

宇宙線ミューオンの観測

賀登翔一郎 柴田舜 島本翔平 ソクジュンモ 竹下颯馬 馬場琉乃介

アウトライン

0. 概要

1. 準備(理論)

2. 実験装置

3. 実験

4. 結果・解析

5. 考察

アウトライン

0. 概要

1. 準備(理論)

2. 実験装置

3. 実験

4. 結果・解析

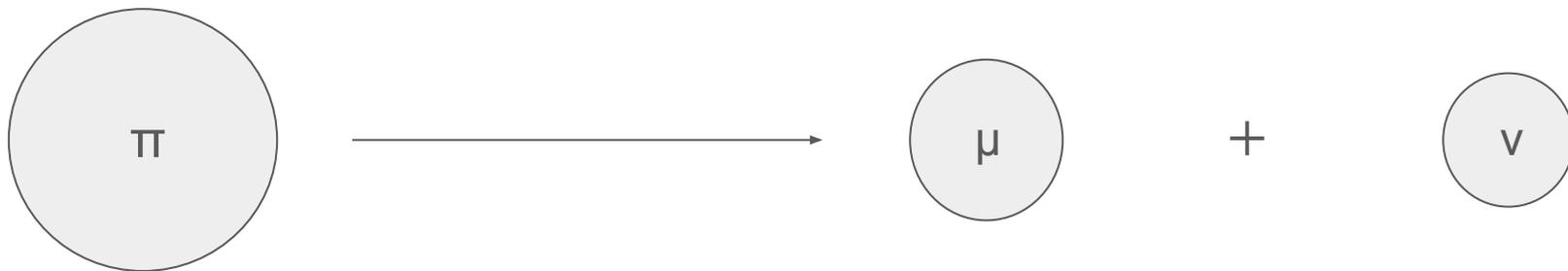
5. 考察

0. 概要

今回測定したのは

- ・宇宙線ミューオンの強度の角度依存性と東西効果

1.1 理論 ミューオンの線源



$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

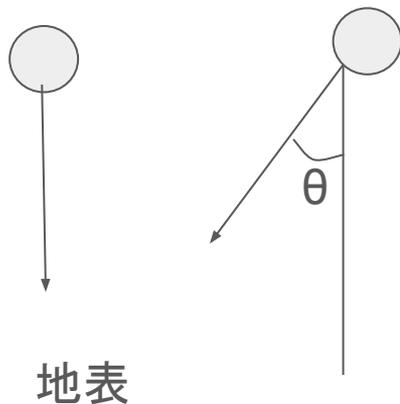
$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

- ・ミューオンは二次宇宙線
- ・大気中で吸収されづらい
- ・寿命は $2.2\mu\text{s}$ だが亜光速で飛ぶので固有時間で寿命が尽きる前に地表に到達する

1.2 理論 ミューオンの天頂角度分布 $J(H, \theta)$

平均自由行程を λ 、ミューオンの移動距離を X とすると
と仮定できる

$$J(X, \theta) = J(0, \theta) \exp\left\{-\frac{X}{\lambda}\right\}$$

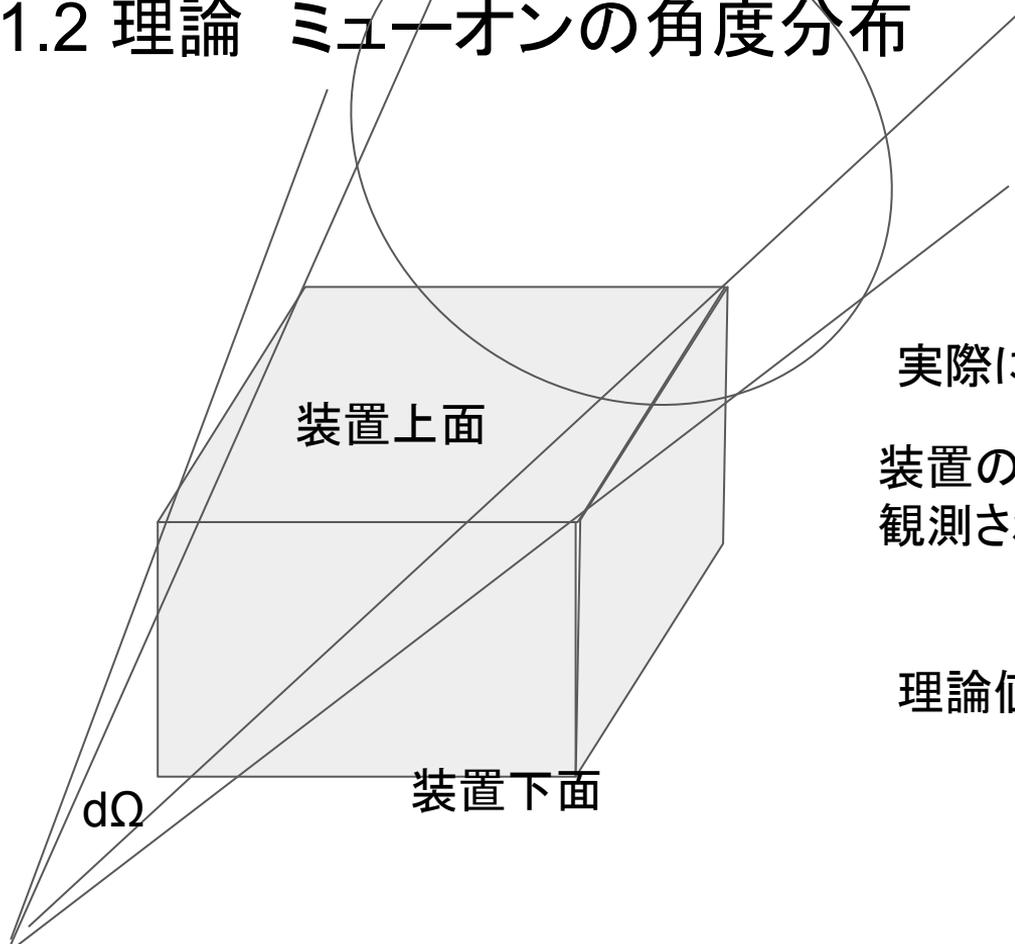


$$J(X, \theta) = J(X, 0) (\cos \theta)^{\frac{X}{\lambda}}$$

他の実験により

$X/\lambda = 2$ がよく知られている

1.2 理論 ミューオンの角度分布



実際には

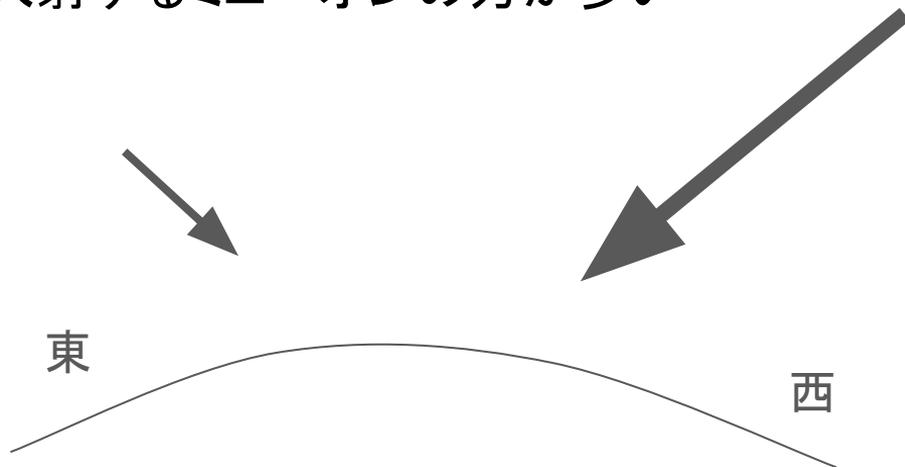
装置の形状に合わせた立体角との積が
観測される

理論値通りになるかは不確定

1.3 理論 東西効果

東西効果: 東西から入射するミュオンの強度分布が異なる現象

西から入射するミュオンの方が多い



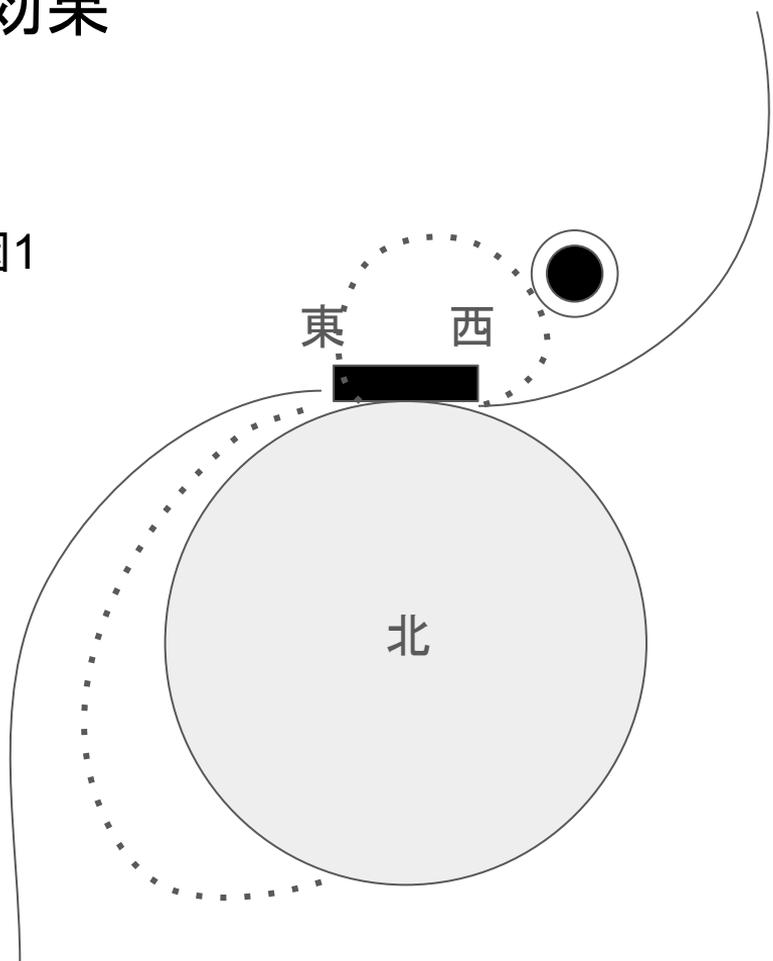
1.3 理論 東西効果

要因 地磁気の影響で説明できる

1. 到達までに必要な一次宇宙線のエネルギーの下限が東西で異なる
2. ミューオンの大気行路が東西で異なる

論 東西効果

要因1



ローレンツ力によって一次宇宙線が曲がる

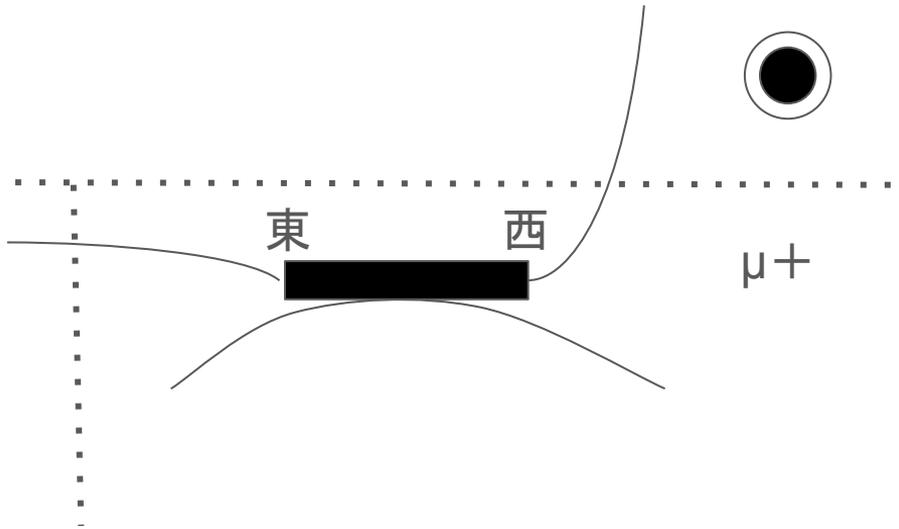


東から回り込んで入射する方がエネルギー損失が小さい

* 一次宇宙線が十分低エネルギーのとき

1.3 理論 東西効果

* 一次宇宙線が高エネルギーのとき



μ+の場合

西から入射したミュオン(+)の大気行
なる

μ-の場合

東から入射したミュオン(-)の大気行
る

一方、二次宇宙線ではμ+の存在比が20パーセント多い

西から入射するミュオンが多くなる

アウトライン

0. 概要

1. 準備(理論)

2. 実験装置

3. 実験

4. 結果・解析

5. 考察

2.1 実験装置 プラスチックシンチレータ

5 cm × 120 cm のプラスチックシンチレータ

×
8個



2.1 実験装置 プラスチックシンチレータ



5 cm × 120 cm のプラスチックシンチレータ × 8個 × 8層

2.1 実験装置 プラスチックシンチレータ



2.2 実験装置 波長変換ファイバー

シンチレータ光は直接MPPCに伝わるのではなく、波長変換ファイバーを通してMPPCへ送られる

←シンチレータが大型であり、直接光検出器に繋げた場合、検出器から遠い部分での発光は検出器に届く頃には減衰してしまっている

光ファイバー中では光が全反射するのでその減衰を抑えられる

2.3 実験装置 MPPC

MPPCとは

Multi Pixel Photon Counter の略

微小光測定に用いられる半導体光検出器

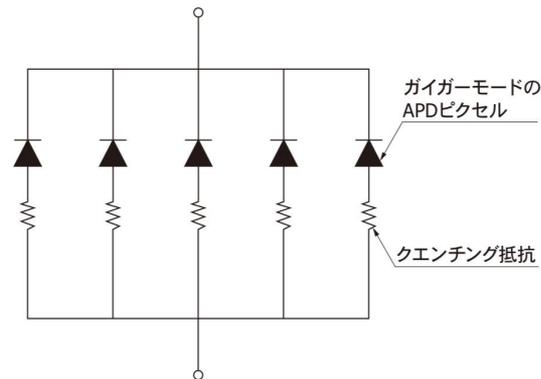
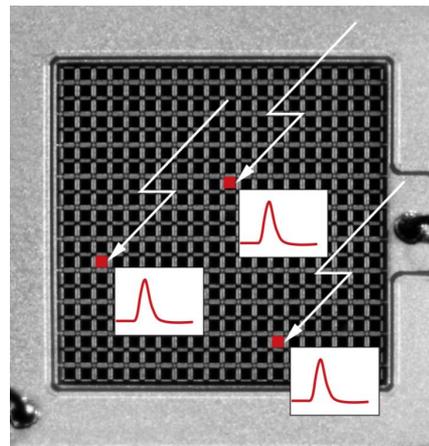
64 ch 読み出せる



MPPC動作原理

各ピクセルにはAPD(Avalanche PhotoDiode)が並列に繋がっており、64ch同時に読み出すことができる

光子が入射するとAPD内で光電子が弾き出され、半導体原子に衝突し電子、ホールを次々生成する電子雪崩によって信号が増幅

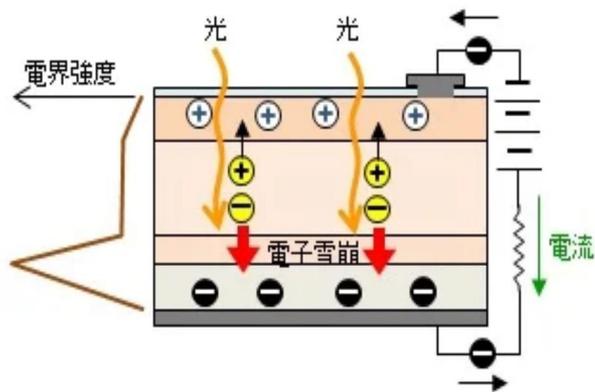


MPPC動作原理つづき

APDはガイガーモード(逆電圧が降伏電圧以上)にあるので入射する光子の量によらず一定の出力を発生させる

→高い光子検出能力

ガイガーモードのままでは電流が流れ続けてしまうので抵抗をAPDに直列に繋いでAPDにかかる電圧を下げ増幅を一時的にする



PMT(光電子増倍管)との比較

似た機能を持つものとしてPMT(光電子増倍管)があるが、

- ・波長変換ファイバーを通した後の光(緑)に対する感度の良さ
- ・64個検出するのにMPPCの方が安価

などの理由から本実験ではMPPCを使用した

PMTに比べダークノイズなどが大きいですが、動作確認に活用できる

2.4 実験装置 EASIROCモジュール

MPPCからの信号の読み出しに用いる

1チップあたり 32 ch 読み出せる

⇒ 1モジュールあたり2チップ搭載され

ており、合計64ch読み出す

- ・MPPCへの電圧供給
- ・信号増幅
- ・デジタル化

を64ch同時にできる



2.5 実験装置 全体

宇宙線ミュオンが装置に入射する

→プラスチックシンチレータがシンチレーション光を出す

→光ファイバーでシンチレーション光がMPPCの各チャンネルに誘導される

→宇宙線信号を判定するための条件を満たすとEASIROCモジュールでMPPCの64ch分のADCcountがコンピュータに送られる

→解析

アウトライン

0. 概要

1. 準備(理論)

2. 実験装置

3. 実験

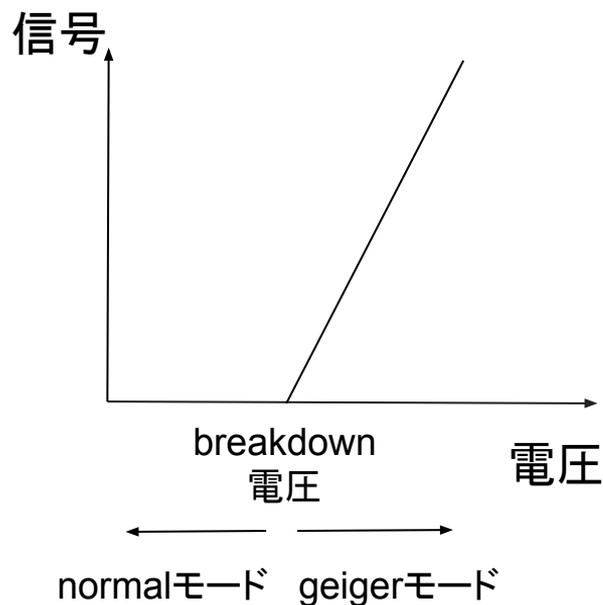
4. 結果・解析

5. 考察

3.1 実験 予備実験 ダークノイズの測定

MPPCの作動確認のために何も無い状態でダークノイズを測定

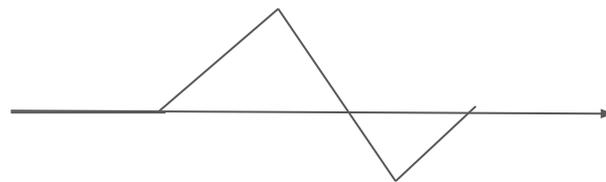
ダークノイズ: 光子がない状態で熱電子による信号



- breakdown電圧を超えたらGeigerモードに転換、ダークノイズが検出される
- breakdown電圧を超えたら波形は一定

3.1 実験 予備実験 ダークノイズの測定

- 光が入らないようにMPPCを遮光テープで巻く
- 電圧を増やしながらオシロスコープで観測
- 58Vから右のような波形が見られた



3.1 実験 予備実験 ノイズの排除

本実験を始める前にノイズを排除する

- 光によるノイズ
- ケーブルによるノイズ
- 物理的なノイズ

3.1 実験 予備実験 ノイズの排除

光によるノイズ

部屋の電気を消したりしながら光によるノイズがあるか判断→ノイズ○

mppcの周りをより確実に遮光→ノイズ減少



3.1 実験 予備実験 ノイズの排除

ケーブルによるノイズ

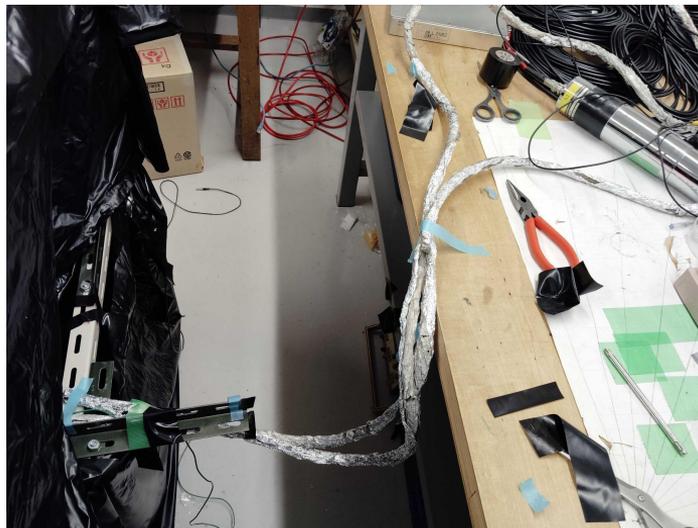
ダークノイズの測定：同軸ケーブル

本実験：単線ケーブル

	単線ケーブル	同軸ケーブル
構造	信号線が1本のみ	信号線 + 絶縁体 + 金属シールド + 外皮
シールド(遮蔽)	なし	あり(銅メッシュやアルミホイルなど)
ノイズ耐性	非常に低い	非常に高い

3.1 実験 予備実験 ノイズの排除

ケーブルによるノイズ



単線ケーブルをアルミホイルで巻いて遮蔽する



グラウンドをモジュールの方につなぐ

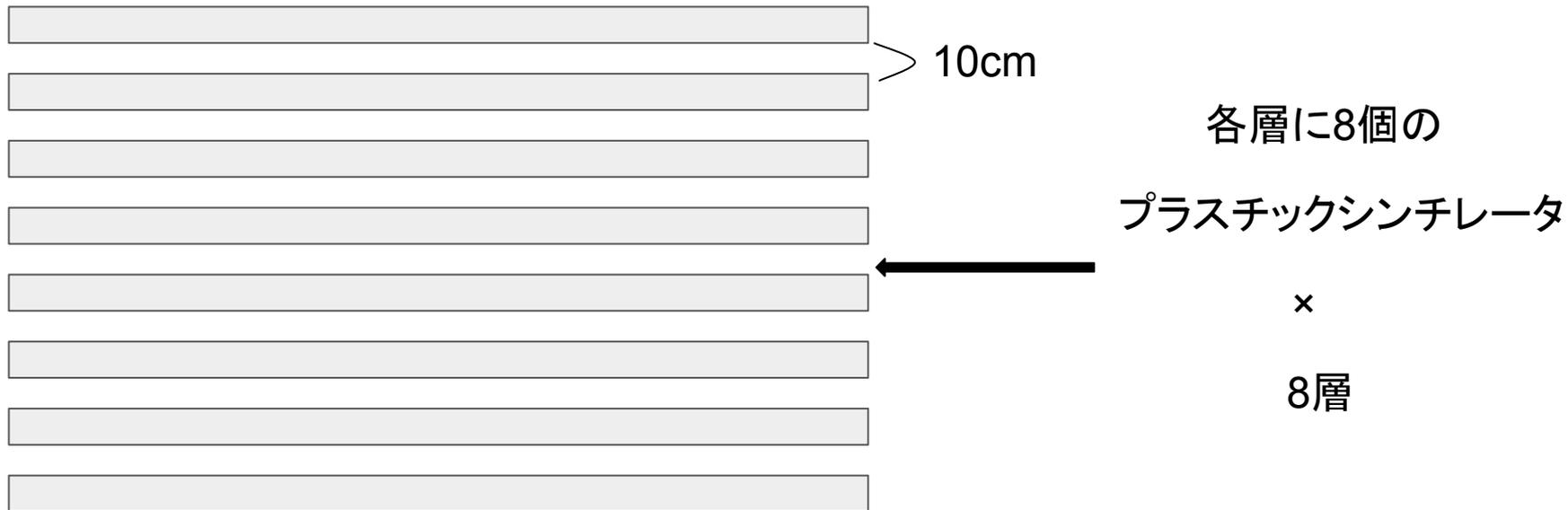
3.1 実験 予備実験 ノイズの排除

物理的ノイズ

基板とmppcの連結が弱い→テープで巻いて保守

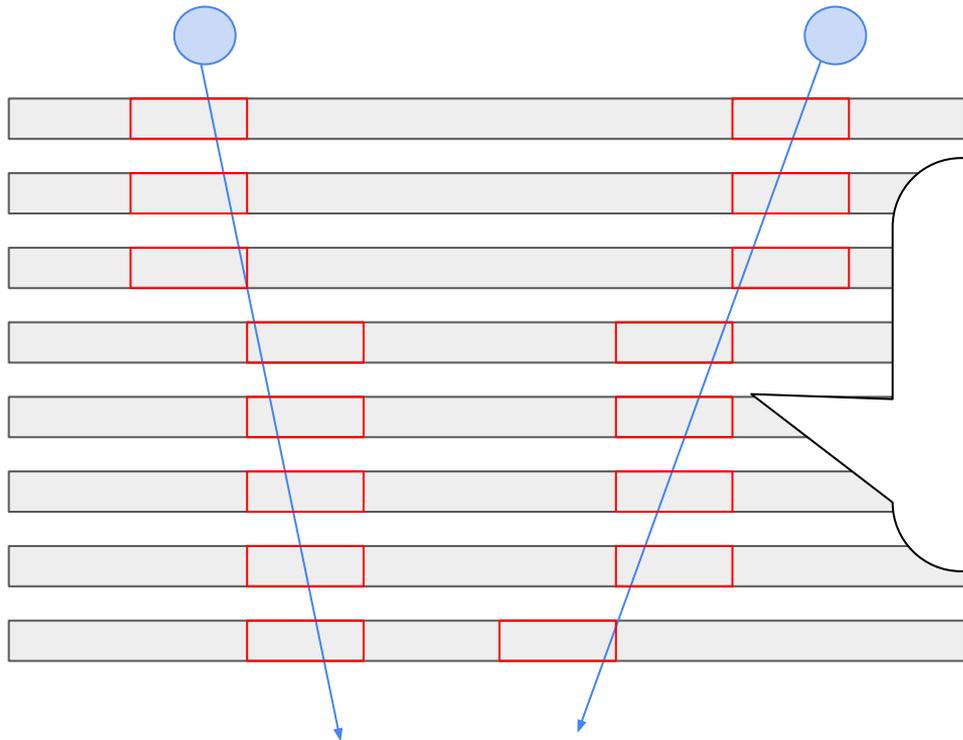


3.2 実験 本実験



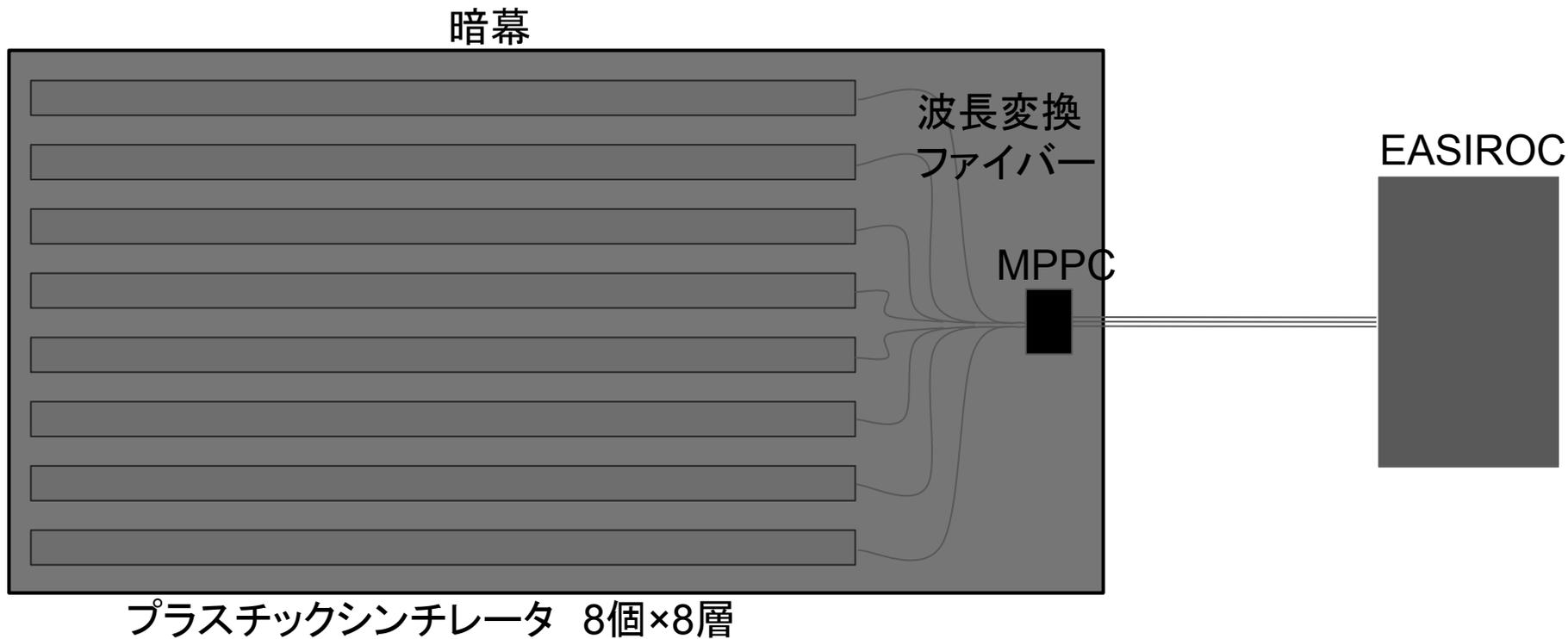
3.2 実験 本実験

ミューオン



ほぼ同時に
大きなエネルギーが観測された
シンチレータの位置関係から
ミューオンの飛跡がわかる

3.2 実験 本実験

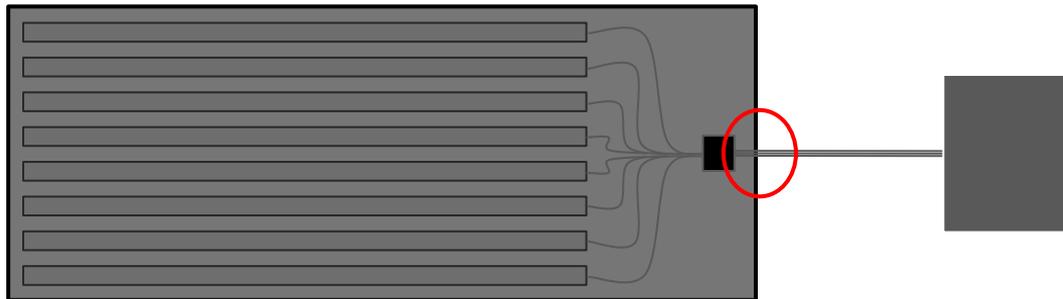


3.2 実験 本実験

実際に動かしてみて

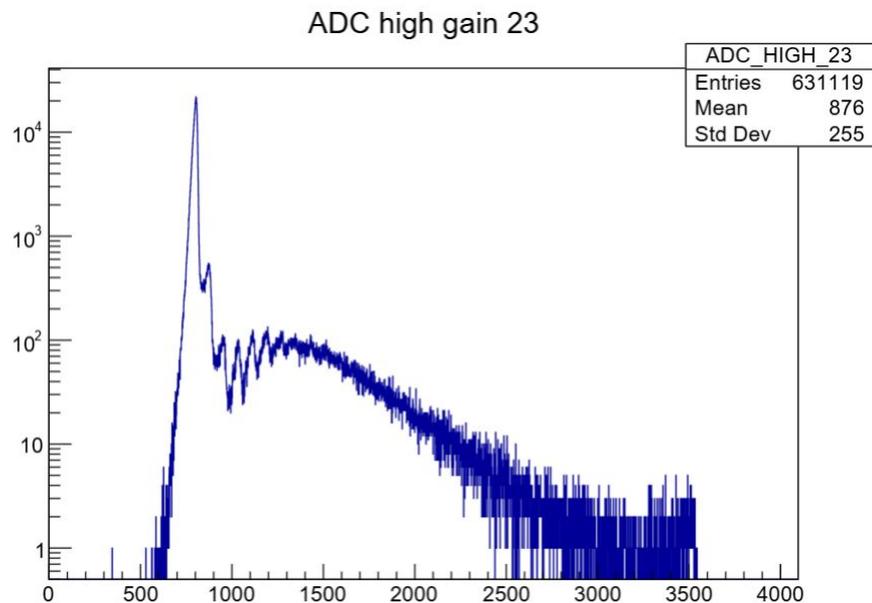
暗幕とケーブルの隙間で光漏れが多そう

→遮光テープで各所をとめる

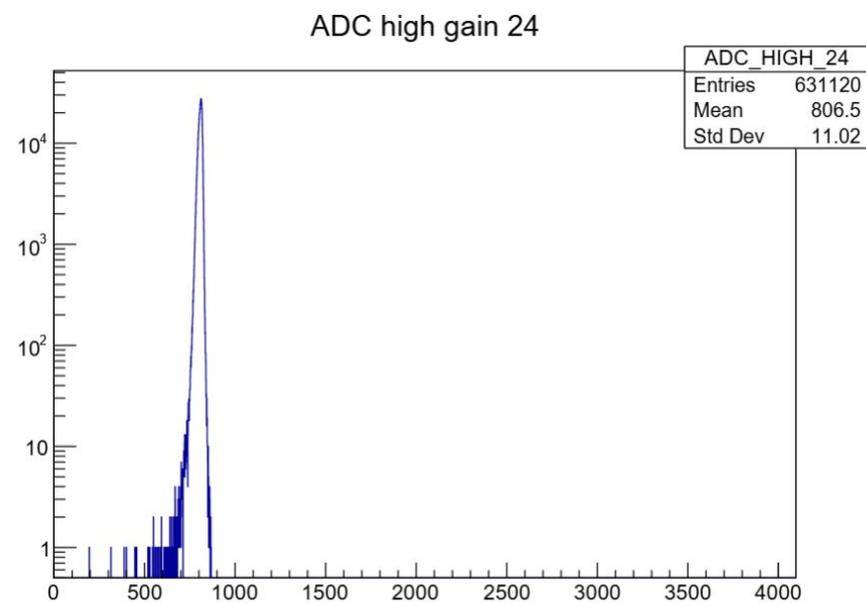


3.2 実験 本実験

チャンネルごとに結果を見て右図のようなものを探す → 11 ch くらいあった

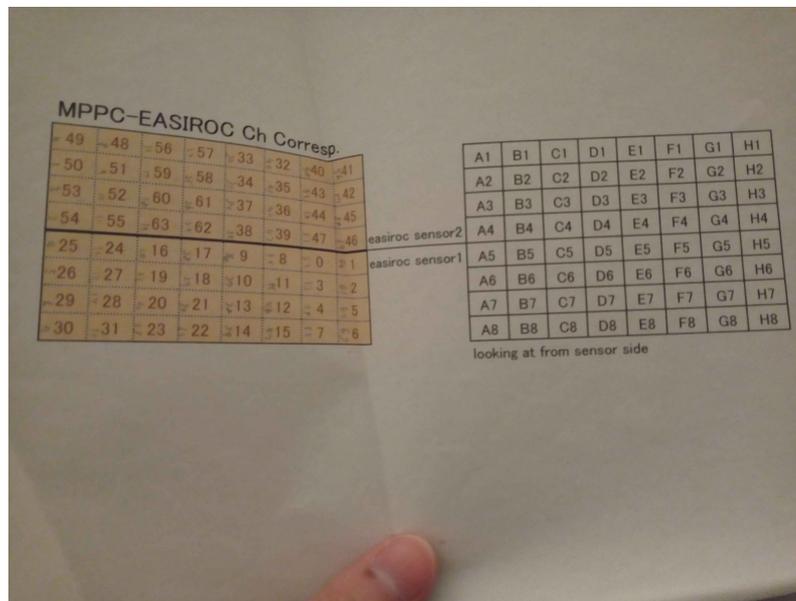


生きてるチャンネル



死んでいるチャンネル

3.2 実験 本実験



A-1,2, B-1,3, D-1,5,6,7,8, E-1,8

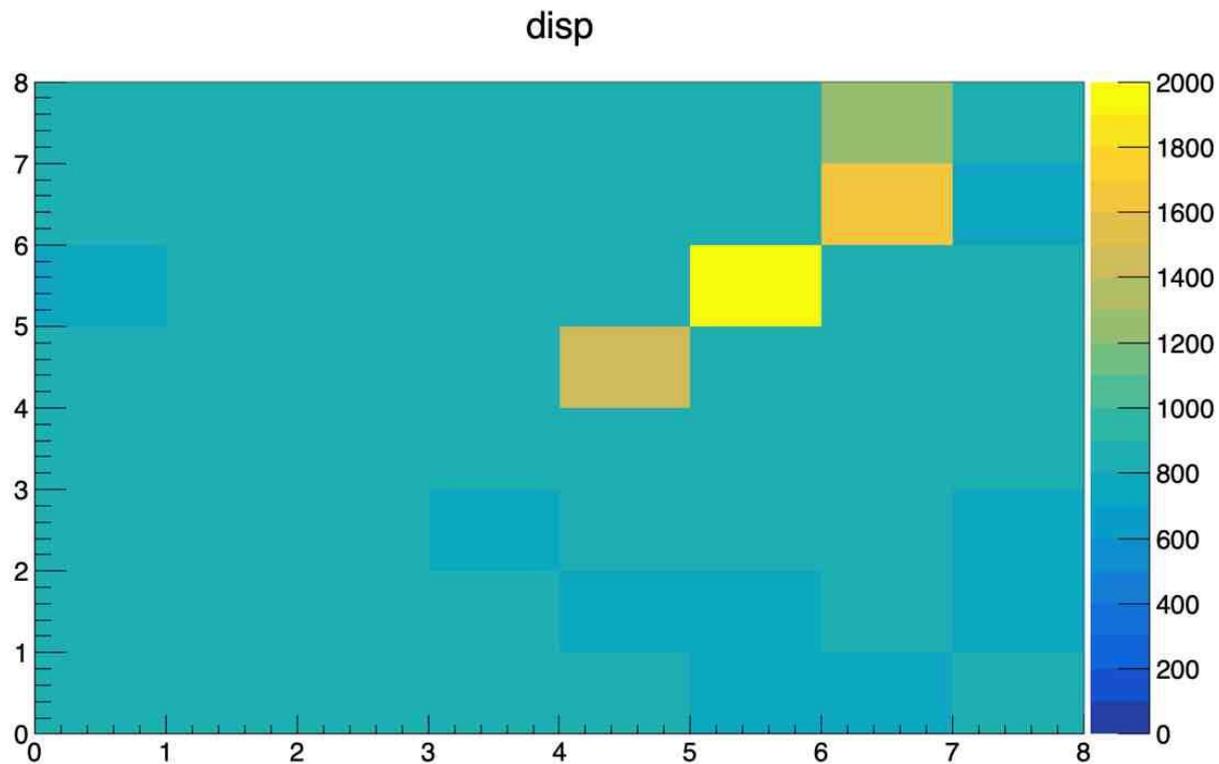
では信号を読み出せなかった

上面

H8	H7	H6	H5	H4	H3	H2	H1
G8	G7	G6	G5	G4	G3	G2	G1
F8	F7	F6	F5	F4	F3	F2	F1
■	E7	E6	E5	E4	E3	E2	■
■	■	■	■	D4	D3	D2	■
C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
B8	B7	B6	B5	B4	■	B2	■
A8	A7	A6	A5	A4	A3	■	■

■ : 死んでいるチャンネル

3.2 実験 本実験



3.2 実験 本実験

これで宇宙線が見えていることを確認できたので、

2/17~18,19~20にそれぞれ20時間ずつ測定を行なった。

解析には宇宙線が良く見えていそうな2/17~18の結果を用いた。

アウトライン

0. 概要

1. 準備(理論)

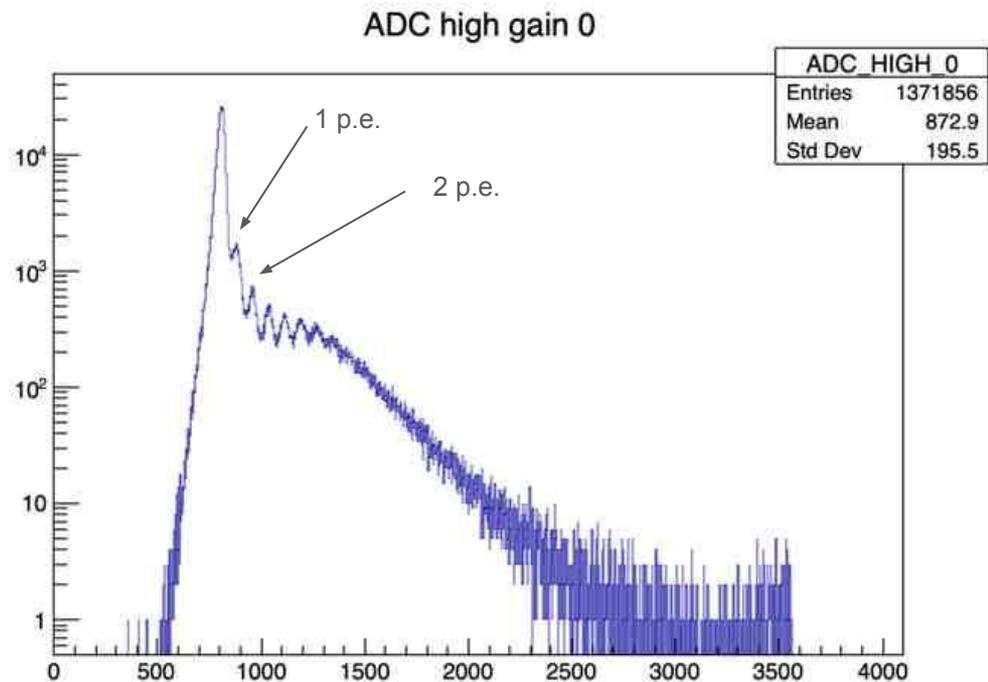
2. 実験装置

3. 実験

4. 結果・解析

5. 考察

4. 結果・解析

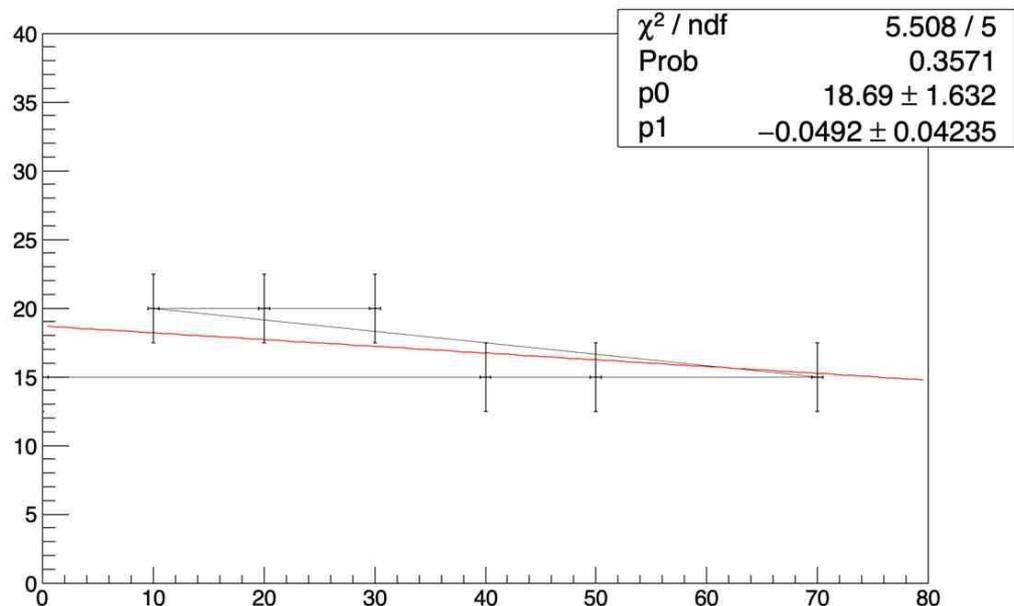


0 ch ADC Countのヒストグラム

1 p.e. の次の谷(920 count)を閾値にする

4. 結果・解析 復元

西



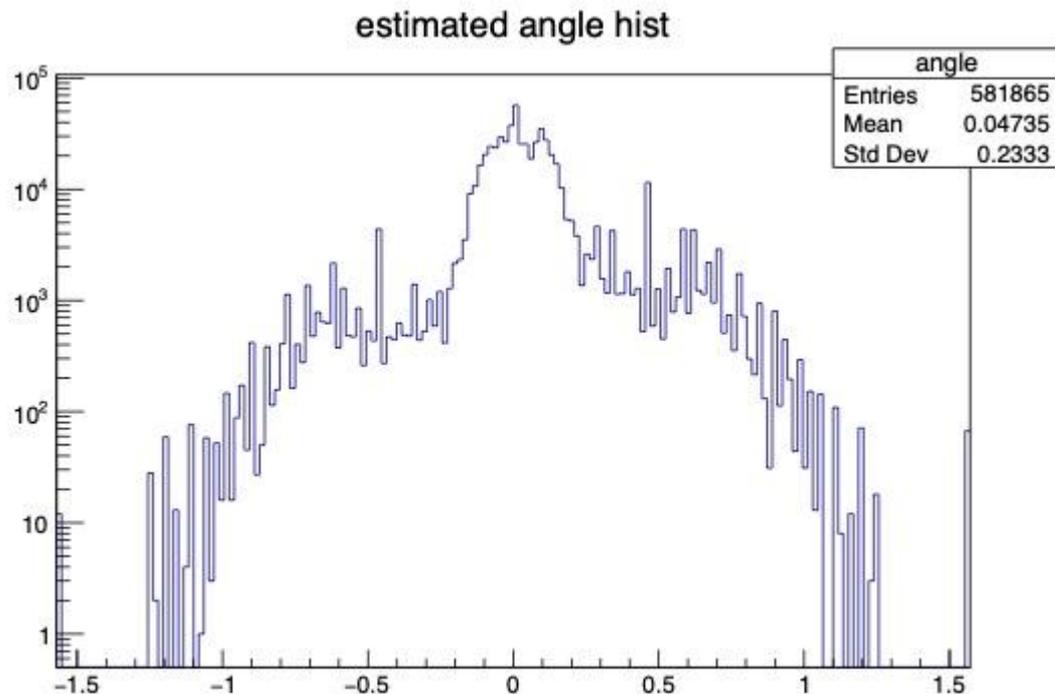
各シンチレータを中心点で代表し、寸法を誤差とした

一次関数でフィッティング

東

鉛直方向

4. 結果・解析 角度分布



$$\chi^2/\text{ndf} < 5$$

天頂角の分布

$$\text{西側: } w = 383738$$

$$\text{東側: } e = 198060$$

$$\text{Asymmetry} = (w-e)/(w+e)$$

$$\sim 0.319 \pm 0.001$$

東

西

アウトライン

0. 概要

1. 準備(理論)

2. 実験装置

3. 実験

4. 結果・解析

5. 考察

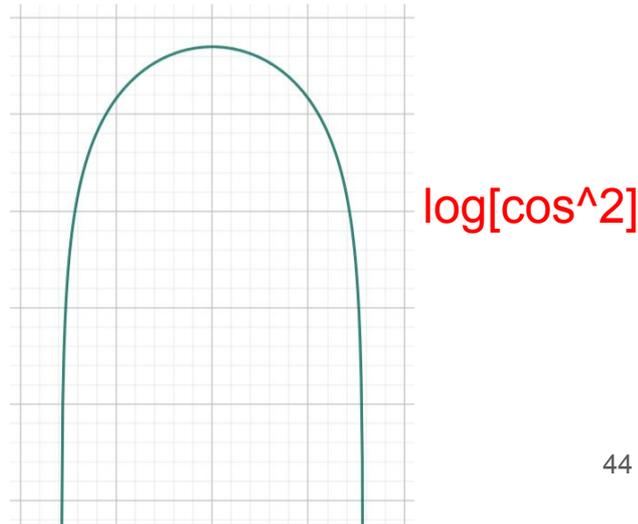
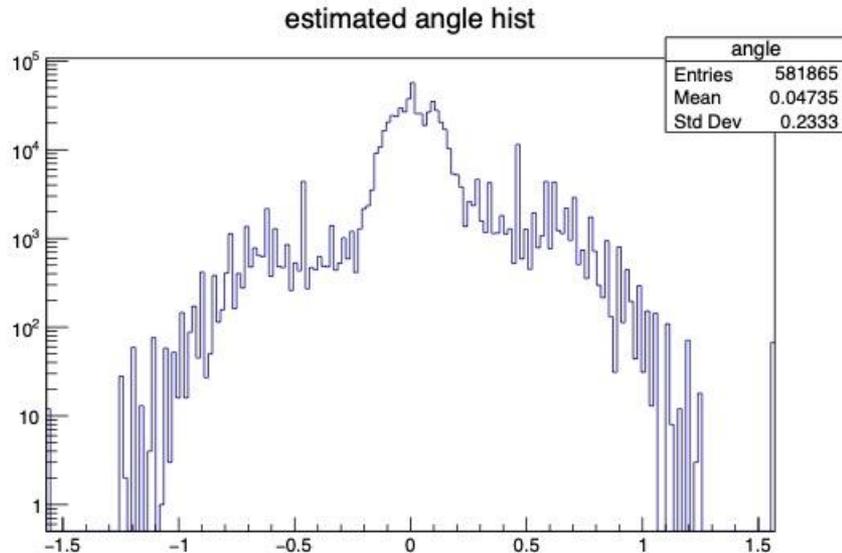
5. 考察 東西効果

- 全体は理論の予想である \cos^2 と同じような形をしている(ように見える)
- しかし西側のイベントが少し多い
 - **東西効果は見えている!**
- Asymmetryの誤差も小さい

$$\text{Asymmetry} = (w-e)/(w+e)$$

$$\sim 0.319 \pm 0.001$$

- 実験を行ったA1部屋は建物の東側にある
 - 西側からくるミュオンが多く止められる
 - 東西効果を小さく見積もる



5. 考察 分布

・ $\pm 0.5\text{rad}$ 付近でカーブから減っている

・解析方法が影響？

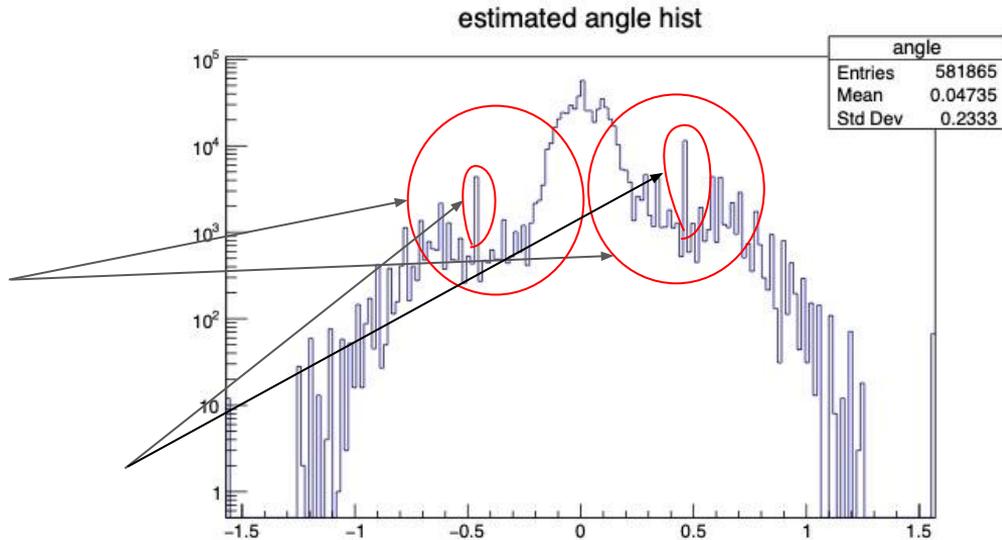
この 26° のピークに吸われている？

過去の実験もここにピークがあった

チャンネル数が有限

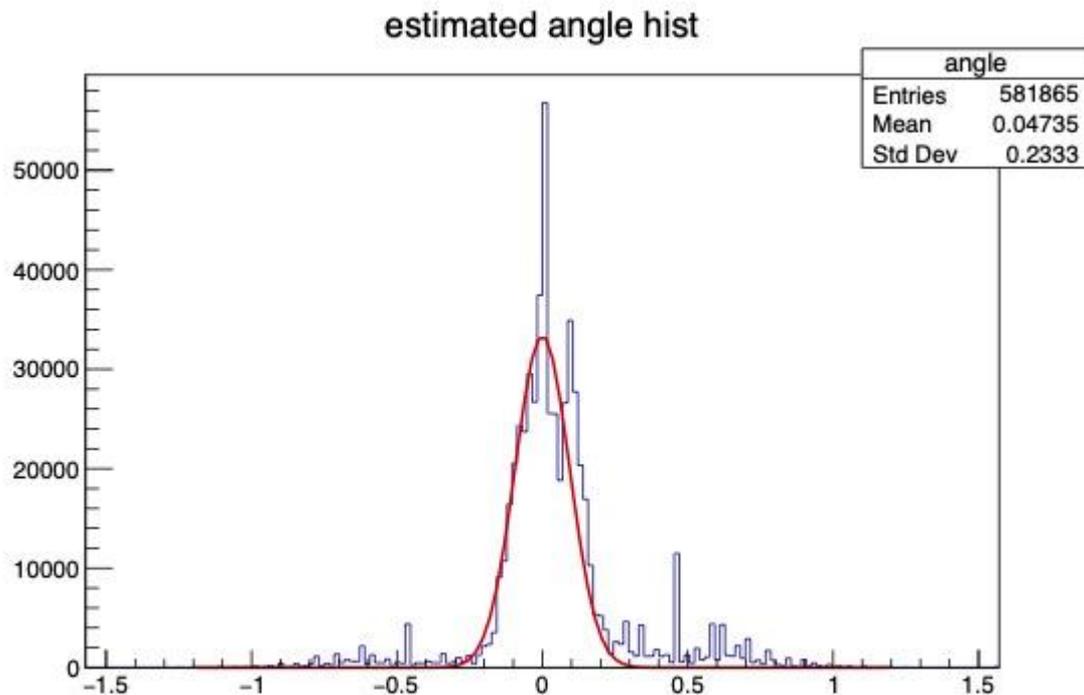
→算出角度も有限個

→特定の角度が出やすい？



H8	H7	H6	H5	H4	H3	H2	H1
G8	G7	G6	G5	G4	G3	G2	G1
F8	F7	F6	F5	F4	F3	F2	F1
	E7	E6	E5	E4	E3	E2	
				D4	D3	D2	
C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
B8	B7	B6	B5	B4		B2	
A8	A7	A6	A5	A4	A3		

5. 考察 分布



フィッティングすると \cos^{115}

- ・装置形状由来
- ・ χ^2/ndf の設定
 χ^2/ndf に制限をかけないと40乗になる

5. 考察 改善点

- ・dead chをファイバーを入れ替えて端によせることで影響を小さくする
- ・装置の幾何学的形状(dead ch、建物の配置)の考慮を入れたシミュレーションを行い、
 - ・角度分布の関数を正確に計測する
 - ・本当の東西効果がどのくらい見えているか確かめる

結論

- ・プラスチックシンチレータを多層に並べた検出器と、シンチレーション光を誘導する波長変換ファイバー、光を検出するMPPCを用いた実験装置により、宇宙線の飛跡を捉えることができた

- ・飛跡のデータを解析したところ、

- ・天頂角 0° 近くから降る宇宙線が多いが、理論の \cos^2 とはずれること

- ・東西効果が表れていること

が分かった

謝辞

今回の実験に際し、わかりやすく丁寧にご説明いただき、またスライド作成に関して適切な指摘をくださった木河さん、有元さんに深く感謝申し上げます。誠にありがとうございました。

また、ゼミをご担当いただいた吉岡さん、橋本さん、陳さんにも心より感謝申し上げます。