

宇宙線ミュオン及び電磁 シャワーの観測について

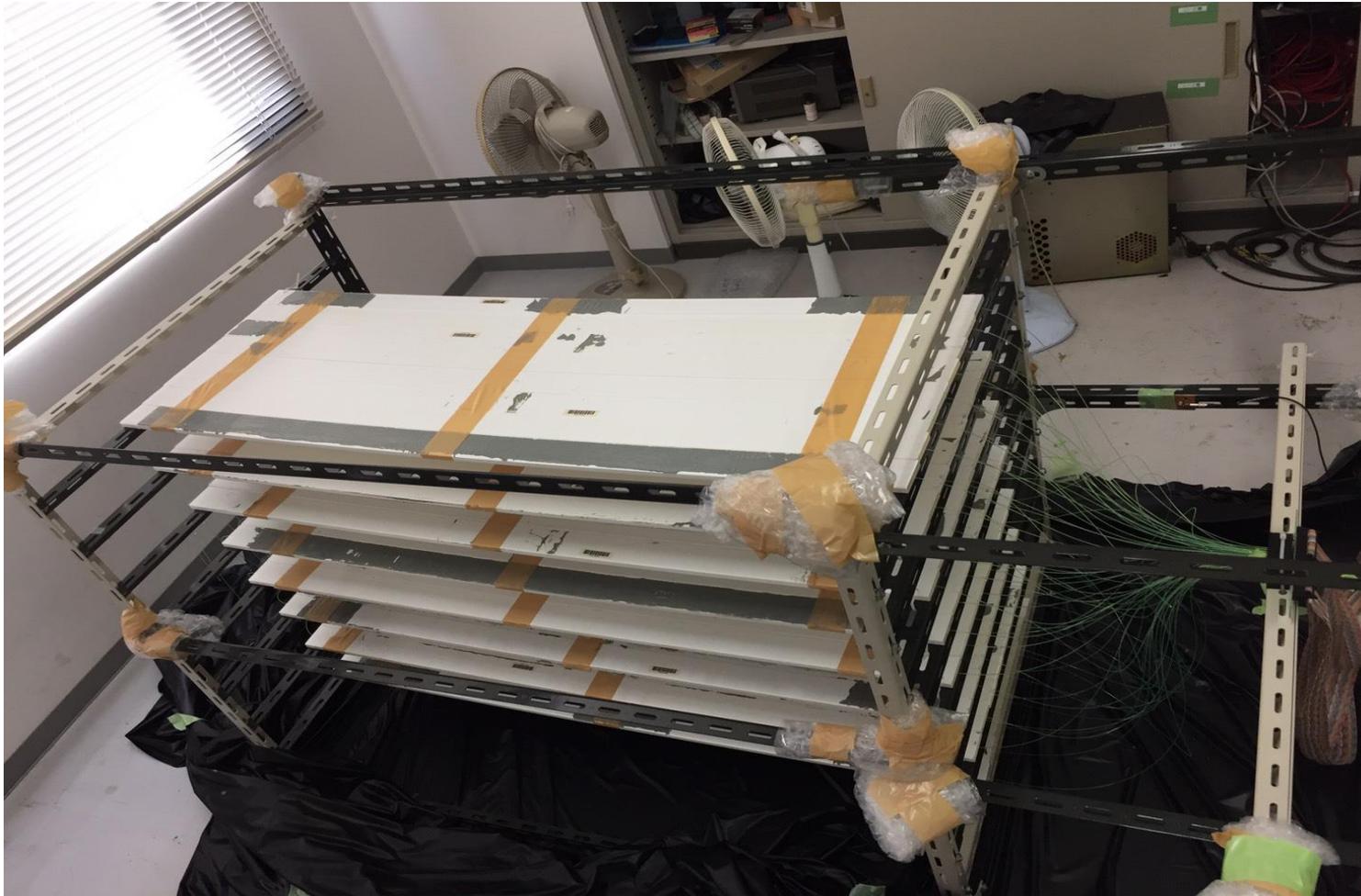
課題演習A1 小柴 鷹介 小橋 亮介 菅島 文悟
山下 達也 吉中 智弘

2017年9月26日 課題演習A1A2発表会

はじめに

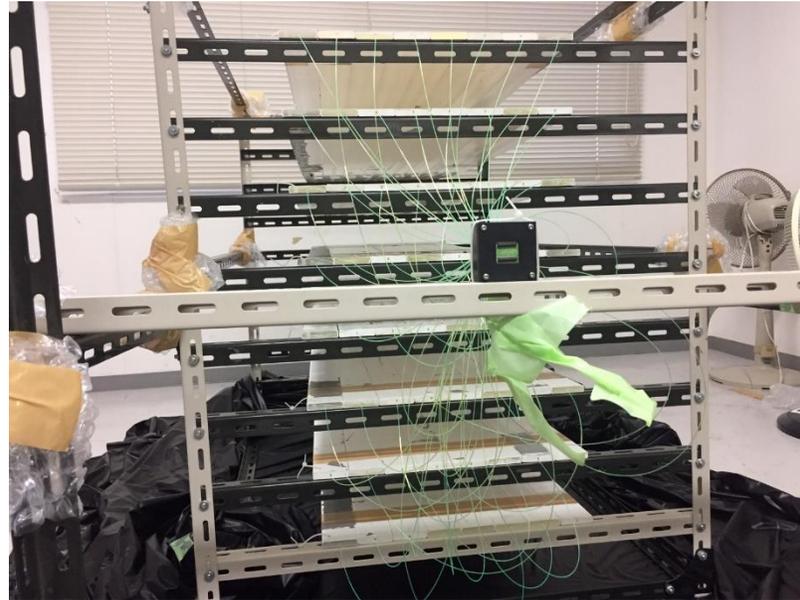
- 宇宙線とは宇宙を高エネルギーで飛び回っている粒子のことであり、地球に大量に降り注いでいる。地球大気に飛び込む前の宇宙線を一次宇宙線といい、大気に飛び込んだのち新たに生まれた宇宙線を二次宇宙線という。
- 二次宇宙線として、ミューオン、ニュートリノ、電子、 γ 線などがあるがここでは特にミューオン、電磁シャワーについて扱う。

実験装置(シンチレータ)



- ミューオンおよび電子という粒子が通過すると発光するシンチレータ板を用意した

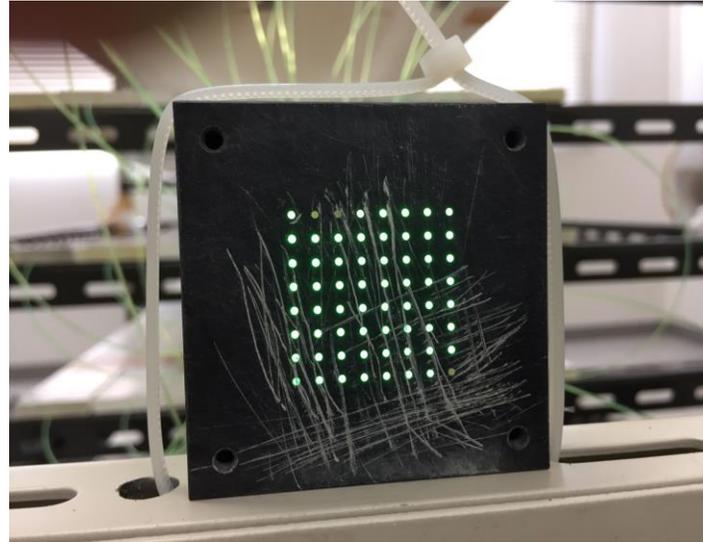
実験装置(シンチレータ): 詳細



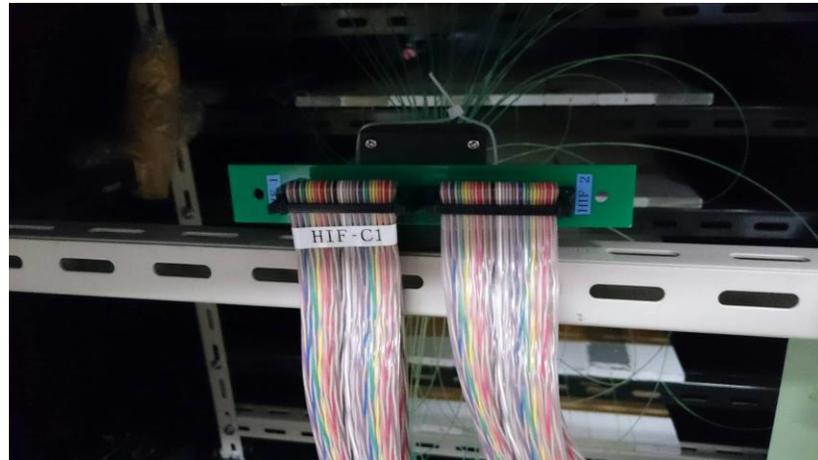
奥行き方向に長い
シンチレータの板を
88マス状に並べた
形で骨組を渡して
検出器とする



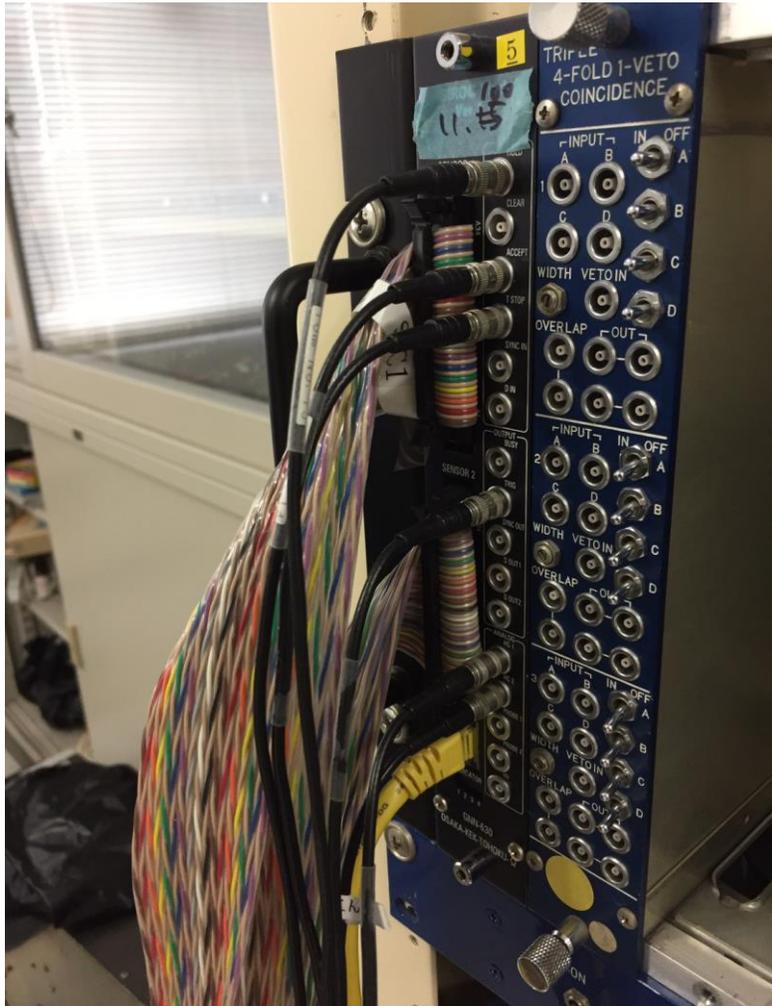
実験装置(光ファイバー+MPPC)



- シンチレータのシンチレーション光を光ファイバーを通じてMPPCで電気信号に変換する



実験装置(高電圧をかける)



- MPPCから出た微弱な電流はケーブルを
通ってきたあとHigh Voltageで増幅される。
今回用いたのはEasiroc Moduleである



光量漏れチェック



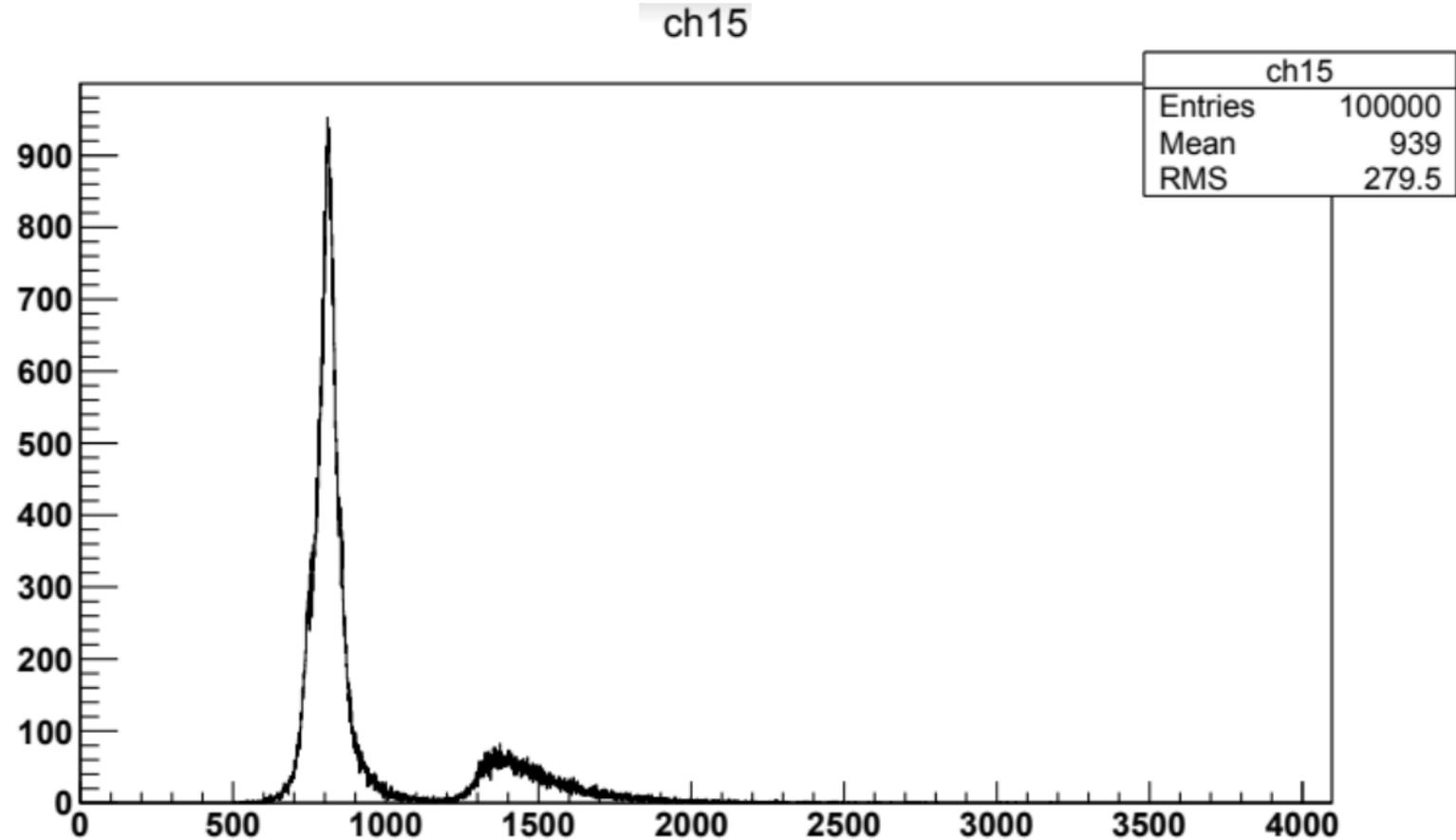
- シンチレータ板からなる検出器に暗幕をかぶせて室内の光が入らないようにした(我々の対象とする1電子レベルのエネルギーの反応も検出できる精度まで高めた)

測定(設定)

- Thresholdの設定は
エネルギーに対しては1200、
個数に対しては4, 10, 15とした

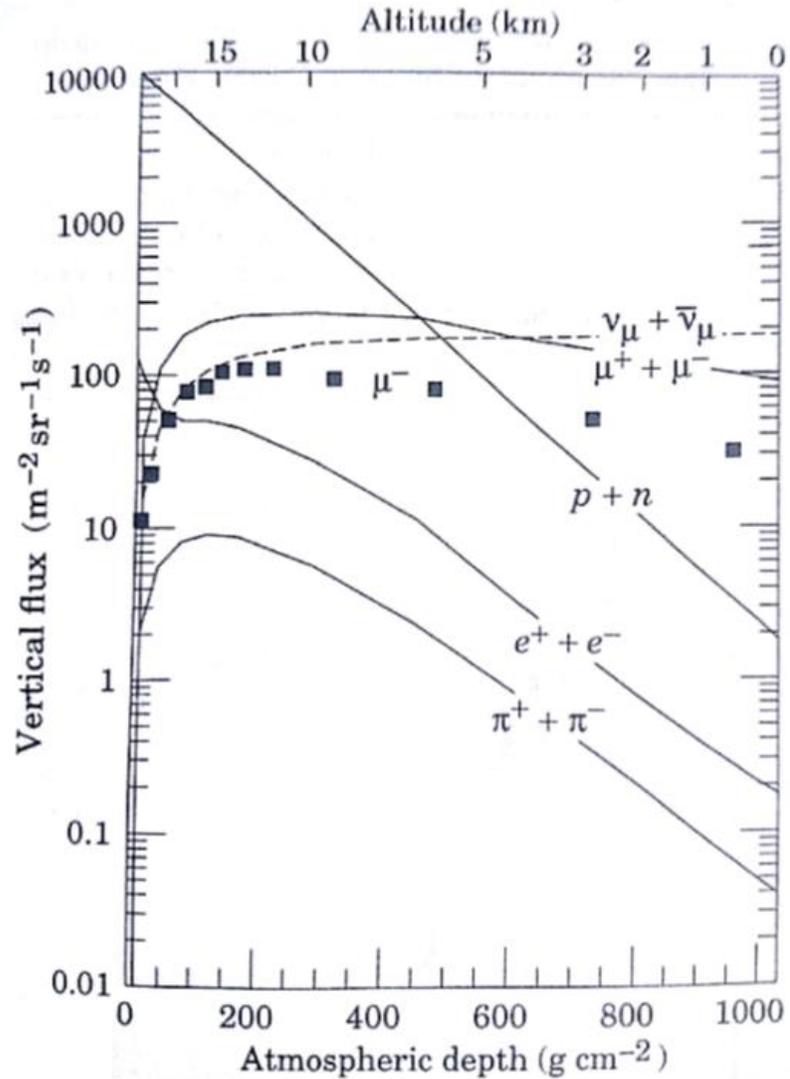
設定(エネルギー)

右の図で最初のピークは熱電子の寄与によるものであり、二番目のピークがミュオンによるものだと考えられる



↑
↑のところ(~1200)でthresholdをかけた

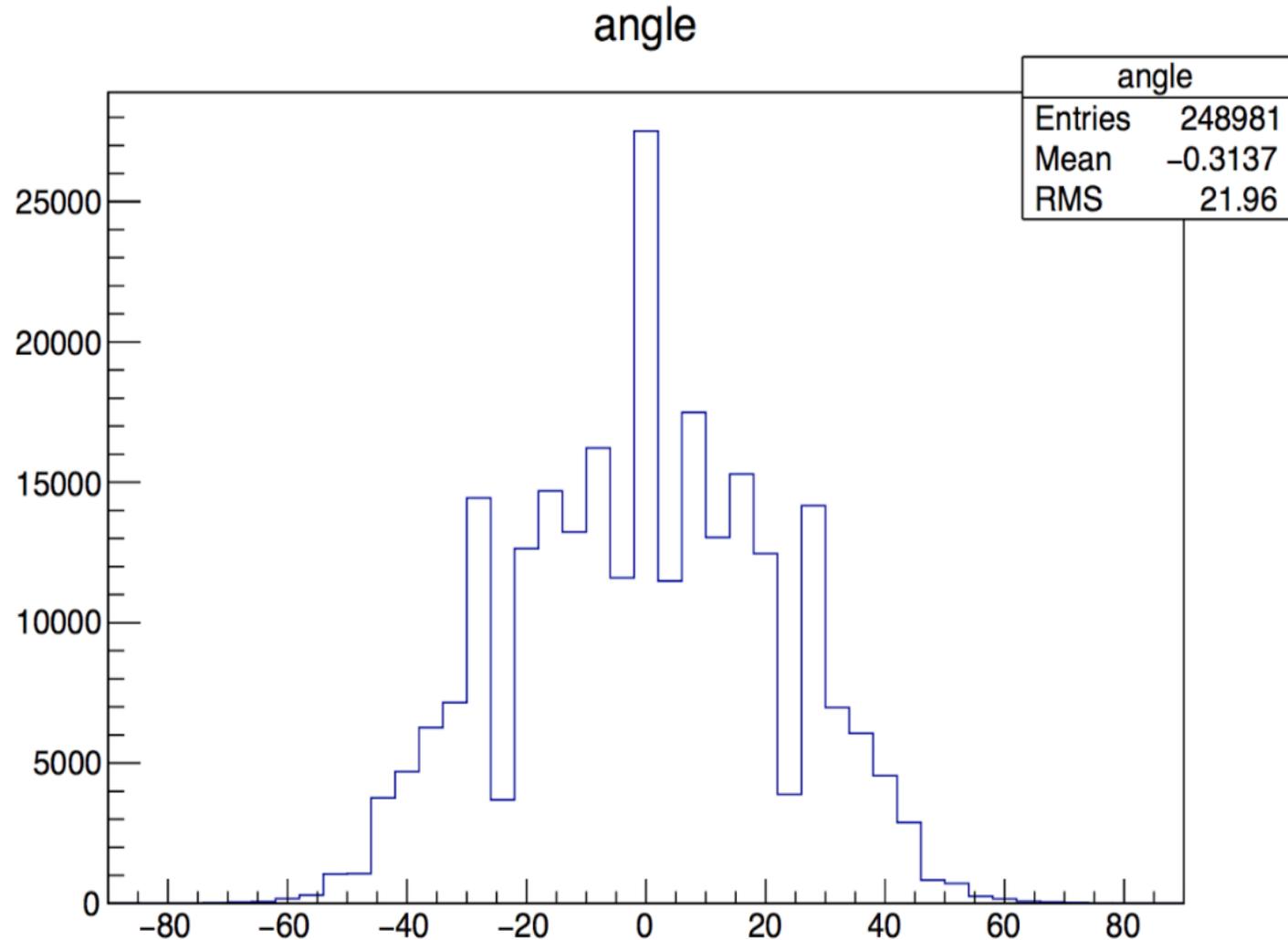
様々な種類の粒子のフラックス



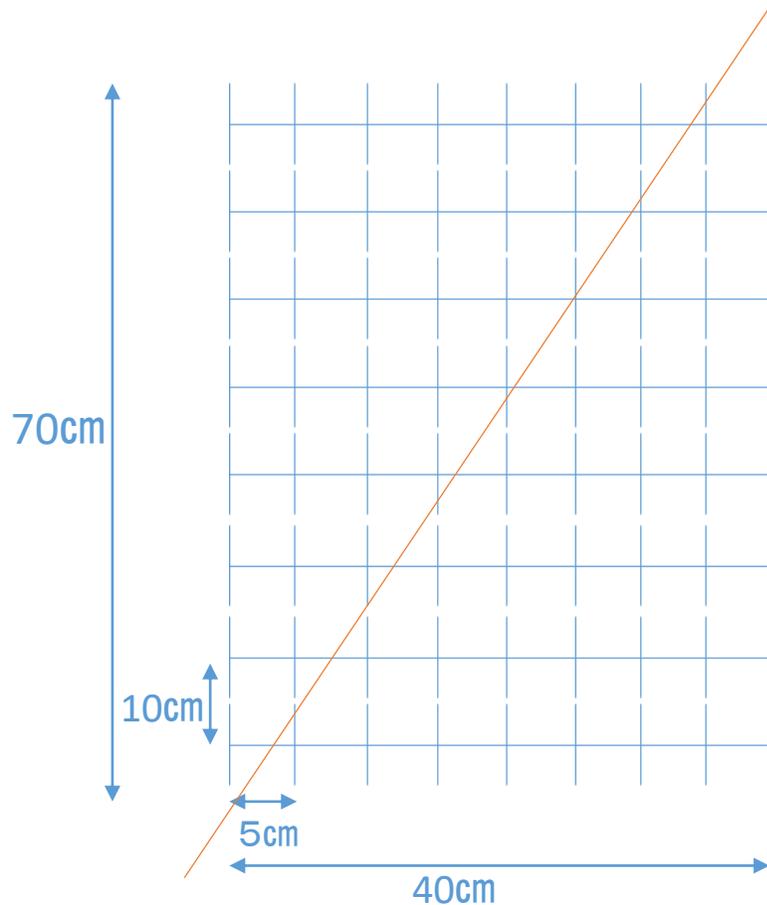
設定 (angleについて)

トラックでエネルギーが
1200以上のセルを最小
二乗法によって評価し、
その直線の角度を度数
分布表で表したものが
angleである

bin幅は4度ずつである



シンチレータの模式図



真上から入射する粒子
の次に多いのは丁度
装置の対角線を通る粒
子である

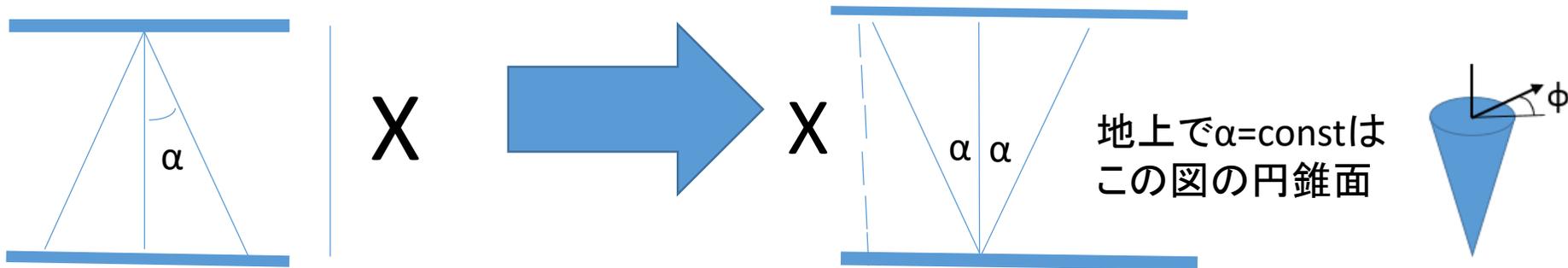
その角度 θ は左図より

$$\text{Arctan}\theta = 1/2$$

$$\therefore \theta \doteq 26.6^\circ$$

理論(天頂角分布)

- まず、ミューオン μ の天頂角分布が $(\cos\alpha)^n$ に比例することをみる
- μ が地上からの高さ X の上空で生成し角度 α で飛来してくると仮定する。このような宇宙線のfluxを $J(X, \alpha)$ とする。



- 関係式 $J(X, \alpha) = J\left(\frac{X}{\cos\alpha}, \alpha = 0\right)$ とする
- μ の強度は平均自由行程 λ で指数関数的に減衰するとする

$$J(X, \alpha) \propto e^{-\frac{X}{\lambda}} \quad (J(X, 0) = J_0 e^{-\frac{X}{\lambda}})$$

理論(天頂角分布)

- 以上2つの仮定から式変形($\alpha \ll 1$ ゆえ $\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \ll 1$)

$$J(X, \alpha) = J\left(\frac{X}{\cos \alpha}, \alpha = 0\right) = J(X, 0) \frac{J\left(\frac{X}{\cos \alpha}, 0\right)}{J(X, 0)}$$

$$\frac{J\left(\frac{X}{\cos \alpha}, 0\right)}{J(X, 0)} = \exp\left(-\frac{X}{\lambda} \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1\right)\right) = \left\{\exp\left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1\right)\right\}^{-\frac{X}{\lambda}}$$

$$\text{展開} \quad \approx \left\{1 + \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1\right)\right\}^{-\frac{X}{\lambda}} = (\cos \alpha)^{\frac{X}{\lambda}}$$

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

理論(天頂角分布)

- 以上の議論から μ の天頂角分布は $(\cos \alpha)^{\frac{X}{\lambda}}$ に比例することが予想される。
- 天頂角分布の実験では実験によりこの指数を確認する方針をとる。

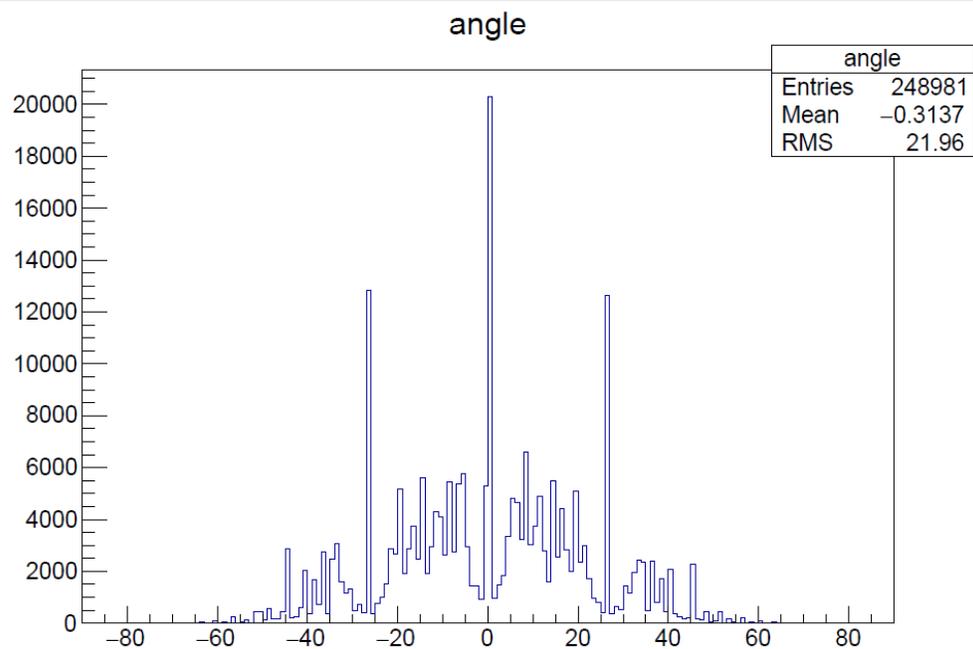
$$J(X, \alpha) \propto (\cos \alpha)^{\frac{X}{\lambda}}$$

- 理論的には指数がほぼ2と求まる($\lambda=500 \text{ g/cm}^2, X=1000\text{g/cm}^2$)

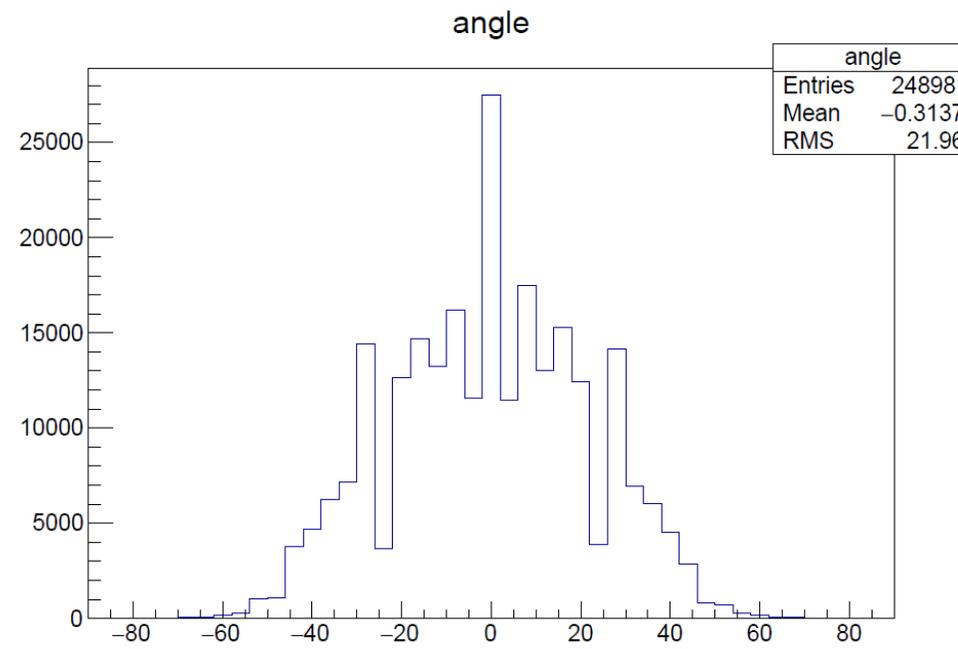
$$J(X, \alpha) \propto (\cos \alpha)^2$$

方針(天頂角分布)

- 閾値(ADCカウント)を超えたシンチレータの位置をもとに直線を引いて、その傾き θ に対する頻度分布を求めた。



bin幅 1°



bin幅 4°

方針(天頂角分布)

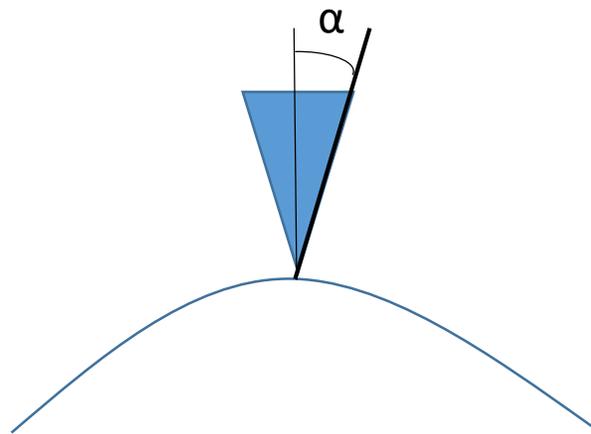
- 閾値を超えたシンチレータの位置をもとに直線を引いて、その傾き θ に対する頻度分布を求めた。
- この指数を実験で確認する方針をとる。

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

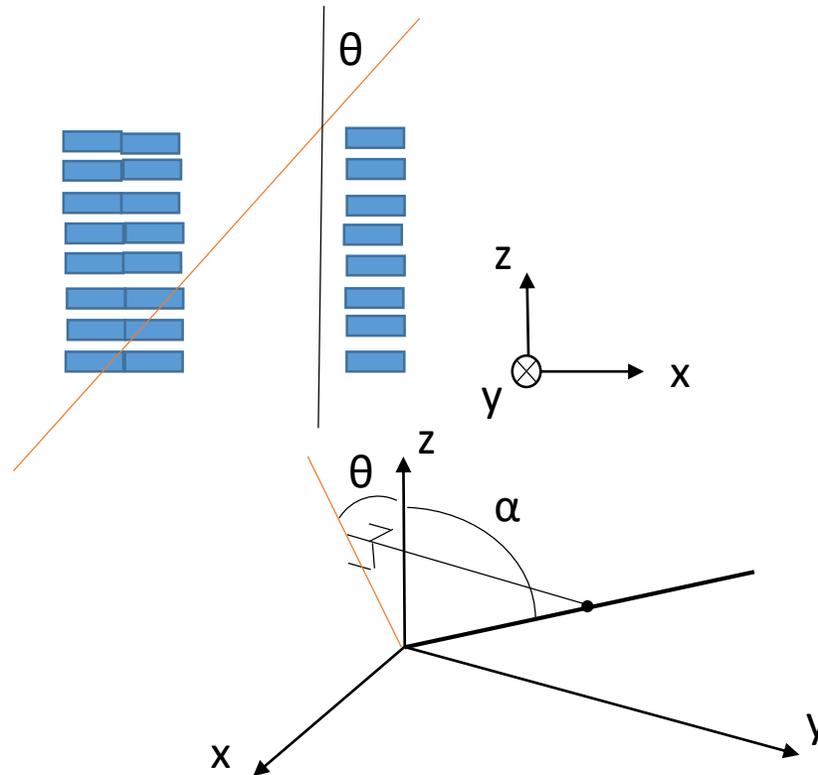
- ただし、 α と θ は違う量
 - 1 一様性
 - 2 シミュレーション

観測機器の幾何(天頂角分布)

- ここで、天頂角 α と観測の θ は別の量である。奥行きに長い長方形を使った検出では α を (x,z) 平面に射影した角度として観測される。これを θ とする。

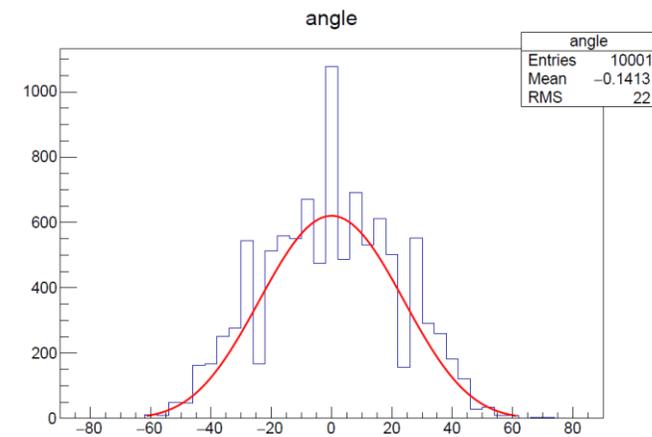
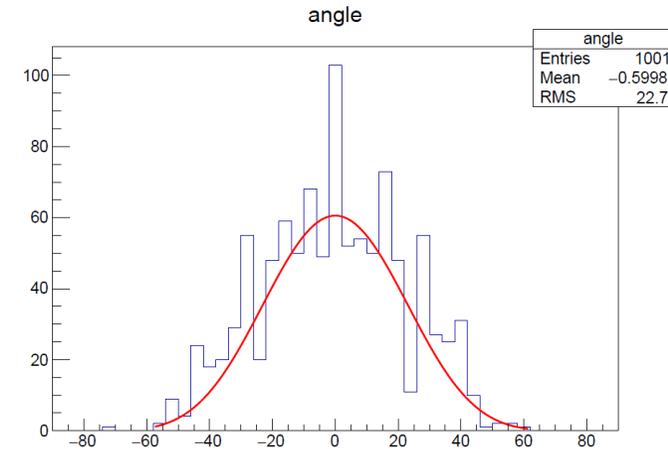
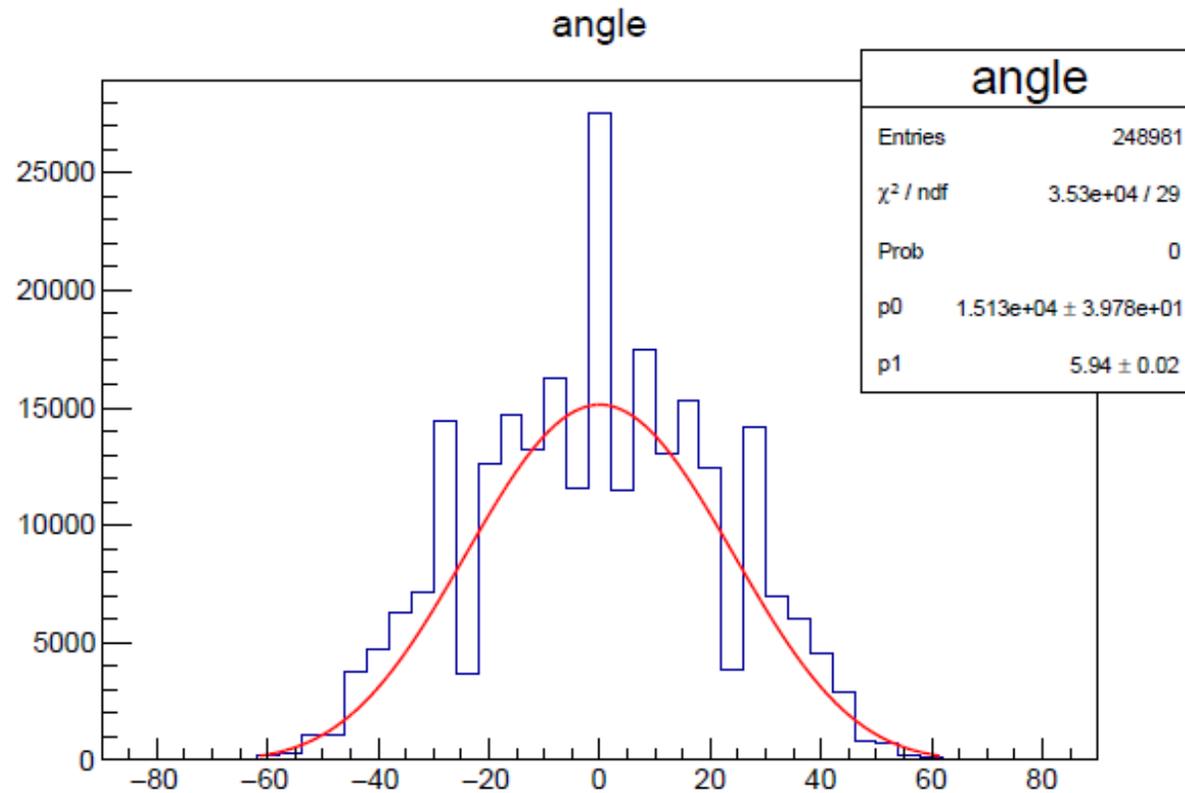


ちきゅう



結果(天頂角分布)

- \cos の累乗を仮定してfittingすると、指数はほぼ6である
- 装置の幾何的問題からbin幅は 4°



方針(天頂角分布)

- 閾値を超えたシンチレータの位置をもとに直線を引いて、その傾き θ に対する頻度分布を求めた。
- 右辺の指数を実験で確認する方針をとる。

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

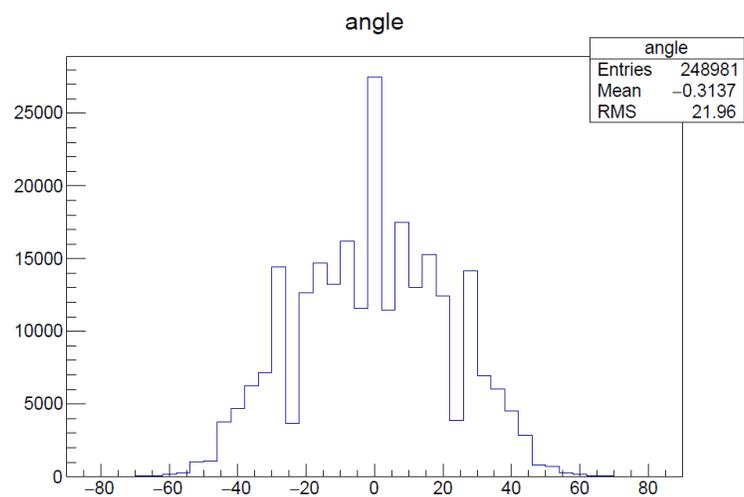
- ただし、 α と θ は違う量
 - 1 積分
 - 2 シミュレーション

解析1-積分(天頂角分布)

- ϕ について一様と仮定すると、
- $I(\theta) = 2 \int_0^{\pi/2} d\phi J(\alpha, \phi) \leftarrow$ 奥行きに潰した、つまり ϕ で積分
- $d\phi = -d\alpha \frac{\tan \phi}{\tan \alpha (\cos \alpha)^2}$
- $I(\theta) = 2 \int_{\theta}^{\pi/2} d\alpha \frac{\tan \theta J(\alpha)}{(\sin \alpha)^2 \sqrt{1 - \left(\frac{\tan \theta}{\tan \alpha}\right)^2}}$
- この計算を $I(\alpha)$ に直すのはできなさそうなので $I(\alpha)$ が \cos の累乗に比例する仮定のもと、代入して測定に近いものを選ぶ

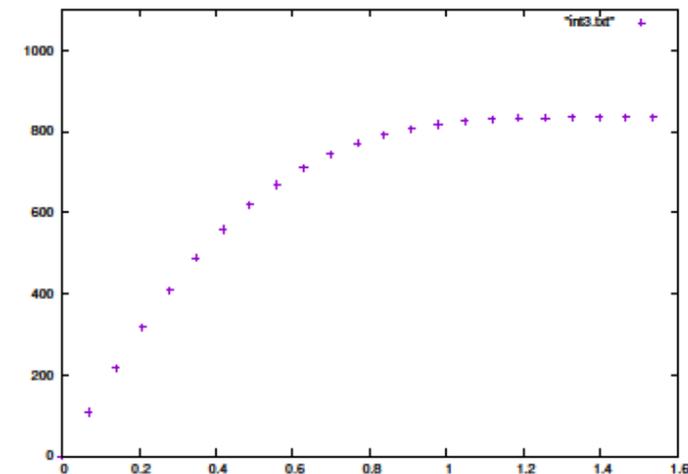
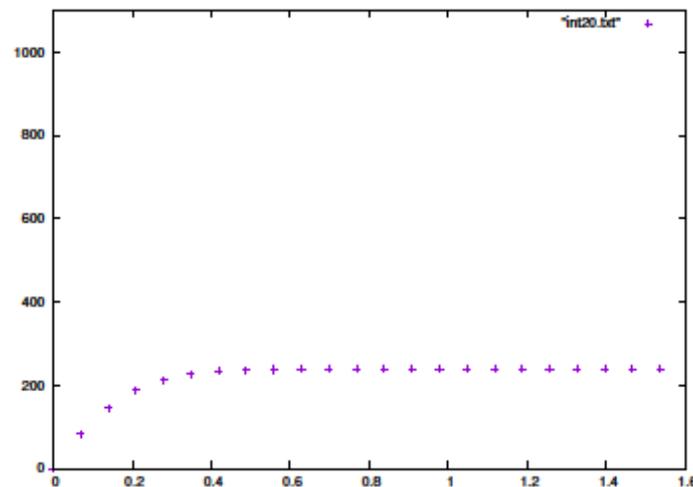
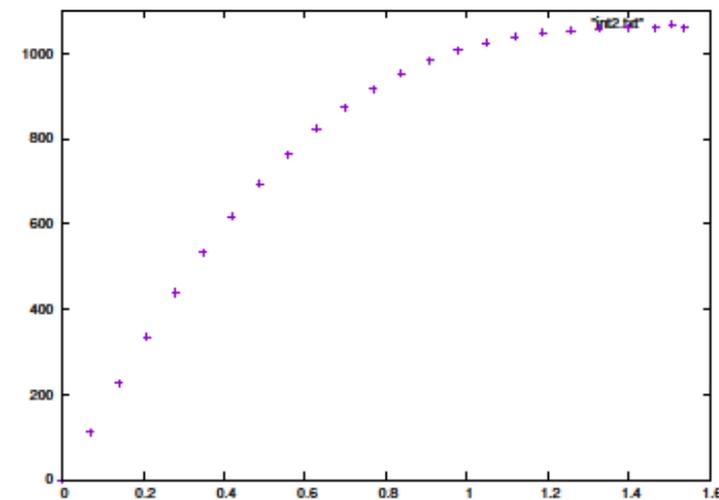
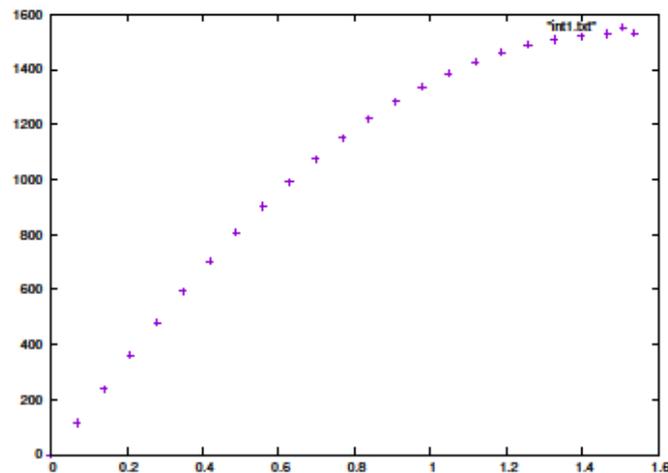
解析1-積分(天頂角分布)

- 結果は図の通りだった



n=

実測



積分の問題点と改善案(天頂角分布)

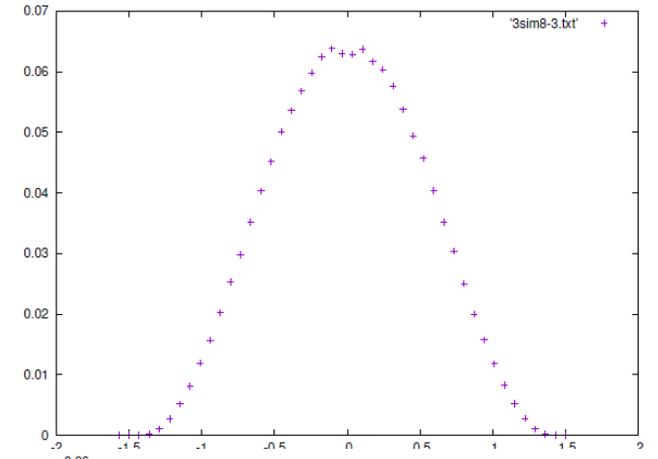
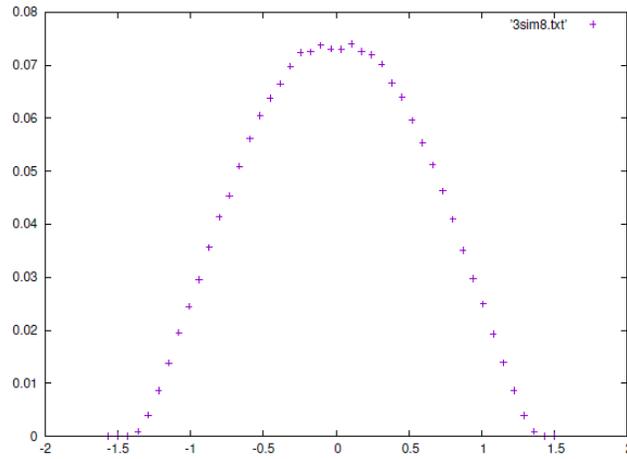
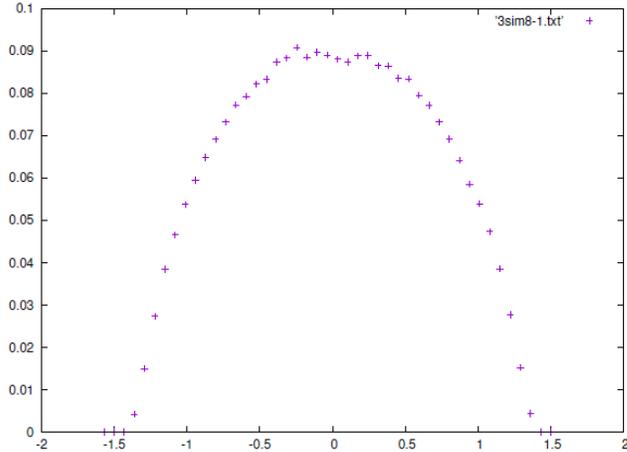
- 全く違う性質を示すグラフになってしまった。
- これは検出器を大きさのない点として考えたためと思われる。

解析2-シミュレーション(天頂角分布)

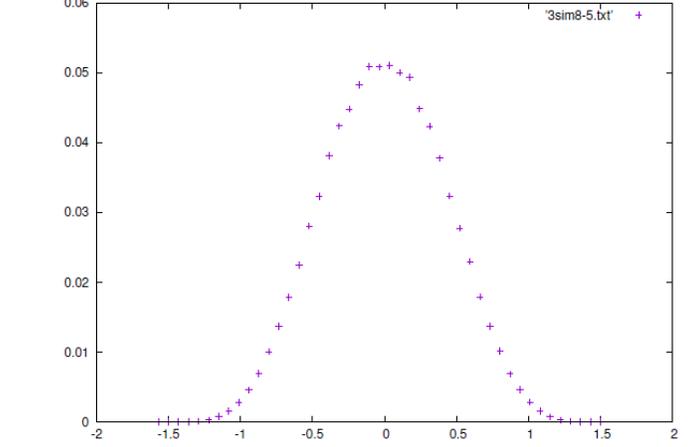
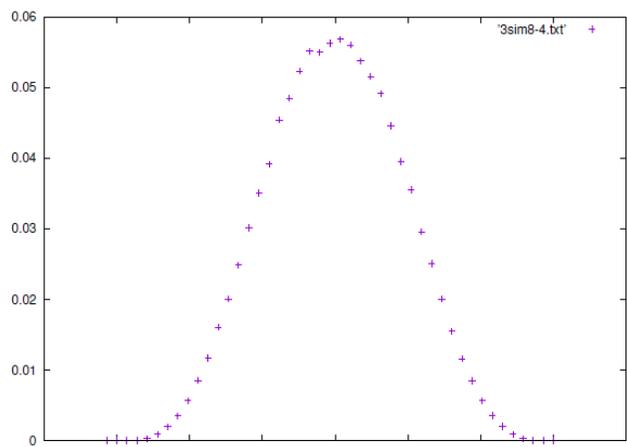
- 天頂角分布が $(\cos\alpha)^n$ に比例する場合のシミュレーションを行った。
- シミュレーションで行ったことは、 $N=5000000$ 回以下を繰り返した
 1. 検出器の中点を通り検出器に平行な面上でランダムに1点選ぶ(ただし検出できる限界の角度からその半径は150 cmとした。
 2. 宇宙線の放出される角度を $(\cos\alpha)^n$ の確率分布に従い設定する
 3. 検出器でカウントされるか
 - 理想はシンチレータを並べてThreshold:4を満たすものだが
今回は2枚用意して上面に当たるor下面に当たる でカウント

解析2-シミュレーション(天頂角分布)

- シミュレーションの結果は以下の図の通りで
($n=1,2,3,4,5$)



指数が上がる
と中心に寄っ
ていっている

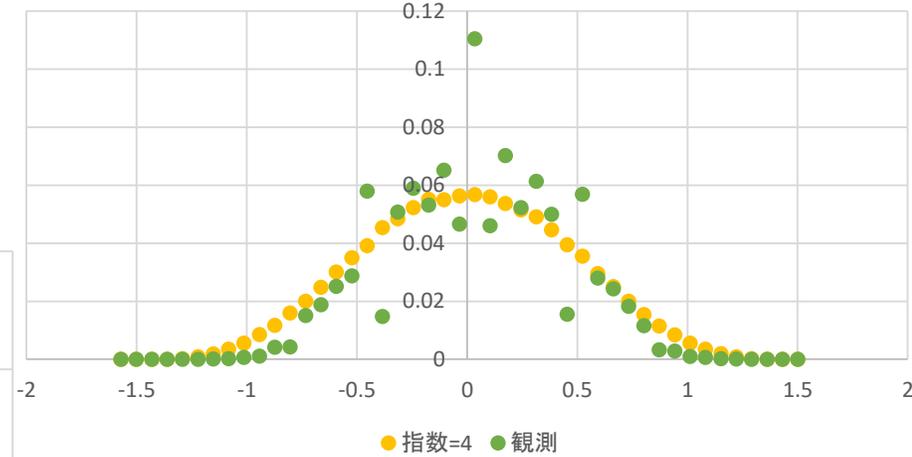
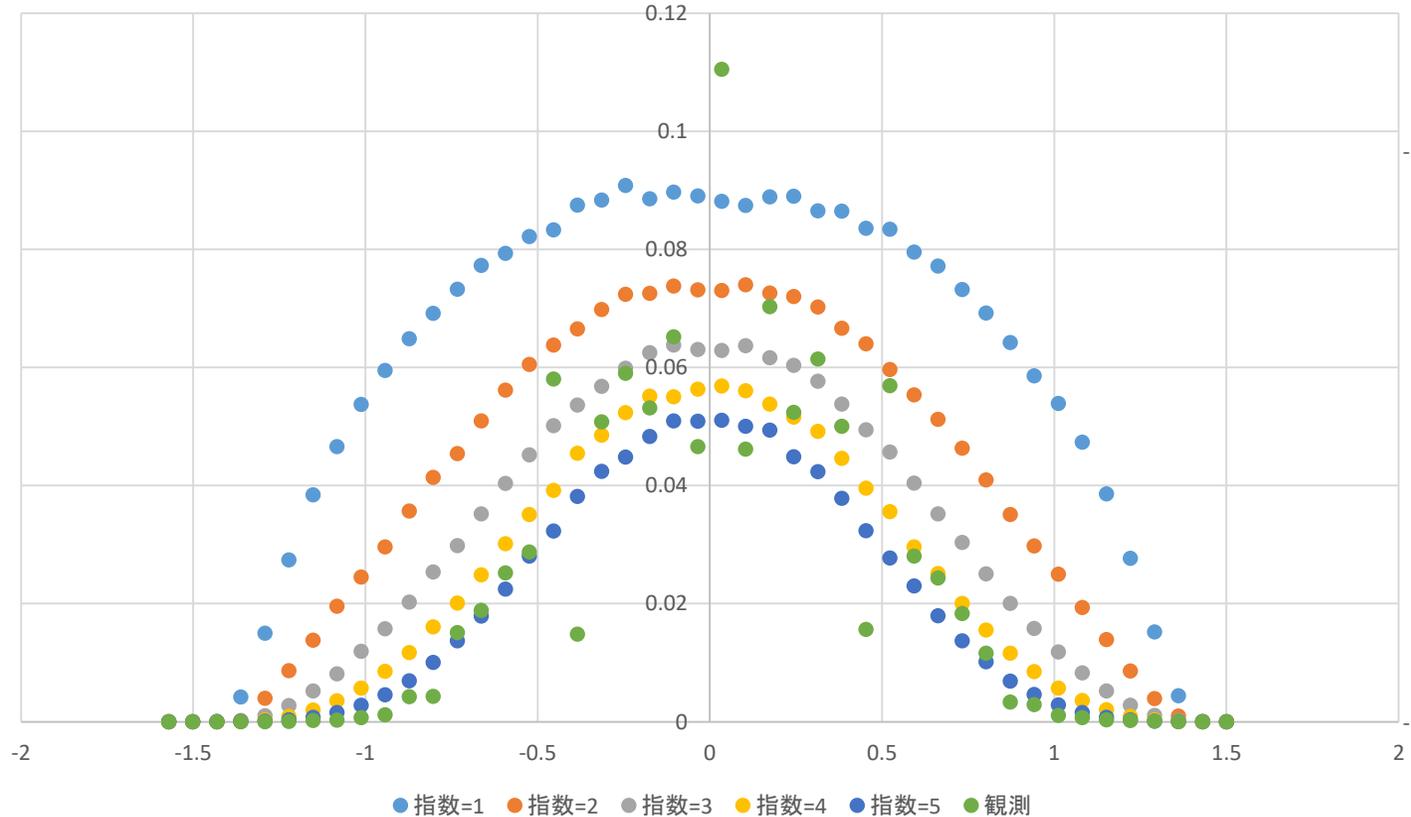


解析2-シミュレーション(天頂角分布)

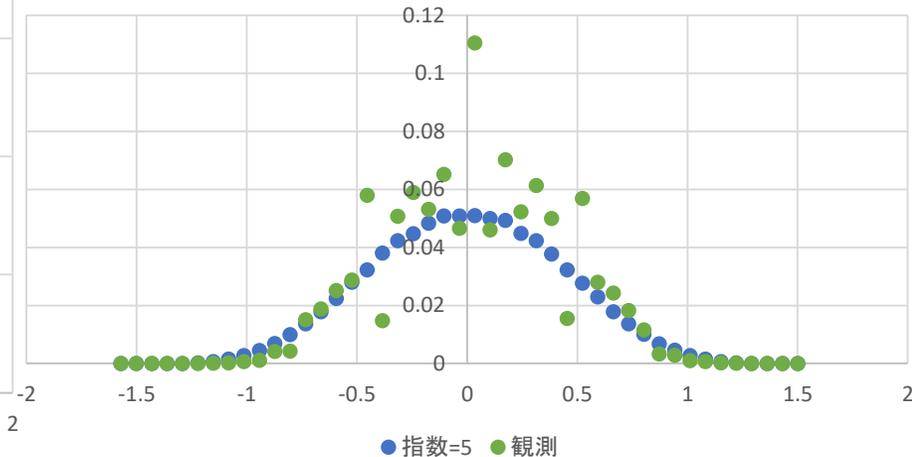
シミュレーション(4)と観測の比較

- 比較(観測値も試行数N=248981で割った)

シミュレーションと観測の比較

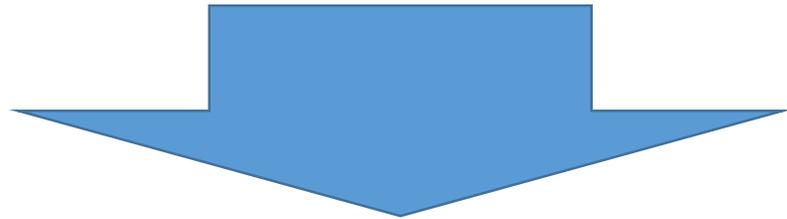


シミュレーション(5)と観測の比較



シミュレーションの問題点と改善案

- $n=4, n=5$ とも近いように見受けられたが、少なくとも $n=2$ とは違う結果となってしまったが、 $n=3$ ほどにはなりそうである。
- 本来は 8×8 枚あるところを簡易にしてしまったことは実際の実験のデータから離れてしまった要因とも考えられる。



- これを実際にできなくても(Threshold:4に対して)検出器内で飛跡 が長いものを抽出しカウントするシミュレーションは書くことができたはず

東西効果

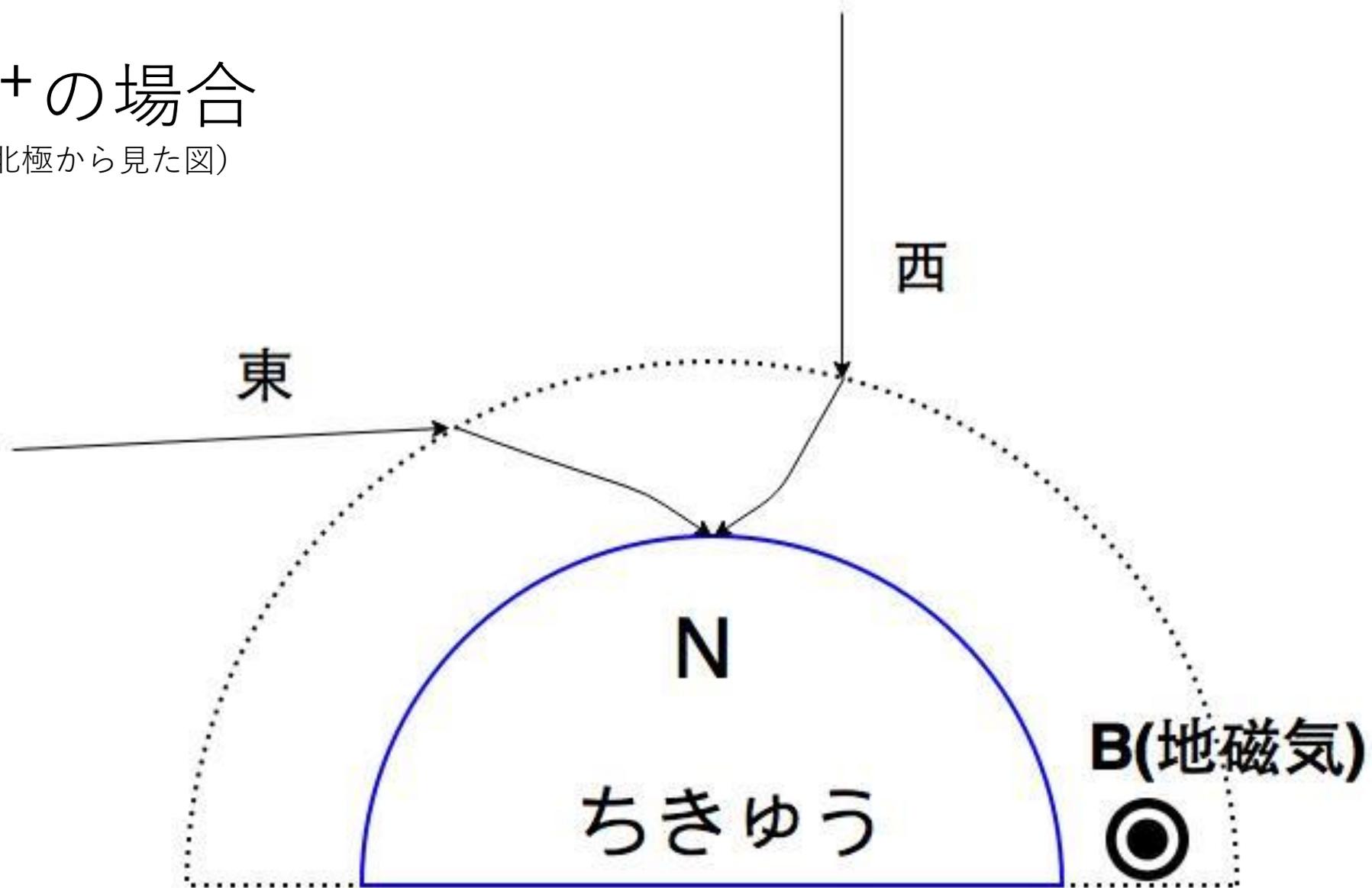
- 理論

- 1次宇宙線の軌道が地磁気によって曲げられるため、入射可能な粒子の最低エネルギーに差が生じる
- 2次宇宙線(ミューオン)は東からの方が、距離が長くなり、崩壊の可能性が高まる
- μ^+ は μ^- より多く存在している

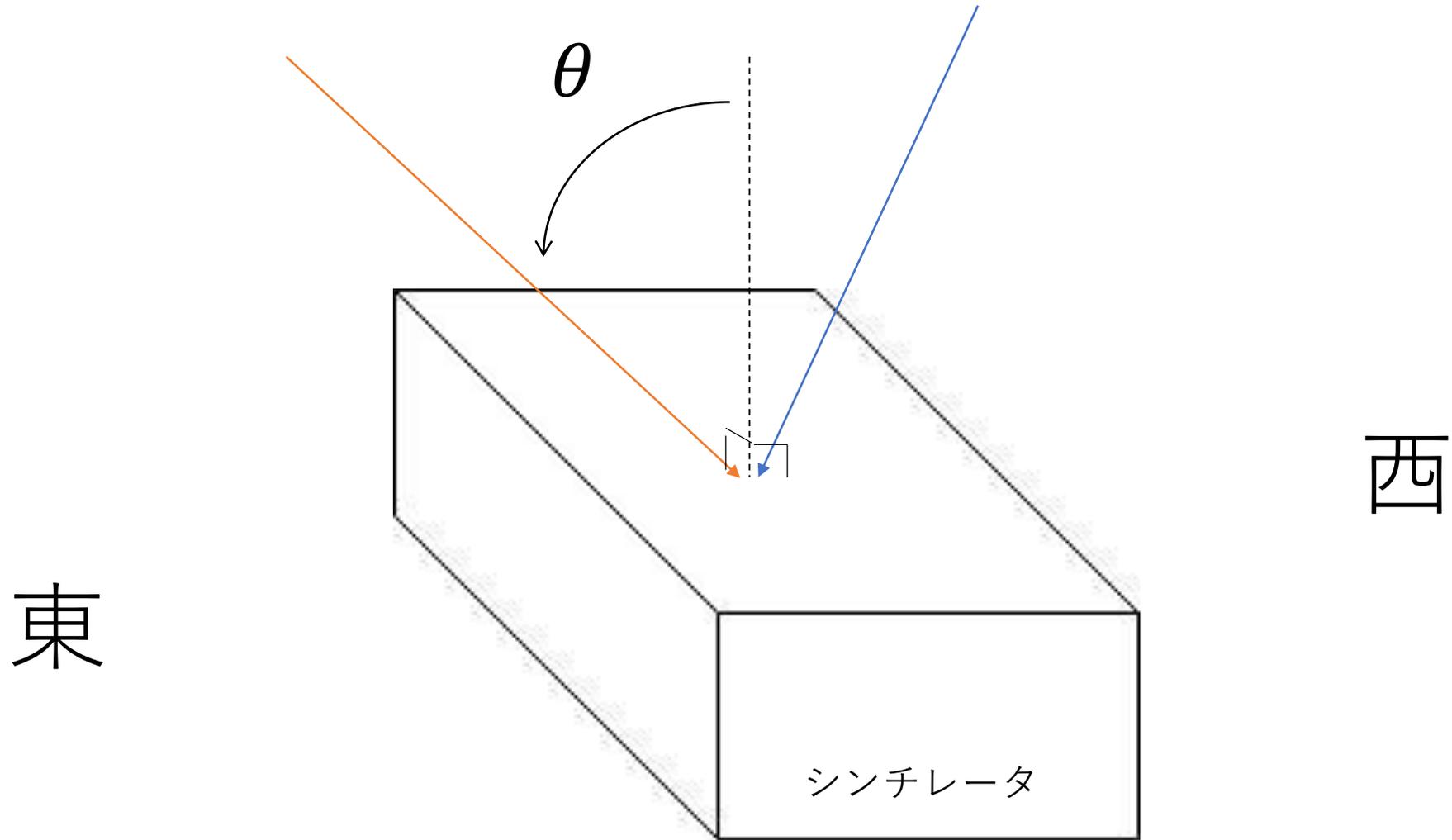
以上より、西からのミューオンが多く降ってくる

μ^+ の場合

(北極から見た図)

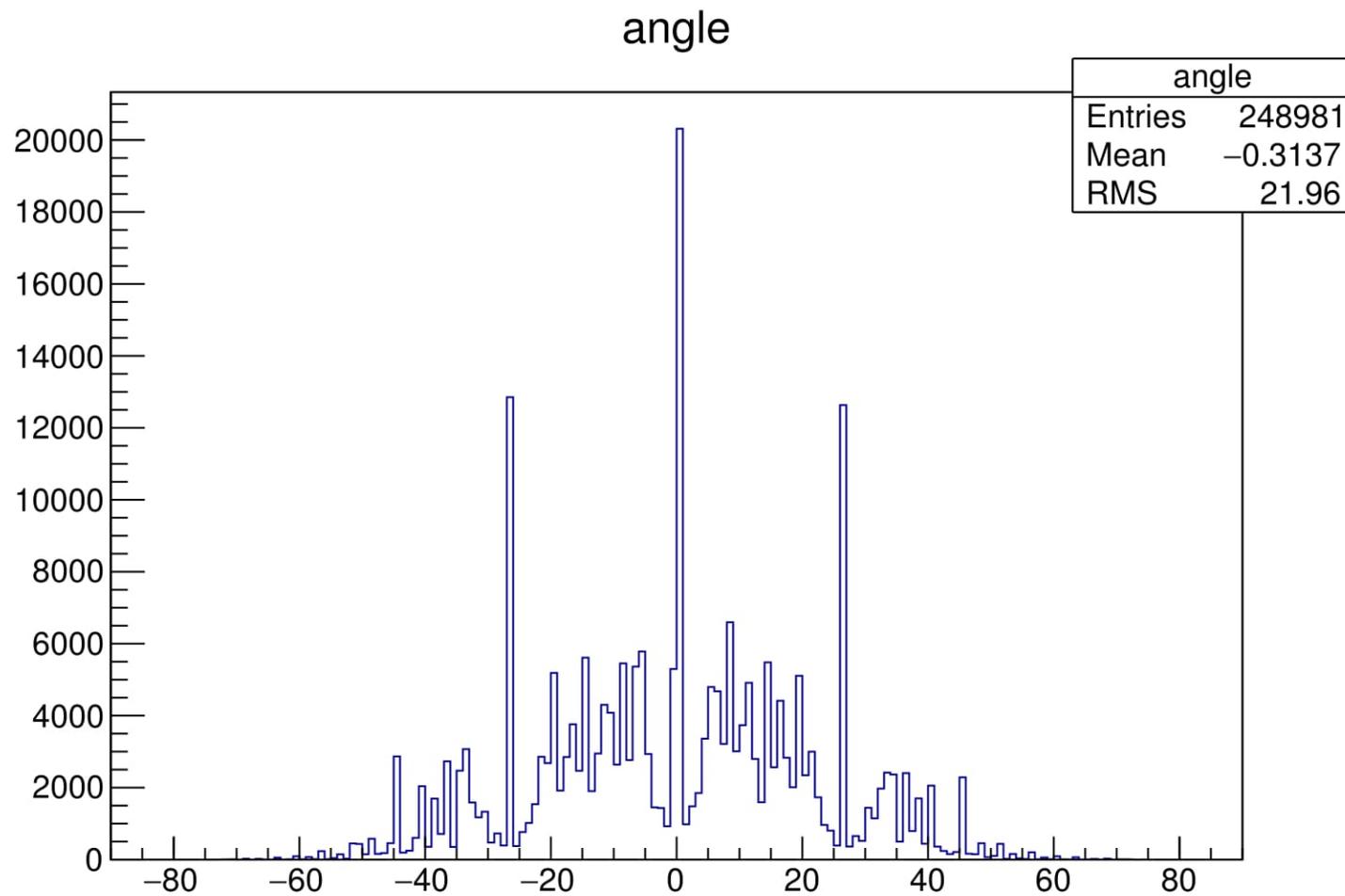


- シンチレータの東西方向について

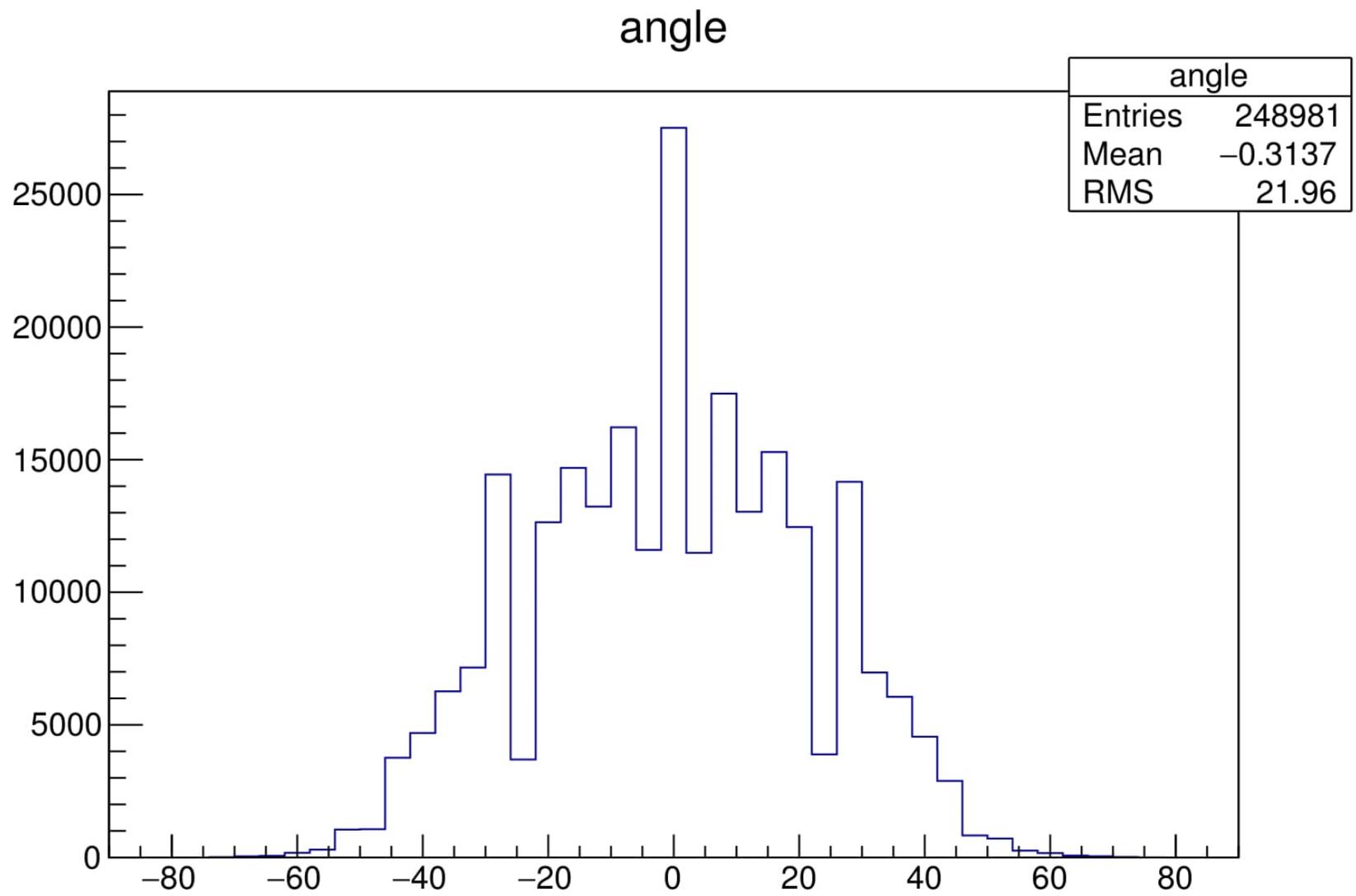


- 実験データ

ミューオンを測定しヒストグラムを得る



ミューオンのヒストグラム(7月31日測定)



ミューオンのヒストグラムbin幅4 (7月31日測定)

- 解析

西からのイベント数を w 、東からのイベント数を e として、以下の計算を行った。また、 w と e の誤差はそれぞれ \sqrt{w} 、 \sqrt{e} とした。

$$(\textit{Asymmetry}) = \frac{w - e}{w + e}$$

$$(\textit{Asymmetry} \text{の誤差}) = 2 \sqrt{\frac{we}{(w + e)^3}}$$

w, e はそれぞれ $+4^\circ$ 以上、 -4° 以下を積分したもので

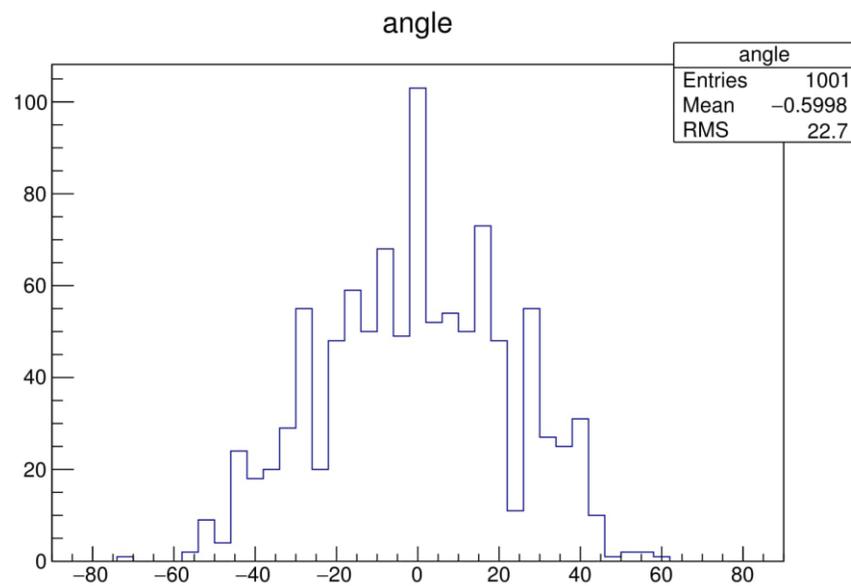
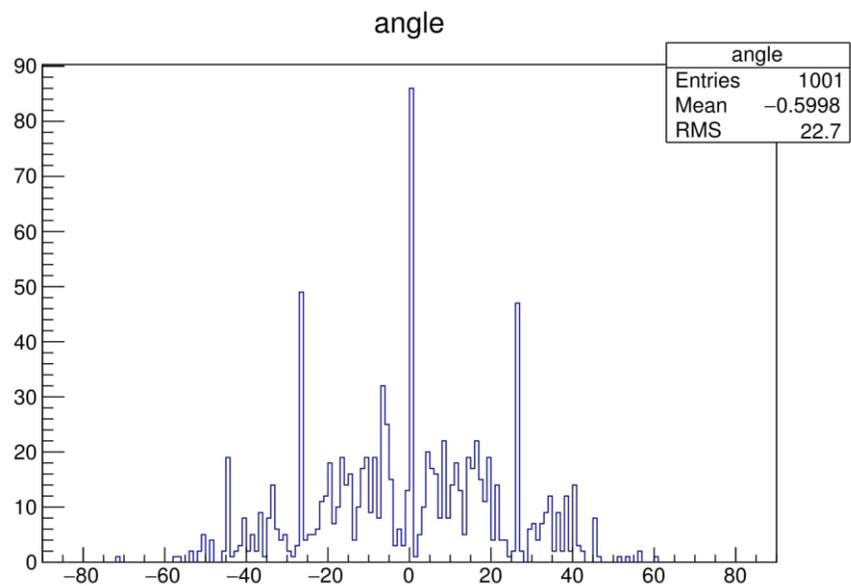
$$w = 1.111 \times 10^5, e = 1.104 \times 10^5$$

であったので

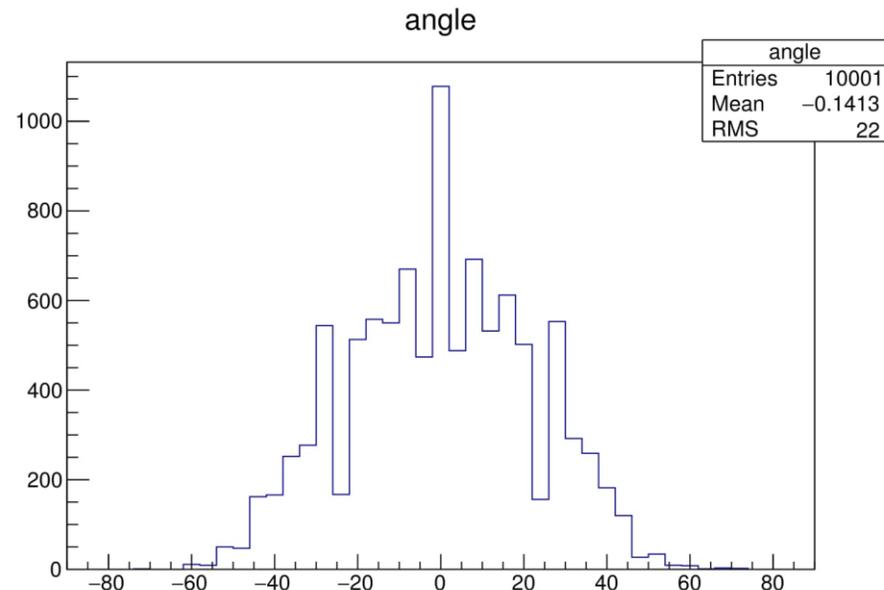
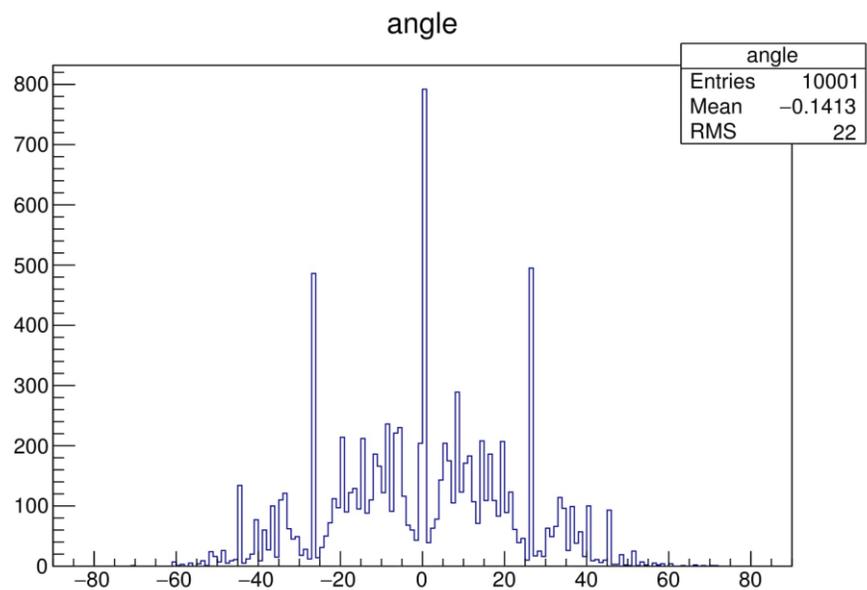
$$(\text{Asymmetry}) = 0.316(\pm 0.213)\%$$

となった。

7月31日

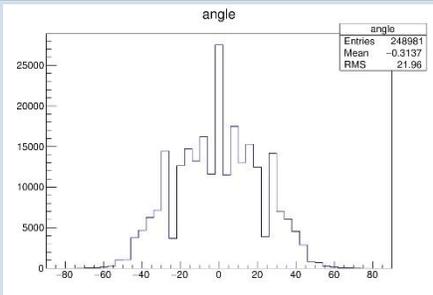


8月21日

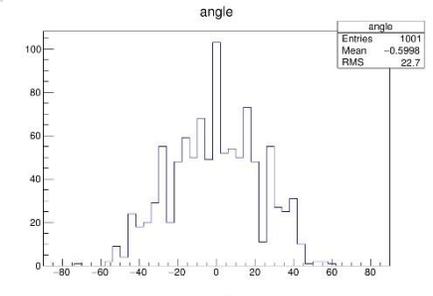


日付	イベント数	Asymmetry (\pm 誤差)%	ヒストグラム
----	-------	---------------------------	--------

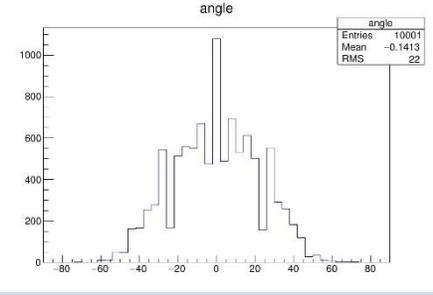
2017.7.31	248981	0.316(\pm 0.213)
-----------	--------	---------------------



2017.7.31	1000	1.22(\pm 3.33)
-----------	------	-------------------



2017.8.21	10000	-0.235(\pm 1.06)
-----------	-------	---------------------



- 考察

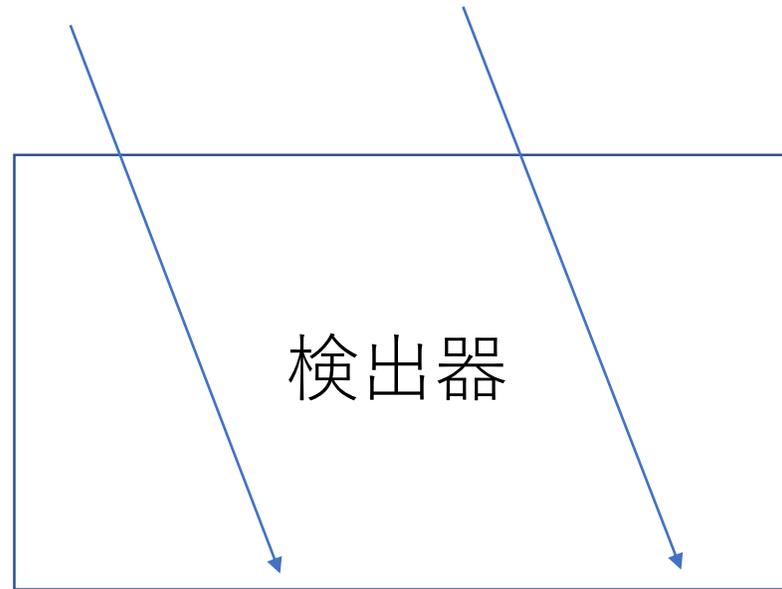
ヒストグラムと *Asymmetry* の値からは、東西効果が表れていることがわかる。

イベント数10000での場合、*Asymmetry* がマイナスになっているが、誤差でプラスに振れるので、誤差の範囲内である。

イベント数が多いほど、わかりやすい結果があらわれる。

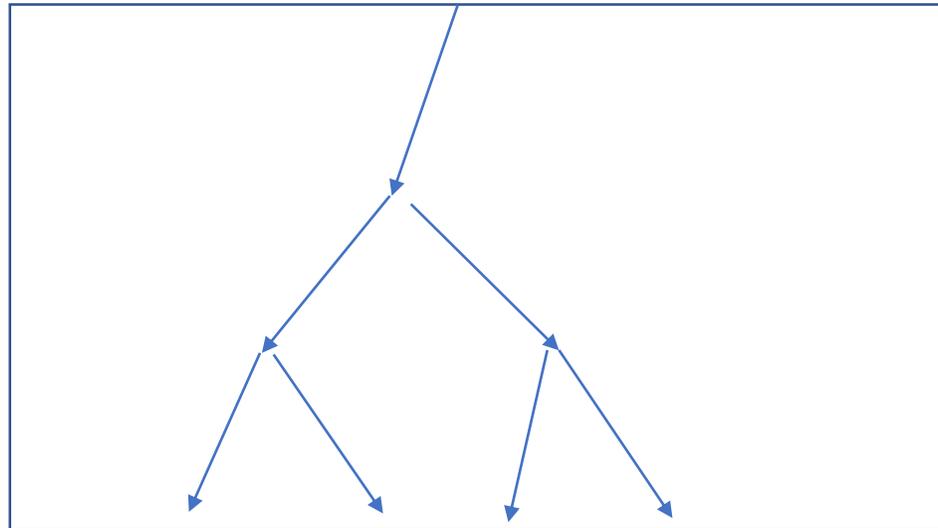
原理(ミューオン束)

- ミューオンが生成した時に同じ方向にほぼ平行に飛行するものがある。
- 今回は特に2本の場合について調べる。



原理(電磁シャワー)

- 宇宙からやってきた高エネルギー電子、光子が大気中の原子の原子核に当たった時に電子-陽電子対生成が起きる。
- このとき生成した電子-陽電子は原子核によるクーロン力によって加速され制動放射で光子(γ 線)を放出する。
- この反応が連鎖することで、電磁シャワーが起きる。

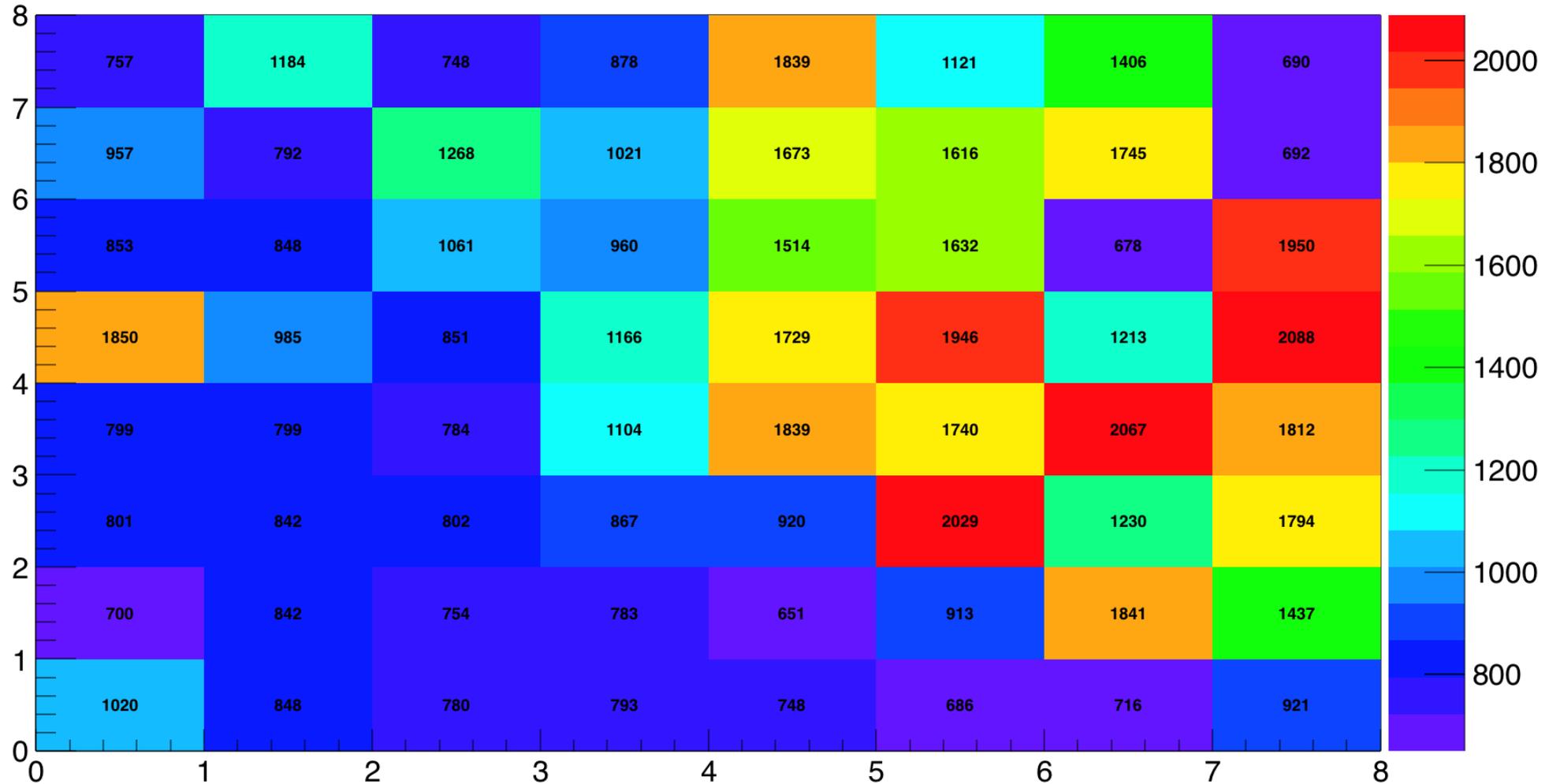


解析(ミューオン束・電磁シャワー)

- 電磁シャワーとミューオン束がどれくらいの割合で来ているか調べた。
- これらを発見しやすいようにthresholdの値を10,15にして各々200eventずつ測定した。

(10はミューオン束、15は電磁シャワーのためである)

電磁シャワーの例



結果

- ① 0821_2 Threshold 10 event 200 time 2275sec
- ② 0821_3 Threshold 15 event 100 time 1545sec
- ③ 0830_1 Threshold 15 event 100 time 1482sec

	ミュオン束(2本)	電磁シャワー	その他
①	98	19	83
② + ③	56+42=98	17+21=38	27+37=64

考察(ミューオン束・電磁シャワー)

- 参考にするデータを

Threshold 4 event 250000 time 7400sec

とする。これはミューオン1本以上を見るためのものである。

- ミューオン2本以上の割合は

$$\frac{98}{2280} \div \frac{250000}{7400} \times 100 = 0.127\%$$

- 電磁シャワーの割合は

$$\frac{38}{3000} \div \frac{250000}{7400} \times 100 = 0.0375\%$$

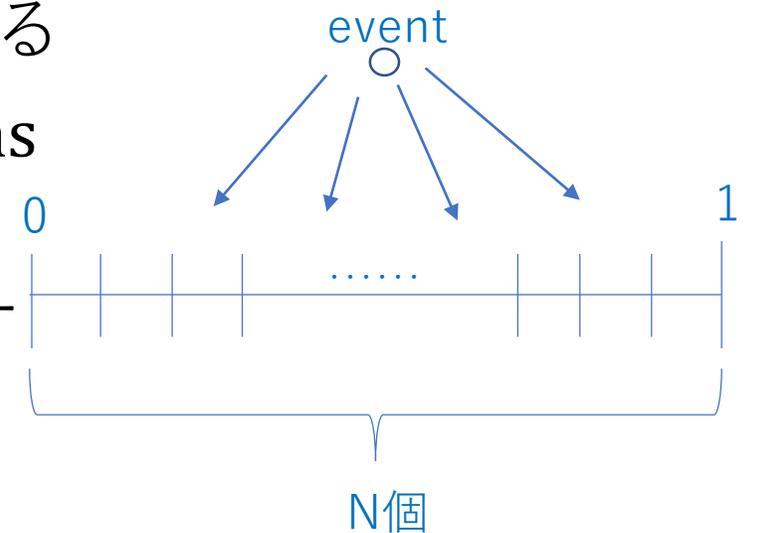
考察(ミューオン束)

- ミューオン束が2本が入ってくるとき、偶然異なる二点から入射したのか、それとも同じ点で発生したものが入ってきたのか調べる。
- 考えているデータより1秒間に34event起きている
- ミューオンが同時に計測されるのはおよそ300ns内に2つのミューオンが降ってきた時である
- Nを300nsの逆数とすると、1秒間に2本のミューオンが入る確率Pは

$$P = \frac{{}^N C_{34-1} \times (34-1)}{{}^N C_{34}} \times 2 = 6.73 \times 10^{-4} (s^{-1})$$

- よって7400秒間に $P \times 7400 = 4.98$ event起きる
- ミューオン2本のtotalは317.5eventより

- 偶然の割合は $\frac{4.98}{317.5} \approx 0.016$ よって約1.6%である



考察(ミューオン束・電磁シャワー)

- 電磁シャワーとミューオン束を見分けるのは非常に困難であった。
- 視認によって分析しているため精度は高くない。
- 割合はオーダー程度で見積もるのが良いと思われる。

改善点

- 軌跡より、ミューオン束と電磁シャワーを区別するのは難しそうである。
- 電子とミューオンの質量の違いから判断できるような装置を考えるのが良いであろう。
- 例としては、磁場をかけてその曲がり具合のちがいによって二つを区別する装置、などが考えられる。

説明（速度分布）

最初のチャンネルに信号が入ってから、各チャンネルの信号が一定値を超えるまでの時間データ(1ns単位)から宇宙線の速度を計算することを試みる。

- ・ 同じ列の最上段と最下段がどちらも反応したデータ（東西方向には傾いていない宇宙線）について、両者の時間差をとる。

（左から2，3列目は最上段破損の可能性があり2段目、8列目は同じく7段目を使用。）

予想

- ・光ファイバーの長さなどの要因では各チャンネル間のずれは変わらないはず。（幅ができない。中心位置がずれる。）
- ・宇宙線の南北の傾きによって速く見えるものと遅く見えるものが出てくるが、中心位置は変わらないはず。（幅ができる。中心位置がずれない。）

縦70cmに及ぶ測定装置をほぼ光速の宇宙線が通るため、かかる時間はおよそ2ns。

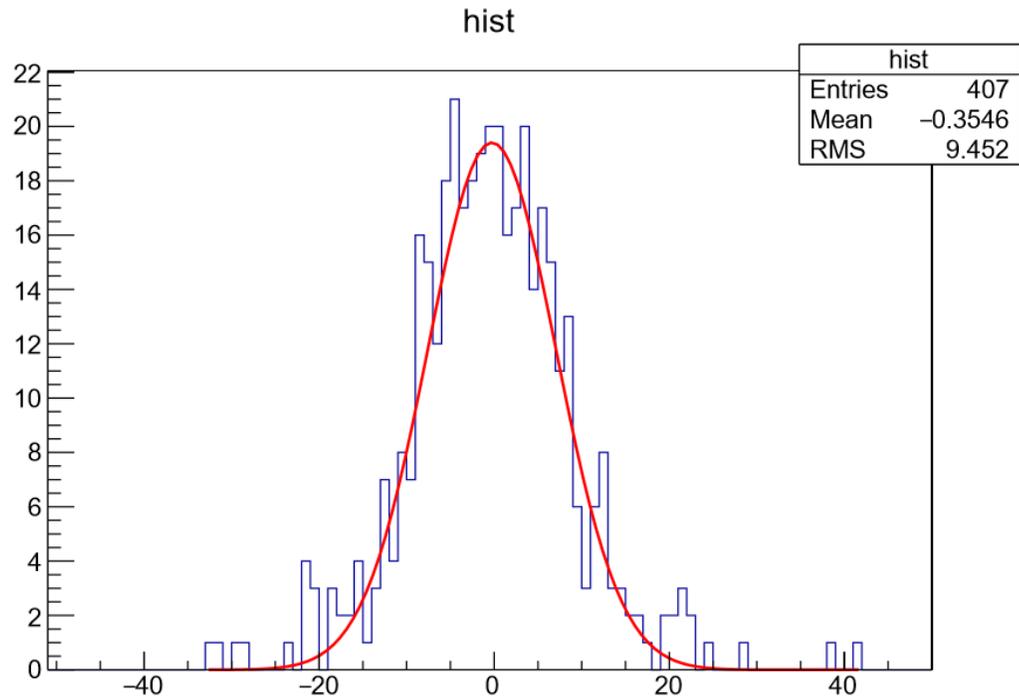
実際には斜めに傾いて入ってくるためそれより長くなり、数nsほどの所にピークができると予想できる。

結果

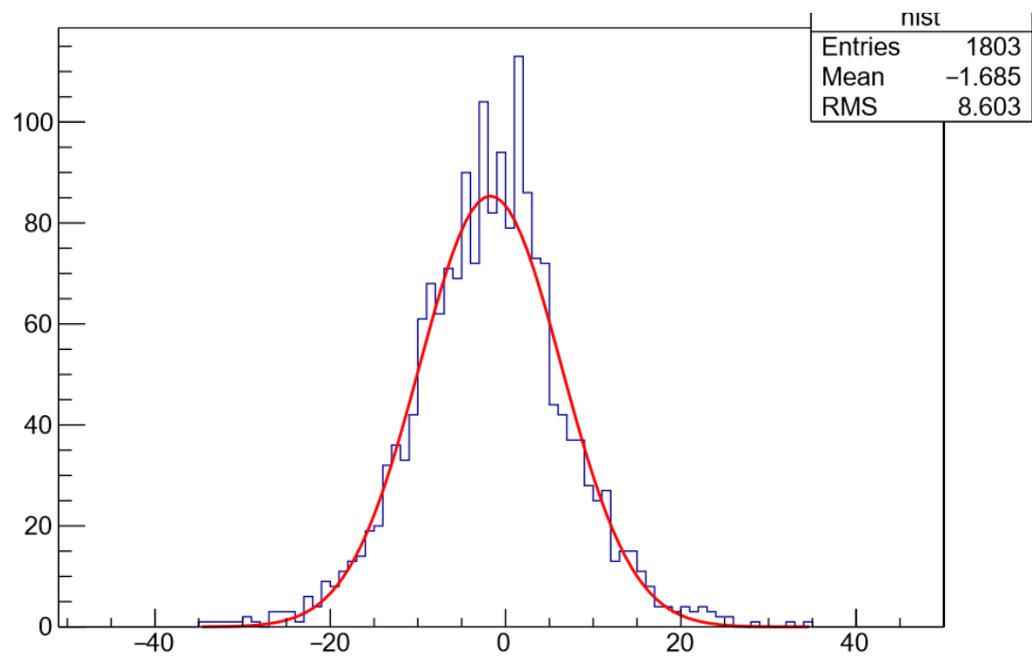
→7/31のデータから3桁数以上のデータが取れたのは2列目、3列目、5列目のみだった。

時間差(ns)を横軸、カウント数を縦軸にとってヒストグラムにする。

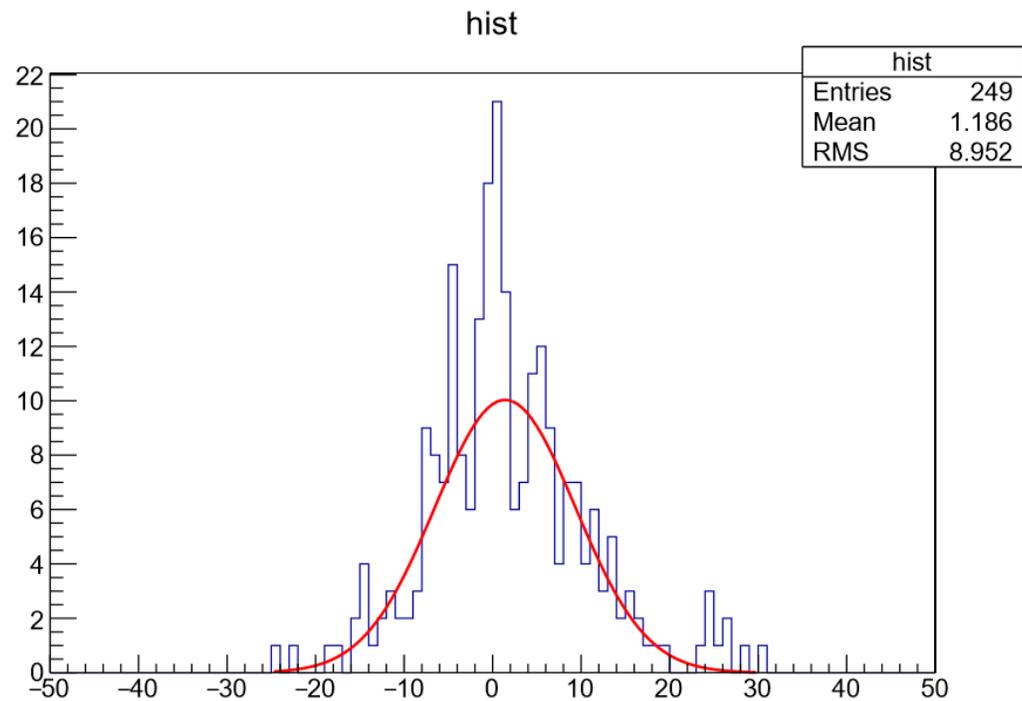
±50ns間を表示して正規分布でフィッティング。
中心の値を求める。



← 2列目の結果(407 entries)
mean - 0.265 ± 0.399



← 3列目の結果(1803 entries)
mean - 1.73 ± 0.195



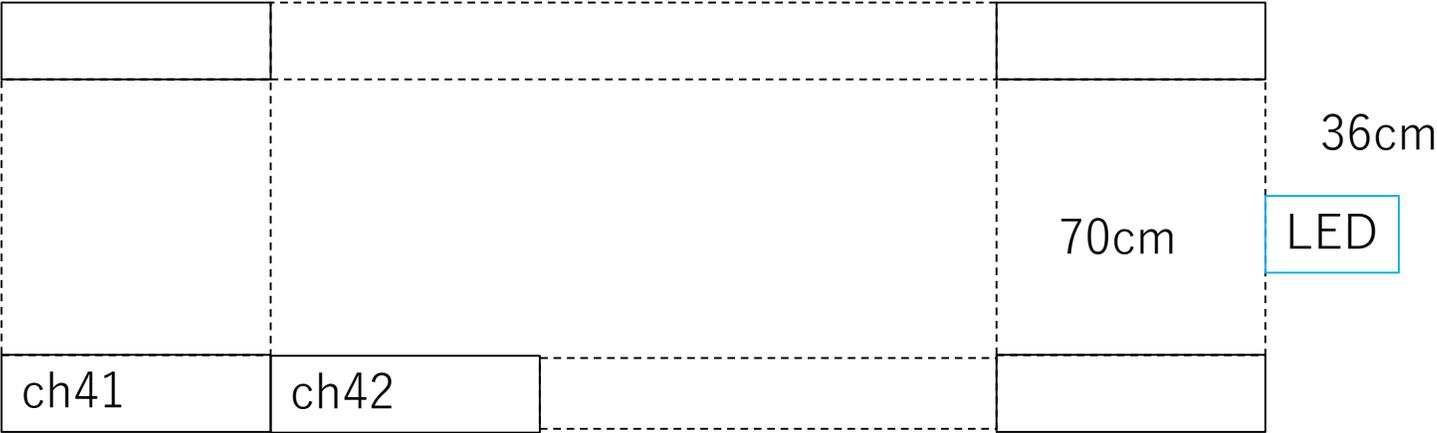
← 5 列目の結果(249 entries)
mean + 1.41 ± 0.598

マイナス側にピークが来るなど、是正の必要あり。

検出器の癖によるずれを測る。

暗幕内に設置したLEDを光らせ、各チャンネルの時間差を見る。

LEDは最右列のすぐ右、最上段LEDの底から36cm下の位置にあった。



仮に最右列に重なっていたとしても
最上段LEDの中心まで36.5cm、
最下段LEDの中心まで33.5cmであり、光速での時間差は
0.1ns。

実際のLEDは8×8の平面から外れており、右方向にもずれているため差はさらに小さくなる。

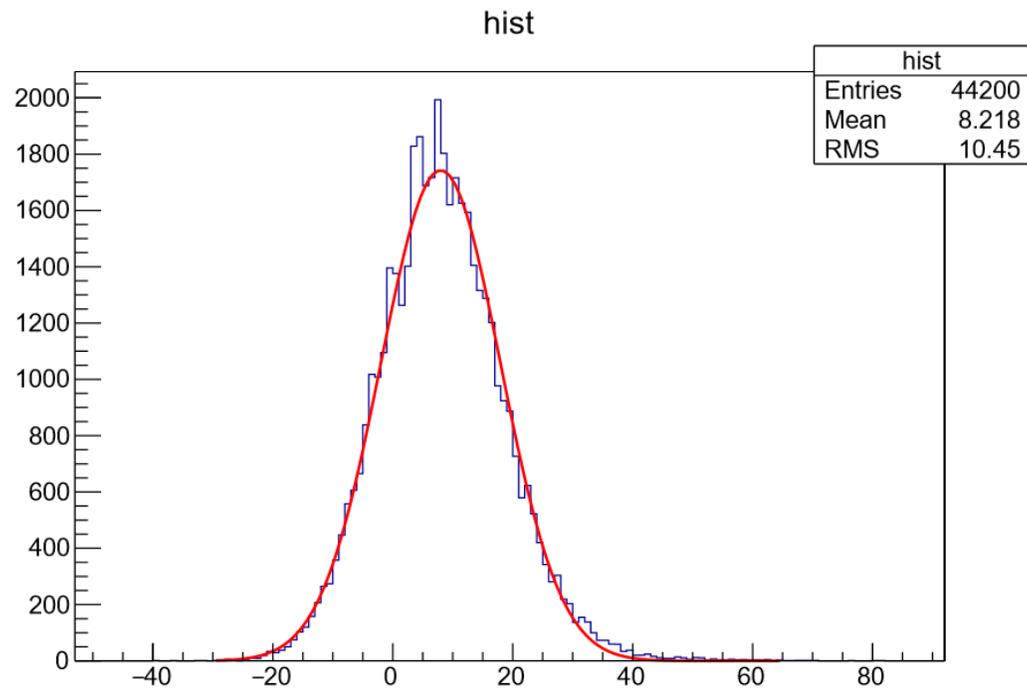
→LEDの光の届く時間の差は無視してもよい。

○測定

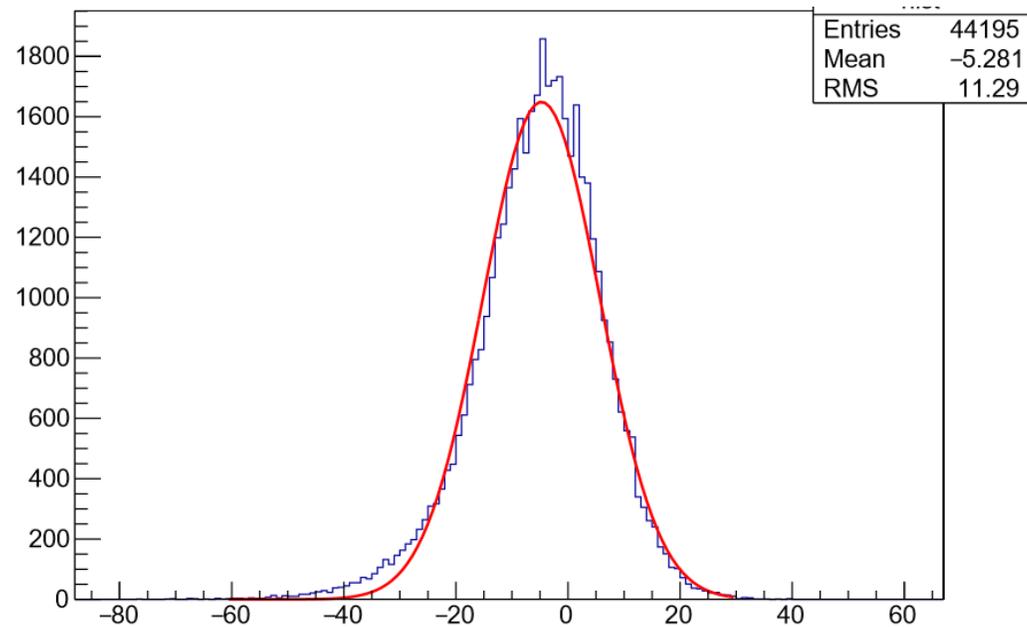
LEDにかける電圧はパルス波

high 0V, low -1.6V, duty 99.980%, 1kHz

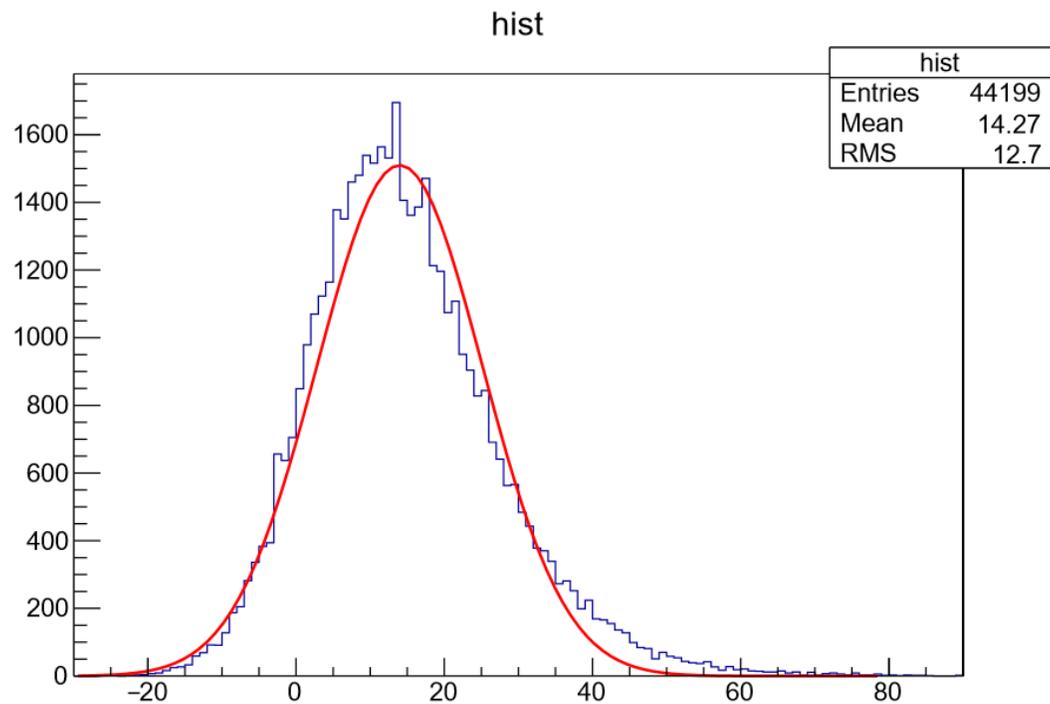
dac code 200, threshold 50で計測。(9/15)



← 2列目の結果(44200 entries)
mean + 7.98 ± 0.0489



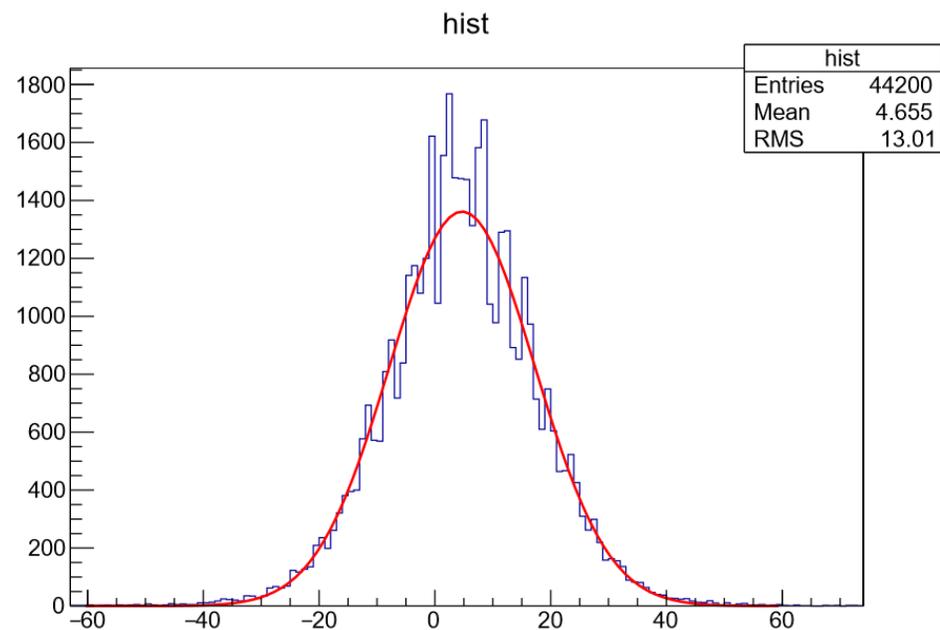
← 3列目の結果(44195 entries)
mean - 4.75 ± 0.0582



←5列目の結果(44199 entries)
mean + 13.98 ± 0.0626

この補正を考えると、それぞれの列で宇宙線が通過した時間は、
2列目で -8.2 ± 0.4 ns
3列目で $+3.0 \pm 0.3$ ns
5列目で -12.6 ± 0.7 ns
これでも説明がつかなかった。

ここでch41とch42(左下で隣あった2つ)を比べる。
結果は下のグラフのようになり、 $\text{mean} + 4.70 \pm 0.061$ であった。



LED光の角度依存性や光ファイバーの長さの差だけでは説明がつかない。

考察、反省

今回の実験では速度分布を求めることができなかった。

宇宙線がエネルギーを落とし始めてから最低限のエネルギーを放出するまでの時間が影響したと思われる。

この時間がチャンネルごとに違い、速度を求めることができなくなった。

- ・ MPPCのチャンネルごとに受けたエネルギーと放つ電気信号の関係が異なる可能性がある。

- ・ シンチレーター内で宇宙線が光を放出したとき、そのエネルギーが高ければ瞬間的に反応し、低ければ少し時間をかけて反応する。

改善案

正確な速度分布を計算するためには全てのチャンネルについてエネルギーと時間の関係を調べる必要があり難しいと思われるが、以下のようにすれば比較的容易になる可能性がある。

- ・ データ数を増やす。
- ・ 今回は「一定以上の電気信号が出たもの」をデータとして使ったが、「一定以上一定以下」のように絞ってやれば各チャンネルで一定に近い値が出るのでは。

