

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

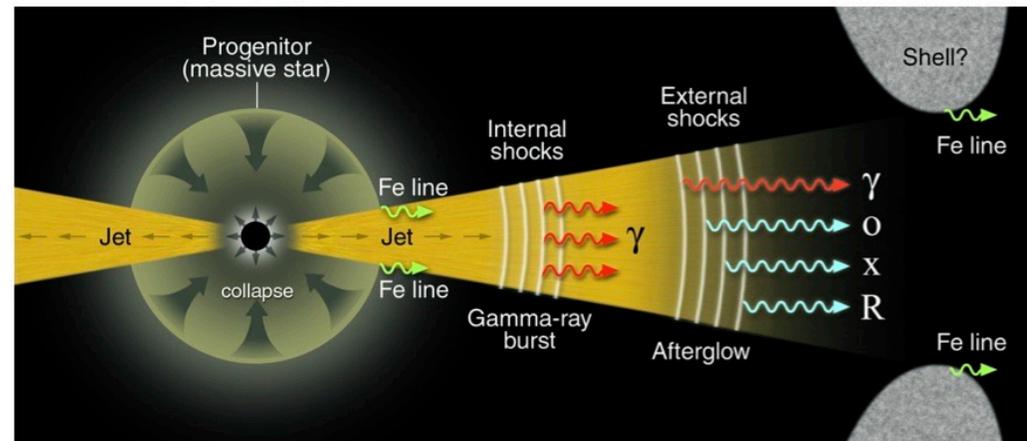


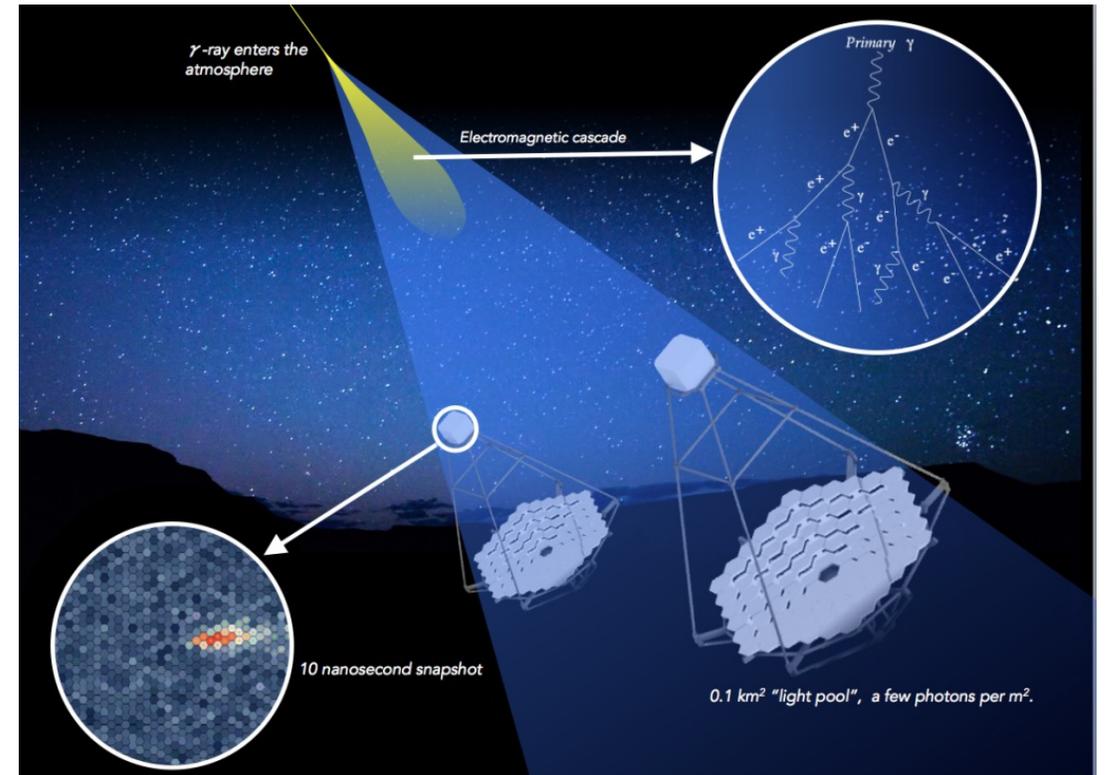
図. パルサーとガンマ線バースト

(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(π 粒子、ミューオンなど)

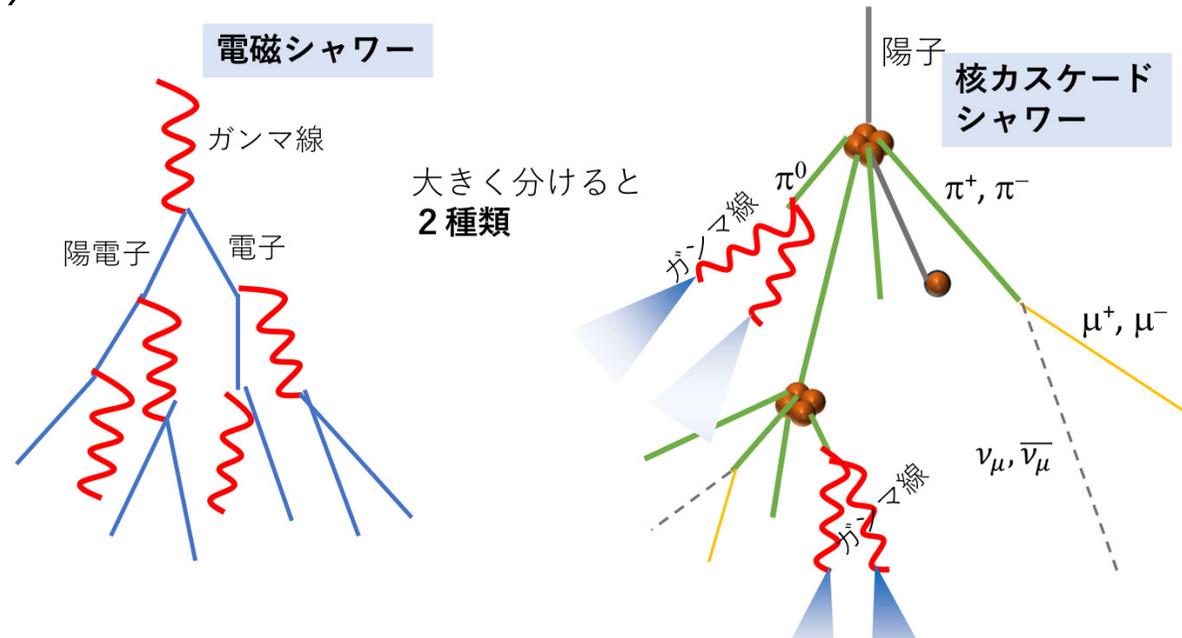


図. 空気シャワーの概念図
(Oishi's slide)

ミューオン(μ)

- 荷電粒子なので計測が容易
- 寿命は 2.2×10^{-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 γ 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



- π 粒子は崩壊する
- 電子は制動放射する

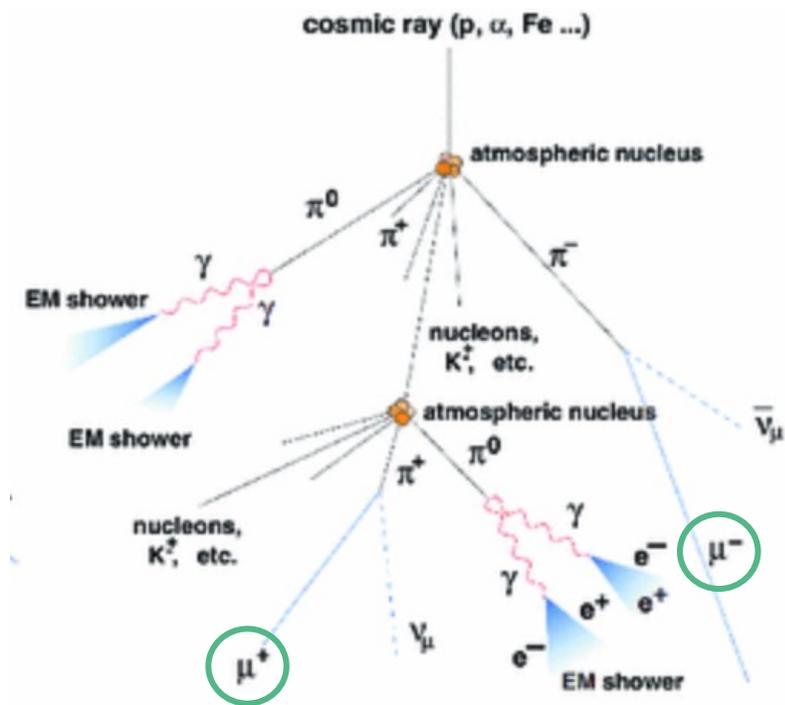


図. 空気シャワーの概念図

(Wagner 2006)

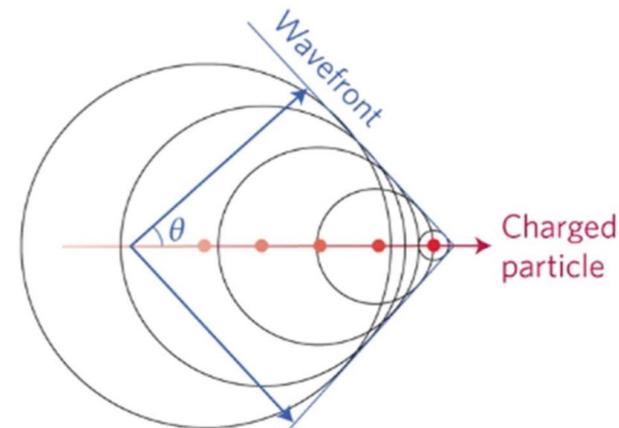
荷電粒子の出すシグナル（チェレンコフ光）

- 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)

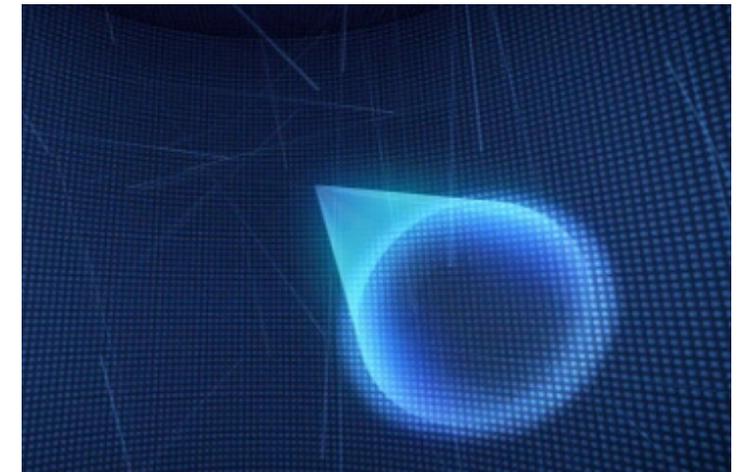


図.
左：チェレンコフ光の広がり (Oishi's slide)
右：チェレンコフ光のモデル(スーパーカミオカンデ,
宇宙線研究所)

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

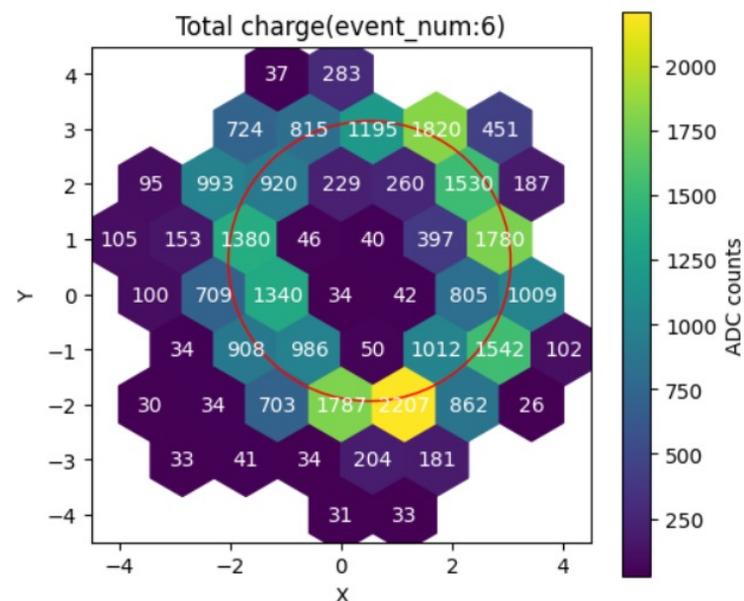


図. リングの例(実験データ)

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

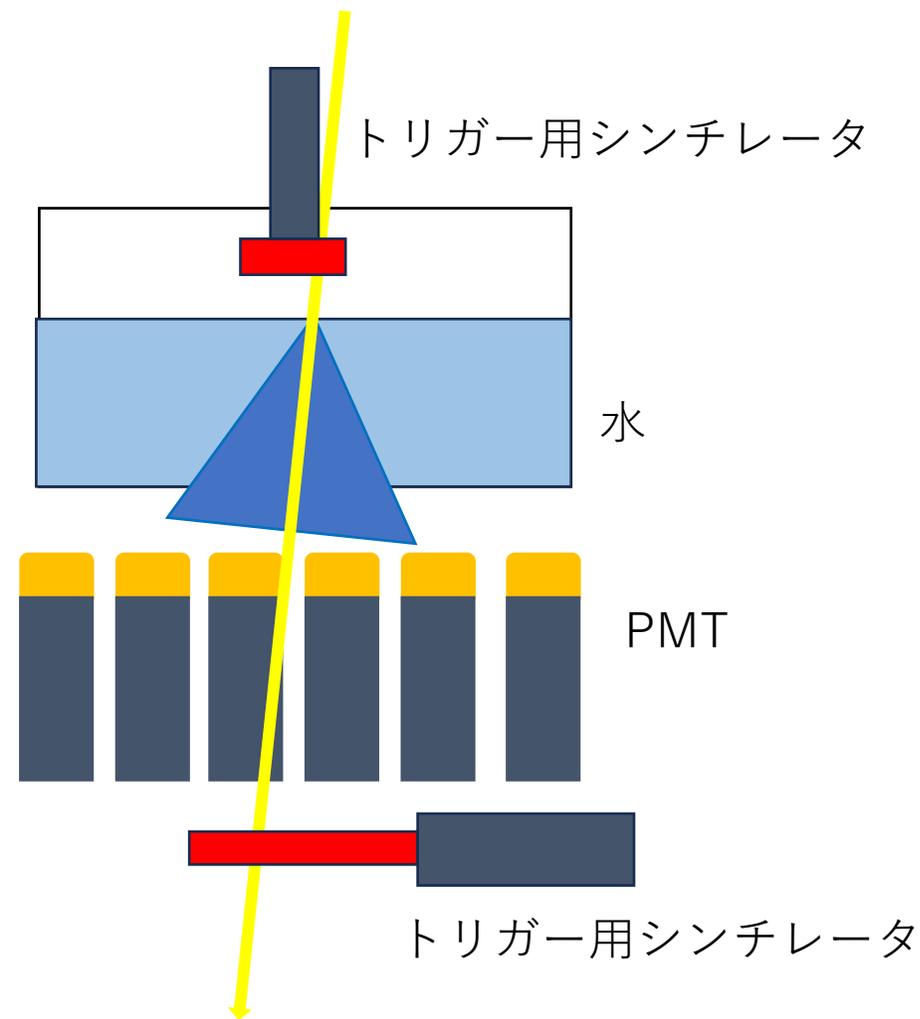
02

検出器 測定原理

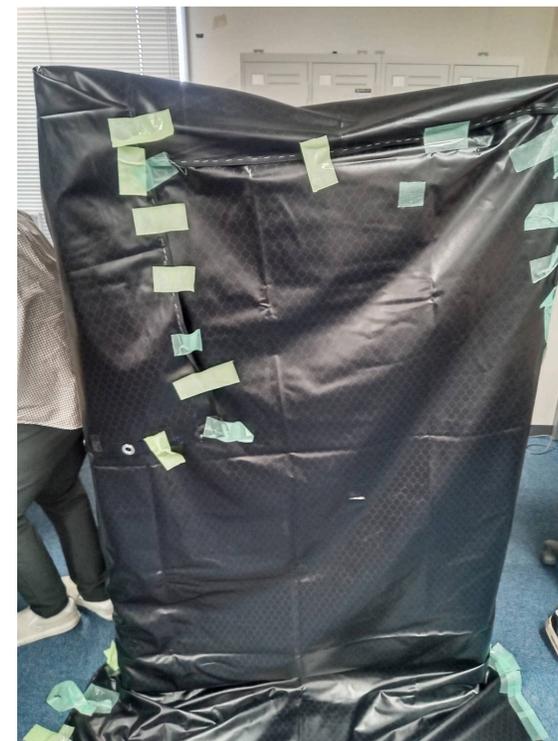
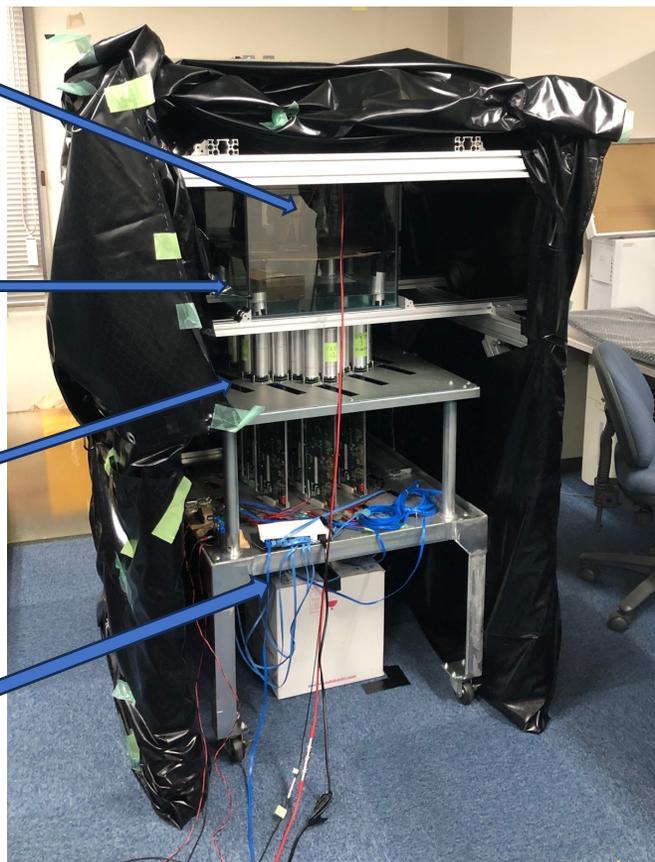
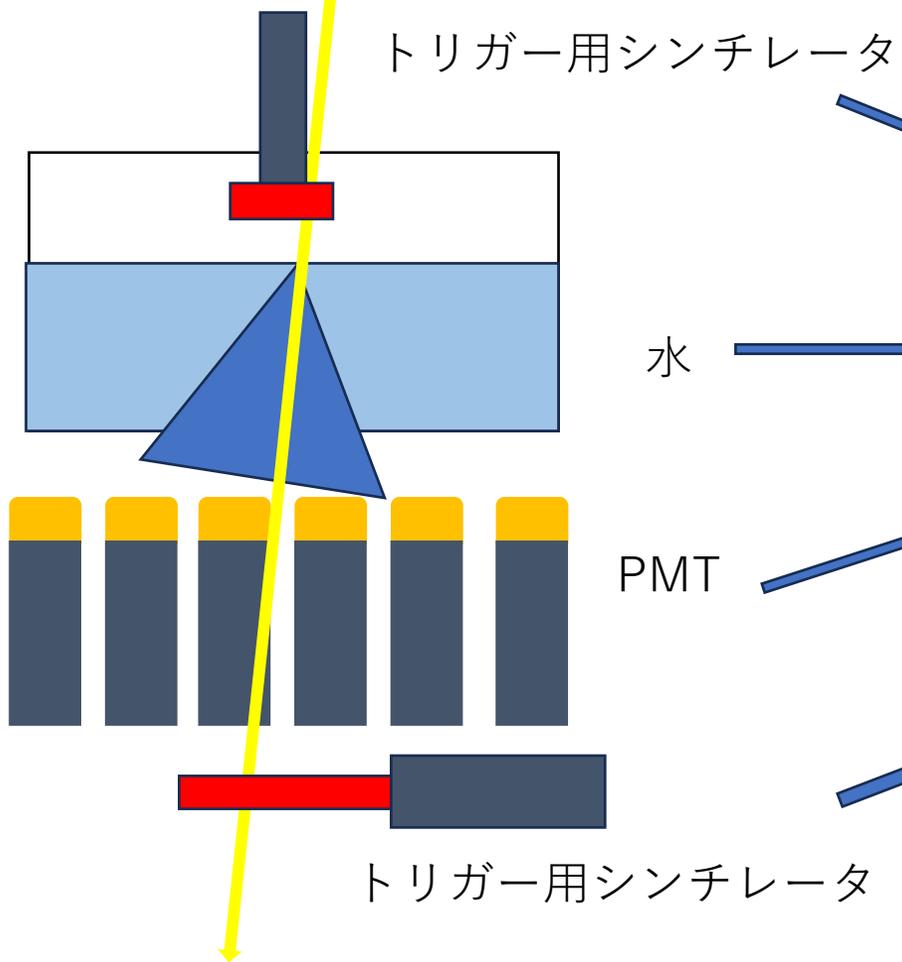
検出器

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



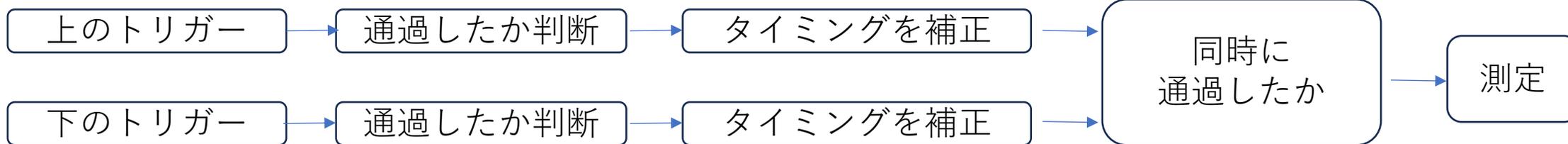
ゲートジェネレータ

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

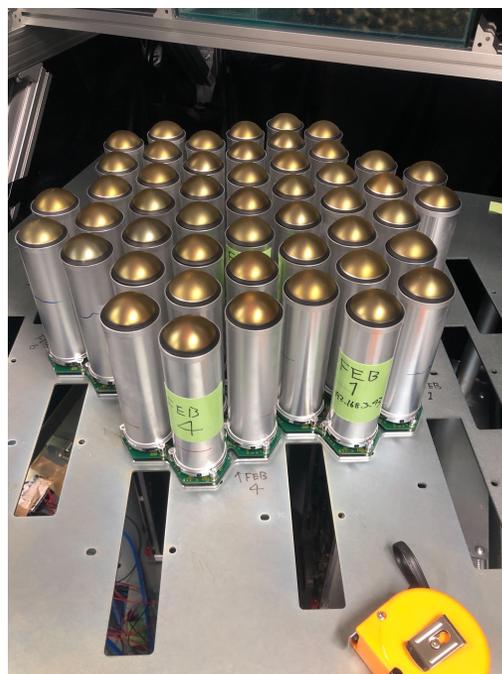


光電子増倍管 (PMT)

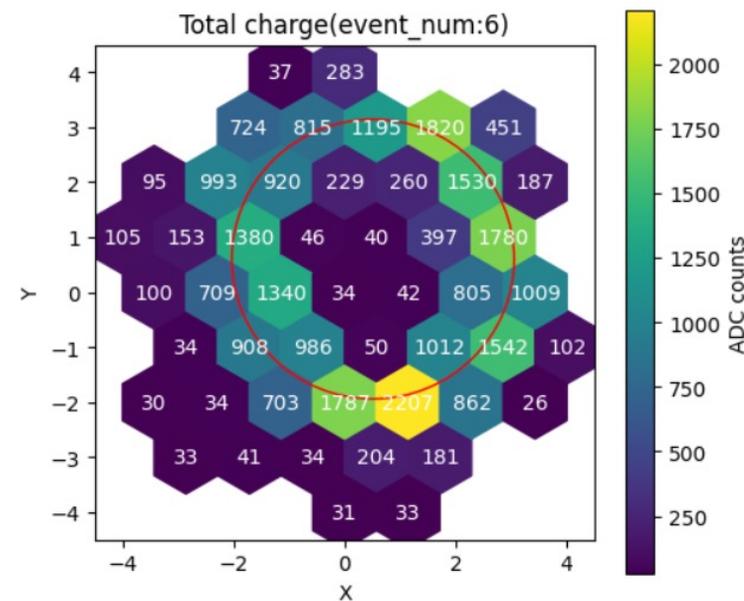
高感度の測定が可能



7本で1module



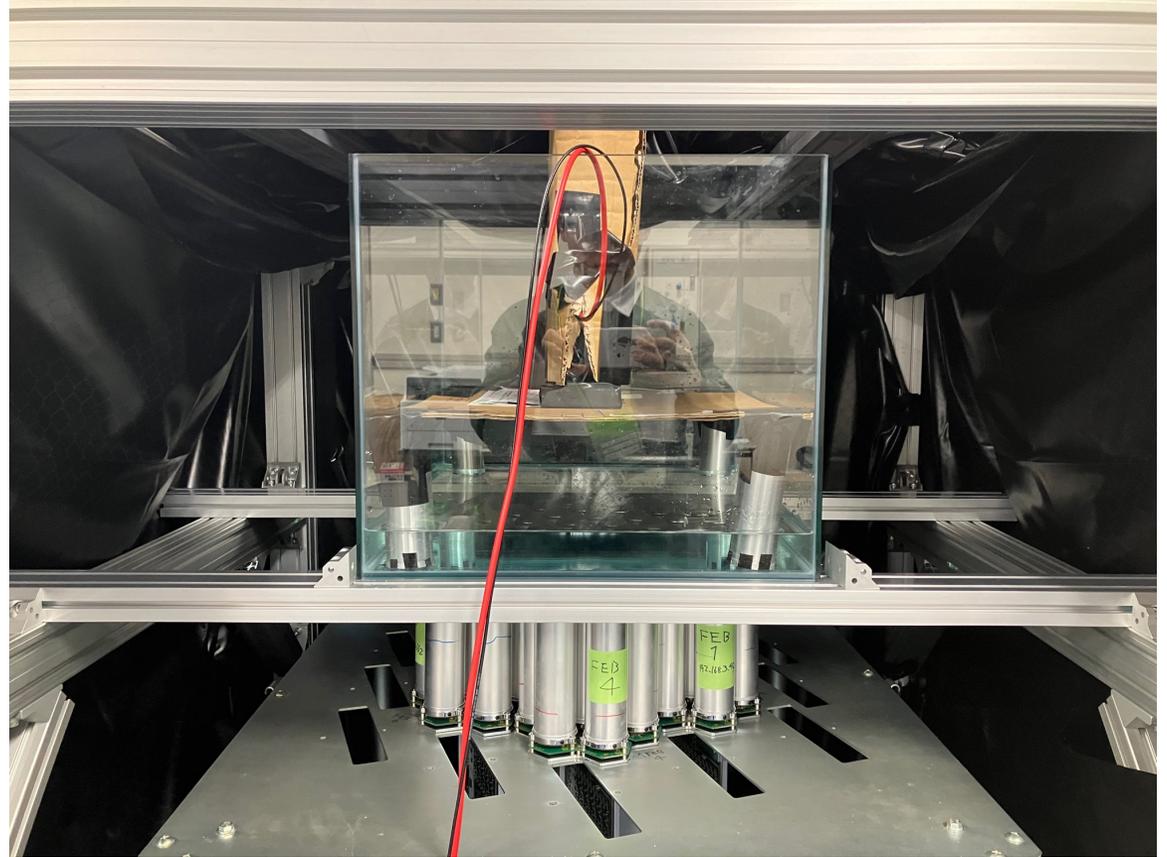
7 module(49本)



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

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

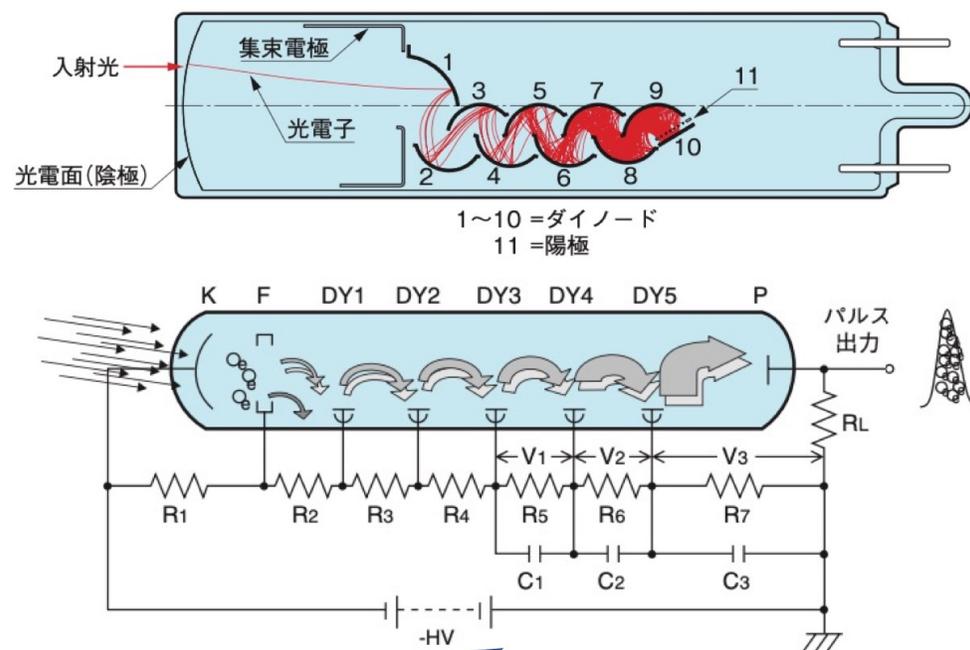
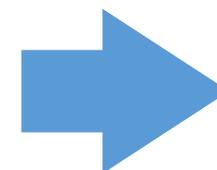
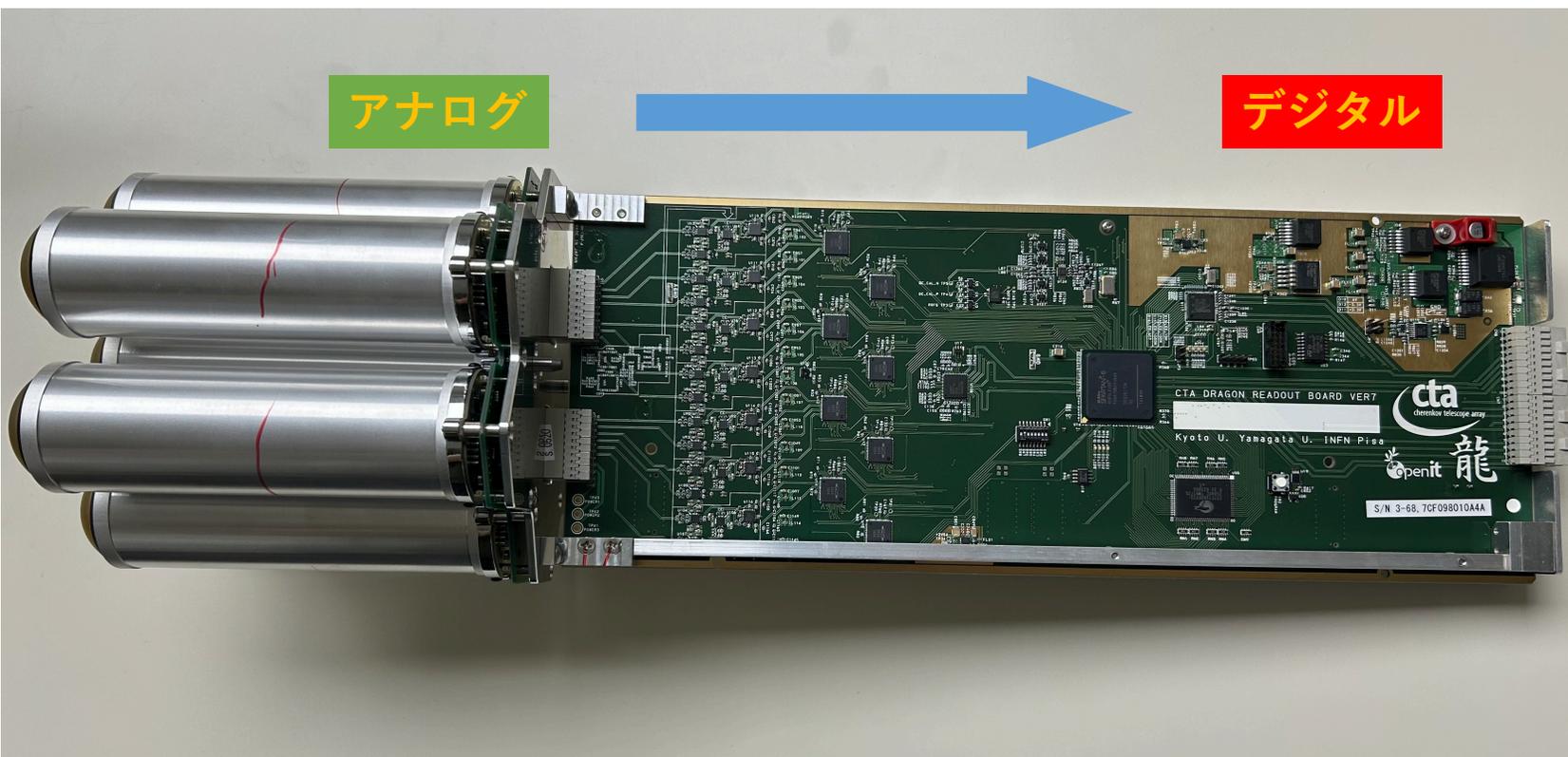


図. 光電子増倍管内部の仕組み

PMT校正

PMT7本(ピクセル)+ボードで1モジュール

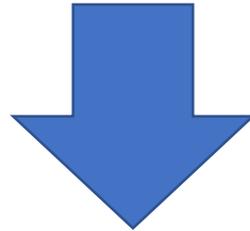


入力した光を
をADC count
として記憶す
る

図. 光電子増倍管モジュール

PMT校正

- ・ 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

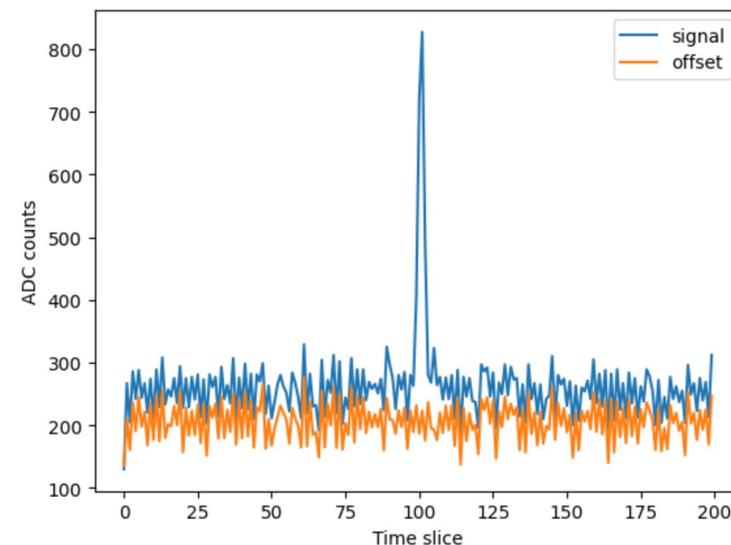
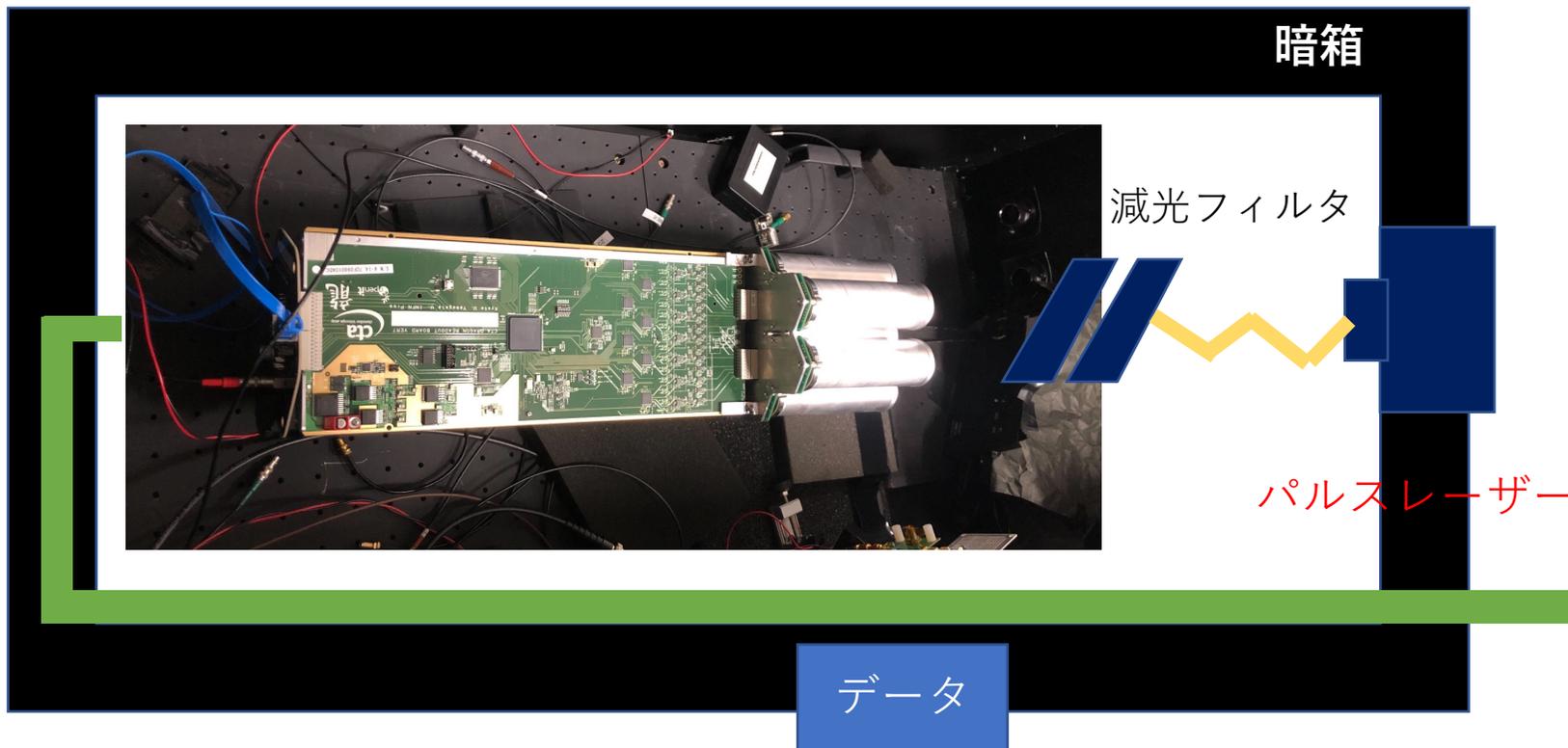
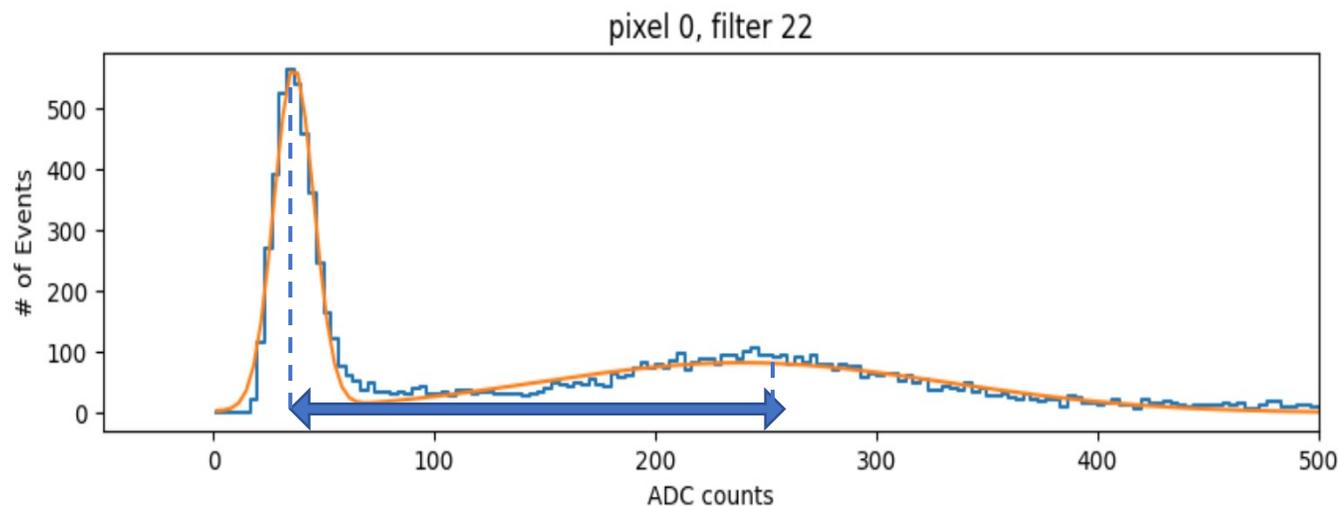


図. 一つのパルス事象の例

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	5.21×10^4
1	4.49×10^4
2	7.28×10^4
3	4.29×10^4
4	7.26×10^4
5	6.17×10^4
6	6.51×10^4

PMT較正

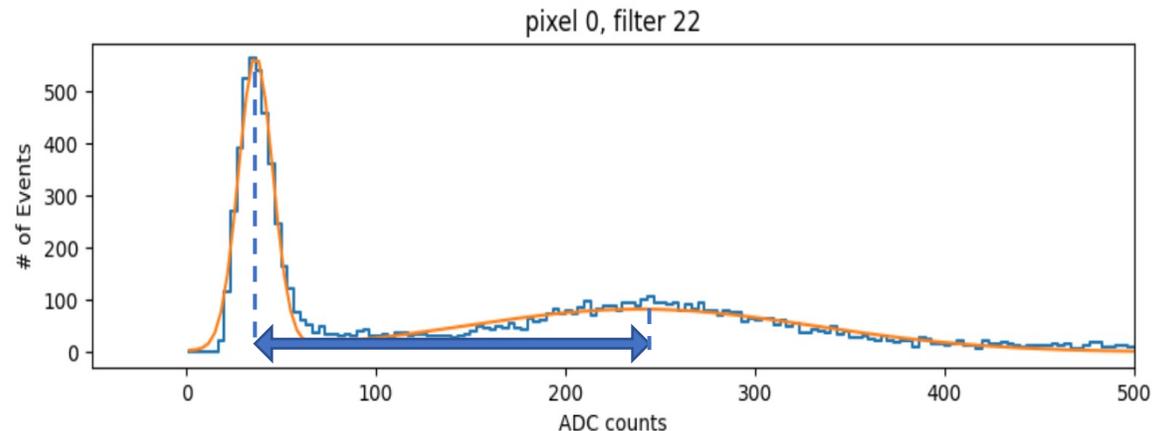
測定1 結果

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	5.21×10^4
1	4.49×10^4
2	7.28×10^4
3	4.29×10^4
4	7.26×10^4
5	6.17×10^4
6	6.51×10^4



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校正

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

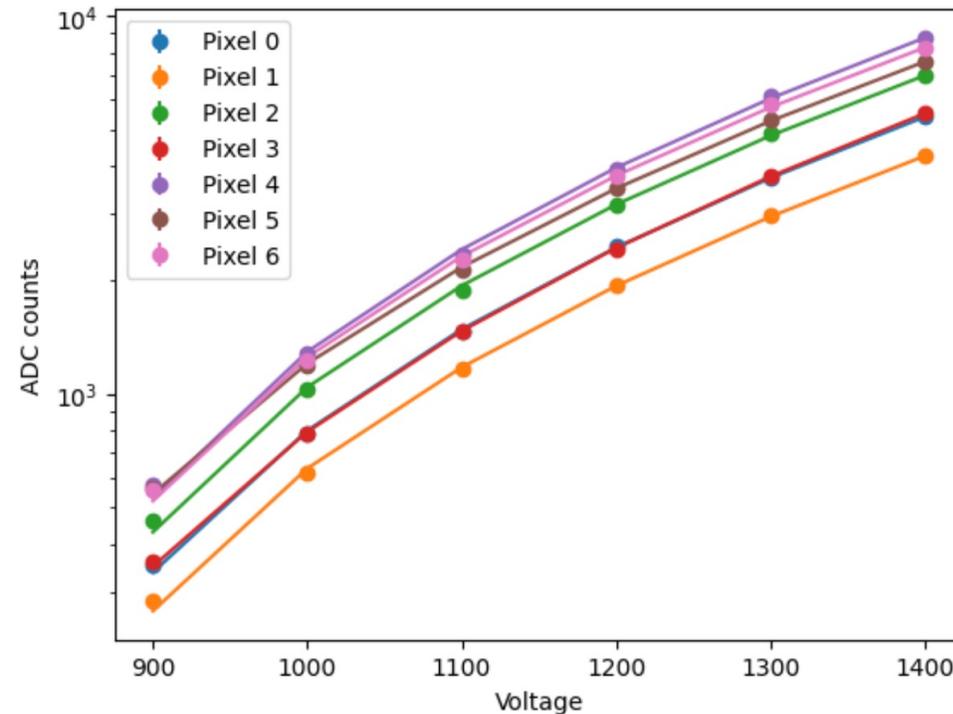


図. 出力の電圧依存性

PMT較正

測定2 結果

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

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

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

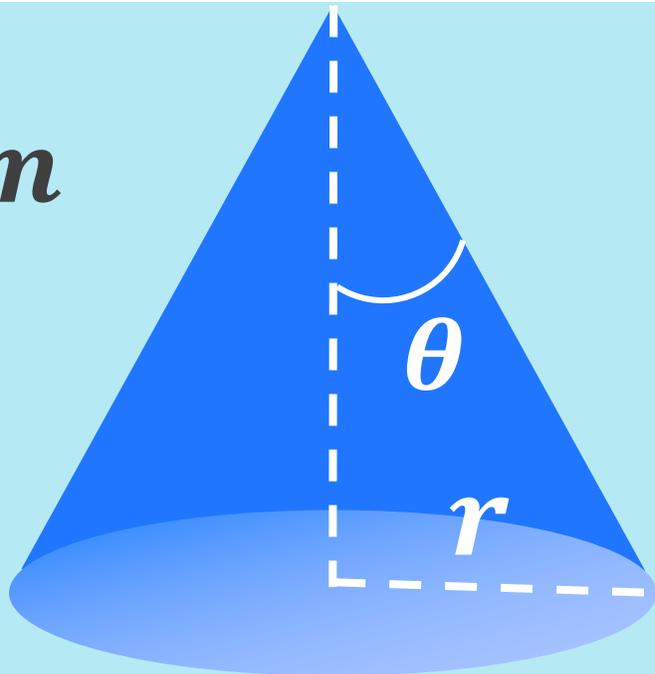
チェレンコフ角
光量の測定
～理論と実験～

チェレンコフ角 θ 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

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

θ : チェレンコフ角

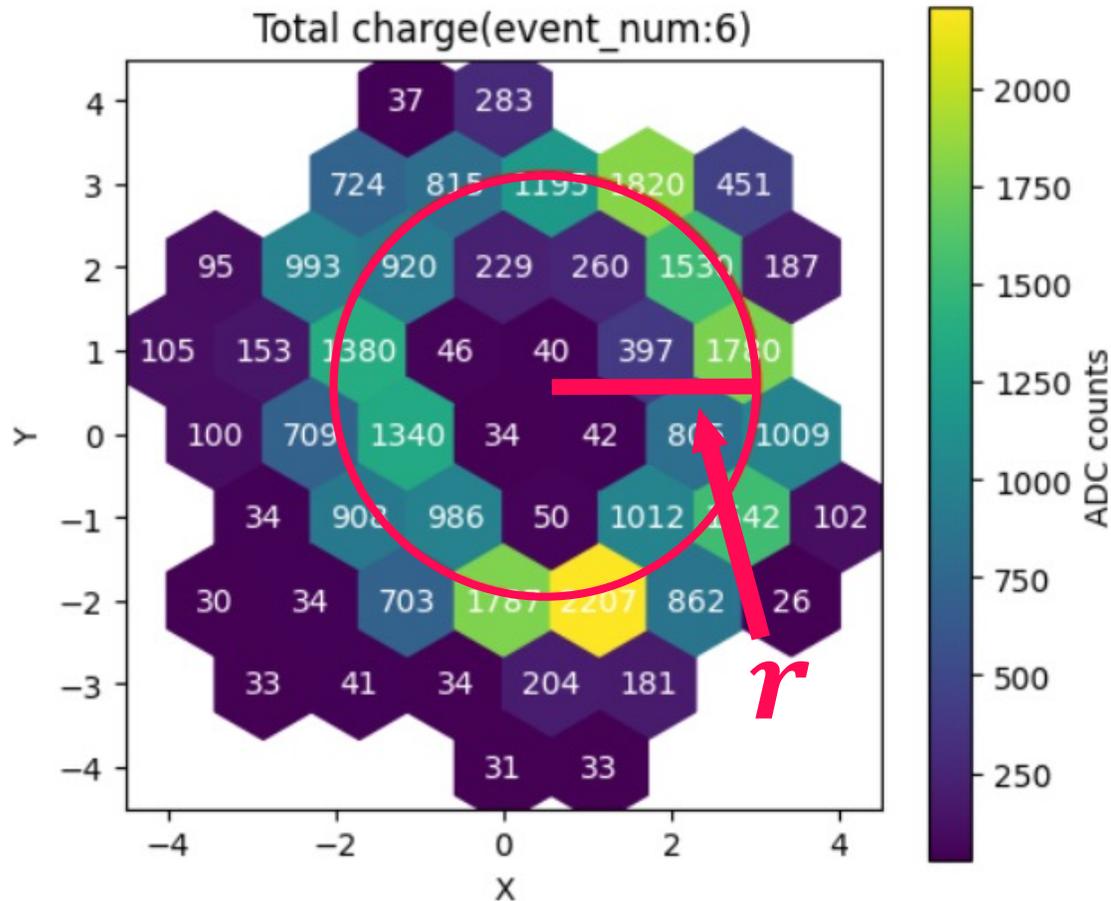
n : 水の屈折率(1.33)

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 θ 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

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

θ : チェレンコフ角

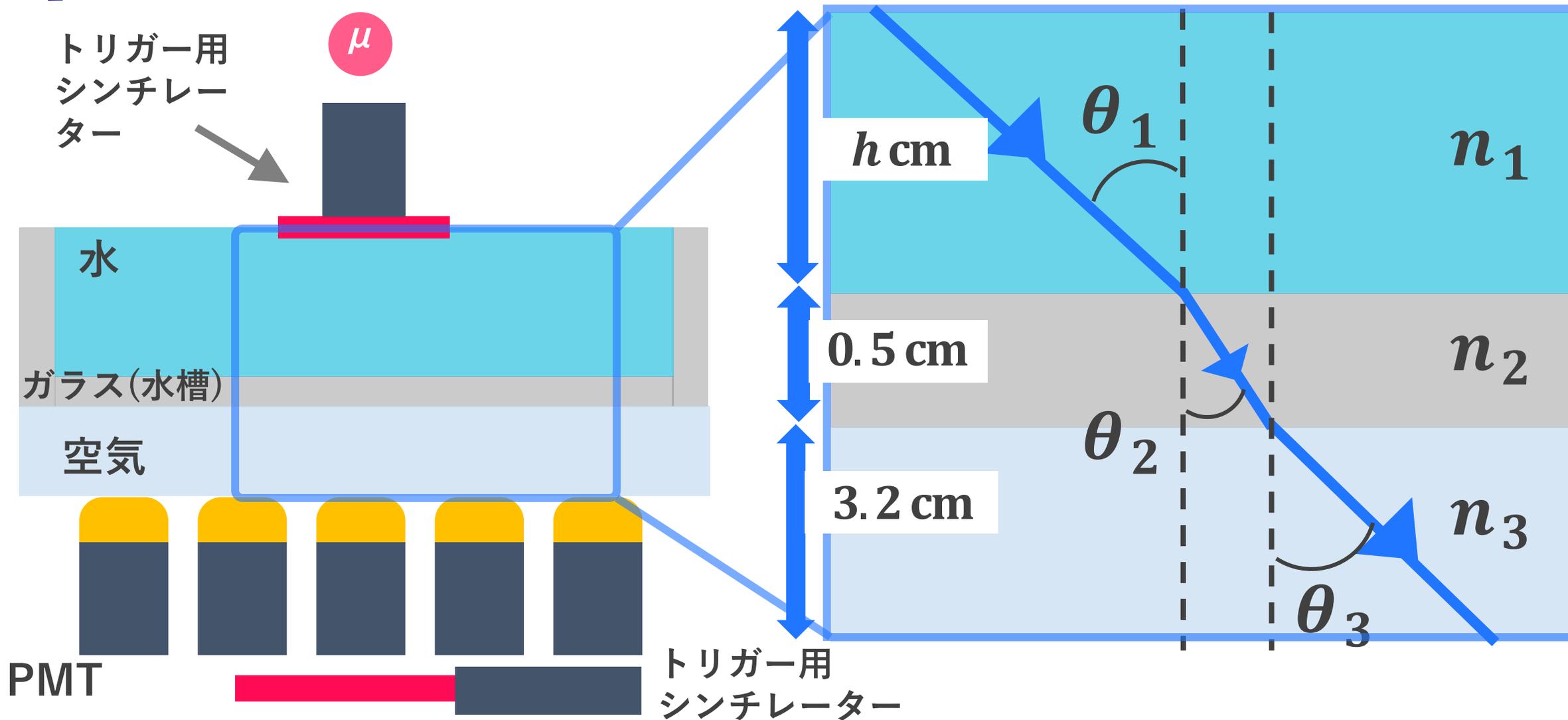
n : 水の屈折率(1.33)

v : 粒子の速度

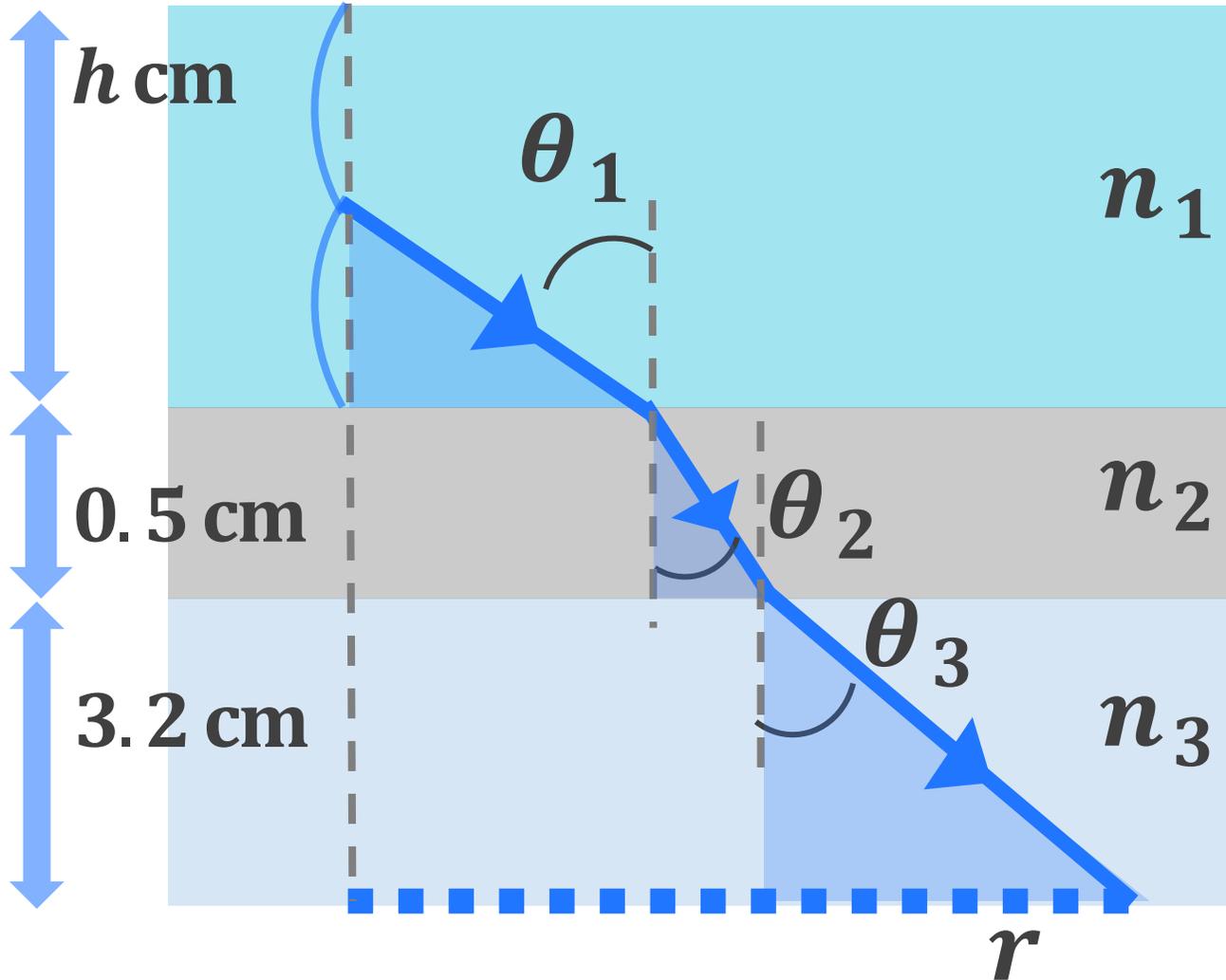
c : 光速

r : チェレンコフ光の半径

チェレンコフ角の測定方法



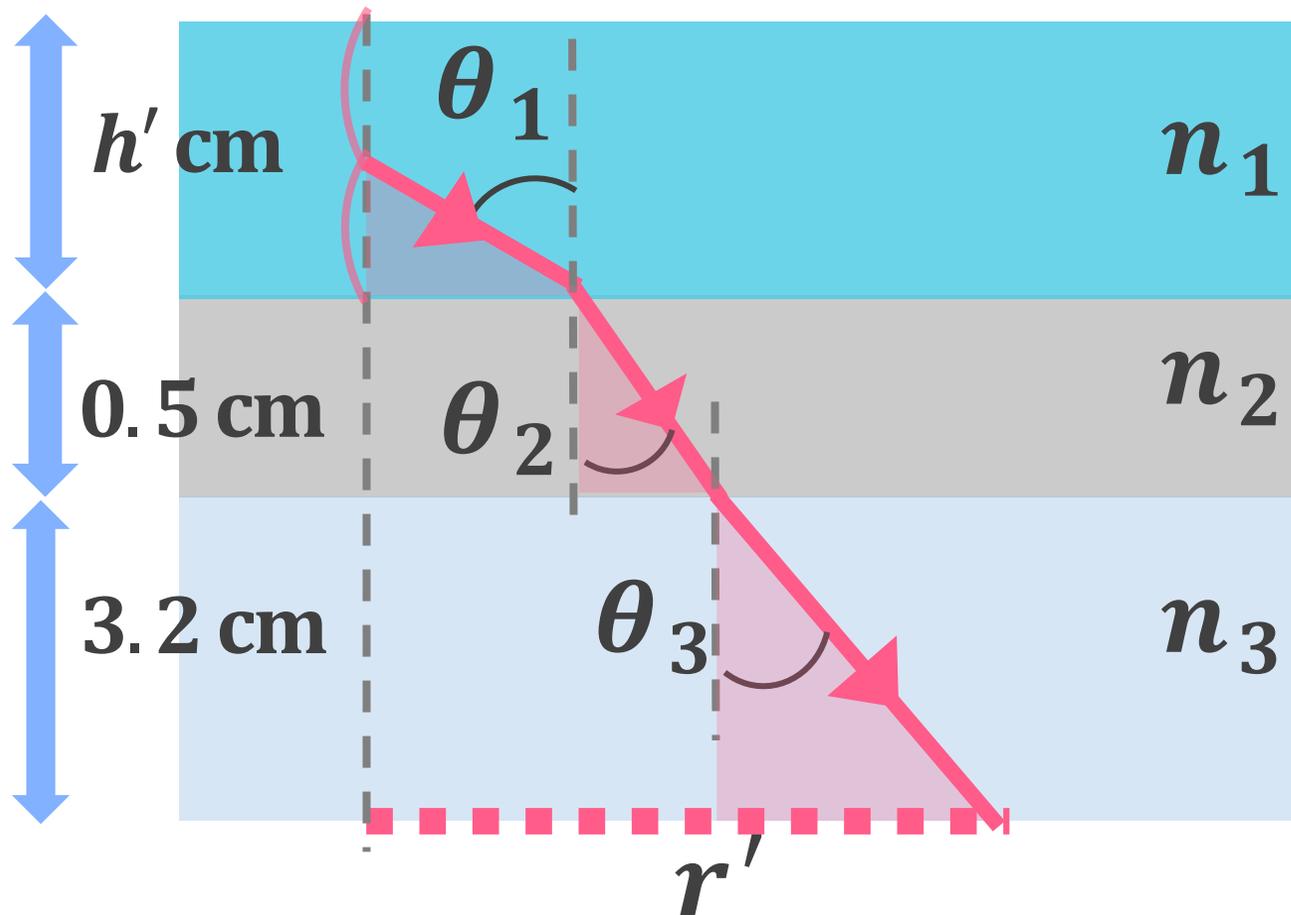
チェレンコフ角の測定方法



.....の部分

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

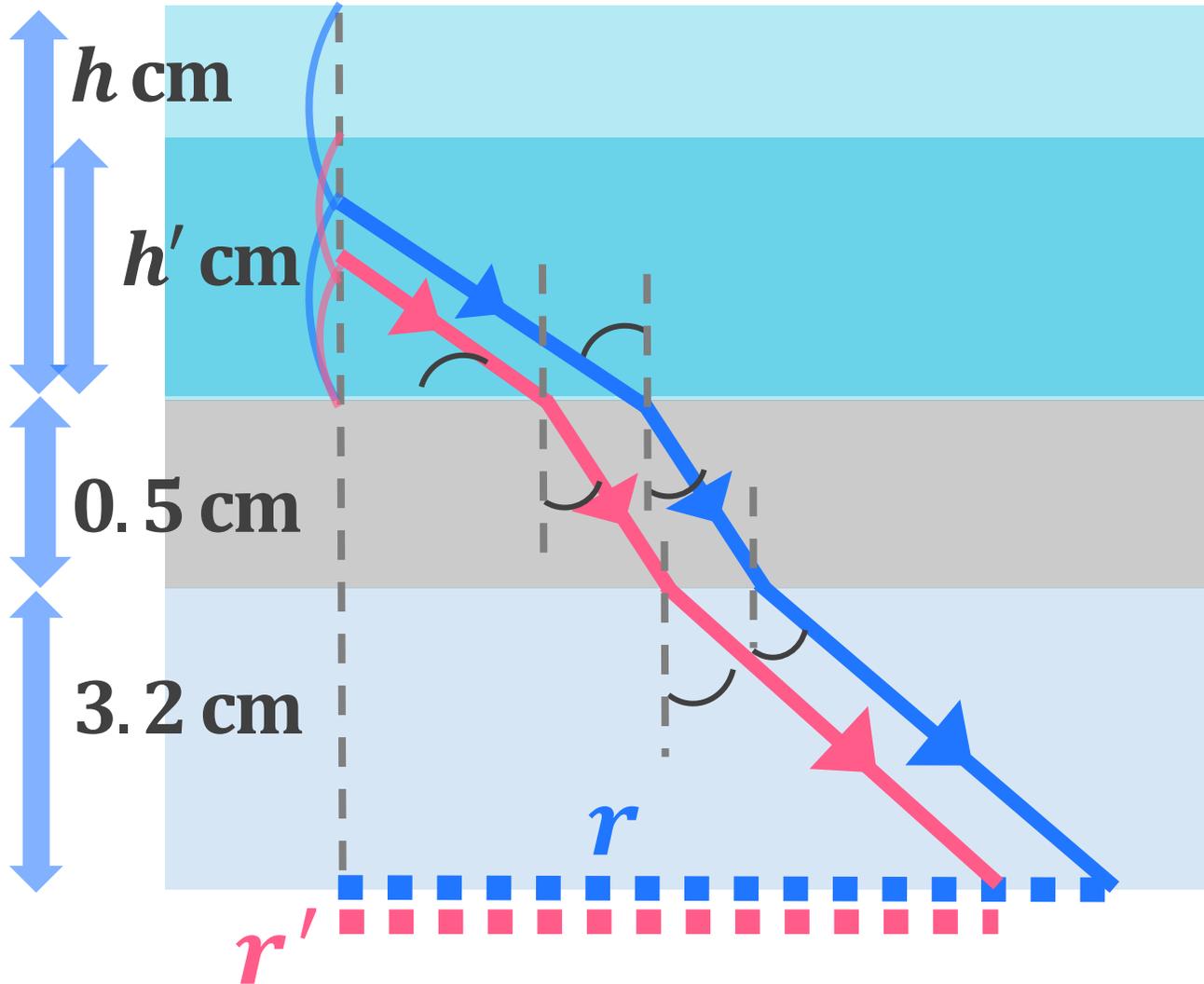
チェレンコフ角の測定方法



■ ■ ■ ■ ■ ■ 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 θ_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

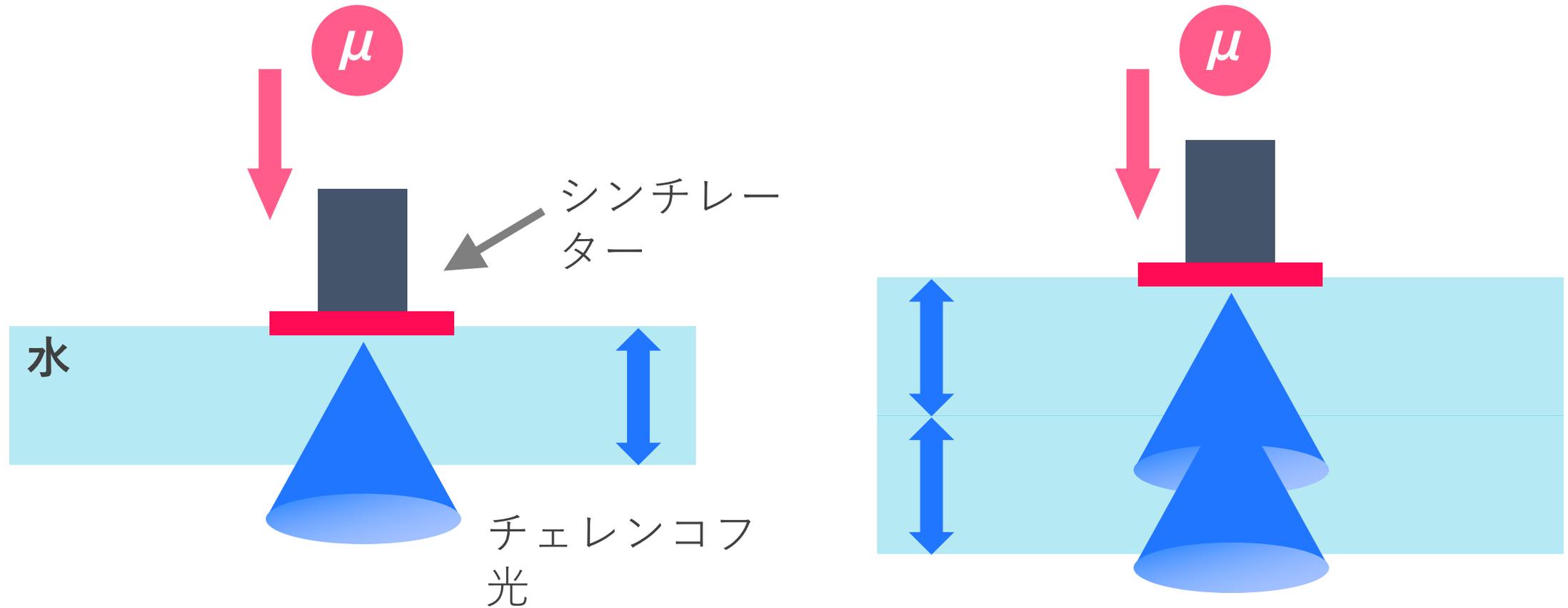
$$40.6 \pm 1.4^\circ$$

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

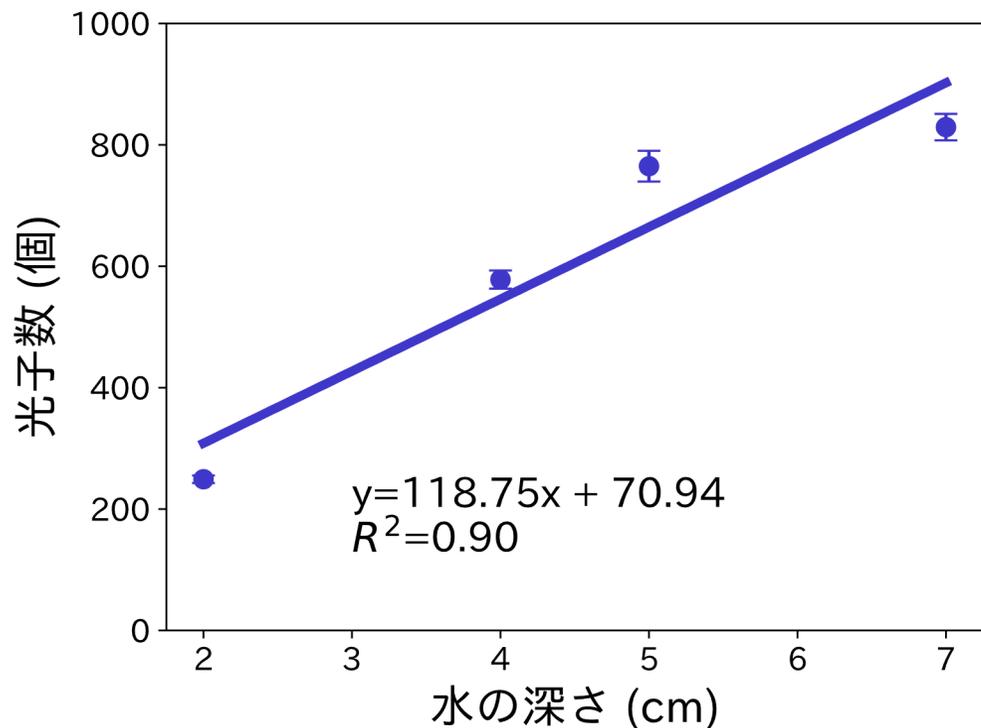
チェレンコフ光の光量の理論



▶ 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



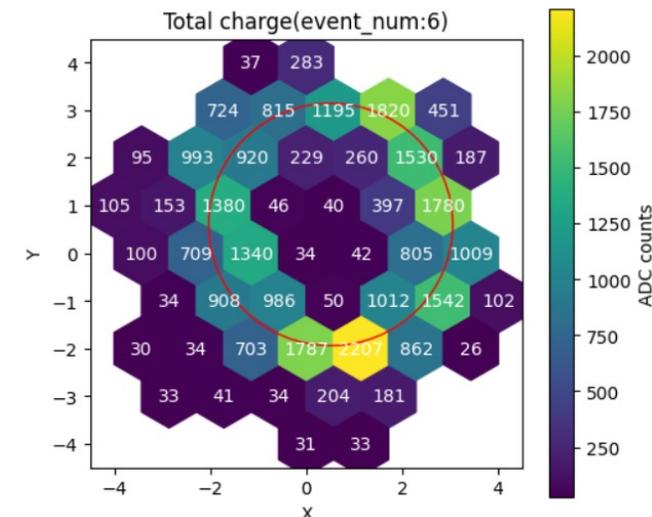
- 屈折率 n の異なる物質について同様の実験

- 実験に用いた物質

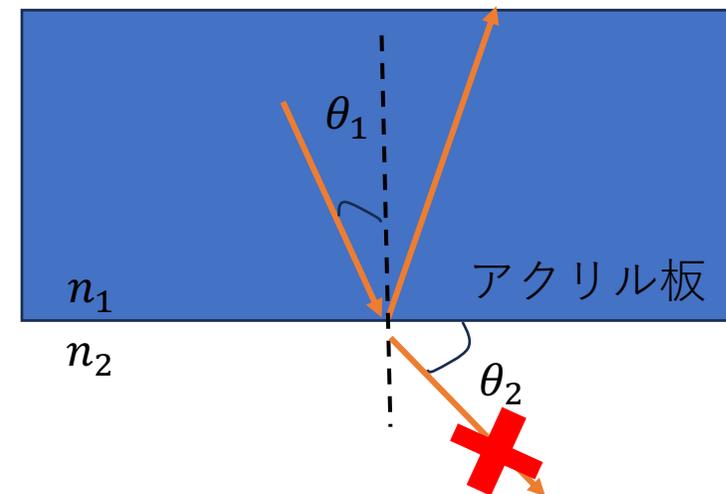
- アクリル板 ($n = 1.49$) \Leftrightarrow 水 ($n = 1.33$)
- シンチレータ ($n = 1.56$)

- チェレンコフ角 θ_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?**



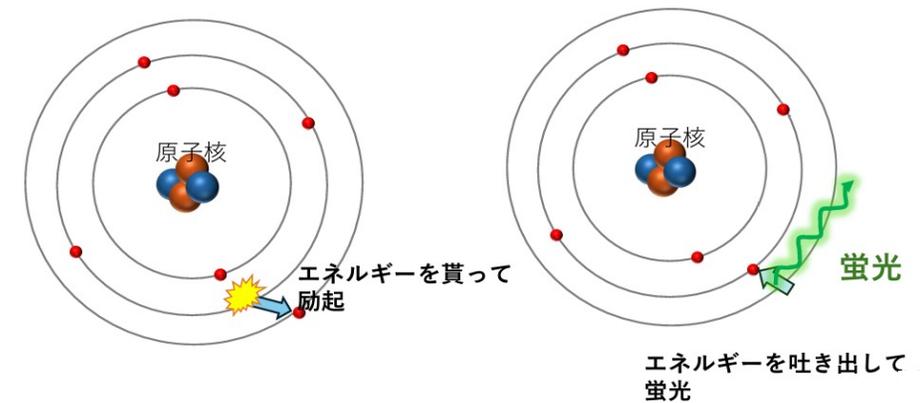
図：水チェレンコフ光の場合の例



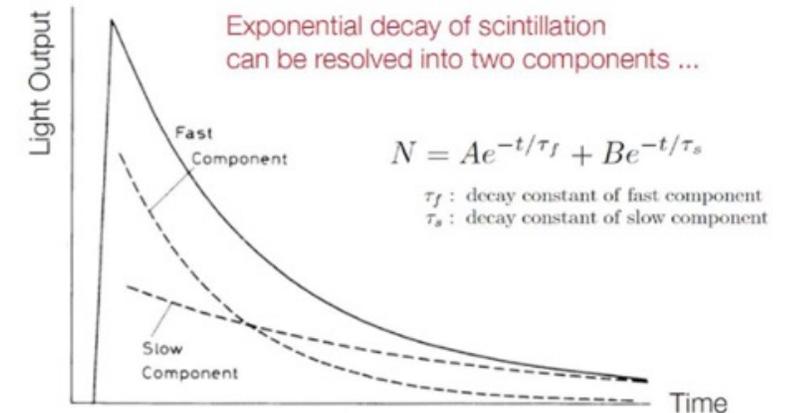
蛍光 (Scintillation)

- 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りと放出される

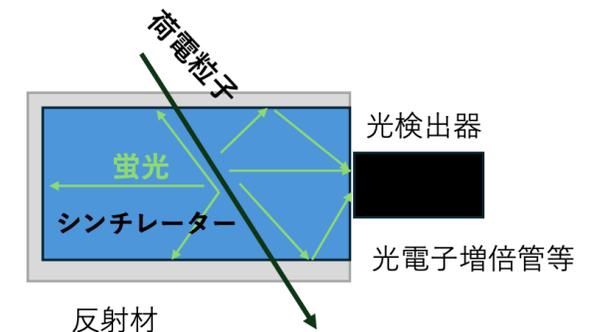
□ シンチレーション光は等方的に放出されるため
リングが**観測されない**



図：シンチレーションの仕組み

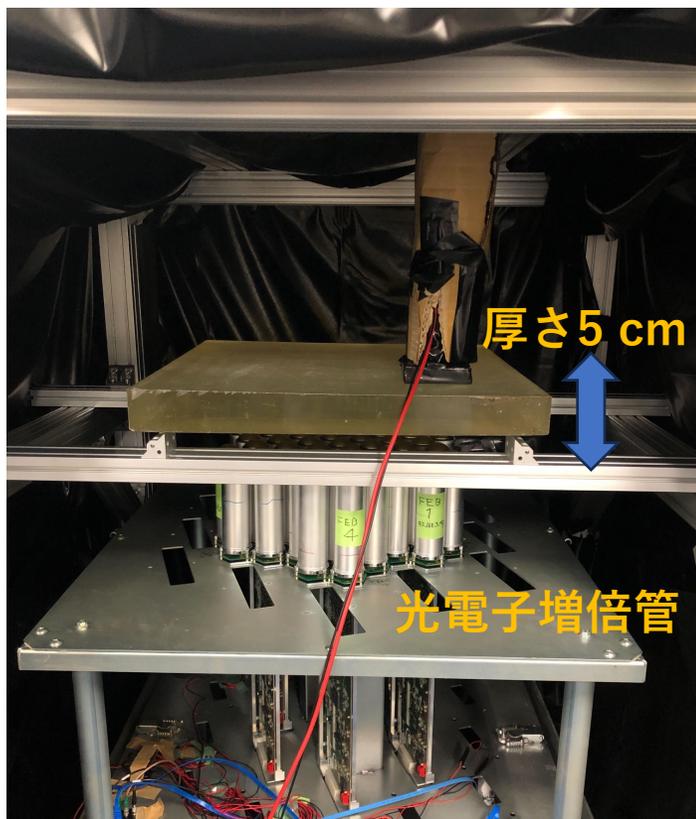


図：シンチレーション光の時間特性

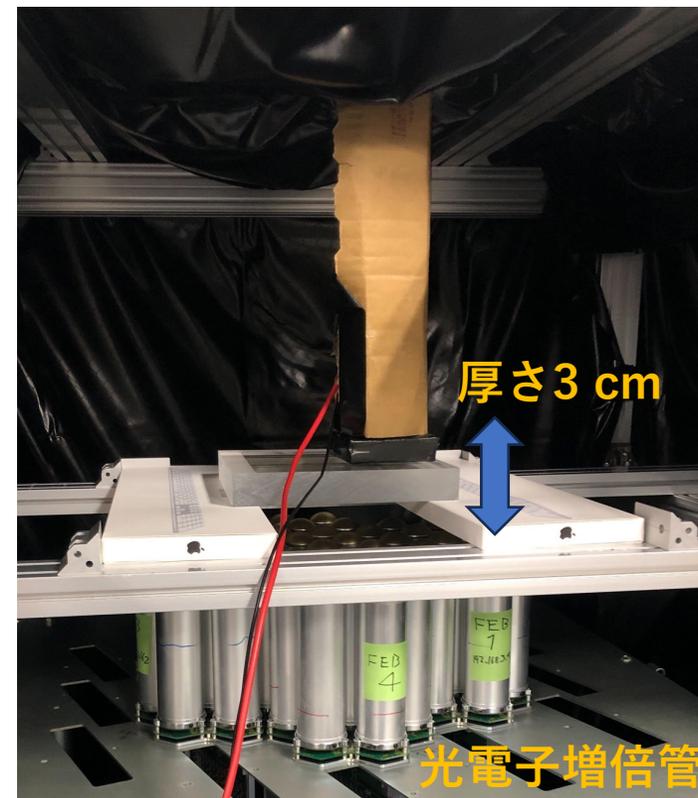


実験方法

- 図のようなセットアップで実験を行う

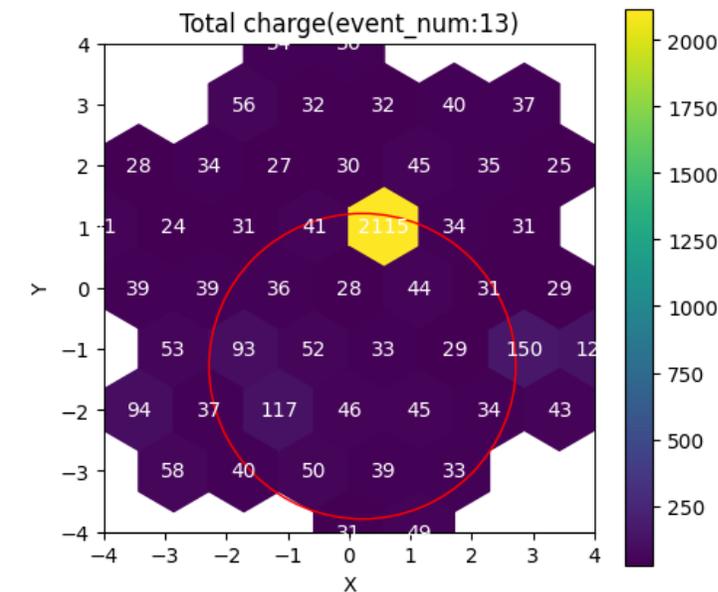
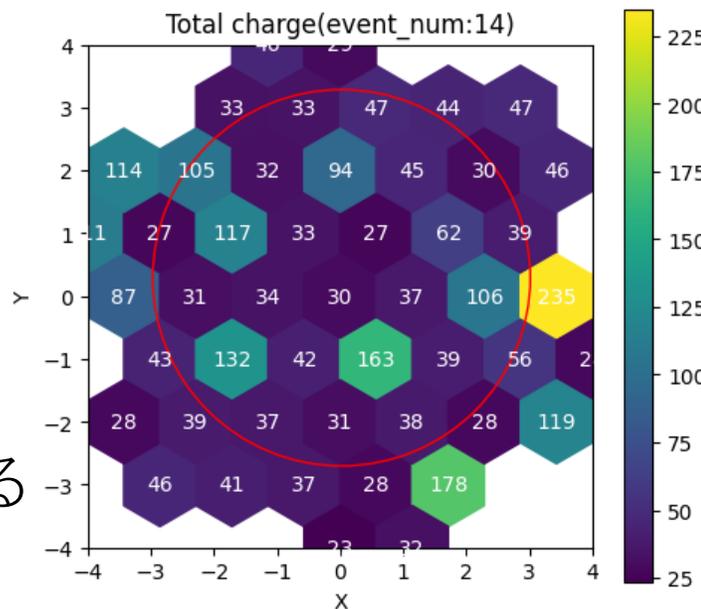
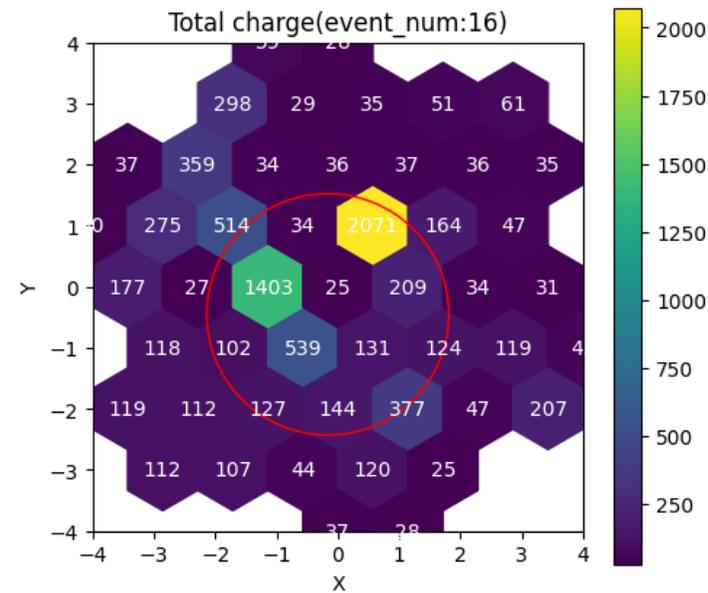
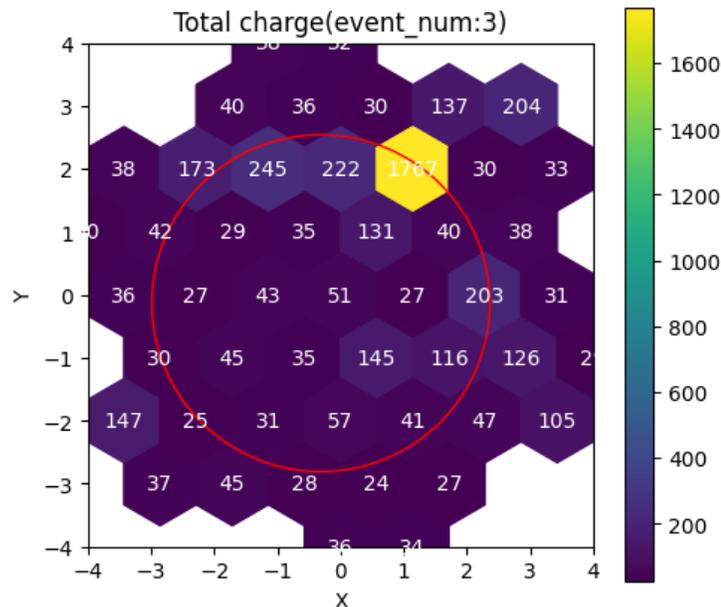
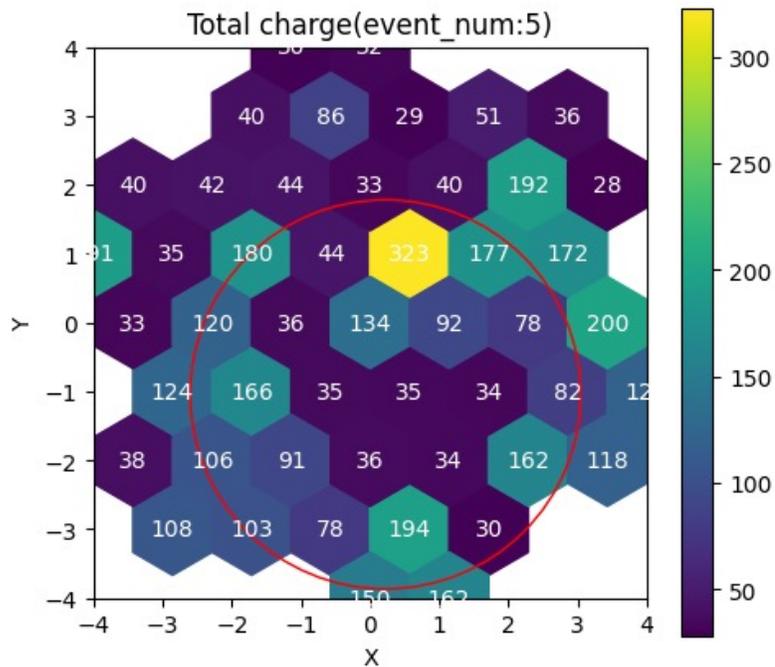


図：シンチレータの場合



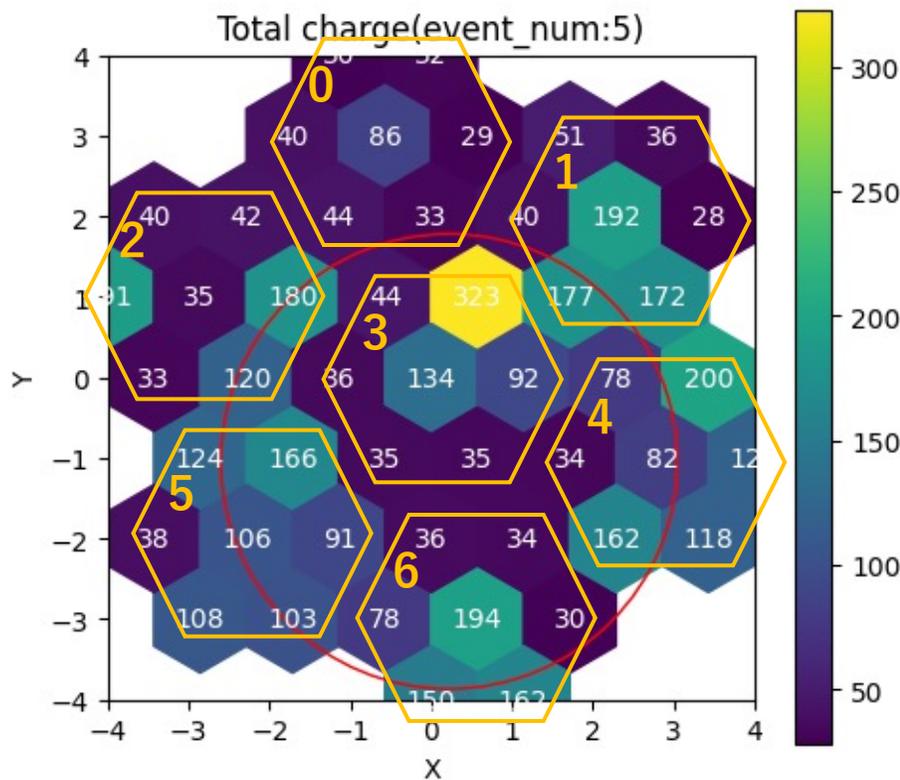
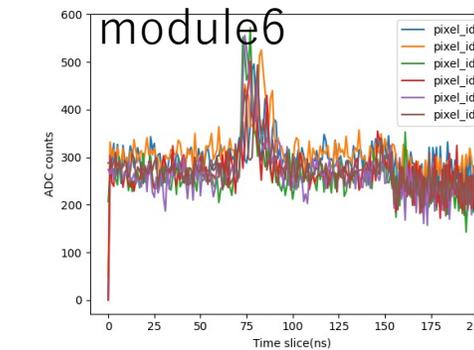
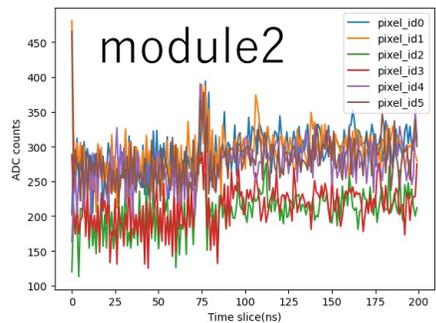
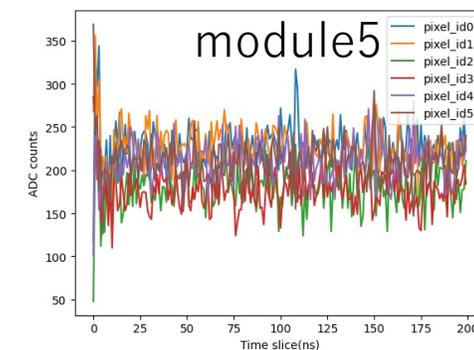
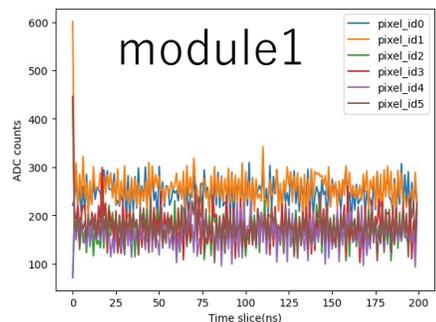
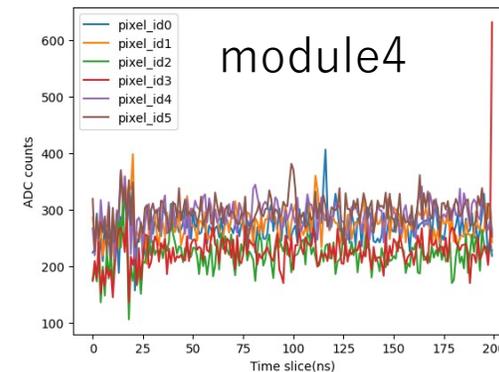
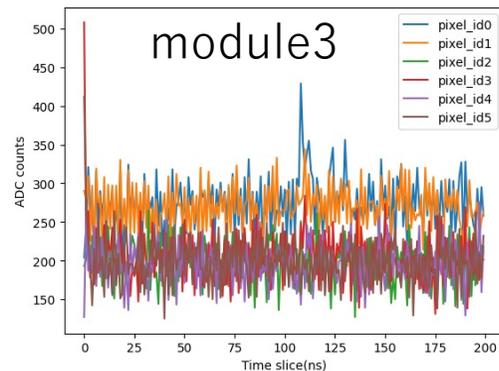
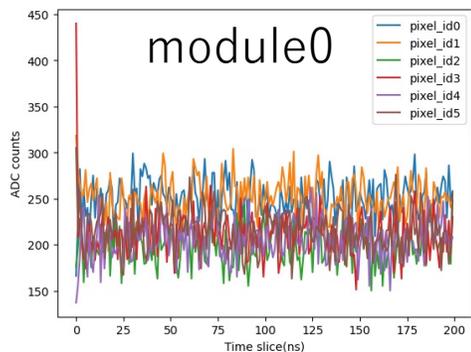
図：アクリル板の場合

結果(アクリル板)

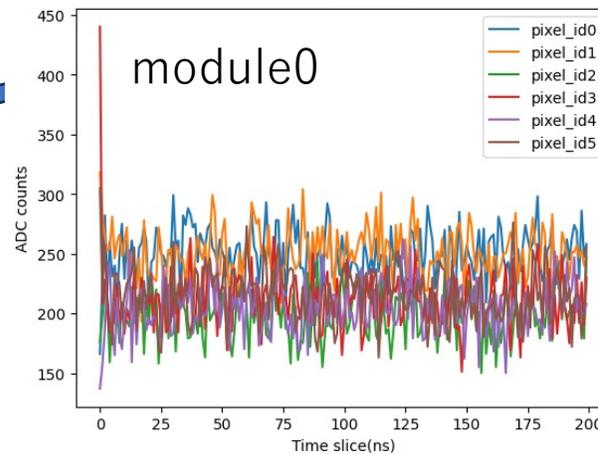
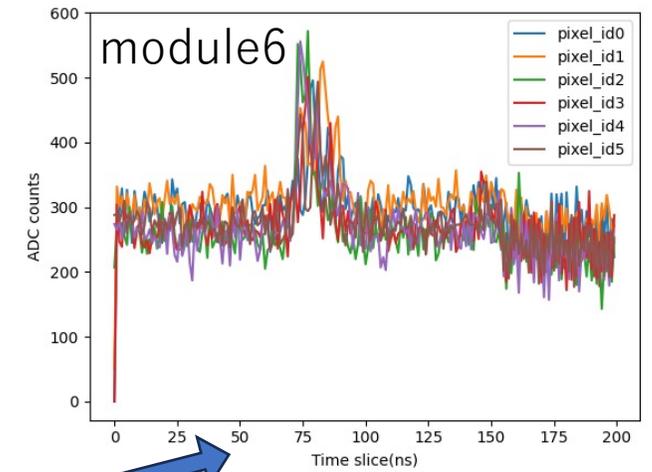
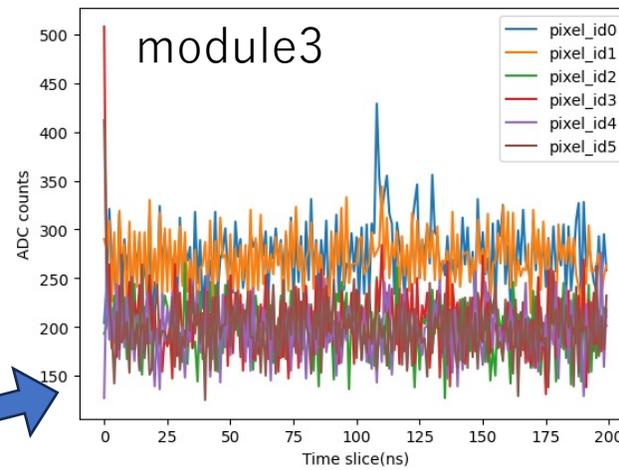
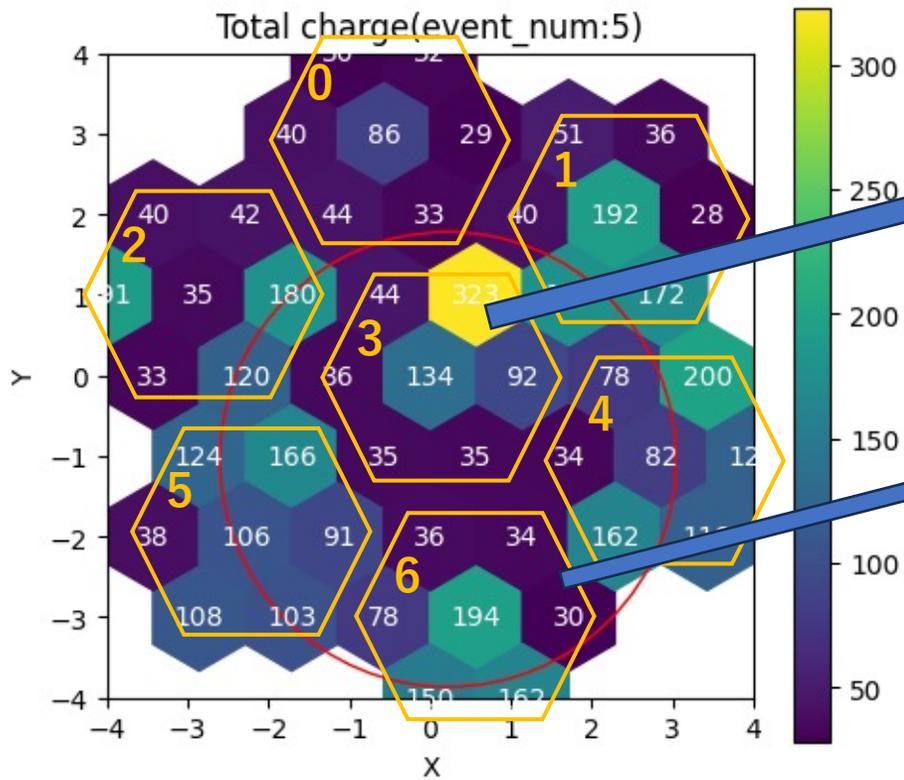


- 明るい1点が見られる
- 円のように見える部分もある

結果(アクリル板)

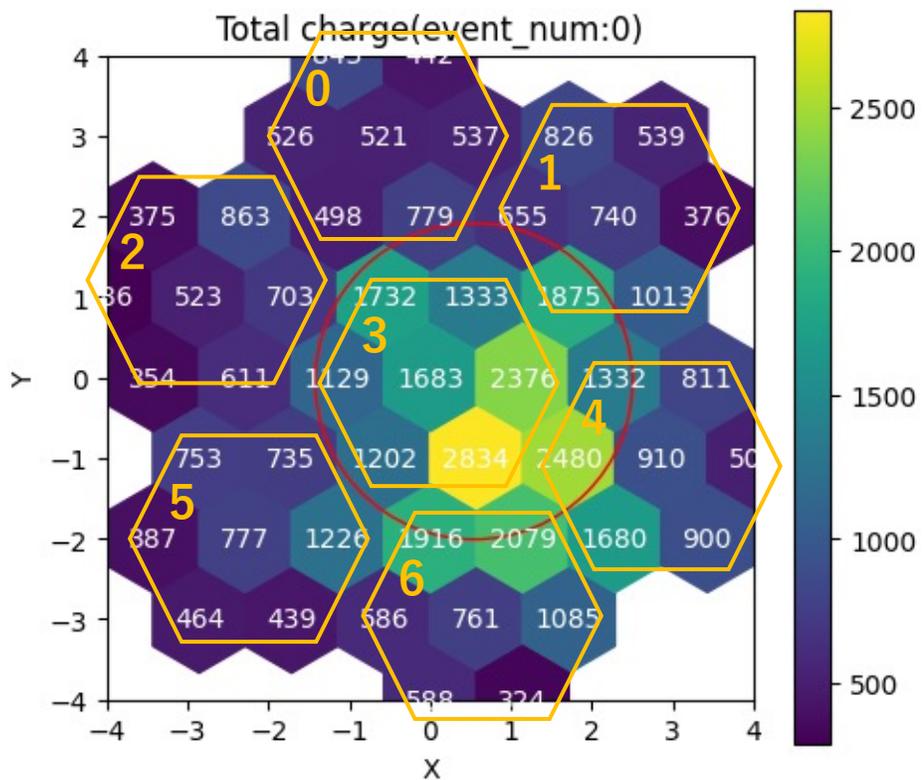
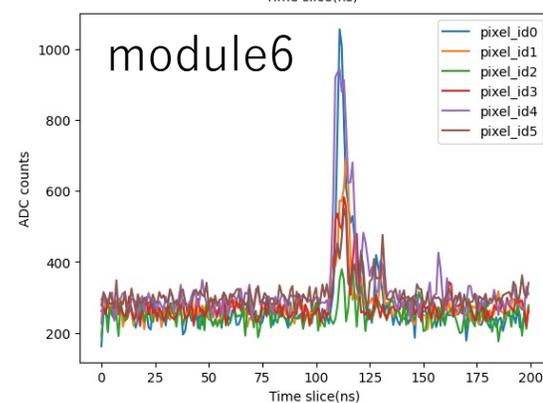
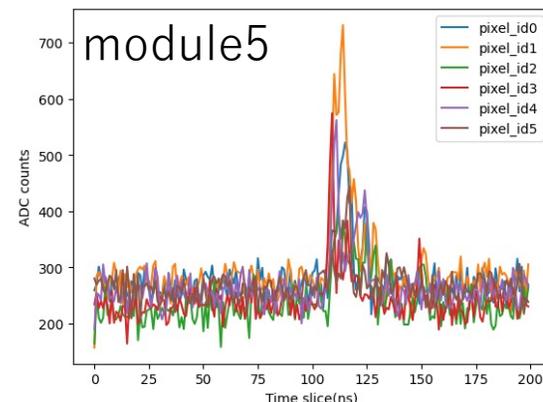
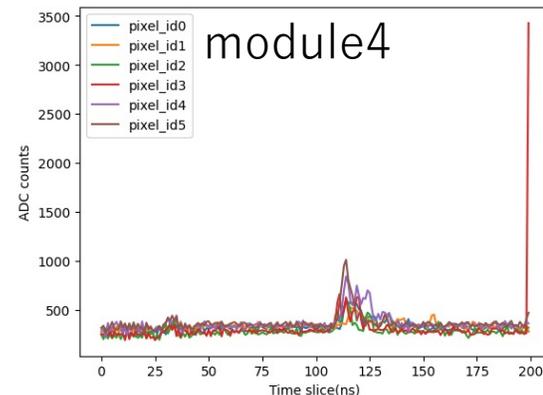
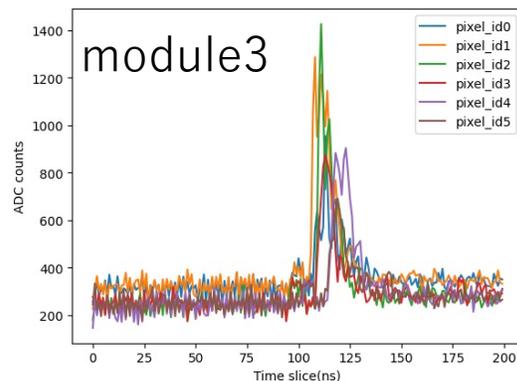
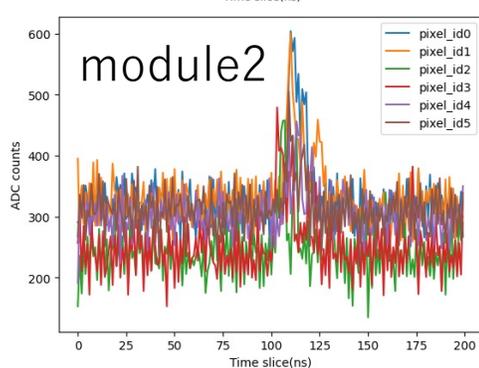
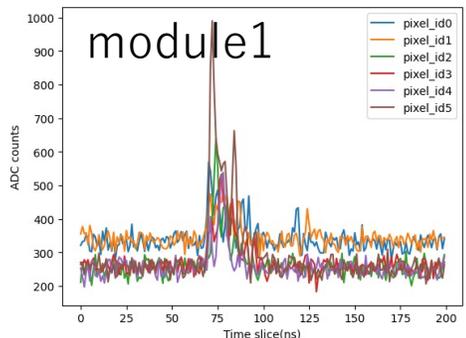
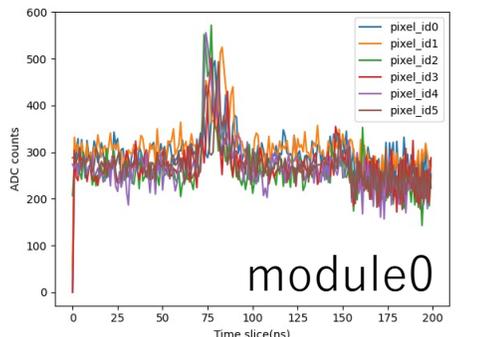


結果(アクリル板)



- 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

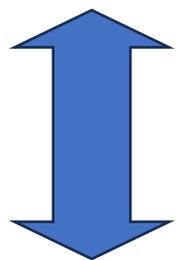
結果（シンチレータ）



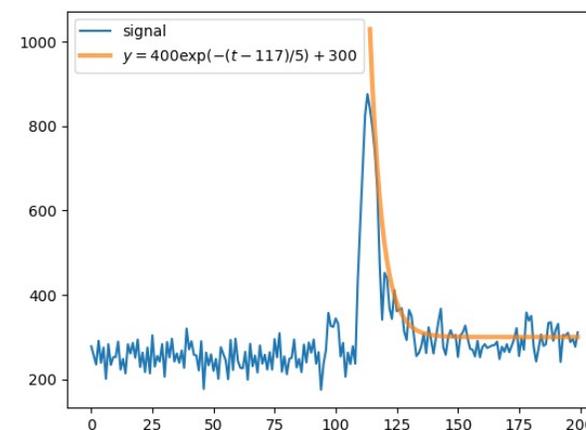
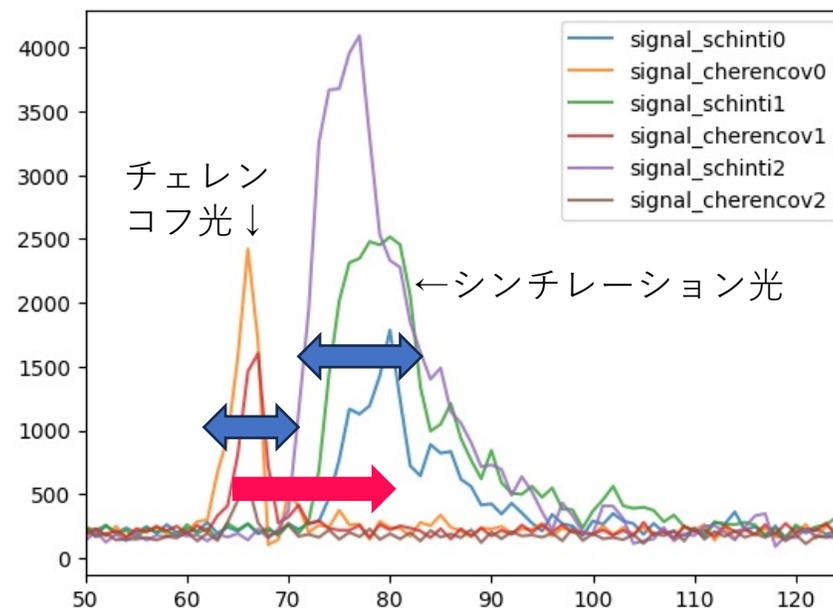
• どのモジュールでも光を計測

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（ $\sim 5\text{ns}$ ）

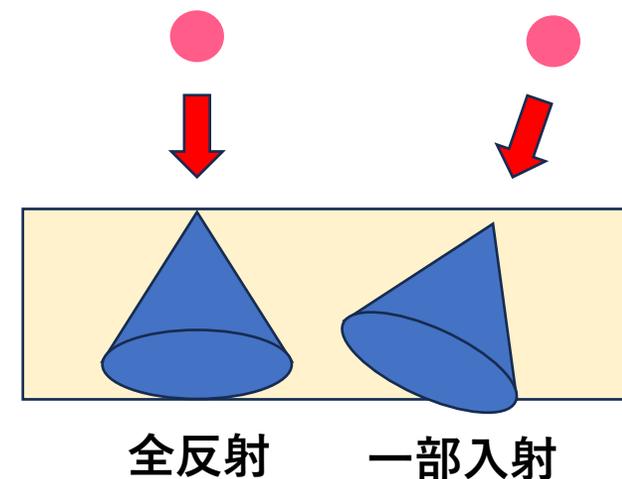


- シンチレーション光
 - なだらかな反応（ $\sim 10\text{ ns}$ ）
 - タイミングが遅い（ $\sim 10\text{ ns}$ ）
 - ピーク前はデルタ関数的に増加し，ピーク後は**指数関数的**に減衰



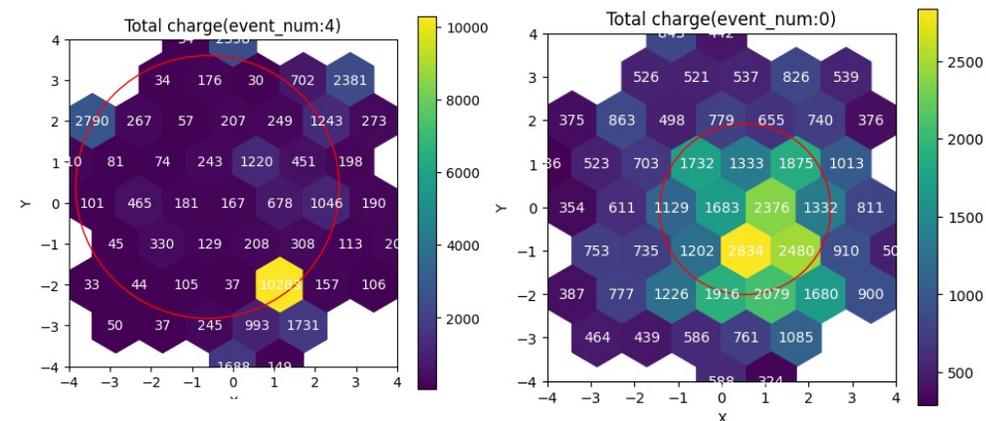
考察

- 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

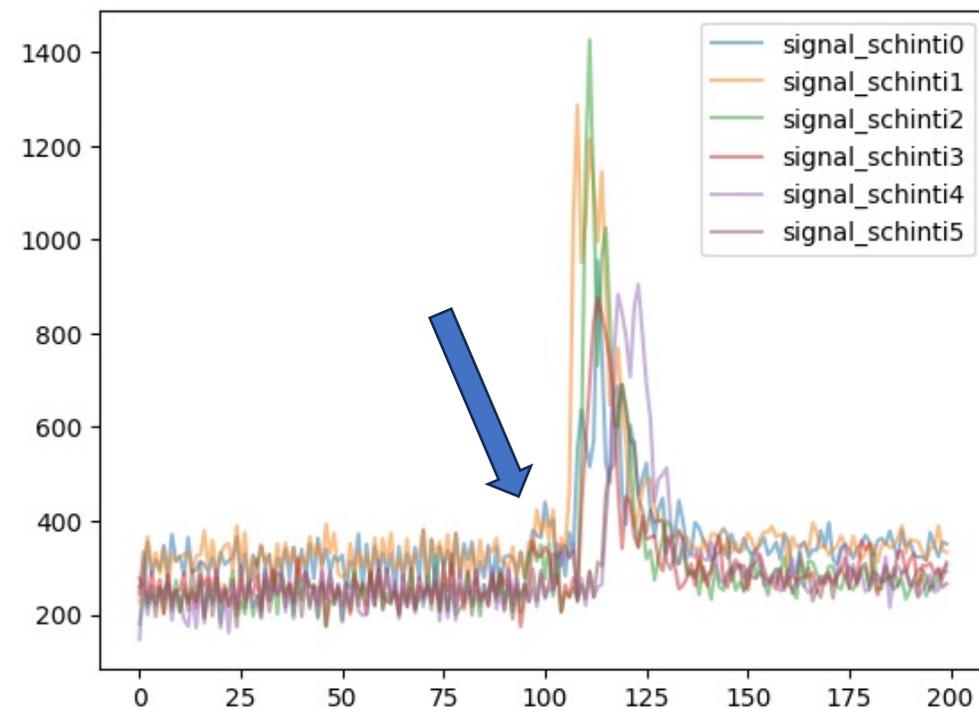
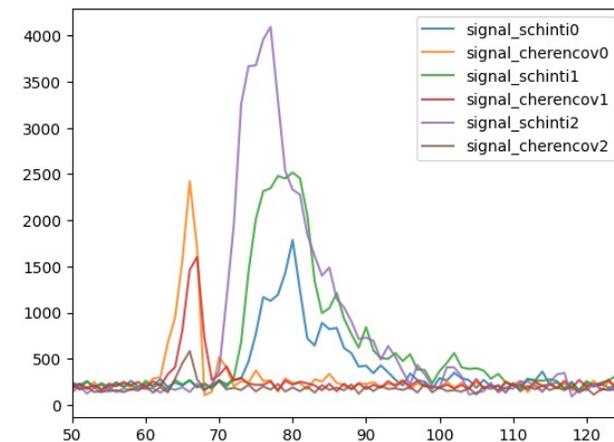
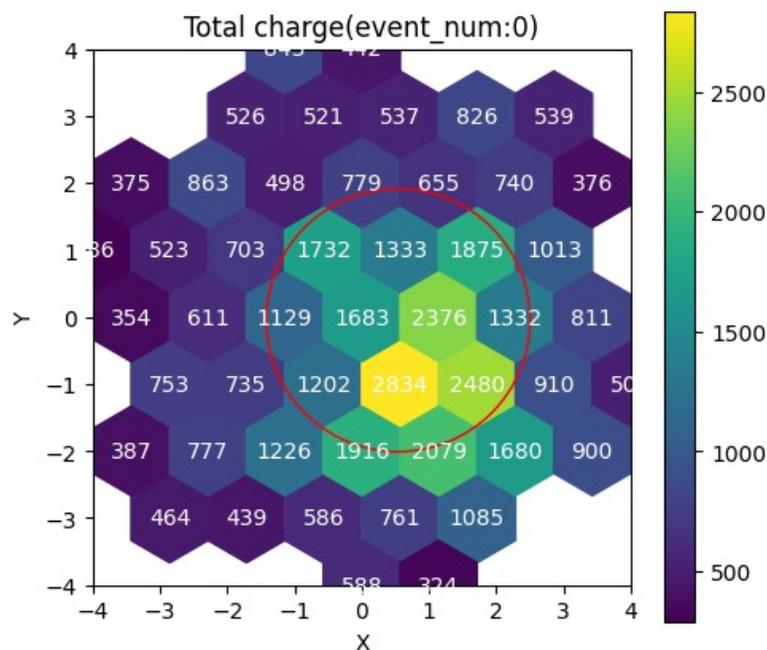
- 物質に応じた計測装置を選ぶ or 作る必要



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

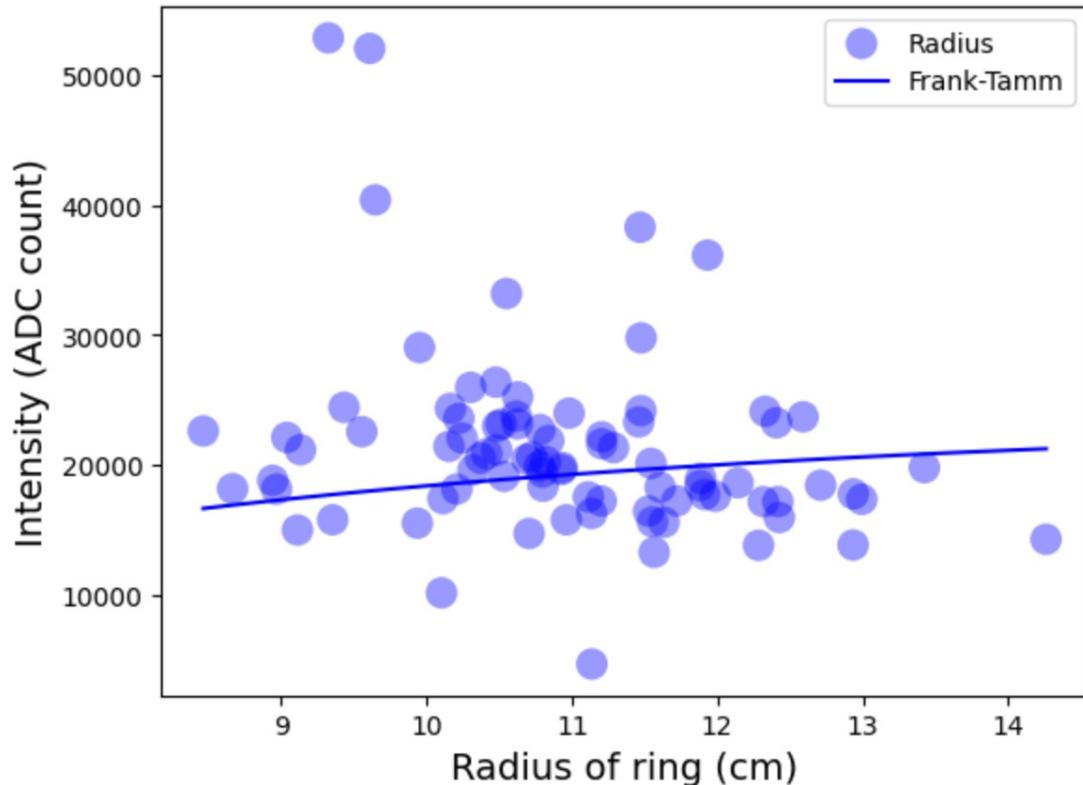


まとめ ▶ ミューオンを用いてチェレンコフ光の検出を行った

- 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！！

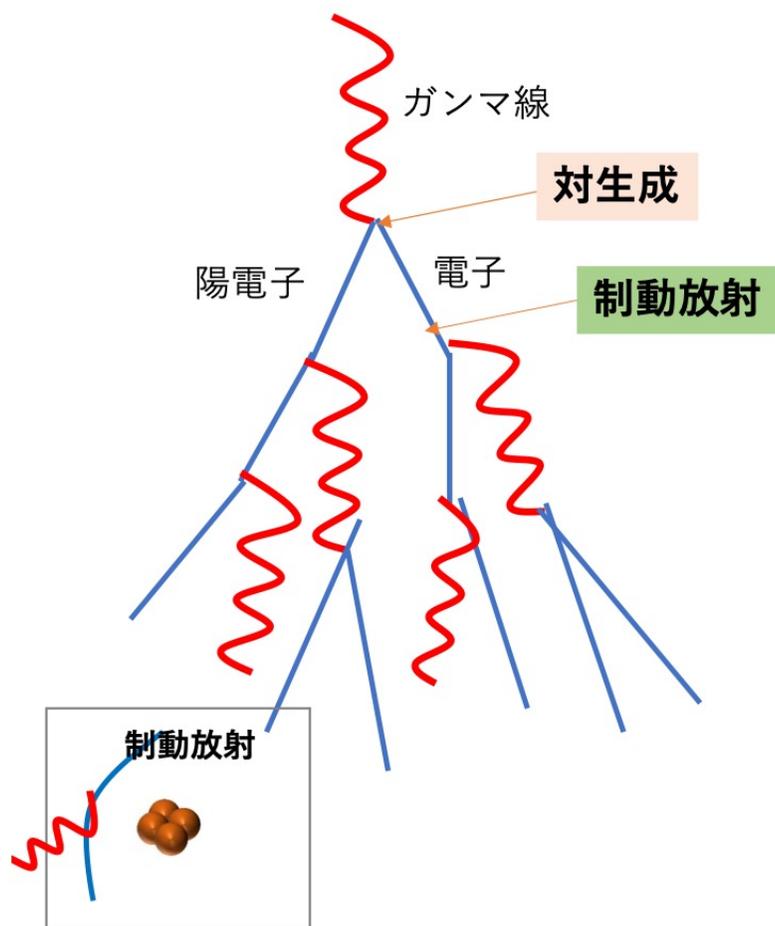
補足 (β の依存性について)



Frank_Tammの公式

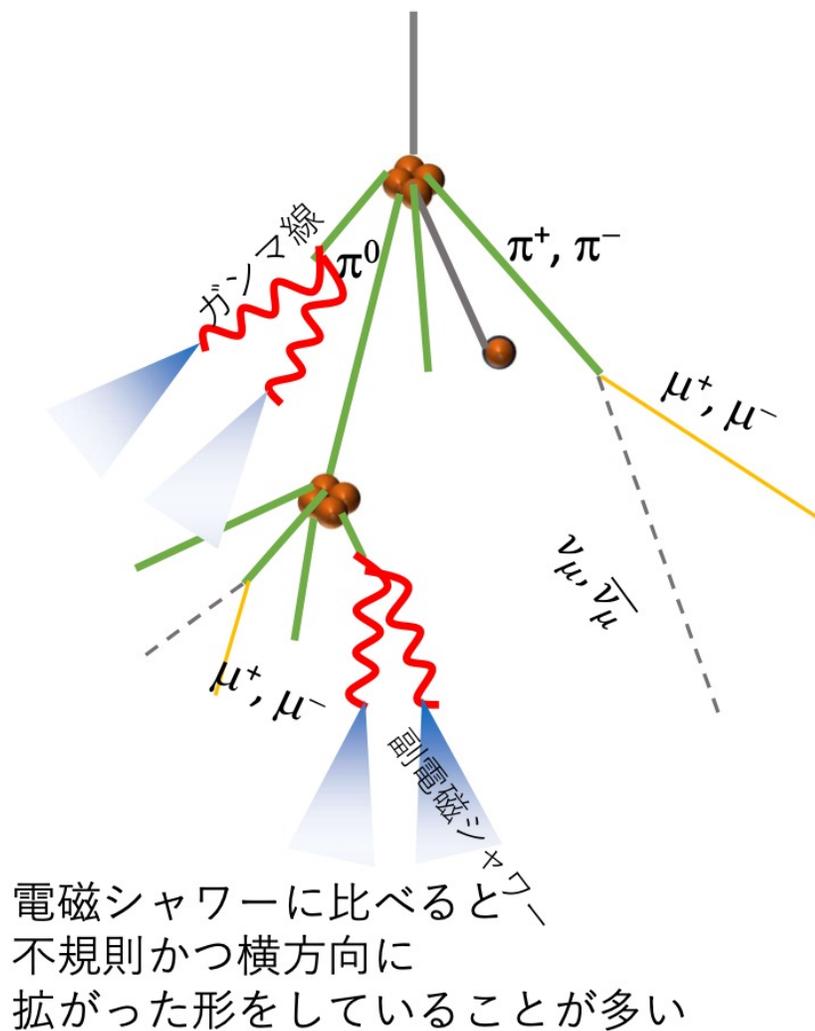
$$\frac{d^2 E}{dx d\omega} \propto 1 - \frac{c^2}{\beta^2}$$

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 π (パイ) 粒子
 - ✓ 3種類 π^\pm, π^0
 - ✓ π^0 : 2つのガンマ線に崩壊→電
磁シャワーへ
 - ✓ π^\pm は崩壊するか、また原子核
と衝突して π^\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
 π^\pm 静止質量 $140 \text{ MeV}/c^2$
- 電荷を持たない中性パイ粒子
 π^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



π 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)

