

2025 ICRRスプリングスクール

# 宇宙ニュートリノ研究

赤池 飛雄

李 承陸

宮崎 利希

大始良 日陽

岸田 彩花

2025/03/07

# INDEX

1 概要

---

2 測定原理

---

3 測定方法

---

4 結果・考察

---

5 結論

---

01

概要

# | 超新星背景ニュートリノ (DSNB)

宇宙で過去に**爆発した超新星**から放出されたニュートリノが空間を飛び回っている

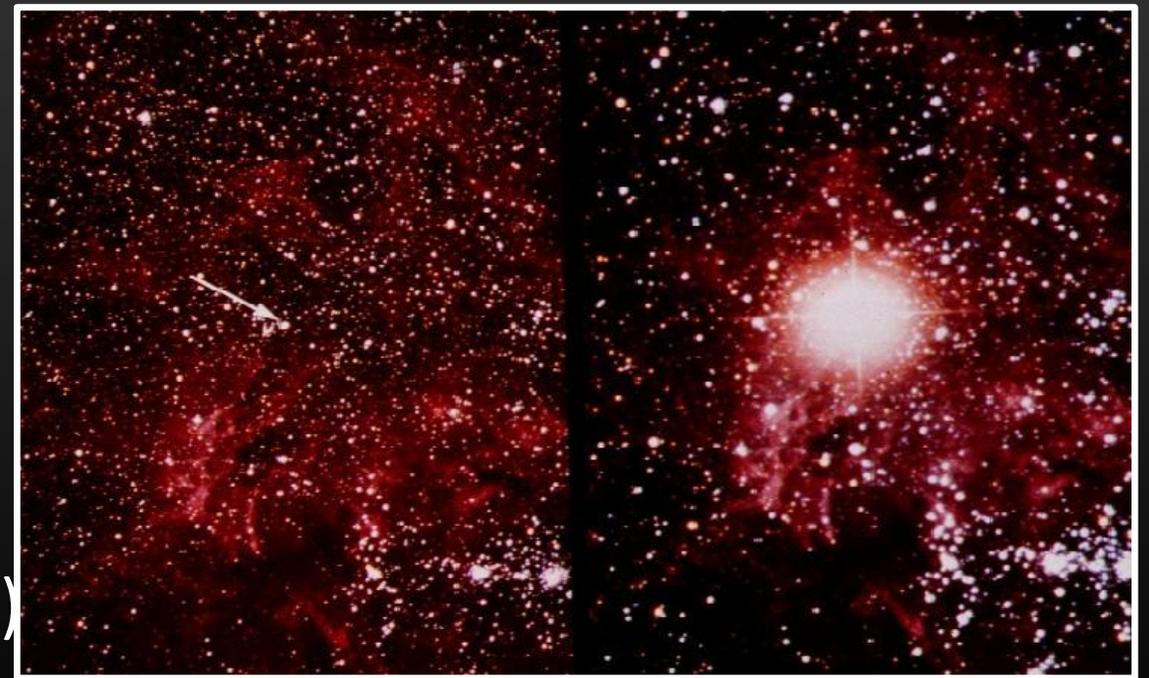
キャッチできれば**星の進化の謎を紐解く手がかり**になる！

→ 未だ誰も観測できていない...  
(Super-K が世界最高感度で探索中！)

SN1987A の超新星爆発

Before

After



# | 本研究の目的

Super-Kを模した小型検出器(Mini-K)で  
**超新星背景ニュートリノ**の観測に挑戦！

# 実験過程

Mini-Kを使い**宇宙線ミュオンの影響の少ない地下**(神岡)で  
1週間データを取得

**検出器全体のエネルギー較正**のためPMTのゲインを求める

**逆 $\beta$ 崩壊反応の検出効率**を較正用線源を用いて評価

超新星背景ニュートリノの**フラックス**を求める

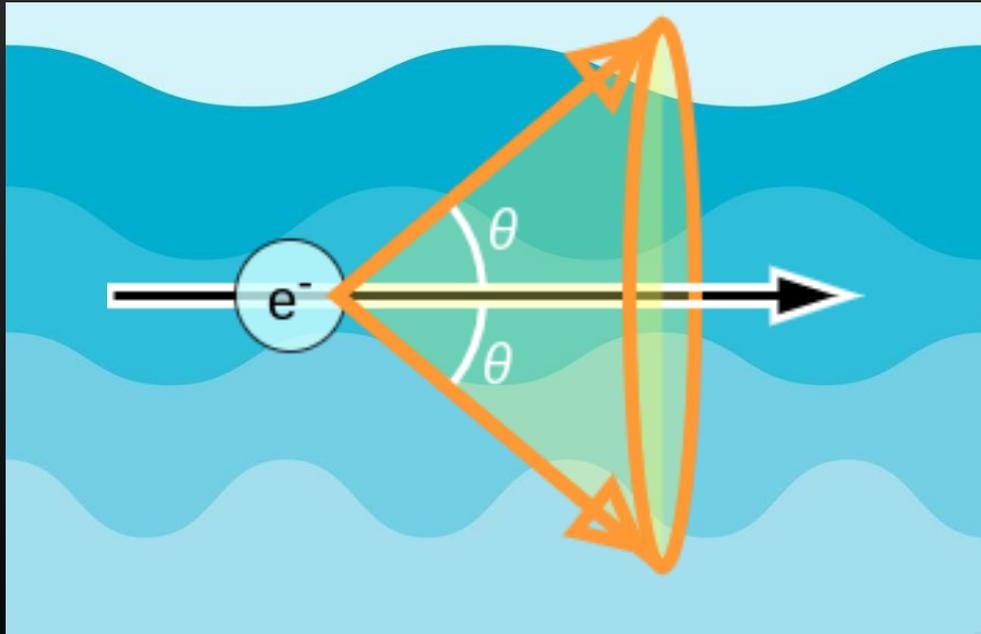
02

測定原理

# | チェレンコフ光

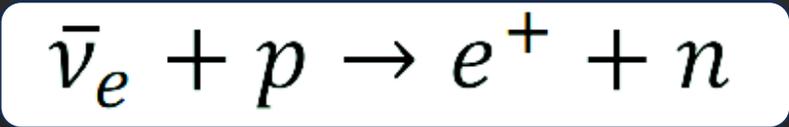
荷電粒子が**物質中の光速を超える速度**で通過すると進行方向に沿って円錐状の光を放射

チェレンコフ光

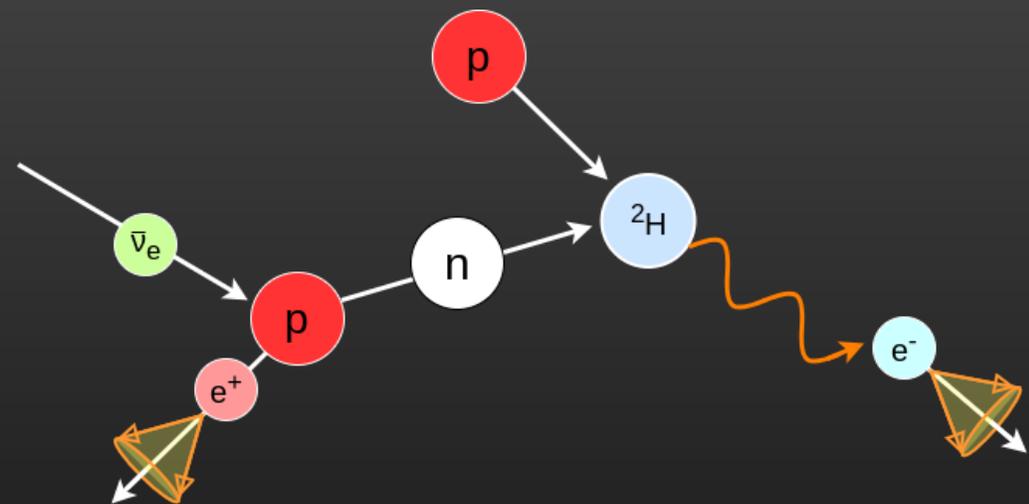


# 逆β崩壊反応

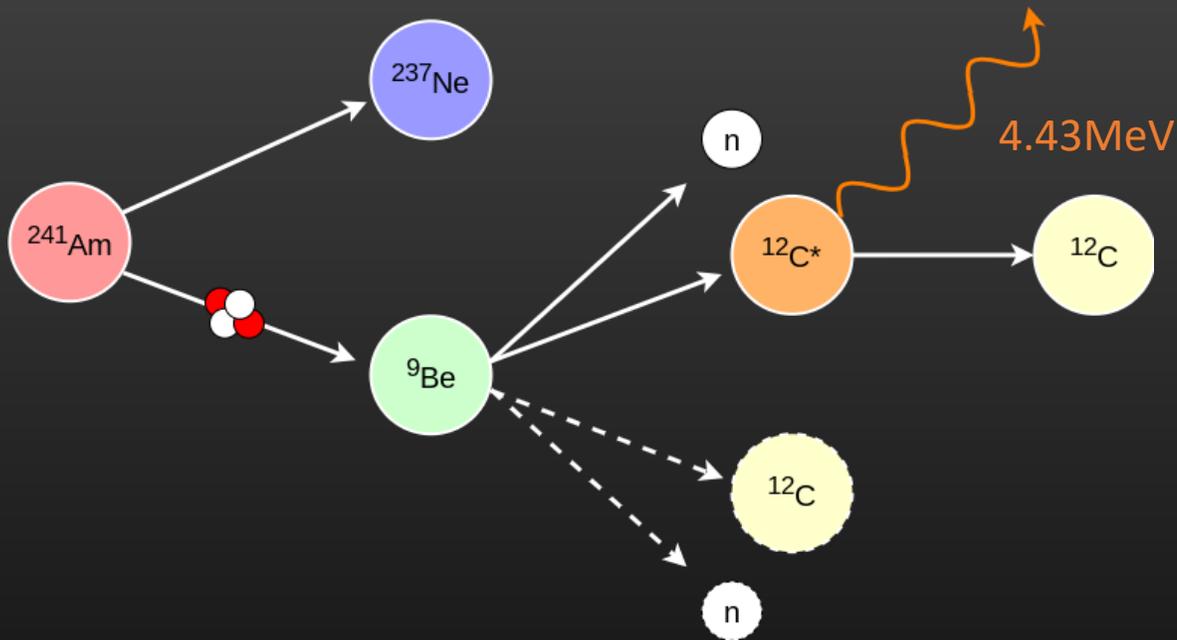
- 超新星爆発由来のニュートリノで、もっとも反応確率が高い現象



- 陽電子：チェレンコフ光を出すのですぐに検出
- 中性子：水中のHと衝突を繰り返して減速し、**~200 μs後**にH(SK-GdではGd)に吸収され **γ線**を放出



# 逆β崩壊反応の検出効率の見積もり



## Am/Be線源



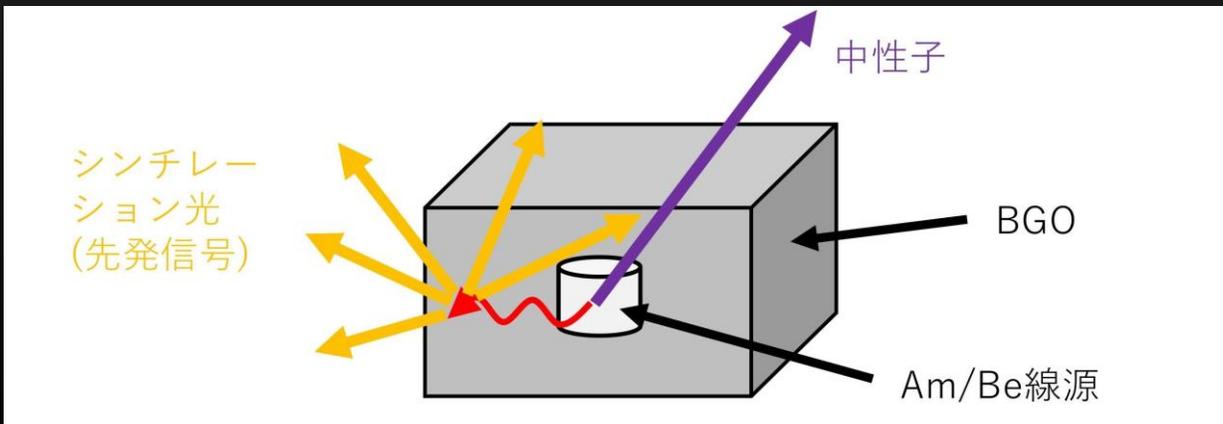
$^{12}\text{C}^*$ は4.43MeVの $\gamma$ 線を放出し  
基底状態へ

中性子はHと相互作用し $\gamma$ 線放出  
→チェレンコフ光(後発信号)

## BGOシンチレータ

BGO内で4.43MeVの $\gamma$ 線が光電吸収  
→シンチレーション光(先発信号)

→逆β崩壊反応に類似しているため  
これをもとに検出効率を求める

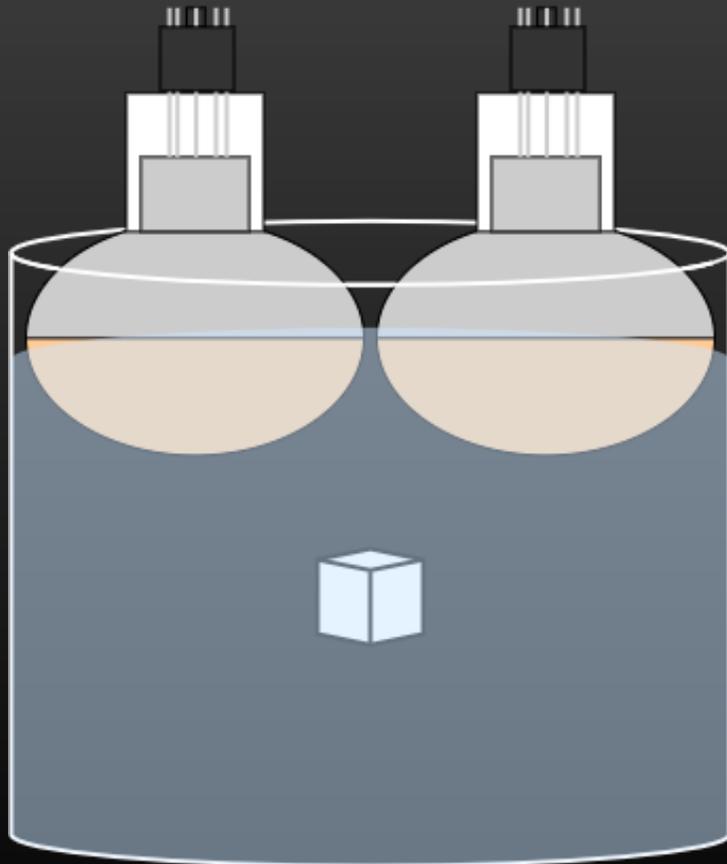


03

実験方法

# Mini-K 装置図

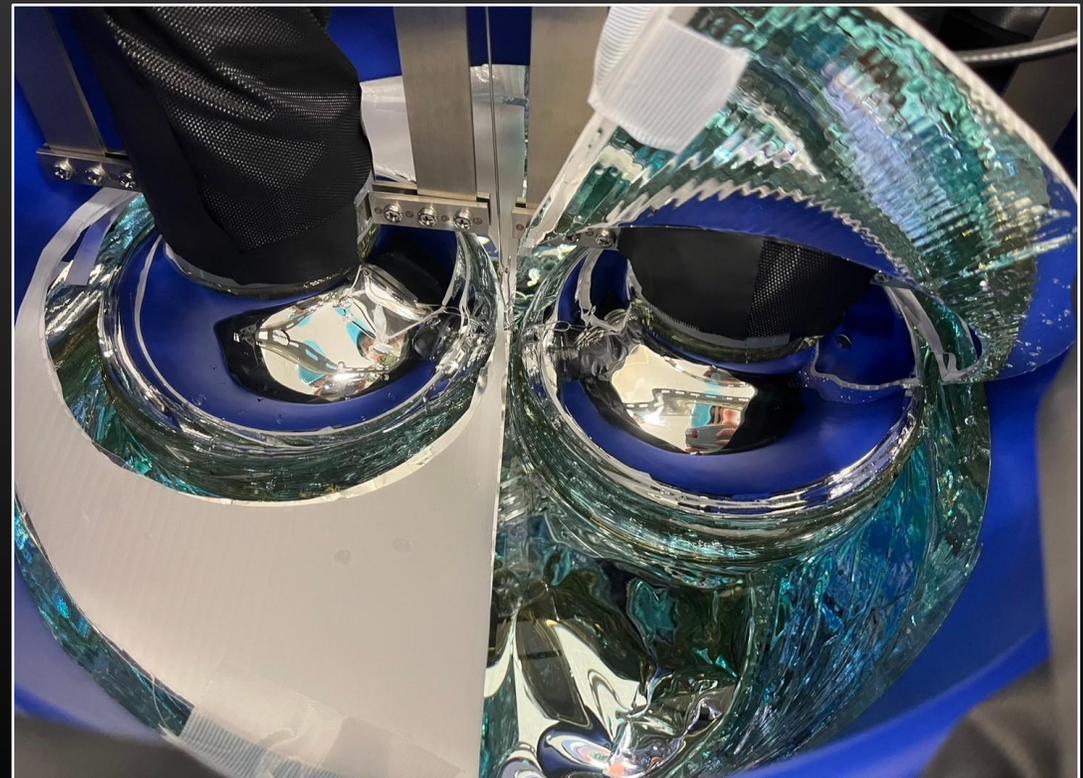
8 inch PMT



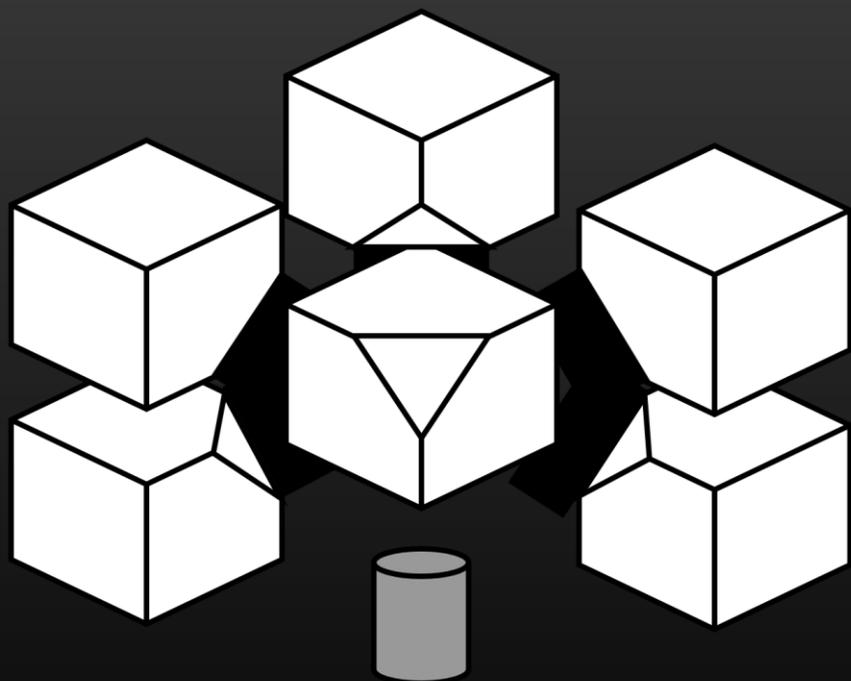
≈40 L 純水

光電子増倍管(PMT)×2 : HAMAMATSU R5912

水タンクの中に反射材を巻いている



# | BGO ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ) シンチレータ



**Am/Be線源+BGOシンチレータ**

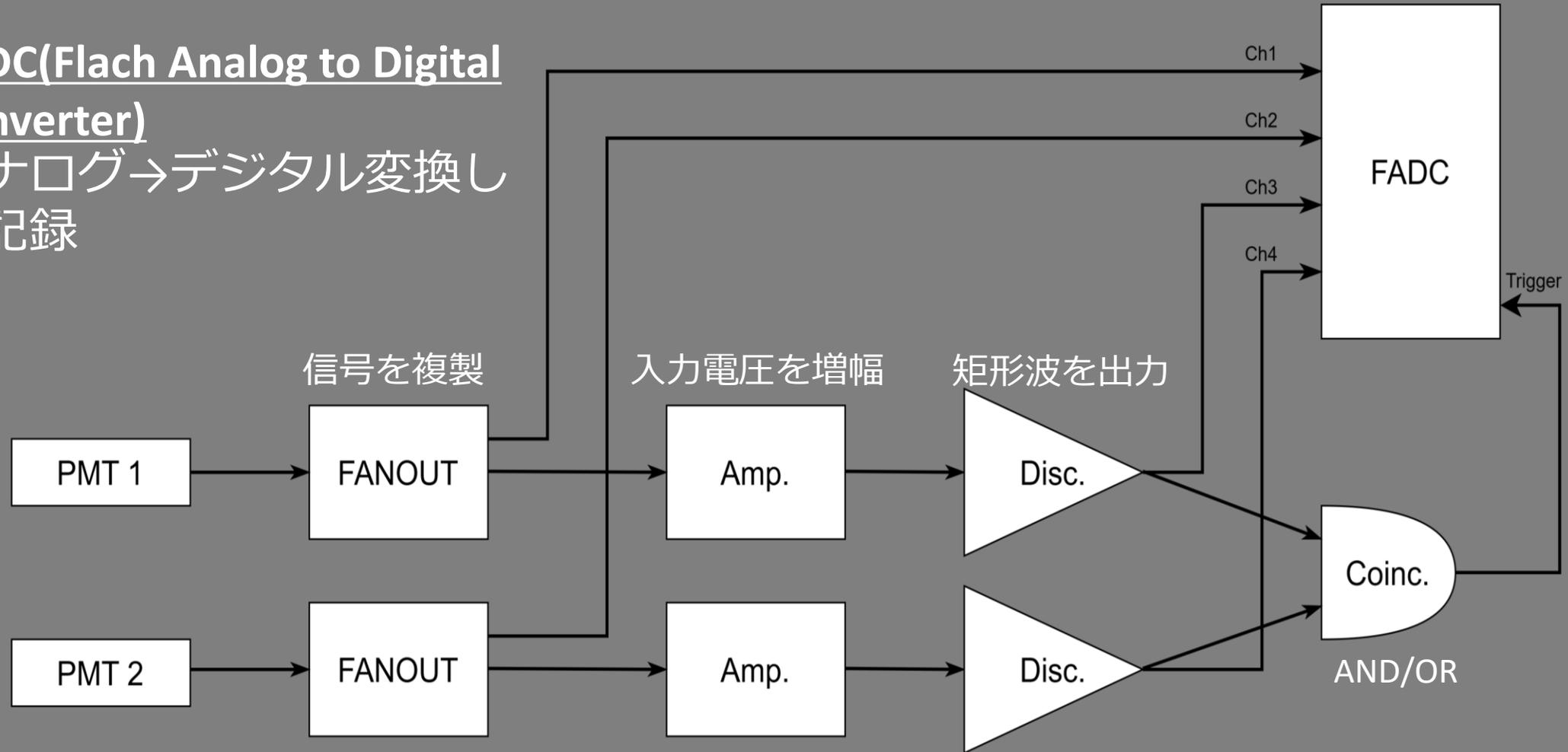
- $\gamma$ 線に敏感
- 発光量が高め
- 吸湿性がほとんどない



# NIMモジュール(回路図)

今回の実験結果にはANDのみを使用  
→ダークカレントの対策

FADC(Flach Analog to Digital Converter)  
アナログ→デジタル変換して記録



# データの取得

## 条件

In water / In air

+

- 何も入れない状態
- LEDのみ
- Am/Beのみ
- BGOのみ
- Am/Be+BGO

## 手順

- ① Mini-Kに試料を入れる
- ② (水を使う場合：水を入れる)
- ③ 電源ON、電圧を設定
- ④ 信号をオシロスコープで確認
- ⑤ FADCでデジタル変換して  
波形情報をPCで記録

04

結果・考察

# データ解析の流れ

PMTの較正をするためにゲイン(増幅率)を求める

どのような粒子が来ているのか確認する

(ニュートリノ、宇宙線、環境放射線など)

逆 $\beta$ 崩壊反応に対する検出効率を求める(線源のデータで評価)

逆 $\beta$ 崩壊反応の信号を探す

超新星背景ニュートリノが見えるエネルギー範囲でフラックスを求める

# データ解析の流れ

PMTの性能評価のためにゲイン(増幅率)を求める

どのような粒子が来ているのか確認する

(ニュートリノ、宇宙線、環境放射線など)

逆 $\beta$ 崩壊反応に対する検出効率を求める(線源のデータで評価)

逆 $\beta$ 崩壊反応の信号を探す

超新星背景ニュートリノが見えるエネルギー範囲でフラックスを求める

# 1) PMTのゲイン(増幅率)を求める

ある電圧値に対して光電子がどのくらい増幅されるかはPMT個体による。

PMTの個体差を補正するためにゲインを求める！

(本実験ではLEDを点けたときのデータから計算した。)

観測される光電子数はPoisson分布に従い、 $N > 20$ ではガウシアンに近似できる。  
meanおよびsigmaを求めたのち、増幅率 $G$

$$\begin{cases} (\text{mean}) = GeN & N : \text{観測された光電子数} \\ (\text{sigma}) = Ge\sqrt{N} & e : \text{電気素量 } (1.602 \times 10^{-19} \text{ C}) \end{cases}$$

$$G = \frac{(\text{sigma})^2}{(\text{mean}) \times e}$$

$$\text{CH1: } 1.89(3) \times 10^6$$

$$\text{CH2: } 1.62(3) \times 10^6$$

# データ解析の流れ

PMTの性能評価のためにゲイン(増幅率)を求める

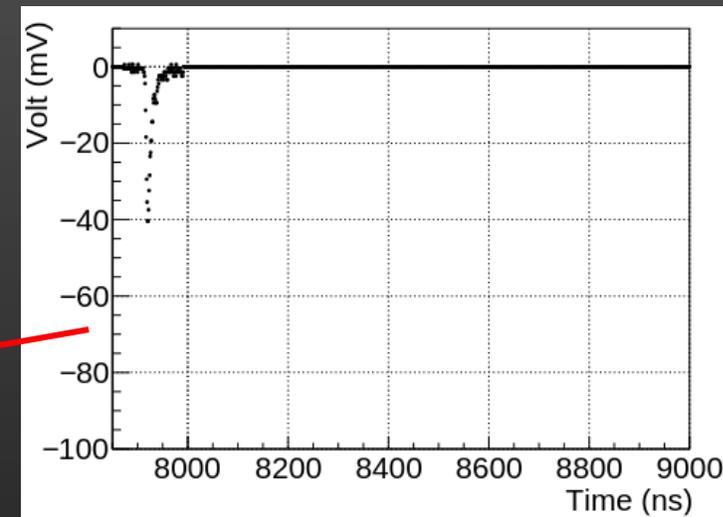
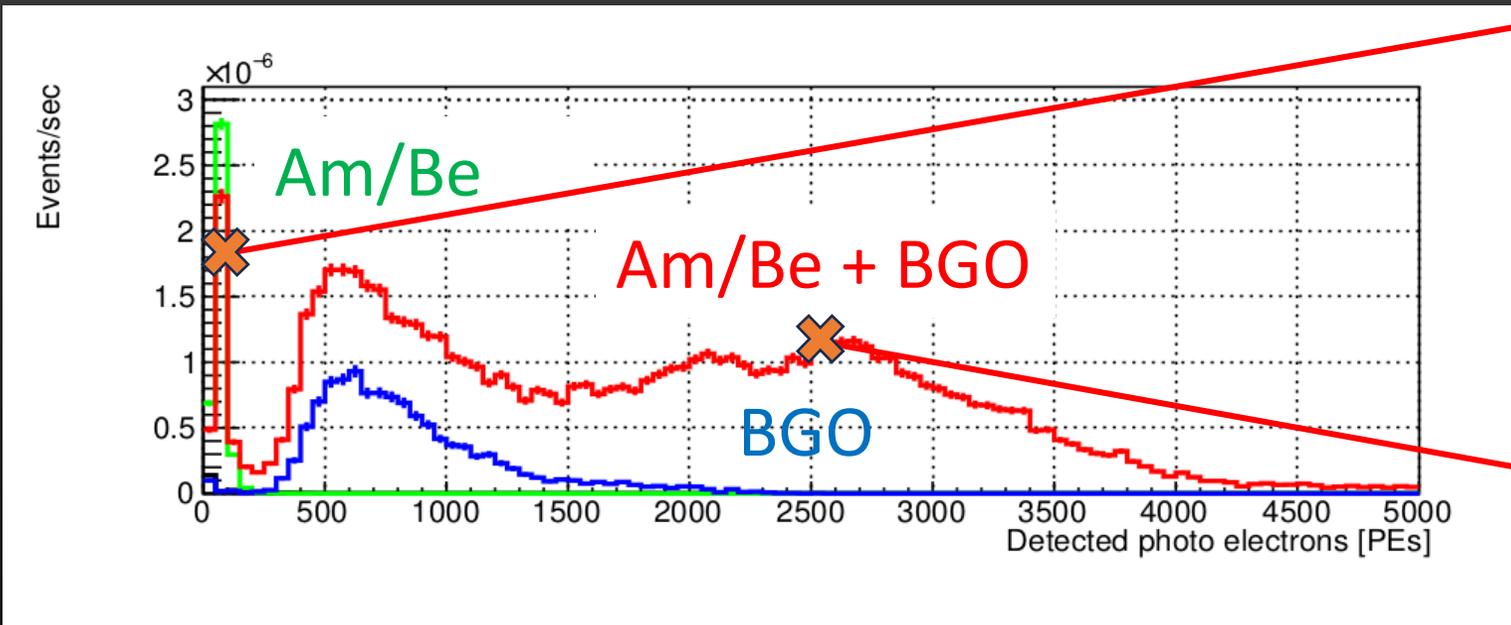
**どのような粒子が来ているのか確認する**  
**(ニュートリノ、宇宙線、環境放射線など)**

逆β崩壊反応に対する検出効率を求める(線源のデータで評価)

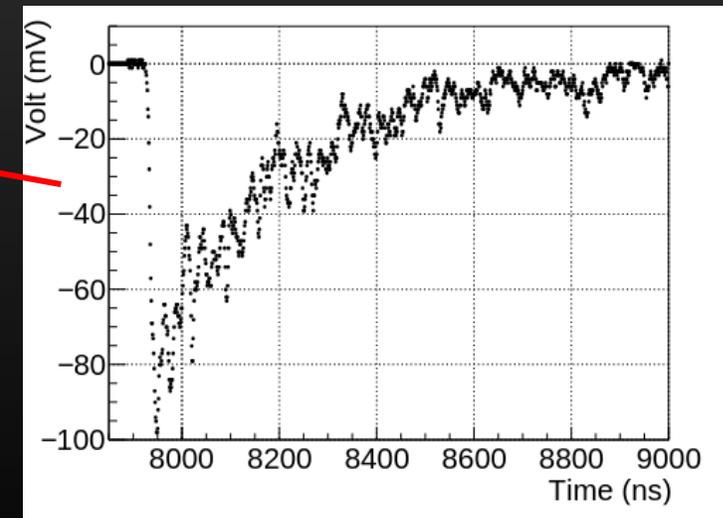
逆β崩壊反応の信号を探す

・超新星背景ニュートリノが見えるエネルギー範囲でフラックスを求める

# | 2) 測定結果 (In Water)

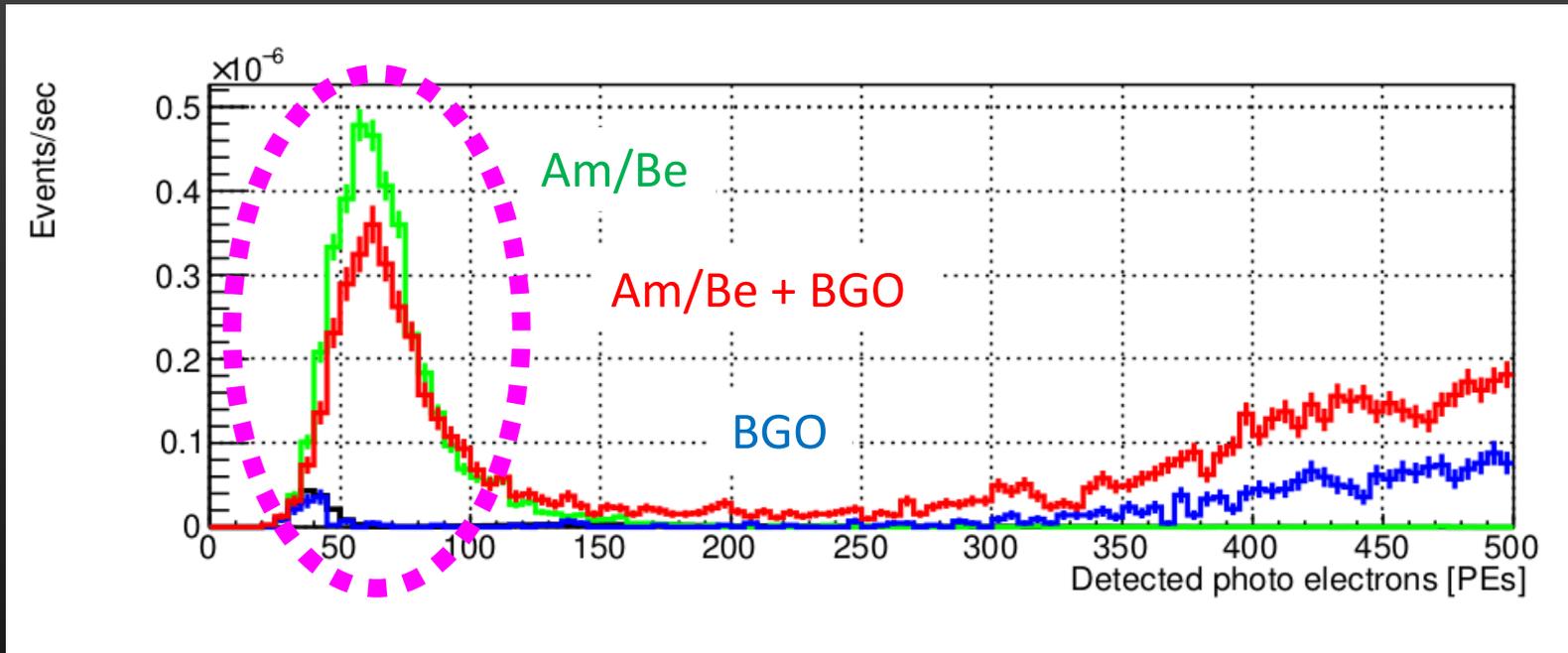


チェレンコフ光の信号(Am/Be)



シンチレーション光の信号  
(Am/B)

## 2) 60 PEs付近のピーク

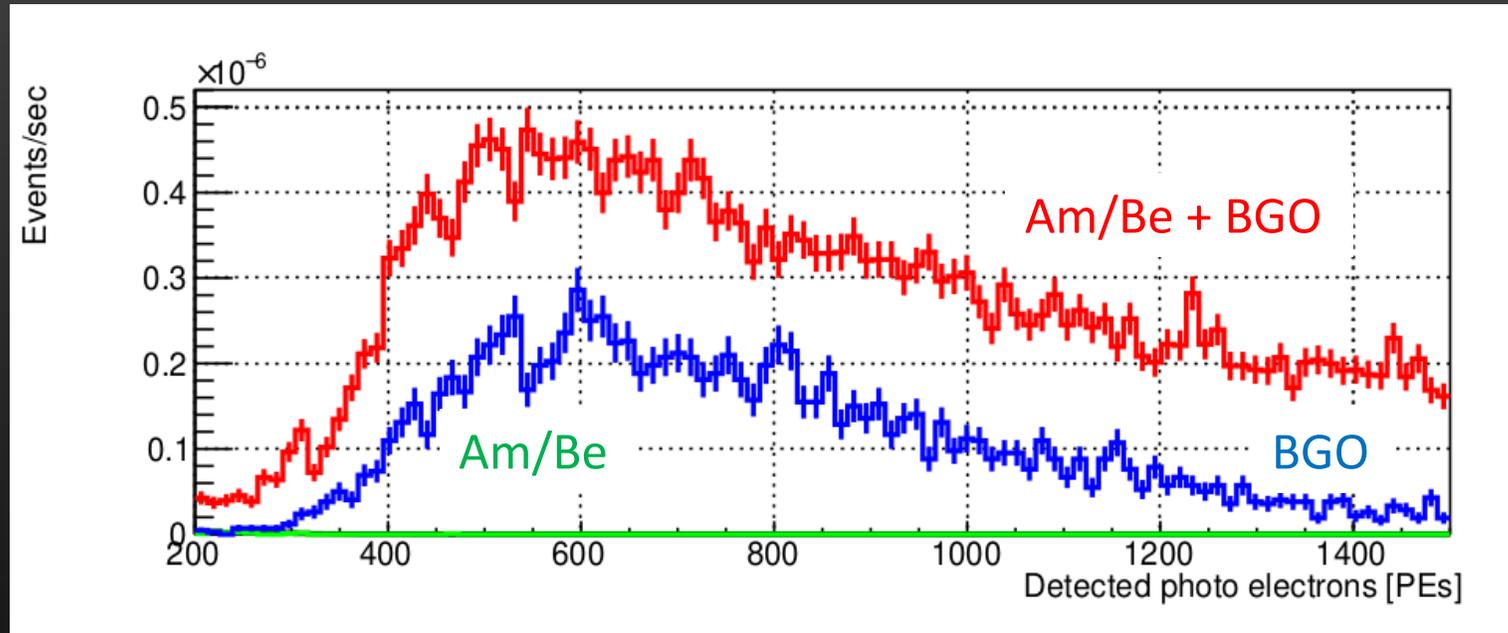


BGOのみときにはイベントがほとんど見られない

Am/Be + BGOよりAm/Beのみの方がレートが高い

$^{12}\text{C}^*$ からの $\gamma$ 線+中性子由来の $\gamma$ 線のチェレンコフ光

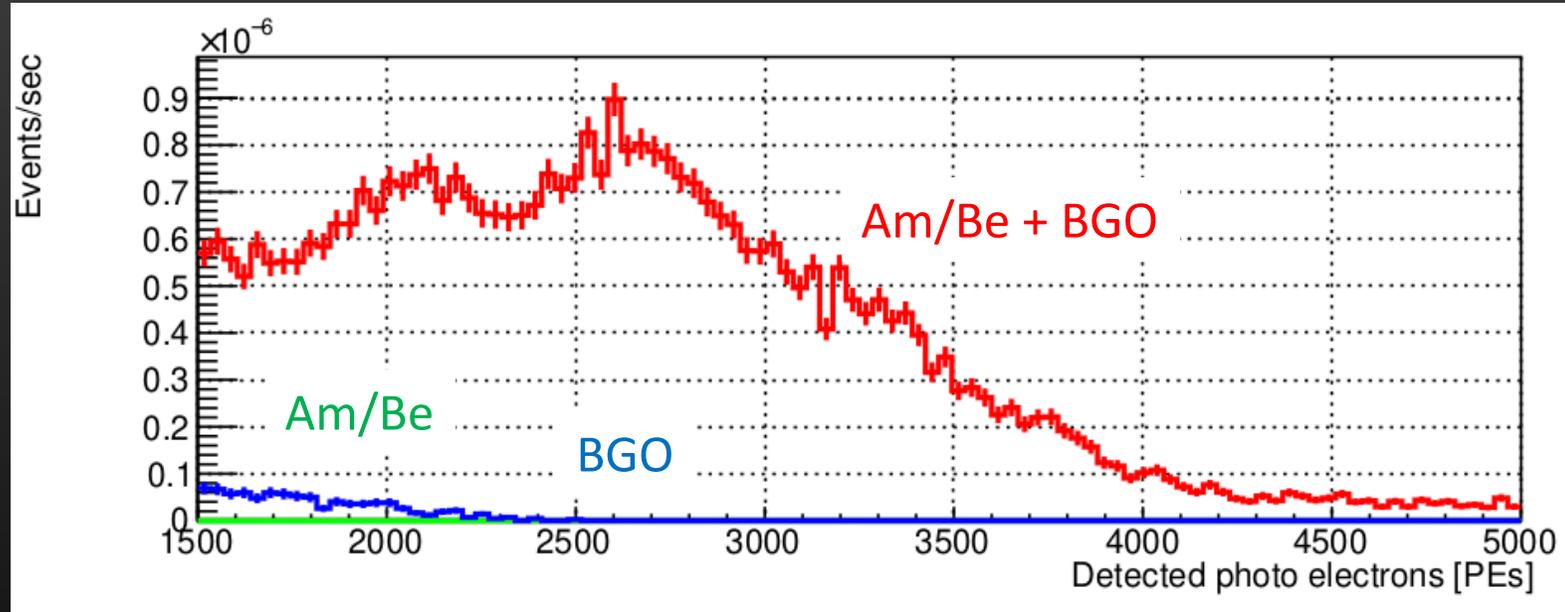
## | 2) 600 PEs付近のピーク



Am/Beのみのときには発光が見られない  
BGOのみよりAm/Be + BGOの方がレートが高い

$^{12}\text{C}^*$ からの $\gamma$ 線+環境放射線からのシンチレーション光

## | 2) 2500 PEs付近のピーク



Am/Be + BGOにのみ発光がある

$^{12}\text{C}^*$ からの $\gamma$ 線シンチレーション光

# | 2) 条件によってレートが違う理由(BGO)

## 宇宙線ミュオンの影響

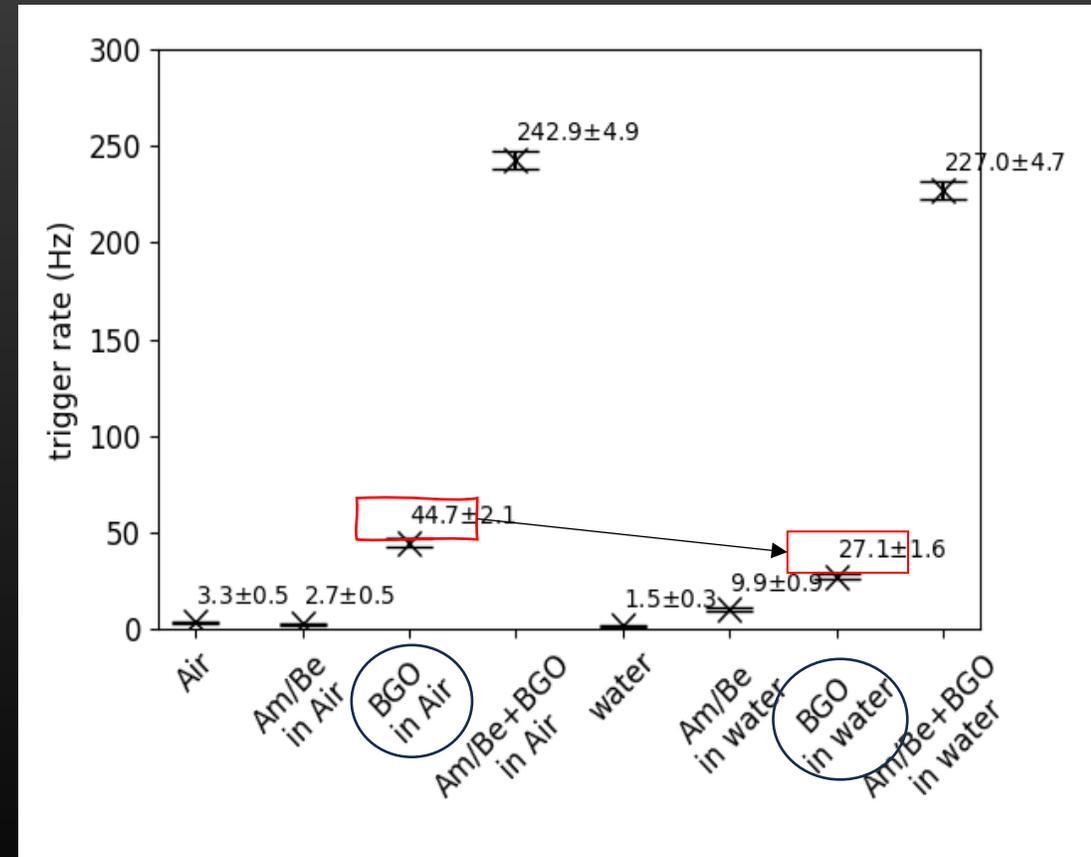
地下で多くとも $10^{-4}$ Hzになるため棄却

## 環境放射線の影響

$\alpha$ 線・ $\beta$ 線：数MeV程度で水で止まるため棄却

$\gamma$ 線：トリウム系列 $^{208}\text{Tl}$ の $\gamma$ 線(2.6MeV)の放出割合が99.2%

**$\gamma$ 線の飛程からAirからWaterが半分になっているのは妥当**



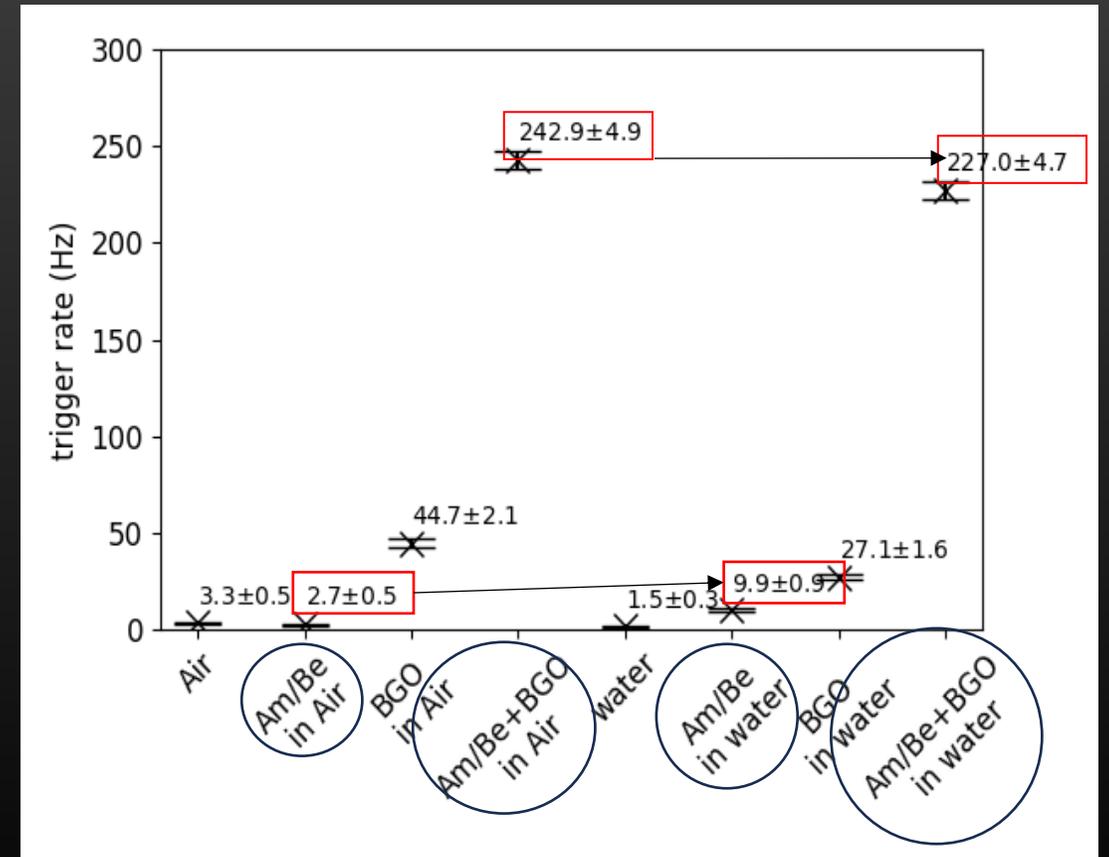
## 2) 条件によってレートが違う理由 (Am/Be, Am/Be + BGO)

### Am/Be

中性子が $\gamma$ 線を放出し光電吸収が起きたためIn Waterの方がIn Airより高い

### Am/Be + BGO

BGOのみの時のIn WaterとIn Airの違いが反映されている  
チェレンコフ光とシンチレーション光  
どちらもキャッチしている



# データ解析の流れ

PMTの性能評価のためにゲイン(増幅率)を求める

どのような粒子が来ているのか確認する

(ニュートリノ、宇宙線、環境放射線など)

**逆 $\beta$ 崩壊反応に対する検出効率を求める(線源のデータで評価)**

逆 $\beta$ 崩壊反応の信号を探す

超新星背景ニュートリノが見えるエネルギー範囲でフラックスを求める

### 3) 検出効率



$\gamma$ 線によるシンチレーション光を先発信号として続く  
**中性子の検出割合を評価**

$$\text{検出効率} = \frac{\text{検出された中性子の数}}{\text{中性子が出る反応数}}$$

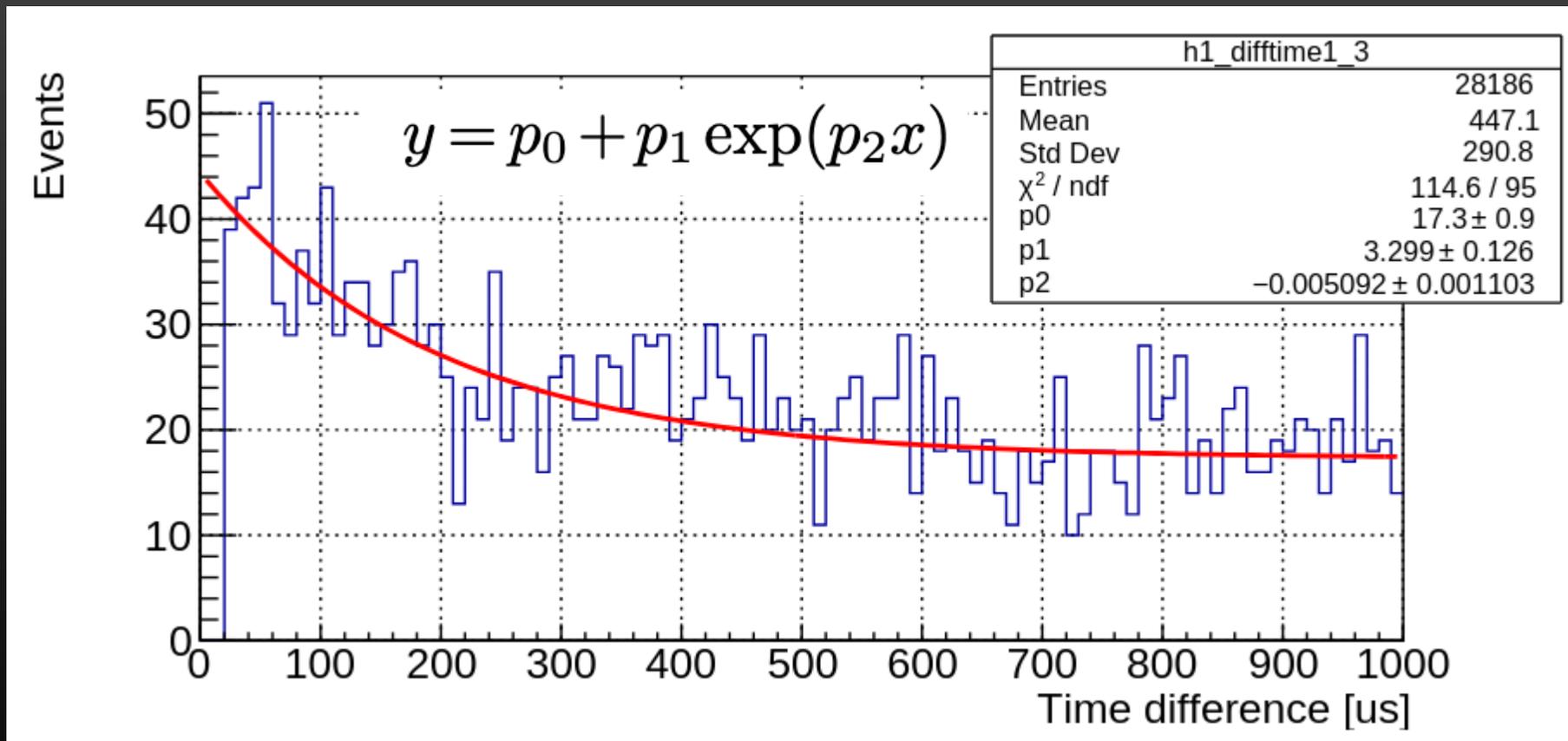
# | 3) 検出効率

$\gamma$ 線 (シンチレーション) + 中性子 (チェレンコフ)

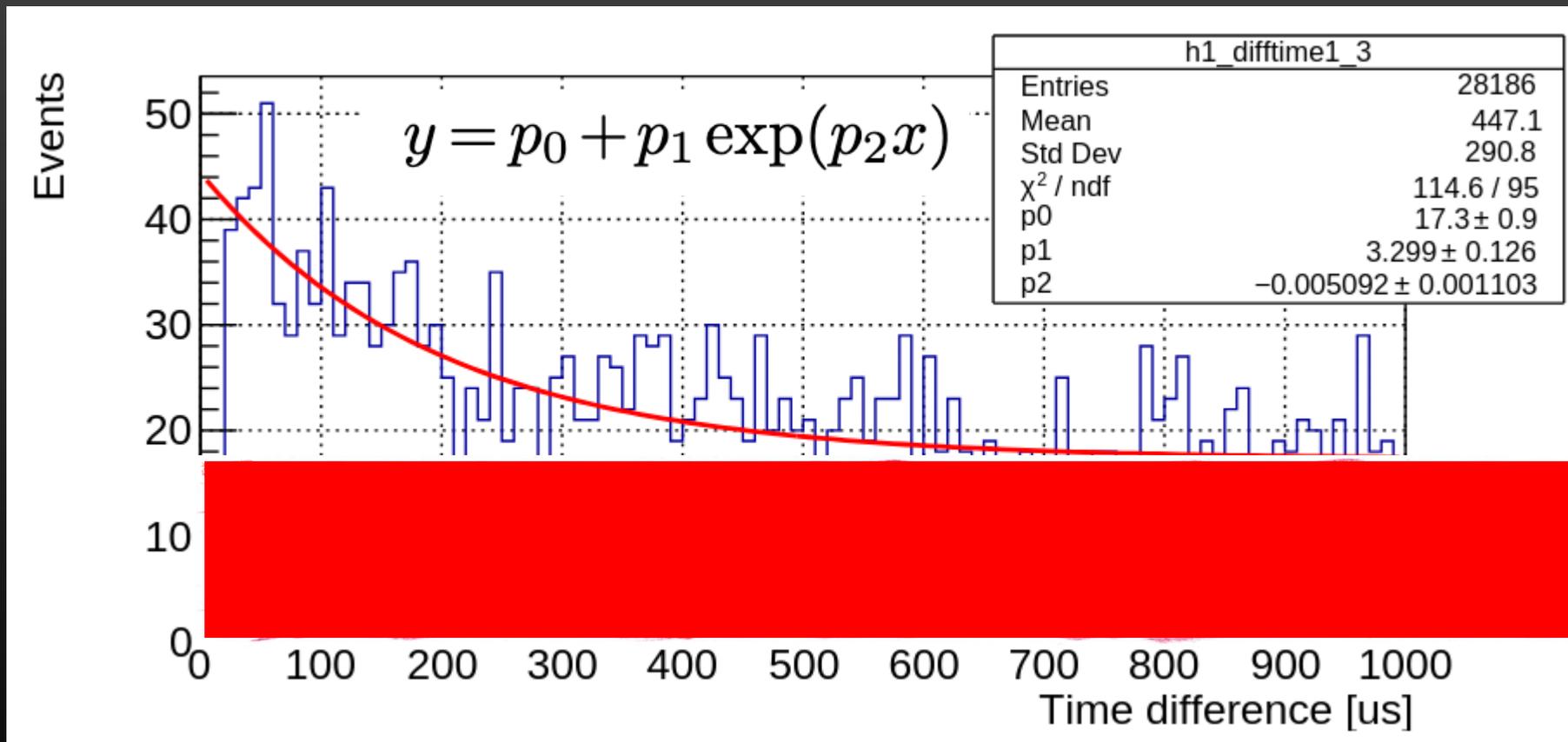
識別条件:

- ① 信号の間が短い (上限)
- ②  $\gamma$ 線のエネルギー (下限)
- ③ 先発信号の幅 (シンチレーション光か否か)

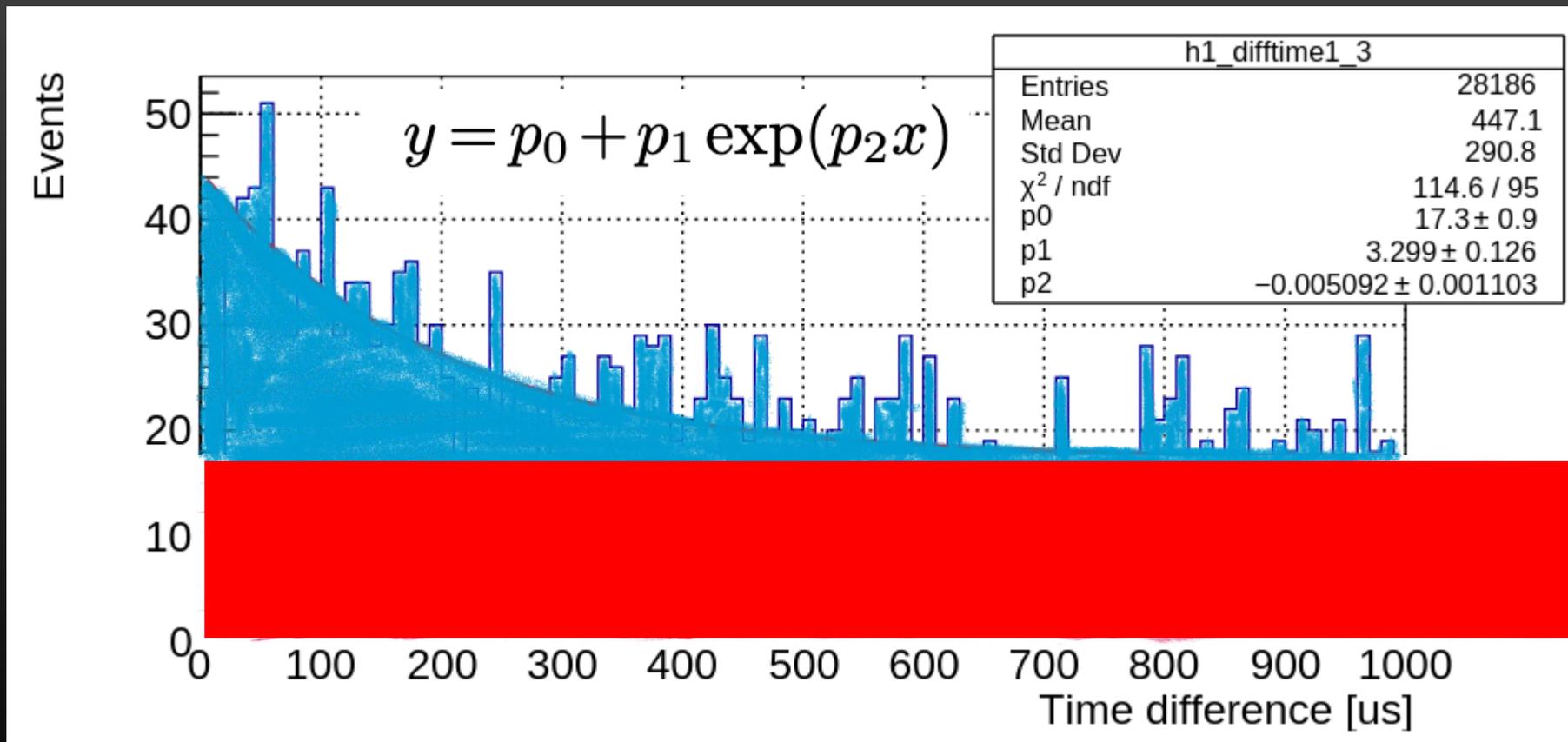
### 3) 検出効率



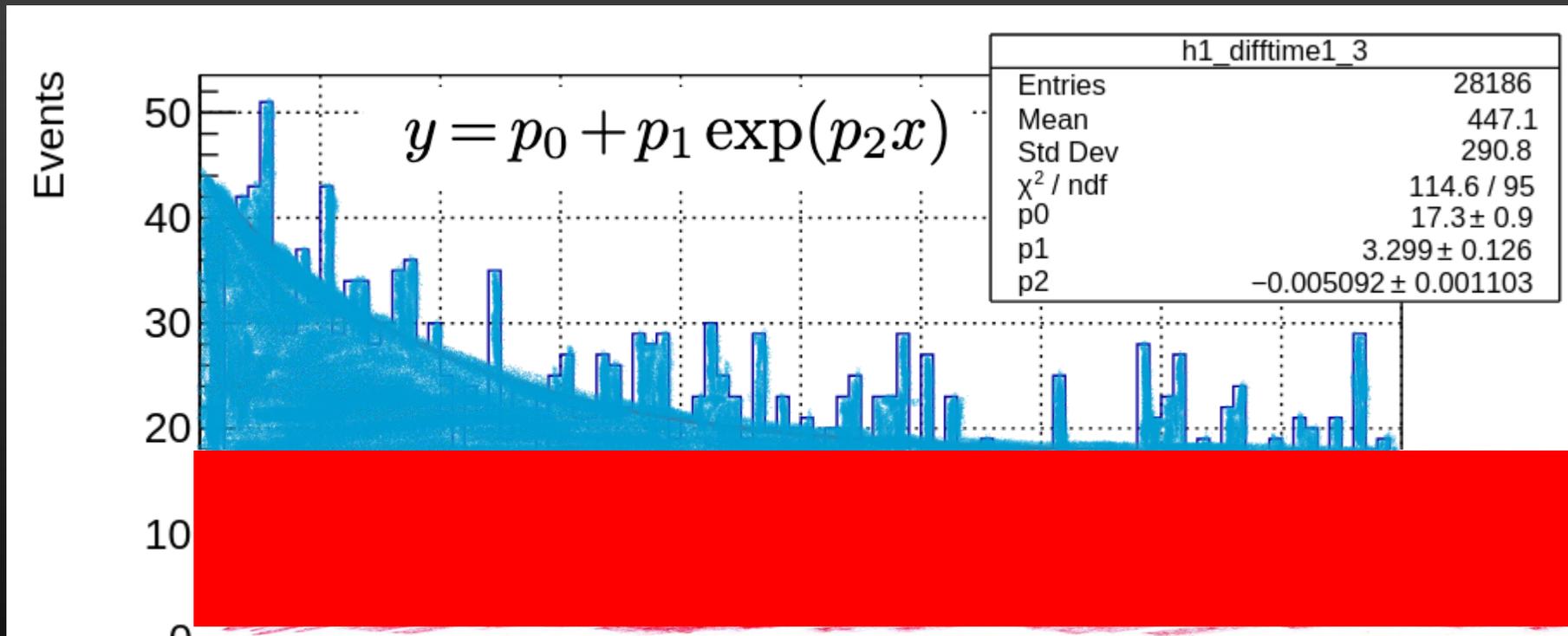
### 3) 検出効率



### 3) 検出効率



# | 3) 検出効率



検出効率 :  $\frac{\text{Blue Histogram}}{\text{Blue Histogram} + \text{Red Histogram}} = 2.0(4) \%$

$\chi^2 / n_{\text{dof}} = 114.6 / 95$

$1/p_2 \simeq 200(40) \cdot \mu\text{s}$

# データ解析の流れ

PMTの性能評価のためにゲイン(増幅率)を求める

どのような粒子が来ているのか確認する

(ニュートリノ、宇宙線、環境放射線など)

逆 $\beta$ 崩壊反応に対する検出効率を求める(線源のデータで評価)

**逆 $\beta$ 崩壊反応の信号を探す**

超新星背景ニュートリノが見えるエネルギー範囲でフラックスを求める

# | 4) ニュートリノの信号

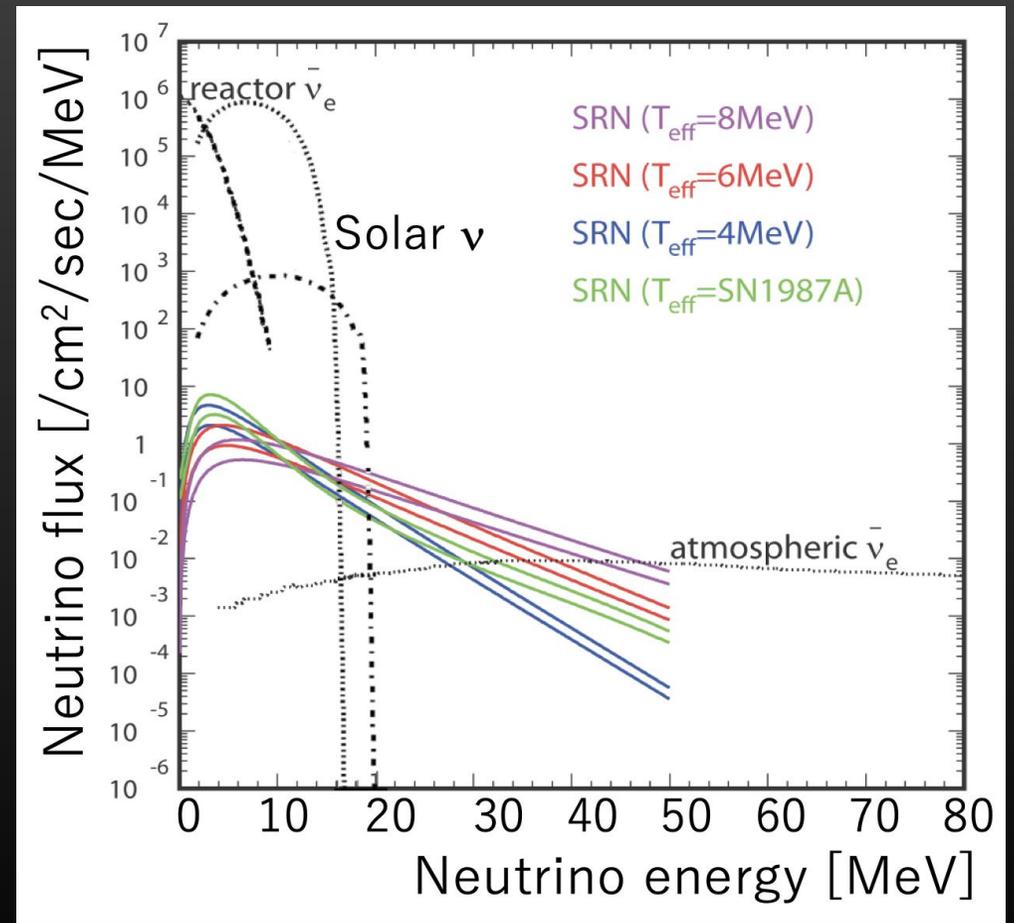
識別条件：

- 陽電子と中性子の信号の時間差
- エネルギーの上限/下限 (MC)

エネルギーの範囲

測定可能なニュートリノのE (20-30 MeV)

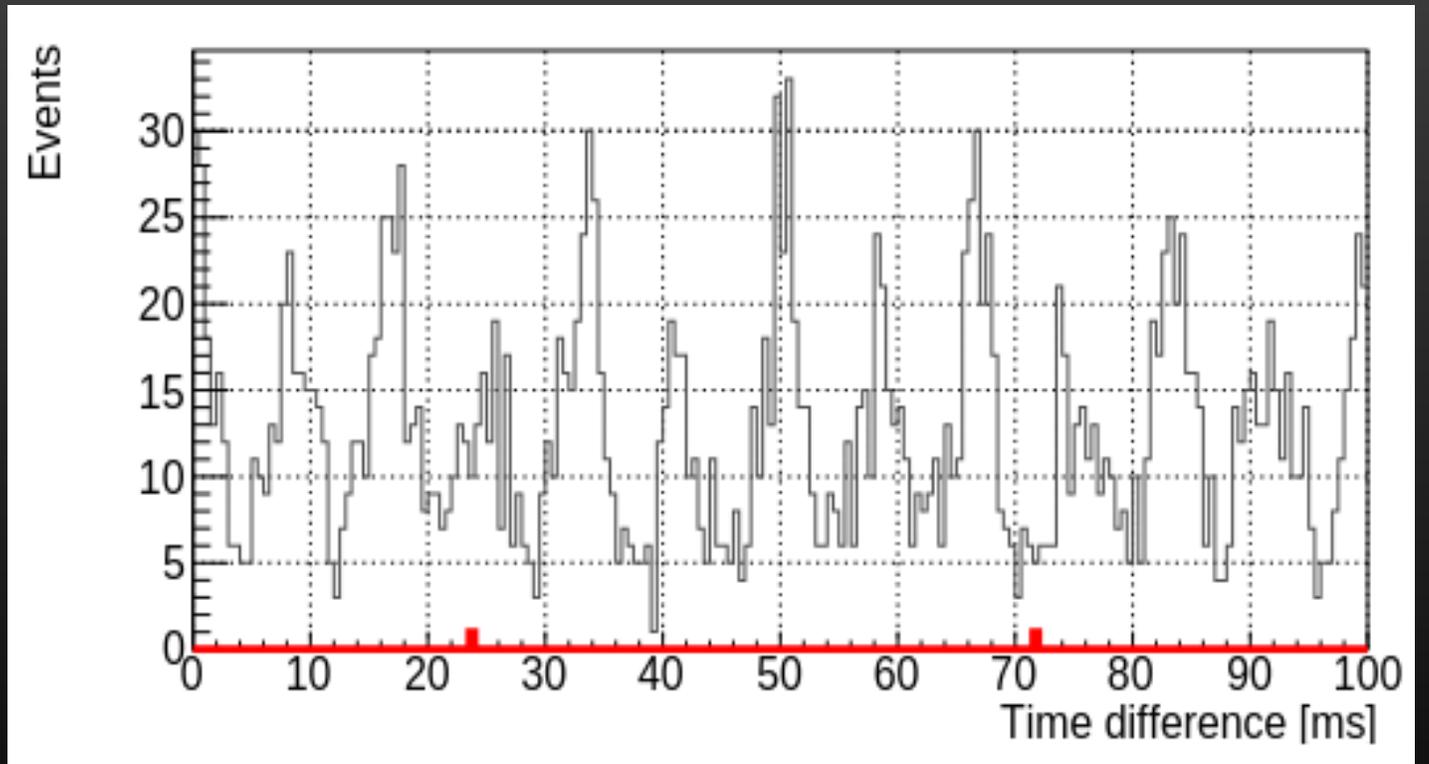
- 対応する陽電子の平均E (文献)
- 陽電子によるチェレンコフ光のエネルギー分布



# | 4) ニュートリノの信号

- 黒：全ての信号
- 赤：識別条件あり

反電子ニュートリノ  
の数は0



# データ解析の流れ

PMTの性能評価のためにゲイン(増幅率)を求める

どのような粒子が来ているのか確認する

(ニュートリノ、宇宙線、環境放射線など)

逆 $\beta$ 崩壊反応に対する検出効率を求める(線源のデータで評価)

逆 $\beta$ 崩壊反応の信号を探す

**超新星背景ニュートリノが見えるエネルギー範囲でフラックスを求める**

## 5) フラックスの上限

$$N_{\text{exp}} = \tau \times N_p \times \int_{E_{\text{min}}}^{E_{\text{max}}} \sigma(E_\nu) \phi(E_\nu) dE_\nu$$

$N_{\text{exp}}$  : 検出器内で発生する予想事象数

$\tau$  : 測定時間

$\sigma(E_\nu)$  : 反応断面積

$N_p$  : 検出器内の陽子数

$\phi(E_\nu)$  : フラックス

## | 5) フラックスの上限

$$N_{\text{exp}} = \tau \times N_p \times \int_{E_{\text{min}}}^{E_{\text{max}}} \sigma(E_\nu) \phi(E_\nu) dE_\nu$$

$N_{\text{exp}}$  : 検出器内で発生する予想事象数

$\tau$  : 測定時間

測定

$\sigma(E_\nu)$  : 反応断面積

文献

$N_p$  : 検出器内の陽子数

計算

$\phi(E_\nu)$  : フラックス

## | 5) フラックスの上限

$N_{\text{exp}}$  : 検出器内で発生する予想事象数

測定したニュートリノの数 $\sim$ ポアソン分布

値が0になる90%信頼区間で確率の上限をかける

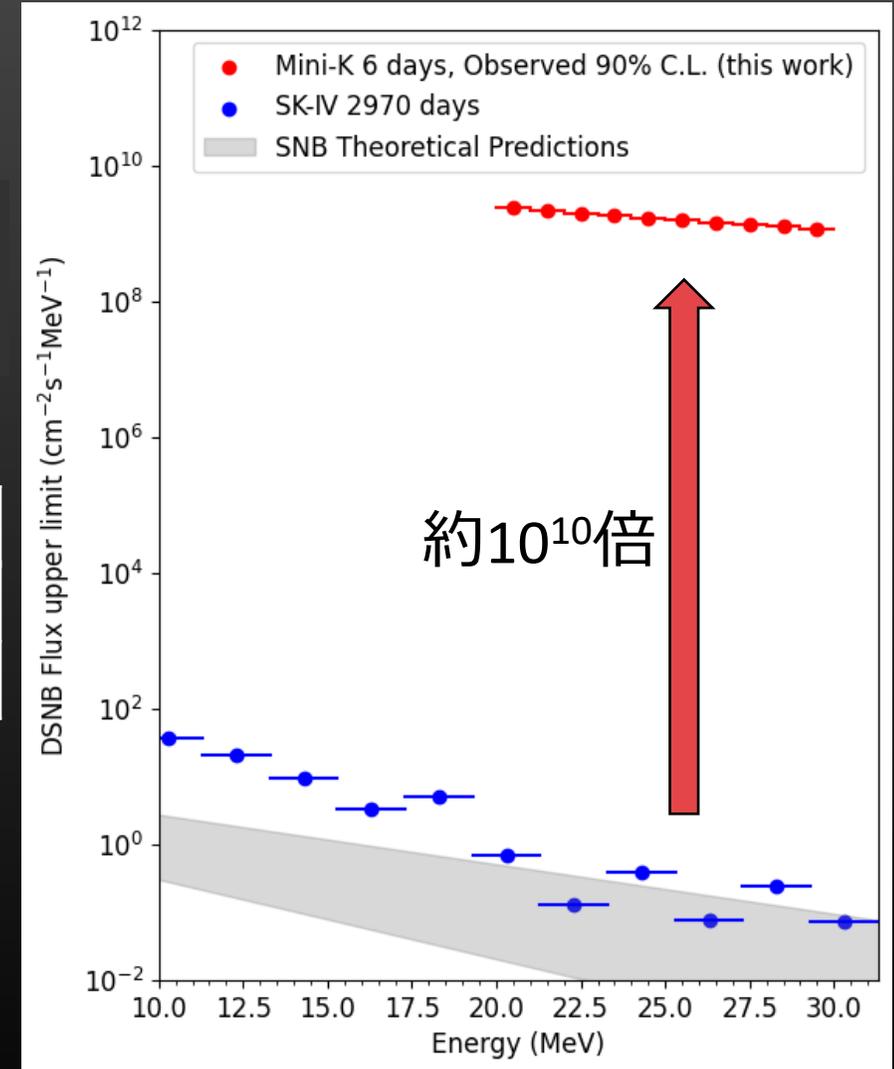
$$\frac{\text{測定できたニュートリノ (上限)}}{\text{検出効率}} = \text{検出器内で反応するニュートリノ (上限)}$$

# | 5) フラックスの上限

$$\phi(E_\nu) = 1.2 \times 10^9 \sim 2.4 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ MeV}^{-1}$$

	Mini-K	SK-IV
Exposure (kg · day)	40×6	2.25×10 <sup>7</sup> ×2970
検出効率	2.0%	≈20%

Exposureと検出効率の違いを考えると妥当な結果



05

まとめ

# | 本実験のまとめ

- 検出器の校正のためにPMTの**ゲイン**(増幅率)を求めた
- 宇宙線や環境放射線によるレートは**適切に評価された**
- Am/Be線源を中性子源として**検出効率2.0(4)%**を求められた
- 超新星背景ニュートリノ放射(DSNB)は**見られなかった**
- 20~30 MeVのエネルギーにおけるDSNBのフラックスの上限として **$1.2 \times 10^9 \sim 2.4 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{MeV}^{-1}$** を得た

# | 今後の展望

- **外水槽の追加**などによるバックグラウンドの低減
- シミュレーション等を用いて**Cutを厳密にする**ことで検出効率の向上
- **検出器の大型化**で脱出する中性子や $\gamma$ 線の割合を低減して検出効率を向上できる
- **Exposureを増やす**ことでフラックスに対する制限を厳密にできる

# Thank you for listening!

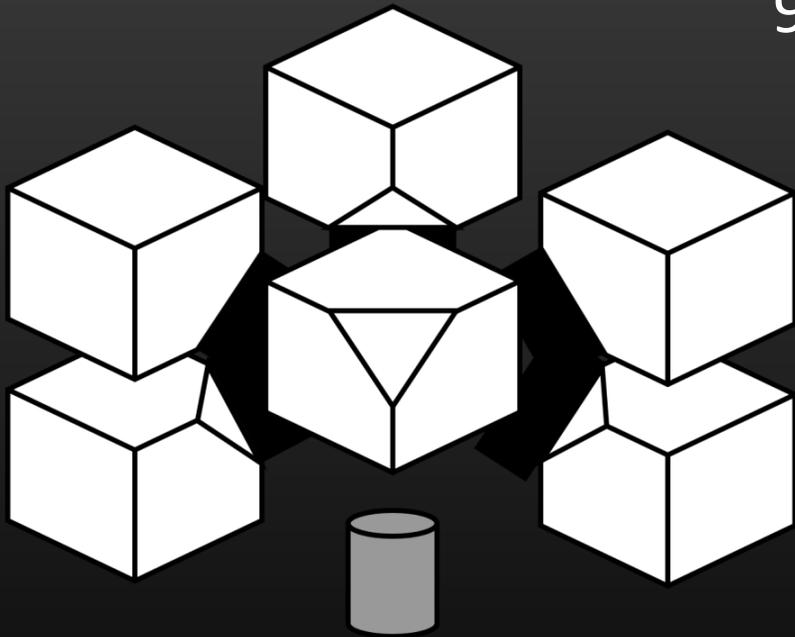


06

Back Up

# Am/Be 線源

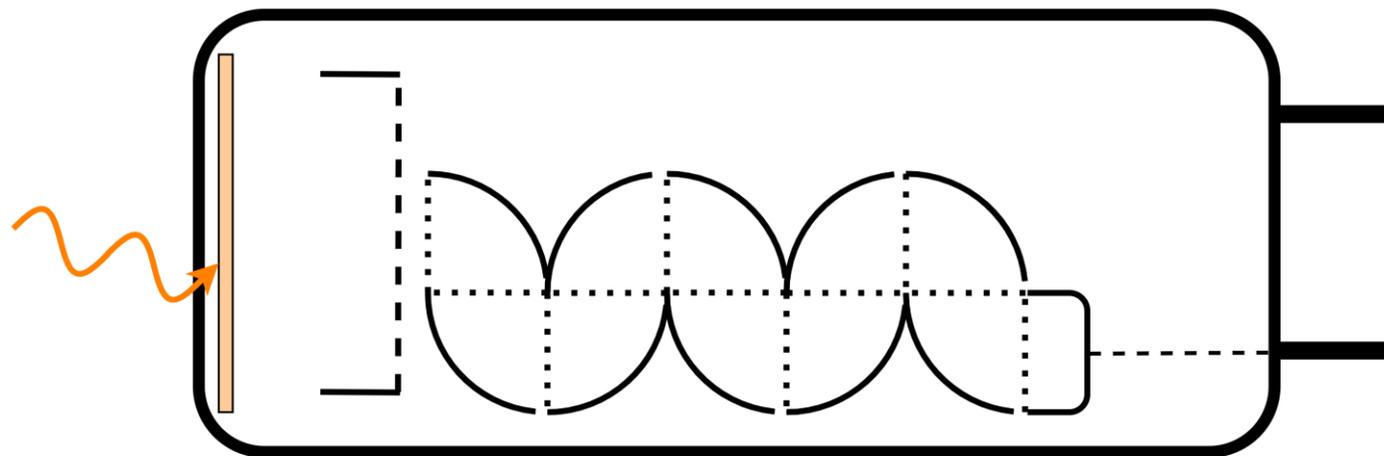
Amが崩壊放出した $\alpha$ 線をBeが吸収し、中性子を放出



**Am/Be線源+BGOシンチレータ**



# | 光電子増倍管 (PMT)



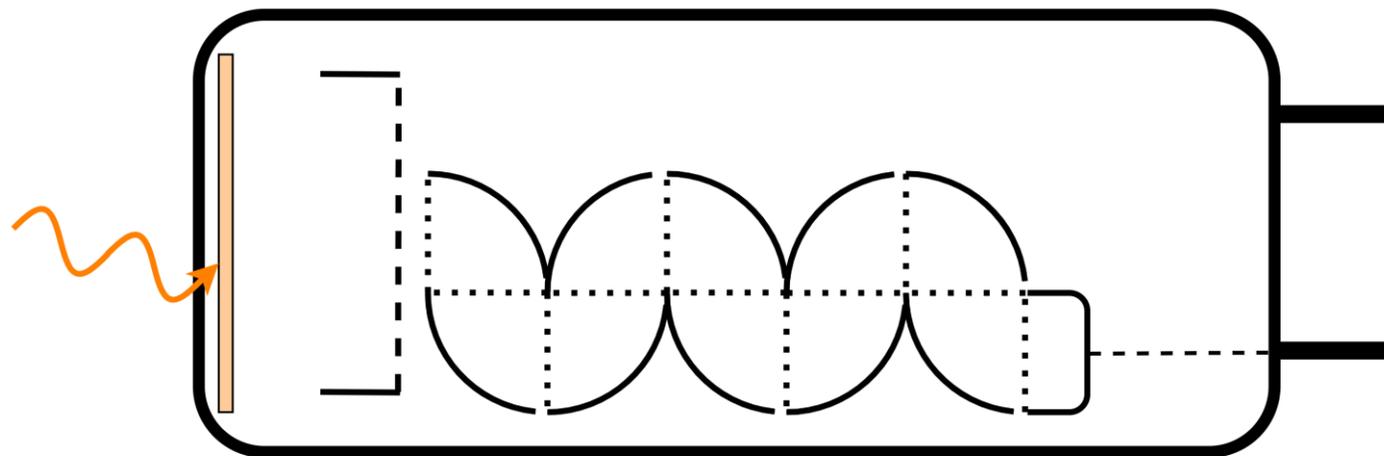
光電子を放出  
(光電効果)

電圧による加速

2次電子放出  
(繰り返し)

陰極へ  
( $\times 10^6 \sim 10^7$ )

# | 光電子増倍管 (PMT)



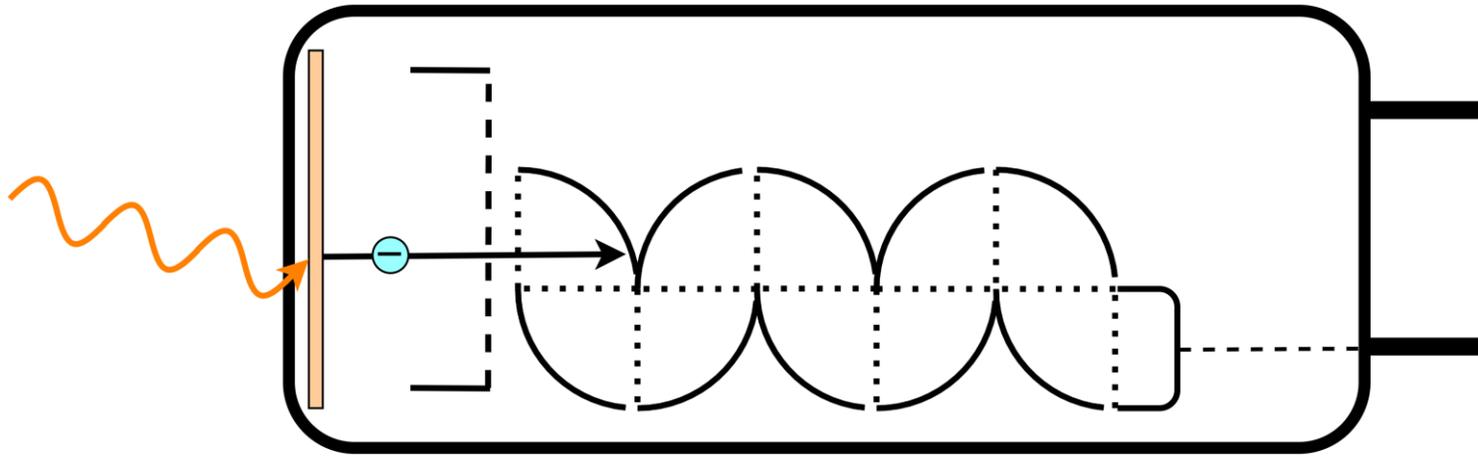
光電子を放出  
(光電効果)

電圧による加速

2次電子放出  
(繰り返し)

陰極へ  
( $\times 10^6 \sim 10^7$ )

# | 光電子増倍管 (PMT)



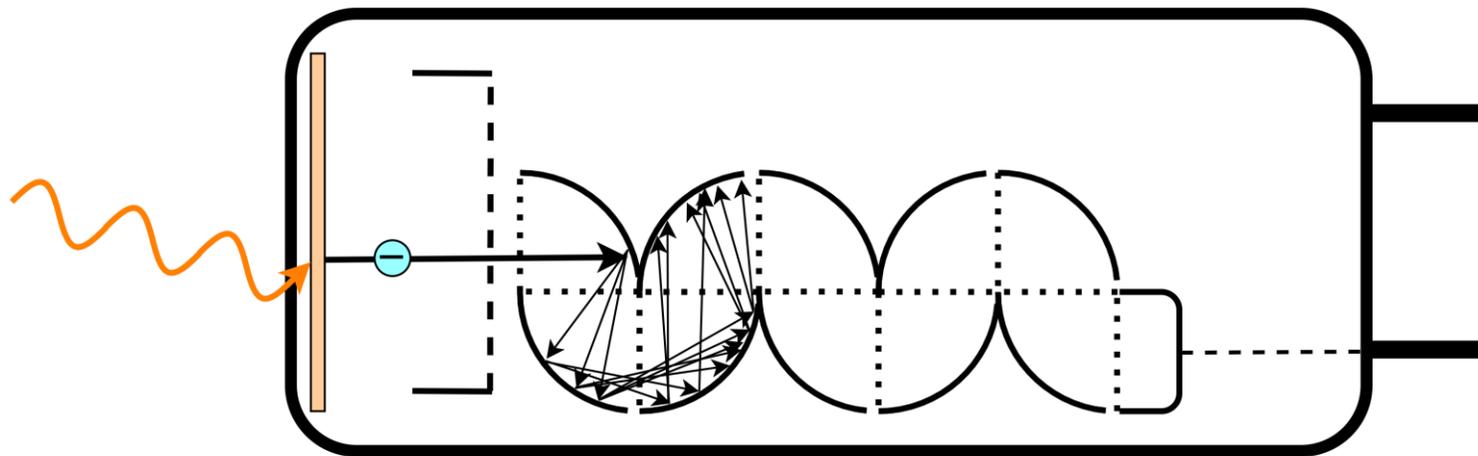
光電子を放出  
(光電効果)

電圧による加速

2次電子放出  
(繰り返し)

陰極へ  
( $\times 10^6 \sim 10^7$ )

# | 光電子増倍管 (PMT)



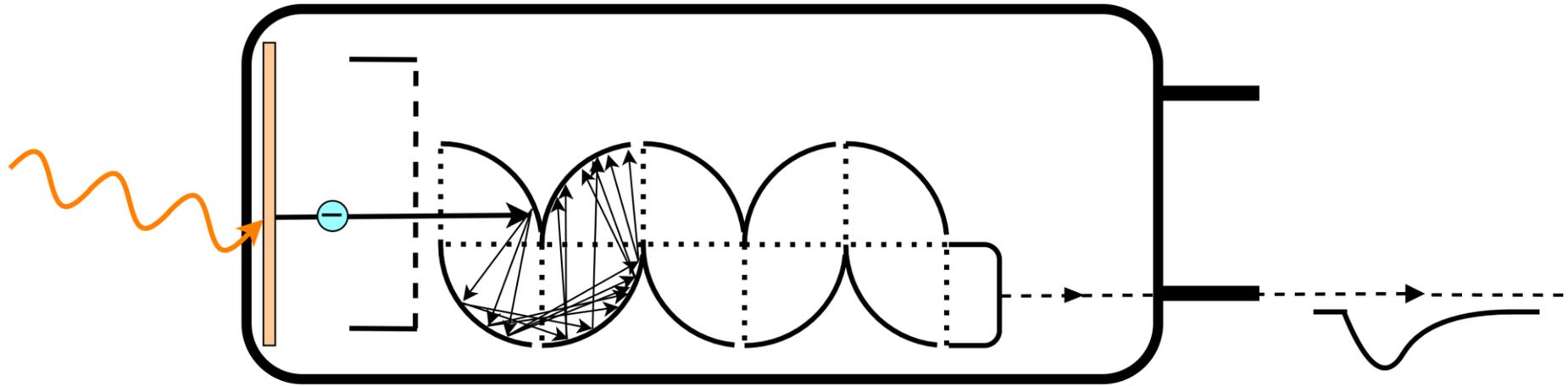
光電子を放出  
(光電効果)

電圧による加速

2次電子放出  
(繰り返し)

陰極へ  
( $\times 10^6 \sim 10^7$ )

# | 光電子増倍管 (PMT)



光電子を放出  
(光電効果)

電圧による加速

2次電子放出  
(繰り返し)

陰極へ  
( $\times 10^6 \sim 10^7$ )

# DAQ(Data AcQuisition)

## What is DAQ?

- PMTからの信号を収集・記録するシステム
- 電気信号の測定で信号を適切に処理・記録するための**NIMモジュール**を使用

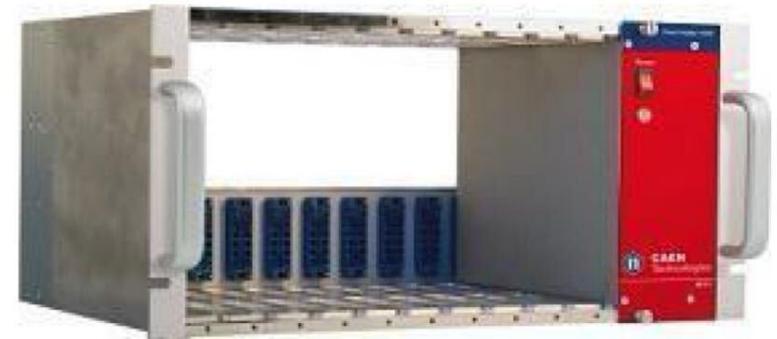
## NIM(Nuclear Instrumentation Module)

- モジュールごとに1つずつ機能を備える
- **NIMビン**に収納+電源クレートに入れて使用



← NIMモジュール

↓ NIMビン

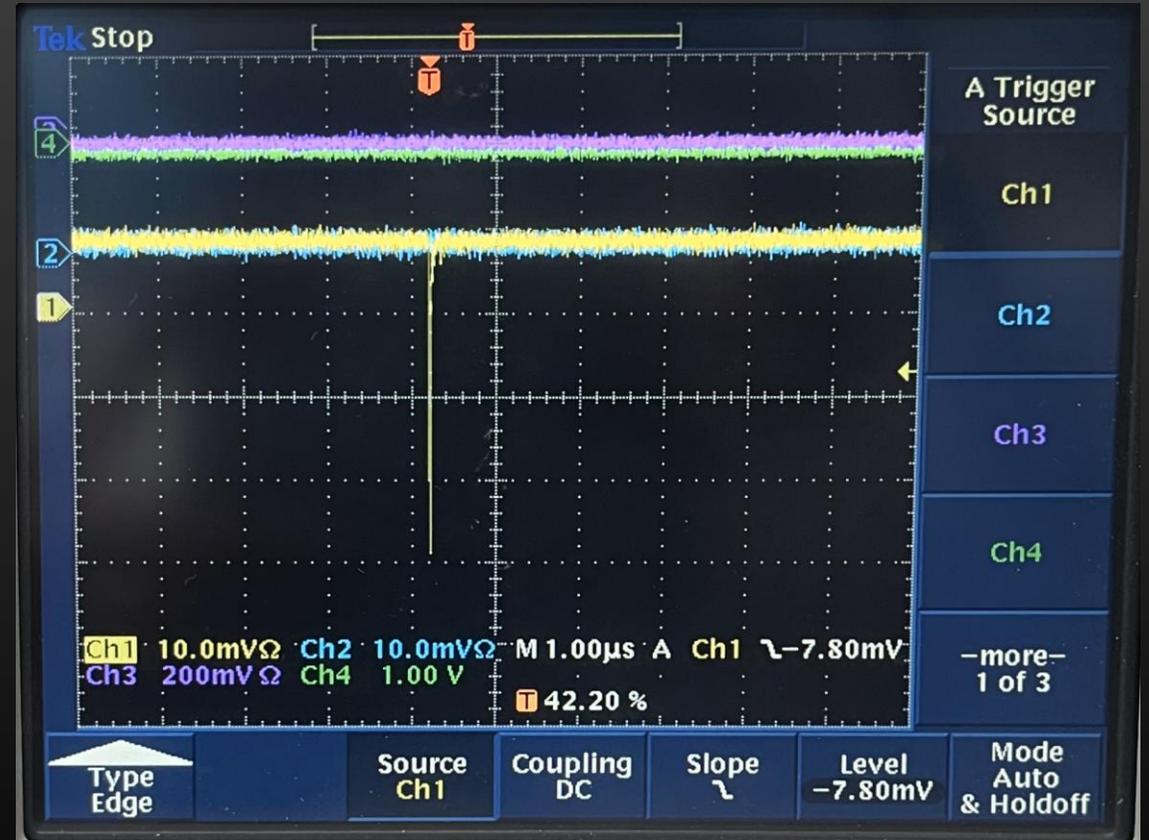


# Mini-K 内容

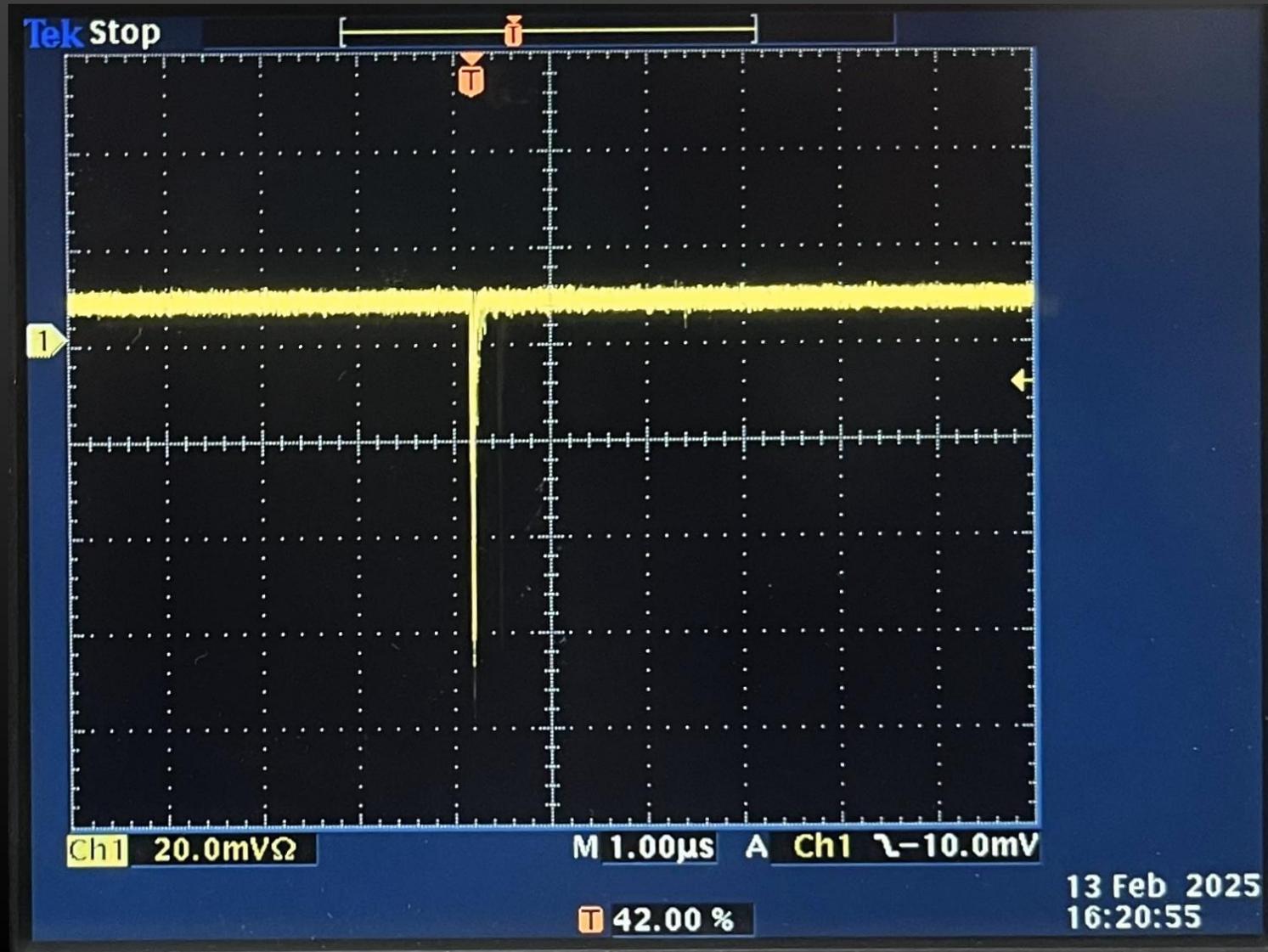
名称	個数
PMT (20 cm)	2
DC 電源	2
オシロスコープ	1
FADC	1
NIM規格	
水槽	1
架台	1
暗幕	1
LED	1
Am/Be 線源+BGO	1
純水	適量(40L)
反射材	1



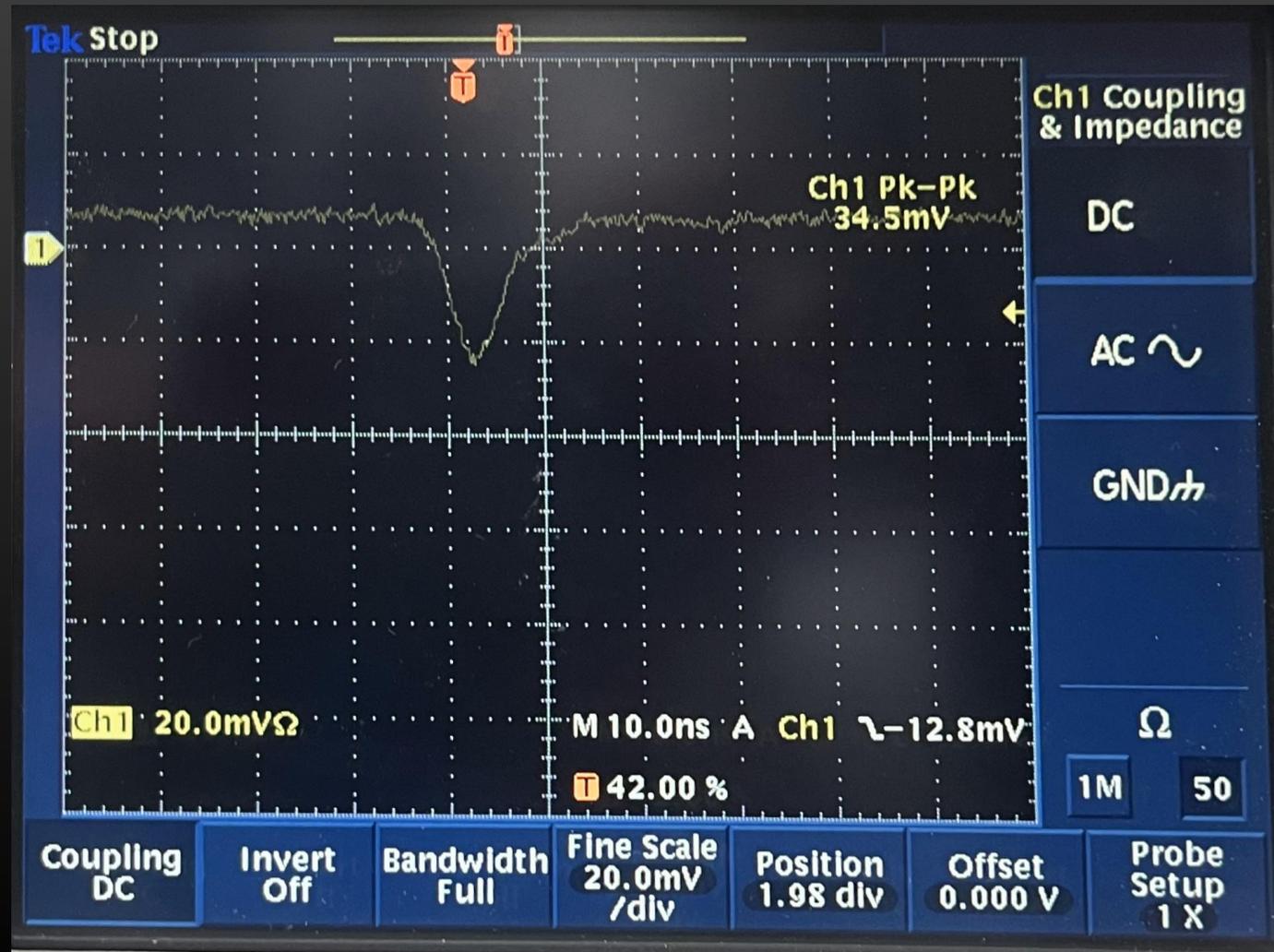
# オシロスコープ信号波形 (Air)



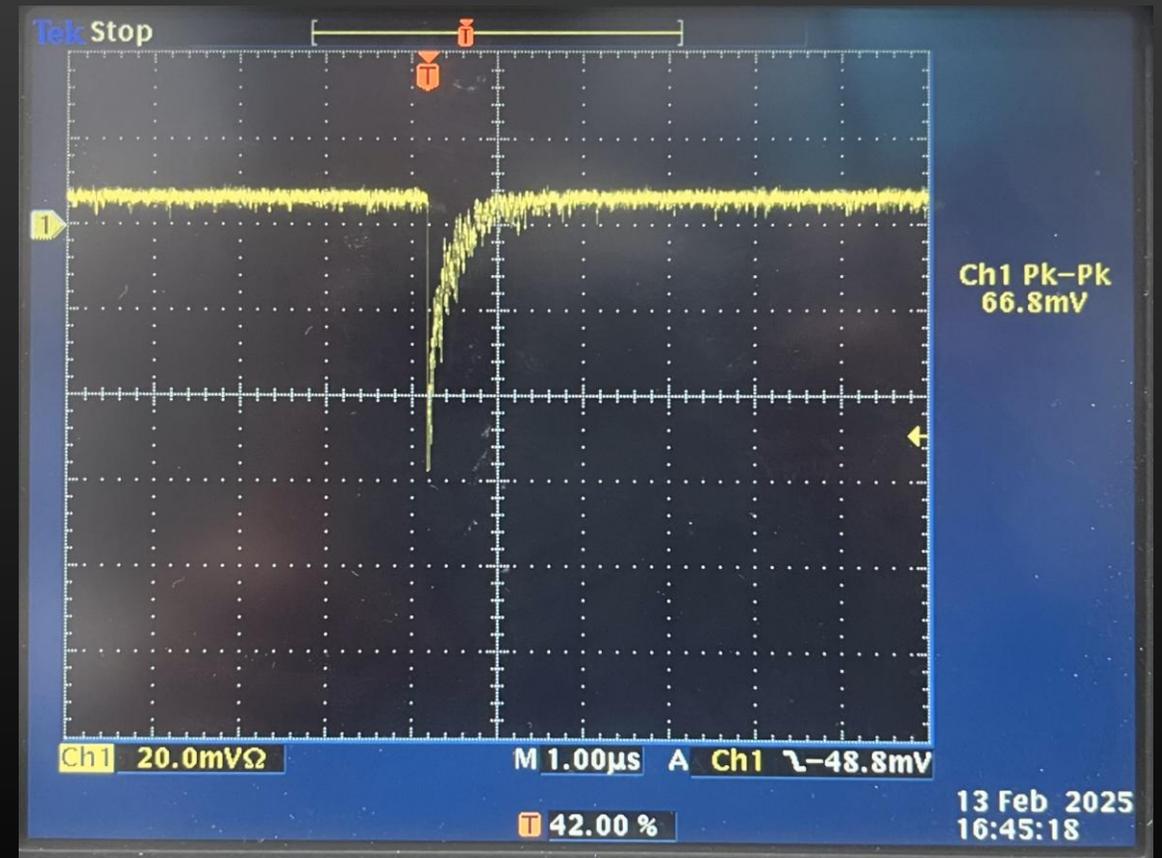
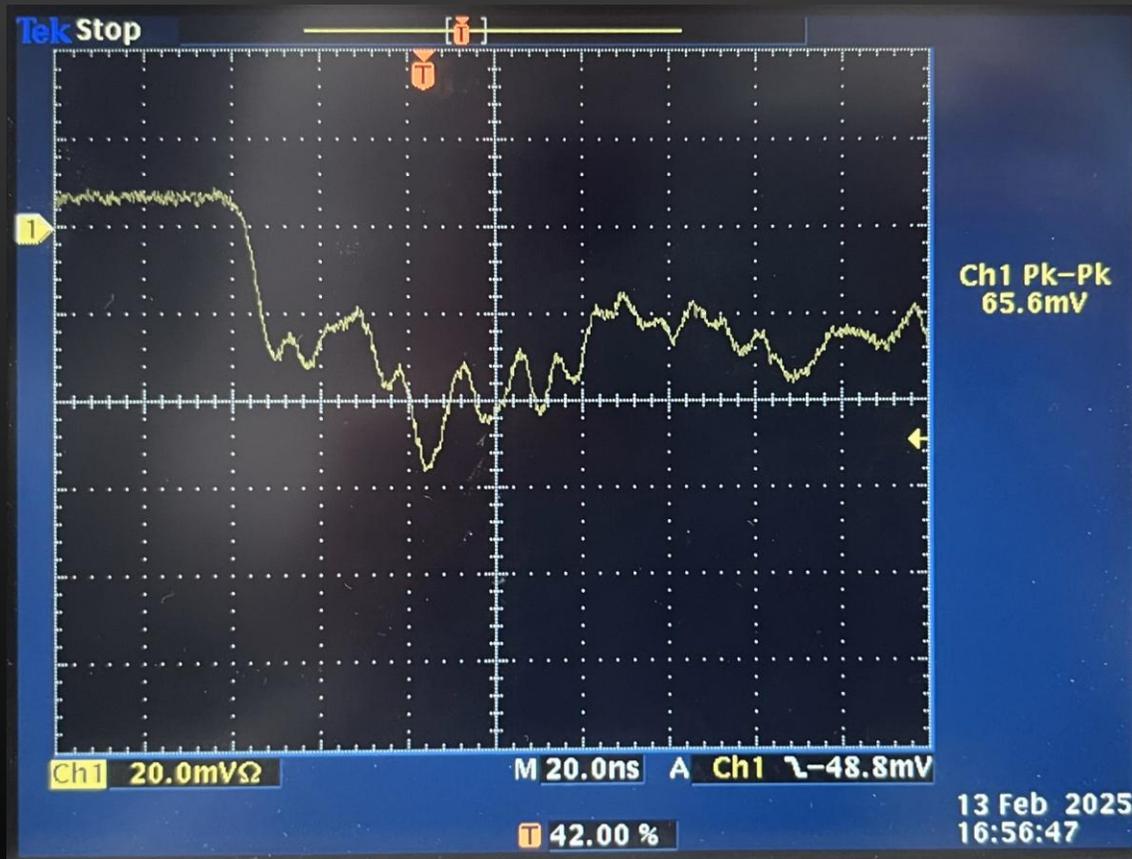
# オシロスコープ信号波形 (LED in Air)



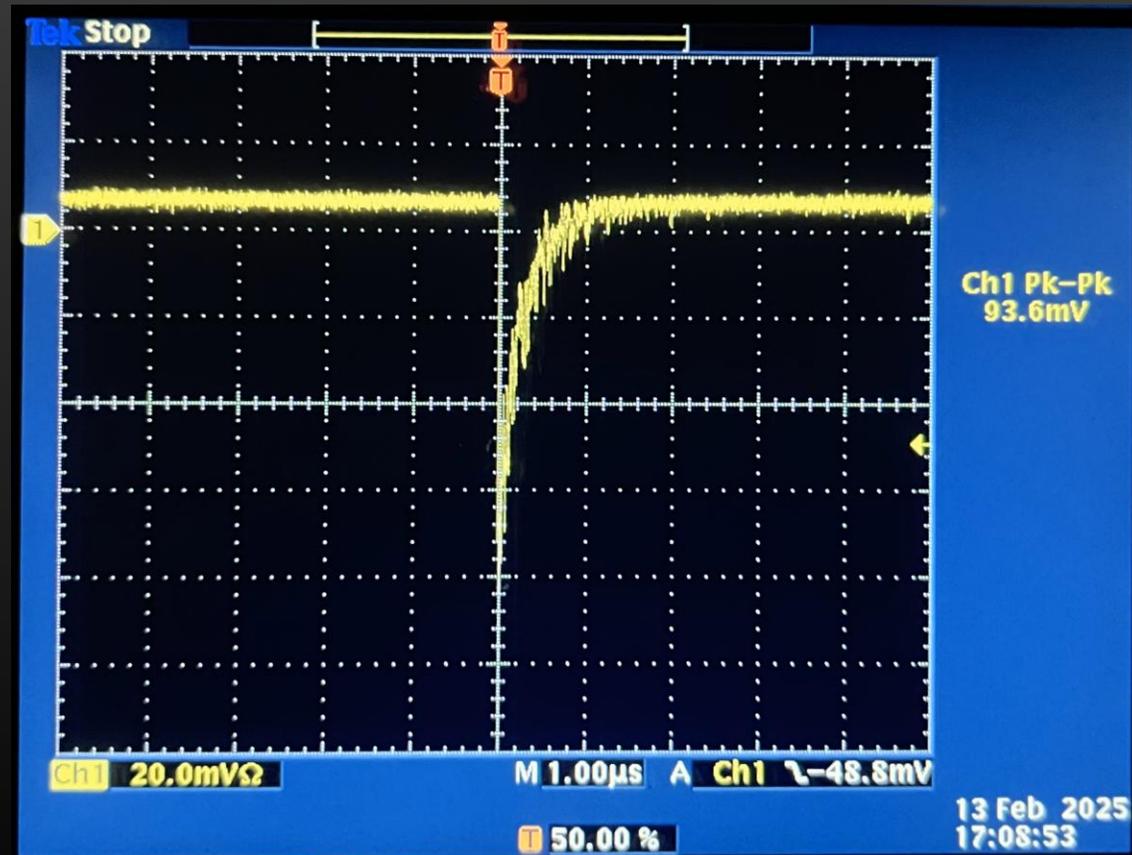
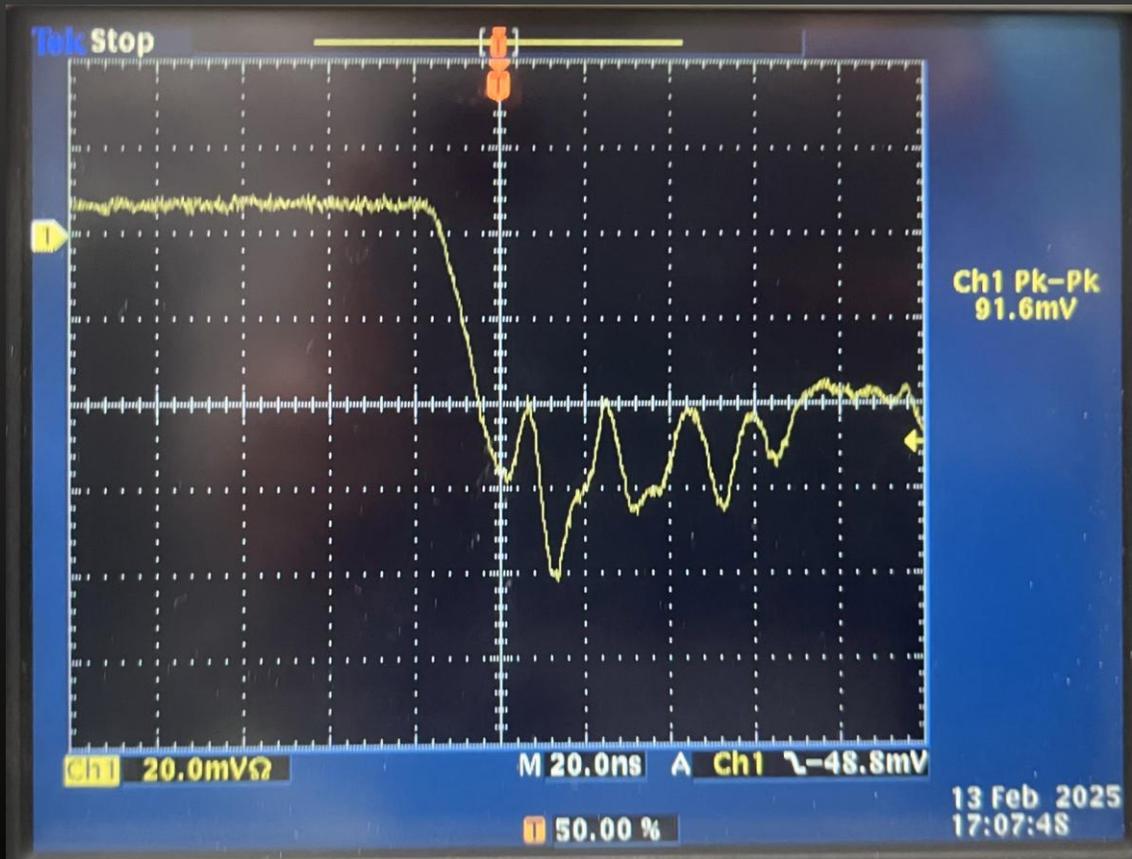
# オシロスコープ信号波形 (Am/Be in Air)



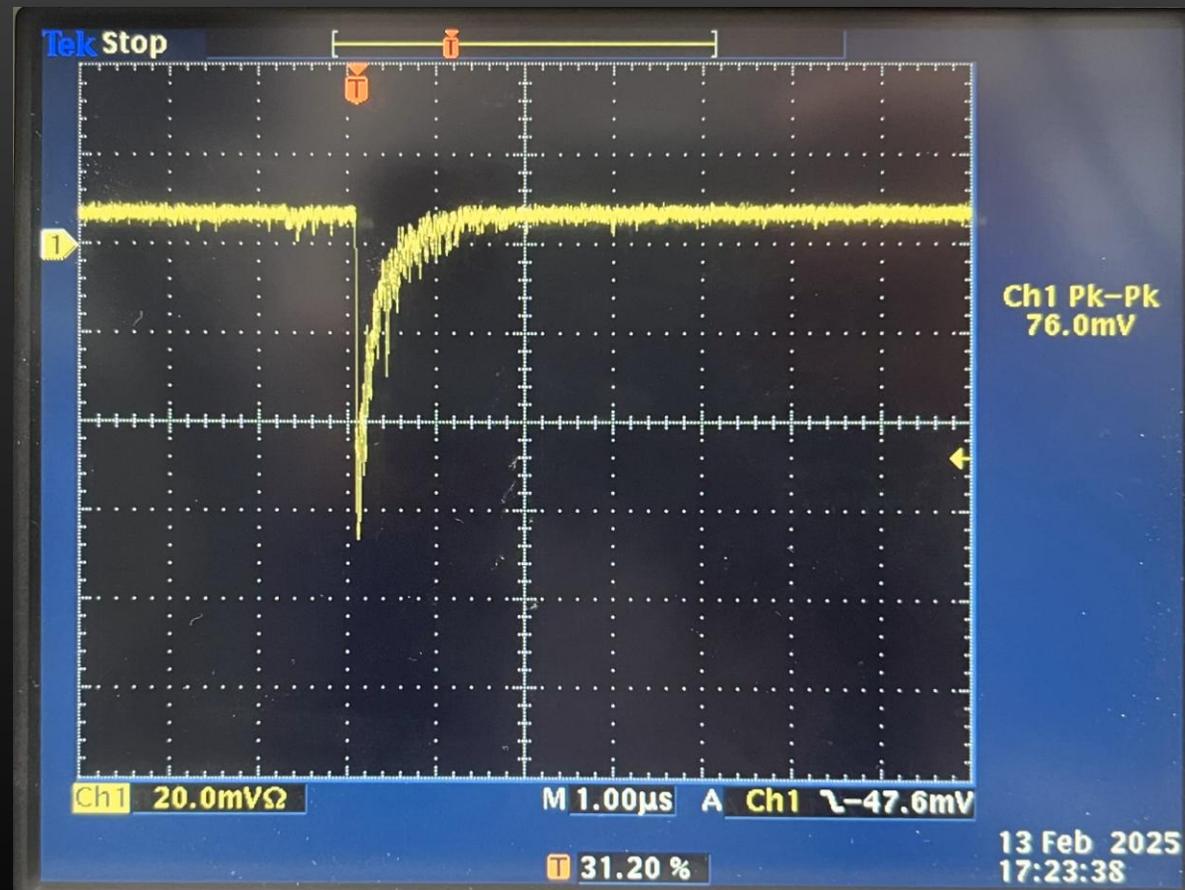
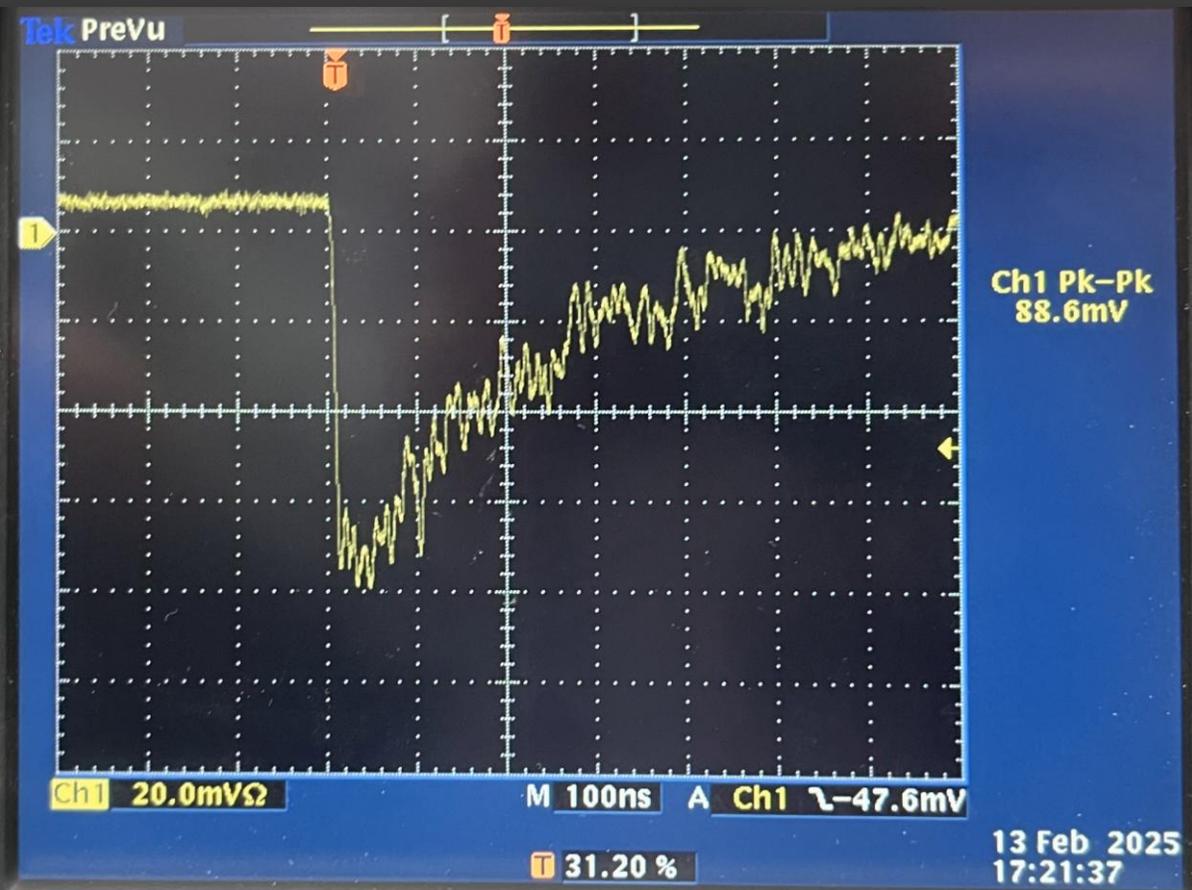
# オシロスコープ信号波形 (BGO in Air)



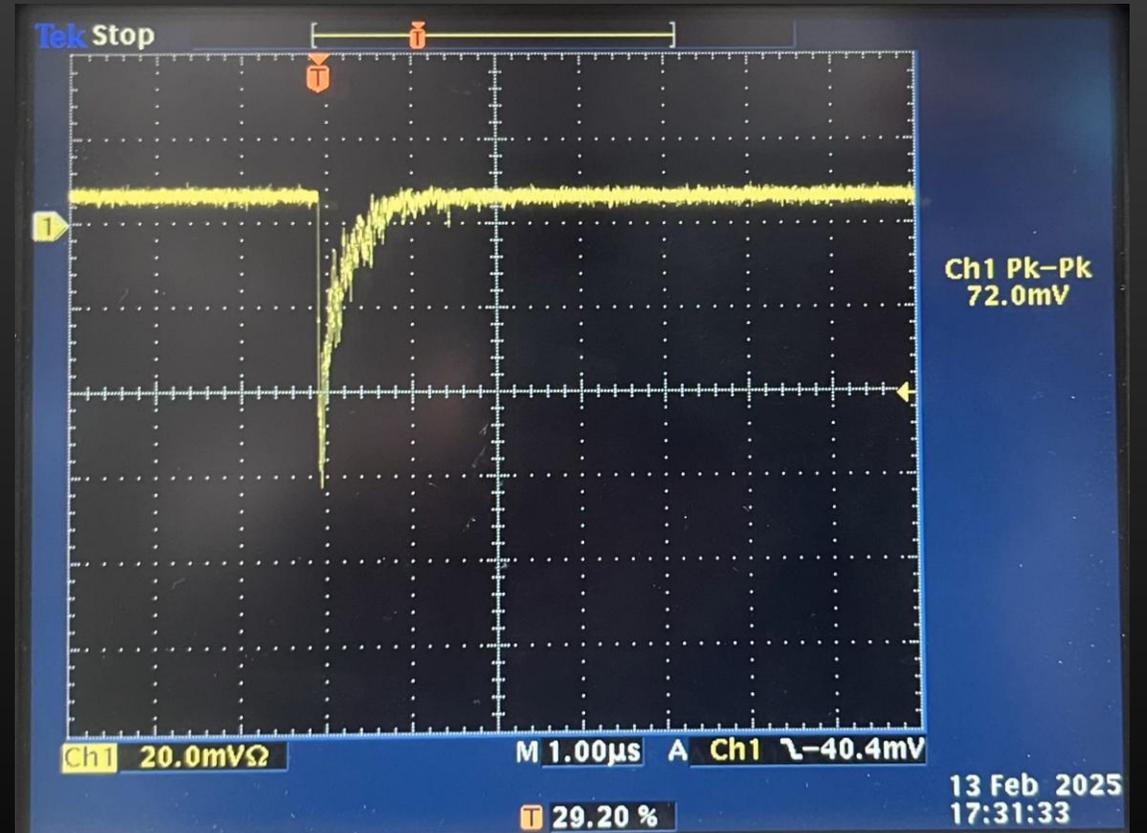
# オシロスコープ信号波形 (Am/Be + BGO in Air)



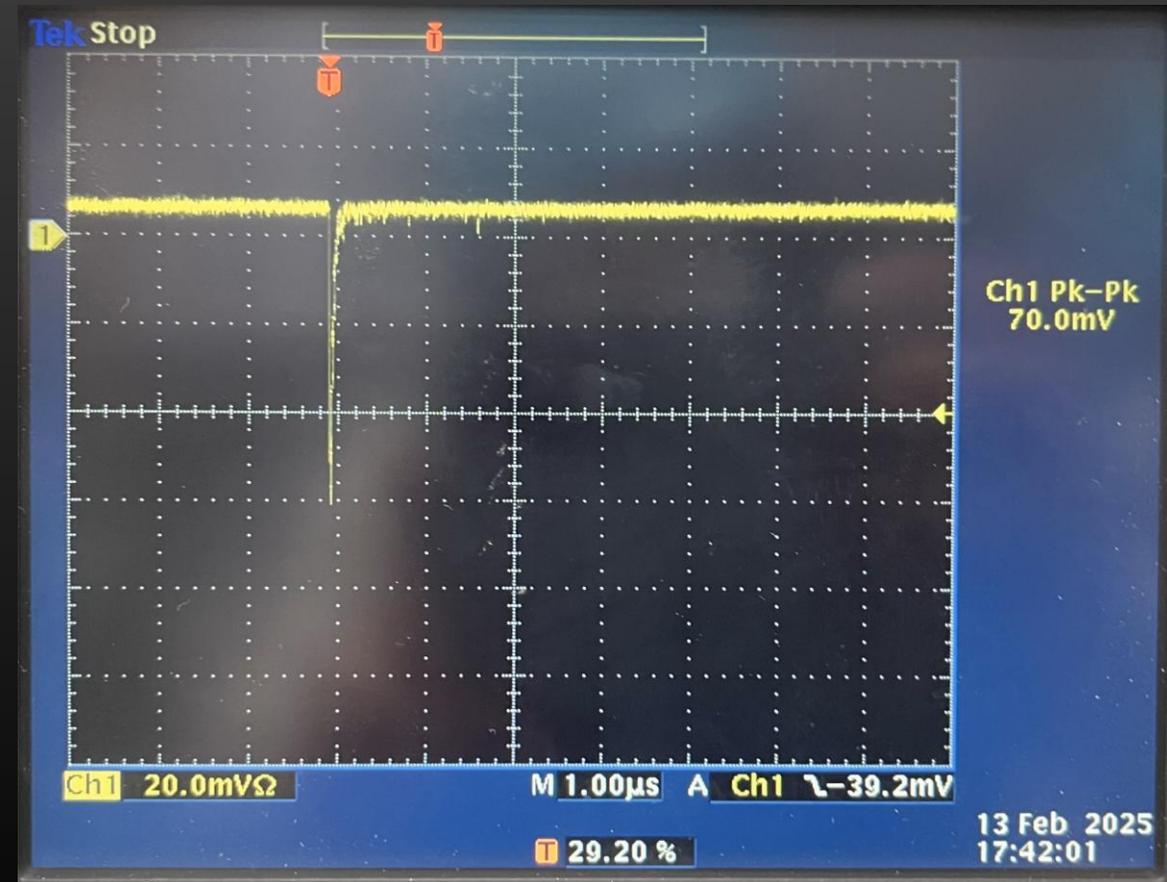
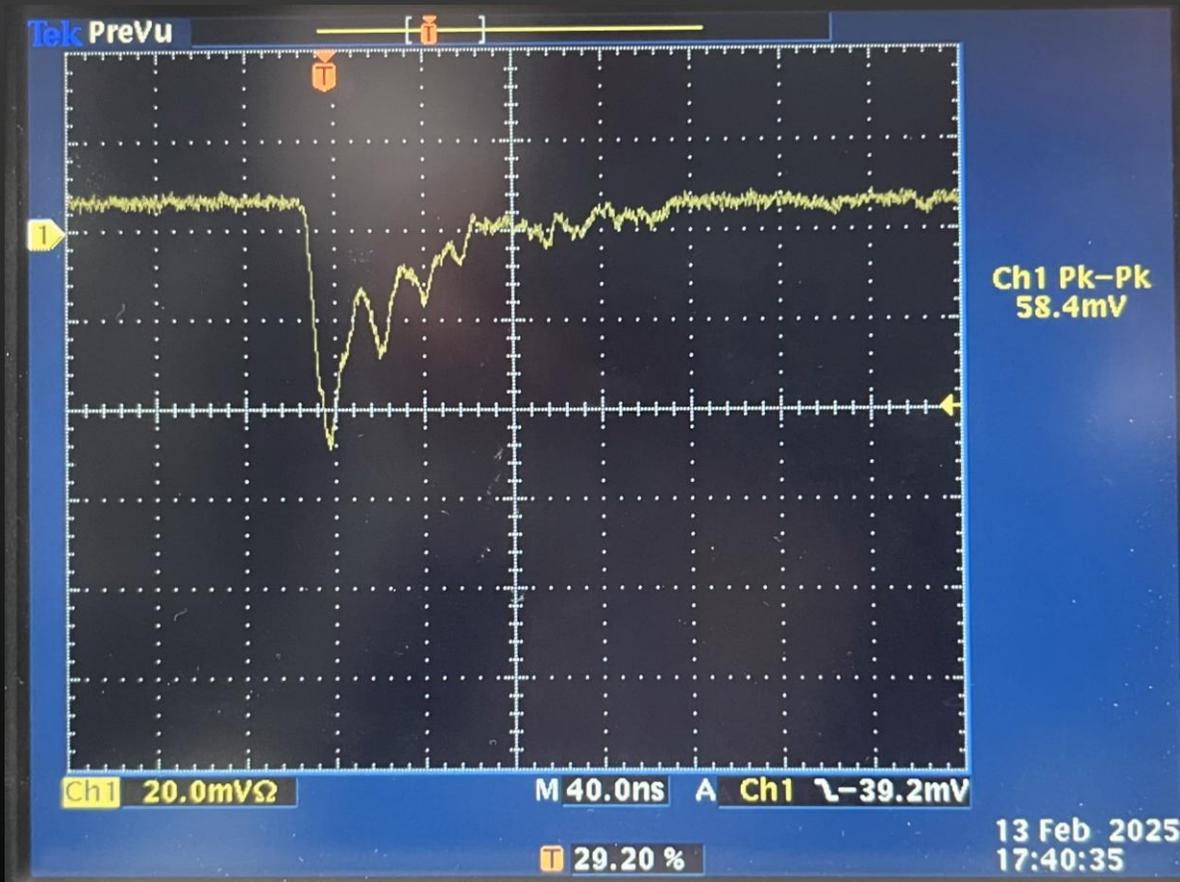
# オシロスコープ信号波形 (Am/Be + BGO in water)



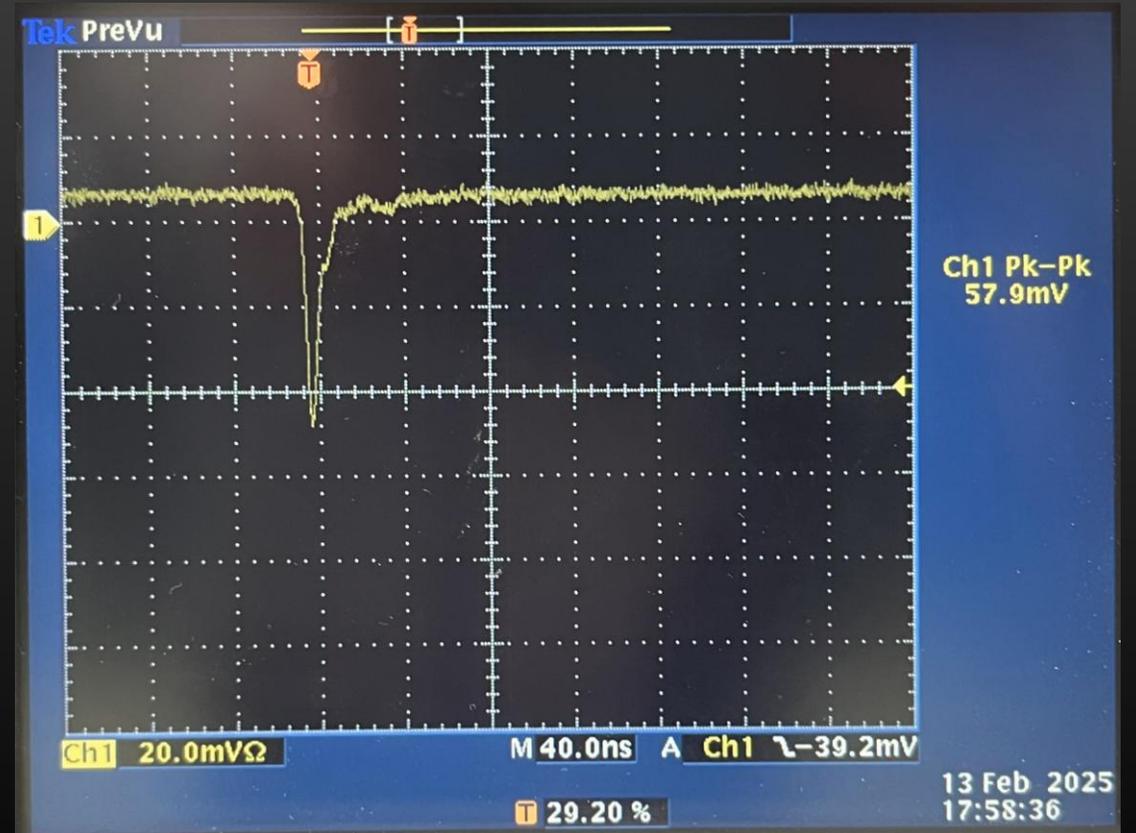
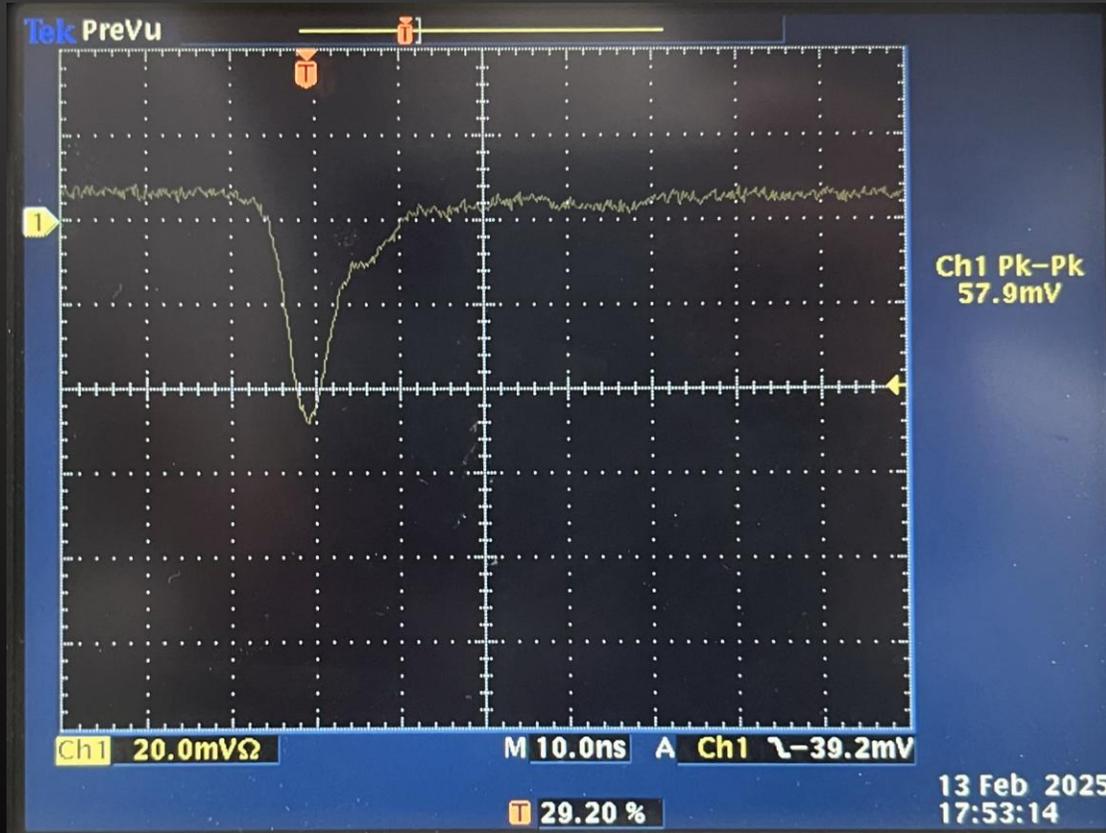
# オシロスコープ信号波形 (BGO in water)



# オシロスコープ信号波形 (Am/Be in water)



# オシロスコープ信号波形 (in water)



# PMTのゲインから光電子数への変換

光電子がどのくらい増幅されるかはPMT個体による。

PMTの個体差を補正するためにゲインを求める。

(本実験ではLEDを点けたときのデータから計算した。)

観測される光電子数はPoisson分布に従い、 $N > 20$ ではガウシアンフィットできる。

meanおよびsigmaを求めたのち、増幅率 $G$

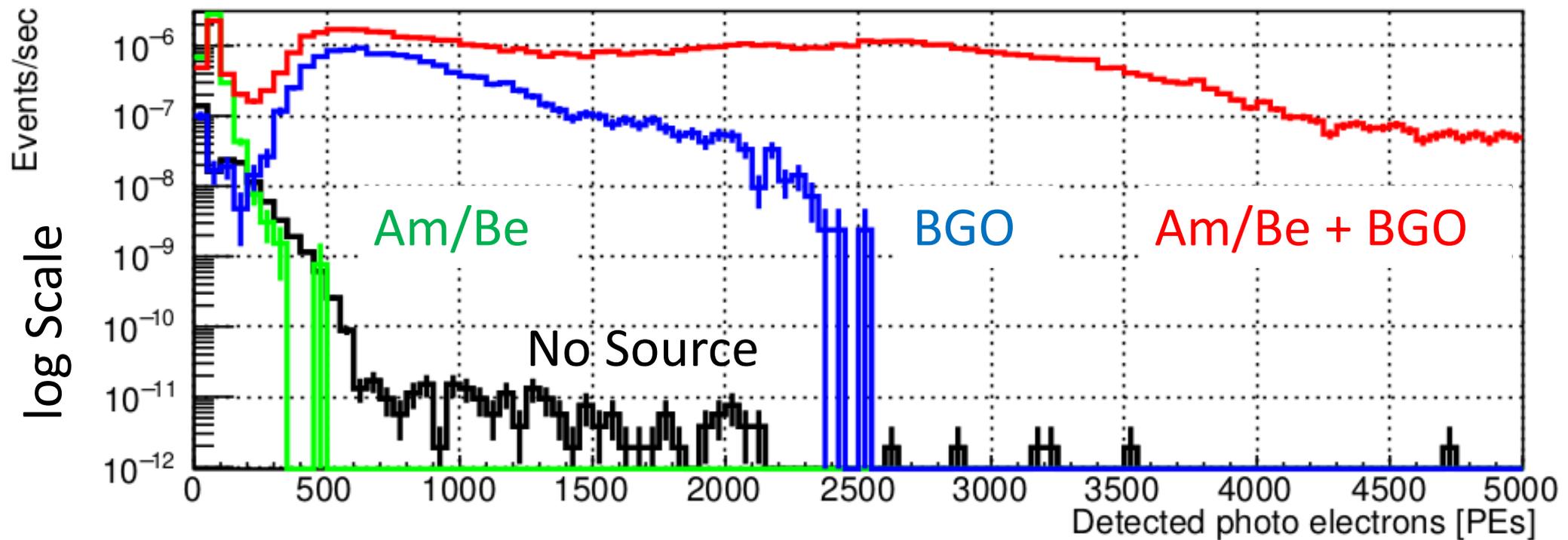
$$\begin{cases} (\text{mean}) = GeN & N : \text{観測された光電子数} \\ (\text{Sigma}) = Ge\sqrt{N} & e : \text{電気素量 } (1.602 \times 10^{-19} \text{ C}) \end{cases}$$

$$G = \frac{(\text{sigma})^2}{(\text{mean}) \times e}$$

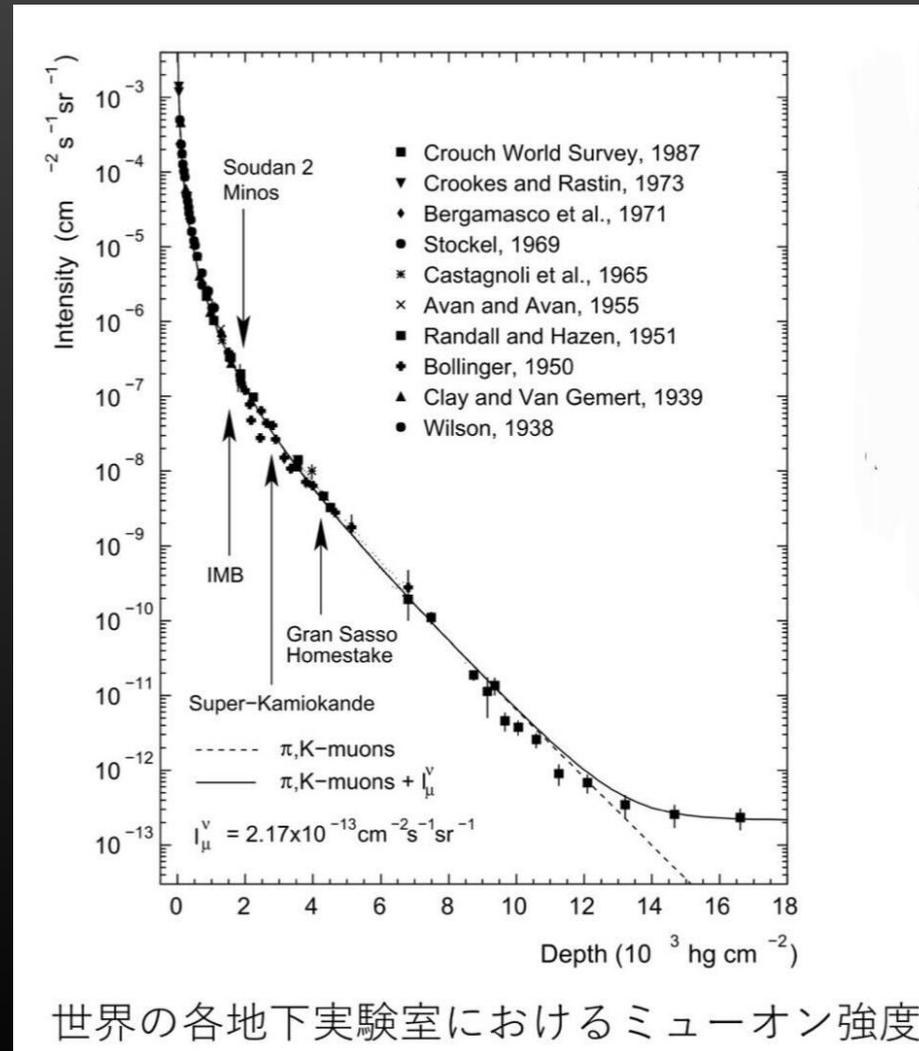
$$\text{CH1: } 1.89(3) \times 10^6$$

$$\text{CH2: } 1.62(3) \times 10^6$$

# 測定結果 (In Water)



# 地下での宇宙線ミュオン



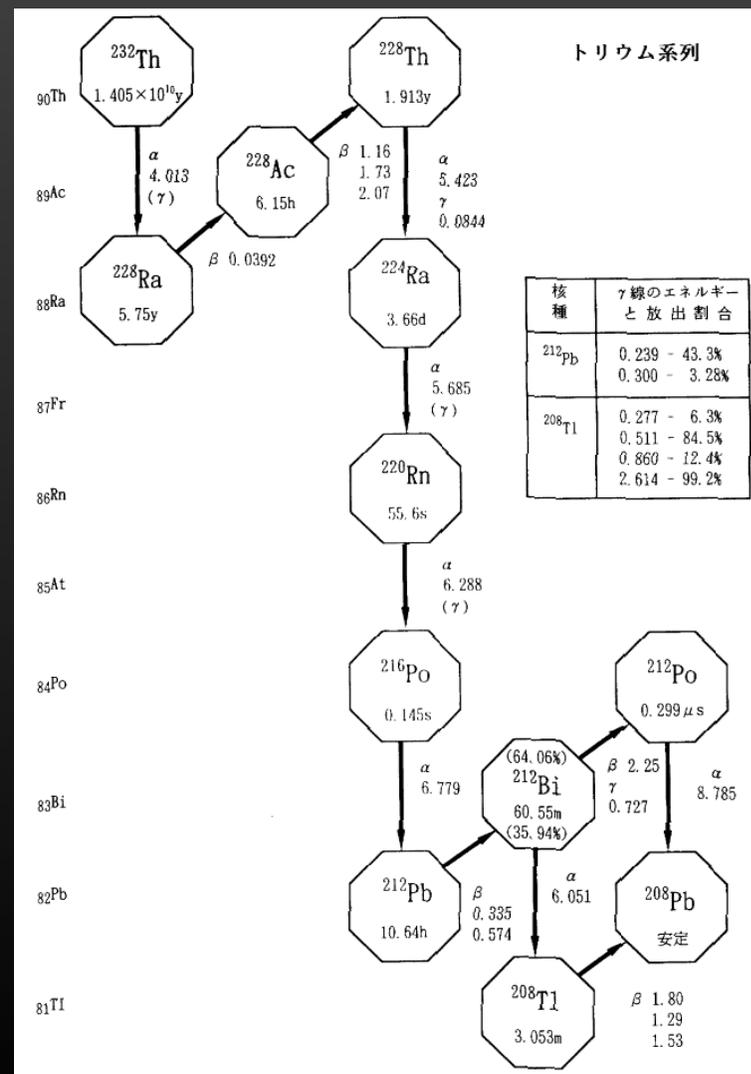
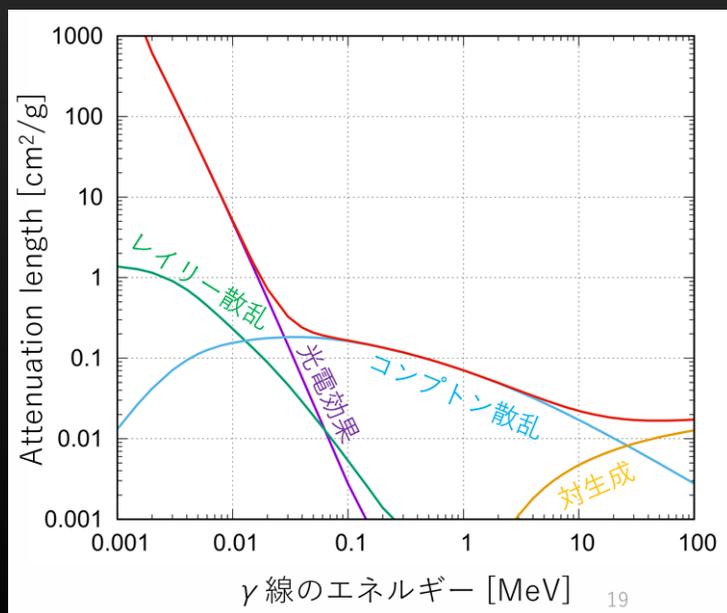
# 水中での $\gamma$ 線の飛程

$\gamma$ 線エネルギー [MeV]	$\text{cm}^2/\text{g}$	cm
1	$7.07\text{e-}2$	14.1
2	$4.94\text{e-}2$	20.2
5	$3.03\text{e-}2$	33.0
10	$2.2\text{e-}2$	45.5

$\gamma$ 線の水中での飛程は、  
2 MeV に対して約20 cm と大きい。

# トリウム系列について

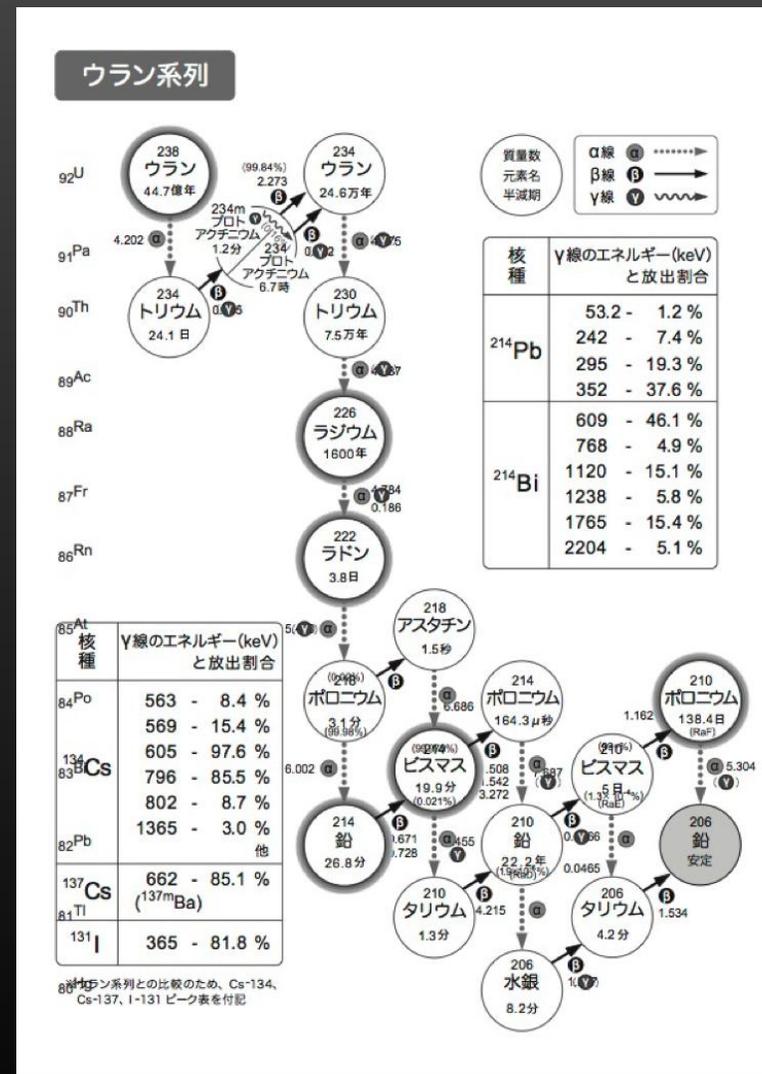
TI 2.6MeV、99.2%  
→飛程20~25cm



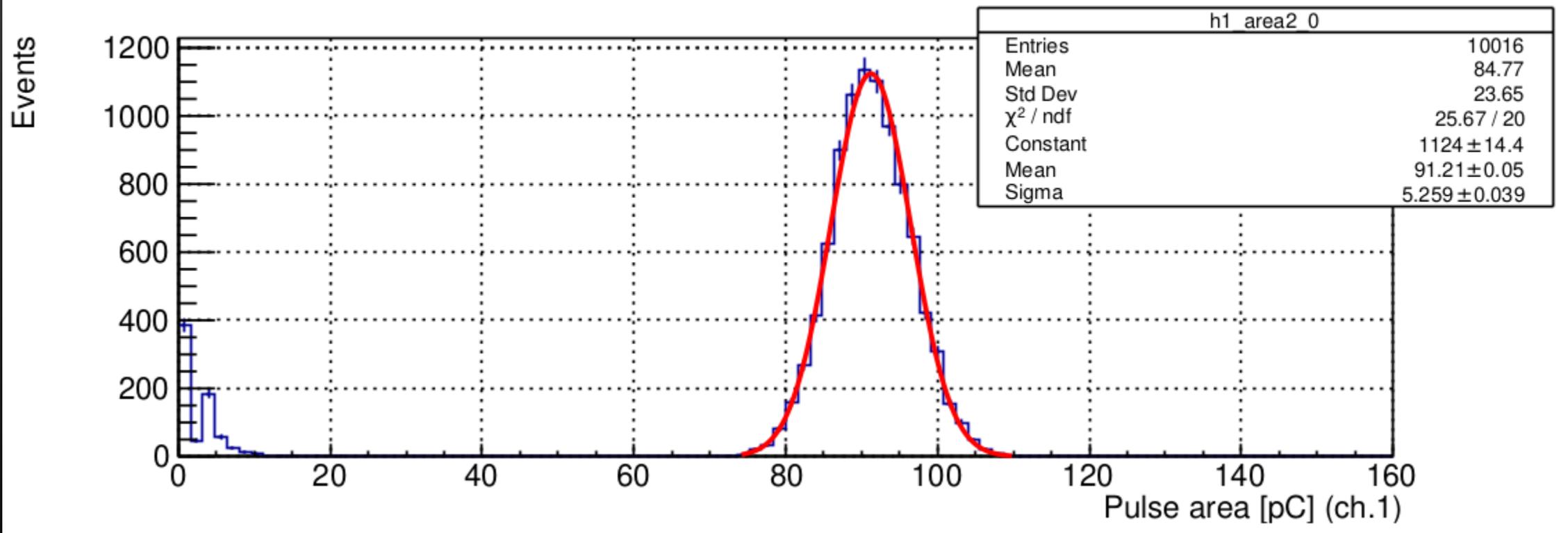
URL: [https://www.ne.jp/asahi/radioactivity/mineral/use/keiretu\\_t.htm](https://www.ne.jp/asahi/radioactivity/mineral/use/keiretu_t.htm)

# ウラン系列について

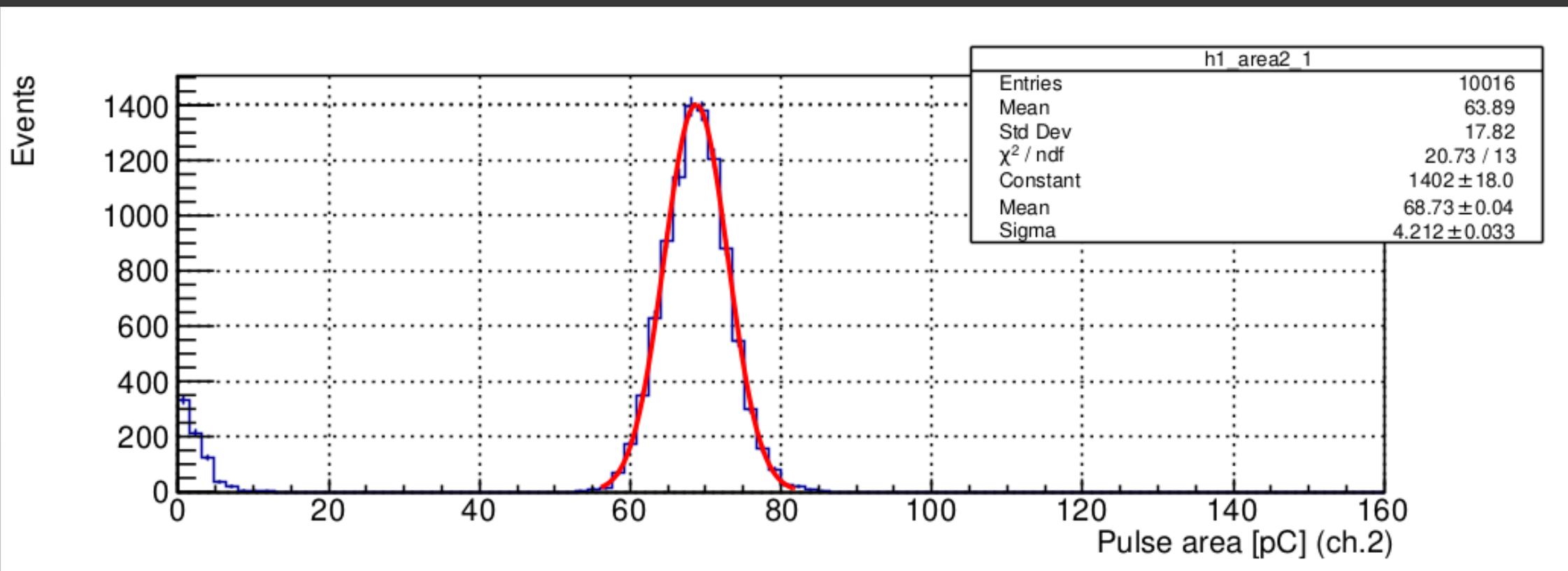
Bi 2.2MeV、5.1%



# CH1 : PMTのゲイン(増幅率)



# CH2 : PMTのゲイン(増幅率)

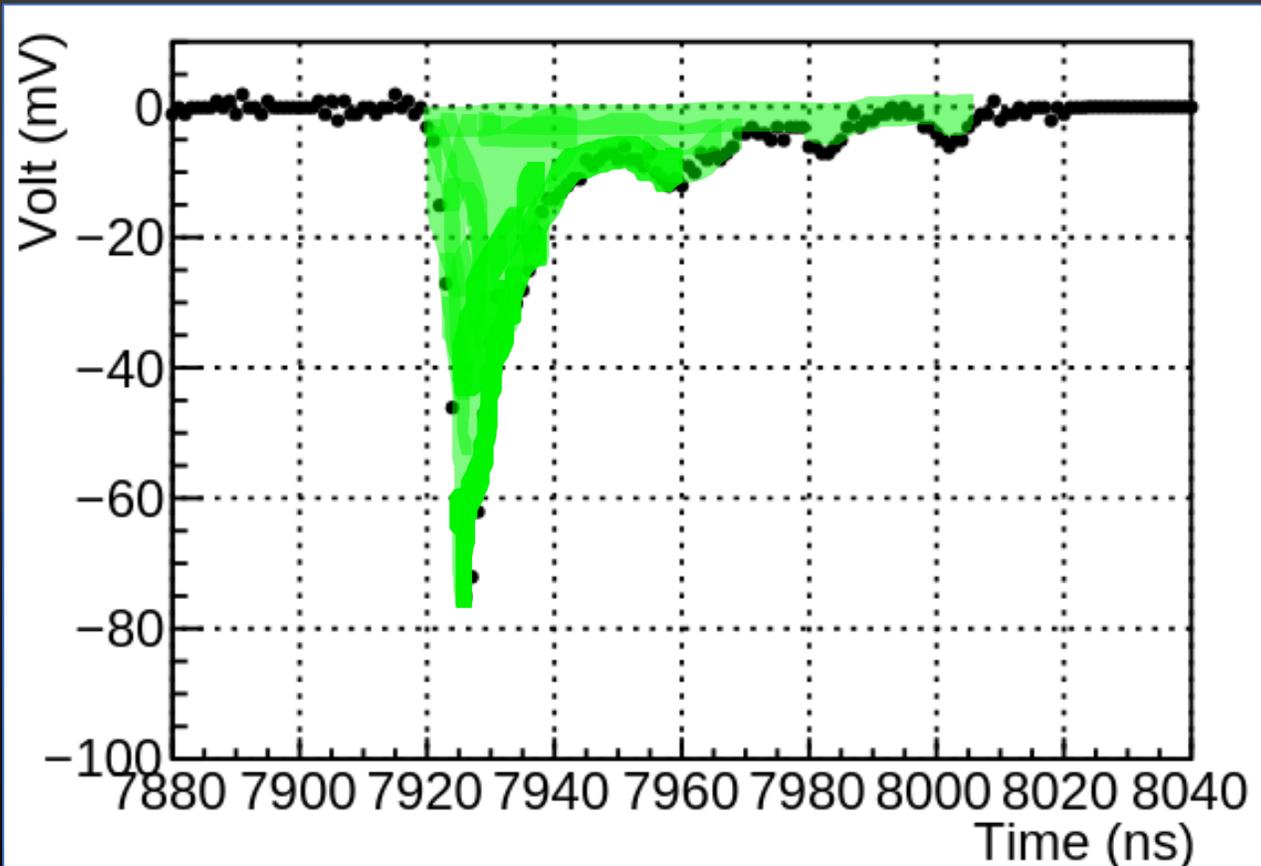


# | 横軸の変換

ゲイン $G$ を用いてヒストグラムの横軸を電荷量 $Q$ [pC]から光電子数 $N$ [PEs]に変換

$$N = \frac{1}{Ge} \times Q$$

# 電荷量の求め方

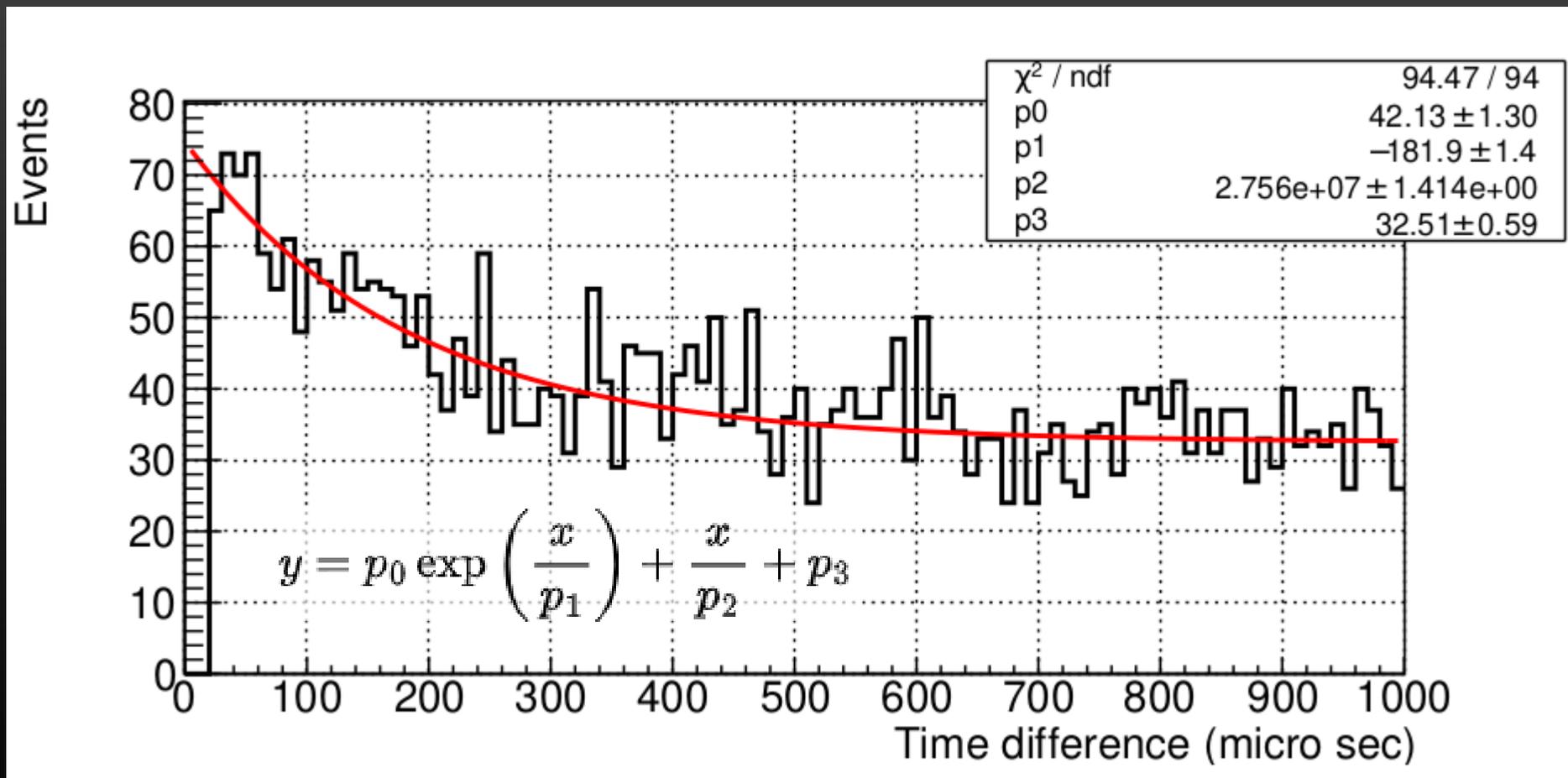


面積 (Pulse Area) は電荷量[C]  
に対応する。

$$Q = \int \frac{V}{Z} dt$$

$Z$ : 同軸ケーブルのインピーダンス

# 測定結果：検出効率計算過程のFitting



# ダークカレント (暗電流)

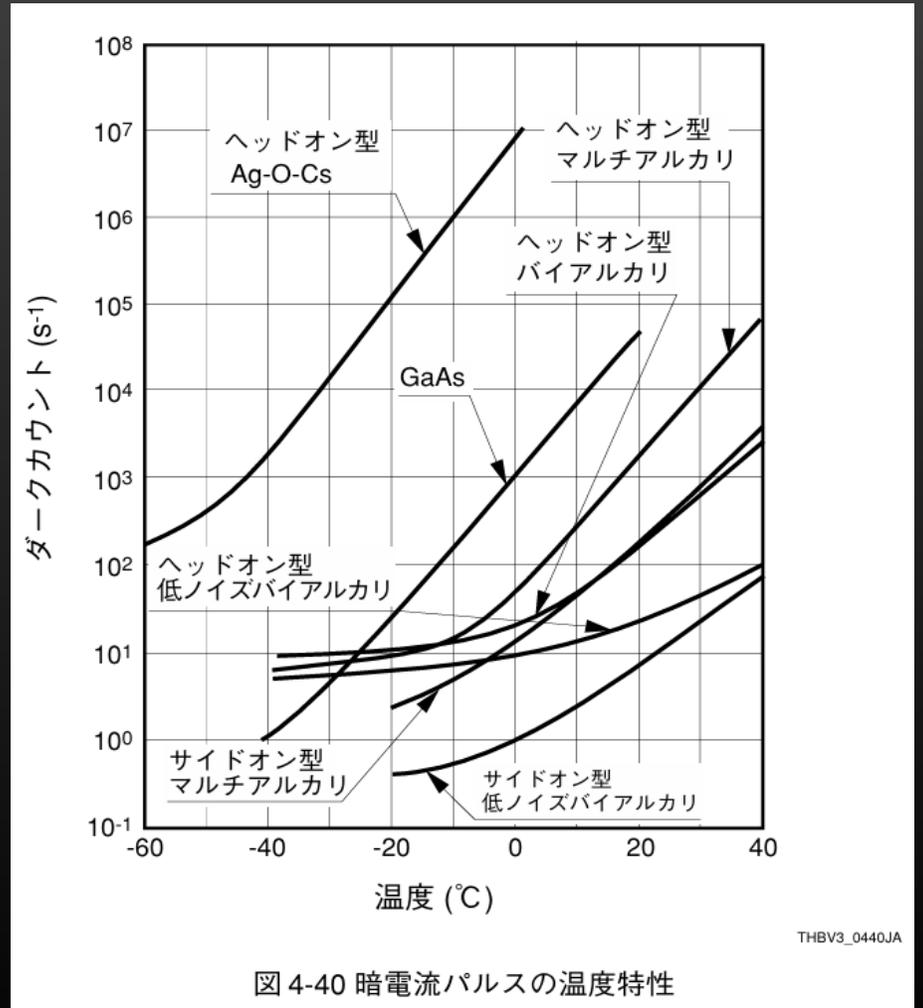
浜松ホトニクス  
「光電子増倍管その基礎と応用」

光の入射と関係なく  
PMTに流れている微弱な電流

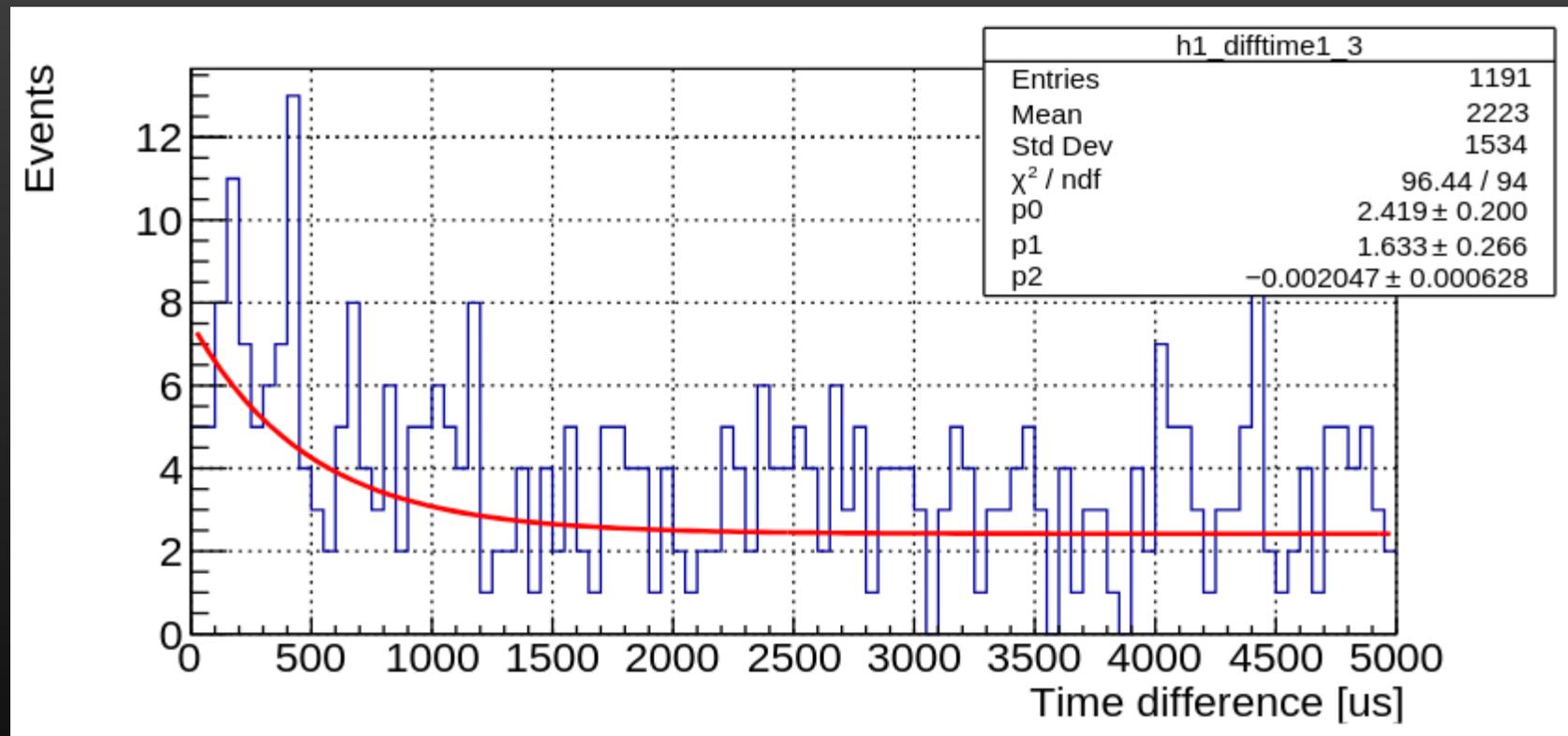
主要な要因：

光電面およびダイノード面からの  
熱電子の放出

→温度を下げることで低減可能



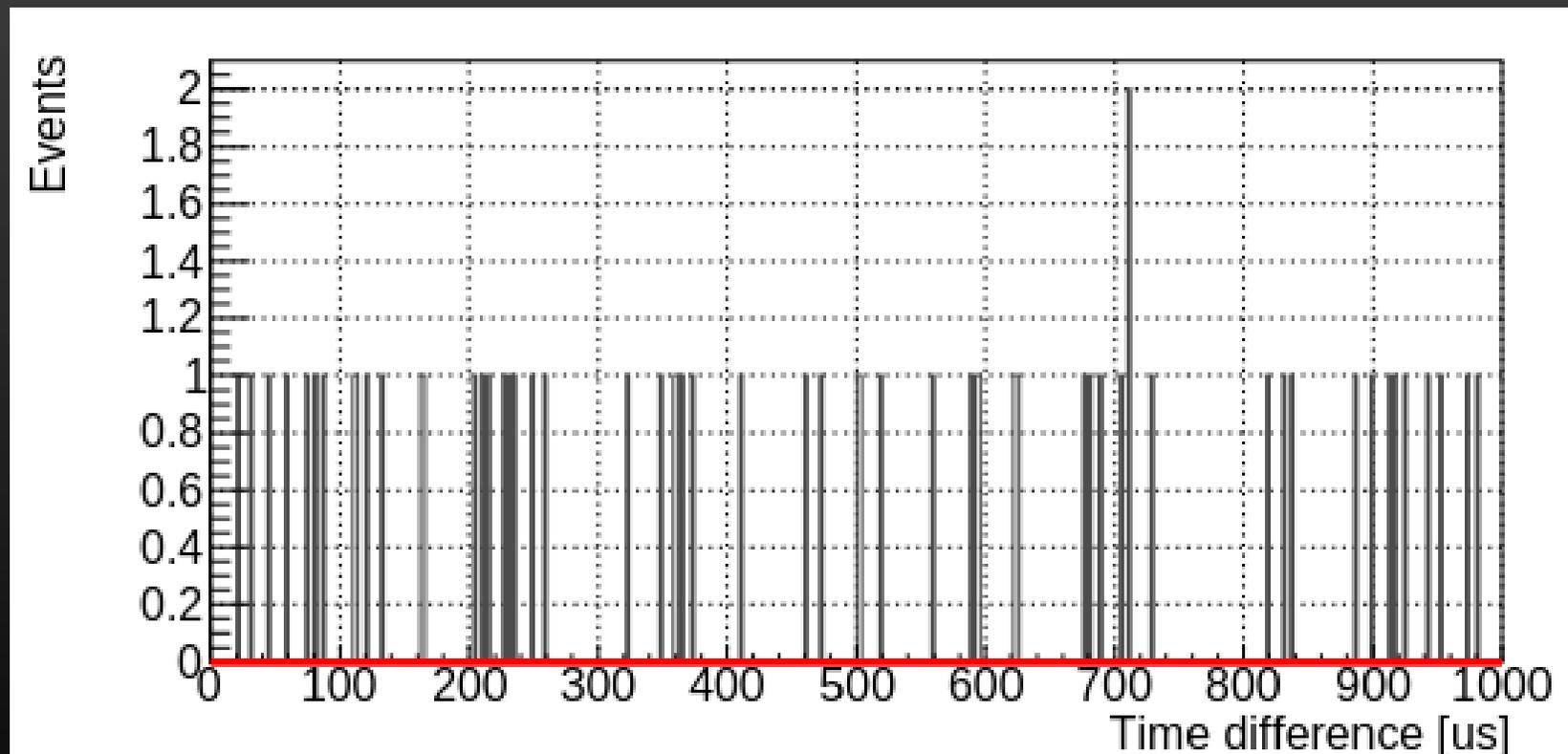
# 測定結果：より複雑なカット



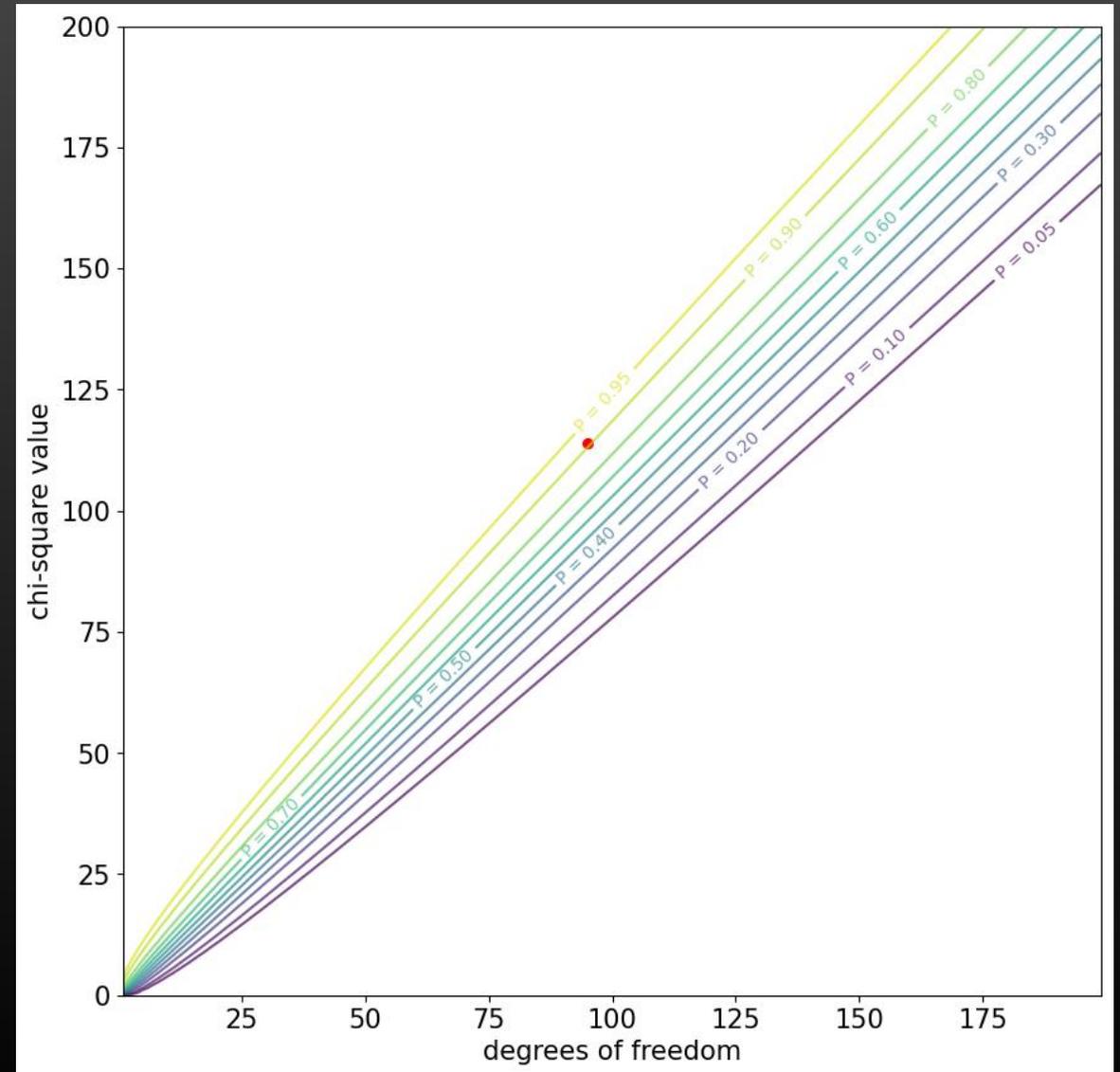
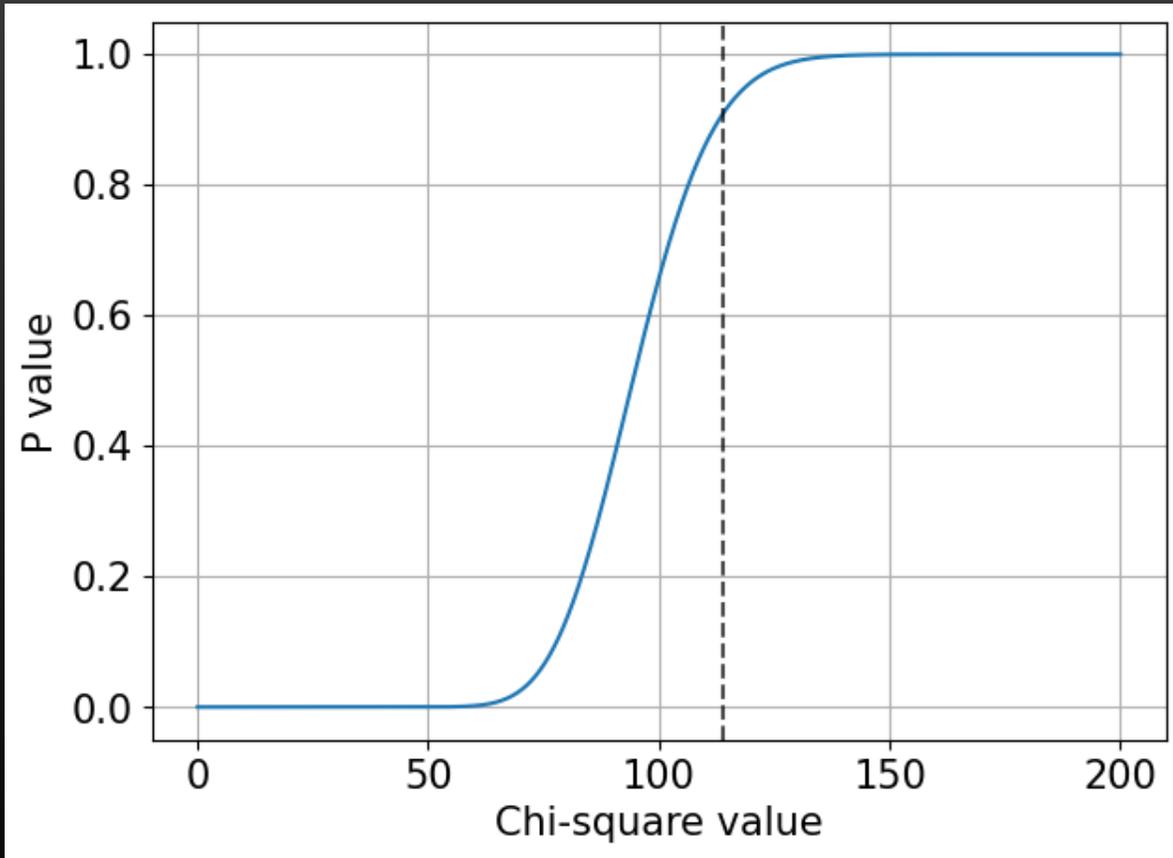
(全イベント-バックグラウンド) / 全イベント = 20(2)%

exp部分が目的とするイベントであることを強く示唆する

# 測定結果：反電子ニュートリノ



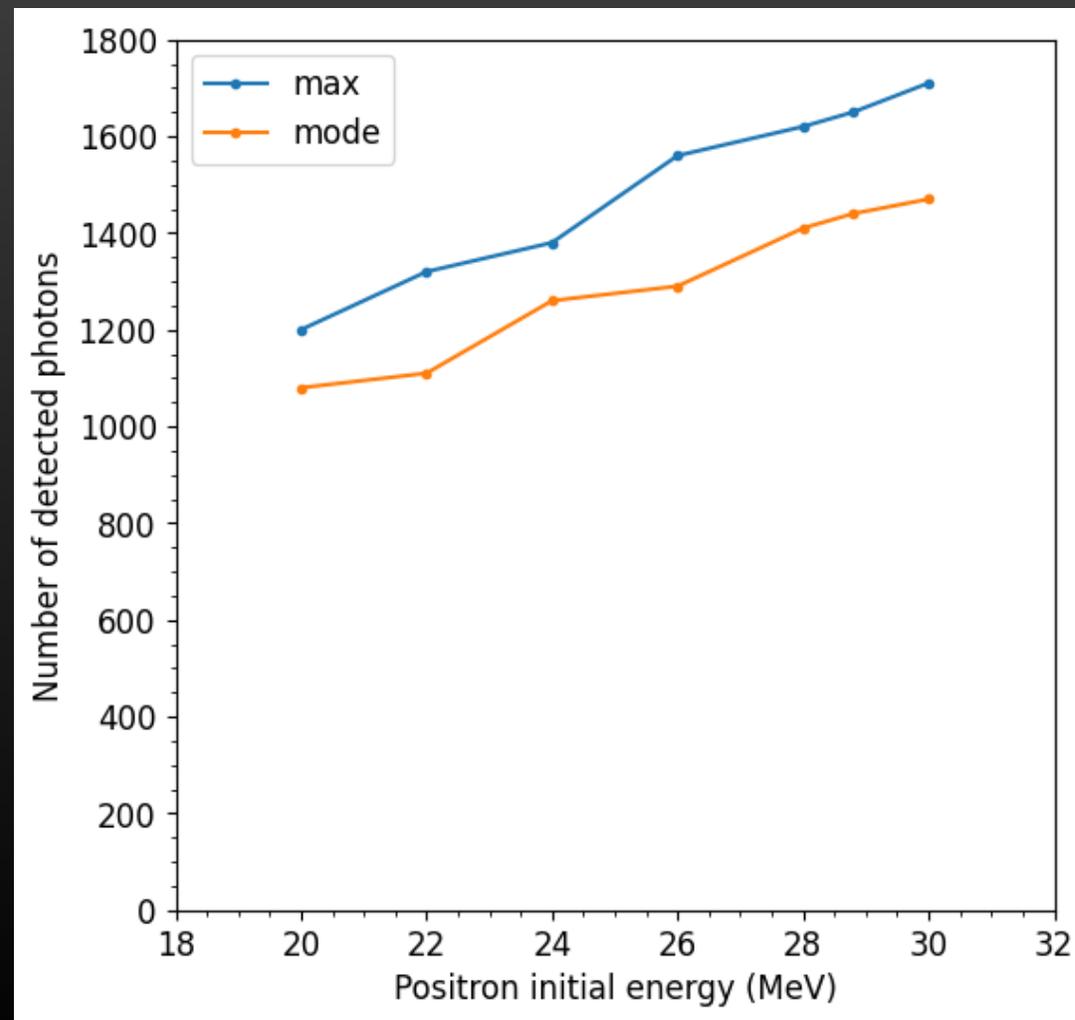
# P-value



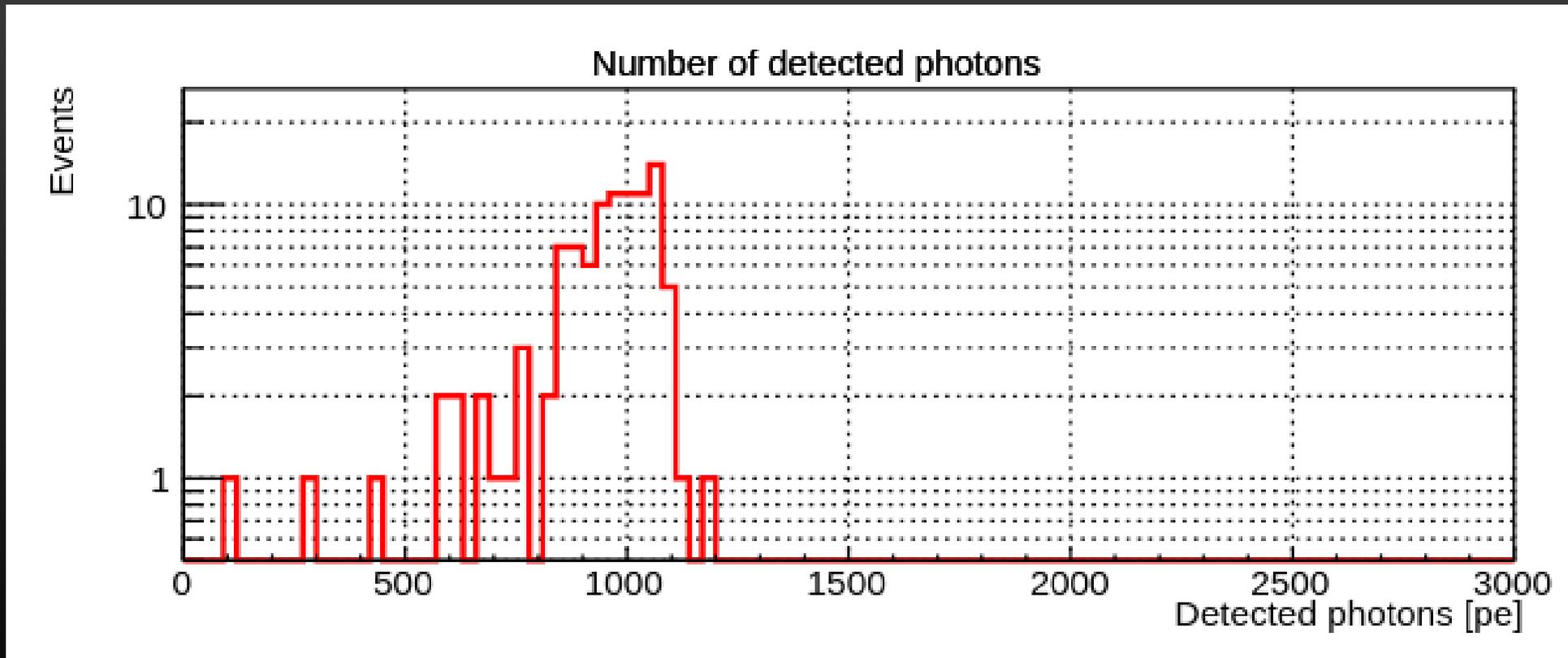
# | シミュレーション :

陽電子の入射エネルギーに対してPMTに捕捉される光子数

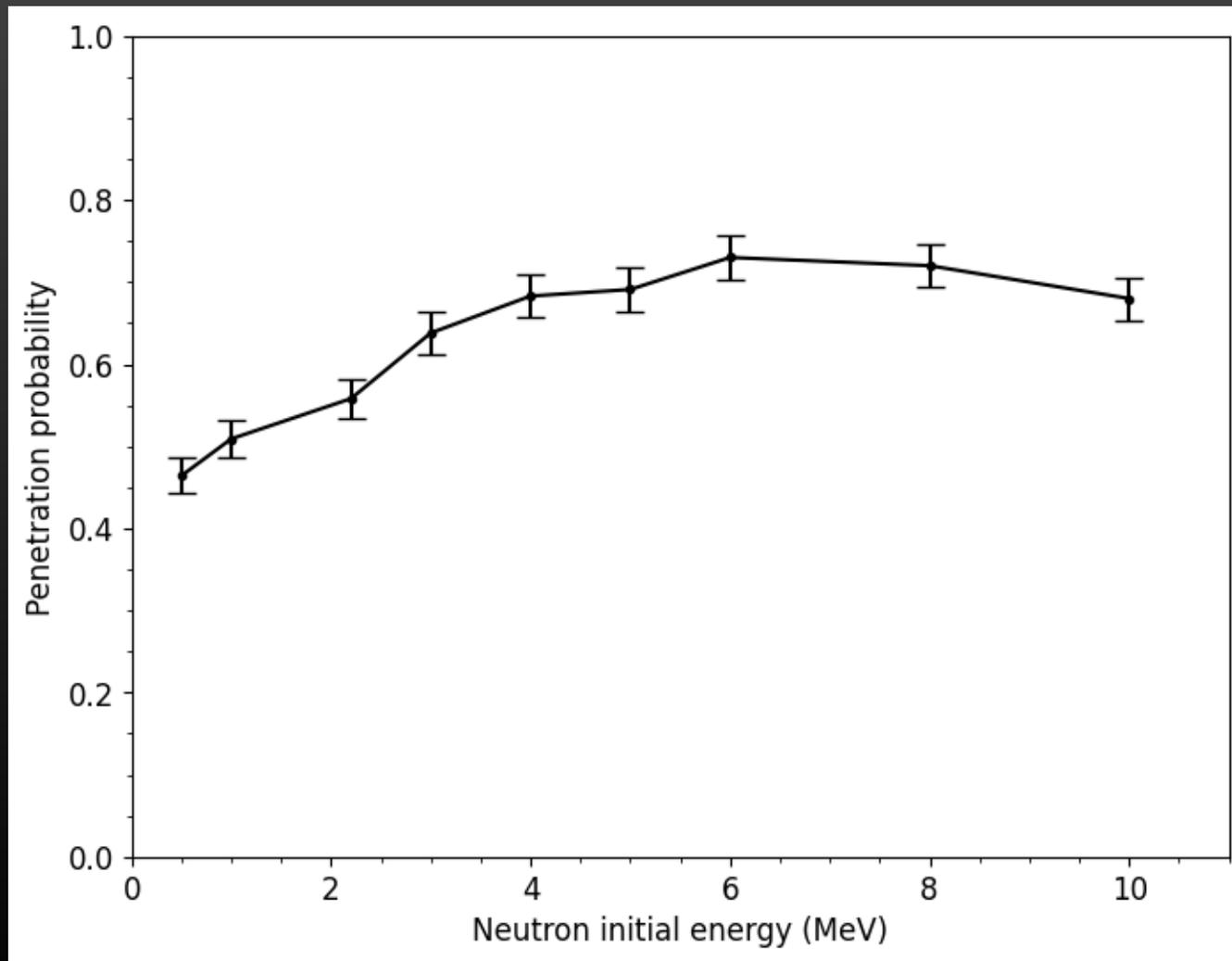
Geant4でシミュレーション



# シミュレーション：22 MeV 陽電子



# シミュレーション：中性子透過確率

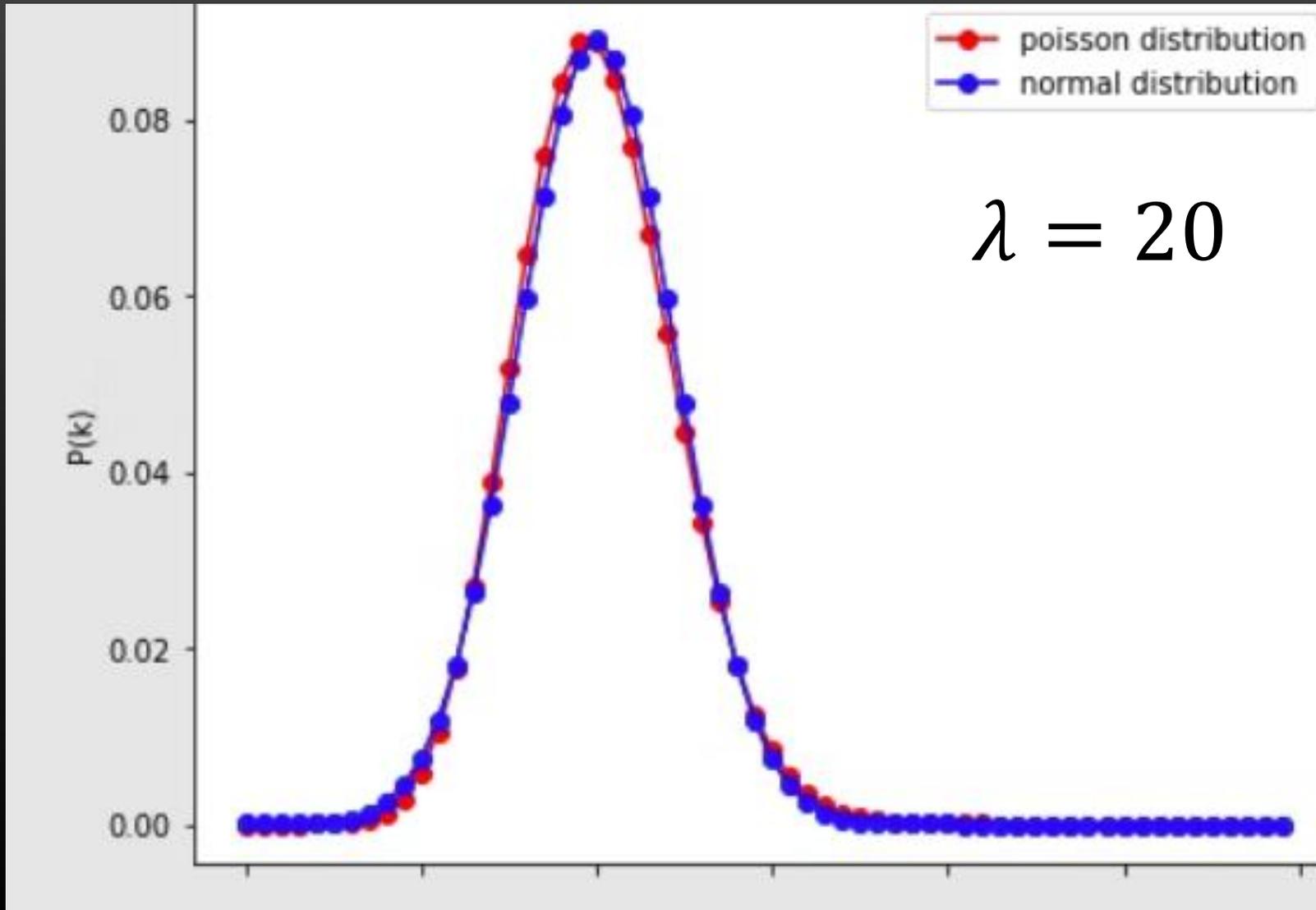


# | Poisson distribution & Gaussian distribution

ポアソン分布 :  $P(k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}$

正規分布 :  $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$

# Poisson distribution & Gaussian distribution



# | 検出効率が低い理由

- 中性子が水と反応せずに抜けていく  
→水の体積を大きくすれば検出効率が上がるのでは
- $\gamma$ 線が抜けていく、吸収される  
→ $\gamma$ 線の検出効率？  
 $\gamma$ 線源だけを置いた時の検出効率はいくら？

# | 参考文献

[1] "Evaluation of gadolinium's action on water Cherenkov detector systems with EGADS" (2022)

[2] "Diffuse Supernova Neutrino Background Search at Super-Kamiokande" (2021)