

# GRAINEエマルションチェンバーに記録された ハドロン反応の解析手法の開発

名古屋大学 理学研究科D1

森下 美沙希

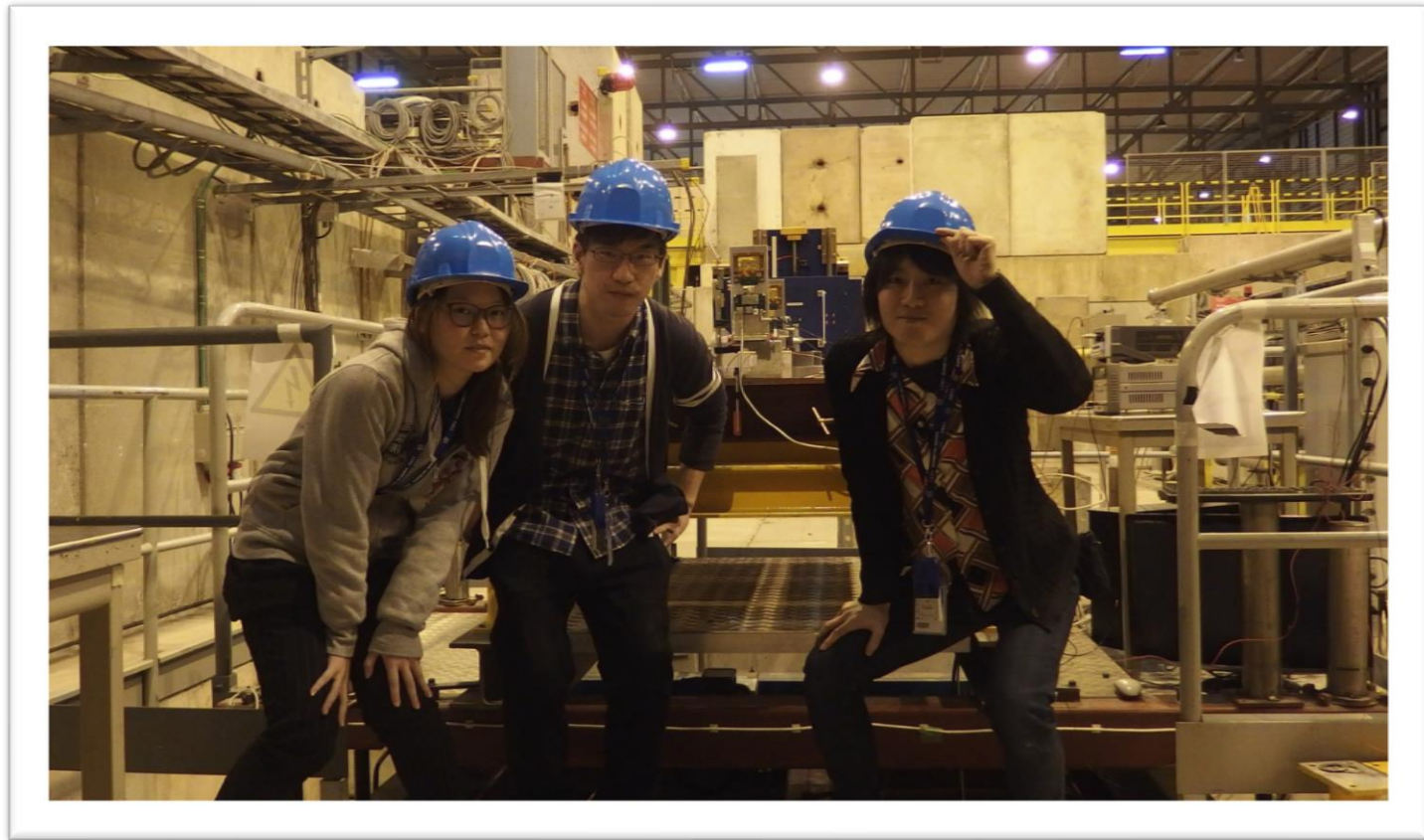
# 自己紹介

名前 森下 美沙希

学年 D1

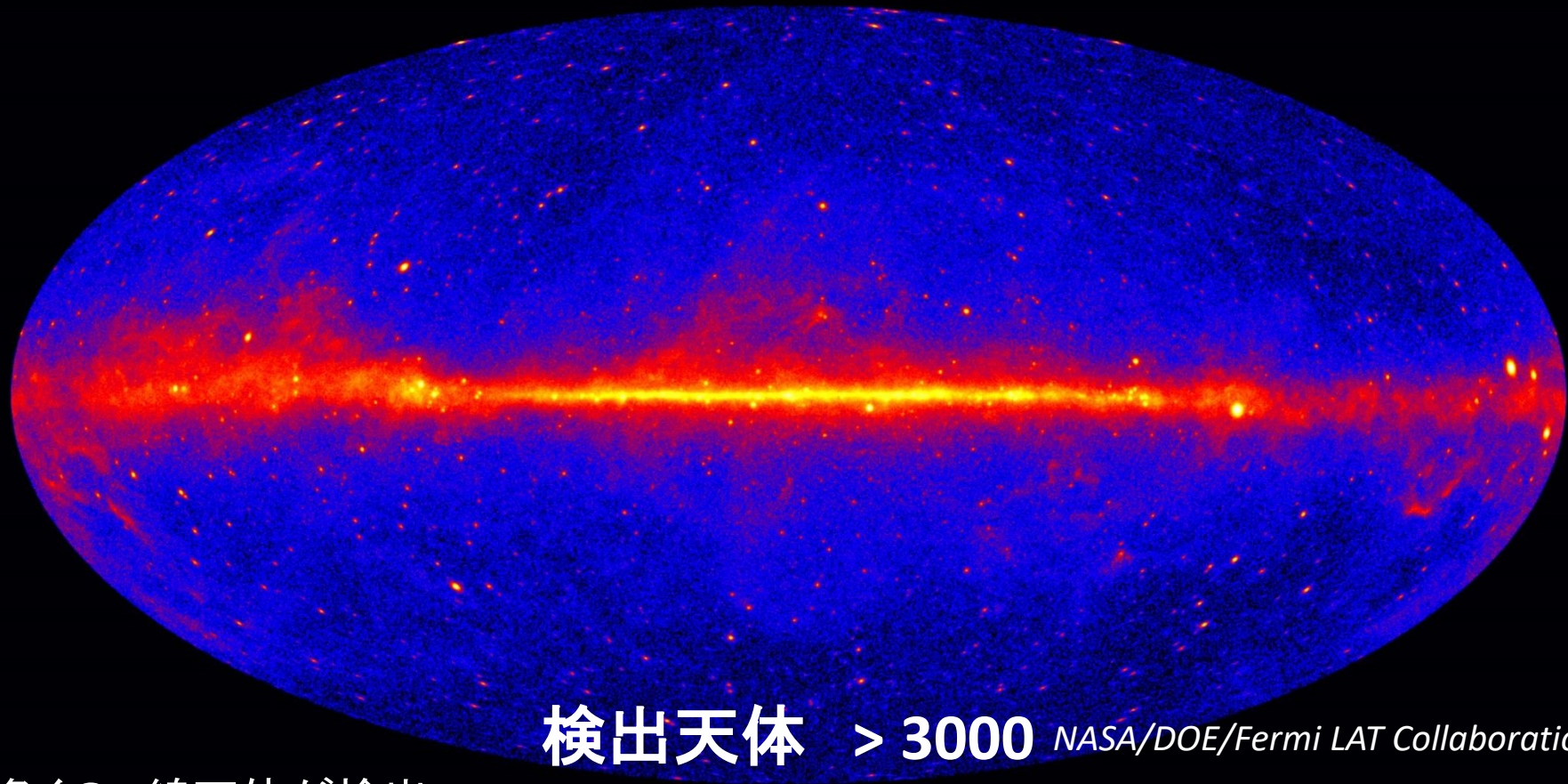
所属 愛知教育大学現代学芸課程自然科学コース宇宙物質科学専攻  
(原子核乾板にであう)

→ 名古屋大学F研 2015年の夏ごろからGRAINE実験に参加



# ガンマ線天体

Fermi-LATによるガンマ線全天マップ(2008-2013  $E_\gamma > 1\text{GeV}$ )



検出天体 > 3000 NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration

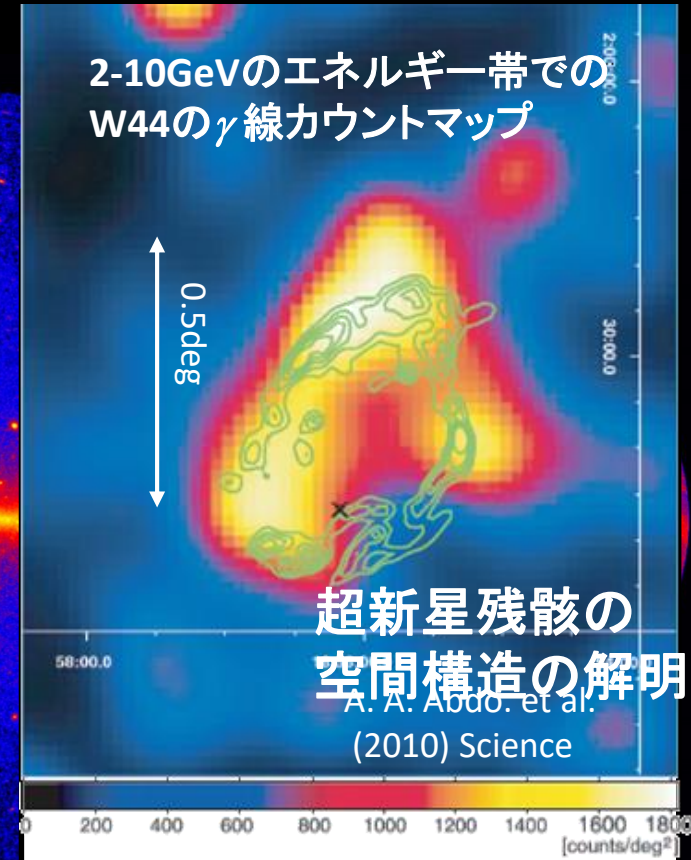
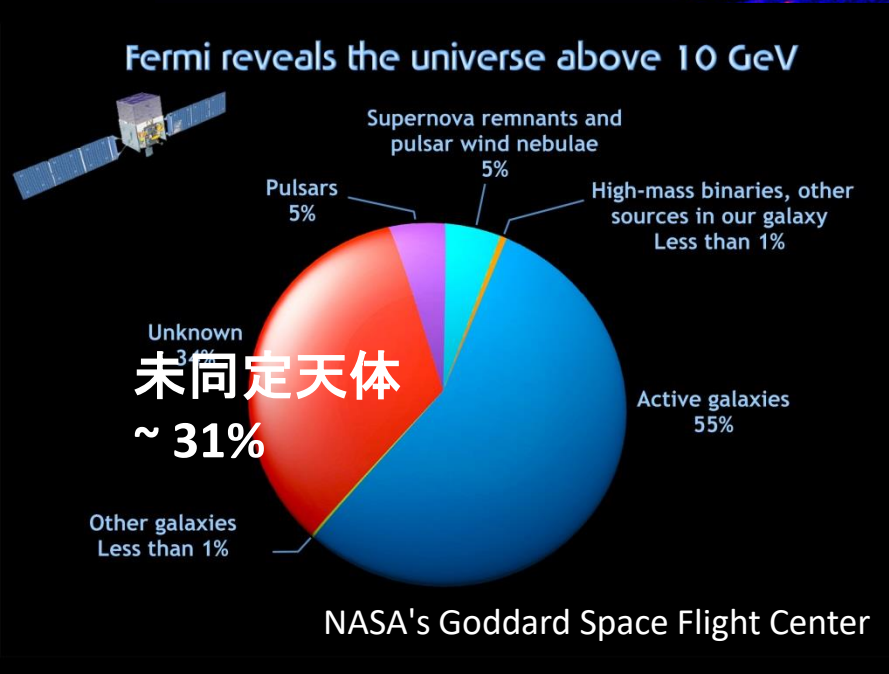
多くの $\gamma$ 線天体が検出

→ 様々な課題の解決には高解像度の観測が必須



# ガンマ線天体

## Fermi-LATによるガンマ線全天マップ(2008-2013 $E_\gamma > 1\text{GeV}$ )



検出天体 > 3000 NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration

多くの $\gamma$ 線天体が検出

→ 様々な課題の解決には高解像度の観測が必須

GRAINE実験では原子核乾板を用いることで高角度分解能の

$\gamma$ 線天体精密観測を目指す



# エマルションの顕微鏡画像

素粒子反応点

100 $\mu$ m

コンプトン電子

宇宙線 $\mu$ 粒子

- 1 $\mu$ m以下の銀粒子の連なりで飛跡が構成されるため、空間分解能が高い  
→反応点周りの解析、短寿命粒子の同定に有効な検出器
- 4 $\pi$ 方向にすべての荷電粒子を記録することができる
- 乾板自体の面積化が可能

# ガンマ線天体

## Fermi-LATによるガンマ線全天マップ(2008-2013 $E_\gamma > 1\text{GeV}$ )

\*  $10\text{m}^2 * \epsilon_{\text{trans}} * \epsilon_{\text{conv}} * \epsilon_{\text{det}}$

	フェルミ衛星	x1/6 →	GRAINE
角度分解能 @100MeV	6.0deg (105mrad)	x1/9 →	1.0deg (17mrad)
@1GeV	0.90deg (16mrad)	→	0.1deg (1.7mrad)
エネルギー範囲	20MeV - 300GeV		10MeV - 100GeV
ガンマ線偏光感度	No	x8 →	Yes
有効面積 100MeV	0.25m <sup>2</sup>	x3 →	2.1m <sup>2</sup> *
@ 1GeV	0.88m <sup>2</sup>	→	2.8m <sup>2</sup> *
Dead time	26.5 $\mu\text{sec}$ (readout time)		Dead time free

検出天体 > 3000 NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration

多くの $\gamma$ 線天体が検出

→ 様々な課題の解決には高解像度の観測が必須

GRAINE実験では原子核乾板を用いることで高角度分解能の

$\gamma$ 線天体精密観測を目指す

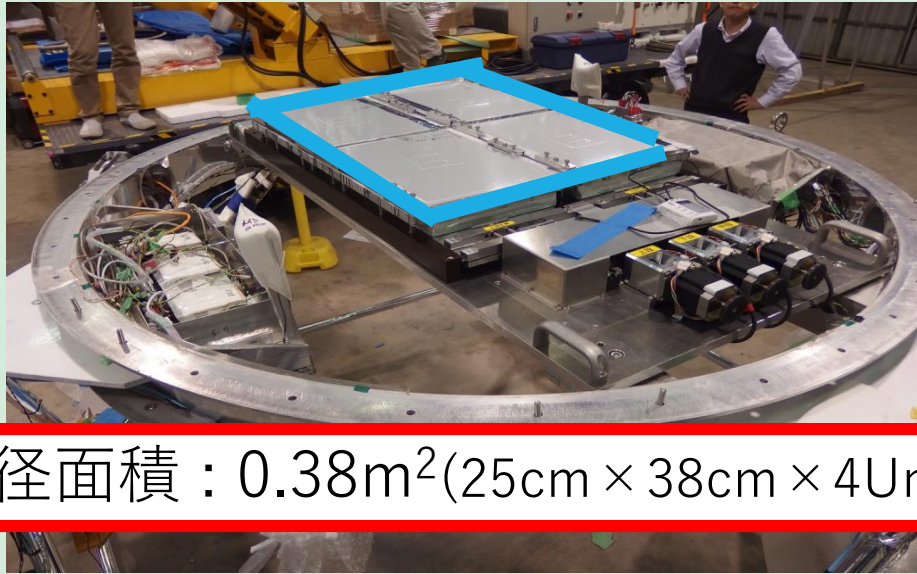


# GRAINE(Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion)計画

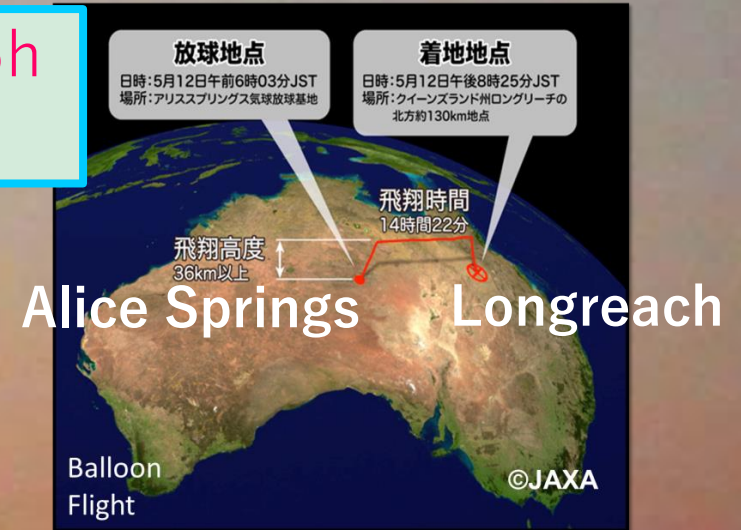
原子核乾板を用いることで高角度分解能の $\gamma$ 線天体の精密観測を目指す

将来計画として10m<sup>2</sup>の口径面積で観測を行うことを目的としている

2015年5月  
オーストラリアにて…



観測時間 = 11.5h  
(36km以上)



口径面積 : 0.38m<sup>2</sup>(25cm × 38cm × 4Units)

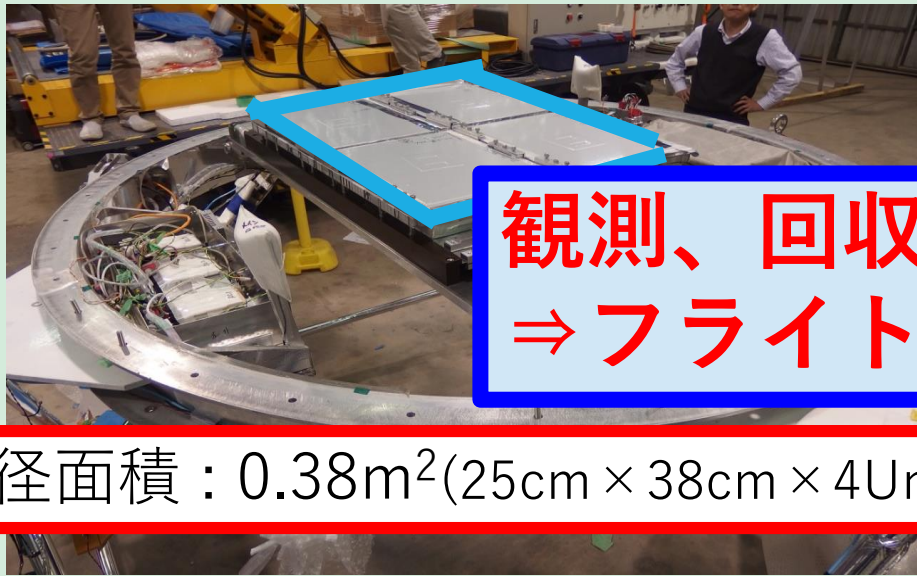
# GRAINE(Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion)計画

原子核乾板を用いることで高角度分解能の $\gamma$ 線天体の精密観測を目指す

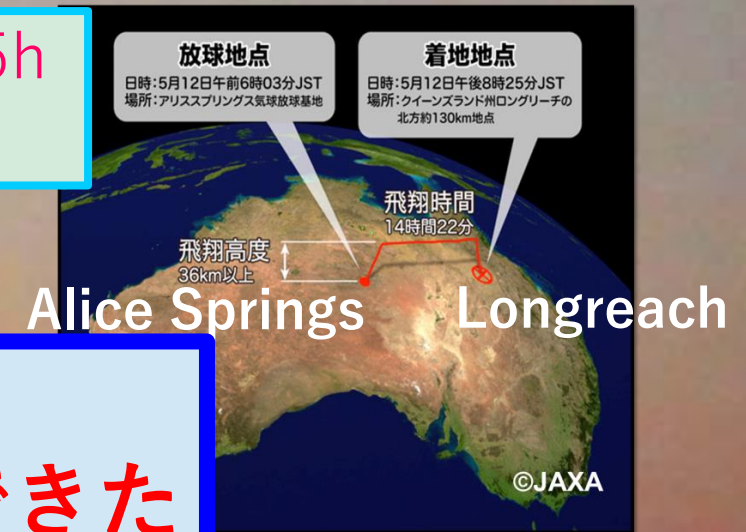
将来計画として10m<sup>2</sup>の口径面積で観測を行うことを目的としている

2015年5月  
オーストラリアにて…

観測時間 = 11.5h  
(36km以上)



観測、回収、現像に成功  
⇒ フライト乾板を得ることができた



口径面積 : 0.38m<sup>2</sup>(25cm × 38cm × 4Units)

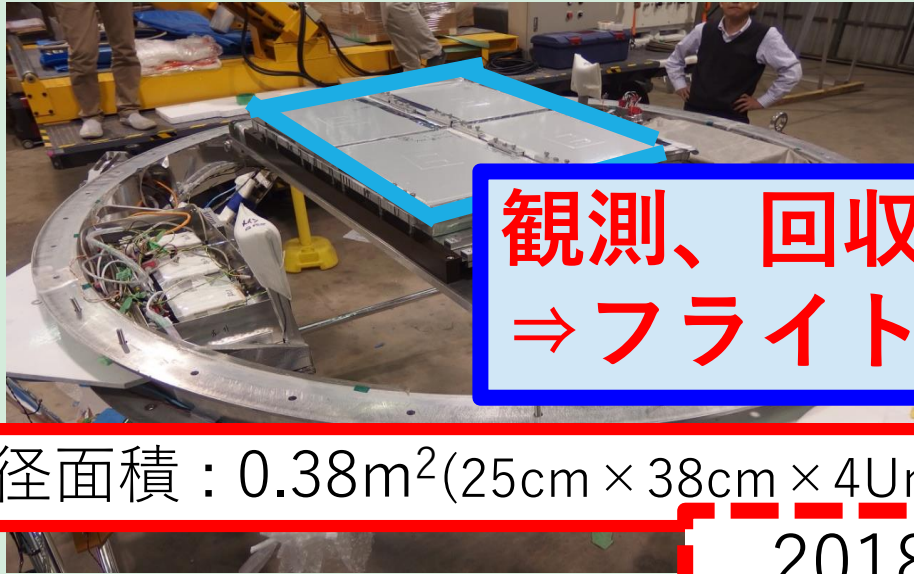


# GRAINE(Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion)計画

原子核乾板を用いることで高角度分解能の $\gamma$ 線天体の精密観測を目指す

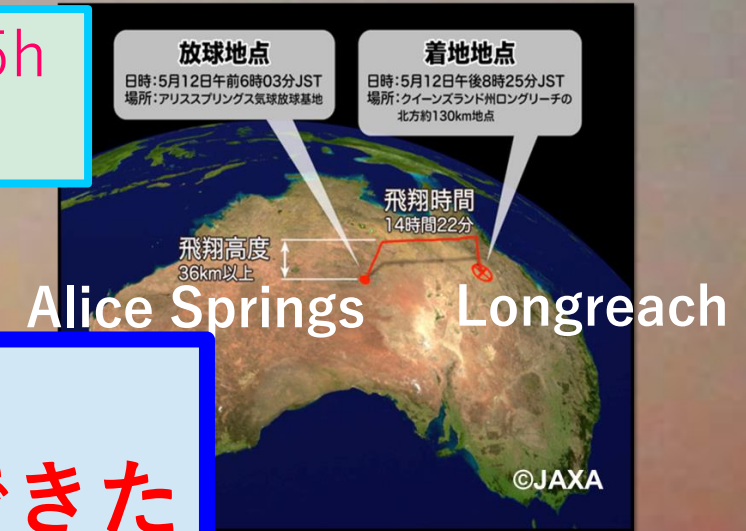
将来計画として10m<sup>2</sup>の口径面積で観測を行うことを目的としている

2015年5月  
オーストラリアにて…



観測時間 = 11.5h  
(36km以上)

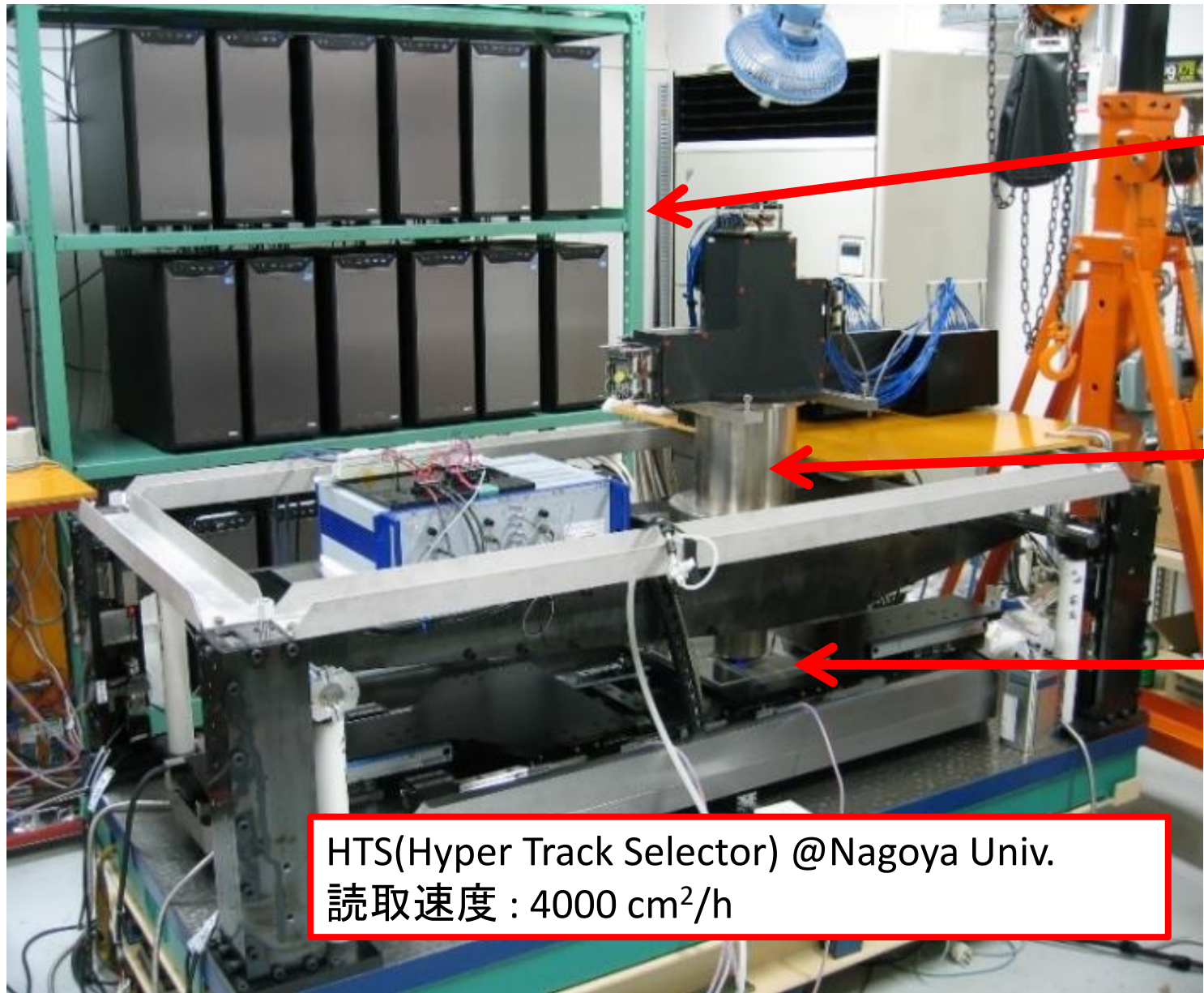
観測、回収、現像に成功  
⇒ フライト乾板を得ることができた



口径面積 : 0.38m<sup>2</sup>(25cm × 38cm × 4Units)

2018年にもフライトを行う (3日目中村悠哉)

# 高速自動飛跡読取装置 (HTS-1) @名古屋大学F研



コンピュータ

対物レンズ

5mm\*5mm/1視野

ステージ

HTS(Hyper Track Selector) @Nagoya Univ.  
読取速度 : 4000 cm<sup>2</sup>/h

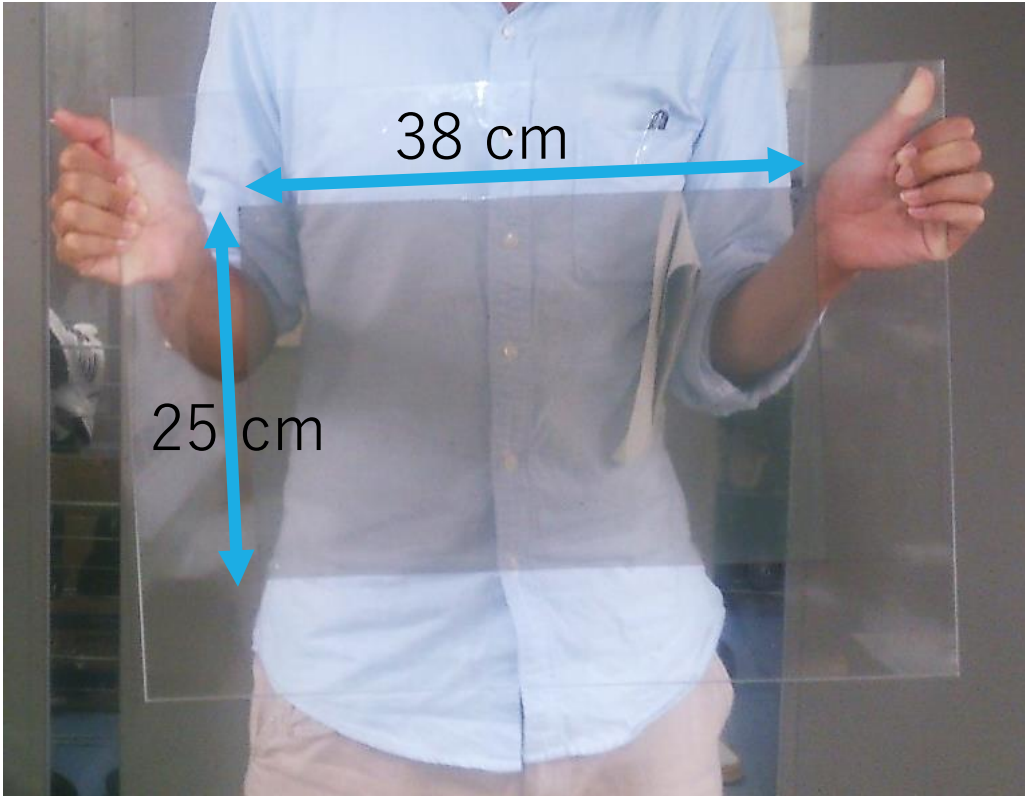
全フライト乾板(41m<sup>2</sup>)の読取を  
約3ヶ月で終了  
↓  
飛跡データの解析



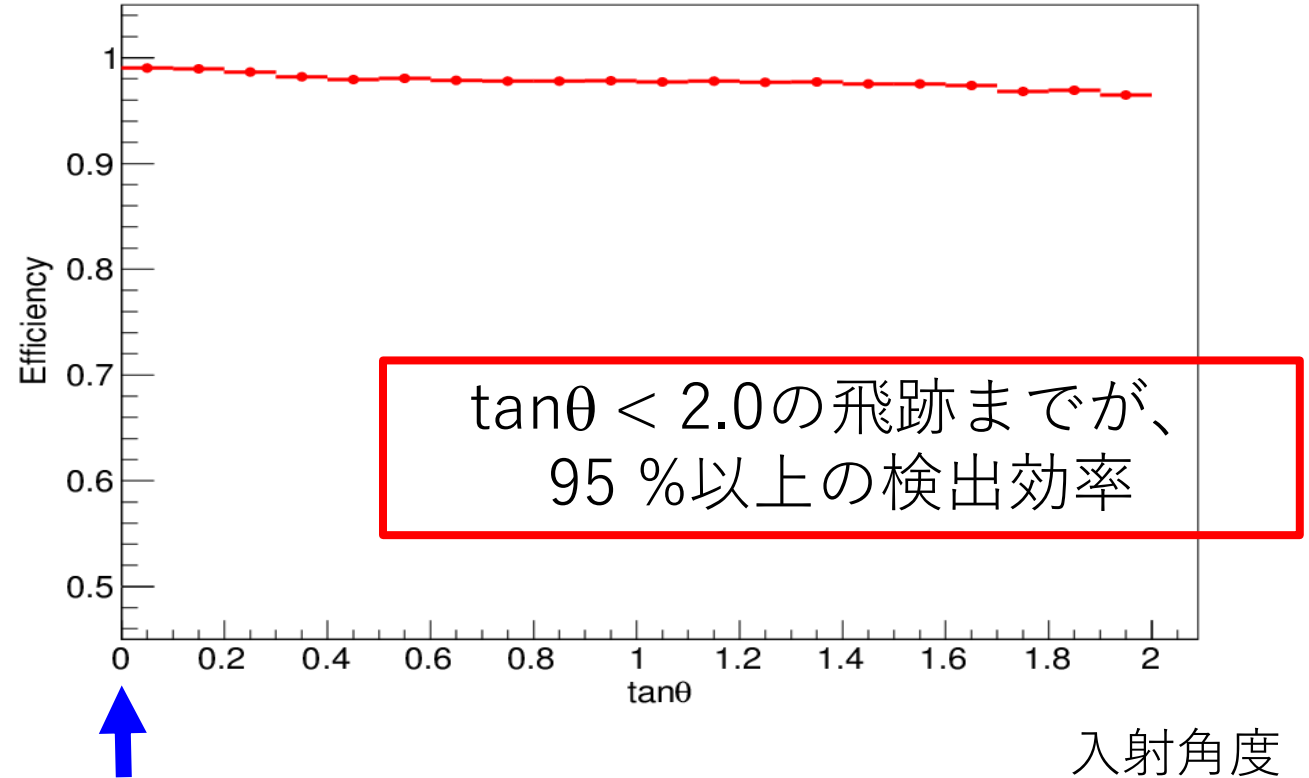
# GRAINE2015 フライト乾板の実績

名古屋大学で製造したフィルムを使用

## GRAINE2015 フライト乾板



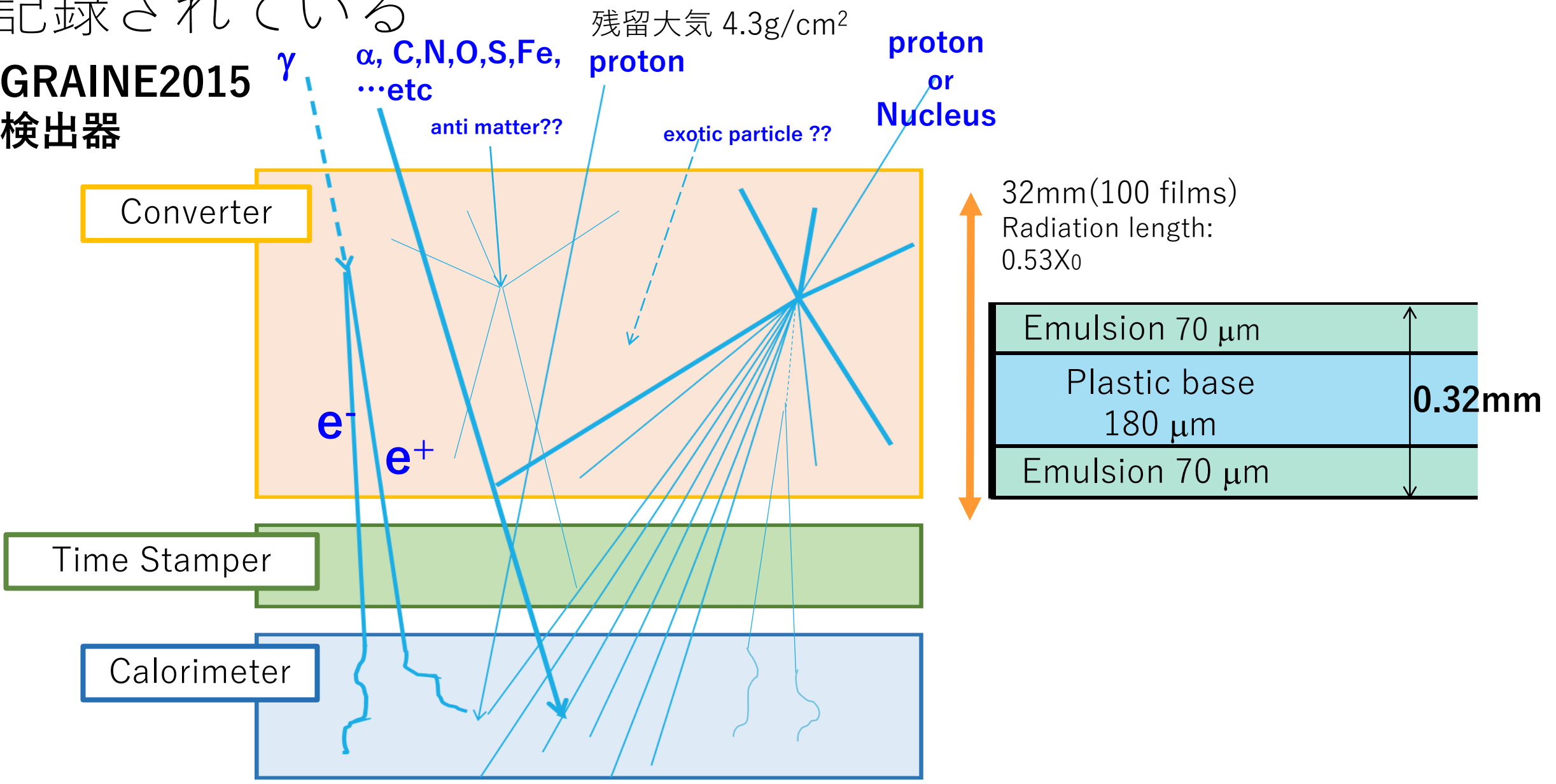
## 飛跡の検出効率の角度依存性



自動読取による読み落としが非常に少ない性能の良い乾板である

# 気球搭載乾板には観測中通過した全ての荷電粒子が記録されている

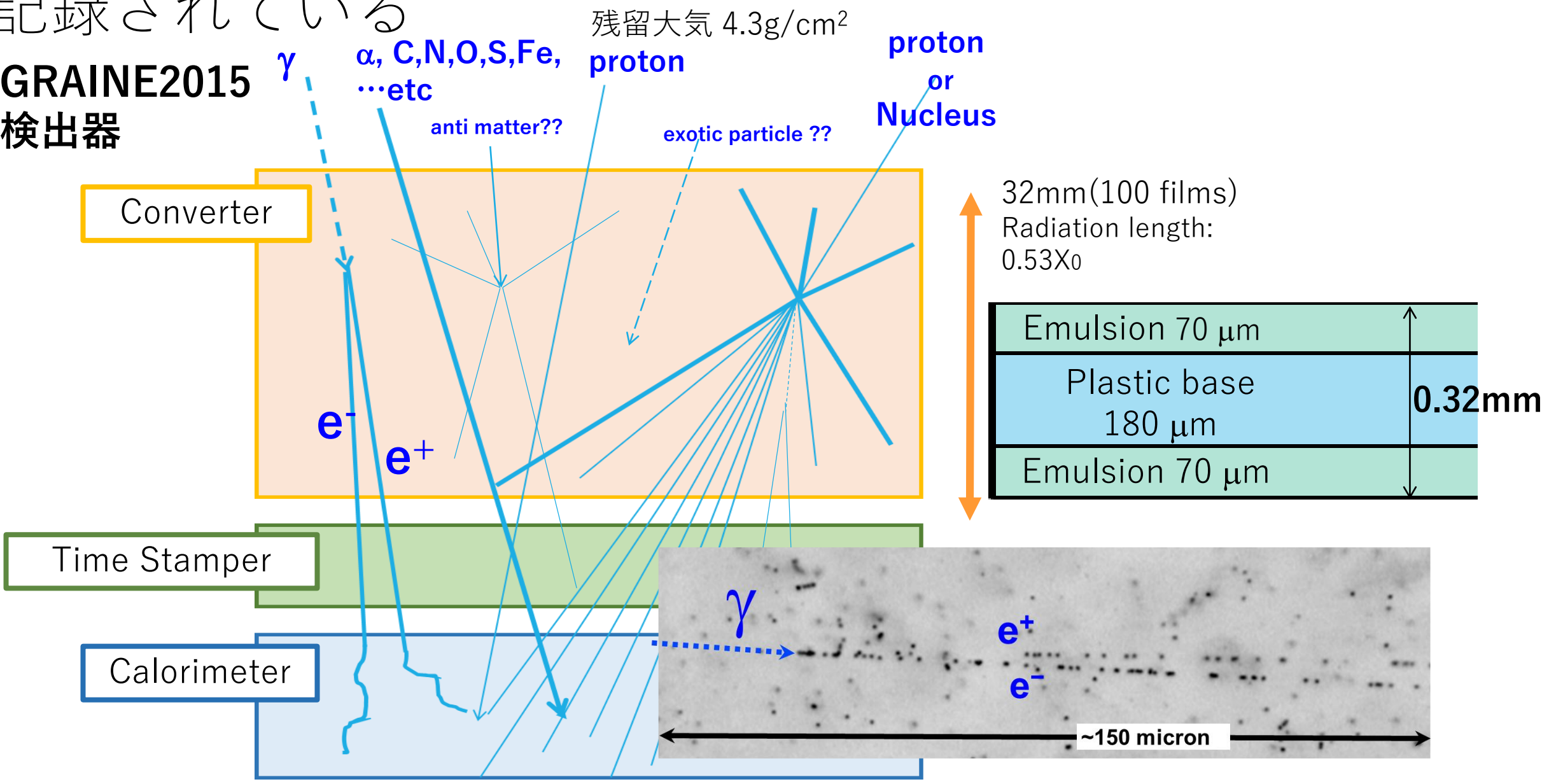
## GRAINE2015 検出器



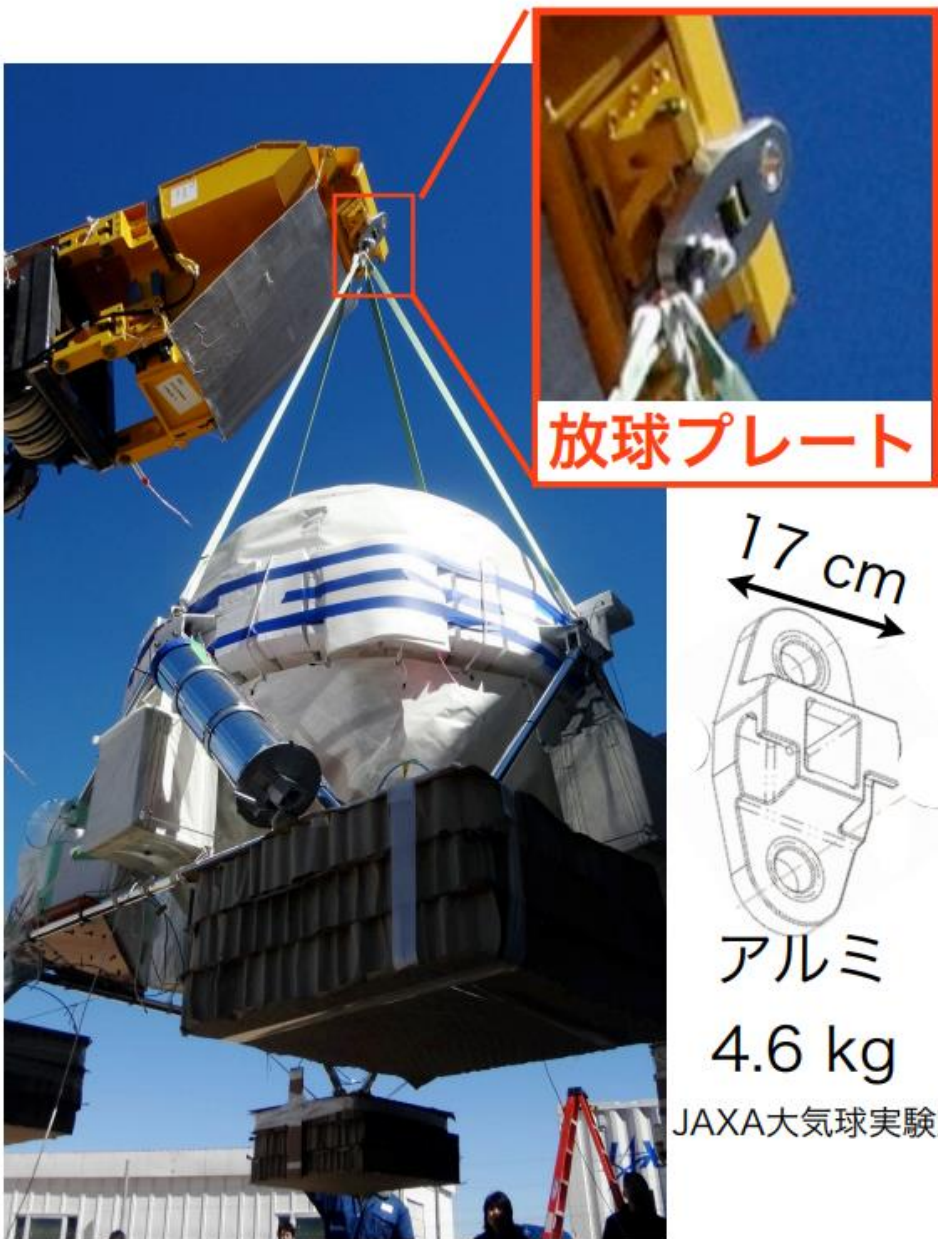


# 気球搭載乾板には観測中通過した全ての荷電粒子が記録されている

## GRAINE2015 検出器

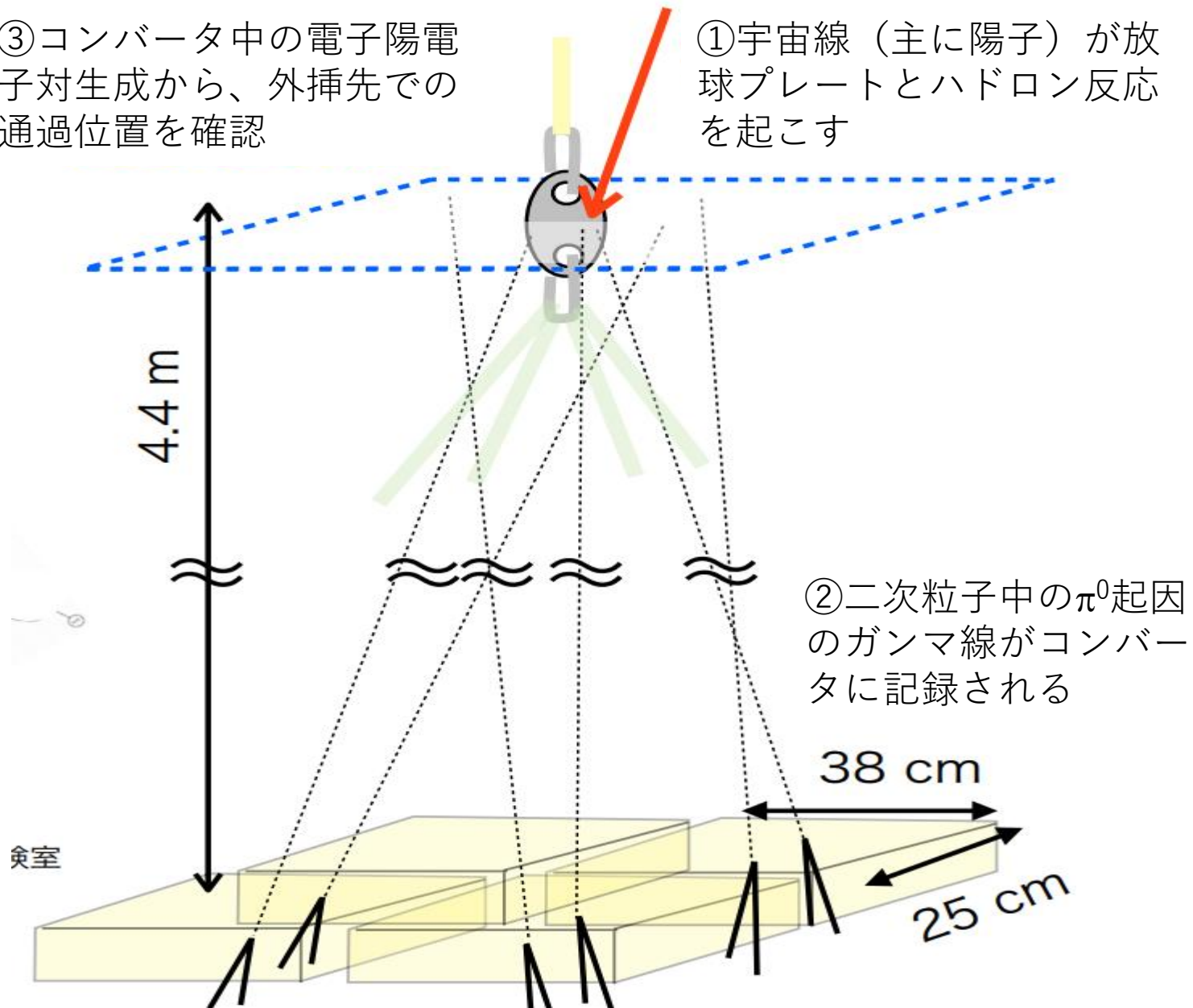


# 検出器外部のガンマ線によるイメージング



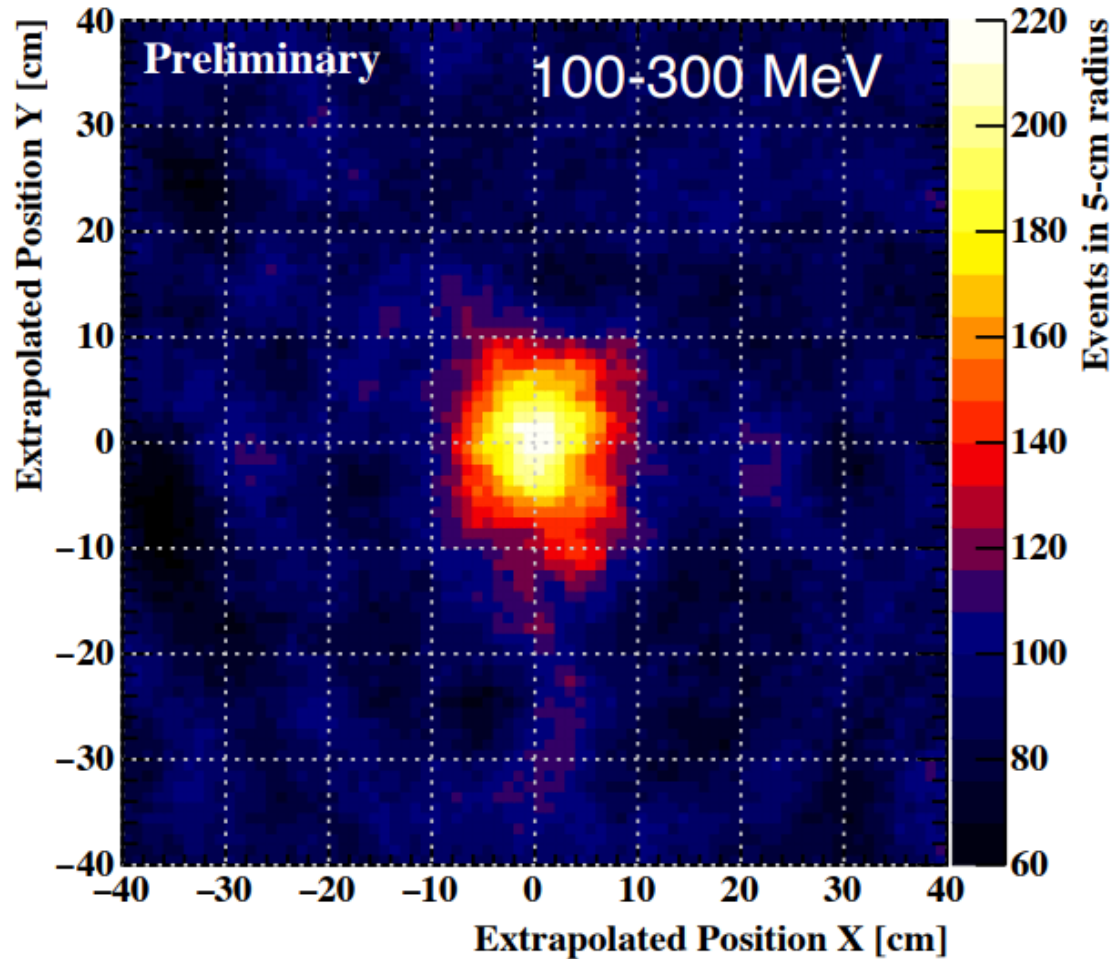
③コンバータ中の電子陽電子対生成から、外挿先での通過位置を確認

①宇宙線（主に陽子）が放球プレートとハドロン反応を起こす



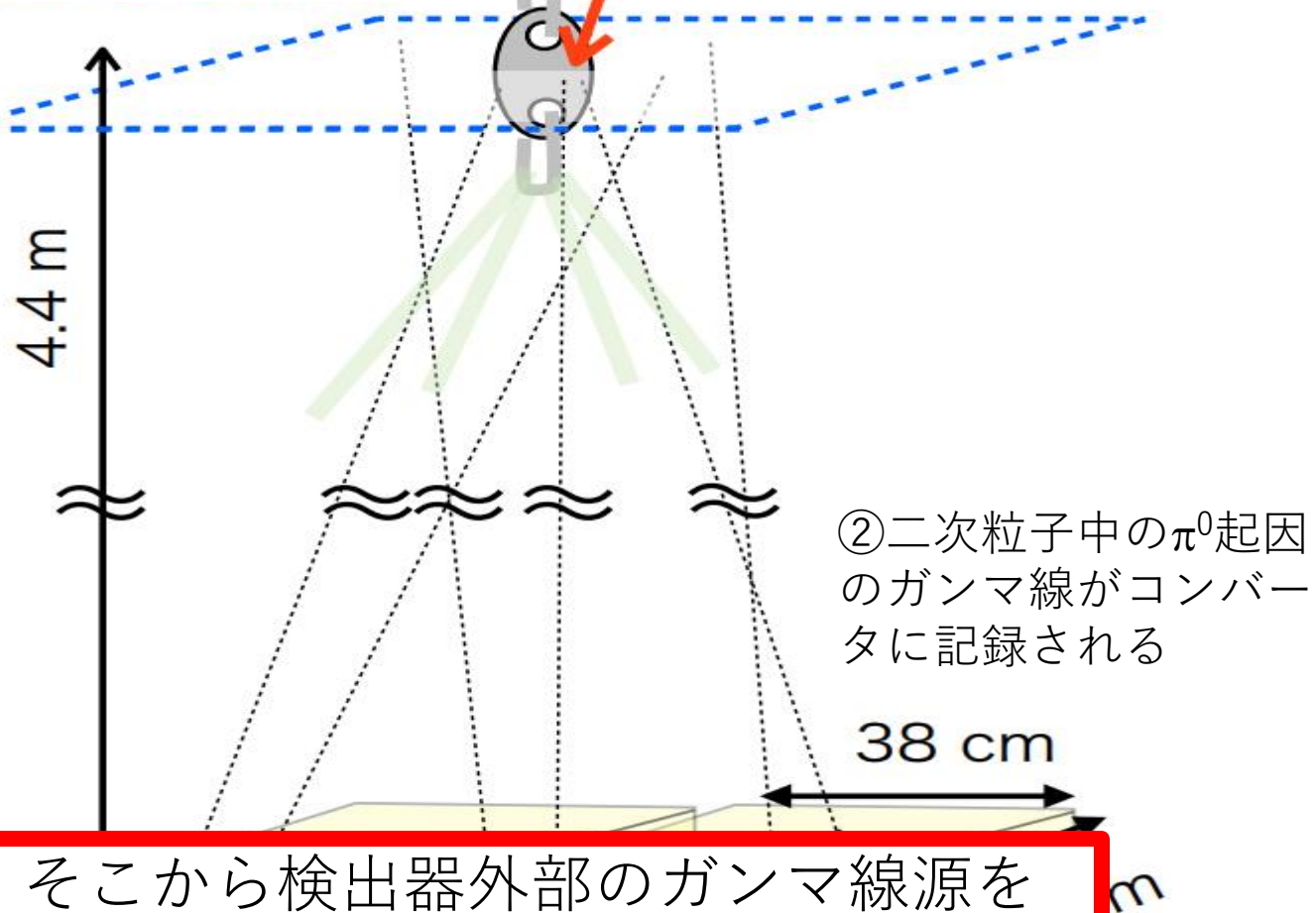


# 検出器外部のガンマ線によるイメージング



コンバータ中の電子陽電子生成から、外挿先での位置を確認

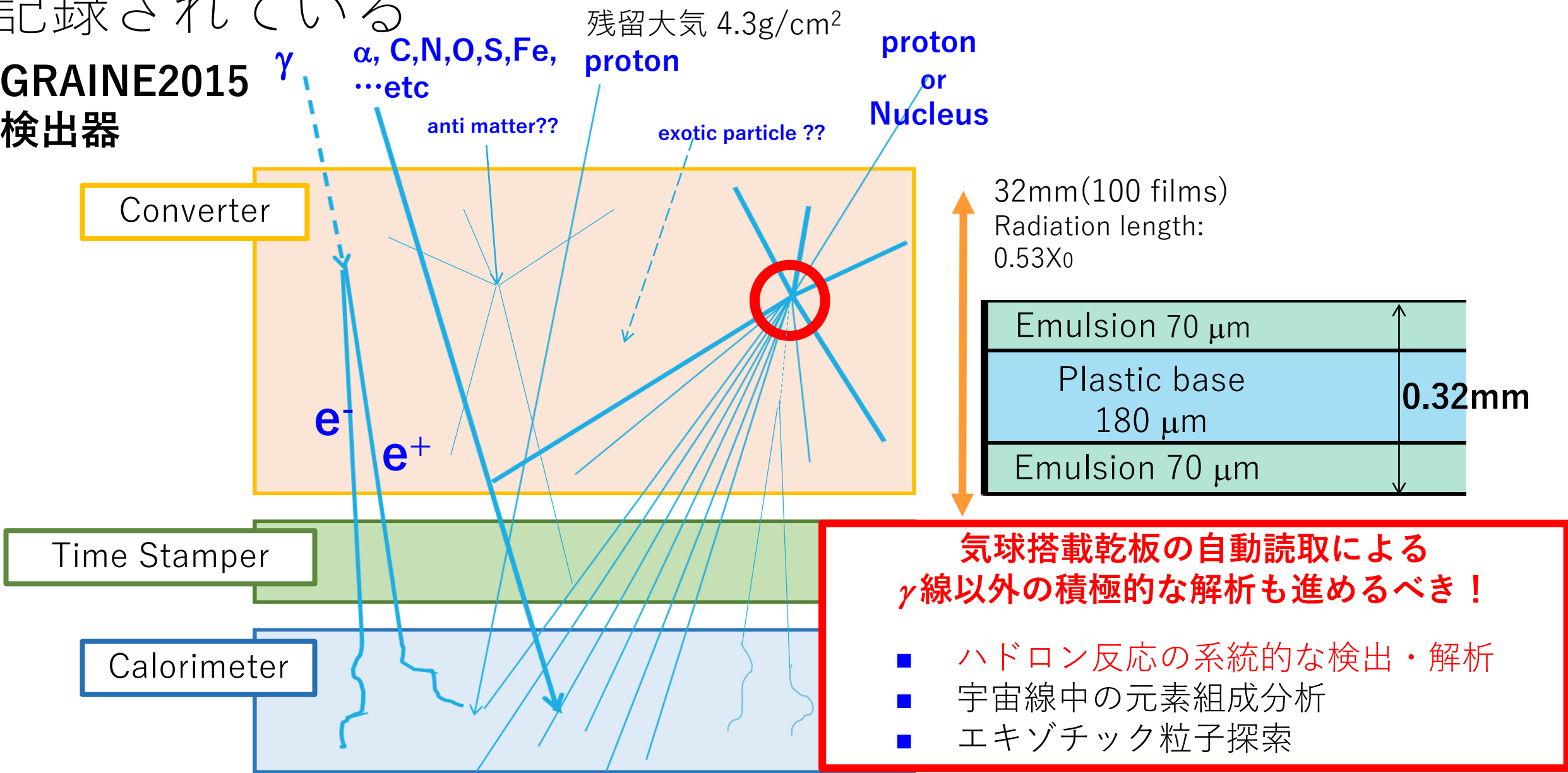
①宇宙線（主に陽子）が放球プレートとハドロン反応を起こす



広い検出器面からガンマ線を検出し、そこから検出器外部のガンマ線源を初めて結像できた

# 気球搭載乾板には観測中通過した全ての荷電粒子が記録されている

## GRAINE2015 検出器

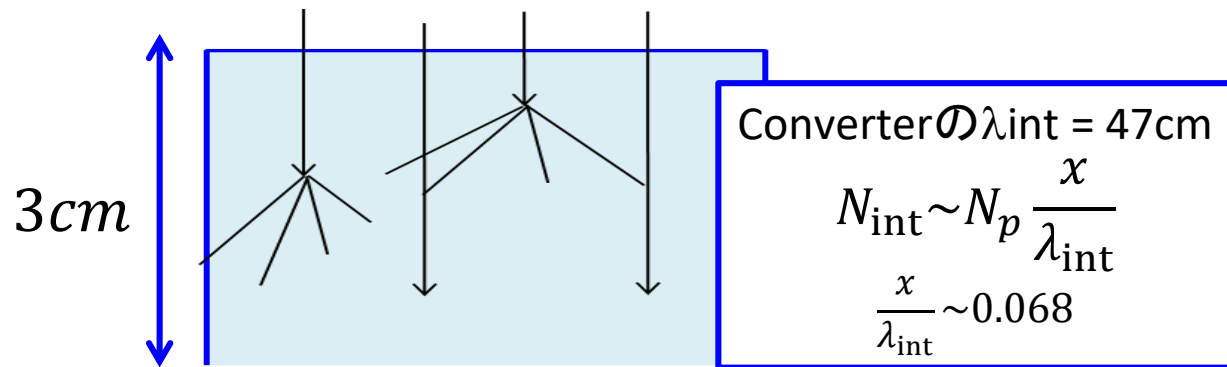


**気球搭載乾板の自動読取による  
 $\gamma$ 線以外の積極的な解析を進めるべき！**

- ハドロン反応の系統的な検出・解析
- 宇宙線中の元素組成分析
- エキゾチック粒子探索

# コンバータ中のハドロン反応を検出することで

## ①気球高度でのprotonのfluxの測定



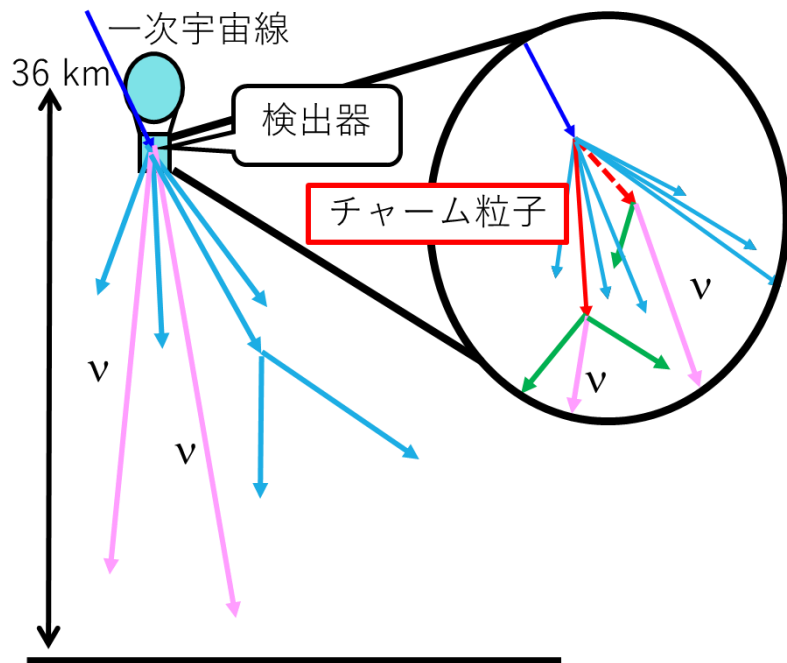
1次宇宙線のflux ←衛星実験などで精密に測定



しかし...

地磁気等の影響でfluxは変動する  
⇒ 本実験での  
観測高度・緯度でのfluxを測定

## ②気球高度でのチャーム粒子生成率の測定



### 原子核乾板

← GeV領域の、短寿命で崩壊するチャーム粒子( $c\tau \sim$  数 $100\mu\text{m}$ )の検出に有効なディテクター

### 大多数のハドロン反応の解析

→ 1次宇宙線起因のチャーム粒子生成率の測定

→ prompt  $\nu$ の推定にフィードバック

### Prompt $\nu$

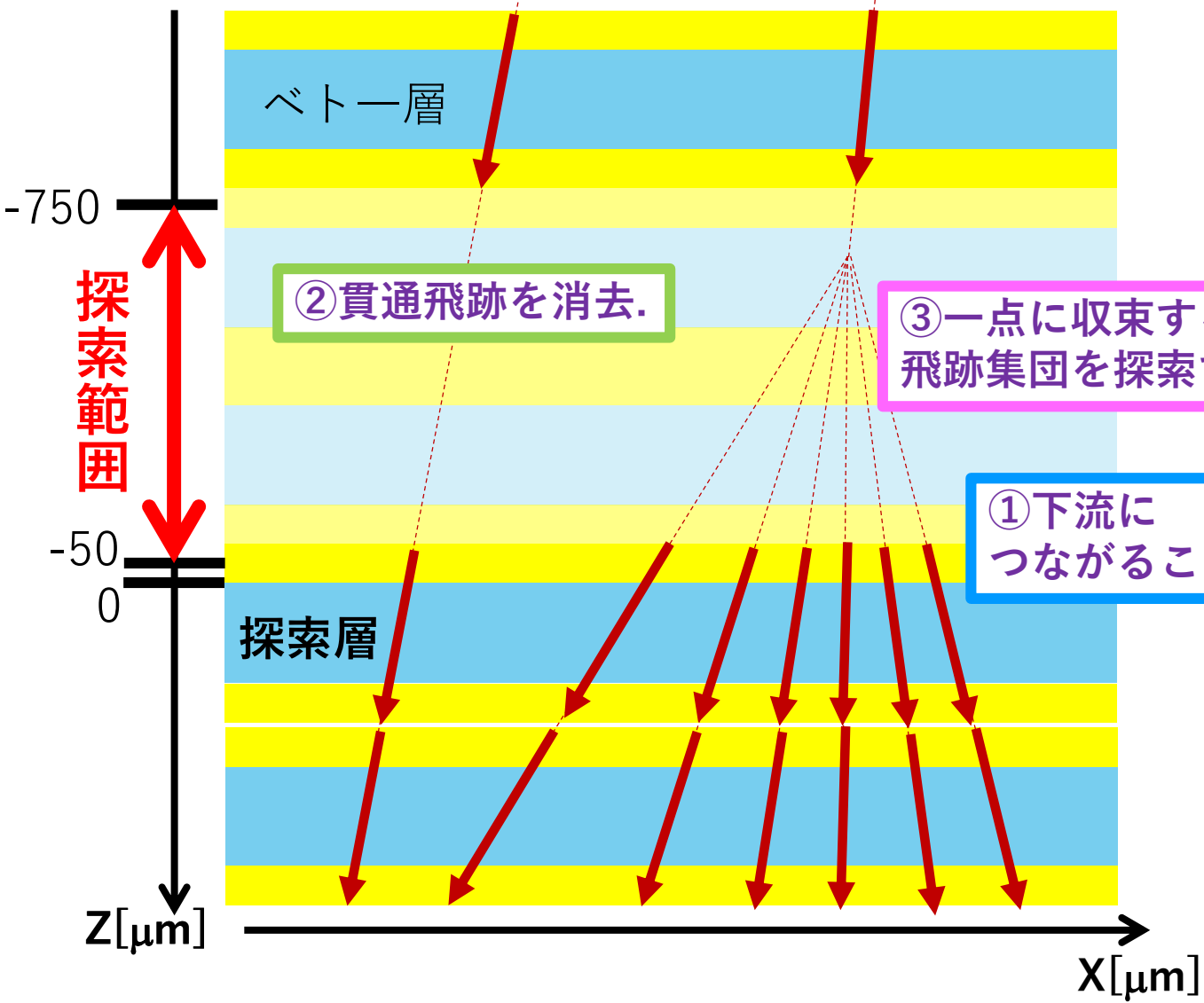
1次宇宙線起因のチャーム粒子が崩壊したときに生成された大気ニュートリノ

( $D^+ \rightarrow e^+, \nu_e, D^0 \rightarrow K^-, e^+, \nu_e \dots$ etc)

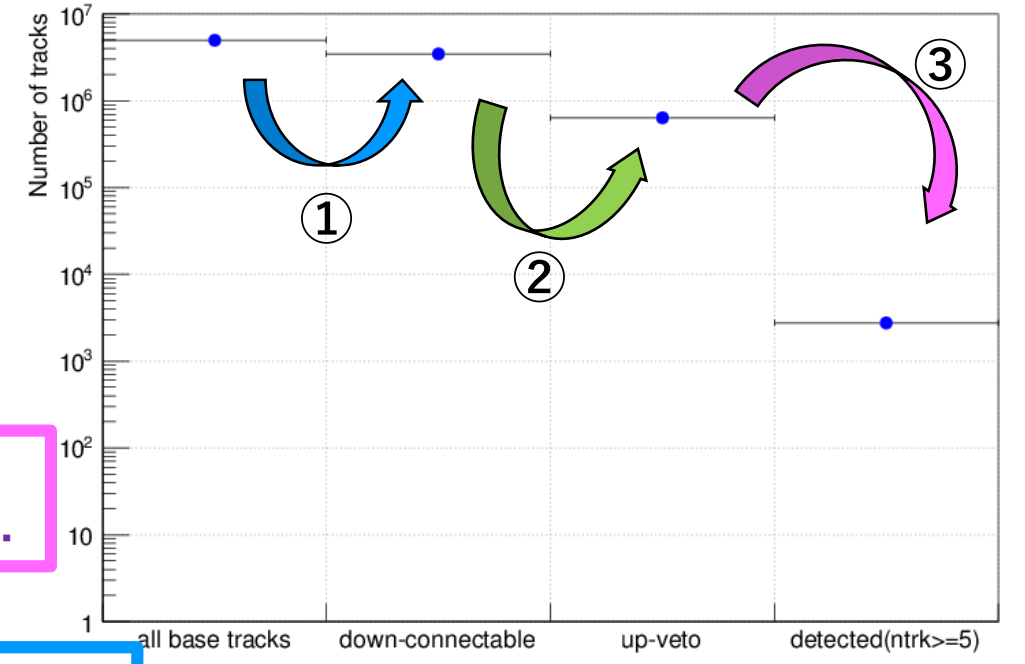


# ハドロン反応の系統的な探索方法の開発現状

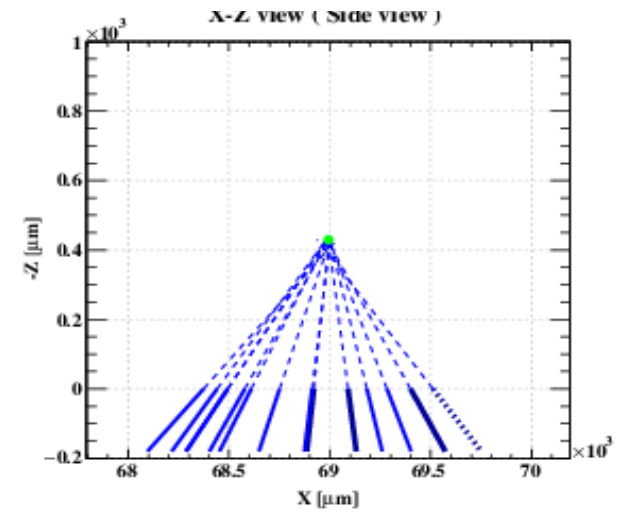
## 5枚の乾板の断面図



## 選び出しによる飛跡本数の推移

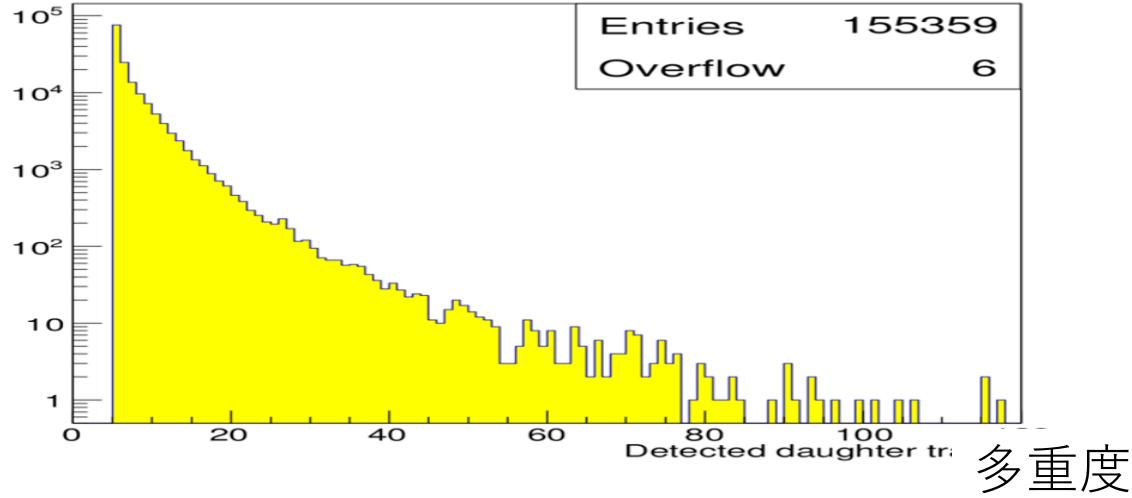


## 探索層のX-Z位置分布

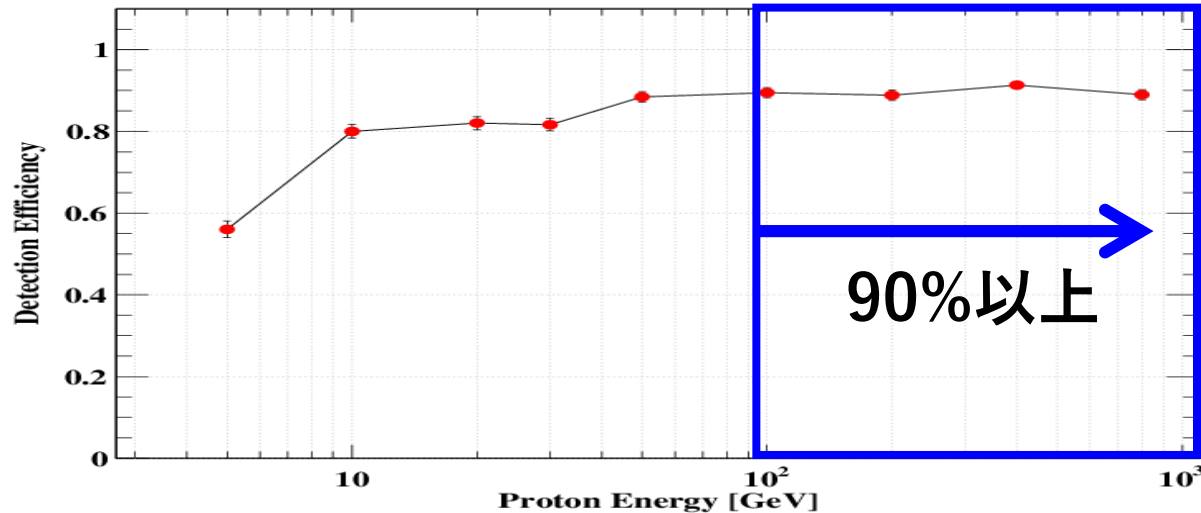


# GRAINE2015フライトでのハドロン反応候補の検出現状

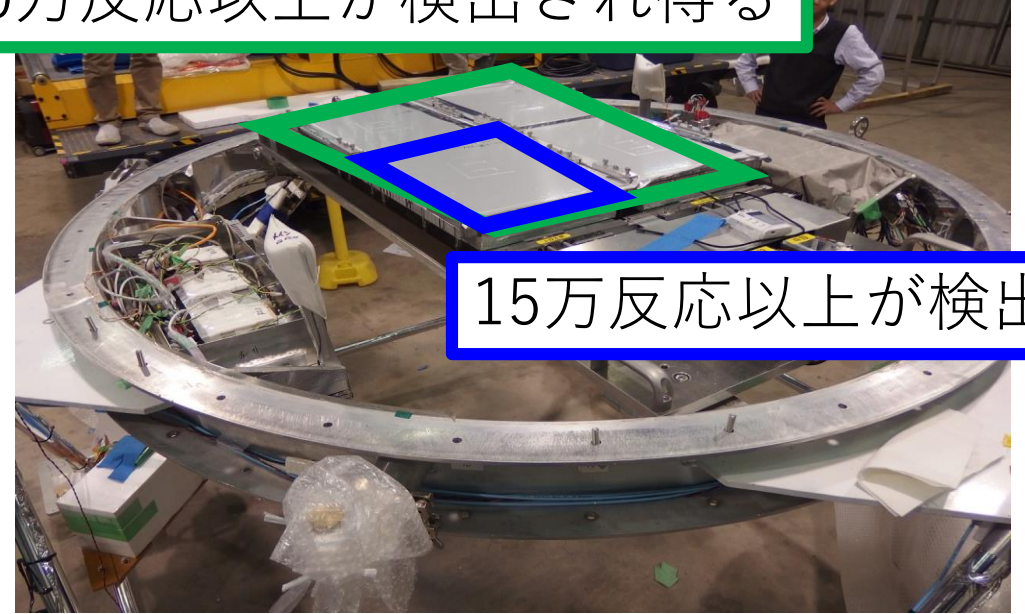
## フライトデータ中のハドロン反応候補 (多重度5以上) の多重度分布



## MCシミュレーションによる 垂直入射陽子のハドロン反応検出効率



60万反応以上が検出され得る



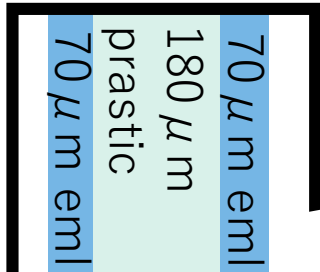
15万反応以上が検出

探索手法の検出効率を  
ビーム実験から評価

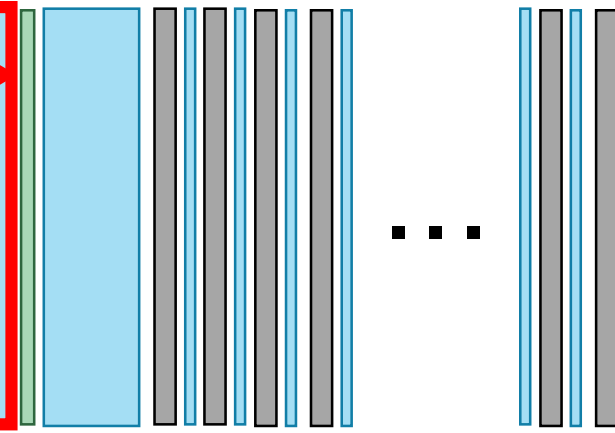
# 400 GeV陽子ビーム実験@CERN SPS

## チェンバー構造の断面図

400GeV 陽子



20枚

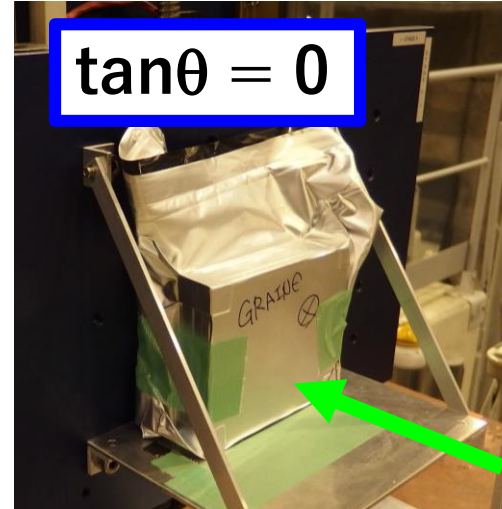


↑Tungsten 0.5mm

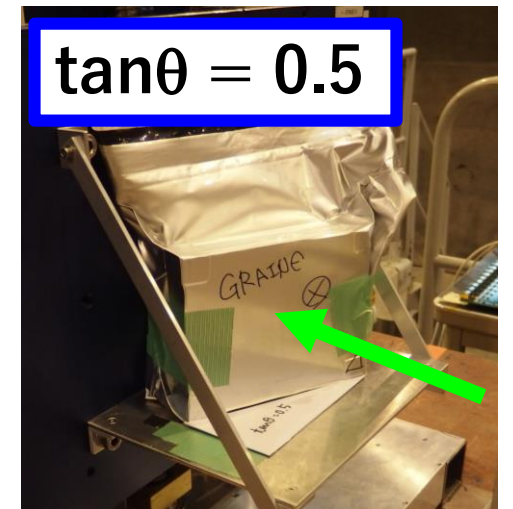
GRAINE実験と  
同構造のフィルム

チェンバーの位置ごとに  
ビーム角度を変えて入射

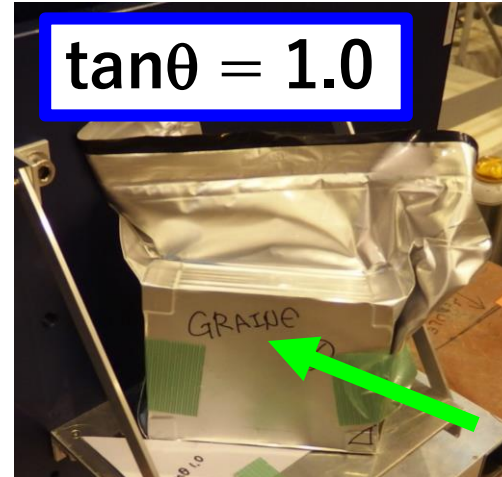
$\tan\theta = 0$



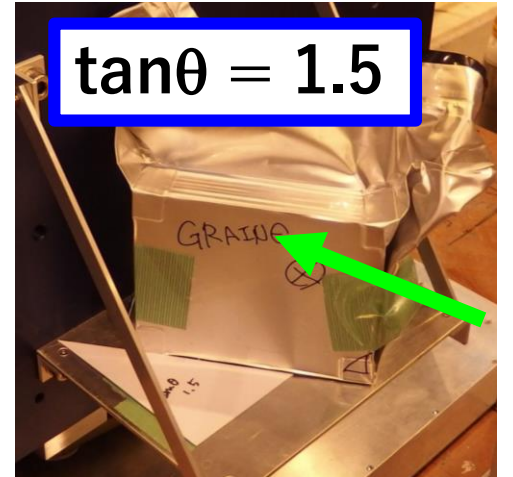
$\tan\theta = 0.5$



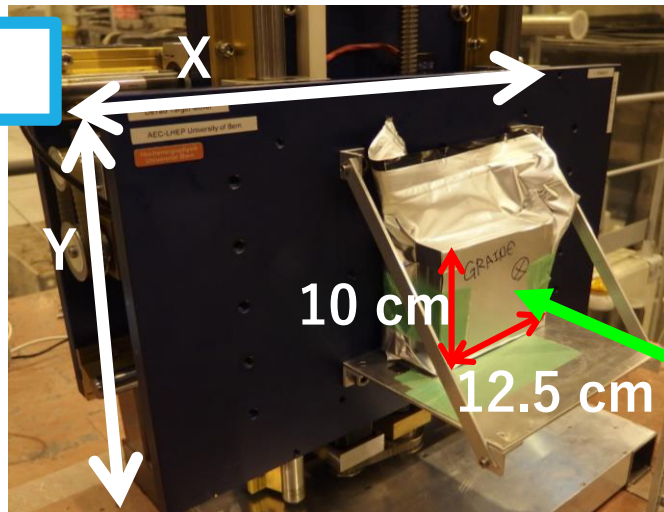
$\tan\theta = 1.0$



$\tan\theta = 1.5$



## XYステージ



ベルン大学ですべての乾板を現像

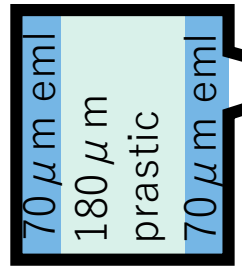


# ハドロン反応探索

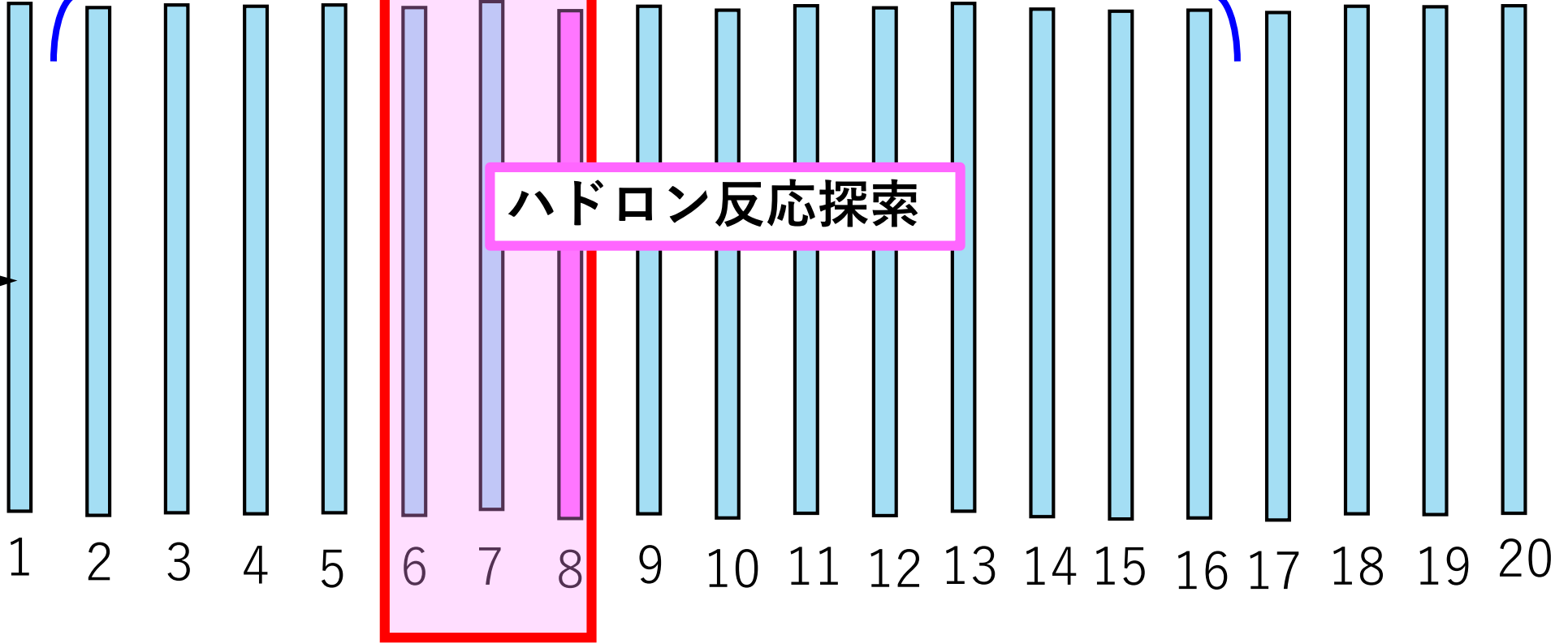
GRAINE2015 コンバータと同構造部

自動読取済み

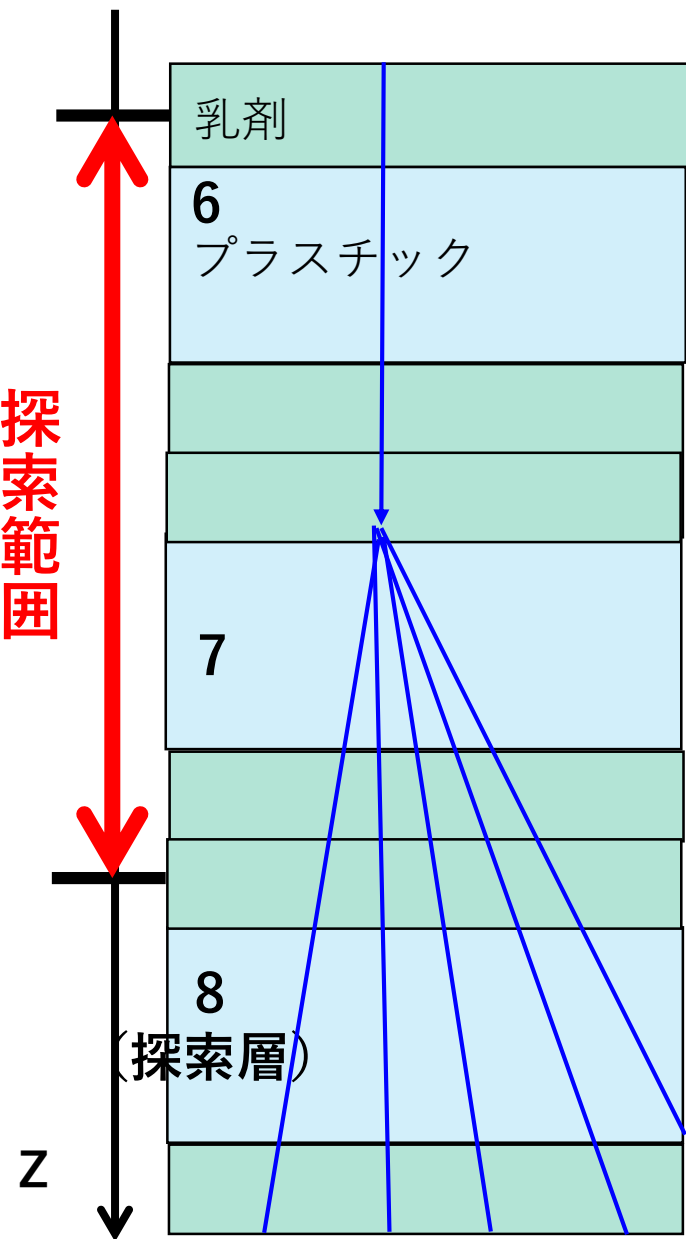
400GeV  
陽子  
→



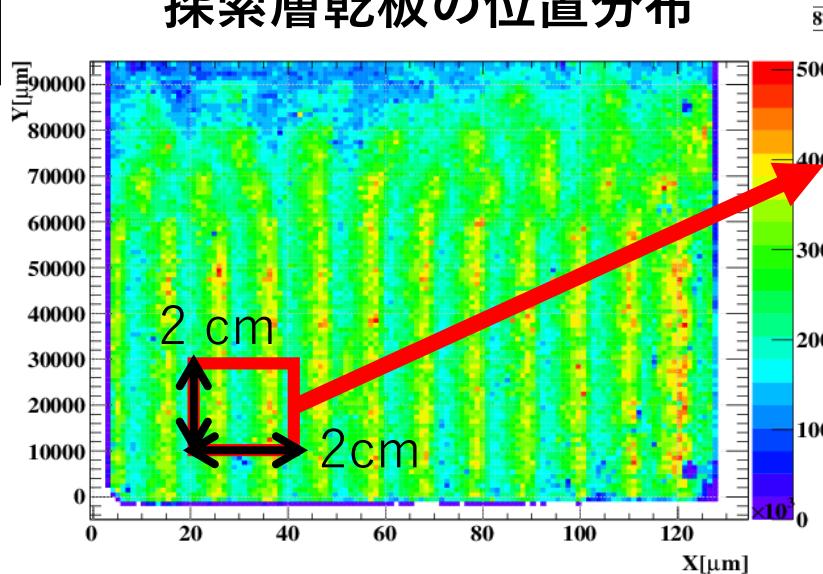
ハドロン反応探索



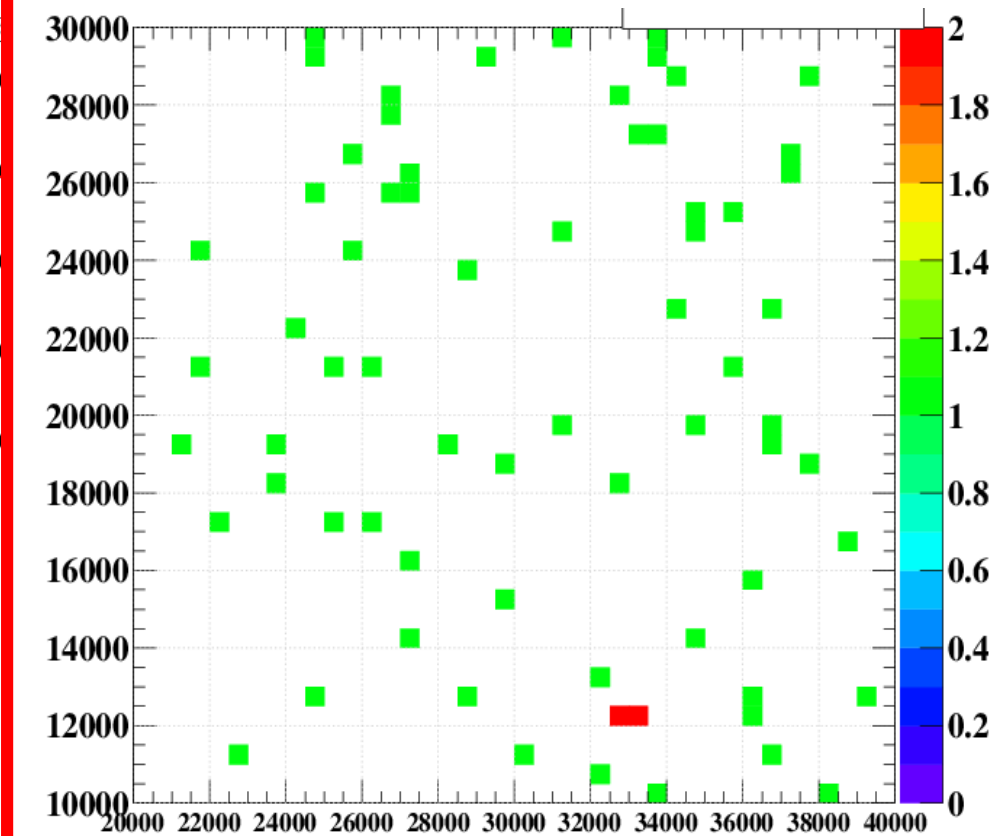
# ハドロン反応点の探索結果 ①



### 探索層乾板の位置分布

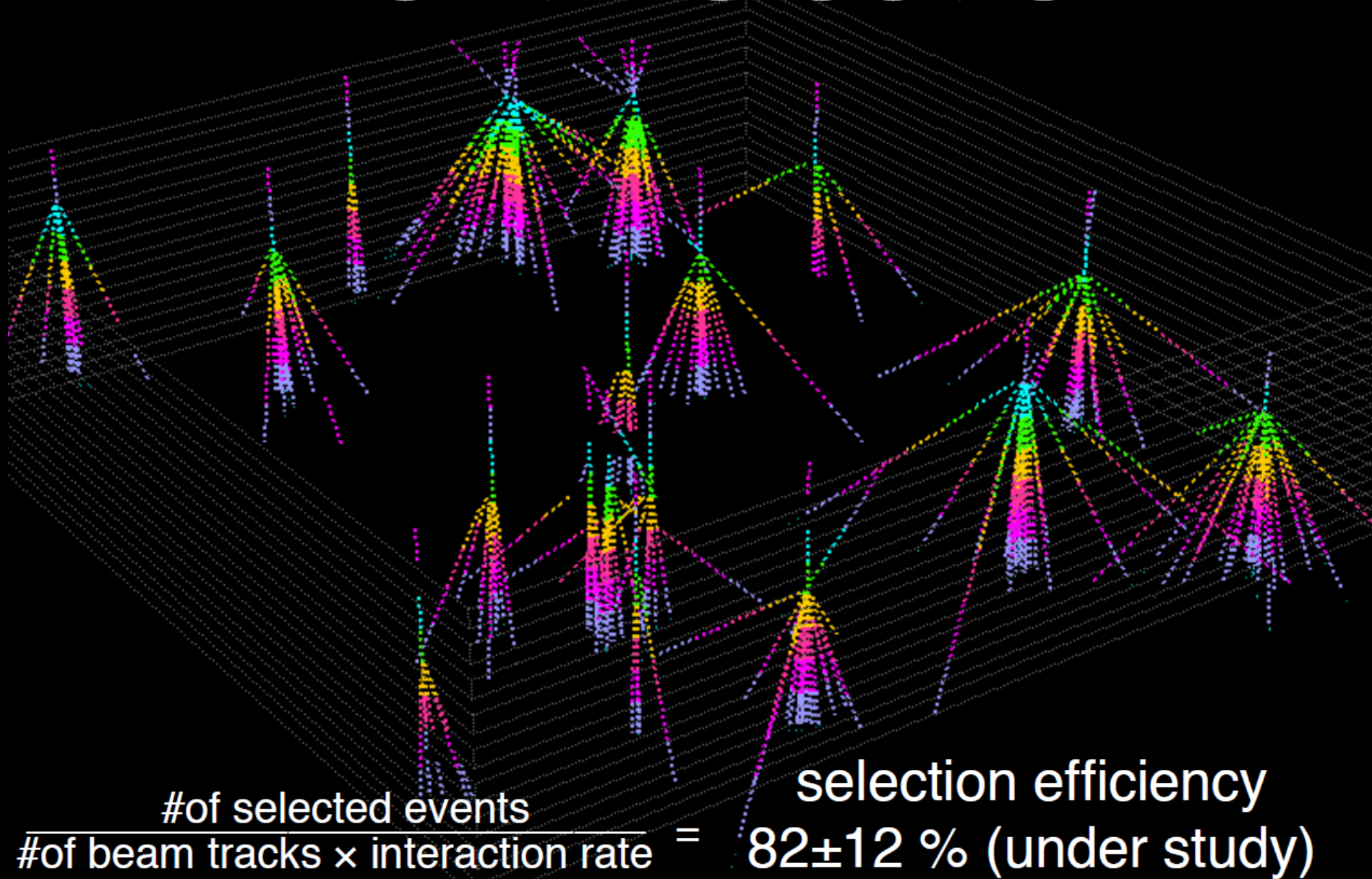


### 反応点の位置分布



検出ハドロン反応数 : 72反応 /  $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 700\ \mu\text{m}$

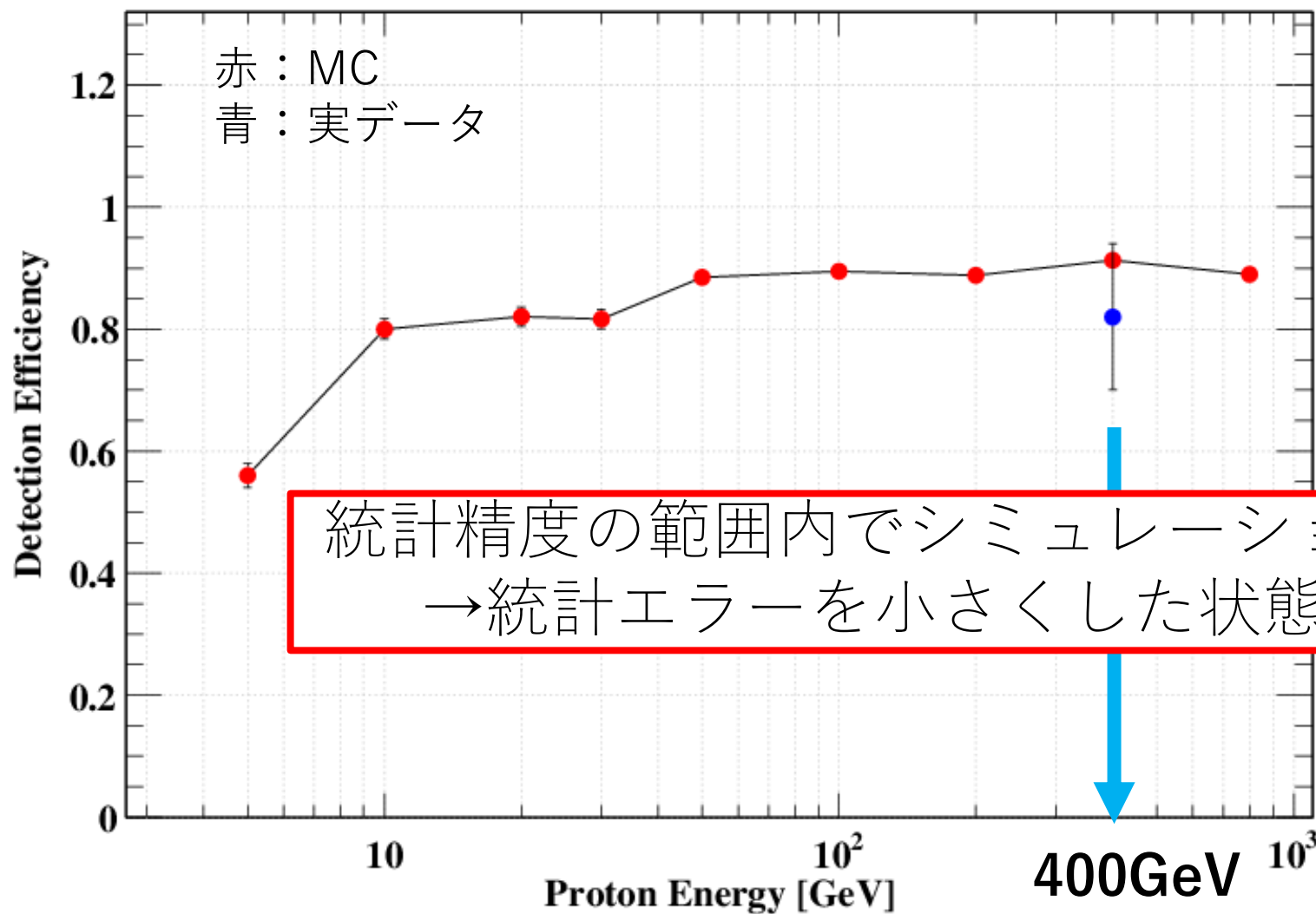
# Event Selection





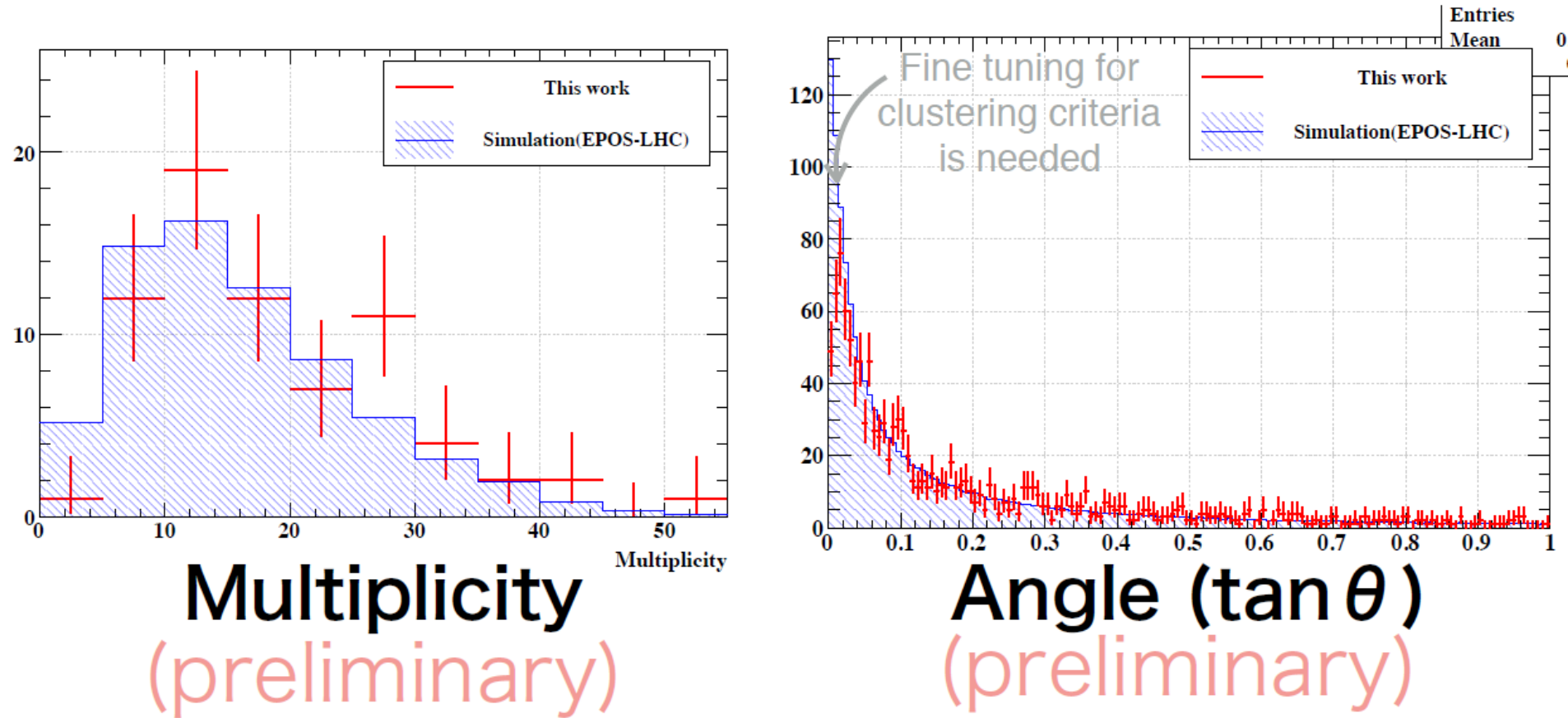
# MCシミュレーションによる検出効率との比較

## MCシミュレーションによる 垂直入射陽子のハドロン反応検出効率



# Comparison with Post-LHC Int. Model

Minimum bias measurement with nuclear emulsion



this is the first data of comparison between emulsion measurement and Post-LHC Int. Model.

# まとめ

- 原子核乾板の自動読取技術が進み、乾板全面積の読取が可能になった
- GRAINE2015フライト乾板に記録されたハドロン反応の探索が進行中
- コンバータ中に記録された全ハドロン反応を解析することで、気球フライト時の一次宇宙線陽子フラックスの測定や気球高度でのチャーム粒子生成率の測定を目指す（プロンプトニュートリノのフラックス推定にフィードバック）
- CERN SPSにて400GeV陽子ビーム実験
  - 実データから開発中のハドロン反応の検出効率の評価を行う
  - 72個のハドロン反応を検出（2cm × 2 cm × 700 μm）
  - 検出効率： $0.82 \pm 0.12$  ( $\tan\theta = 0.0$ )
- MCシミュレーションから得られるハドロン反応の検出効率（0.913）と統計精度の範囲内で矛盾ない
- 多重度や放出角についてPost-LHC modelでのシミュレーションとの比較を行い、400GeVのハドロン反応では矛盾ない。

# 展望

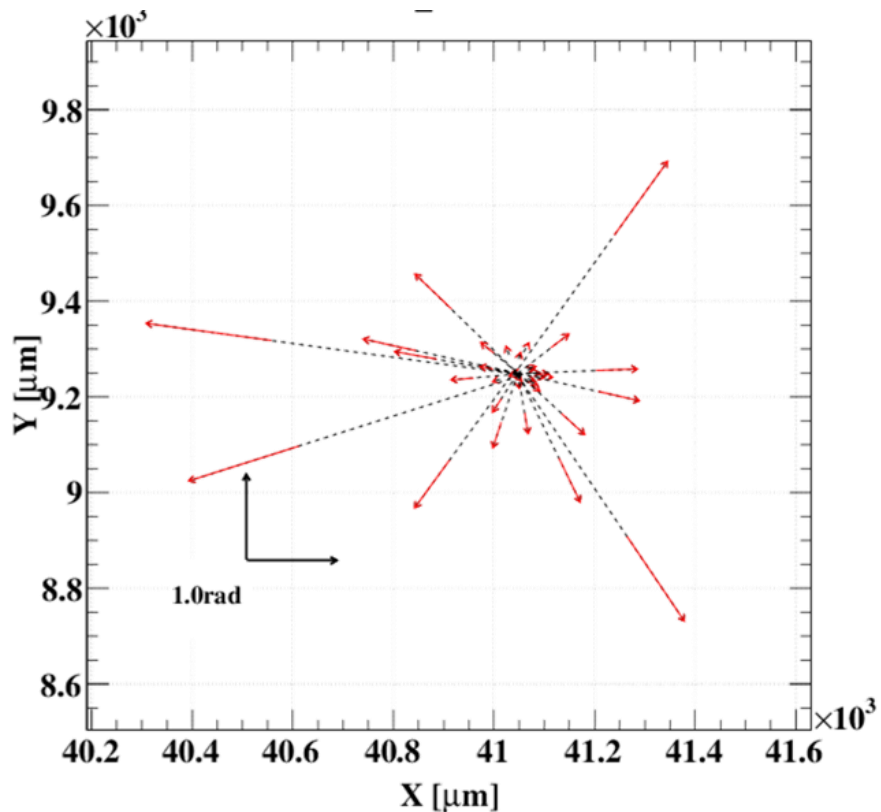
- 解析範囲の拡張、統計精度の改善
- 入射角度別のハドロン反応の検出効率の導出



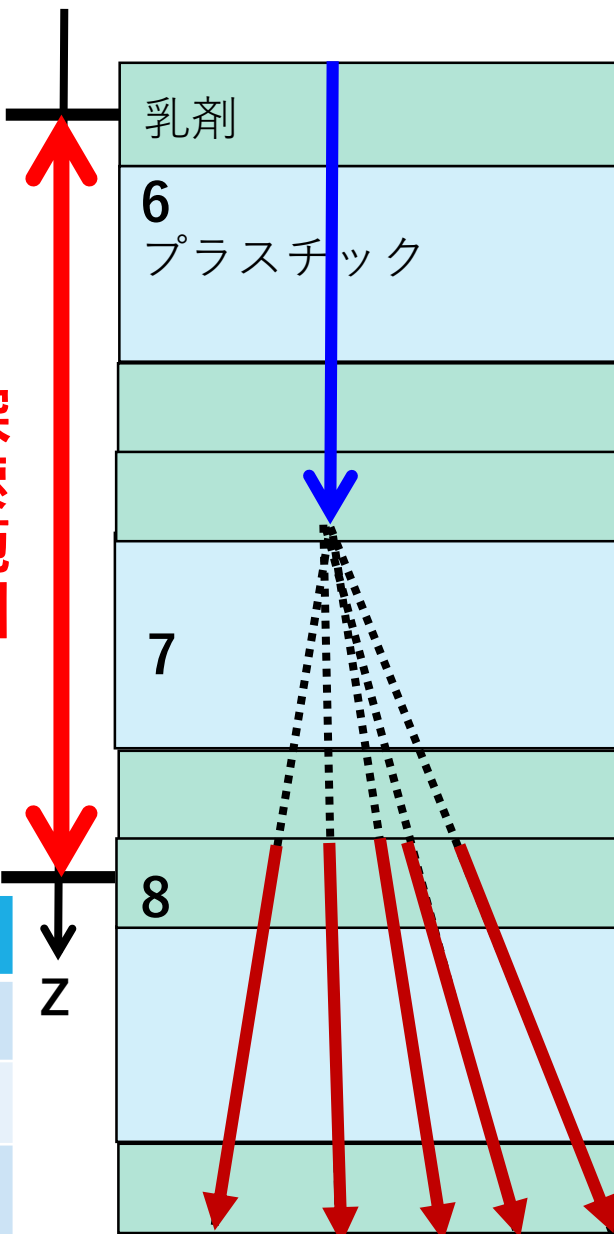


# ハドロン反応点の探索結果 ②

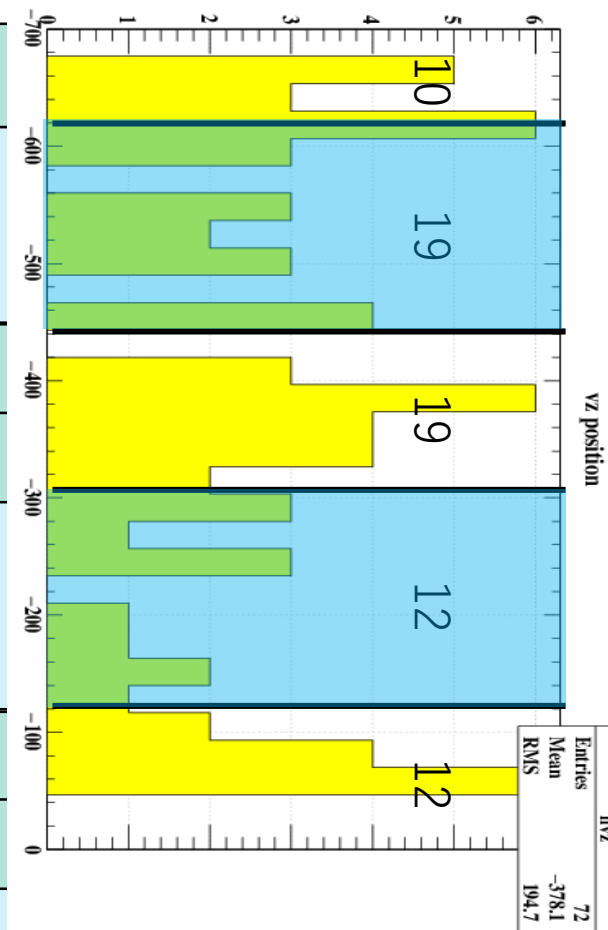
## 二次粒子候補飛跡の位置分布の1例



探索範囲

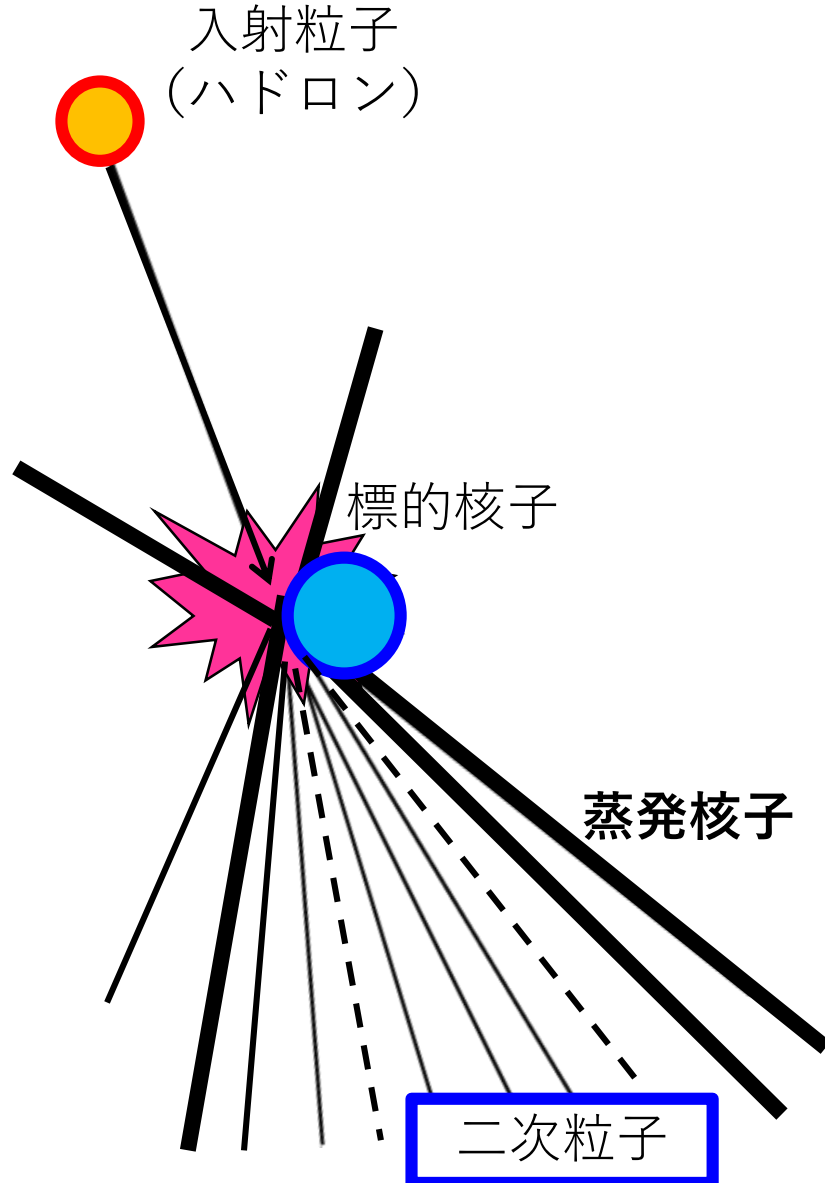


## 反応点のZ座標分布



	乳剤	プラスチック
検出ハドロン反応数	41	31
100μmあたり	$17.1 \pm 2.7$	$8.2 \pm 1.5$
Nuclear interaction lengthの逆数の比	2	1

# ハドロン反応とは



ハドロンが入射粒子として、標的の核子に衝突し粒子の多重発生を起こす反応

## 反応起因の飛跡

**二次粒子：衝突によって生成される粒子。**

- $\pi^{+/-}, \pi^0$  が大多数
- $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  反応によって、 $\gamma$ 線が生成される。
- 入射粒子が数100GeV以上のエネルギーを持って衝突するとチャーム粒子（チャームクォークを含むハドロン）が生成されることがある

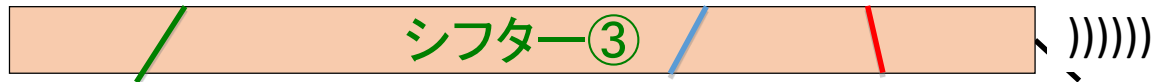
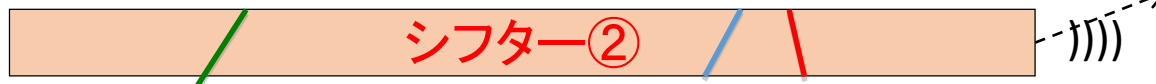
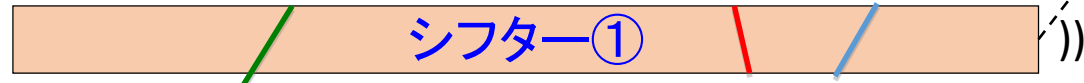
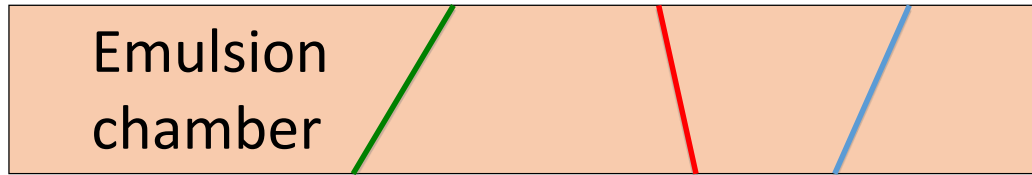
**蒸発核子：標的の原子核から飛び出た粒子。**

- 等方的に分布する。
- 一般に $-dE/dx$ が大きく、MeVオーダーの運動量を持つ。



# 多段シフター

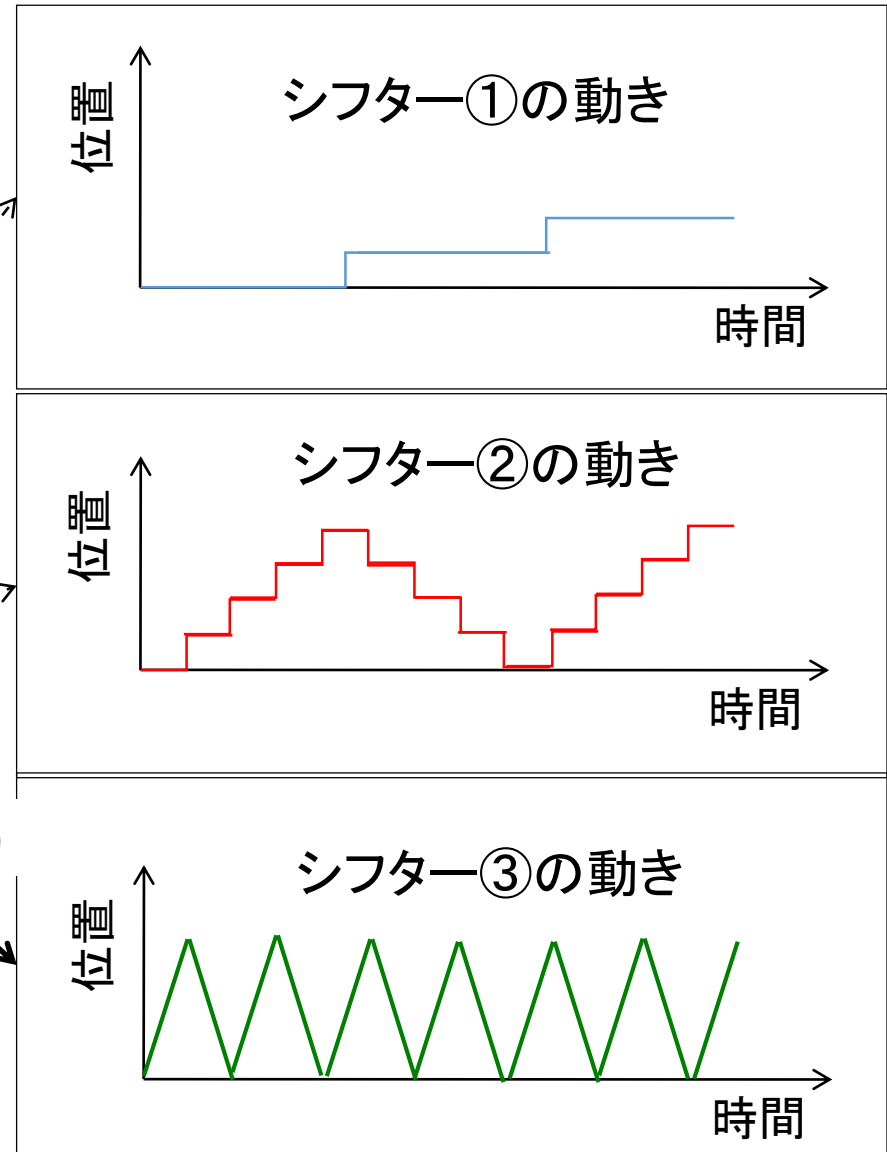
S. Takahashi, et al.  
NIMA 620(2010)



各段の位置ずれの組み合わせ



飛跡に時間情報を付与

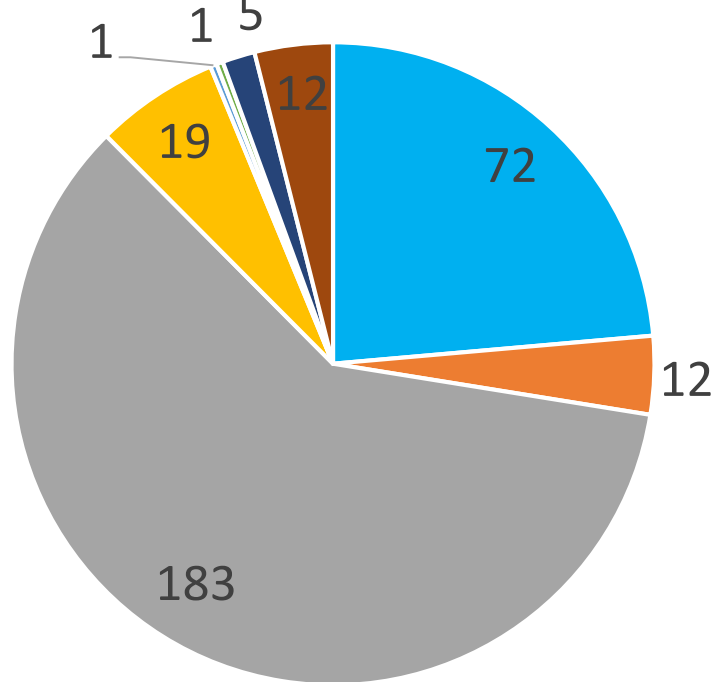


# ハドロン反応候補の内訳 (3次元の飛跡データによる仕分け)

2cm × 2cm × 700μmで

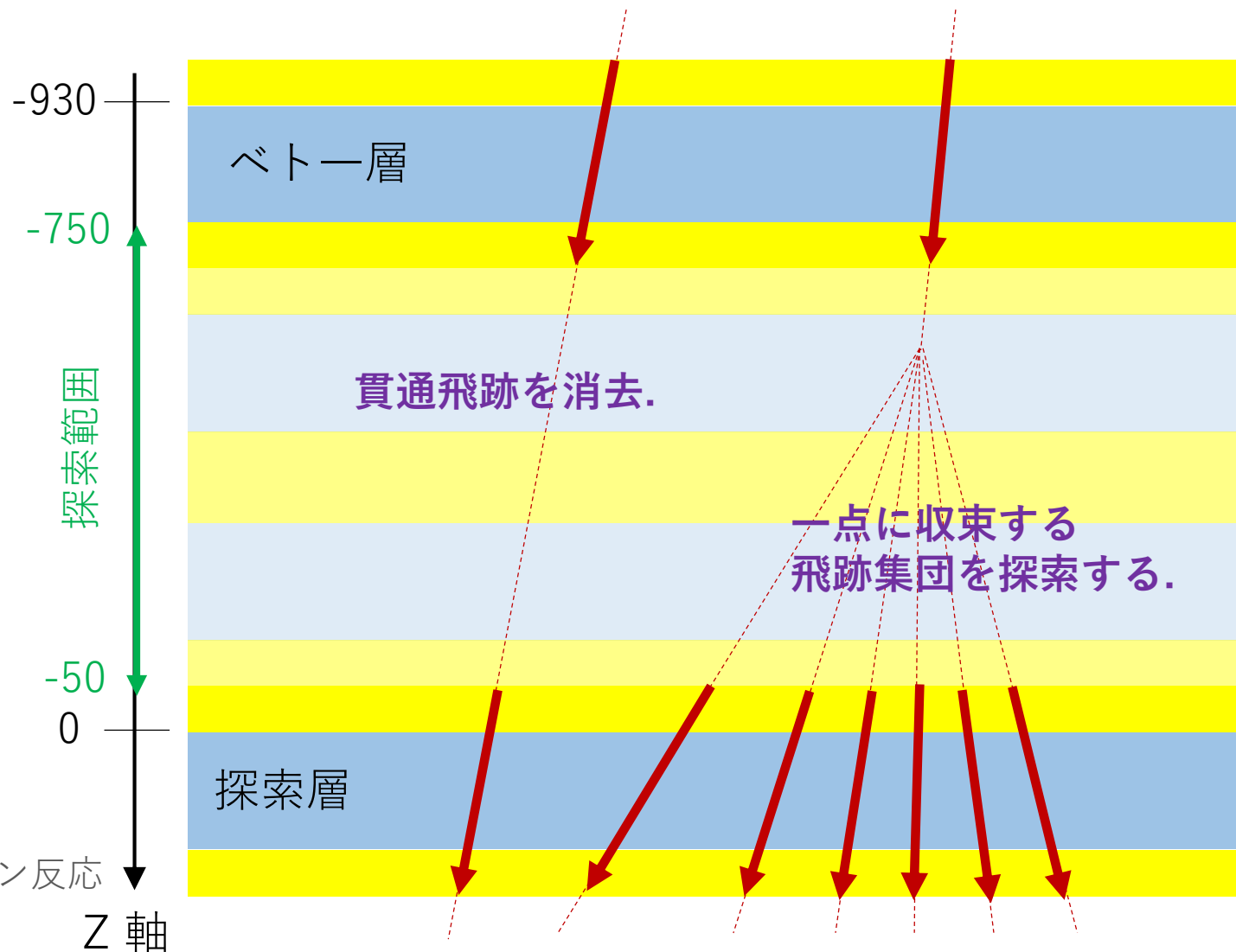
多重度3以上で探索

→303個のinteraction 候補



- ハドロン反応
- beam
- epair
- ?

- 2本
- 探索範囲外のハドロン反応
- black
- same



# ハドロン反応の検出効率

GRAINE実験と同構造(20枚)

自動読取済み

400GeV  
陽子  
→

入射陽子数の導出  
66887本

ハドロン反応探索  
検出反応数72個

探索範囲でのハドロン反応数期待値

入射陽子数  $\times 1.31 \times 10^{-3}$

400GeV陽子 ( $\tan\theta = 0$ ) によるハドロン反応の検出効率

72

$$= \frac{72}{66887 \times 1.31 \times 10^{-3}}$$

$$= \mathbf{0.82 \pm 0.12(stat.)}$$

Nuclear  
interaction length

乳剤

35.033 cm

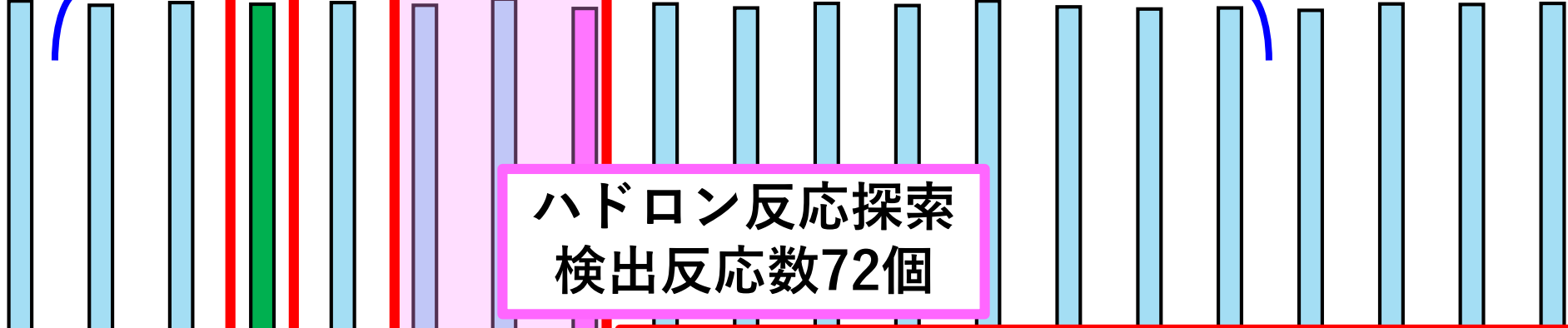
プラスチック

70.649 cm

探索範囲における反応確率

$1.31 \times 10^{-3}$

1 2 3 4 5 6 7 8



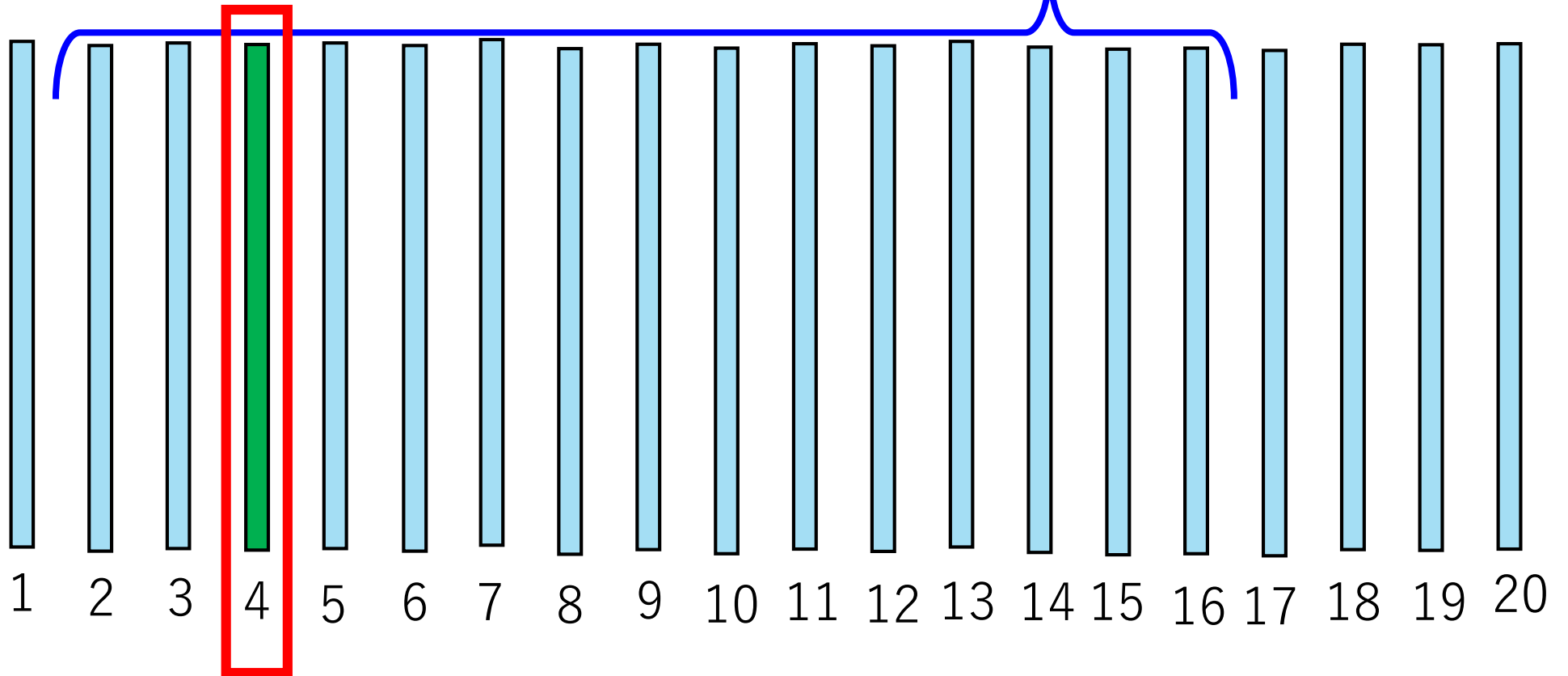


# 入射陽子数の導出

GRAINE2015 コンバータと同構造部

HTS-1によって自動読取済み

→  
400GeV  
陽子

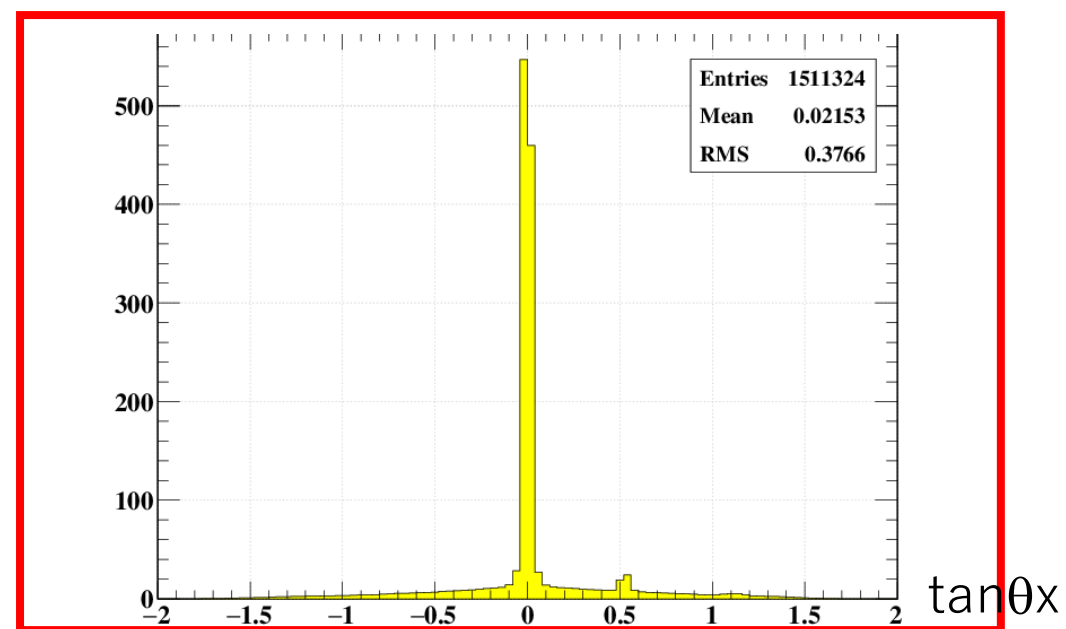
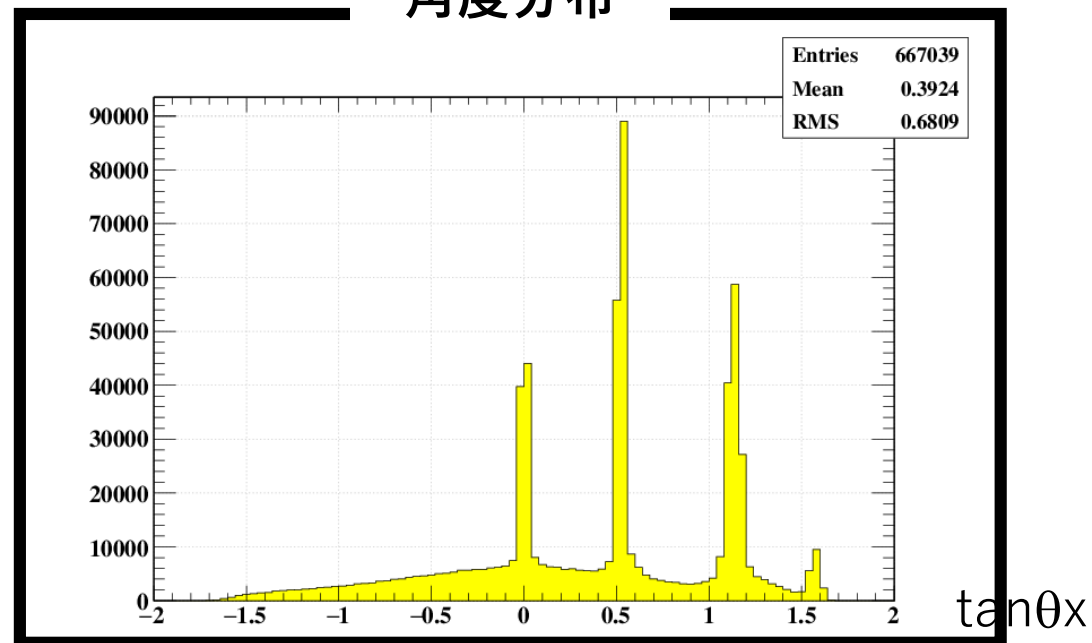
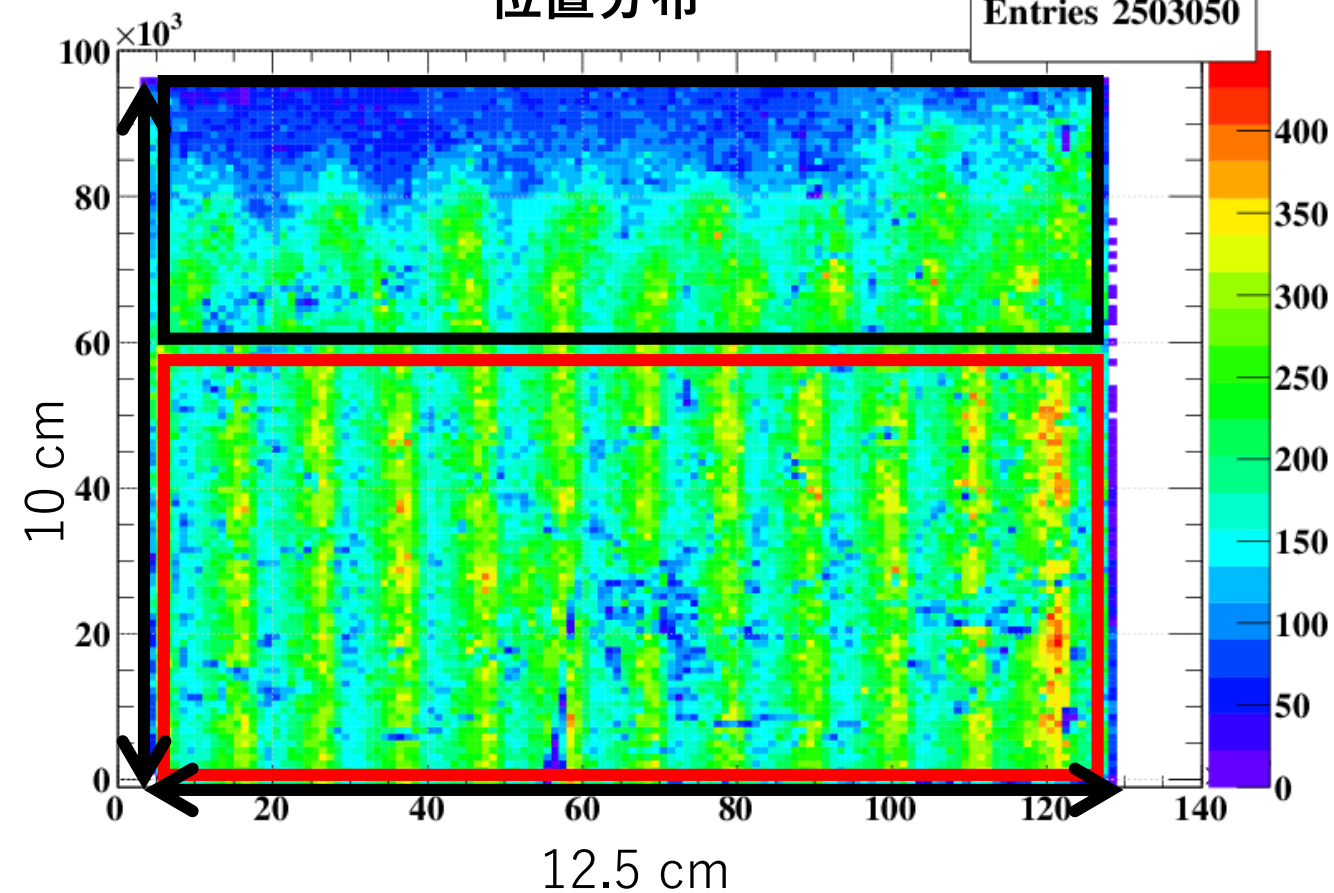


# 自動読取後の1枚の乾板の飛跡データ

## 角度分布

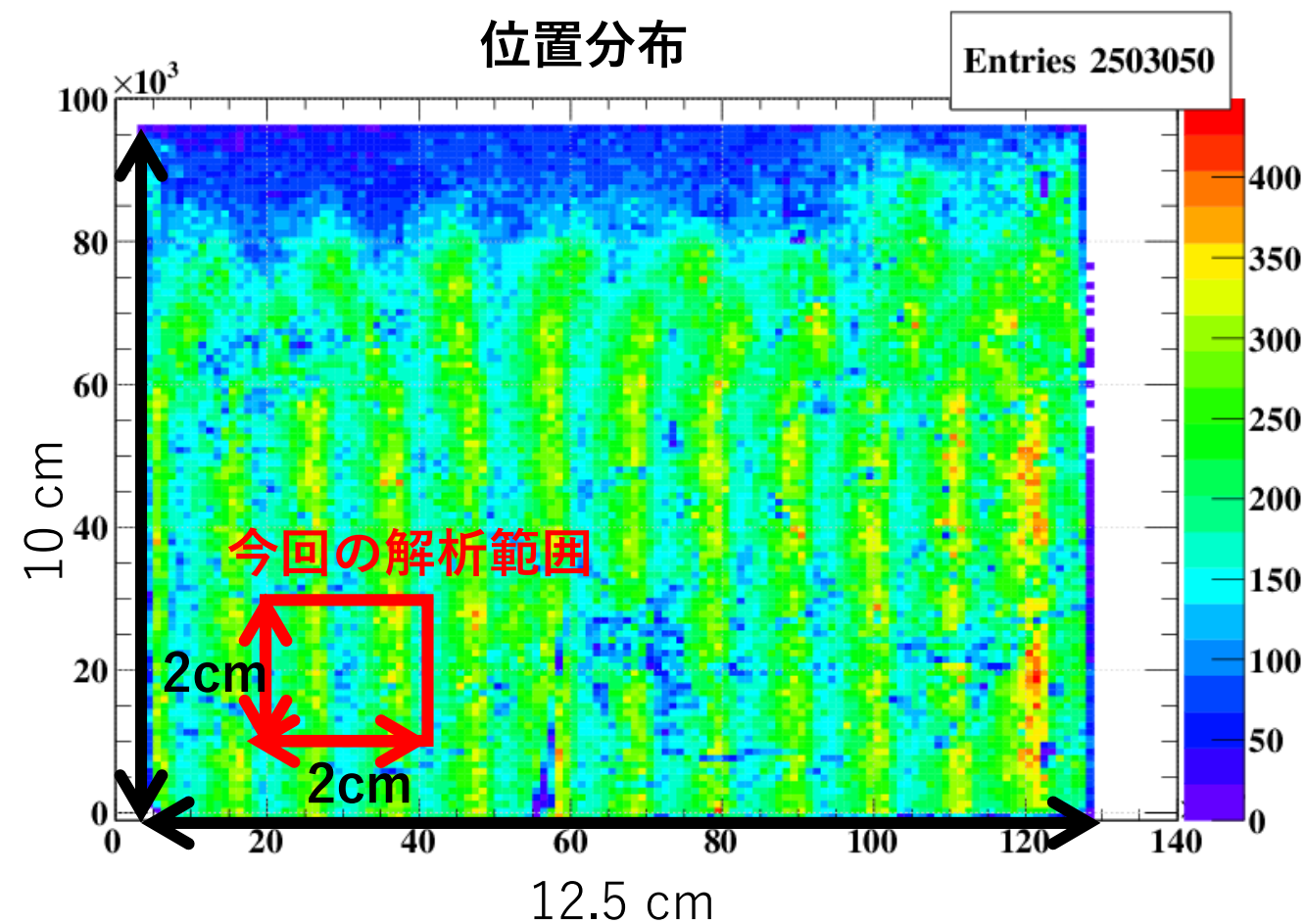
### 位置分布

Entries 2503050

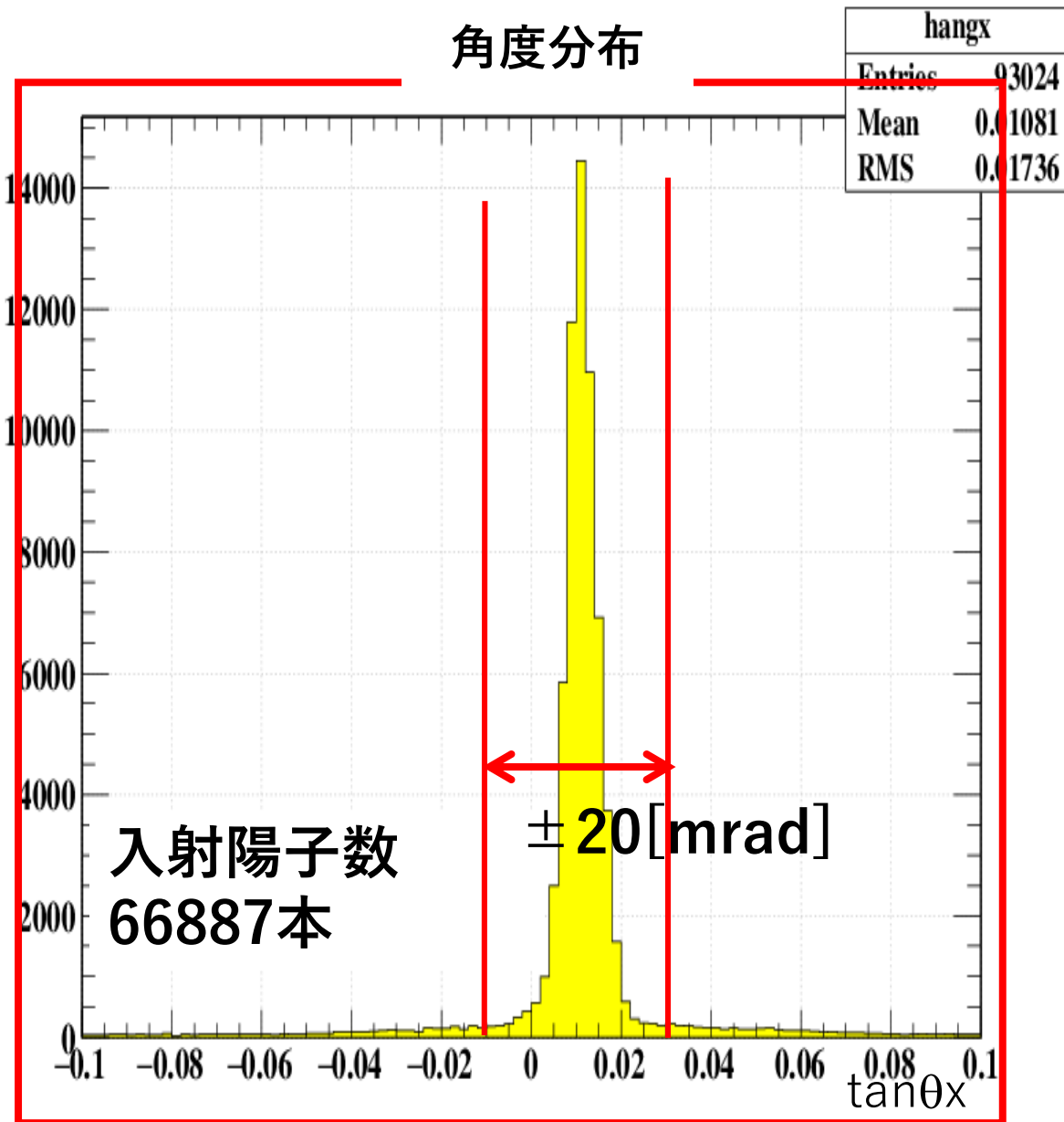


# 入射陽子数の導出

## 位置分布



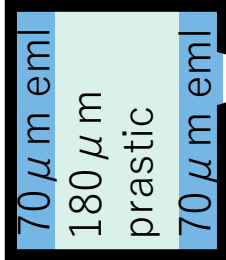
## 角度分布



# 現像・解析を行った乾板

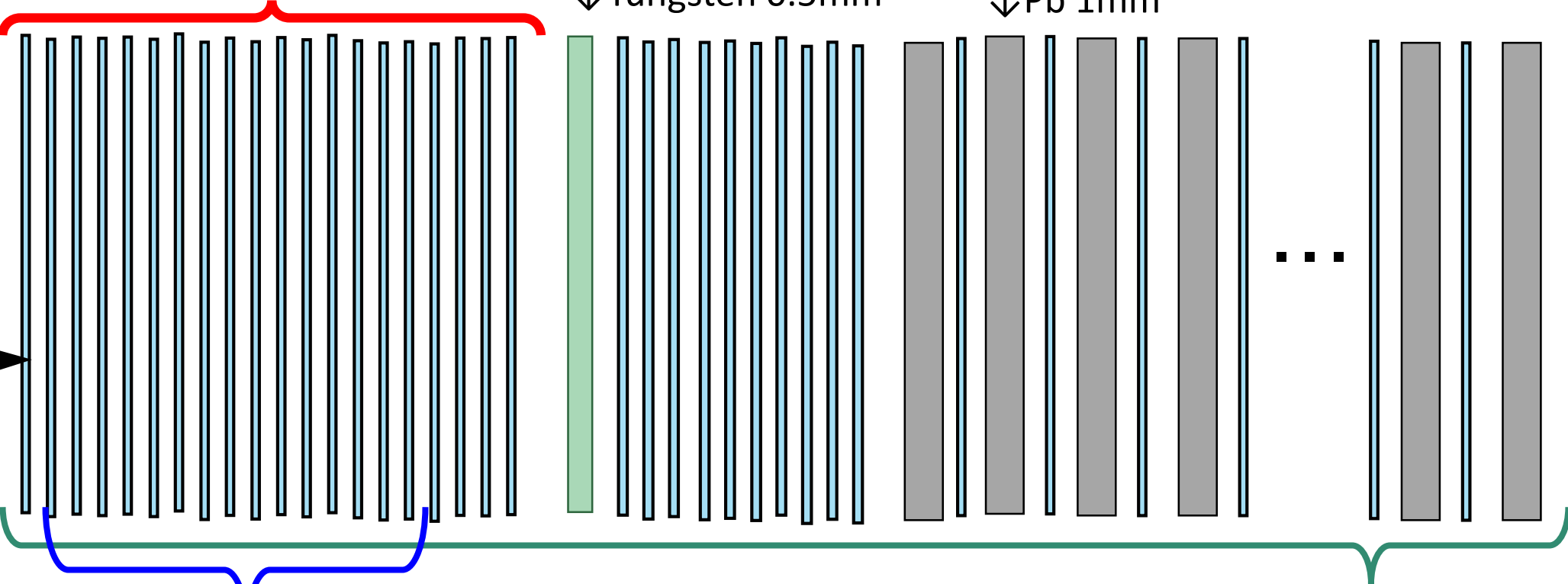
GRAINE実験と同構造(20枚)

400GeV  
陽子  
→



↓ Tungsten 0.5mm

↓ Pb 1mm



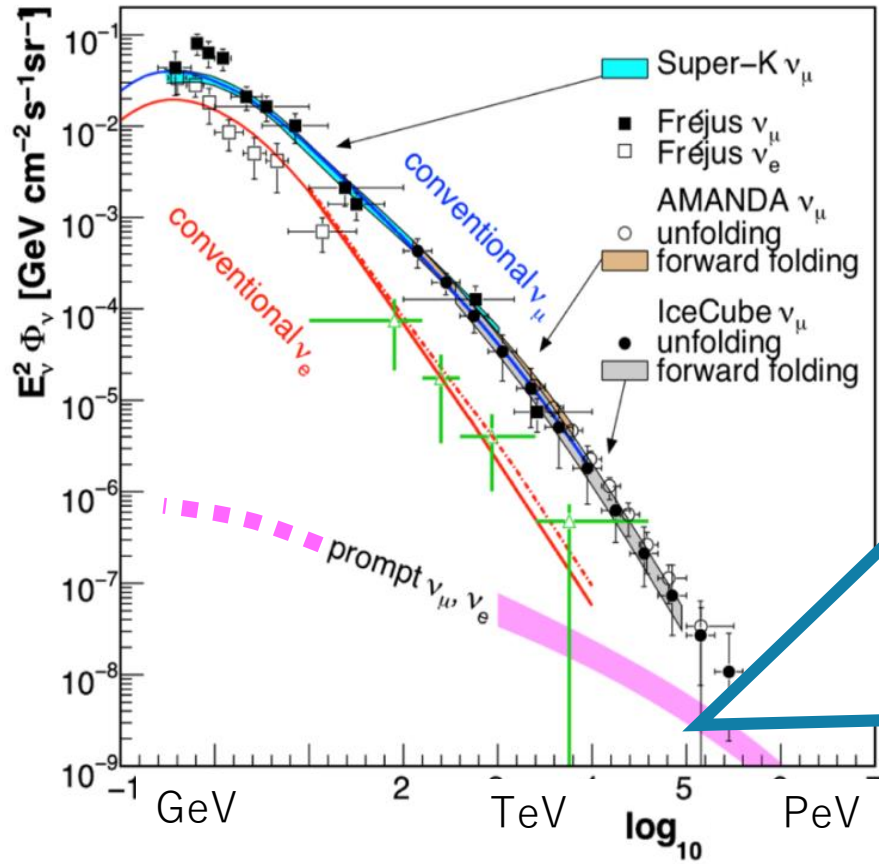
名古屋大学で自動読取

BERN大学で現像



# 大気 $\nu$ のエネルギースペクトル

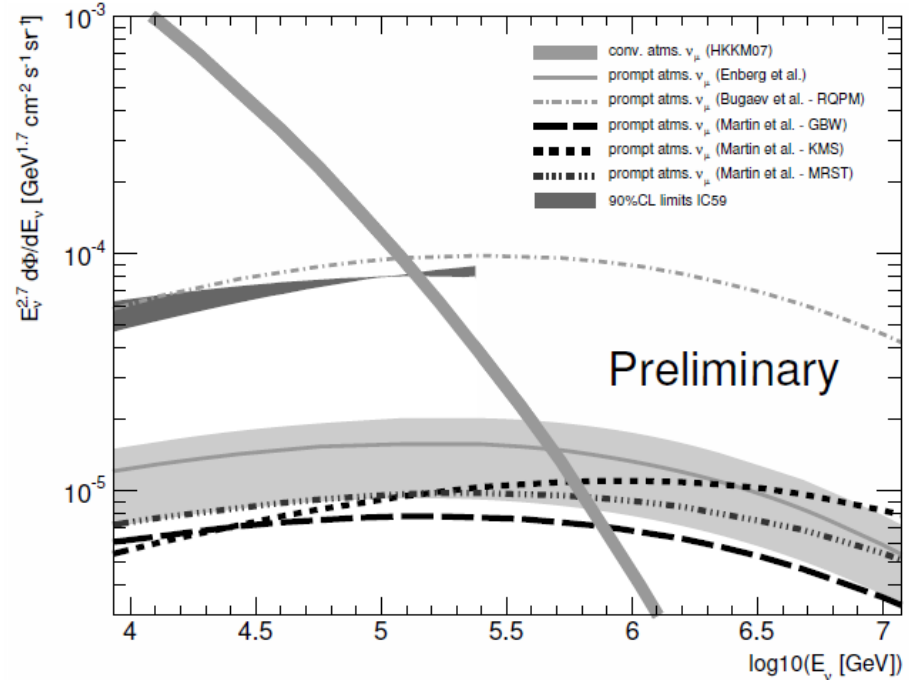
大気 $\nu$ のエネルギースペクトル  
IceCube Coll., PRL 110, 151105 (2013)



## Prompt $\nu$

### PeV領域での宇宙 $\nu$ 測定のBack Ground

1次宇宙線起因のCharm粒子が崩壊、生成された大気 $\nu$   
( $D^+ \rightarrow e^+, \nu_e$ ,  $D^0 \rightarrow K^-, e^+, \nu_e$  ...etc)



上空でのチャーム粒子の検出が困難であるため  
実測がされておらず、モデルによる不定性が大きい

# 系統的なチャーム粒子の検出のために

気球チェンバーに記録  
された飛跡



ハドロン反応



入射粒子エネルギー  
> 100 GeV  
入射粒子が陽子



IPや運動量などの条件  
から選び出す

チャーム粒子数

GRAINE2015  
フライトデータにおける  
検出数のオーダー

$O(10^6)$

$O(10^4)$

$O(1)$

GRAINE計画の将来観  
測計画における検出数  
のオーダー

$O(10^8)$

$O(10^6)$

$O(10^2)$

# 系統的なチャーム粒子の検出のために

気球チェンバーに記録された飛跡

ハドロン反応

入射粒子エネルギー  
> 100 GeV  
入射粒子が陽子

IPや運動量などの条件  
から選び出す

チャーム粒子数

GRAINE2015  
フライトデータにおける  
検出数のオーダー

GRAINE計画の将来観  
測計画における検出数  
のオーダー

ハドロン反応を系統的に探索するスタディが  
GRAINEのフライト乾板から行われ始めている

$O(10^2)$

$O(10^2)$

$O(10^4)$

$O(10^6)$

$O(1)$

$O(10^2)$