

# 宇宙線ミュオンを用いた火山内部の密度分布測定に関するシミュレーション研究

東京大学 素粒子物理国際研究センター M1

辻 直希

# 目次

- \* 目的
- \* 背景
- \* 実験方法
- \* 実験結果
- \* 考察
- \* 展望
- \* 結論

## ミュオグラフィとは？

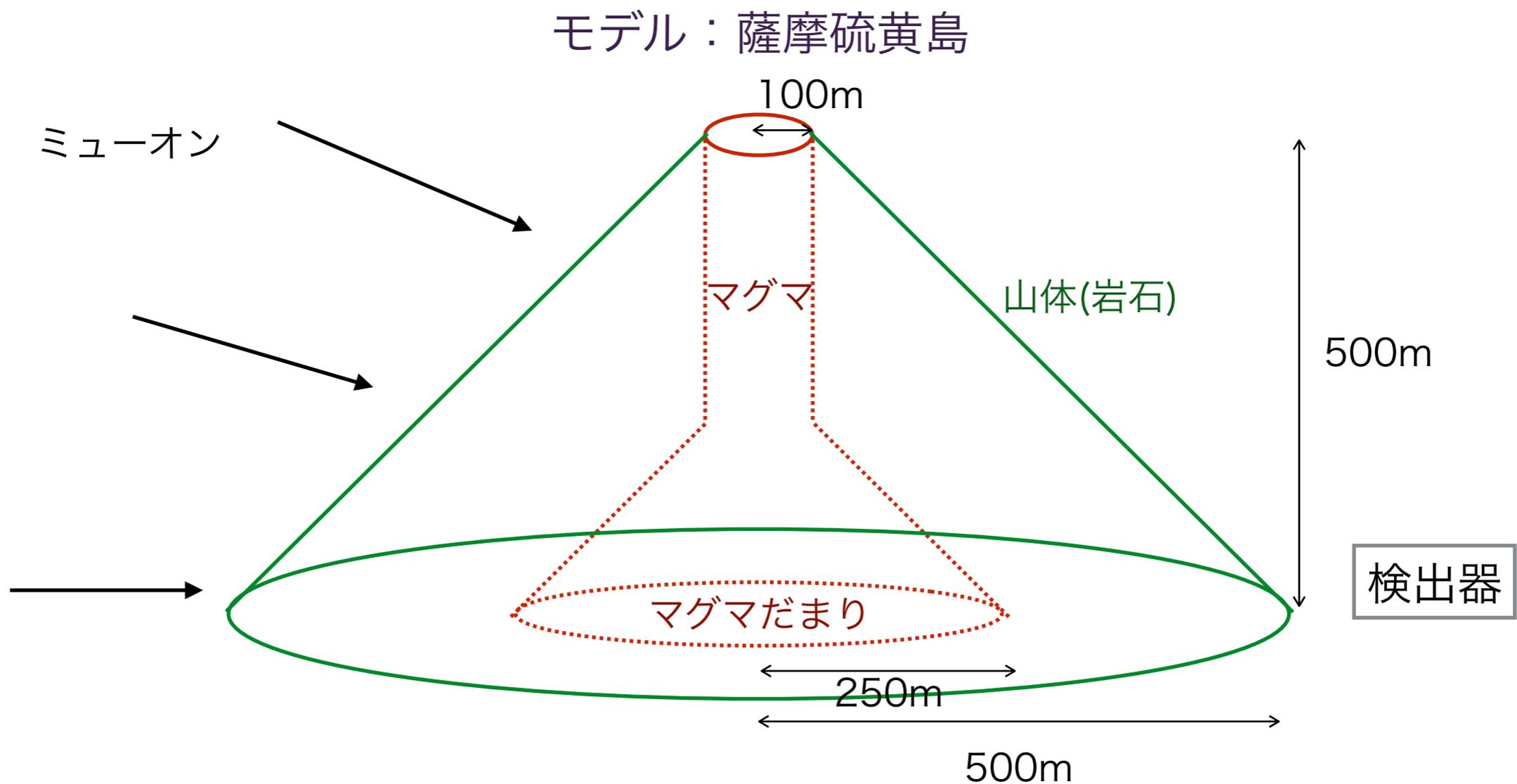
- \* ミューオンを用いた透過撮影技術
  - \* ミューオン：数kmの岩盤さえ通り抜ける高い透過力を持っている。
  - \* 非常に高密度の物質の中では、通過できるミューオンの個数が減る。
- \* ミューオンの飛来した方向と数を検出することで、レントゲン写真のように巨大物体内部の密度分布が調べられる。
- \* 火山内部の密度分布を、ミュオグラフィの手法を使って調べる。

## 目的

- \* マグマの有無などの火山の組成の違いをどれくらいの精度で測定できるかを調べる。
- \* そのために、マグマ有り、無し、全て岩石の場合に分けてシミュレーションを行い、その結果を比較する。

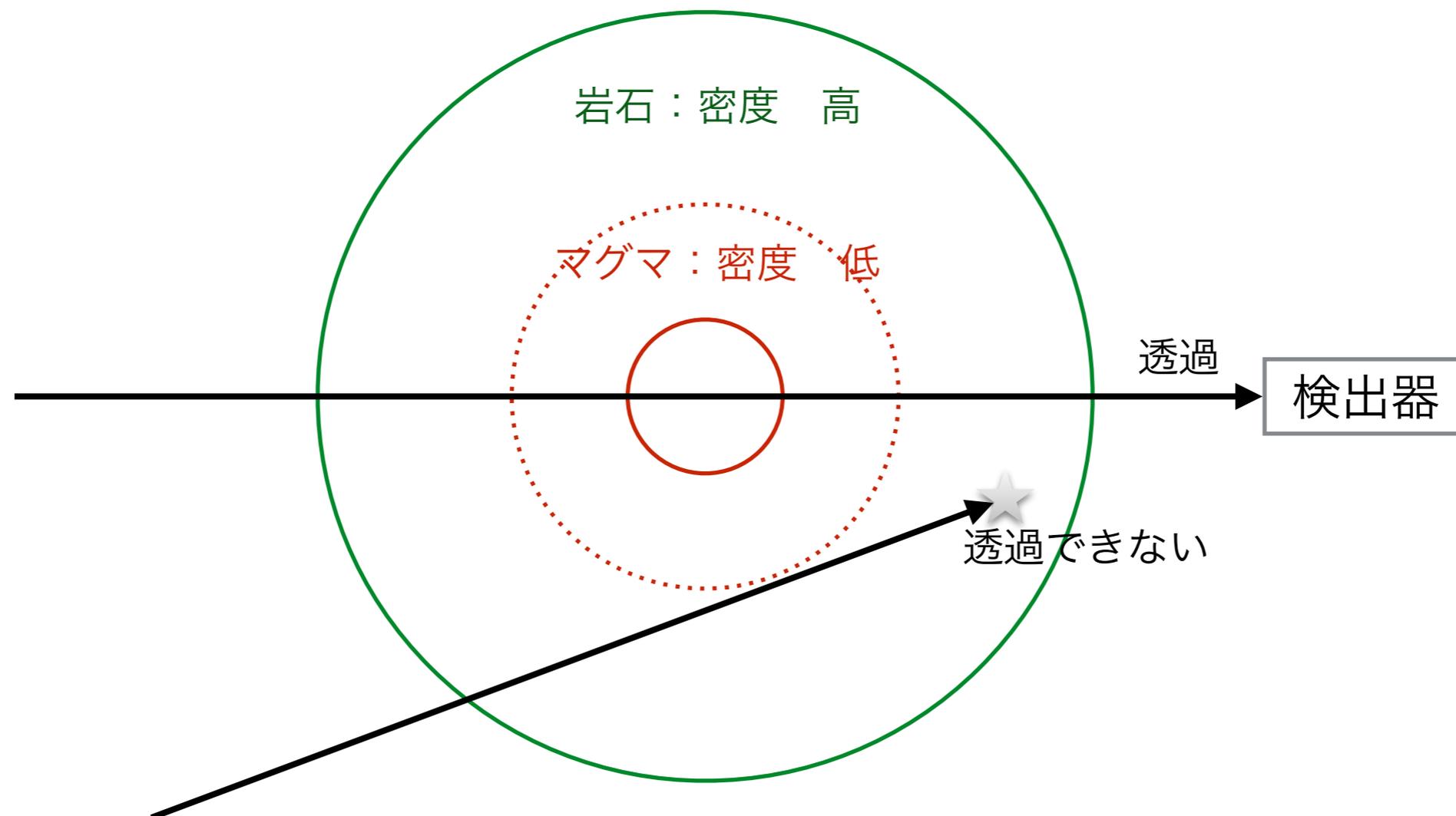
# 火山

- \* ミューオンが宇宙線シャワーにより入射してくる。
- \* 火山を透過したミューオンを捕らえる。



## 原理

- \* 密度の低い物体を通るミュオンは透過しやすい。
- \* 密度の高い物質を通るミュオンは透過できない。



## 実験方法

- \* 九州大学においてミュオグラフィを用いた火山透視のプロジェクトが進行中。
- \* その設計を元にシミュレーションを行いました。

## 検出器

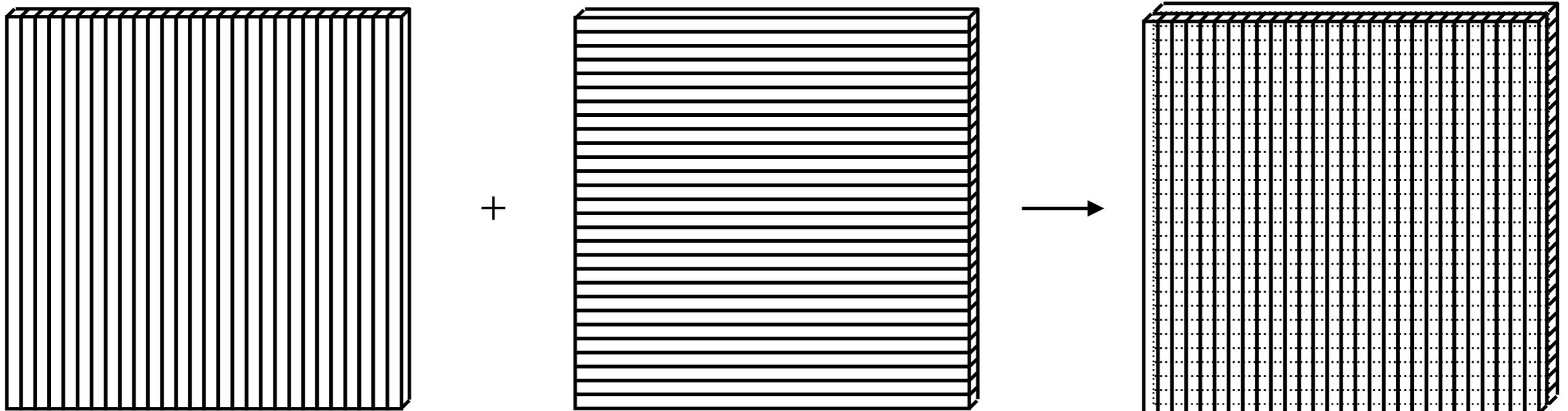
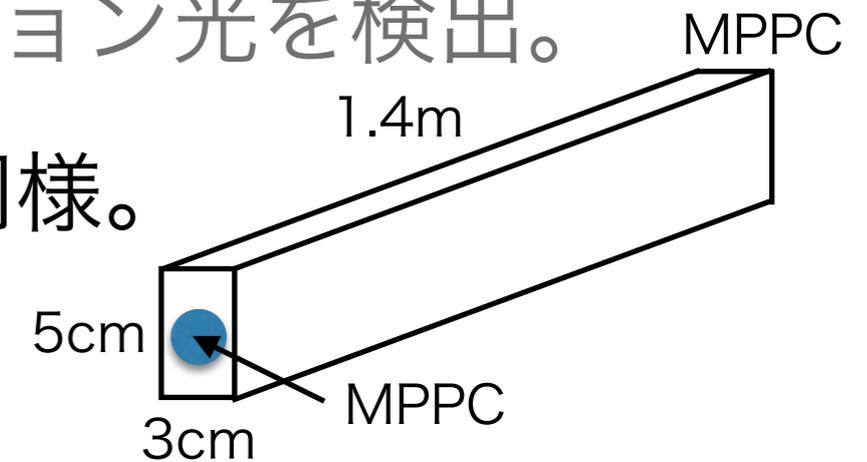
\* 3cm×5cm×1.4mの棒状シンチレータ

\* 両端にMPPCをつけてシンチレーション光を検出。

\* 28本を縦方向に並べる。横方向にも同様。

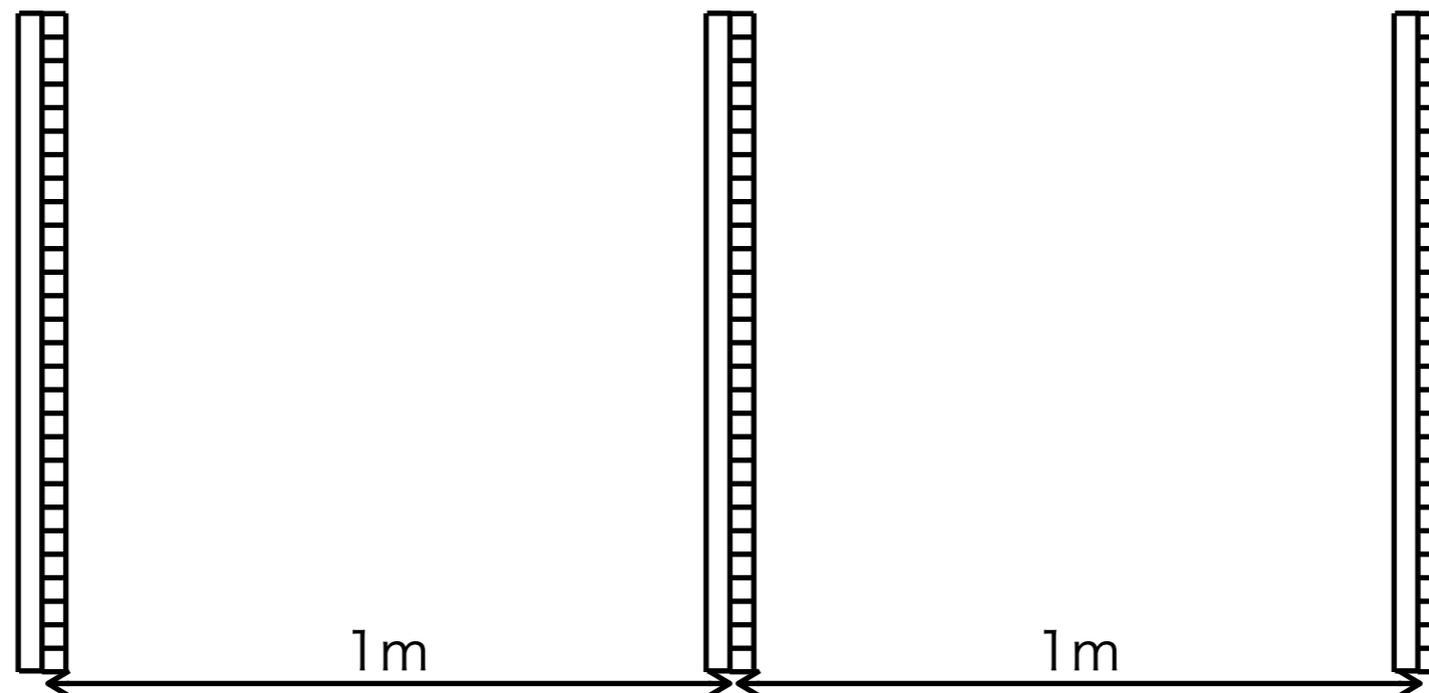
\* 縦方向、横方向を合わせて一組。

\* それぞれの方向で座標、角度を決定するため。



## 検出器

- \* 3組を1mずつ離して配置する。
  - \* 角度分解能を上げるため。
  - \* バックグラウンドを軽減する、透過ミューオンのみを検出するため。(2組だとシンチレータ間で散乱した粒子も検出してしまう)
- \* 縦方向、横方向それぞれで角度を再構成する。



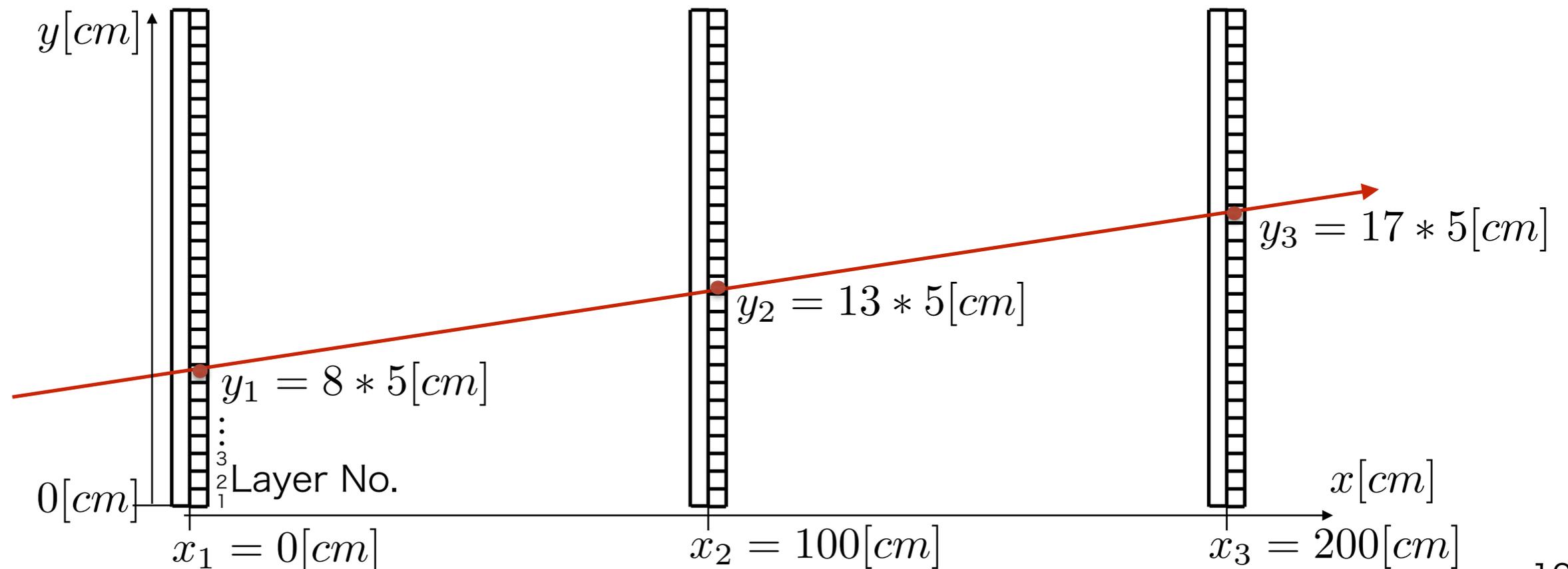
# 入射角度再構成

\* 最小二乗法で直線近似  $y = ax + b$

$$a = \frac{3 \sum_{k=1}^3 x_k y_k - \sum_{k=1}^3 x_k \sum_{k=1}^3 y_k}{3 \sum_{k=1}^3 x_k^2 - (\sum_{k=1}^3 x_k)^2}$$

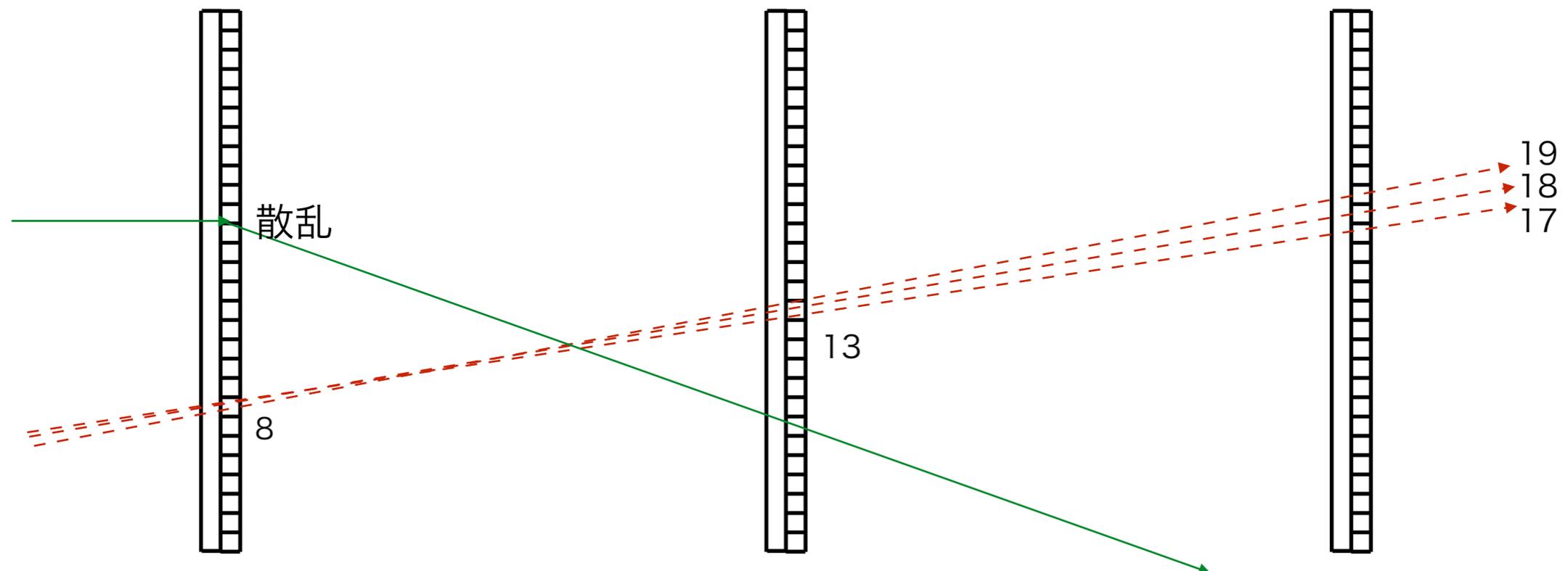
$$= \frac{5(3(100 * 13 + 200 * 17) - (100 + 200)(8 + 13 + 17))}{3(100^2 + 200^2) - (100 + 200)^2} = 0.225$$

$$\phi = \arctan a * \frac{180}{\pi} = 12.7^\circ$$



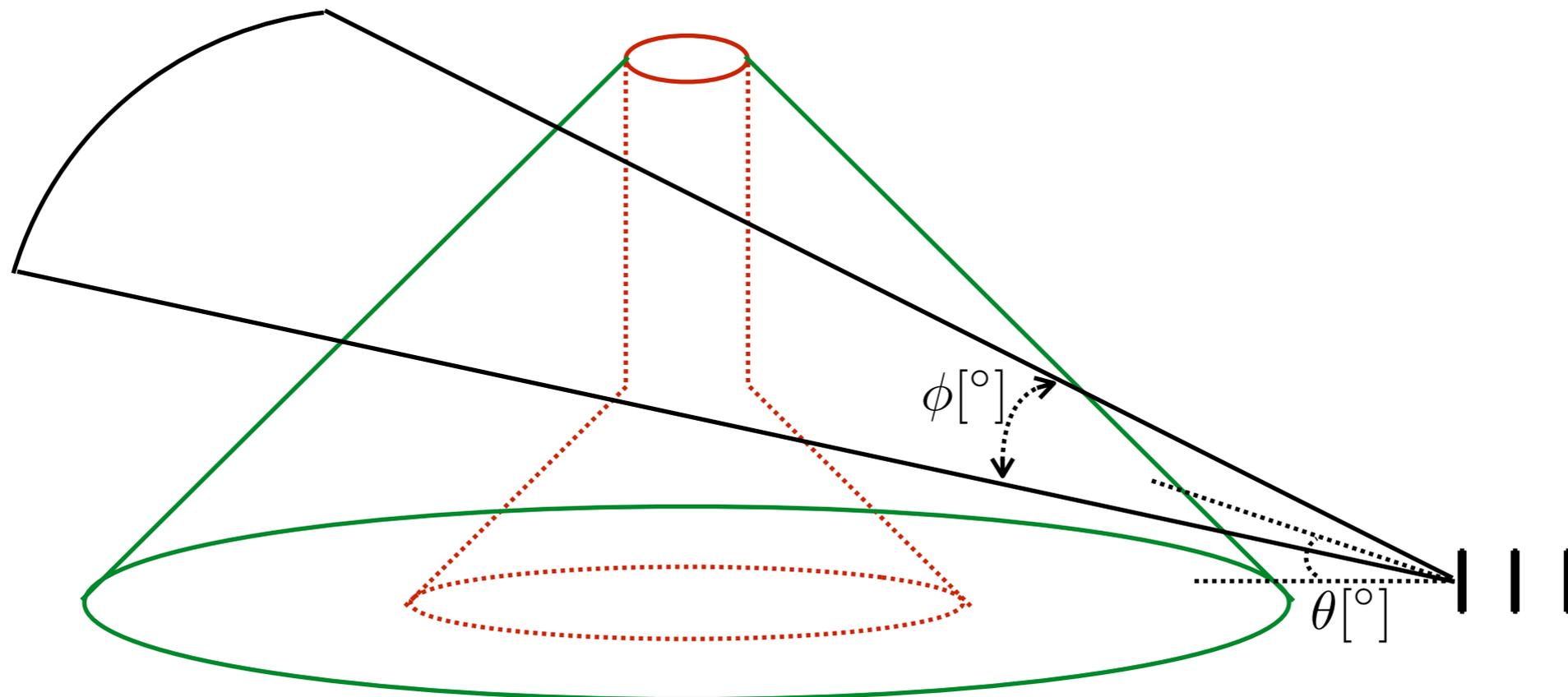
## 3組である理由

- \* 通過したレイヤーナンバーが(8,13,17)のときと(8,13,18)のとき、(8,13,19)のときを区別できる。
- \* 2組では区別できず、(8,13)しか読み取れない。
- \* 2組だと途中で散乱した粒子とミュオンを区別できない。



# 角度

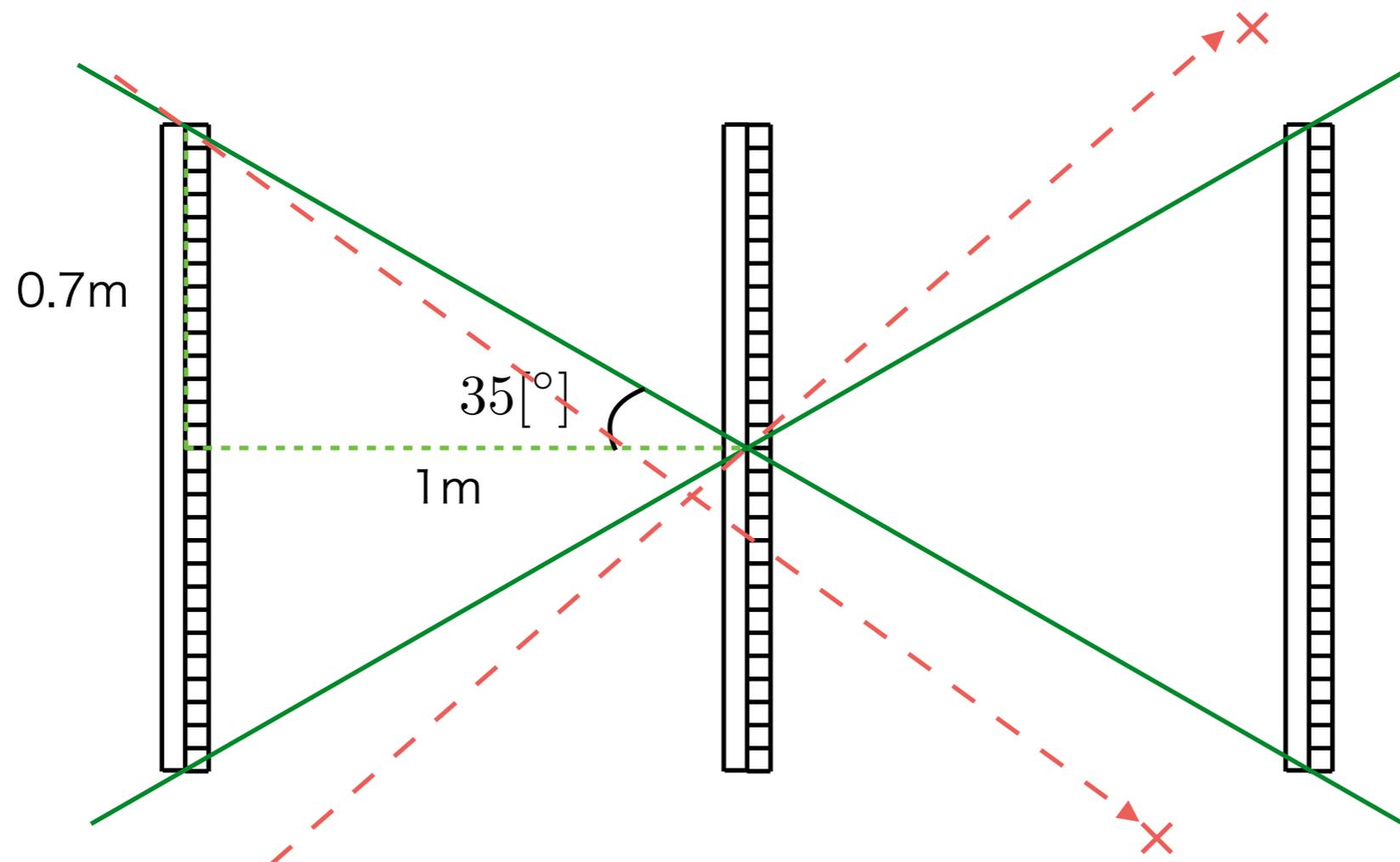
- \* 鉛直方向の角度を  $\theta[^\circ]$ 、水平方向の角度を  $\phi[^\circ]$  とする。
- \* それぞれの角度に関して角度を再構成。角度ごとにミューオンの数を測定。



# 検出可能な角度

\* 3組のシンチレータで検出可能な角度の最大値

$$\arctan \frac{0.7}{1} = 35[^\circ]$$



## シミュレーション

- \* Geant4を用いたシミュレーション
- \* 火山を設置し、その前方に検出器を設置する。
- \* 火山の後方からミューオンを飛ばし、透過したミューオンを測定する。
  - \* 検出器に届かなかったものや、3組全てのシンチレータに入射しなかったもの、検出器内で角度が変化したものは除外。
  - \* 透過したミューオンに対して角度を再構成。

$\theta = 0[^\circ]$ のとき

## \* 岩石 密度

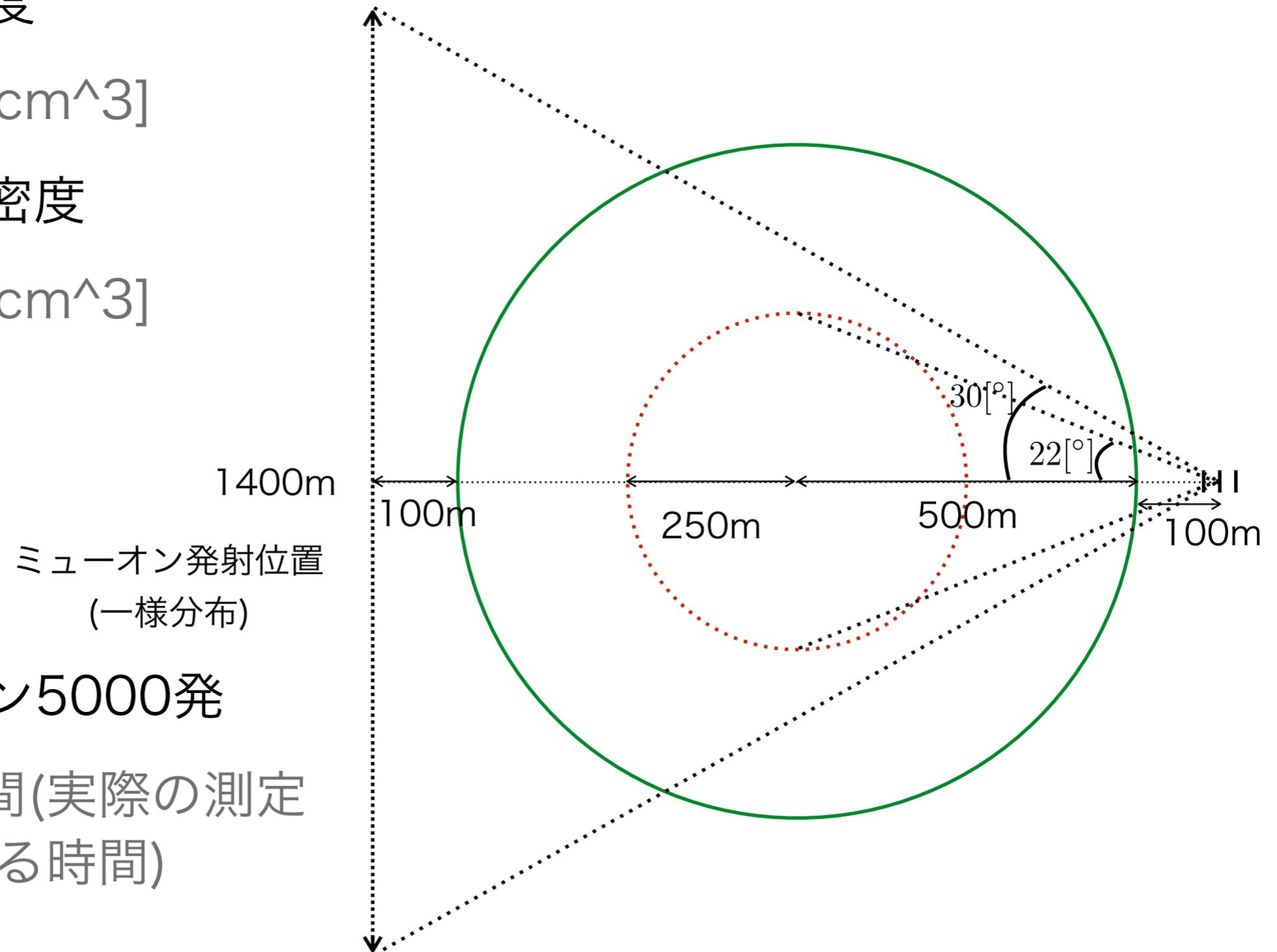
\*  $2.9[\text{g}/\text{cm}^3]$ 

## \* マグマ 密度

\*  $1.4[\text{g}/\text{cm}^3]$ 

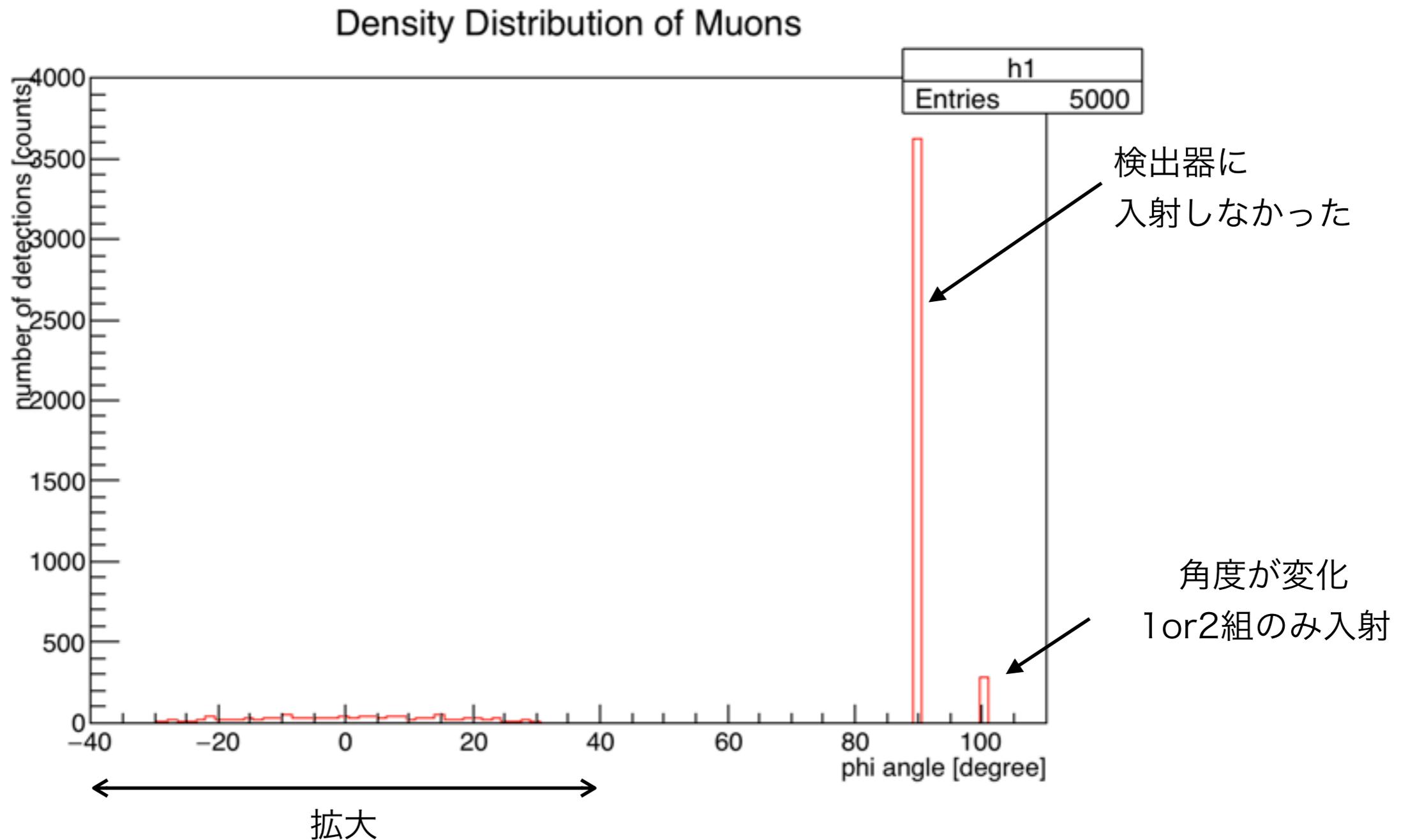
## \* ミューオン5000発

\* 約2日間(実際の測定にかかる時間)



$\theta = 0[^\circ]$  実験結果

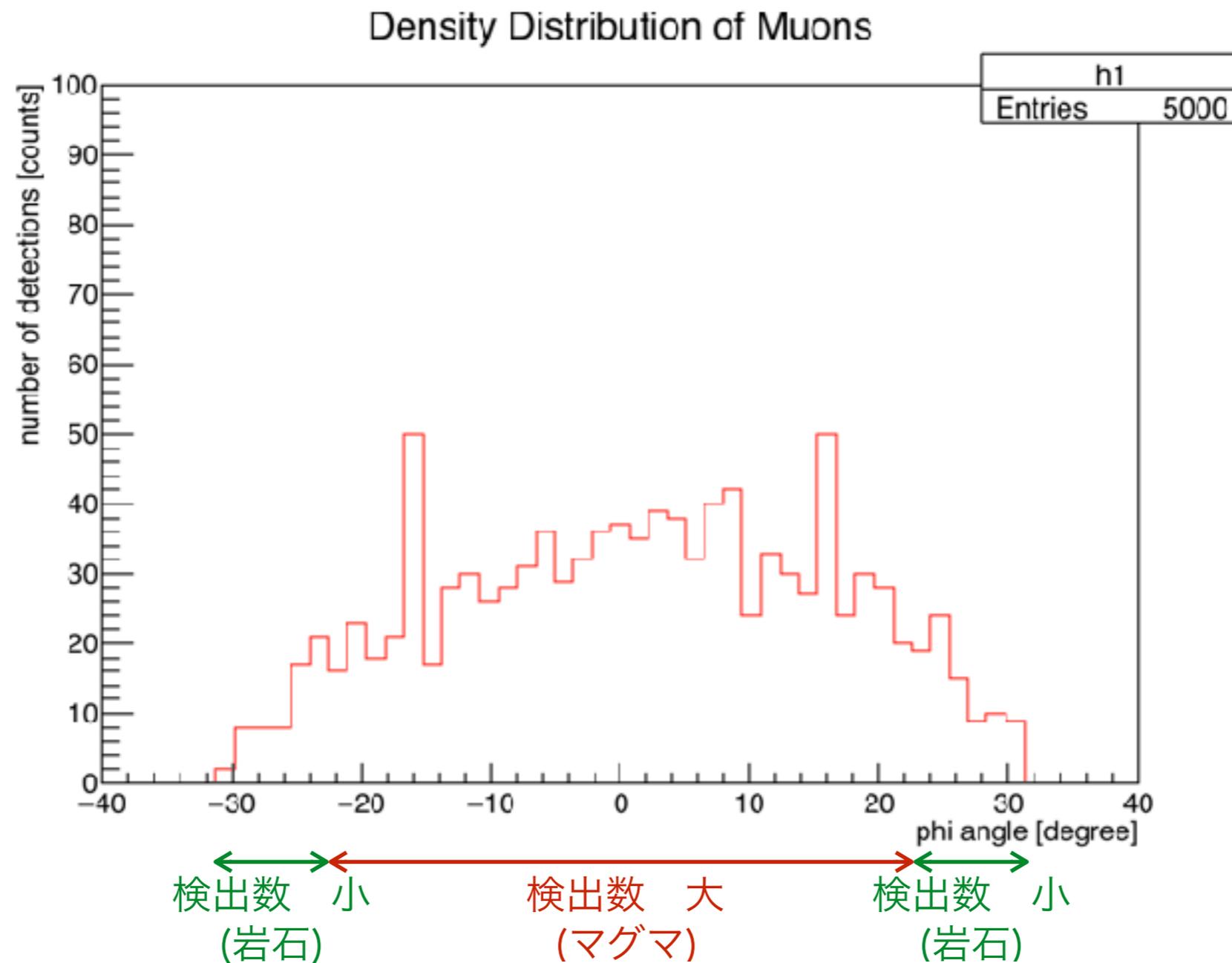
\* マグマがある場合



$$\theta = 0[^\circ]$$

\* マグマがある場合 (拡大)

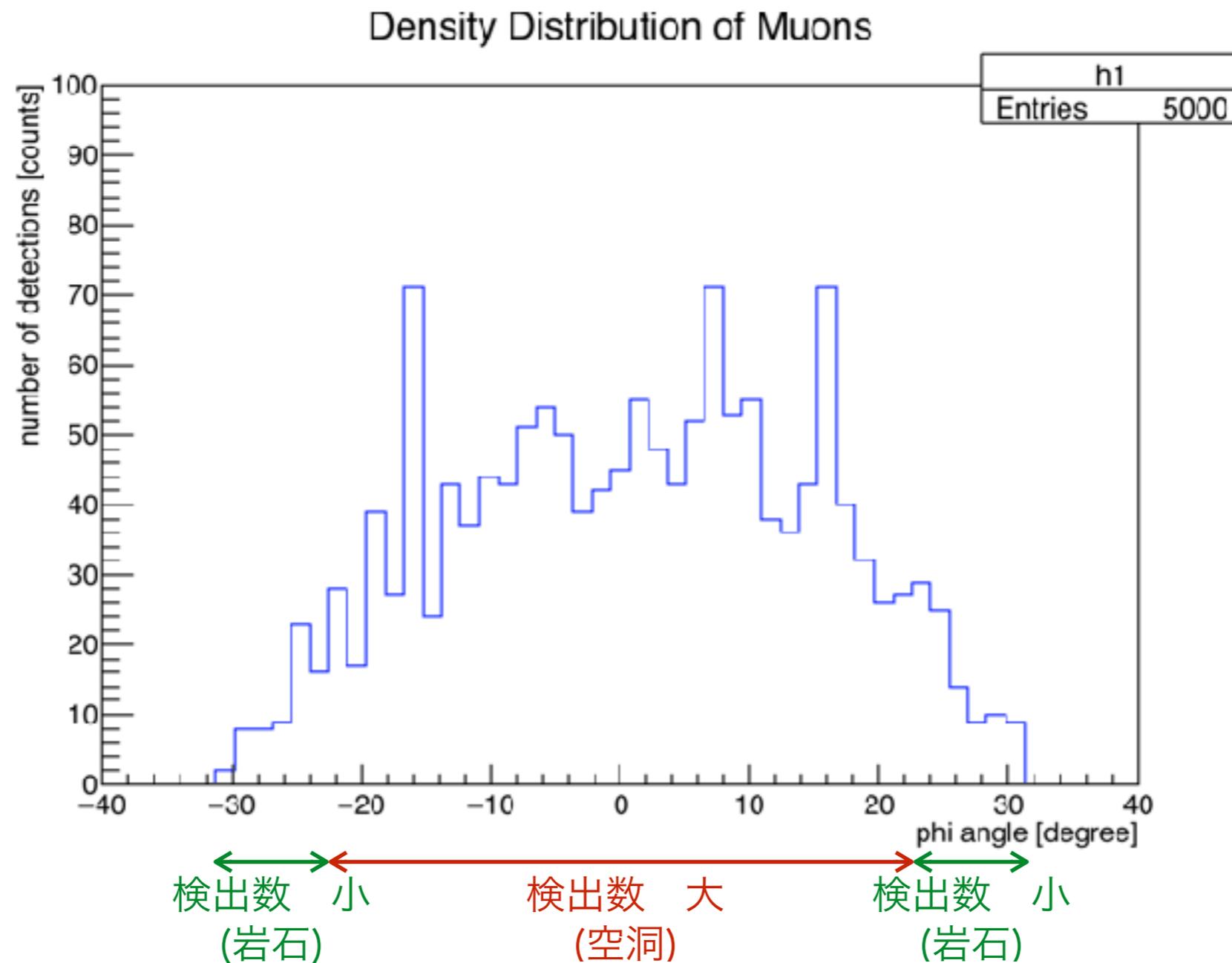
\*  $-22^\circ \sim 22^\circ$  に低密度の物質が存在



$$\theta = 0[^\circ]$$

\* マグマが無い（空洞の）場合

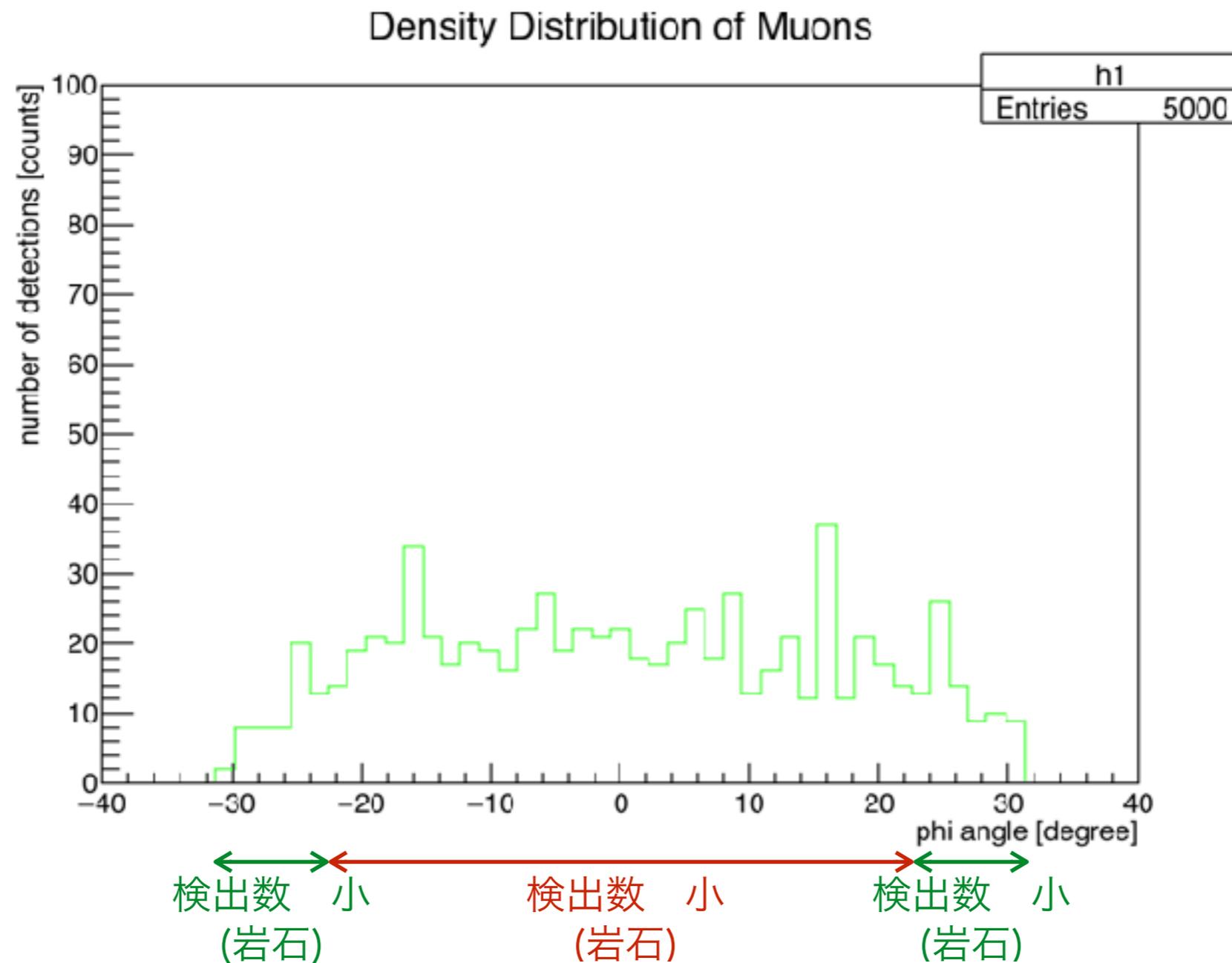
\*  $-22^\circ \sim 22^\circ$ にさらに低密度の物体



$$\theta = 0[^\circ]$$

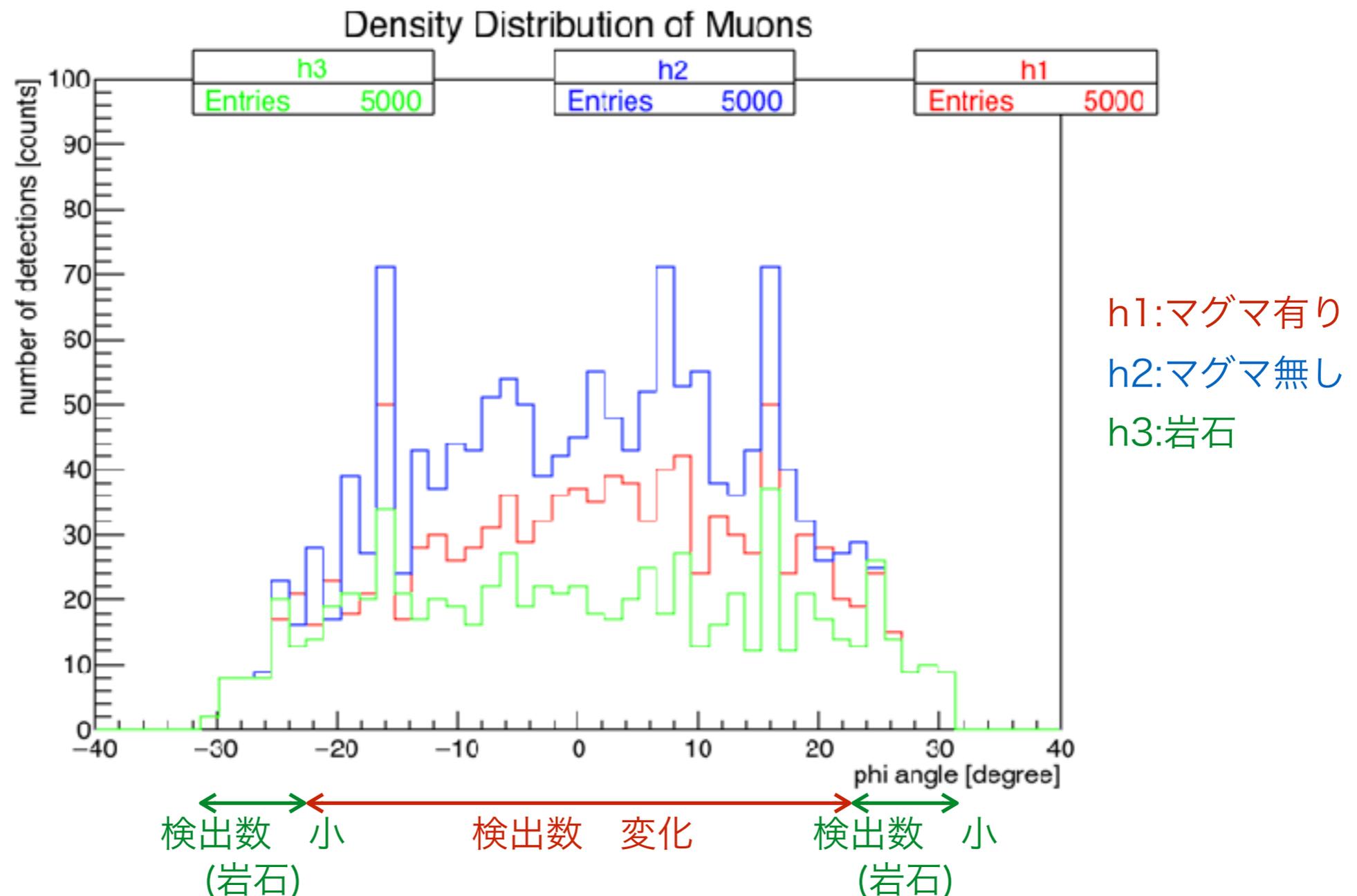
\* 岩石の（マグマが固まっている）場合

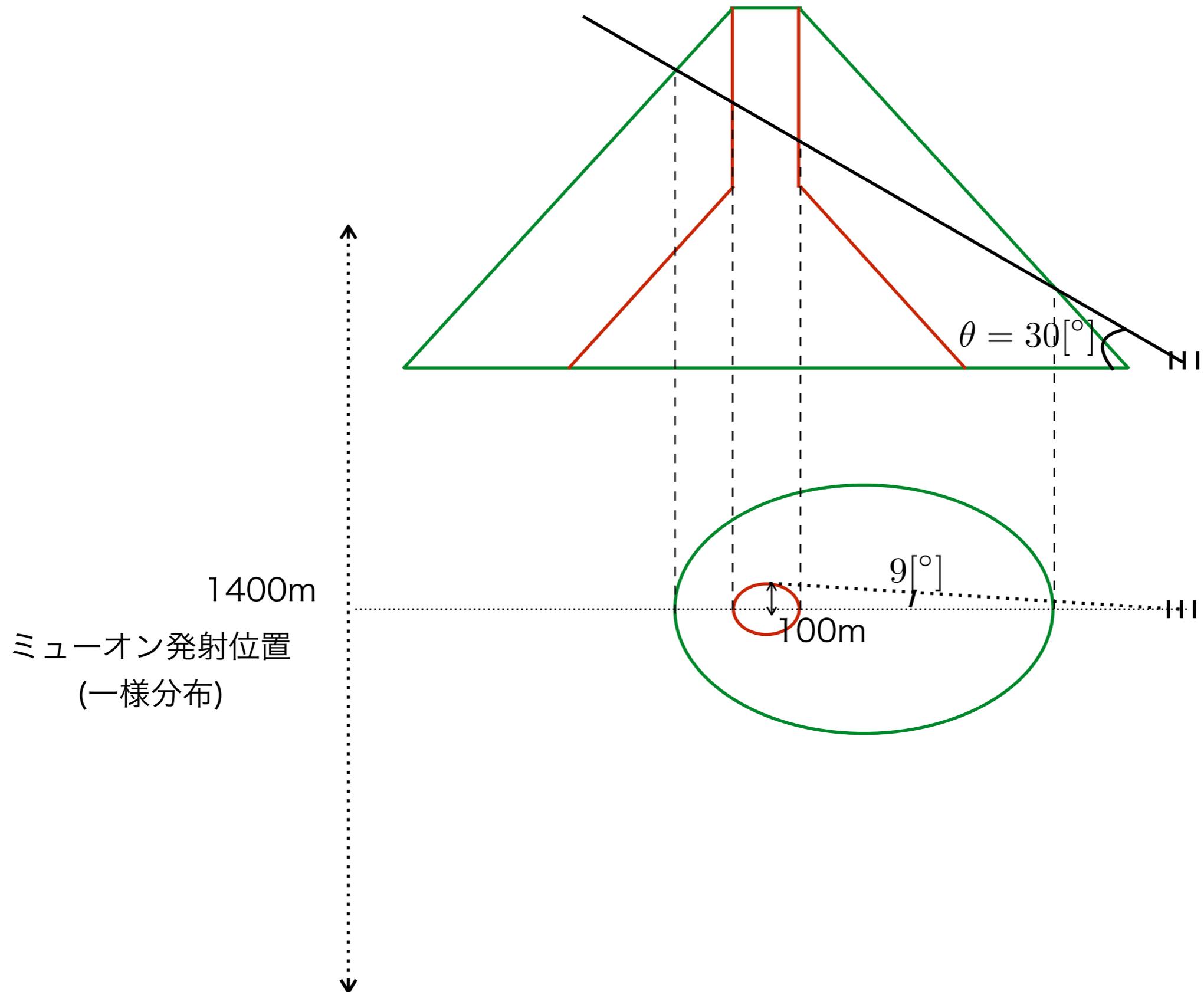
\* 密度変化なし



## $\theta = 0[^\circ]$ 比較

- \* 密度の変化によりミューオンの検出数が変化。
- \* 高密度の物質のときは少なく、低密度のときは多い

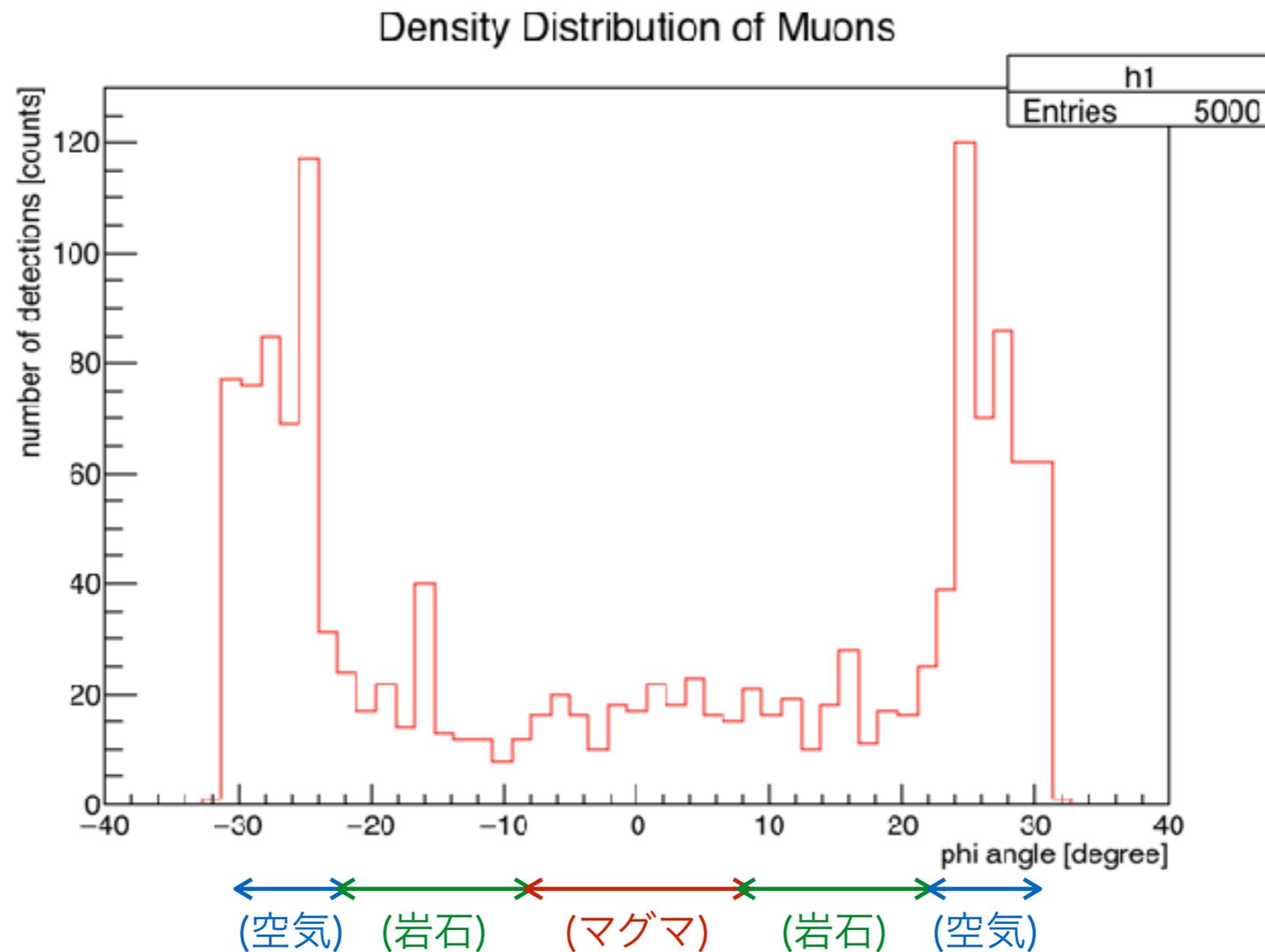


$\theta = 30[^\circ]$  のとき

$$\theta = 30[^\circ]$$

\* マグマがある場合

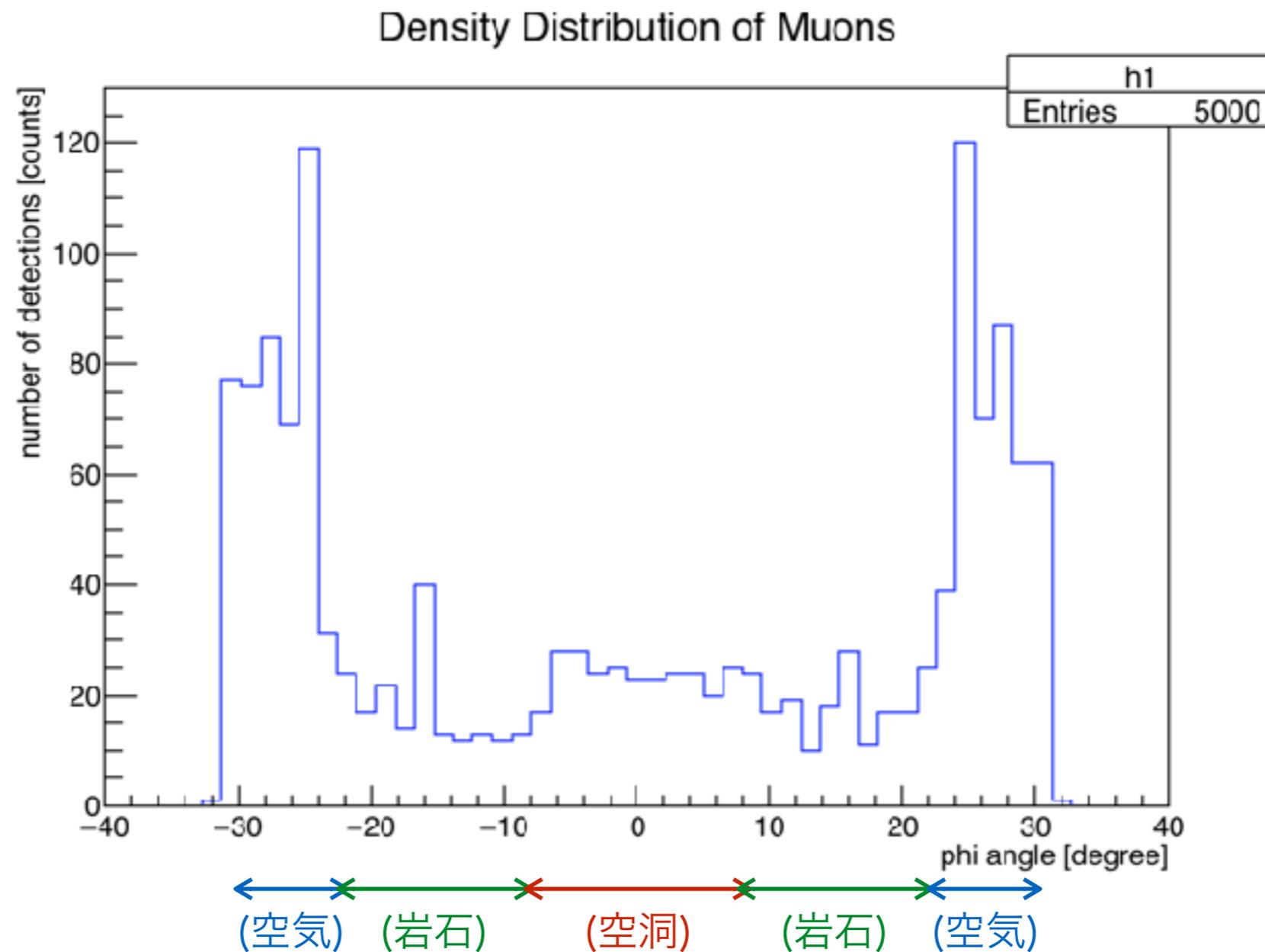
- \* 検出数の差が小さい。低密度物質が存在？



$$\theta = 30[^\circ]$$

\* マグマが無い（空洞の）場合

\* 検出数の差有り。低密度の物体が存在。

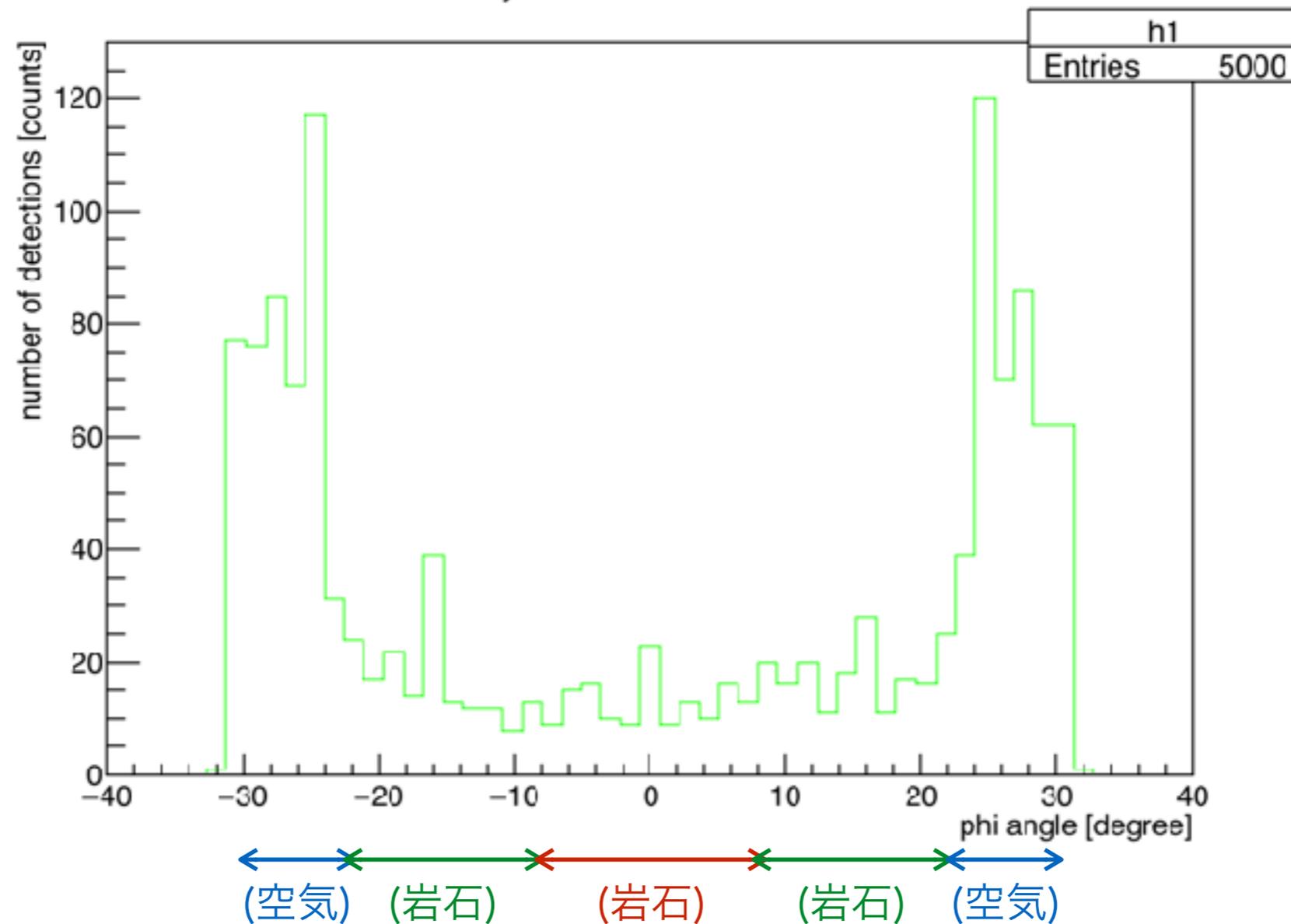


$$\theta = 30[^\circ]$$

\* 岩石の（マグマが固まっている）場合

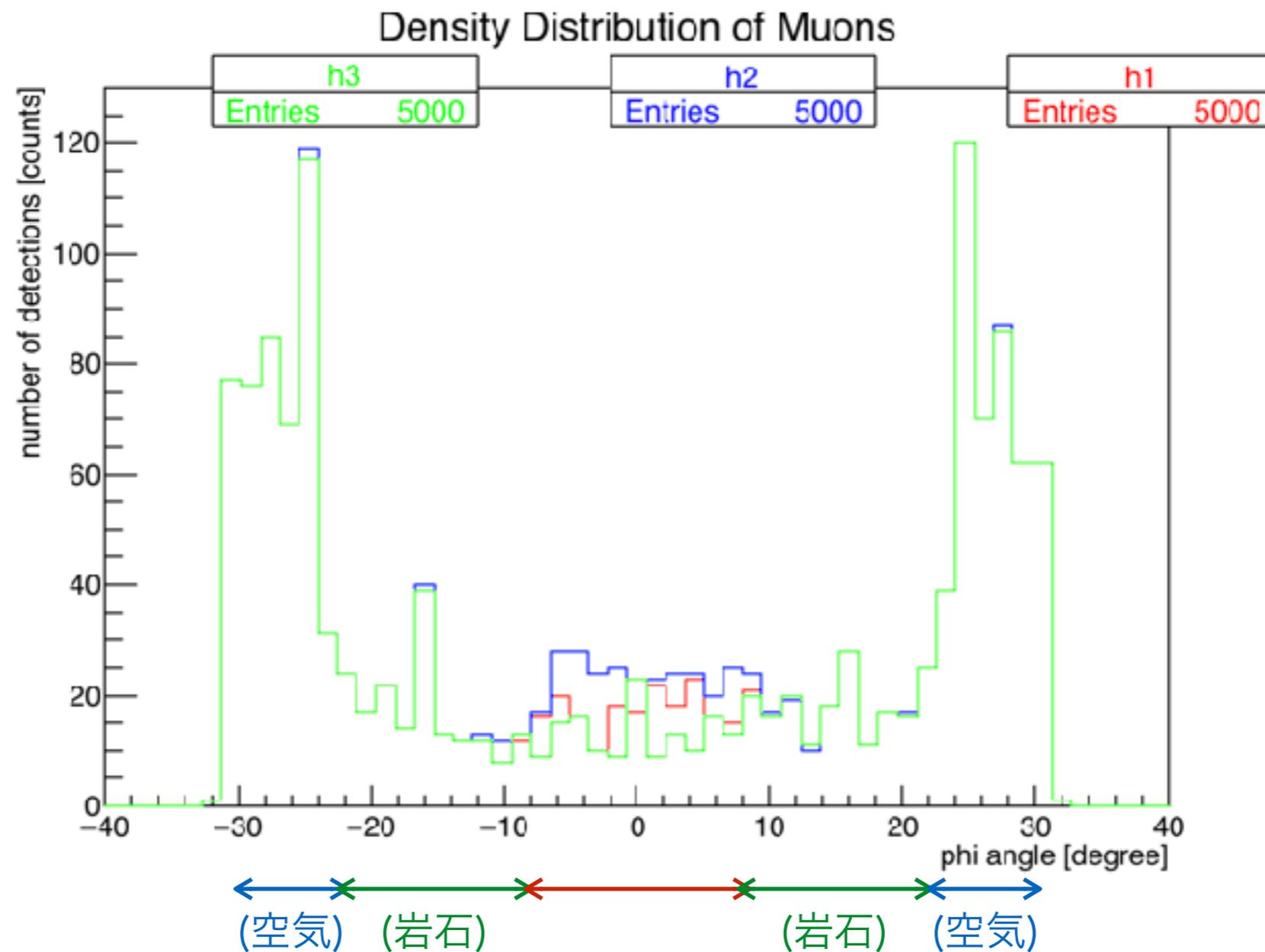
\* 検出数の差がない。密度変化なし。

Density Distribution of Muons



$\theta = 30[^\circ]$  比較

- \*  $\theta = 0[^\circ]$  の時と比べて検出数の差が少ない。
- \* 小さい(細い)物質は見分けづらい。



## 考察

- \* 密度の違いにより、確かに透過ミューオンの数が変化している。
  - \* 密度が低い物質を通る経路は検出数が多くなる
  - \* 密度が高い物質を通る経路は検出数が少なくなる。
- \* 山体（岩石）との検出数の違いにより、密度の低い物質が存在していることが分かる。
- \* しかし、密度の低い物質が細かったり小さかったりする場合は、ミューオン検出数の変化が見分けづらい。

## 課題点

- \* 細い（小さい）物質をどう捉えるか。
- \* 検出器を置く場所について考えなければならない。
  - \* 山から近いと、検出可能角度の限界により山全体を観測できない。
  - \* 山から遠いと、火山道が細い場合は検出数の違いを見分けにくい。
- \* さらに多くのイベント数や様々な場合についてシミュレーションする

## 展望

- \* ミュオグラフィにより、火山の組成の解明や、噴火の兆候を捉えることにつながる。
- \* 火山、ピラミッドにミュオグラフィを用いる研究が実際に行われている。
  - \* 火山：東京大学 田中宏幸教授、ピラミッド：名古屋大学 森島邦博特任助教
- \* さらに、様々な用途に応用することができる。
  - \* ニュートリノを使って地球を透視する。コアの有無を直接測定。

## 結論

- \* ミュオグラフィのシミュレーションにより火山の密度分布を調べ、密度の違いによりミュオンの検出数が変化することを確かめられた。
- \* また、山体との検出数の違いから、低密度のマグマが存在することを特定できた。

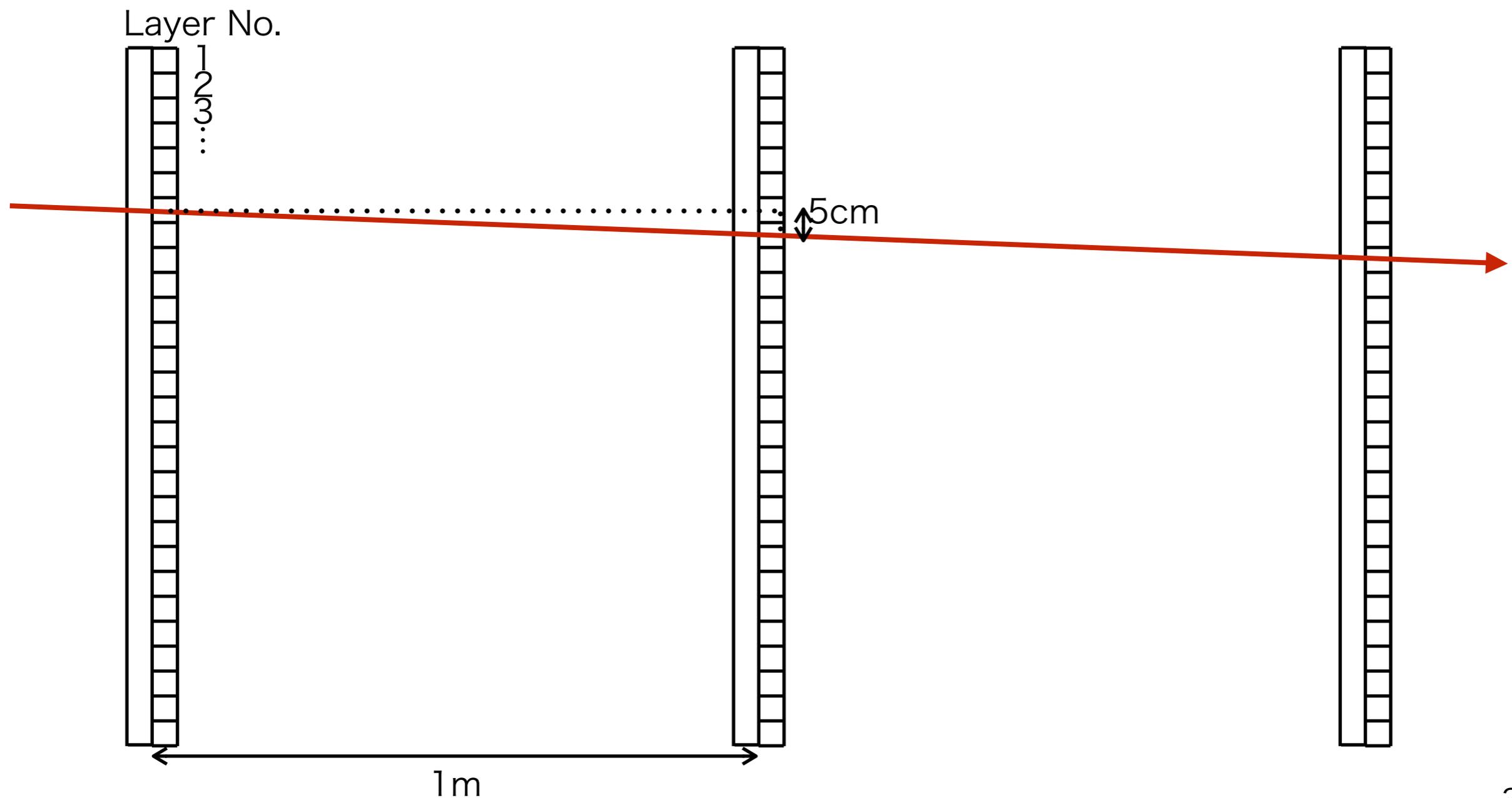
ご静聴ありがとうございました。

本研究にあたって、九州大学の末原大幹先生にご指導いただきました。

# Backup

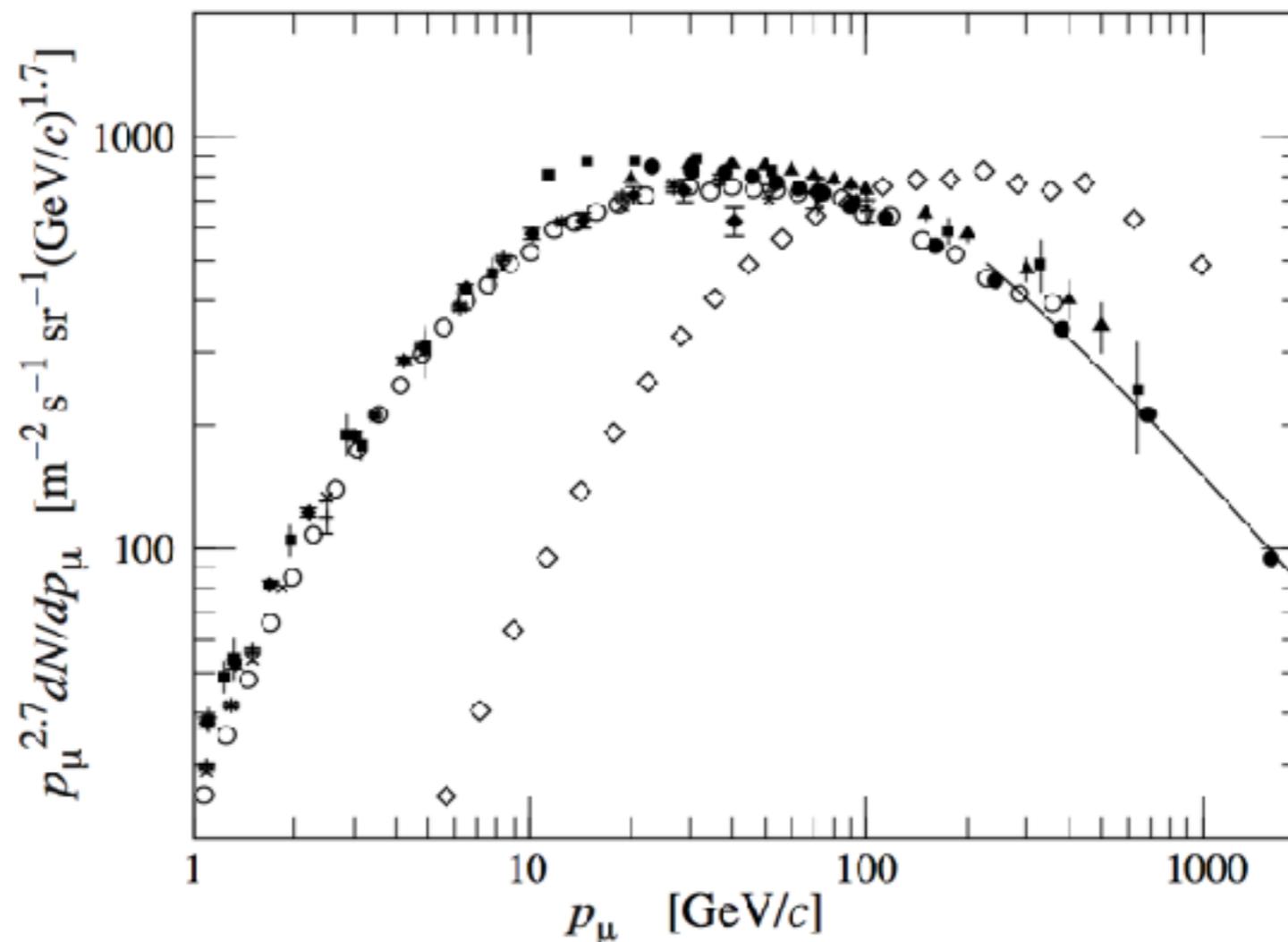
# 分解能

- \* 3組のシンチレータ間の距離：1m
- \* 分解能： $\arctan(5/100)=2.86^\circ$



# 宇宙線ミューオンのエネルギー

$$\frac{dN_\mu}{dE_\mu d\Omega} \approx \frac{0.14 E_\mu^{-2.7}}{\text{cm}^2 \text{ s sr GeV}} \times \left\{ \frac{1}{1 + \frac{1.1 E_\mu \cos \theta}{115 \text{ GeV}}} + \frac{0.054}{1 + \frac{1.1 E_\mu \cos \theta}{850 \text{ GeV}}} \right\}$$



**Figure 24.4:** Spectrum of muons at  $\theta = 0^\circ$  ( $\blacklozenge$  [41],  $\blacksquare$  [46],  $\blacktriangledown$  [47],  $\blacktriangle$  [48],  $\times$ ,  $+$  [43],  $\circ$  [44], and  $\bullet$  [45] and  $\theta = 75^\circ$   $\diamond$  [49]). The line plots the result from Eq. (24.4) for vertical showers.

## 宇宙線ミューオンの数

$$\frac{dN_{\mu}}{dE_{\mu}d\Omega} \approx \frac{0.14 E_{\mu}^{-2.7}}{\text{cm}^2 \text{ s sr GeV}} \times \left\{ \frac{1}{1 + \frac{1.1 E_{\mu} \cos \theta}{115 \text{ GeV}}} + \frac{0.054}{1 + \frac{1.1 E_{\mu} \cos \theta}{850 \text{ GeV}}} \right\}$$

\*  $\theta$  を指定してからEに関して積分

\*  $2.66 \times 10^{-5}$  [number/cm<sup>2</sup> sec sr]

\* シンチレータの面積、立体角をかける

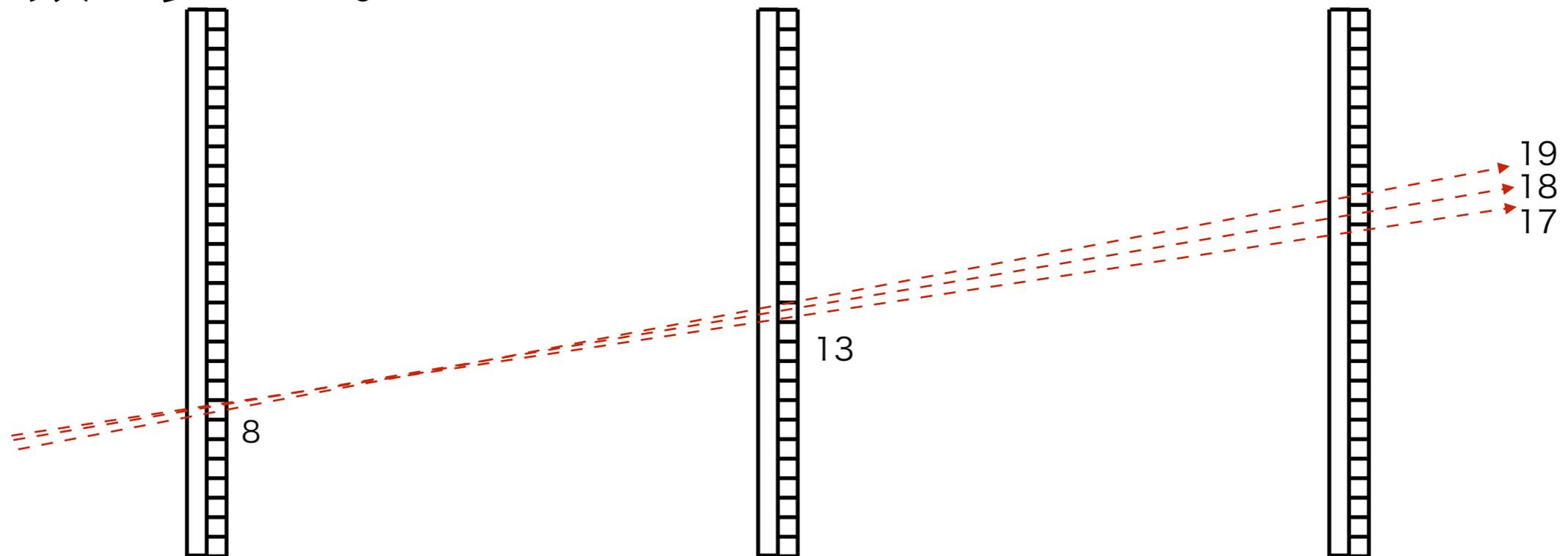
\* 0.0261 [number/sec]

\* 5000発にかかる時間

\*  $5000/0.0261 = 191567$  [sec] = 53 [hour] = 2.2 [day]

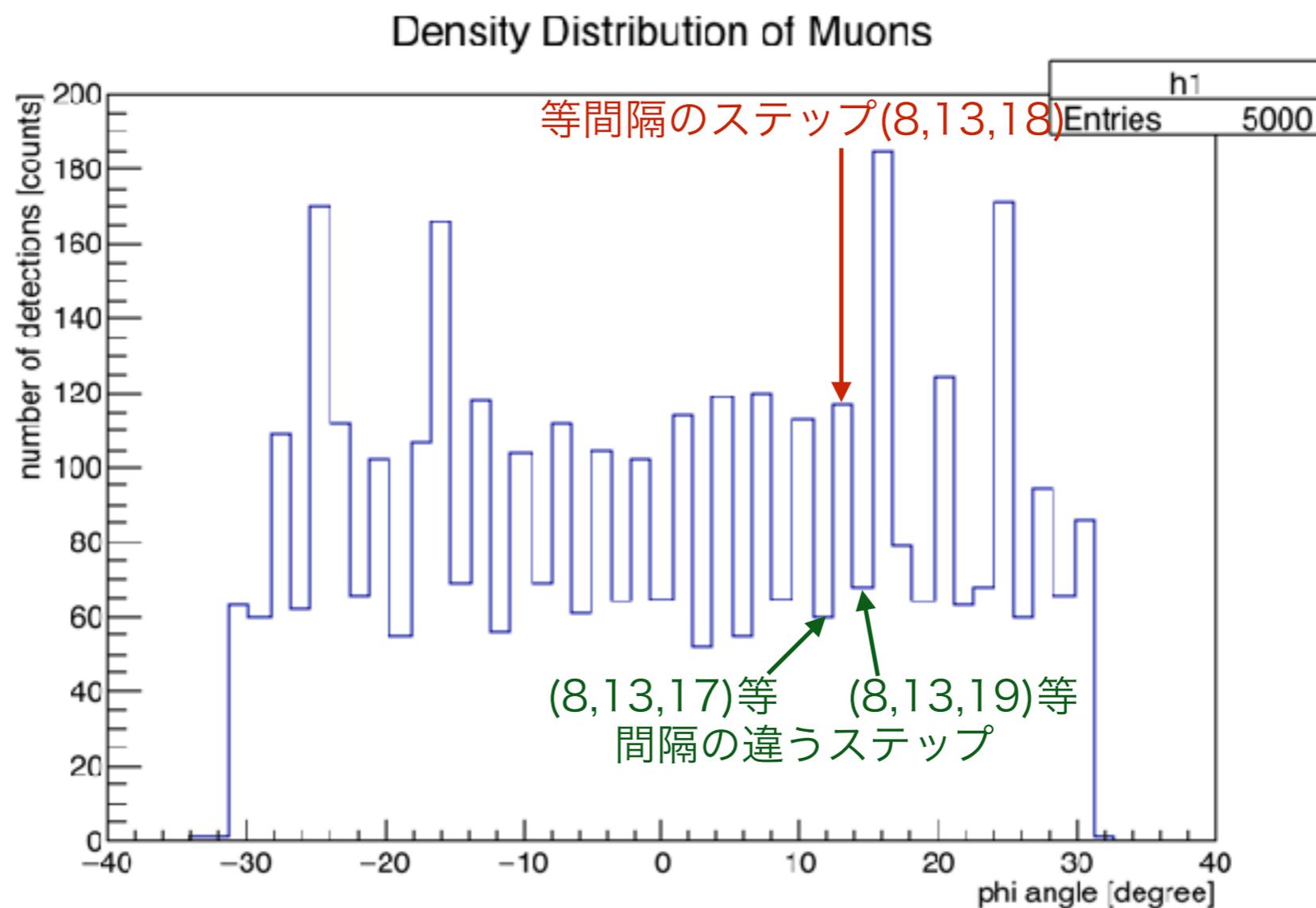
## 実験結果の突出部分

- \*  $8 \rightarrow 13 (=8+5) \rightarrow 18 (=13+5)$  のように等間隔のステップで入射するミュオン数が多い
- \*  $8 \rightarrow 13 (=8+5) \rightarrow 17 (=13+4), 8 \rightarrow 13 (=8+5) \rightarrow 19 (=13+6)$  のように、違うステップで入射するミュオンは、少し角度が変わるとすぐ違うレイヤーに入射してしまうため、数が少ない。



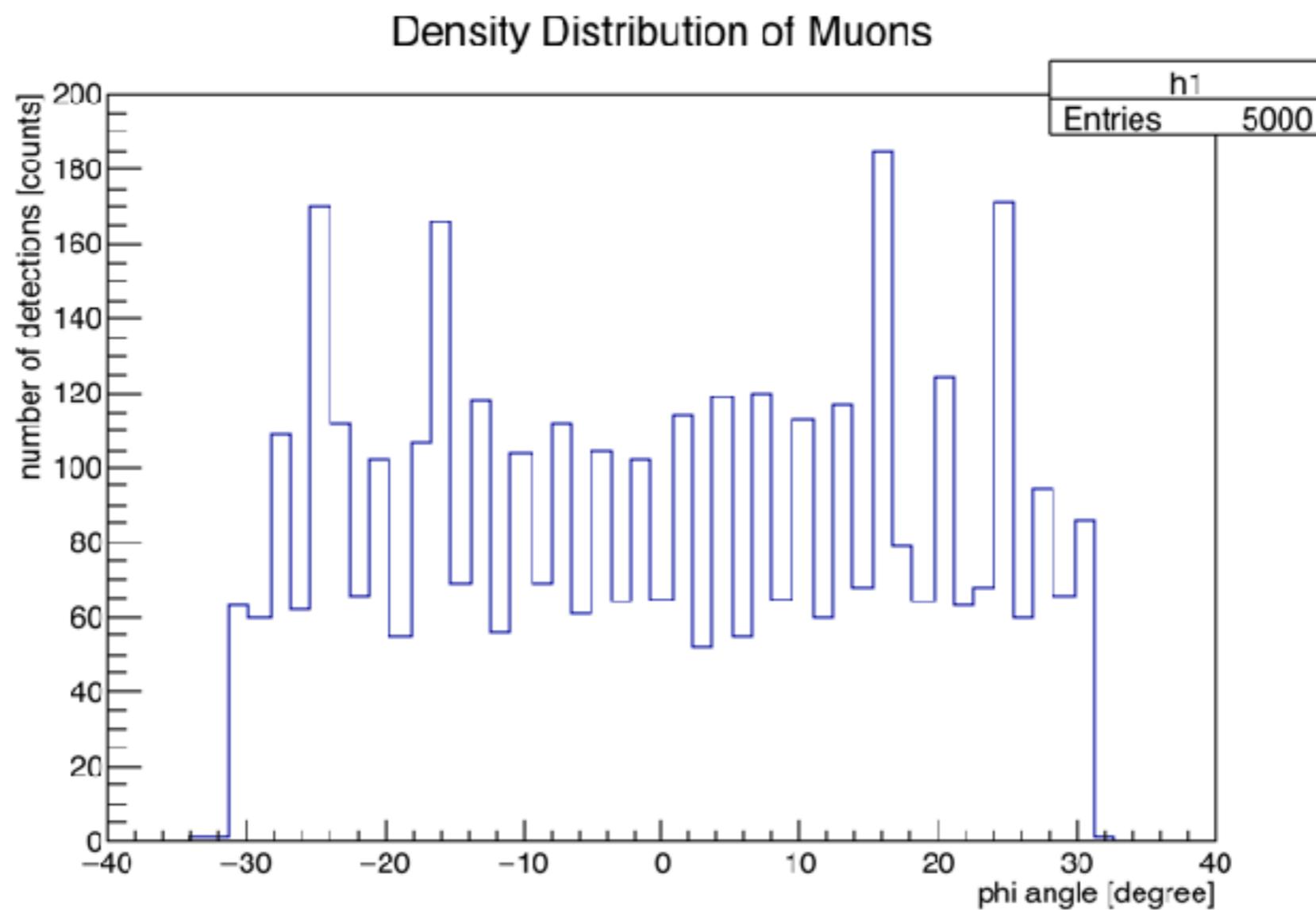
$$\theta = 0[^\circ]$$

\* 山がない場合



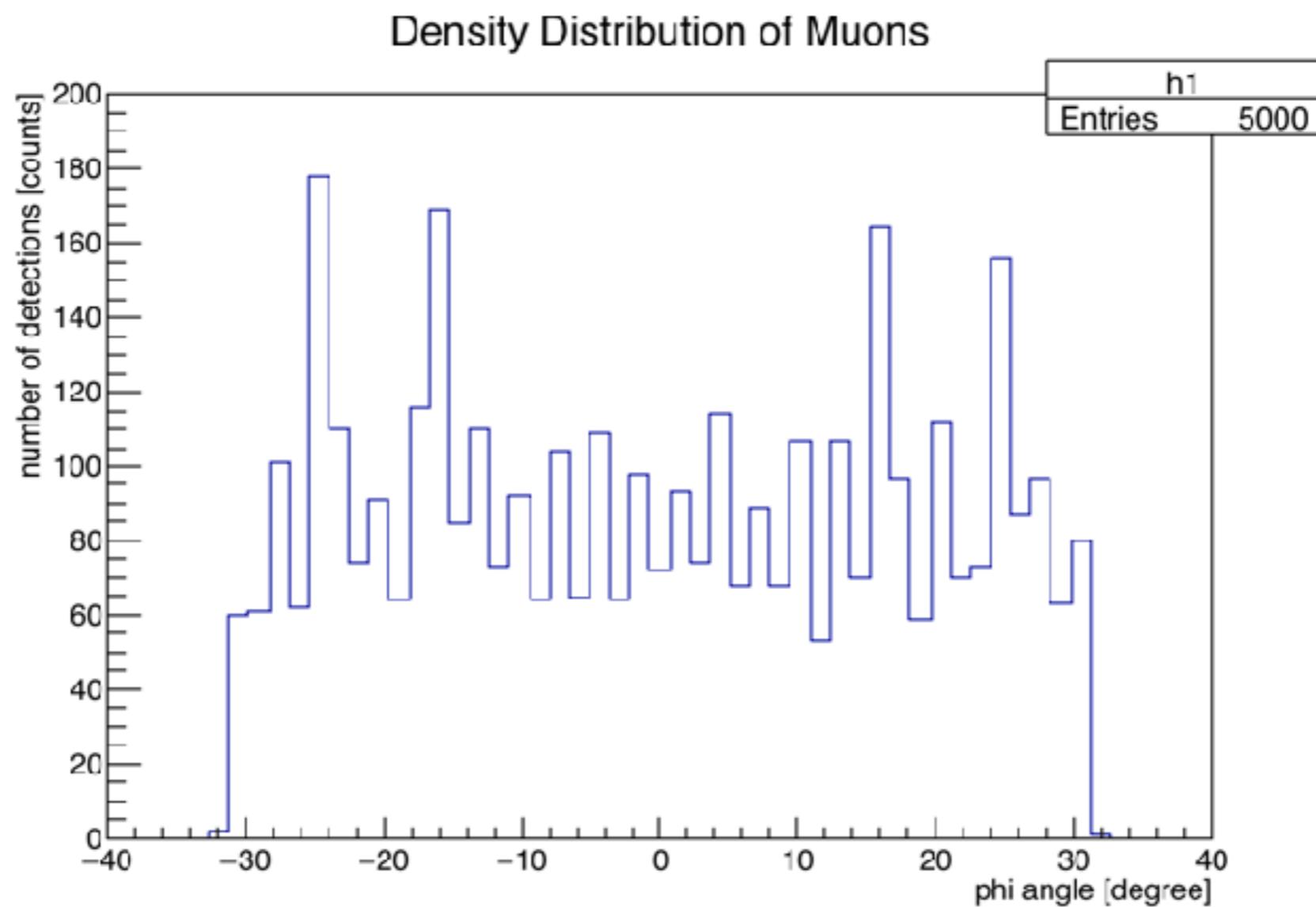
$$\theta = 0[^\circ]$$

\* 山がない場合

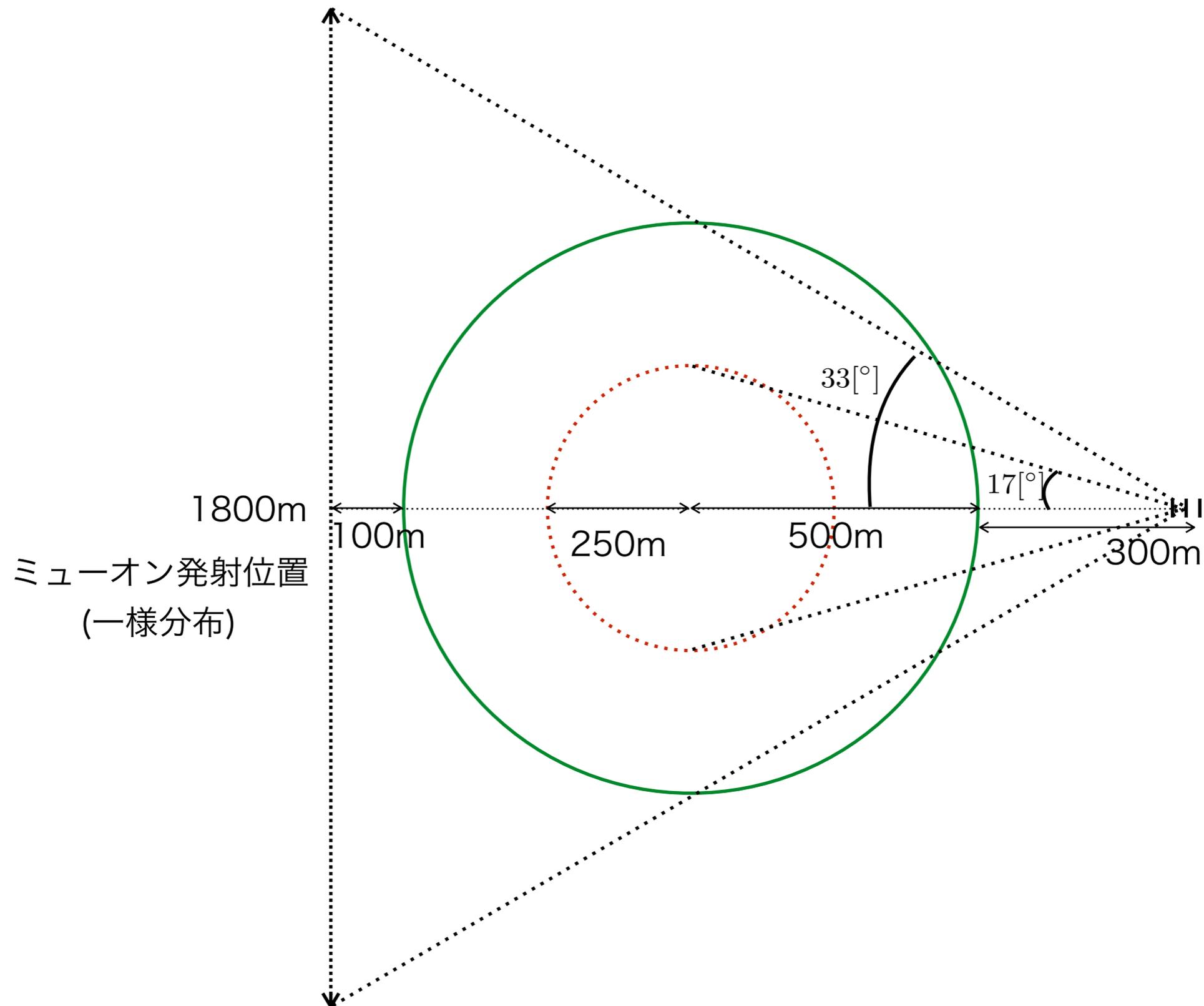


$$\theta = 30[^\circ]$$

\* 山がない場合

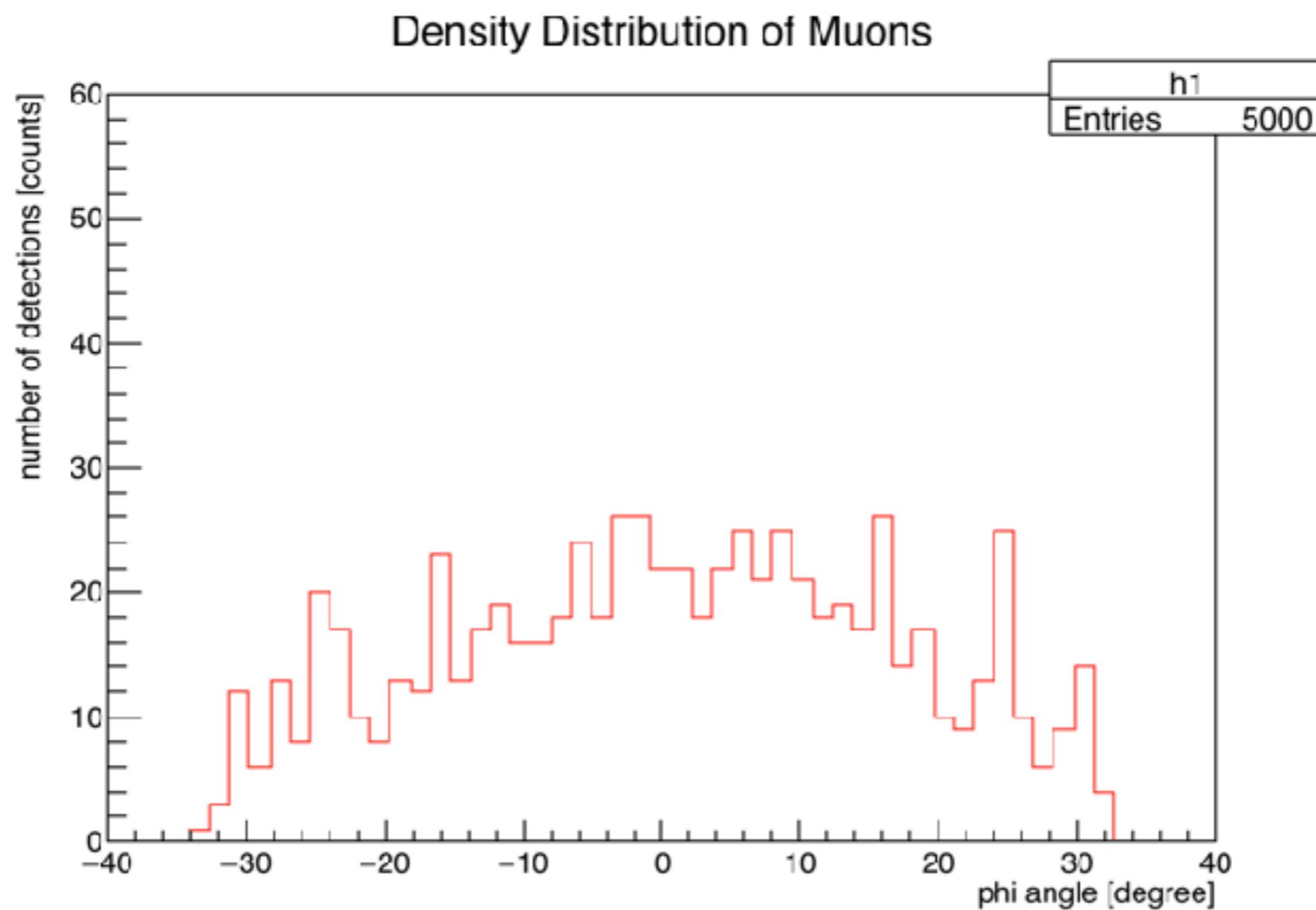


$\theta = 0[^\circ]$ , 前方300mに検出器



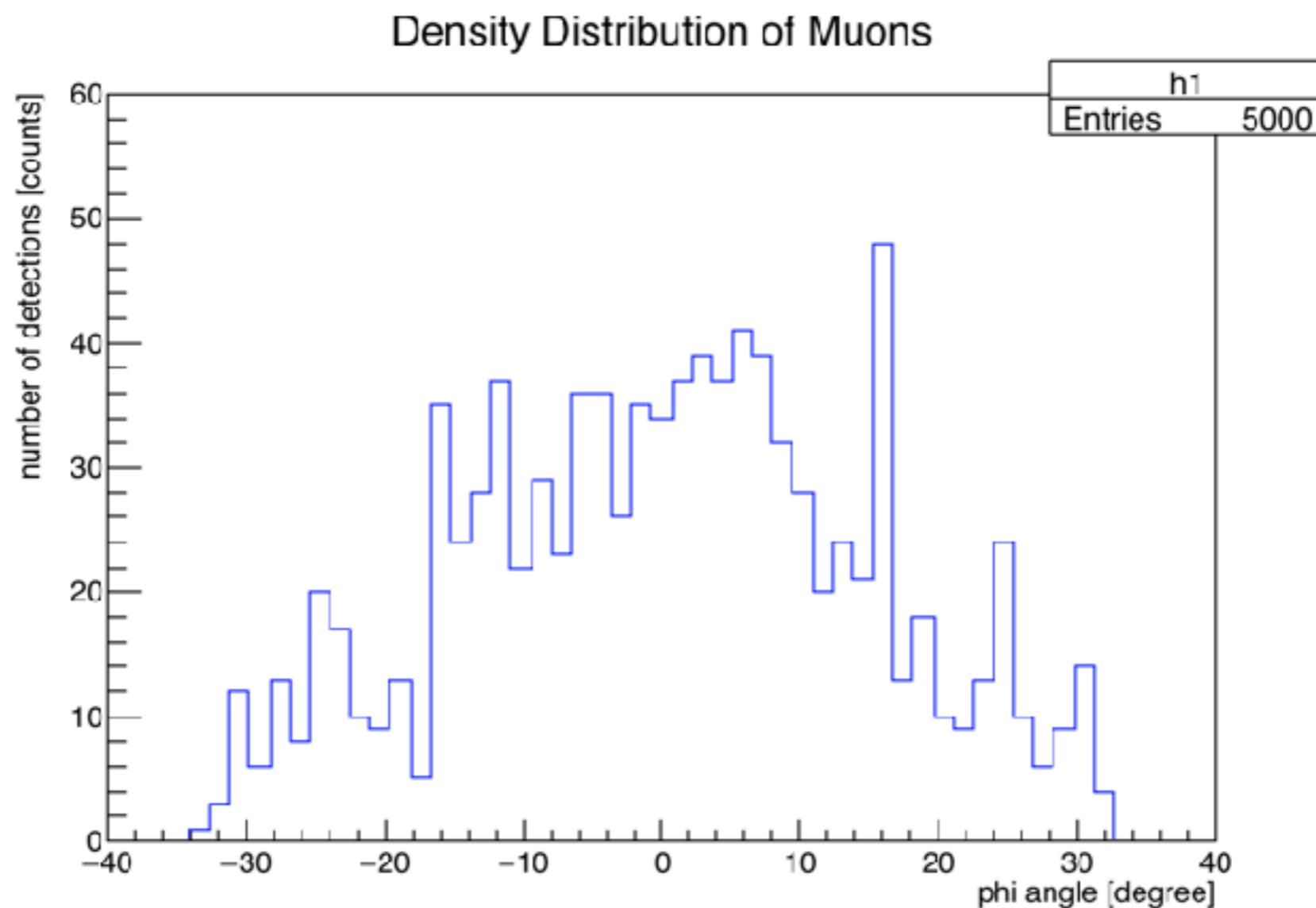
$\theta = 0[^\circ]$ , 300mのとき

\* マグマがある場合



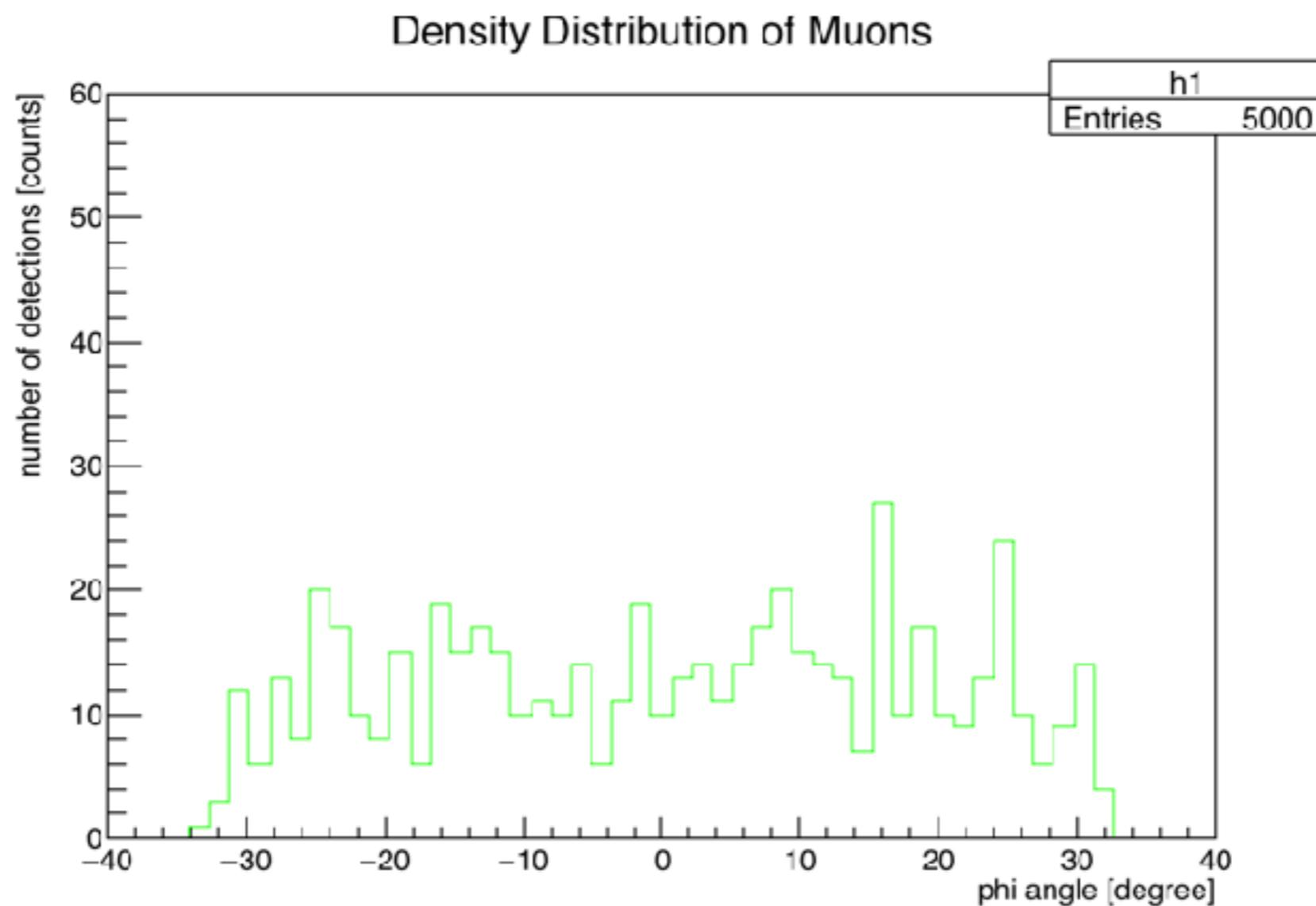
$\theta = 0[^\circ]$ , 300mのとき

\* マグマがない (空洞の) 場合



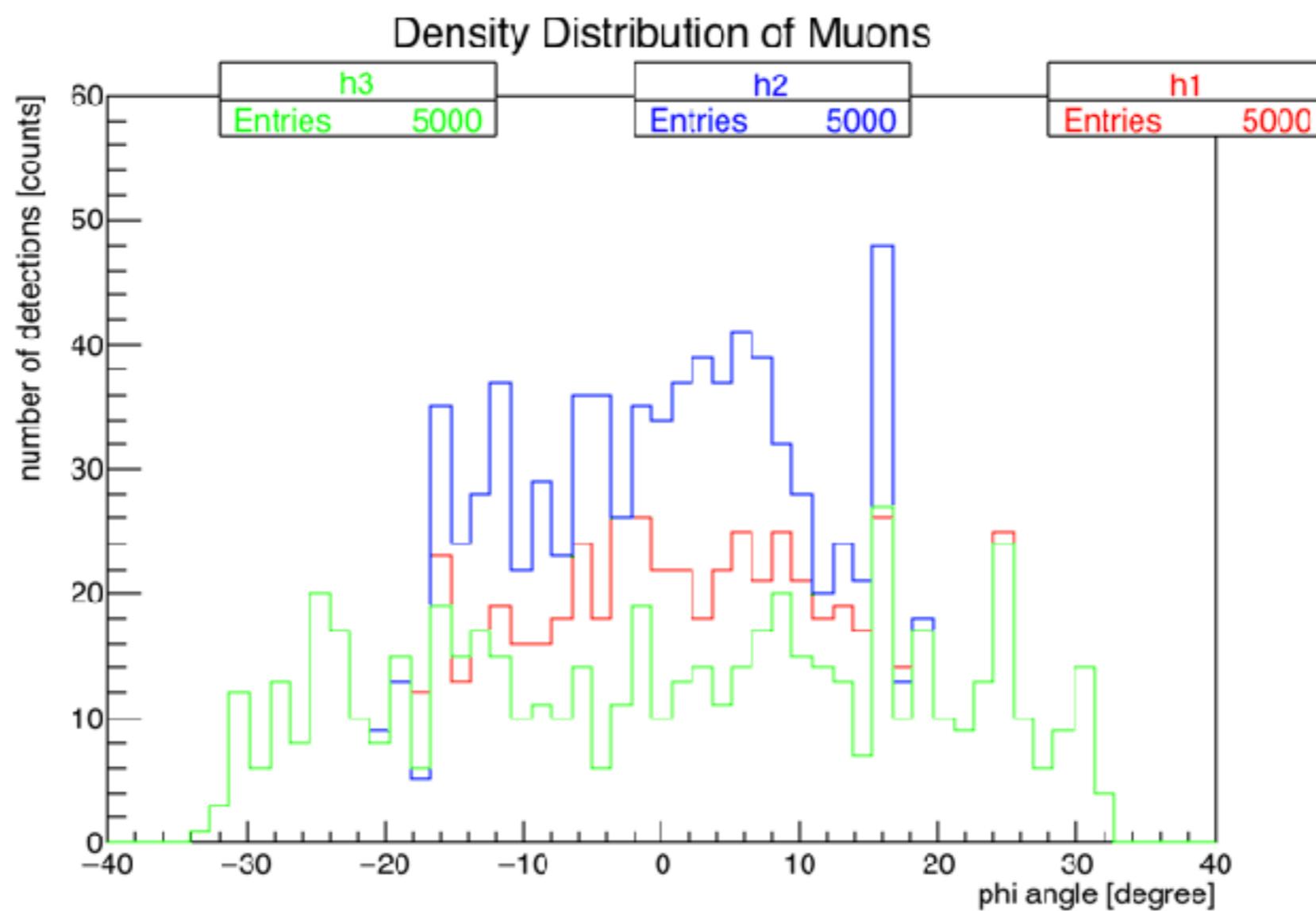
$\theta = 0[^\circ]$ , 300mのとき

\* 岩石の場合



$\theta = 0[^\circ]$ , 300mのとき

\* 比較



$\theta = 0[^\circ]$ , 300mのとき

\* 山がない場合

