

# 高エネルギーガンマ線天文学グループ

3月8日(金) 最終発表

渡邊、宮崎、森田、ケンプ、岸川

01

概要

# 高エネルギーガンマ線天文学の意義

- ガンマ線は磁場の影響を受けずに宇宙空間を直進  
→ **ガンマ線の生成場所**が特定可能
- ガンマ線の生成場所はパルサーや活動銀河核など  
→ **宇宙の極限環境における物理**がわかる

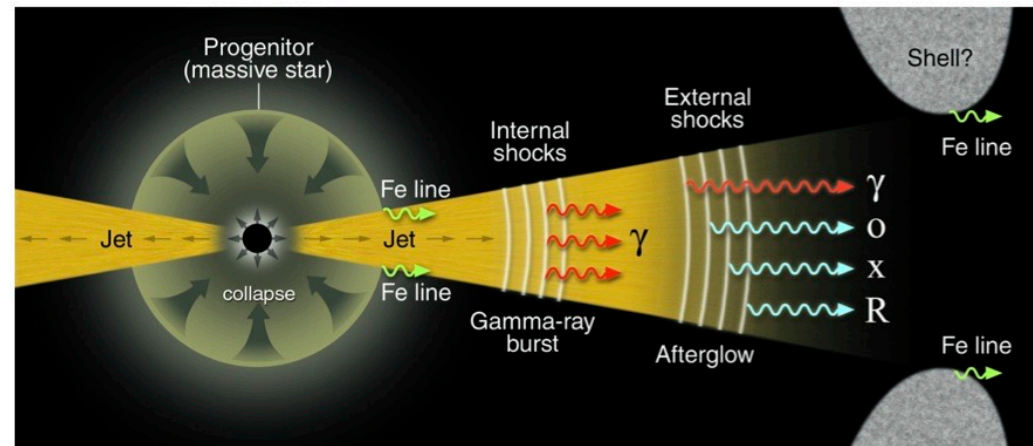


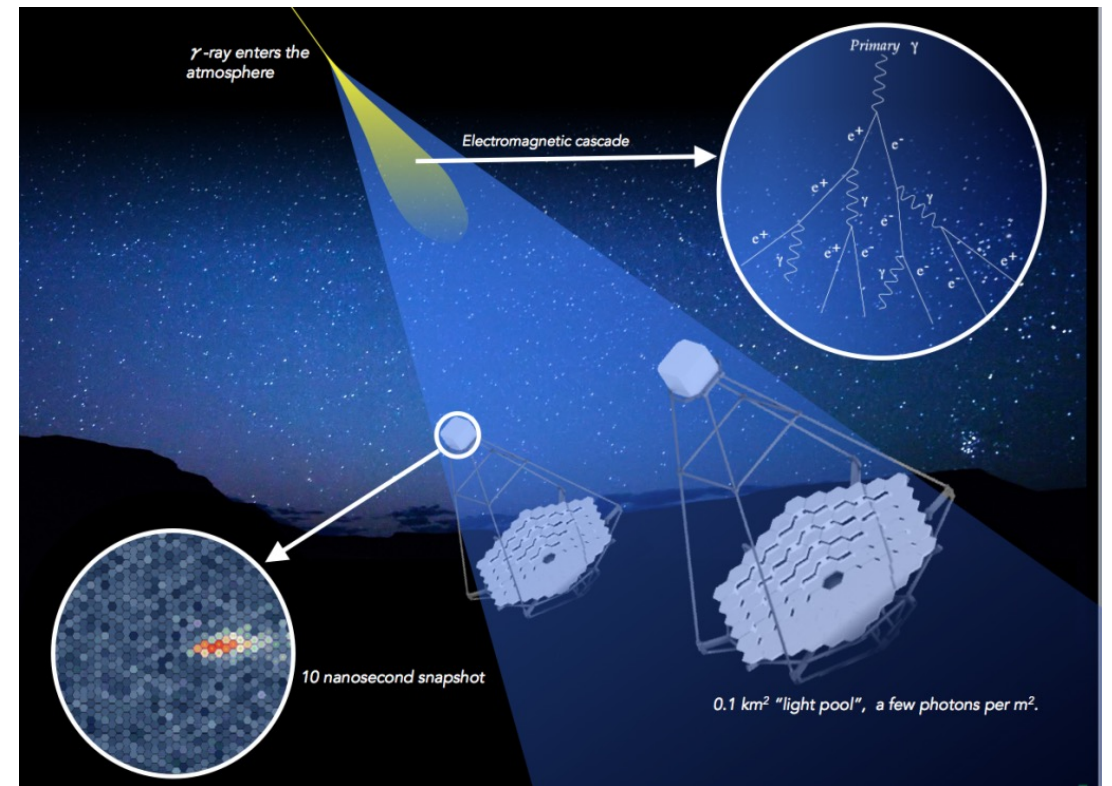
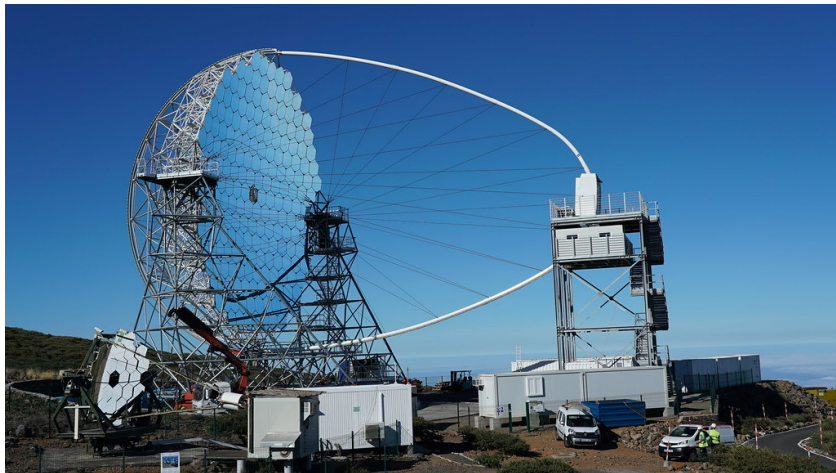
図. パルサーとガンマ線バースト

(宇宙線研究所チェレンコフ宇宙ガンマ線グループ)

# チェレンコフ望遠鏡でガンマ線を捉える

- 高エネルギーの地球大気に入射したガンマ線  
→ **光電子増倍管 (PMT)** などの光センサーで捉える

図.  
左：チェレンコフ望遠鏡アレイ大口径望遠鏡  
(宇宙線研究所チェレンコフ宇宙ガンマ線グループ)  
右：ガンマ線を望遠鏡で捉えるイメージ  
(Cherenkov Telescope Array)



# 空気シャワー

- **ガンマ線**が地球大気に突入し、電子・陽電子対生成と制動放射を繰り返して起こす
- 入射粒子が**原子核**の場合は多様な粒子が生成される( $\pi$ 粒子、ミューオンなど)

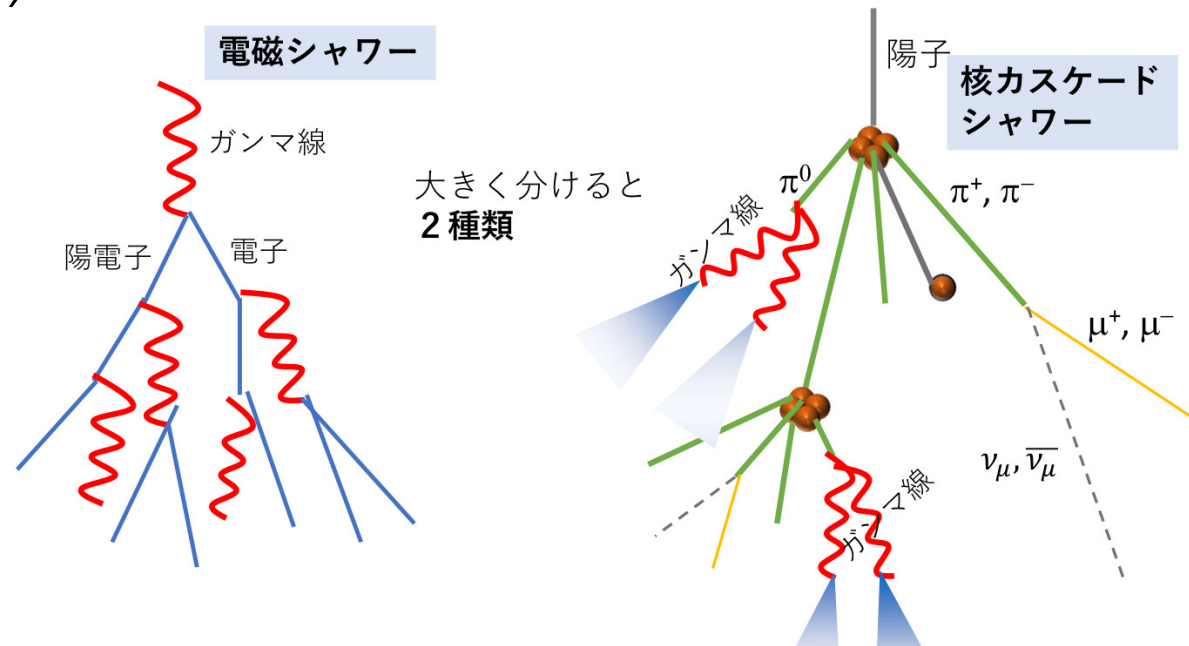


図. 空気シャワーの概念図  
(Oishi's slide)

# ミューオン( $\mu$ )

- 荷電粒子なので計測が容易
- 寿命は $2.2 \times 10^{-6}$  s
- 相対論的な速度で運動している粒子は静止系から見ると $\gamma$ 倍寿命が伸びる

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \beta = \frac{v}{c}$$

ミューオンは地上に届きやすく観測しやすい



- $\pi$  粒子は崩壊する
- 電子は制動放射する

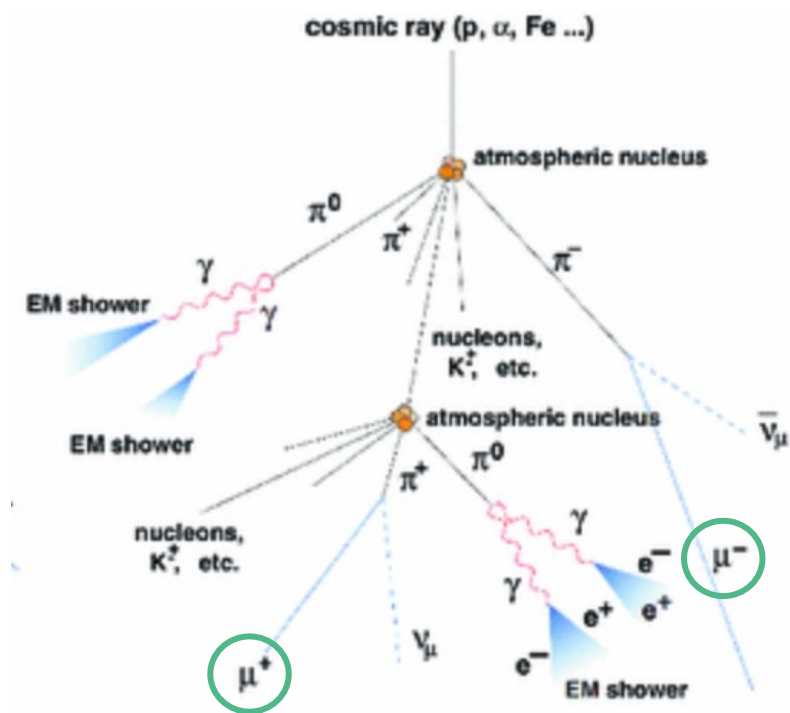


図. 空気シャワーの概念図

(Wagner 2006)

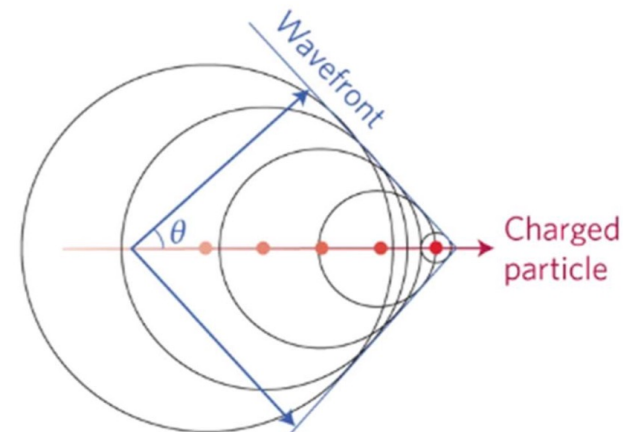
# 荷電粒子の出すシグナル（チェレンコフ光）

- 空気や水などの媒質中を  
(荷電粒子の速度) > (その媒質中を進む光速) で運動

$v$

$\frac{c}{n}$

→ チェレンコフ光が放射



Nature Nanotechnology (*Nat. Nanotechnol.*)  
ISSN 1748-3395 (online) ISSN 1748-3387 (print)

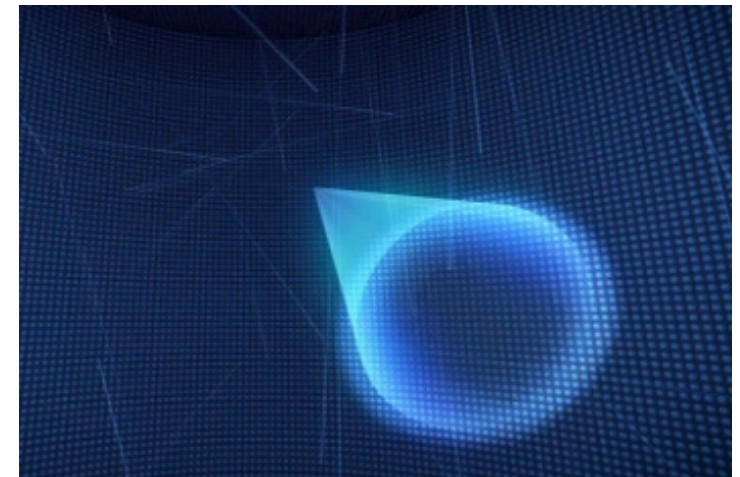


図.  
左：チェレンコフ光の広がり (Oishi's slide)  
右：チェレンコフ光のモデル(スーパーカミオカンデ,  
宇宙線研究所)

# ミューオンリング

- ミューオンが放出した**チェレンコフ光**がリング状に投影される

粒子の種類 … 形状

粒子の来た方向 … 検出時刻の差と形状

粒子の持つエネルギー … 光量

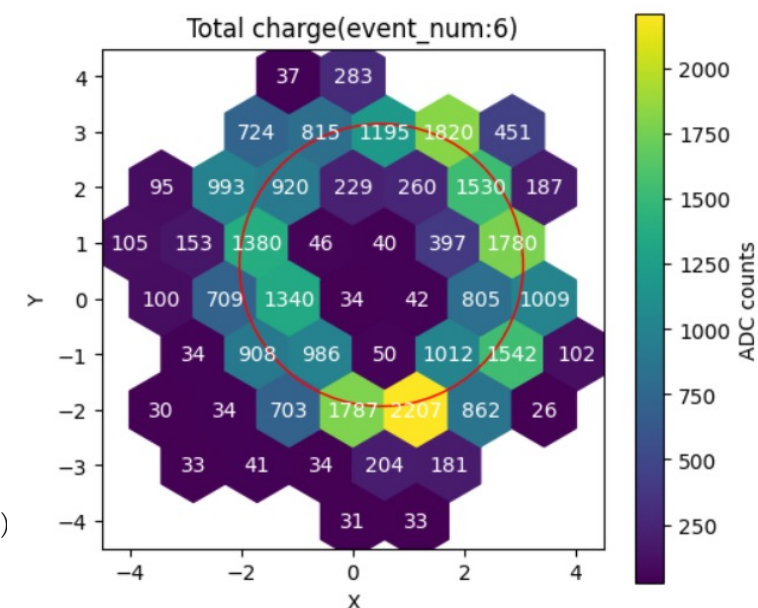


図. リングの例(実験データ)



# 今回の実験の概要

- ミューオンからの**チェレンコフ光**の検出を行う
- PMTの較正
- **水**での測定
  - **チェレンコフ角**の測定
  - **光量**の測定
- **アクリル**や**シンチレータ**での測定
  - チェレンコフ光の変化の様子



測定の様子

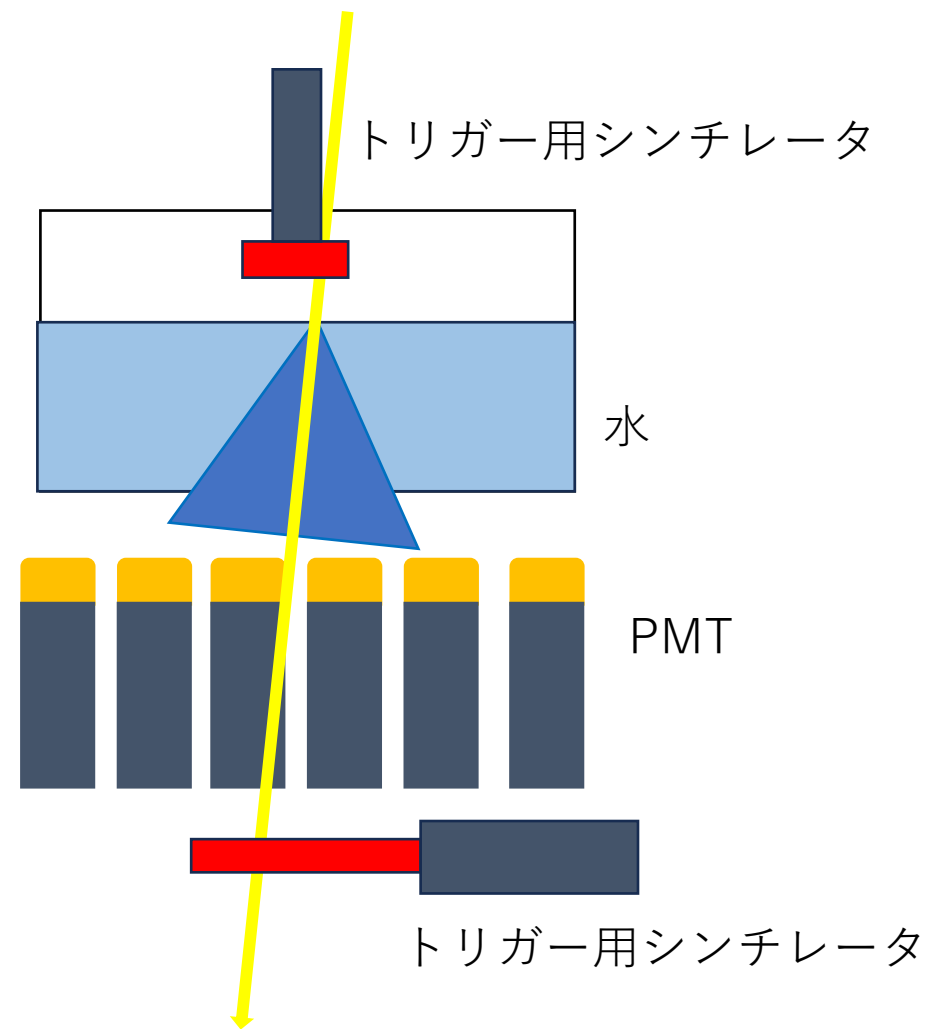
02

検出器  
測定原理

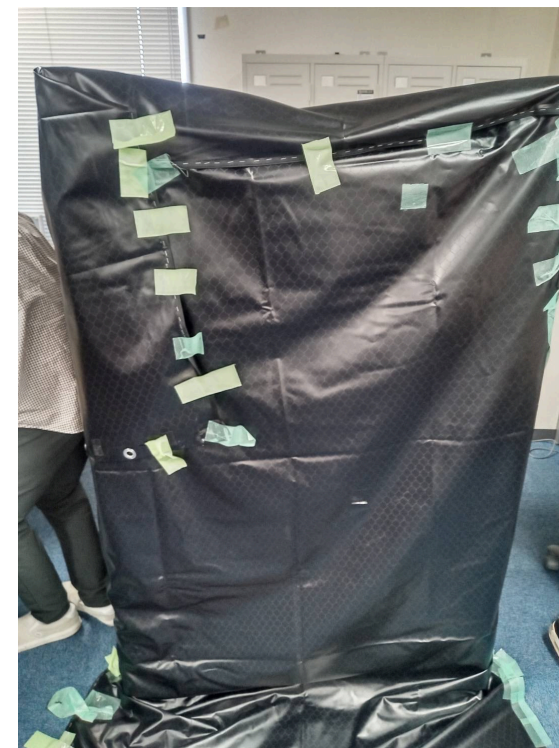
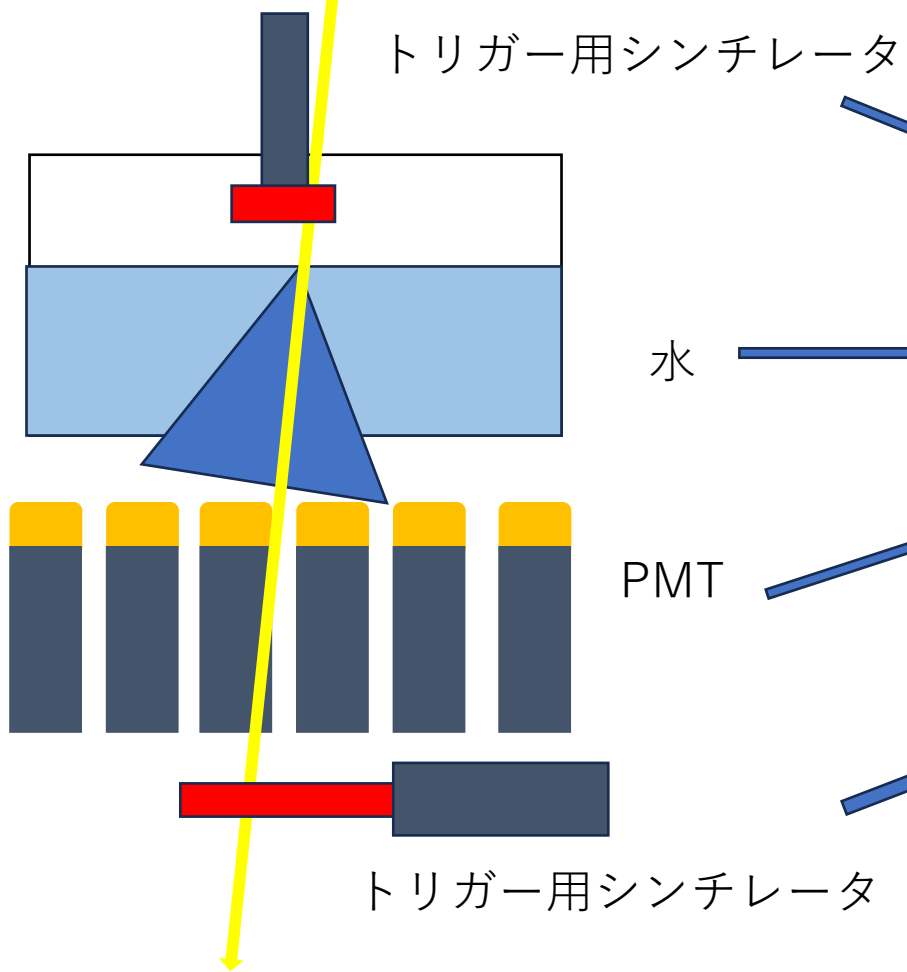
# 検出器

ミューオンによる**水チェレンコフ光**を  
光電子増倍管（PMT）で測定

上下のトリガーに反応があった瞬間の  
光量を取得



# 検出器



測定時  
外部からの光を遮断

# 検出器



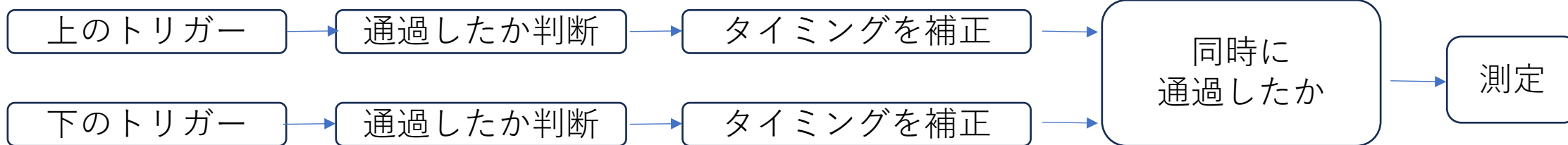
ゲートジェネレータ

トリガーからの信号



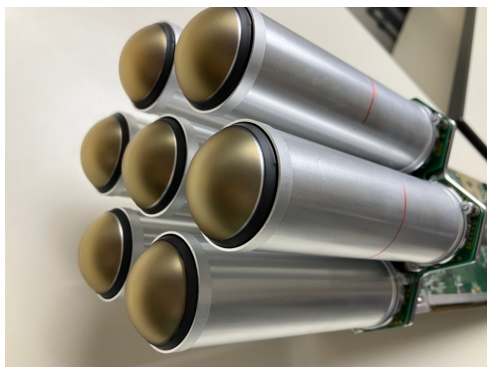
ディスクリミネータ

コインシデンス

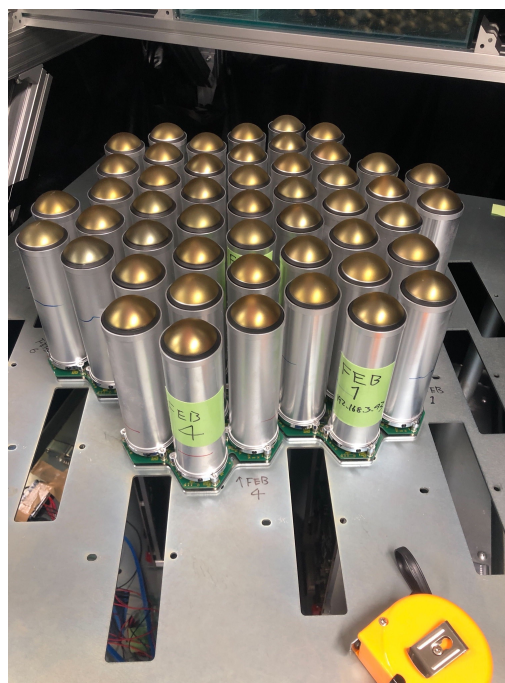


# 光電子増倍管 (PMT)

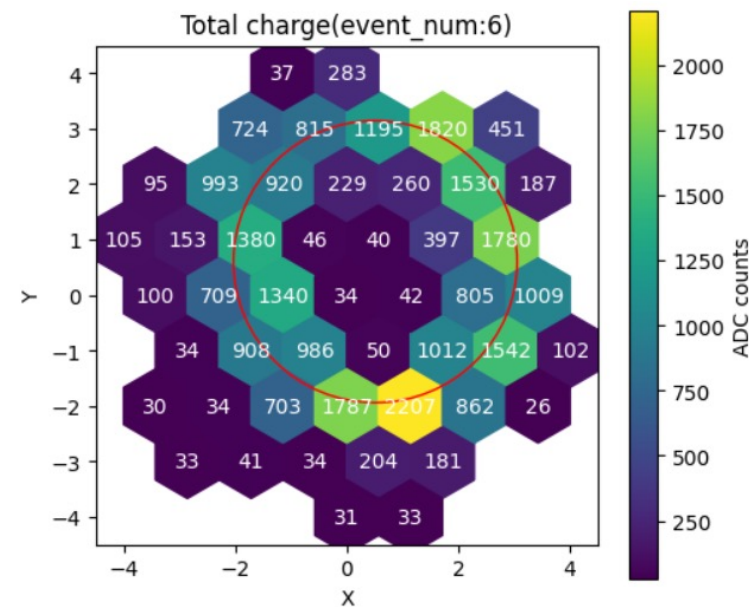
高感度の測定が可能



7本で1module



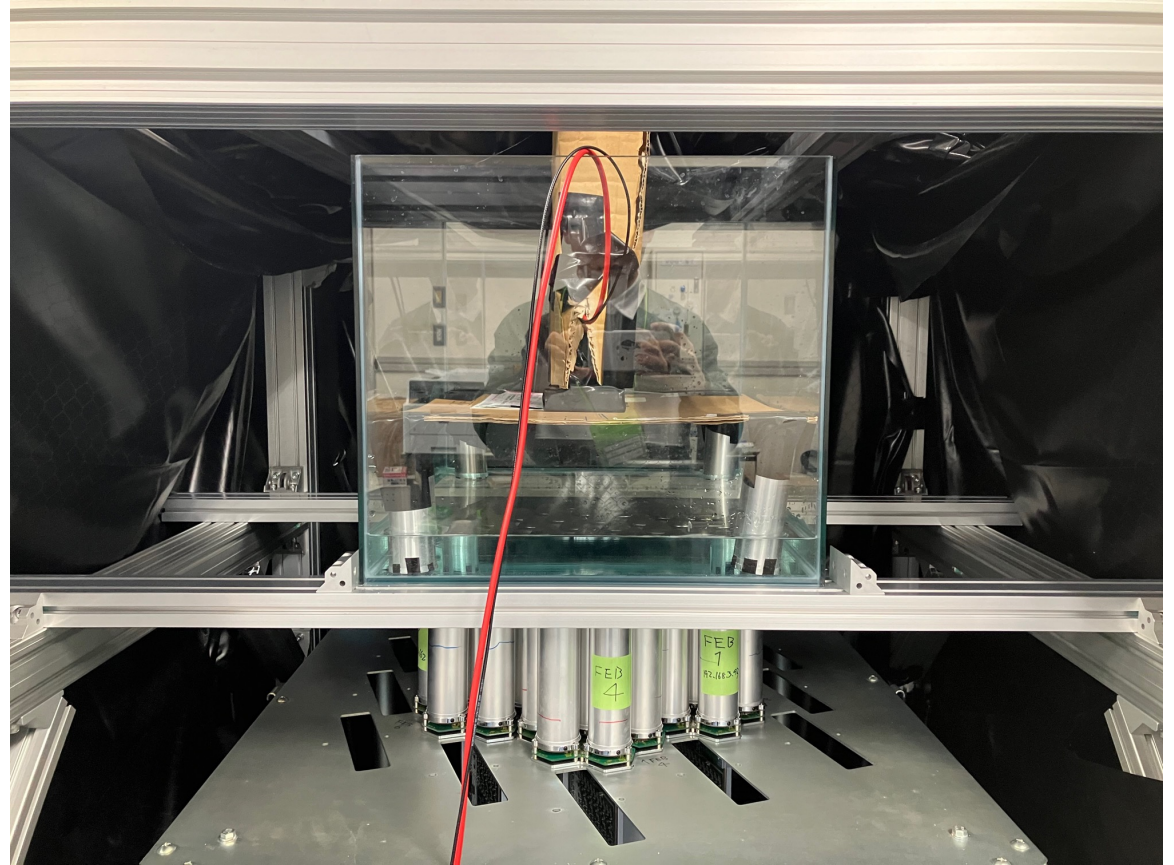
7 module(49本)



実験データの例  
(Pythonを使用)

# 測定

- ・ 水（深さ2.0cm、4.0cm、5.0cm、7.0cm）
- ・ アクリル板（厚さ3.0cm）
- ・ シンチレータ（厚さ5.0cm）



03

PMT較正



# PMT校正

・ 今回のPMT(光電子増倍管)の光電面と初段は350Vで固定されていて、残り6段が等分割されている。

・ 各ダイノード間で電子は

$$\delta = AE^k \text{ 倍} \quad (E: \text{ダイノード間の電圧}, k \sim 0.7)$$

よって、増倍率Gと電圧Vの関係式は

$$G = G_1 (V - 350)^{\sim 4}$$

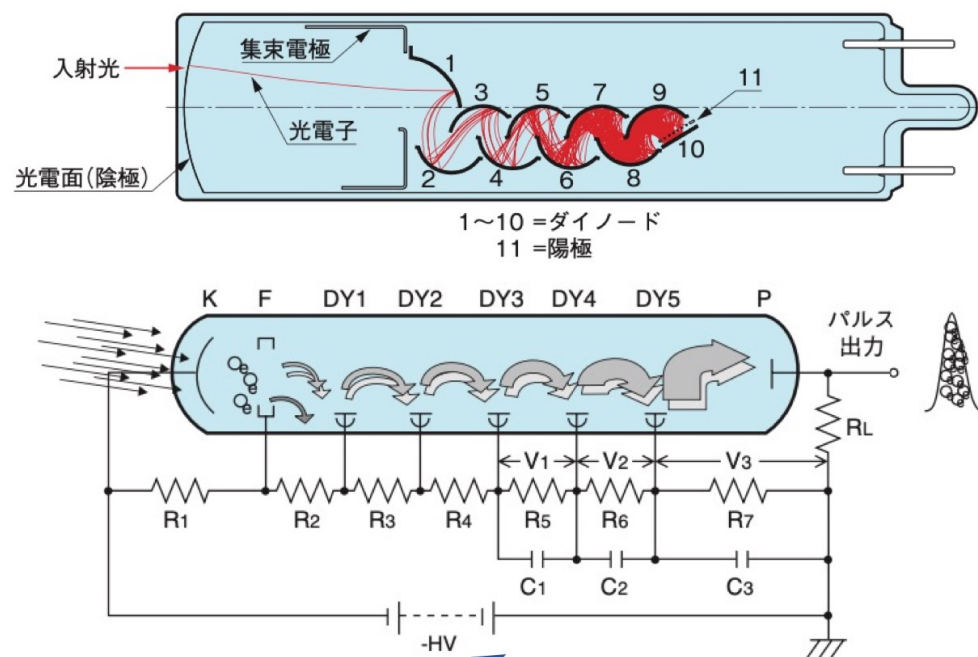
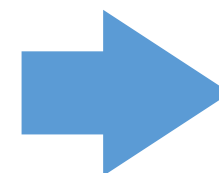
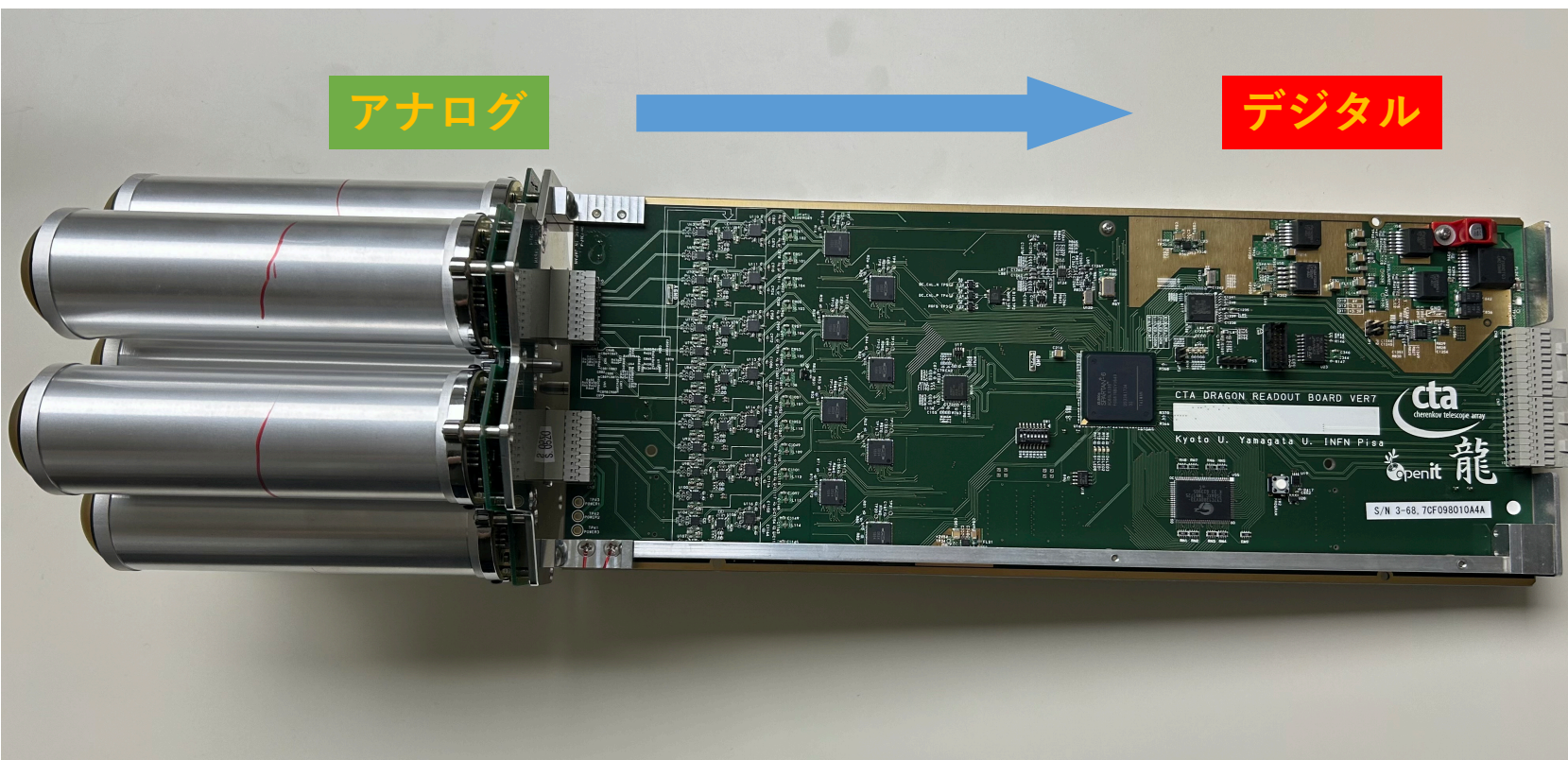


図. 光電子増倍管内部の仕組み

# PMT校正

PMT7本(ピクセル)+ボードで1モジュール

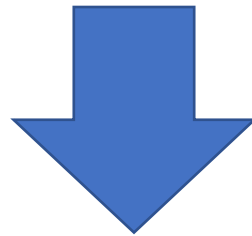


入力した光を  
をADC count  
として記憶す  
る

図. 光電子増倍管モジュール

# PMT較正

- ・ 同じ電圧をかけても増倍率はPMTごとに異なる
- ・ 良い測定のために全てのPMTの増倍率を30000に揃えたい



それぞれのPMTで、

ある電圧における増倍率

電圧と増倍率の関係

を求めることで増倍率が30000になる高圧の値を求めることができる。

# PMT較正

## 測定1

PMTに高めの電圧(1400V)をかけて微弱なパルスを送り、10000回測定する

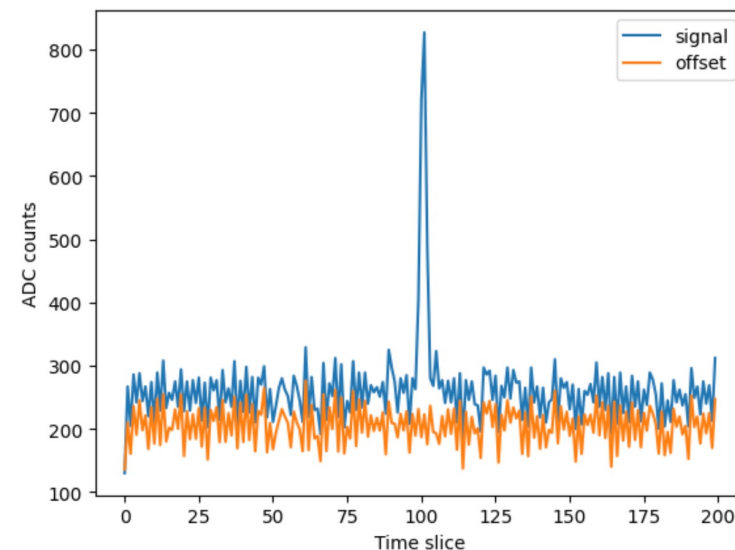
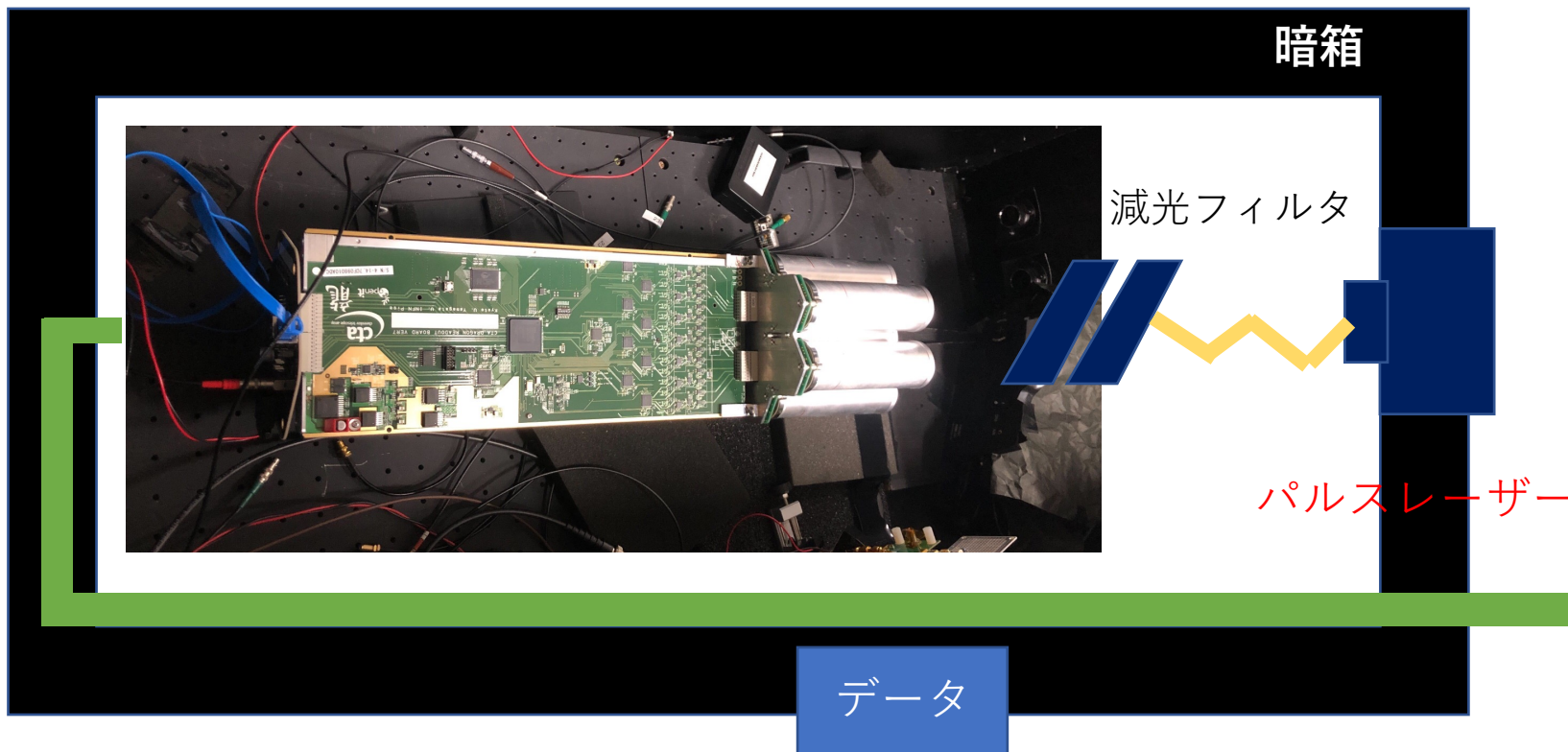
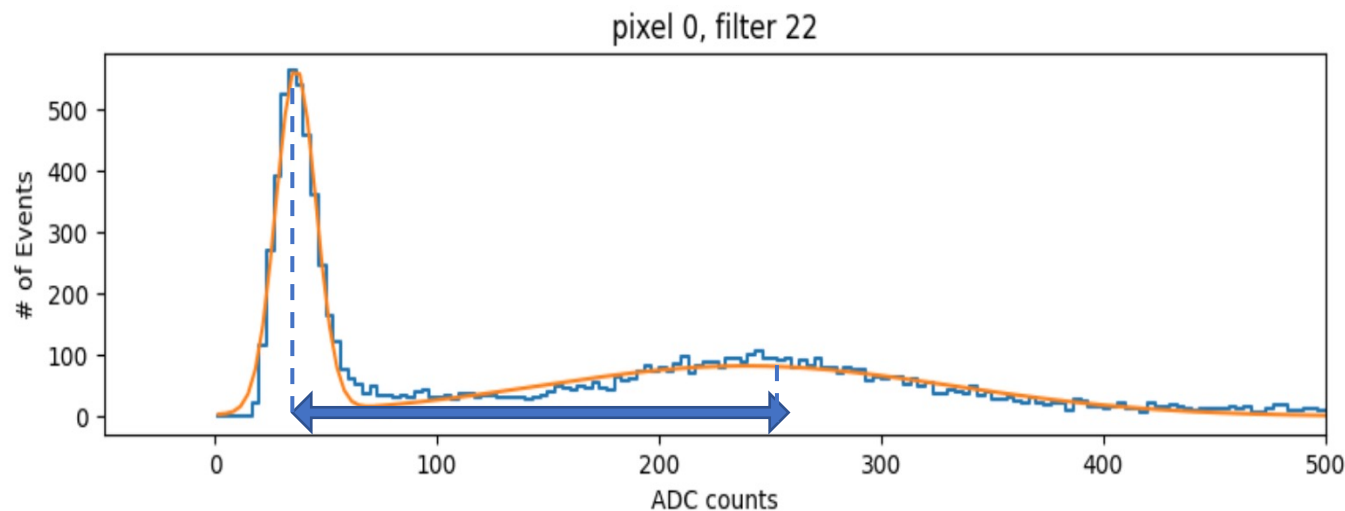


図. 一つのパルス事象の例

# PMT較正

## 測定1. 結果

一つのパルス事象における出力電荷量のデータをあつめてヒストグラムに



二つのピークの差から1光電子あたりのADCを算出



1400Vでの増倍率がもとまる

表. 1400Vにおける各ピクセルごとの増倍率 (モジュール4)

ピクセル	増倍率
0	$5.21 \times 10^4$
1	$4.49 \times 10^4$
2	$7.28 \times 10^4$
3	$4.29 \times 10^4$
4	$7.26 \times 10^4$
5	$6.17 \times 10^4$
6	$6.51 \times 10^4$

# PMT較正

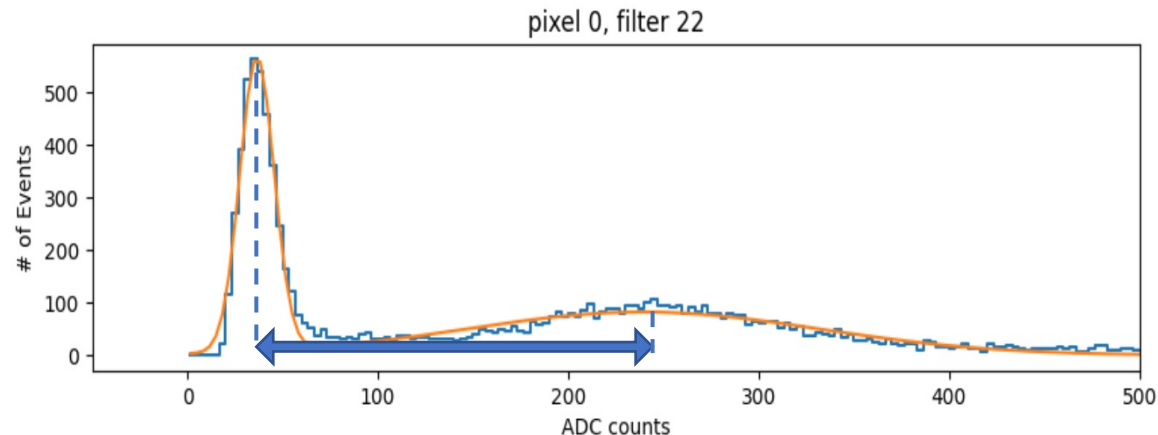
## 測定1 結果

測定1で得られた1光電子あたりのADC

ピクセル	増倍率
0	$5.21 \times 10^4$
1	$4.49 \times 10^4$
2	$7.28 \times 10^4$
3	$4.29 \times 10^4$
4	$7.26 \times 10^4$
5	$6.17 \times 10^4$
6	$6.51 \times 10^4$



増倍率  
30000倍に



増倍率30000のときの  
1光電子あたりADCカウント

**141.6 (ADC count)**

# PMT較正

## 測定2

明るいパルス(~20光電子)をさまざまな高圧で測定し、出力の電圧依存を見る

それぞれの電圧でピークのADCカウントを求める。



電圧と増幅率の関係式

$$G = G_1(V - 350)^\alpha + c$$

でフィッティング

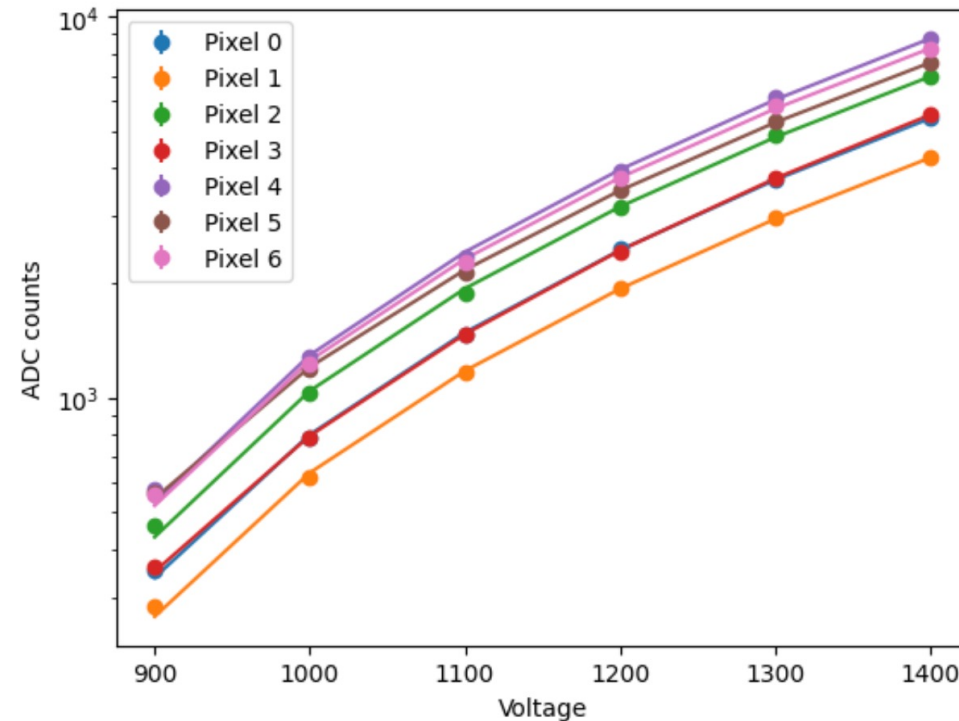


図. 出力の電圧依存性

# PMT較正

測定2 結果

$$G = G_1(V - 350)^\alpha + c$$

ピクセル	$G_1$	$\alpha$	$c$
0	$1.20 \times 10^7$	3.53	$-2.38 \times 10^2$
1	$1.18 \times 10^7$	3.50	$-1.97 \times 10^2$
2	$2.59 \times 10^7$	3.46	$-3.50 \times 10^2$
3	$3.68 \times 10^8$	3.70	$-1.69 \times 10^2$
4	$2.72 \times 10^7$	3.49	$-4.35 \times 10^2$
5	$2.96 \times 10^7$	3.45	$-3.01 \times 10^2$
6	$3.79 \times 10^7$	3.43	$-4.24 \times 10^2$

測定1,測定2から、  
かけるべき電圧が求  
まる。



電圧(V)
1256
1291
1177
1306
1179
1211
1200

表. 電圧-増倍率間の関係(モジュール4)



# 04

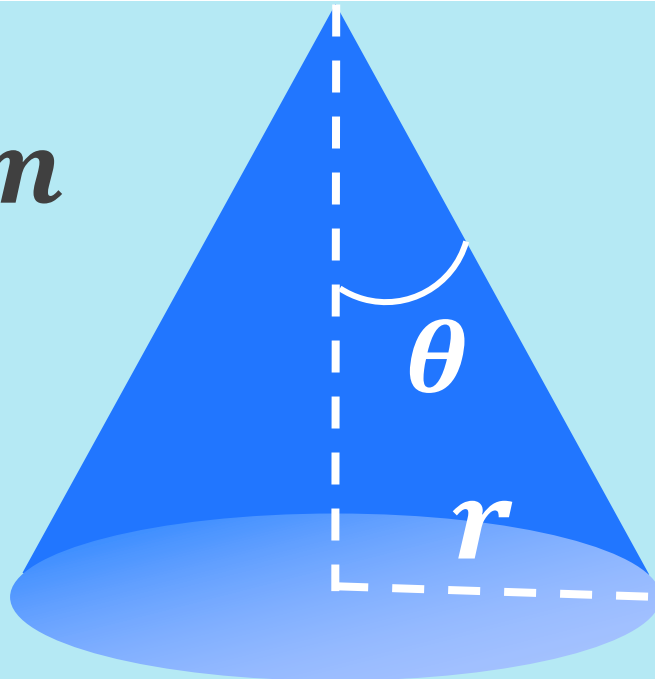
チェレンコフ角  
光量の測定  
～理論と実験～

# チェレンコフ角 $\theta$ の理論

ミューオン  
(ほぼ光速)



水  
屈折率  $n$



## 関係式

粒子が物質中の光速(=  $c/n$ )  
を超えた時に発生

$$\cos \theta = \frac{c}{nv}, \theta = 41.2^\circ$$

$\theta$  : チェレンコフ角

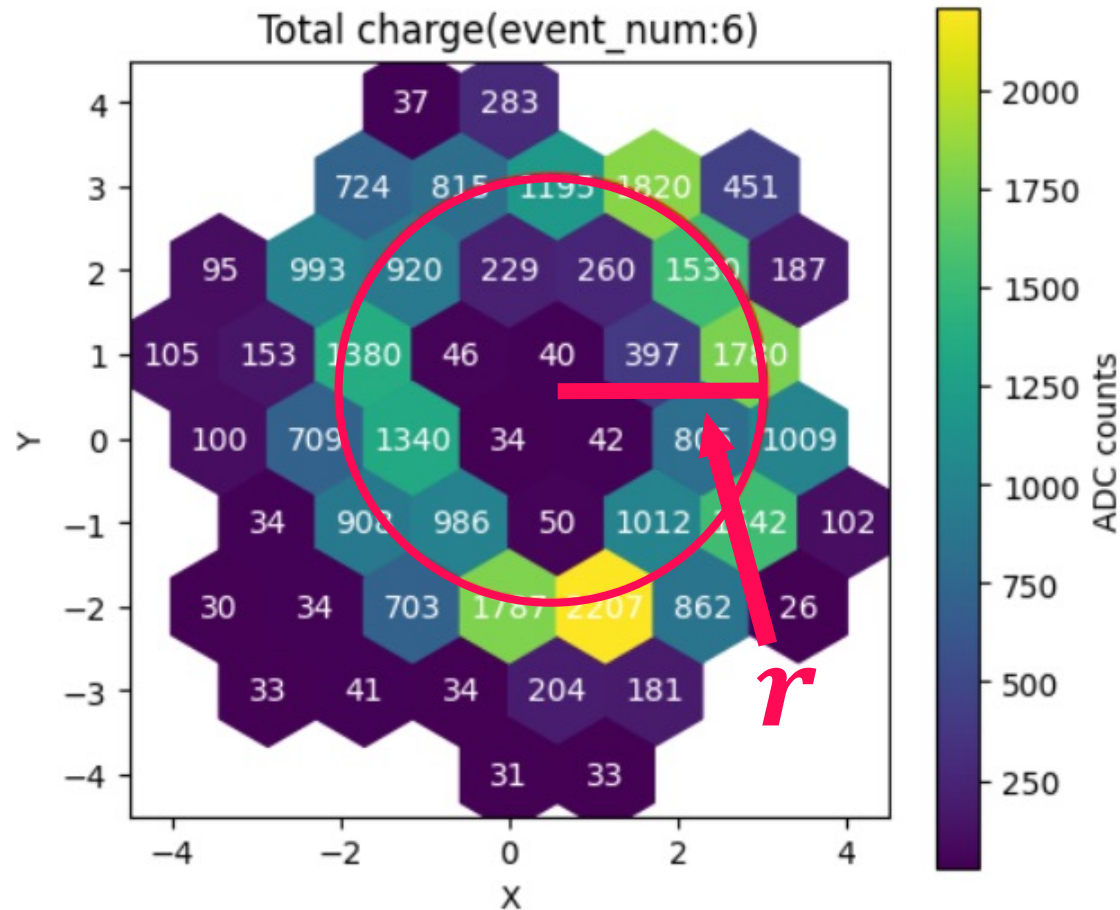
$n$  : 水の屈折率(1.33)

$v$  : 粒子の速度

$c$  : 光速

$r$  : チェレンコフ光の半径

# チェレンコフ角 $\theta$ の理論



## 関係式

粒子が物質中の光速(=  $c/n$ )  
を超えた時に発生

$$\cos\theta = \frac{c}{nv}, \theta = 41.2^\circ$$

$\theta$  : チェレンコフ角

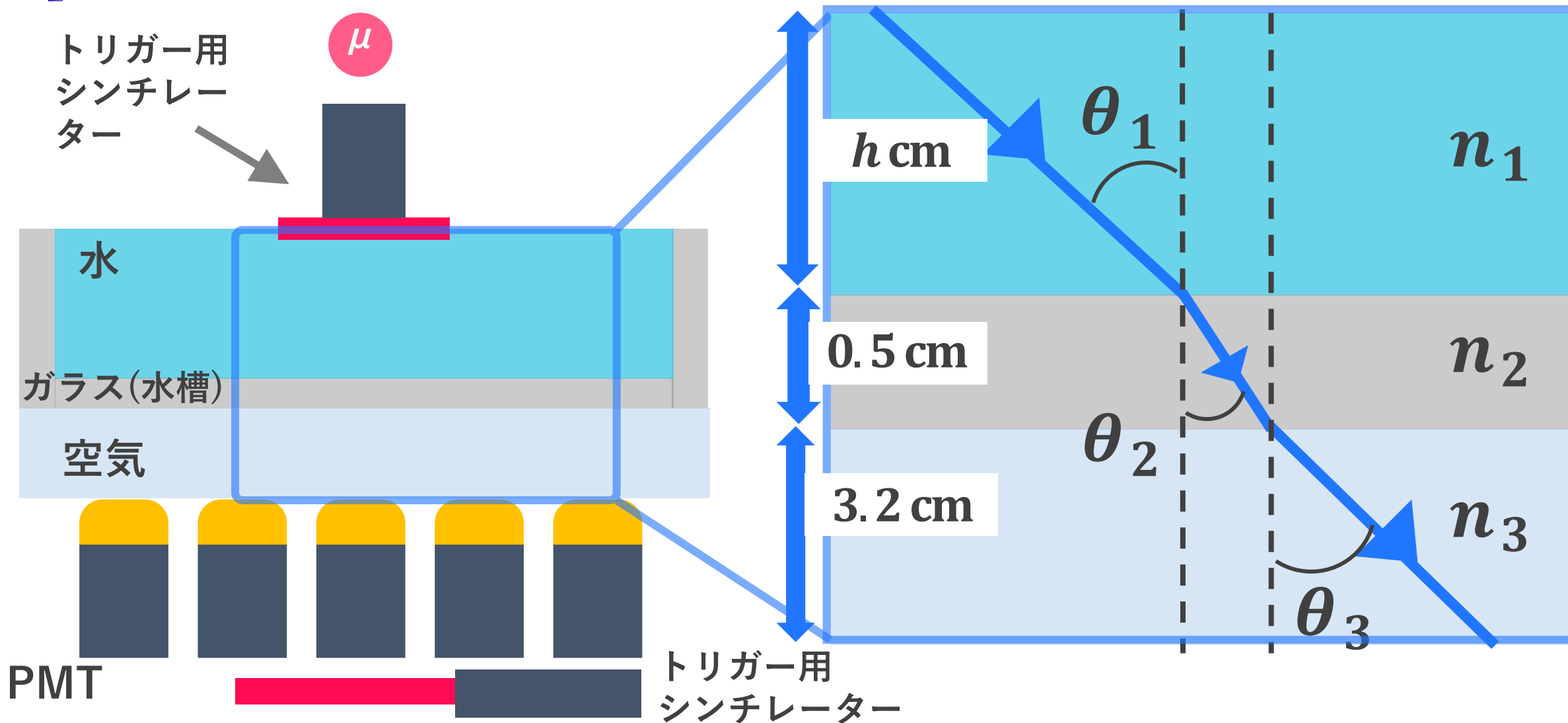
$n$  : 水の屈折率(1.33)

$v$  : 粒子の速度

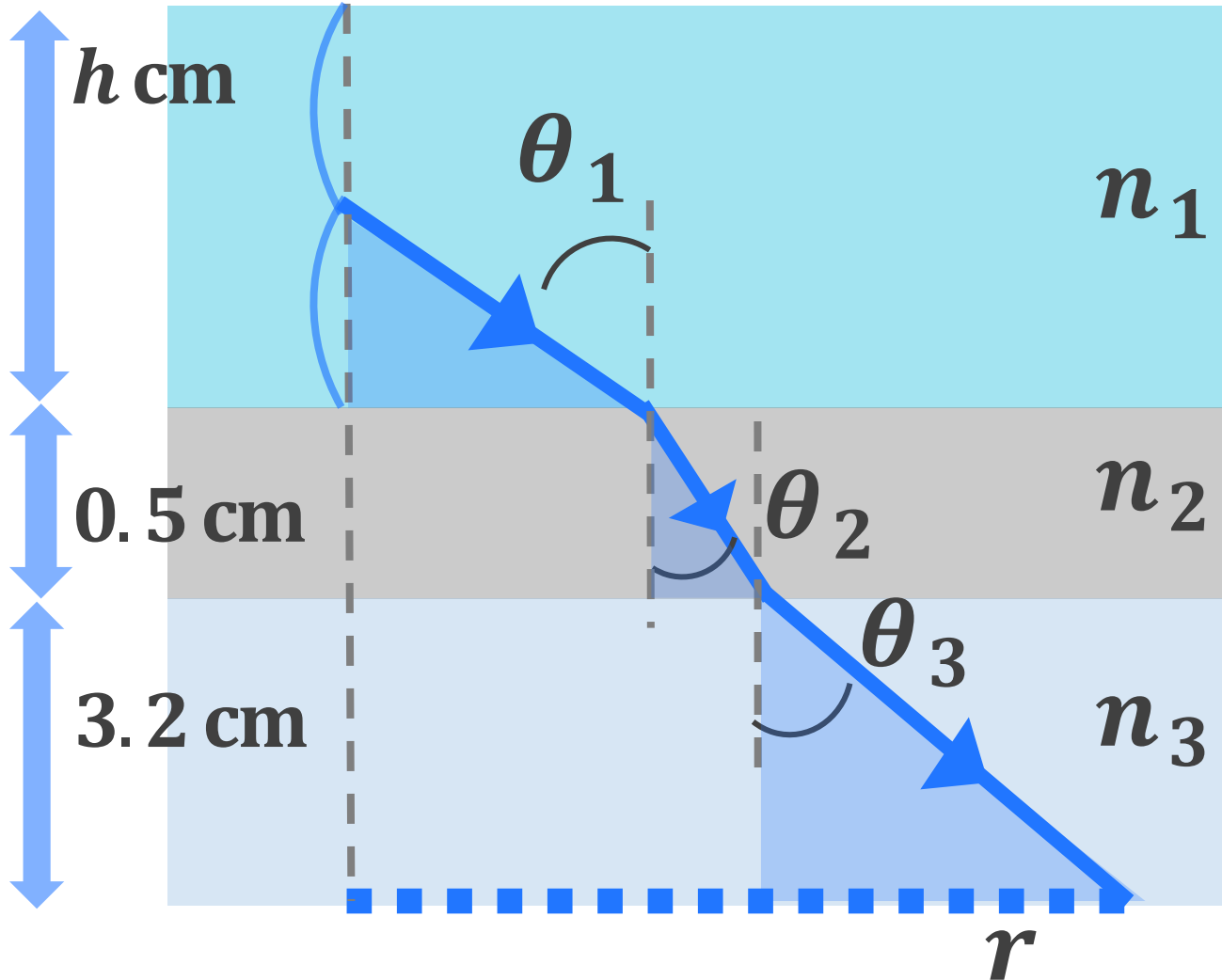
$c$  : 光速

$r$  : チェレンコフ光の半径

# チェレンコフ角の測定方法



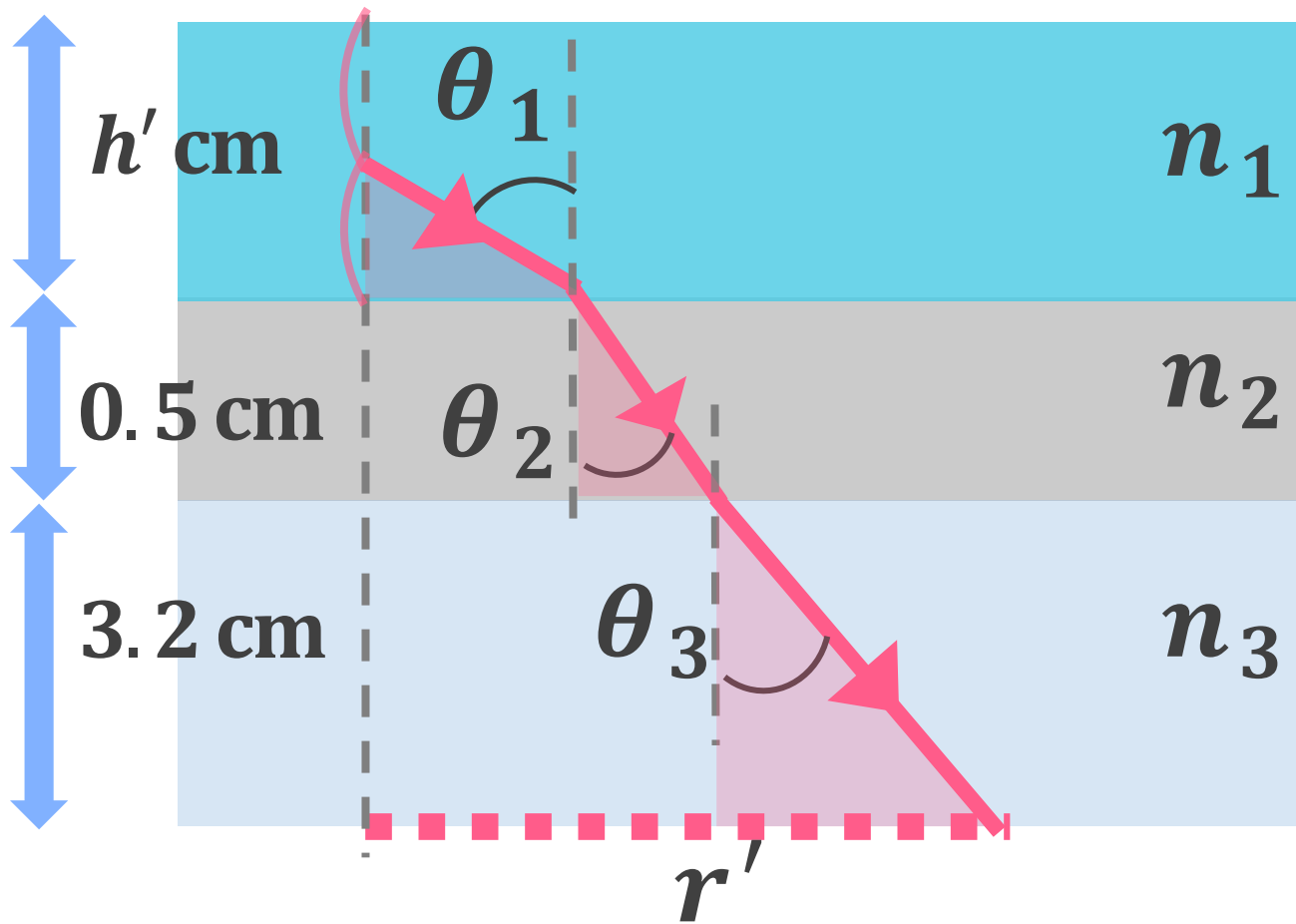
# チェレンコフ角の測定方法



.....の部分

$$\frac{h}{2} \tan \theta_1 + 0.5 \tan \theta_2 + 3.2 \tan \theta_3 = r$$

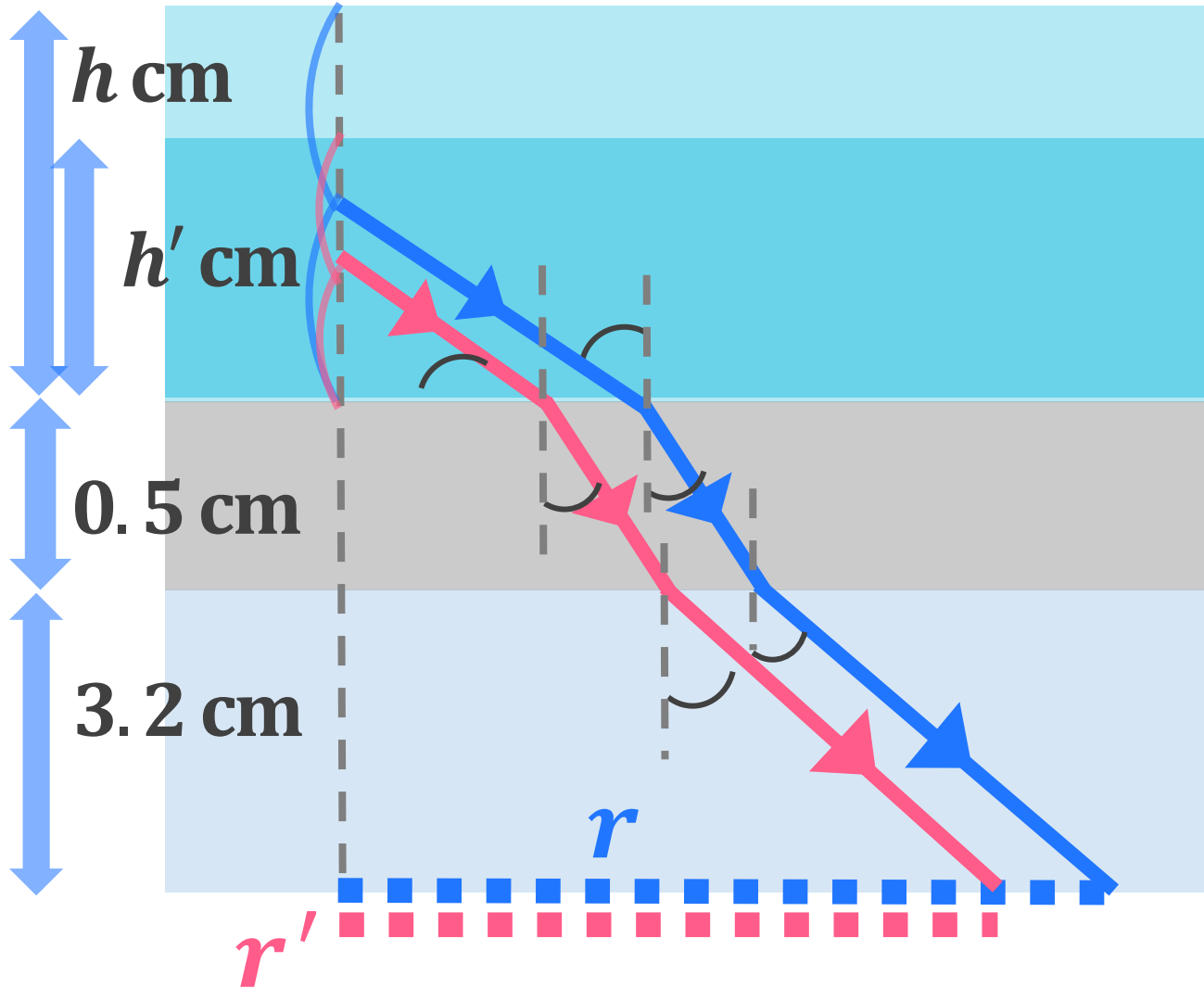
# チェレンコフ角の測定方法



■ ■ ■ ■ ■ ■ の部分

$$\frac{h'}{2} \tan\theta_1 + 0.5 \tan\theta_2 + 3.2 \tan\theta_3 = r'$$

# チェレンコフ角の測定方法



.....の部分

$$\frac{h}{2} \tan \theta_1 + 0.5 \tan \theta_2 + 3.2 \tan \theta_3 = r$$

.....の部分

$$\frac{h'}{2} \tan \theta_2 + 0.5 \tan \theta_2 + 3.2 \tan \theta_3 = r'$$



チェレンコフ角 $\theta_1$ を求める式

$$\left( \frac{h}{2} - \frac{h'}{2} \right) \tan \theta_1 = r - r'$$

## 結果&考察

### チェレンコフ角

$$\Delta h \tan \theta_1 = \Delta r$$

$$\Delta r = 0.43 \text{ cm}$$

$$\Delta h = 0.5 \text{ cm}$$

結果

$$40.6 \pm 1.4^\circ$$

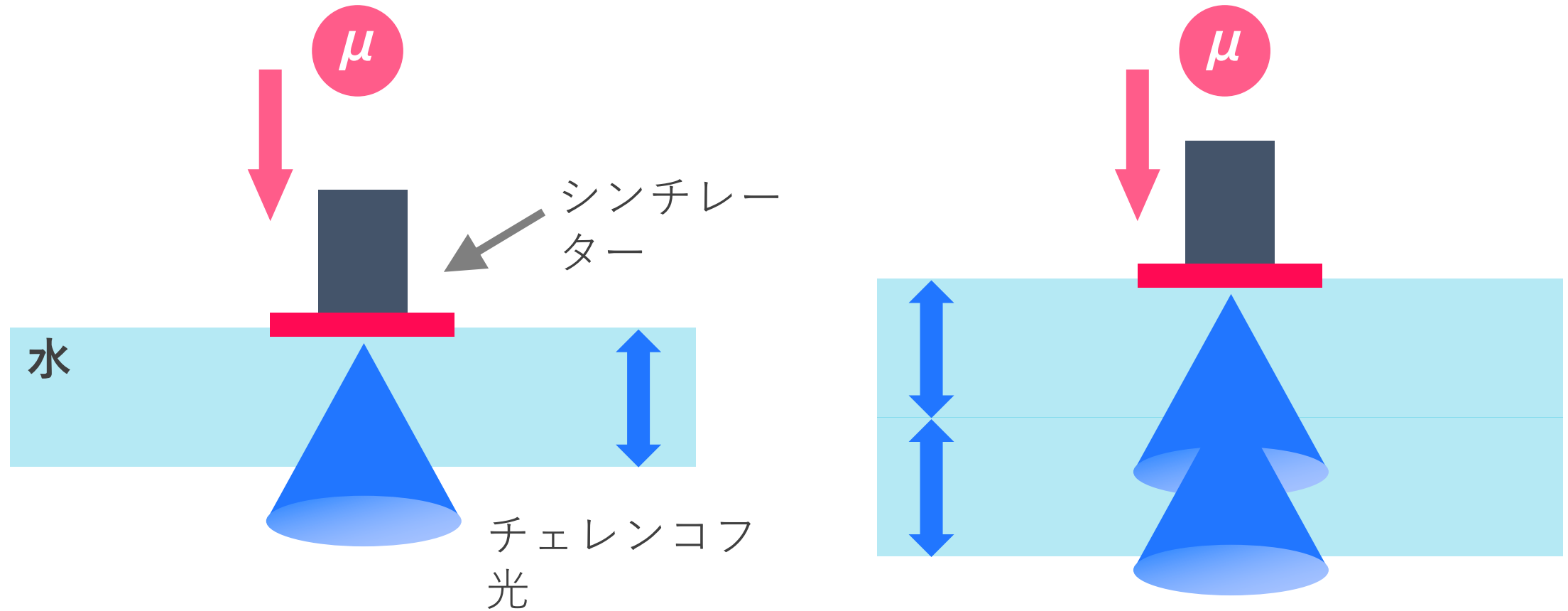
理論値

$$41.2^\circ$$

チェレンコフ角は、誤差の範囲内で一致した



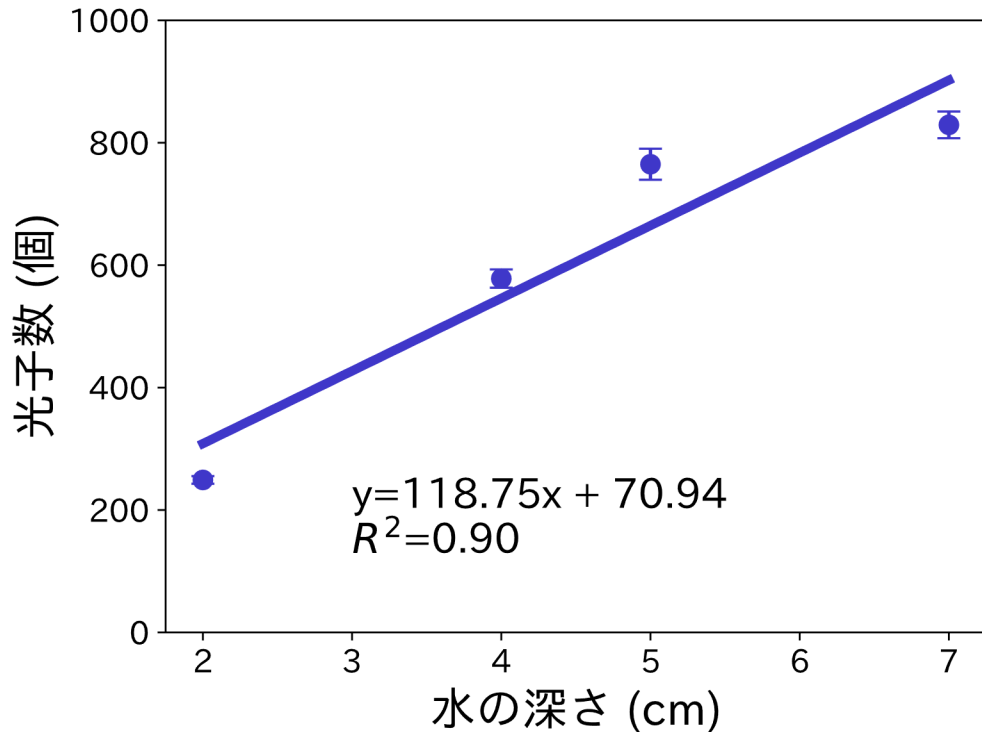
# チェレンコフ光の光量の理論



▶ ミューオンが通る**水の深さ**と**光量**は比例するはず

# 結果&考察

## 光量



結果

1cm当たり118個の光子

理論値

1cm当たり340個の光子

三木信太郎 修論”SK-Gdにおける中性子検出を用いたニュートリノ事象再構成手法”より

光子の数え方、PMTの充填率、媒質中での反射・吸収、プログラムの計算の不備などが考えられる

05

アクリル・  
シンチレータ

# 動機

- 水チェレンコフ光を見ることができた



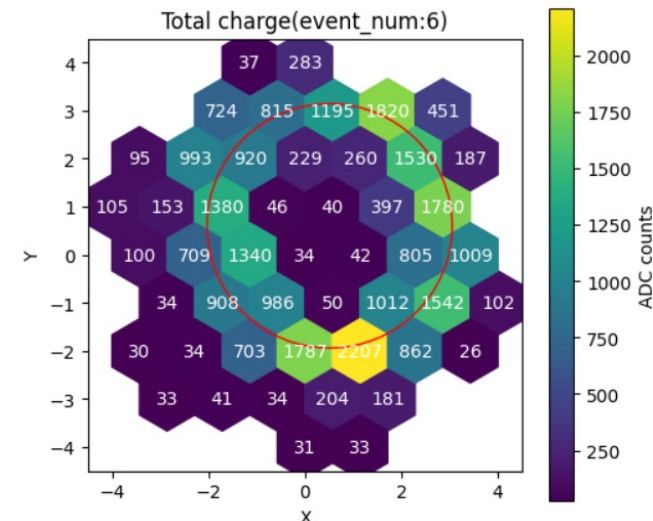
- 屈折率 $n$ の異なる物質について同様の実験

- 実験に用いた物質

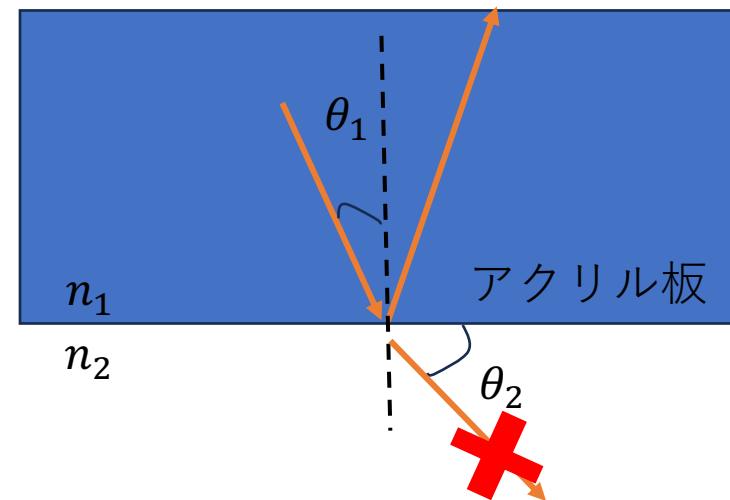
- アクリル板 ( $n = 1.49$ )       $\Leftrightarrow$  水 ( $n = 1.33$ )
- シンチレータ ( $n = 1.56$ )

- チェレンコフ角 $\theta_c$

- アクリル板 $\cdots\theta_c = 47.84^\circ$        $\Leftrightarrow$  水 ( $\theta_c = 41.2^\circ$ )
- スネルの法則より**全反射**
- チェレンコフ光は**見えない?**



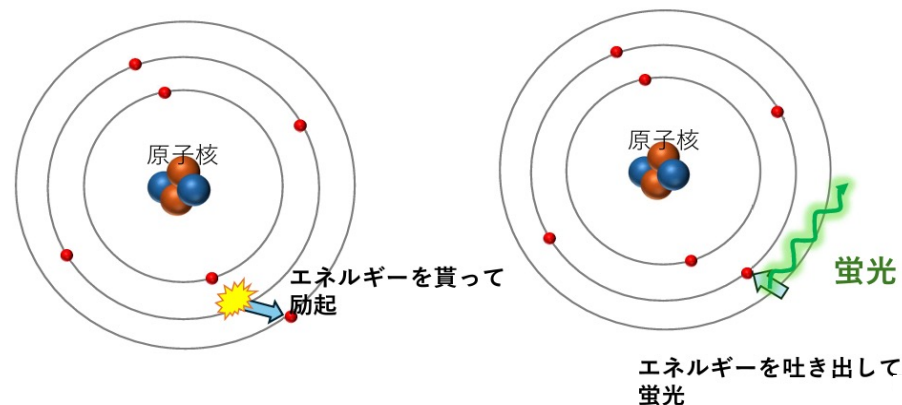
図：水チェレンコフ光の場合の例



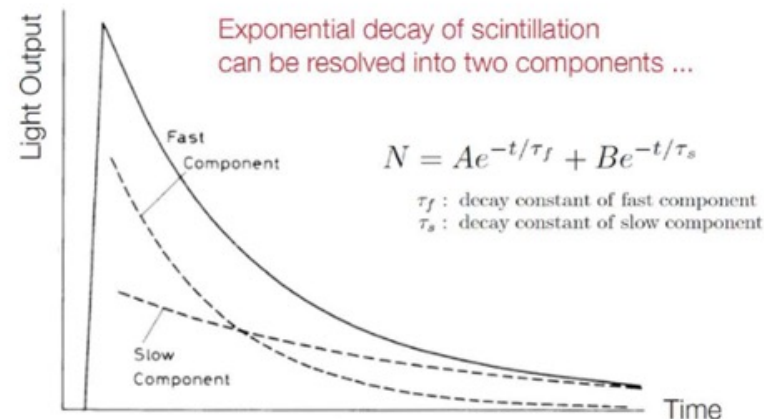
# 蛍光 (Scintillation)

- 外部からのエネルギー供給  
→ 電子が**励起** (別準位へ移動)
- 電子が得たエネルギーが可視光帯の光で"再放出"  
→ **蛍光 (シンチレーション光)**
- 基底状態と励起状態のサイクルに時間がかかる  
→ チェレンコフ光に比べゆっくと放出される

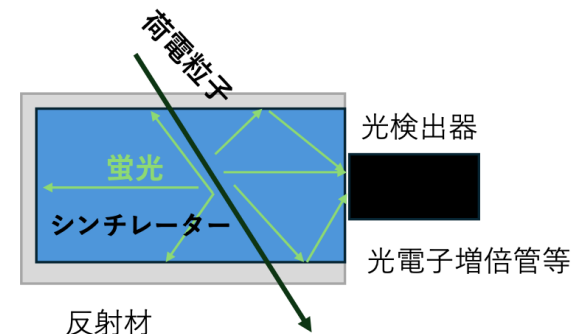
□ シンチレーション光は等方的に放出されるため  
リングが**観測されない**



図：シンチレーションの仕組み

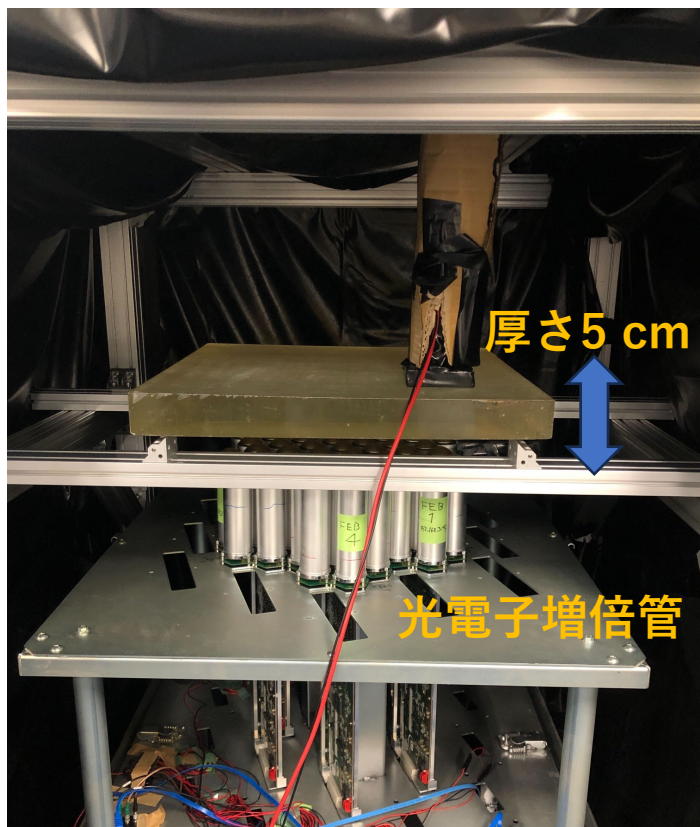


図：シンチレーション光の時間特性

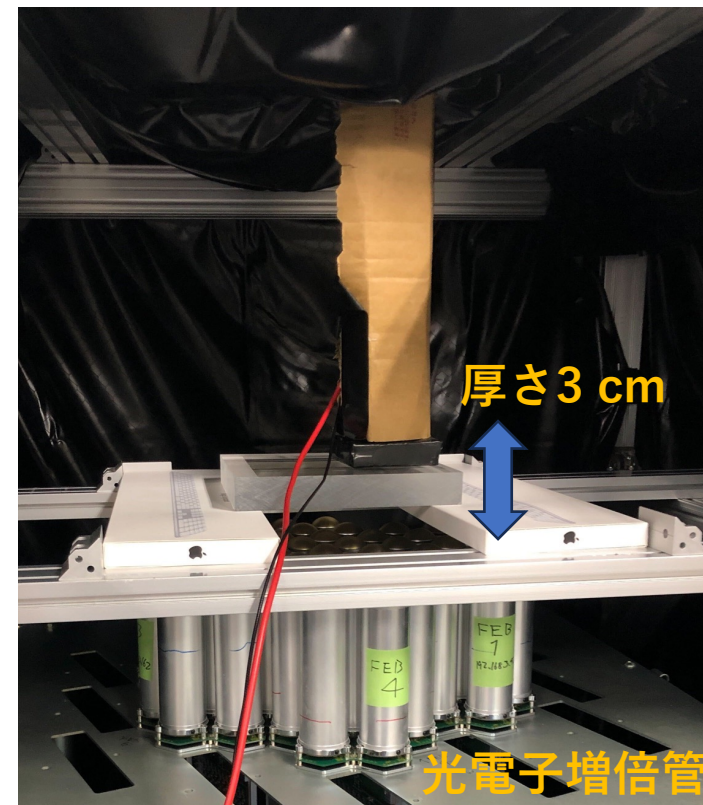


# 実験方法

- 図のようなセットアップで実験を行う

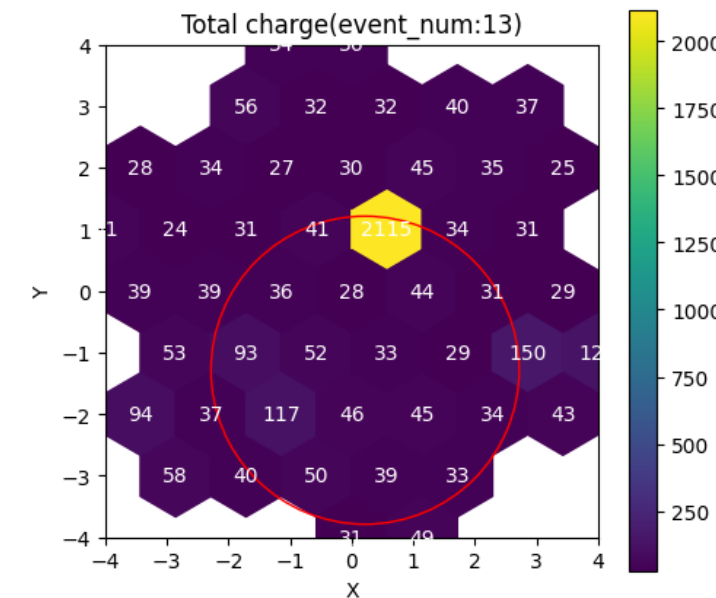
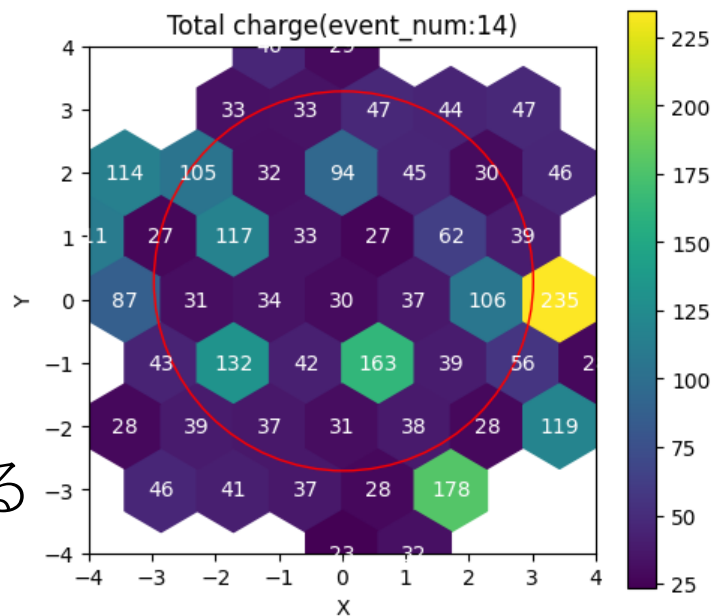
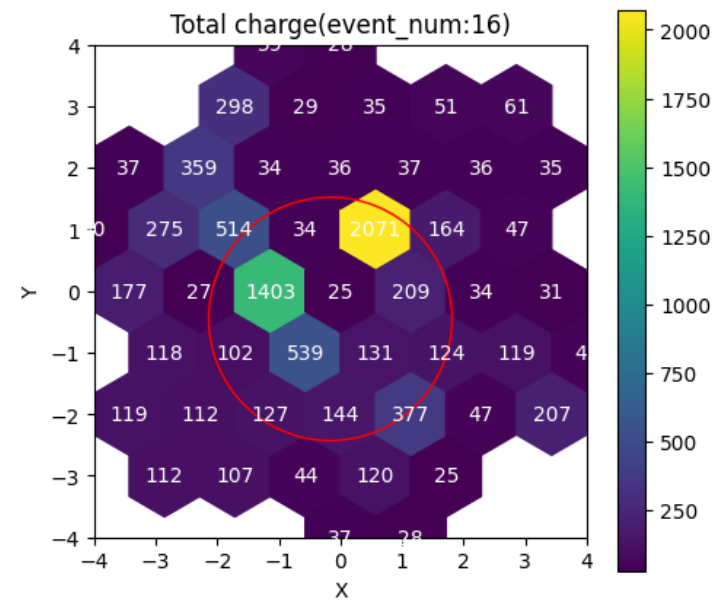
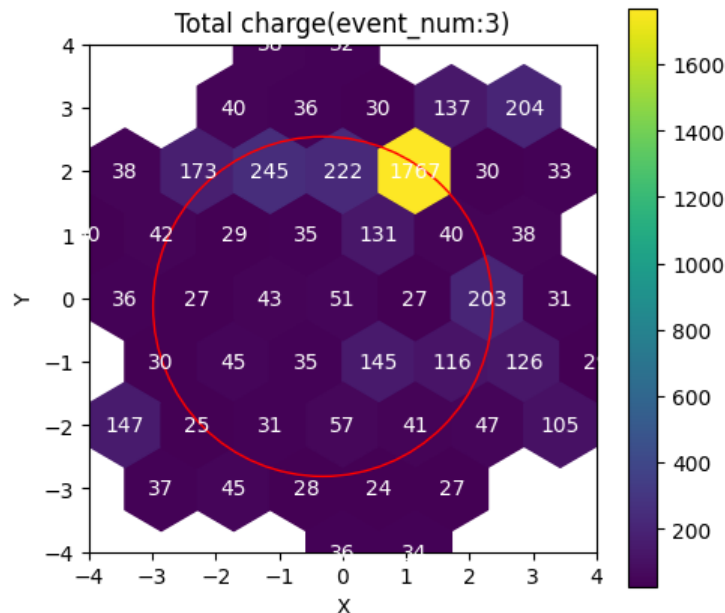
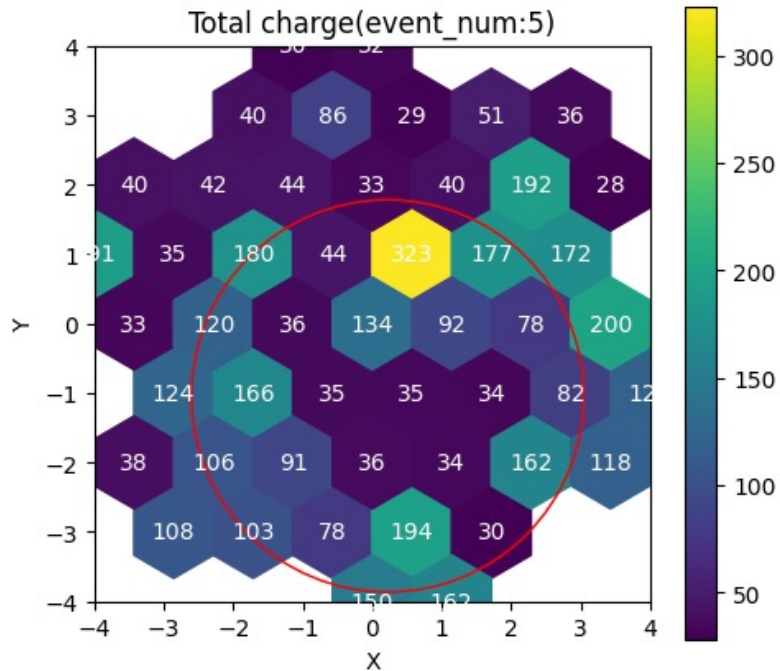


図：シンチレータの場合



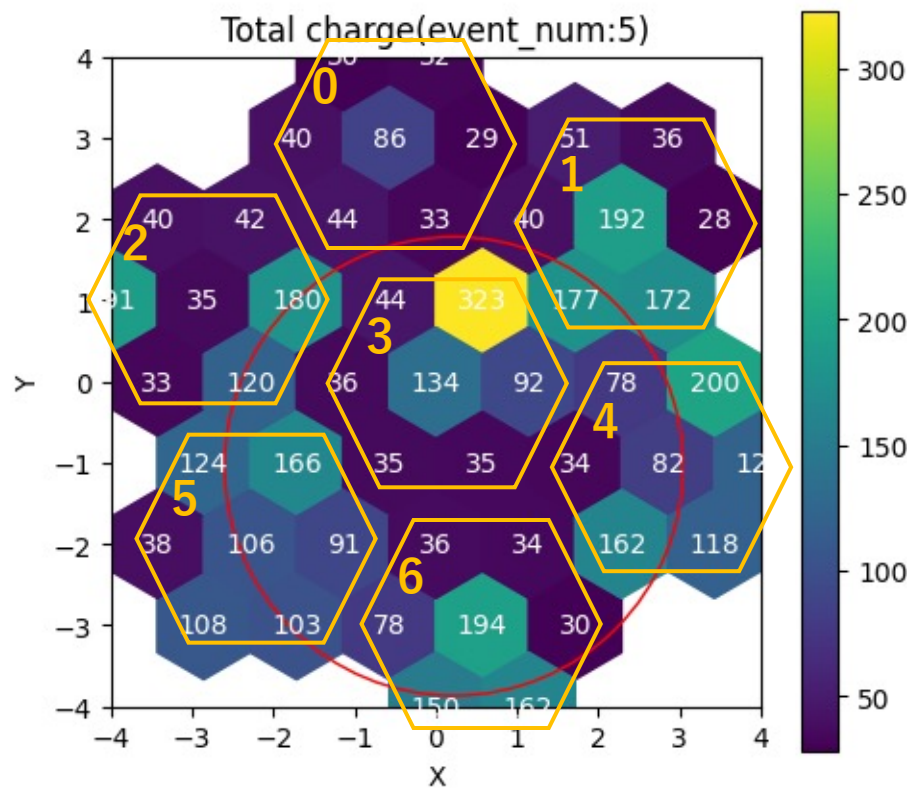
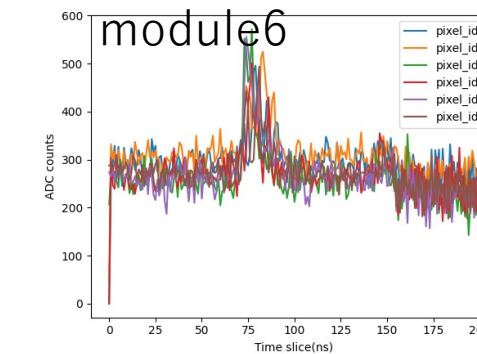
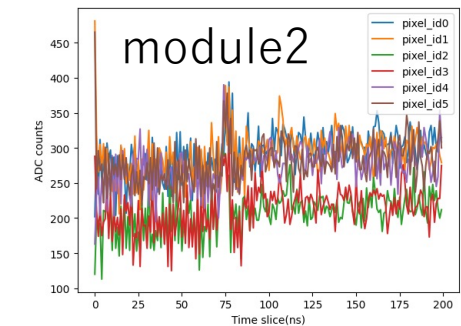
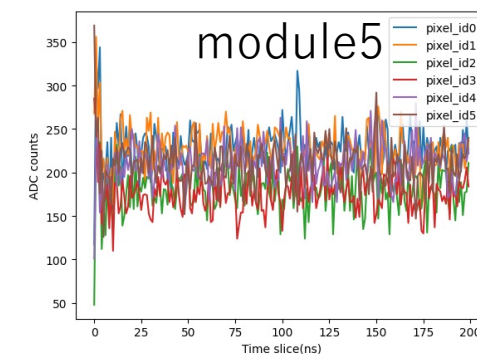
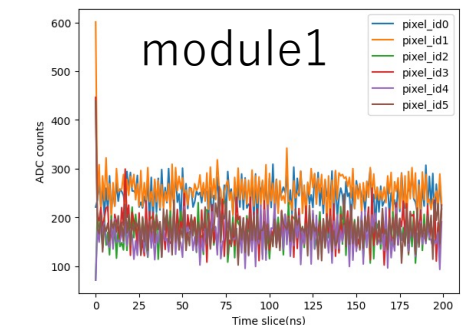
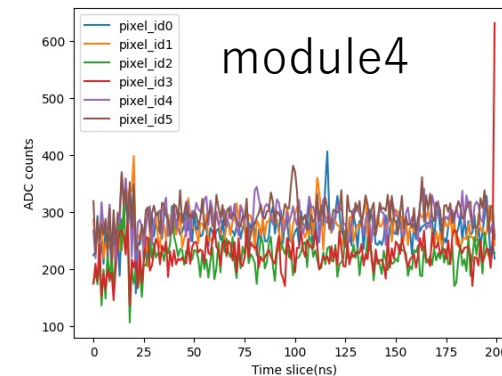
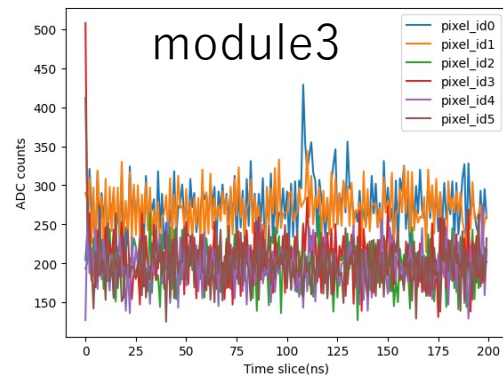
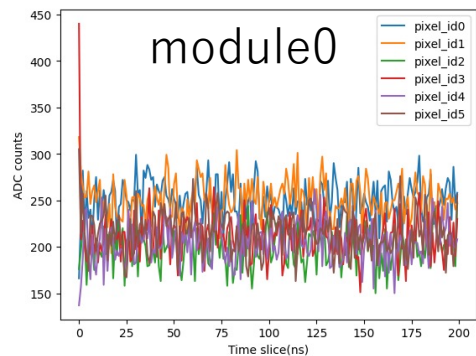
図：アクリル板の場合

# 結果(アクリル板)



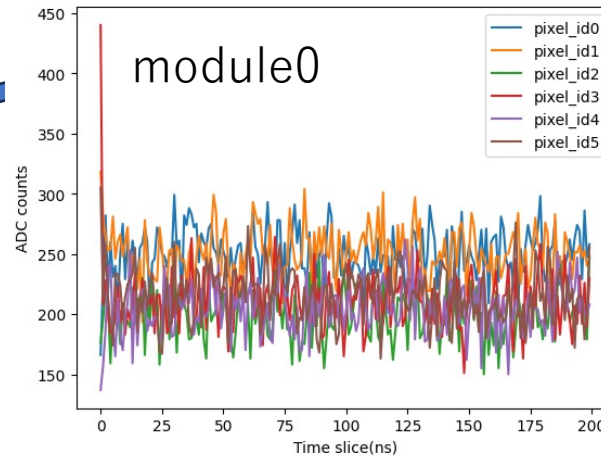
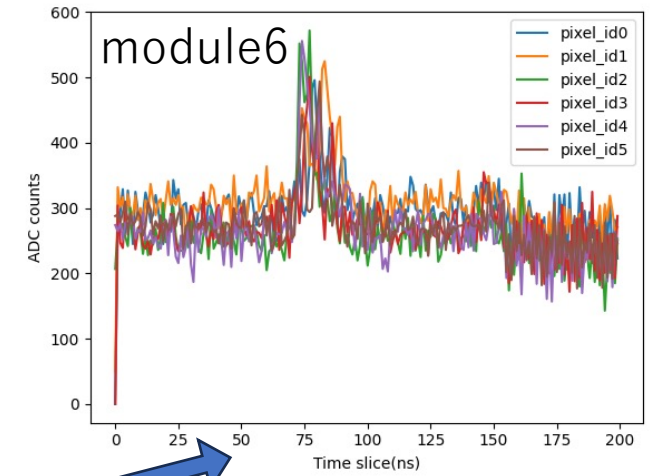
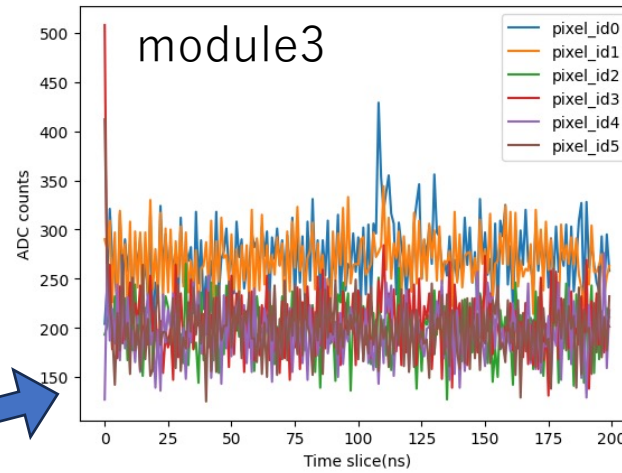
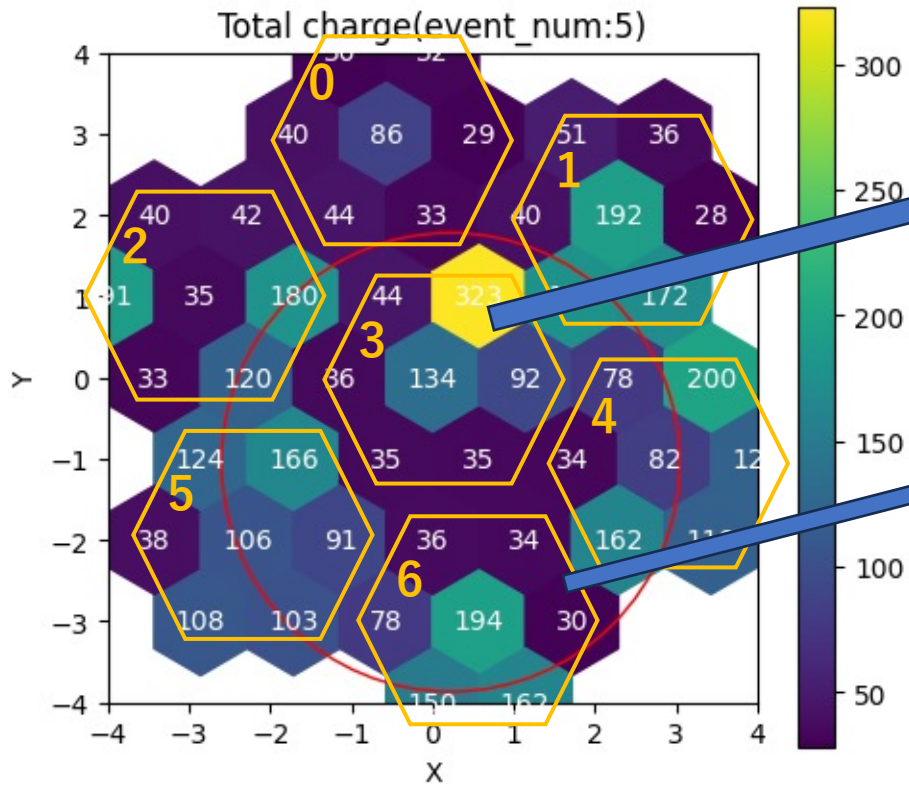
- 明るい1点が見られる
- 円のように見える部分もある

# 結果(アクリル板)



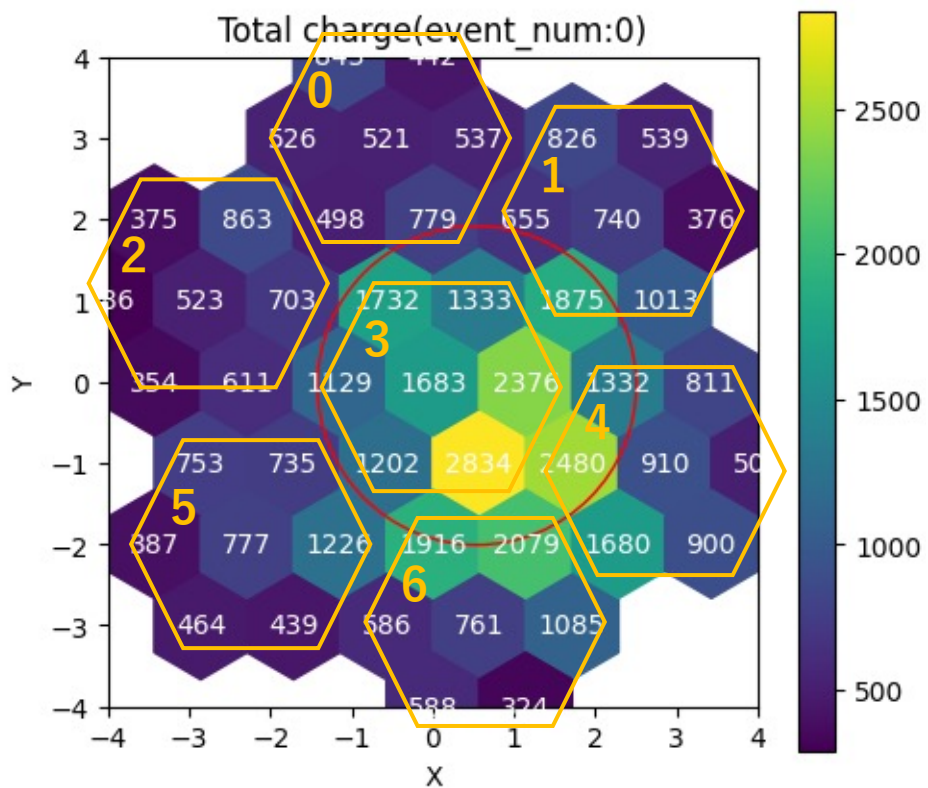
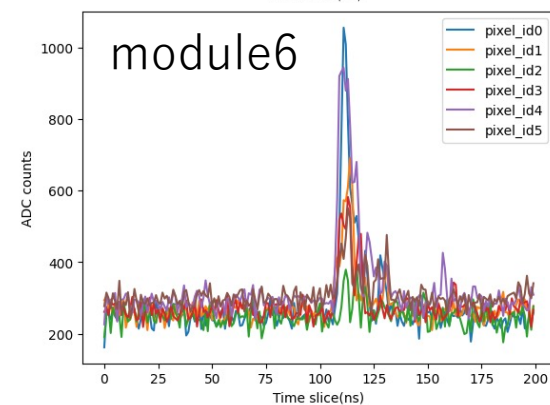
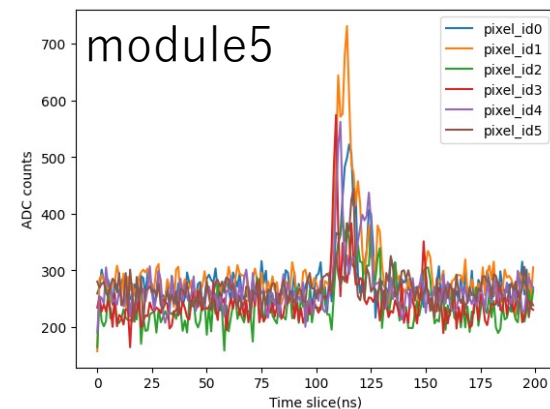
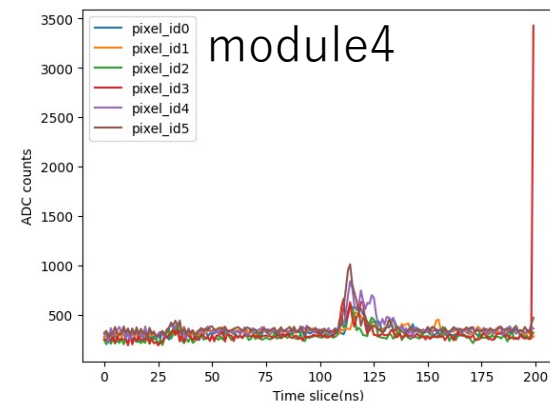
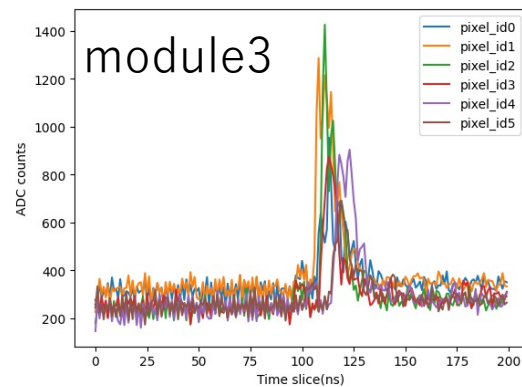
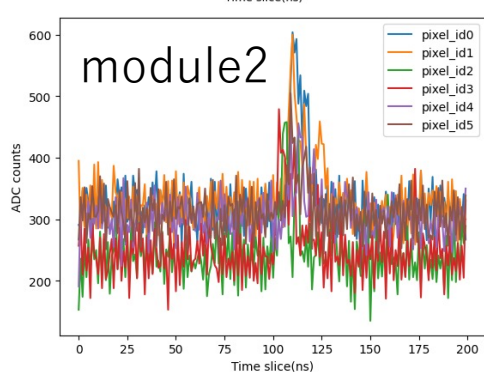
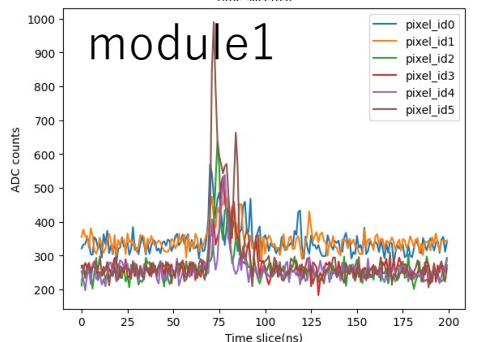
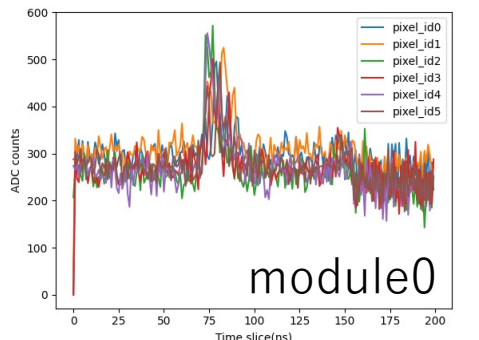


# 結果(アクリル板)



- module3,6にチェレンコフ光
- 光量自体は弱いですが、円形のように

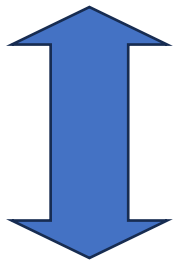
# 結果（シンチレータ）



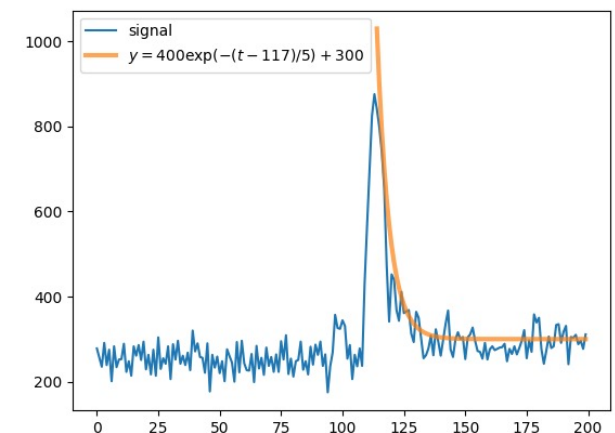
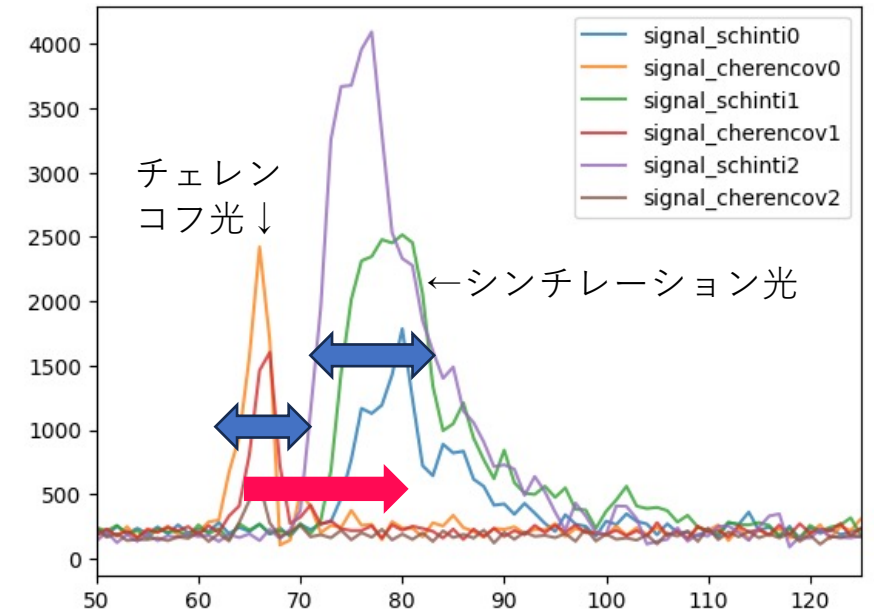
• どのモジュールでも光を計測

# 結果（シンチレーション光とチェレンコフ光の比較）

- チェレンコフ光
  - 急峻な反応（ $\sim 5\text{ns}$ ）

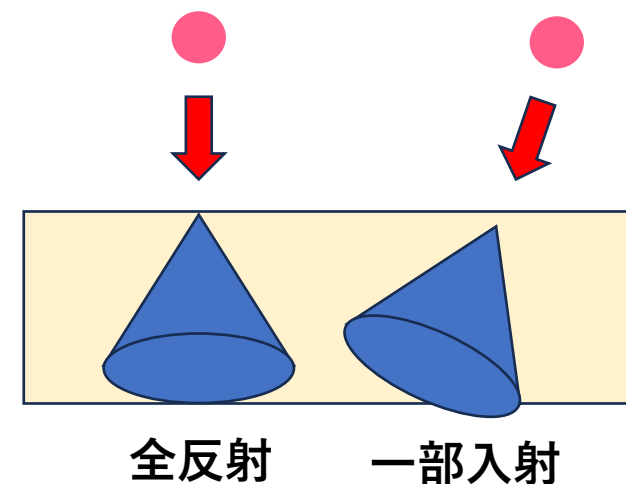


- シンチレーション光
  - なだらかな反応（ $\sim 10\text{ ns}$ ）
  - タイミングが遅い（ $\sim 10\text{ ns}$ ）
  - ピーク前はデルタ関数的に増加し，ピーク後は**指数関数的**に減衰



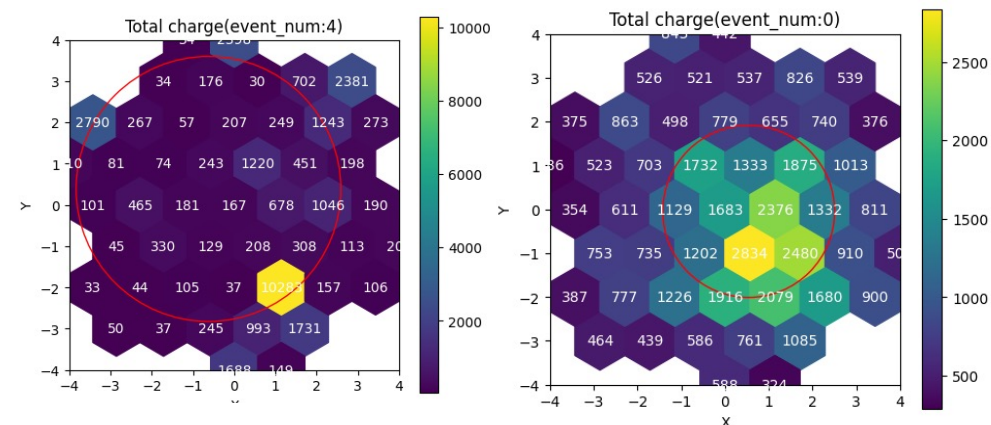
# 考察

- アクリル板
  - ミューオンが光電面に当たった  
→明るい1点が観測
  - 粒子の入射角度によって円形が見える



- シンチレータ
  - 等方的に広がる光  
→入射粒子がどの方向から来たかわからない

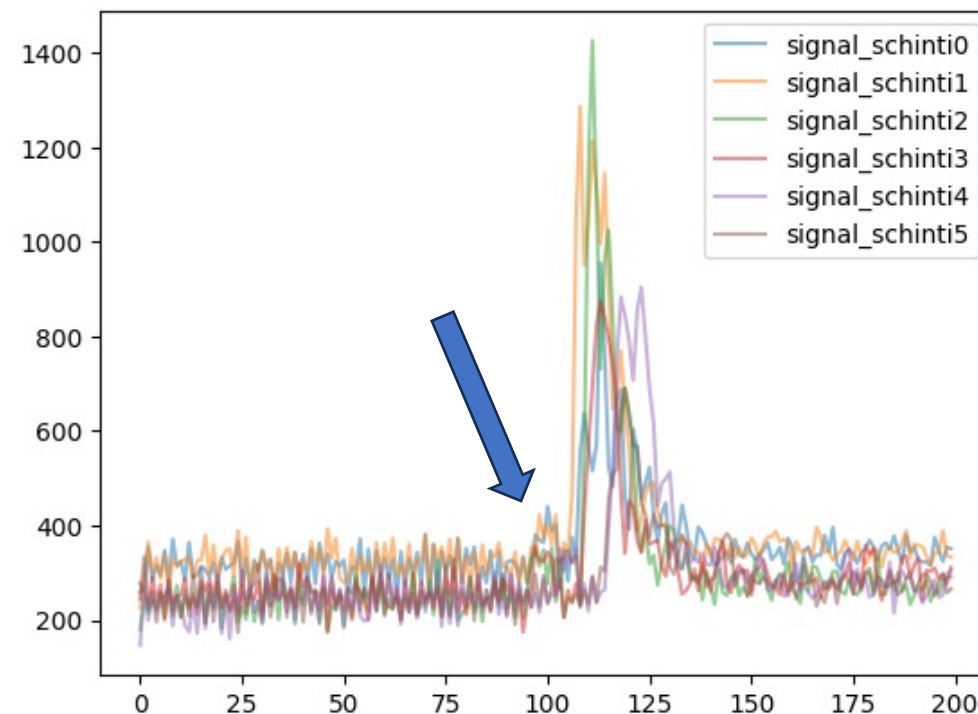
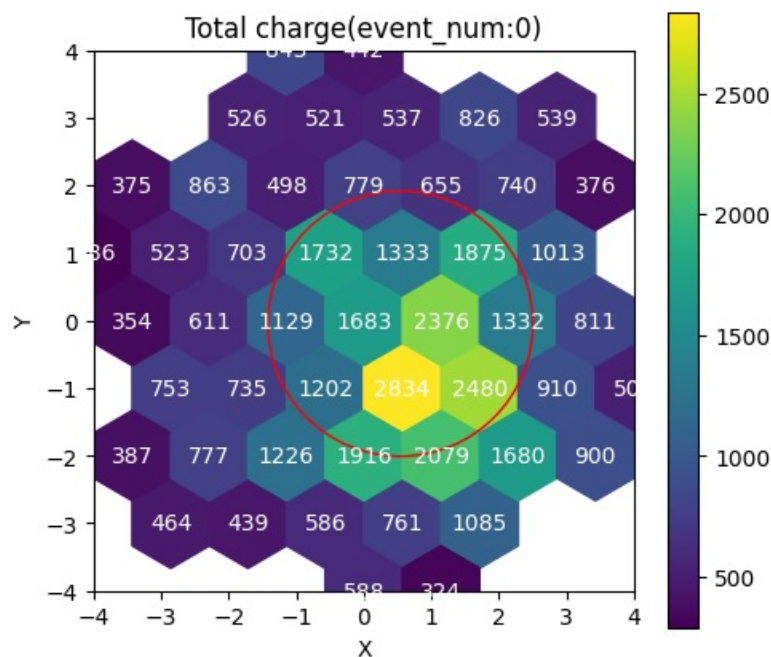
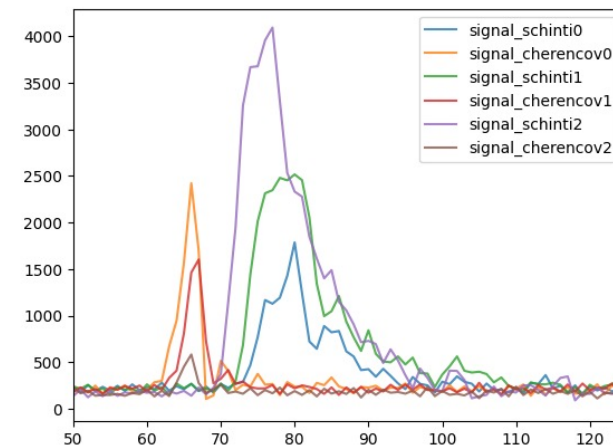
- 物質に応じた計測装置を選ぶ or 作る必要



図：アクリル板の計測結果 図：シンチレータの計測結果

# 考察

- シンチレータでもチェレンコフ光は起きているはず
- 光量はシンチレーション光に対して小さい
- 全体では円形は見えていない



まとめ ▶ ミューオンを用いてチェレンコフ光の検出を行った

① 水でのチェレンコフ角の測定  
→ 理論値は誤差の範囲内であり、理論と観測の一致を確認

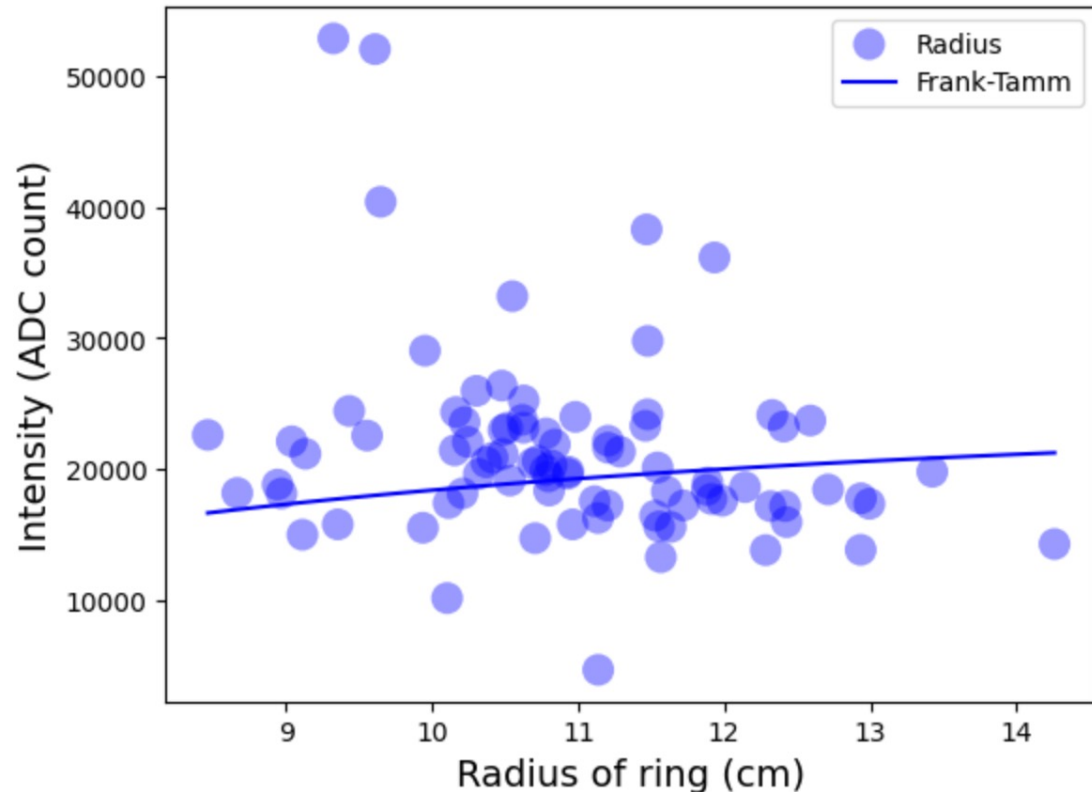
② 水での光量の測定  
→ 文献値の1/3程度の光量となった

③ アクリルでの測定  
✓ 光量は少ないが、チェレンコフ光を確認

④ シンチレータでの測定  
✓ シンチレーション光が観測され、  
光量は少ないがチェレンコフ光を確認

予想外の  
結果！！

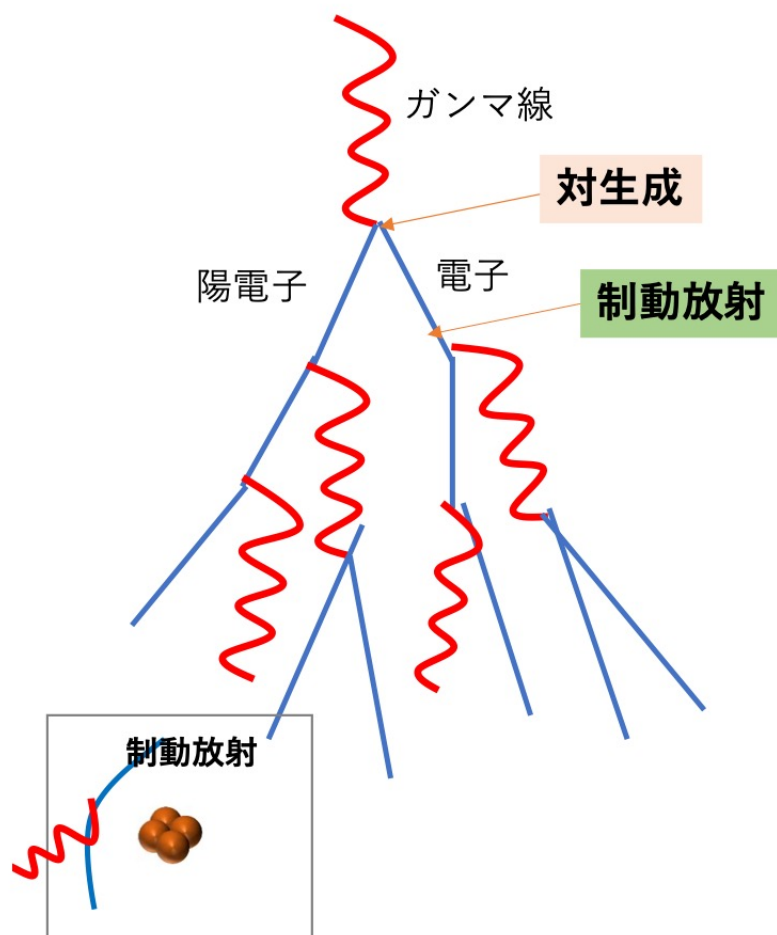
## 補足 ( $\beta$ の依存性について)



Frank\_Tammの公式

$$\frac{d^2 E}{dx d\omega} \propto 1 - \frac{c^2}{\beta^2}$$

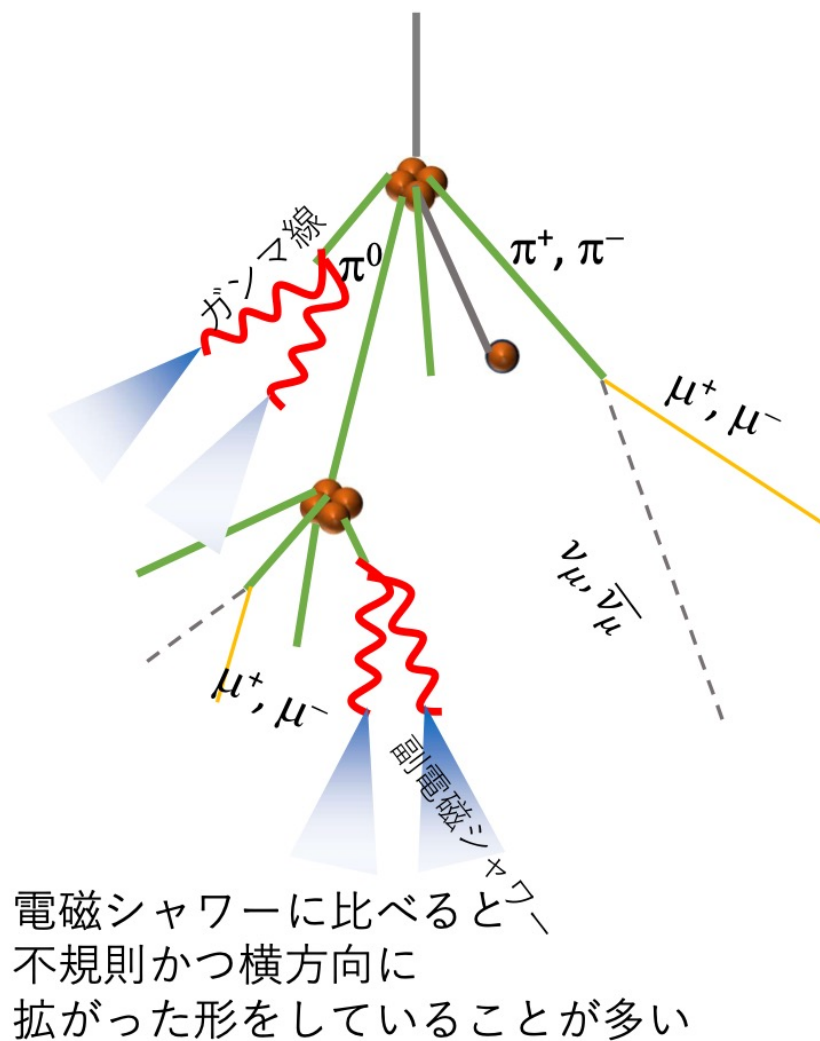
# 電磁シャワー



- 入射粒子が  
ガンマ線 または 電子  
のときに起きる
- ガンマ線は  
電子・陽電子対生成を起こす  
 $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$
- 電子・陽電子は原子核のそばを通  
るときに軌道が曲がりガンマ線を  
放出してエネルギーを失う（制動  
放射）  $e^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma$
- 対生成→制動放射→対生成→ 制動  
放射を繰り返し、粒子の数が雪崩  
的に増える



# 核カスケードシャワー



- 入射粒子が主に  
原子核（陽子、ヘリウム、..鉄）  
のときに起きる
- 大気を構成する主要な元素は  
窒素(Z=7)、酸素(Z=8)
- 原子核同士の衝突では多様な粒子  
が生成される（次頁）
- 主要なものは $\pi$ (パイ) 粒子
  - ✓ 3種類  $\pi^\pm, \pi^0$
  - ✓  $\pi^0$ : 2つのガンマ線に崩壊→電  
磁シャワーへ
  - ✓  $\pi^\pm$ は崩壊するか、また原子核  
と衝突して $\pi^\pm$ を生成する

# パイ粒子

- クォーク二つから出来ている中間子（メソン）
- 電荷を持った荷電パイ粒子  
 $\pi^\pm$  静止質量  $140 \text{ MeV}/c^2$
- 電荷を持たない中性パイ粒子  
 $\pi^0$  静止質量  $134 \text{ MeV}/c^2$
- 超高エネルギー宇宙線の衝突では、  
これらの3つは等量生成される  
(一回あたりの衝突では生成はバラつく)
- それぞれ短命で別の粒子に崩壊する



$\pi$ 粒子と湯川秀樹博士  
1947年にパウエルにより  
実験的に存在が実証  
(1949年にノーベル賞)

