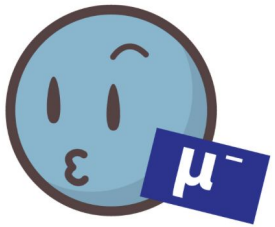
高エネルギーガンマ線天文学

窪田 剛大、酒井 温槻、小澤 仁史、中里 仁寧、店網 航輝

Supervisor　助教 野崎誠也先生　TA 森田 開さん　永田 柊弥さん　PD 阿部 正太郎さん

muon

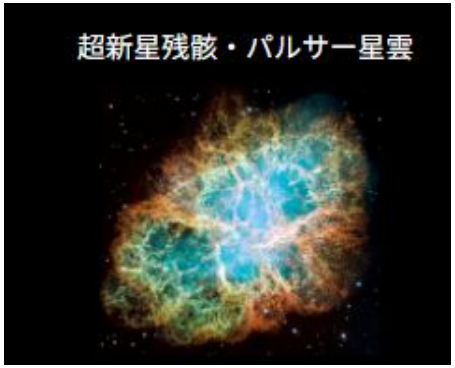


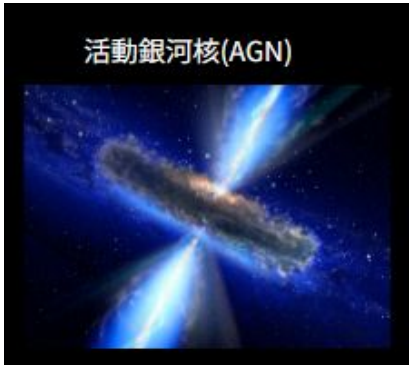
イントロダクション

高エネルギーガンマ線天文学とは

対象：TeV(10^{12}eV)帯の高エネルギーのガンマ線

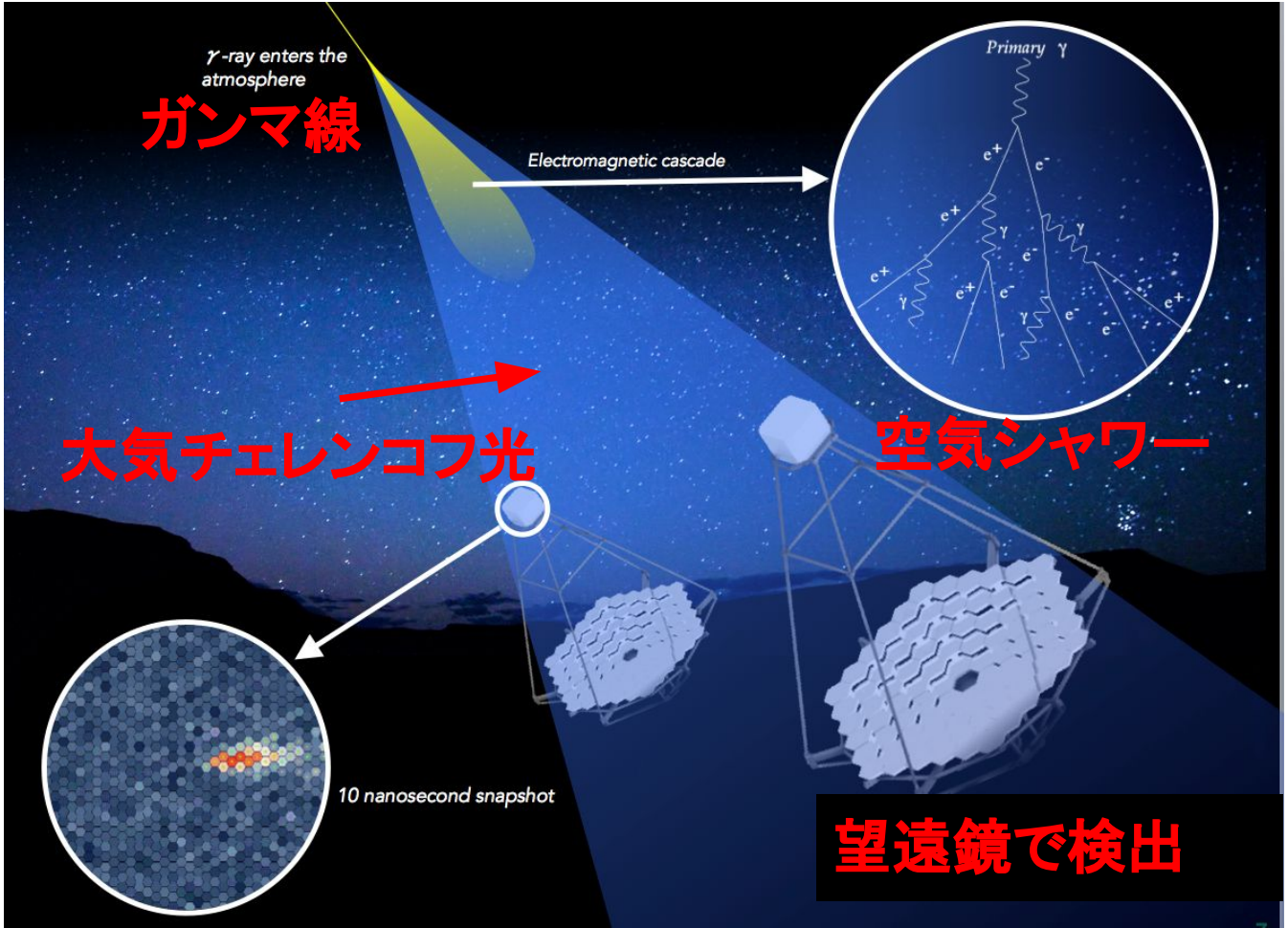
・ガンマ線は電荷を持たない
→磁場によらず直進
→観測された方向が分かる
→**発生した天体の位置を特定可能**





・パルサー・超新星残骸・活動銀河核など
→**宇宙の極限環境で起こる高エネルギー現象を研究**

γ線の観測原理


γ-ray enters the atmosphere
ガンマ線
Electromagnetic cascade
Primary γ
大気チェレンコフ光
空気シャワー
10 nanosecond snapshot
望遠鏡で検出

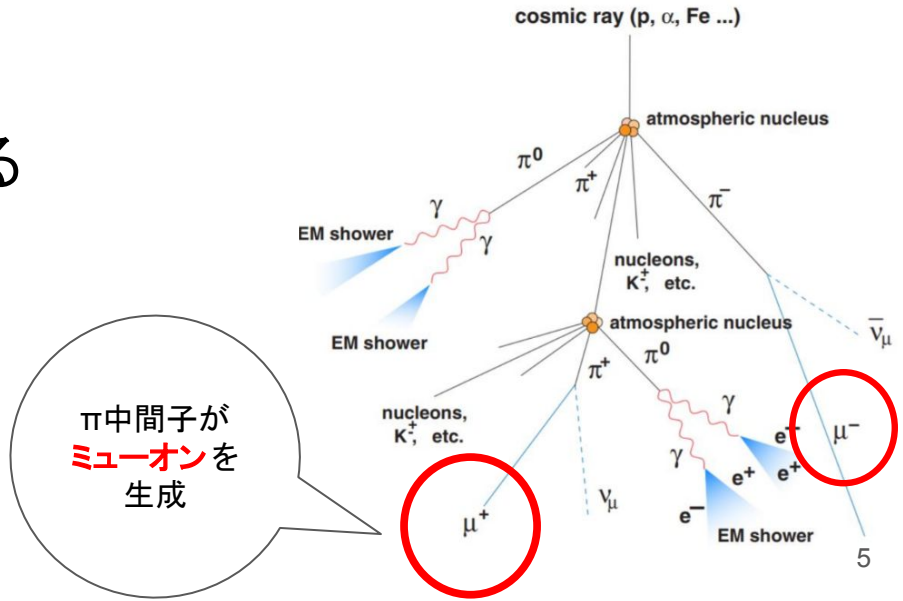
空気シャワーとは？

ー高エネルギー宇宙線が地球の大気に入射した際に発生する物理現象

①宇宙線が地球大気に衝突

②衝突によって多数の二次粒子
（ミューオン・電子など）が大量に生まれる

核カスケードシャワー

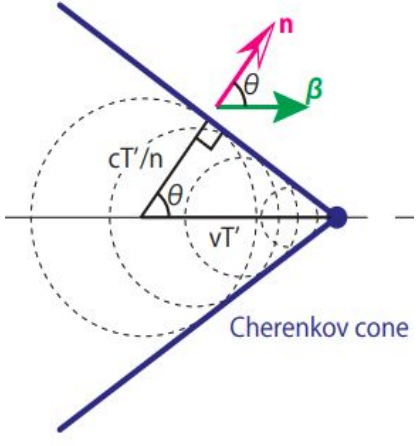


チェレンコフ光

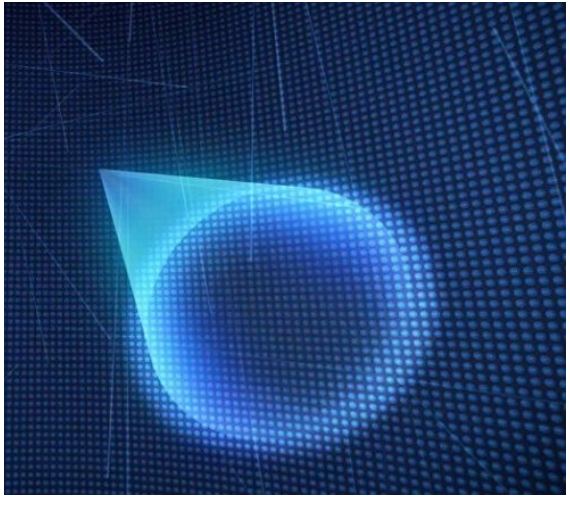
荷電粒子が、媒質中（水・空気・ガラスなど）を

v (荷電粒子の速度)$> \frac{c}{n}$ (媒質中での光速)　で運動

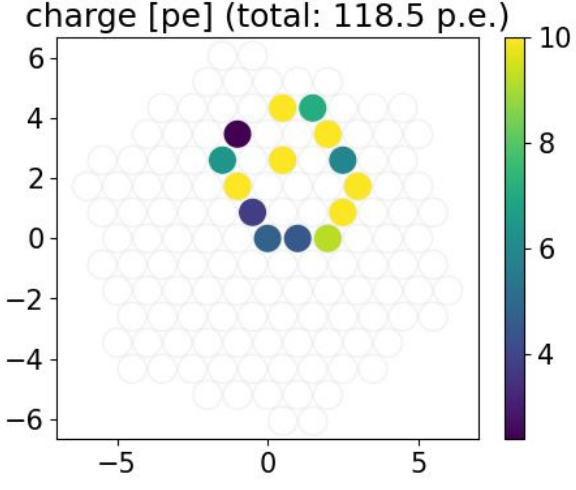
➡チェレンコフ光（青い光）が放出



$$\cos\theta = \frac{ct/n}{\beta ct} = \frac{1}{n\beta}$$



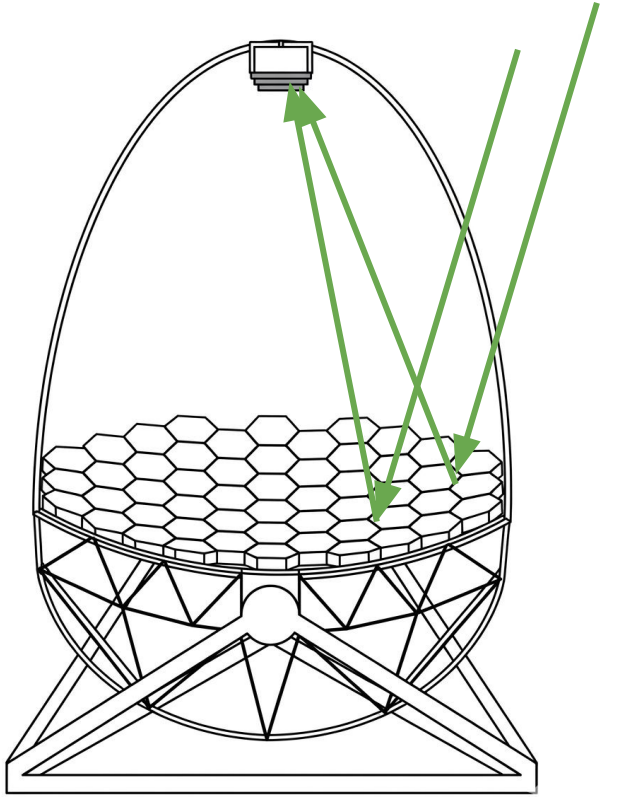
イメージ図



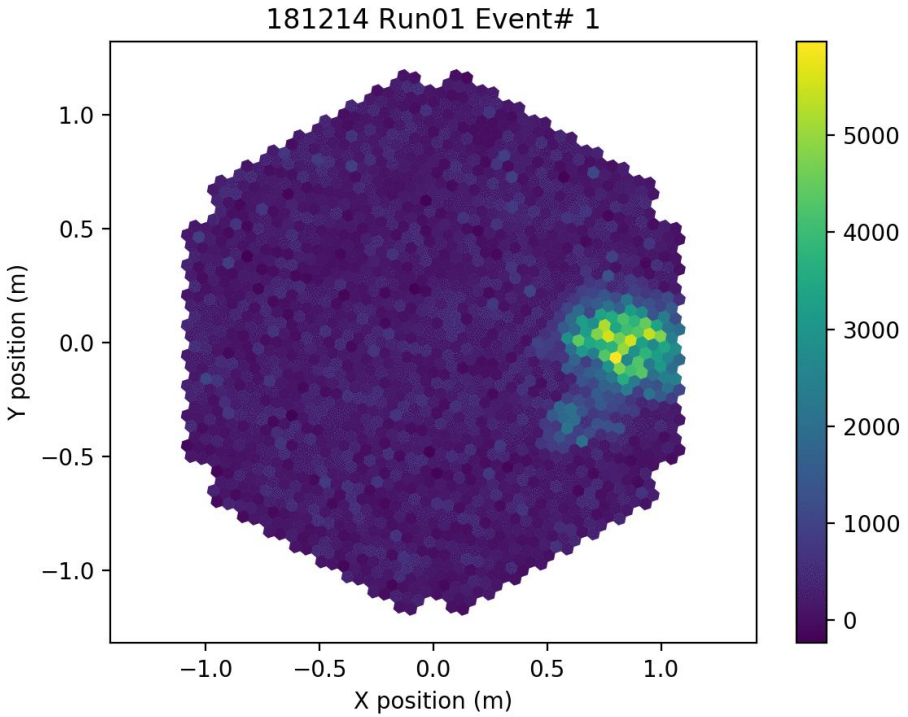
実験データ

解像型大気チェレンコフ望遠鏡（IACTs）

LST camera（焦点面カメラ）



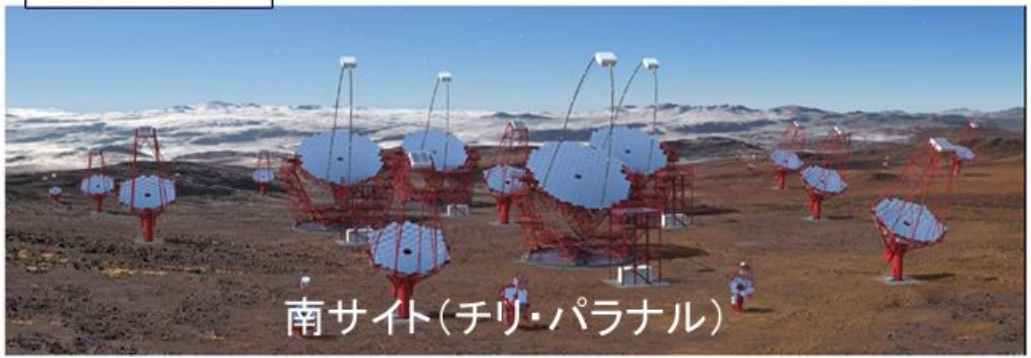
実際に観測したチェレンコフ光



大気チェレンコフ望遠鏡
Cherenkov **T**elescope **A**rray (CTA)

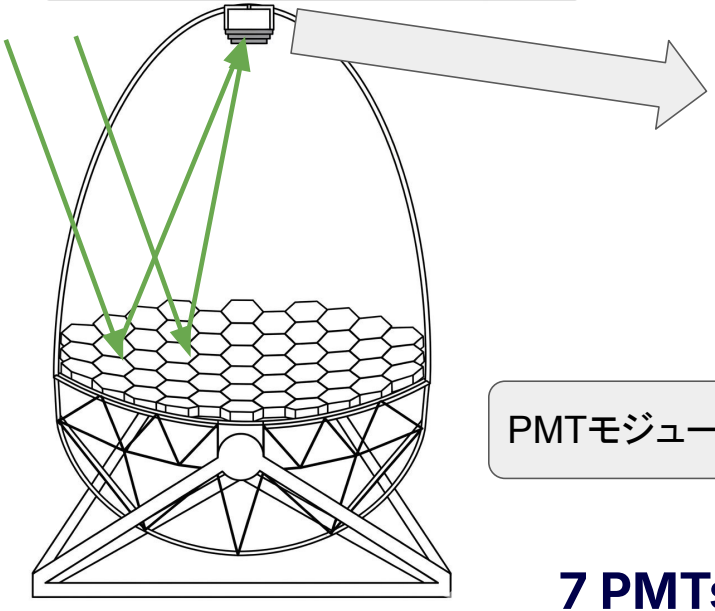


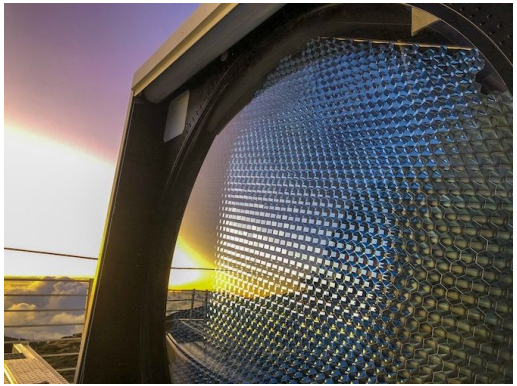
完成予想図



解像型大気チェレンコフ望遠鏡（IACTs）

LST camera（焦点面カメラ）





265PMTモジュール

PMTモジュール



7 PMTs

実際、実験で使用した！

ミューオン（μ）とは？ー今回の実験の主役！

地上に届きやすい➡観測しやすい

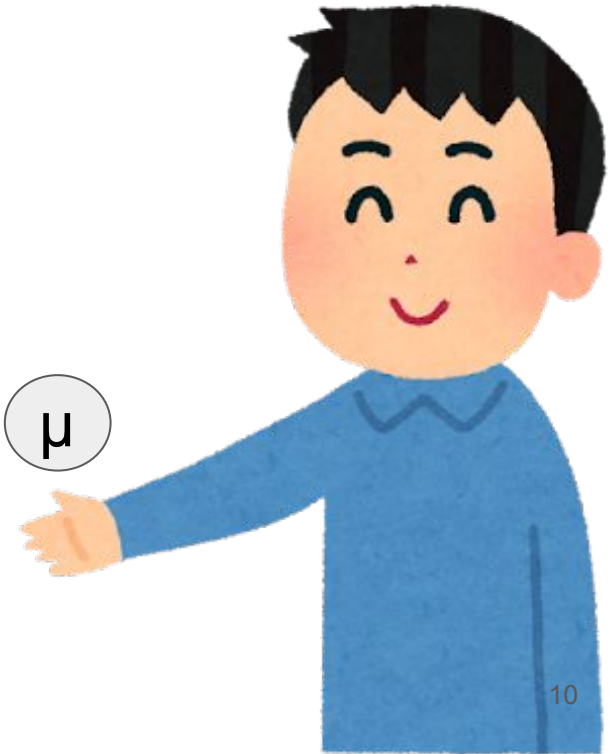
①到来頻度が高い：手のひらサイズに1個/秒で到来

②ミューオンの静止質量：約106 (MeV)

③寿命：2.2×10^{-6} s

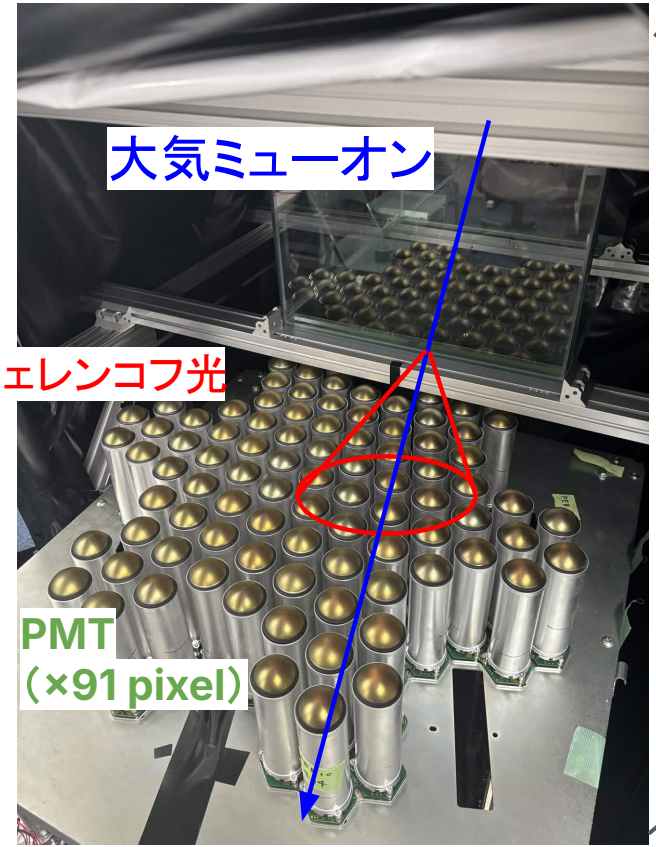
→相対論効果による粒子寿命の **γ倍延長**

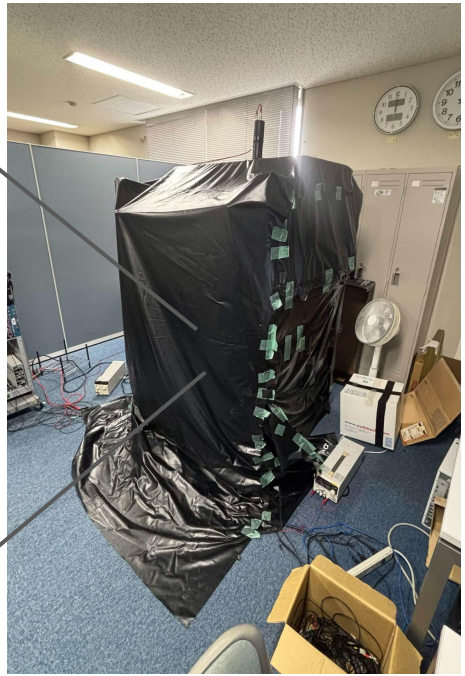
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}},\ \beta = \frac{v}{c} \quad E = m_0\,\gamma\,c^2$$



実験概要・方法

目的：CTAで使用されるPMTを使用し、大気ミューオンが水を通過する際に放射されるチェレンコフ光を検出





暗箱で外部からの光を遮断

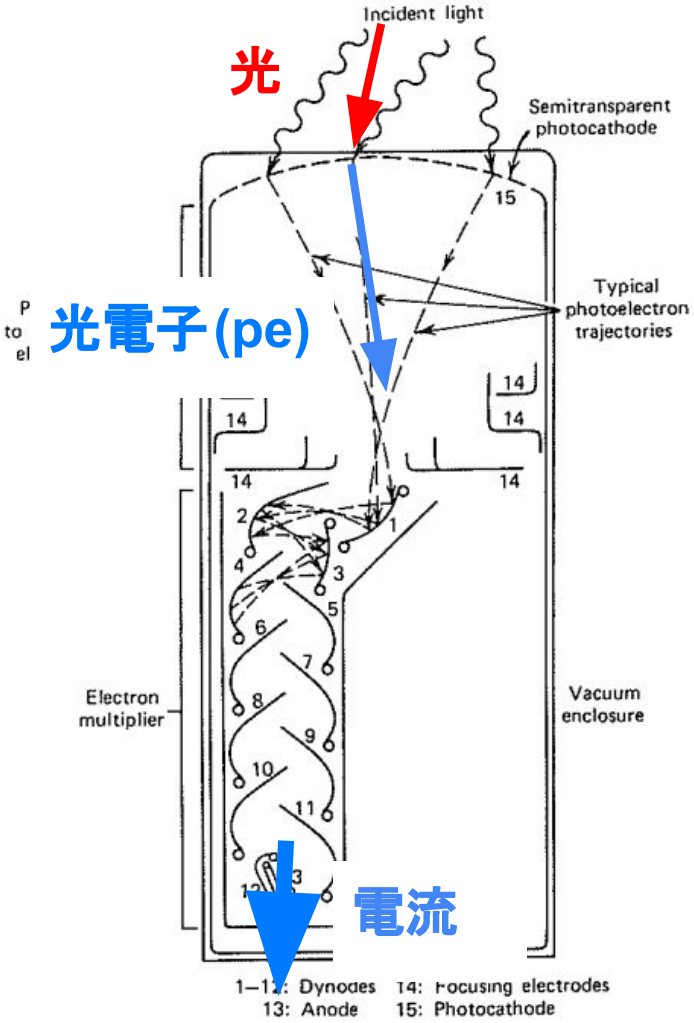
PMT(Photomultiplier tube)

光電効果を使った光検出器。

大きく2つのパーツがある：

①光電面・・・光子→光電子に変換

②電子増倍部・・・光電面から出た光電子を加速・倍増

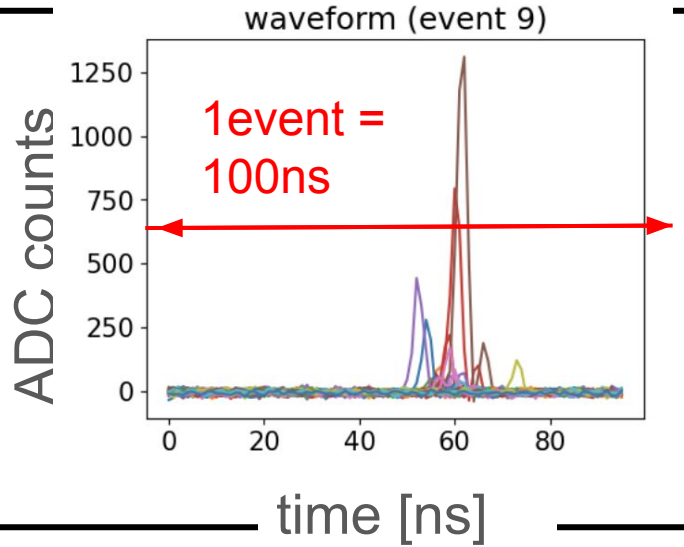


PMTから送られる電気信号のその後



DRS4はPMTから来た電圧情報を**〜GHz**でサンプリングする。

トリガー（合図）が来たら
1event分の信号を送る（今回は100ns）



キャリブレーション（PMTゲイン調整）

元の光電子数を知るためには、**1光電子あたりの ADC count**がほしい

（ADC count / p.e.）

しかし、ADC count / p.e. は個々のPMTでばらつきがある。

キャリブレーションの目的

PMTにかける高電圧(HV:HighVoltage)を個別に調整することで

ADC count / p.e.をそろえる

（∝ゲイン）

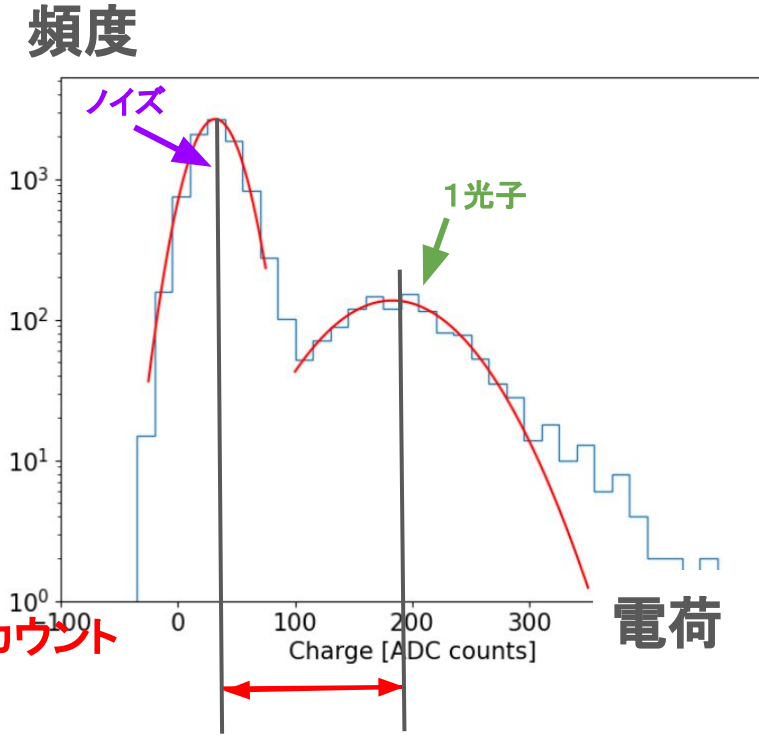
キャリブレーション（PMTゲイン調整）

個々のADC count/ p.e.のばらつきを測る（1光電子測定）

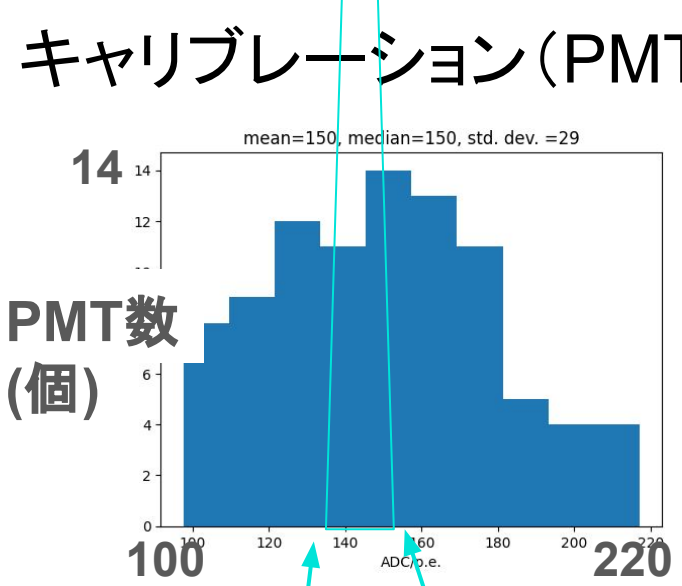
まず全PMTに同じHVをかける。その状態でたまに1光子が入射するほどの微弱な光を当てる。

するとPMTそれぞれの電荷分布にノイズの山と1光子の山が現れる。山の頂点の差分がその PMTの1光子あたりのADCカウント。

その量をもとにHVを較正。



キャリブレーション（PMTゲイン調整）



較正前

較正後

以後の実験は較正後のHVを用いる。

今後、すべてのPMTに対して

150 ADC count / p.e.

として扱う。

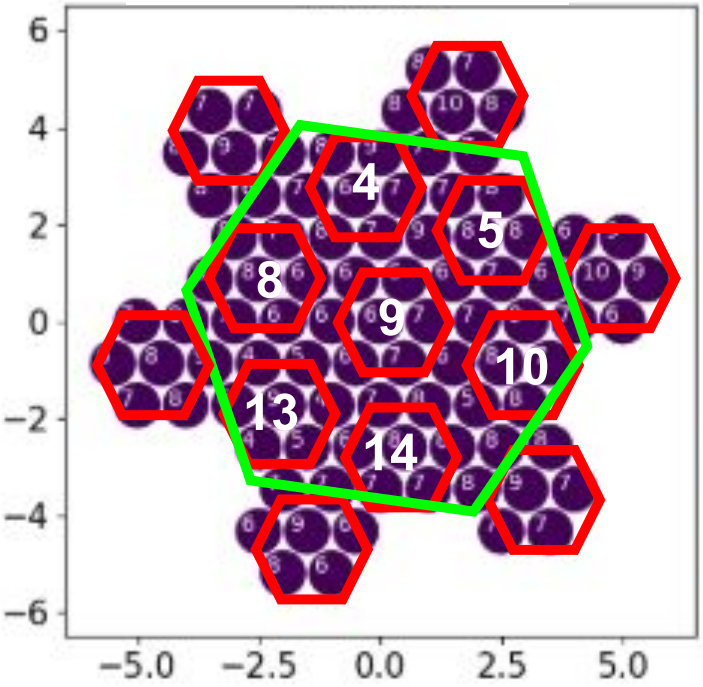
ローカルトリガー

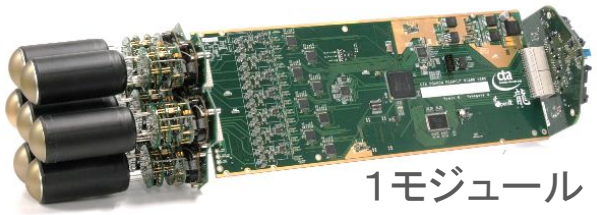
隣り合う2つのPMTが閾値（3p.e.）以上の信号を同時に出した場合のみデータを取得

・中央の7つのモジュールでローカルトリガーを設定できる(右図における緑で囲った箇所)

(1モジュールあたり7ピクセルのPMT)

本実験のPMT 配置図





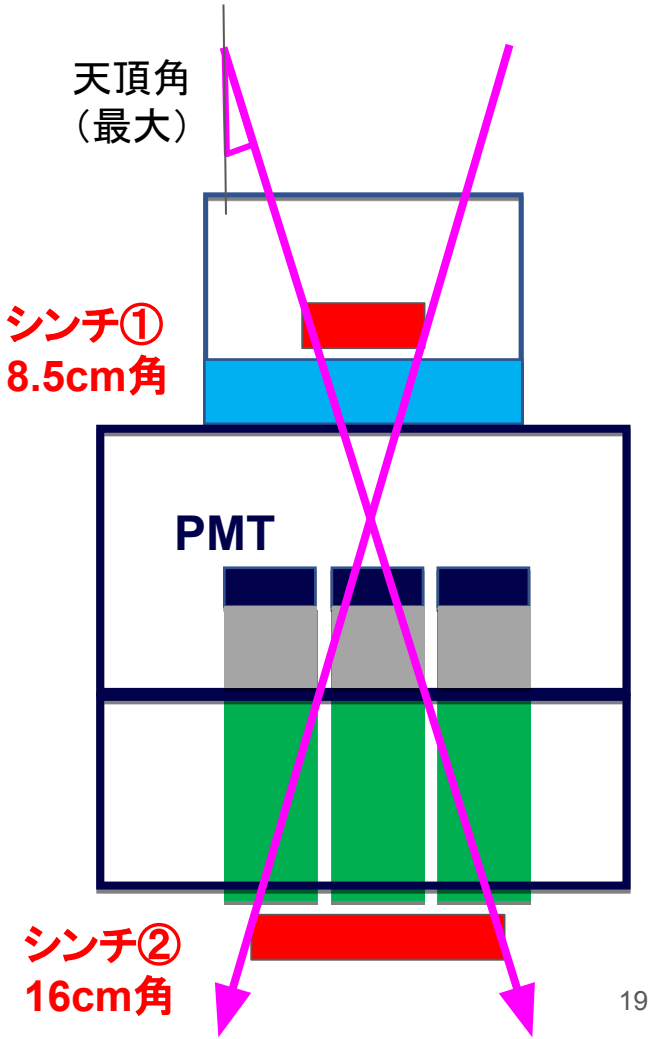
1モジュール

外部トリガー（シンチレーター）

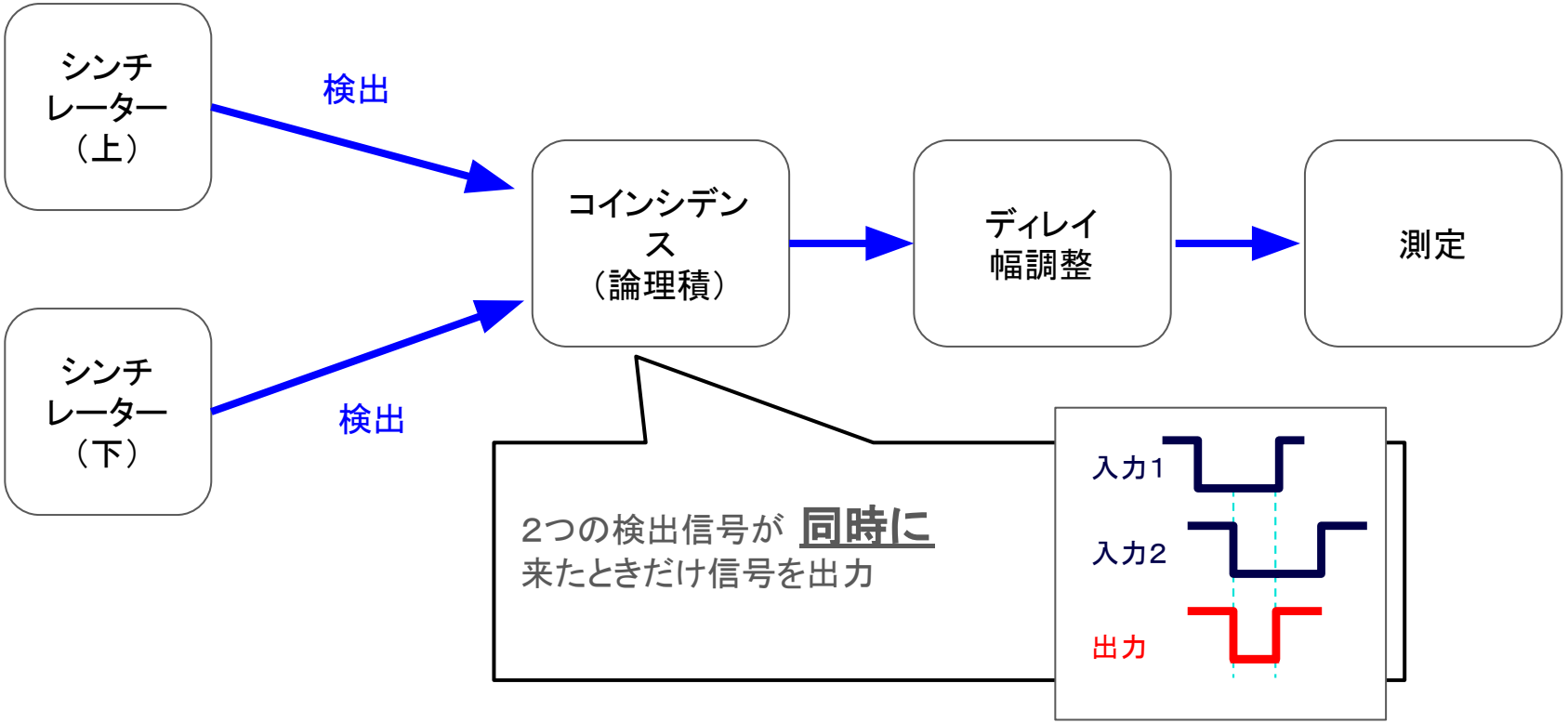
上下2つのシンチレーターが**同時に**信号を検出したときにのみPMTのデータを取得する

||

粒子の飛来する天頂角が制限できる！



外部トリガー（シンチレーター）



実験内容

1. 到来頻度（外部トリガーをかけて実験）
2. 到来角度分布（ローカルトリガーをかけて実験）
3. 大気ミューオンのエネルギー分布
   （外部トリガーをかけて実験）

結果・考察

実験内容

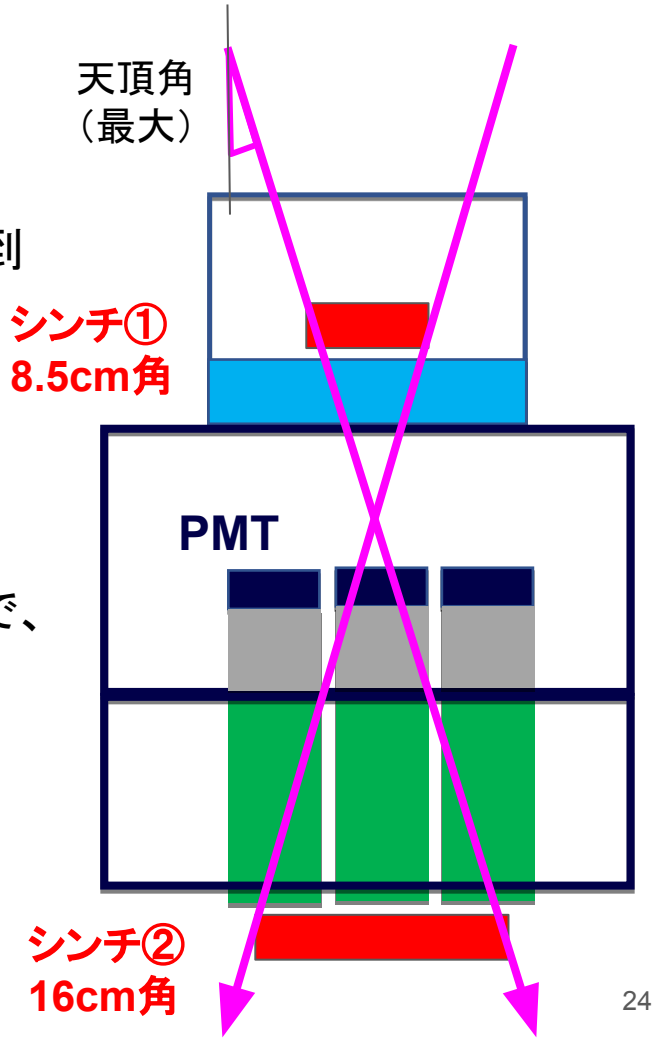
1. 到来頻度（外部トリガーをかけて実験）
2. 到来角度分布（ローカルトリガーをかけて実験）
3. 大気ミューオンのエネルギー分布
   （外部トリガーをかけて実験）

①到来頻度

上下2つのシンチレータを同時に通過する、ミューオンの到来頻度を測定

目的

ミューオンの到来頻度の理論値と実測値を比較することで、ミューオン以外の粒子を計測していないか確認する

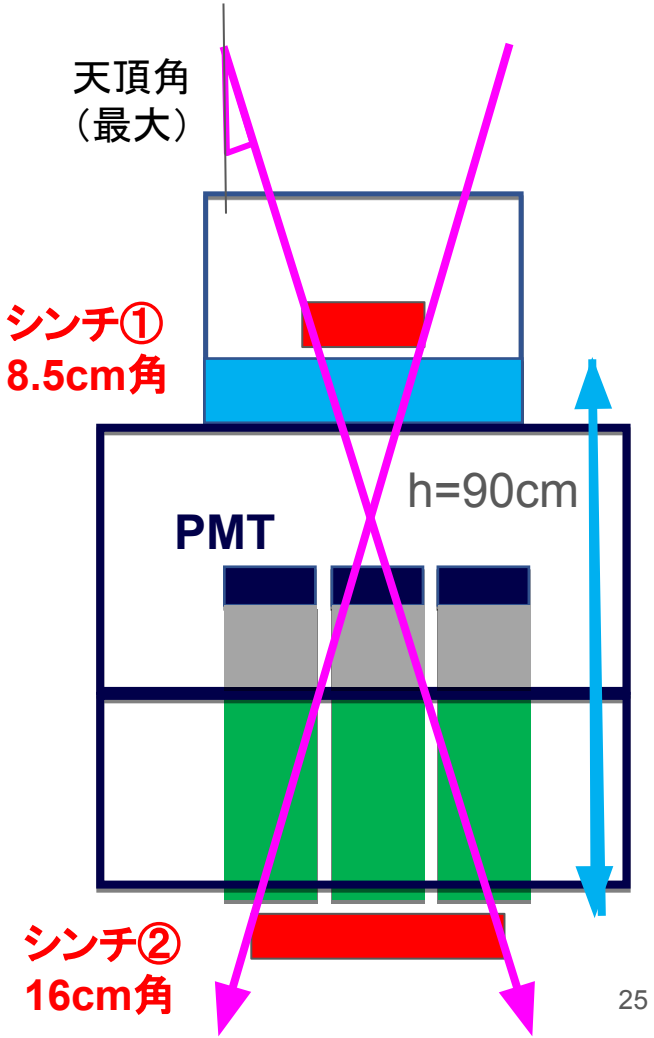


①到来頻度

理論値[個/分]	実測値[個/分]
0.646	0.712±0.029

- 理論値:10cm四方で1個/秒と大まかに仮定
- 約10%の誤差で一致

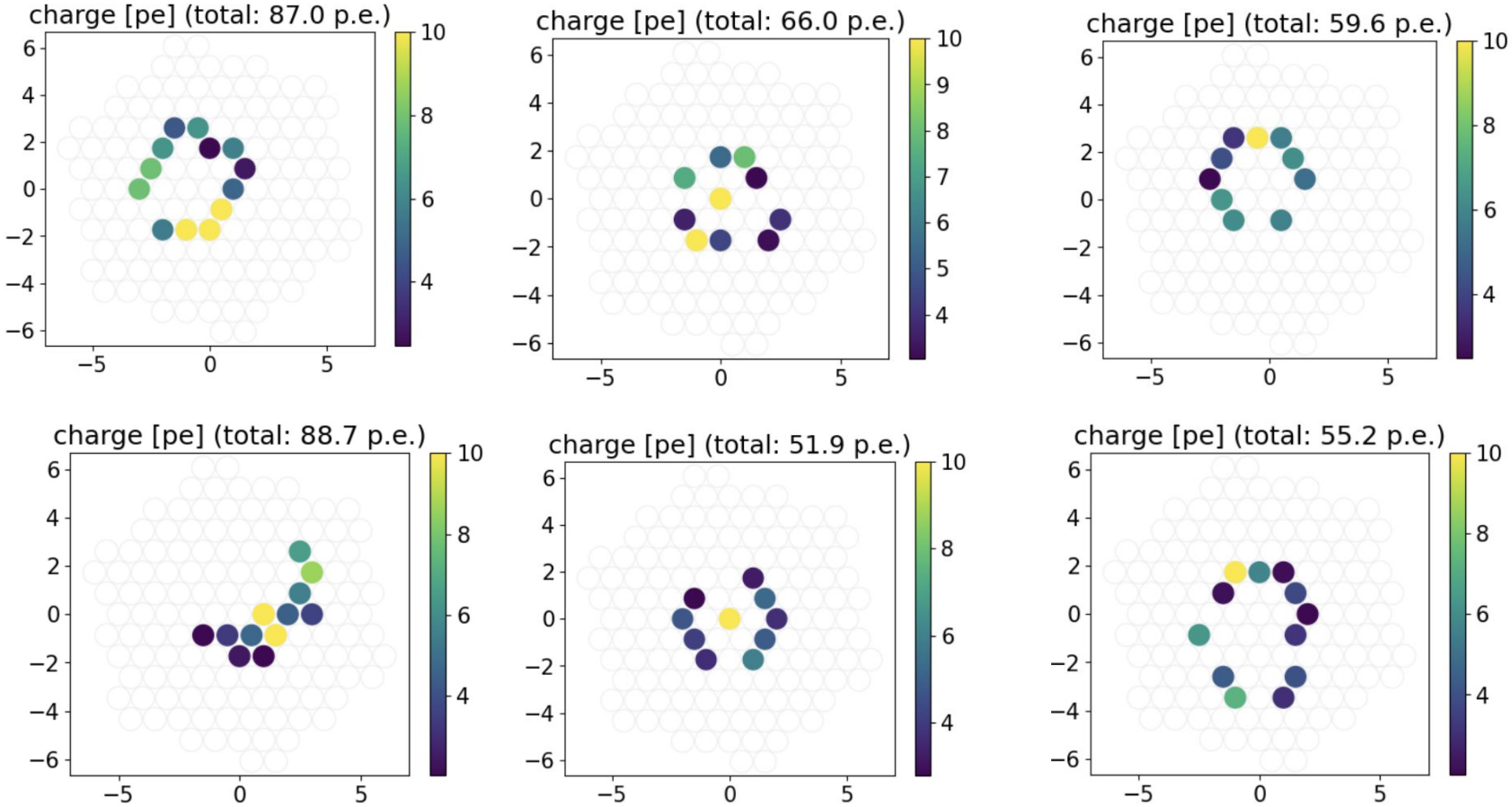
ミューオンの計測ができているのでは？



実験内容

1. 到来頻度（外部トリガーをかけて実験）
2. 到来角度分布（ローカルトリガーをかけて実験）
3. 大気ミューオンのエネルギー分布
   （外部トリガーをかけて実験）

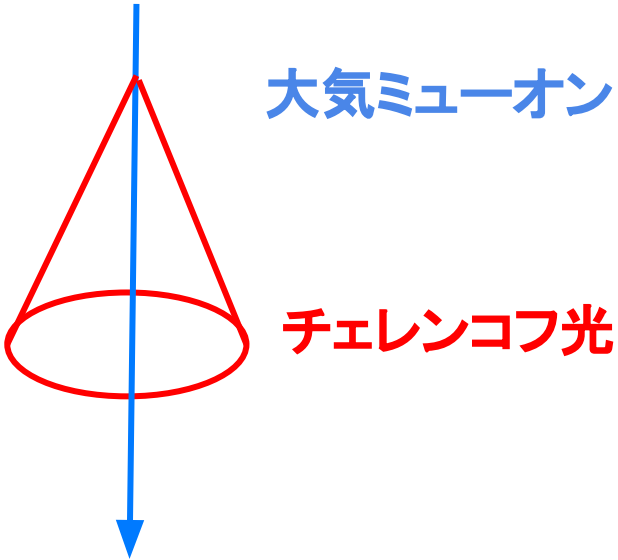
様々な形状のチェレンコフリングが見つかりました！

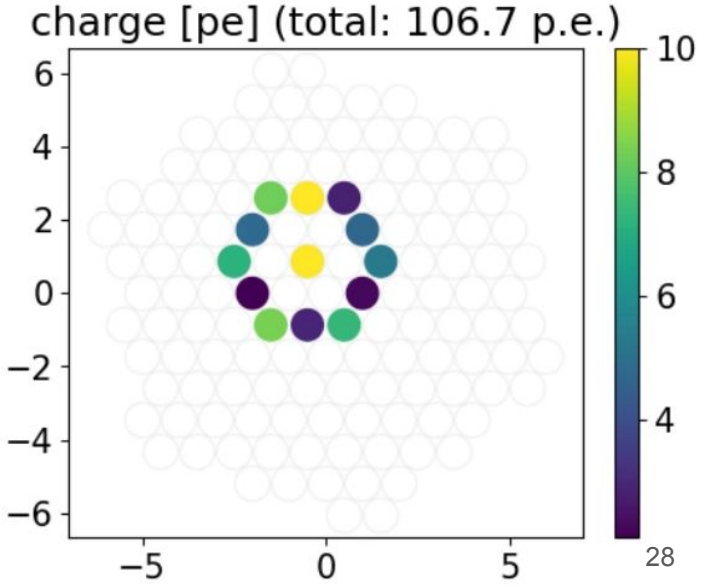


チェレンコフリングの形状

①円の場合

ミューオンが**真上**から入射すると、飛跡に対してチェレンコフ光が一定角度で広がるので、検出器平面に対して**垂直**に交わる
→**ほぼ真円**





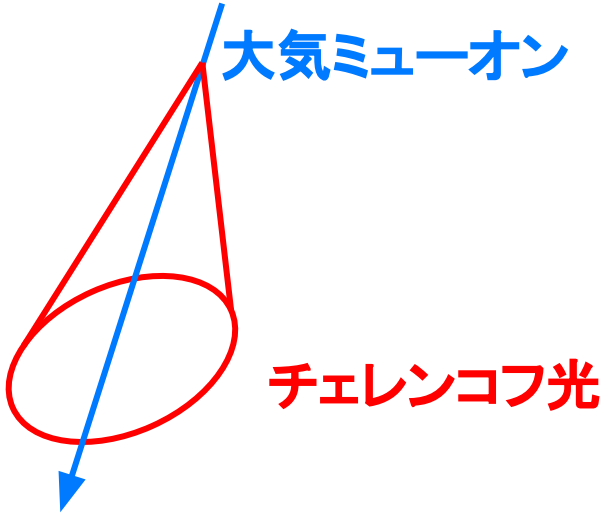
チェレンコフリングの形状

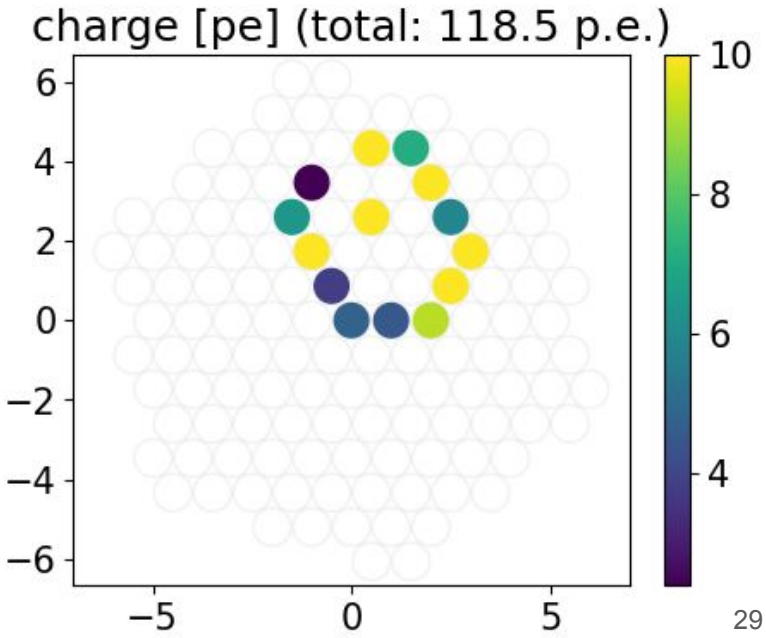
②楕円状の場合

光の円錐全体が検出器平面に対して**傾く**ため

円錐が斜めに切断された状態となる

→進行方向に引き伸ばされた**楕円**





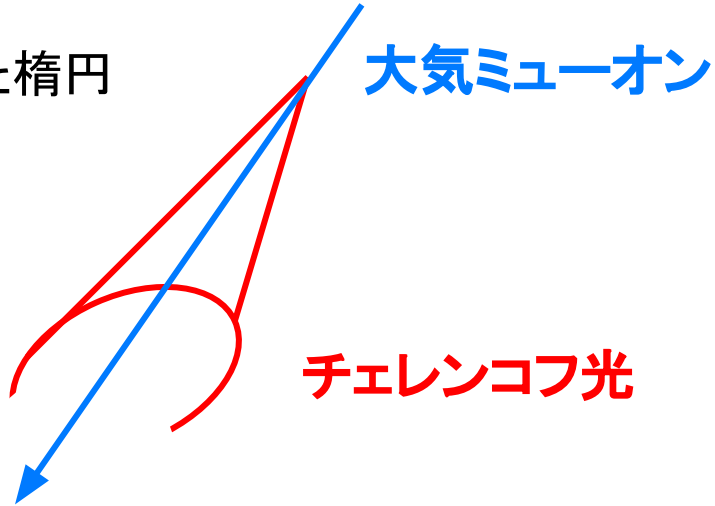
チェレンコフリングの形状

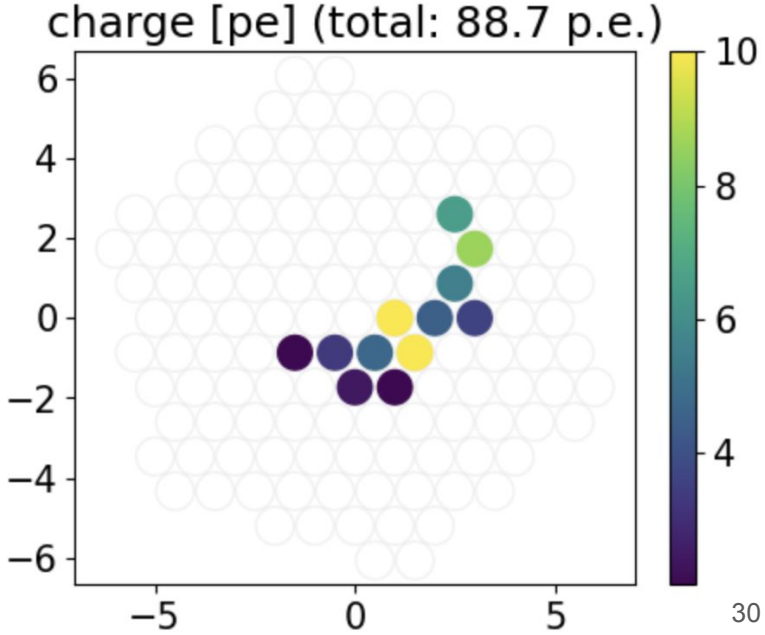
③途切れた楕円の場合

光の円錐の傾きが大きくなりすぎると、ガラスから空気へ出ようとする際に**臨界角**を超える

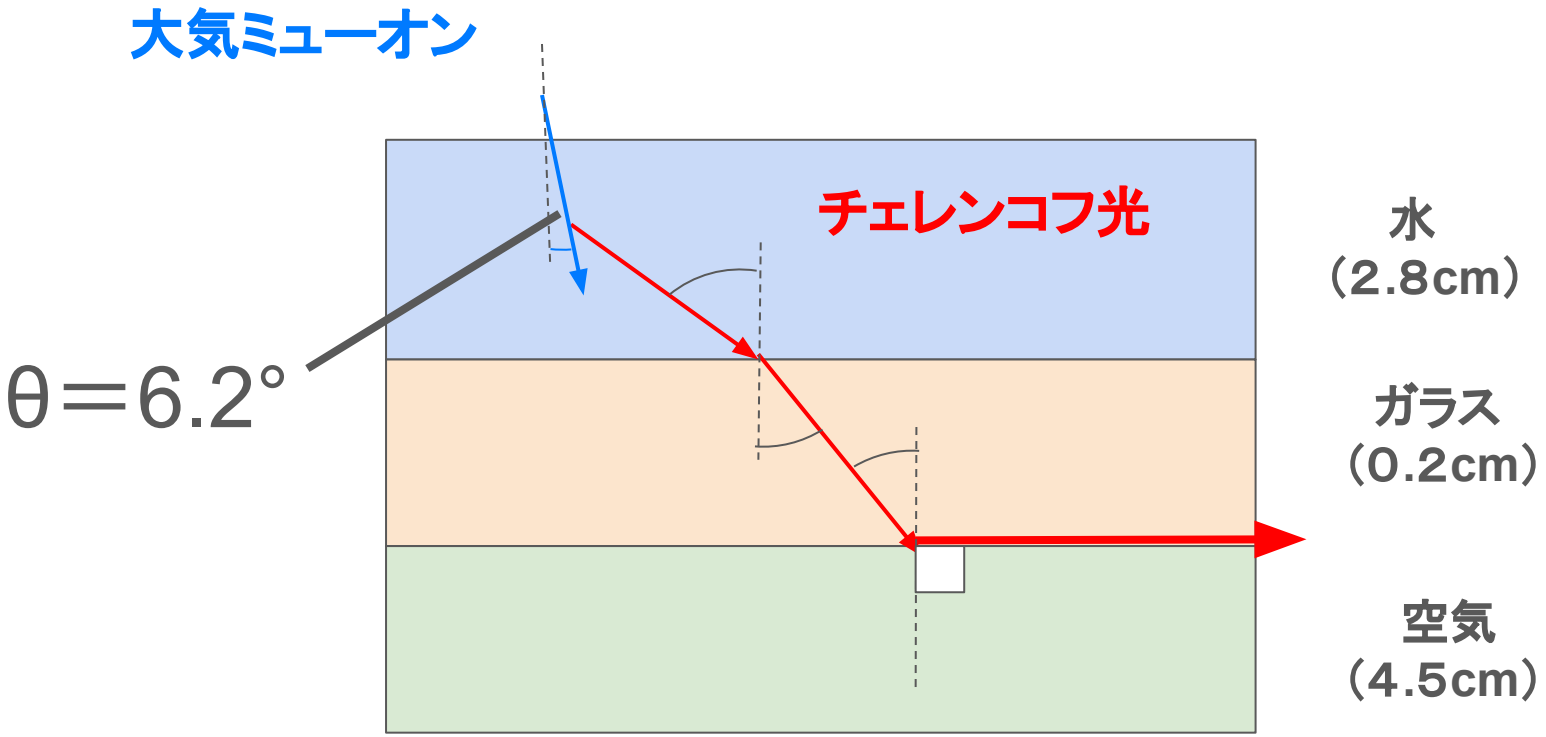
→**全反射**する部分だけ検出器に届かない

→欠けた楕円



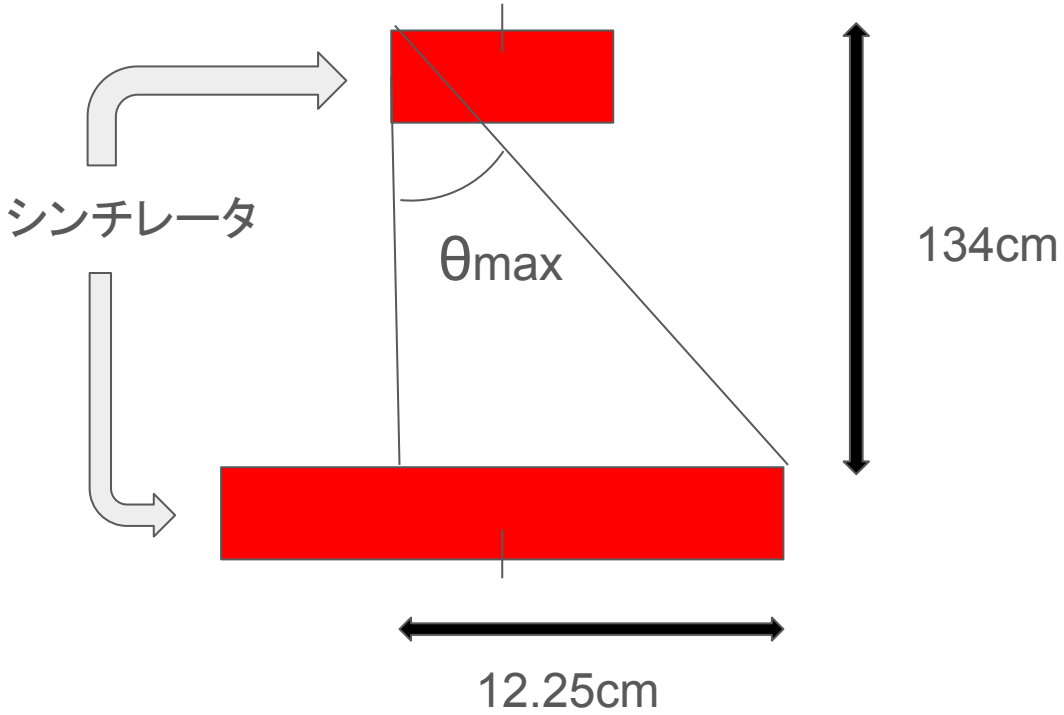


臨界角θの導出



（$n_{水}$＝1.33，$n_{ガラス}$＝1.5，$n_{空気}$＝1.0003）

シンチレータを　上下にセッティングすると、、、



θmax＝5.22...°

全反射起こらない！

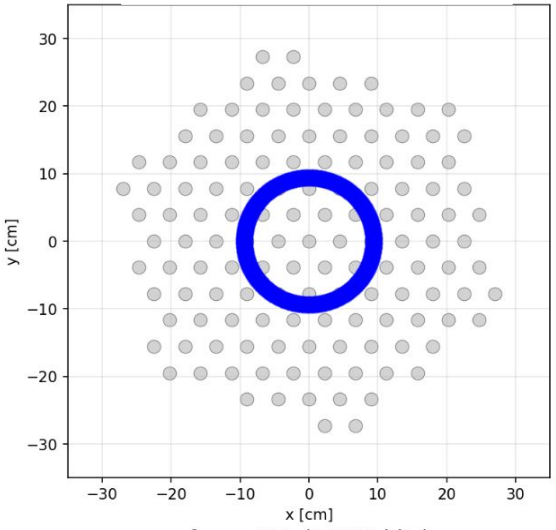
実際、イメージが円形となる確率は

到来角を制限しない測定
：898/9999（9.0%）
到来角を制限した測定：62/292
（21.2%）

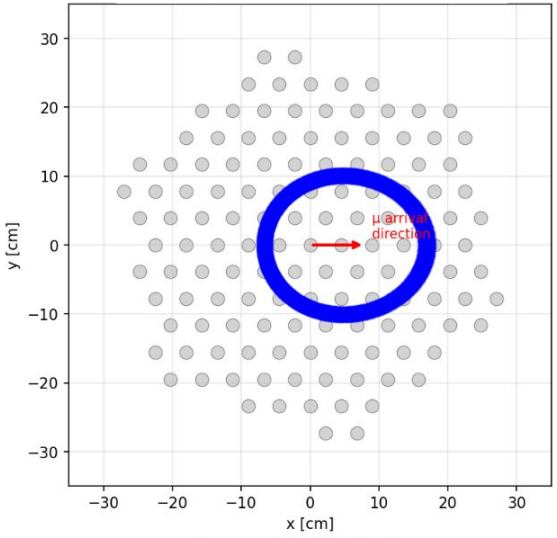
チェレンコフリングのシミュレーション

条件①ミューオンが水面の**中心**に入射
条件②水深：2.5cm，ガラスの厚さ：0.2cm，ガラス下面からPMT：4.5cm
条件③β＝**0.999**

θz＝0°

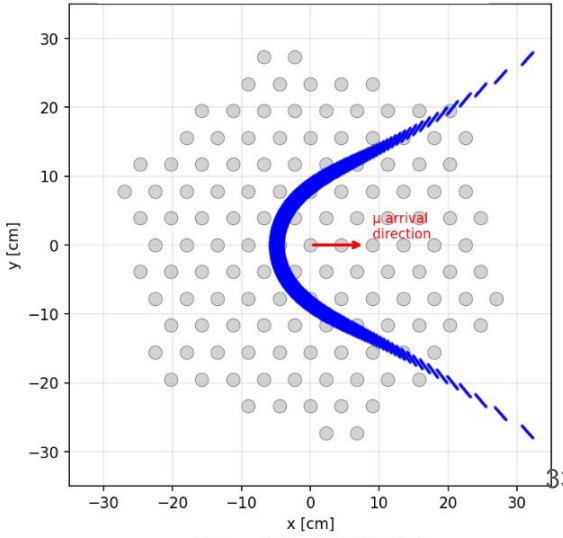


θz＝5°



6.2°

θz＝10°

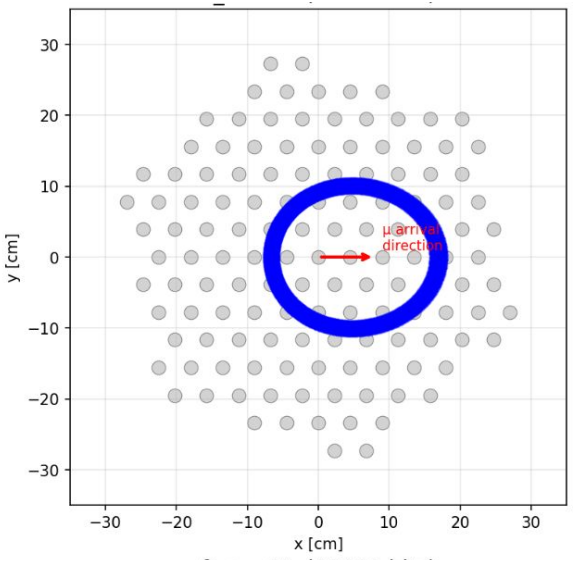


平面型検出器の角度分解能

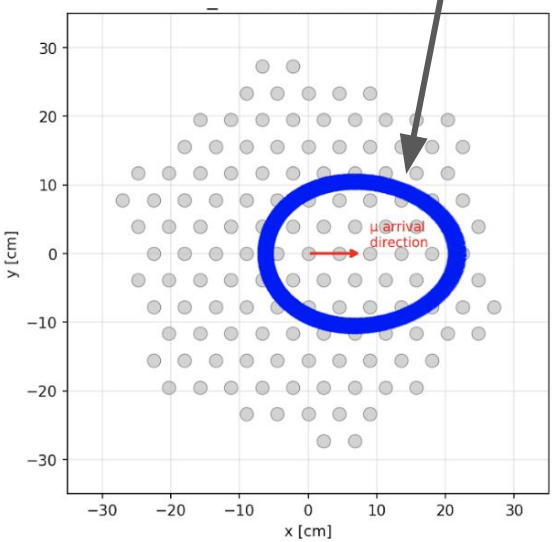
フィッティングするだけではほとんど違いがわからない、、、

6.2°

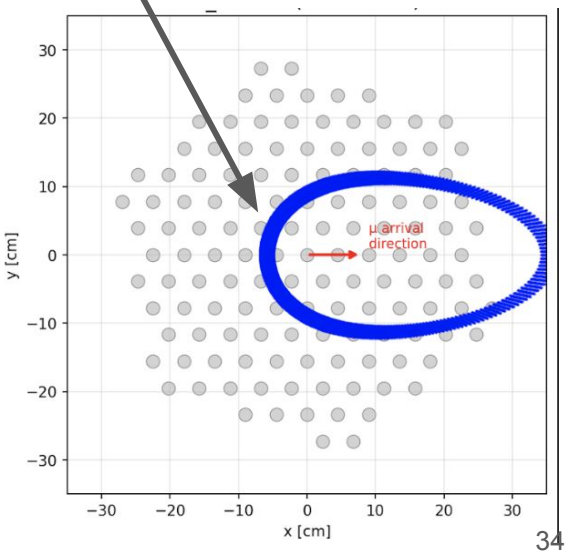
θz＝5°

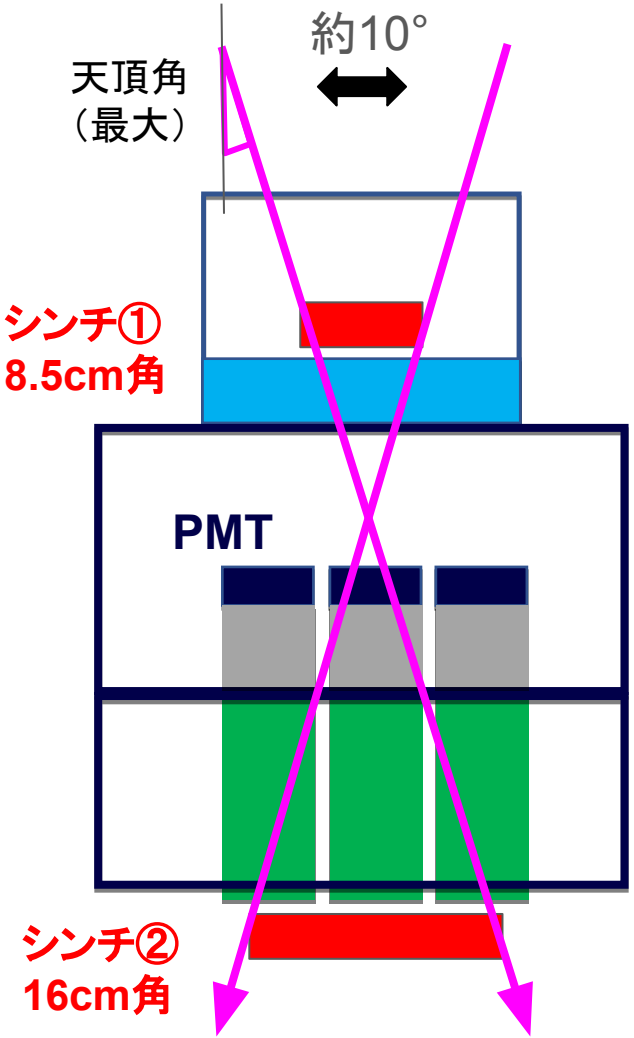


θz＝6°



θz＝7°





シンチレータで上下から挟んだセットアップ

・細かい到来角度❌

・PMTのunit数を増やしたとしても臨界角の影響で狭い範囲のミューオンしか完全には観察できない

➡ 到来方向の推定は**IACTs**を用いたアプローチが現実的

実験内容

1. 到来頻度（外部トリガーをかけて実験）
2. 到来角度分布（ローカルトリガーをかけて実験）
3. 大気ミューオンのエネルギー分布（外部トリガーをかけて実験）

エネルギー推定

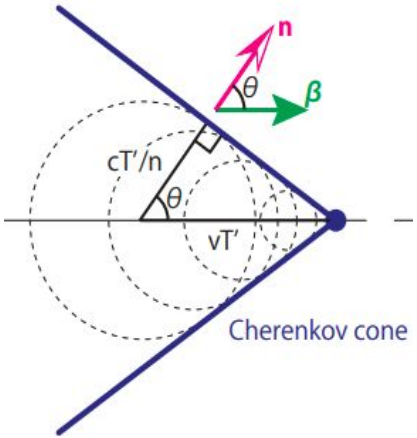
直径による推定 原理

チェレンコフ角θがβで決まる

βごとのθを求めておく

到来方向を制限して半径を算出しβを逆算

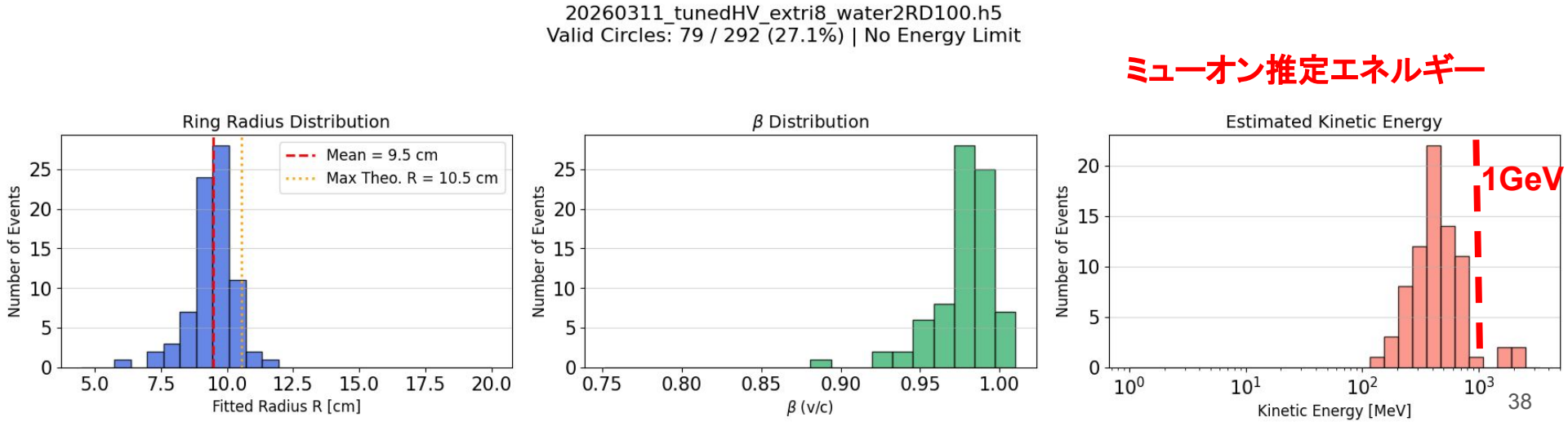
setup:臨界角による光カットを防ぐため鉛直方向のみに限定



$$\cos\theta = \frac{ct/n}{\beta ct} = \frac{1}{n\beta}$$

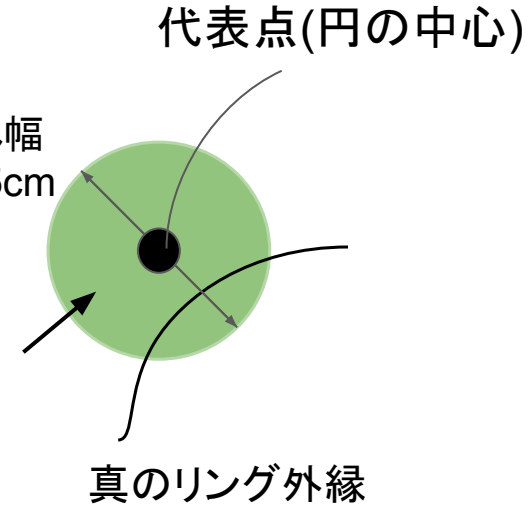
直径による推定 結果

failed…→半径の算出誤差がβの変化でとりうる半径の変動幅より大きいため
縦軸：検出イベント数
横軸：左；リング外径(cm) 中央；β 右；エネルギー(MeV)



直径による推定 結果

リング外径がピクセルピッチでなまされる図→



ピクセルピッチ=4.5cm
βmin=0.9→Rmin=6.4cm
βmax=1.0→Rmax=10cm

Rmax-Rmin=3.7cm<4.5cm！！
ピッチをより小さくするorリングを大きくしないと推定は困難

エネルギー推定

光電子数による推定 原理

チェレンコフ光の光量からミューオンのエネルギー⇔βを求めたい

βと光電子数の関係を計算しておく

Frank–Tammの公式

$$\frac{dW}{d\omega dz} = \frac{q^2\omega}{c^2}\left(1 - \frac{1}{n_r^2\beta^2}\right)$$

粒子が媒質中を進むときの長さx、周波数ω当たりの放射エネルギー

エネルギー推定

光電子数による推定　誤差要因

天頂角変化　(~5°)

QEの波長依存性 QE=量子効率：光子が光電面で電子に変換される効率～0.4

1光電子あたりのADCカウントの個体差

水、ガラスによる吸収、反射減衰

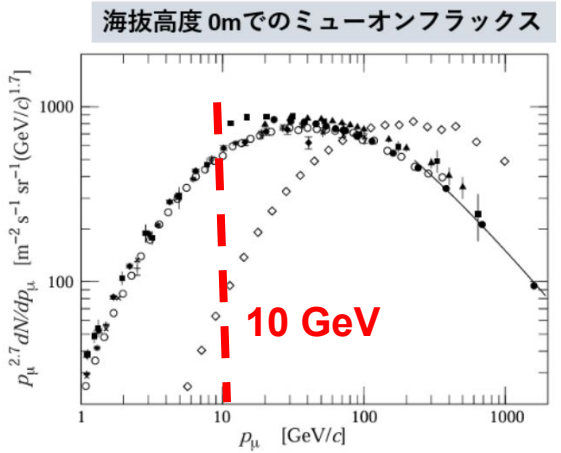
光電面形状によるQE変化 (平面で仮定→実際はドーム型)

屈折率n(ω)の波長依存性

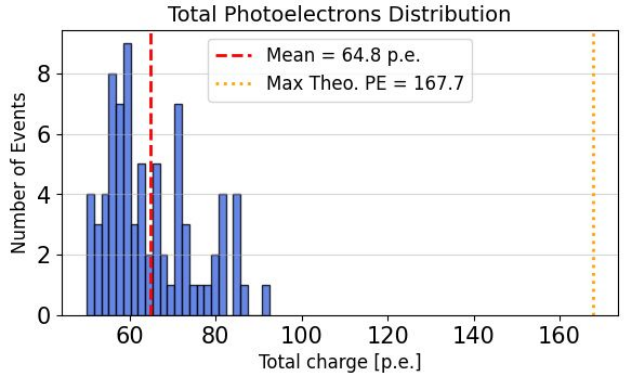
…

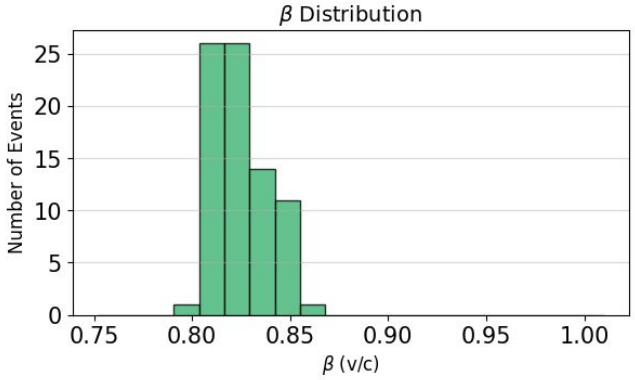
光電子数による推定　結果

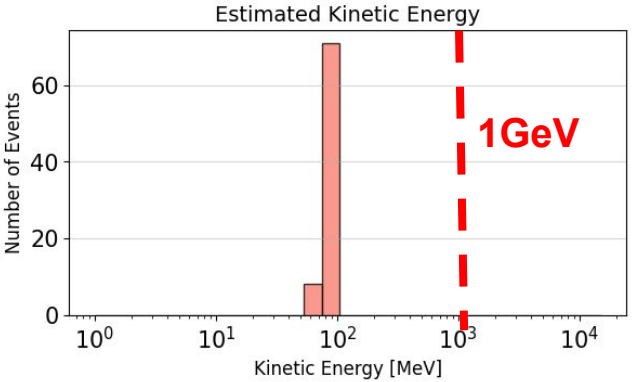
100MeVにピーク
→大気ミューオンのエネルギーピークより2桁小さい
→きてほしい光電子数の1/3程しかカウントしていない
縦軸：検出イベント数
横軸：左；リング外径(cm) 中央；β 右；エネルギー(MeV)



20260311_tunedHV_extri8_water2RD100.h5
Valid Circles: 79 / 292 (27.1%) | Upper Limit E: 10.0 GeV







ミューオンの推定エネルギー

光電子数による推定 考察

いろいろな因子を考えてみたがバイアスの原因究明には至らず

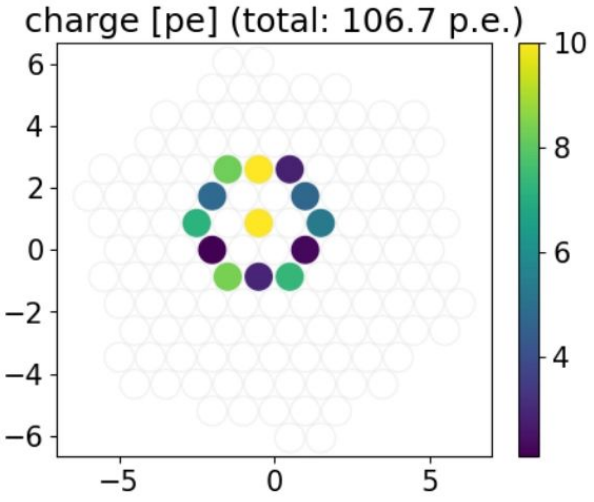
精度に影響する因子を考えてみても1桁ほどの誤差はでなさそう→ヒストグラムでは
β=0.05程度の誤差

算出までに考慮する物理過程が多い→それぞれのバイアスが重なってる？

※水とガラスによる減衰を実験で調べたが誤差以上の有意差見られず

まとめ

実験室測定でミューオンを検出！！



①到来頻度

- 実測値と理論値が約10%の誤差で一致
  →**ミューオンの計測が妥当に行えている**

②到来角度推定

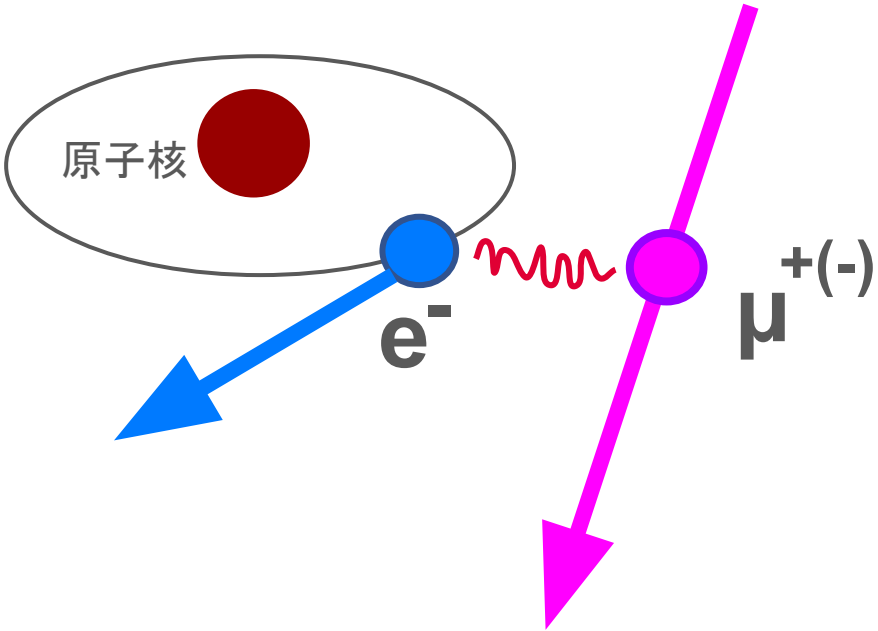
- 今回のセットアップでは、臨界角の影響により、**狭い入射角のミューオンしか完全なリングとして観察できない**
- 詳細な到来方向の推定には、IACTsを用いたアプローチが現実的

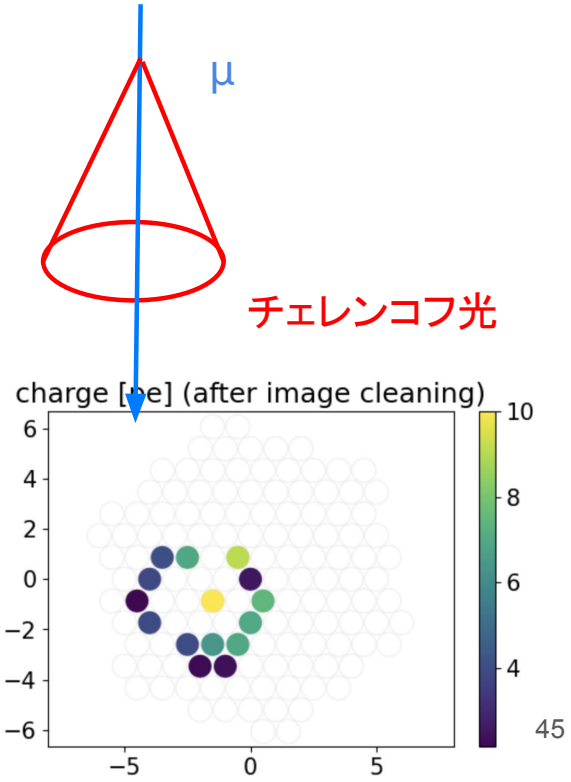
③大気ミューオンのエネルギー分布

- リング半径からの推定はPMTのピクセルの大きさ的に困難
- ADCカウントからの推定は100MeVにピークができ、大気ミューオン本来のエネルギーピークより2桁小さい→因子特定失敗

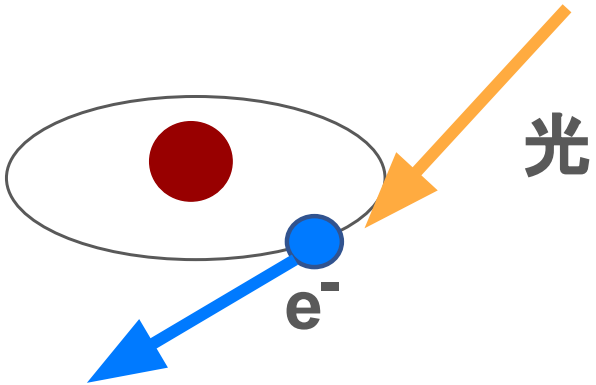
リングの中心の点の正体

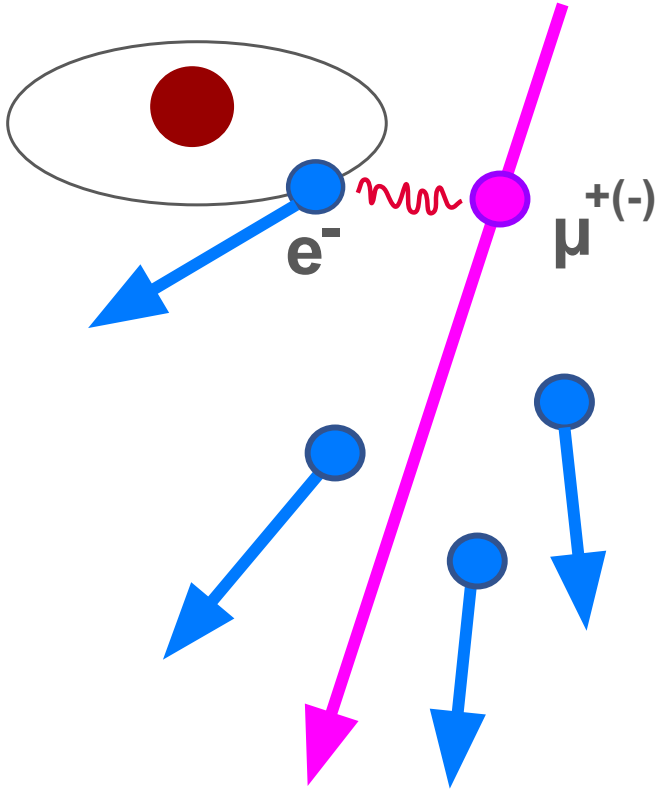
ミューオンとPMT表面(フォトカソード)中の
電子との**クーロン相互作用**





光電効果との違い・・・
1つの入射粒子によって放出される電子の数





光・・・1光子に対し(高々)1電子

ミューオン・・・1粒子に対し多数！