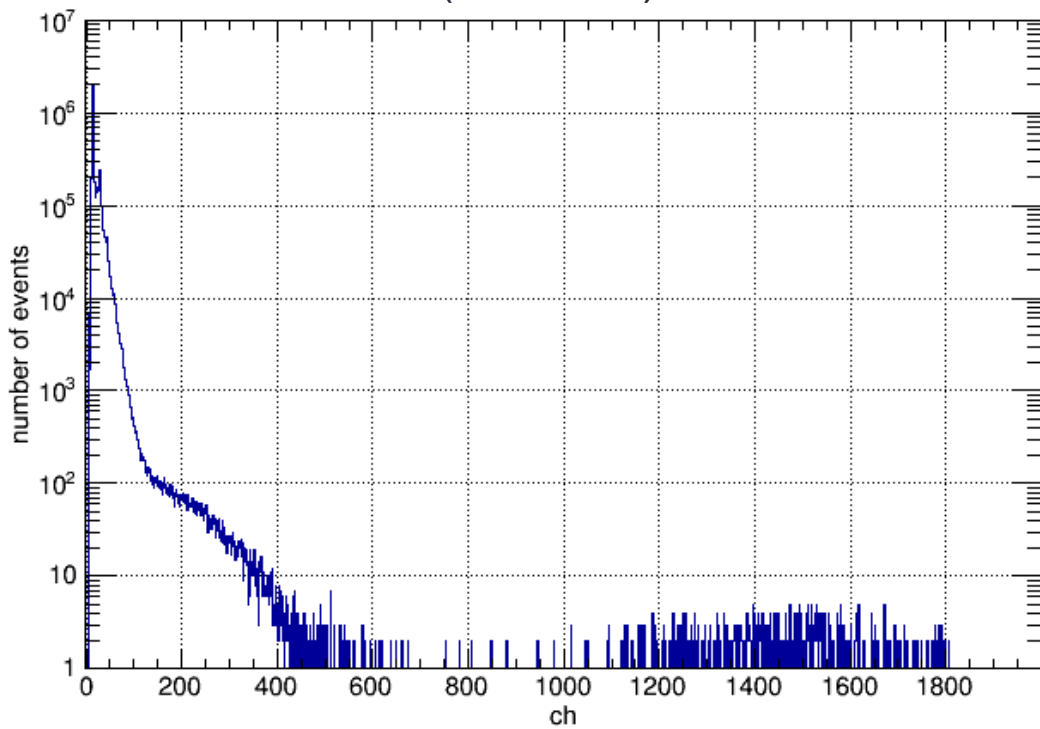
低エネルギー側はノイズに埋もれるが、信号の検出は成功



# 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

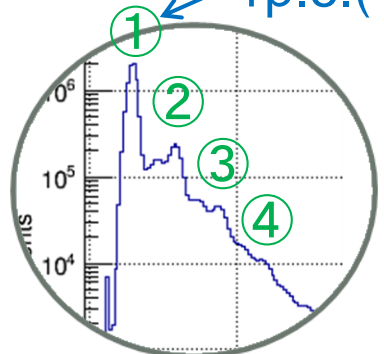
<  $^{241}\text{Am}$ (59.5 keV)とBG>



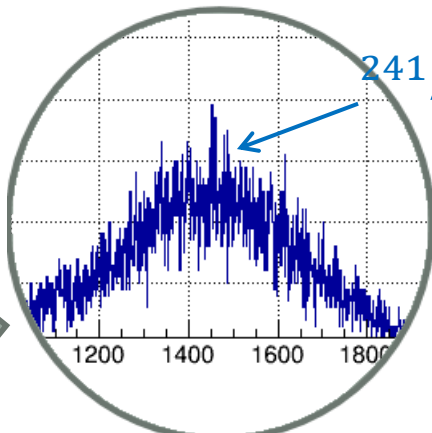
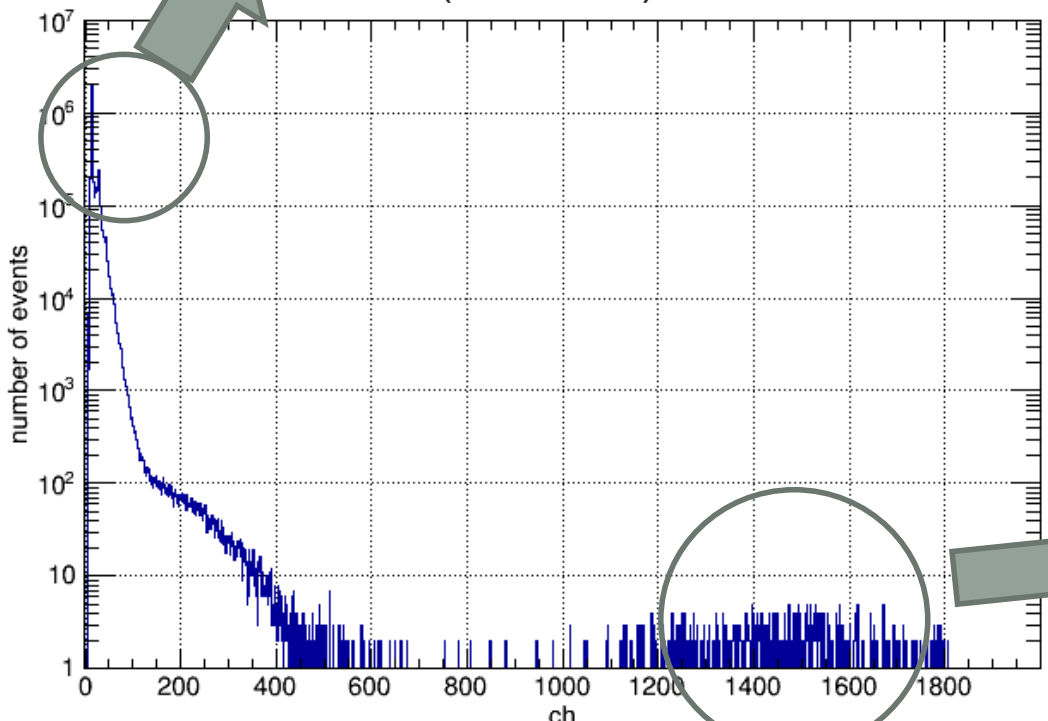
# 絶対光量の議論

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



< <sup>241</sup>Am(59.5 keV)とBG >

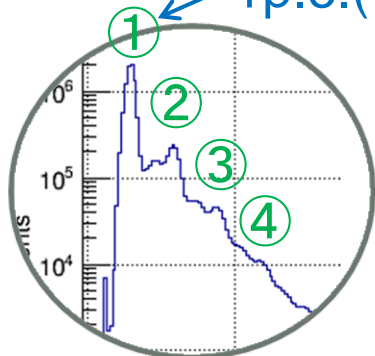


※左図より積分時間が長い

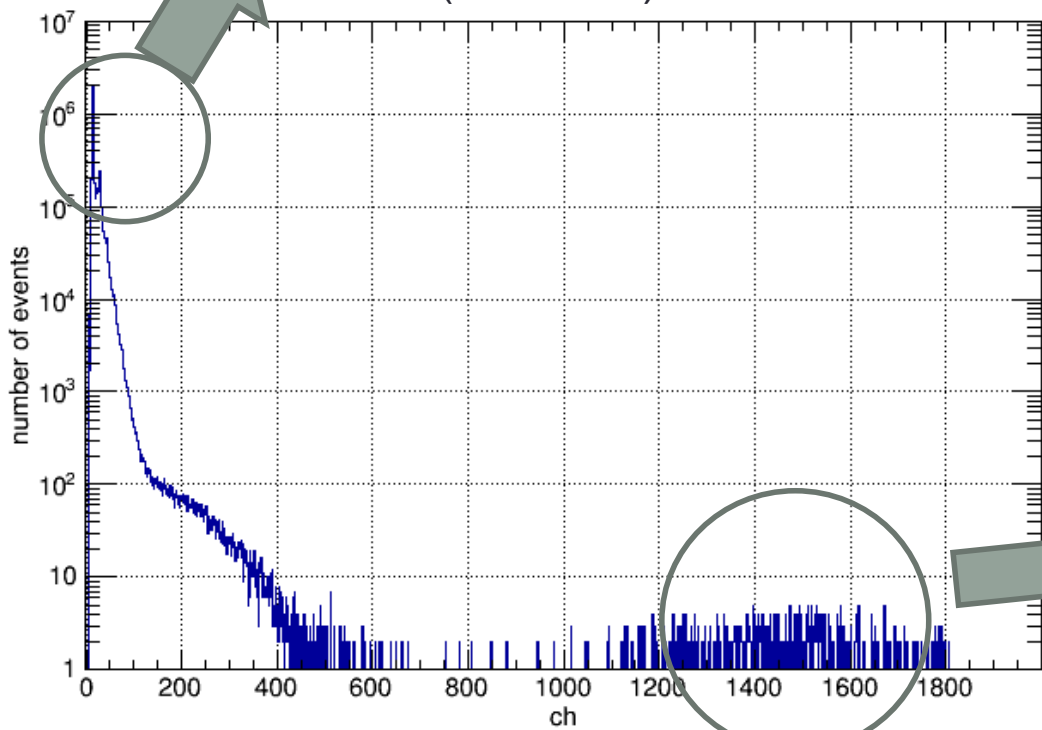
# 絶対光量の議論

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

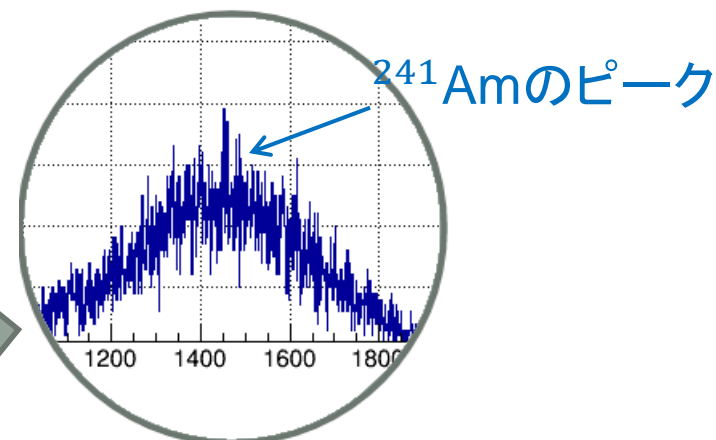


<  $^{241}\text{Am}$ (59.5 keV)とBG>



	MPPC	PMT
1p.e.[ch]	14.7	13.3
$^{241}\text{Am}$ 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

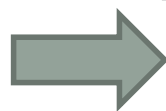
- ・プラスチックシンチレータとMPPCの組み合わせで信号の読み出しを行った

MPPCピクセルサイズ	100 $\mu\text{m}$
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

- ・  $^{57}\text{Co}$ のスペクトルを取得  
➡ ~10 keVの信号の特定が可能
- ・  $^{55}\text{Fe}$ 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

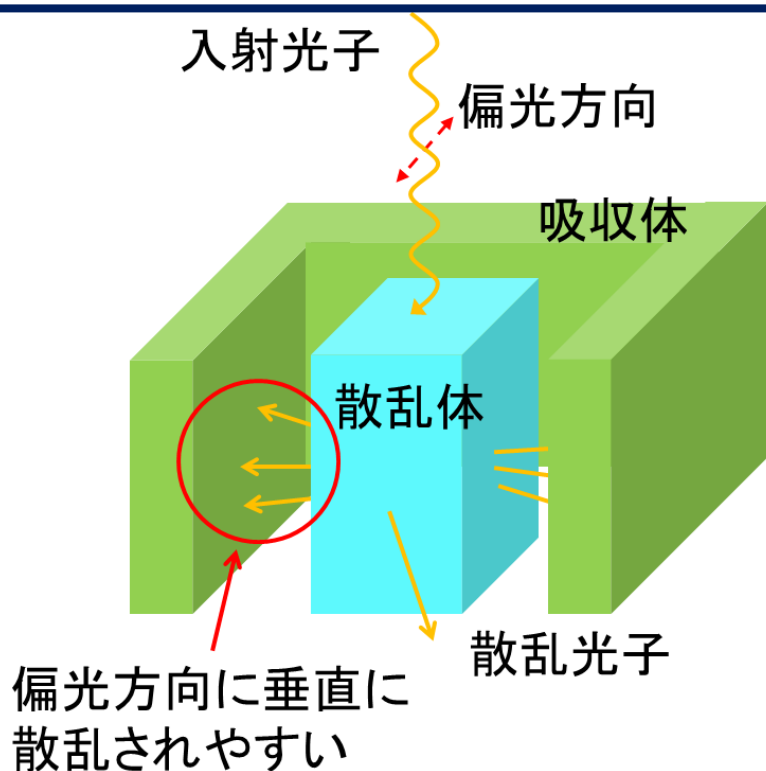
一般的な偏光X線検出器

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

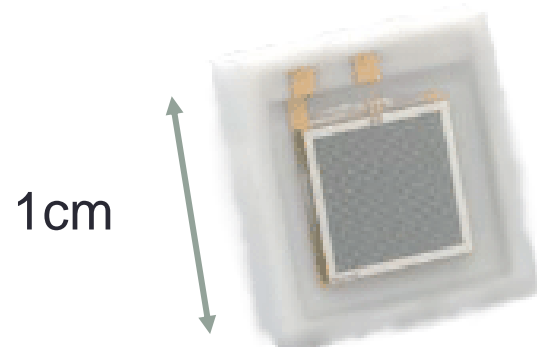
## 目的

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

光検出器に  
MPPCを使用

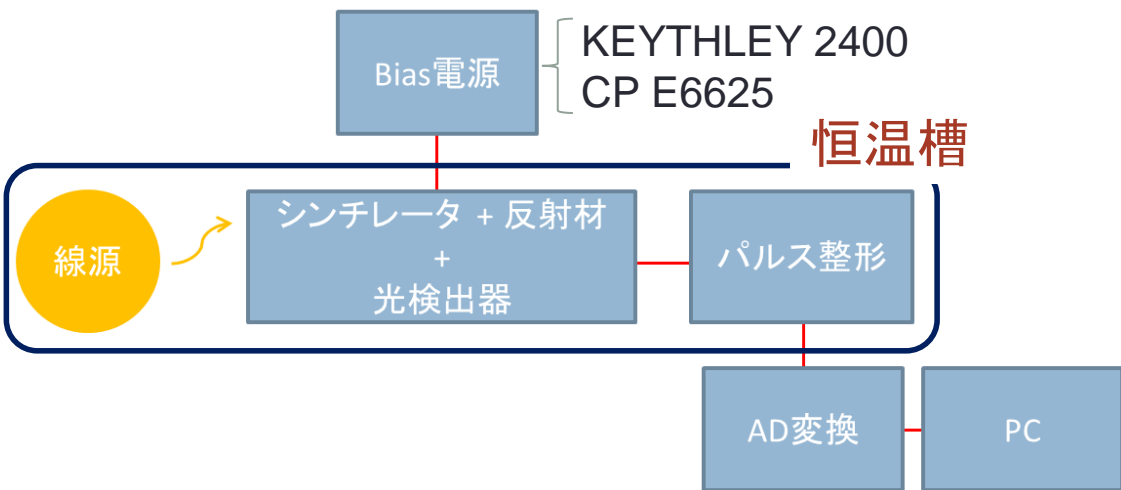


今回用いた光検出器  
浜松ホトニクス社  
「S10985」



# 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>

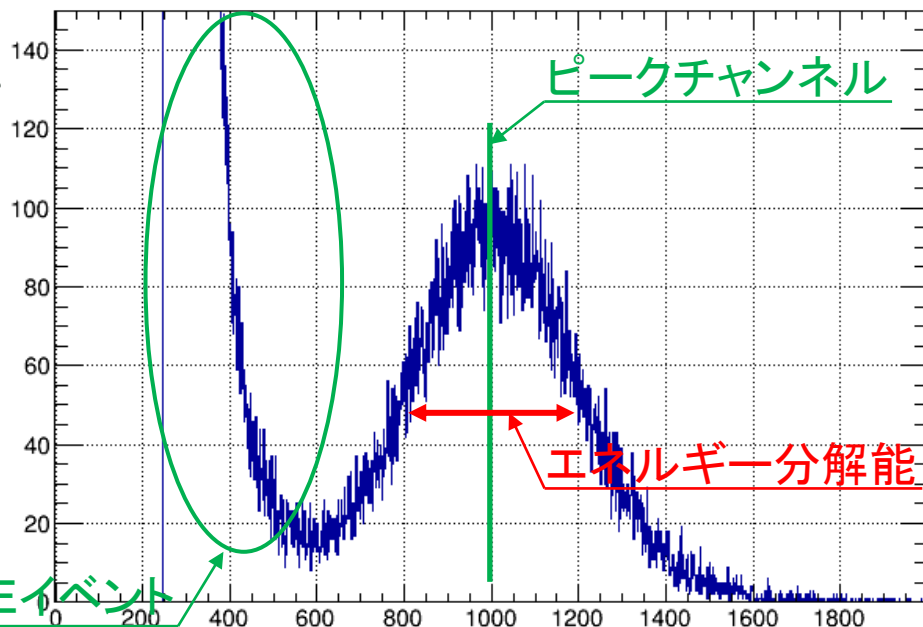


## 評価項目

以下の項目に分けて評価を行う

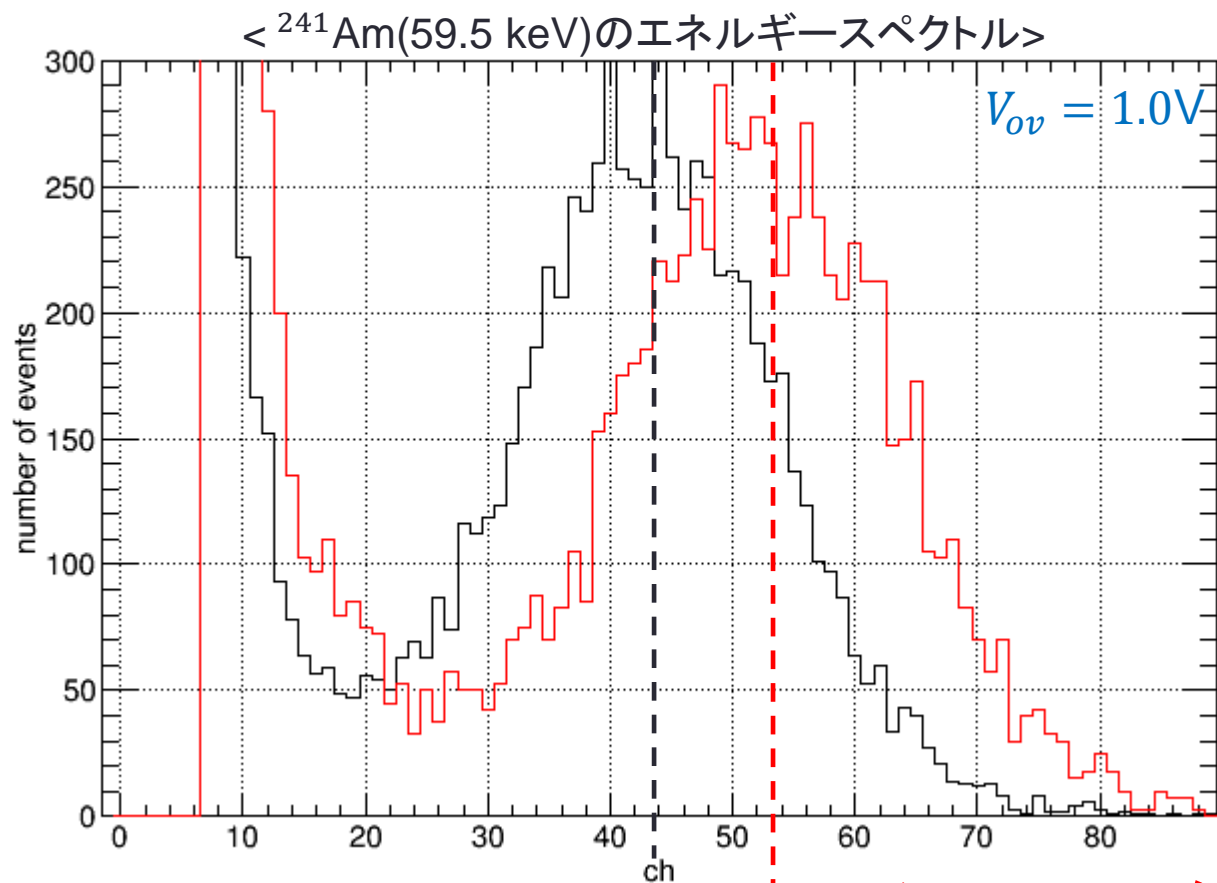
- ・シンチレータ部
  - ・MPPCとのマッチング
  - ・MPPC部
  - ・ピクセルサイズの評価
  - ・温度依存性
  - ・読み出し回路
- 受光面のデメリット改善
- ノイズのデメリット改善
- ノイズ、低Eイベント

< $^{241}\text{Am}$ (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 →

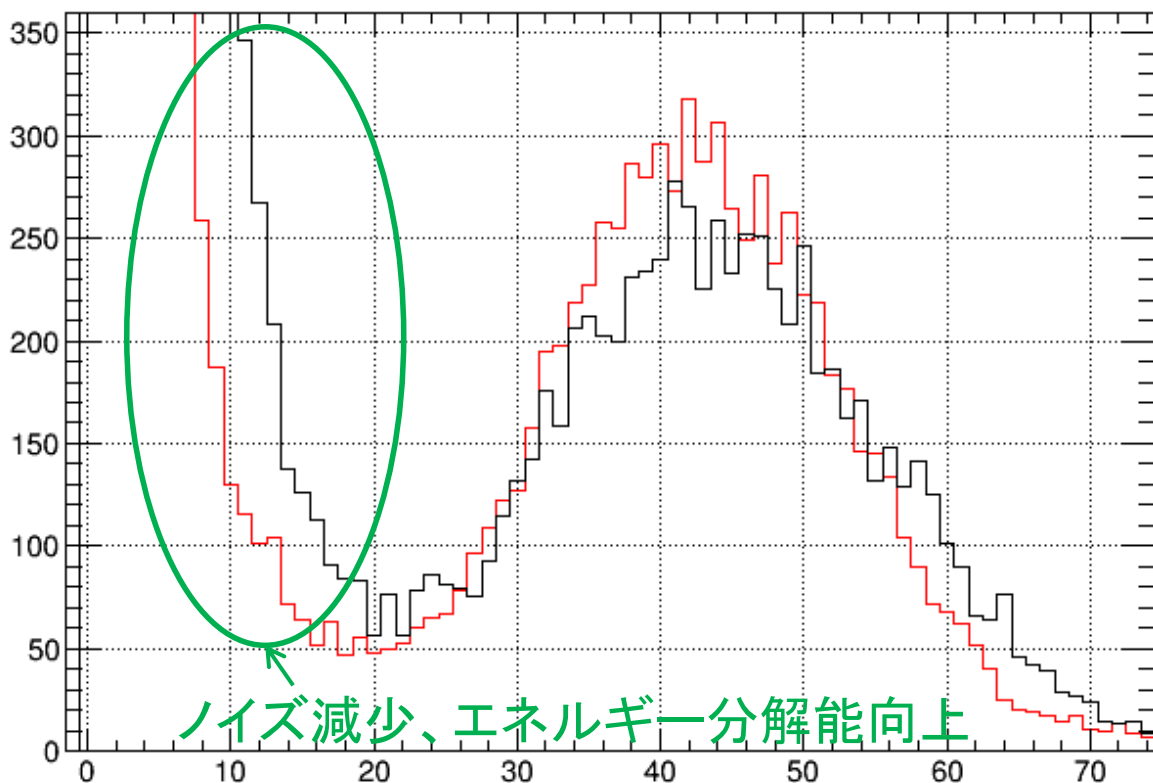
シンチレータのサイズ変更により、  
エネルギー分解能が約8%改善

# 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 $\mu\text{m}$ でも線形性に問題ない)

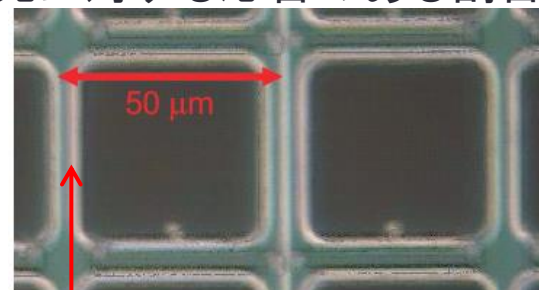
ピクセルサイズ	50 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$
開口率[%]	61.5	78.5
$V_{ov}$ [V]	1.1	1.0

<  $^{241}\text{Am}$ (59.5 keV)>



<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)

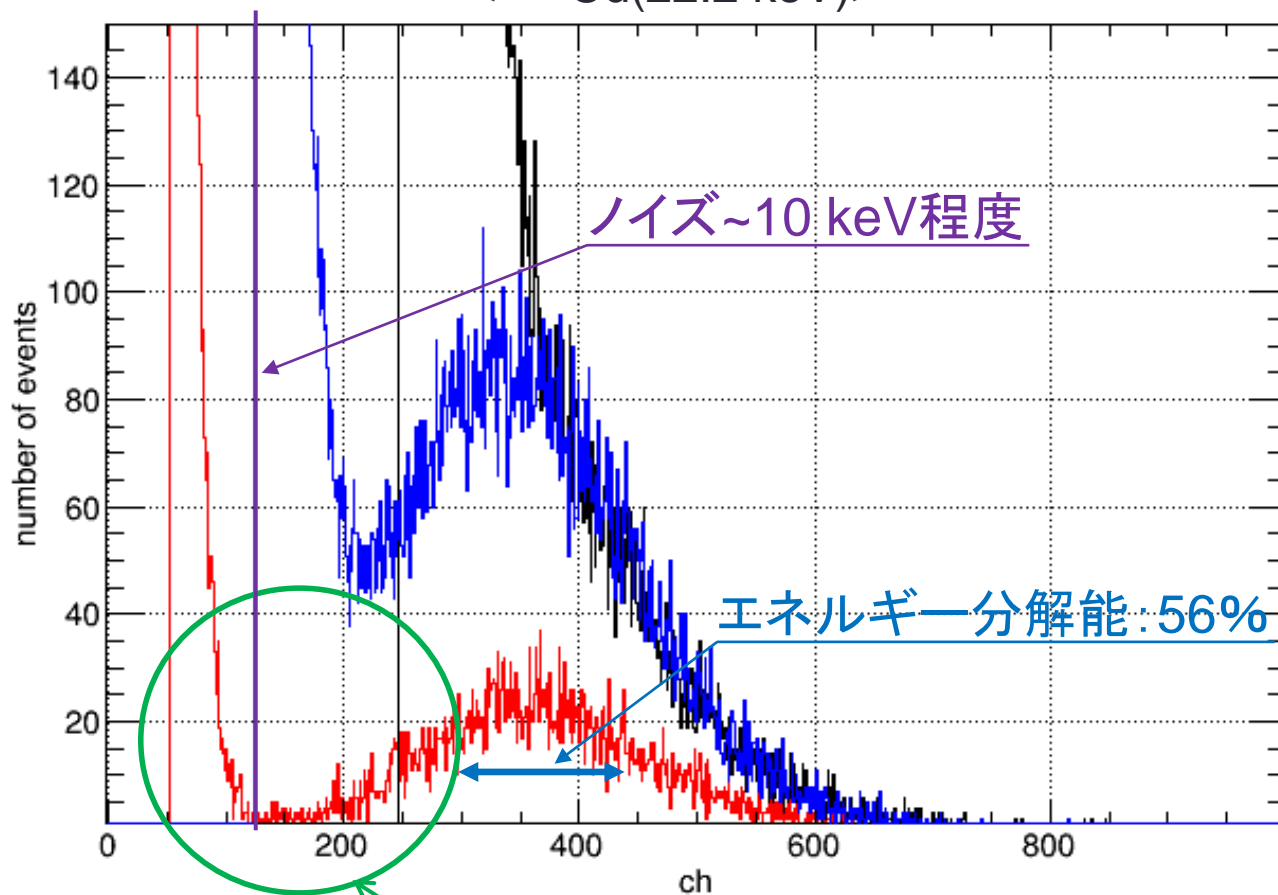
エネルギー分解能  
54.8%  $\rightarrow$  51.2%

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

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



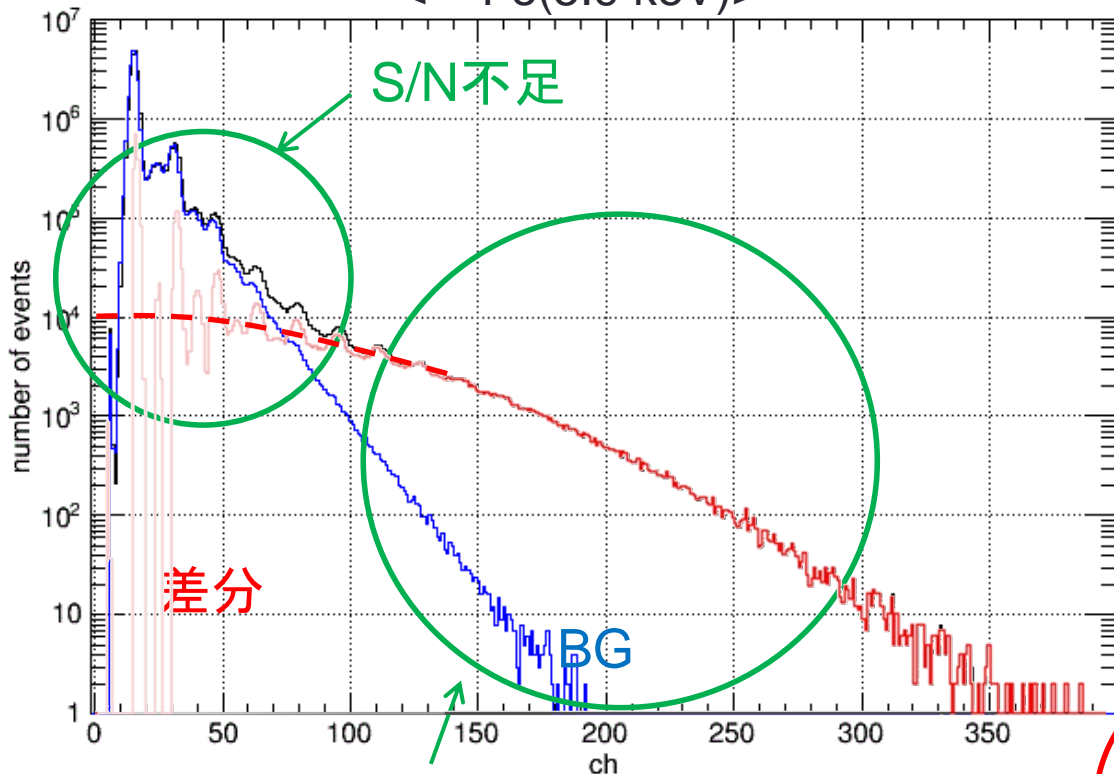
ピークのすそまではっきりと分離されている

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

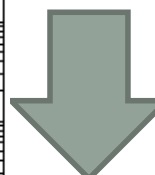
# MPPCの動作環境による影響

-10°C、50nsで動作

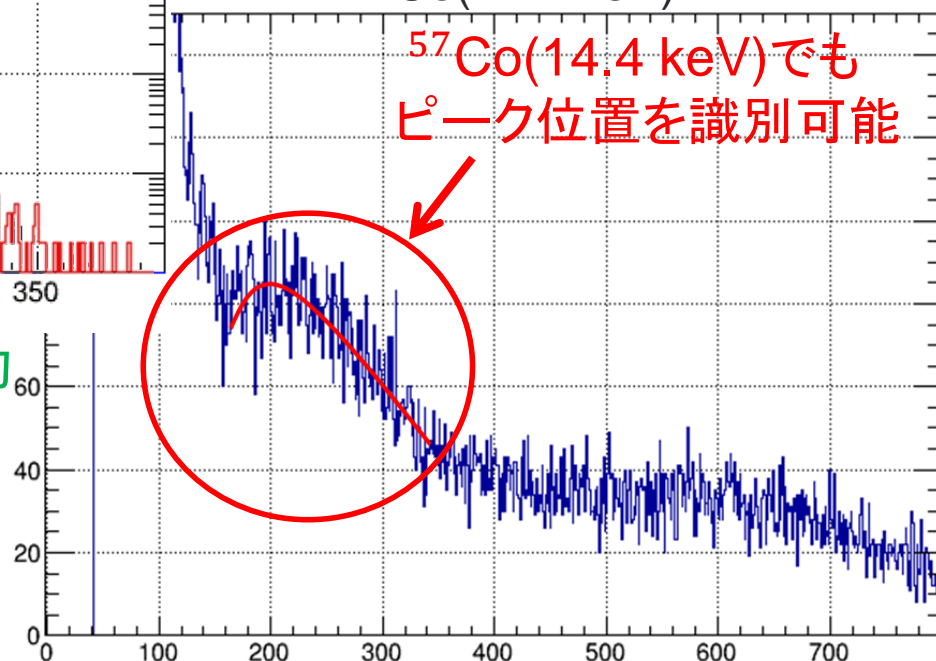
<  $^{55}\text{Fe}$ (5.9 keV)>



信号の位置  
有無を特定可能



<  $^{57}\text{Co}$ (14.4 keV)>

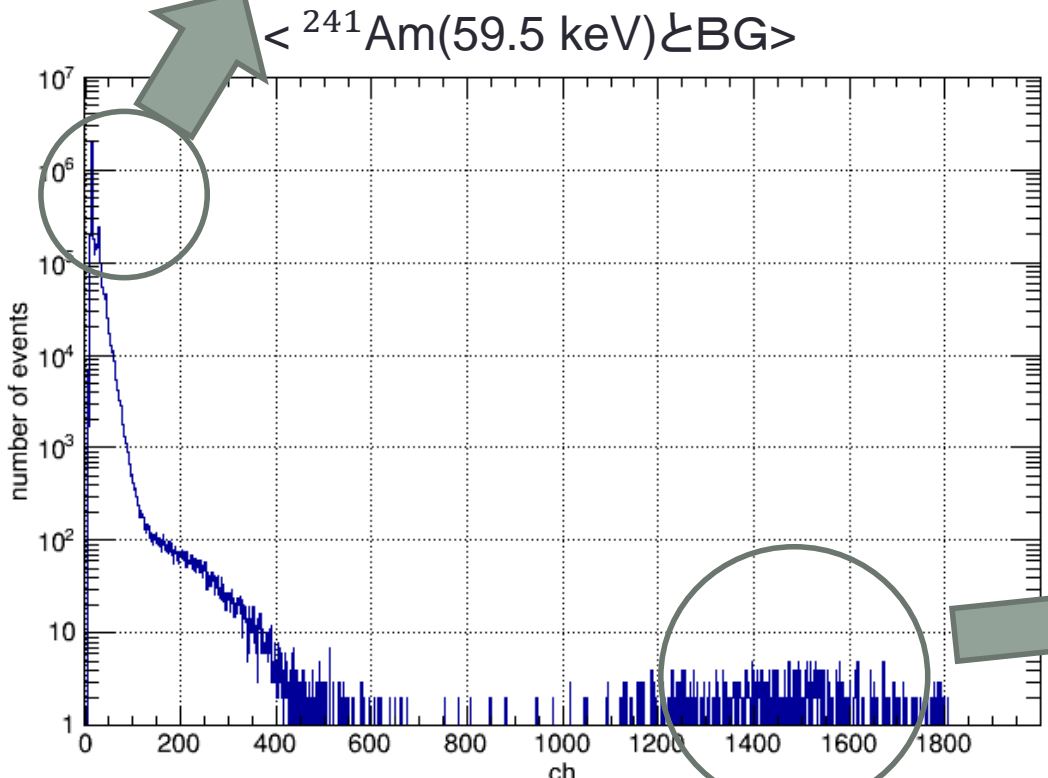
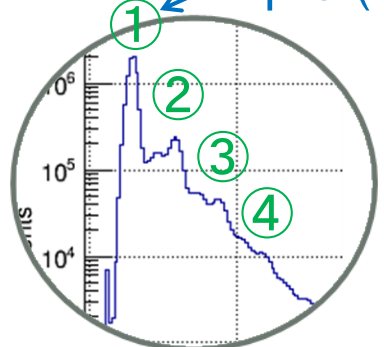


低エネルギー側はノイズに埋もれるが、信号の検出は成功

# 絶対光量の議論

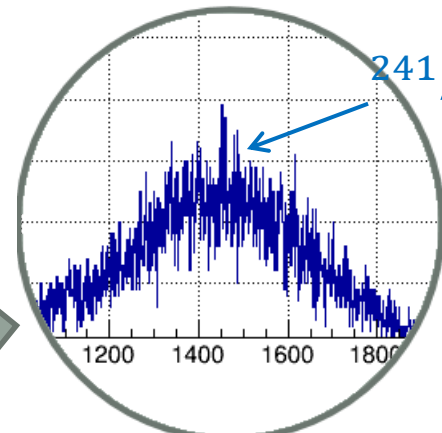
光子1つ分のイベントに対し、  
各信号がフォトン何個分か測定

← 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
<sup>241</sup> 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 $\mu\text{m}$
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

- ・  $^{57}\text{Co}$ のスペクトルを取得  
➡  $\sim 10 \text{ keV}$ の信号の特定が可能
- ・  $^{55}\text{Fe}$ のスペクトル取得  
➡  $\sim 6 \text{ keV}$ 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

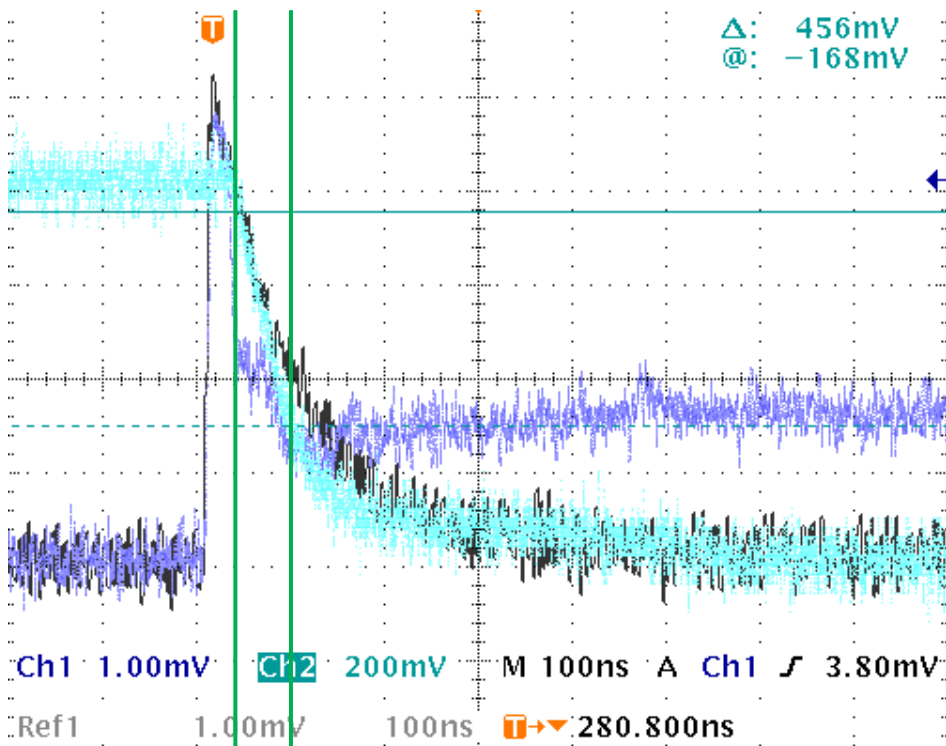
- ・  $\sim 60 \text{ keV}$ の信号では、PMTと同程度の性能となることを確認

➡ 光量は十分稼いでいる

- ・ 目標の信号を読み出すために

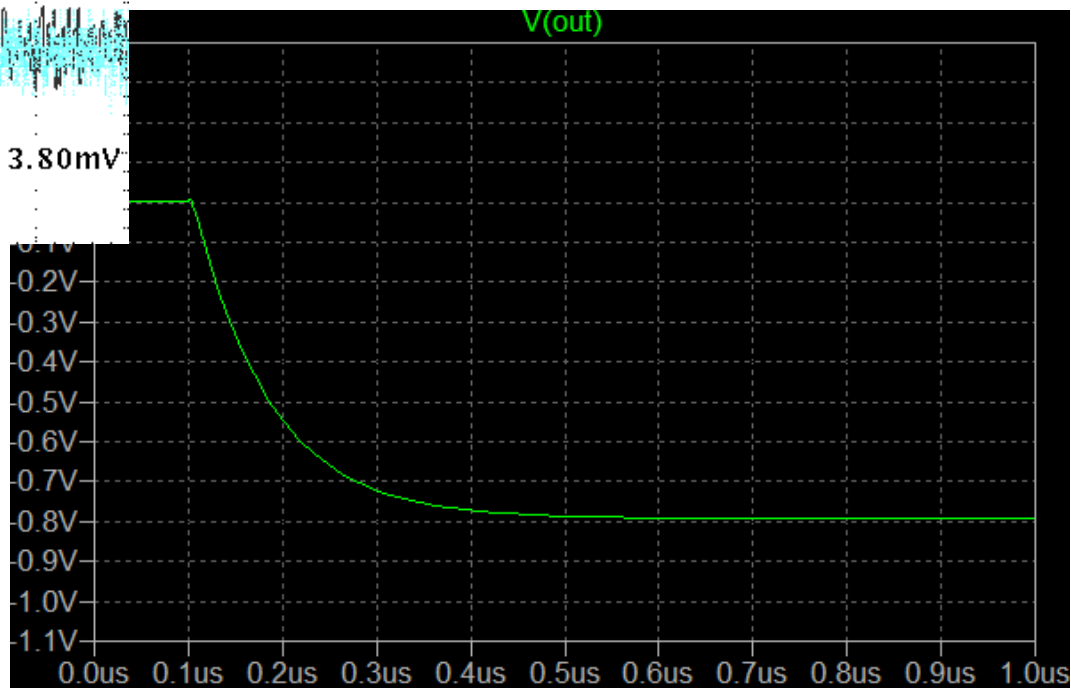
- ・ MPPCの新製品を使用(従来品よりノイズ低下)
- ・ 読み出し速度の向上(プラスチックシンチレータの発光速度: $\sim$ 数ns)
- ・ 吸収体との同時計数(ノイズ除去)

# 50nsで読み出した際の波形



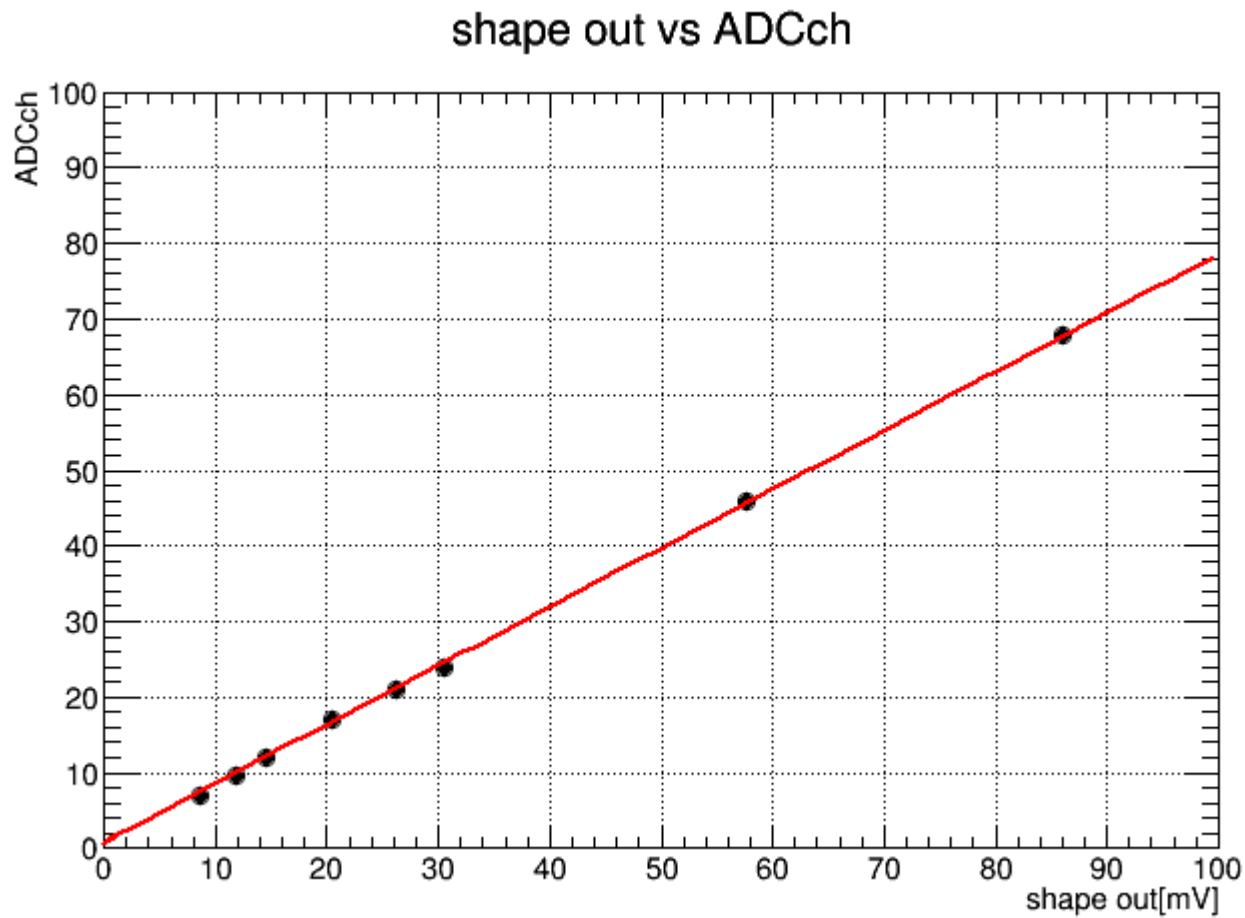
立ち上がりの時定数 ~50ns

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



# シンチレーション検出器

X-ray / gamma-ray  
from radioisotope

