

# 0 $\nu$ $\beta\beta$ 崩壊探索実験AXELのための 紫外光感度を持つPMTおよび MPPCの評価

京大理 東大宇宙線研<sup>A</sup>

潘 晟

市川 温子, 中家 剛, 南野 彰宏, 中村 輝石, 石山 優貴,  
柳田 沙緒里, 羽田 顕人, 廣瀬 昌憲, 関谷 洋之<sup>A</sup>

21 Mar 2015

日本物理学会 第70回年次大会(2015年) @早稲田大学

# Contents

- What's AXEL ?
- Group status
- UV-sensitive MPPCの評価
  - Motivation
  - 実験セットアップ
  - 解析、結果
- Summary

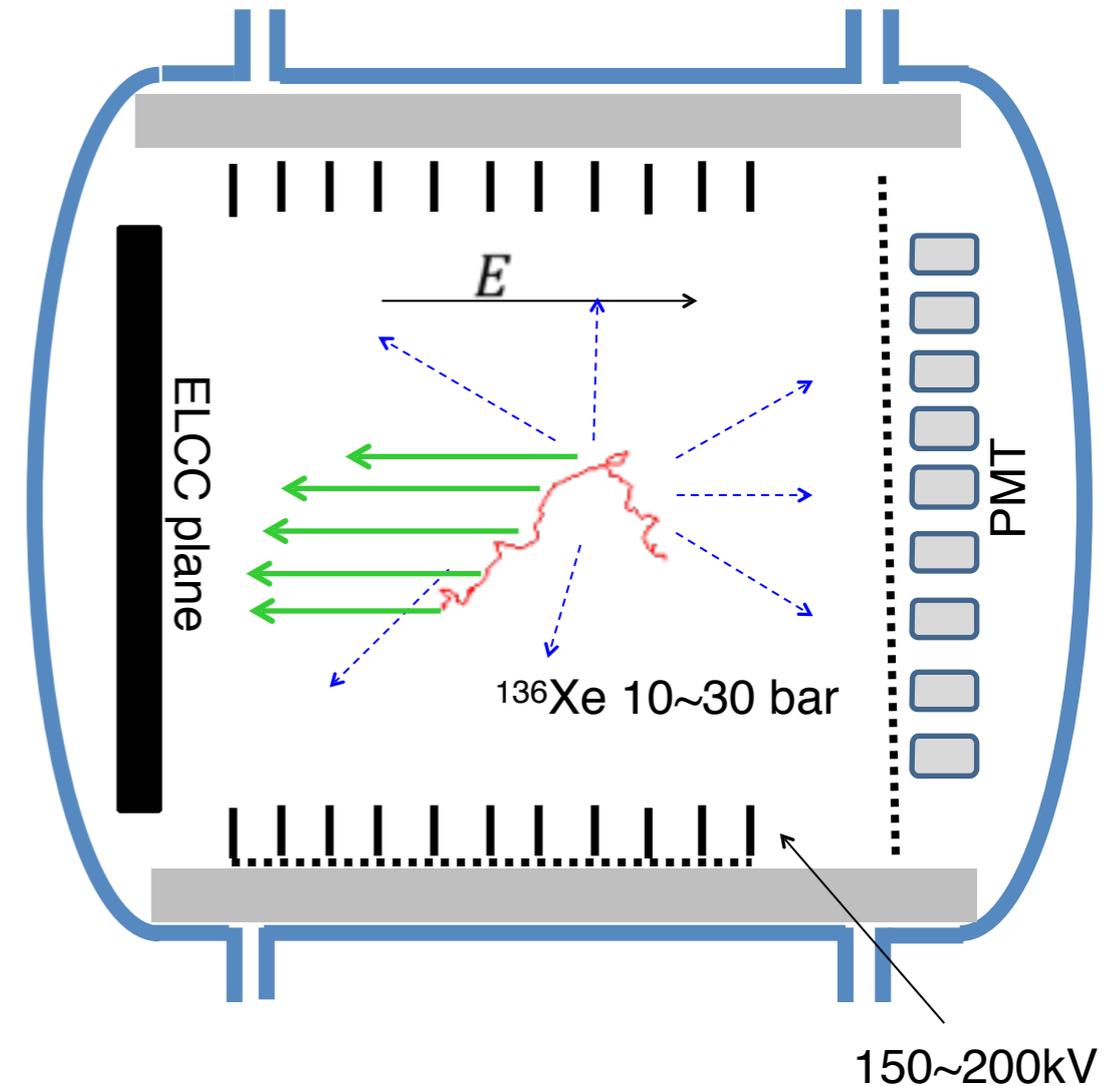
# Contents

- What's AXEL ?
- Group status
- UV-sensitive MPPCの評価
  - Motivation
  - 実験セットアップ
  - 解析、結果
- Summary

# What's AXEL?

## 高圧XeガスTPC for $0\nu\beta\beta$ search

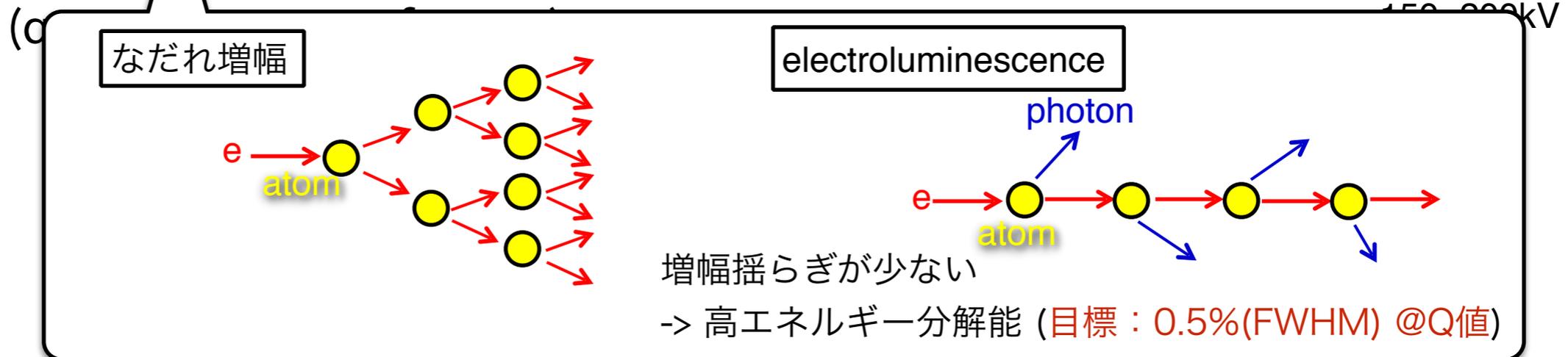
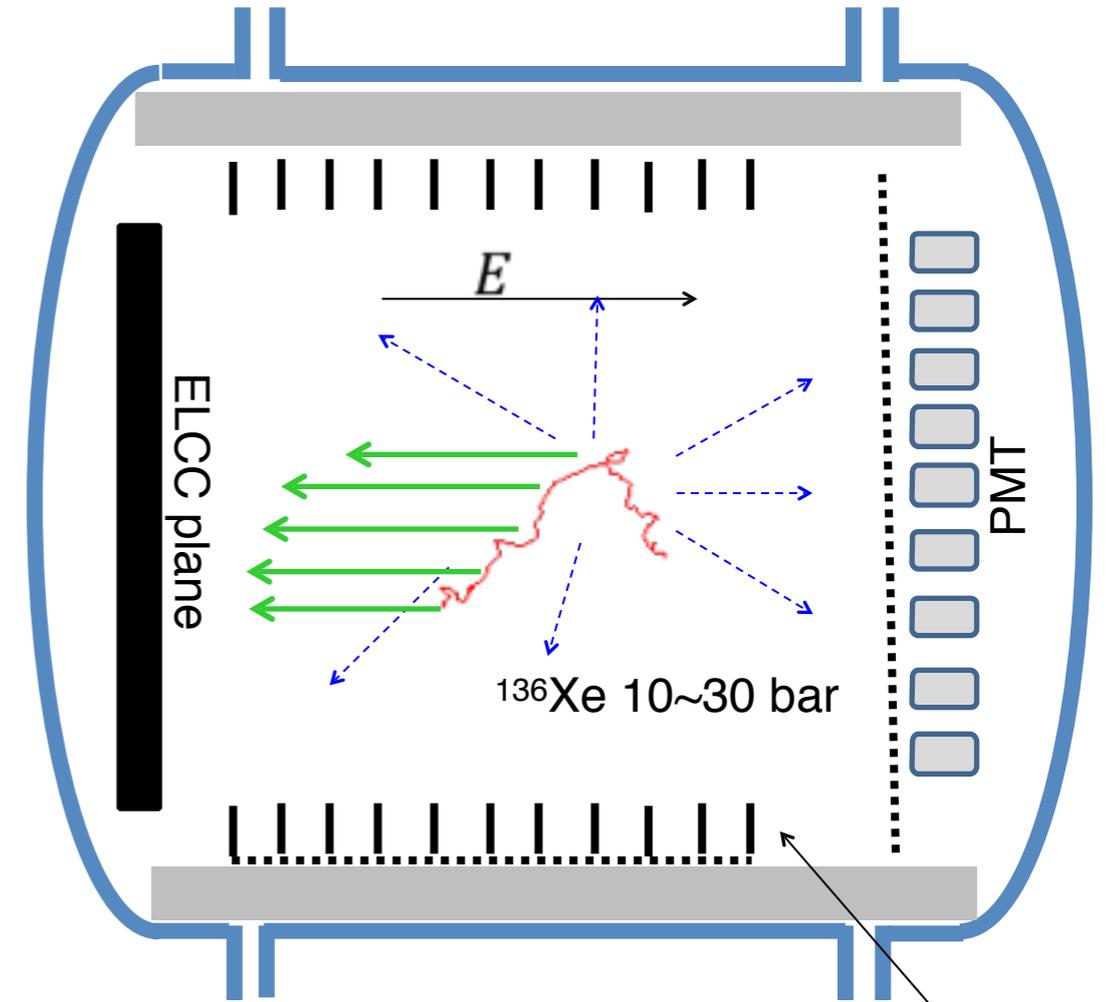
- ~ 1 ton のenriched  $^{136}\text{Xe}$  gas
- 15~30 bar (0.088~0.18g/cm<sup>3</sup>)  
->  $\phi 2\text{m} \times 1.7\text{m}$  cylinder (for 30bar)
- 信号の読み出し
  - Energy : Proportional Scintillation mode (Electroluminescence)
  - Tracking : background rejection ( $\alpha$ -ray & a part of  $\gamma$ -ray)



# What's AXEL?

## 高圧XeガスTPC for $0\nu\beta\beta$ search

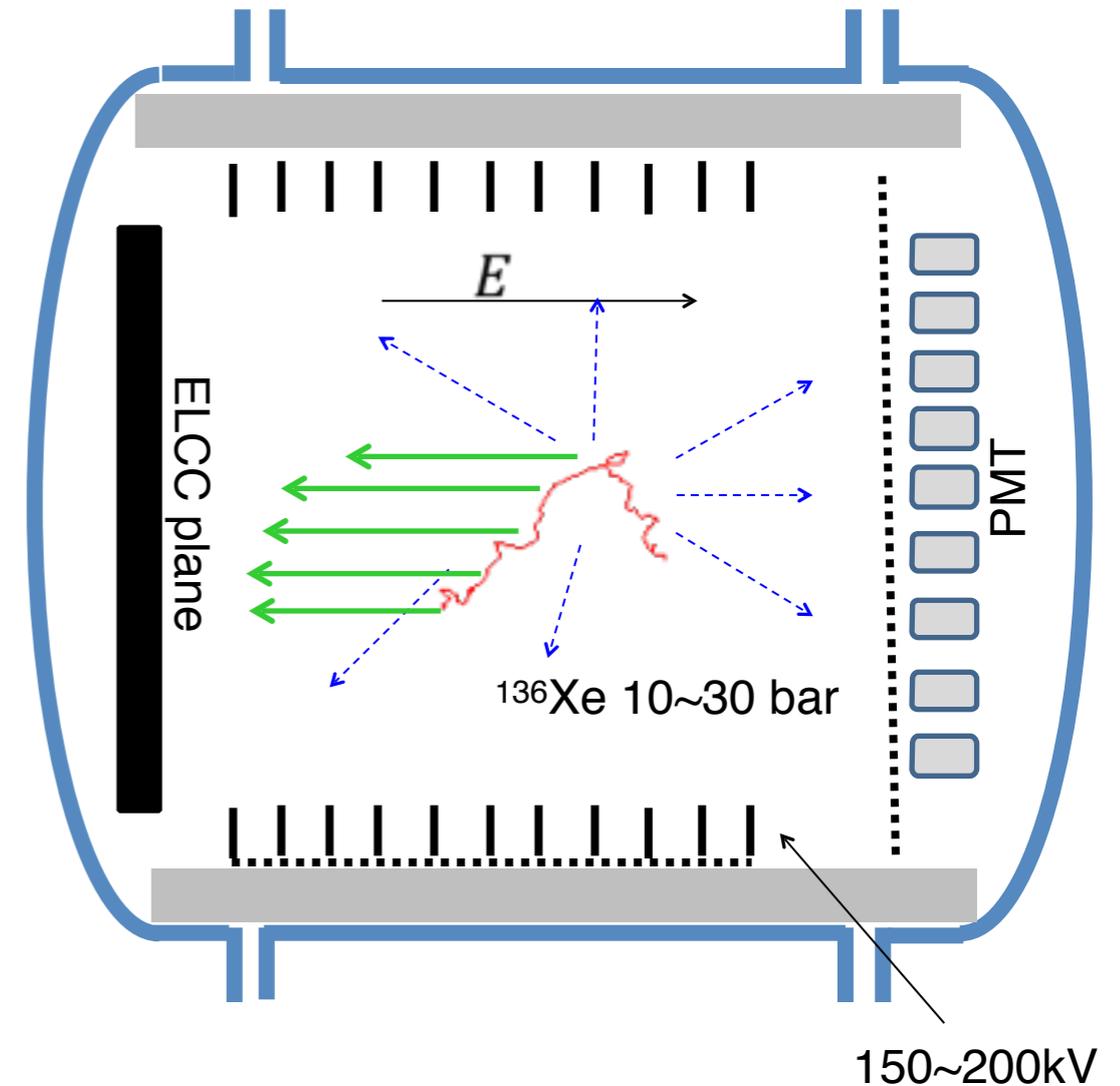
- ~ 1 ton のenriched  $^{136}\text{Xe}$  gas
- 15~30 bar (0.088~0.18g/cm<sup>3</sup>)  
->  $\phi 2\text{m} \times 1.7\text{m}$  cylinder (for 30bar)
- 信号の読み出し
  - Energy : Proportional Scintillation mode (Electroluminescence)
  - Tracking : background rejection



# What's AXEL?

## 高圧XeガスTPC for $0\nu\beta\beta$ search

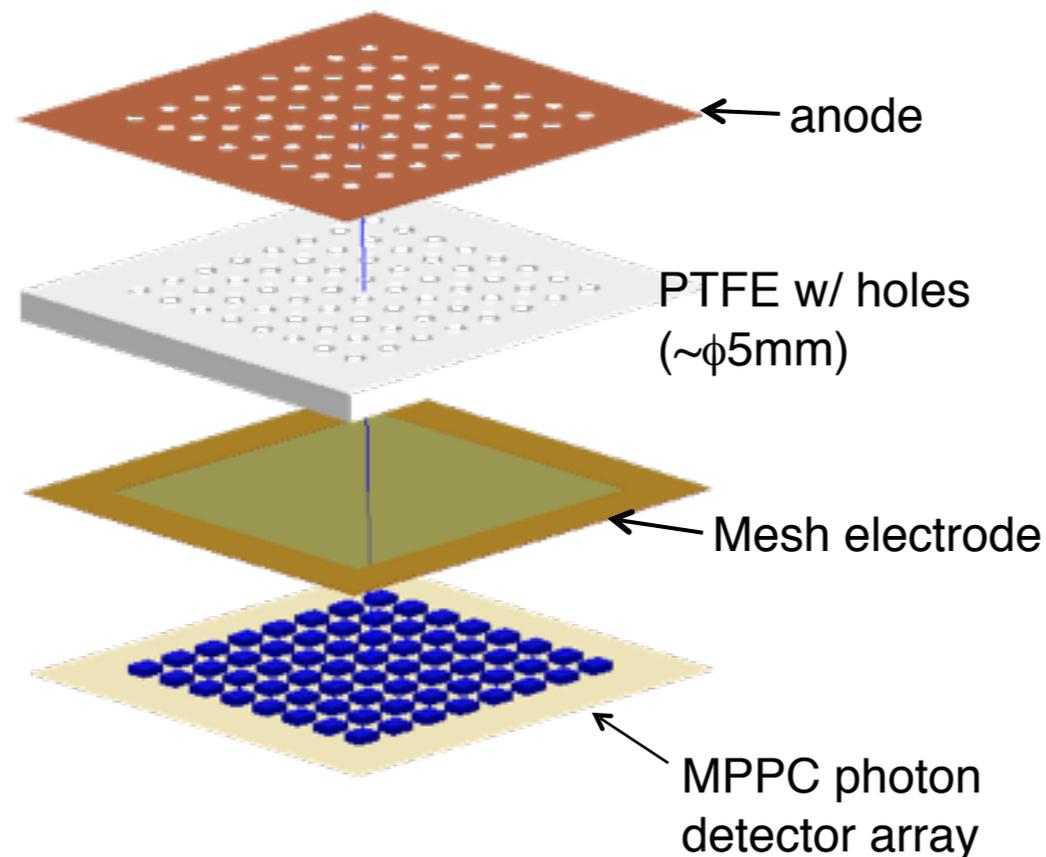
- ~ 1 ton のenriched  $^{136}\text{Xe}$  gas
  - 15~30 bar (0.088~0.18g/cm<sup>3</sup>)  
->  $\phi 2\text{m} \times 1.7\text{m}$  cylinder (for 30bar)
  - 信号の読み出し
    - Energy : Proportional Scintillation mode (Electroluminescence)
    - Tracking : background rejection ( $\alpha$ -ray & a part of  $\gamma$ -ray)
- > ELCCを用いる (次スライド)



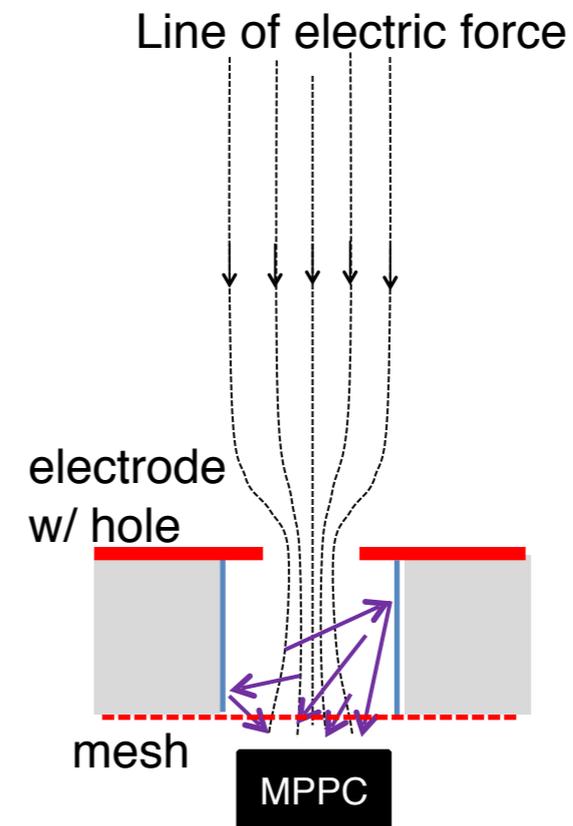
# What's AXEL?

## ELCC (ElectroLuminescence Collecting Cell)

- 光検出器との場所依存がない -> 高エネルギー分解能
- セルごとに堅い構造 -> メッシュのたわみが無いので高エネルギー分解能、大型化可能
- 電場のシミュレーション、一様性の確認 -> 中村輝石が第69回秋期物理学会で発表



ELCCの模式図



1セルの構造

# Contents

- What's AXEL ?
- Group status
- UV-sensitive MPPCの評価
  - Motivation
  - 実験セットアップ
  - 解析、結果
- Summary

# Group status

## R&D項目

- ELCCの原理実証

- > 昨年度、秋山晋一(卒業)、石山優貴が研究、原理実証 (FWHM : 13.8% @29.8keV -> **1.5% @Q値**を達成)

- > 第68回年次大会(2014)にて、石山優貴が発表

- 試作機

- > 10Lの容積、<10 atm 対応、最大64ch読み出しのチェンバー

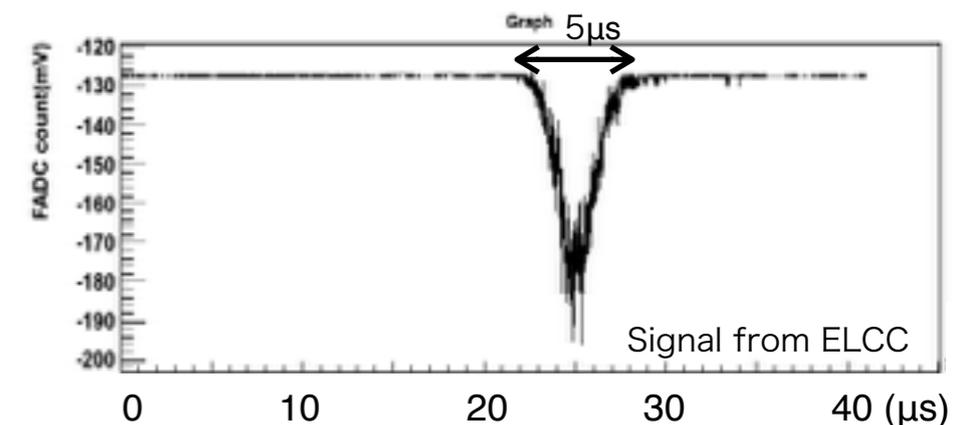
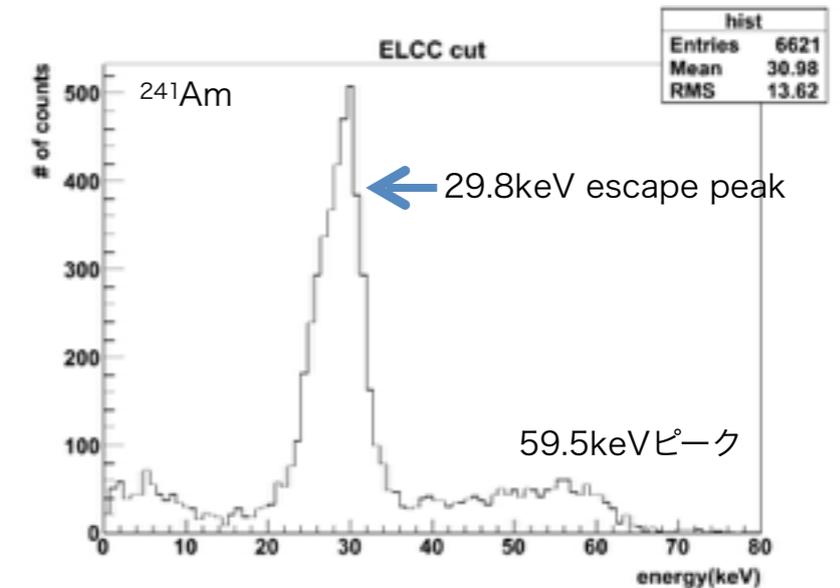
- > 次の公演(21aCA-14)で中村輝石が発表

- 大光量、long pulseに対するMPPCの線形性の確認

- > 3/22に柳田沙緒里が発表(22aDF-1)

- 高圧Xe gas中でのUV-sensitive MPPCのPDE測定

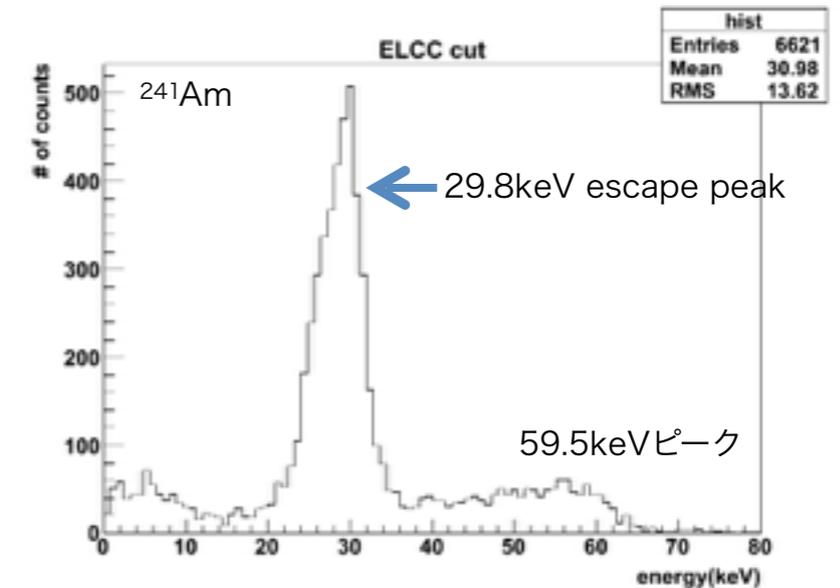
- > 本公演の内容



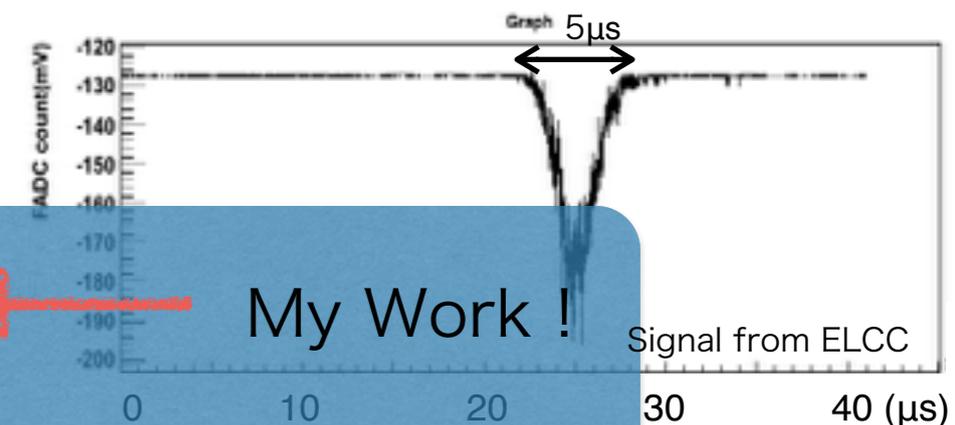
# Group status

## R&D項目

- ELCCの原理実証 **UV-PMT**
  - > 昨年度、秋山晋一(卒業)、石山優貴が研究、原理実証 (FWHM : 13.8% @29.8keV -> **1.5% @Q値**を達成)
  - > 第68回年次大会(2014)にて、石山優貴が発表
- 試作機 **可視光用MPPC+WLS**
  - > 10Lの容積、<10 atm 対応、最大64ch読み出しのチェンバー
  - > 次の公演(21aCA-14)で中村輝石が発表
- 大光量、long pulseに対するMPPCの線形性の確認
  - > 3/22に柳田沙緒里が発表(22aDF-1)



- 高圧Xe gas中でのUV-sensitive MPPCのPDE測定
  - > 本公演の内容



# Contents

- What's AXEL ?
- Group status
- UV-sensitive MPPCの評価
  - Motivation
  - 実験セットアップ
  - 解析、結果
- Summary

# UV-sensitive MPPCの性能評価

## Motivation

- ・ Xeの発光波長：~170 nm
- > 現在のHamamatsuから販売されているMPPCは感度を持たない
- > 波長変換剤(WLS)を用いて、可視光へと変化して読みだす (現在の試作機)
  - chごとのWLSの塗りムラによるPDEの差、WLSのにじみによる隣のchへの染み出し
  - Xe中でのWLS(TPB)の腐食



エネルギー分解能の悪化

## UV-sensitiveなMPPCの採用

- > gas中でのXeの発光波長のPDEは測定されていない
  - PDEが低いと、エネルギー分解能の悪化につながる
  - PDEを測定し、それを元に検出器をデザインする (EL gainの決定など)



# Contents

- What's AXEL ?
- Group status
- UV-sensitive MPPCの評価
  - Motivation
  - 実験セットアップ
  - 解析、結果
- Summary

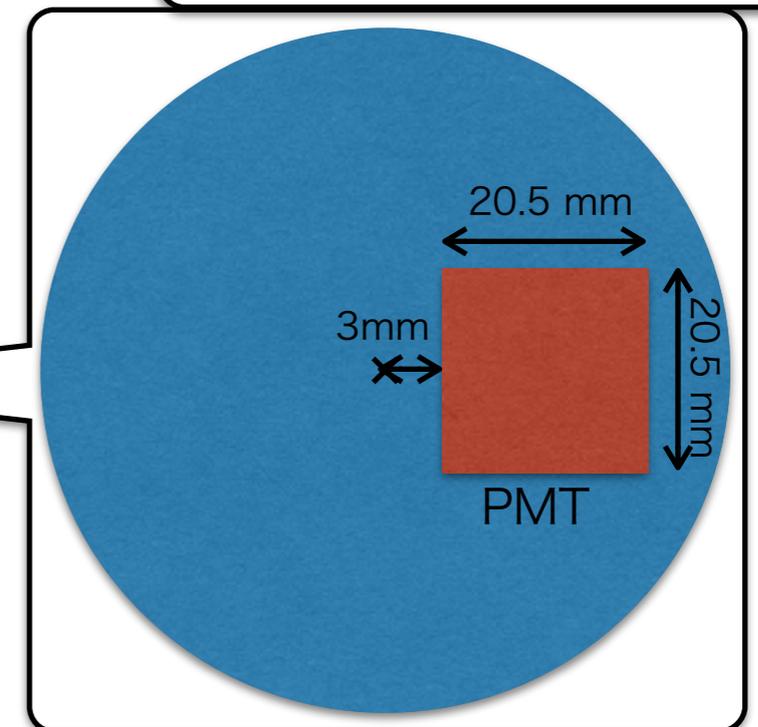
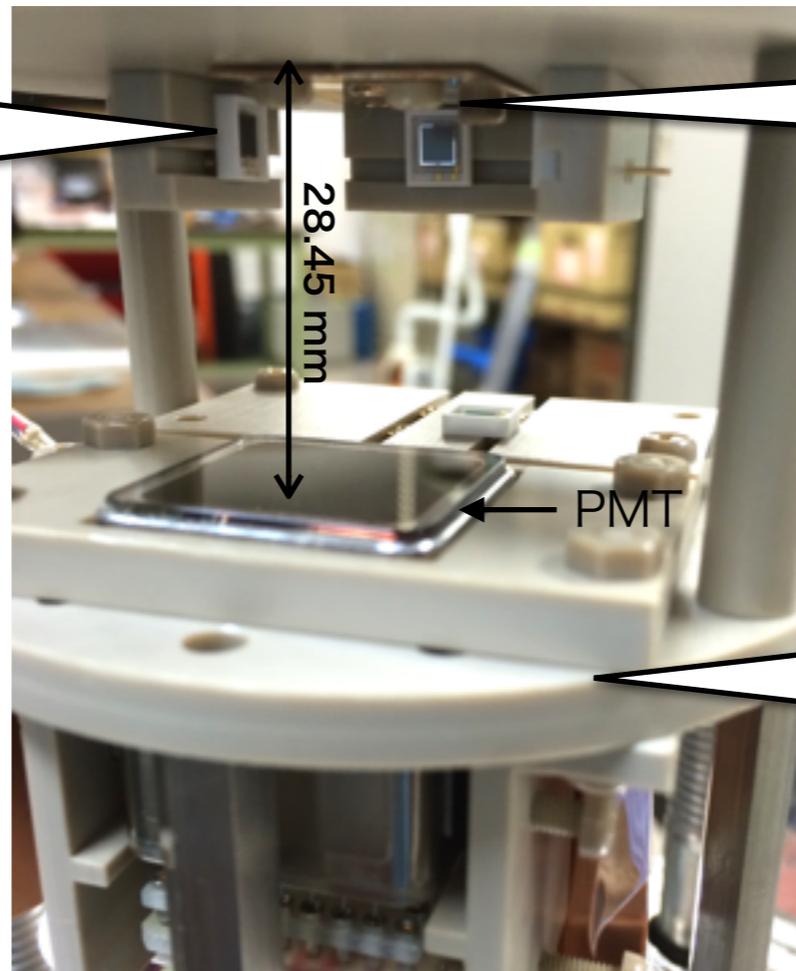
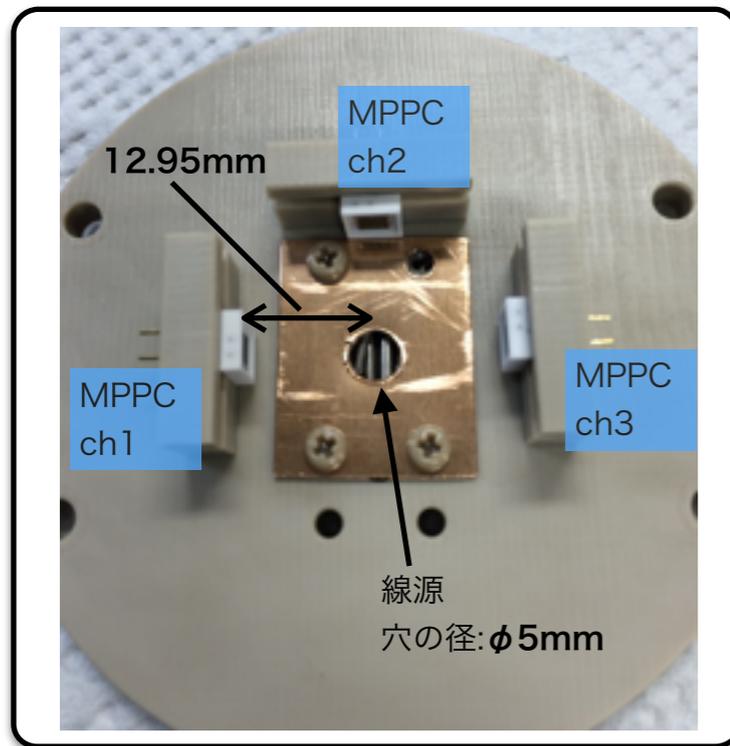
# UV-sensitive MPPCの性能評価

## 実験セットアップ

- Xe gas : 7.3 atm -> point likeなシンチ光発生
- PMTはquartz窓のUV-sensitiveなもの -> -720V 印加
- MPPCはUV対応のサンプル品 -> 全て -69.0 V 印加  
(詳細はback up)
- 標準線源の $\alpha$ 線源は真空、高圧下での使用は禁止  
->  $\alpha$ 線源としてトリウム入りタングステン電極棒を使用



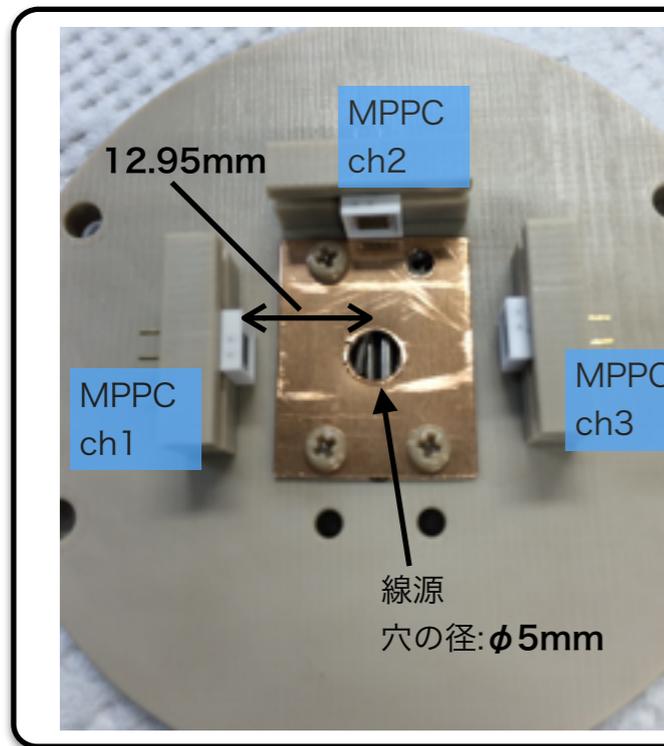
線源はタングステン電極棒に含まれている $\alpha$ 線源( $^{232}\text{Th}$ )



# UV-sensitive

## 実験セットアップ

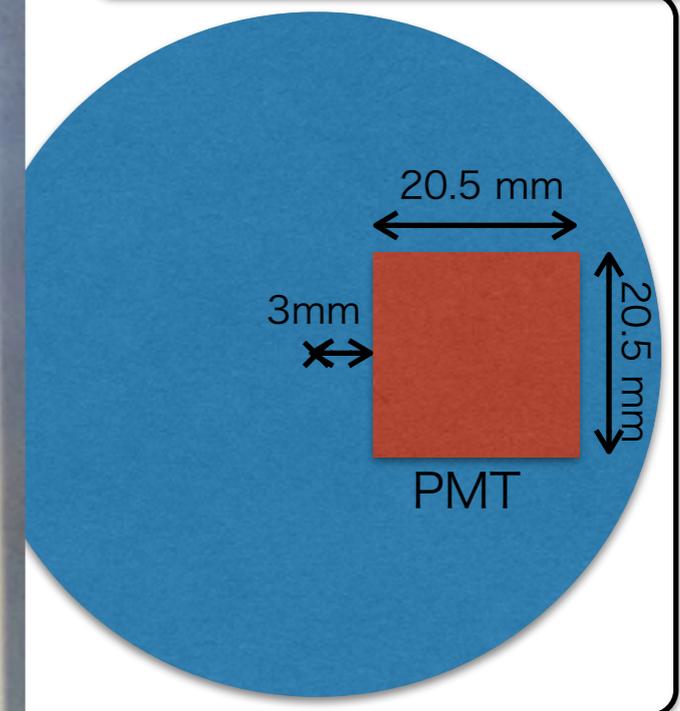
- Xe gas : 7.3 atm
- PMTはquartz窓のU
- MPPCはUV対応の  
(詳細はback up)
- 標準線源の $\alpha$ 線源は  
->  $\alpha$ 線源としてトリウ



イベントレートが非常に低い  
エネルギー帯が広い



線源はタングステン電極棒に含まれている $\alpha$ 線源( $^{208}\text{Th}$ )



# UV-sensitive MPPPCの性能評価

## 実験セットアップ

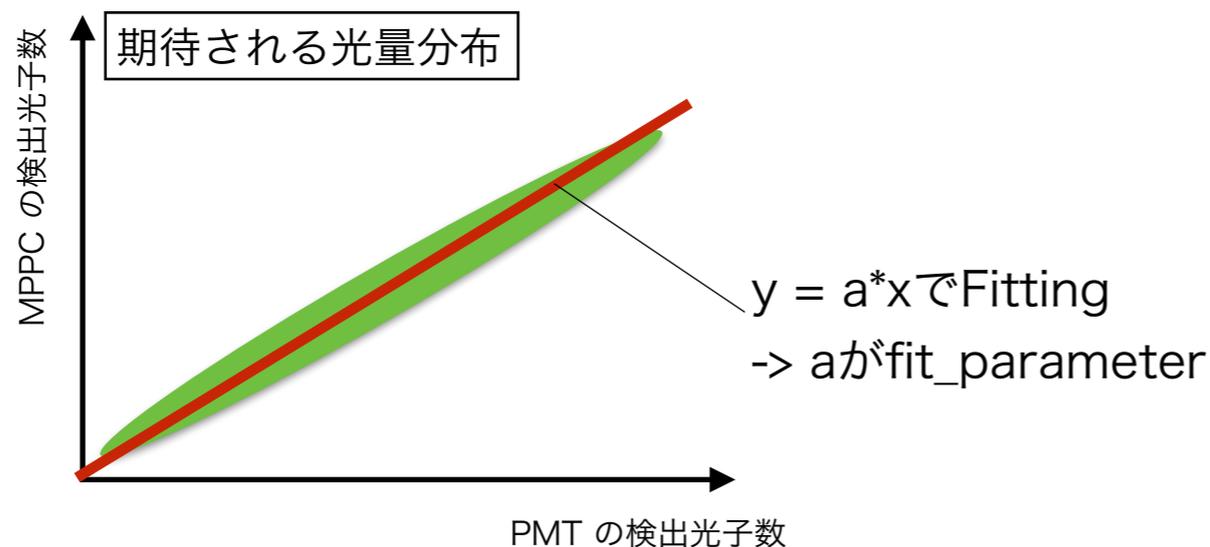
- PMTの検出光子数 = primaryのphoton数 \* PMT方向の立体角割合 \* QE
- MPPPCの検出光子数 = primaryのphoton数 \* MPPPC方向の立体角割合 \* PDE
- MPPPCの検出光子数 = fit\_parameter \* PMTの検出光子数

より、

$$\text{PDE} = \text{fit\_parameter} * (\text{PMT立体角} / \text{MPPPC立体角}) * \text{QE}$$

でMPPPCのPDEを求めることができる

30% for  $\lambda = 170\text{nm}$   
(HAMAMATSUのスペックシート)

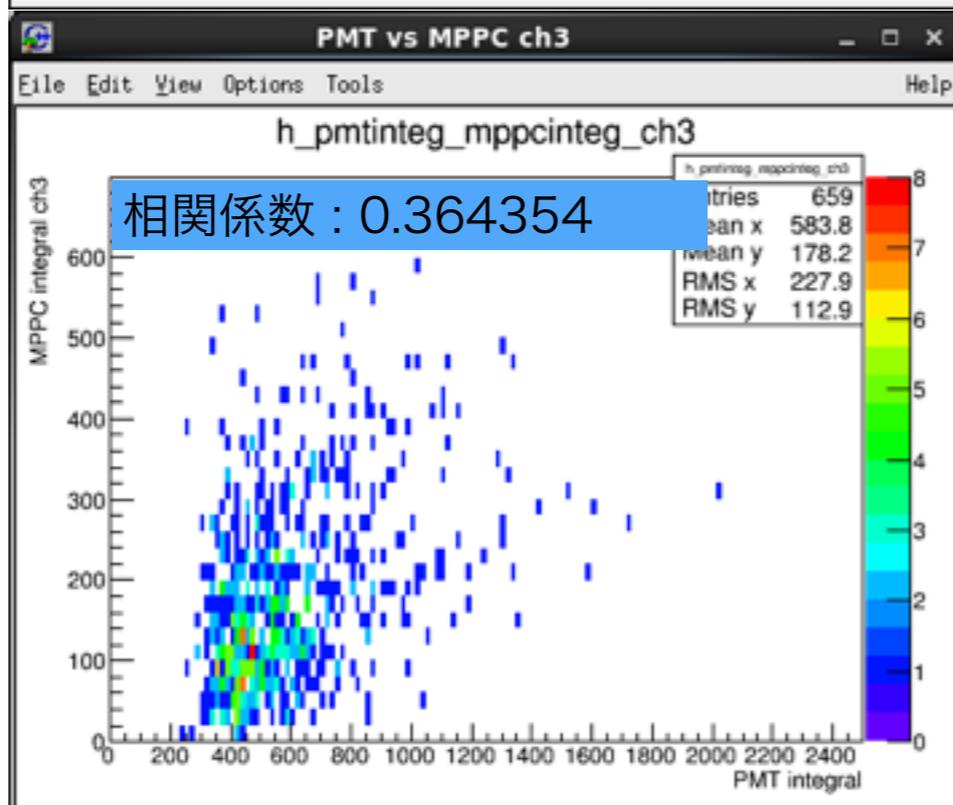
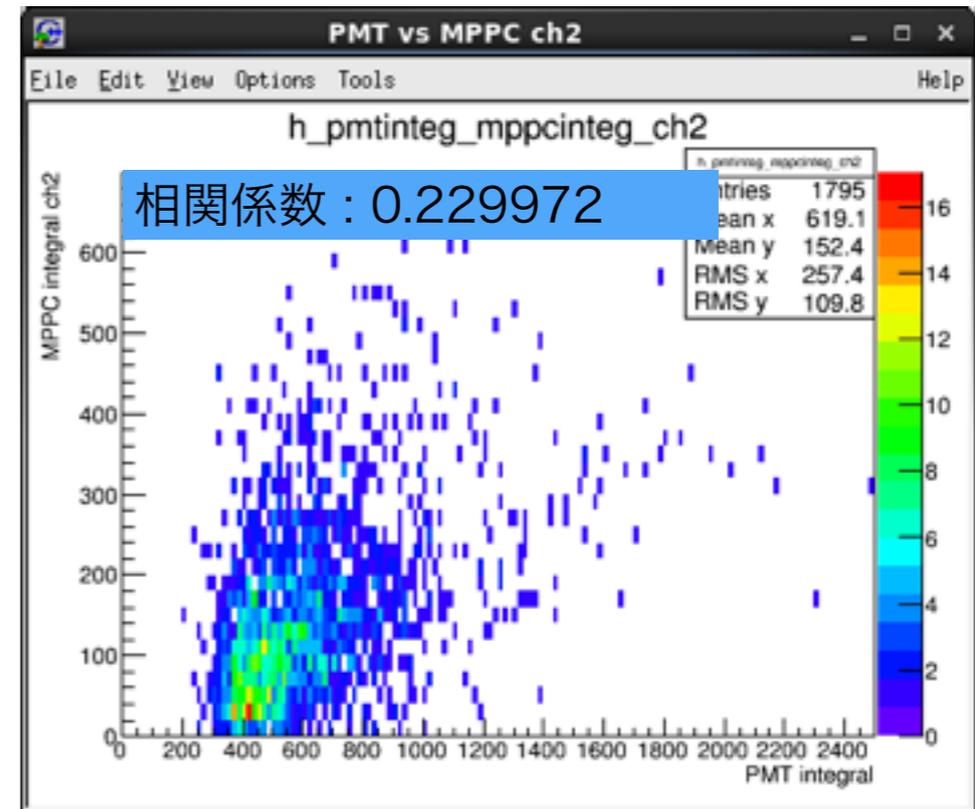
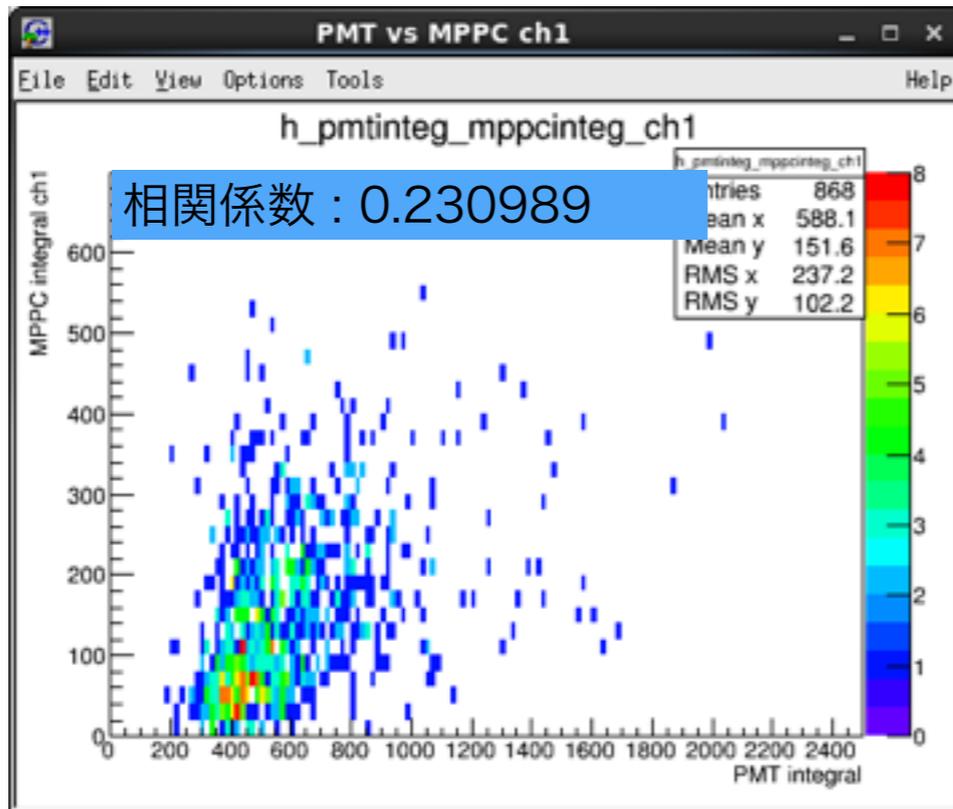


# Contents

- What's AXEL ?
- Group status
- UV-sensitive MPPCの評価
  - Motivation
  - 実験セットアップ
  - 解析、結果
- Summary

# UV-sensitive MPPCの性能評価

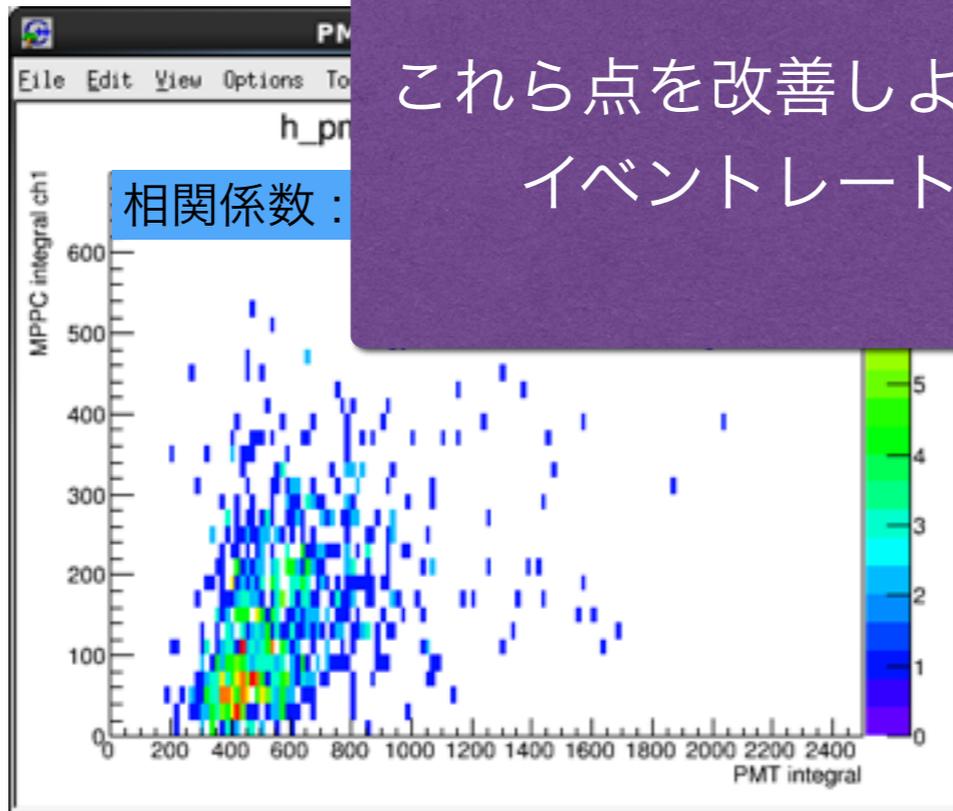
解析、結果 (22.45h 測定)



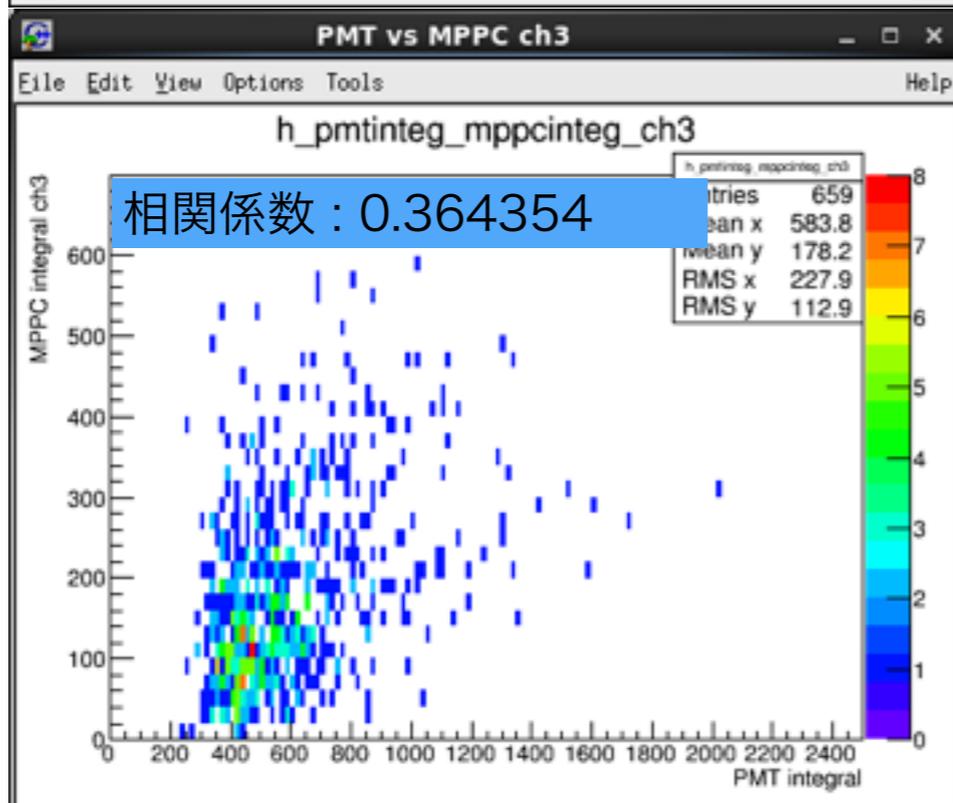
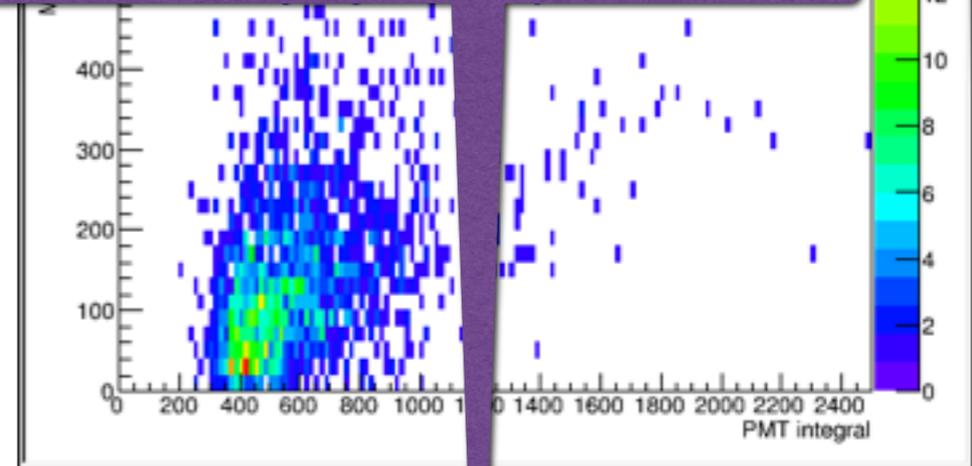
- ・ 横軸をPMTのintegral値、縦軸をMPPCのintegral値でプロット
    - > 相関がかなり弱い
      - 線源の大きさを絞っていない
      - $\alpha$ 線の飛行方向を絞っていない
- ことによるものと思われる

# UV-sensitive MPPCの性能評価

解析、結果 (22.45h 測定)



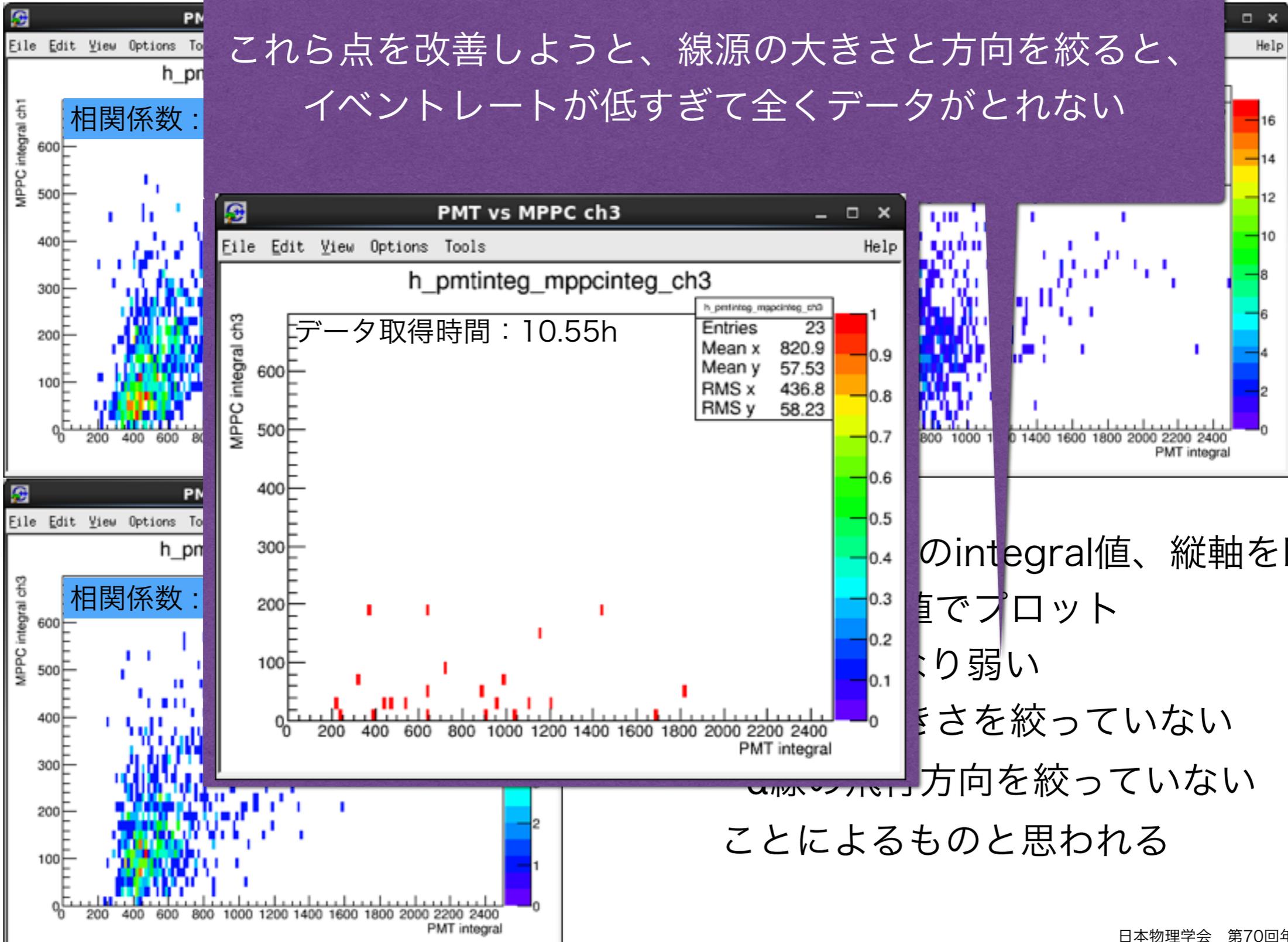
これら点を改善しようと、線源の大きさと方向を絞ると、イベントレートが低すぎて全くデータがとれない



- ・ 横軸をPMTのintegral値、縦軸をMPPCのintegral値でプロット
    - > 相関がかなり弱い
      - 線源の大きさを絞っていない
      - $\alpha$ 線の飛行方向を絞っていない
- ことによるものと思われる

# UV-sensitive MPPCの性能評価

解析、結果 (22.45h 測定)



# UV-sensitive MPPCの性能評価

## 考察

期待していた光量分布に反して、広がった分布が得られた

-> この分布をフィッティングして得られるPDEは信頼できないのでは……

-> 定量的な判断は、Geant4などのシミュレーションとの比較によって行うべき

-> 今後の課題

PMTとMPPCの光量の相関を出すために、光源をよりpoint likeにするべき

-> 7.3気圧下で最大エネルギーの $\alpha$ 線の飛程は約3mm

-> 飛行方向の違いによって、各MPPC、PMTへの入射光子数は大きく変化する

->  $\alpha$ 線をコリメートする必要があるが、現在の線源ではコリメートするとイベントレートの非常に小さくなってしまふ

-> 違う $\alpha$ 線源を選定するか、発光過程を見直す必要がある(EL過程を使用?)

-> 今後の課題

# Contents

- What's AXEL ?
- Group status
- UV-sensitive MPPCの評価
  - Motivation
  - 実験セットアップ
  - 解析、結果
- Summary

# Summary

- ・ 大質量、高エネルギー分解能な $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索実験、AXELやっています
  - > まだまだR&Dのフェーズ
- ・ UV-sensitive MPPCの基礎特性評価(PDE測定)を行った  
(感想) gas中の測定は思ったよりも難しい。。。
- ・  $\alpha$ 線源としてトリウム入りタングステン電極棒を使用
  - > イベントレートが低く、エネルギーもbroad
  - > PDEを求めるまでには至らなかった
- ・ さらにクオリティの高い測定が必要とされる
  - > その際は $\alpha$ 線源をまともなものに変えるべきである
  - > 真空、高圧下でも使える、non gasな $\alpha$ 線源はないものか.....
  - > 現在の試作機のEL光を用いての測定方法も構想中

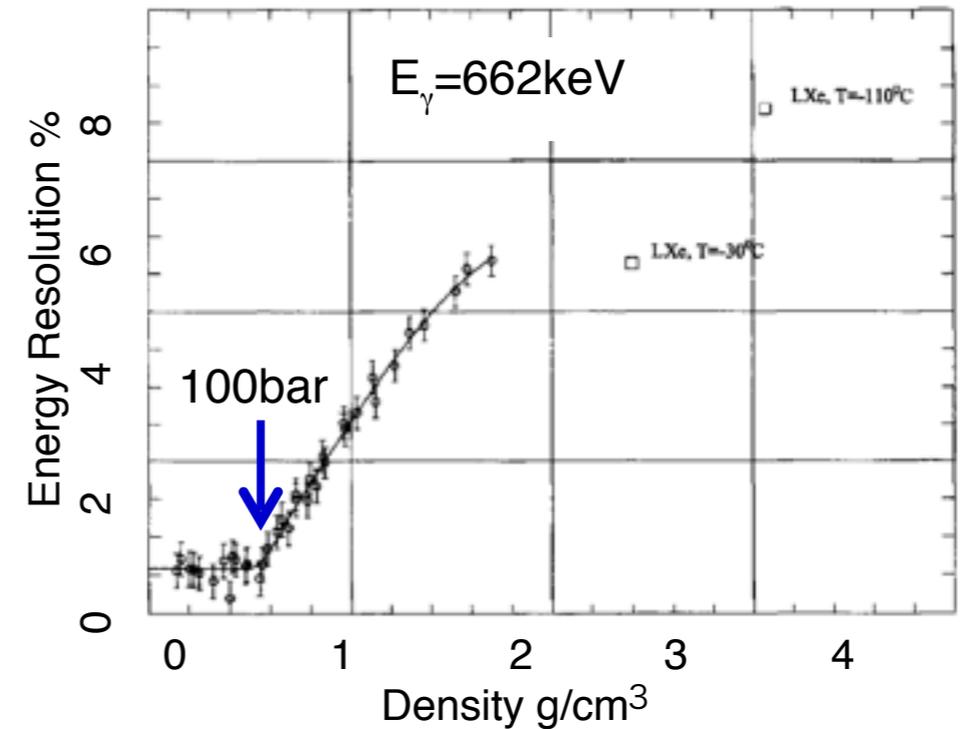
Back Up

# What's AXEL?

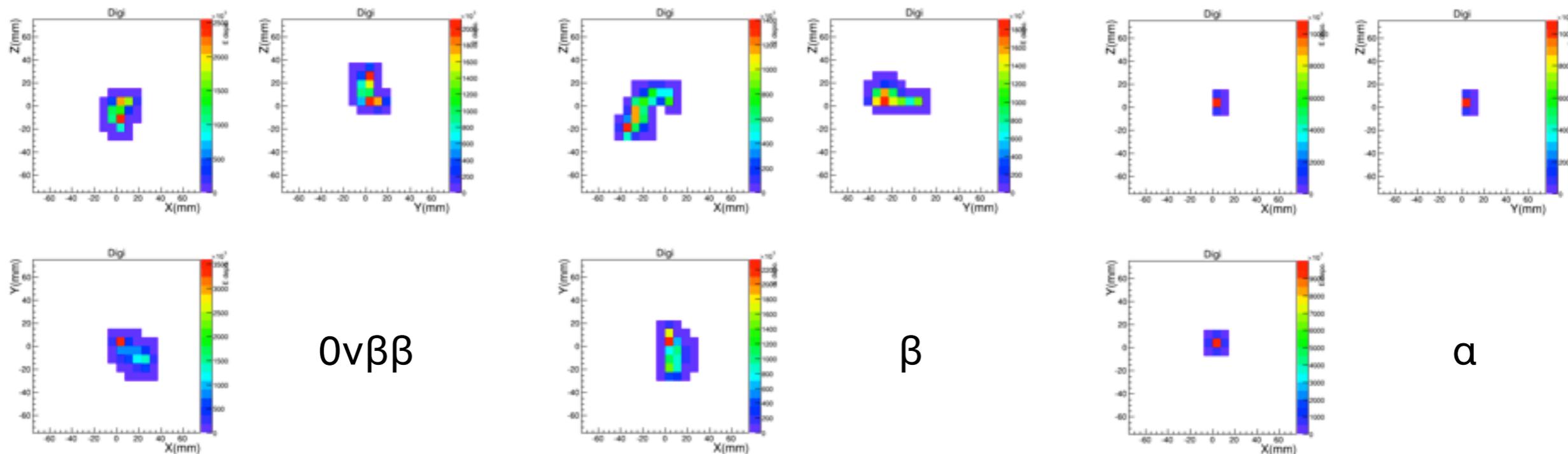
## 高圧XeガスTPC for $0\nu\beta\beta$ search

- ~ 1 ton のenriched  $^{136}\text{Xe}$  gas
- 15~30 bar (0.088~0.18g/cm<sup>3</sup>)  
->  $\phi 2\text{m} \times 1.7\text{m}$  cylinder (for 30bar)
- 信号の読み出し
  - Energy : Proportional Scintillation mode (Electroluminescence)
  - Tracking : background rejection ( $\alpha$ -ray & a part of  $\gamma$ -ray)
- > ELCCを用いる (次スライド)

A. Bolotnikov, B. Ramsey Nucl. Instr. And Meth. A396(1997) 360



# What's AXEL?



simulated event display after 1m drift

- (Electroluminescence)
- Tracking : background rejection (α-ray & a part of γ-ray)
- > ELCCを用いる (次スライド)

150~200kV

# UV-sensitive MPPCの性能評価

## 実験セットアップ

PMT : 高圧(~10 atm)対応、UV-sensitive

Type No : R8520-406-406MODASSY

QE : 30% @ 175 nm (by HAMAMATSU)

Supply V : -800 V

Gain : 1E+06

Rise time : 1.8 ns

今回実験で使用したSerial No : ZB5049

今実験での印加電圧 : -720 V

## MPPC

Type No. (VUV対応) : S12572-025C SPL

Serial No.

ch1 : 5 Vop : -67.85 V (by HAMAMATSU)

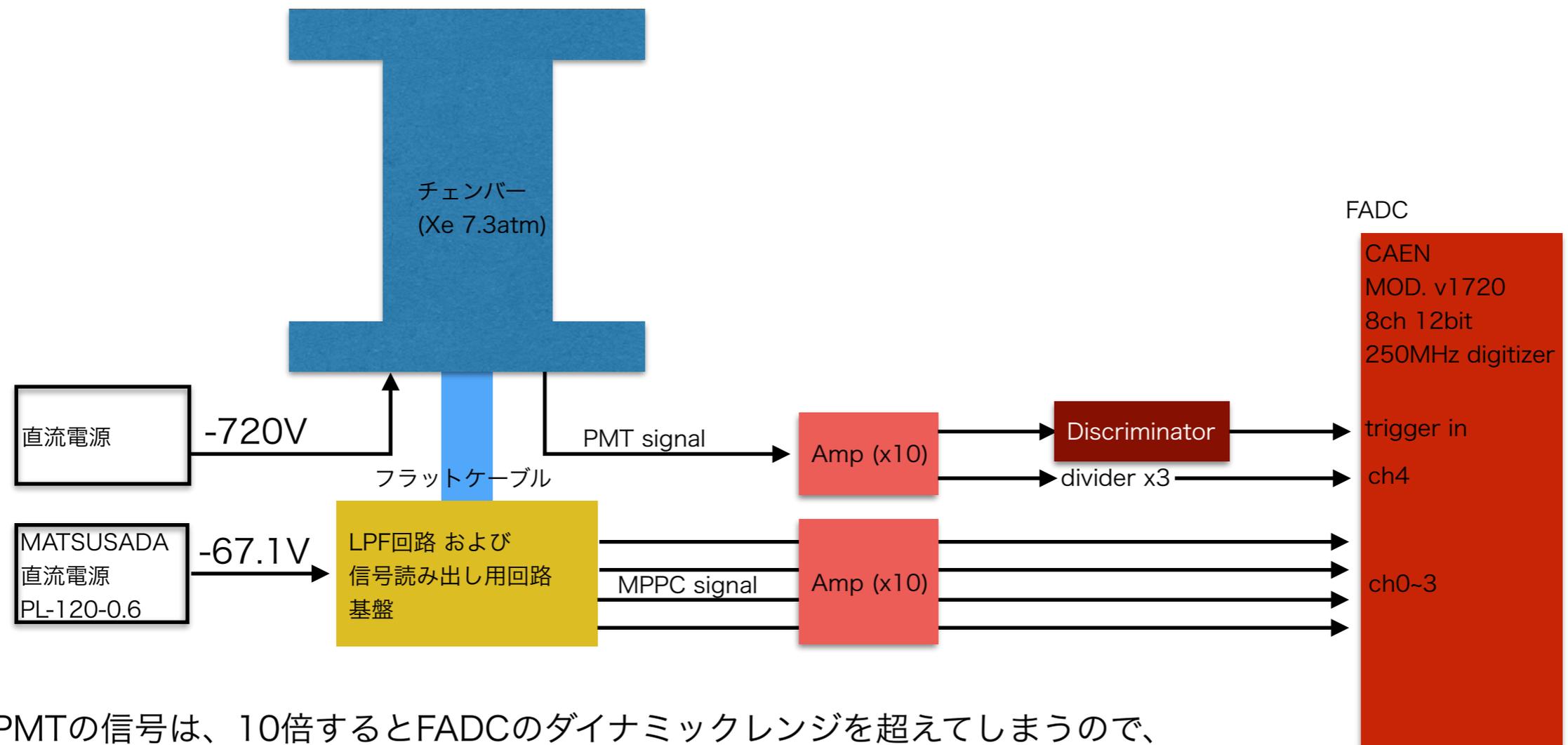
ch2 : 3 Vop : -67.76 V (by HAMAMATSU)

ch3 : 4 Vop : -67.79 V (by HAMAMATSU)

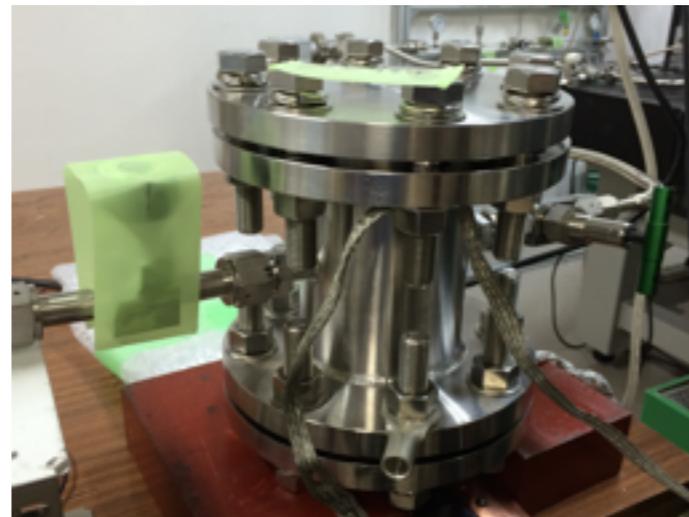
今実験での印加電圧 : -69.0 V (一括)



# 実験セットアップ

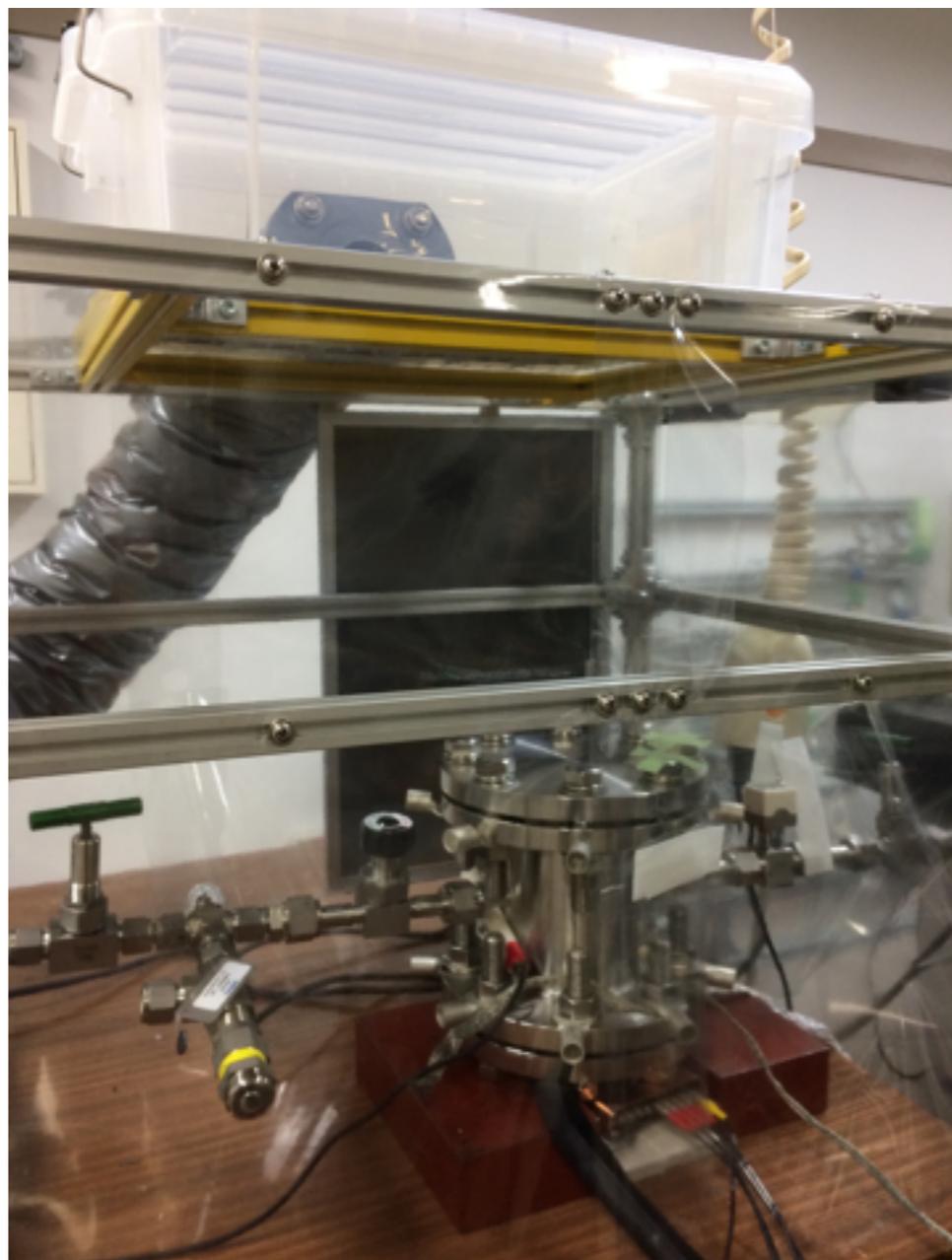


- ・ PMTの信号は、10倍するとFADCのダイナミックレンジを超えてしまうので、dividerで1/8にした。(正味x1.25)
- ・ Discriminatorのthresholdは-89.7mVに設定



# 実験セットアップ

温度は温調機により25°Cに保つ



ORION PAPER01B

# UV-sensitive MPPCの性能評価

## 実験セットアップ



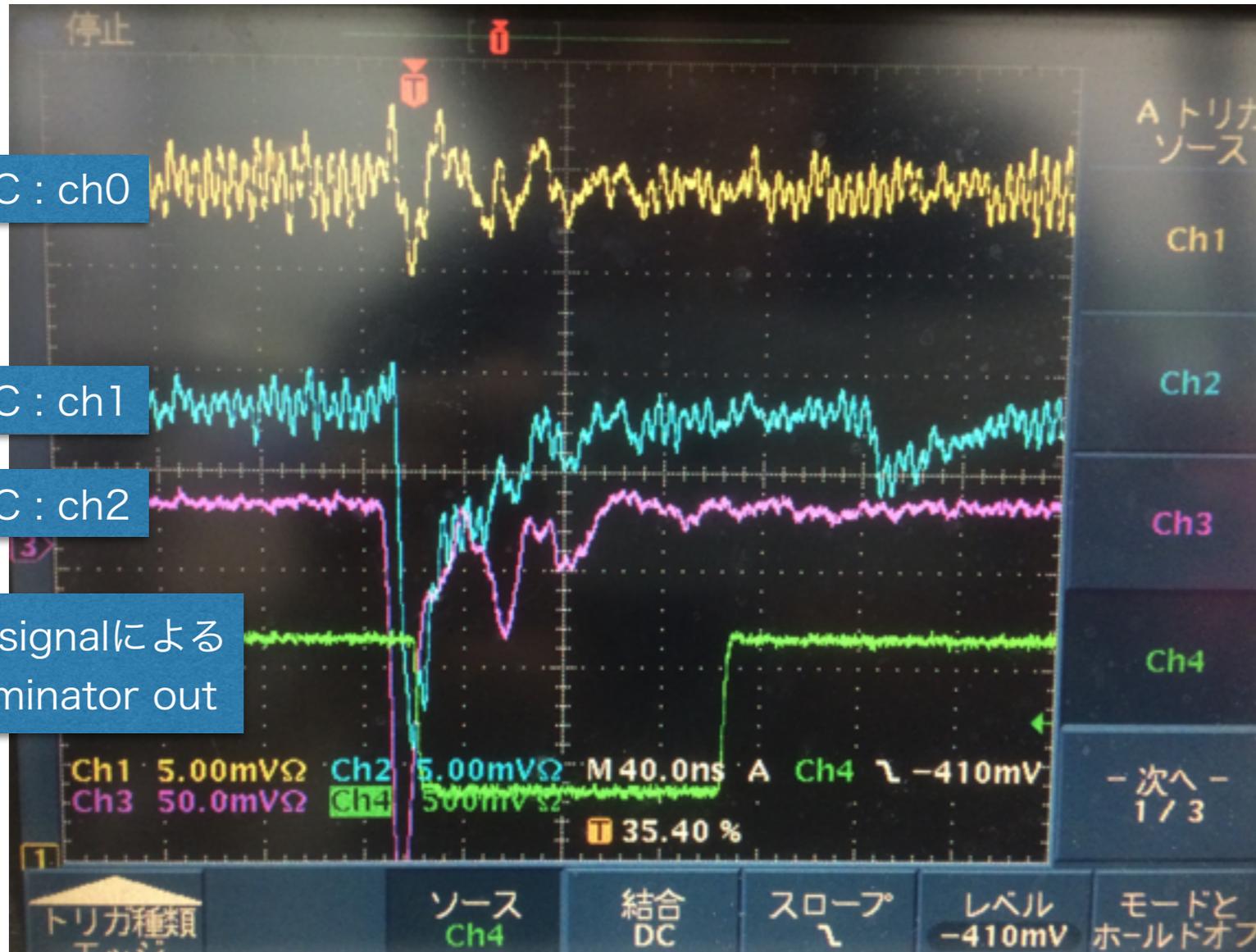
シンチレーション光イベントの  
オシロ画面

MPPC : ch0

MPPC : ch1

MPPC : ch2

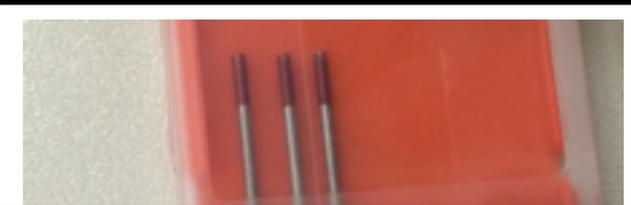
PMTのsignalによる  
Discriminator out



PMT

# UV-sensitive MPPPCの性能評価

## 実験セットアップ



シンチレーション光イベントの  
オシロ画面

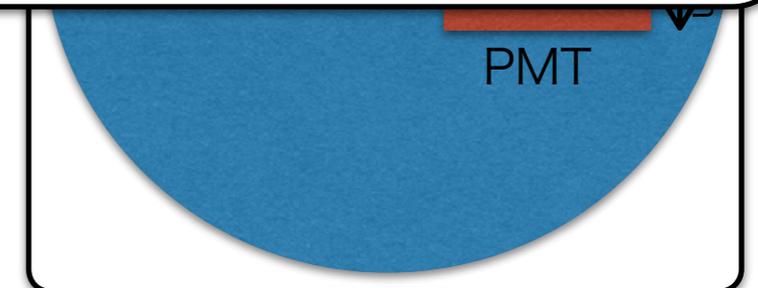
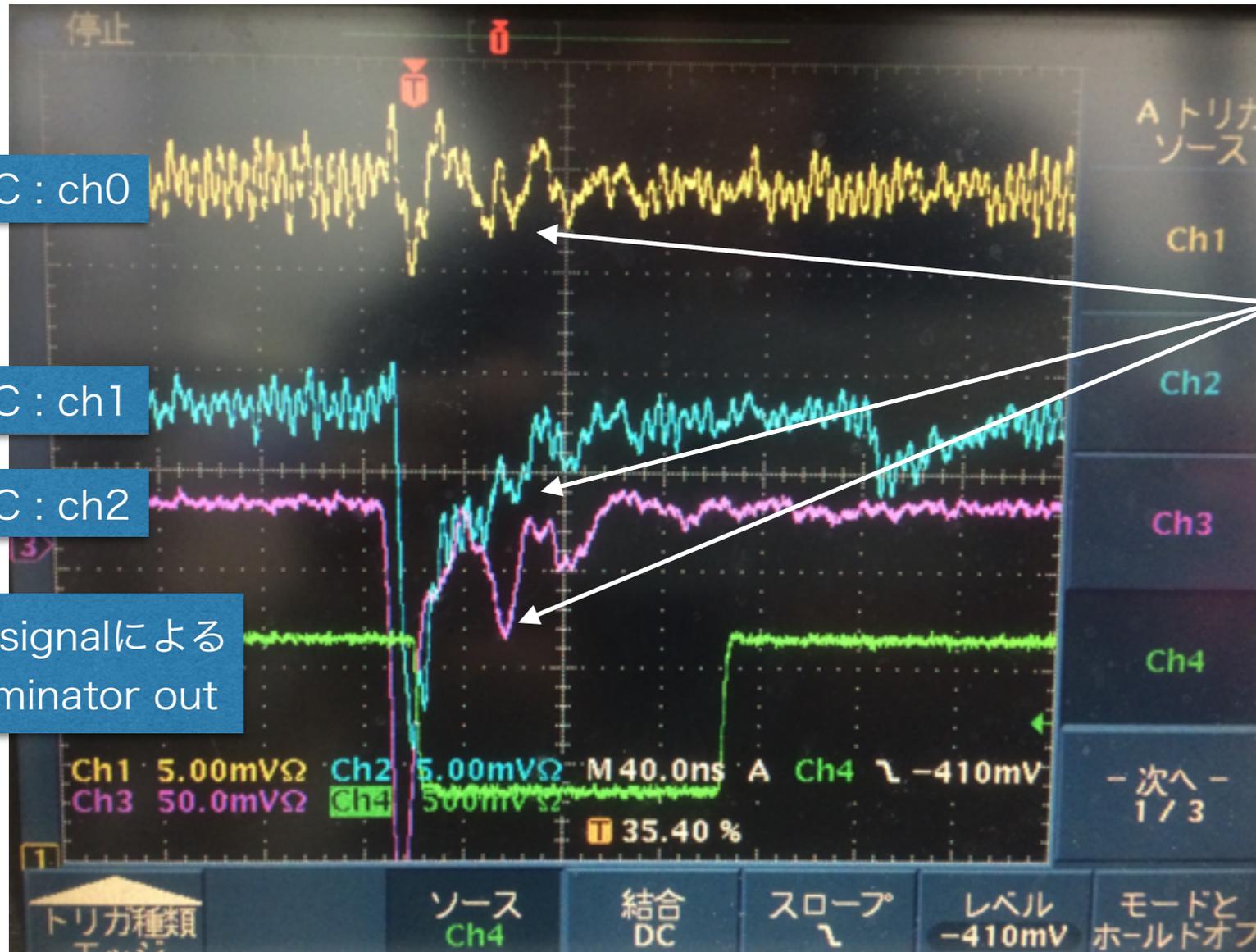
PMTが大きな信号を出すと、それに引き  
ずられたクロストークがのってしまう

MPPC : ch0

MPPC : ch1

MPPC : ch2

PMTのsignalによる  
Discriminator out



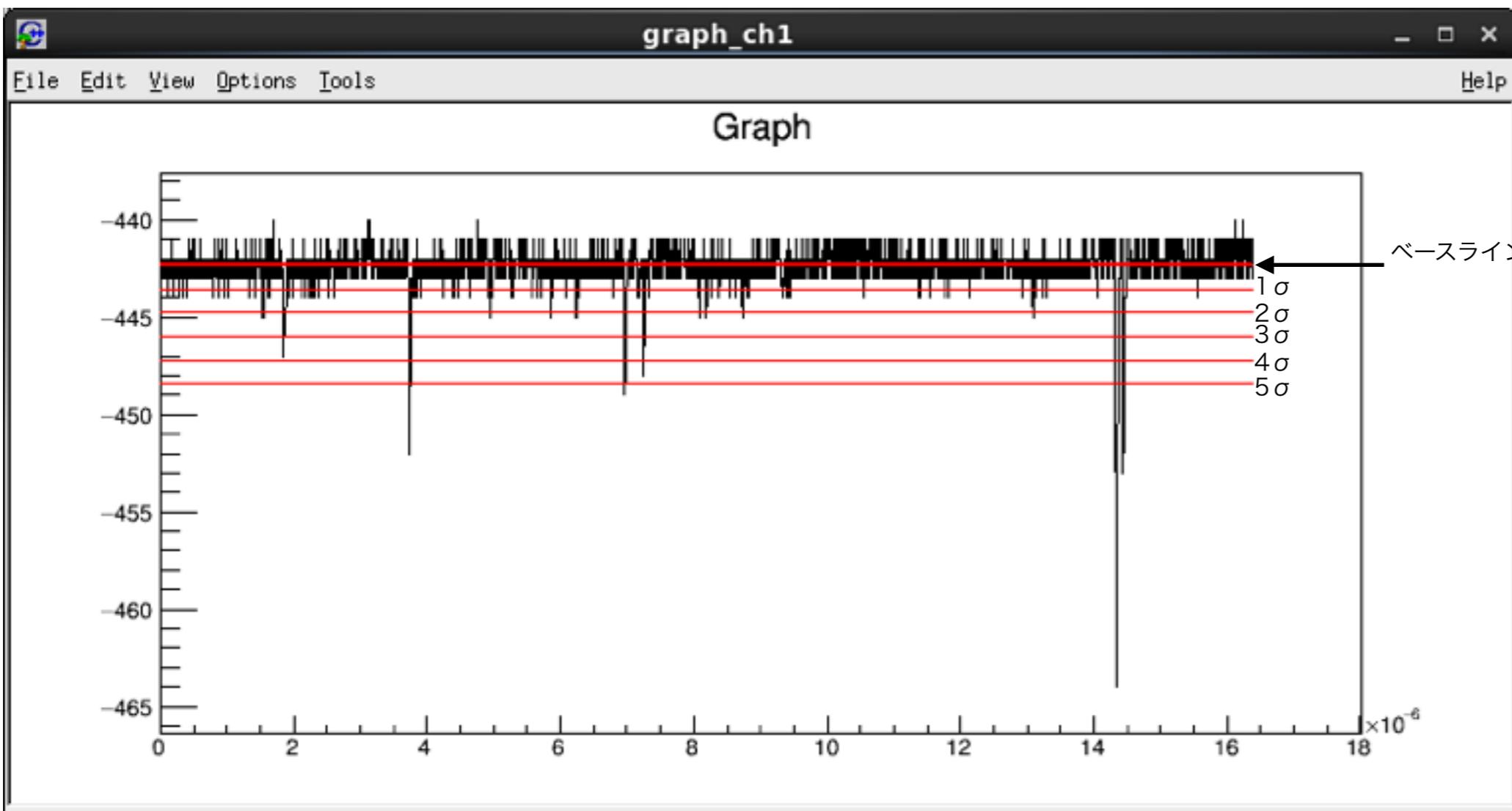
# dark解析

clock generator の信号をトリガーとしてデータを取り、MPPCのdark currentからMPPCのgainを求めた(5000event)  
-> MPPCの波形の積分値からphoton数に焼きなおす際に使用

解析thresholdを決めるため、各event, 各chでベースラインを計算する

-> 今回は各eventの全範囲(4096sample分)のfadc値の平均をベースラインとした。また、その標準偏差 $\sigma$ も求めた。

ch1, event#0



2 $\sigma$ のラインあたりが解析  
thresholdにちょうどいい?

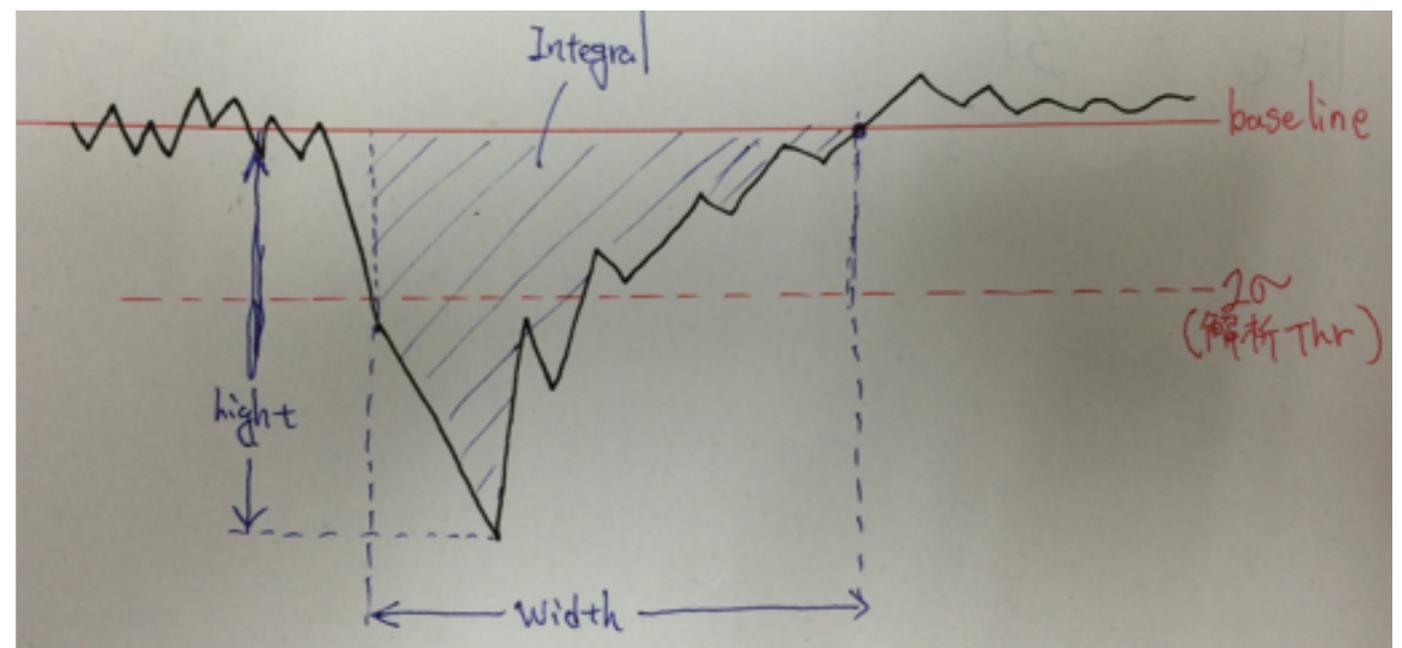
darkの信号がある領域も含めて平均をとってベースラインを求めたが、上図を見ると、それでもあまり問題はないようである  
(ベースラインの下方シフトは起こっていないように思える)

# dark解析

- ・ 前のスライドではch1,event#0の波形だけしか見ていなかったが、他のch、event#についても、ベースラインから $2\sigma$ 離れたところを解析thresholdに設定すると、ノイズ(ベースラインの揺らぎ)とdark currentの信号をうまく切り分けられそう

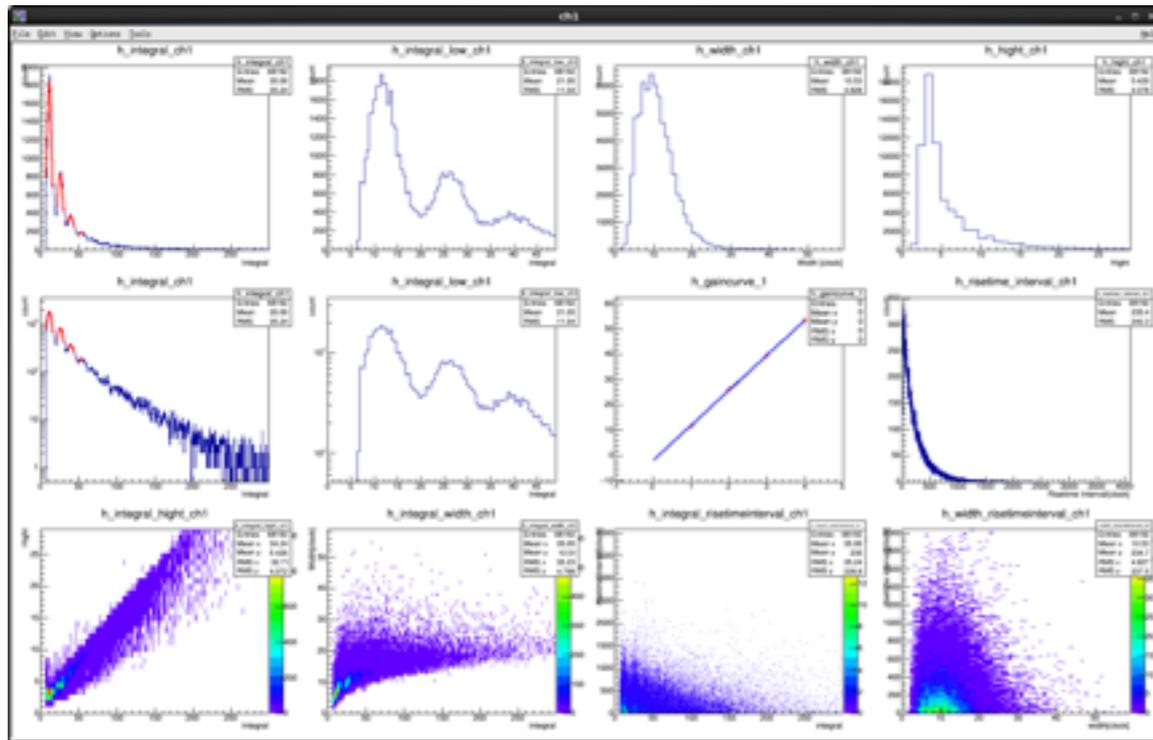
解析内容：

- ・ 設定した解析thresholdを超えたら、そこからベースラインに戻るまでの間、fadc値を積分を行う -> h\_integral
- ・ effective gainは、h\_integralをガウスフィットしたフィッティング結果から0.5photonのthresholdを決め、それを上回る積分値の平均を取る
- ・ one photon gainは、フィッティング結果から、2 photons peak - 1 photon peakにより、求める
- ・ Thresholdを切っている間のクロック(sampling)数もwidthとして記録 -> h\_width
- ・ そのあいだで波高が一番高かったfadc値もhightとして記録 -> h\_high
- ・ 前回解析thrを切ってから、今回解析thrを超えるまでのクロック数をrisetimeとして記録 -> h\_risetimeinterval



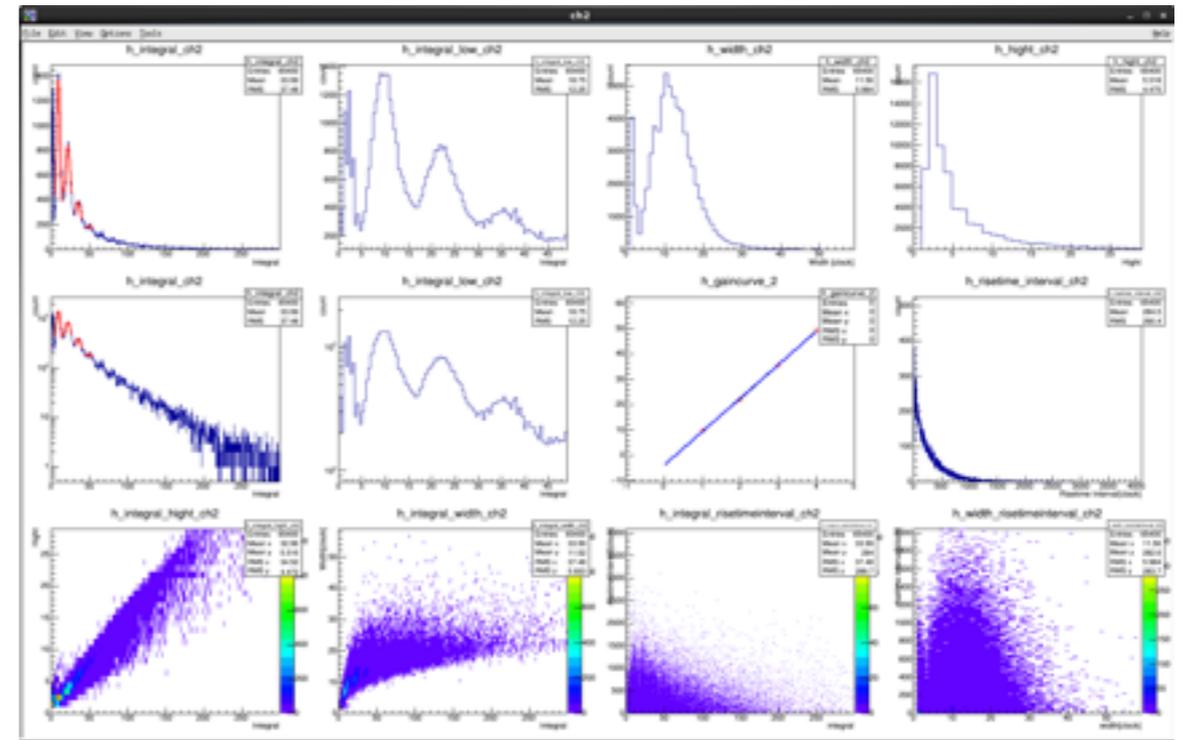
# dark解析

ch1



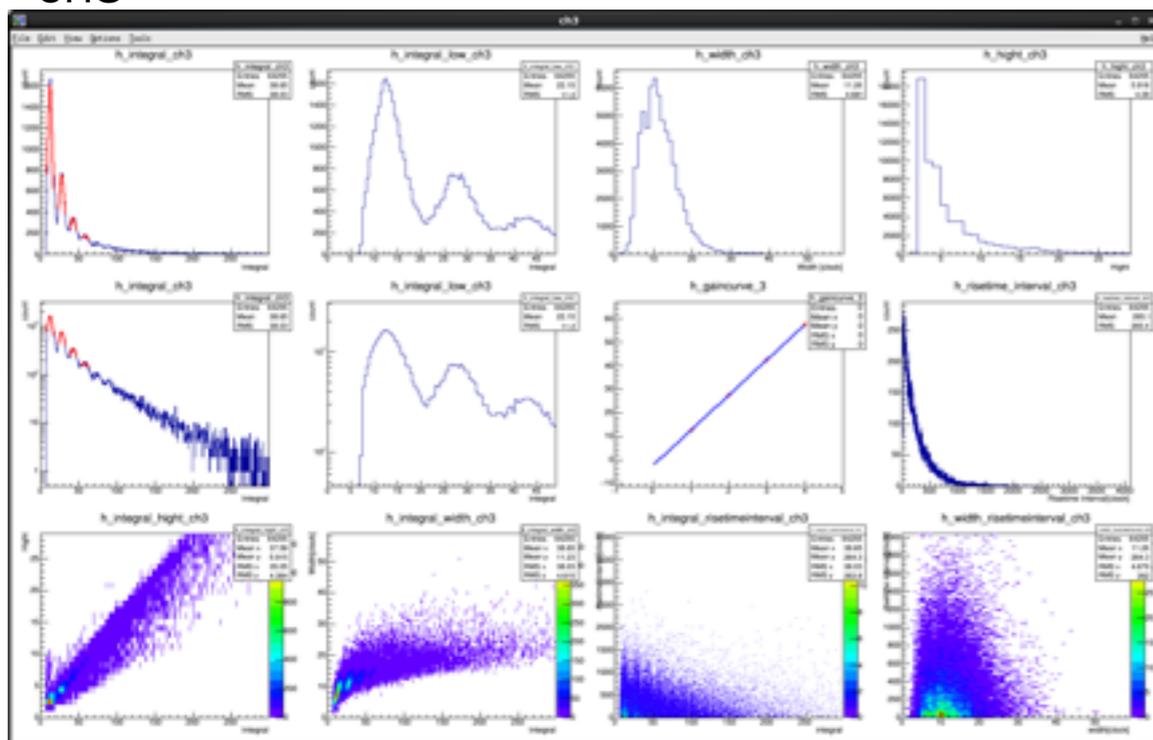
eff\_gain : 35.0578, onephoton\_gain : 14.385

ch2



eff\_gain : 33.9907, onephoton\_gain : 12.0614

ch3



eff\_gain : 38.6493, onephoton\_gain : 15.0547

3つのchでdarkの解析は問題なし  
effective gainを求めた

# シンチレーション光解析

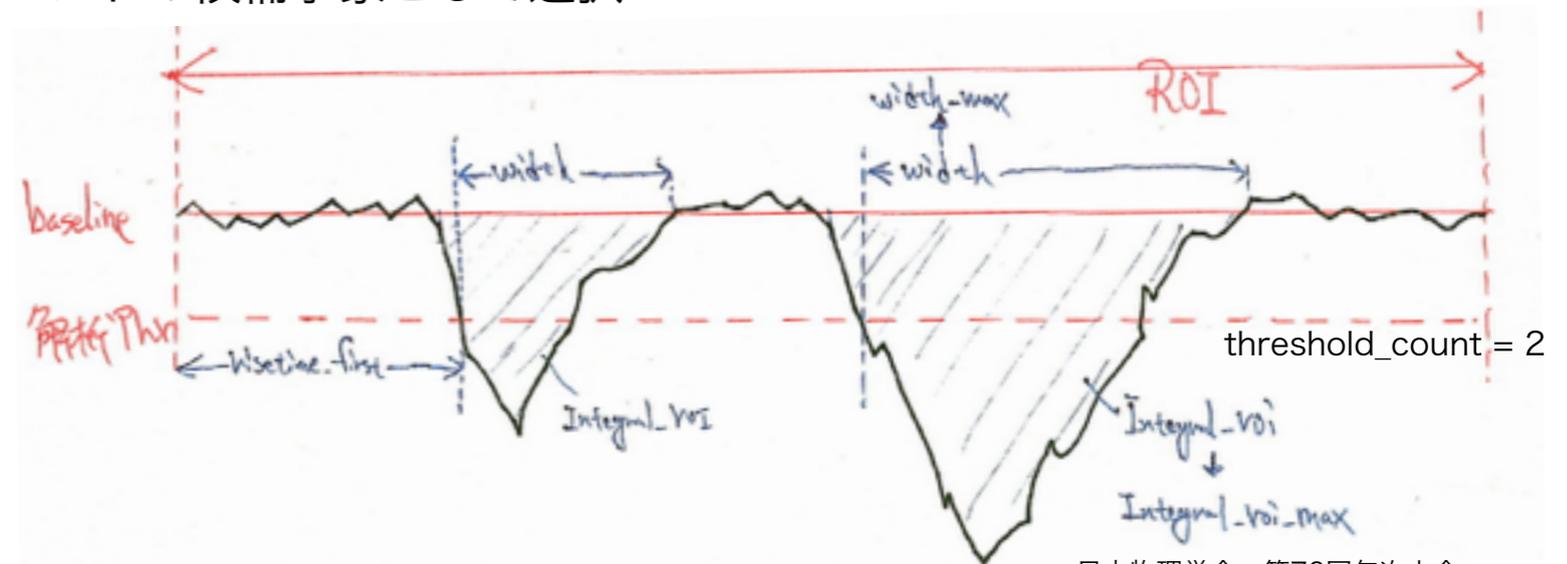
ROIをPMTの信号まわりの50clock(=200ns)に設定(985clock~1034clock) ← 次スライド  
baselineは1035clock~4095clockまでのfadc値の平均として求める。またその際の標準偏差 $\sigma$ も求める  
baselineから $2\sigma$ 下を解析Thrに設定

- ・ ROI内で解析Thrを超えた回数をcount -> threshold\_count
- ・ ROIのスタートから解析Thrを初めて超えたclock値を記録 -> risetime\_first
- ・ 解析Thrを超えて、baselineに復帰するまでの間、baseline - fadc値を足しあわせ続ける -> integral\_roi
- ・ 1event内で、integral\_roiの最も大きい値のもの -> integral\_roi\_max
- ・ 解析Thrを超えて、baselineに復帰するまでの間のclock数を記録 -> width
- ・ 1event内で、widthの最も大きい値のもの -> width\_max
- ・ ROIの範囲内で baseline - fadc値 をclock毎に計算、足し合わせる -> integral\_roi\_sum

解析の際、各chについてROIの範囲内で

- ・ threshold\_countが1 (何回もthresholdを切っている -> 周期ノイズの振動 -> カット)
- ・ width\_max > 5 (振動ノイズをwidthによってカット)
- ・ risetime\_first < 15 (PMTの信号と同期しているもの)

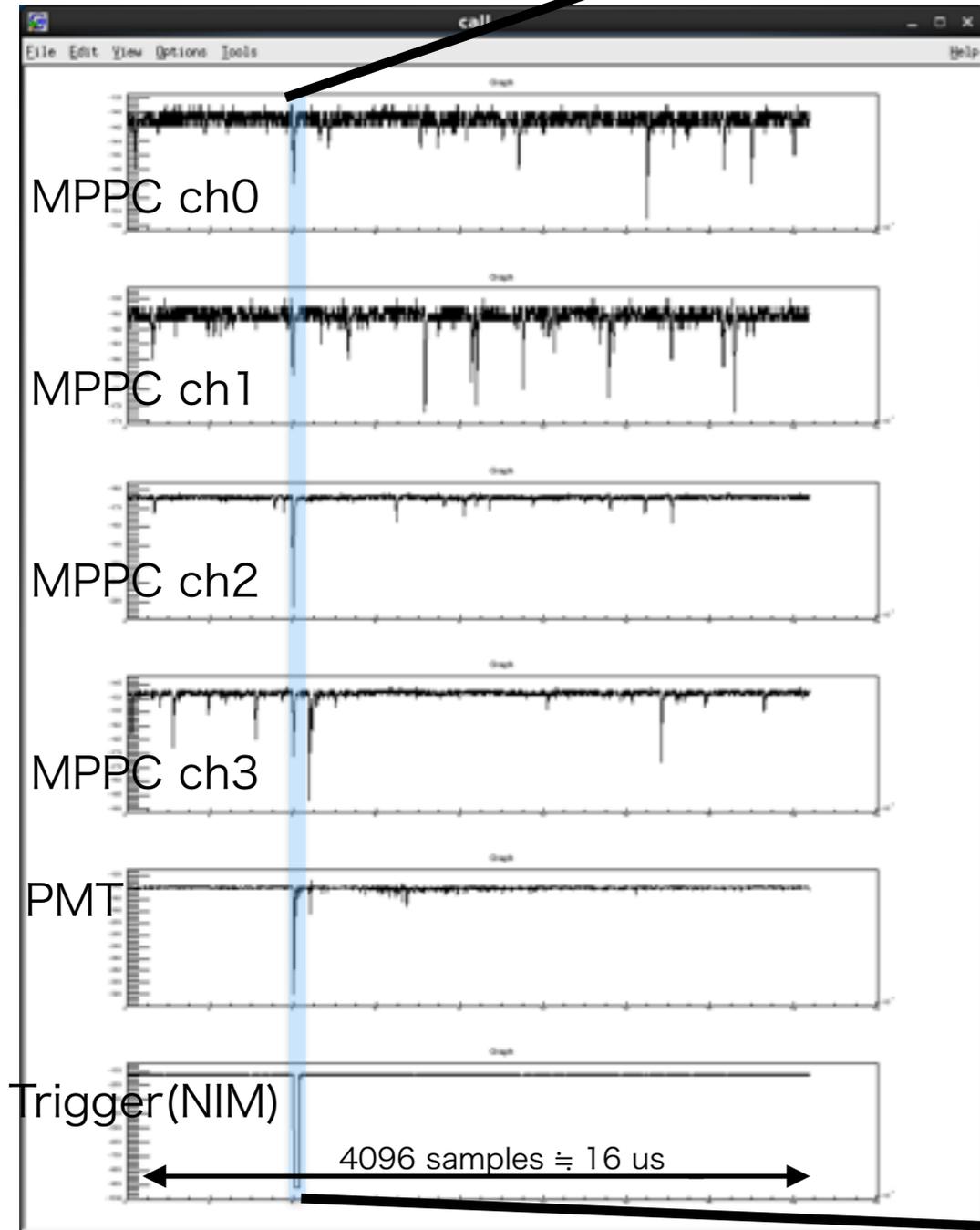
を満たすイベントをシンチレーション光イベントの候補事象として選択



# シンチレーション光解析

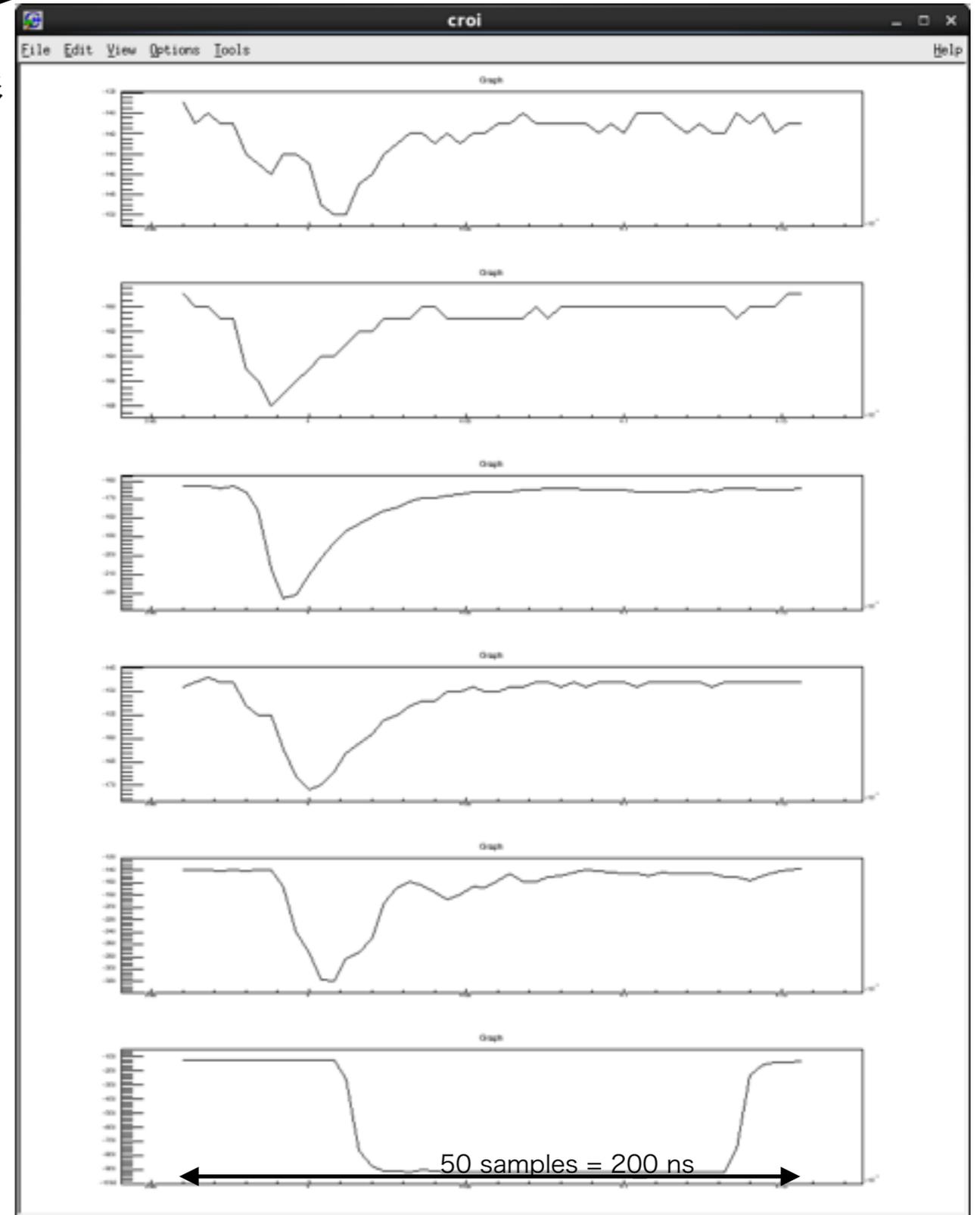
シンチレーション光候補事象の波形と ROI

※解析に用いたデータセットとは異なるデータセットの波形



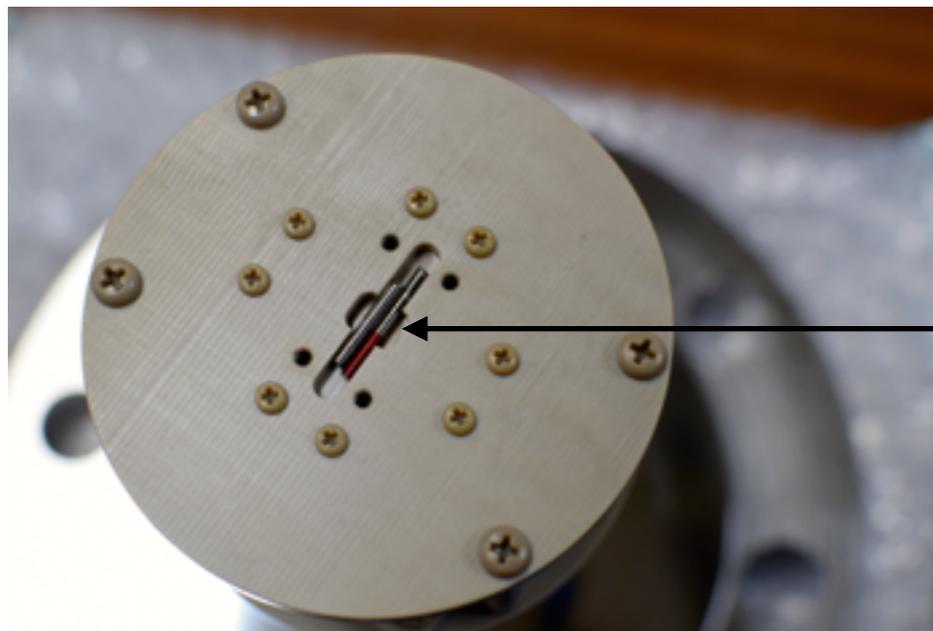
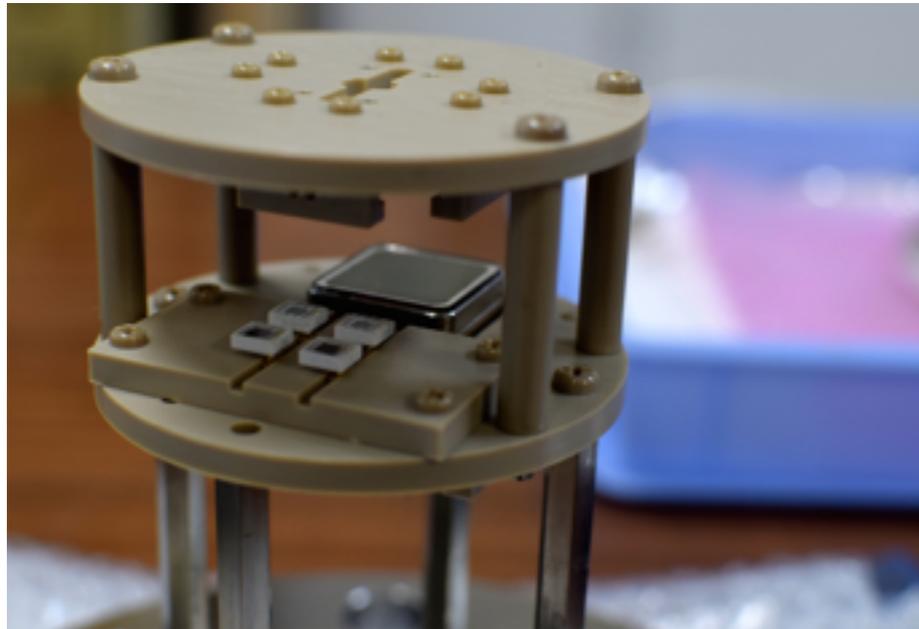
波形表示

水色の影はROI

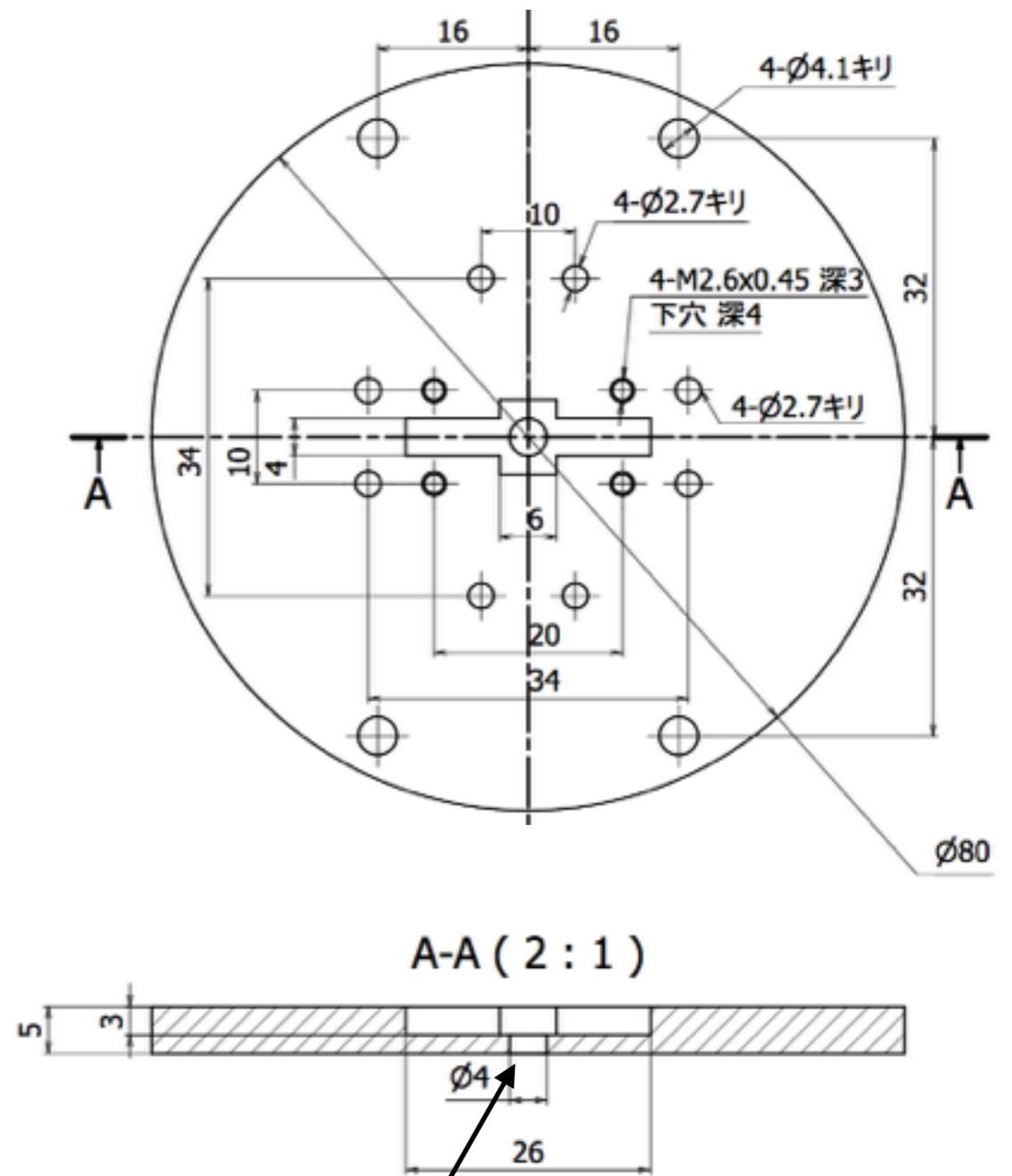


ROIの拡大表示

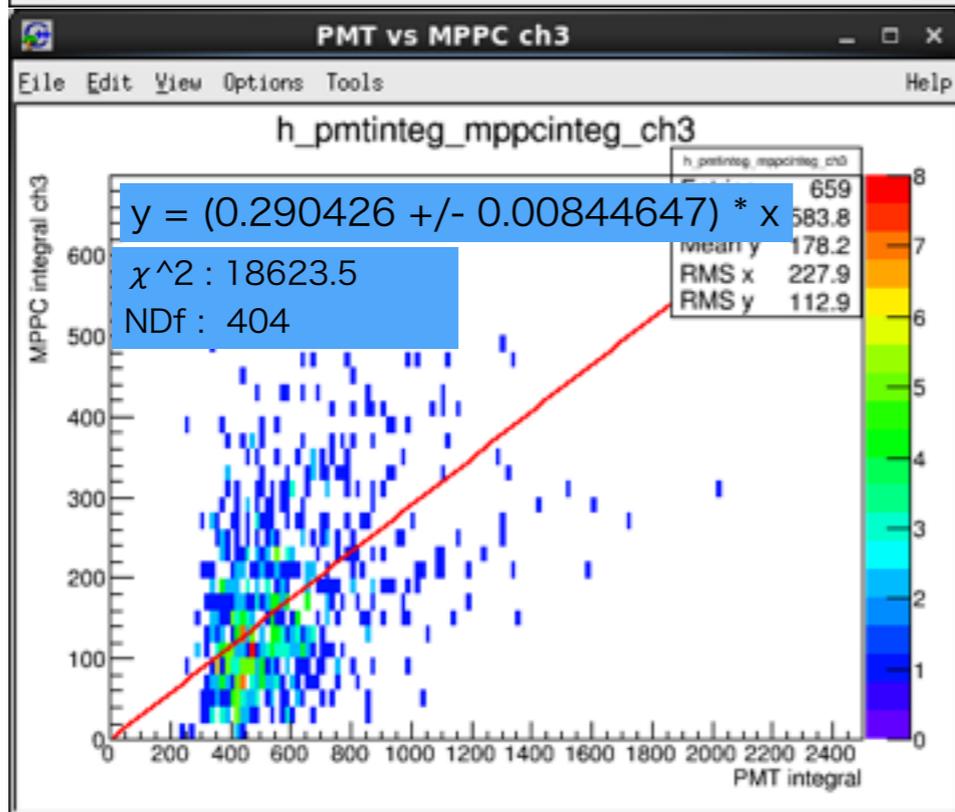
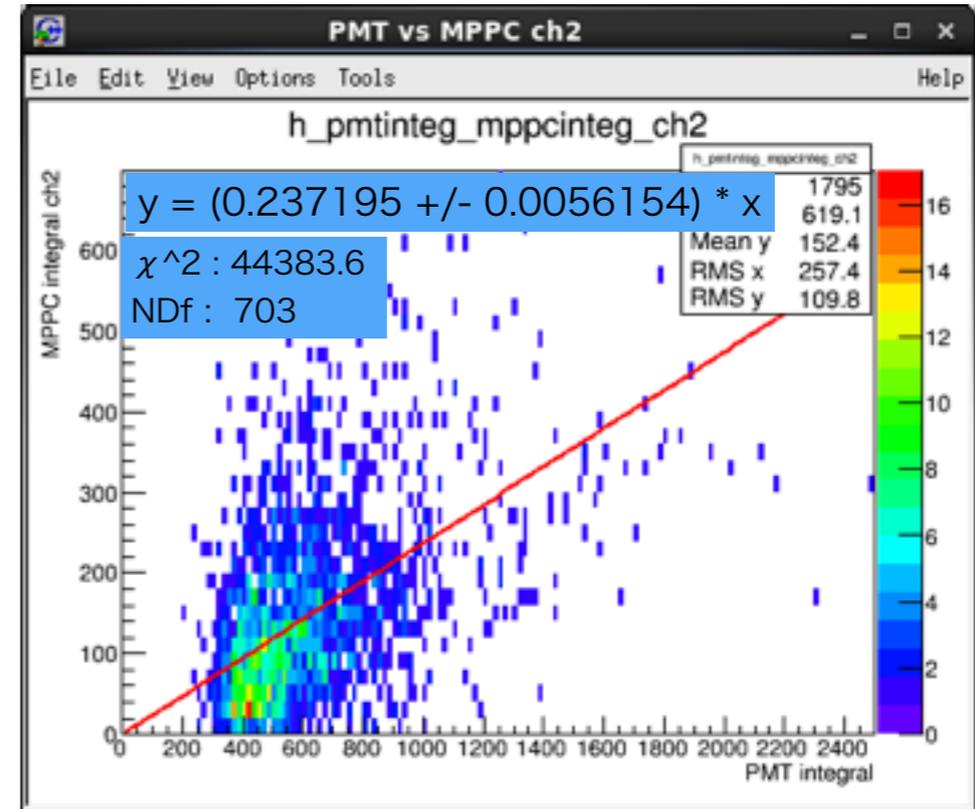
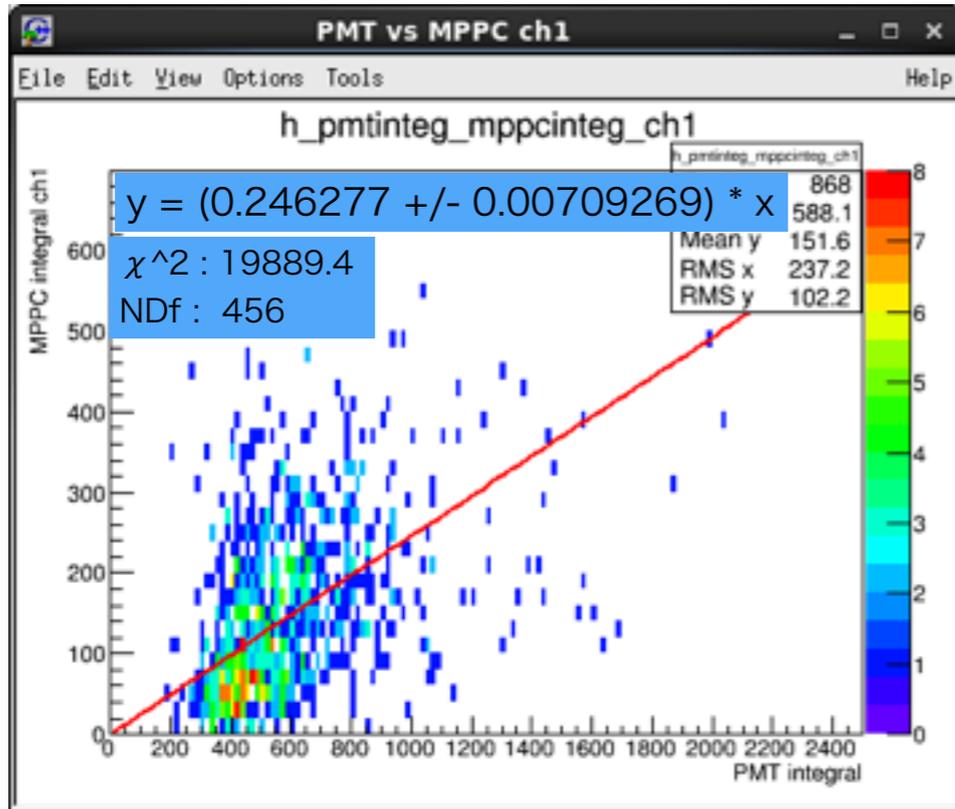
p22の、線源の大きさと $\alpha$ 線の飛行方向を絞った時のセットアップ



タングステン電極棒( $\alpha$ 線源)  
この下部に $\phi 4\text{mm}$ の穴が空いている



# UV-sensitive MPPCの性能評価



- ・ 原点を通ることを要求して直線でフィッティング
- > 分布が広がりすぎている
- >  $\alpha$ 線の発生場所、飛行方向の広がりによるものと予想される