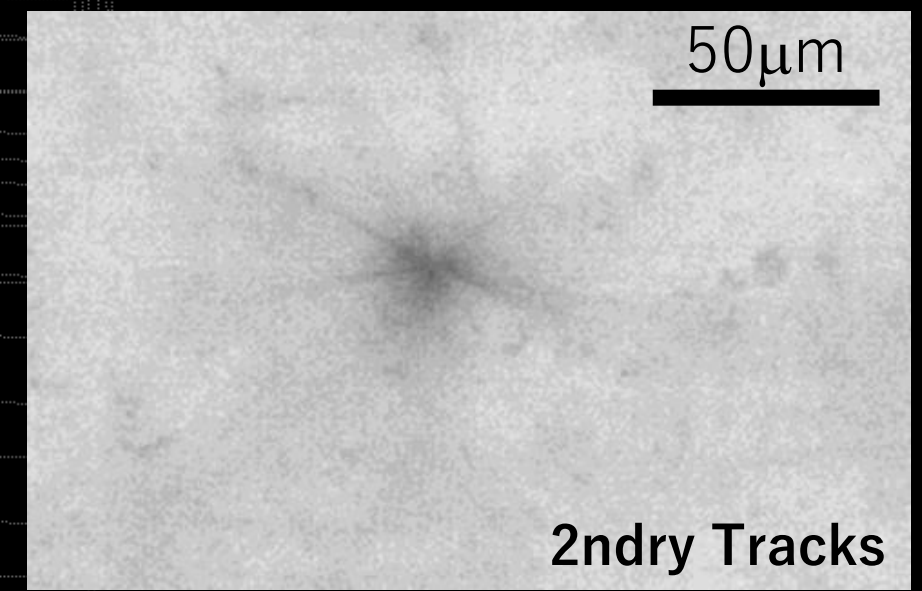
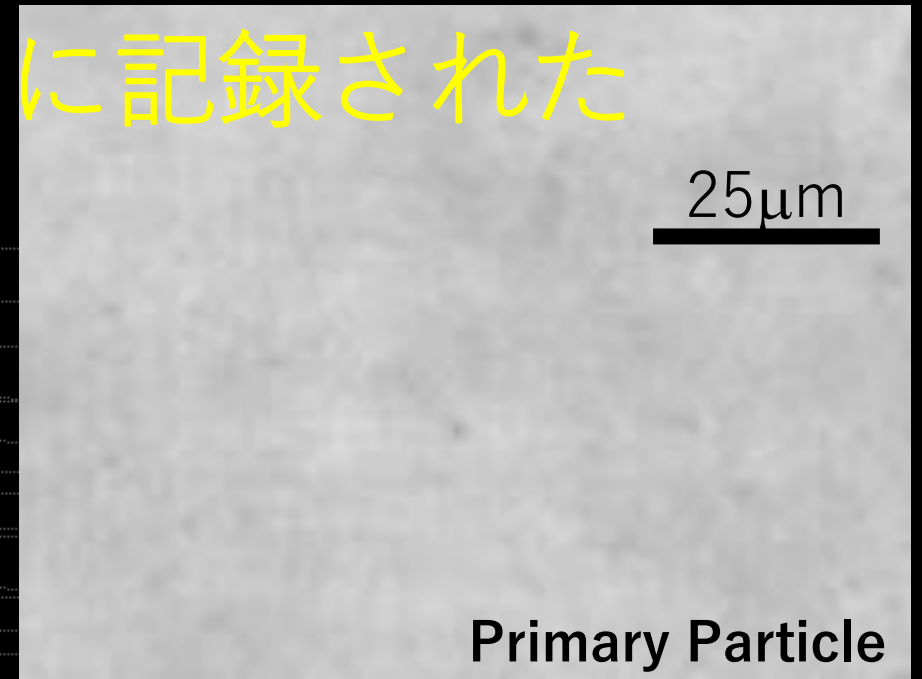
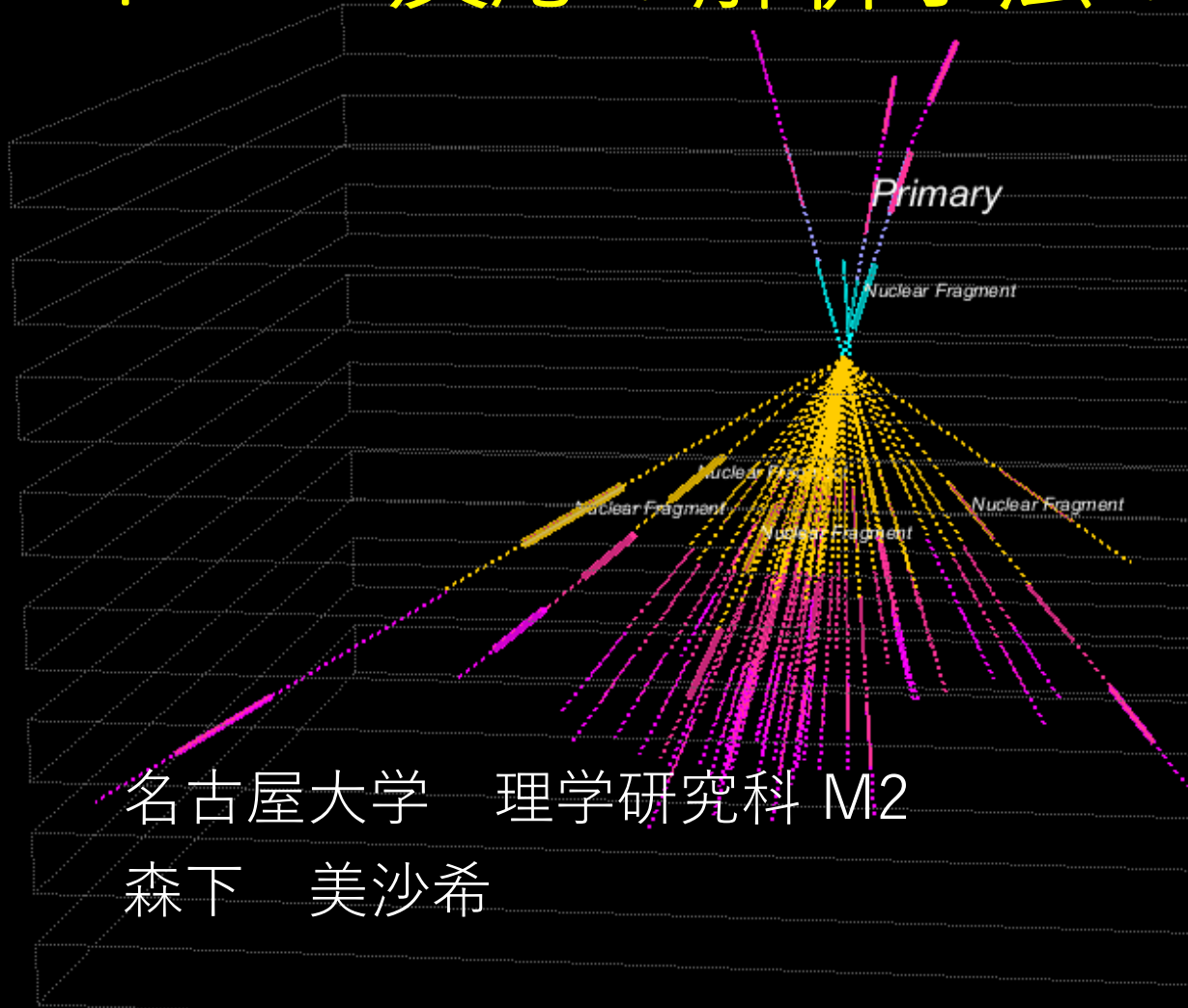


# GRAINEエマルションチェンバーに記録された ハドロン反応の解析手法の開発



名古屋大学 理学研究科 M2  
森下 美沙希

# エマルシヨンの顕微鏡画像

素粒子反応点

100 $\mu$ m

コンプトン電子

宇宙線 $\mu$ 粒子

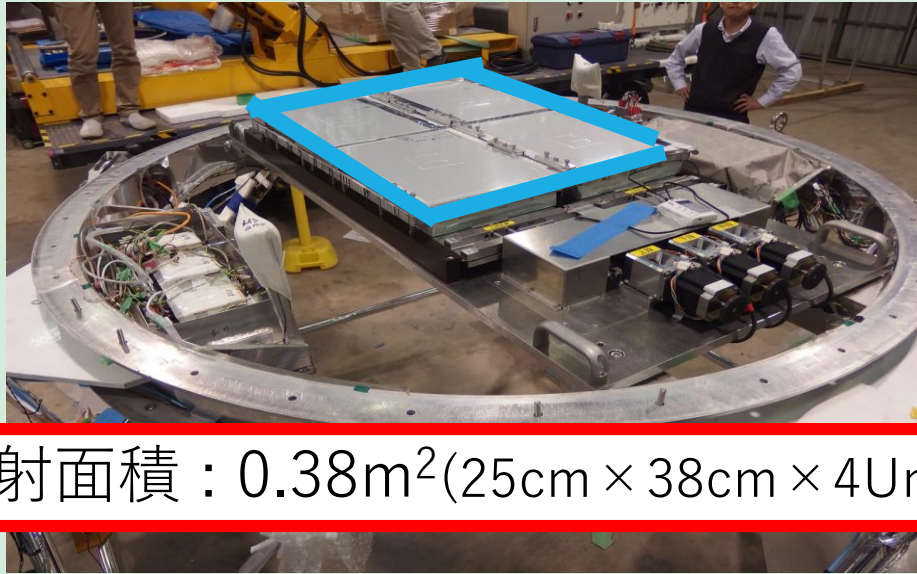
- 1 $\mu$ m以下の銀粒子（グレイン）の連なりで飛跡が構成されるため、空間分解能が高い  
→ 反応点周りの解析、短寿命粒子の同定に有効な検出器
- 4 $\pi$ 方向にすべての荷電粒子を記録することができる
- 乾板自体の面積化が可能

# 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

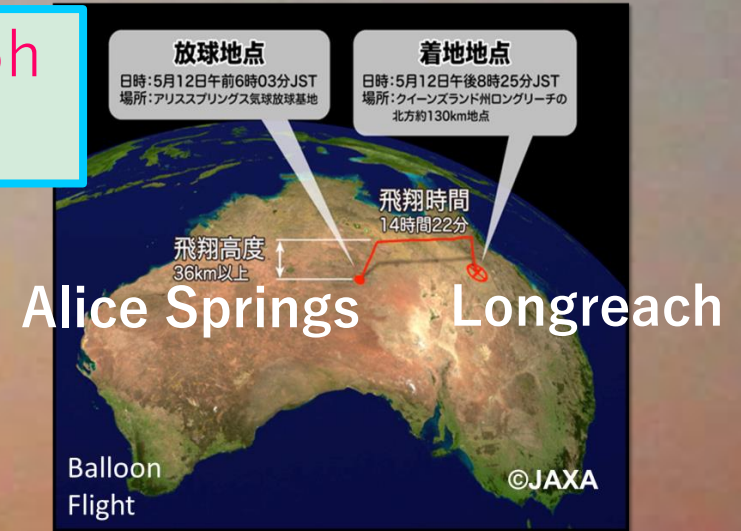
将来計画として10m<sup>2</sup>の照射面積で観測を行うことを目的としている

2015年5月  
オーストラリアにて…



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

観測時間 = 11.5h  
(36km以上)



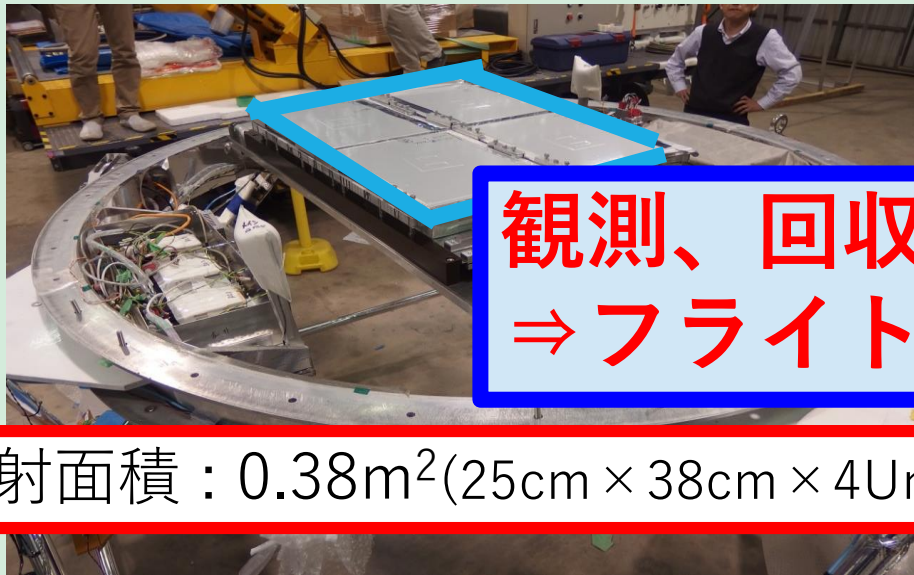
# GRAINE(Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion)計画

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

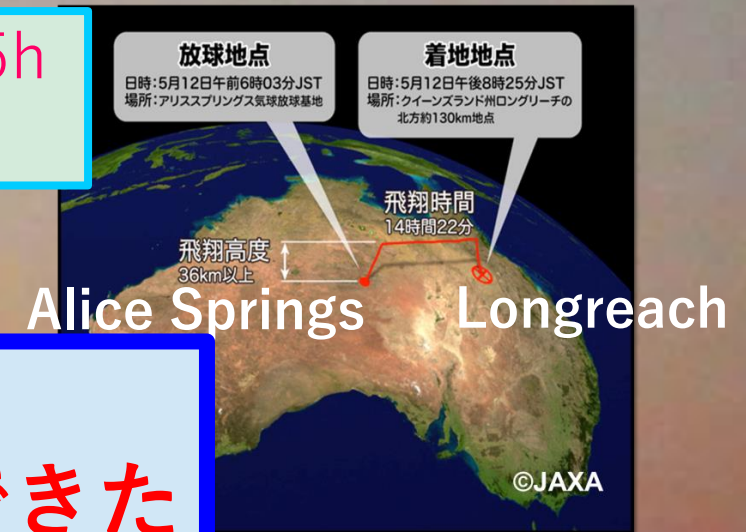
将来計画として10m<sup>2</sup>の照射面積で観測を行うことを目的としている

2015年5月  
オーストラリアにて…

観測時間 = 11.5h  
(36km以上)

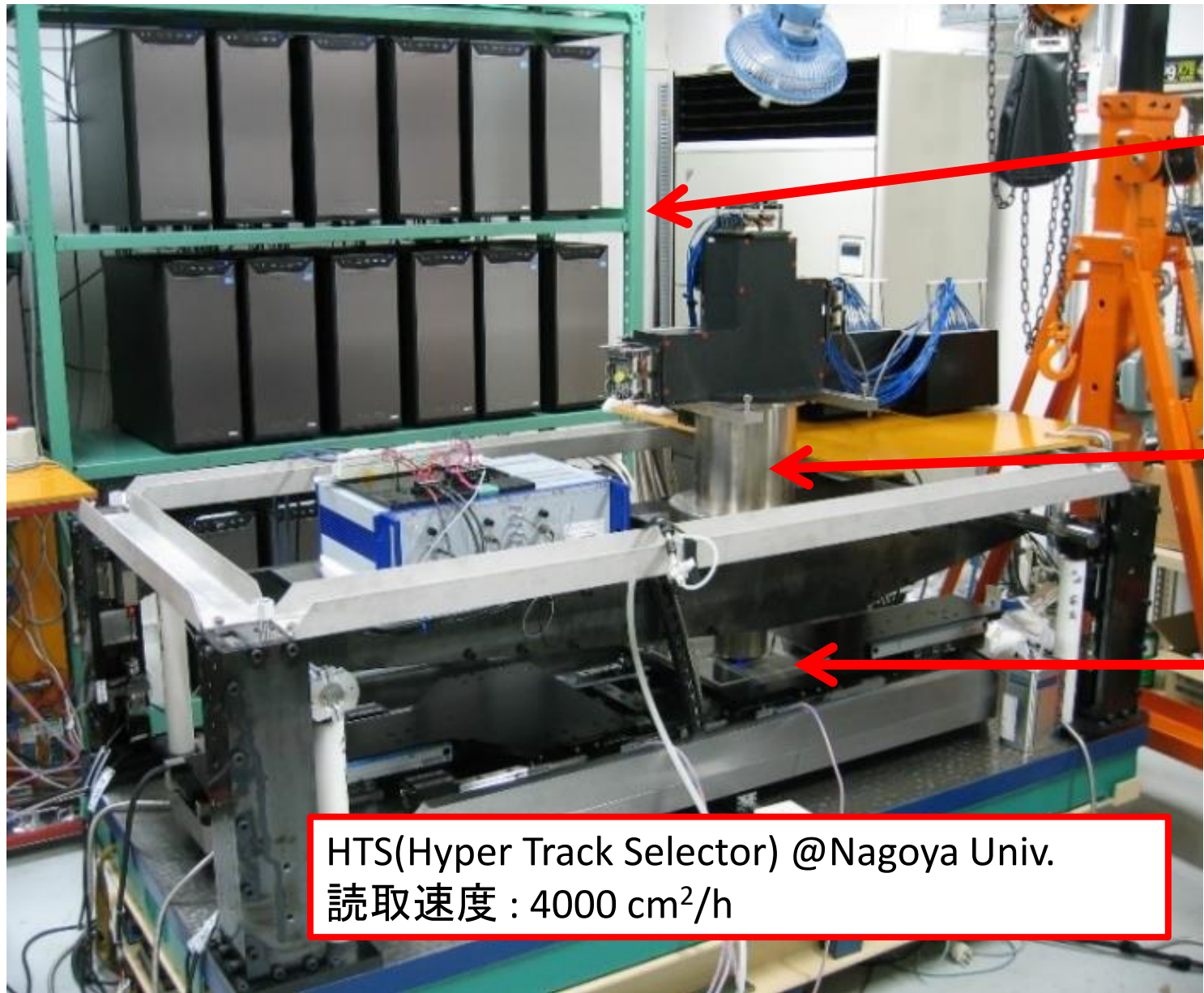


観測、回収、現像に成功  
⇒ フライト乾板を得ることができた



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

# 高速自動飛跡読取装置 (HTS) @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

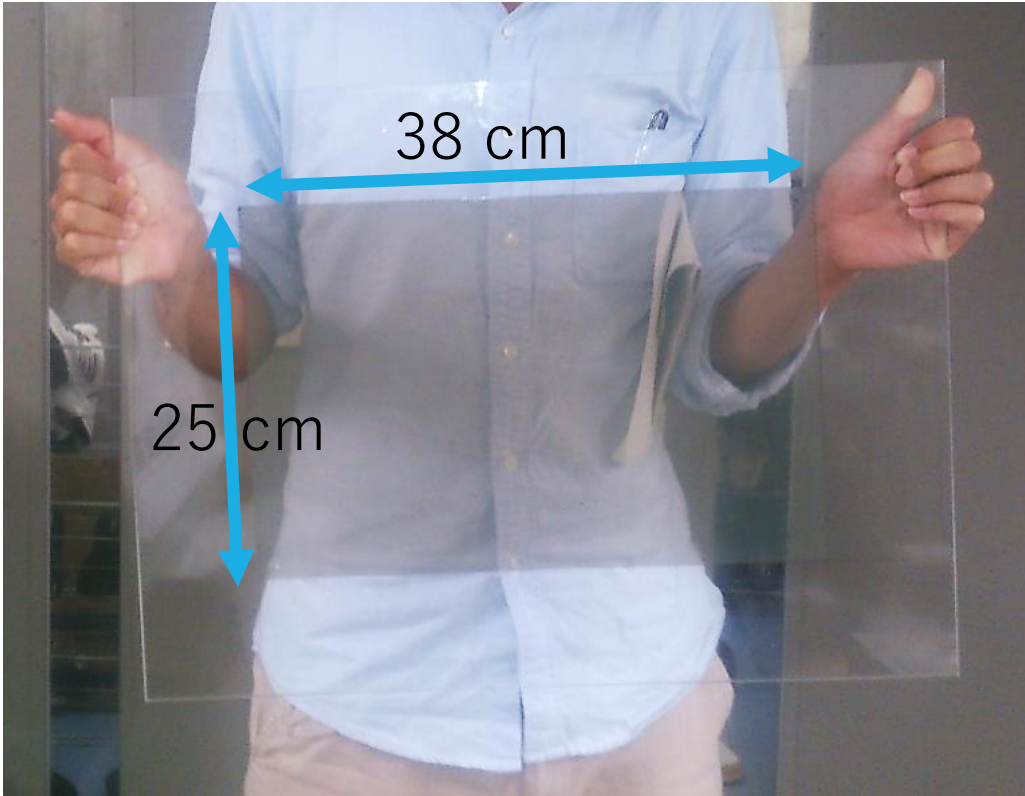
HTS(Hyper Track Selector) @Nagoya Univ.  
読取速度 : 4000 cm<sup>2</sup>/h

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

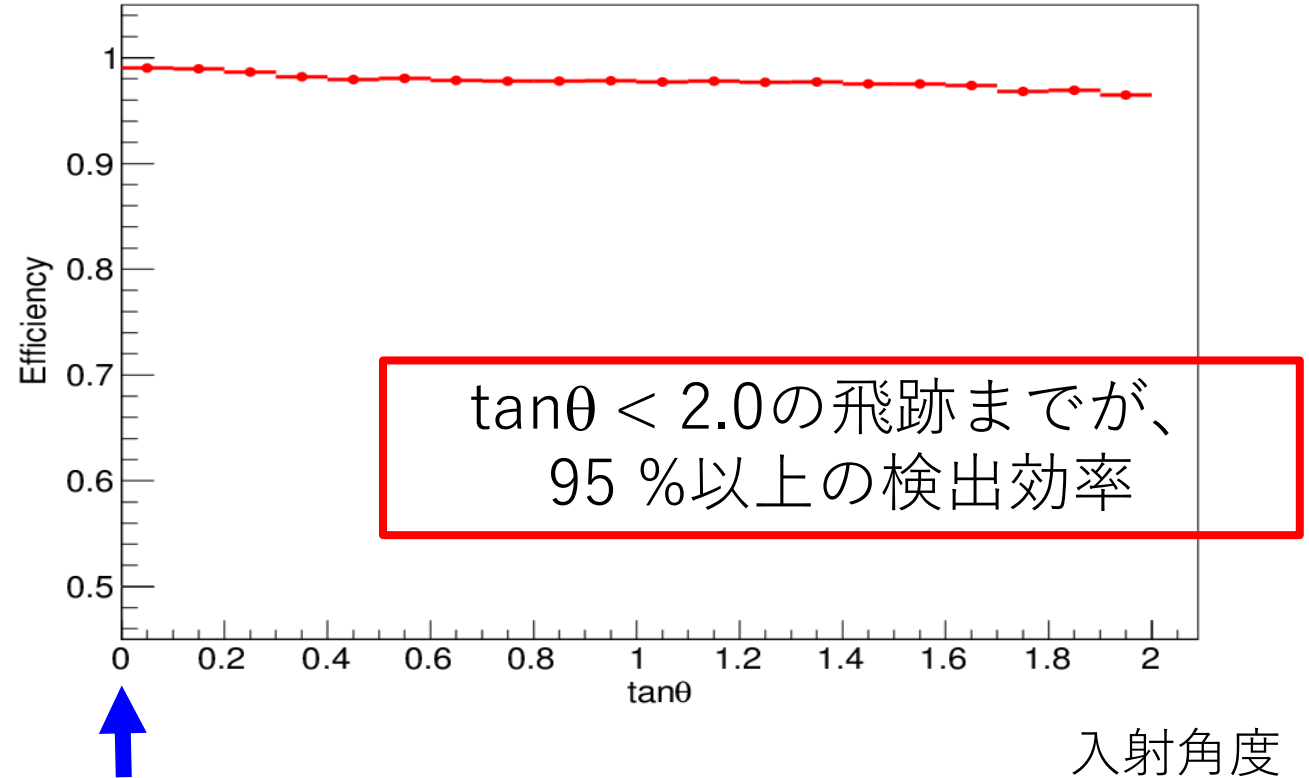
# GRAINE2015フライト乾板の実績

名古屋大学で製造したフィルムを使用

## GRAINE2015フライト乾板



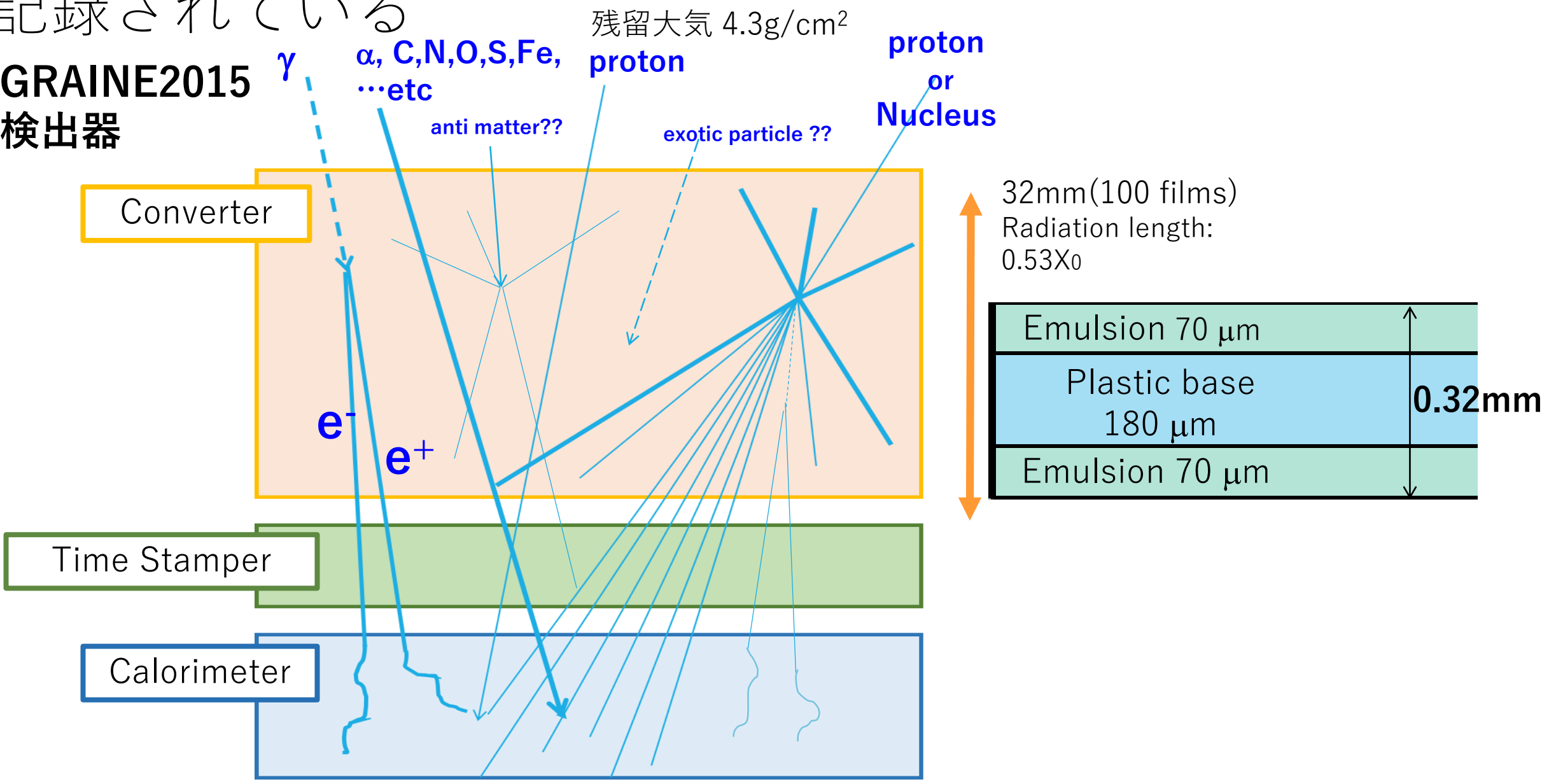
## 飛跡の検出効率の角度依存性



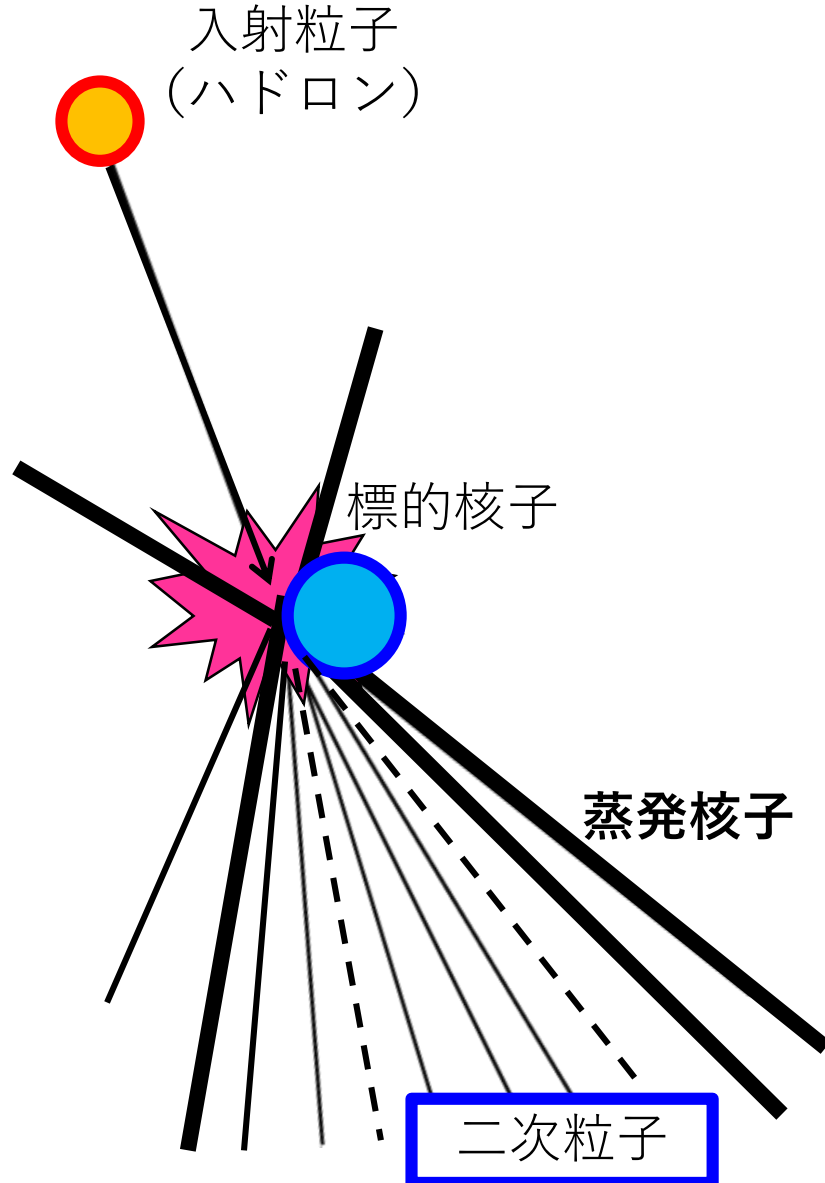
自動読取による読み落としが非常に少ない性能の良い乾板である

# 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



# 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

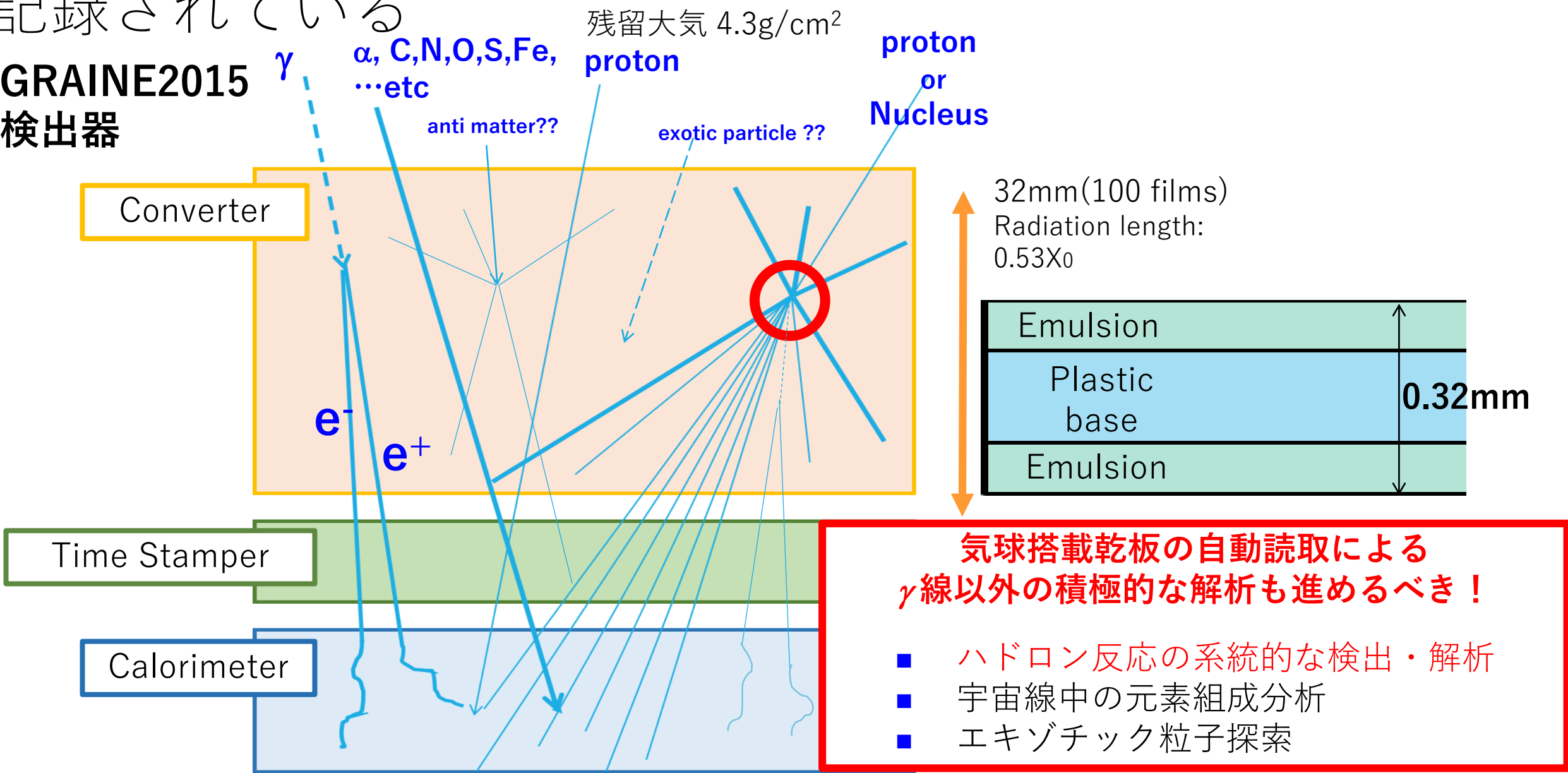
**蒸発核子：標的の原子核から飛び出た粒子。**

- 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。



# 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

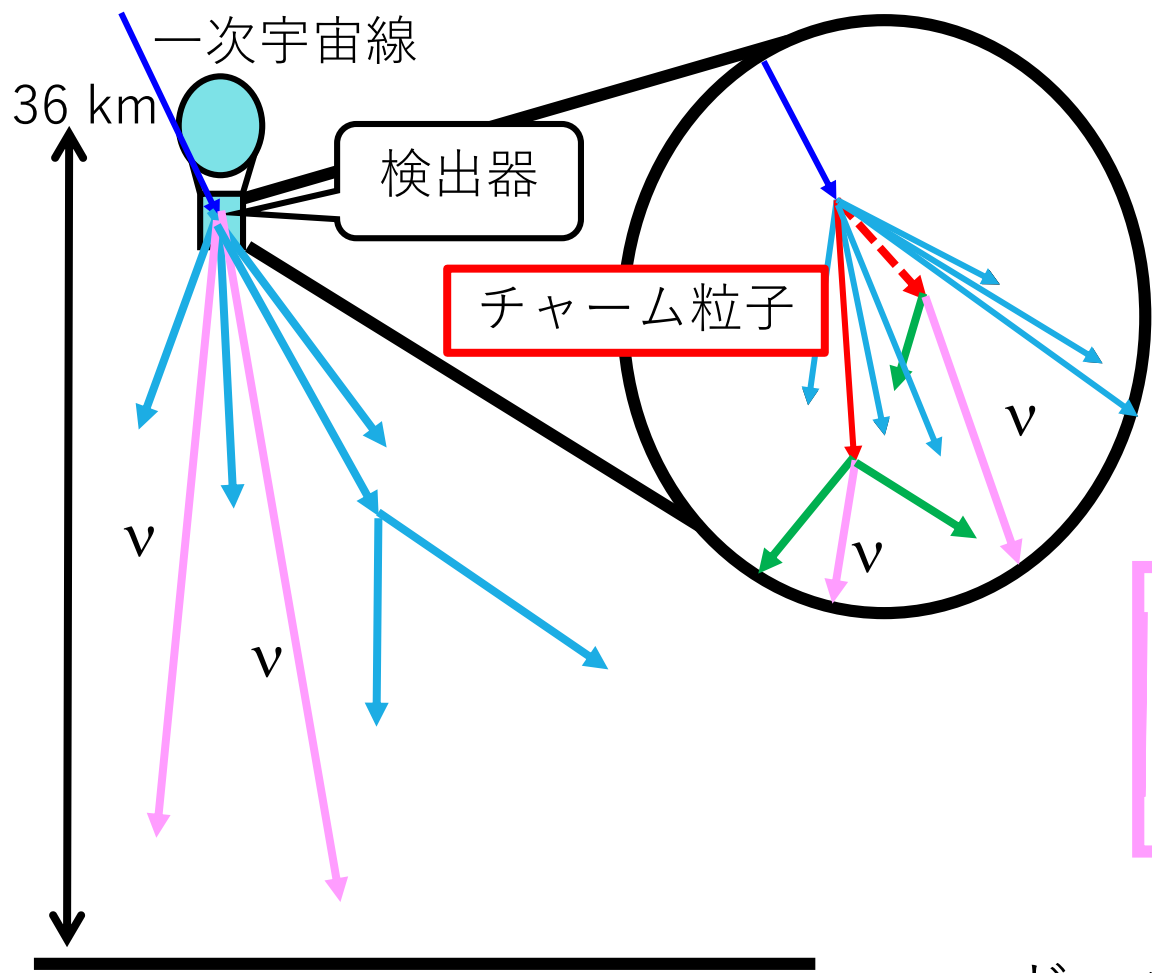


**気球搭載乾板の自動読取による  
 $\gamma$ 線以外の積極的な解析を進めるべき！**

- 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

# ハドロン反応の系統的な検出・解析を行う目的

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

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

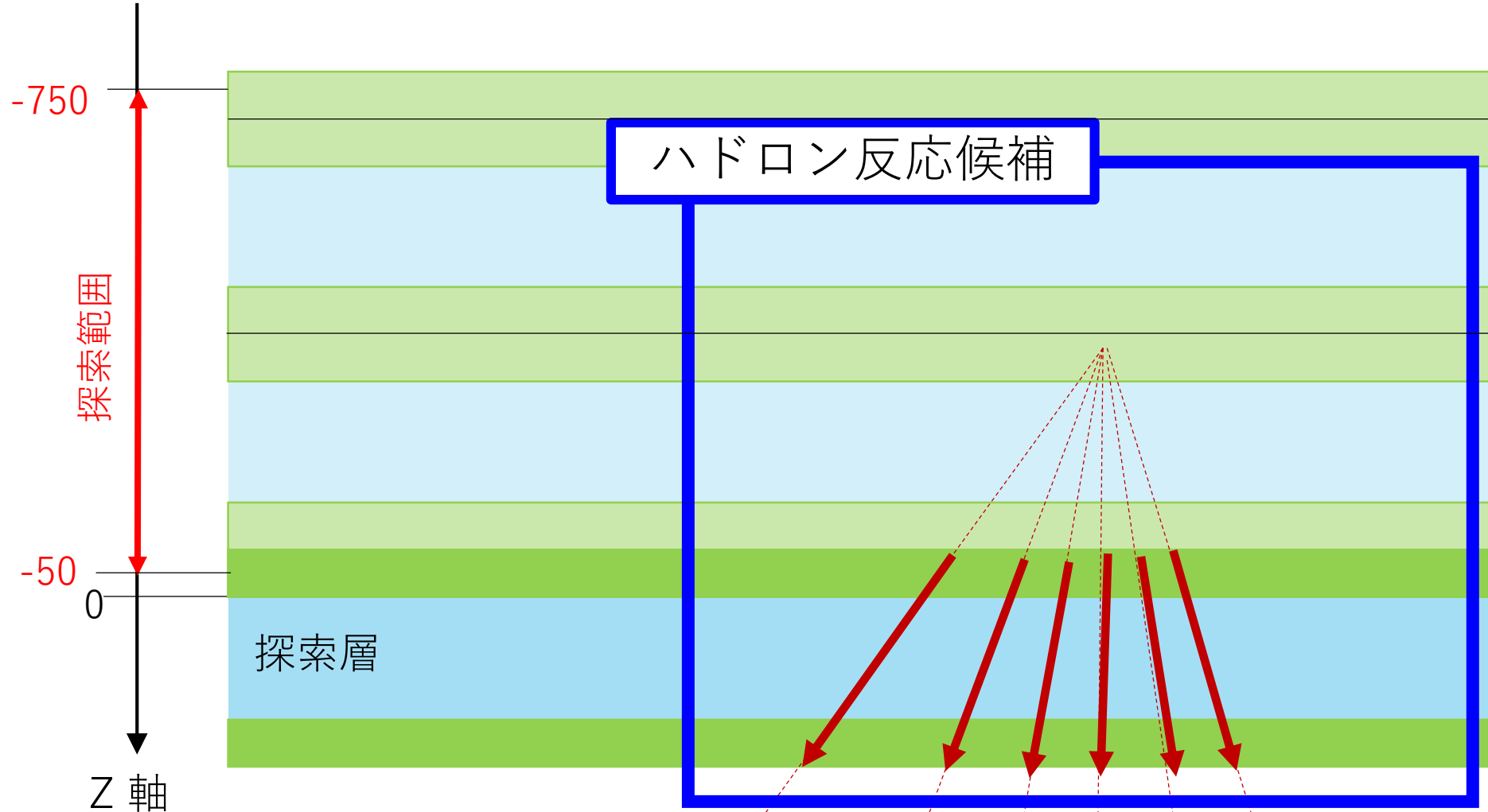
# 系統的なチャーム粒子の検出のために

気球チェンバーに記録された飛跡	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	$O(10^6)$	$O(10^8)$
入射粒子エネルギー > 100 GeV 入射粒子が陽子	$O(10^4)$	$O(10^6)$
↓ IPや運動量などの条件 から選び出す	チャーム粒子の生成量が最も高いと考えられる 100GeV以上の陽子のハドロン反応から優先的に 解析する	
チャーム粒子数		

# ハドロン反応の系統的探索

日本物理学会第71回年次大会  
(2016/03/19)河原

上流に貫通しない飛跡の中で  
3次元的に測定精度の範囲内で、1点に収束する飛跡集団を選び出す

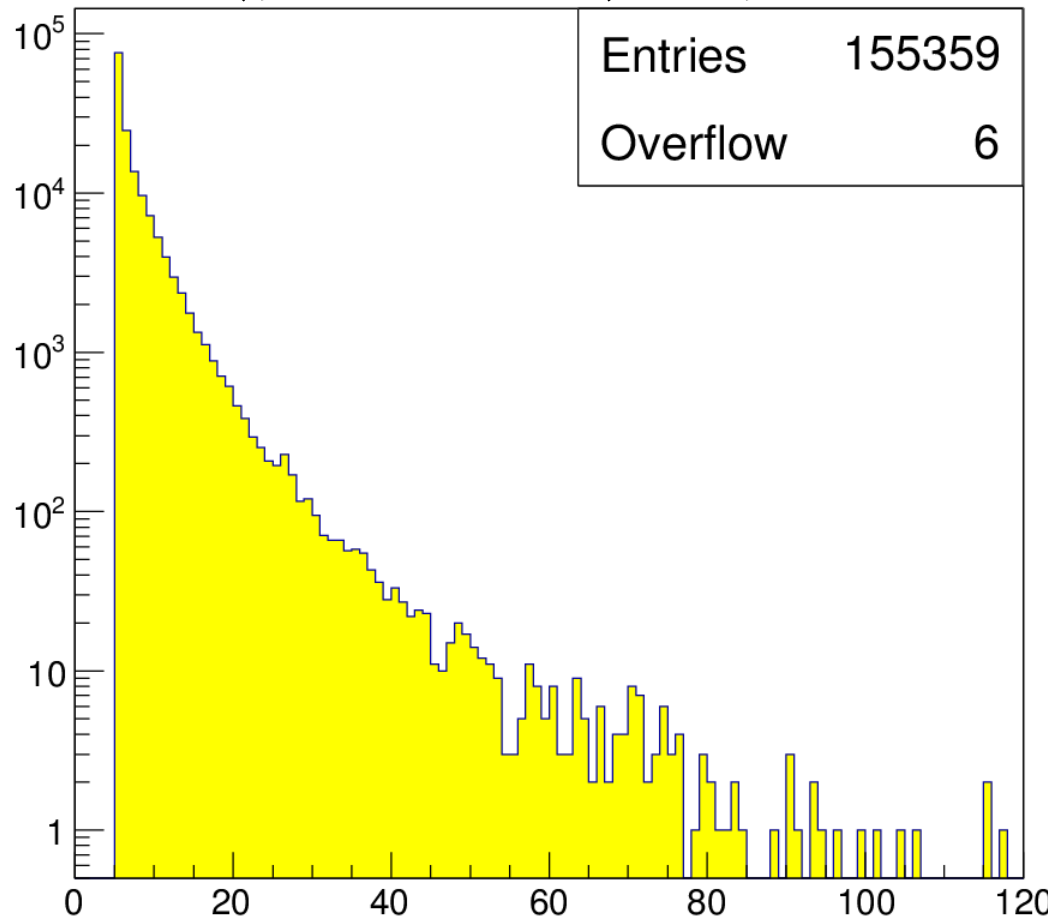


# GRAINE2015フライトでのハドロン反応候補の検出現状

## 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

60万反応以上が検出され得る

15万反応以上が検出



ハドロン反応の系統的な選び出しの開発が進行中

# 本研究の内容

気球チェンバーに記録された飛跡	GRAINE2015 フライトデータにおける 検出数のオーダー
ハドロン反応	$O(10^6)$
入射粒子エネルギー > 100 GeV 入射粒子が陽子	$O(10^4)$
↓ IPや運動量などの条件 から選び出す チャーム粒子数	$O(1)$

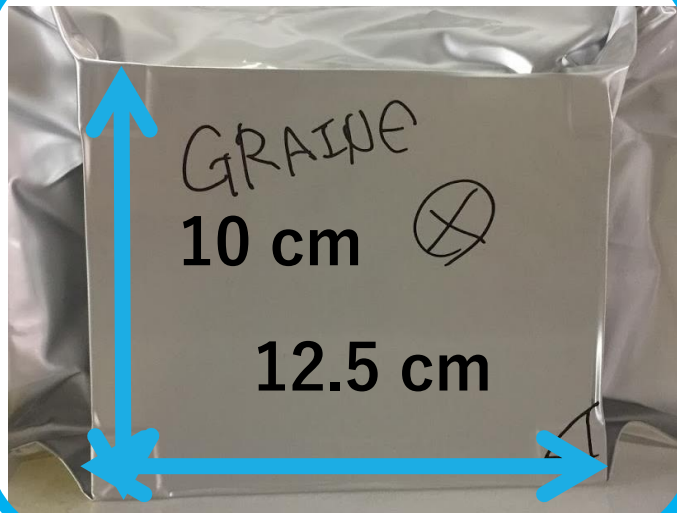
ビームによる評価

ハドロン反応の検出効率

# 400 GeV陽子ビーム実験

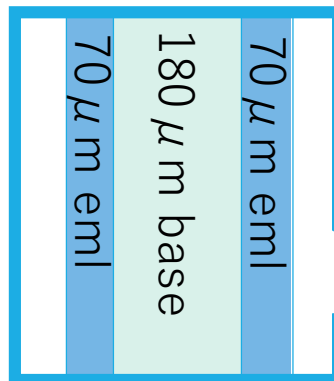
- 名古屋大学で製造した乳剤をベルン大学へ輸送
- ベルン大学で塗布をしてもらう (2016/10/24~)
- 11/11 CERNのダークルームでチェンバーを組み立てる
- 11/12 Experimental Hall North1(EHN1) H4にて照射
- 11/13 チェンバーを解体
- 11/14~11/15 ベルン大学にて乾板を現像・乾燥
- 名古屋大学に持ち帰り、HTSにより乾板を読取

## チェンバー正面



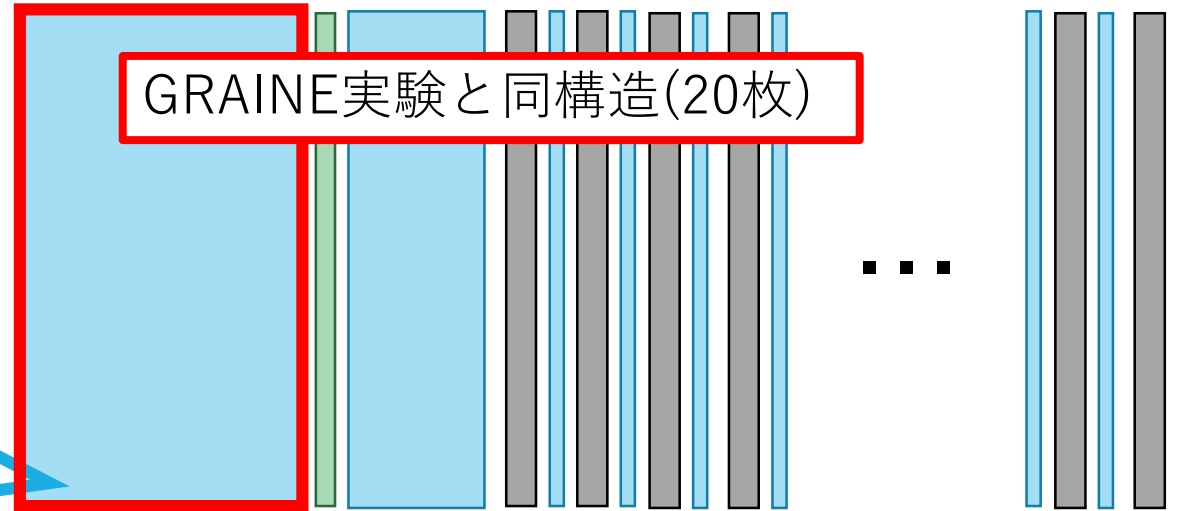
## チェンバー構造の断面図

400GeV proton  
 $1.6 \times 10^4 / \text{cm}^2$



GRAINE実験と同構造(20枚)

↑ Tungsten 0.5mm

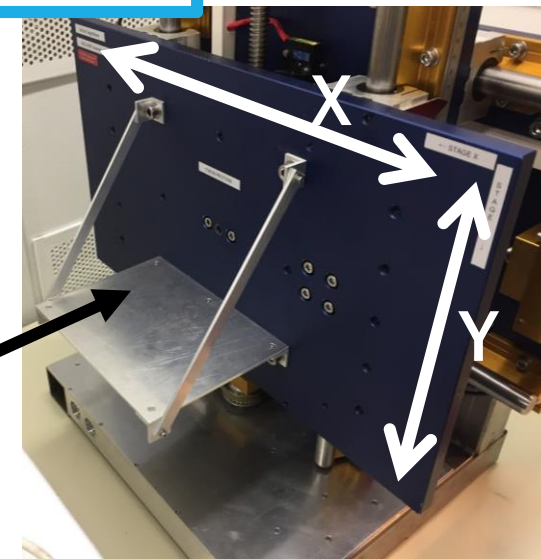


# 400 GeV陽子ビーム実験

- 名古屋大学で製造した乳剤をベルン大学へ輸送
- ベルン大学で塗布をしてもらう (2016/10/24~)
- 11/11 CERNのダークルームでチェンバーを組み立てる
- 11/12 Experimental Hall North1(EHN1) H4にて照射
- 11/13 チェンバーを解体
- 11/14~11/15 ベルン大学にて乾板を現像・乾燥
- 名古屋大学に持ち帰り、HTSにより乾板を読取

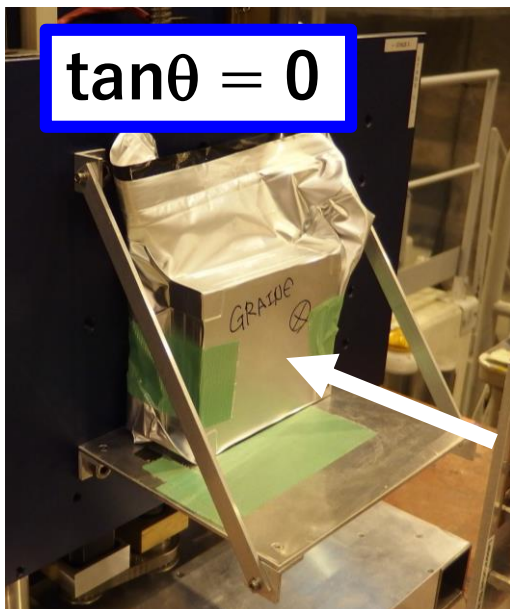
## XYステージ

400GeV  
陽子

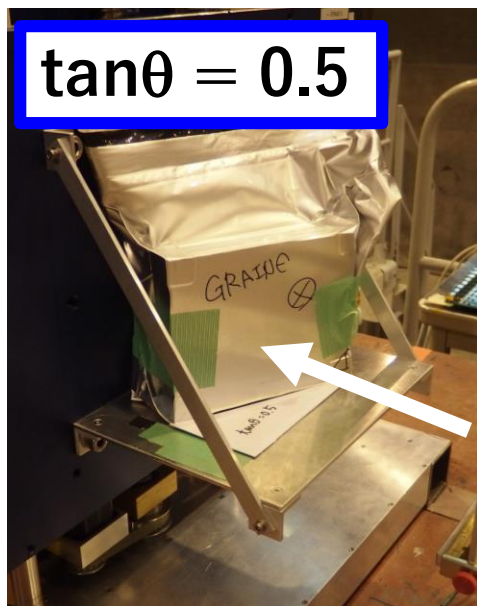


チェンバーの場所ごとに入射ビームの角度を変えて照射

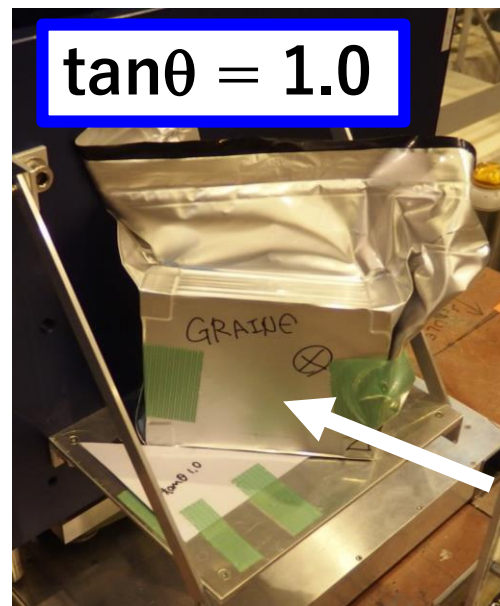
$\tan\theta = 0$



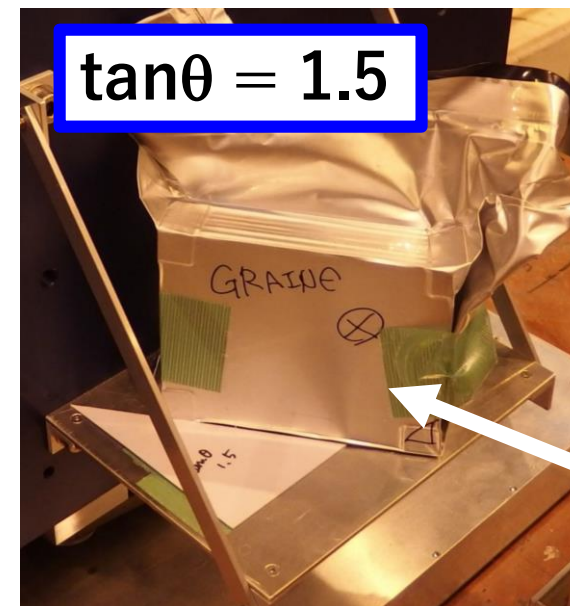
$\tan\theta = 0.5$



$\tan\theta = 1.0$



$\tan\theta = 1.5$





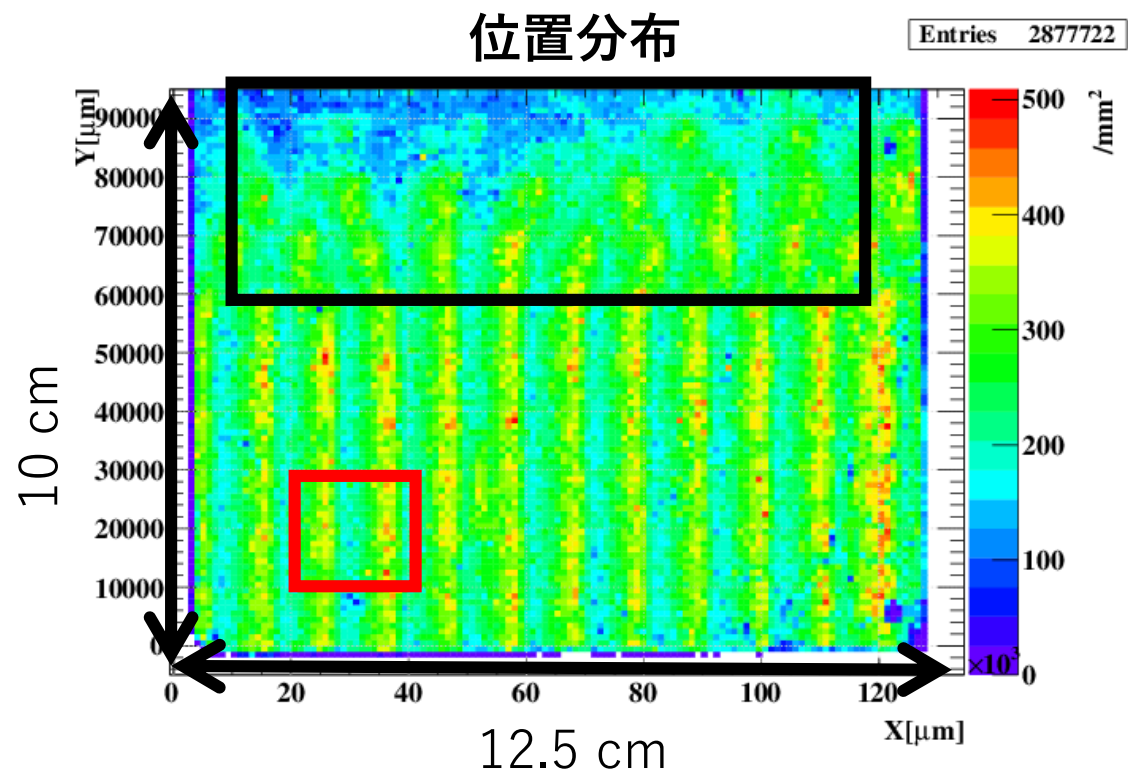
# 400 GeV陽子ビーム実験



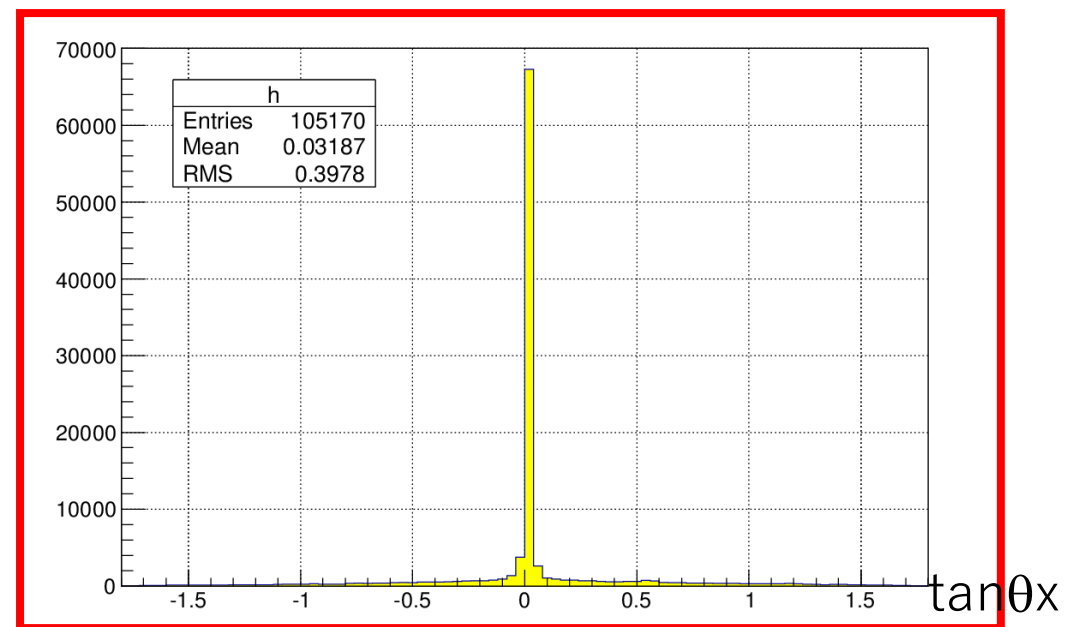
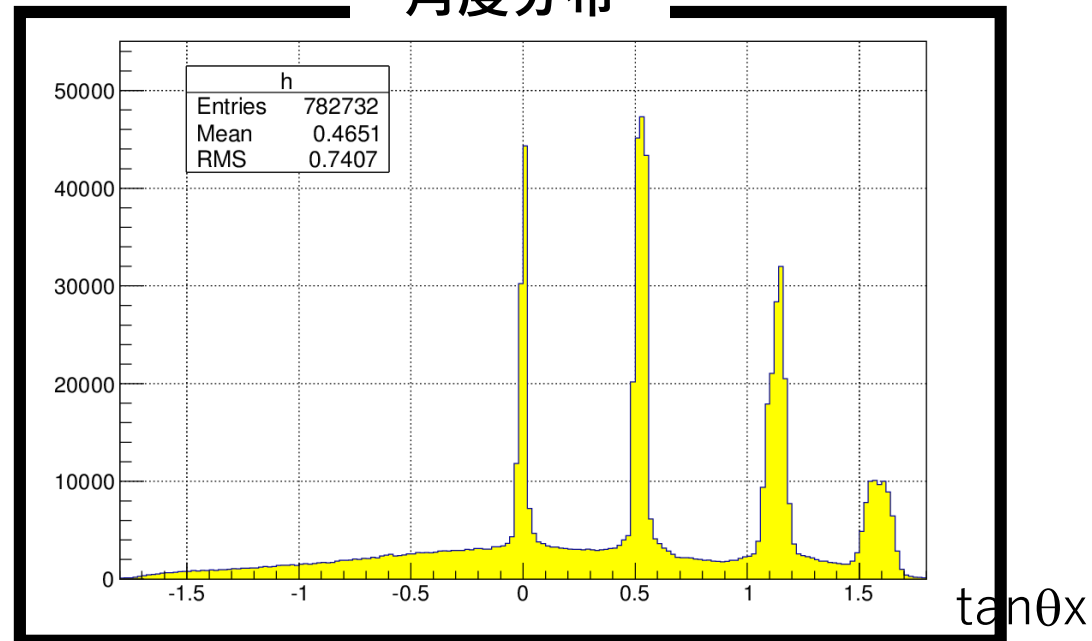
- 名古屋大学で製造した乳剤をベルン大学へ輸送
- ベルン大学で塗布をしてもらう (2016/10/24~)
- 11/11 CERNのダークルームでチェンバーを組み立てる
- 11/12 Experimental Hall North1(EHN1) H4にて照射
- 11/13 チェンバーを解体
- 11/14~11/15 ベルン大学にて乾板を現像・乾燥
- 名古屋大学に持ち帰り、HTSにより乾板を読取



# 自動読取後の1枚の乾板の飛跡データ

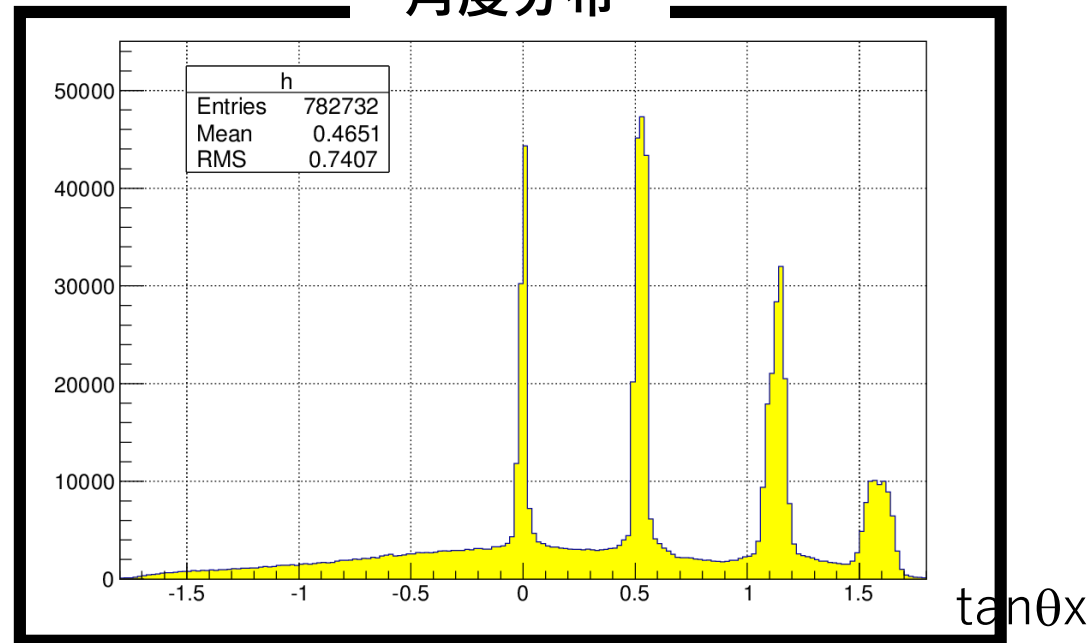


### 角度分布

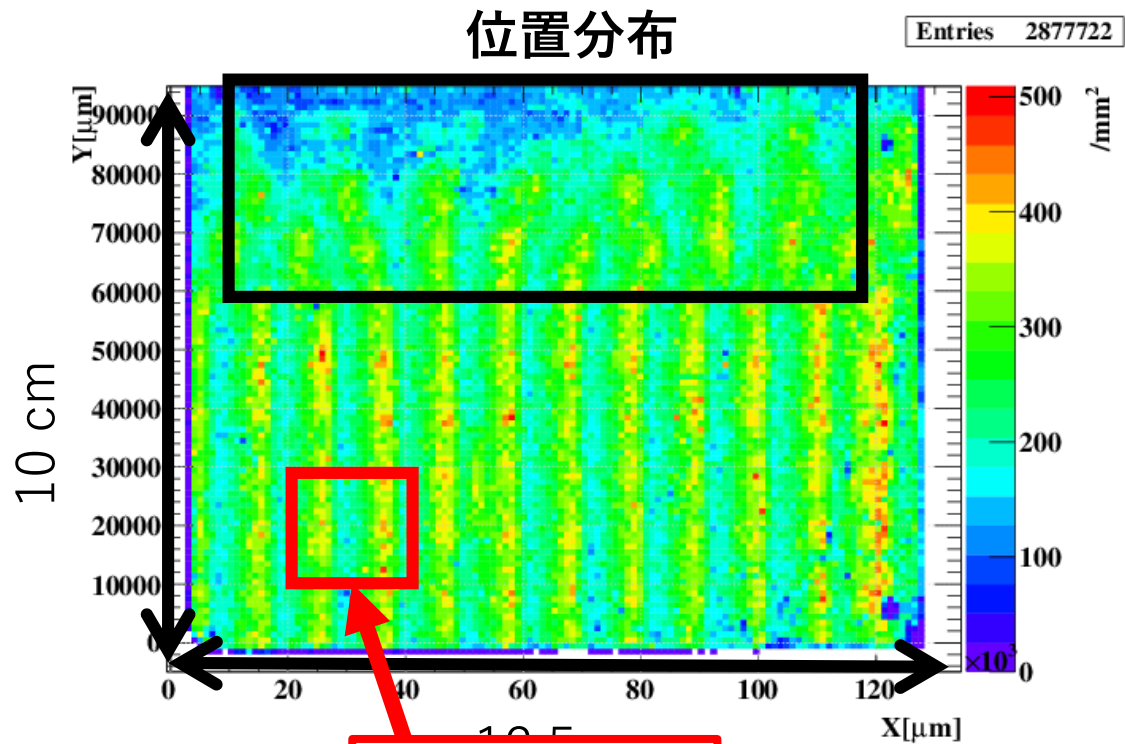


# 自動読取後の1枚の乾板の飛跡データ

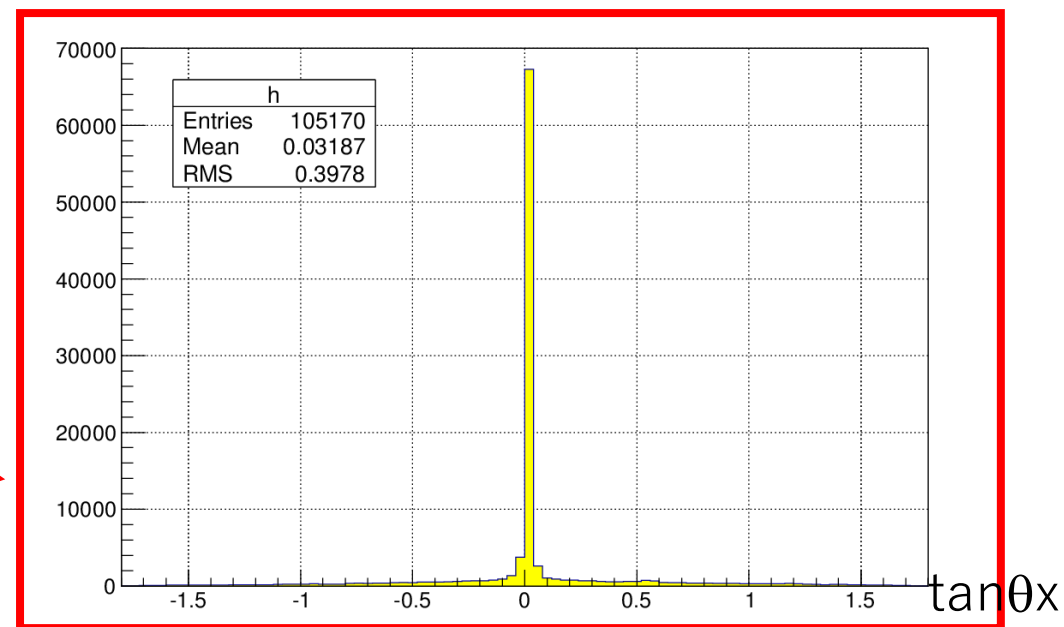
## 角度分布



## 位置分布

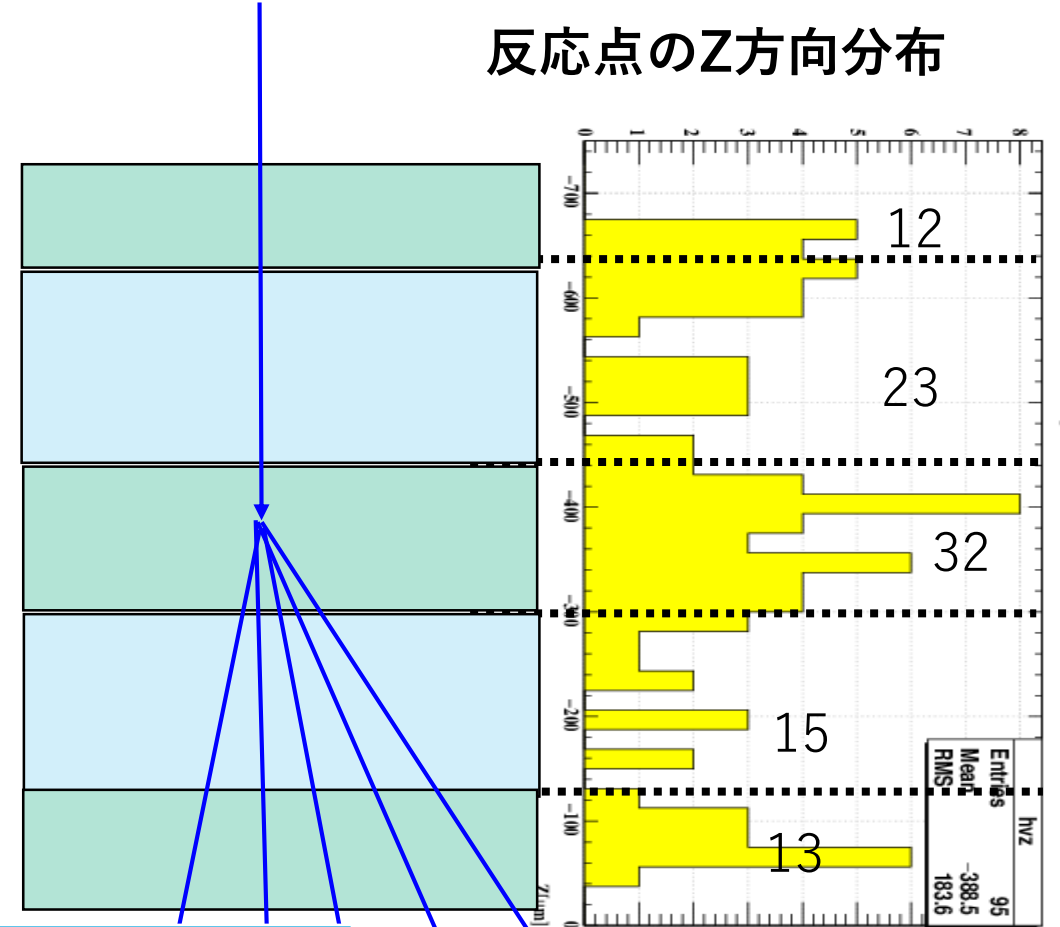
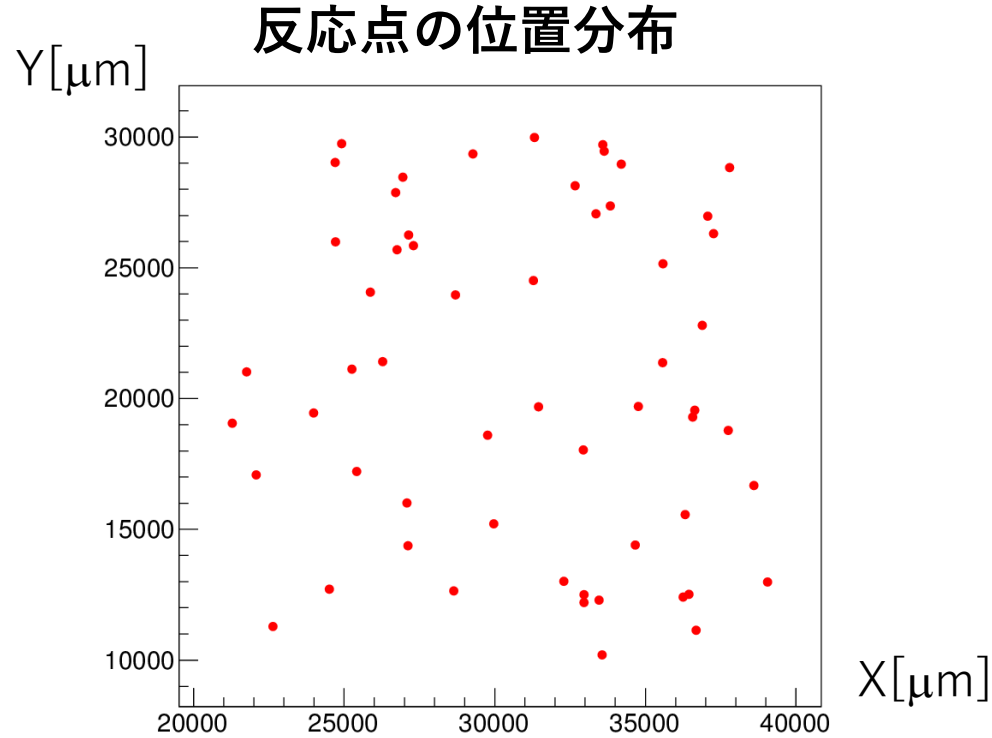


今回の解析



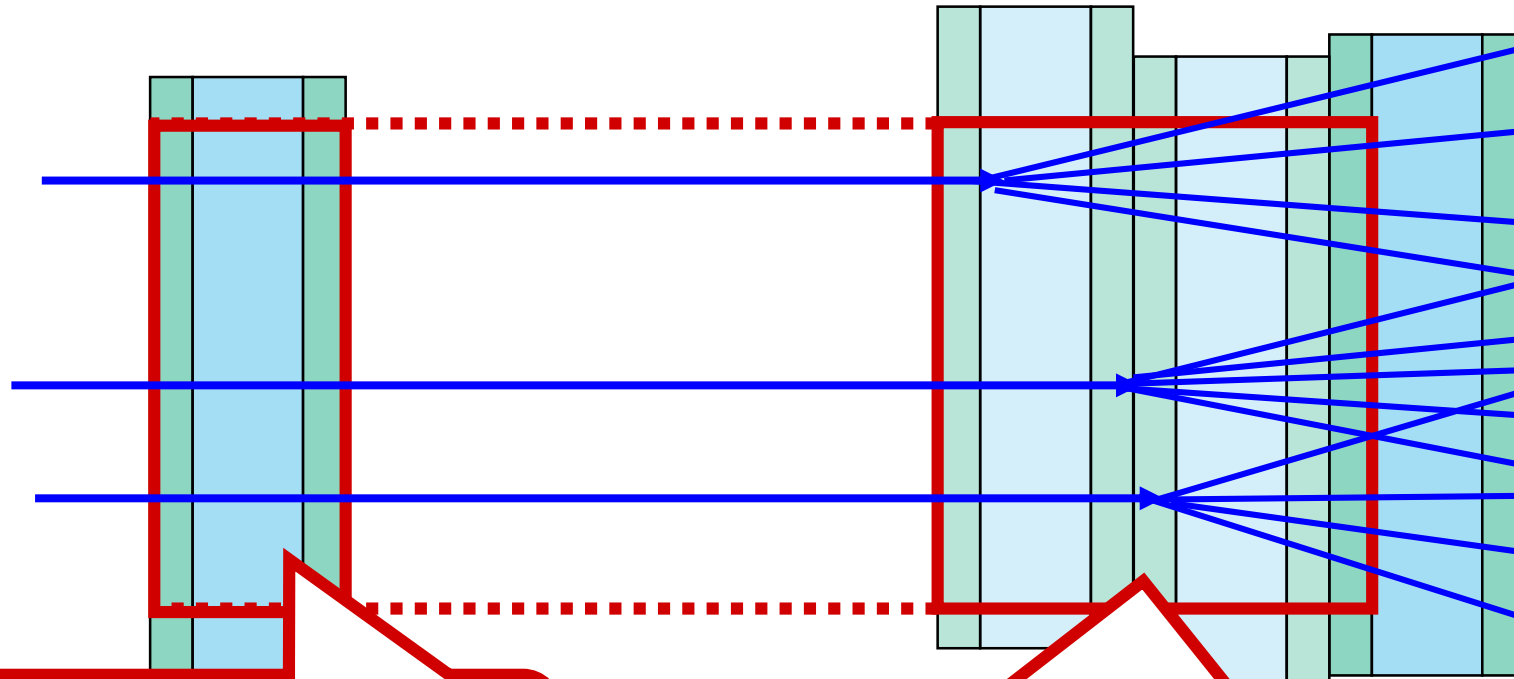
# ハドロン反応点の探索結果

## 反応点のZ方向分布



	乳剤中	ベース中
検出ハドロン反応数	57	38
100μmあたり	$17.8 \pm 2.3$	$10.6 \pm 1.7$
Nuclear interaction length の 違いから期待される反応数比	2	1

# ビームデータによるハドロン反応の検出効率の評価



陽子ビーム本数( $N_{beam}$ )  
 $1.67 \times 10^4 / \text{cm}^2$

検出したハドロン反応数( $N_{detected}$ )  
57個

ハドロン反応の検出効率

$$= \frac{N_{detected}}{N_{beam} \times P}$$

P : Nuclear interaction lengthから求まるハドロン反応確率

$\tan\theta=0$ で入射した400 GeVの陽子の  
ハドロン反応の検出効率 =  $0.65 \pm 0.13$ と評価した

# 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。
  - 本研究では気球搭載原子核乾板に記録されたハドロン反応の解析を行う。
  - 本研究の目的は、チャーム粒子を検出することで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することを目指す。
- 系統的にハドロン反応を探索・解析する必要がある。

## ハドロン反応の探索

- 上流に突き抜けない飛跡の中で、測定範囲の中で空間的に1点に収束するようなハドロン反応候補をGRAINE2015のフライトデータの1/4から15万反応検出した。
- ハドロン反応の検出効率の評価を行うため、400GeV陽子ビーム実験を実施し、 $\tan\theta=0.0$ のビームから検出効率 $0.65 \pm 0.13$ を得た。

## 課題

- 反応数の統計を増やして統計エラーの小さくした状態でシミュレーションとの比較を行う。
- 大角度で入射したハドロン反応の探索を行い角度ごとにハドロン反応の検出効率を導出する

## ハドロン反応の解析

- GRAINE2015フライトデータから検出されたハドロン反応候補のうち、14例に対して「入射粒子の選出→核種同定→エネルギー導出」の解析手順を提案し解析を行った。
- 50%のハドロン反応は現状の解析手法で理解ができています。

## 課題

- $\tan\theta > 2.0$ の大角度飛跡の自動読取手法を開発し、解析可能なハドロン反応数を増やす