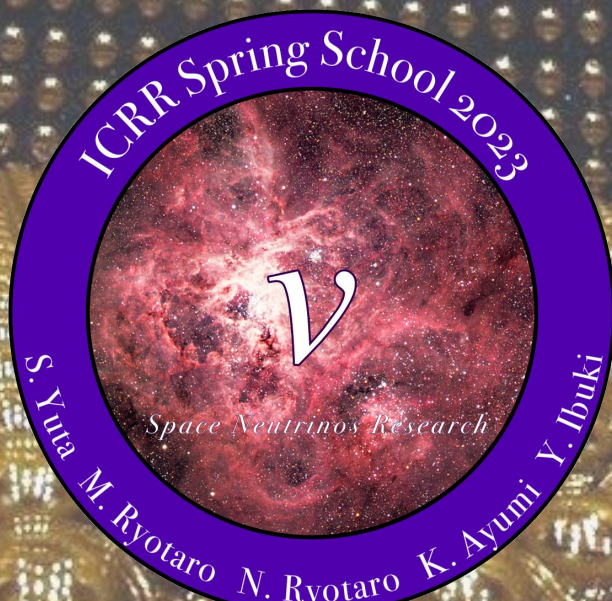


# 宇宙ニュートリノ研究グループ

櫻井, 港, 安田, 西嶋, 小林  
SV: 竹田 TA: 河内, 神長



# 目次

1. 目的
2. 背景
3. 先行研究
4. 原理
5. 実験方法
6. 実験結果
7. 考察
8. まとめ



作業中の様子  
(バケツに”Fitting”済)

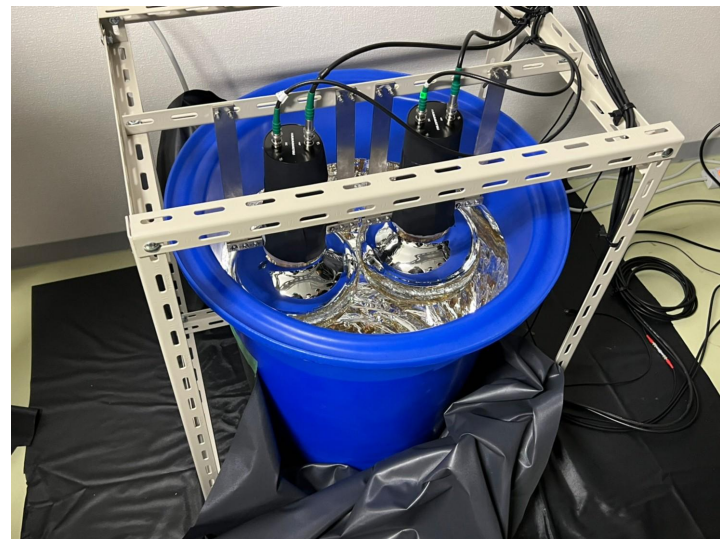


竹田先生



## 目的

光電子増倍管(PMT)と、身近にあるものを使って高い検出効率の実験装置を作成し、ディレイド・コインシデンス信号を検出することにより、超新星背景ニュートリノの検出を試みる



今回の実験で用いた検出器

## 背景 超新星背景ニュートリノとは

・ $8M_{\odot}$ 以上の星は、進化の最終過程として大爆発(超新星爆発)を起こし、星の内部の物質を宇宙空間に放出する

→爆発エネルギーの99%は、ニュートリノによって放出されている

→超新星背景ニュートリノを観測することができれば、宇宙の星形成の歴史を探ることができる



超新星爆発SN1987Aの爆発前(左)と  
爆発後(右)

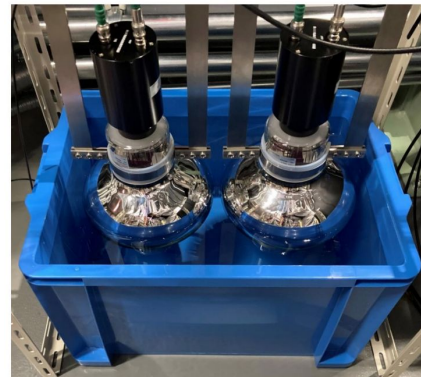
## 先行研究(去年の実験から)

超新星爆発由来の反電子ニュートリノ事象である、ディレイド・コインシデンス反応を探索する実験

- ・反射材があると、ない場合に比べて検出効率が7倍になる

### 問題点

- ・容器の形状が適していない
  - 対称性が低く、有効体積が小さい
  - 検出効率が低い**(1%以下)



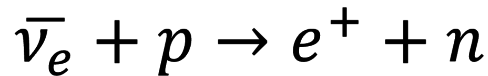
昨年度の実験装置  
(上部から)



昨年度の実験装置外観

## 原理 ディレイド・コインシデンス信号

### 逆ベータ崩壊反応

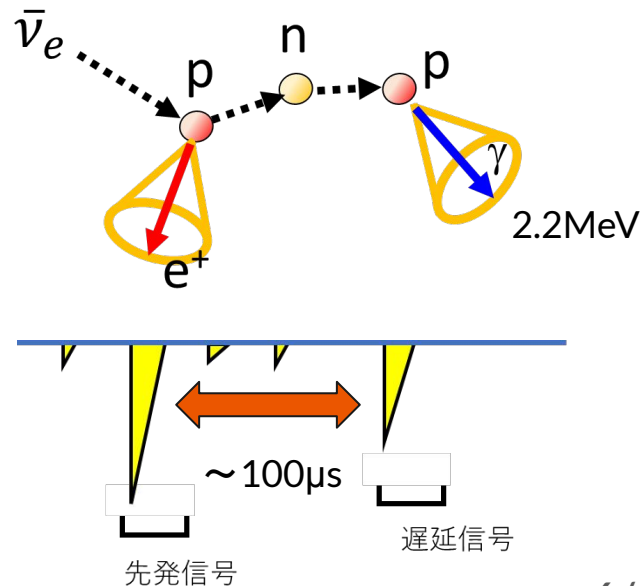


$\bar{\nu}_e$  反電子ニュートリノ       $p$  陽子

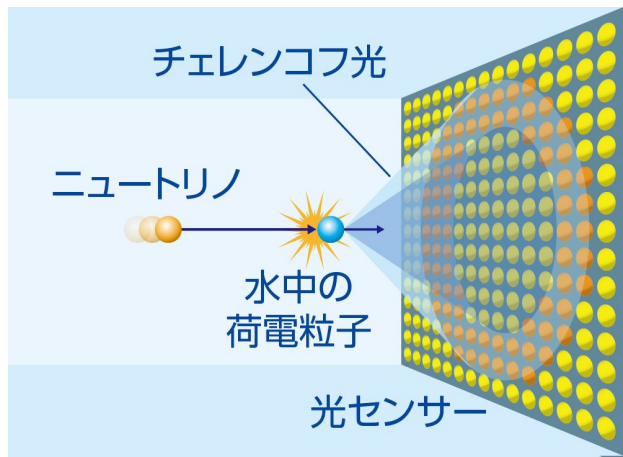
$e^+$  陽電子       $n$  中性子

・ディレイド・コインシデンス信号

→他の事象と区別



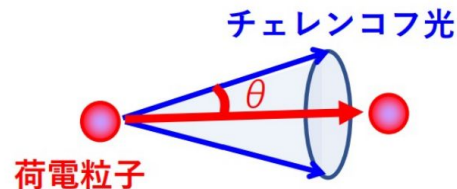
## 原理 チェレンコフ光の検出



### チェレンコフ光の原理

荷電粒子が物質中での光速を超えたときに円錐状の光を放射

(水中では  $n = 1.33$   $\theta = 42^\circ$   $n$ : 屈折率)

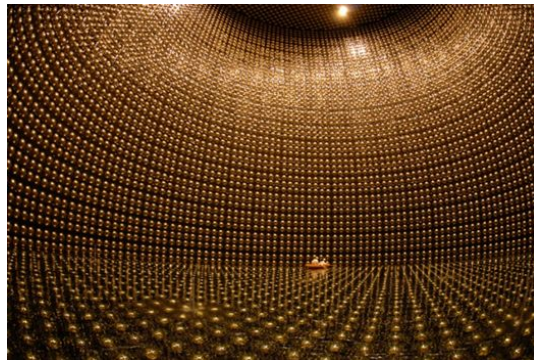


## 原理 光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tube)

本実験では直径が20cmのPMT、R5912を2本使用する  
(スーパーカミオカンデでは直径50cmのPMTを使用)



光電子増倍管

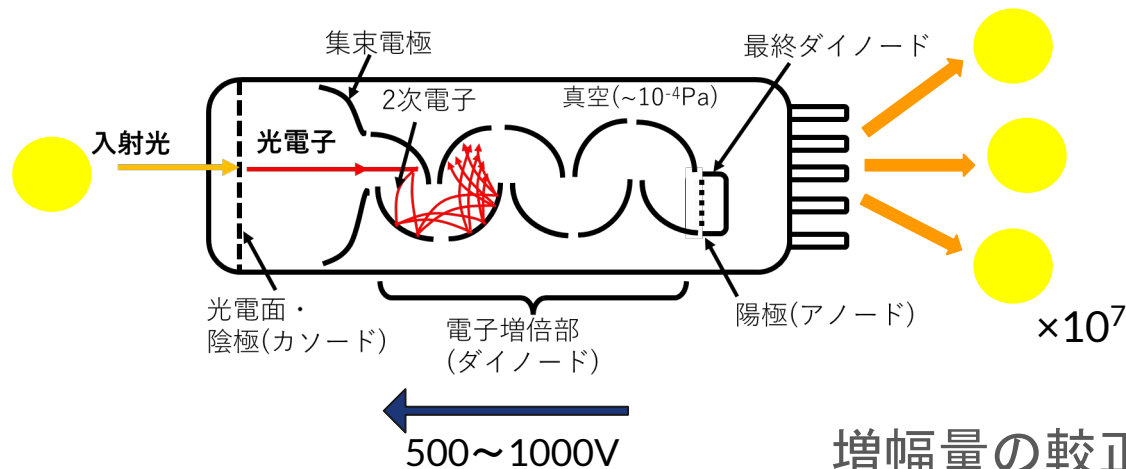


スーパーカミオカンデ



# 原理 光電子増倍管

## PMTの原理



光電面で光電子を放出



電圧で加速・集束



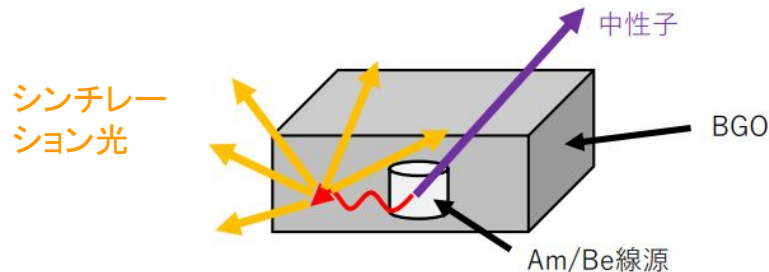
ダイノードで2次電子を放出



放出を繰り返し増幅

増幅量の校正が必要

## 原理 Am/Be線源+BGO

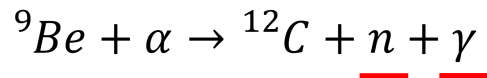
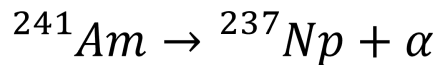


中性子と $\gamma$ 線を同時に放出  
(シンチレーション光→チェレンコフ光)

2.2MeV

→逆ベータ崩壊に類似した反応

$$(\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n)$$



BGO:シンチレーター

ディレイド・コインシデンス事象の

検出効率とエネルギー較正に用いる

# 実験方法

目的 超新星背景ニュートリノを探索する

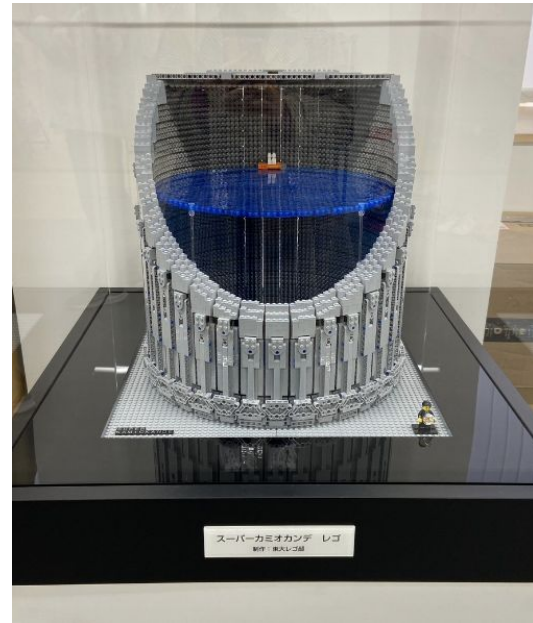
Plan

実験 @神岡



解析 @柏

1. 探索機器のセットアップ
2. 実験データを取得
3. 実験データの解析



## 実験方法 1.ミニカミオカンデ

### ・実験器具

1. バケツ(100L)の内側に反射材を隙間なく貼り付ける
2. PMT 2個を高さ40cmの場所に固定する
3. 写真のようにバケツを設置する
4. バケツに40L水を入れる (空気が入らないようにゆっくり)
5. 水面上に反射材を貼った段ボールで覆う
6. バケツ、PMT全体をブラックボックスや黒シートで覆う
7. 光が入らないように隙間を埋める
8. 測定器に繋いで、測定開始

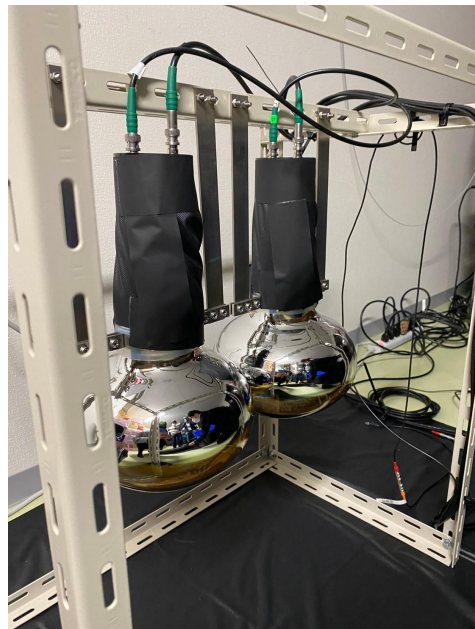




## 実験方法 1. セットアップ

### ・実験器具

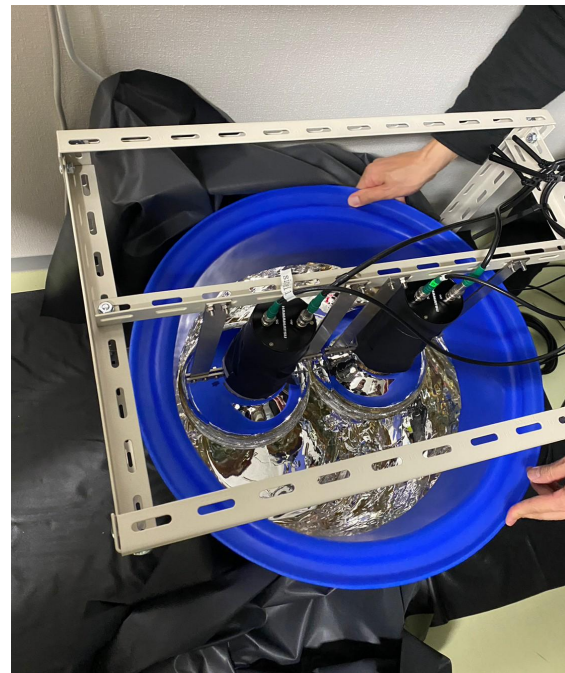
1. バケツ(100L)の内側に反射材を隙間なく貼り付ける
2. PMT 2個を高さ40cmの場所に固定する
3. 写真のようにバケツを設置する
4. バケツに40L水を入れる (空気が入らないようにゆっくり)
5. 水面上に反射材を貼った段ボールで覆う
6. バケツ、PMT全体をブラックボックスや黒シートで覆う
7. 光が入らないように隙間を埋める
8. 測定器に繋いで、測定開始



## 実験方法 1. セットアップ

### ・実験器具

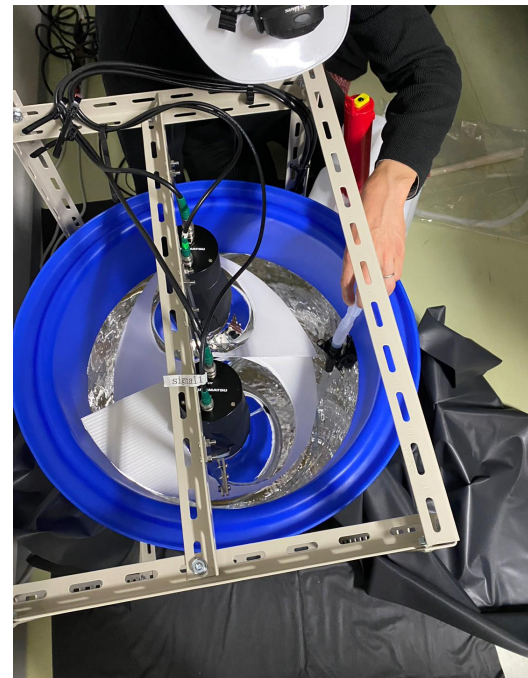
1. バケツ(100L)の内側に反射材を隙間なく貼り付ける
2. PMT 2個を高さ40cmの場所に固定する
3. 写真のようにバケツを設置する
4. バケツに40L水を入れる (空気が入らないようにゆっくり)
5. 水面上に反射材を貼った段ボールで覆う
6. バケツ、PMT全体をブラックボックスや黒シートで覆う
7. 光が入らないように隙間を埋める
8. 測定器に繋いで、測定開始



## 実験方法 1. セットアップ

### ・実験器具

1. バケツ(100L)の内側に反射材を隙間なく貼り付ける
2. PMT 2個を高さ40cmの場所に固定する
3. 写真のようにバケツを設置する
4. バケツに40L水を入れる (空気が入らないようにゆっくり)
5. 水面上に反射材を貼った段ボールで覆う
6. バケツ、PMT全体をブラックボックスや黒シートで覆う
7. 光が入らないように隙間を埋める
8. 測定器に繋いで、測定開始



## 実験方法 1. セットアップ

### ・実験器具

1. バケツ(100L)の内側に反射材を隙間なく貼り付ける
2. PMT 2個を高さ40cmの場所に固定する
3. 写真のようにバケツを設置する
4. バケツに40L水を入れる (空気が入らないようにゆっくり)
5. 水面上に反射材を貼った段ボールで覆う
6. バケツ、PMT全体をブラックボックスや黒シートで覆う
7. 光が入らないように隙間を埋める
8. 測定器に繋いで、測定開始



## 実験方法 1. セットアップ

### ・実験器具

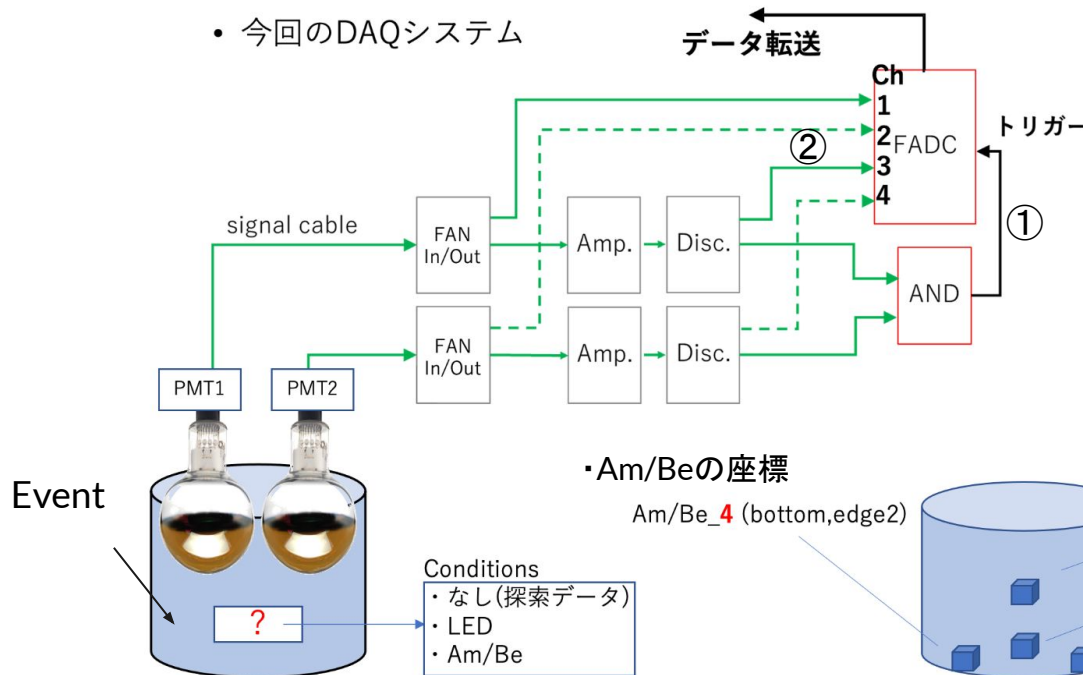
1. バケツ(100L)の内側に反射材を隙間なく貼り付ける
2. PMT 2個を高さ40cmの場所に固定する
3. 写真のようにバケツを設置する
4. バケツに40L水を入れる (空気が入らないようにゆっくり)
5. 水面上に反射材を貼った段ボールで覆う
6. バケツ、PMT全体をブラックボックスや黒シートで覆う
7. 光が入らないように隙間を埋める
8. 測定器に繋いで、測定開始





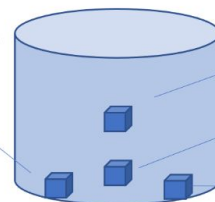
# 実験方法 データ取得

- 今回のDAQシステム



## Am/Beの座標

Am/Be\_4 (bottom,edge2)



Am/Be\_1 (center,center)

Am/Be\_2 (bottom,center)

Am/Be\_3 (bottom,edge1)

| NIM<br>モジュール             | 機能                            |
|--------------------------|-------------------------------|
| FAN In/Out               | 信号を複製する。                      |
| Amp.<br>(Amplifier)      | 入力電圧を増幅する。<br>( $\times 10$ ) |
| Disc.<br>(Discriminator) | 入力がしきい値を超えたら矩形波を出力する。         |
| AND<br>(Coincidence)     | 入力のANDを出力する。                  |

①トリガーをかけるための信号

②PMT1、PMT2の信号をFADCで記録

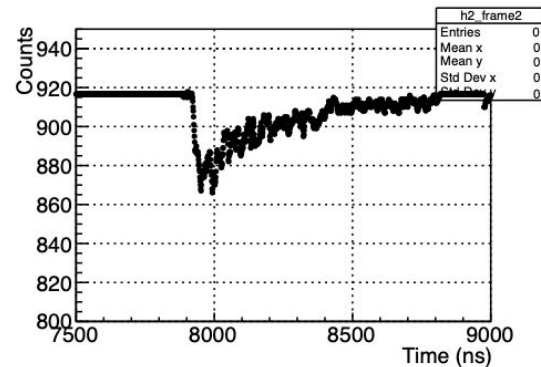
## 実験方法 解析

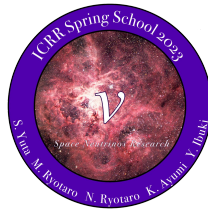
目的 わかっていないイベントを定量的に定める

1. LEDデータから得られた結果からPMTの較正を行う
2. Am/Beデータから検出効率を求める
3. 探索データからニュートリノ候補イベントを選ぶ
4. ニュートリノ候補イベント数と検出効率からFluxを求める

Flux ... 単位時間あたり、単位面積あたり入ってくる粒子数

Am/Beデータで得られた1事象の波形



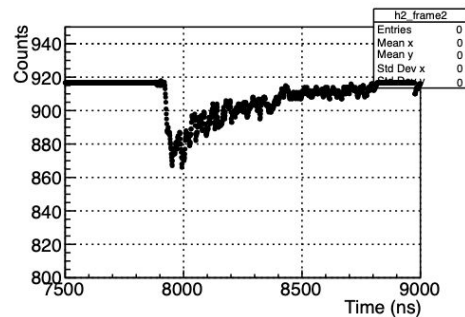


## 実験結果 LEDによる校正

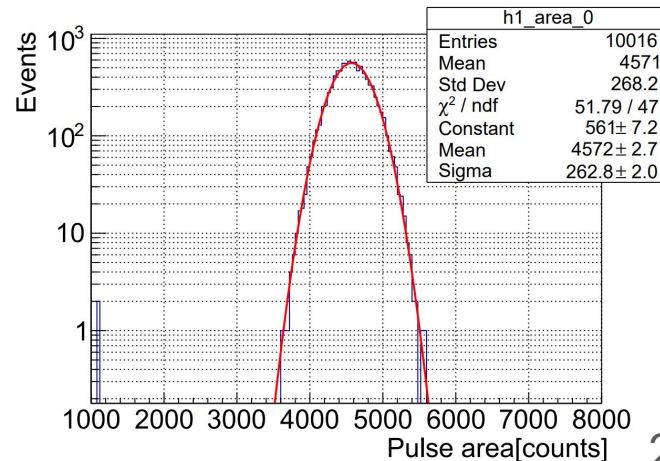
光量が一定であることがわかっている

LEDを用いてPMT及び回路系に対する校正を行った

**1 p.e. = 15.0 counts**



LEDによる測定データ count数分布



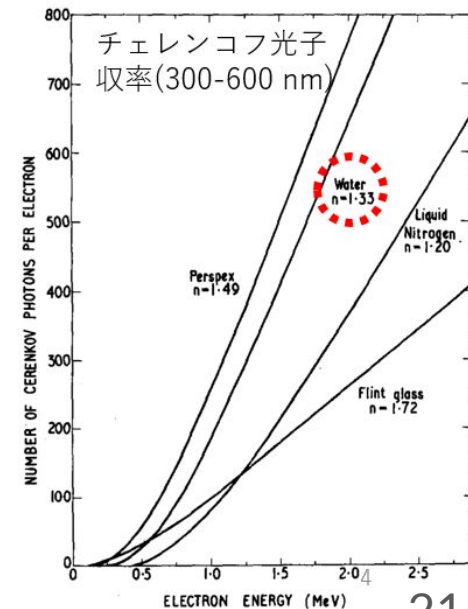
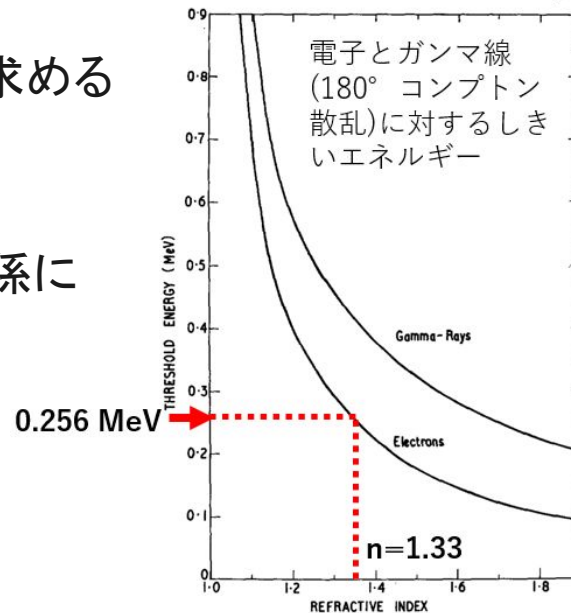
# 実験結果 Am/Beを用いた校正

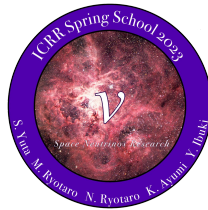
エネルギーと光電子数の関係を求める

電子のエネルギーと光子数の関係に

線形性を仮定して考える

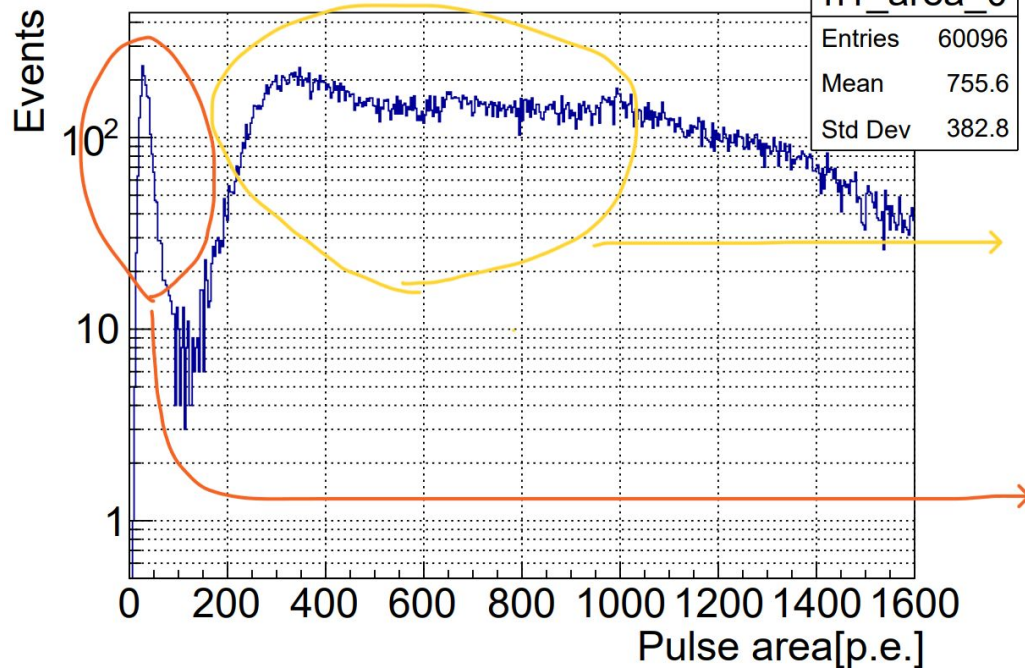
*B. D. Sowerby, NIM 97 (1971) 145*



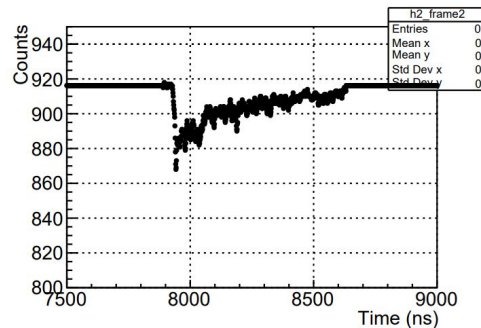


# 実験結果 Am/Beを用いた較正

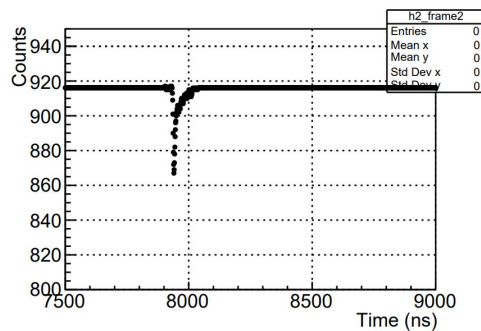
光電子数分布



シンチレーション光

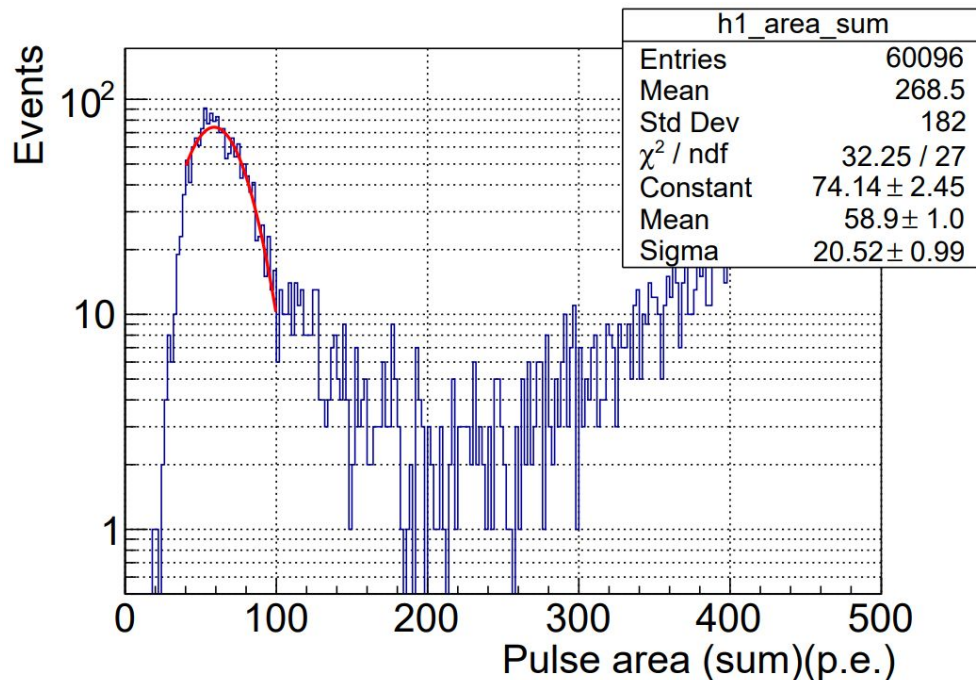


チェレンコフ光





## 実験結果 Am/Beを用いた校正



Am/Be由来のチェレンコフ光は  
2.2 MeVの

ガンマ線がたたき出す電子による  
チェレンコフ光

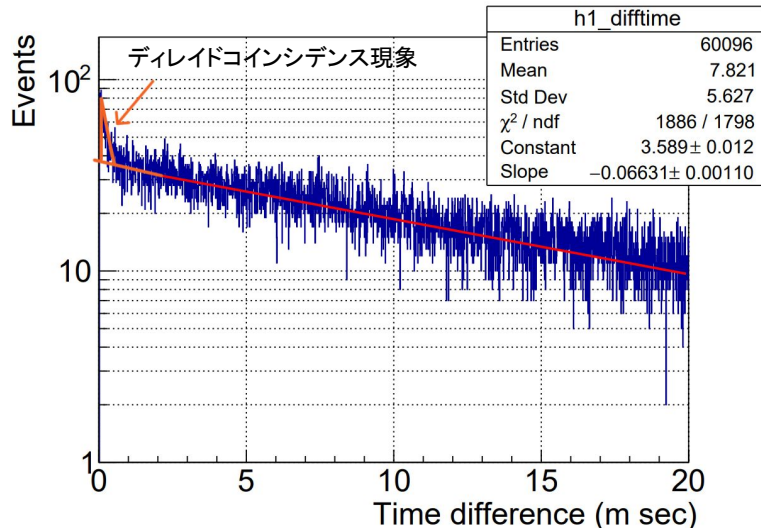
$$58.9 \text{ p.e.} \propto 2.2 \text{ MeV}$$

## 実験結果 Am/Be線源を用いた検出効率の導出

$$\text{efficiency} = \frac{N_{\text{チェレンコフ}}}{N_{\text{シンチレーション}}}$$

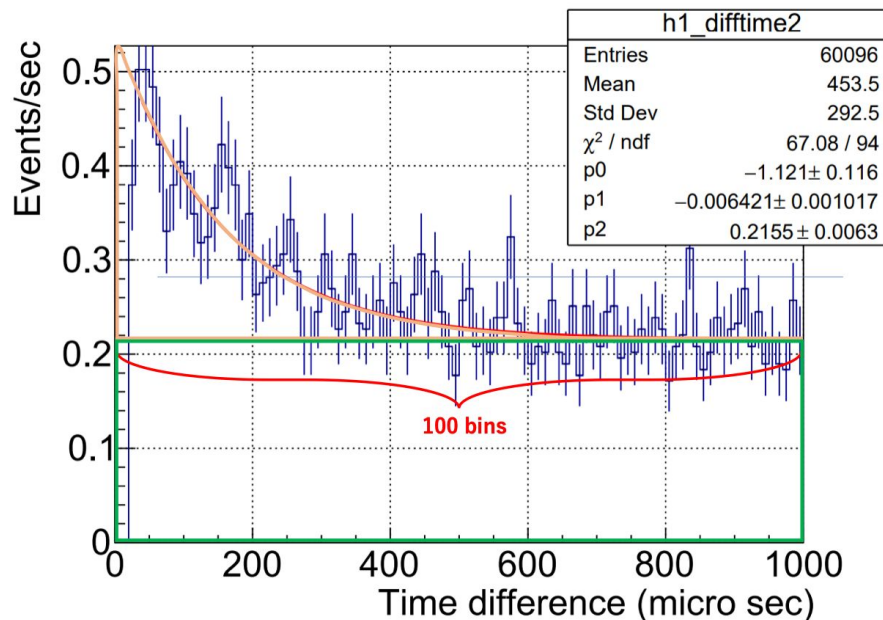
イベントの時間間隔

ディレイドコインシデンス現象の  
1つ目のイベントと  
2つ目のイベントの時間間隔は  
100 $\mu$ s程度



# 実験結果 検出効率

$$\text{efficiency} = \frac{N_{\text{チェレンコフ}}}{N_{\text{シンチレーション}}}$$

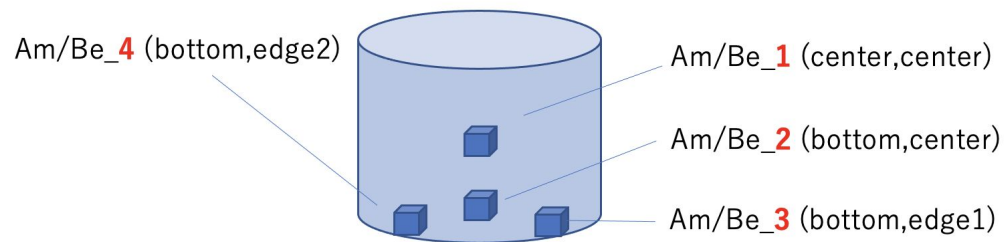


## 実験結果 検出効率

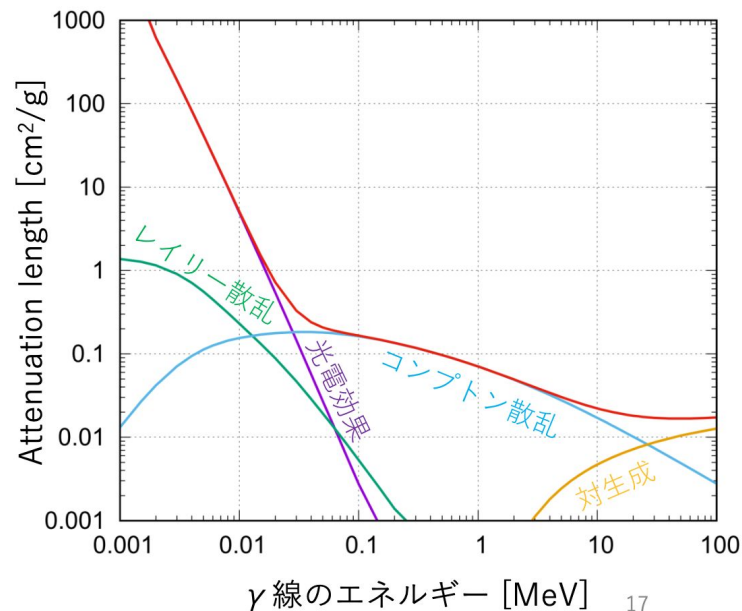
|       | efficiency[%] |
|-------|---------------|
| AmBe1 | 1.196         |
| AmBe2 | 1.750         |
| AmBe3 | 1.060         |
| AmBe4 | 1.380         |

$$\text{efficiency} = \frac{N_{\text{チェレンコフ}}}{N_{\text{シンチレーション}}}$$

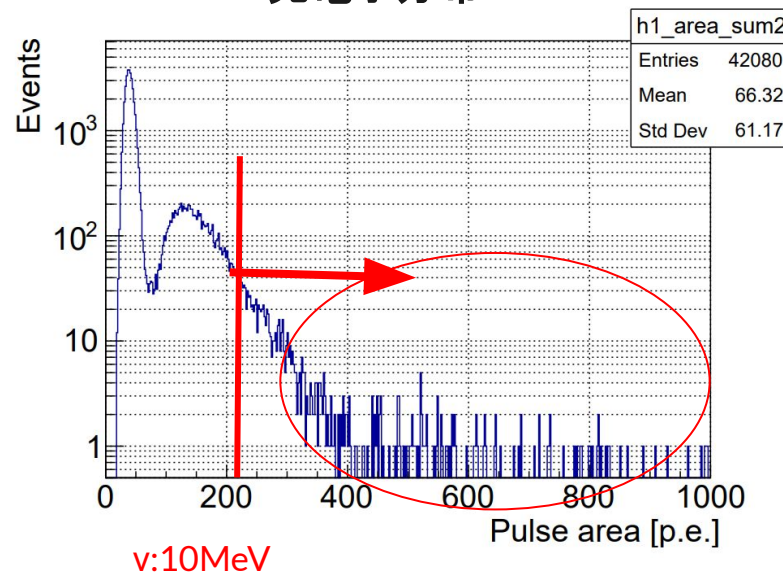
• Am/Be



# 実験結果 超新星背景ニュートリノの条件を絞り込む



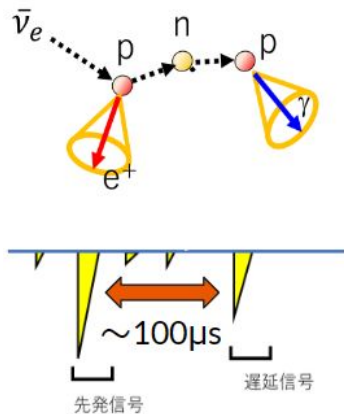
光電子分布





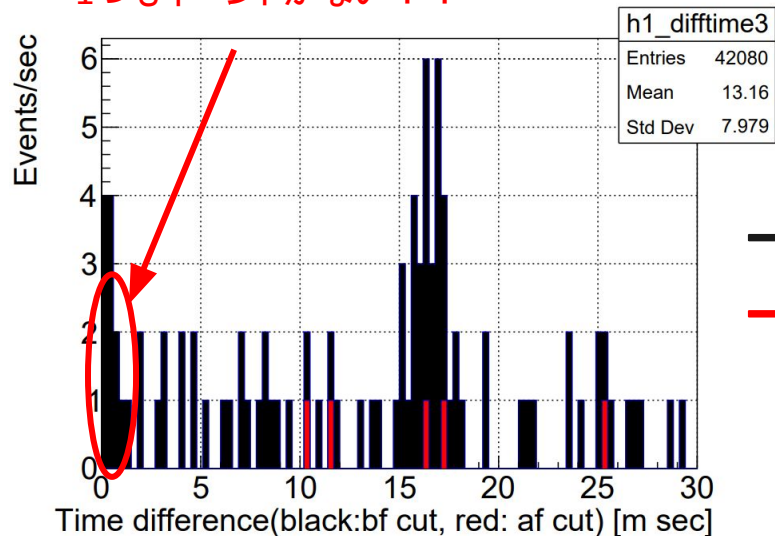
## 実験結果(線形と仮定した時)

さらにチェレンコフ光のイベント数を絞る

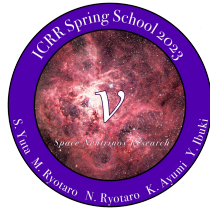


## 時間差分布

1つもイベントがない！！



— 生データ  
— 絞り込み後



## 実験結果 Fluxの上限値の算出

積分範囲を9.5～10.5 MeVにする

$$N_{expected} = (\tau \times N_{proton}) \times \int_{E_1}^{E_2} \sigma(E_\nu) \phi(E_\nu) dE_\nu$$

・  $N_{expected}$  : 検出器内で発生すると期待される事象数

・  $\tau$  : 測定時間 [sec]

・  $N_{proton}$  : 検出器内の陽子数

・  $\sigma(E_\nu)$  : 反応断面積 [ $\text{cm}^2$ ]

・  $\phi(E_\nu)$  : Flux [ $/\text{cm}^2/\text{sec}/\text{MeV}$ ]

$$N_{expected} \times \text{efficiency} = 2.3$$

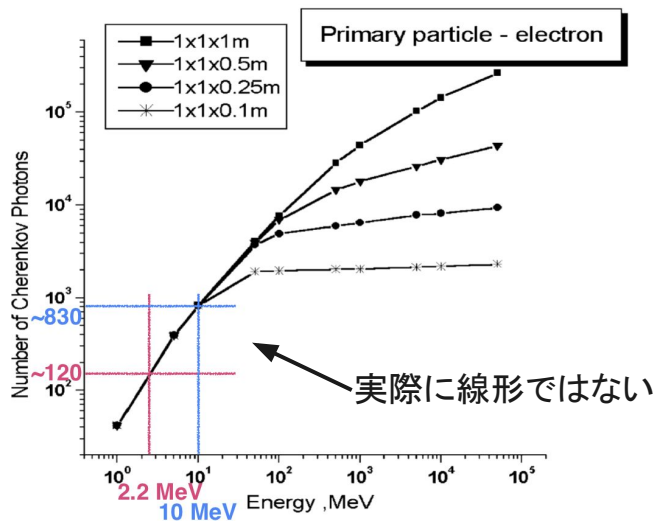
→ AmBe1,2,3,4それぞれの $\phi(E_\nu)$ を求める

## 実験結果 Fluxの上限値の算出

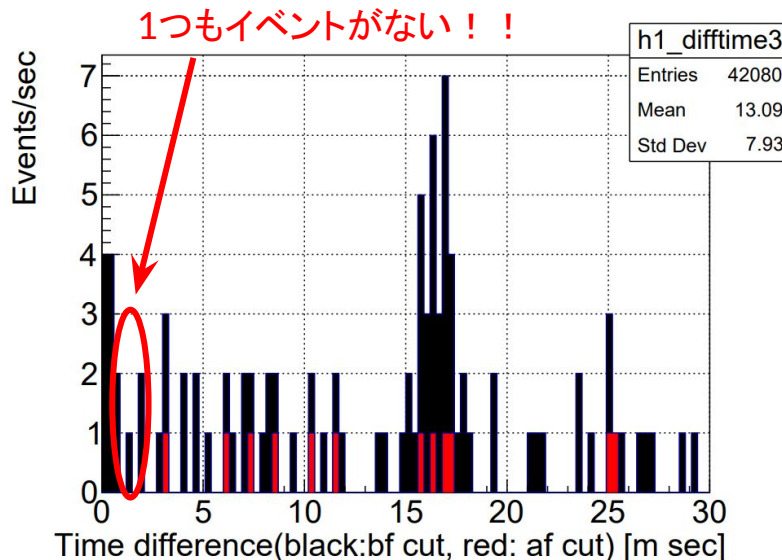
AmBe1,2,3,4のそれぞれのefficiencyを用いて  
計算すると以下のようなになる

|       | $\phi(E_\nu)[/\text{cm}^2/\text{sec}/\text{MeV}]$ |
|-------|---------------------------------------------------|
| AmBe1 | $3.26 \times 10^9$                                |
| AmBe2 | $2.23 \times 10^9$                                |
| AmBe3 | $3.68 \times 10^9$                                |
| AmBe4 | $2.83 \times 10^9$                                |

## 実験結果(文献値)



## 時間差分布

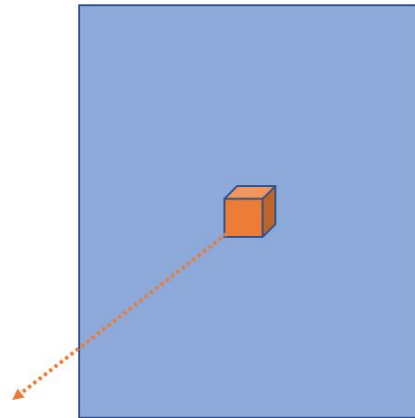


— 生データ  
— 絞り込み後

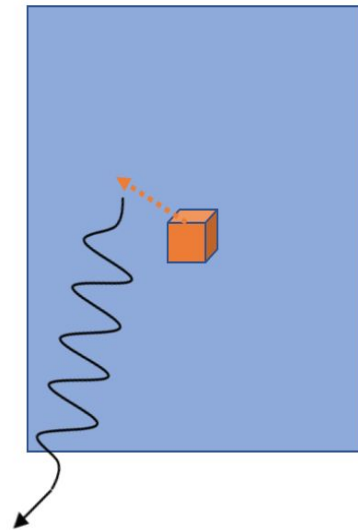
## 考察

検出効率が低い理由

1. 中性子が容器外に出ていった
2. 中性子が $\gamma$ 線になってから出ていった

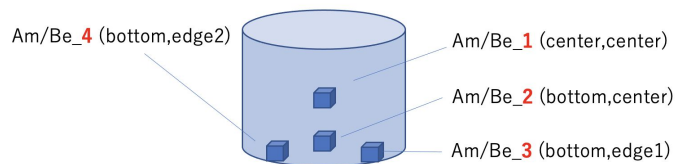


中性子その  
まま出ていく場  
合



$\gamma$ 線になってから  
出ていく場合

## 考察

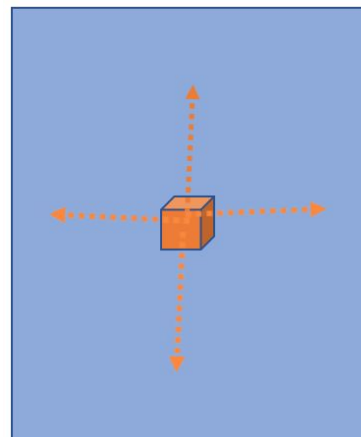


検出効率を上げるためには

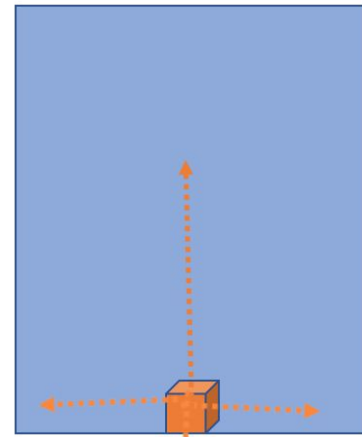
→水が分厚ければ良い

- ・AmBe\_1: 全体として水が薄い
- ・AmBe\_2: 容器上方向に水が分厚い

→AmBe\_2がAmBe\_1に比べ検出効率が高くなり得る



Position1: 全体的に水が薄い



Position2: 上方向に水が厚い



# Super Kamiokande(SK)の結果 との比較

・SK

efficiency: 20%

探索日数: 3000日

水の体積: 22.5 kt

・今回の検出器

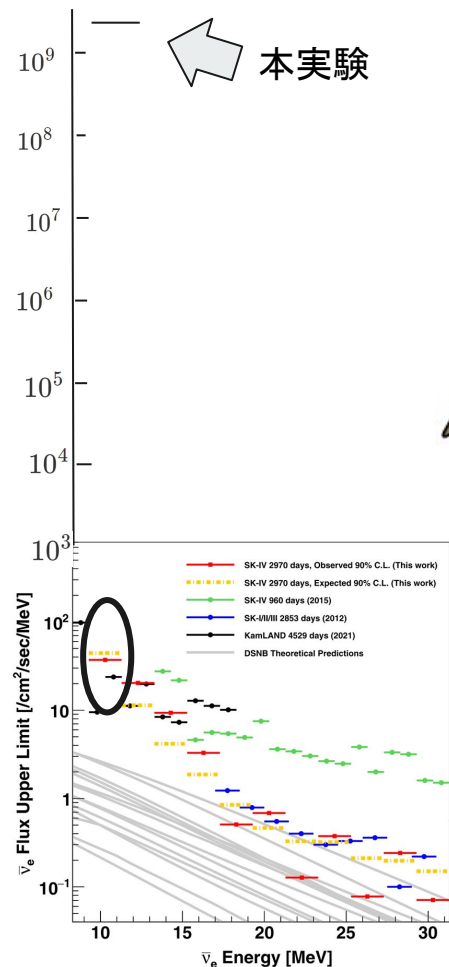
efficiency: 1 %

探索日数: 7日

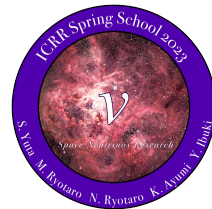
水の体積: 40 kg

SKと同等のFluxの上限 (upper limit)  
を得るには、1000万年かかる

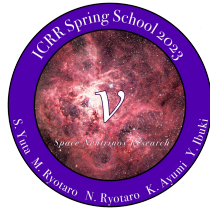
→ 現実的には、より大きな検出器が必要



本実験



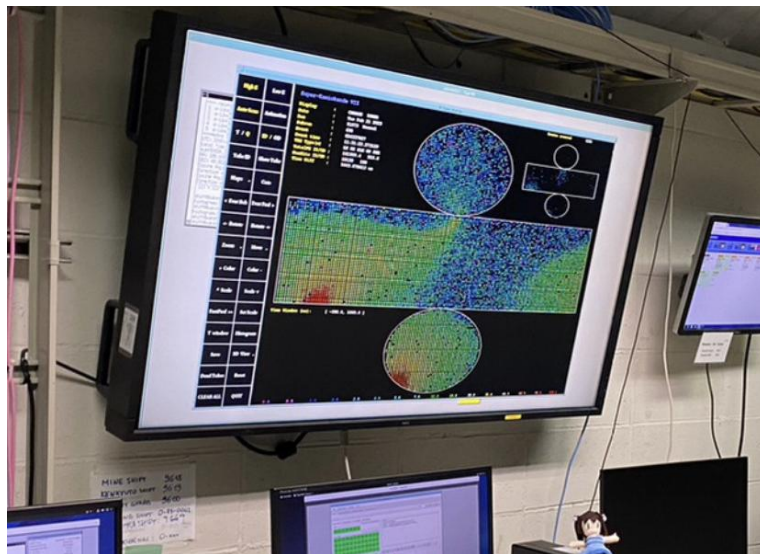
SK



## まとめ

- ・超新星背景ニュートリノの検出を試みるため、  
ミニカミオカンデを組み立て実験を行った
- ・Am/Beの測定データから検出効率を求めた
- ・超新星背景ニュートリノと思われるイベントはなかった
- ・Fluxの上限値を決めた

ご清聴ありがとうございました！



## Q & A 実験結果 LEDによる校正

光電子数は正規分布に従い  $N \pm \sqrt{N}$

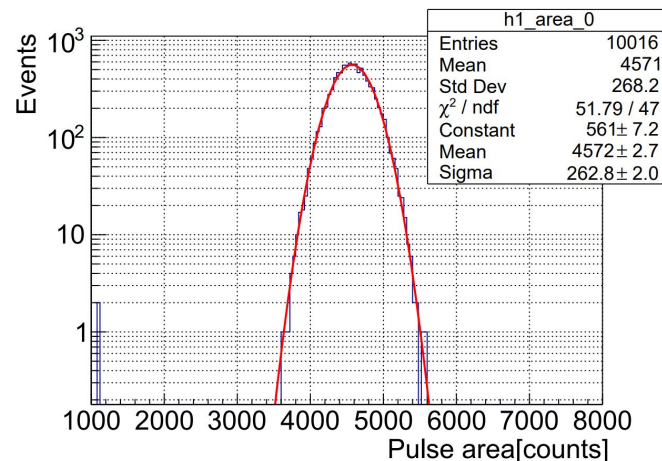
PMTの増幅率がG、FADCによって1 eVが

A countsに変換されるとすると

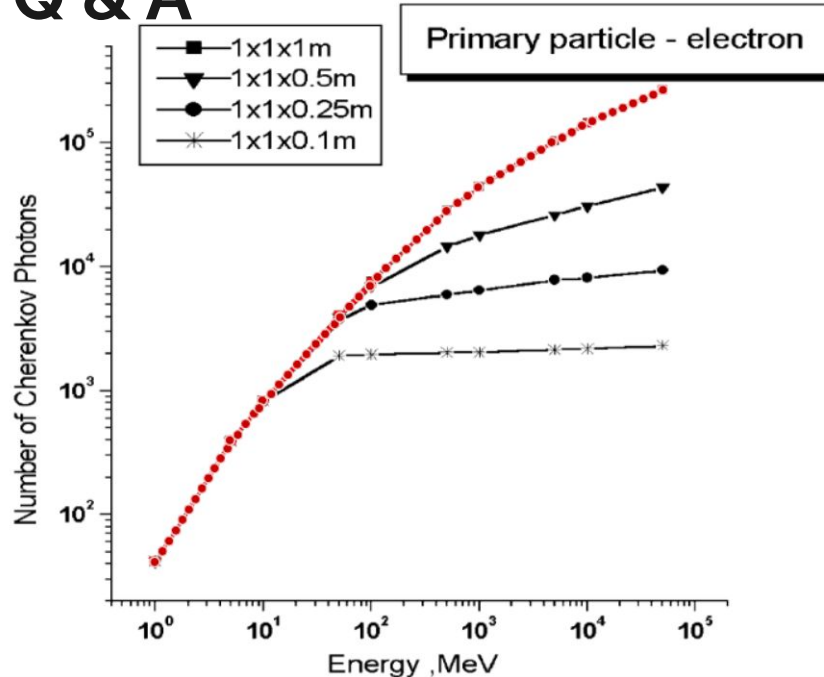
得られる信号は  $\mu \pm \sigma = GAN \pm GA\sqrt{N}$

$$1 \text{ p.e.} = \frac{\sigma^2}{\mu} \text{ counts} = 15.0 \text{ counts}$$

LEDによる測定データ count数分布

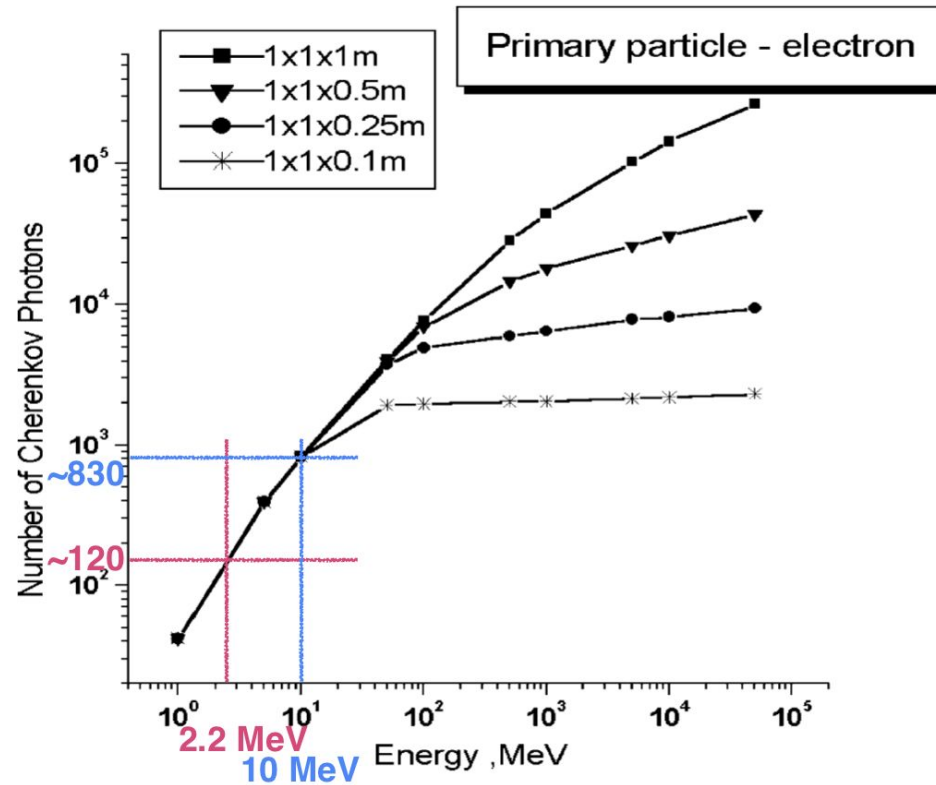


# Q & A



|                    |                    |
|--------------------|--------------------|
| 1.1736706594824586 | 50.64063226549253  |
| 1.3480687518233103 | 61.13903208182589  |
| 1.5637790575434334 | 74.34847180158472  |
| 1.7961441441840145 | 90.76042701435067  |
| 2.063036828076284  | 109.70925413231062 |
| 2.369587634589653  | 132.7775691599967  |
| 2.721689444214112  | 162.0873782994406  |
| 3.12611077244641   | 196.1691222160827  |
| 3.555270099420569  | 235.4763558479149  |
| 4.043345357830126  | 282.77577628288117 |
| 4.696973664662483  | 338.8799715720546  |
| 4.928241392704123  | 395.33049699932315 |
| 5.845542541500697  | 438.22307028528587 |
| 6.899361493974695  | 536.5558445919697  |
| 8.24451137356531   | 647.336174096849   |
| 9.851921492765456  | 828.3298524514902  |
| 11.88979919834706  | 932.6977124062437  |
| 14.06802023410109  | 1112.0112671470426 |

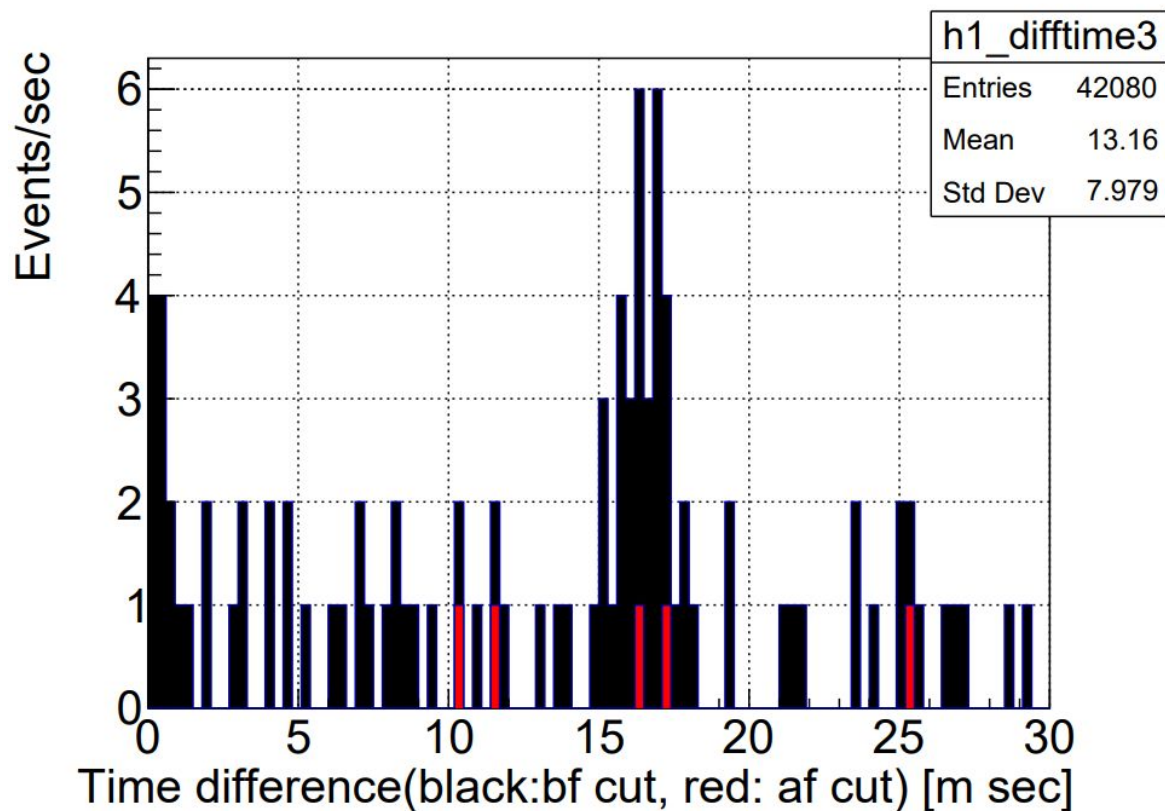
## Q & A



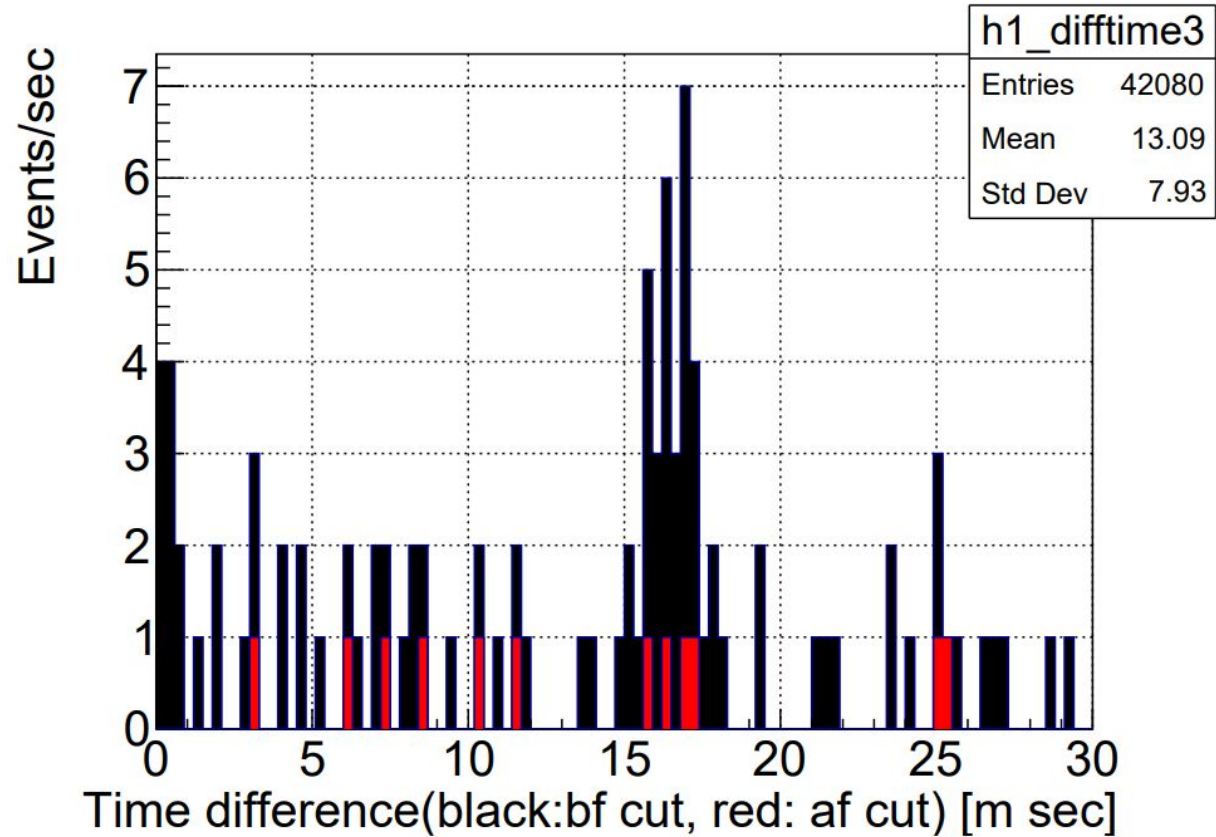




## Q & A



Q & A





## Q & A Poisson 分布

$$P(x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!} \quad : \text{期待値}\lambda\text{の事象が}x\text{回観測される確率}$$

今回は $x=0$ の90%

$$P(x=0) = \frac{\lambda^0 e^{-\lambda}}{0!} = 0.1$$

$$\lambda = -\ln(0.1) \sim 2.30$$



## Q & A 神岡の情報

- ・神岡の情報 地下1000m

気温年中ほぼ変わらない

- ・地下で行う理由

ノイズとなる宇宙線ミュオン

地上 →  $100 \text{ [/sec/cm}^2\text{]}$

地下(10万分の1) → バケツ 1日で8ぱつ



## Q & A 期待値2.3

期待値2.3について

Pisson分布より，期待値 $\lambda$ の事象が $x$ 回観測される確率は，

$$P(x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!}$$

であり，今回は90%の確率で $x = 0$ と考えて，

$$P(0) = \frac{\lambda^0 e^{-\lambda}}{0!} = 0.9$$

$$\lambda = -\ln(0.1)$$

$$\sim 2.30$$