

宇宙線ミュオン の 観測

課題演習 A1 阿部倫史 小倉将紘 栗林宗一郎
島地哲平 春名純一 山本和樹

2017年3月28日 課題演習A1A2発表会

導入

- 宇宙空間から降り注いでいる放射線のことを宇宙線という。宇宙から大気中に入射する放射線が1次宇宙線、大気中での反応によってできる2次粒子からの放射線が2次宇宙線である。2次宇宙線の一つである π 中間子は次のような反応を起こす。



- ミューオンは大気中であまり吸収されないため地表で観測される2次宇宙線の大半を占めている。今回はこの宇宙線ミューオンを観測した。

導入(ミューオンの天頂角分布)

- μ の天頂角分布が $(\cos \varphi)^n$ に比例することを説明する。
- 天頂角 φ から飛来する宇宙線の強度を考える。
- 簡単のため、宇宙線は常に地上から距離 X の地点で φ 方向から飛来すると仮定する。
- 宇宙線の強度 $J(X, \varphi)$ は $\varphi = 0$ で大気の厚さ $\frac{X}{\cos \varphi}$ を通過したときの強度 $J(\frac{X}{\cos \varphi}, \varphi = 0)$ に等しい。つまり、

$$J(X, \varphi) = J\left(\frac{X}{\cos \varphi}, \varphi = 0\right) d\Omega$$

導入(ミューオンの天頂角分布)

- 大気を通過する宇宙線の強度は平均自由行程 λ で指数関数的に減少するとして $J(X, \varphi) = J_0 \exp(-\frac{X}{\lambda})$ とすれば

$$\begin{aligned} J(X, \varphi) &= J\left(\frac{X}{\cos \varphi}, \varphi = 0\right) d\Omega = J(X, \varphi = 0) \frac{J\left(\frac{X}{\cos \varphi}, \varphi = 0\right)}{J(X, \varphi = 0)} d\Omega \\ &= J(X, \varphi = 0) \exp\left(-\left(\frac{1}{\cos \varphi} - 1\right) \frac{X}{\lambda}\right) \end{aligned}$$

- いま $\varphi \ll 1$ として、

$$\begin{aligned} \exp\left(-\left(\frac{1}{\cos \varphi} - 1\right) \frac{X}{\lambda}\right) &\sim 1 - \left(\frac{1}{\cos \varphi} - 1\right) \frac{X}{\lambda} \sim \left(1 + \frac{1}{\cos \varphi} - 1\right)^{-\frac{X}{\lambda}} \\ &= (\cos \varphi)^{\frac{X}{\lambda}} \end{aligned}$$

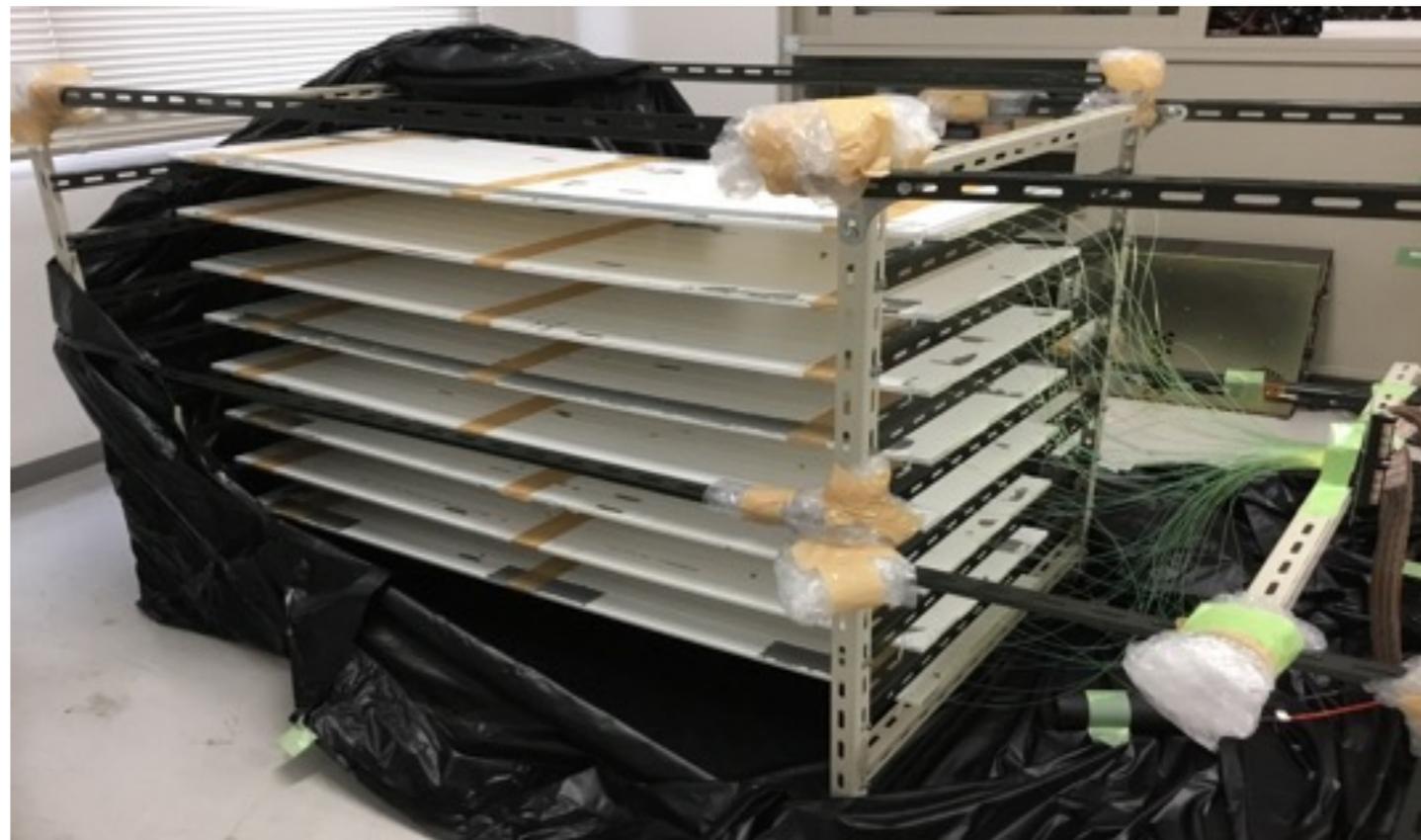
- よって宇宙線の天頂角分布は $(\cos \varphi)^n$ に比例すると考えられる。

導入(ミューオンの天頂角分布)

- μ の天頂角分布は $(\cos \varphi)^n$ に比例しそう。実験的には μ の場合、 $n=2$ であることが知られている。
- 観測される分布はフラックスに検出時間と検出器の面積と立体角をかけた、複雑な式で表されることになる
 - 今回我々はシミュレーションによって θ の分布を計算することも試みた。

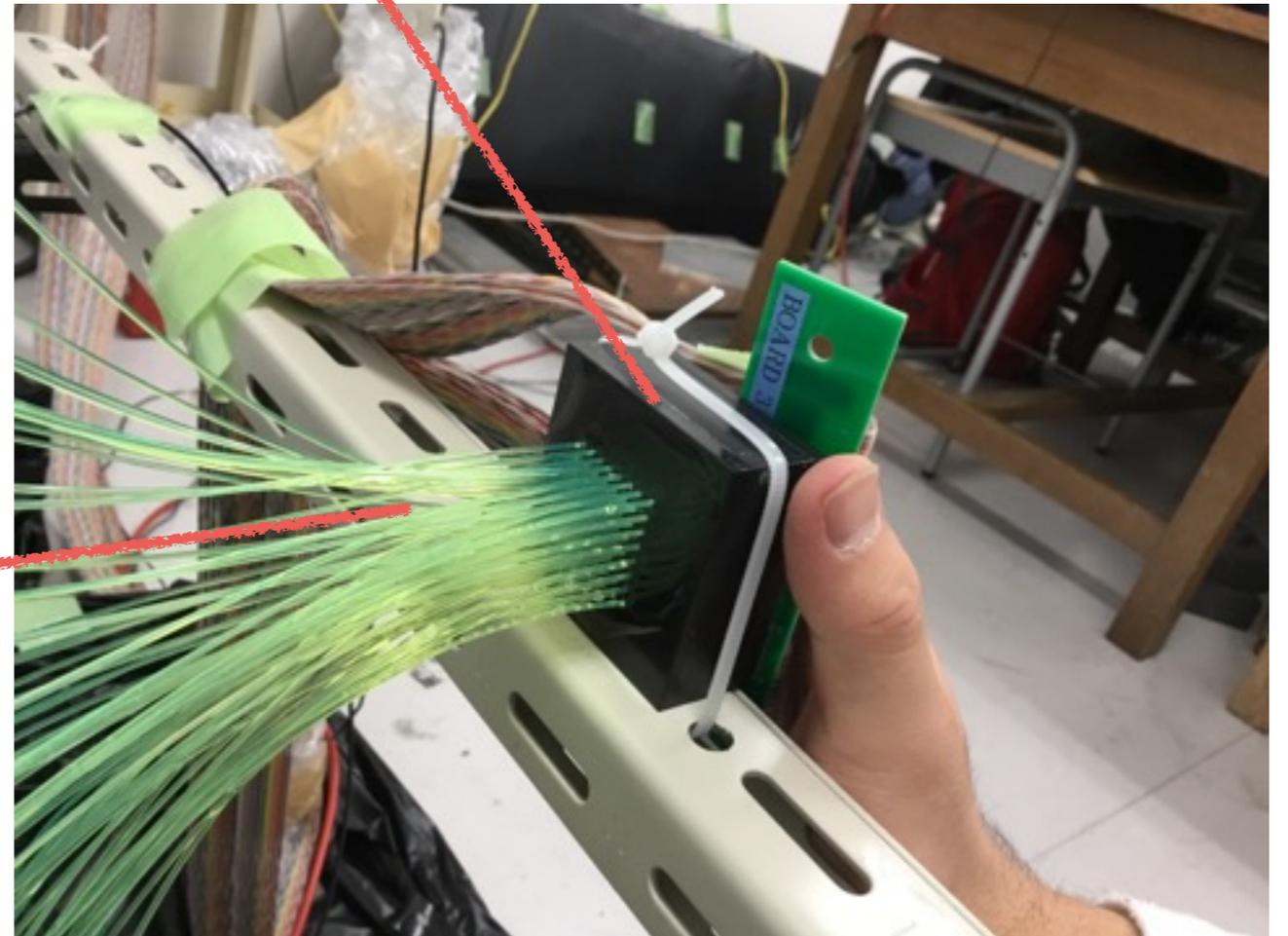
実験装置

- 検出器(シンチレータ)
 - 1層あたりシンチレータ(幅5cm 長さ120cm)×8つ
 - 10cm間隔で計8層
 - 全部で64ch



実験装置

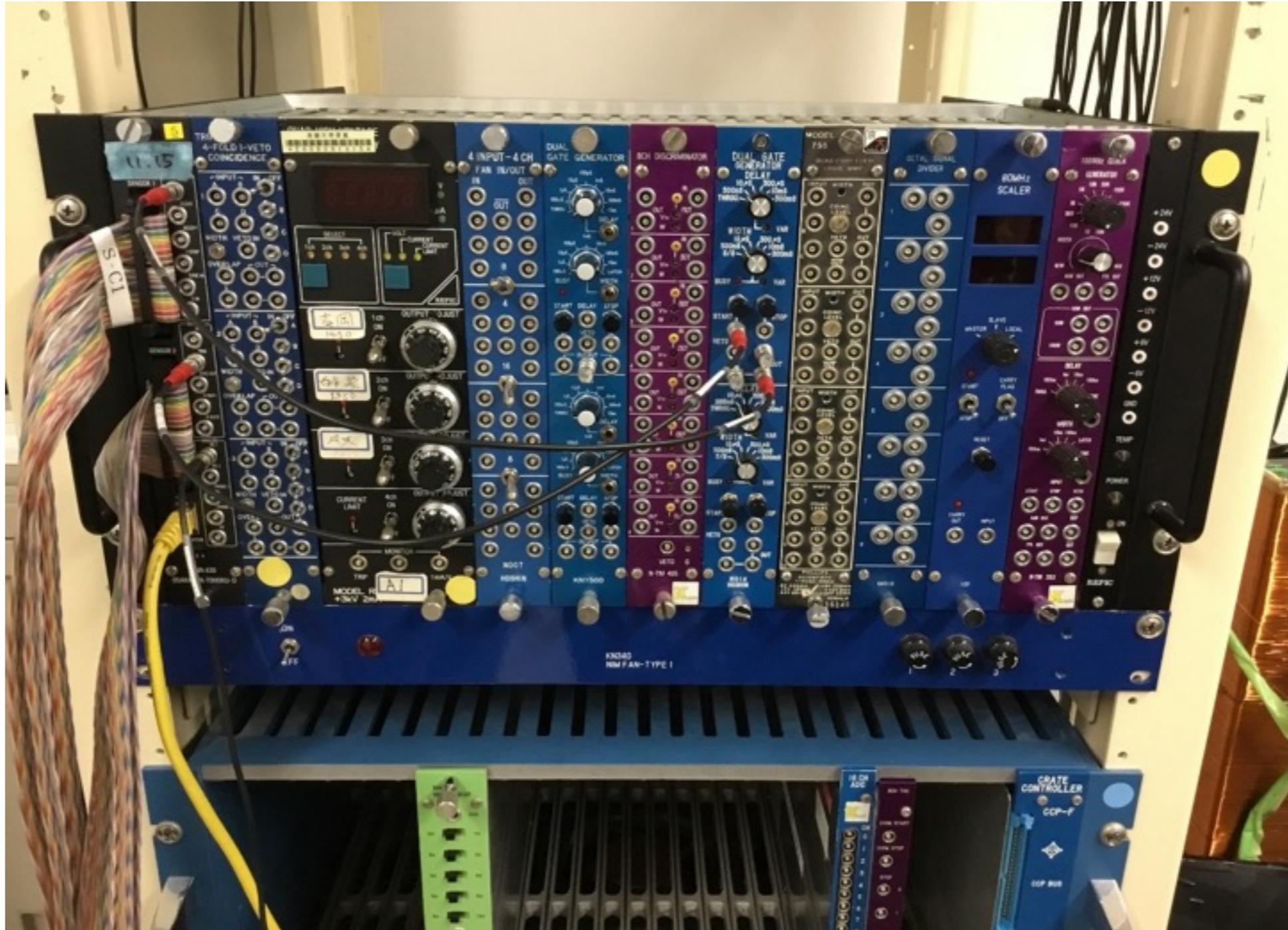
- MPPC (Multi Pixel Photon Counter)
 - 入射光子によりはじき出された光電子の電荷を記録する
 - 光子数計測が可能
 - $8 \times 8 = 64$ ch読み出し可能
- 波長変換ファイバー



実験装置

- MPPC用エレキ(EASIROCモジュール)
- トリガーを3hitに設定した。
- 1moduleあたり32ch読み出し可能。今回は2module用いる。
- ヒットタイミングは測定できない。ある程度の時間幅の電荷情報を測定している。

実験装置 (EASIROC Module)



実験装置



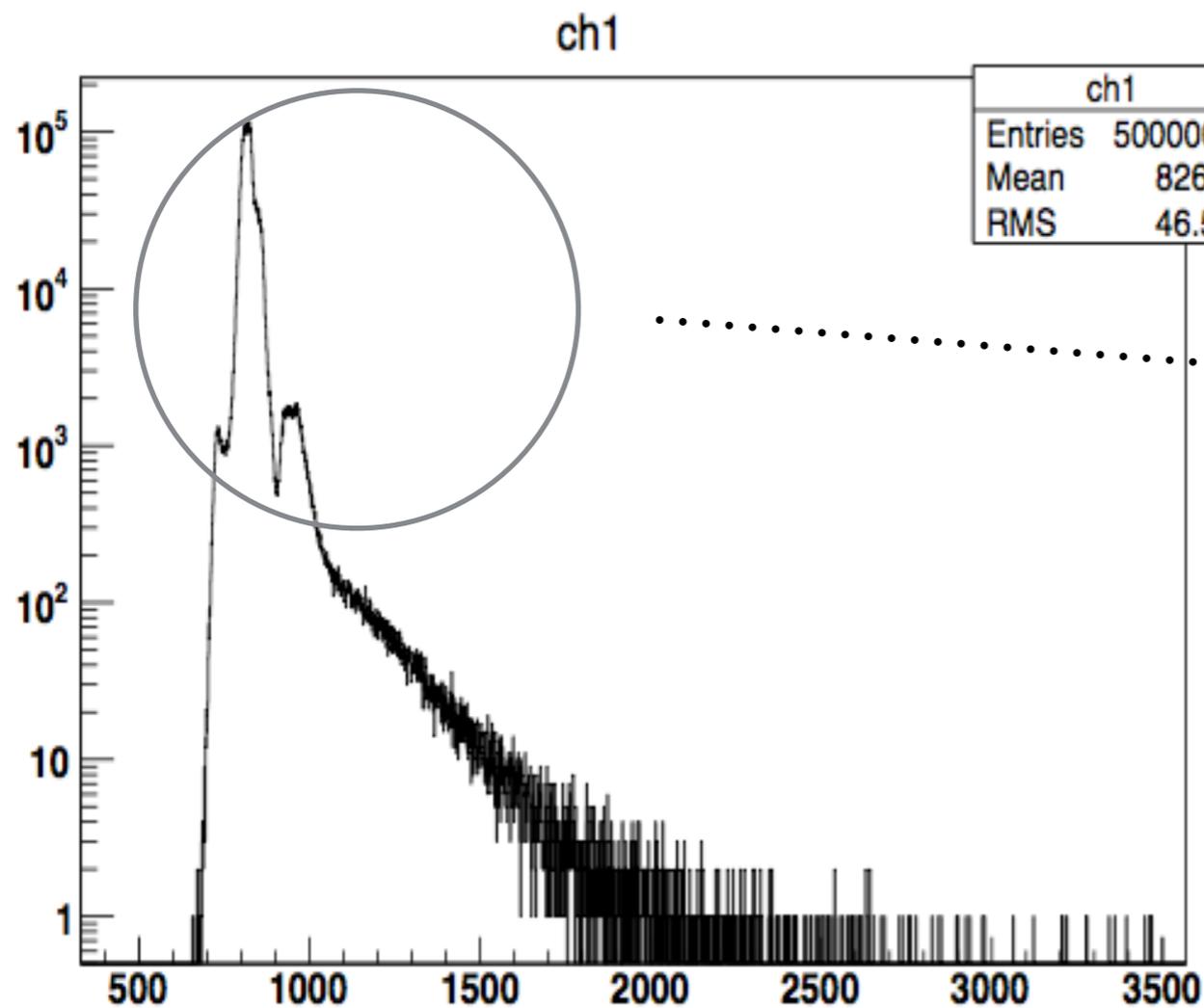
予備実験(光量漏れチェック)

- 実験装置を黒いシートで覆い、外からの光を遮断した。そして中に光電子増倍管を入れておき、それをオシロスコープで確認することで光が遮断されていることを見た。

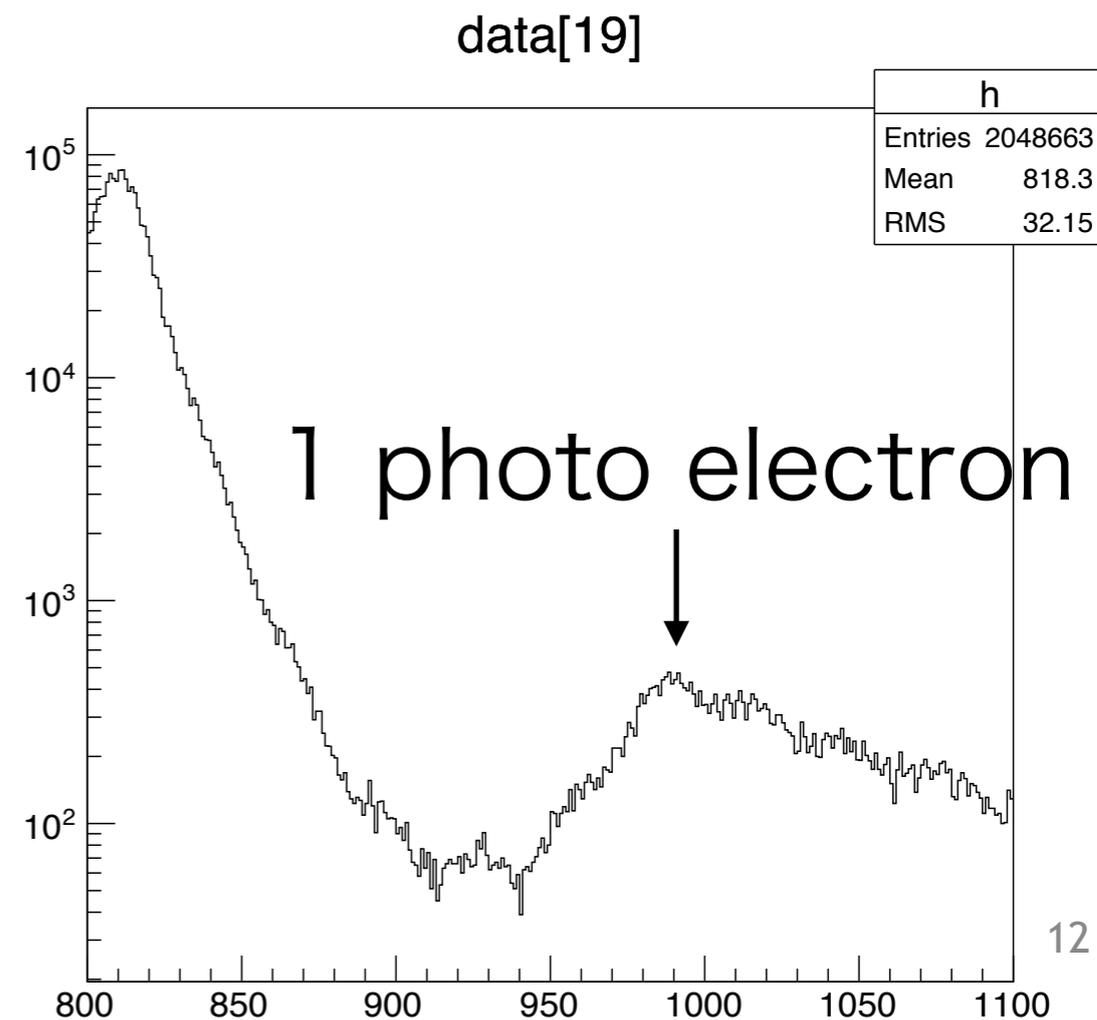


測定(MPPPCの光量分布)

- 降り注いでくるミュオンのエネルギーに対するエントリー数を測定した。
- ADCカウントはエネルギーに対応している。



ADCカウント



ADCカウント

測定(宇宙線の観測)

- 観測は2月7日から2月27日まで行った。
- エアコンで気温20度を保ち、窓は閉め切り、24時間稼働した。また、数日おきに稼働しているか確認を行った。
- 解析には2月14,15日のデータを主に用いた。

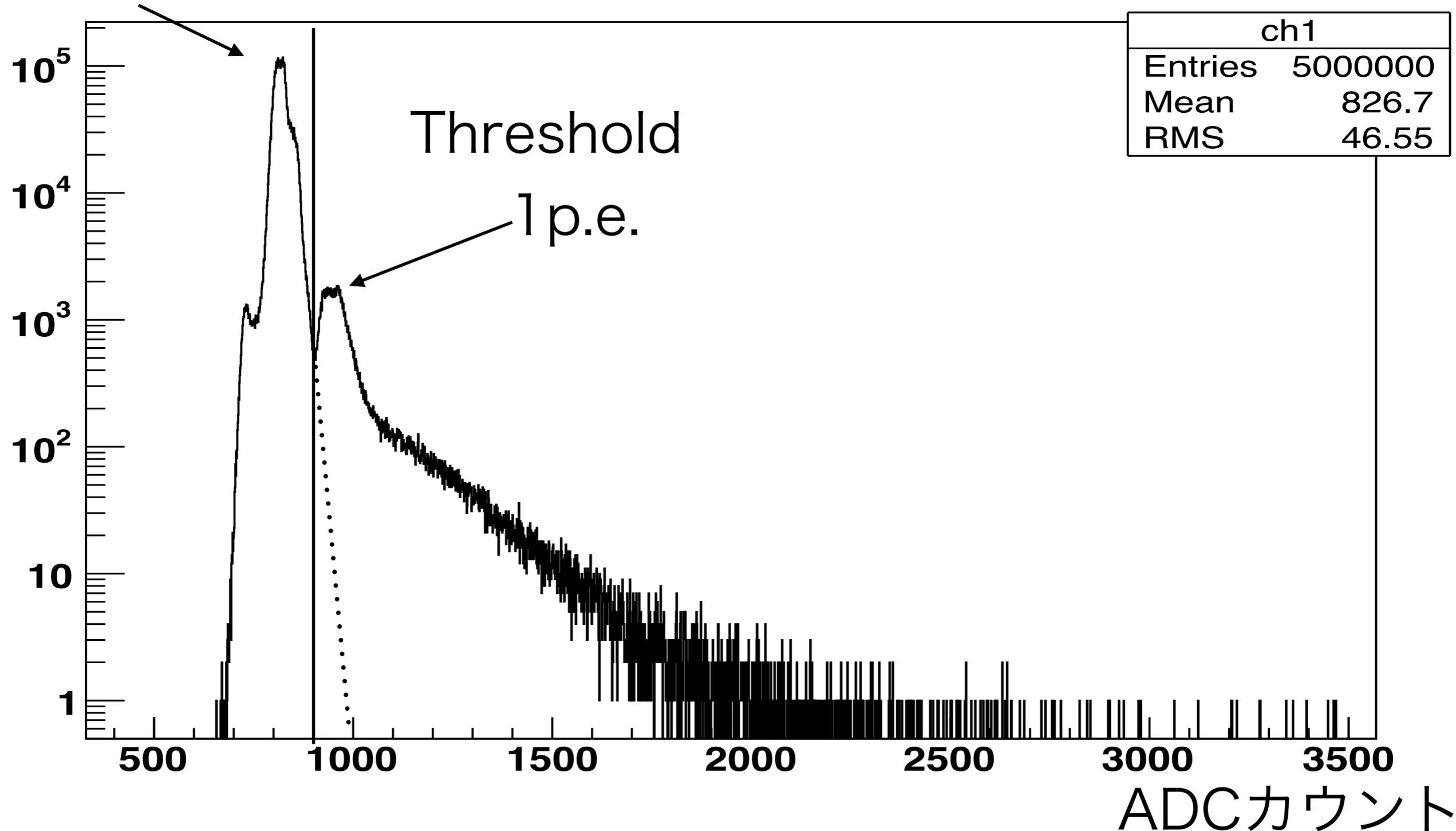
測定(宇宙線の観測)

- 本実験のミュオン測定の際シンチレータが3個以上鳴ったものを取り出して計測した
 - Hit thresholdは、ADCカウントに対するミュオンのエントリー数の分布図において、最初のピークの後初めて極小となるところを採用した
 - 1p.e.の部分にPedestalも含まれていると考えられるがこれ以上高い位置でHit thresholdをかけるとミュオンがあまり明瞭に観測できなくなると考えてこの位置でかけた。

測定 (宇宙線の観測)

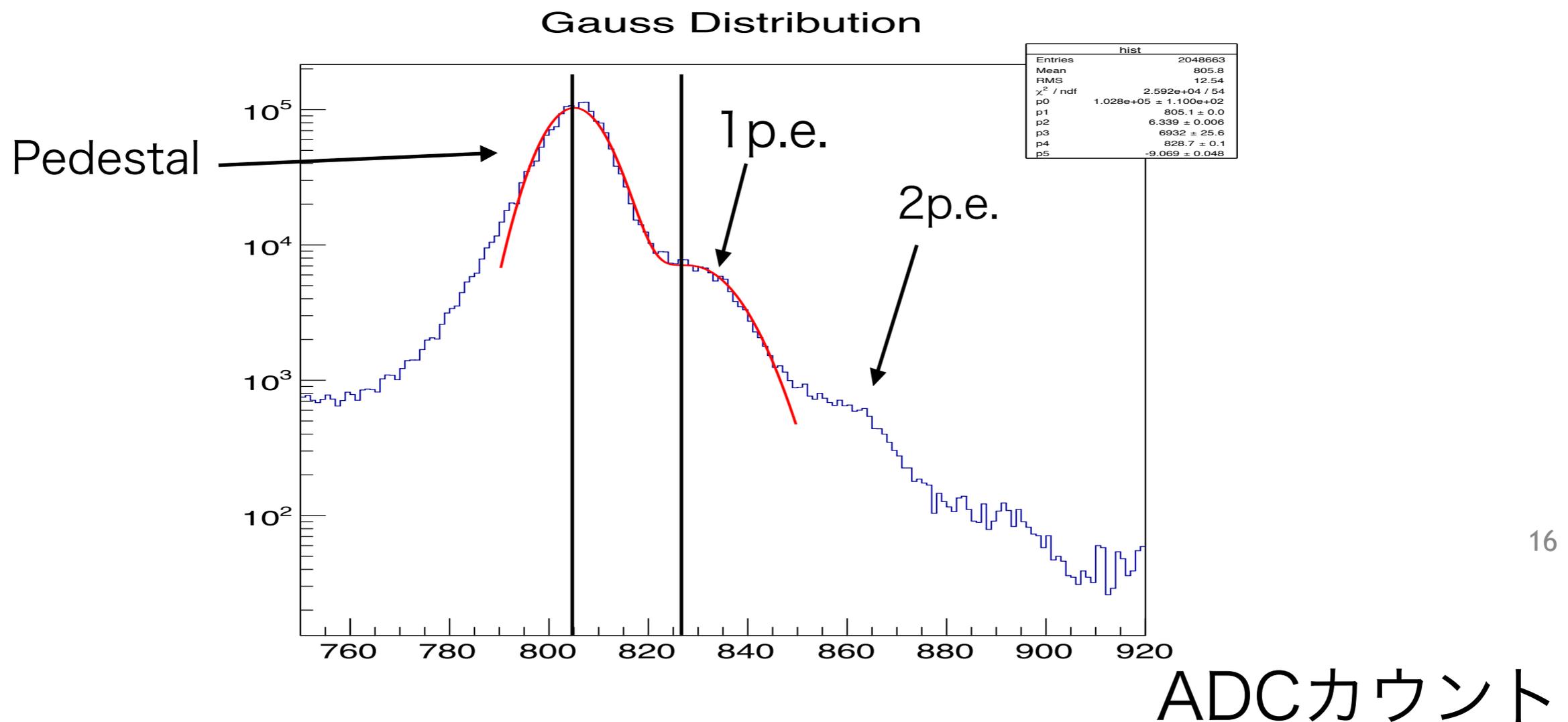
Pedestal

ch1

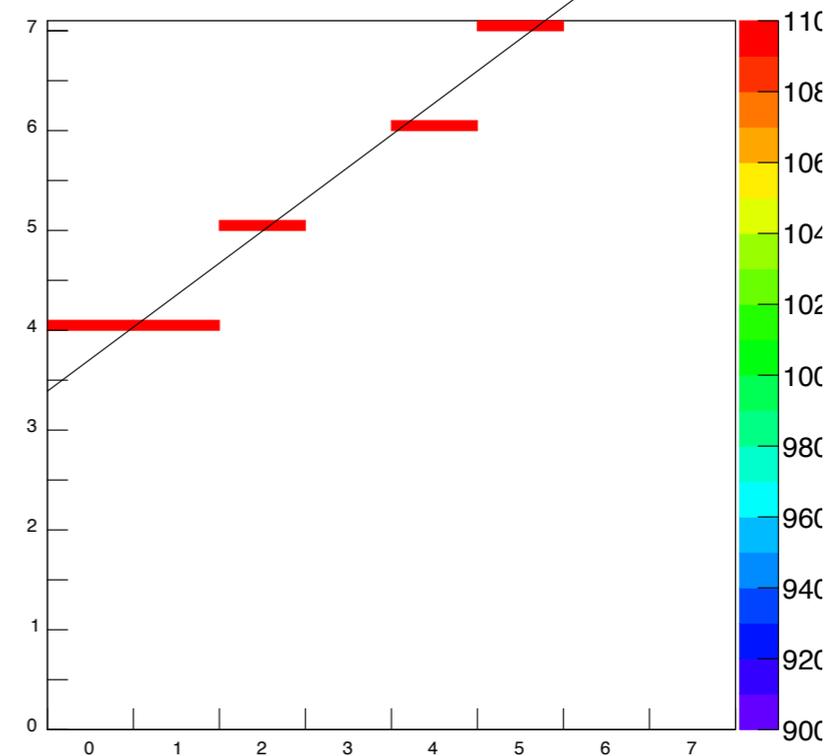
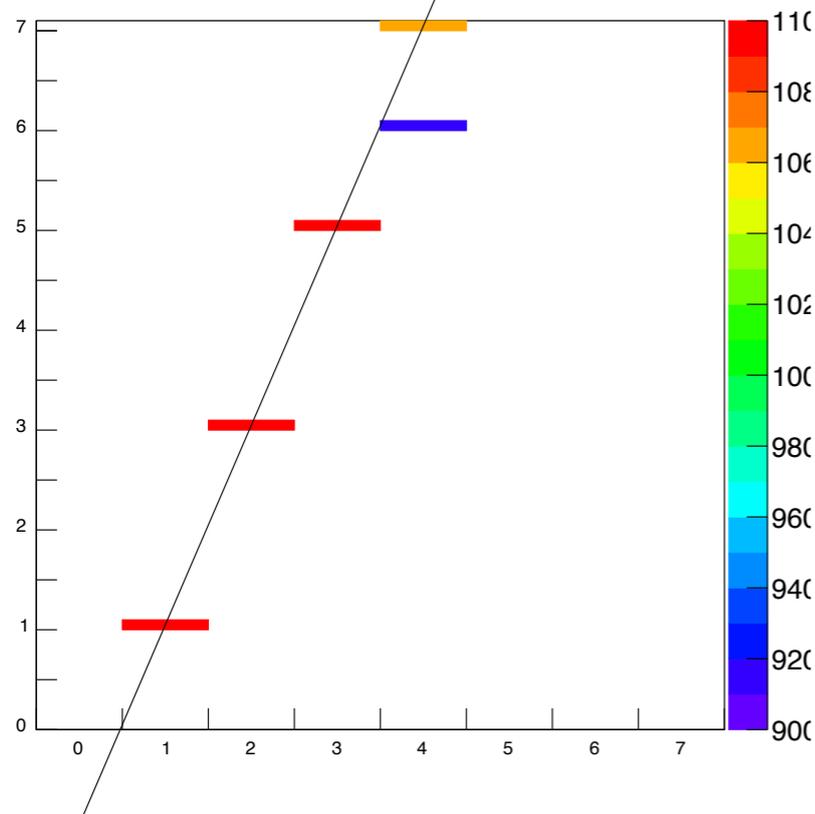
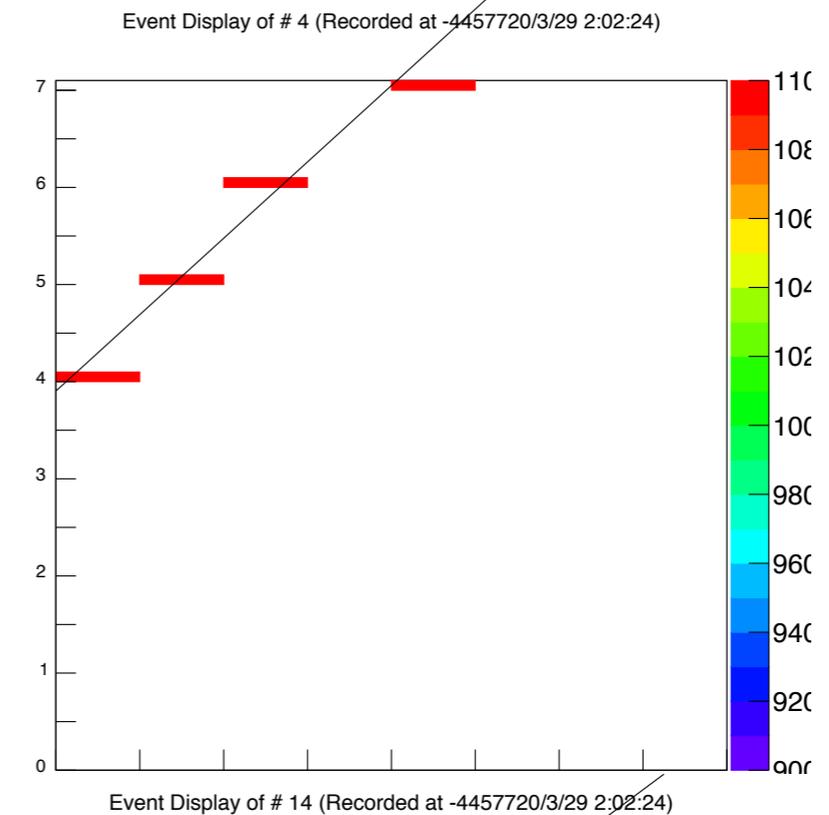
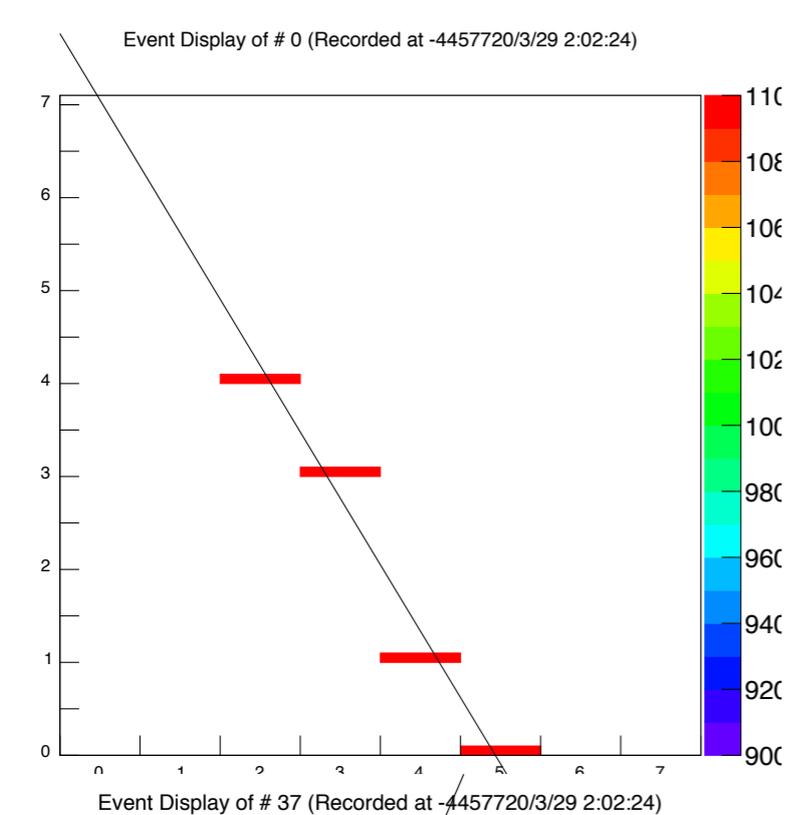


測定（宇宙線の観測）

- Pedestalと1p.e.の部分をGaussianでfitしたものの
- 1p.e.はおよそ23ADCカウントに対応する。

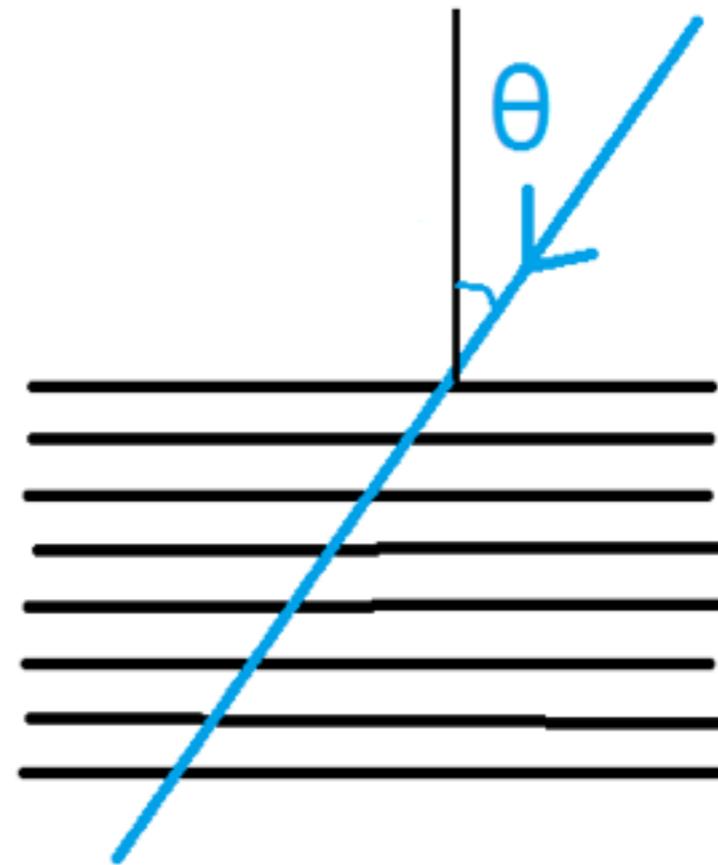
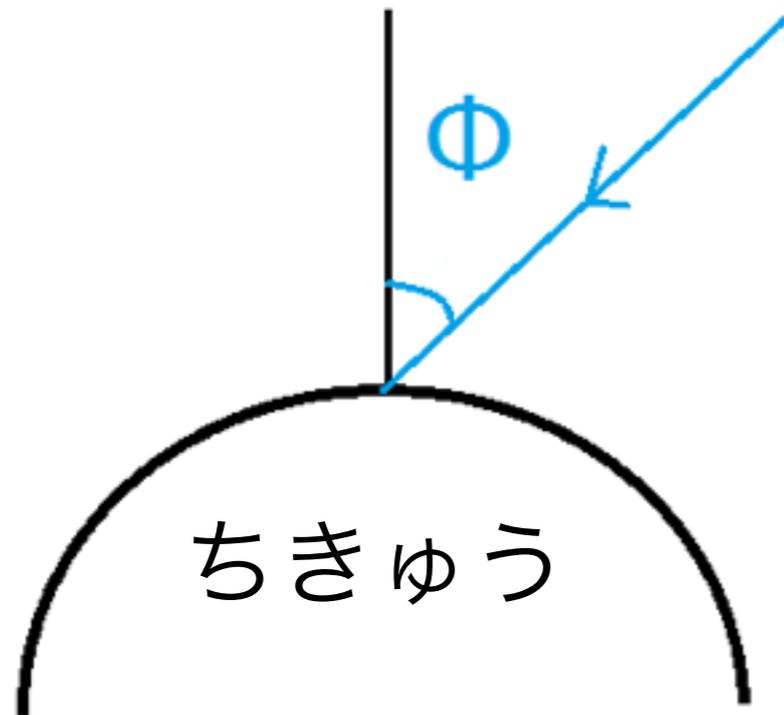


結果 (宇宙線の観測)



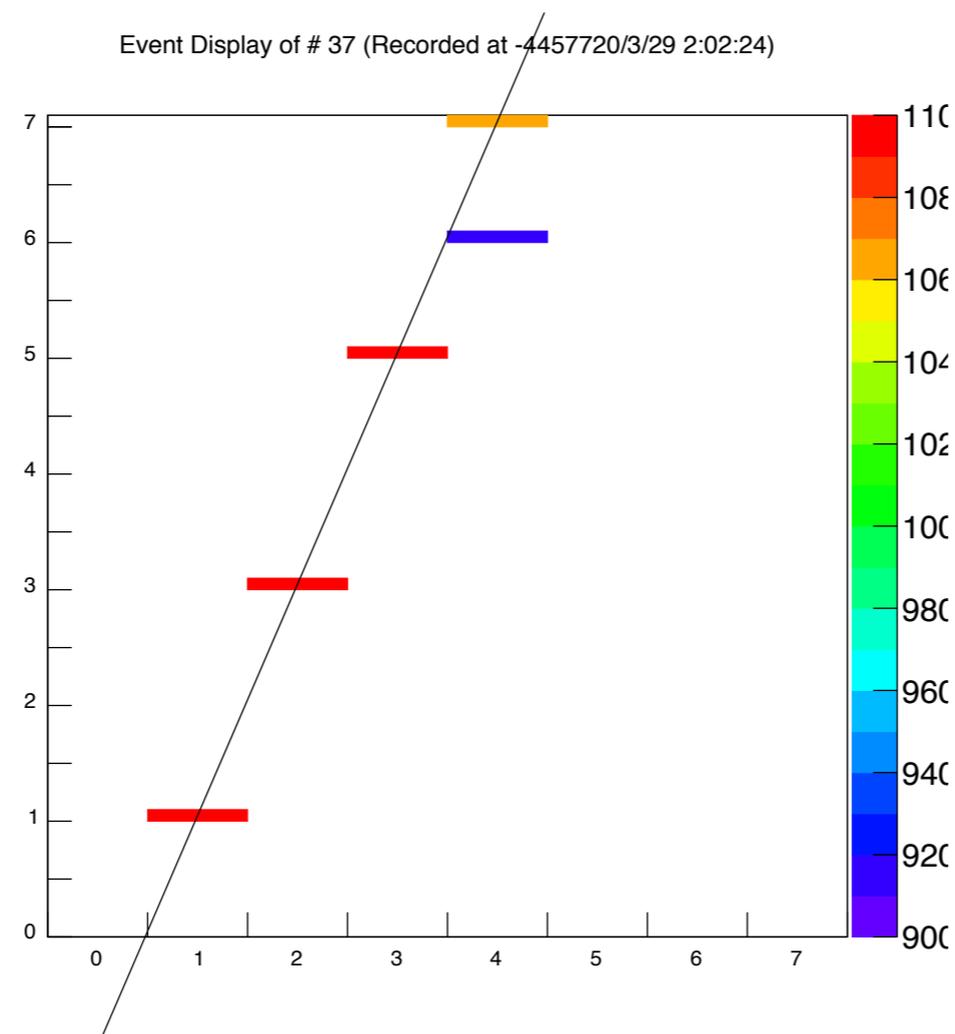
解析(天頂角分布)

- 得られたデータに直線(トラック)を引き、ミューオンの東西方向への移動の天頂角分布を調べた。
- シミュレーションでも天頂角分布を調べた。



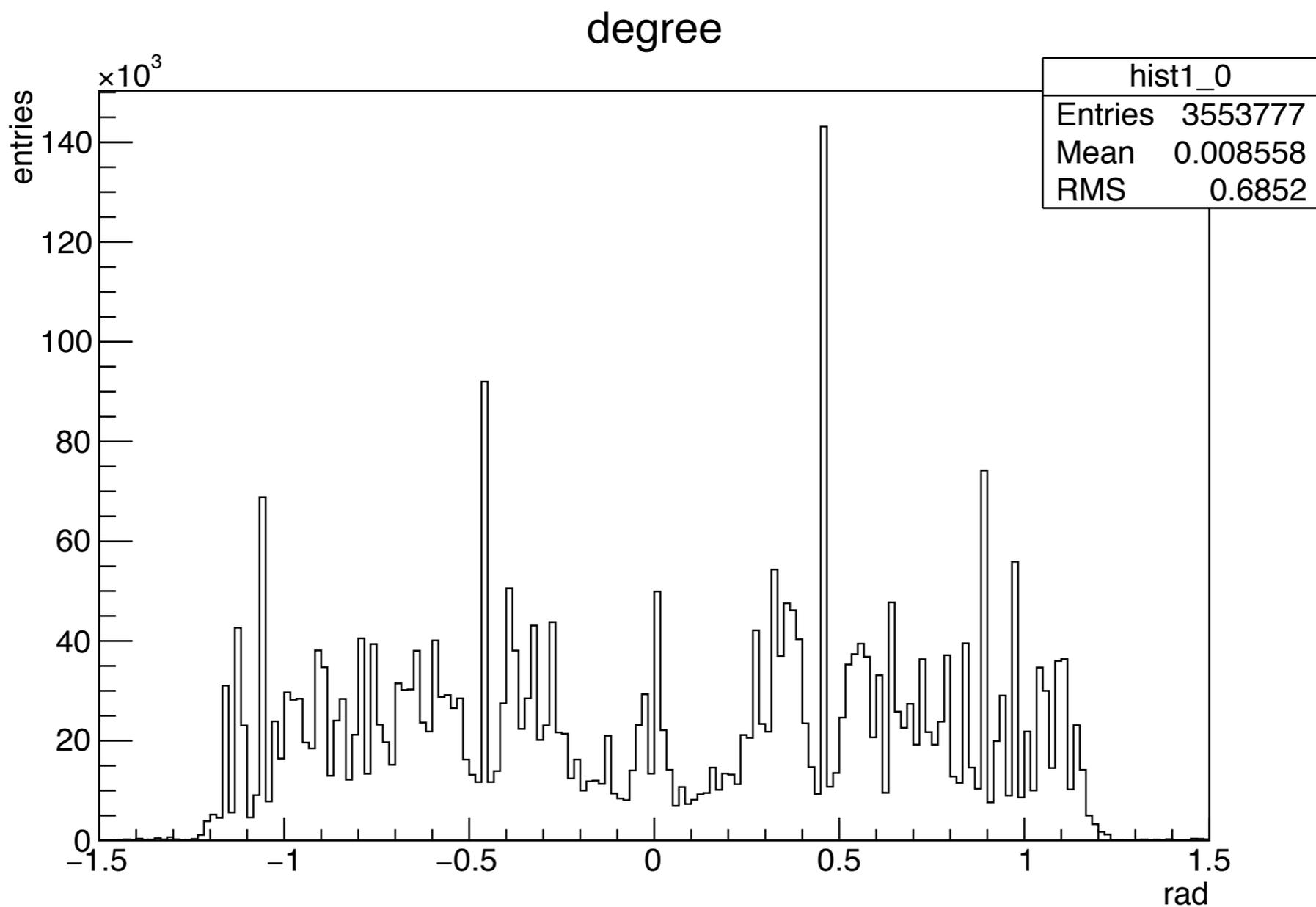
解析(トラックの再構成)

- 初期値を垂直入射とした場合の直線フィットと初期値を水平入射とした場合の直線フィットをそれぞれ行い、2通りのフィットのうち χ^2 が小さい方を取る。



解析(天頂角分布)

ミューオンの天頂角分布

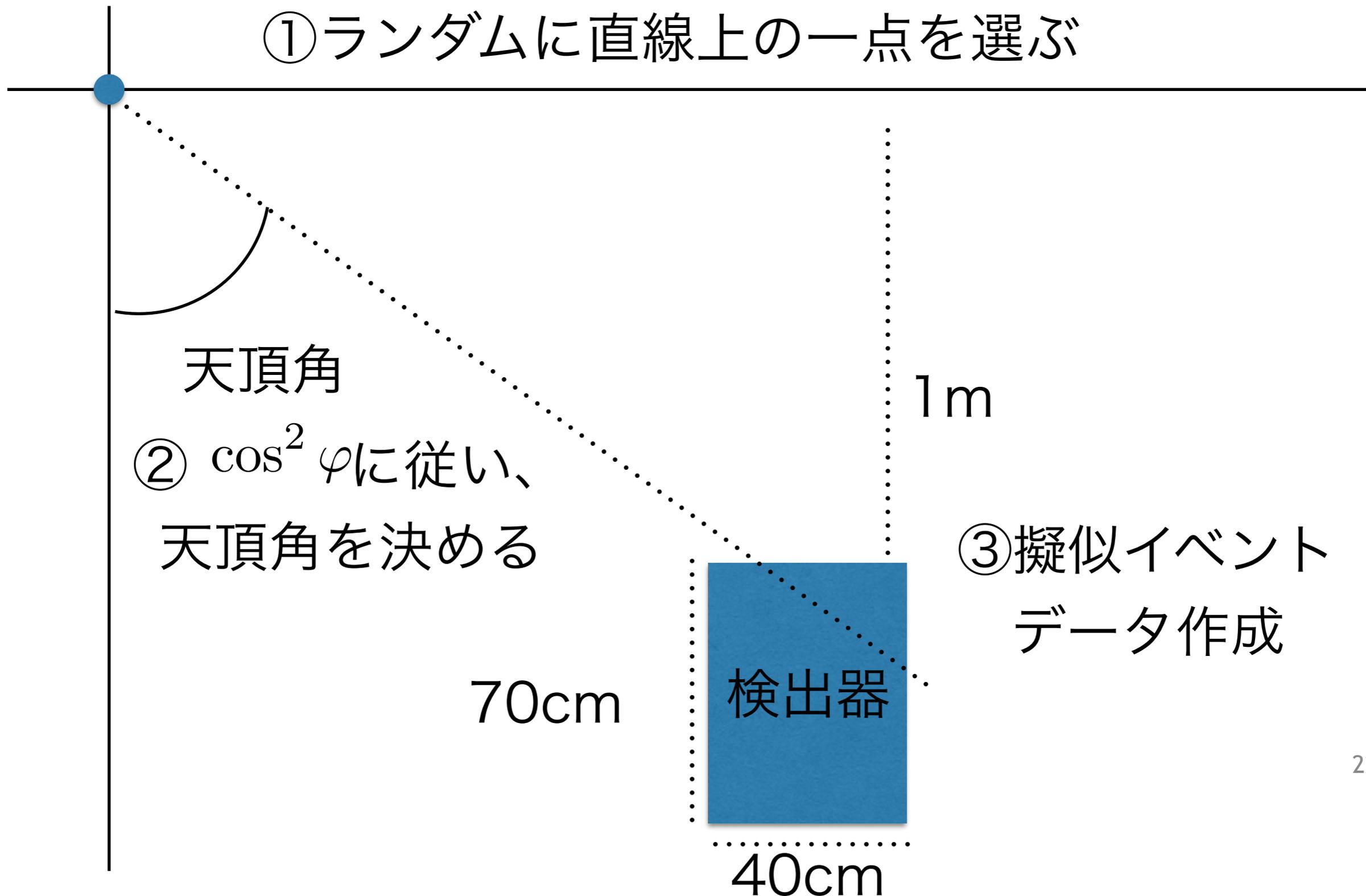


解析(シミュレーション)

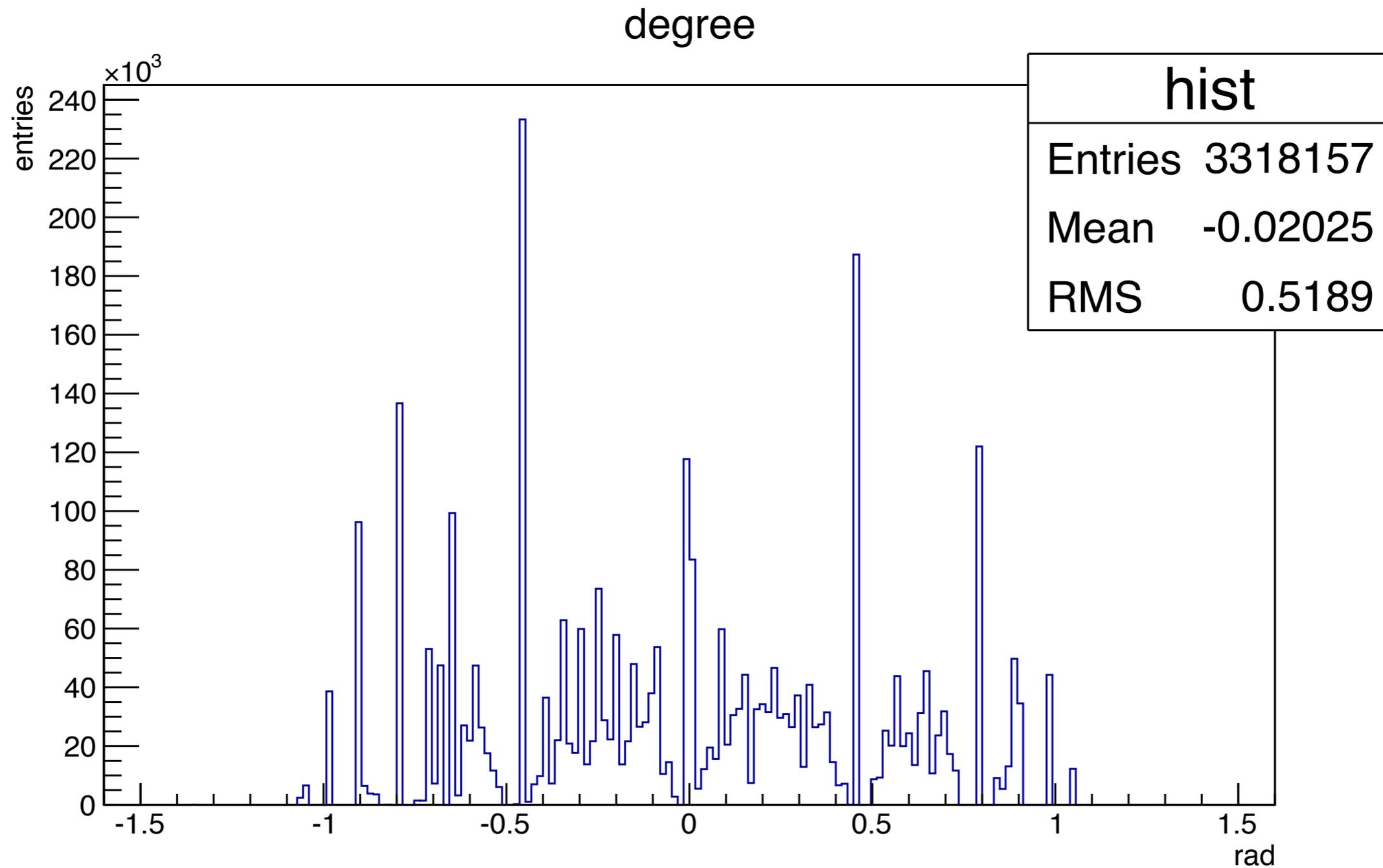
- フラックスが $\cos^2 \varphi$ に従う場合のシミュレーションを行った
- 設定は以下の通りである
 1. 検出器の上空1mの点をランダムに1点選ぶ
 2. 宇宙線の放出される角度を $\cos^2 \varphi$ の確率分布に従い選ぶ
 3. 検出器に当たるかどうかを調べる
- 以上の事を繰り返し、宇宙線の擬似イベントデータおよび天頂角分布を得た

解析(シミュレーション)

① ランダムに直線上の一点を選ぶ



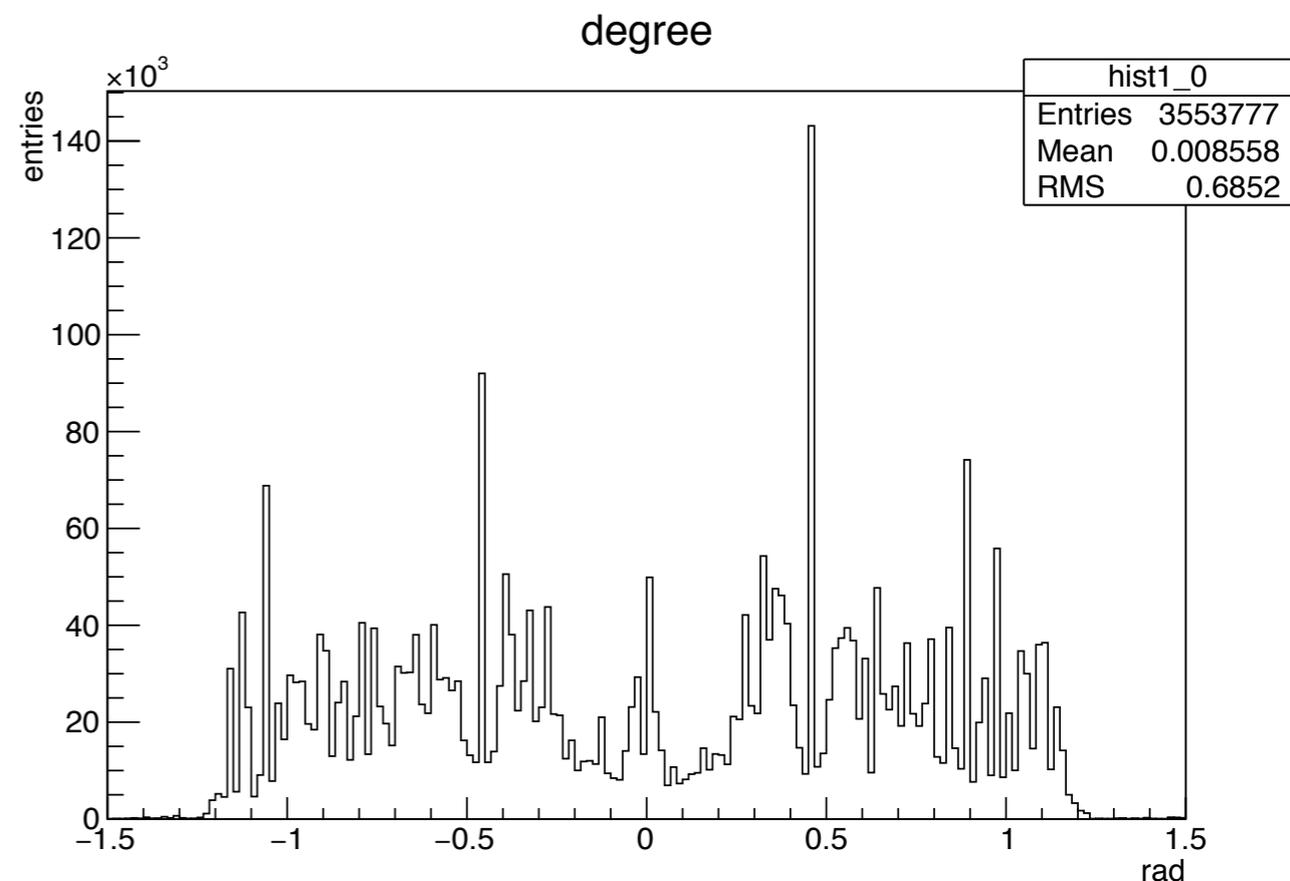
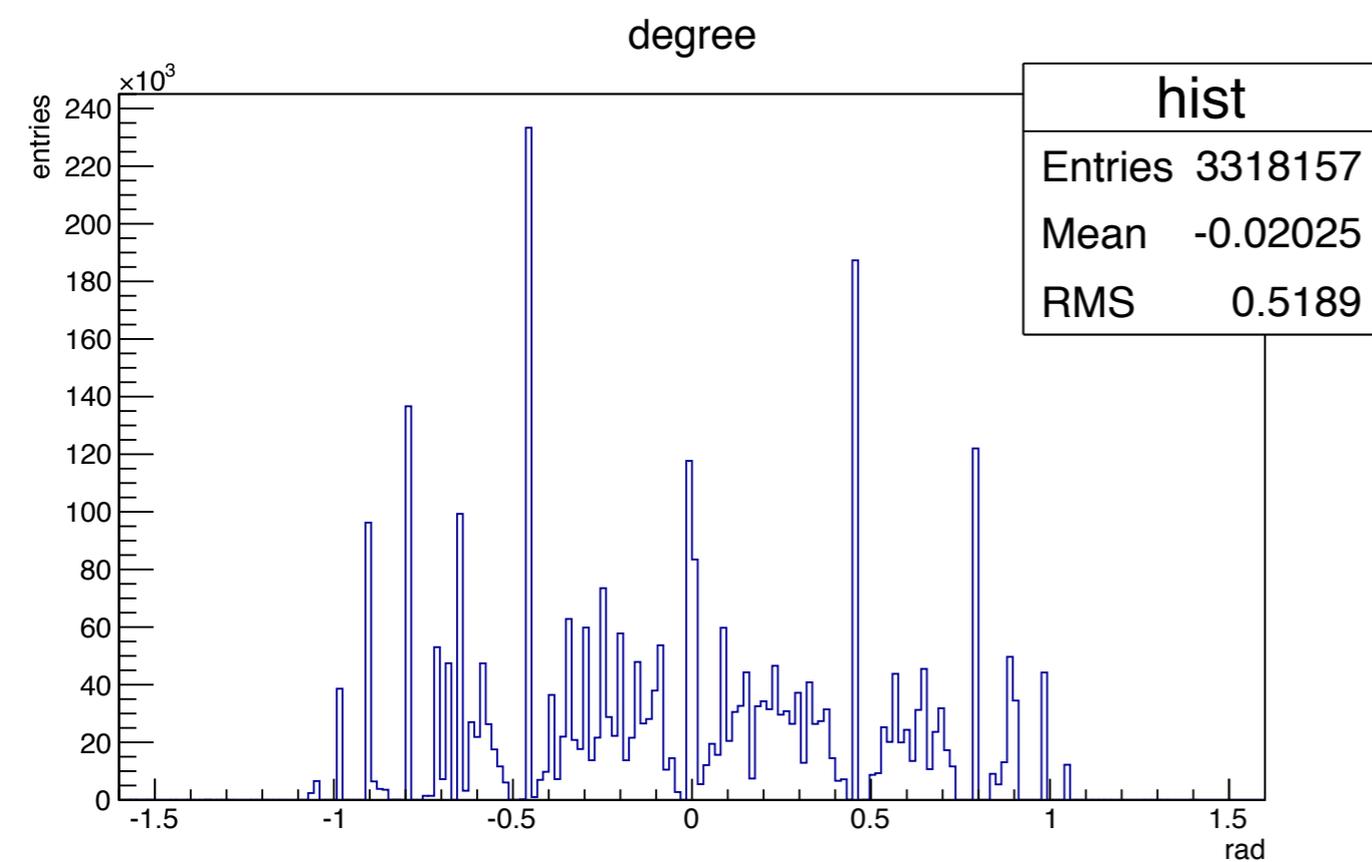
結果(シミュレーション)



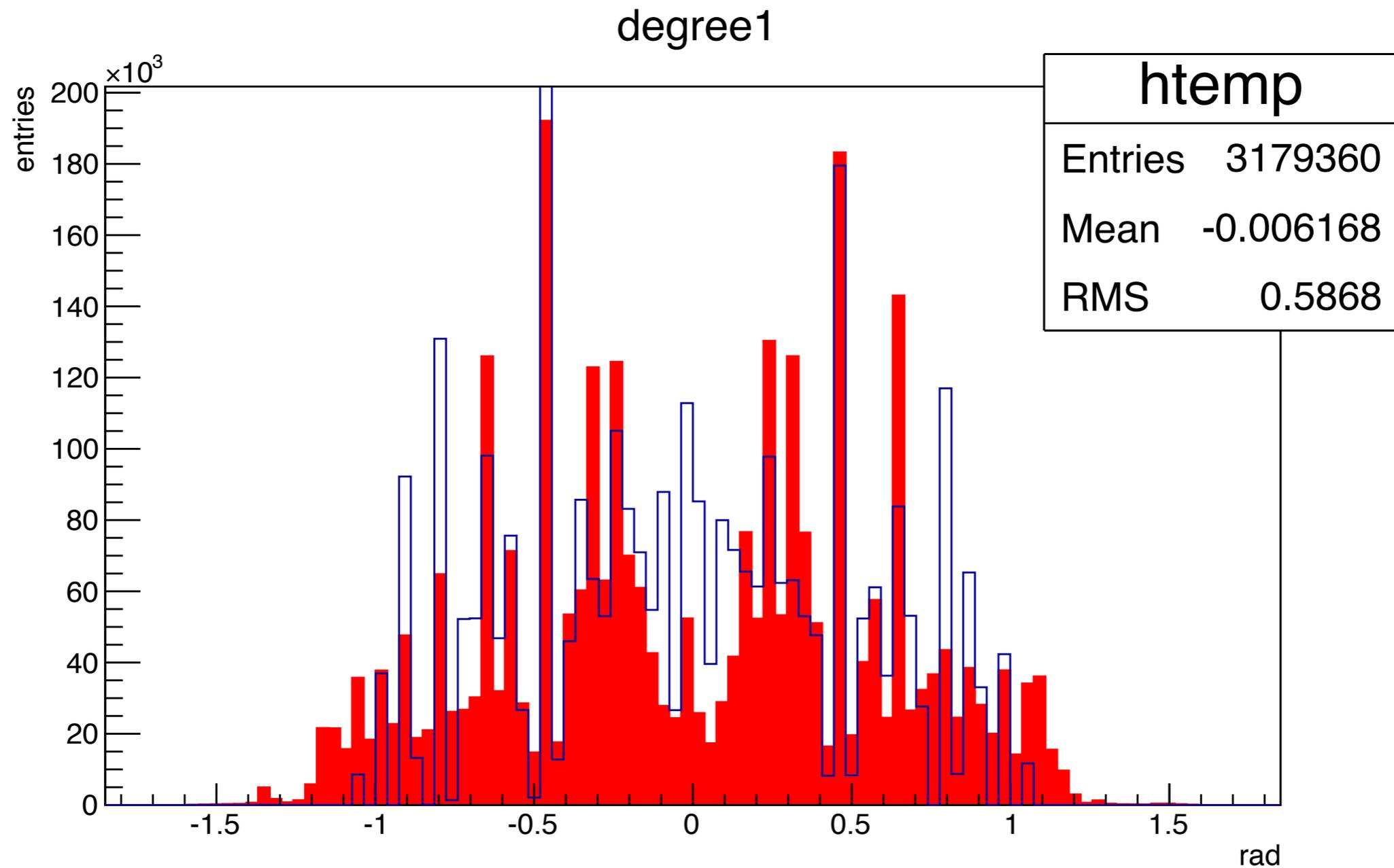
解析(観測&シミュレーション)

シミュレーション

観測



解析(観測&シミュレーション)



青：シミュレーション

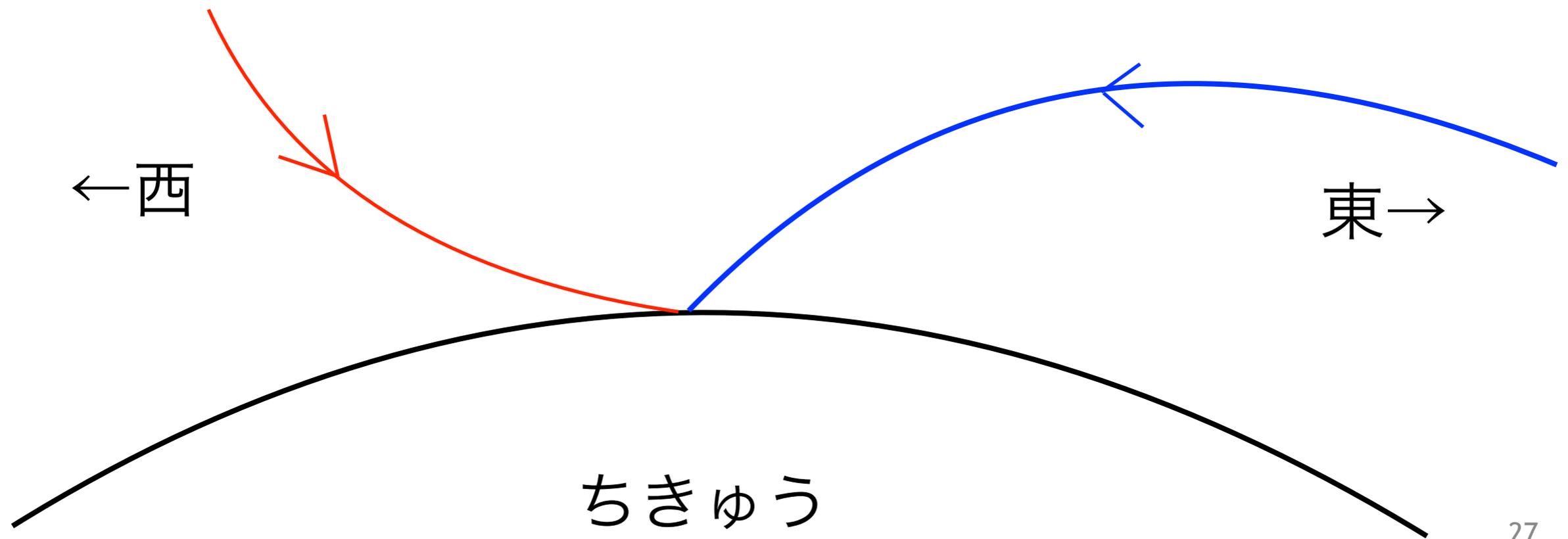
赤：観測結果

考察(天頂角分布&シミュレーション)

- 得られた分布とシミュレーションの分布は概ね一致している(ピーク的位置(0 rad, ± 0.5 rad))
 - 観測された分布は一定数のPedestalがある(ノイズ?)
- 観測された分布には1 rad以上のものがある
 - 1 radは検出限界角度
 - fittingすると、1radを超える場合がある
 - ミューオンが2つ以上or ノイズ
 - シミュレーションでは1つしか飛んでこない

原理(東西効果)

- μ^+ の場合

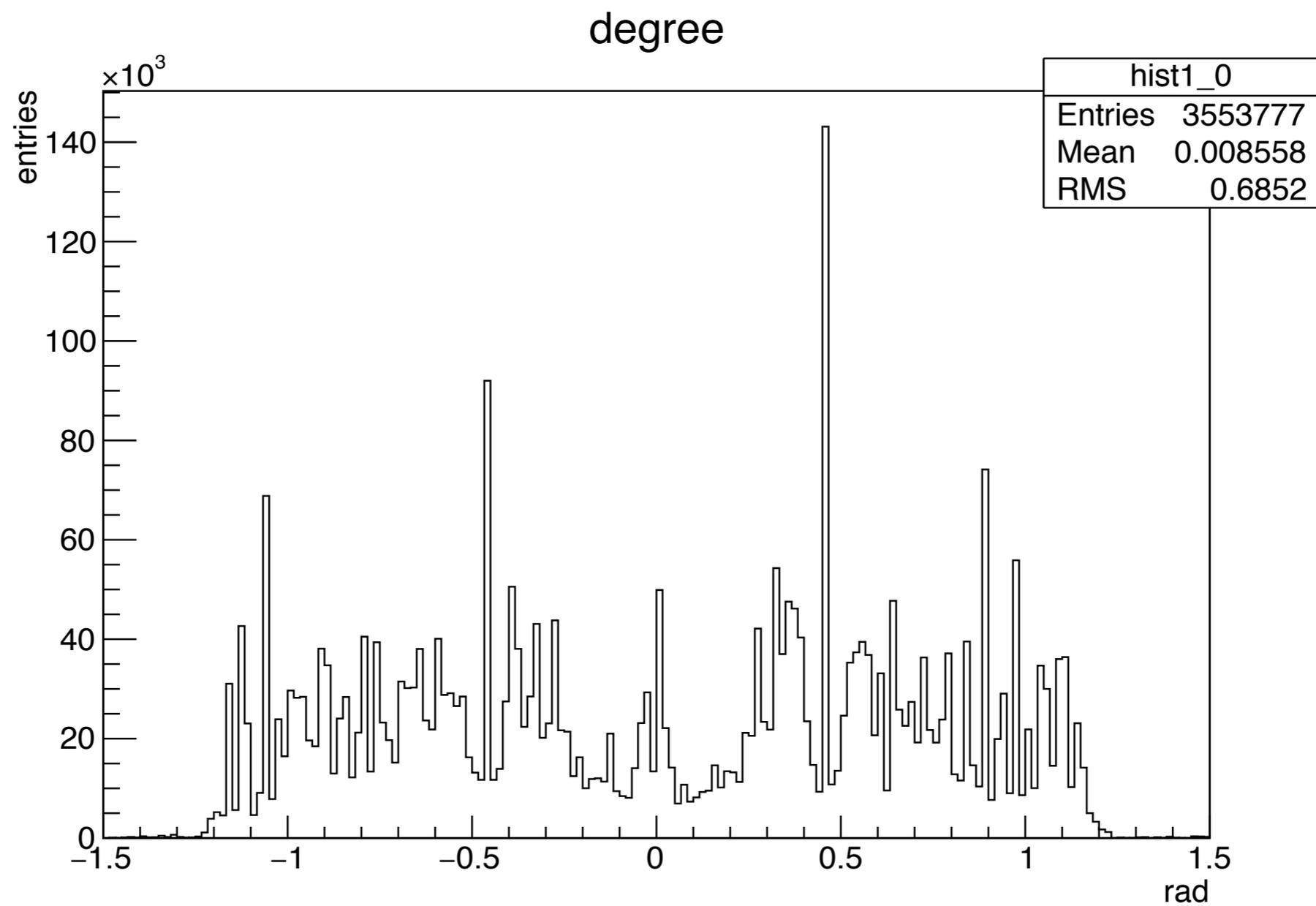


原理(東西効果)

- μ^+ の場合は、東からのミュオンの方が大気圏内の軌道が長くなり、地表に到達するまでに崩壊する率が上がる
- 地磁気に曲げられながら地表に到達するために必要な最低エネルギーが東からの方が高くなる
- よって μ^+ は西から多く入射する
- μ^- の場合は逆に東から多く入射する
- μ^+ の方が多く存在することが観測的にわかっている
→西からのミュオンが多く観測される

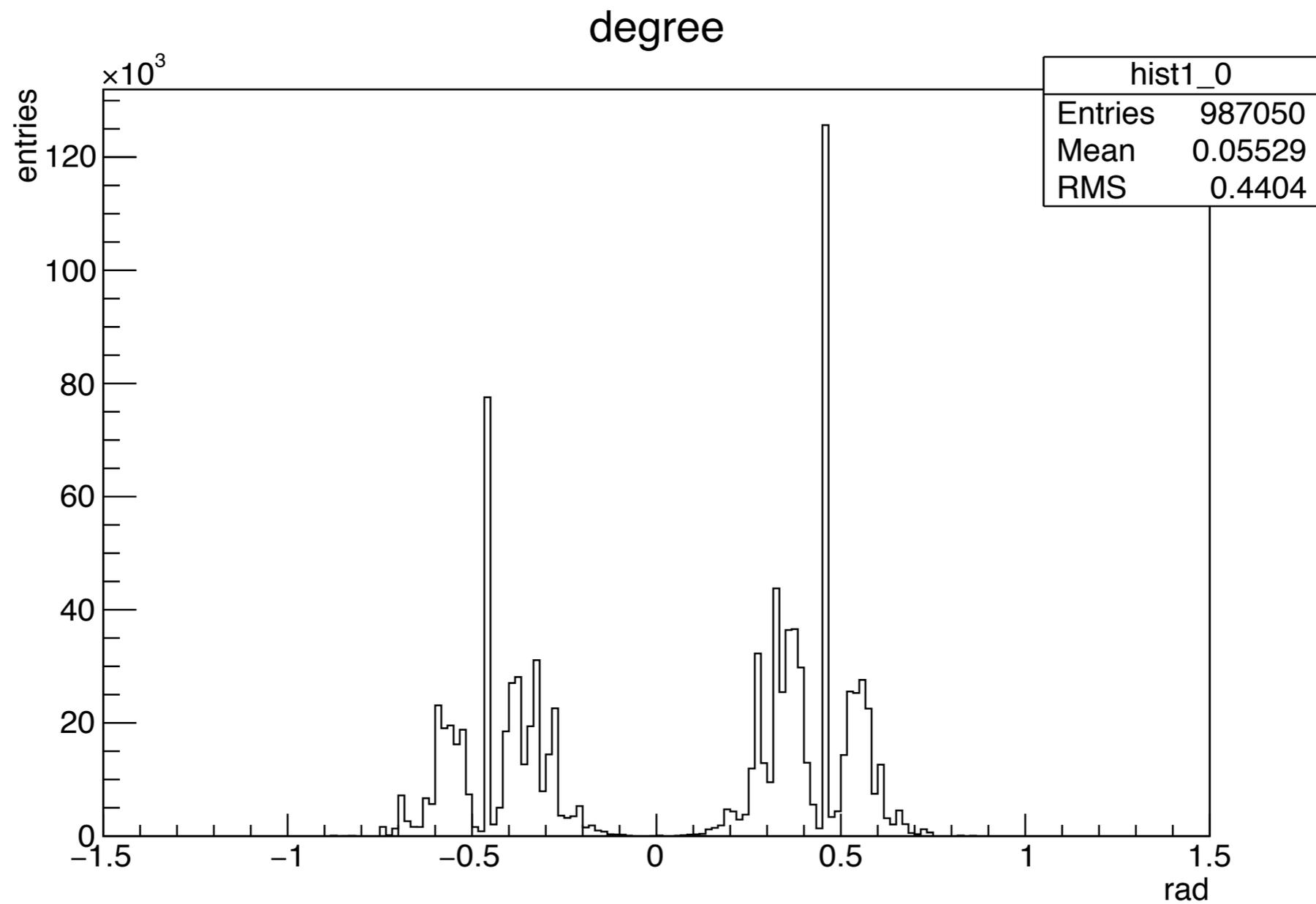
解析(東西効果)

ミューオンの天頂角分布



解析(東西効果)

$\chi^2/Ndf < 5$ の天頂角分布



解析(東西効果)

- 東からのミューオンの数を N_E 、西からを N_W として、東西の *Asymmetry* を

$$(\textit{Asymmetry}) = \frac{N_W - N_E}{N_W + N_E}$$

で計算したところ $\chi^2/\text{Ndf} < 5$ のものに限れば

14.2(±0.1)%、 χ^2/Ndf の制限なしでは 1.7(±0.05)% となった

- 誤差は、 N_E の誤差を $\sqrt{N_E}$ 、 N_W の誤差を $\sqrt{N_W}$ として計算した

考察(東西効果)

- ヒストグラムからも *Asymmetry* の値からも、東西効果の存在は顕著にみてとれる

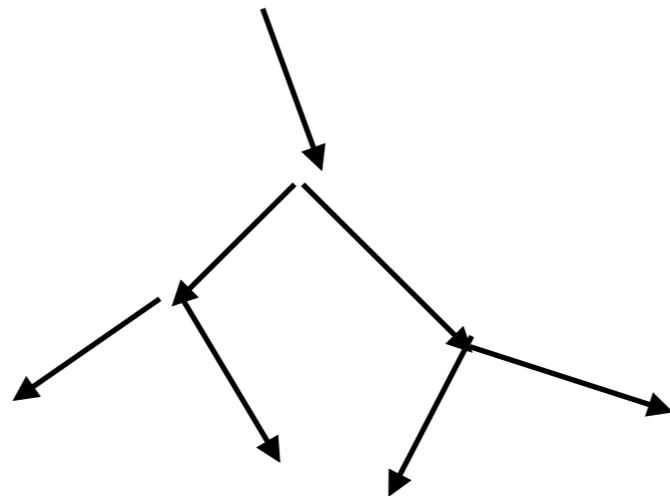
χ^2/Ndf を制限すると *Asymmetry* が大きくなるのは、東西関係なく発生するノイズを取り除けたからだと考えられる

- 建物について

実験を行った部屋は建物の東端近くに位置しており、東側よりも西側に建物の壁や物が多くある。そのため西からのミュオンが比較的多く止められるので、実際の東西効果は実験結果よりも大きいと思われる

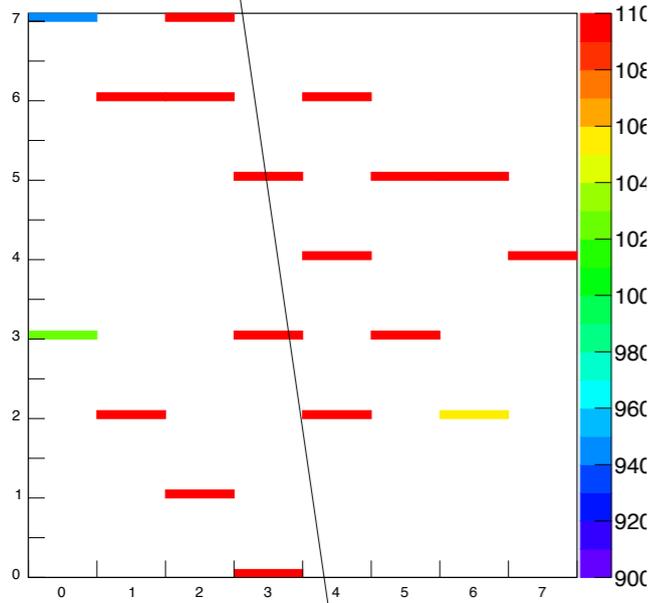
原理(電磁シャワー)

- 高エネルギー電子が大気に入射した時、大気中の原子核と相互作用し、光子が生じる。
- その光子が電子・陽電子を対生成し、生じた電子がまた光子を放出する。
- これを繰り返す現象を電磁シャワーという。

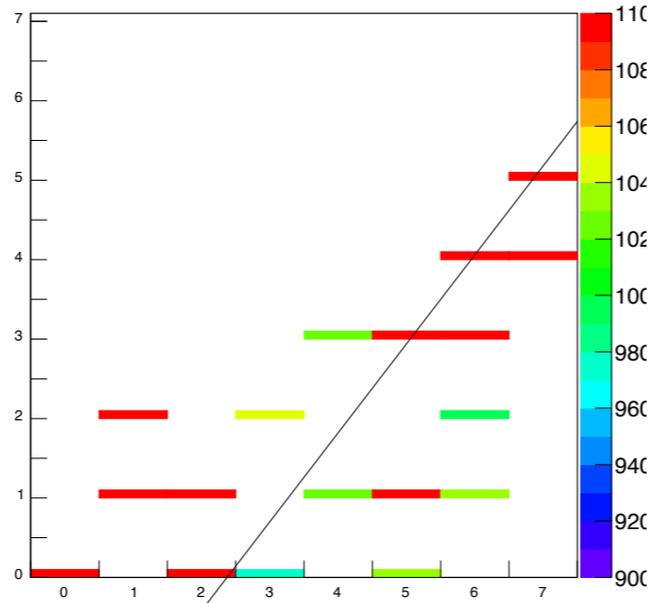


解析 (電磁シヤワー)

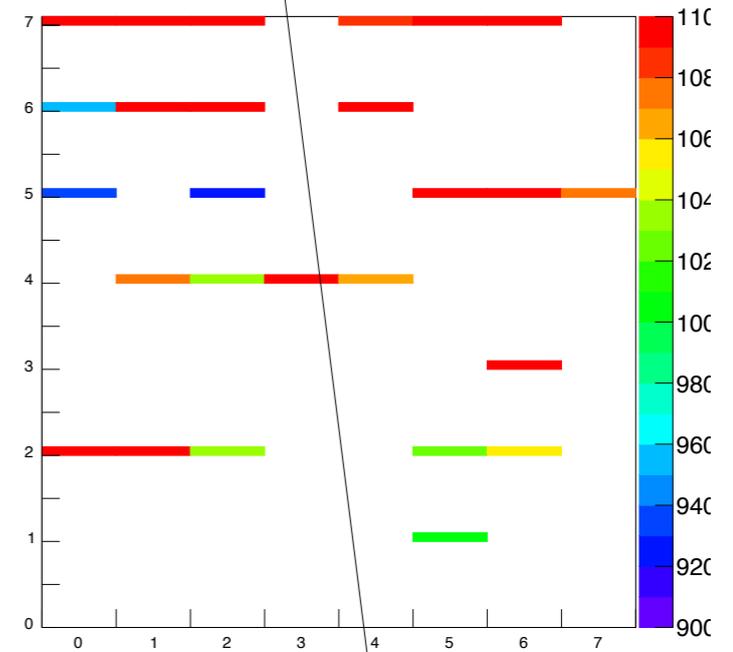
Event Display of # 619699 (Recorded at -4457720/6/27 8:22:08)



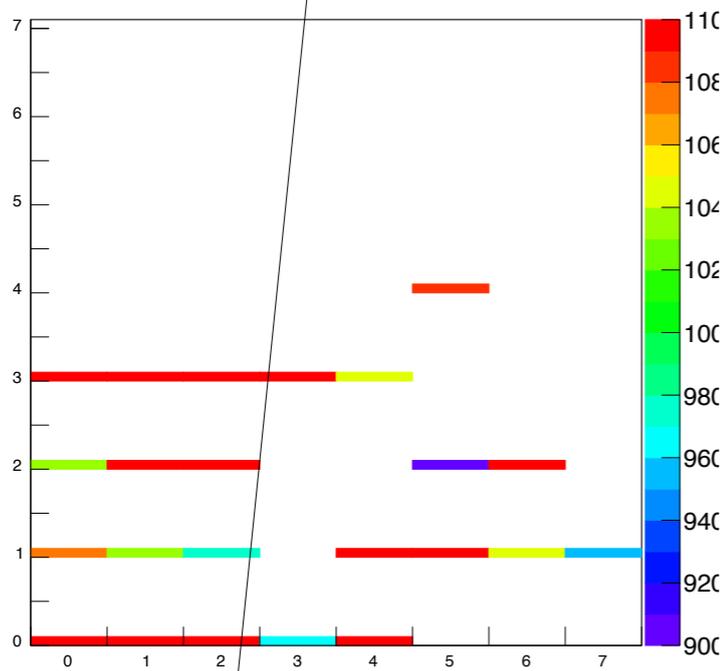
Event Display of # 634798 (Recorded at -4457720/6/27 8:22:08)



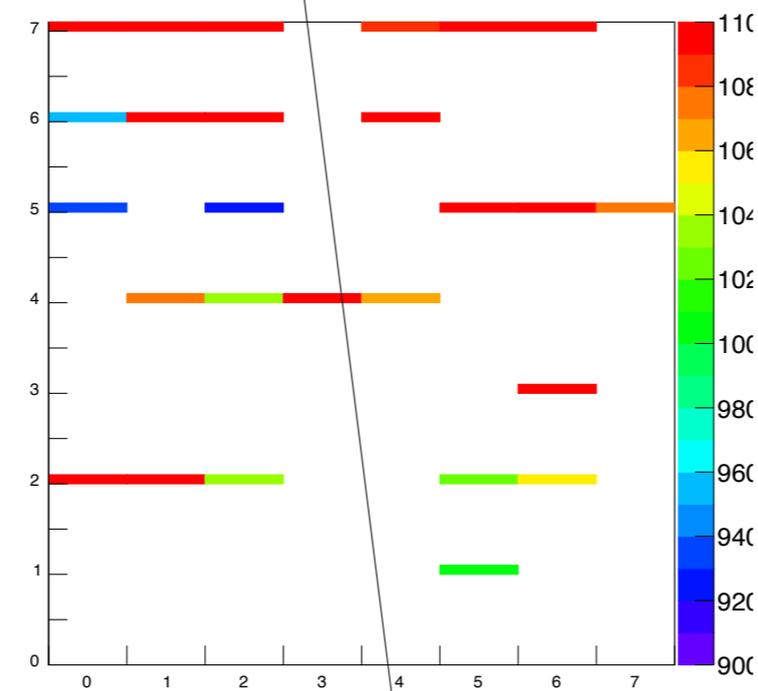
Event Display of # 1244968 (Recorded at -4457720/2/6 21:08:00)



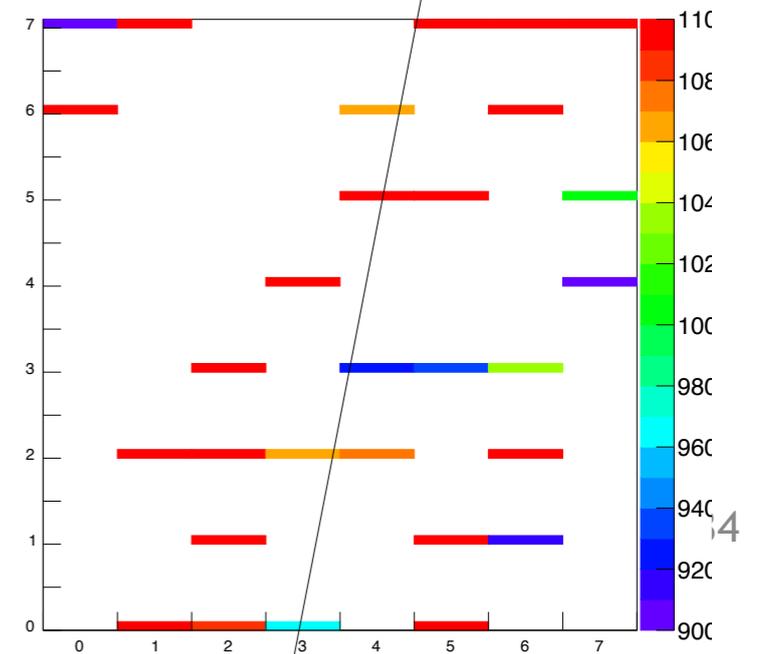
Event Display of # 2205738 (Recorded at -4457720/2/1 14:50:24)



Event Display of # 1244968 (Recorded at -4457720/2/6 21:08:00)



Event Display of # 863598 (Recorded at -4457720/1/30 13:54:56)

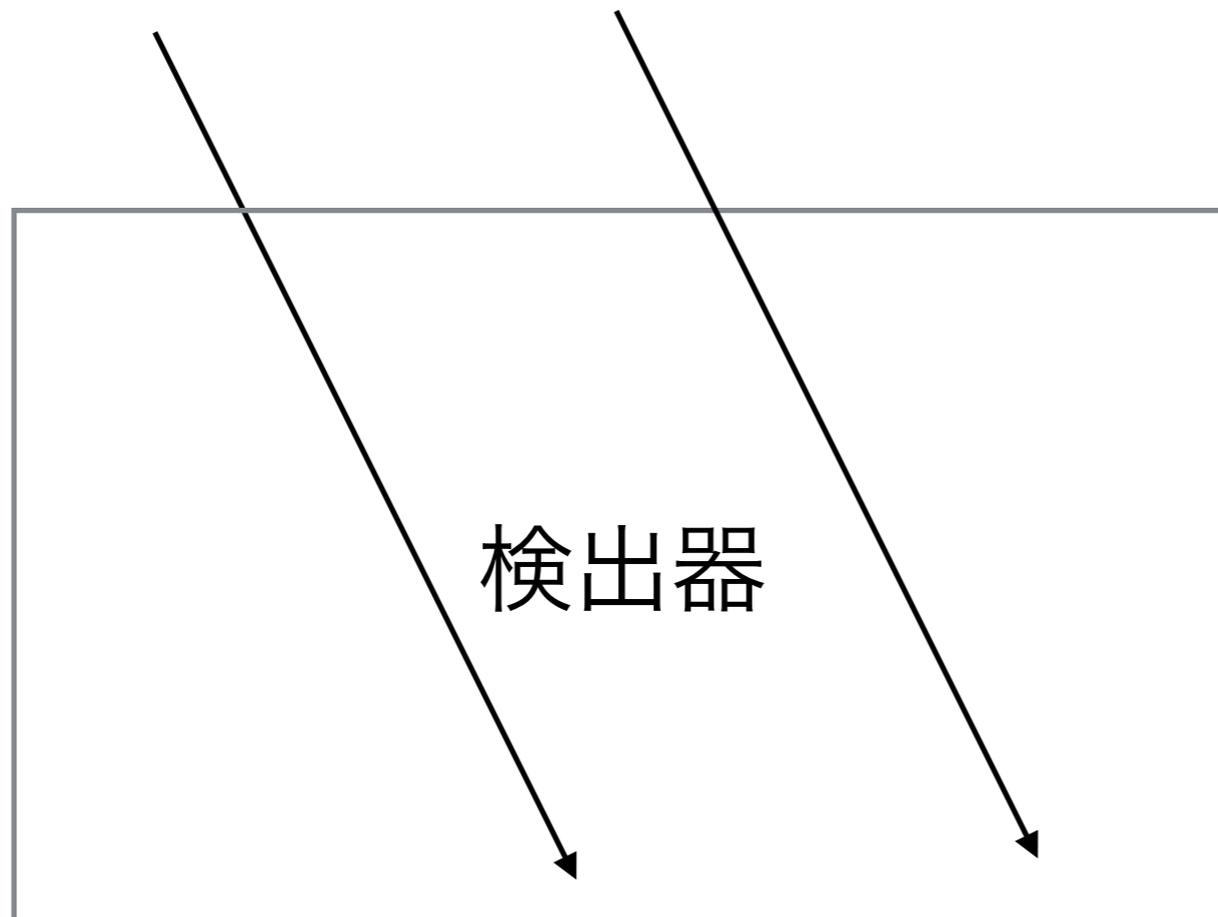


解析と考察（電磁シャワー）

- 実験データでヒット数15以上のもののトラックを調べた。
- その結果、電磁シャワーらしきものはいくつか発見できたものの、はっきりと電磁シャワーと断定できるものがなかった。（ミューオン束と区別がつきにくい、等）
- 電磁シャワーとミューオン束、のいずれなどを区別する方法が必要。具体的にはthresholdの値をより電磁シャワーに合わせたものにしたたりするなど。

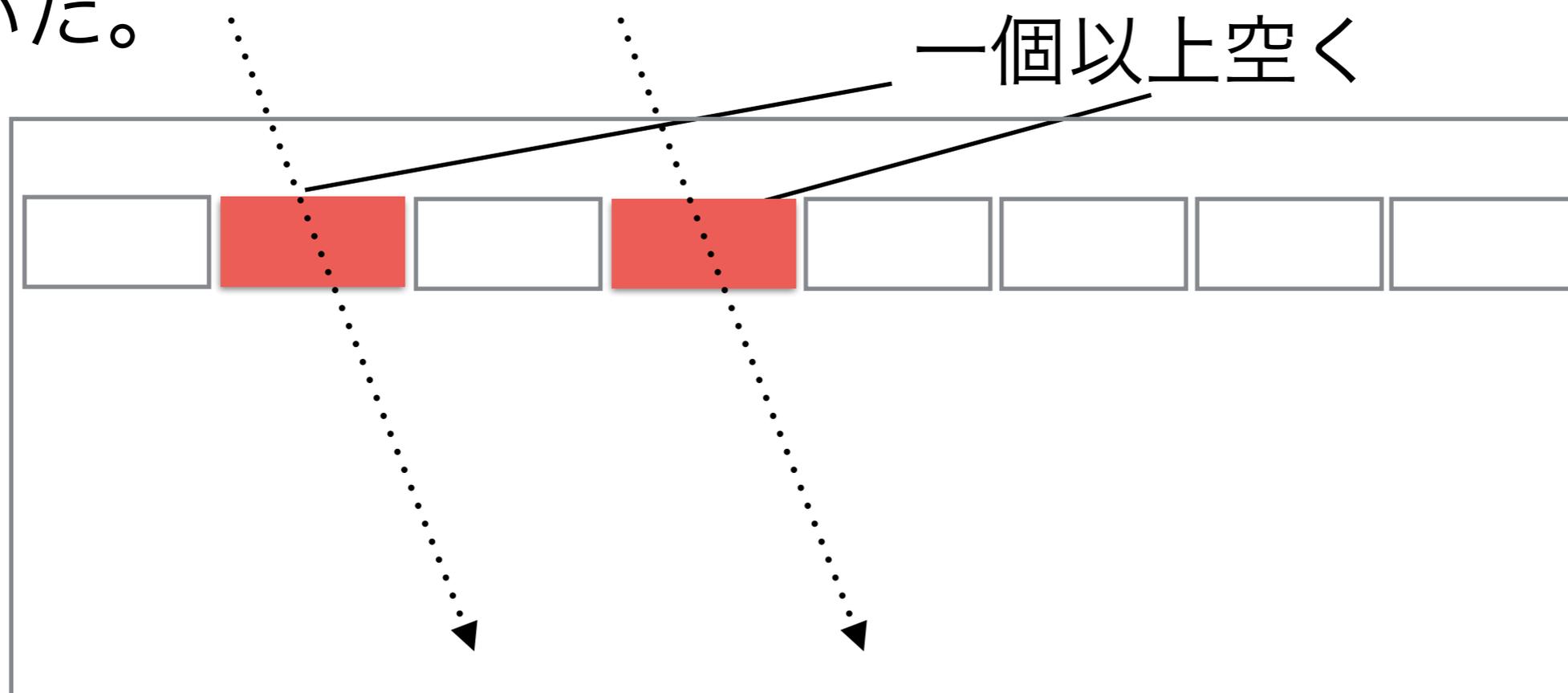
原理(ミューオン束)

- ミューオンの生成過程において同じ方向に向かう複数のミューオンが生成することがある。その結果地上で1 m以内に平行なミューオンの飛跡が観測できることがある。



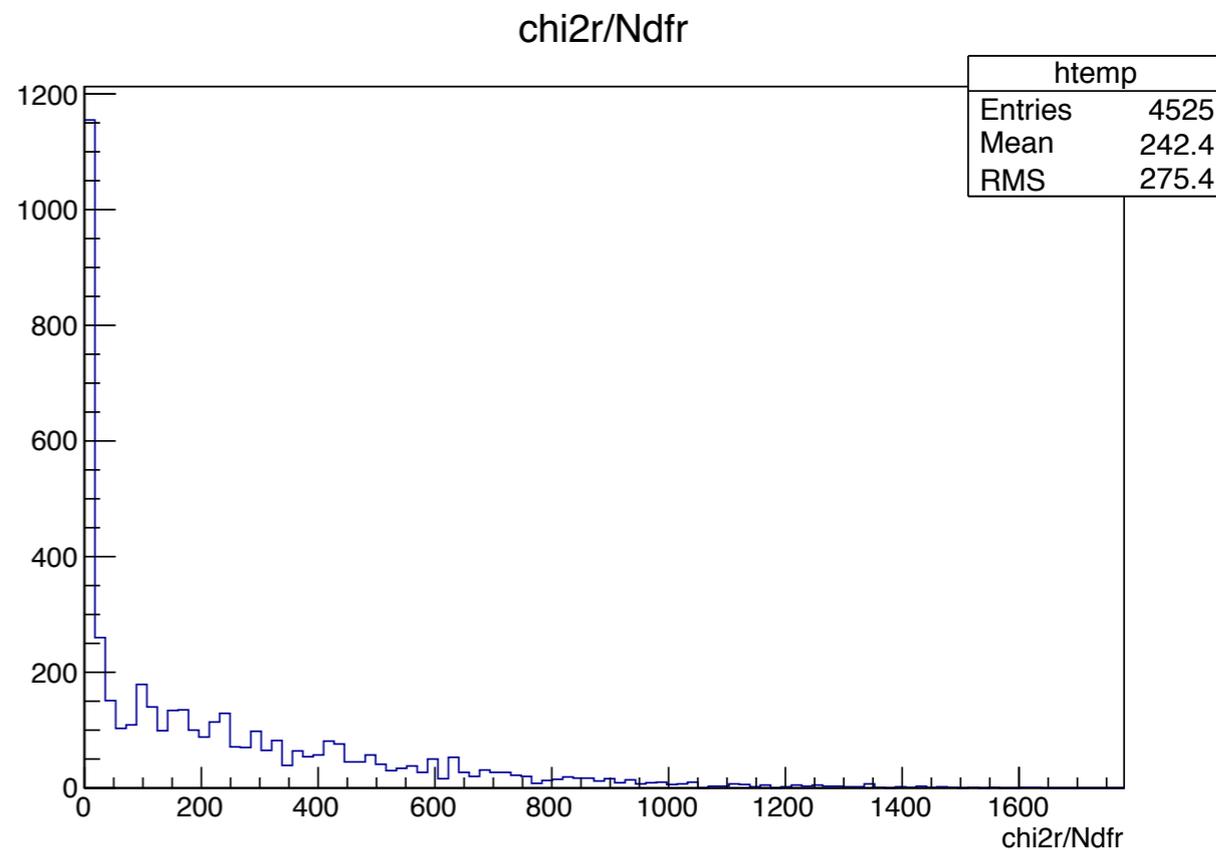
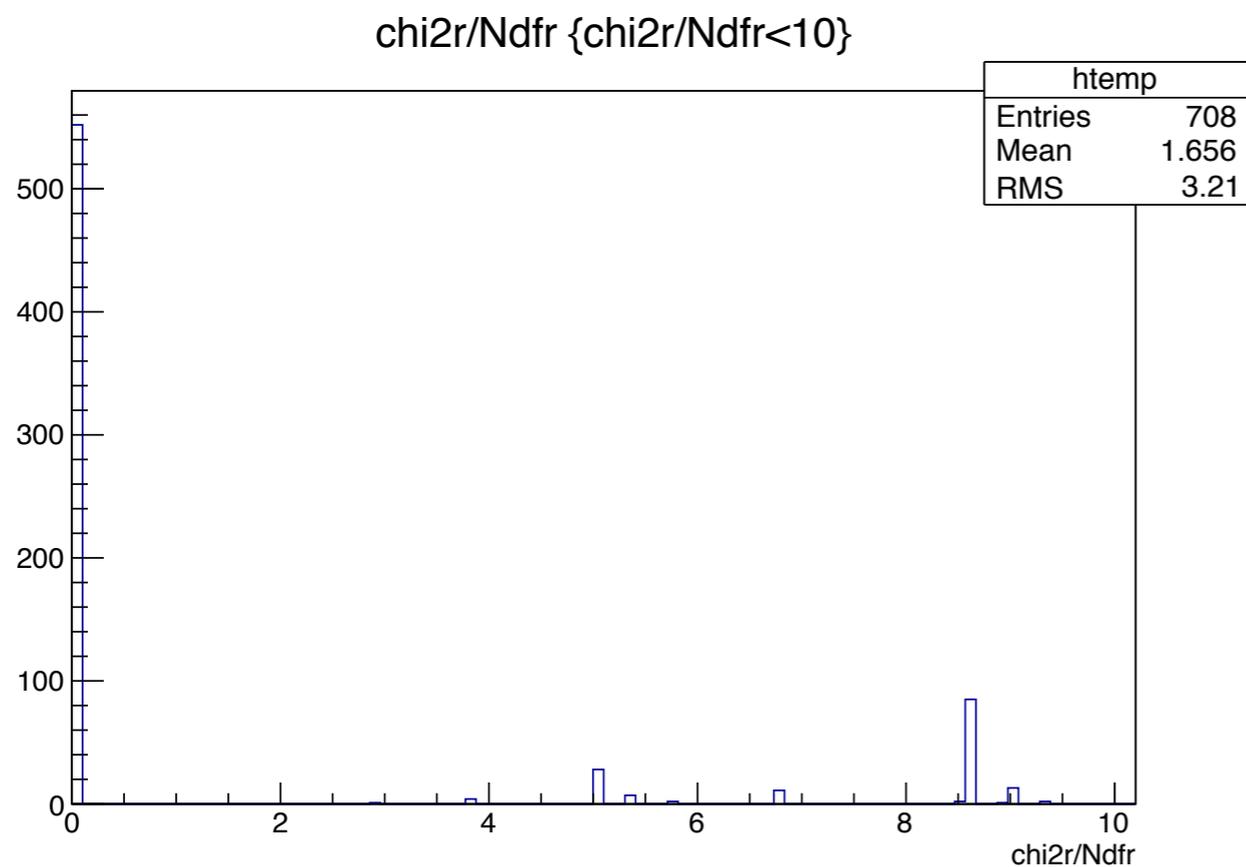
解析(ミュオン束)

- トラック一本引いたものから $\chi^2/ndf > 10$ かつ $7 < \text{ヒット数} < 17$ のものに制限
- さらに各行において1個以上空いて検知した行が4行以上のものに限って、それを左側と右側に分けて、二本引いた。



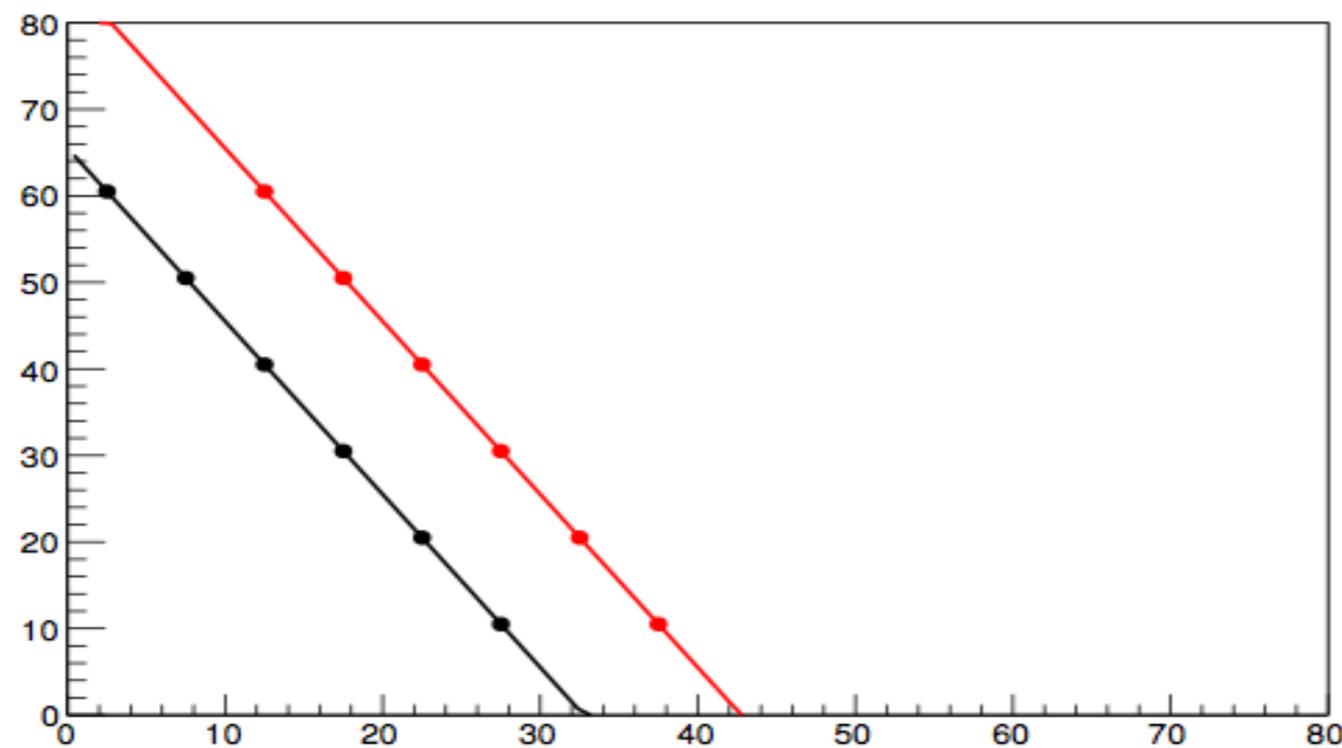
解析(ミュオン束)

- 綺麗に引けたものに絞るために左側の直線と右側の直線とそれぞれの $\chi^2/\text{Ndf} \leq 1$ となるようなものに限った
- 最後にトラックが綺麗に一本引けたもの ($\chi^2/\text{Ndf} \leq 1$) とトラックが二本引けたものの数を比べた。

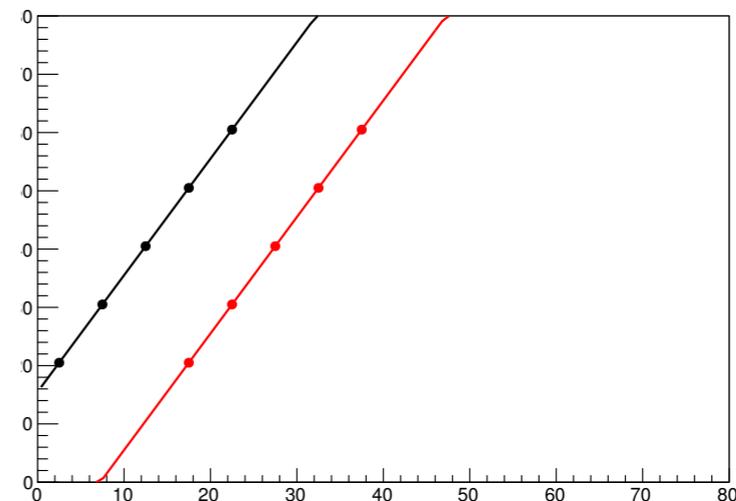
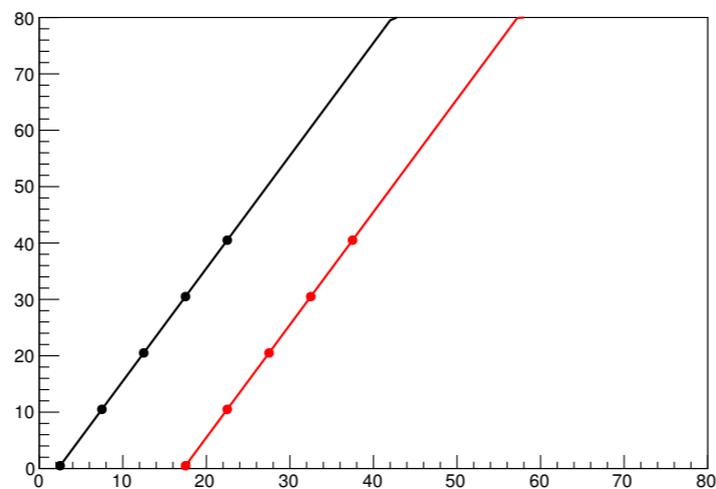
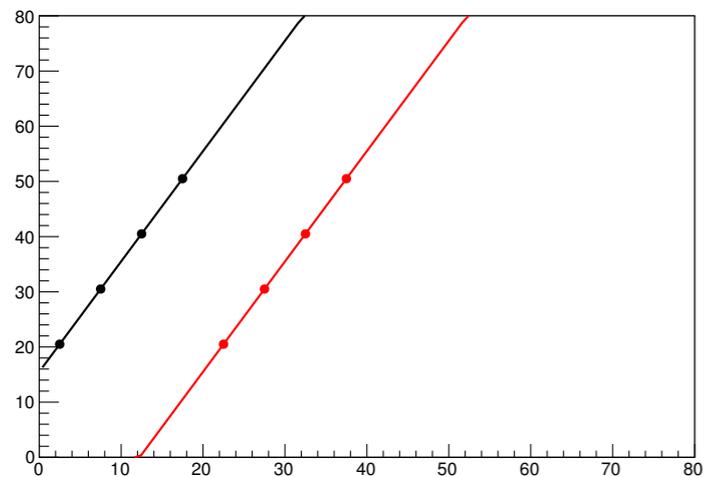
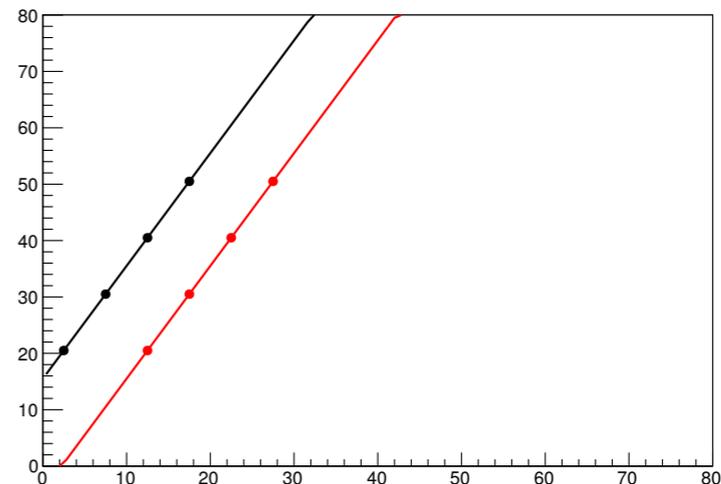
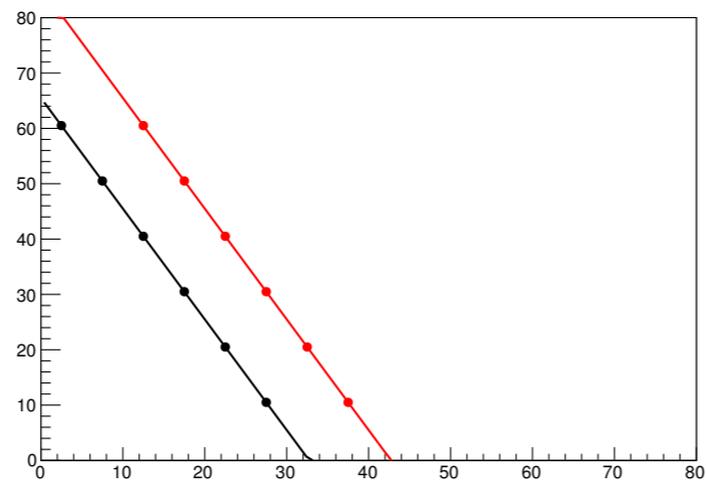
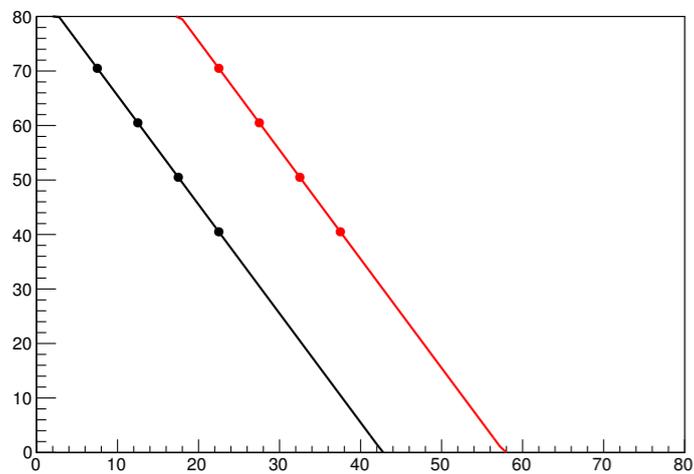


結果(ミュオン束)

- 2日間のデータですべての条件を満たした二本のトラックを引くことのできた数は229個
- 1本のトラックを引くことができた数は239383個
- 割合は $229/239383=0.000957$ (0.096%)程度



結果(ミューオン束)



考察(ミューオン束)

- 思ったよりも数が少なかった。一つ以上飛ばしのものに限ったことが原因？
- また電磁シャワー等の現象とも区別がつきづらい実験でもあった。
- 改善方法としてより細かく区切ってチャンネル数を増やす必要があると考えられる。

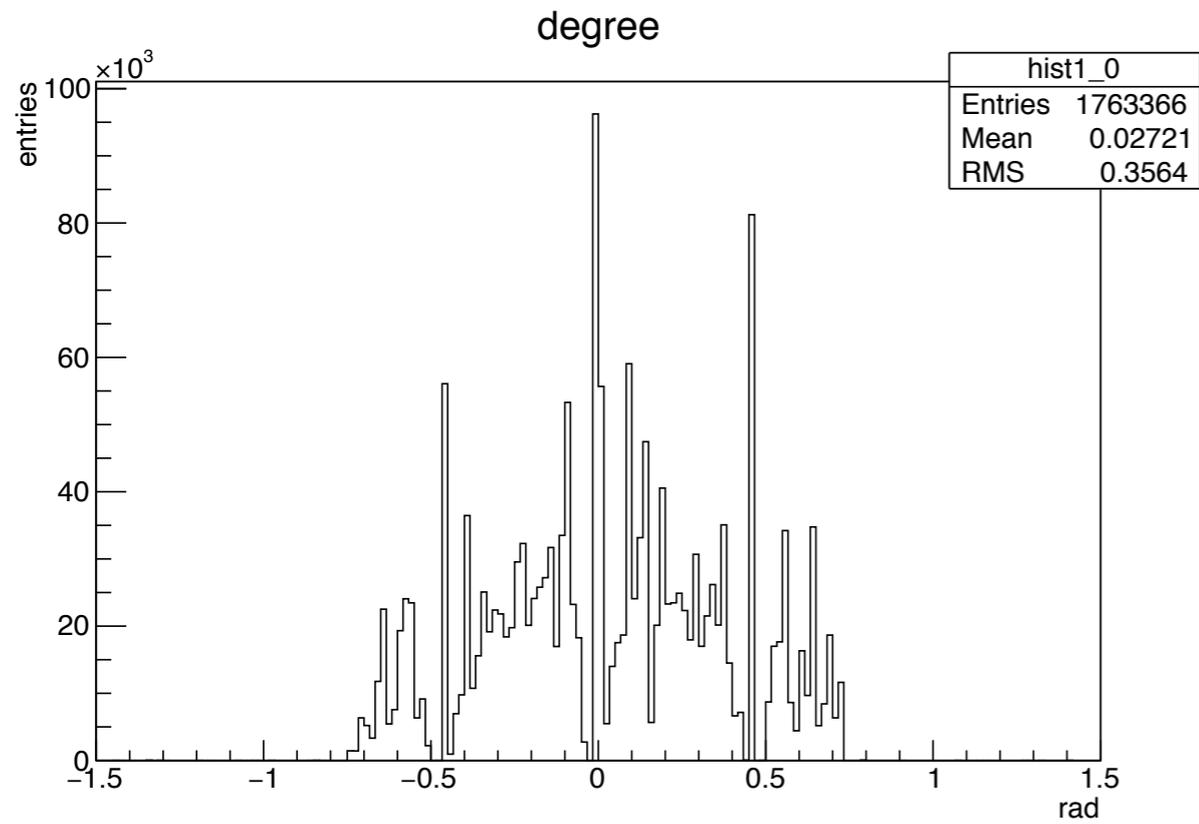
結論

- ・ フラックスの角度分布が $\cos^2 \varphi$ に従うことが確認できた
- ・ 東西効果は顕著にあらわれていた
- ・ 電磁シャワーとミュオン束について、来ていることは確認できたが、両者の区別がつかなかった

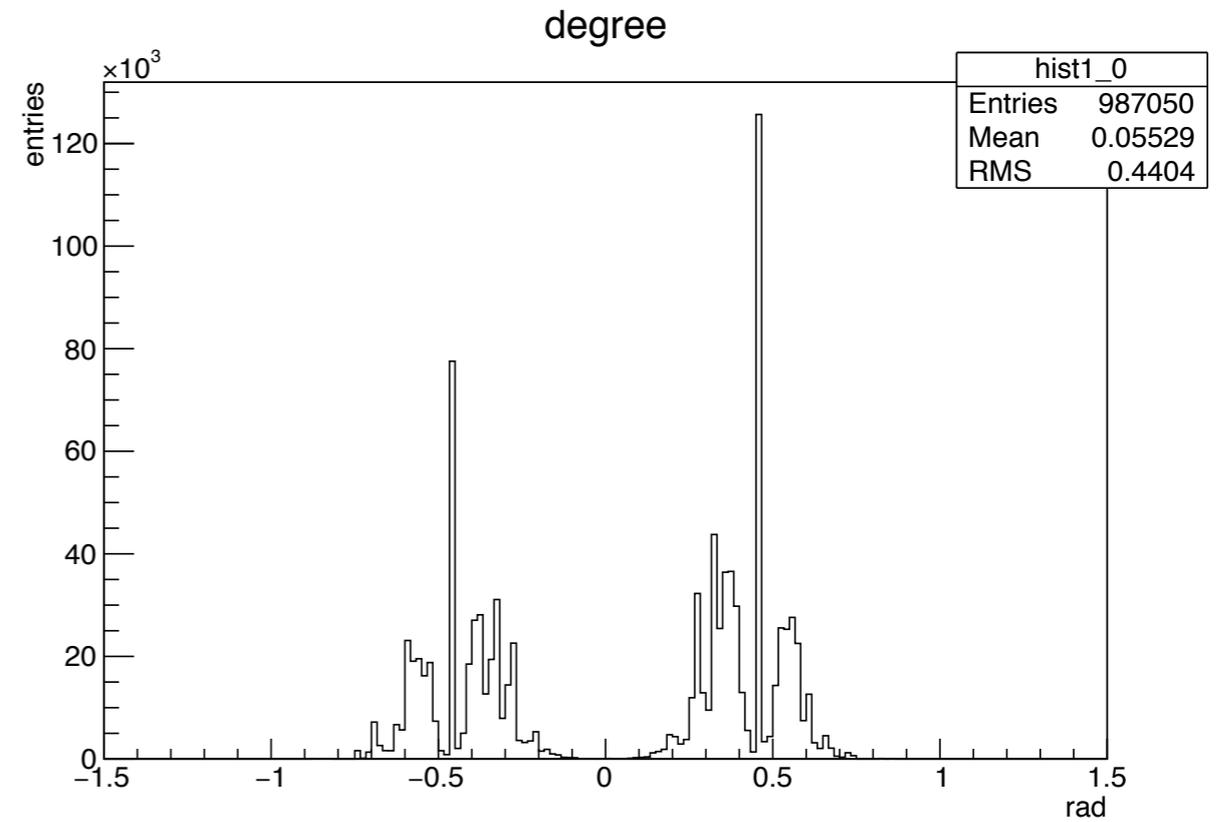
謝辞

- ・ 半年間もの間、わかりやすく丁寧にご指導いただいた、南野さん、関さん、宇野さん、ありがとうございました

$\chi^2/Ndf < 5$ でカットした天頂角分布



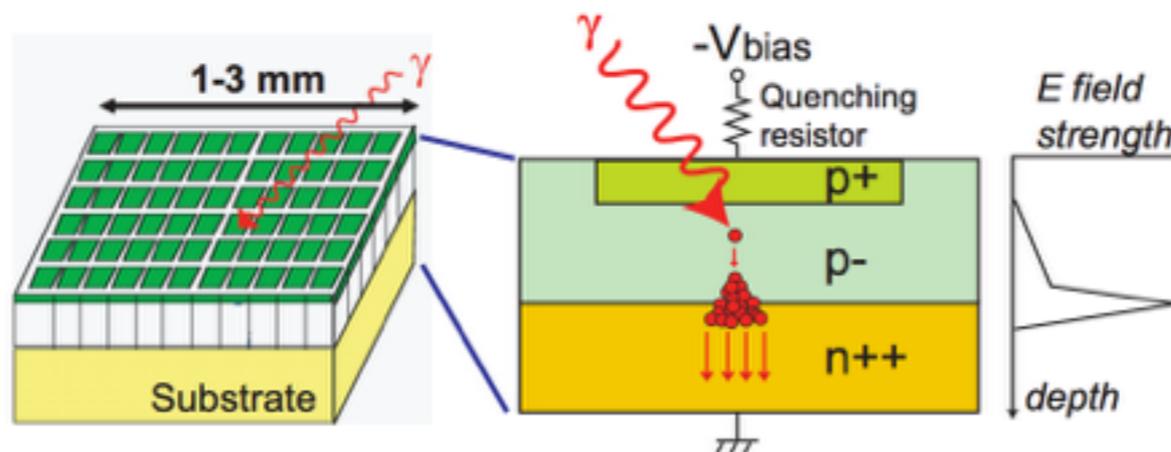
シミュレーション



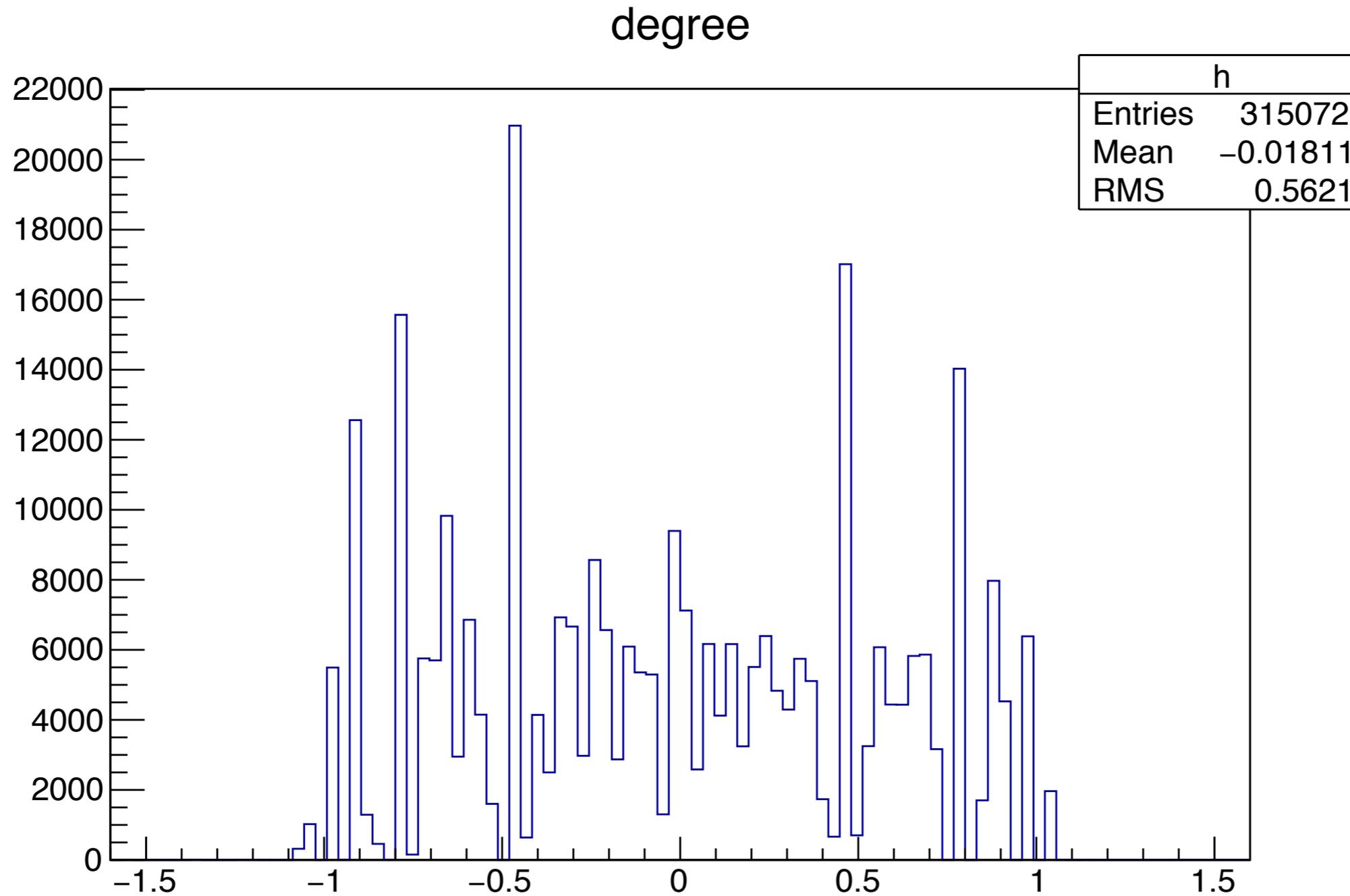
観測

MPPC

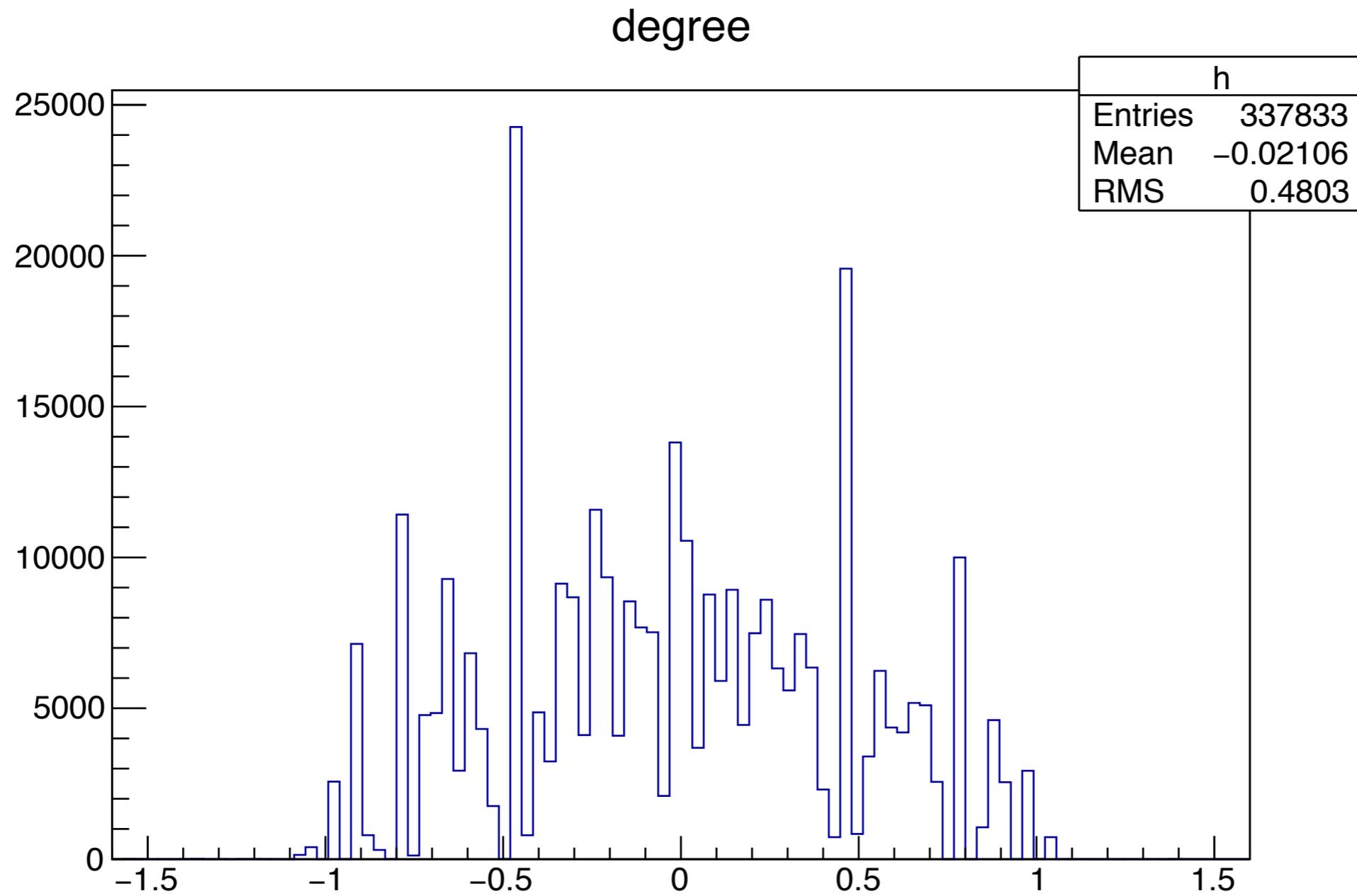
- 受光器1つ(1ch)に対し、多数の微小なAPDピクセルからなる
- 電圧をかけて、電子雪崩を起こす
- 各ピクセルは1光電子(による電子雪崩)飽和する
- 放電するまで各ピクセルは新たに計測できない
- 放電するには数ns必要
- 受光器は全ピクセルの出力電荷の和を信号として出力する



フラックスが \cos^1

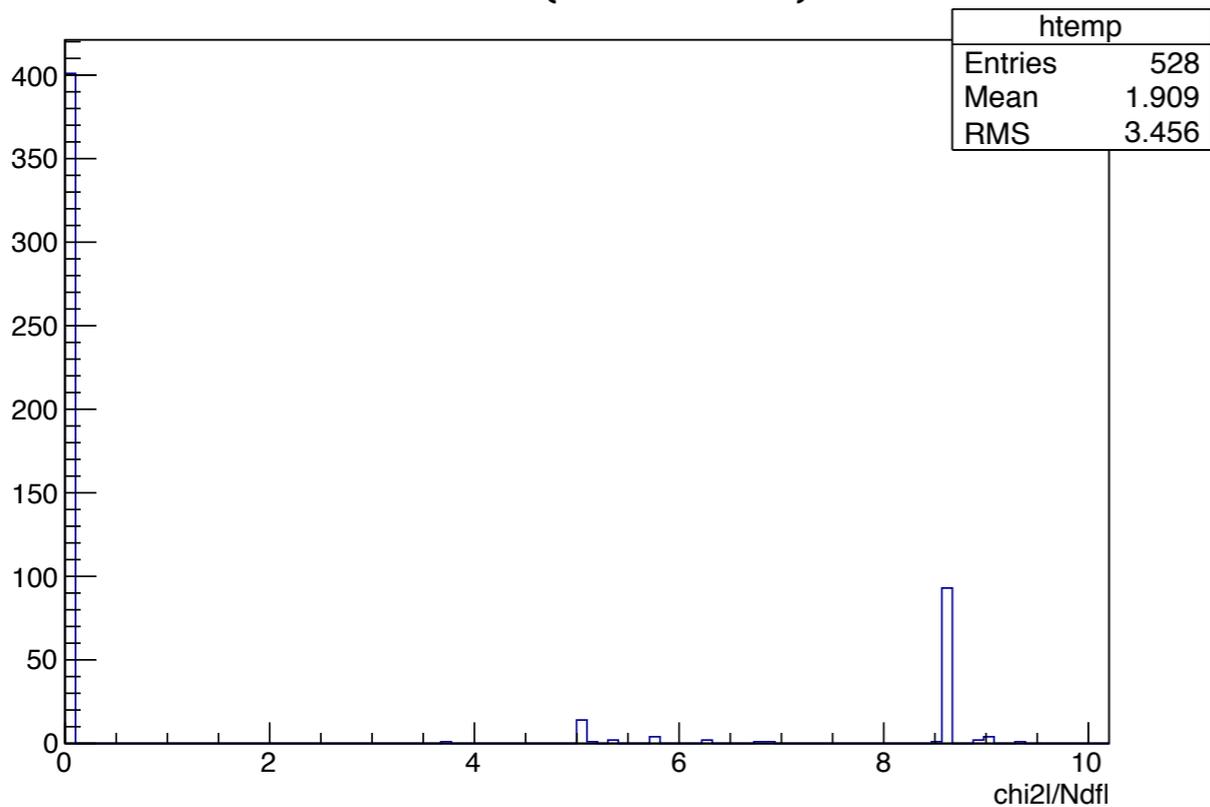


フラックスが \cos^3



解析(ミュオン束)左側

chi2I/NdfI {chi2I/NdfI<10}



chi2I/NdfI

