

20年目の真実

～ミューオン望遠鏡を用いたICRR天井の撮像～

高エネルギーガンマ線天文学Bチーム

栗山直人
間仁田侑典
伯ゆりか
太田溪介
小野真夢

Contents

1.Introduction

2.Set Up

3.Calibration

4.Observation

5.Result

6.Discussion

7.Summary

1.Introduction

2.Set Up

3.Calibration

4.Observation

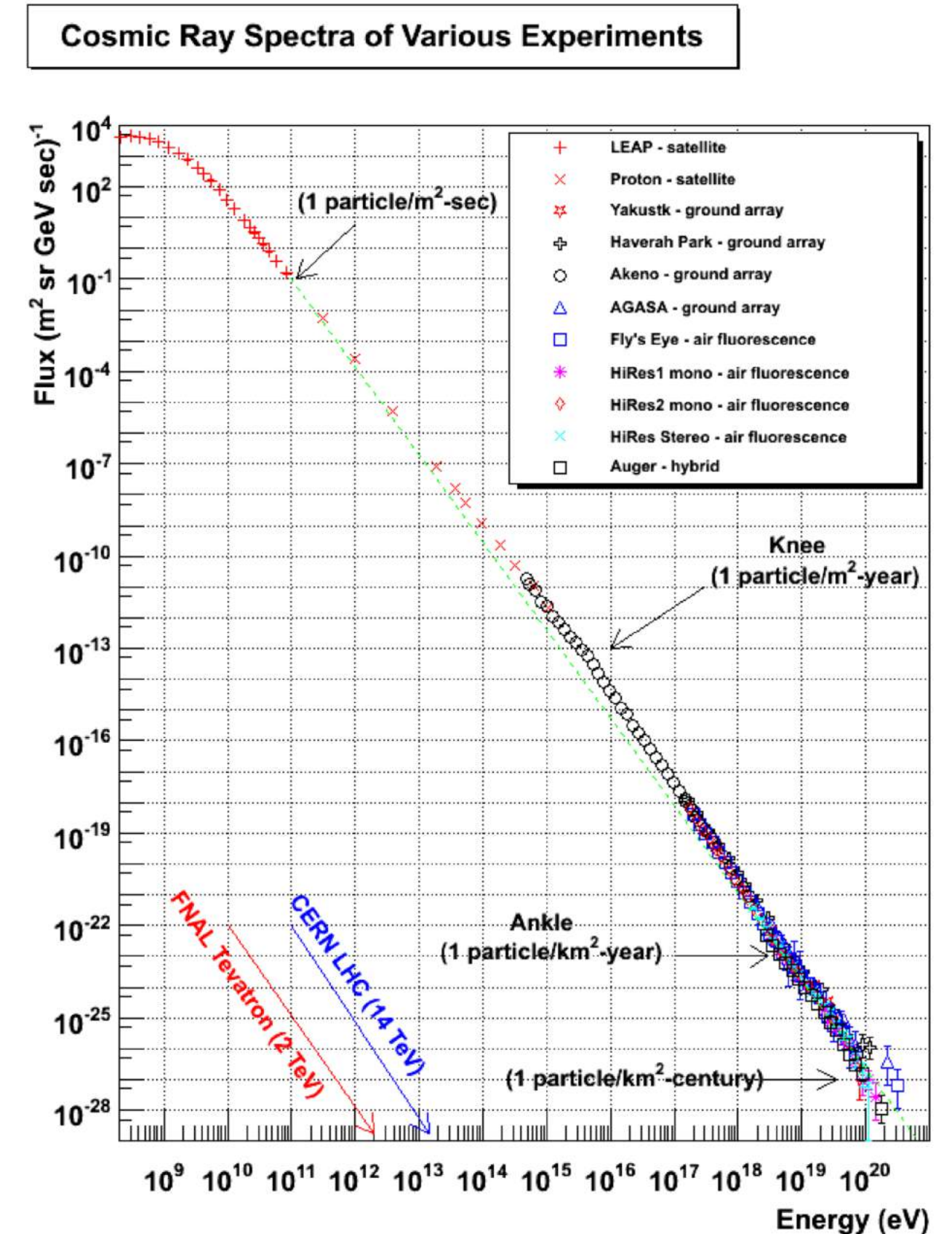
5.Result

6.Discussion

7.Summary

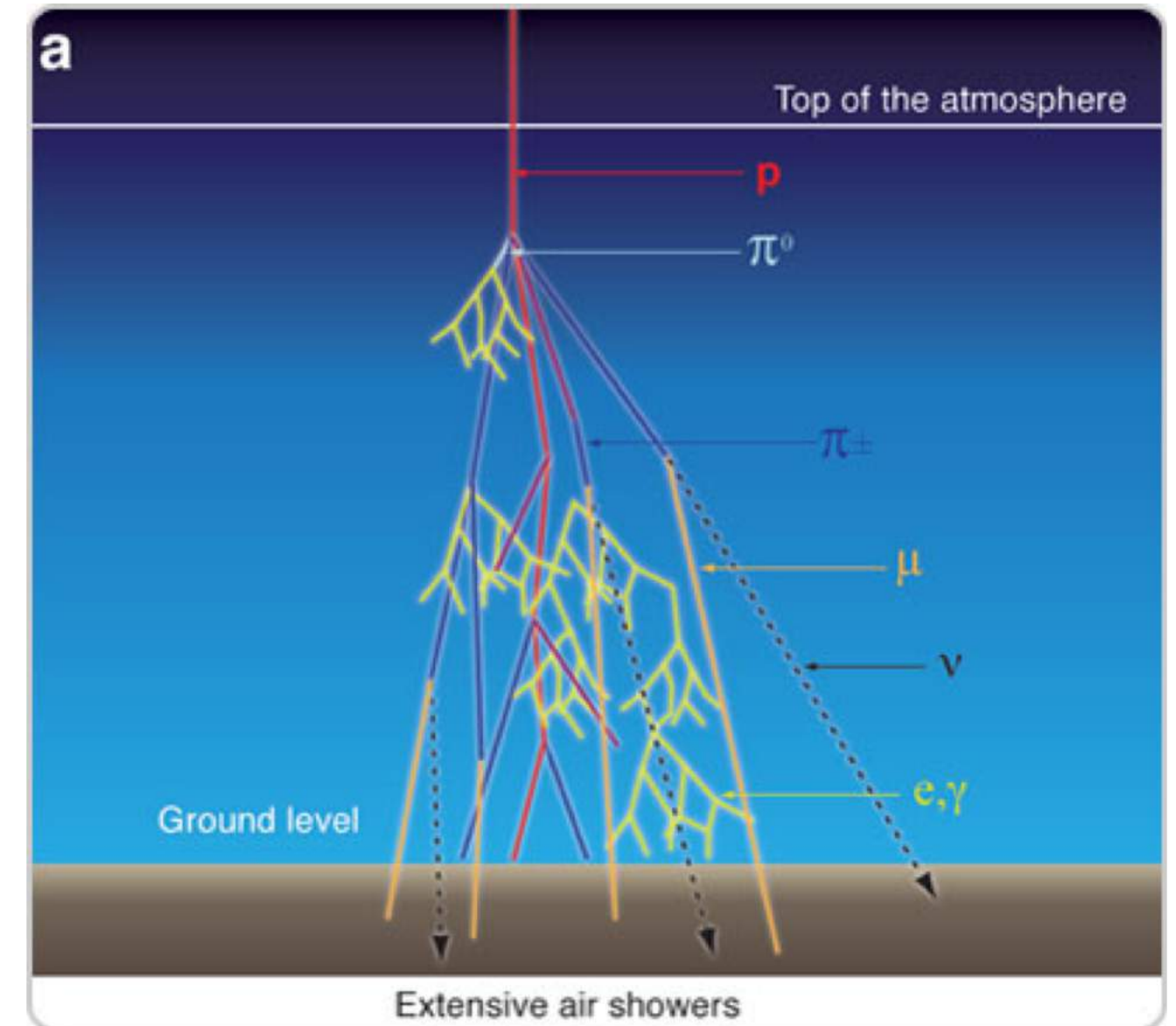
1.1宇宙線？

- 宇宙空間を飛び交う高エネルギーの粒子
- 主成分は物質を構成する
- 陽子、その他原子核、電子
- 等方的に地球に到来
- 加速源が不明



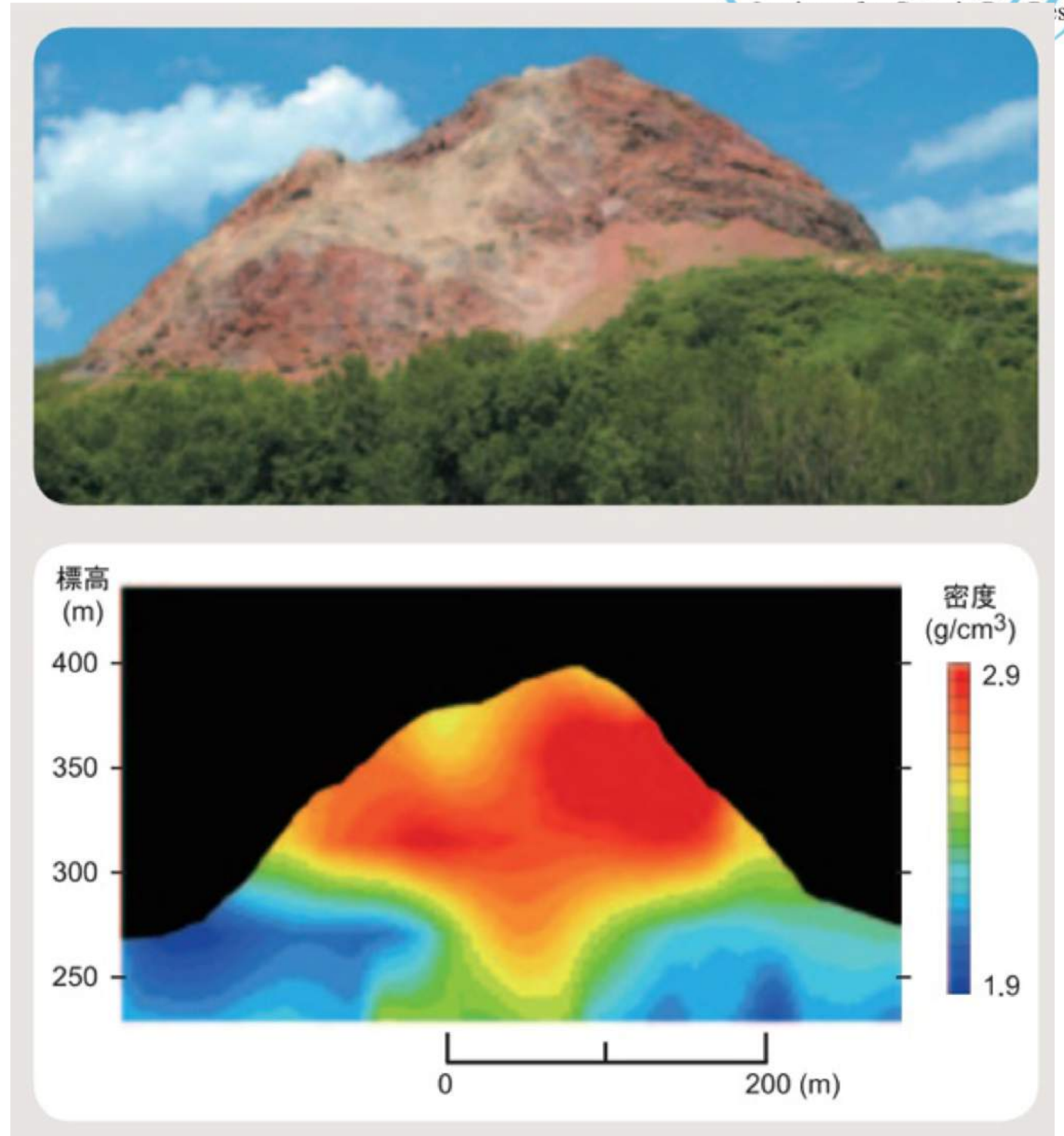
1.2 空気シャワー

- 宇宙線が地球大気と相互作用して繰り返し2次粒子を生成
- ミューオン、電子、陽電子などを生成
- 今回はそのうちの**ミューオン**を観測
 - ↑透過率が高い
- 地上では手のひら面積に毎秒1個



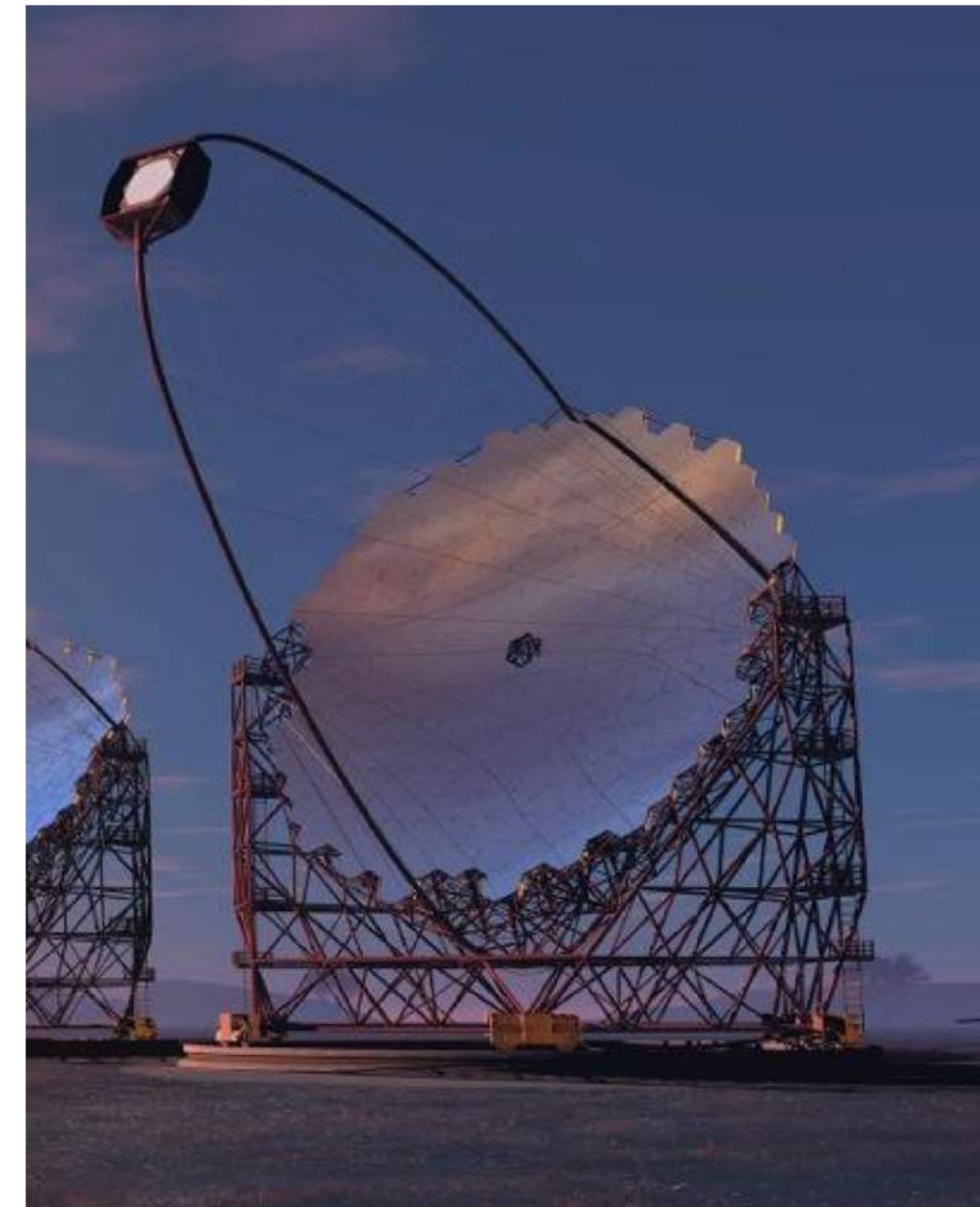
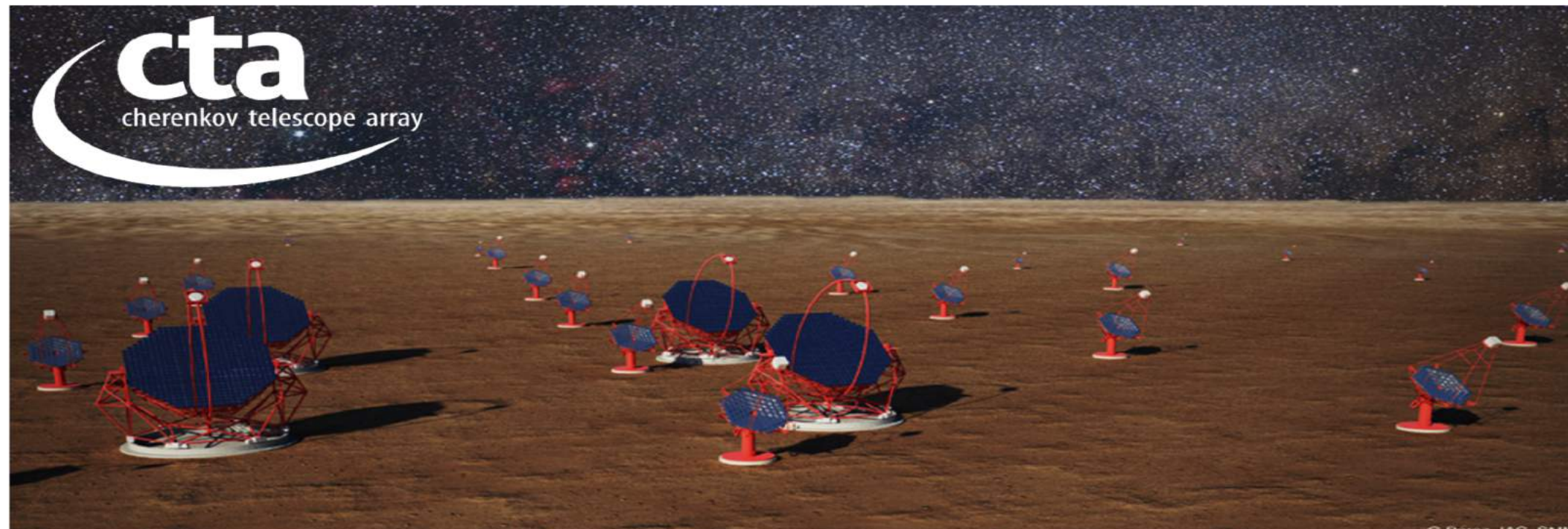
1.3 ミュオグラフィ

宇宙線が地球大気に衝突し、
大量に発生する空気シャワーの
中に含まれるミュオンを
用いた透視撮影技術



1.4 CTA(Cherenkov Telescope Array)

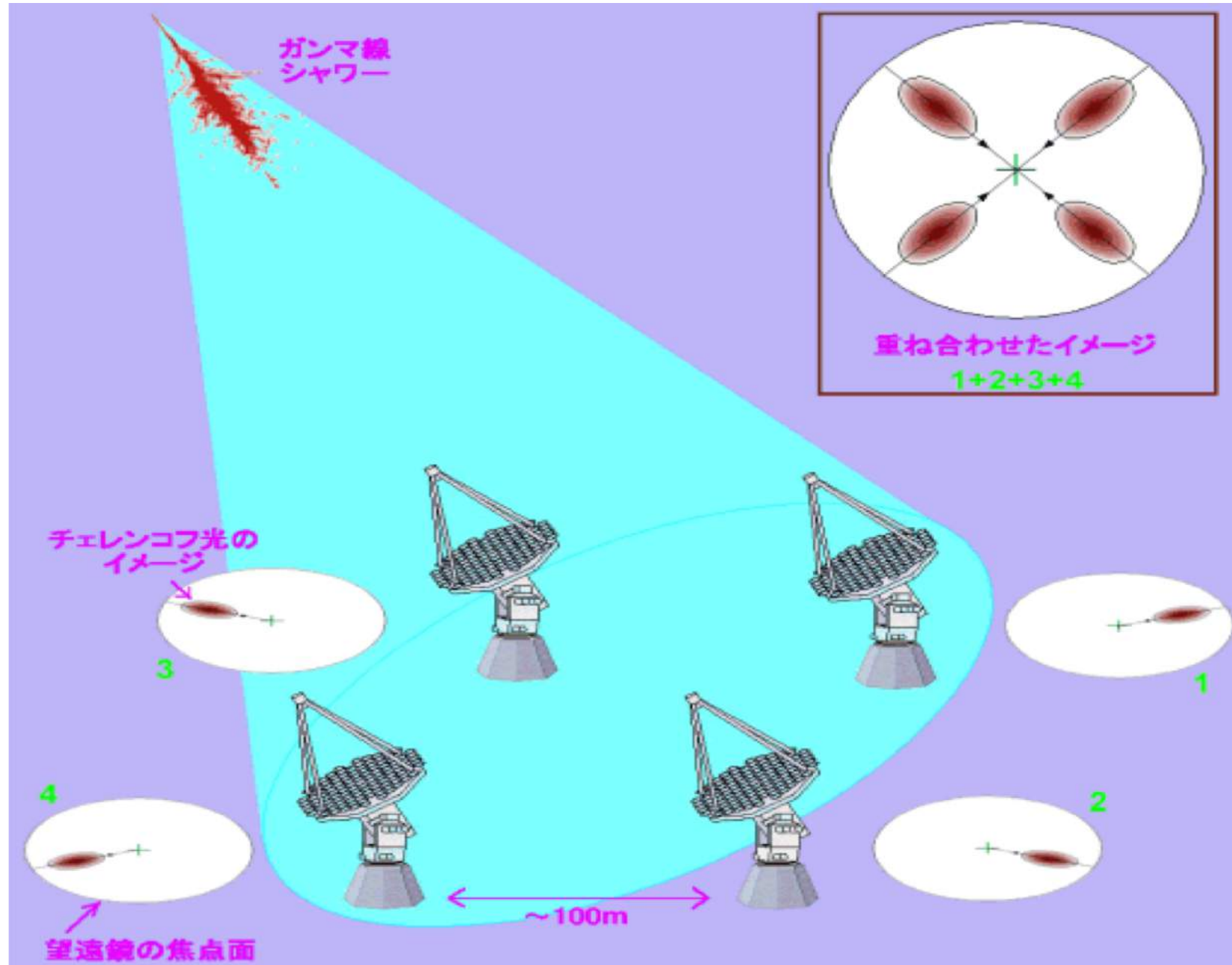
- 近年発展した超高エネルギーガンマ線天文学
- 大気に入射したTeVガンマ線が作るシャワーからのチェレンコフ光をとらえる



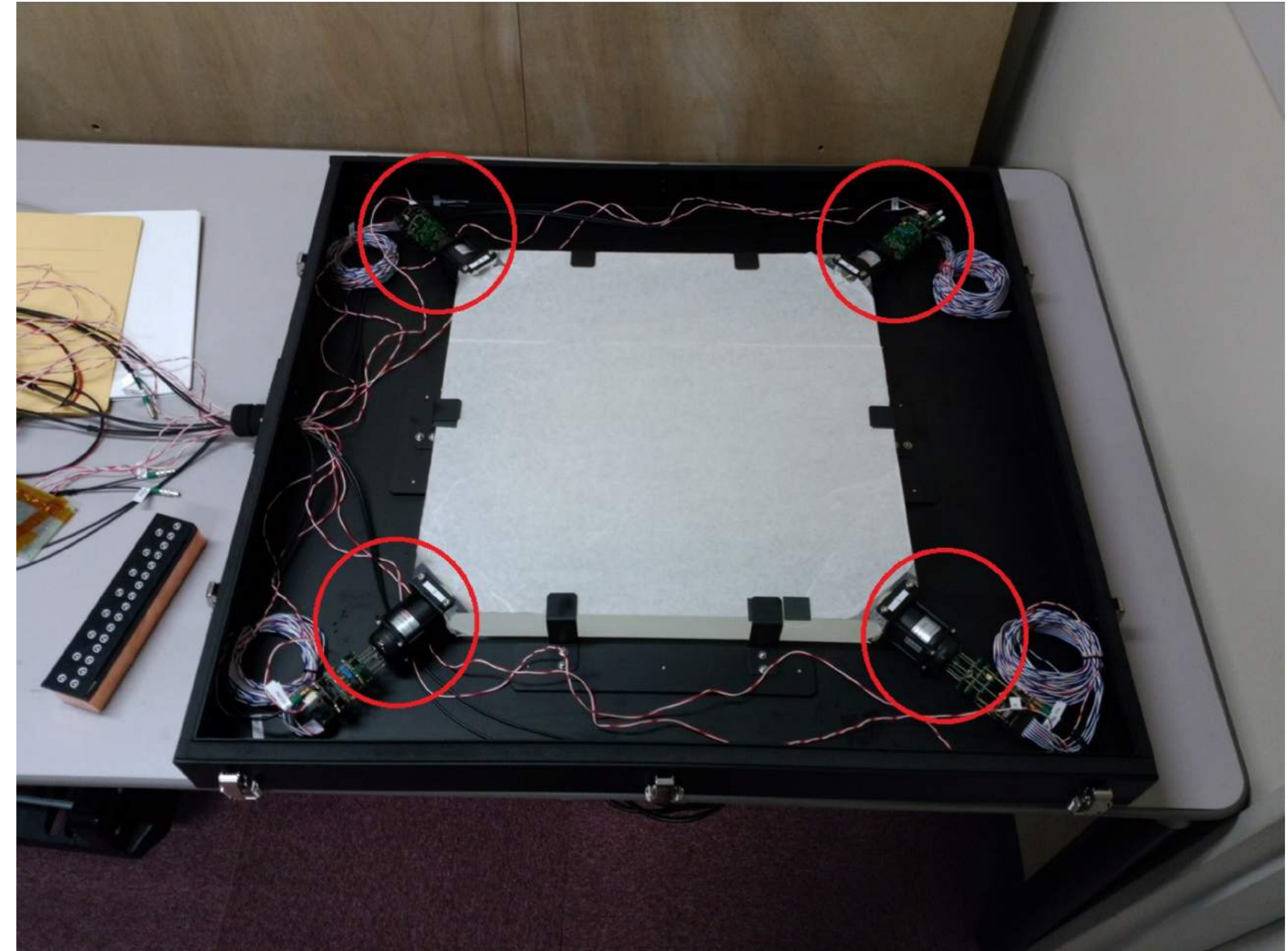
↑ チェレンコフ望遠鏡

←全体図

1.5 CTAと作製した装置との比較



CTA



作製した装置

1.Introduction

2.Set Up

3.Calibration

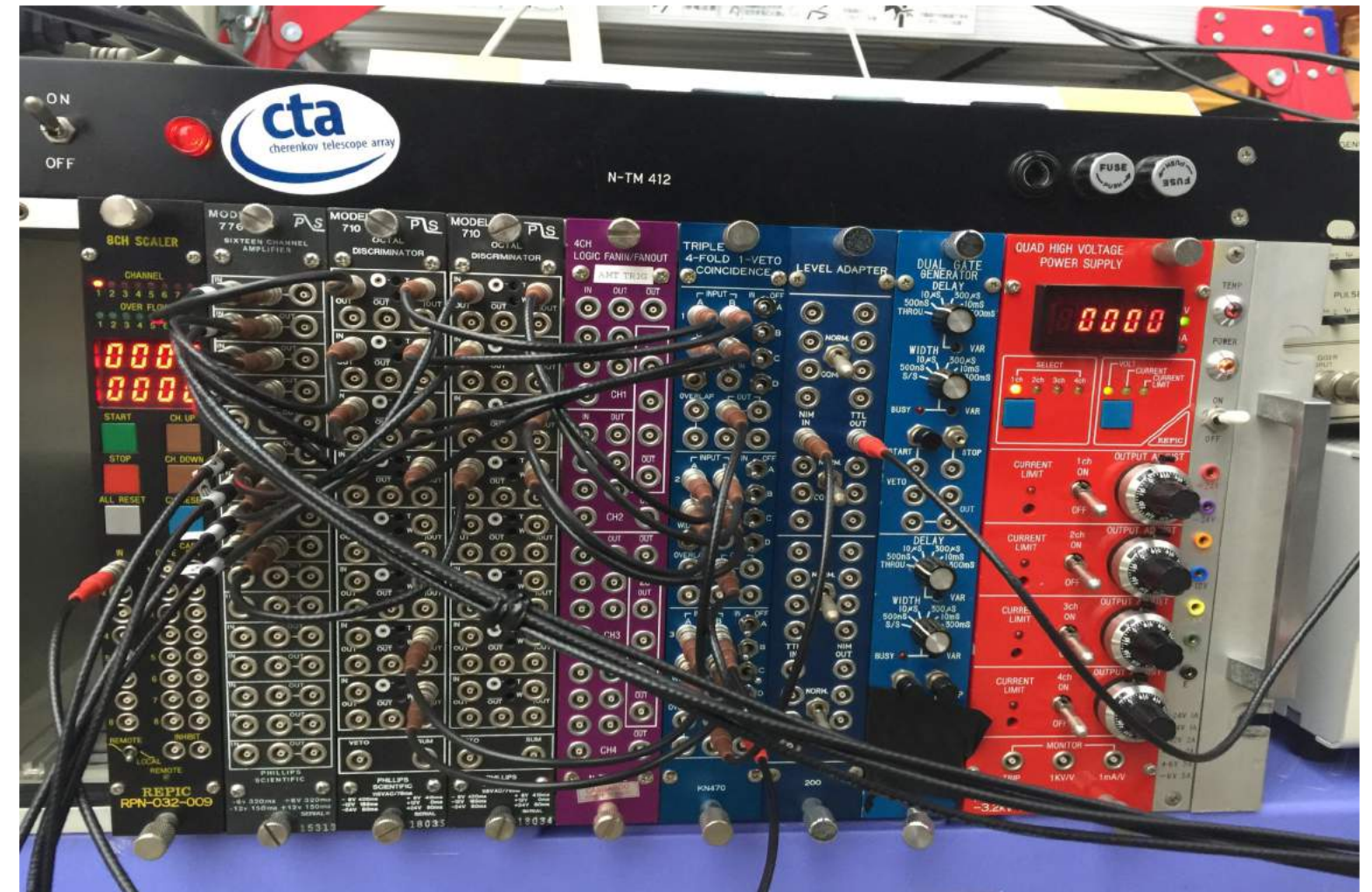
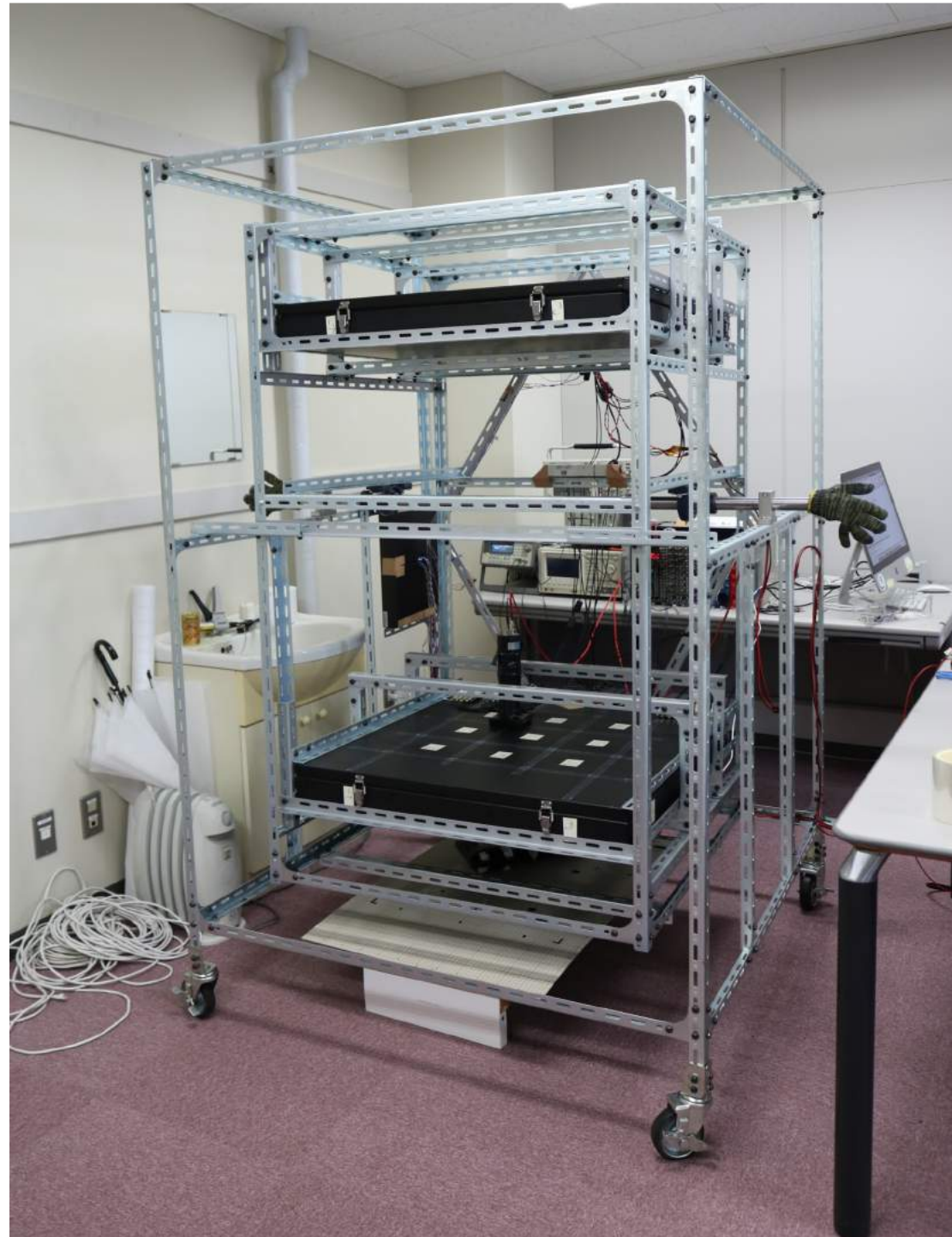
4.Observation

5.Result

6.Discussion

7.Summary

2.1 望遠鏡の全体像



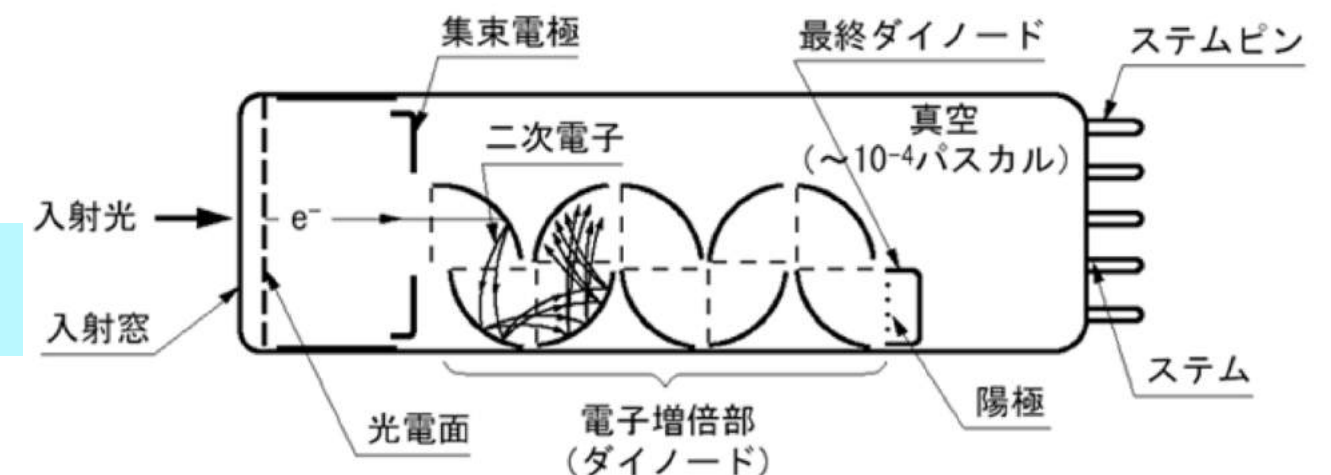
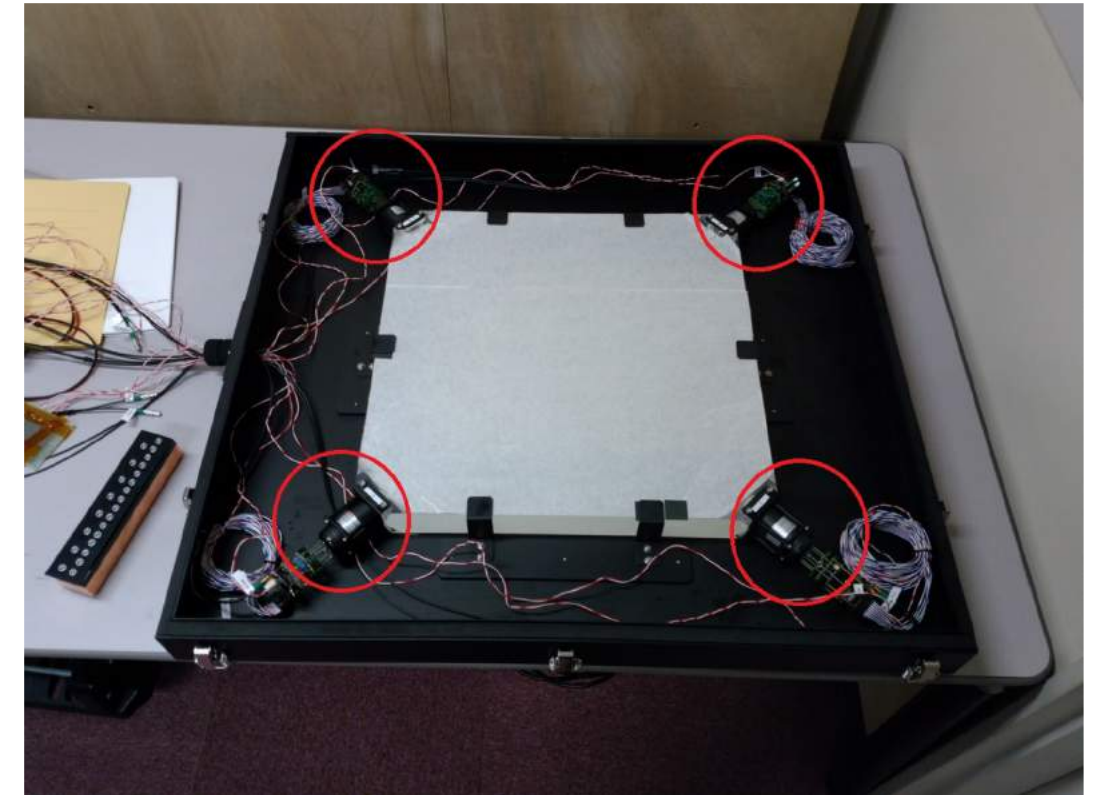
2.2 シンチレーターと光電子増倍管

プラスチックシンチレーター

- ミューオンが入射すると励起光を放射する
- 発光はミューオン由来とは限らない

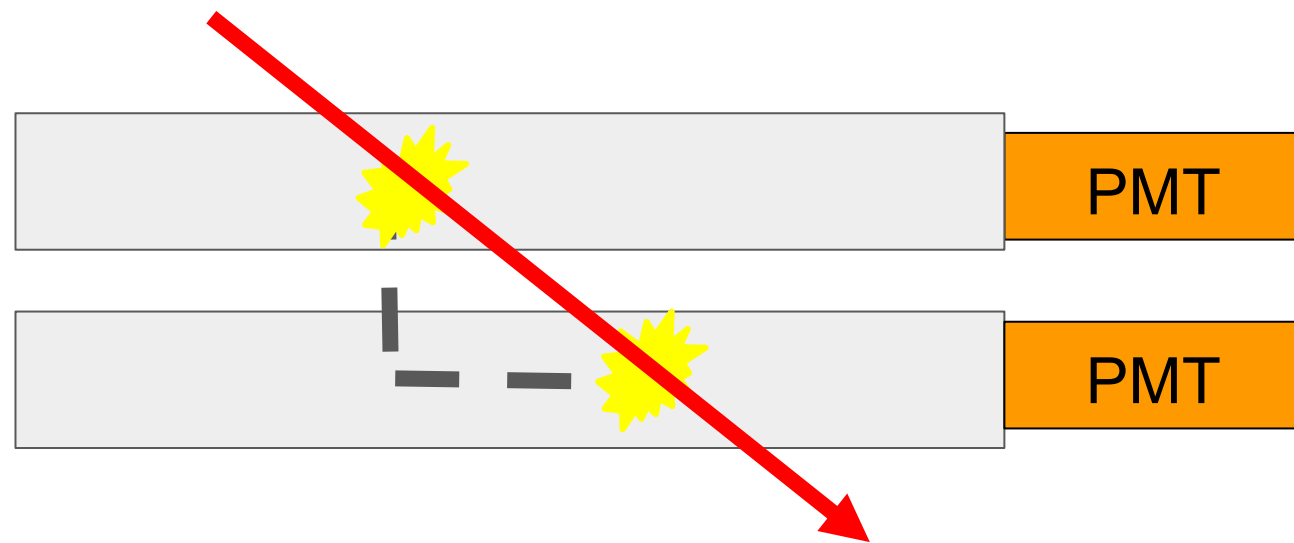
光電子増倍管(PMT)

- 微弱な光を捕らえて信号に変える



どうやってミューオン由来の信号を取り出すか？

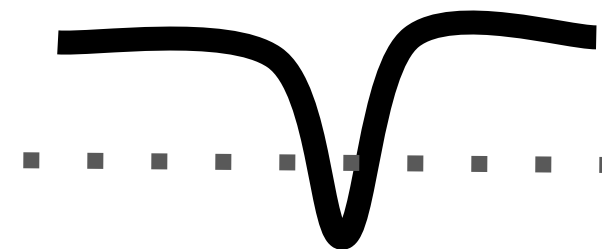
2.3 Trigger Logic



光電子増倍管(PMT)が光子を捕らえて信号を出力

ディスクリミネーター

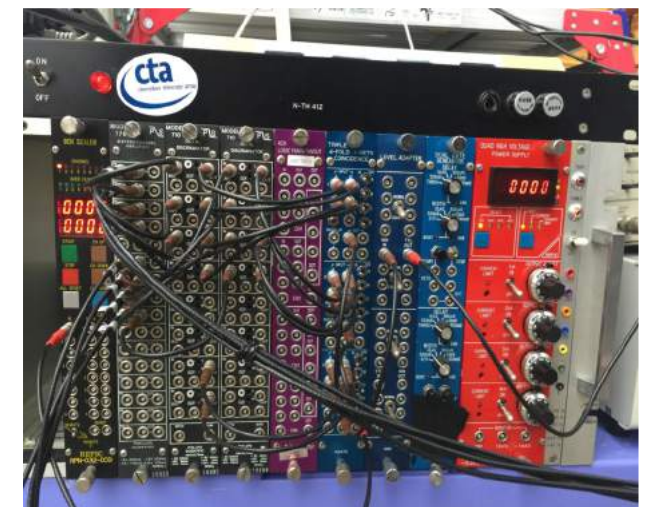
閾値(30mV)を超えた波が来ると矩形波を出力



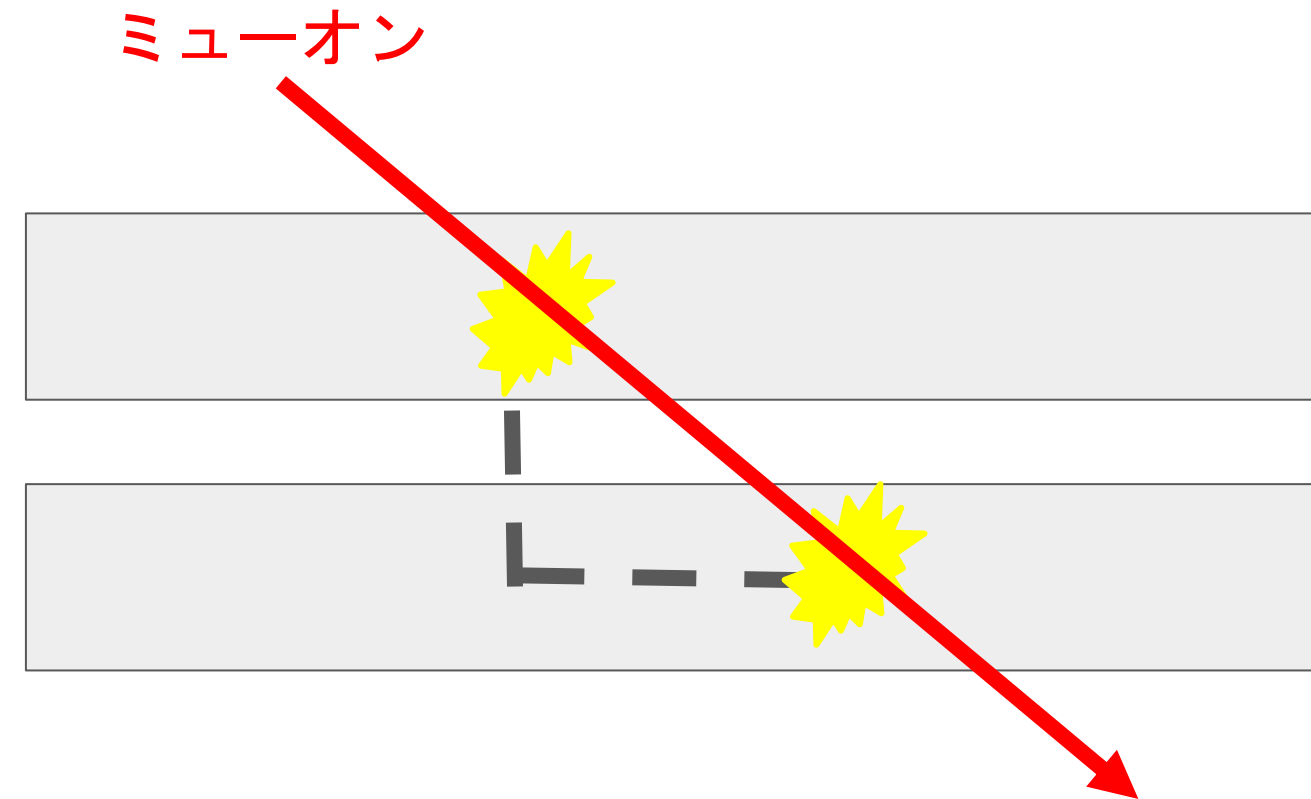
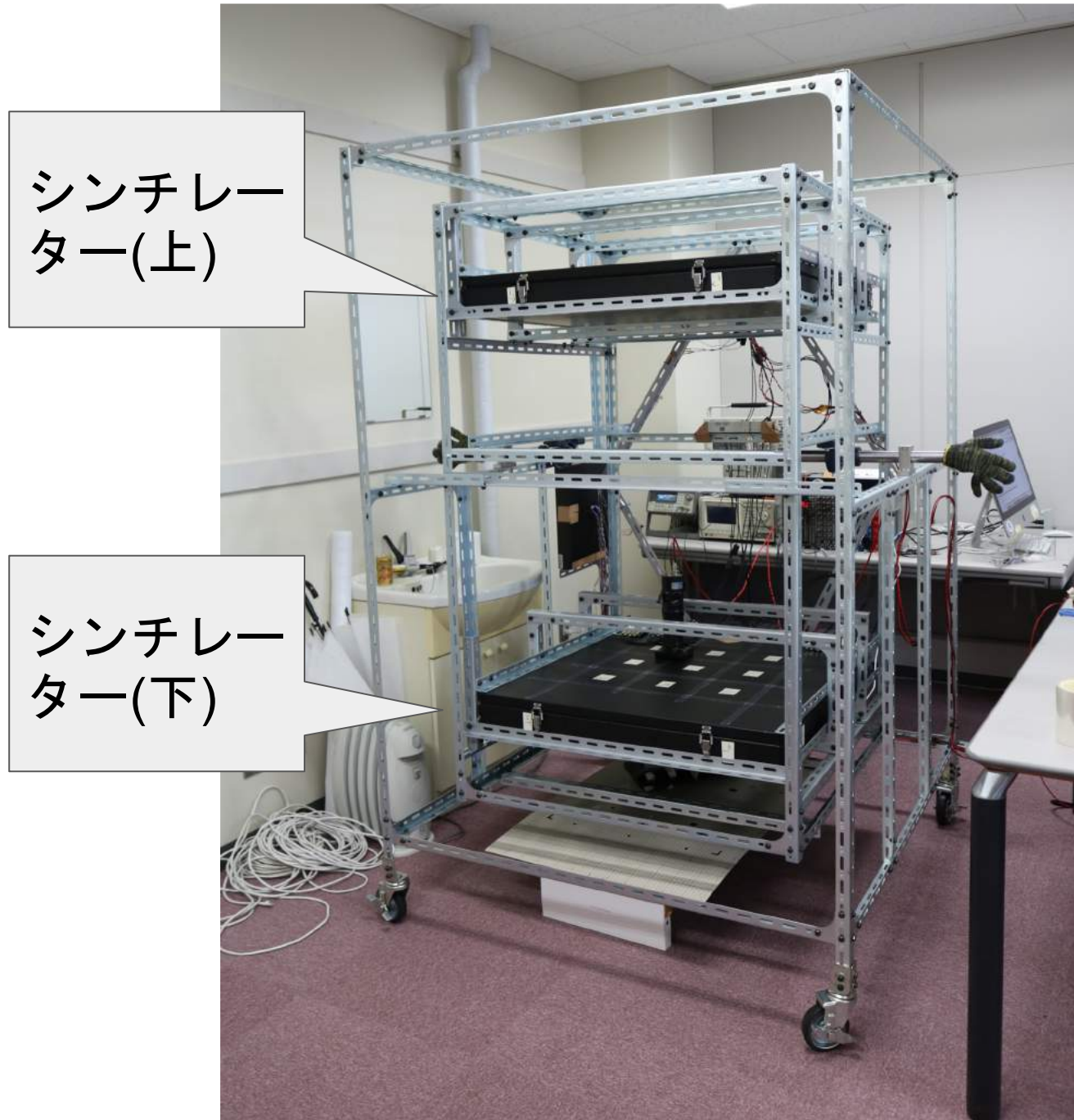
コインシデンス

上下同時に信号がきたら信号を出力

コインシデンスを取ることでミューオン以外のイベントを除くことができる



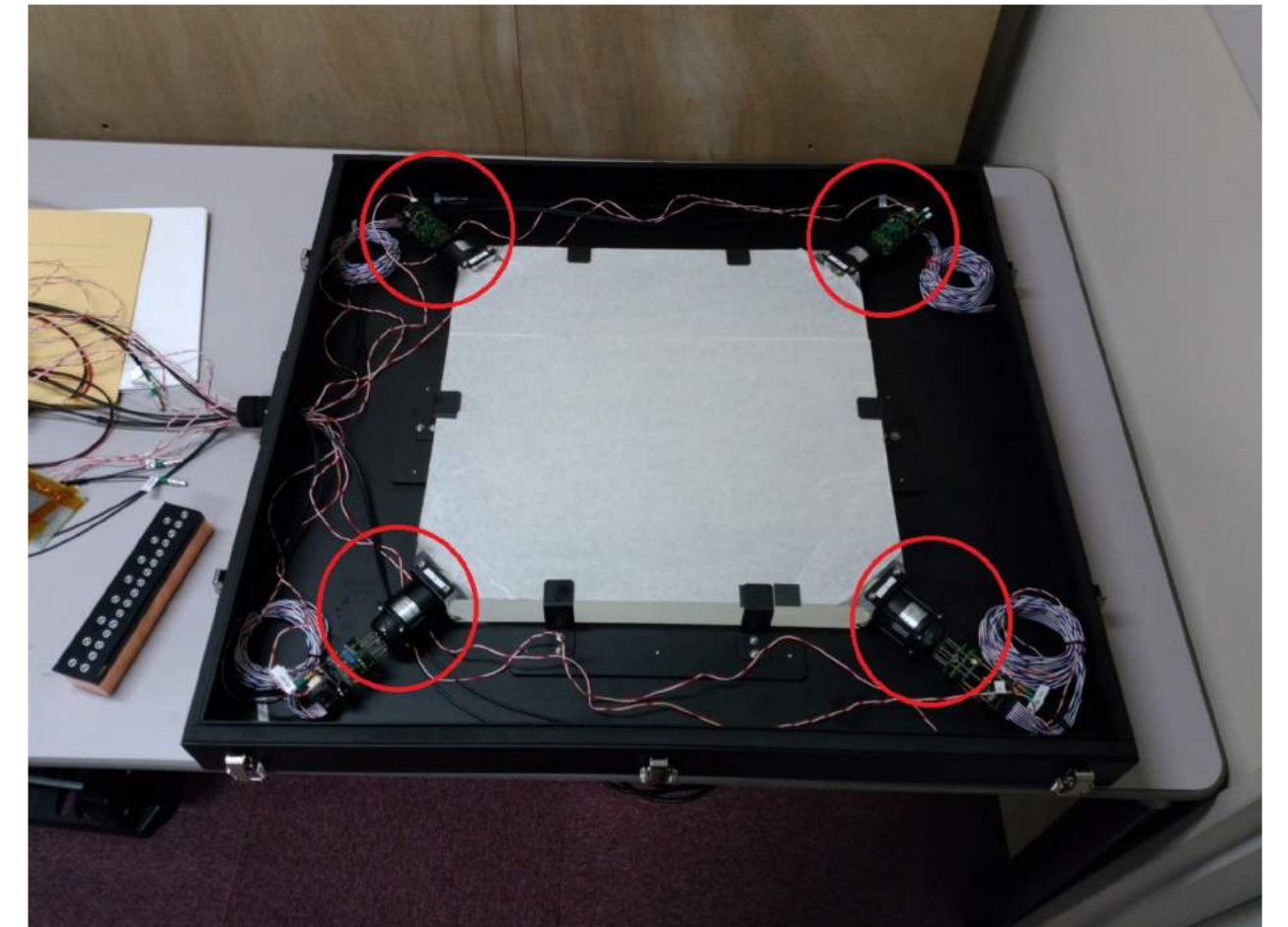
2.4 到来方向の測定

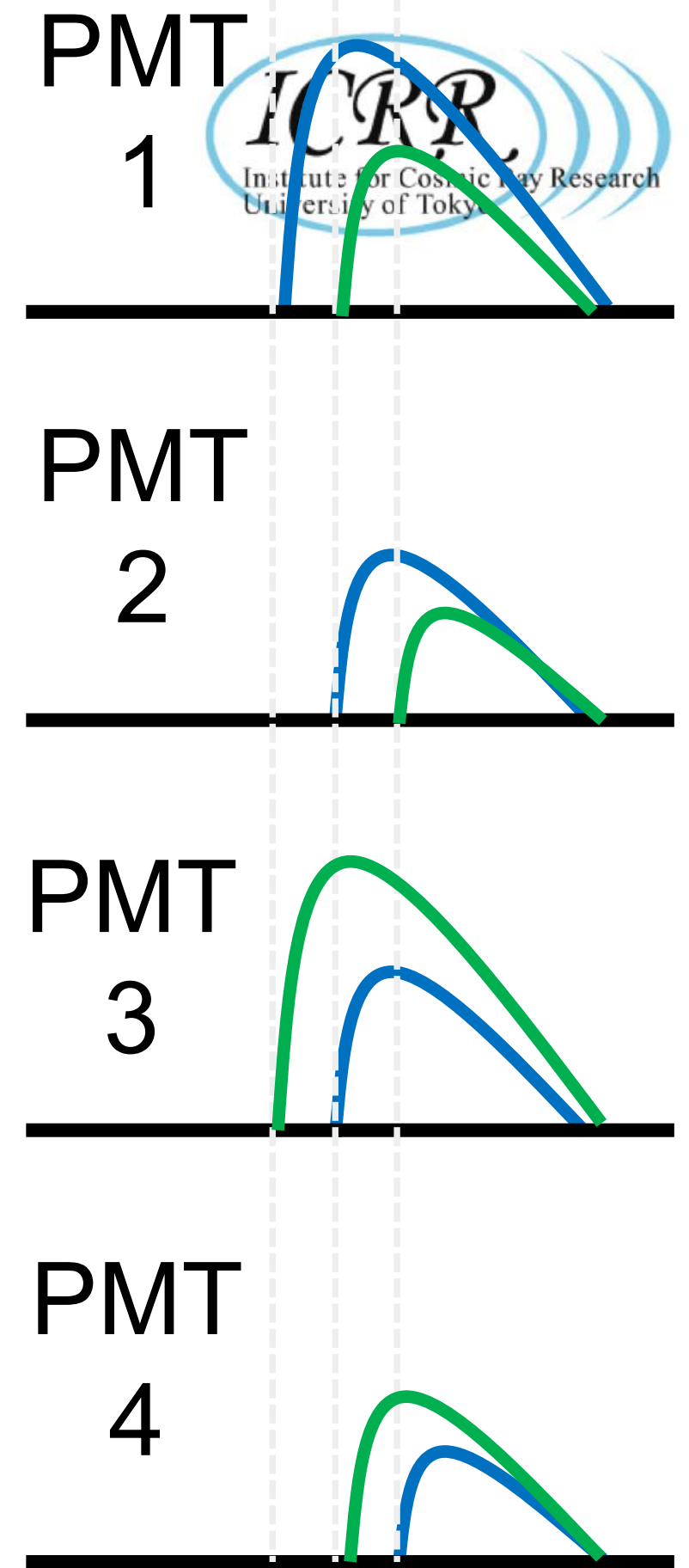
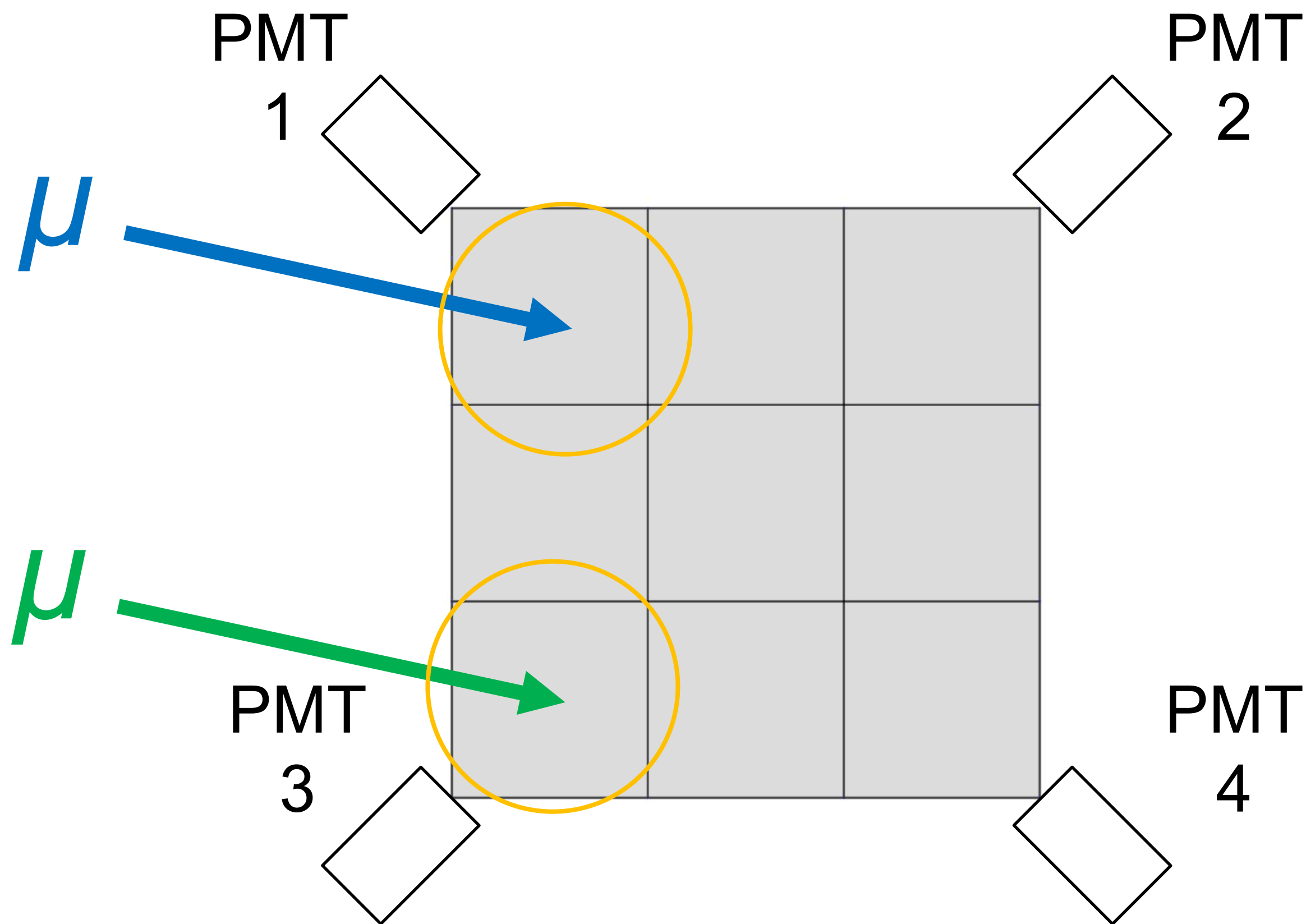


方向測定にはシンチレータ上の
”どこ”に落ちたのか知る必要がある

2.5 どこに落ちたか？

- 検出器上でのミューオンの到来位置はどこか？
- フォトマルは一枚の検出器につき4箇所のみ
- CCDを用いた望遠鏡のように直接位置の特定をすることは不可能





落ちる場所ごとに異なった波形の特徴が表れる!

2.6 機械学習ってなに？

具体例: 手書き数字の判定

“手書きの数字0~9を機械によって判別したい”

様々な手書き数字のデータと答えの組(訓練データ)を
機械に与え各数字に共通する特徴を見つける(学習する)

→新たな数字が認識が可能に!

7 1 8 7
9 9 3 4

訓練データ

計算機

訓練データから
特徴を学習する

Ex) 1は縦に細い
8は輪が二つ

学習

6 3 8

新たな手書きデータ

機械が
判定

6 3 8

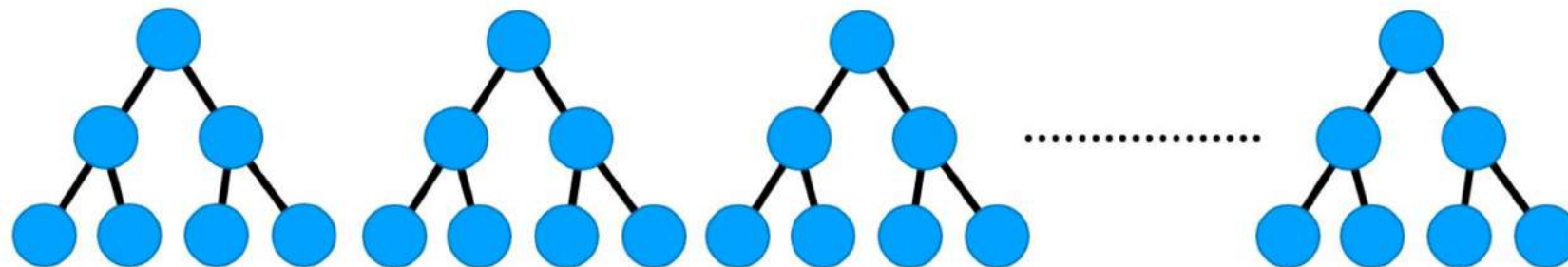
判定された数値⁶

2.7 学習アルゴリズム

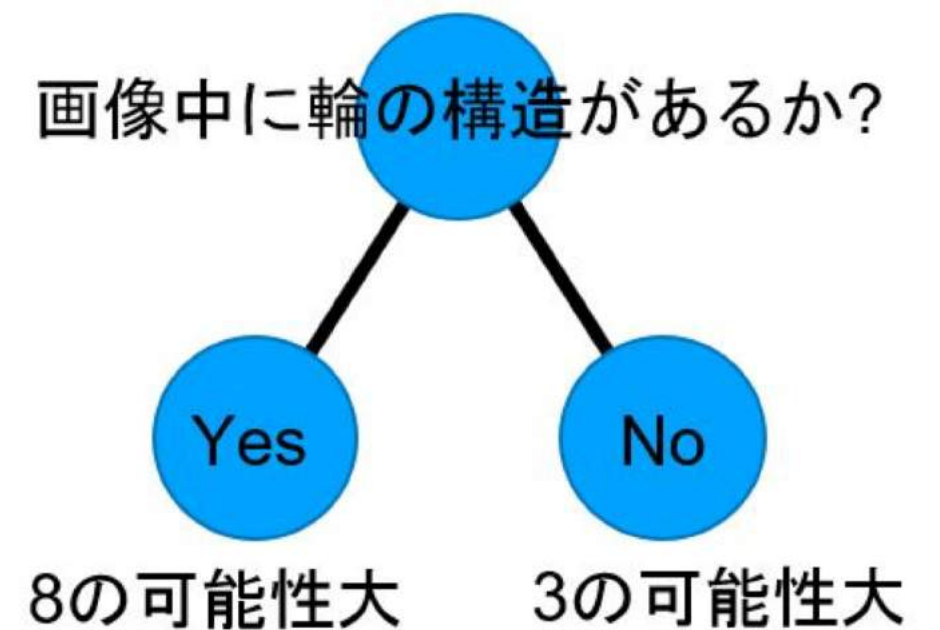
- 機械学習のアルゴリズムは様々
- この度はRandom Forest法を採用
 - - 過学習を防ぐ
 - 計算量が少ない
 - データ処理に透明性があるなどのメリット

2.8 Random Forest 法とは?

- “決定木”によって判定
- 複数の決定木をランダムに作成する
- 決定木を用いた判別を複数回行う



3か8かの識別の例



この手法を利用して、ミューオン到達位置と波形の関係性の較正を行った

1.Introduction

2.Set Up

3.Calibration

4.Observation

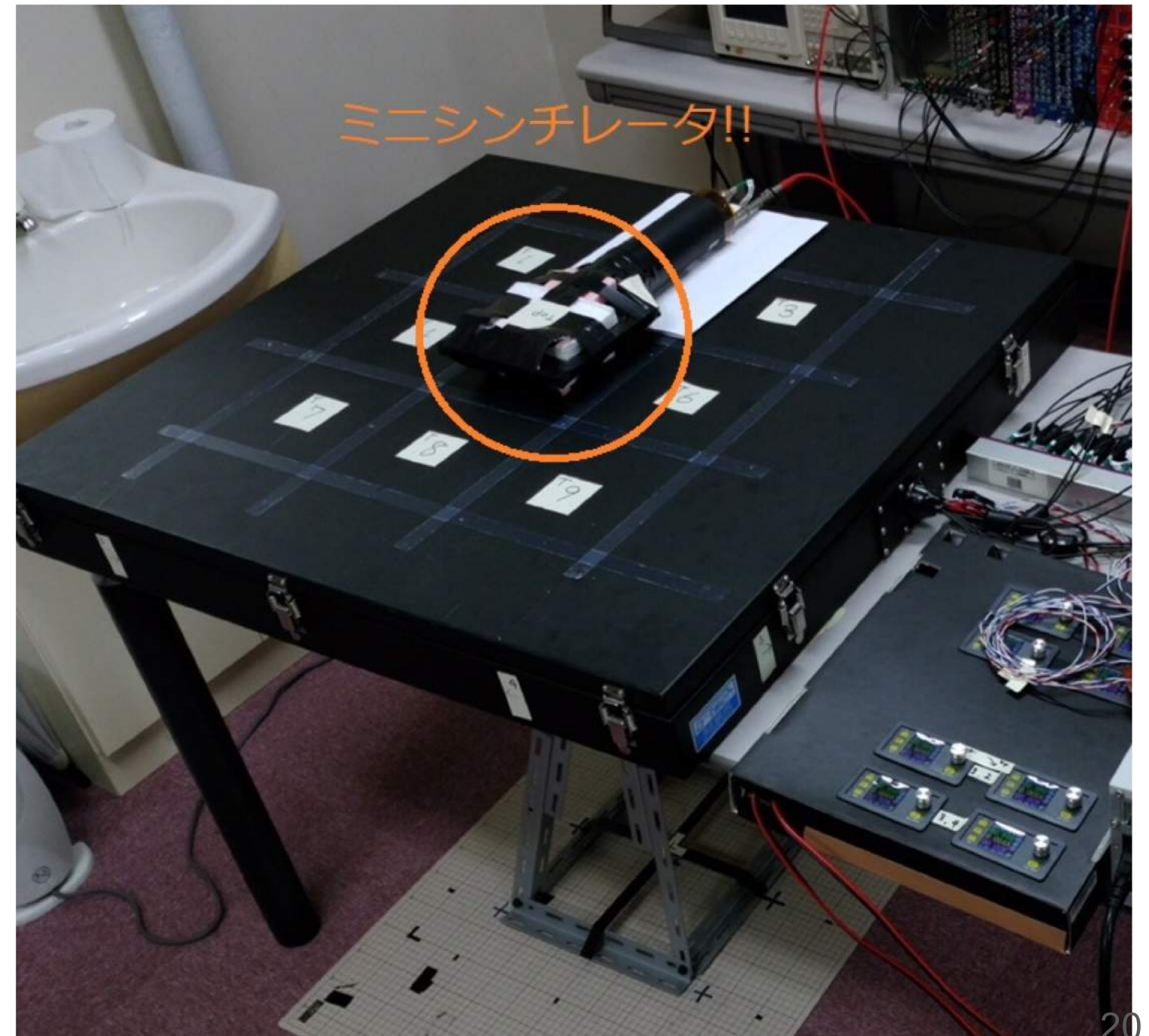
5.Result

6.Discussion

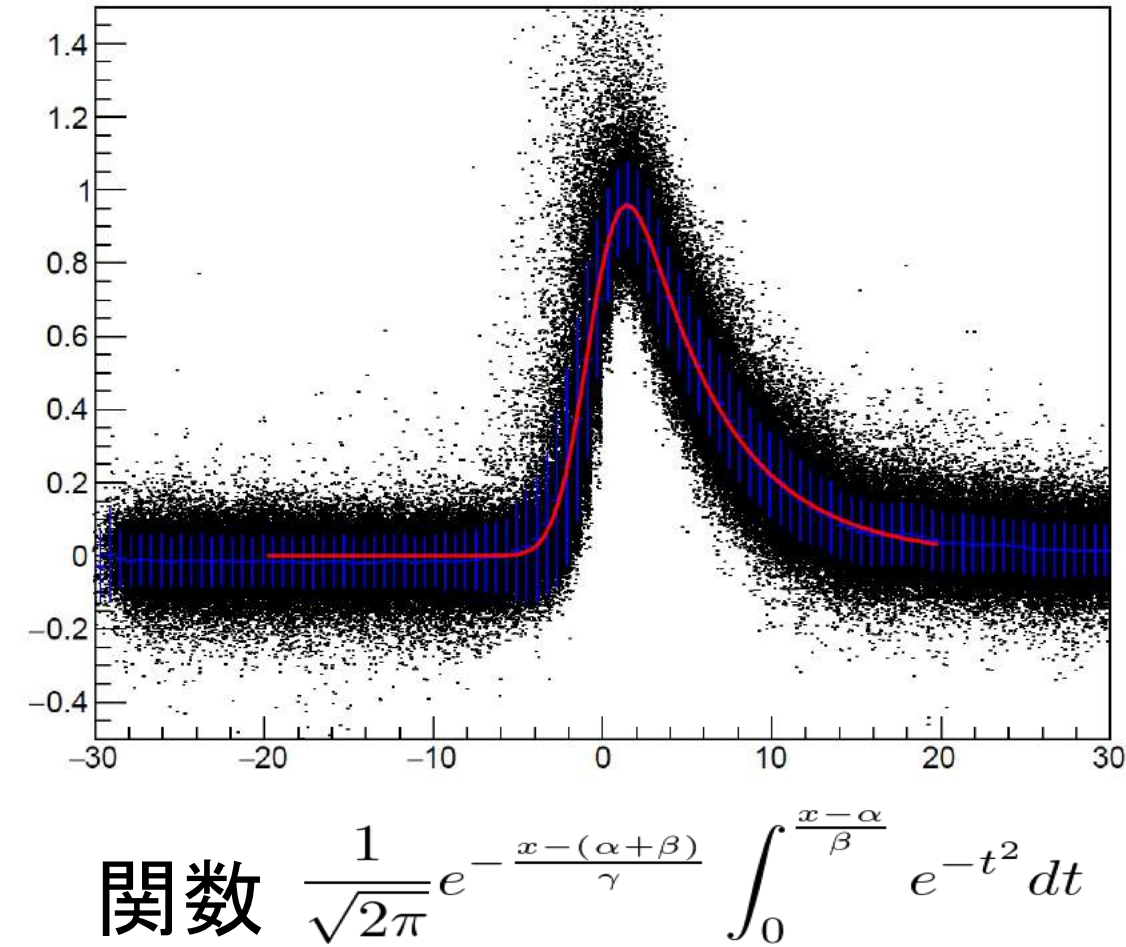
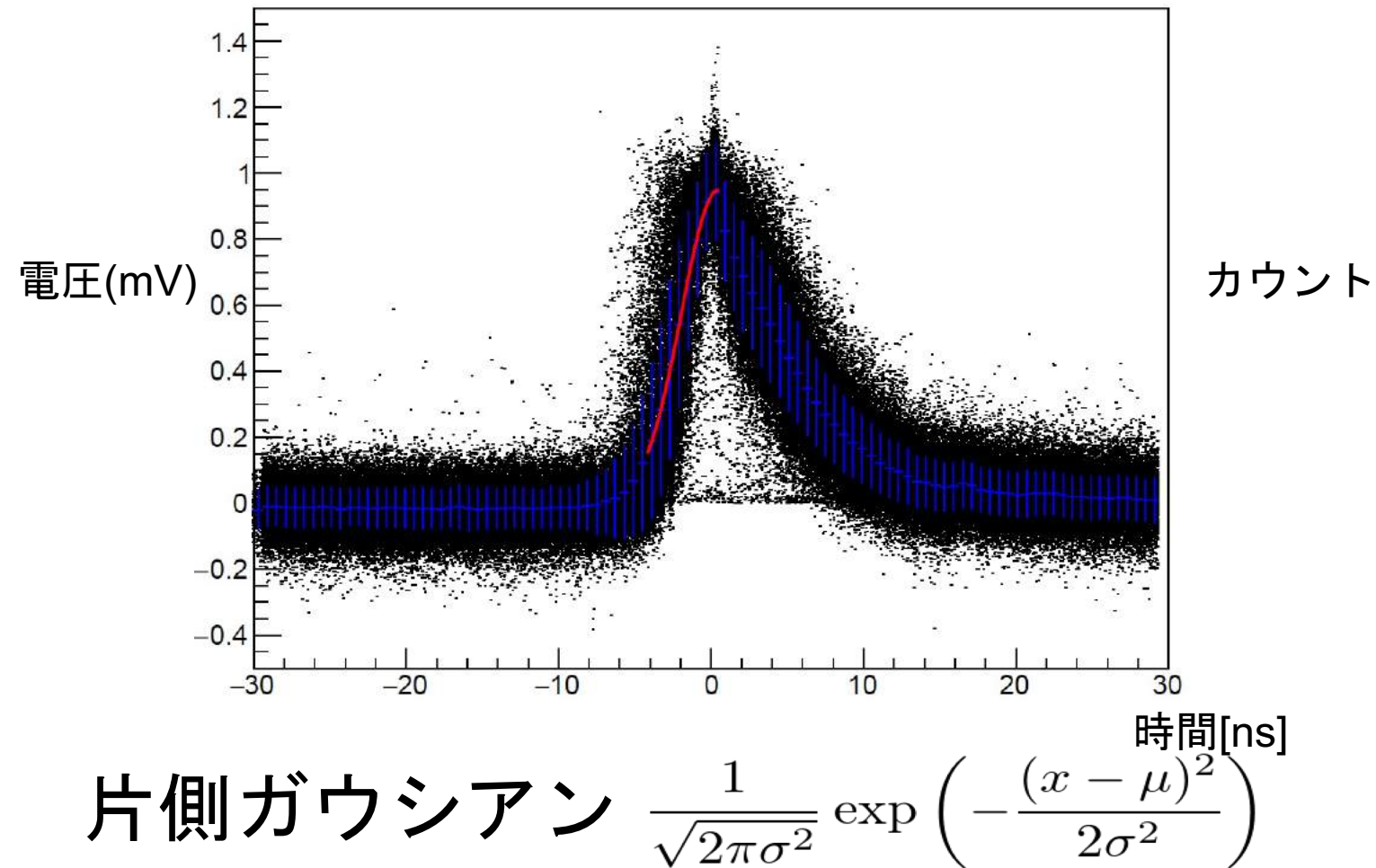
7.Summary

3.1 訓練データの取得

- 落ちた地点が特定されているデータが必要
- 検出器を9つのエリアに区切り、各エリア上に小型の検出器を設置
- 小型の検出器と同時に信号を受けた場合に位置が特定されたデータが得られる



3.2 波形のモデルとパラメータ

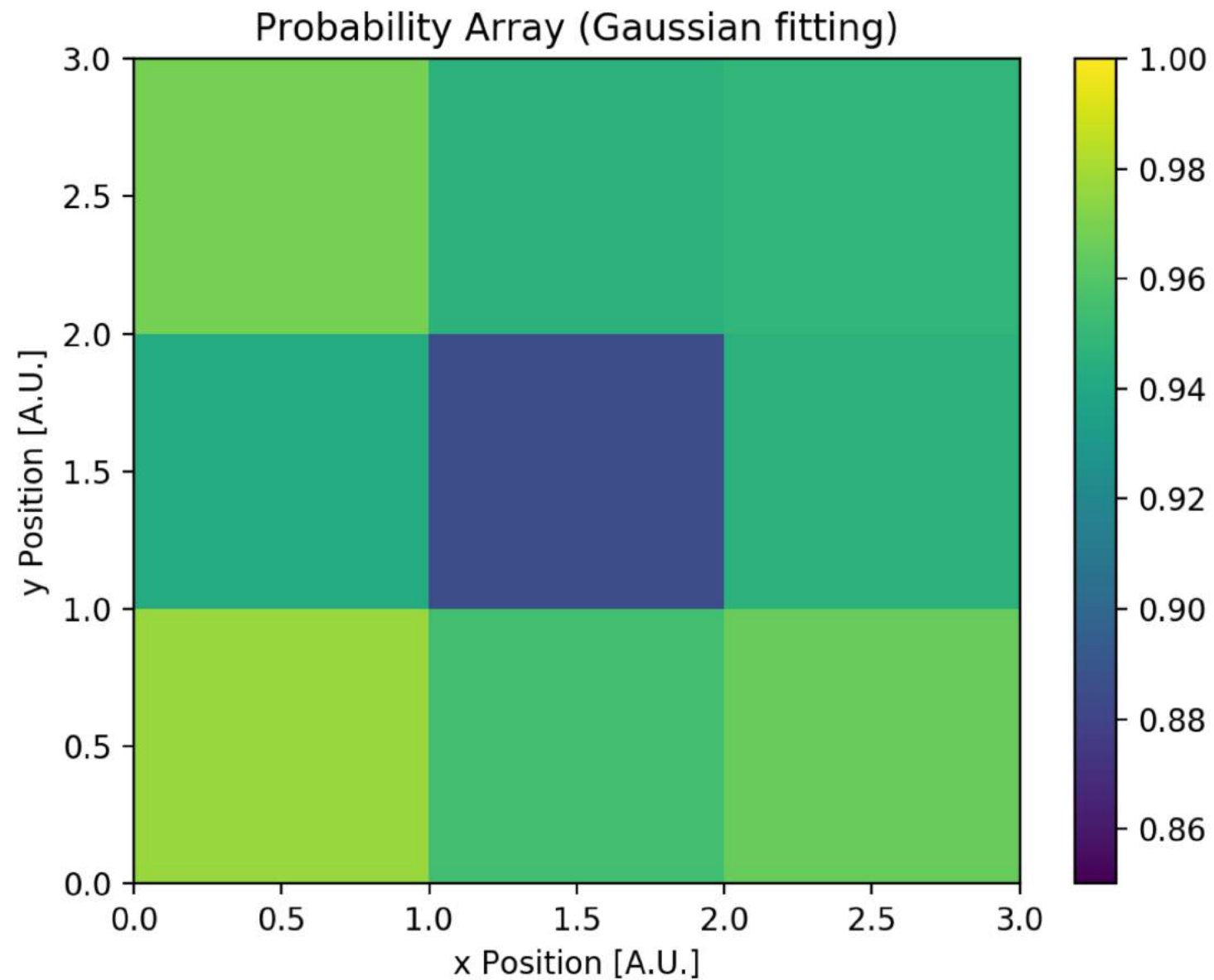


データから特徴を抽出するためには、モデルとなる関数が必要

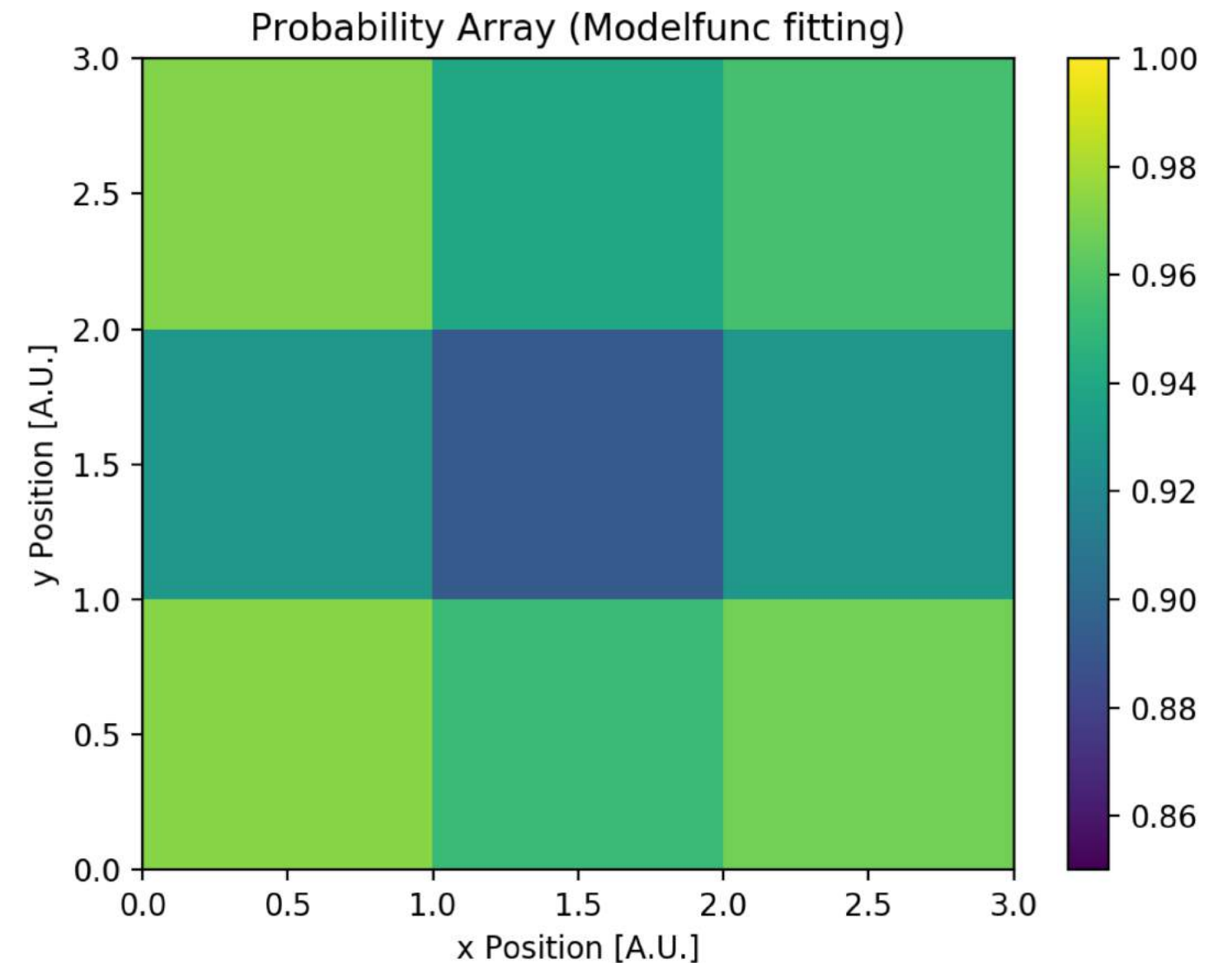
学習させるパラメータは次を使用

片側ガウシアン	ピーク時刻、チャージ、二乗和誤差
関数 $\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x-(\alpha+\beta)}{\gamma}} \int_0^{\frac{x-\alpha}{\beta}} e^{-t^2} dt$	立ち上がり時刻、ピーク電位、二乗和誤差

3.3 Gaussian vs Error Function(1)



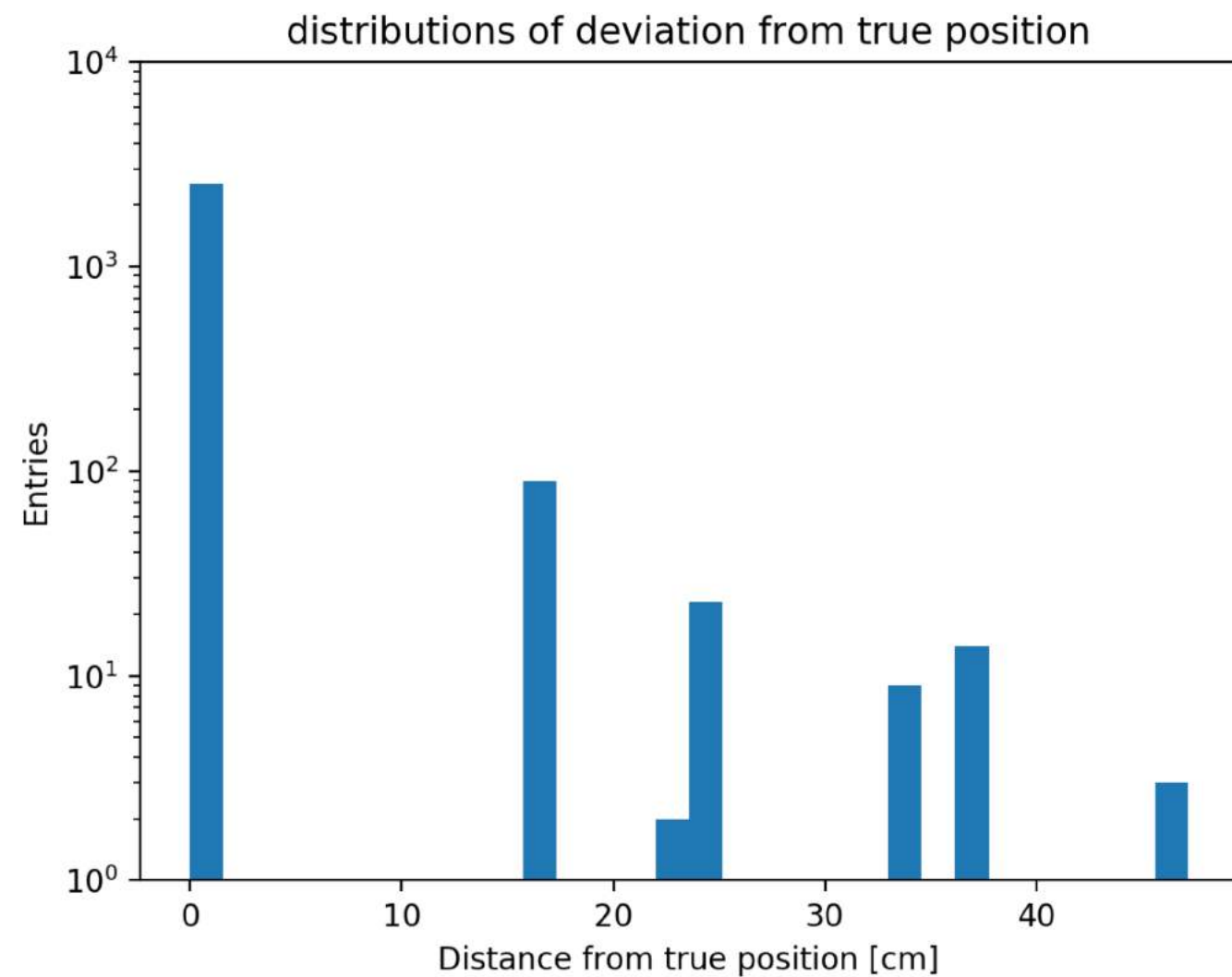
Gaussian



Error function

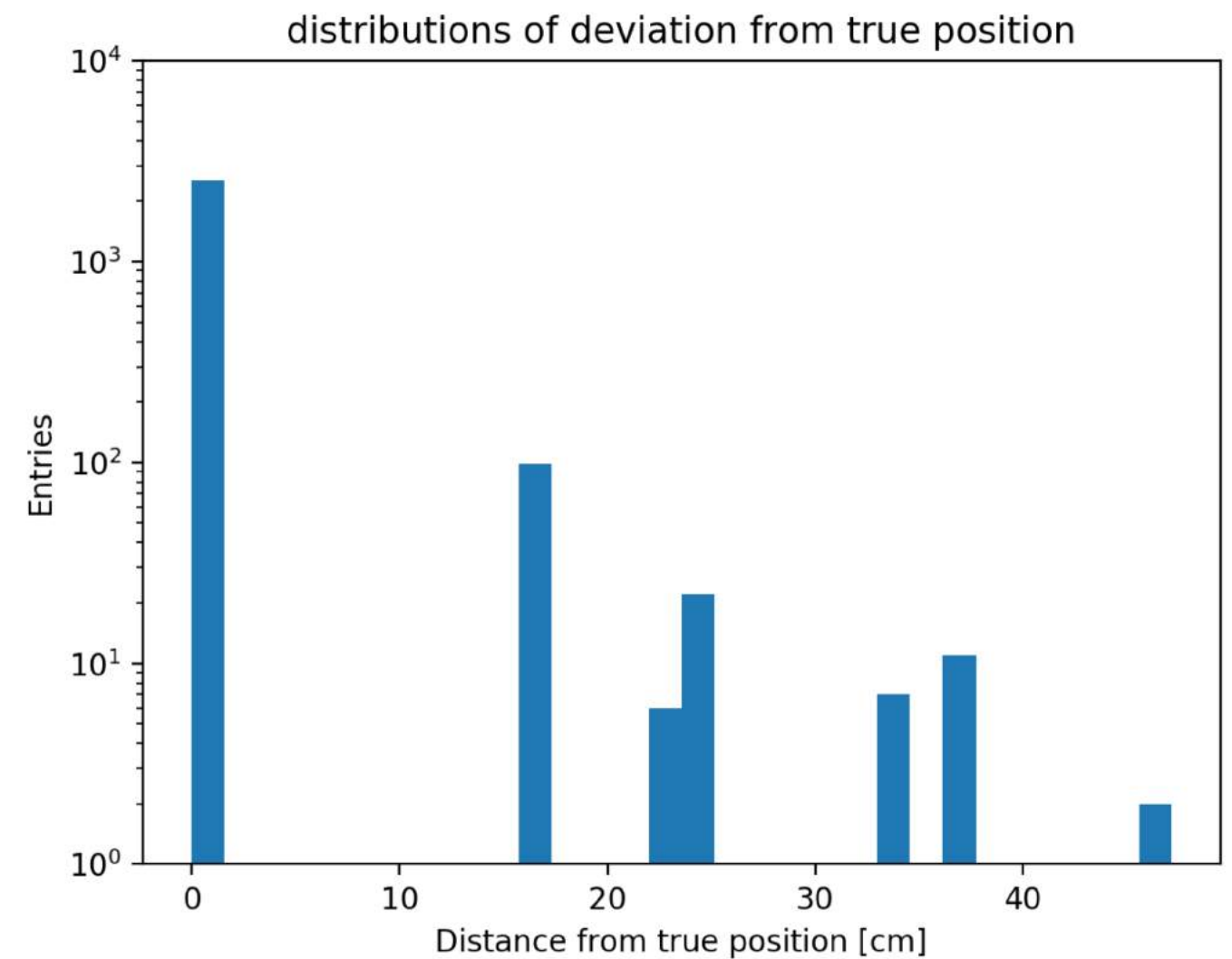
差はない！

3.3 Gaussian vs Error Function(2)



Gaussian

差はない！



Error function

1.Introduction

2.Set Up

3.Calibration

4.Observation

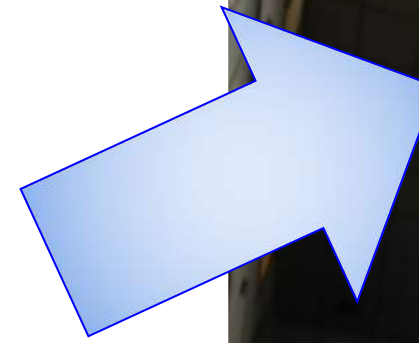
5.Result

6.Discussion

7.Summary

4.1 観測条件

- 日付 2018/03/09(金)
- 方向(ターゲット) ICRR天井
- 時間 on 18:30~
off
- 場所 屋外(1F 倉庫前)
- 天気 曇り

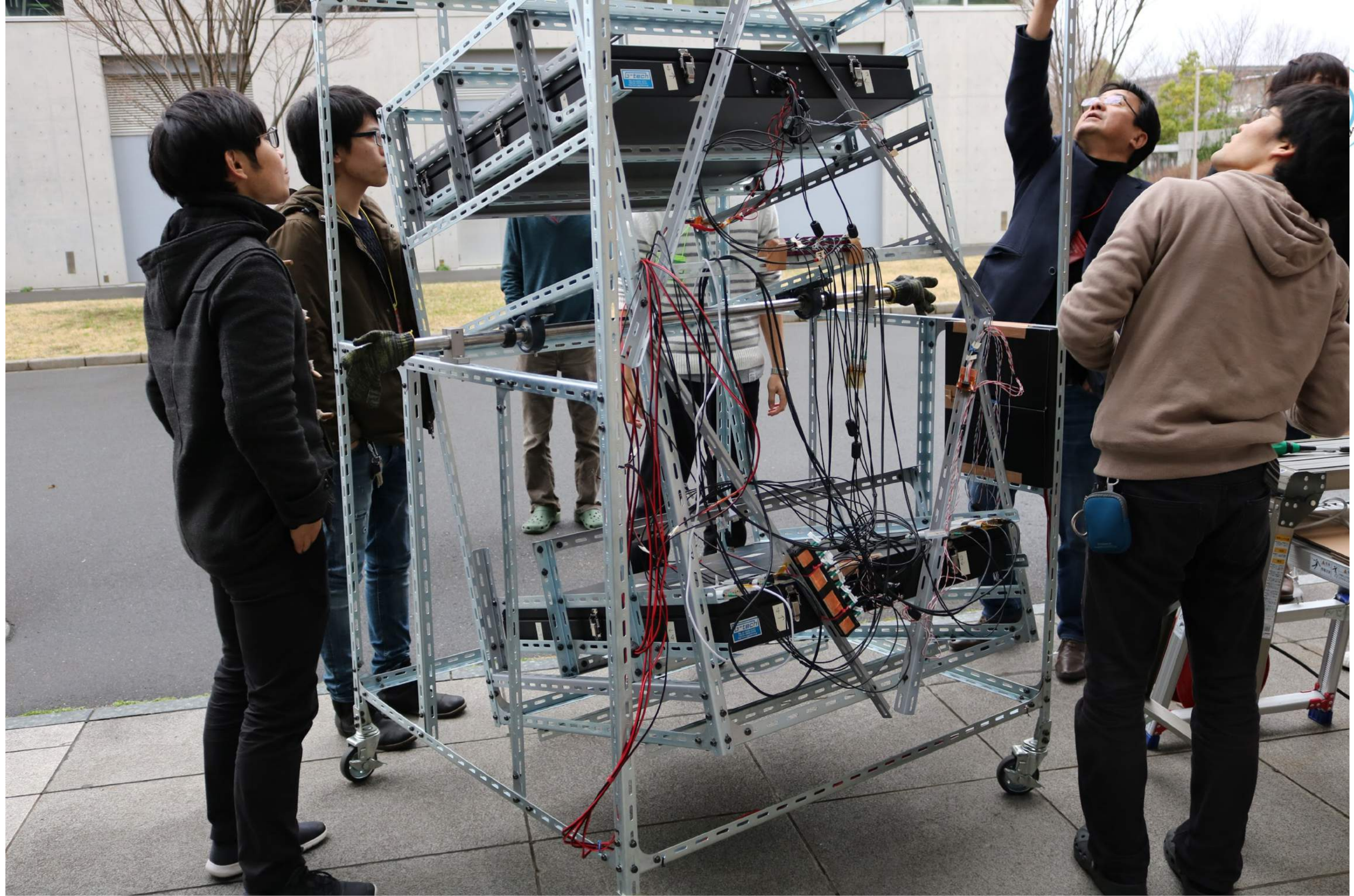






First Light!!!







1.Introduction

2.Set Up

3.Calibration

4.Observation

5.Result

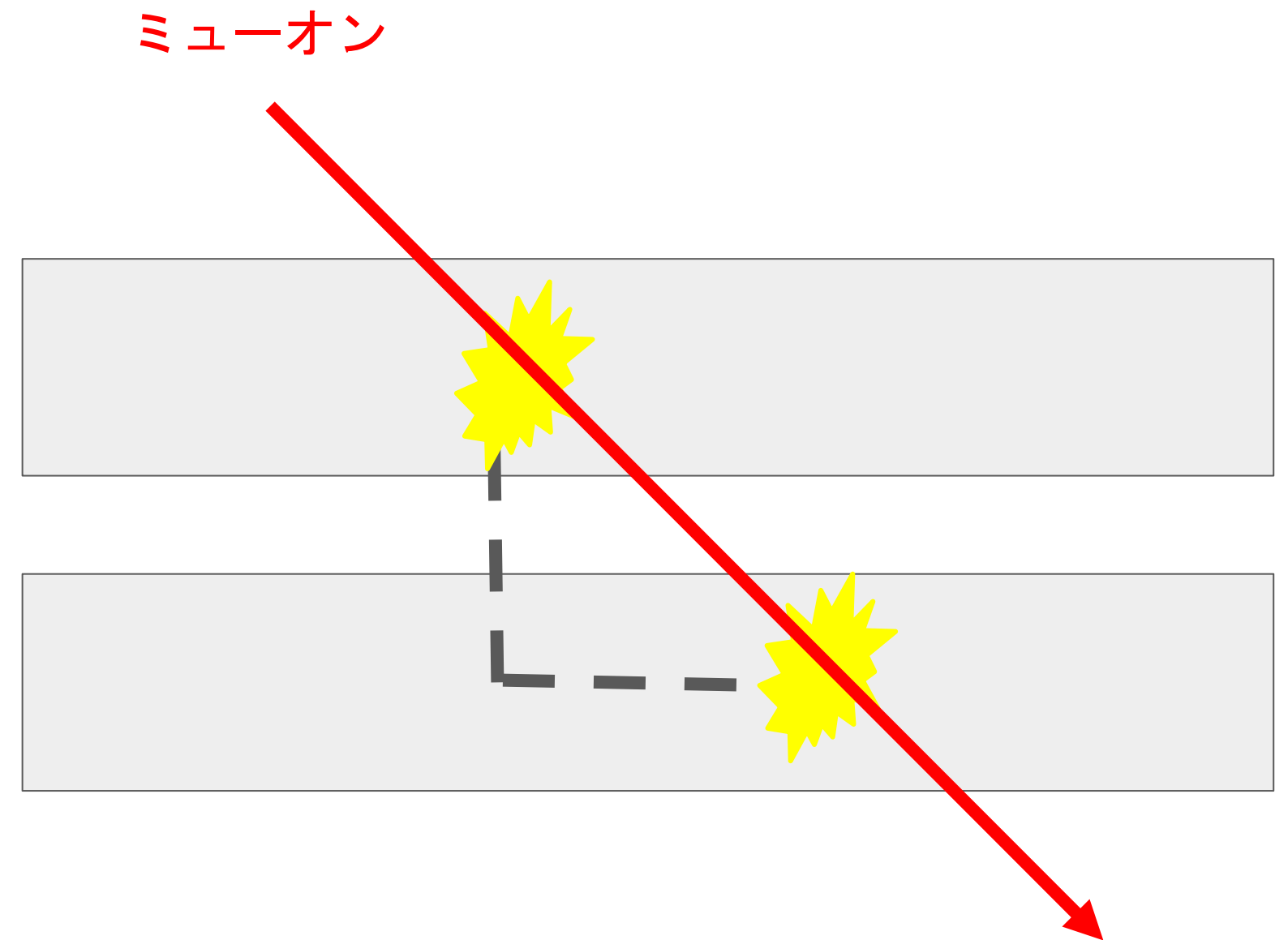
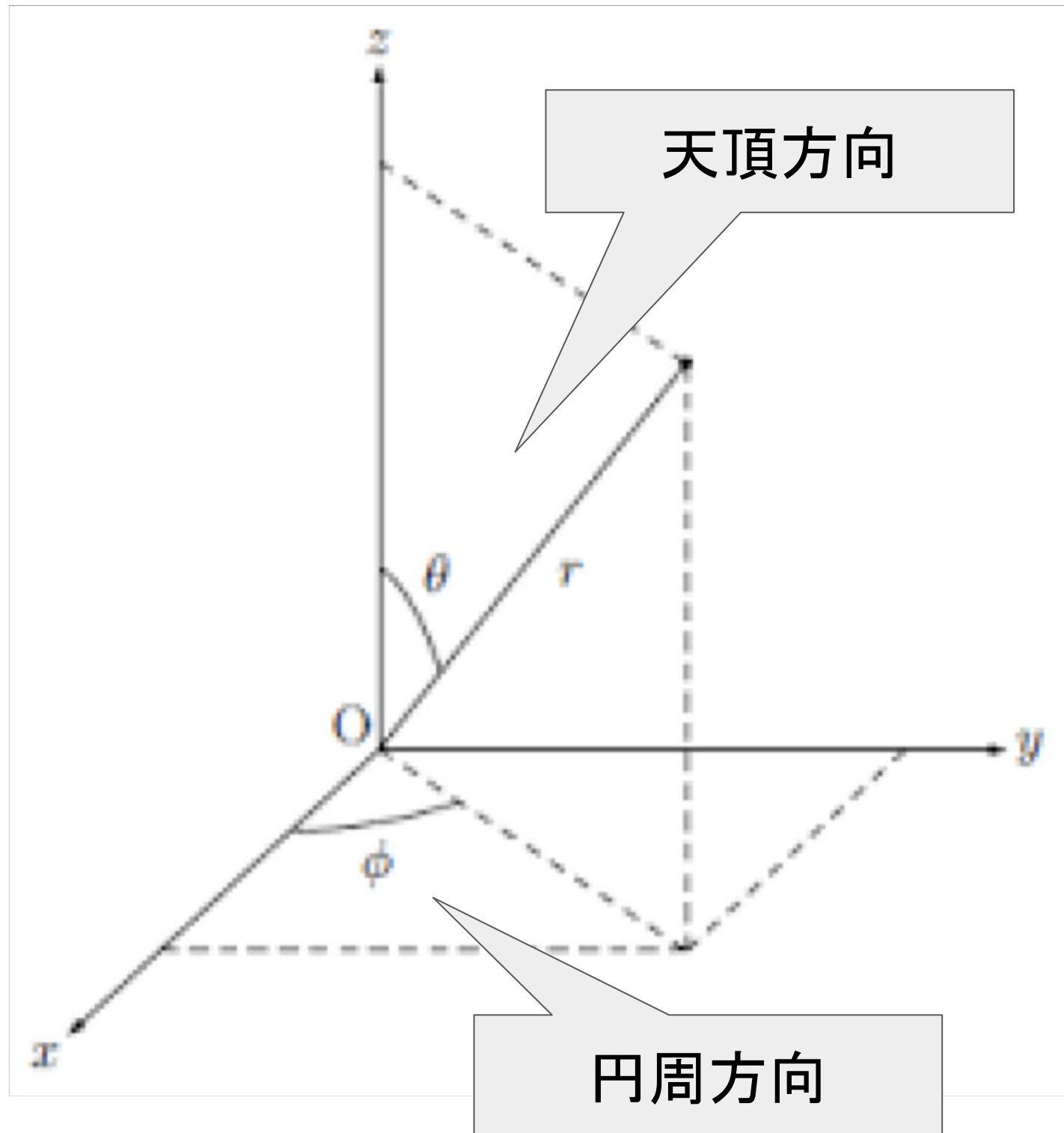
6.Discussion

7.Summary

ある方向からどのくらいのミューオンが来ているか？

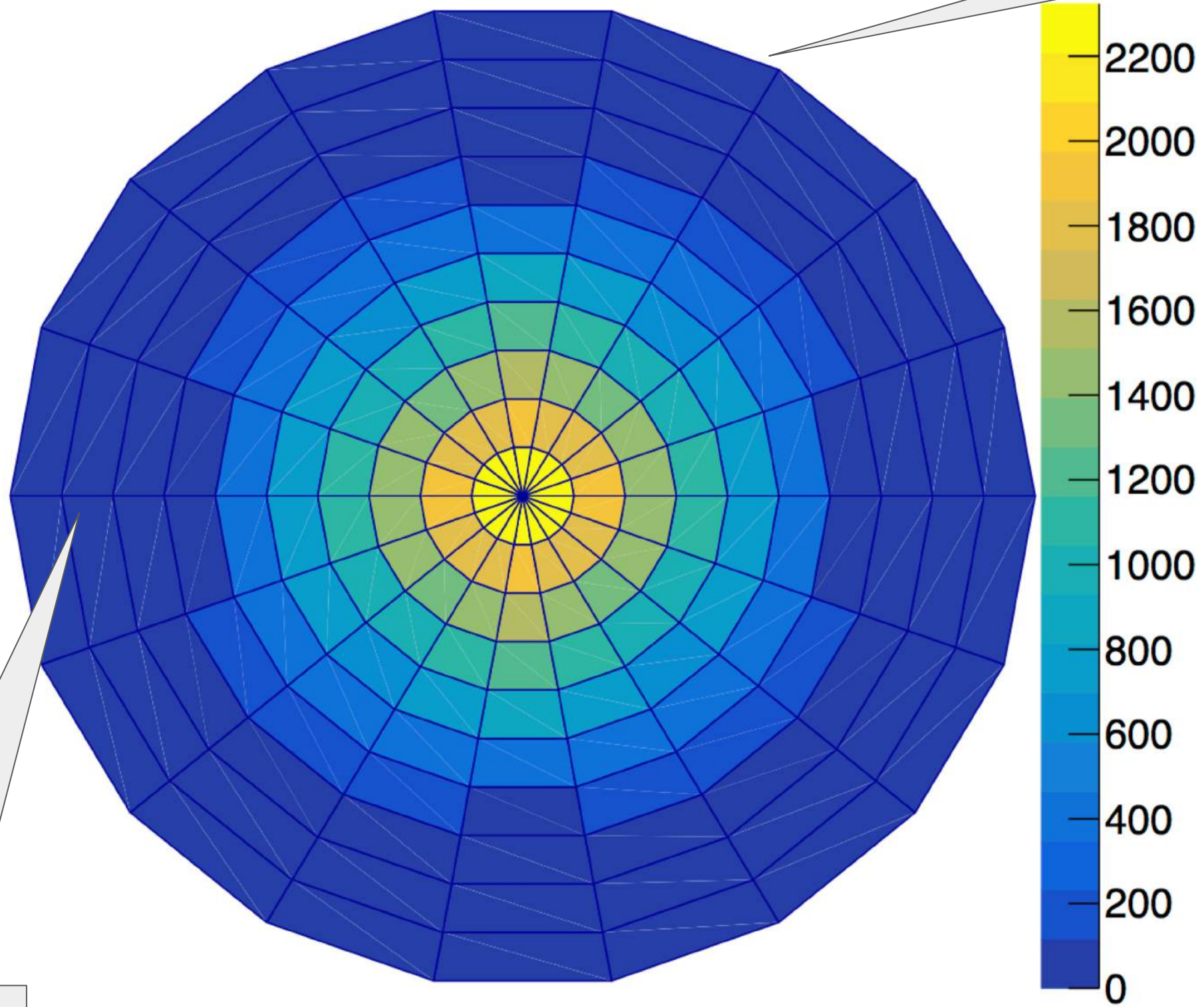
→輝度(立体角まで含めたフラックス)を求めよう！

5.1 角度と面積に関する調整



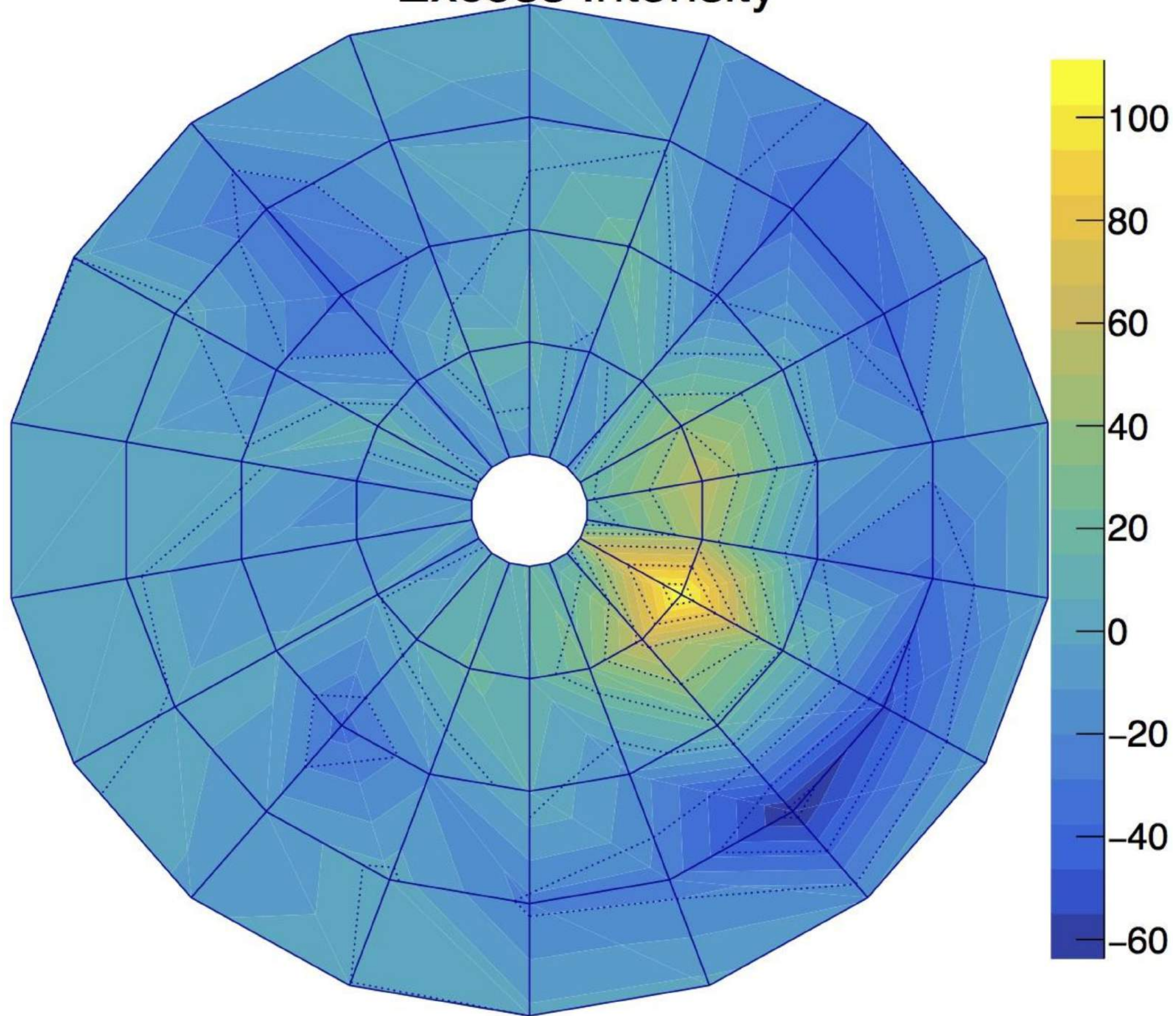
Effective area [cm²]

円周方向

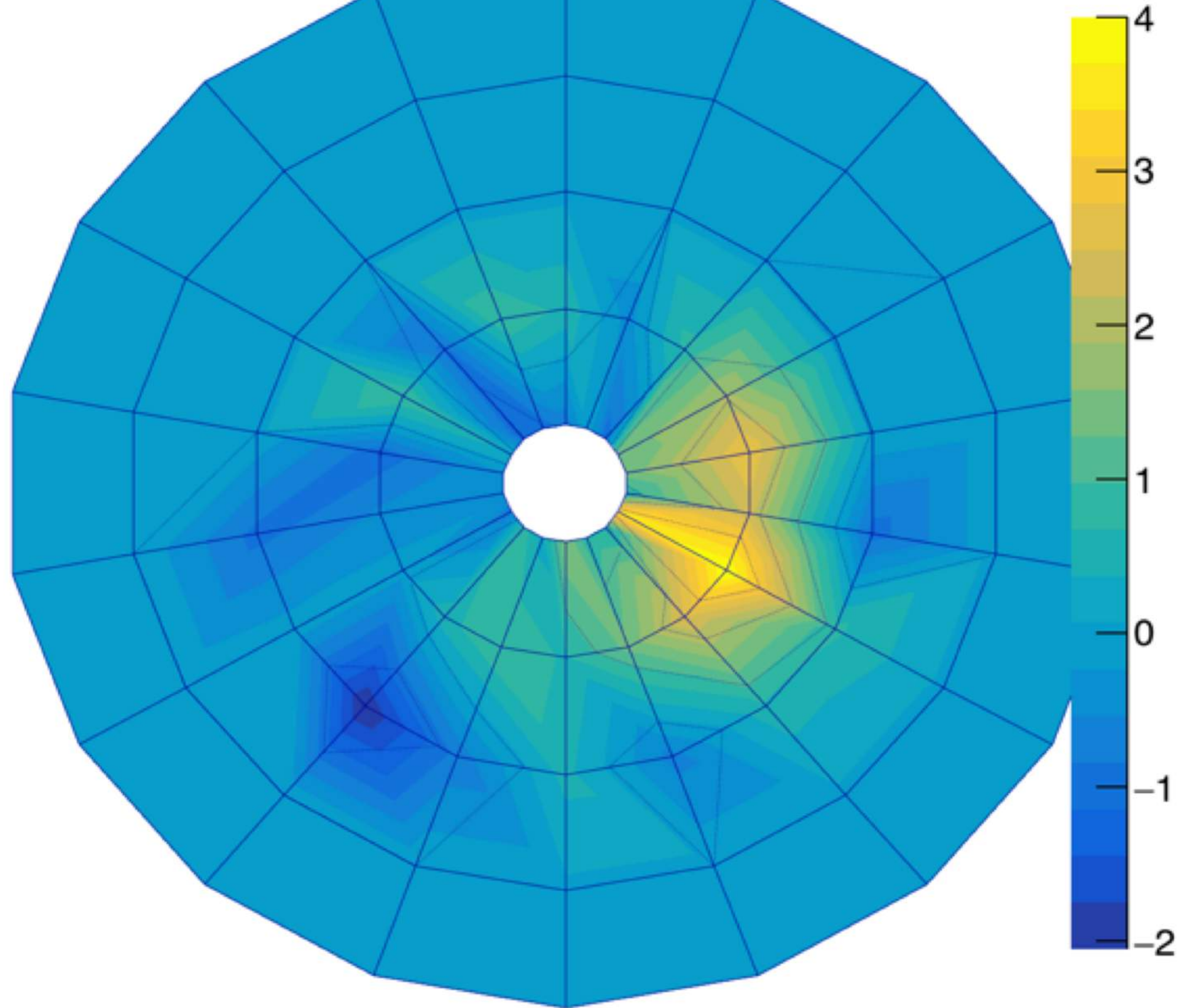


天頂方向

Excess Intensity



Significance



1.Introduction

2.Set Up

3.Calibration

4.Observation

5.Result

6.Discussion

7.Summary

期待される結果

特定の位置にミューオンのホットスポットが検出

⇒①高さ、範囲

②方向

期待される結果

特定の位置にミューオンのホットスポットが検出

⇒①高さ、範囲

②方向

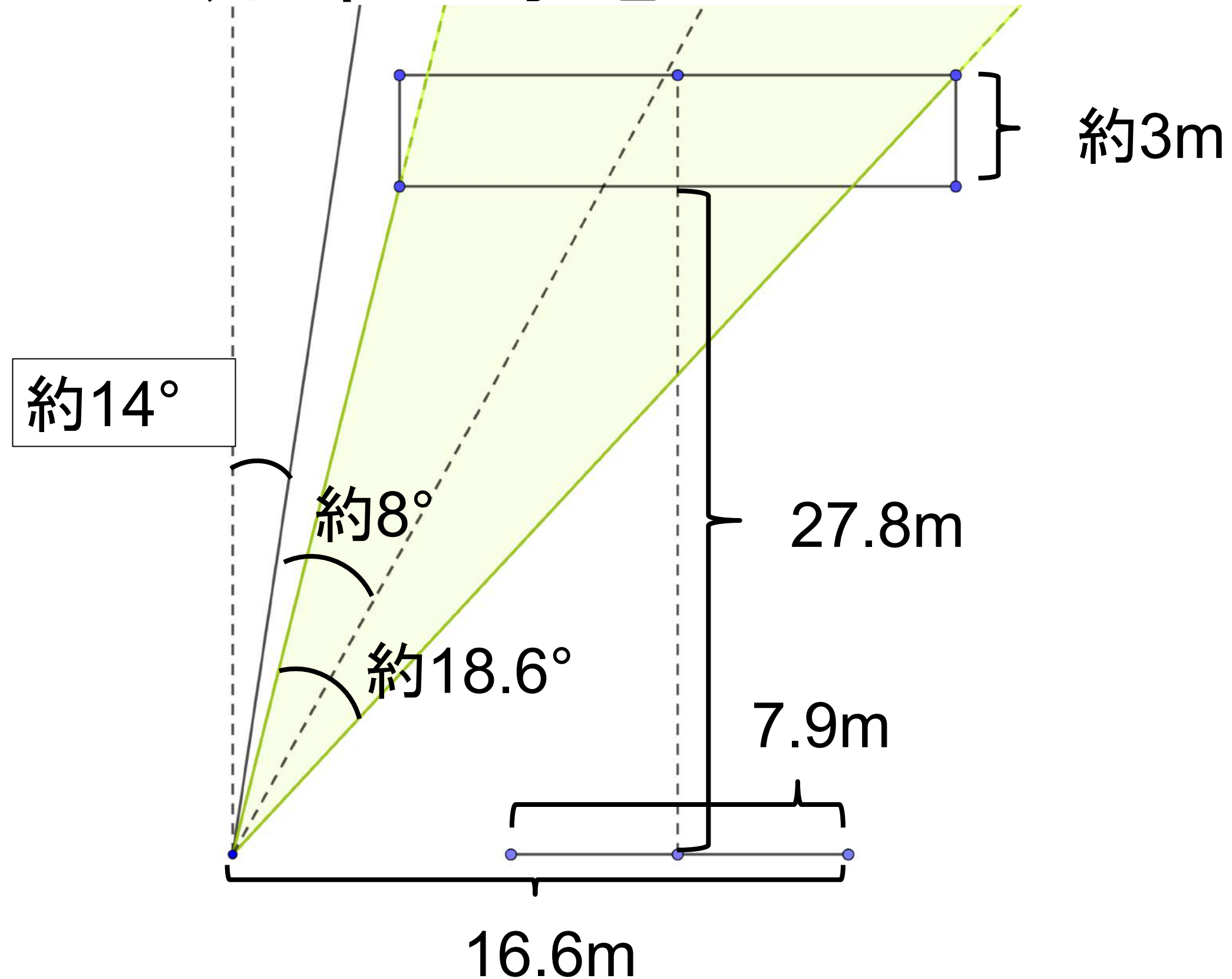
期待される結果

特定の位置にミューオンのホットスポットが検出

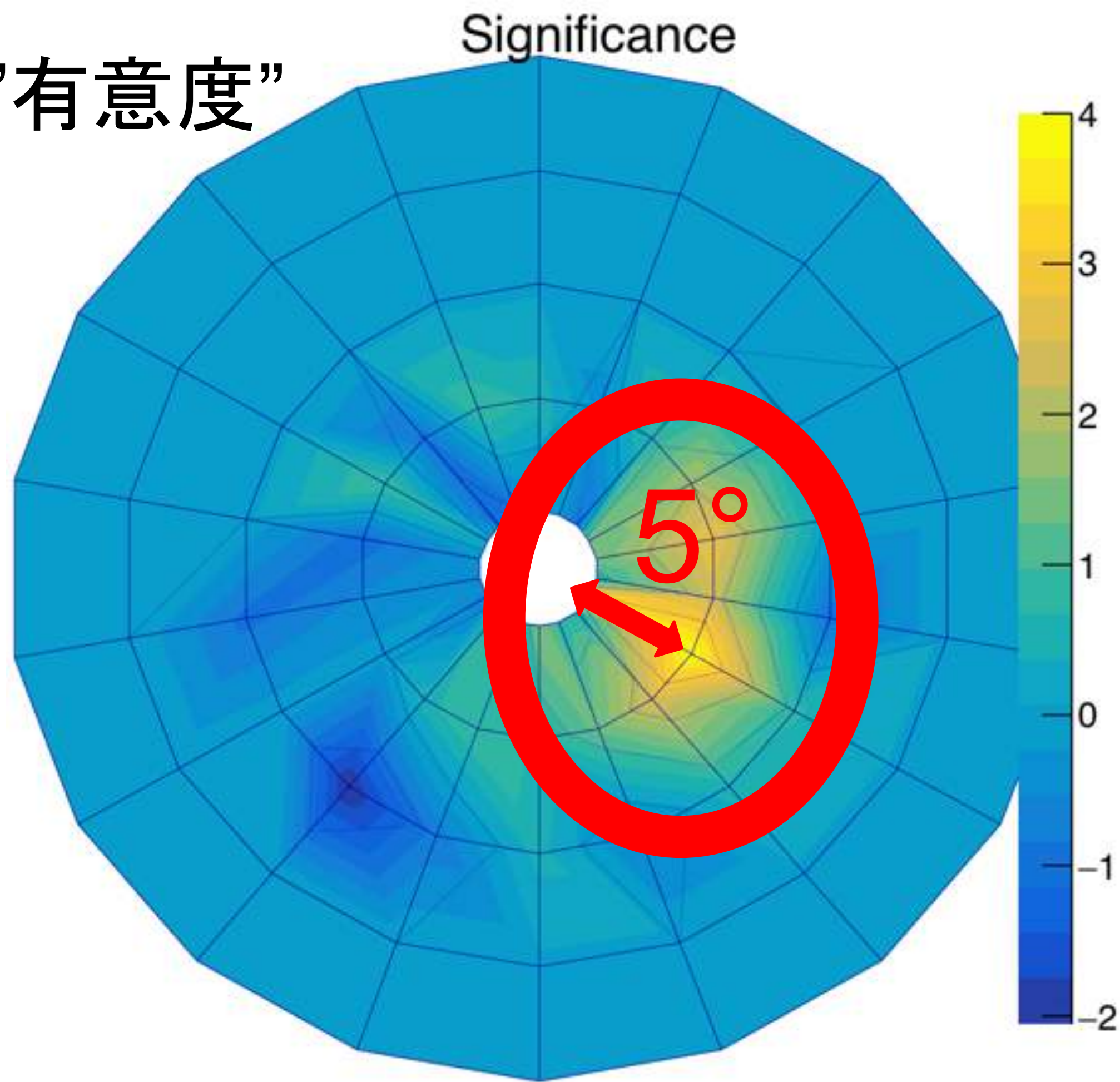
⇒①高さ、範囲

②方向

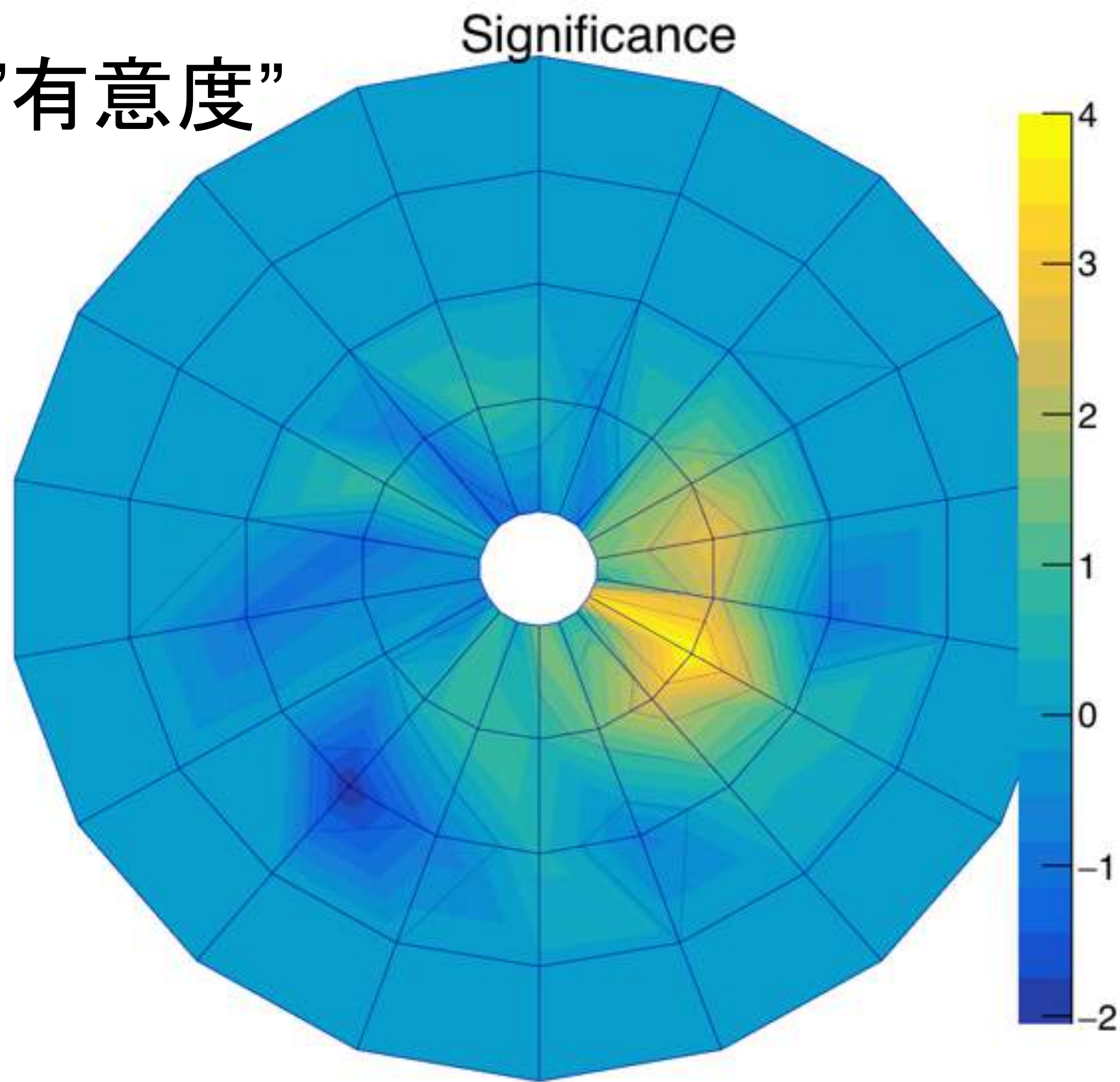
期待される分布の予想



ミューオンの”有意度”



ミューオンの”有意度”

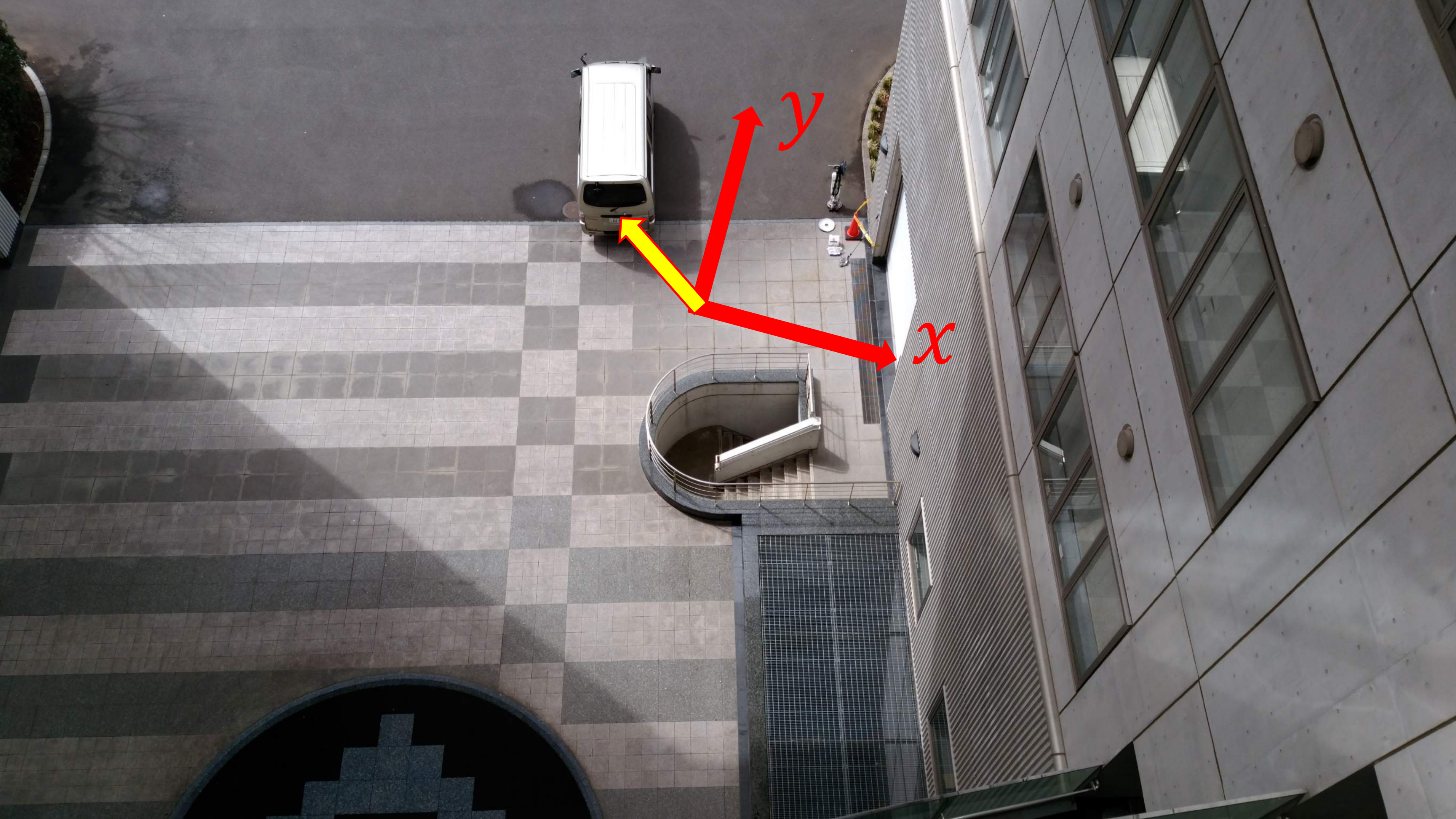


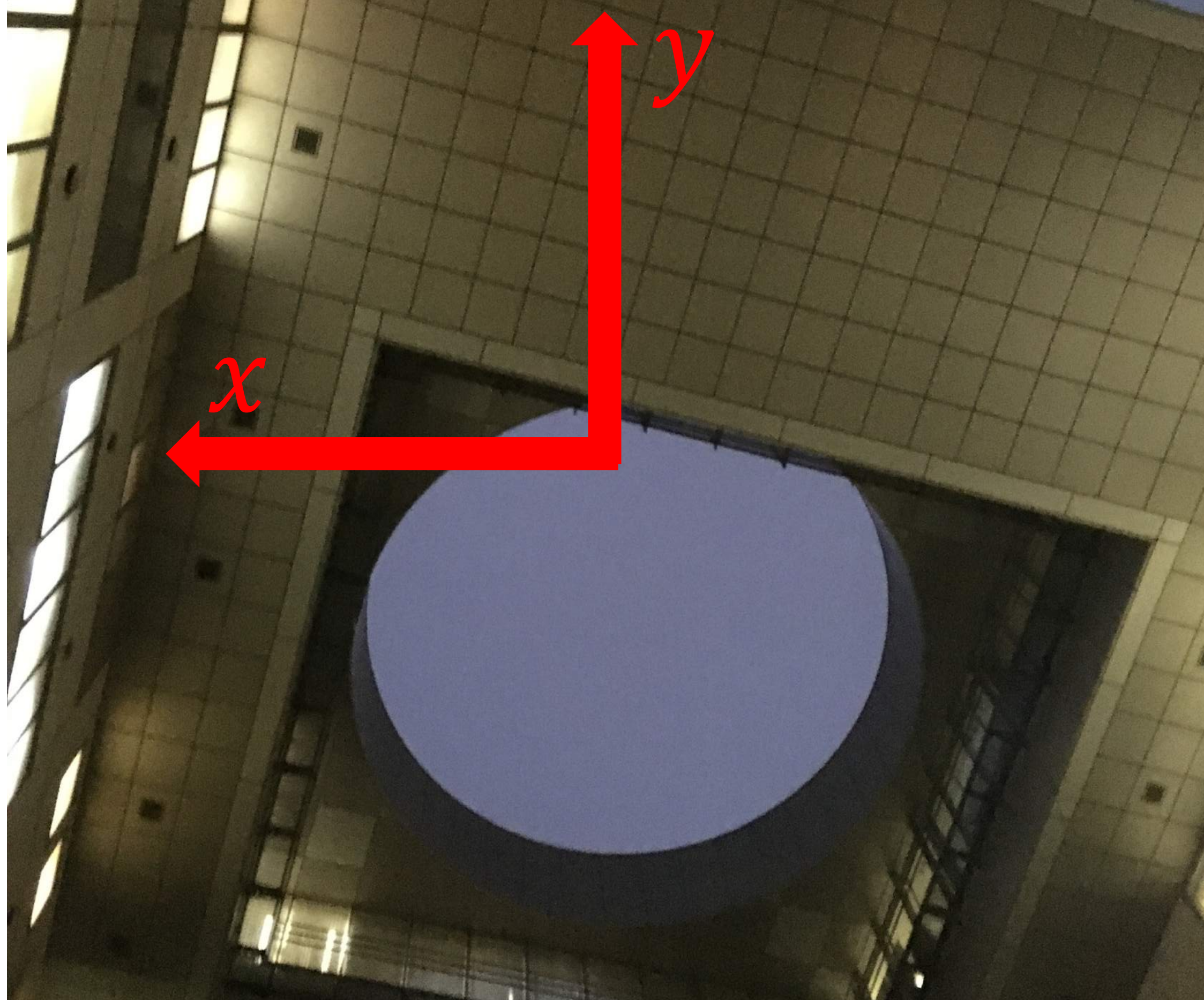
期待される結果

特定の位置にミューオンのホットスポットが検出

⇒①高さ、範囲

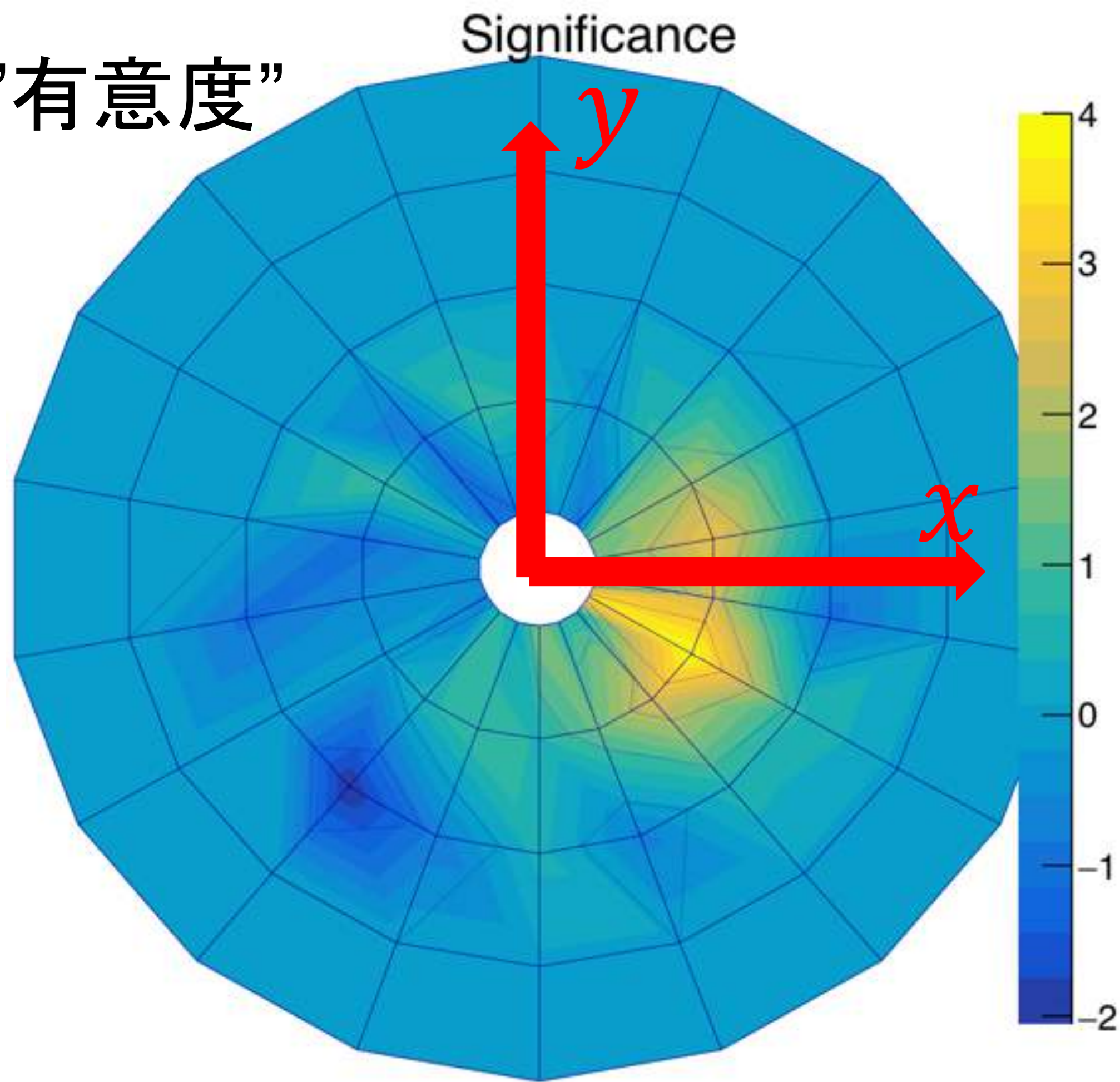
②方向



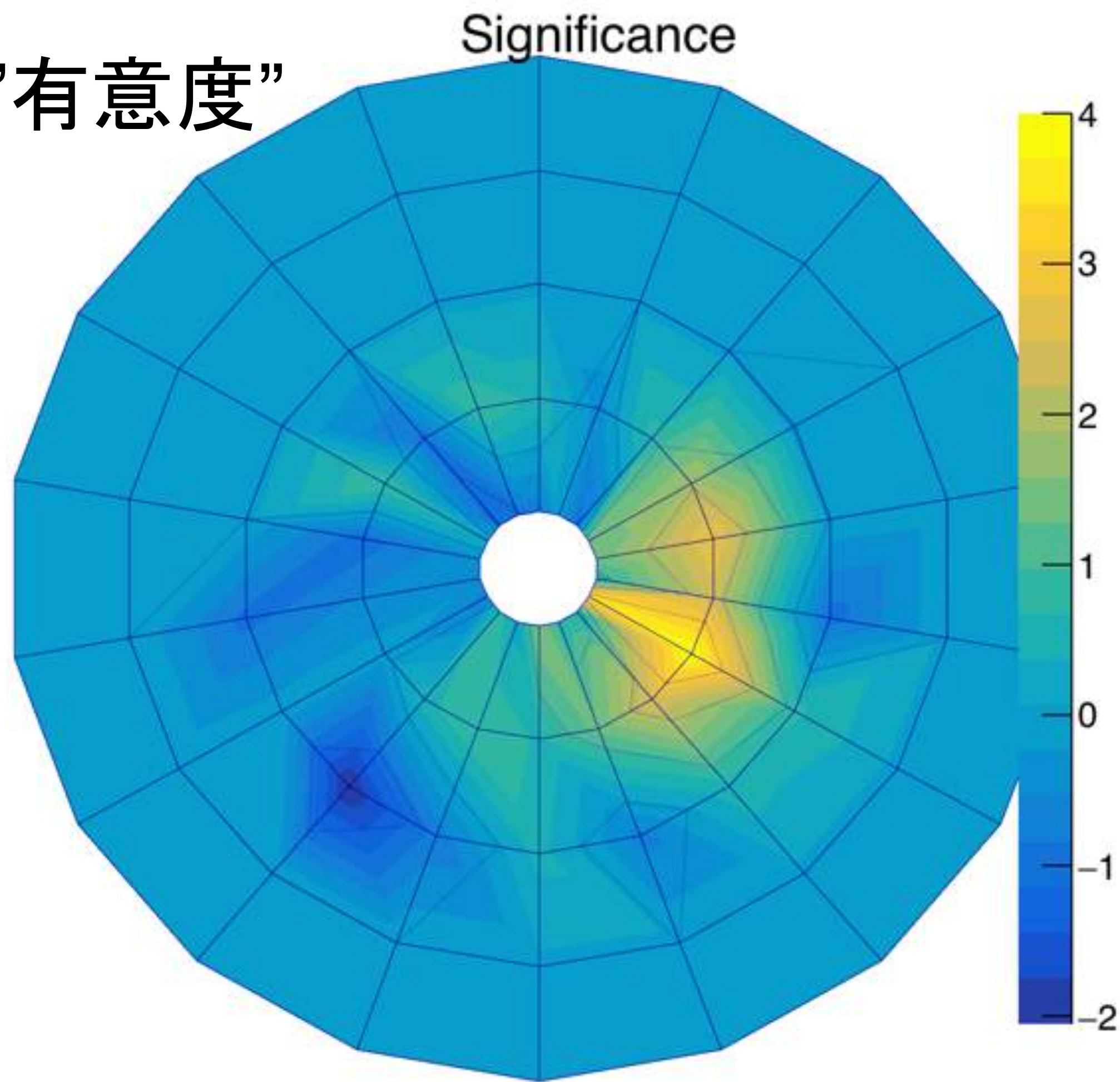


以下の画像は空から見下ろしていることに注意！

ミューオンの”有意度”



ミューオンの”有意度”



Significance分布との比較

- 望遠鏡の中心軸からの傾きと範囲は期待値とほぼ一致
- 方位角については傾きと範囲に比べて精度が得られなかったものの、方位角についてもデータが得られることが分かった

7. Summary

- チェレンコフ望遠鏡の技術をもちいて、撮像型望遠鏡を作成した
- PMTの波形をモデル化し、機械学習をもちいて解析をおこなった
- ミューオグラフィで、統計的に有意なホットスポットの検出に成功した
- 宇宙線研究所の例の穴を建築20年以來初めて有効活用することに成功した

例の穴の大きさと下のくぼみの大きさは異なる

7. Summary

- チェレンコフ望遠鏡の技術をもちいて、撮像型望遠鏡を作成した
- PMTの波形をモデル化し、機械学習をもちいて解析をおこなった
- ミューオグラフィで、統計的に有意なホットスポットの検出に成功した
- 宇宙線研究所の例の穴を建築20年以來初めて有効活用することに成功した

例の穴の大きさと下のくぼみの大きさは異なる



ゴミイベントを拾う確率

- ・ 信号を拾うと30nsecだけトリガーウィンドウが開く
- ・ 1枚のシンチレーターで25Hzのイベントを拾う $\Rightarrow$ 0.04secに1回イベントを拾う
- ・ 「1secに上下のシンチレーターで異なる荷電粒子のイベントをひろう確率」 $\Leftrightarrow$ 「1枚のシンチレーターで1イベントを拾ってから60nsec以内にもう1度同じシンチレーターで別粒子のイベント拾う確率」

- ・ Poisson分布

$$P(a) = \frac{1}{\lambda} \int_0^a e^{-\frac{t}{\lambda}} dt$$

$a=60\text{nsec}$, $\lambda=0.04\text{sec}$ では $P=1.50 \times 10^{-6}$

つまり、ゴミイベントは $3.75 \times 10^{-5}\text{Hz}$

Intensity

輝度(intensity)

単位立体角単位面積当たりの強度

$$\text{Intensity} = \frac{N}{A \sin \theta \Delta \theta \Delta \phi}$$

ある方向からどのくらいの粒子が来ているのか？