

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 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 F研
博士前期課程2年 森下美沙希

原子核乾板の顕微鏡画像

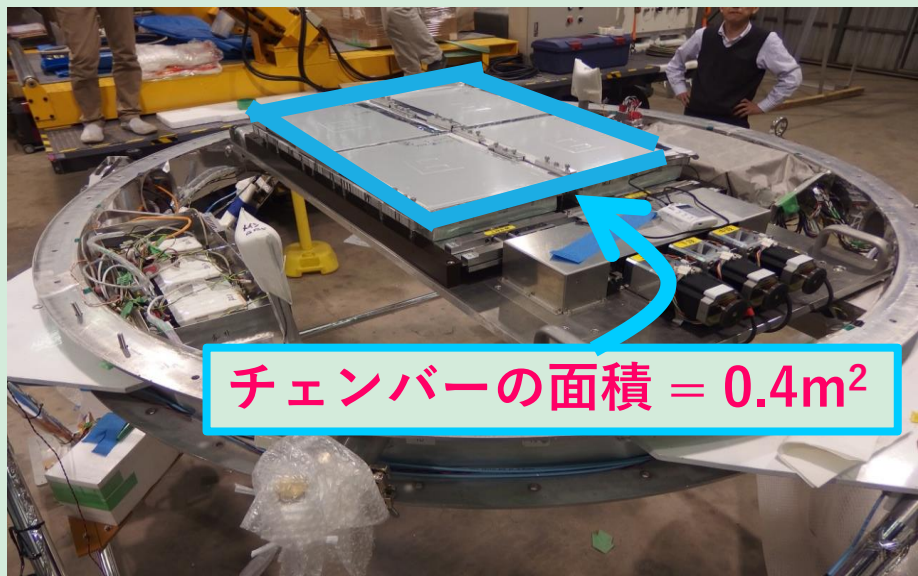


100 μm

GRAINE 計画

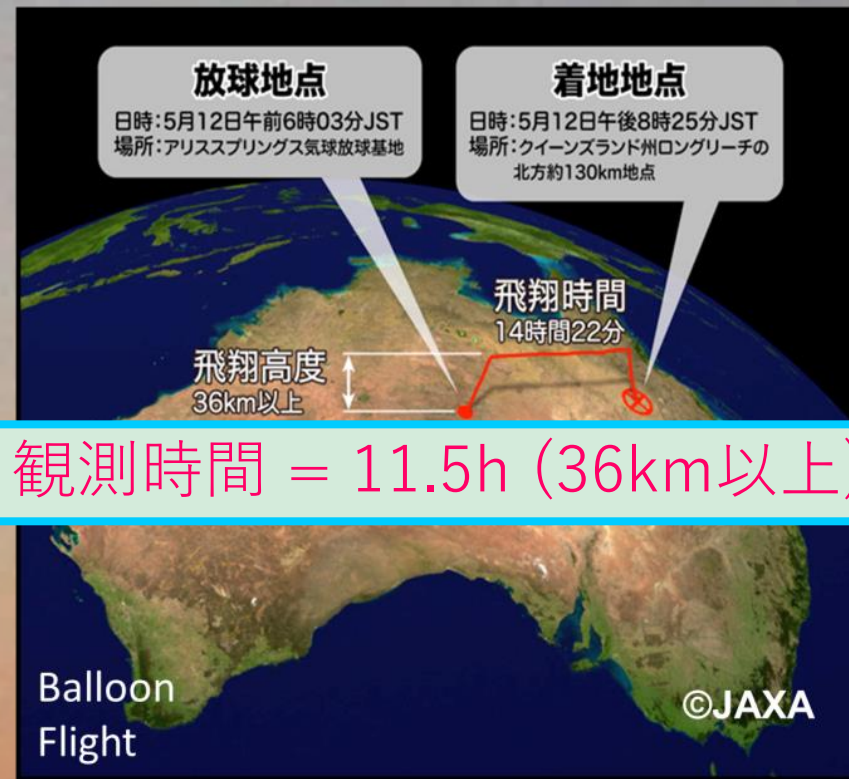
GRAINE実験では原子核乾板を用いることで
高角度分解能の γ 線天体の精密観測を目指す

2015年5月
オーストラリアにて…



チェンバーの面積 = 0.4m^2

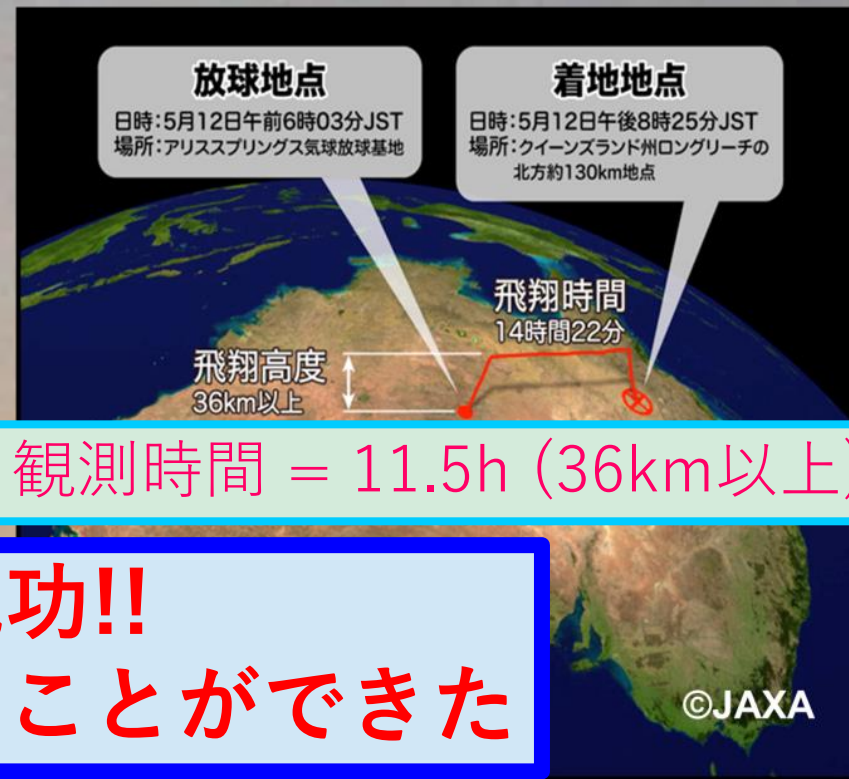
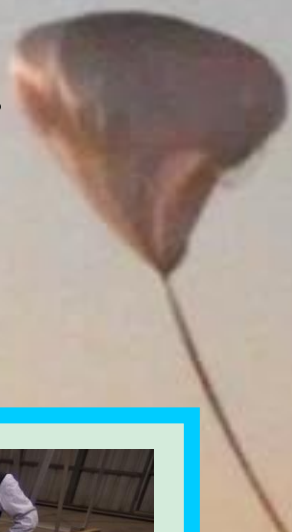
2016/10/30



GRAINE 計画

GRAINE実験では原子核乾板を用いることで
高角度分解能の γ 線天体の精密観測を目指す

2015年5月
オーストラリアにて…



観測、回収、現像に成功!!
⇒ フライト乾板を得ることができた

チェンバーの面積 = 0.4m²



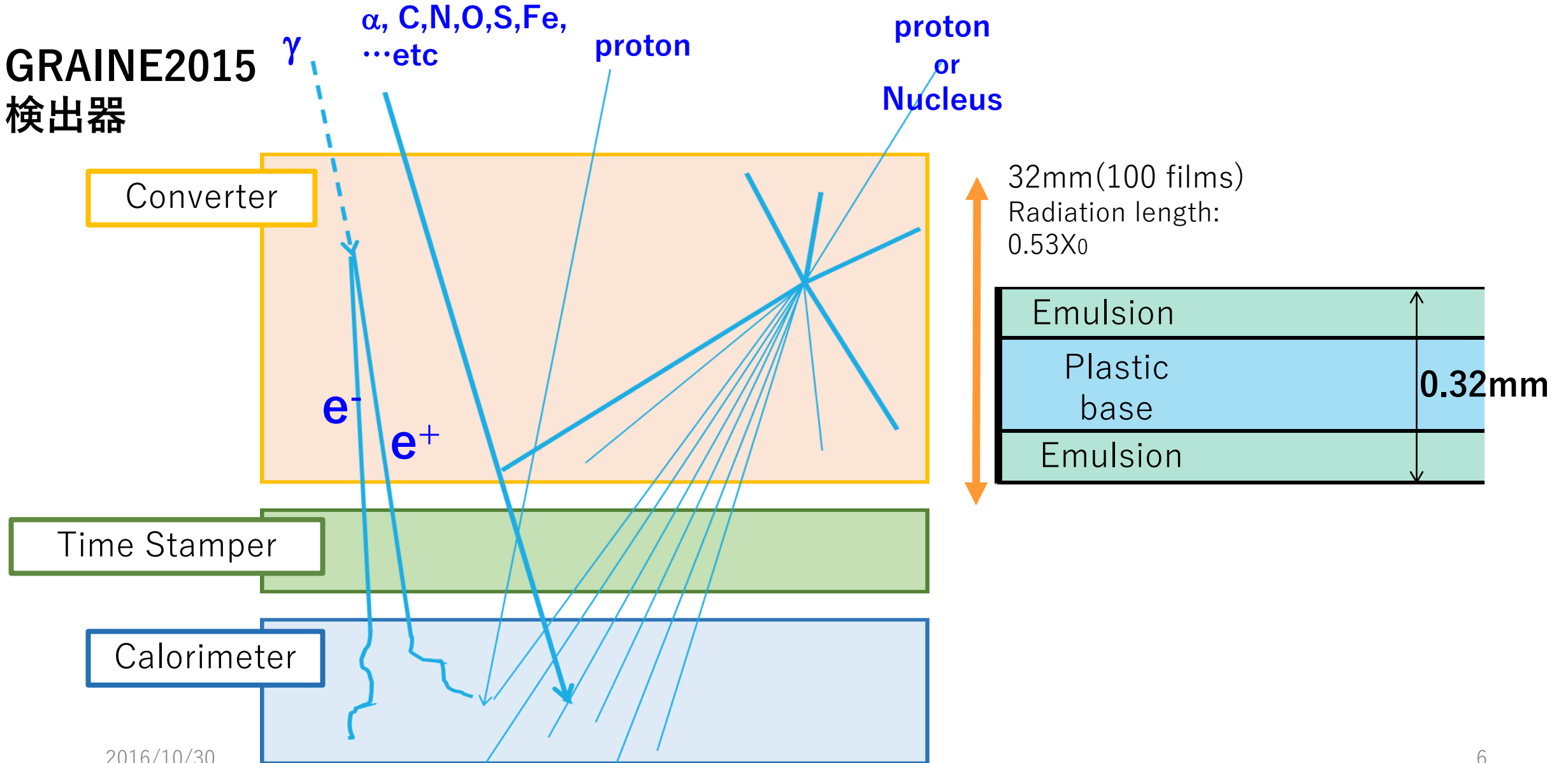
2016/10/30

高速自動飛跡読取装置 (HTS) @名古屋大学F研



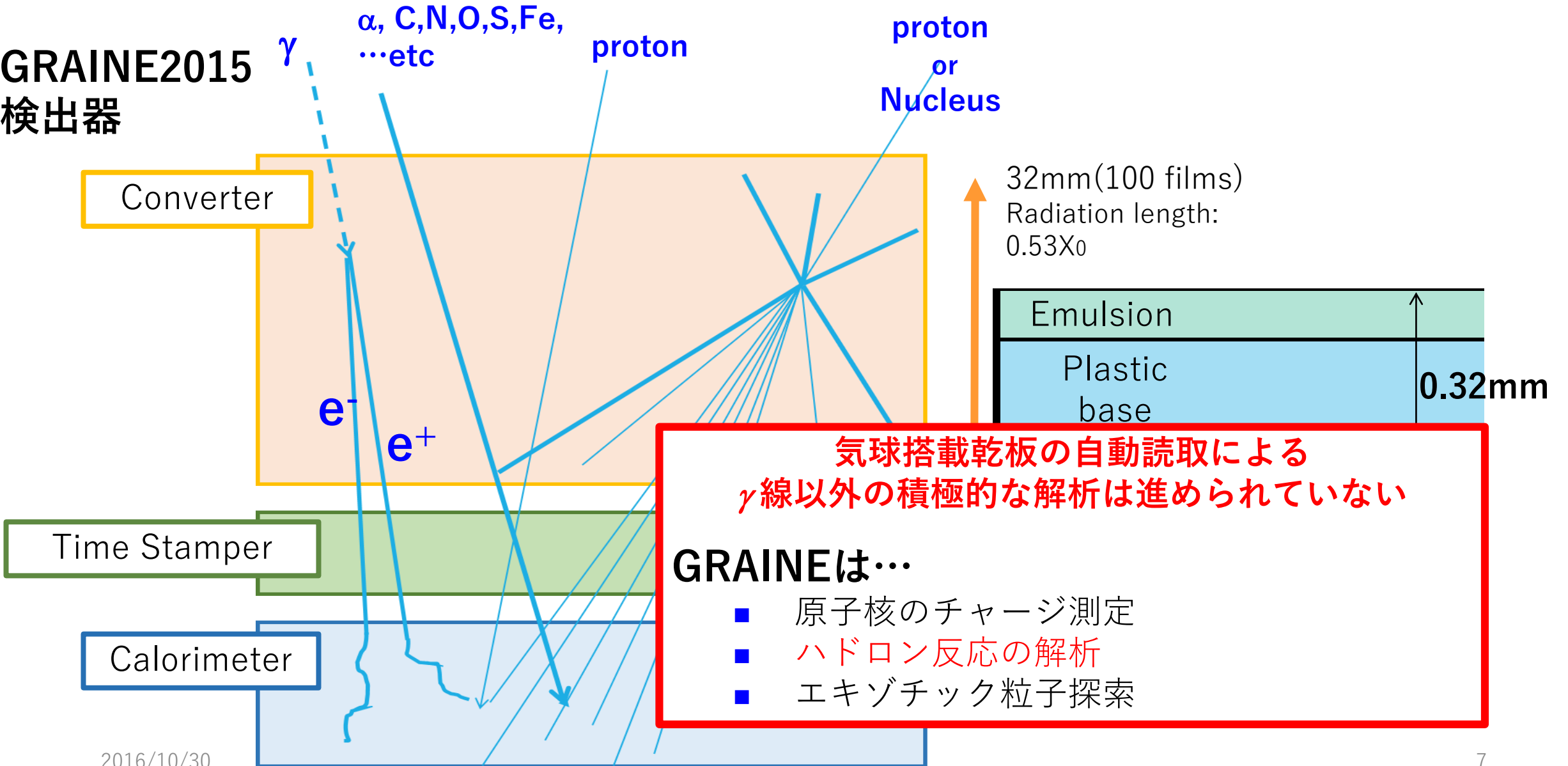
気球実験に用いた乾板に記録される荷電粒子飛跡

GRAINE2015 検出器



気球実験に用いた乾板に記録される荷電粒子飛跡

GRAINE2015 検出器



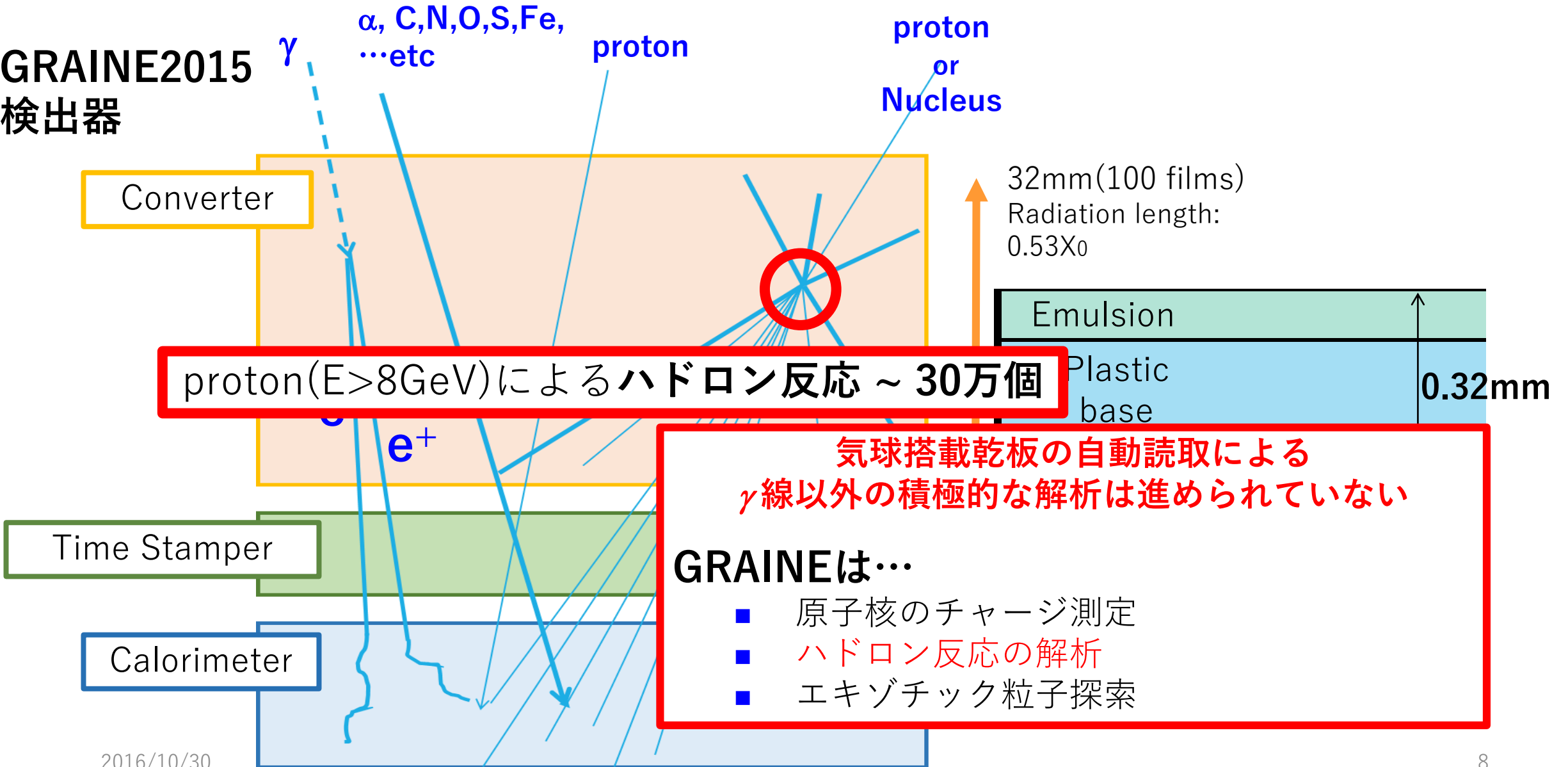
気球搭載乾板の自動読取による
 γ 線以外の積極的な解析は進められていない

GRAINEは…

- 原子核のチャージ測定
- ハドロン反応の解析
- エキゾチック粒子探索

気球実験に用いた乾板に記録される荷電粒子飛跡

GRAINE2015 検出器



proton($E > 8\text{GeV}$)によるハドロン反応 ~ 30万個

気球搭載乾板の自動読取による
 γ 線以外の積極的な解析は進められていない

GRAINEは...

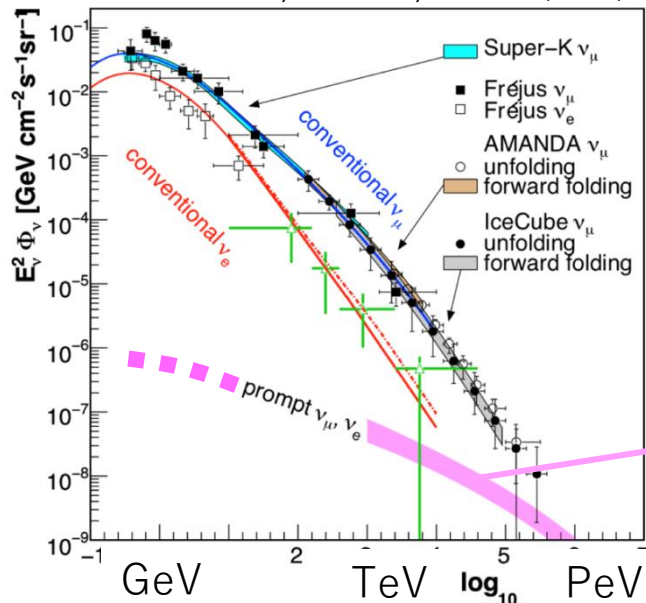
- 原子核のチャージ測定
- ハドロン反応の解析
- エキゾチック粒子探索

ハドロン反応の系統的な検出・解析

上空でのCharm粒子生成率の測定

大気 ν のエネルギースペクトル

IceCube Coll., PRL 110, 151105 (2013)



原子核乾板

← 短寿命で崩壊するCharm粒子($c\tau \sim$ 数 $100\mu\text{m}$)の検出に有効なディテクター

全ハドロン反応の解析

→ 1次宇宙線起因のCharm粒子生成率の測定

→ **prompt ν の推定にフィードバック**

Prompt ν

PeV領域での宇宙 ν 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 ν
($D^+ \rightarrow e^+, \nu_e, D^0 \rightarrow K^-, e^+, \nu_e \dots$ etc)

技術確立

大多数ハドロン反応の解析

自動読取によるハドロン反応の解析手法の開発

- ・ハドロン反応の二次粒子・入射粒子等の選出
- ・ハドロン反応のトポロジー抽出

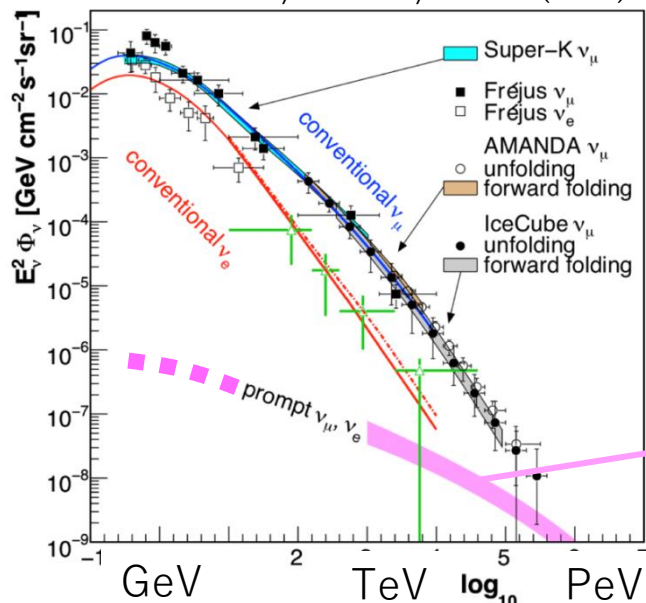
シミュレーション (MC) との比較

- 一次宇宙線フラックスの測定
 - 加速器実験との比較
- ⇒ **開発手法の妥当性の確認**

ハドロン反応の系統的な検出・解析

上空でのCharm粒子生成率の測定

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



原子核乾板

← 短寿命で崩壊するCharm粒子($c\tau \sim$ 数100 μm)の検出に有効なディテクター

全ハドロン反応の解析

→ 1次宇宙線起因のCharm粒子生成率の測定

→ **prompt ν の推定にフィードバック**

Prompt ν

PeV領域での宇宙 ν 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 ν
($D^+ \rightarrow e^+, \nu_e, D^0 \rightarrow K^-, e^+, \nu_e \dots$ etc)

技術確立

大多数ハドロン反応の解析

自動読取によるハドロン反応の解析手法の開発

- ハドロン反応の二次粒子・入射粒子等の選出
- ハドロン反応のトポロジー抽出**

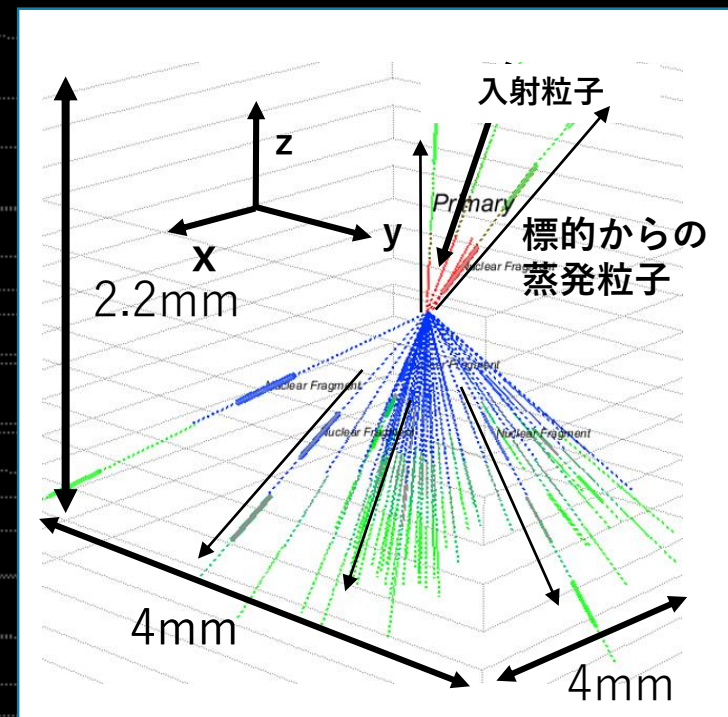
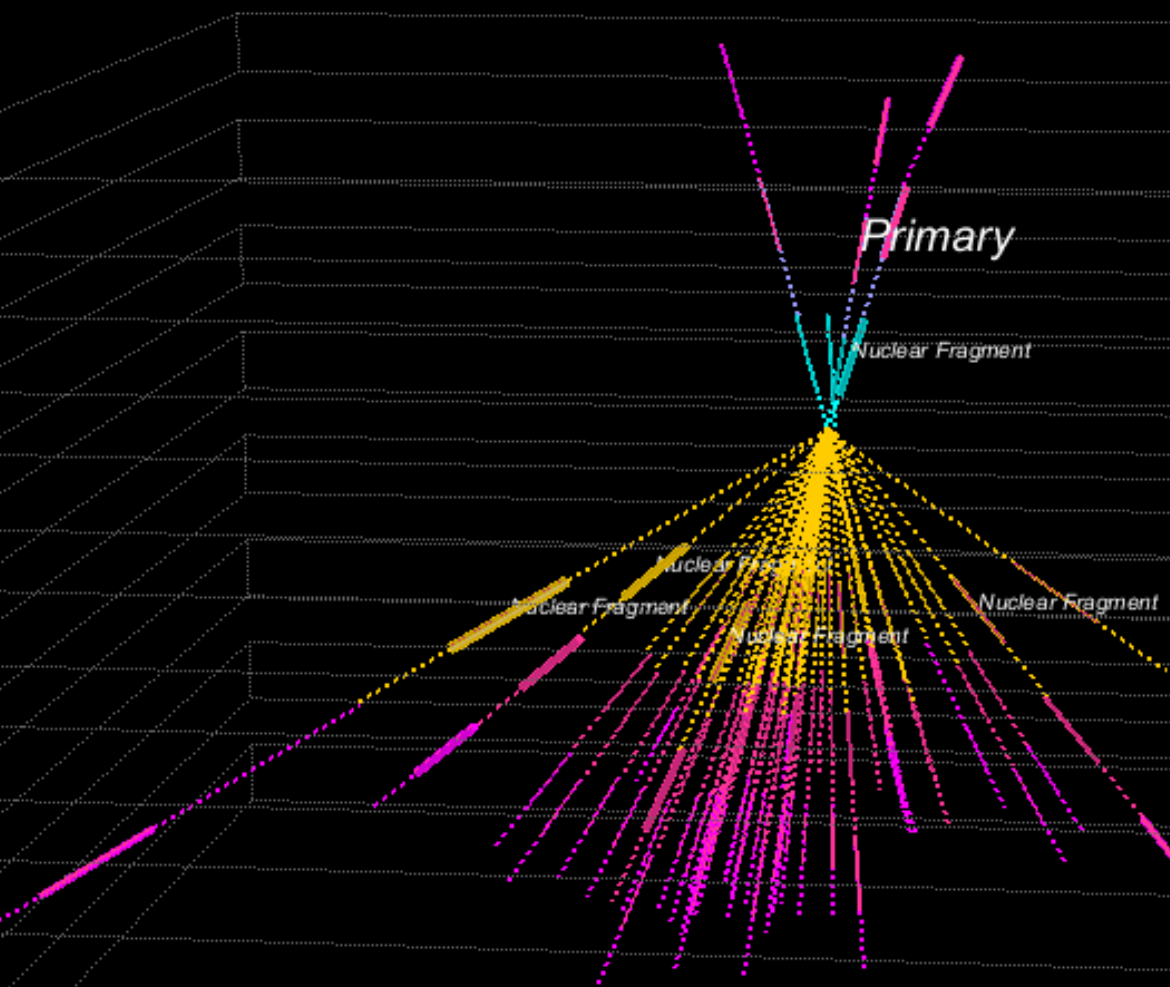
シミュレーション (MC) との比較

- 一次宇宙線フラックスの測定

ある1例のハドロン反応の詳細解析

確認

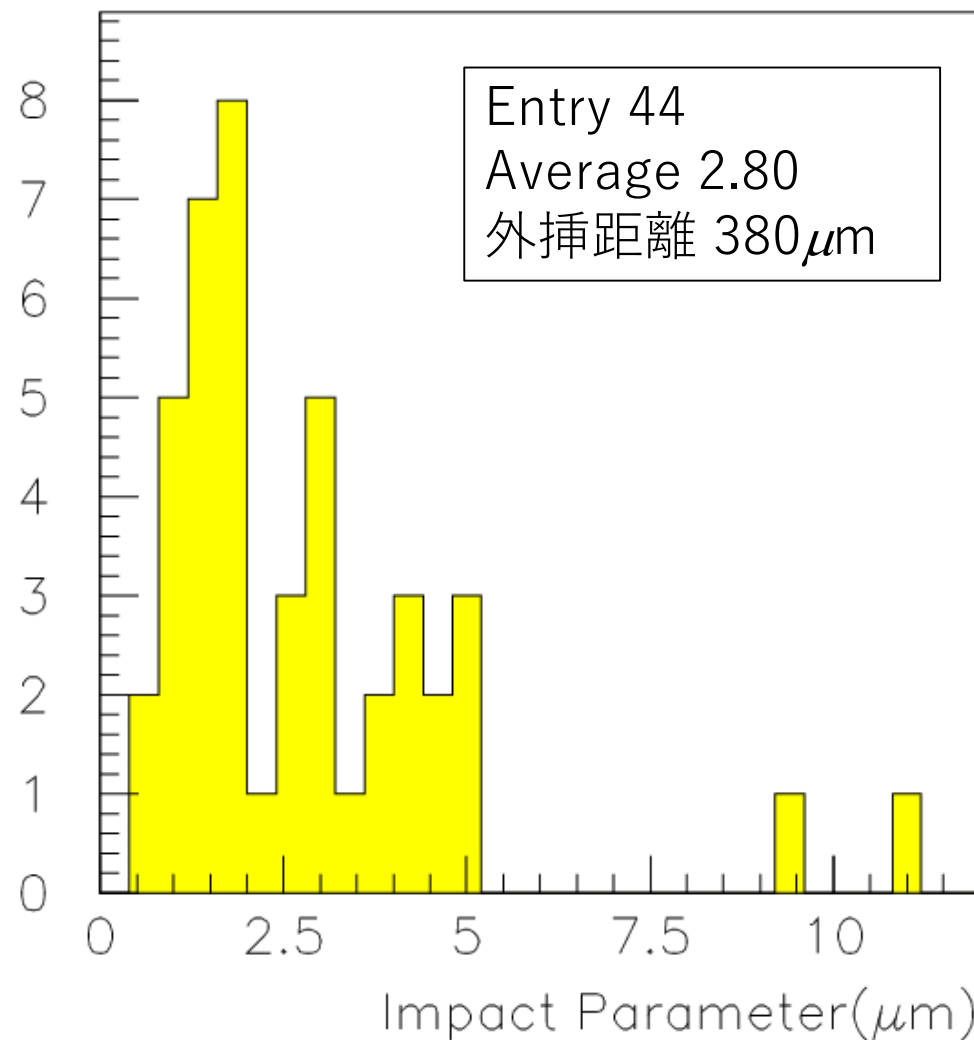
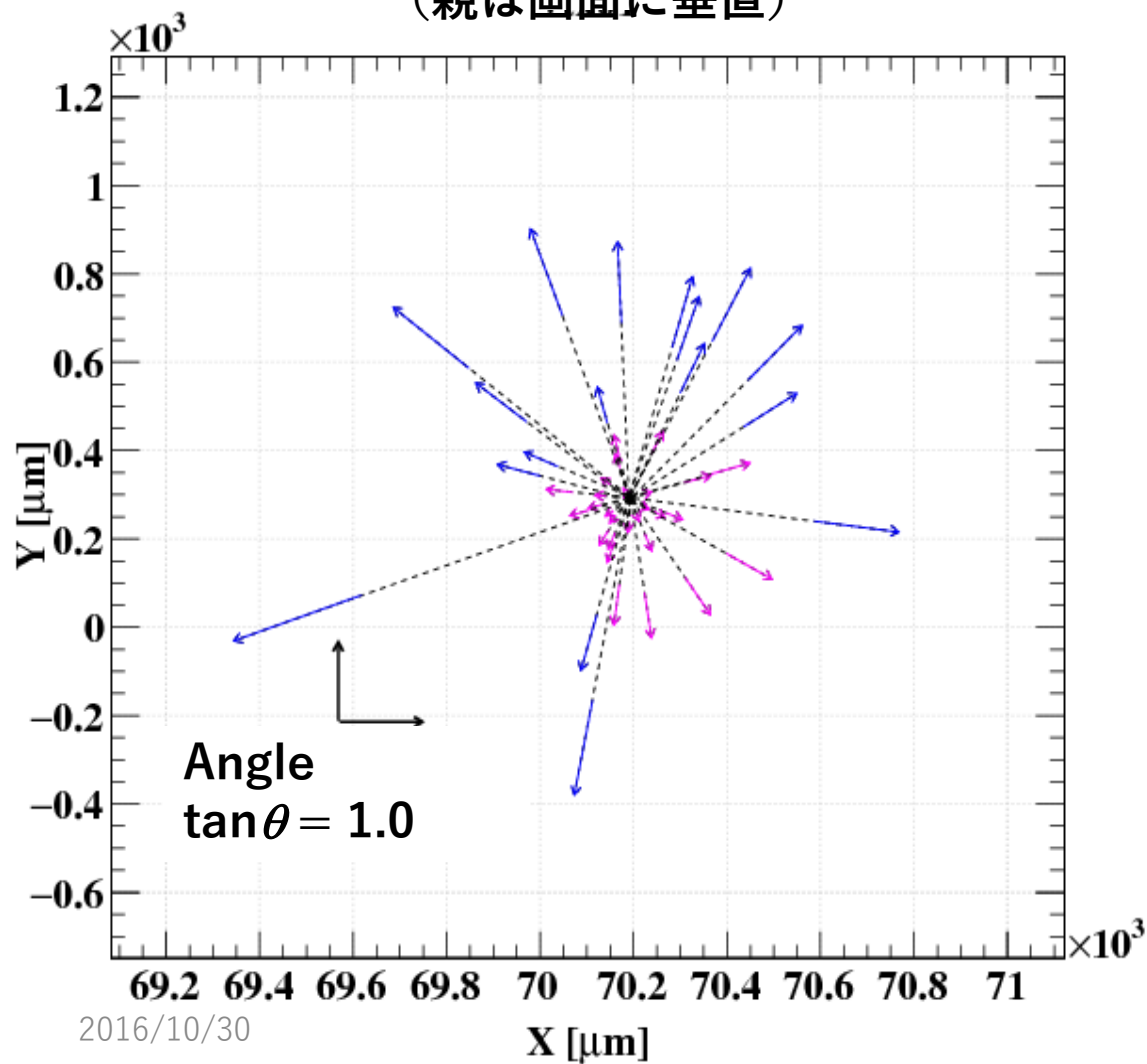
GRAINEチェンバーに記録されたハドロン反応



- 44本の二次粒子候補に対して、自動読取から
- ✓ 反応点の決定精度の確認
 - ✓ $-dE/dx$ を利用した蒸発核子の特定
 - ✓ Pseudo Rapidity分布からの入射エネルギー推定

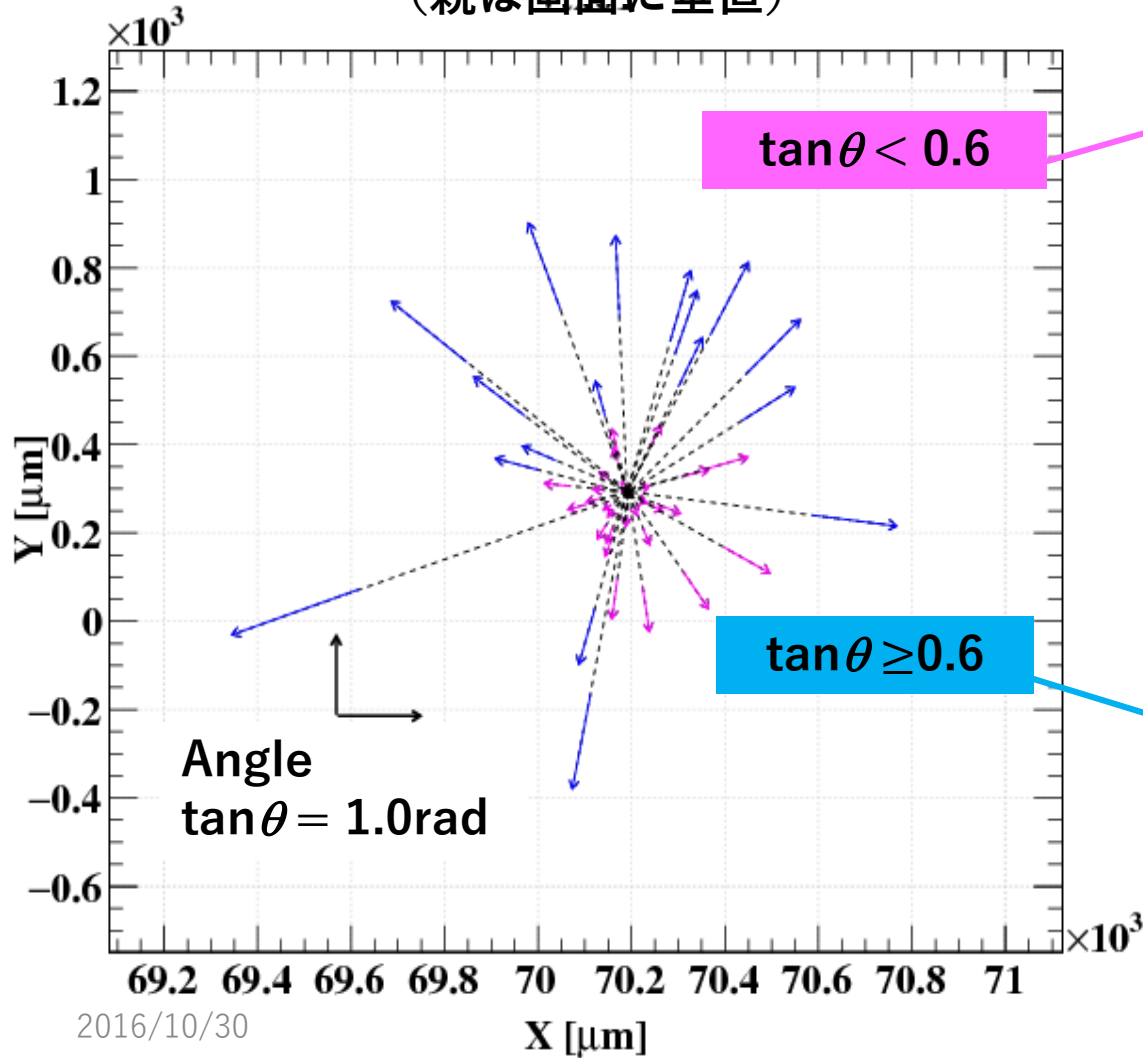
反応点の決定精度の確認

Primary vertexから
380 μm 下流での2次粒子の位置分布
(親は画面に垂直)

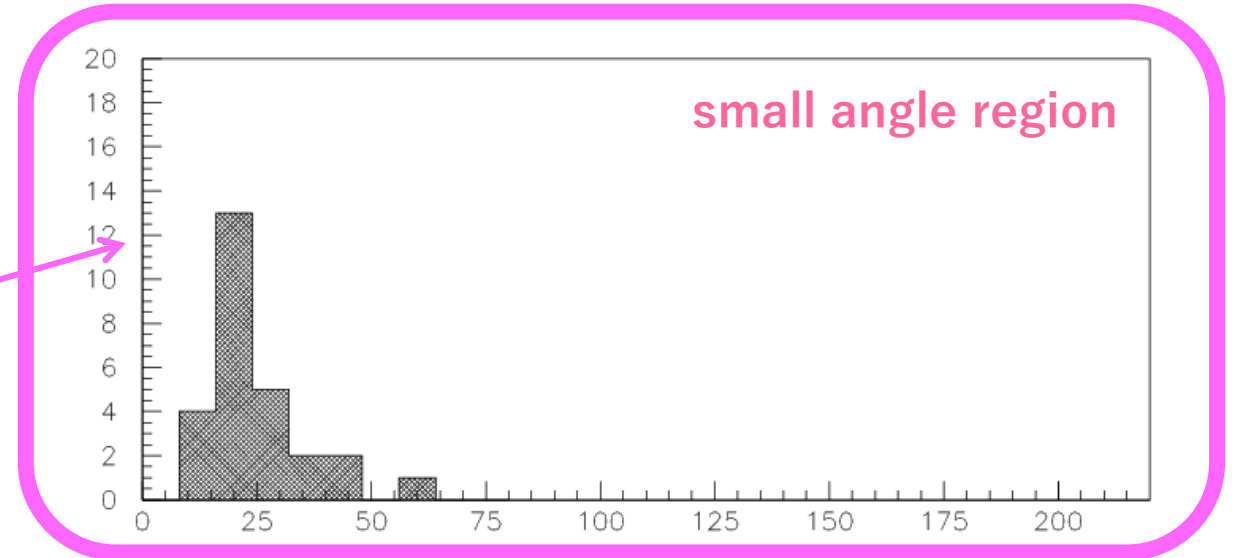


-dE/dxを利用した蒸発核子の特定

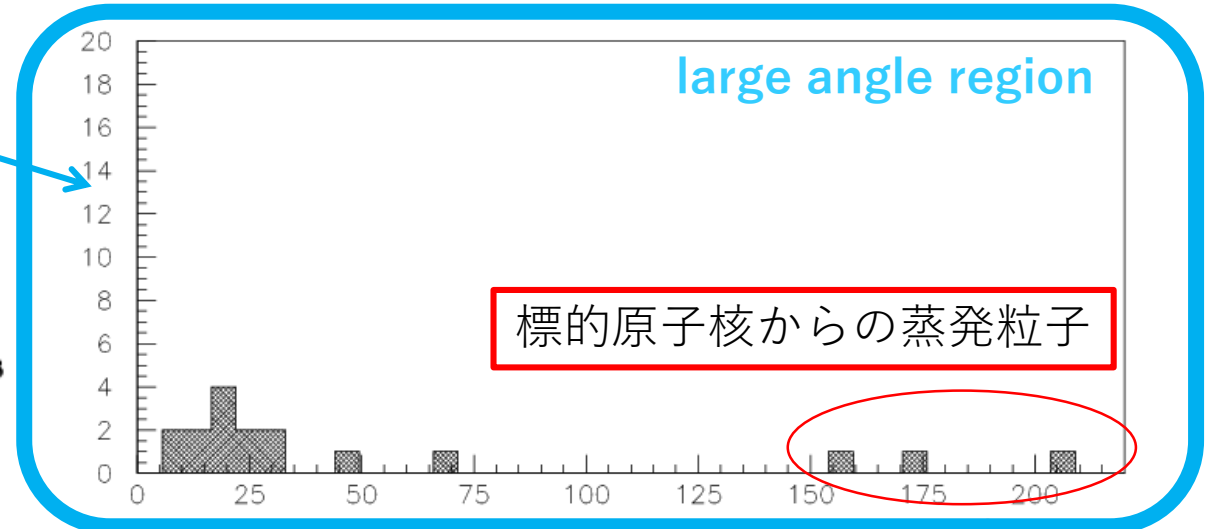
Primary vertexから
380 μm 下流での2次粒子の位置分布
(親は画面に垂直)



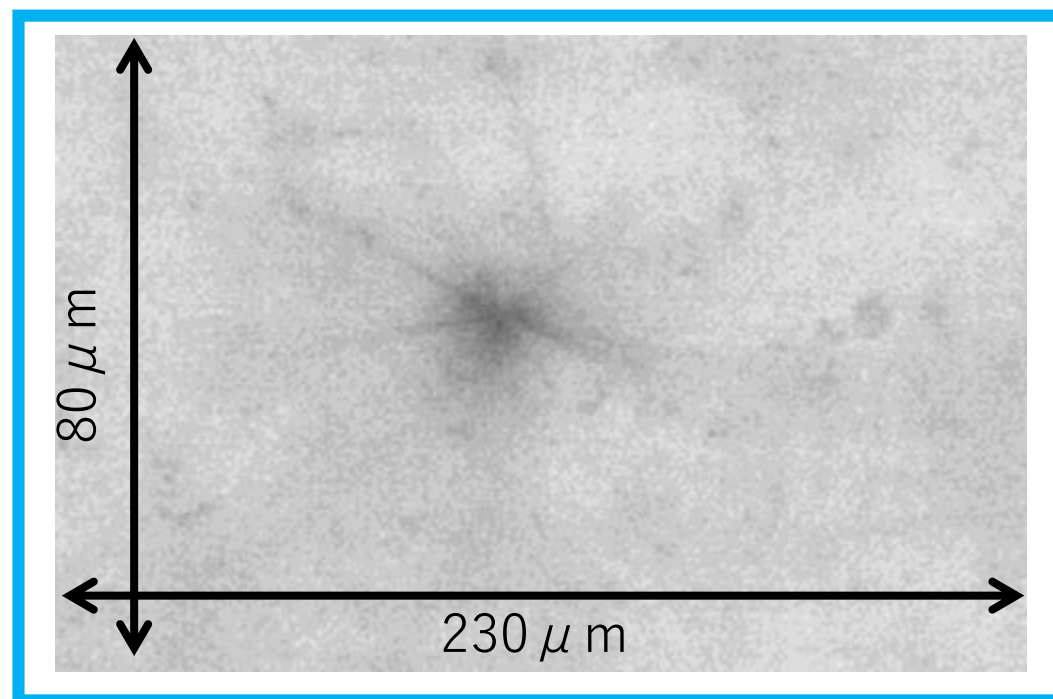
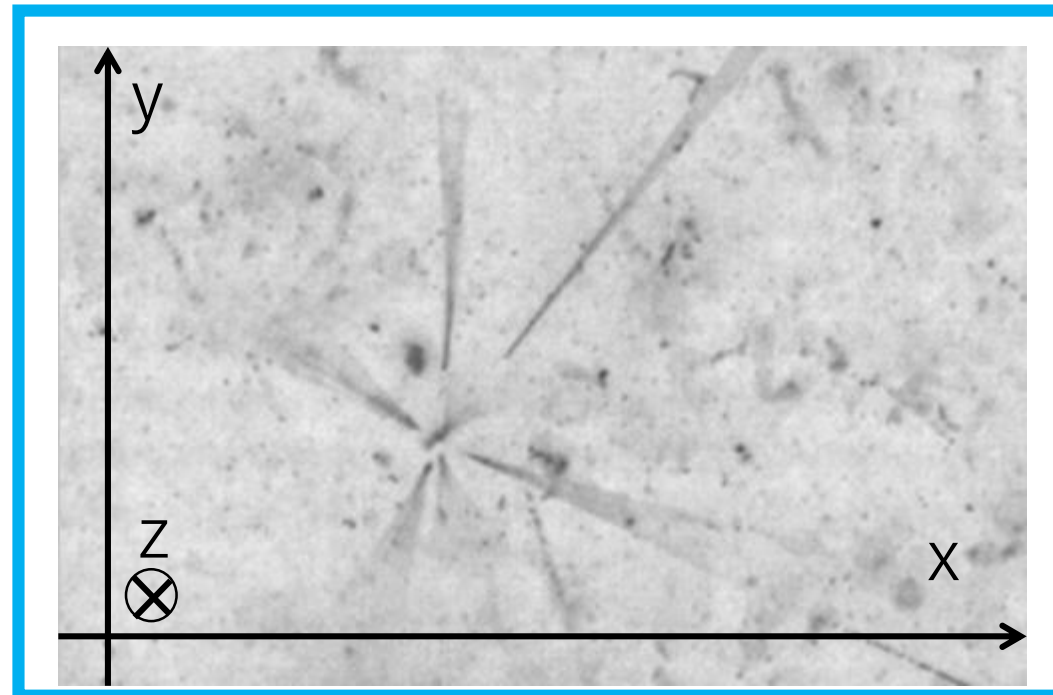
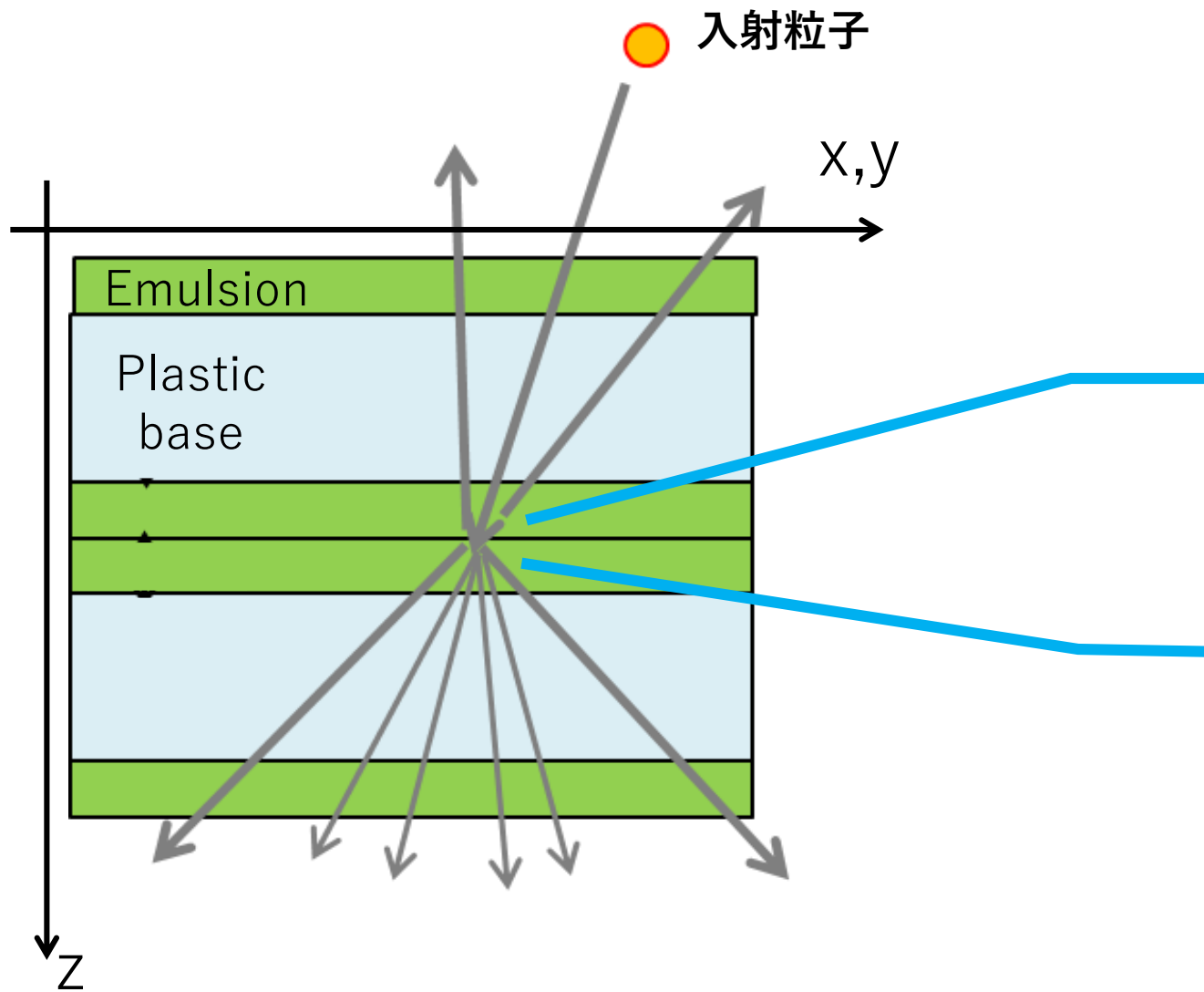
PhV (\sim trackの濃さ = $-dE/dx$)



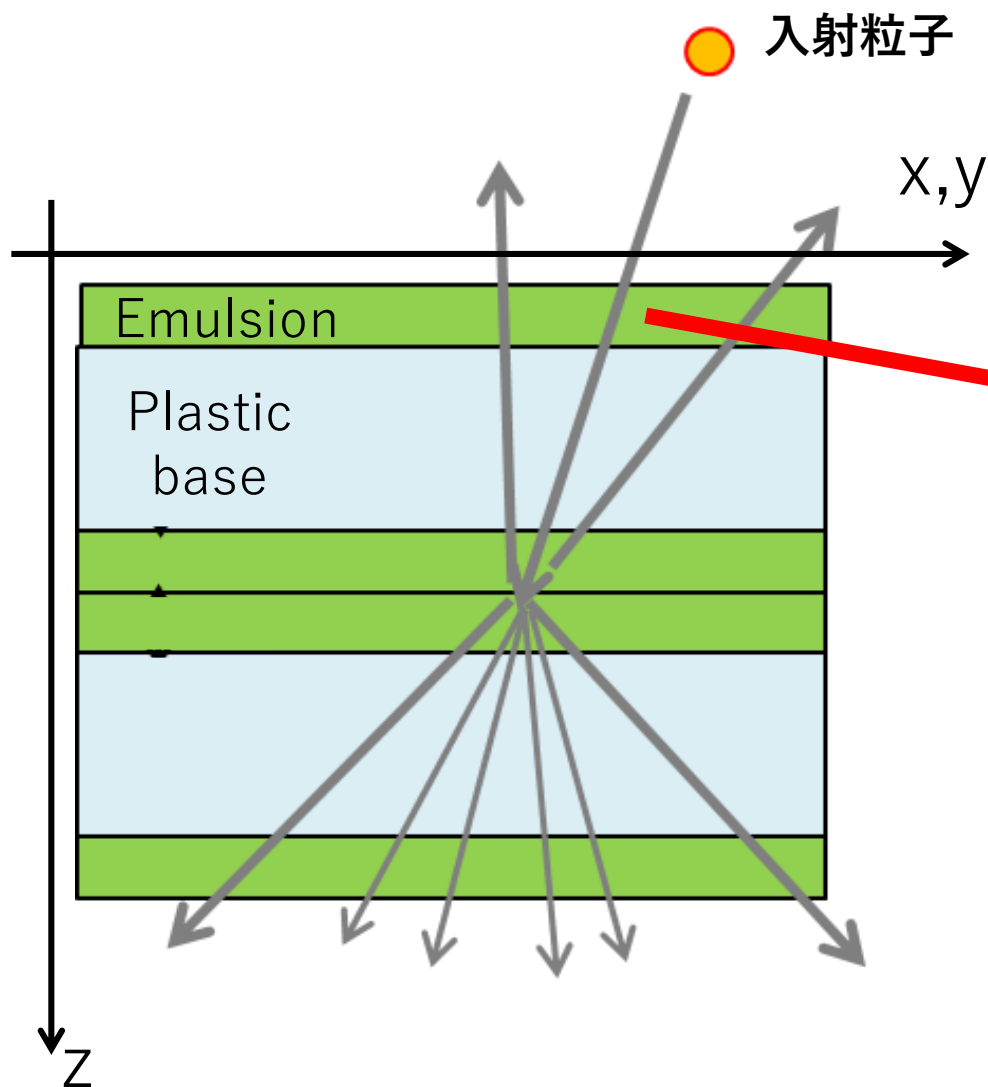
薄 $-dE/dx$ 小 \longrightarrow 濃 $-dE/dx$ 大



顕微鏡画像



顕微鏡画像



100 μm



δ 線

C, N, O ? ?

δ 線の本数： N_δ

$$N_\delta = H \frac{z^2}{\beta^2} \left(\frac{m_e c^2}{E_1} - \frac{m_e c^2}{E_2} \right)$$

E_1 ： δ 線の最小エネルギー

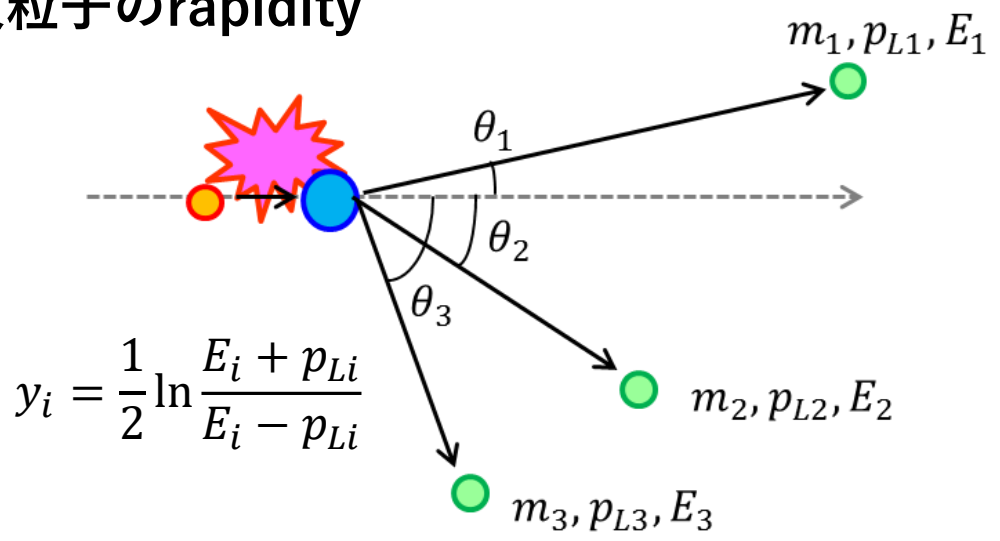
E_2 ： δ 線の最大エネルギー

= 2次電子の最大エネルギー

$$\Rightarrow E_2 = 2m_e c^2 \beta^2$$

2次粒子のPseudo Rapidity分布を用いた 入射粒子エネルギーの推定(Castagnoli法)

2次粒子のrapidity

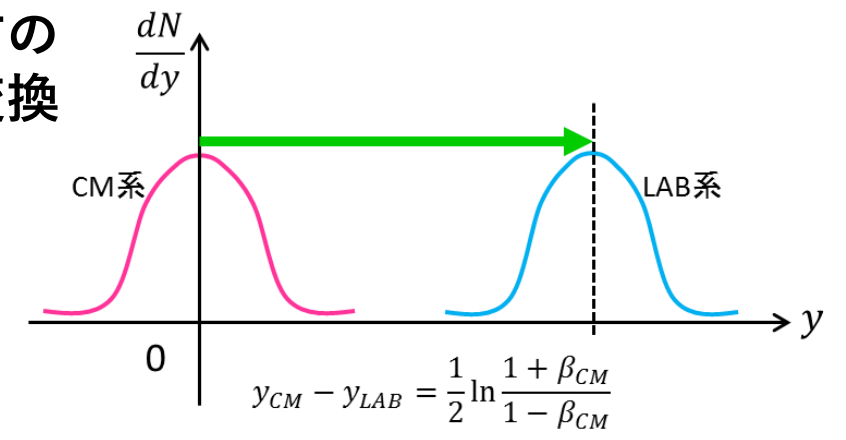


Pseudo Rapidity定義

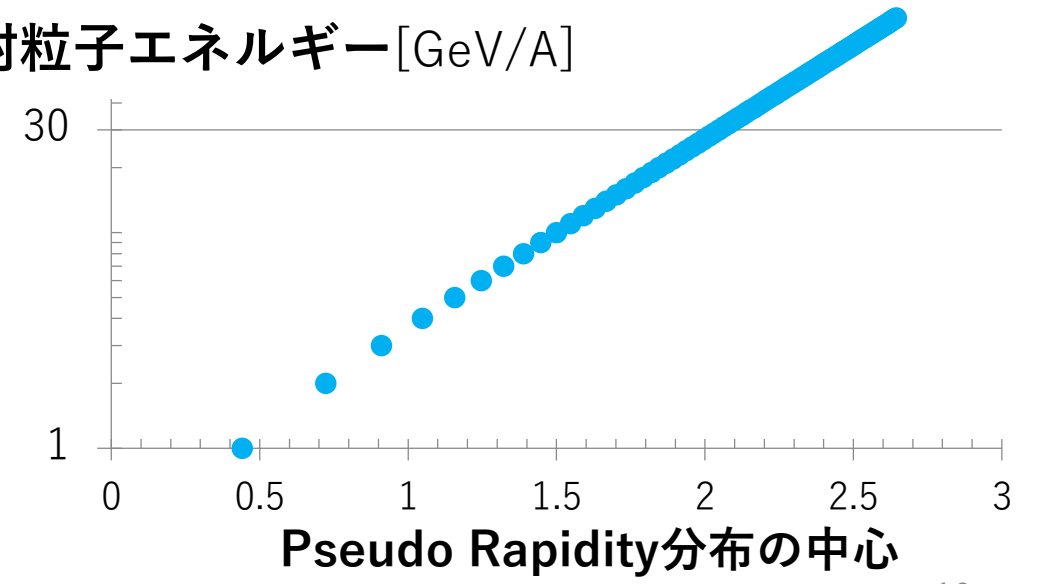
粒子が高速($\beta \sim 1$)で飛行しているとき

$$y_i \sim -\ln \tan \frac{\theta_i}{2} \equiv \eta_i$$

Rapidity分布の ローレンツ変換

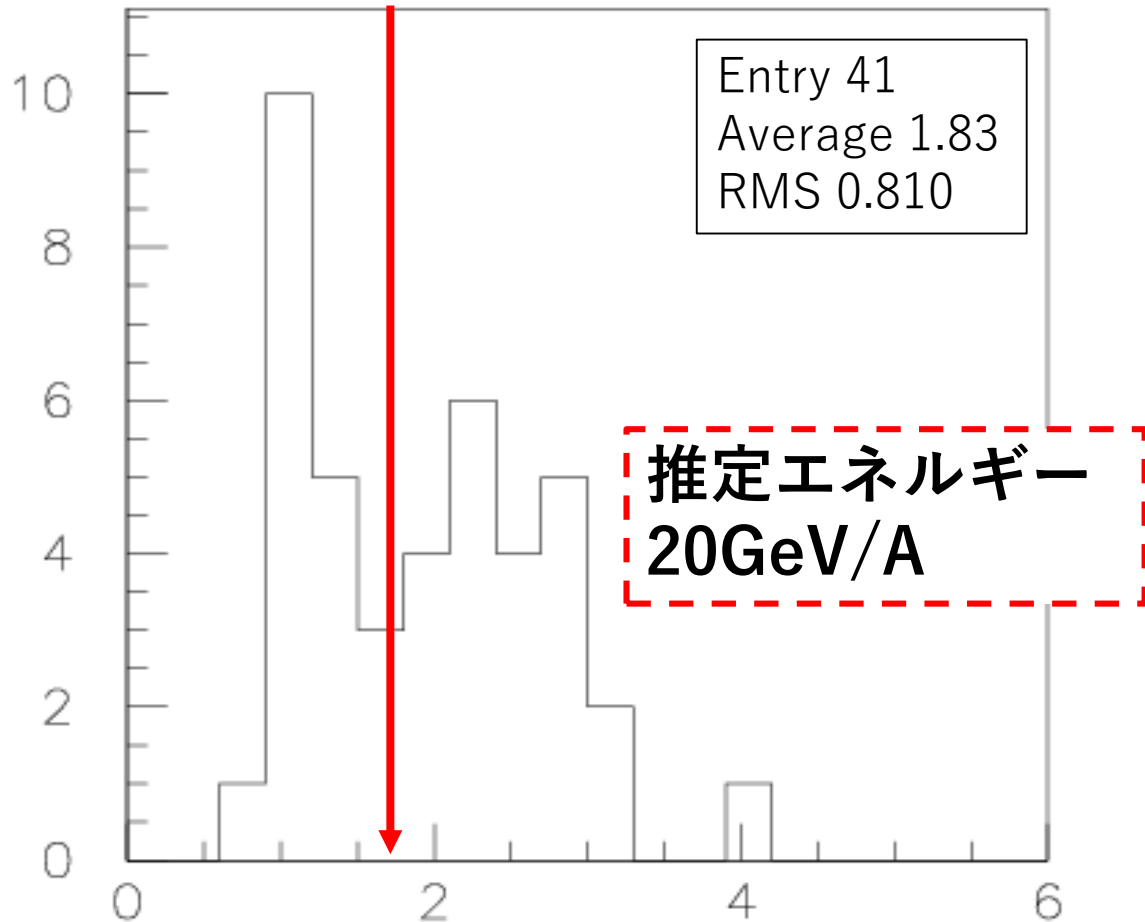


入射粒子エネルギー [GeV/A]



2次粒子のPseudo Rapidity分布を用いた 入射粒子エネルギーの推定(Castagnoli法)

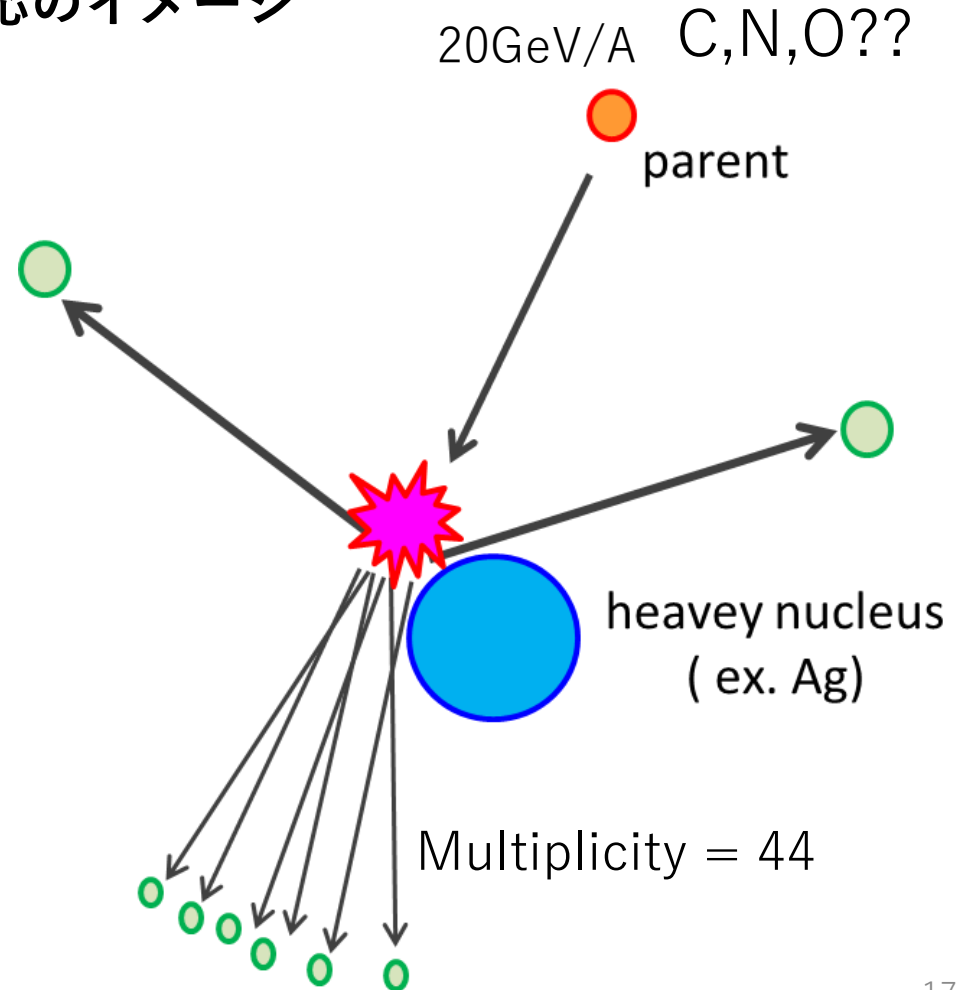
Paused Rapidity分布 (データ)



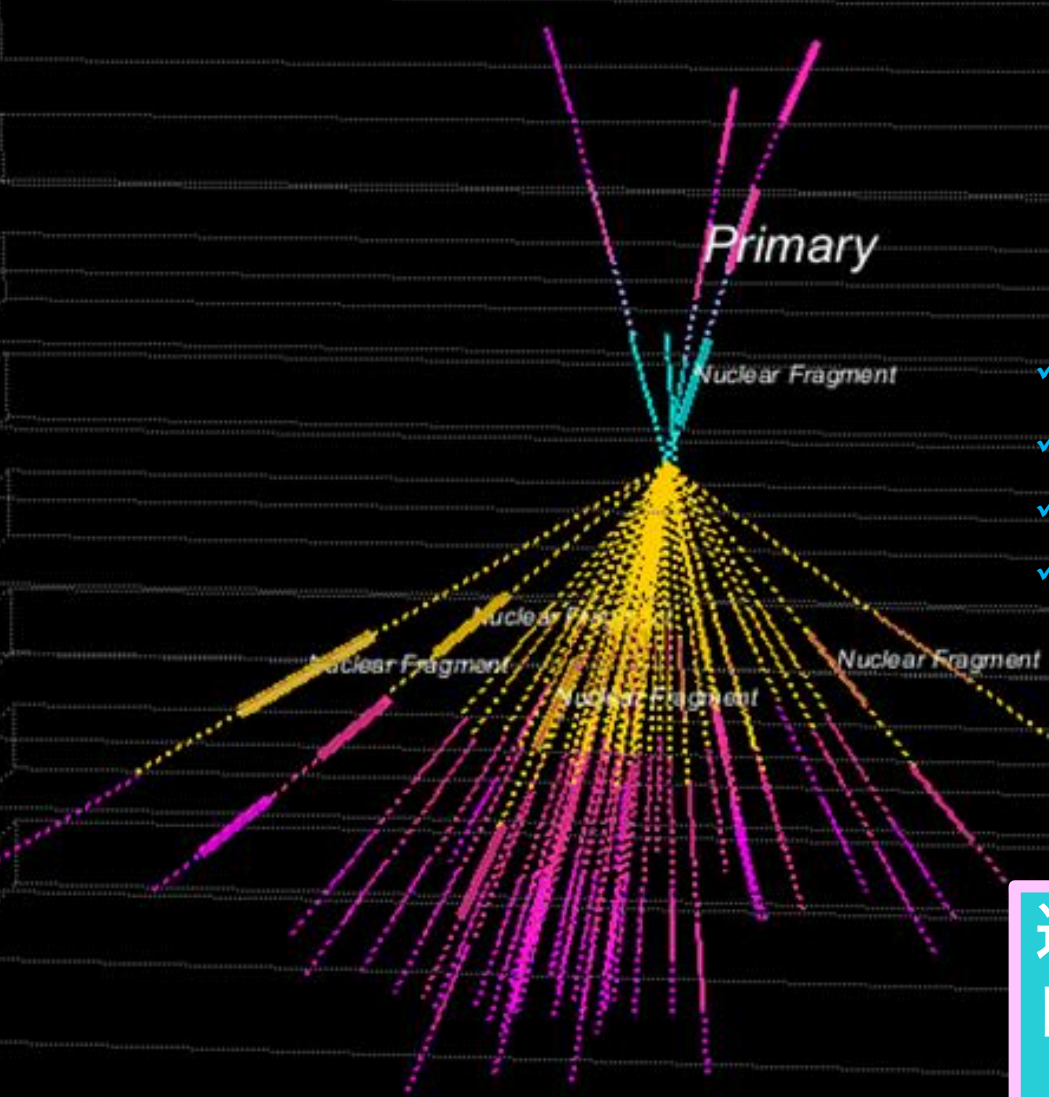
2016/10/30

$-\ln(\tan \theta / 2)$

スキャンデータから考えられる
衝突反応のイメージ



ハドロン反応の自動解析で得られた結果

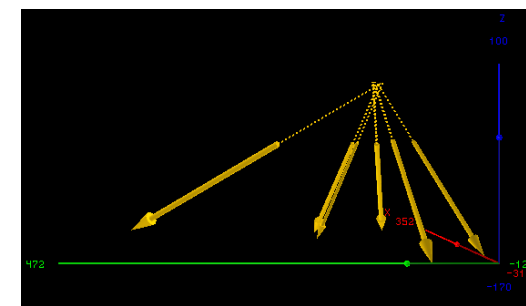
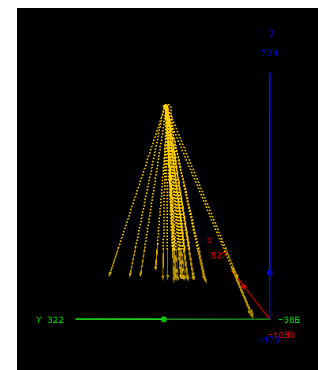
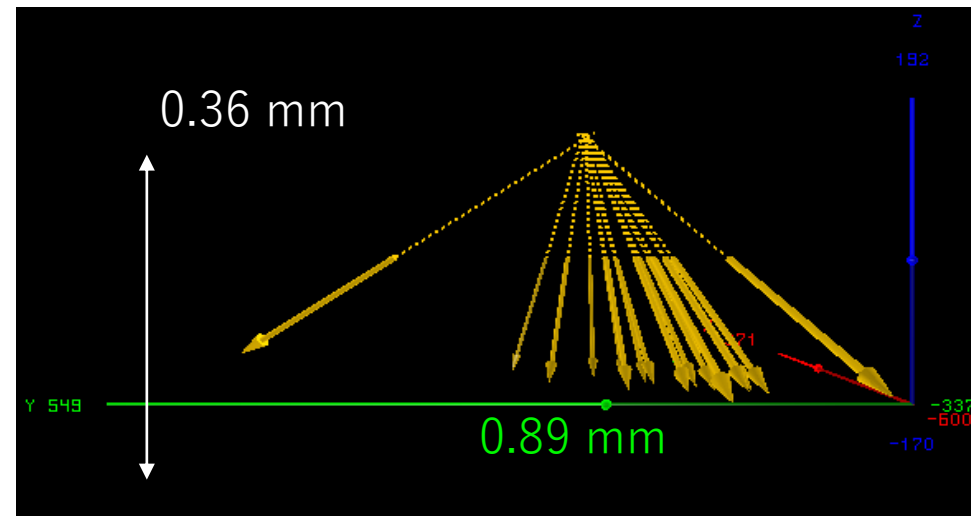
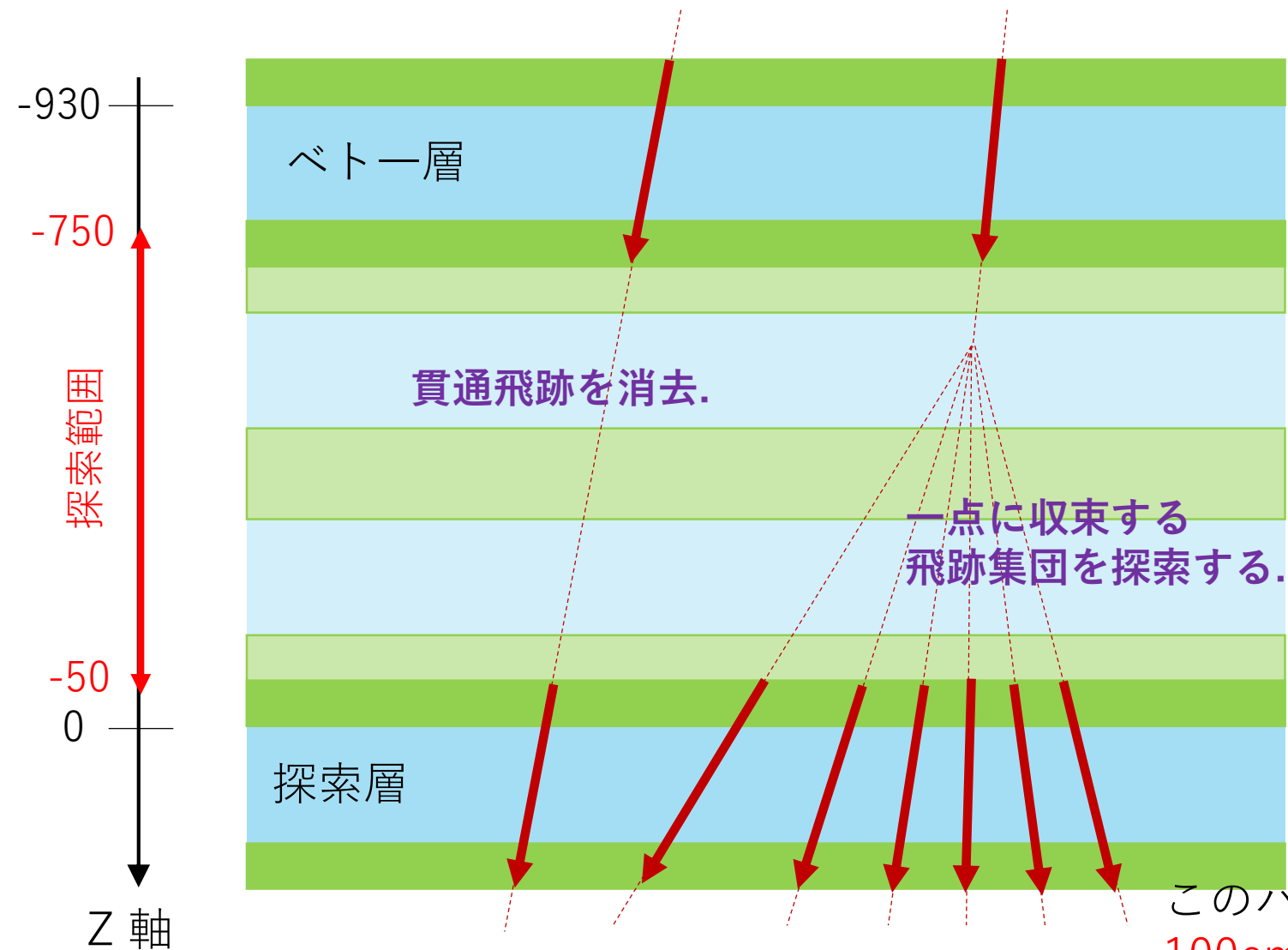


- ✓ 反応起因の生成粒子は44本（二次粒子 41 + 蒸発核子 3）
- ✓ 反応点の決定精度はサブミクロン
- ✓ δ 線から期待される入射粒子はC以上の原子核
- ✓ Pseudo Rapidity分布から入射エネルギーを20GeV/Aと推定

過去に行われた、手動でのハドロン反応の解析は自動解析でも可能である。

⇒ハドロン反応を系統的に探索・解析する

ハドロン反応点の系統的探索手法の開発

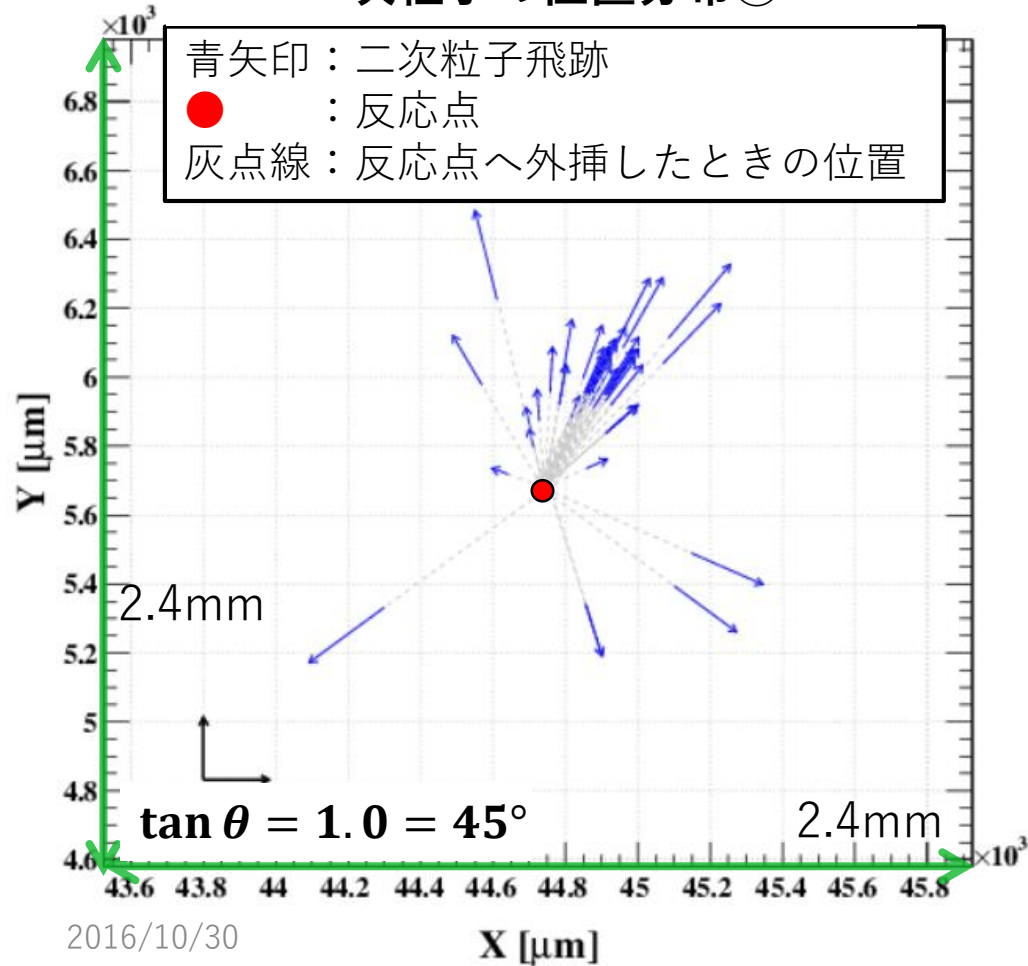


このパイロット解析では
 100cm²、41枚から2398個のハドロン反応を選出
 (マルチプリシティ 8以上)

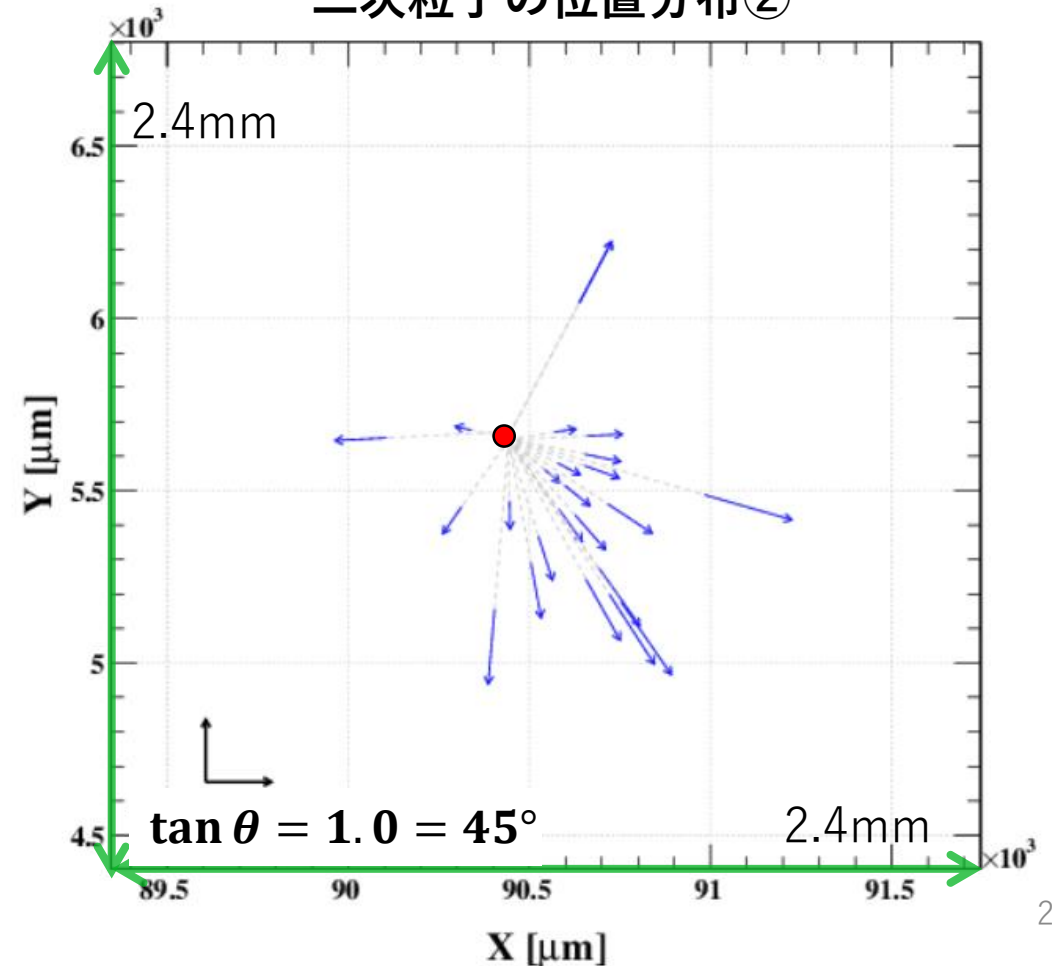
選出されたハドロン反応の二次粒子と反応点の例

1plate × 9cm × 13cm でハドロン反応探索 (多重度10以上)
⇒ **13例について、入射粒子探索**

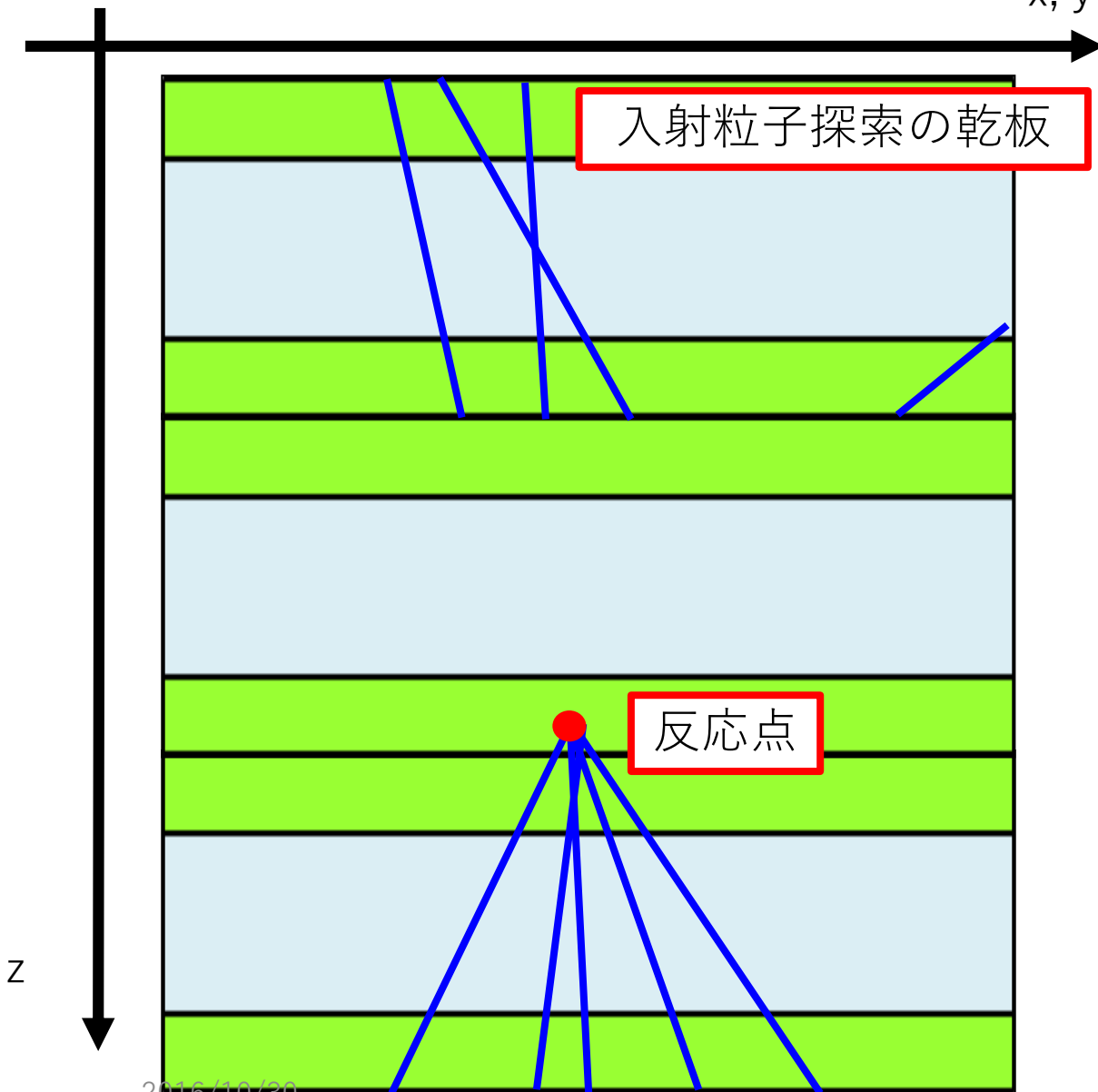
二次粒子の位置分布①



二次粒子の位置分布②

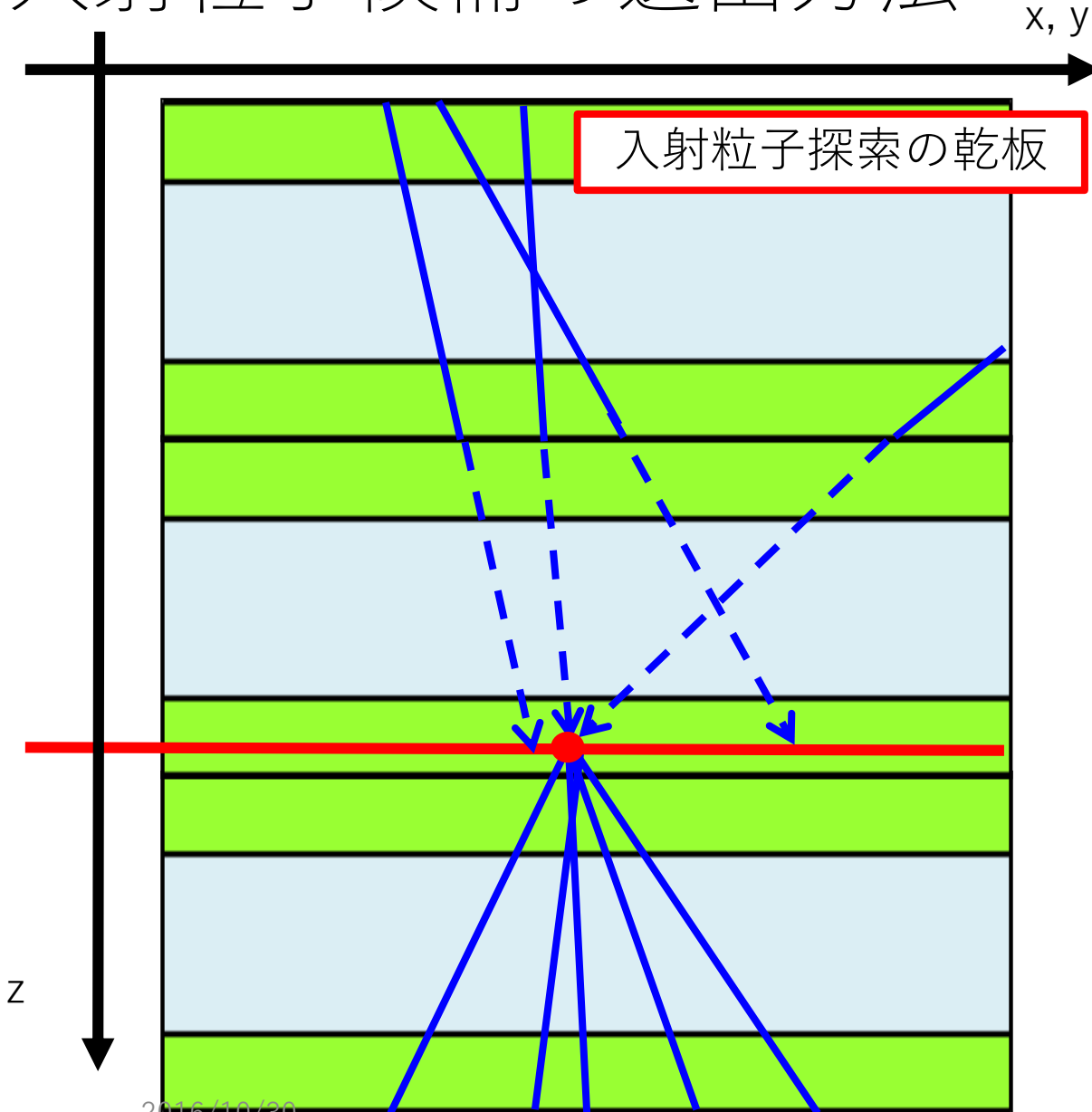


入射粒子候補の選出方法



1. 反応点を含まない上流の乾板で探索
2. 反応点位置まで、飛跡を外挿
3. 外挿後の位置が、乾板の角度精度による位置ずれの 3σ 以内

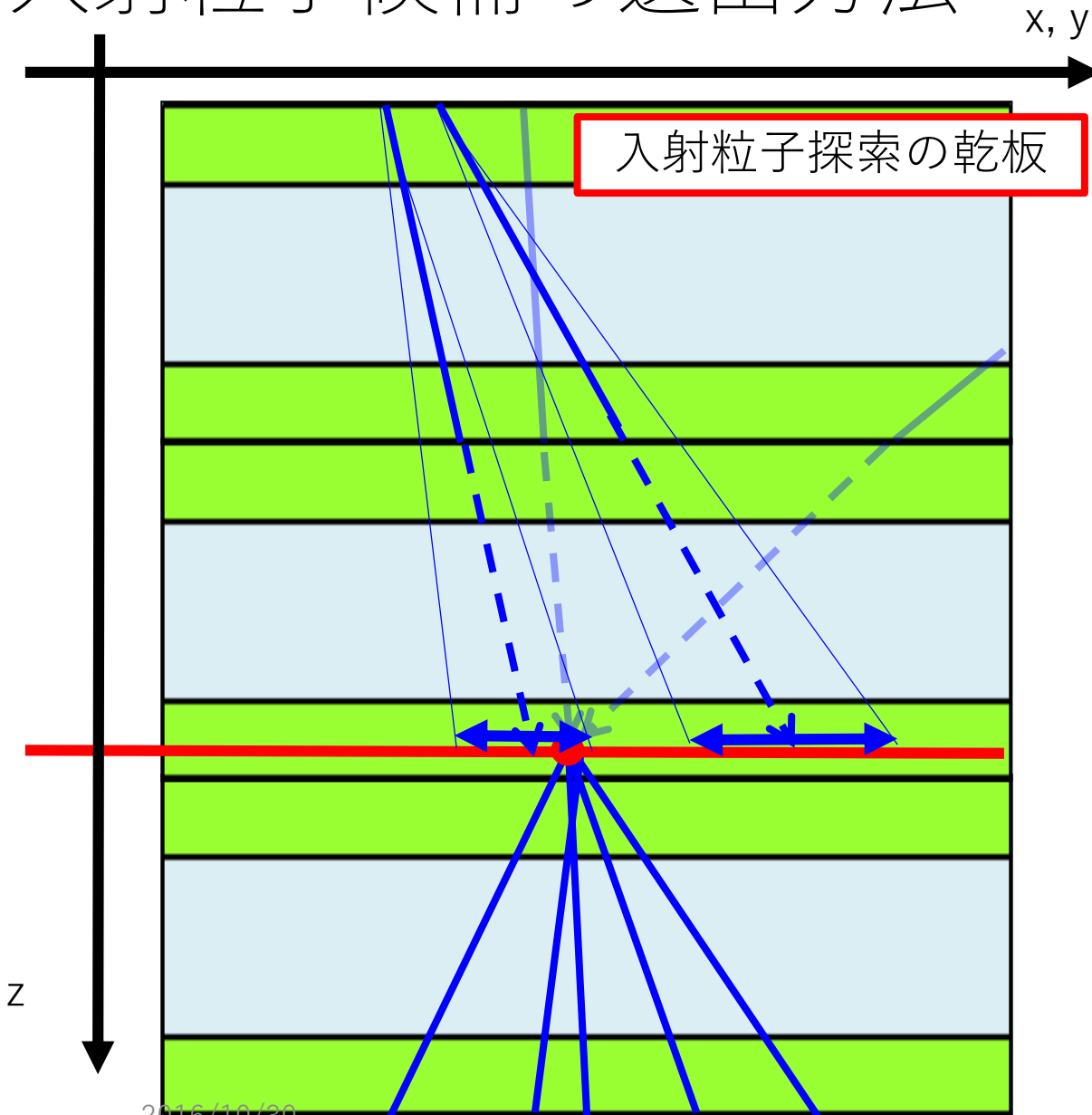
入射粒子候補の選出方法



入射粒子探索の乾板

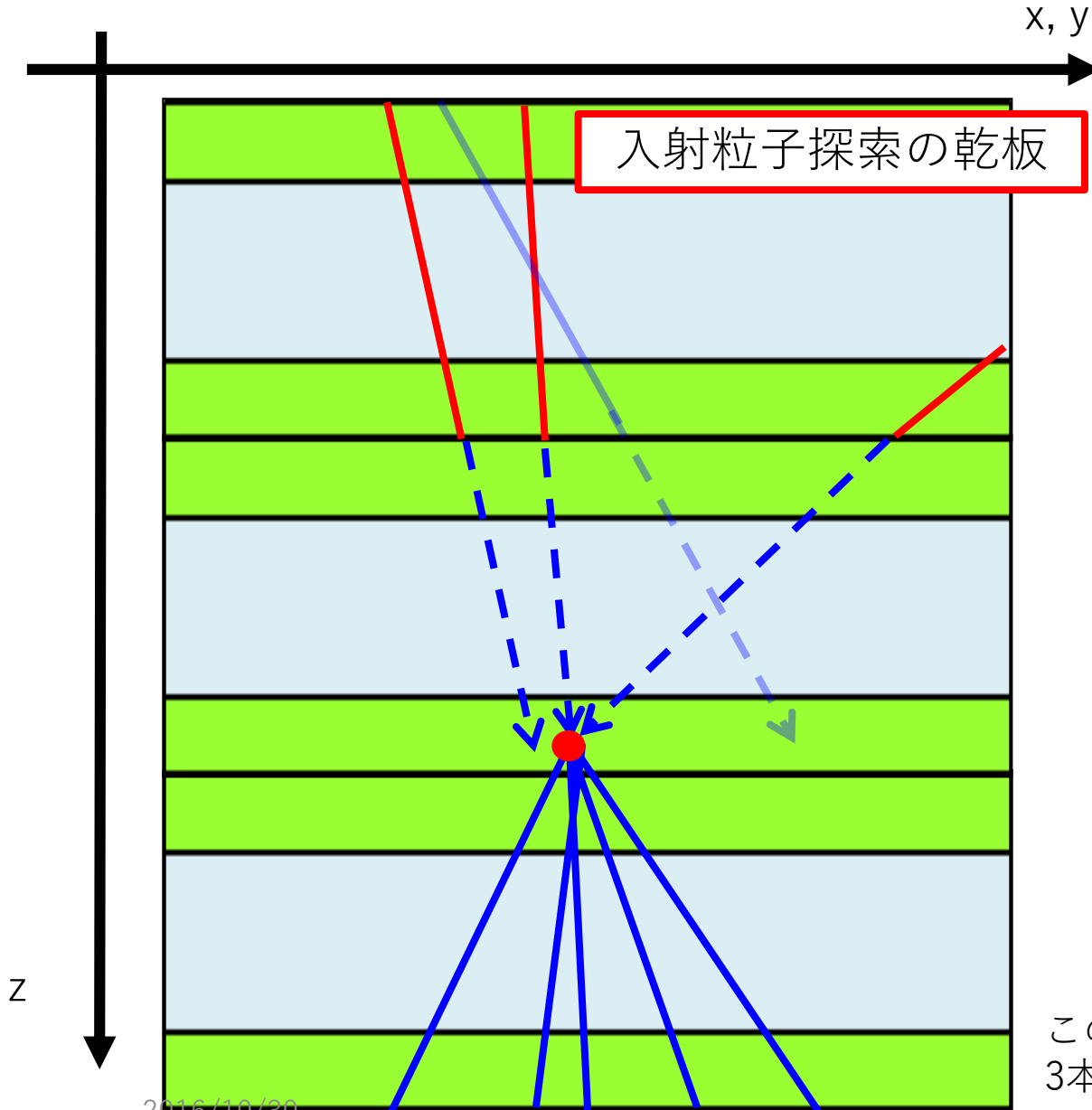
1. 反応点を含まない上流の乾板で探索
2. 反応点位置まで、飛跡を外挿
3. 外挿後の位置が、乾板の角度精度による位置ずれの 3σ 以内

入射粒子候補の選出方法



1. 反応点を含まない上流の乾板で探索
2. 反応点位置まで、飛跡を外挿
3. 外挿後の位置が、乾板の角度精度による位置ずれの 3σ 以内

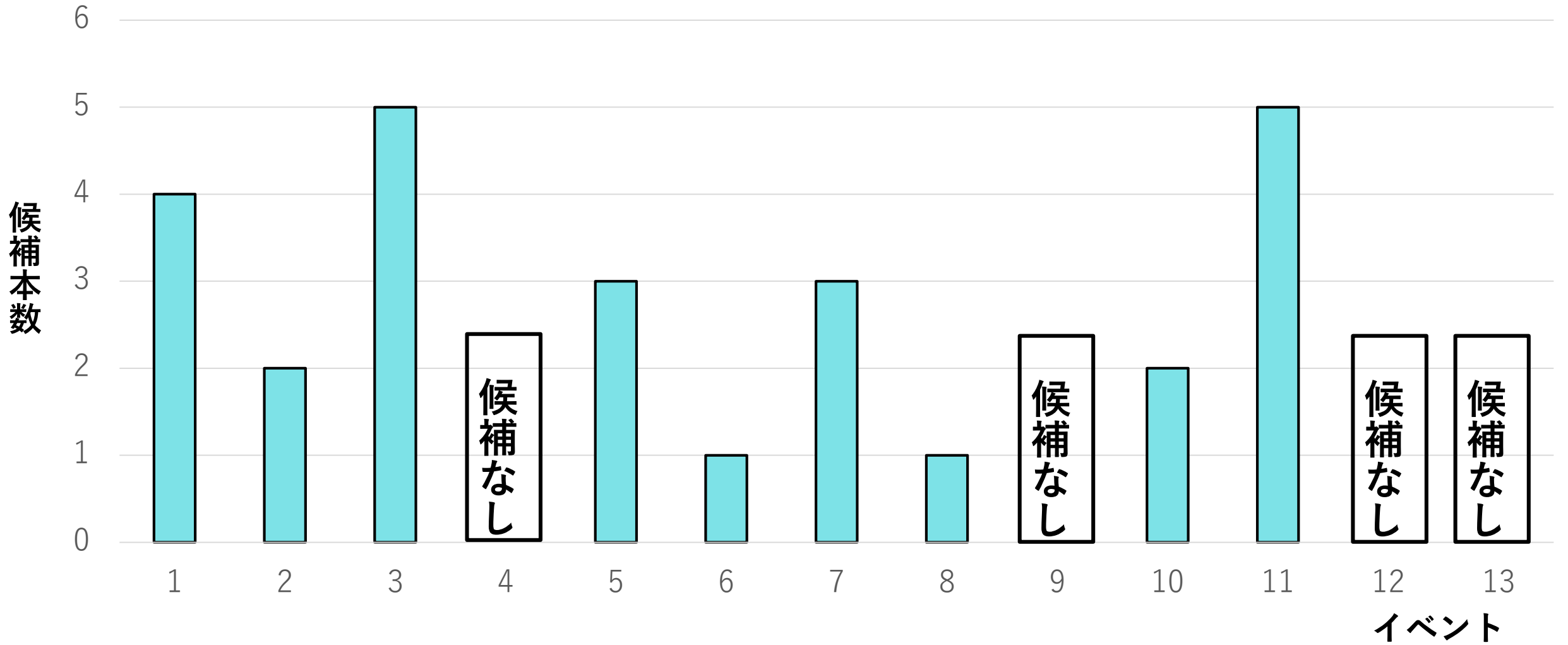
入射粒子候補の選出方法



1. 反応点を含まない上流の乾板で探索
2. 反応点位置まで、飛跡を外挿
3. 外挿後の位置が、乾板の角度精度による位置ずれの 3σ 以内

この絵の場合は
3本の入射粒子候補が選出される

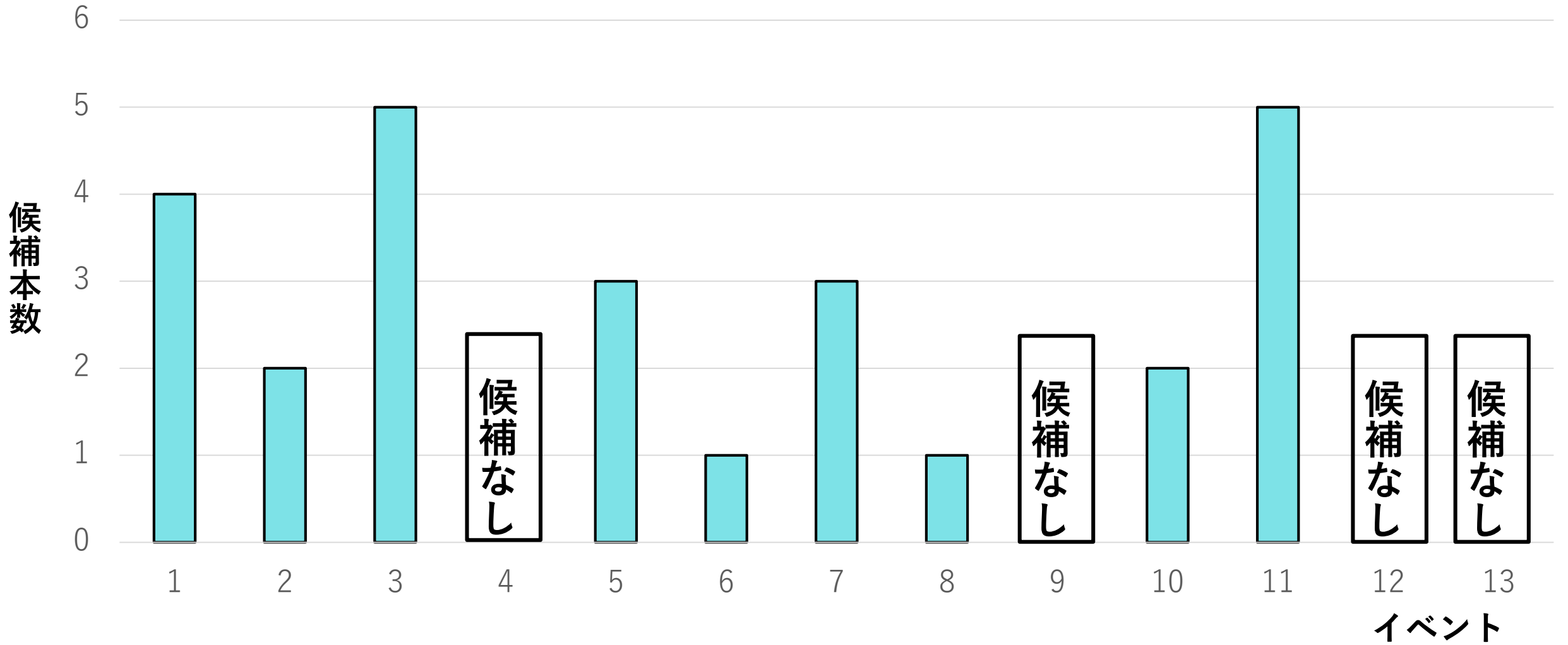
13個のハドロン反応の入射粒子候補の選出結果



- 候補なし：4個
- 複数候補：9個

バックスキャッター粒子を選び出している

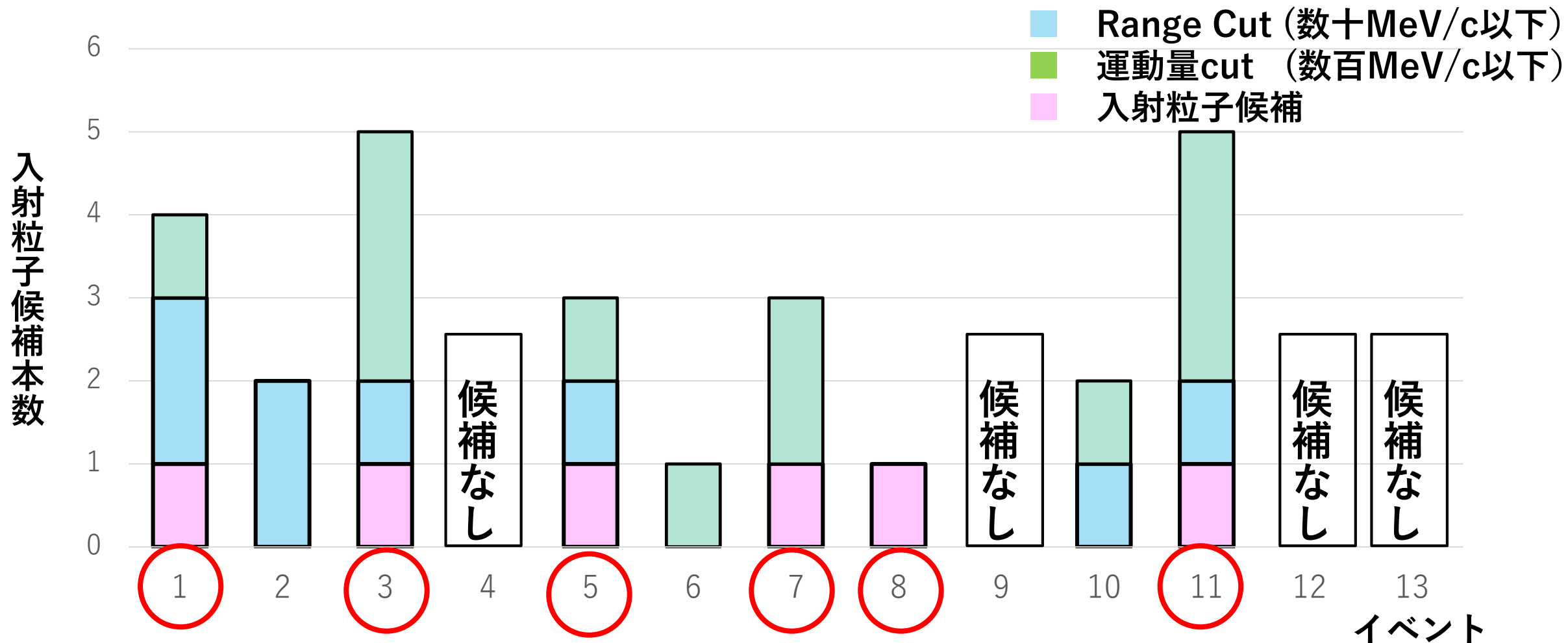
13個のハドロン反応の入射粒子候補の選出結果



- 候補なし：4個
- 複数候補：9個

バックスキャッター粒子を選び出している

バックスキッター粒子識別の結果



6個のハドロン反応において

1本の入射粒子候補を選び出すことができた

Summary

- 気球搭載原子核乾板はガンマ線、電子、ハドロン、原子核、(エキゾチック粒子も…??)が記録されており、自動読み取りによる様々な解析の可能性はある。
- 大統計のハドロン反応の詳細解析によって、上空で生成された短寿命粒子の探索を行う。
- 高速かつ大角度に読み取れるHTSによってハドロン反応の解析を行った。
 - 1例のハドロン反応の詳細解析
 - ✓ 44本の反応起因の粒子を選び出した
 - ✓ IPを評価し、ミクロンオーダーの分解能を確認した
 - ✓ PhV情報(飛跡の濃さ)から、標的原子核の蒸発粒子を検出した
 - ✓ 入射粒子にはd線が見られ、C以上の原子核と期待される
 - ✓ Pseudo Rapidity分布から入射エネルギーを20GeV/Aと推定した
 - 13個に対して、6個のハドロン反応の入射粒子を半自動的に選び出した。

展望

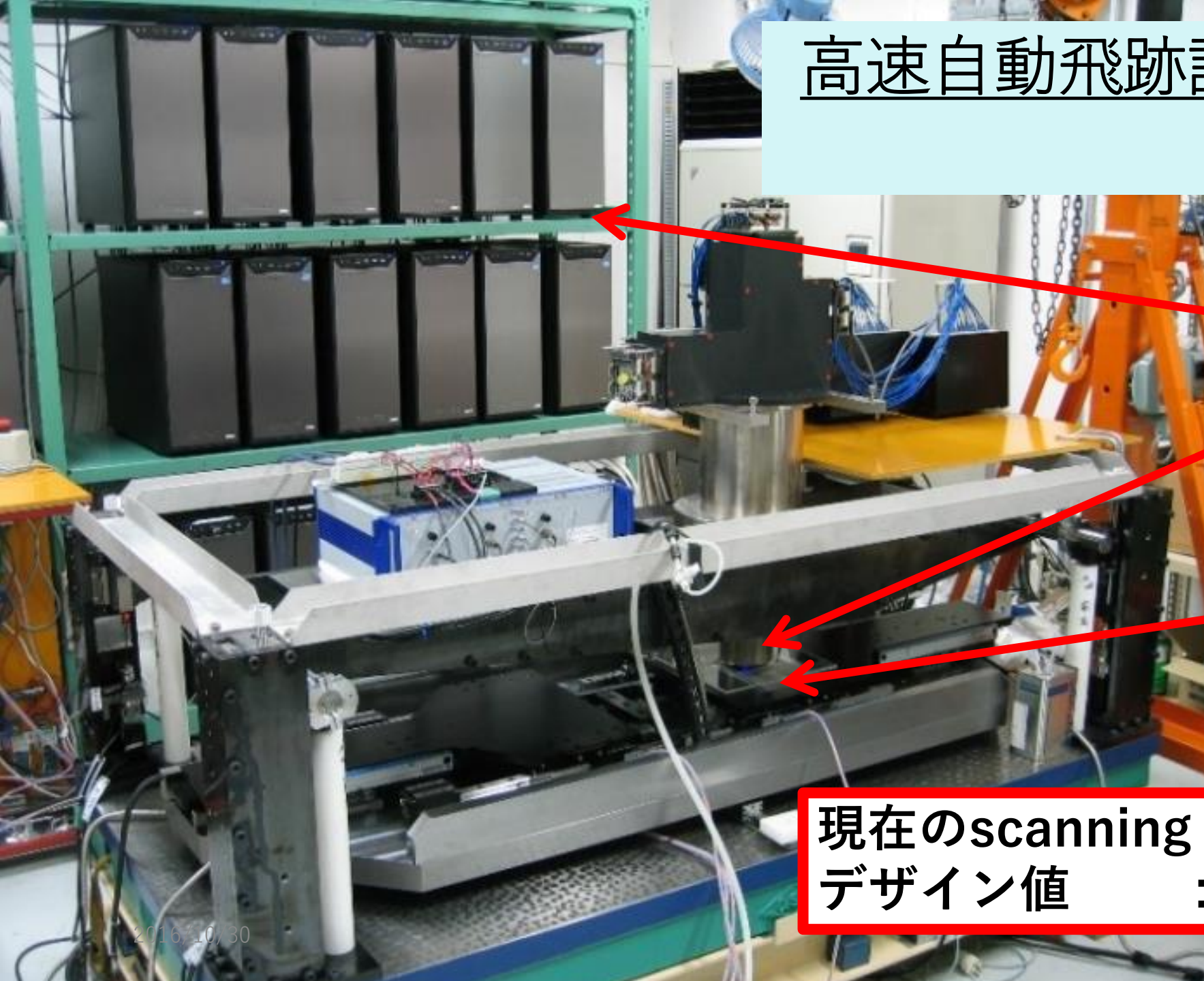
- 入射粒子候補が0本の7個のハドロン反応について、原因を追究する
 - 入射粒子が読取時の角度アクセプタンス ($\tan \theta < 2.0$) 以上の角度で入射した場合
 - 自動読取のinefficiencyの場合
 - 入射粒子が中性電荷の場合
 - 反粒子の対消滅
- 過去の気球実験の自動読み取りによる再解析(アーカイブス計画)

バックアップ



HTS

高速自動飛跡読取装置 (HTS) @名古屋大学F研



コンピュータ

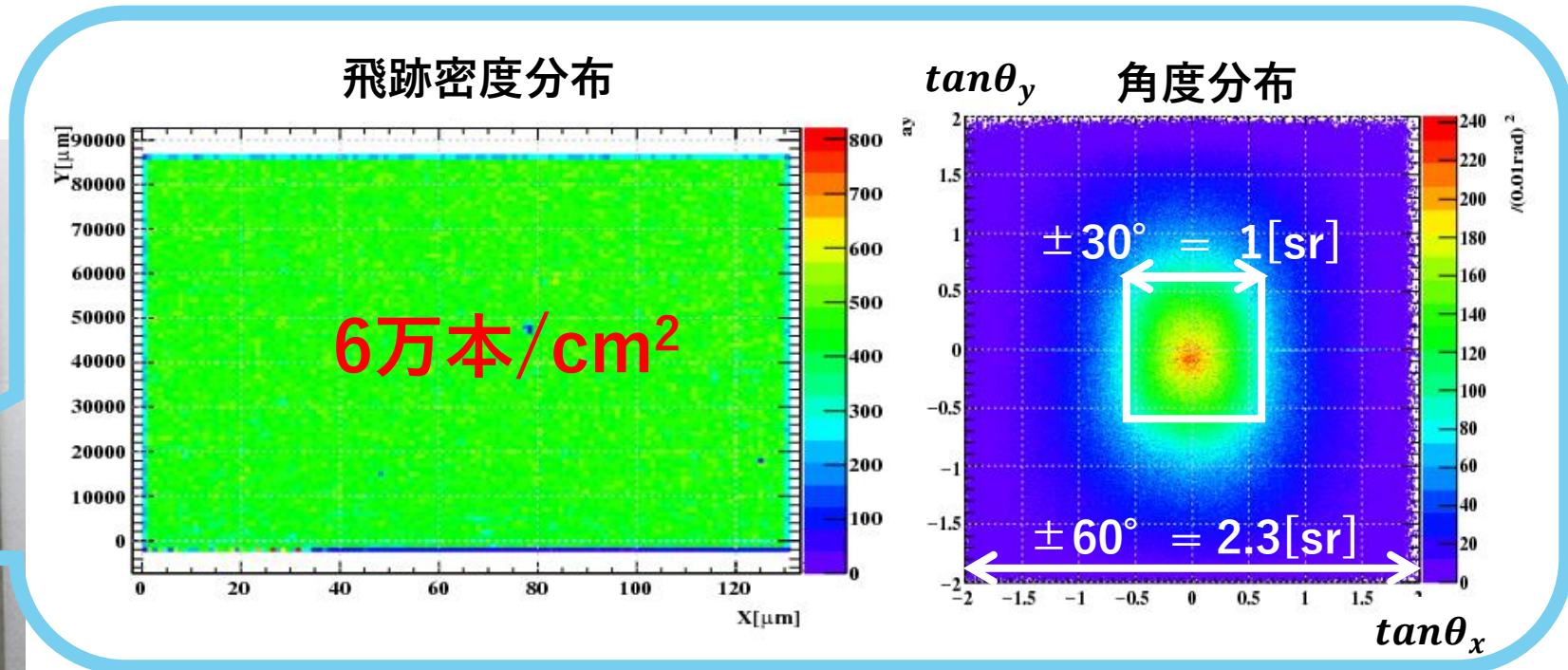
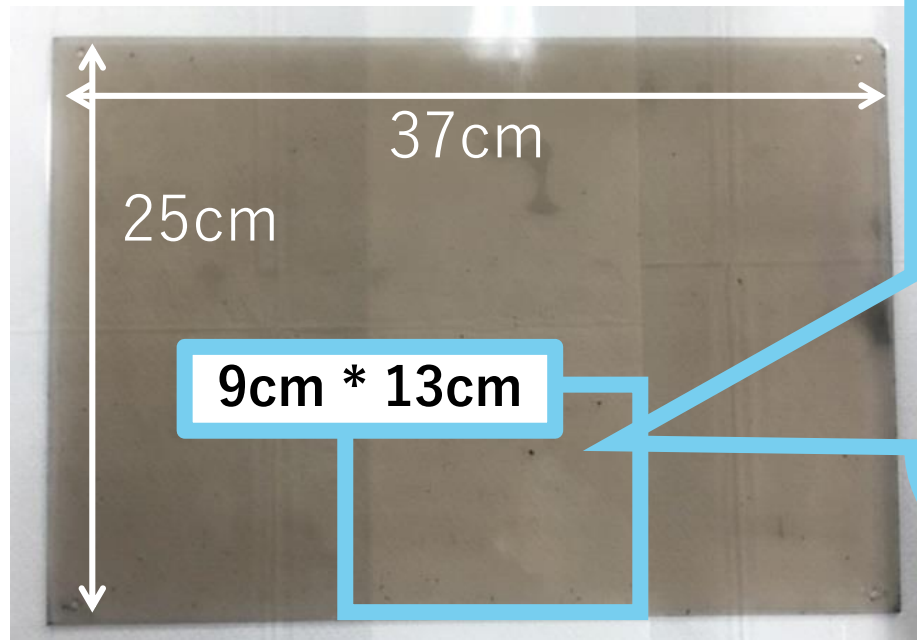
対物レンズ
5mm*5mm/1視野

ステージ

現在のscanning speed : 4000 cm²/h
デザイン値 : 9000 cm²/h

HTSからの得た飛跡データ

全乾板、**400枚 (41m²)** を
約3ヶ月で読み取り完了



HTSの導入により高速かつ大角度に入射した飛跡の読取が可能

⇒ 現在は飛跡データの解析中

IJscanとHTSscanの比較

	IJscan	HTS
角度acceptance	$\tan\theta=0.6$	$\tan\theta=2.0$
速度	$\sim 100\text{cm}^2/\text{h}$	$9000\text{cm}^2/\text{h}$
本数	27	44
Targetからの蒸発核子	0	3
rapidity	1.4以上	0以上

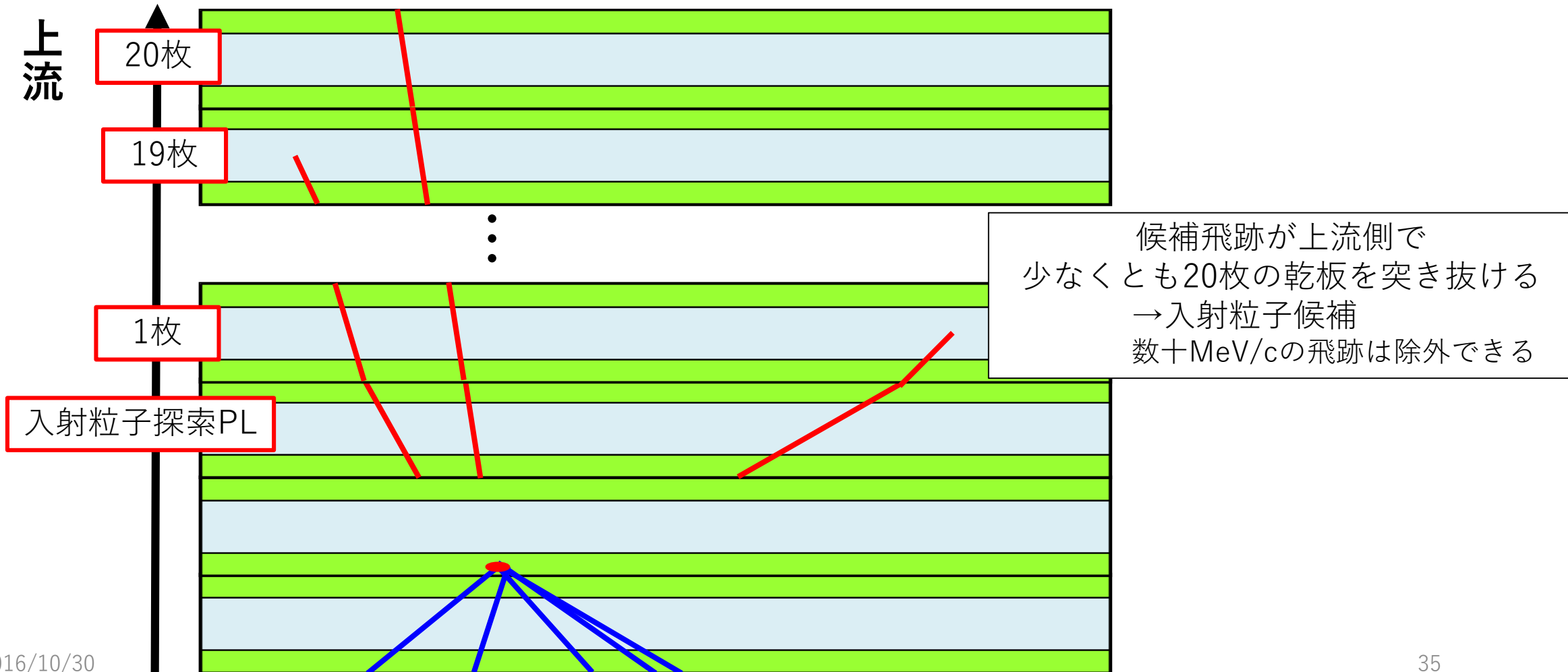
低運動量Cut

バックスキッター粒子の識別① (Range Cut)

入射粒子 → 高運動量

バックスキッター粒子 → 低運動量

⇒ 乾板中を走っている間にエネルギーを失い静止する → 20枚まで追跡する



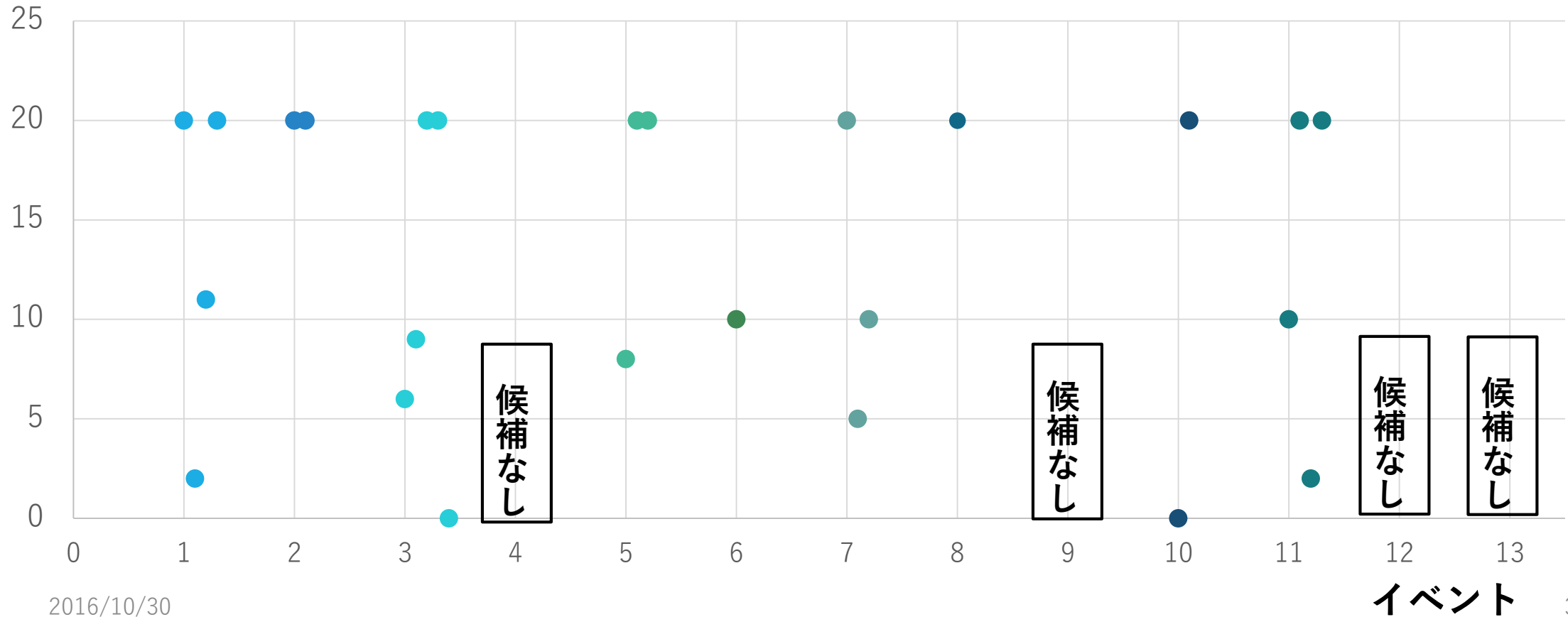
バックスキッター粒子の識別① (Range Cut)

入射粒子 → 高運動量

バックスキッター粒子 → 低運動量

⇒ 乾板中を走っている間にエネルギーを失い静止する

上流への追上枚数



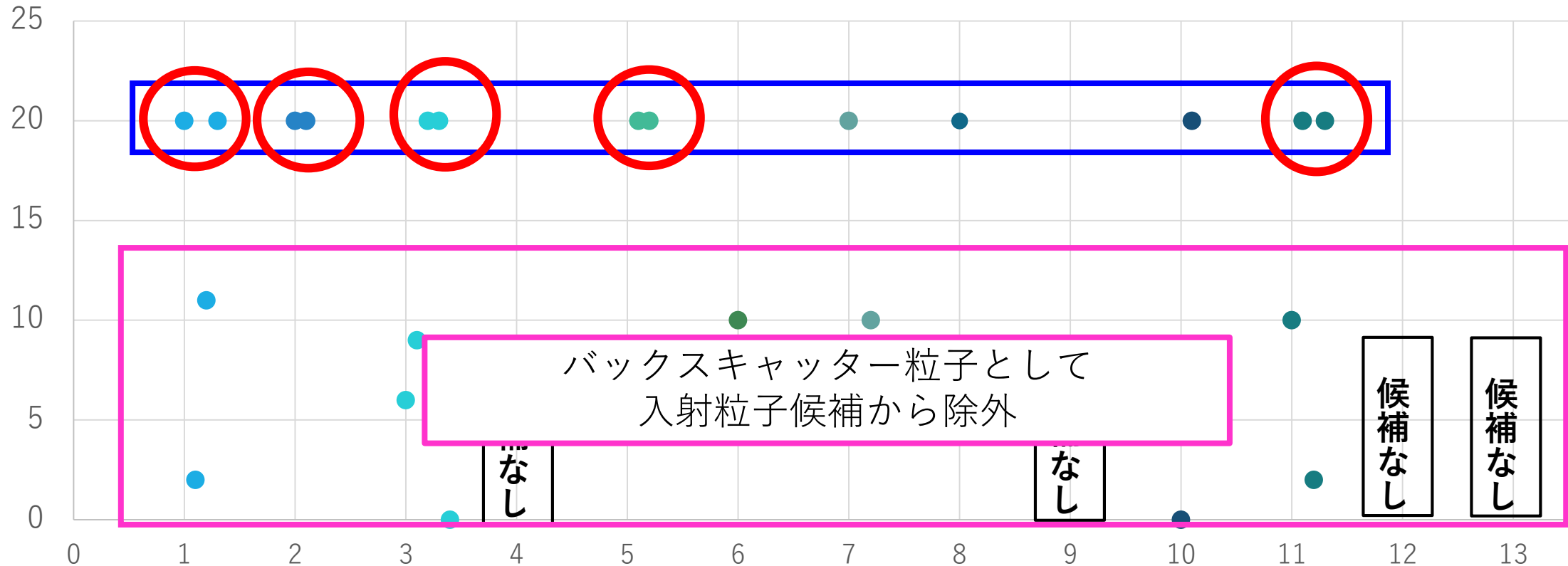
バックスキャッター粒子の識別① (Range Cut)

入射粒子 → 高運動量

バックスキャッター粒子 → 低運動量

⇒ 乾板中を走っている間にエネルギーを失い静止する

上流への
追上枚数



バックスキッター粒子の識別② (多重電磁散乱の検出)

バックスキッター粒子⇒チェンバー中での多重散乱が測定可能

GRAINE Converterの
乾板100枚当たり $0.53X_0$ (X_0 : Radiation Length)

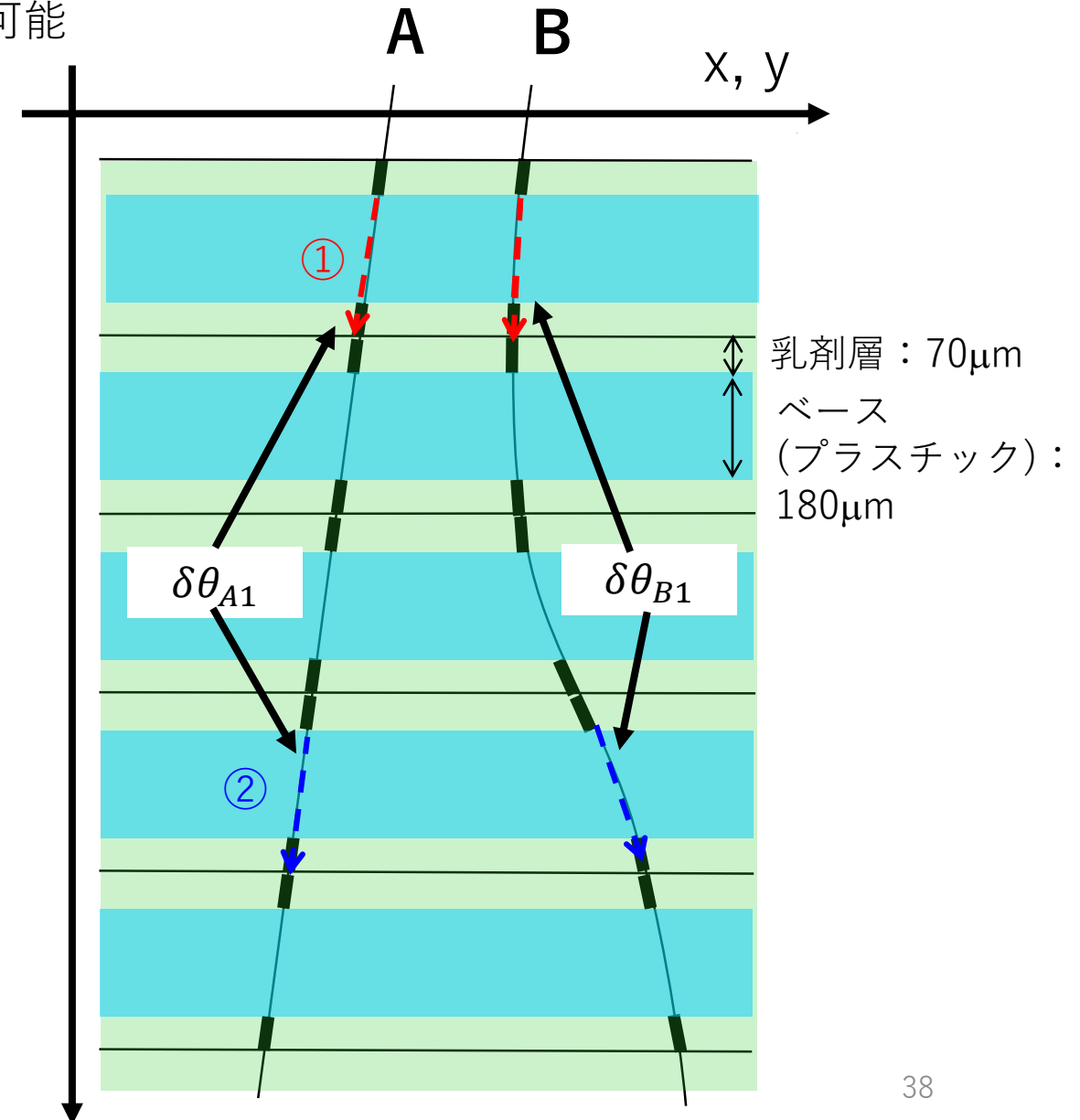
$\tan \theta = 0.1$ で入射したときの角度精度 ~ 2.5 [mrad]

10GeVのProtonが
3枚の乾板を突き抜けたときの散乱角 ~ 0.5 [mrad]

100MeVのProtonが
3枚の乾板を突き抜けたときの散乱角 ~ 140 [mrad]

高運動量の飛跡 (A)
→ ①の角度 - ②の角度 = 角度精度

低運動量の飛跡 (B)
→ ①の角度 - ②の角度 = 角度精度 + 散乱による角度ずれ



バックスキャッター粒子の識別② (多重電磁散乱の検出)

バックスキャッター粒子⇒チェンバー中での多重散乱が測定可能

GRAINE Converterの
乾板100枚当たり $0.53X_0$ (X_0 : Radiation Length)

$\tan \theta = 0.1$ で入射したときの角度精度 ~ 2.5 [mrad]

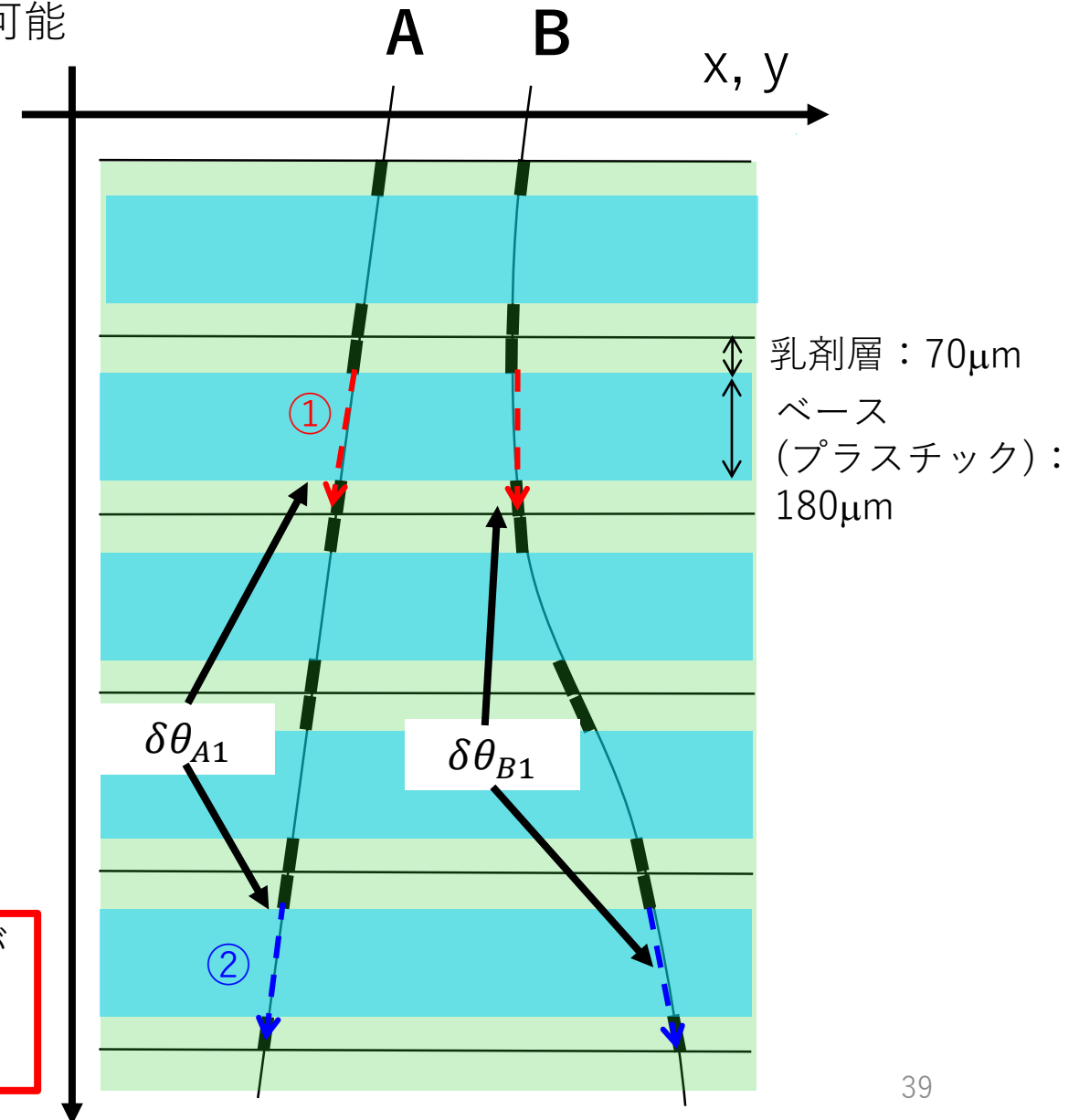
10GeVのProtonが
3枚の乾板を突き抜けたときの散乱角 ~ 0.5 [mrad]

100MeVのProtonが
3枚の乾板を突き抜けたときの散乱角 ~ 140 [mrad]

高運動量の飛跡 (A)
→ ①の角度 - ②の角度 = 角度精度

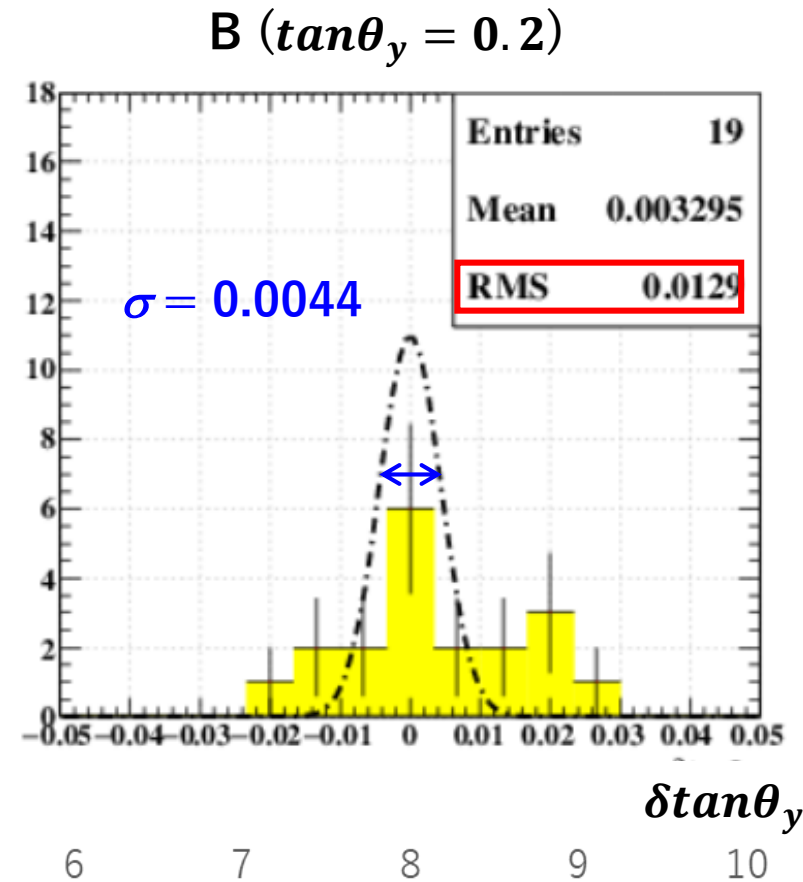
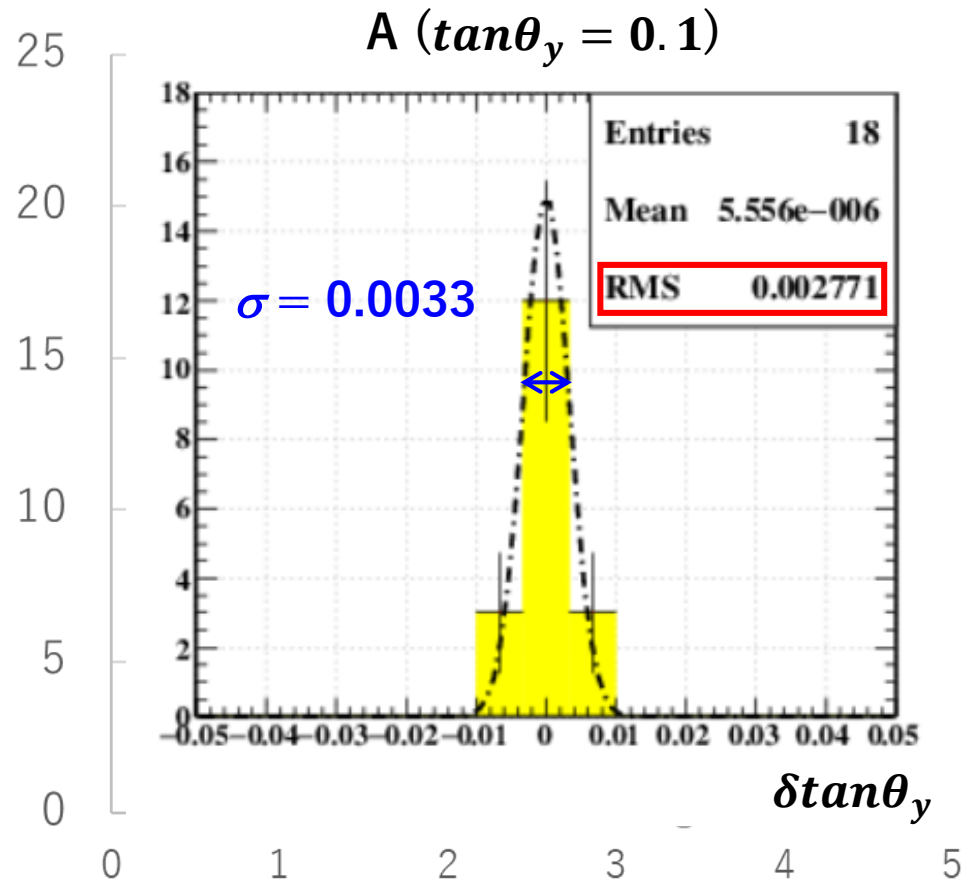
低運動量の飛跡 (B)
→ ①の角度 - ②の角度 = 角度精度 + 散乱による角度ずれ

20枚貫通した候補飛跡のそれぞれの乾板間での角度ずれが
角度精度以上ずれているものを
バックスキャッター粒子として識別する



バックスキッター粒子の識別② (多重電磁散乱の検出)

20枚貫通した候補飛跡のそれぞれの乾板間での角度ずれが
 角度精度以上ずれていないものを
 バックスキッター粒子として識別する

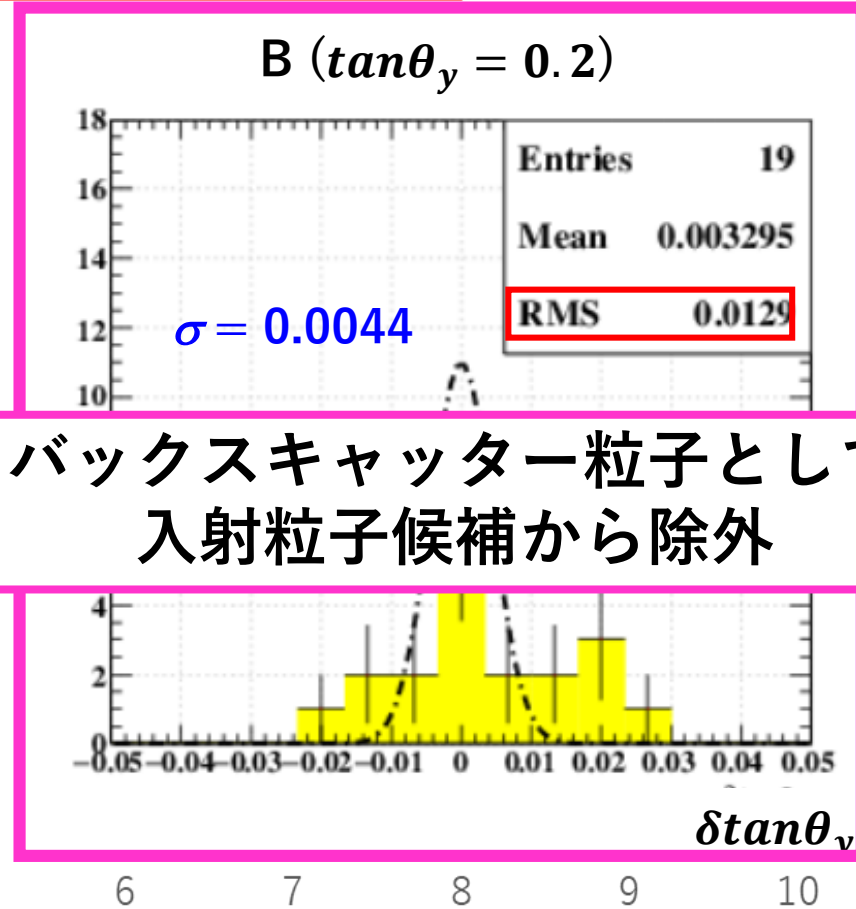
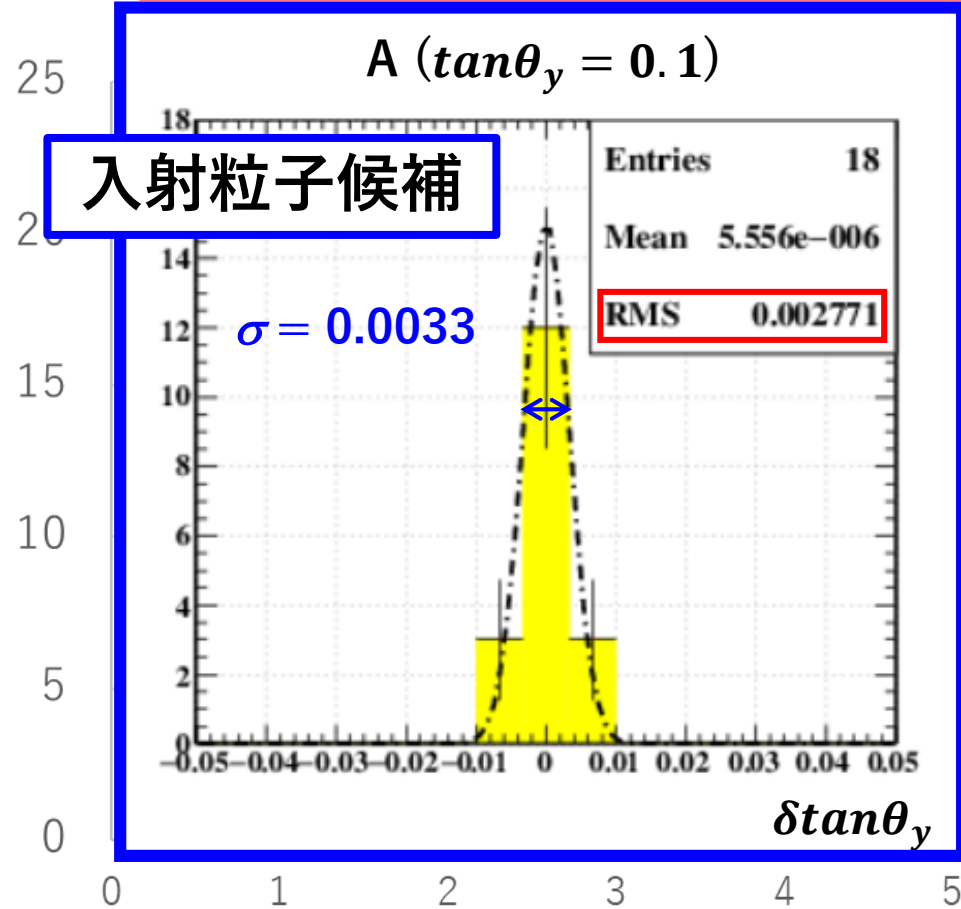


■ : 飛跡データ

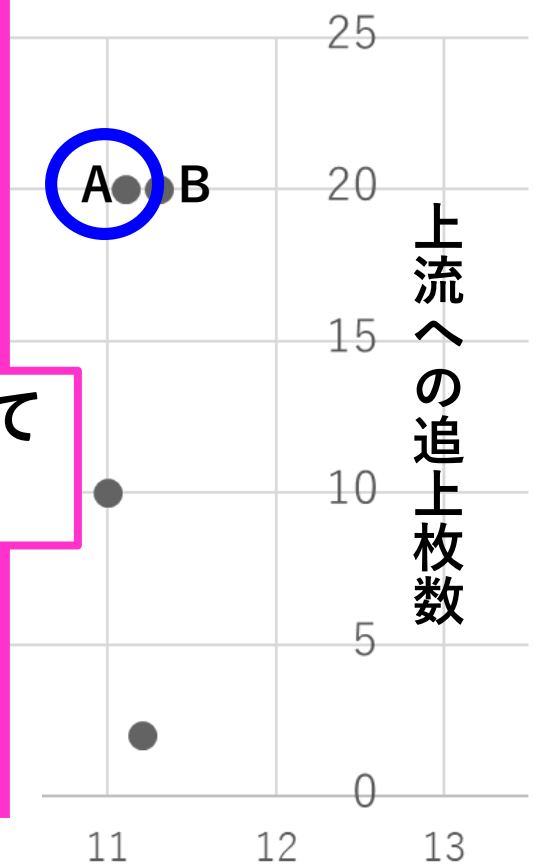
線 : 角度測定精度から期待される分布

バックスキッター粒子の識別② (多重電磁散乱の検出)

20枚貫通した候補飛跡のそれぞれの乾板間での角度ずれが
 角度精度以上ずれているものを
 バックスキッター粒子として識別する



バックスキッター粒子として
 入射粒子候補から除外

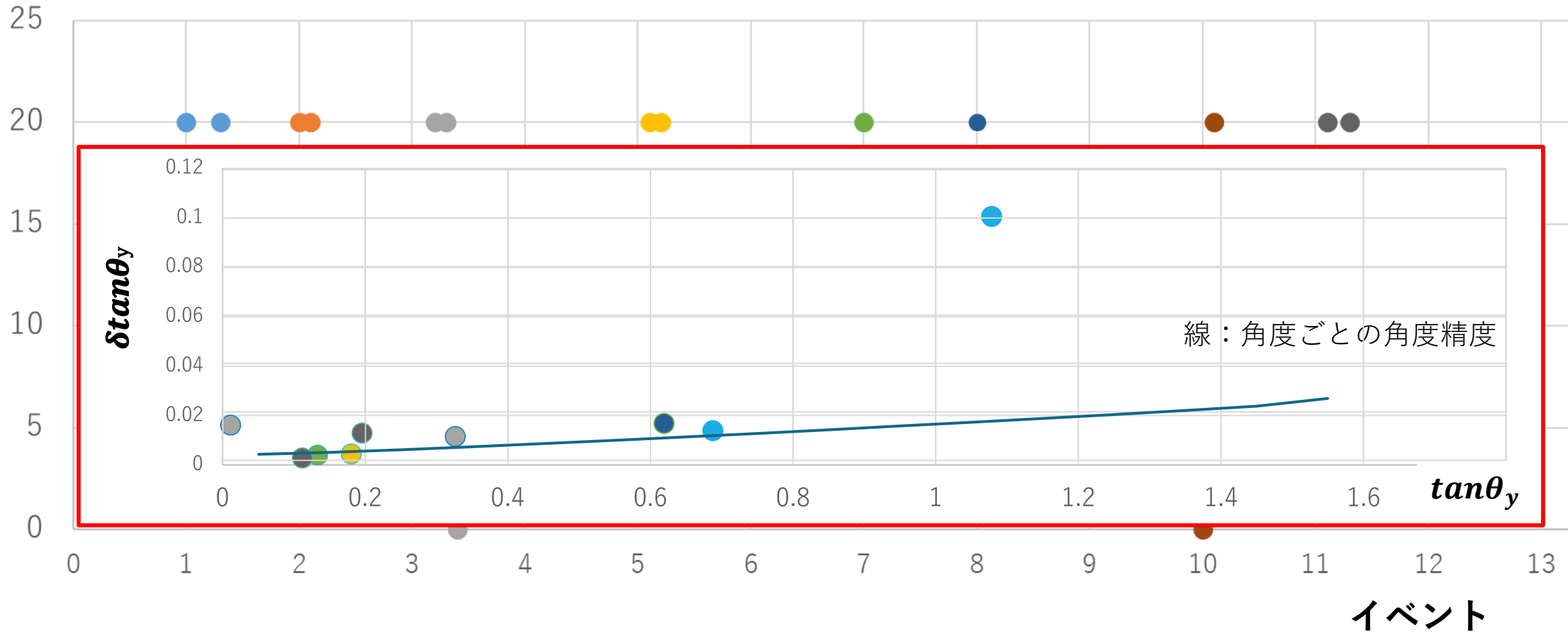


■ : 飛跡データ

線 : 角度測定精度から期待される分布

バックスキッター粒子の識別②（多重電磁散乱の検出）

上流への追上枚数



6例の結果

多重度

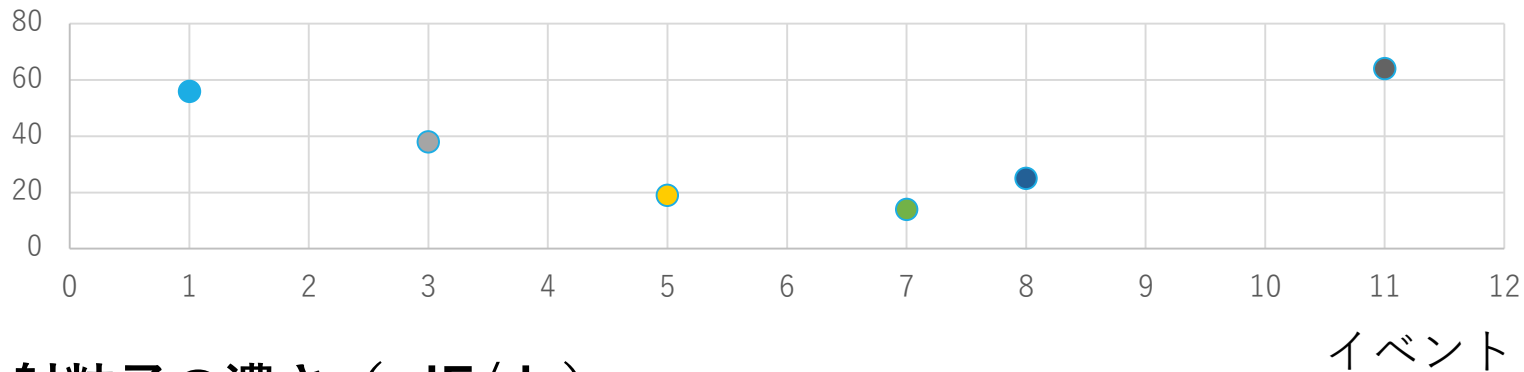
入射粒子核種同定

Pseudo Rapidity分布

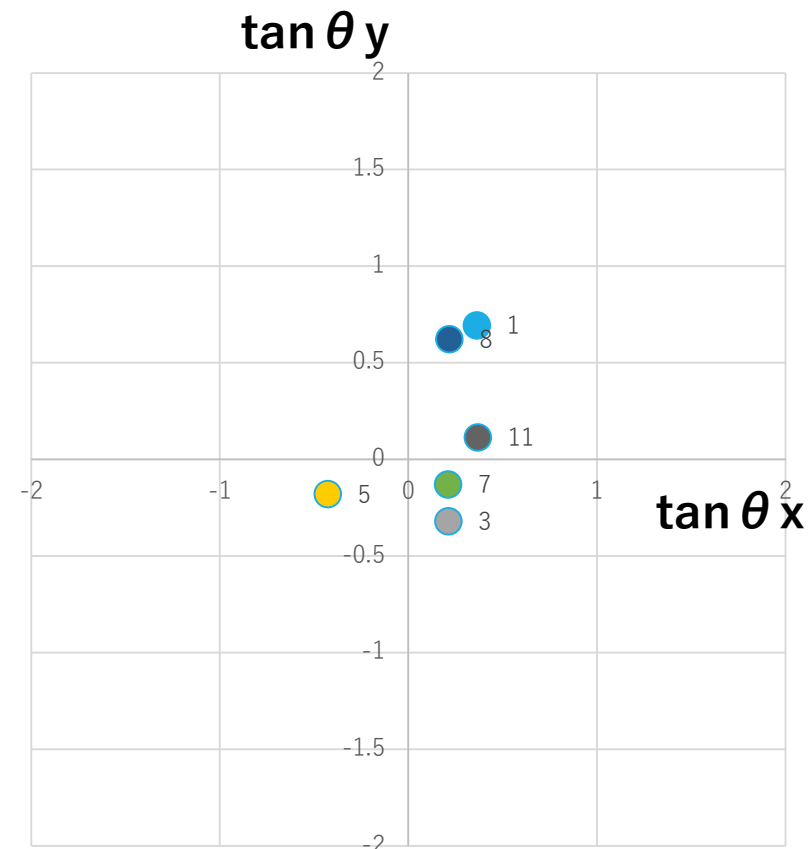
天頂角(6例+7例)

入射粒子が選出できた6個のハドロン反応から得られた情報

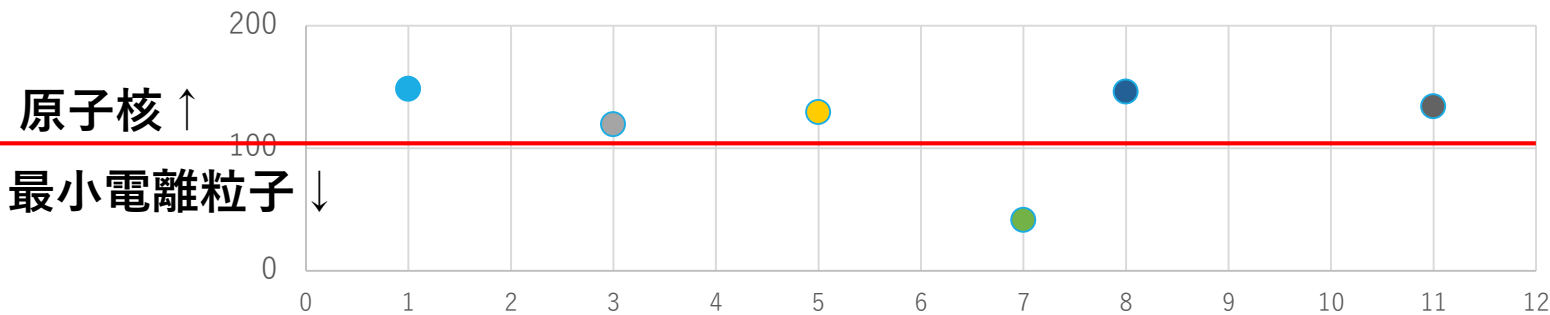
ハドロン反応の多重度



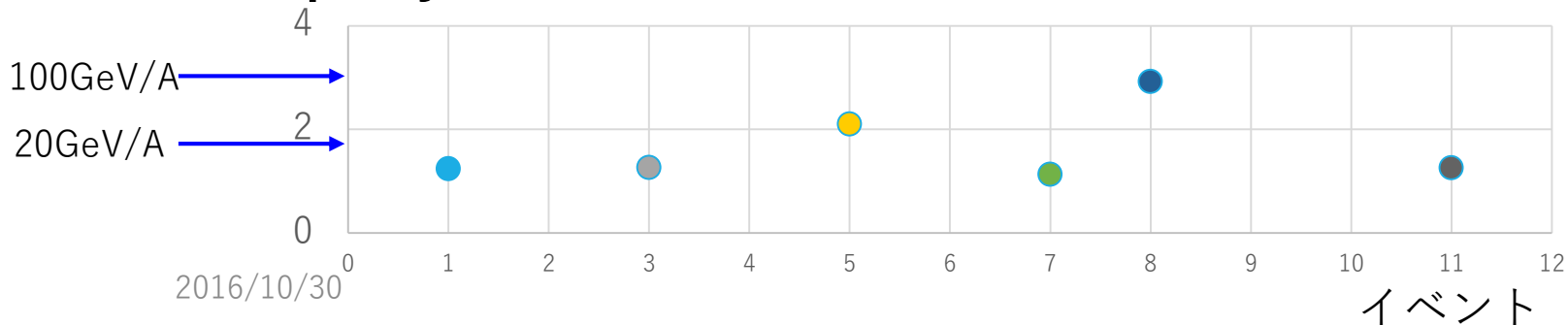
入射粒子の天頂角分布



入射粒子の濃さ ($-dE/dx$)

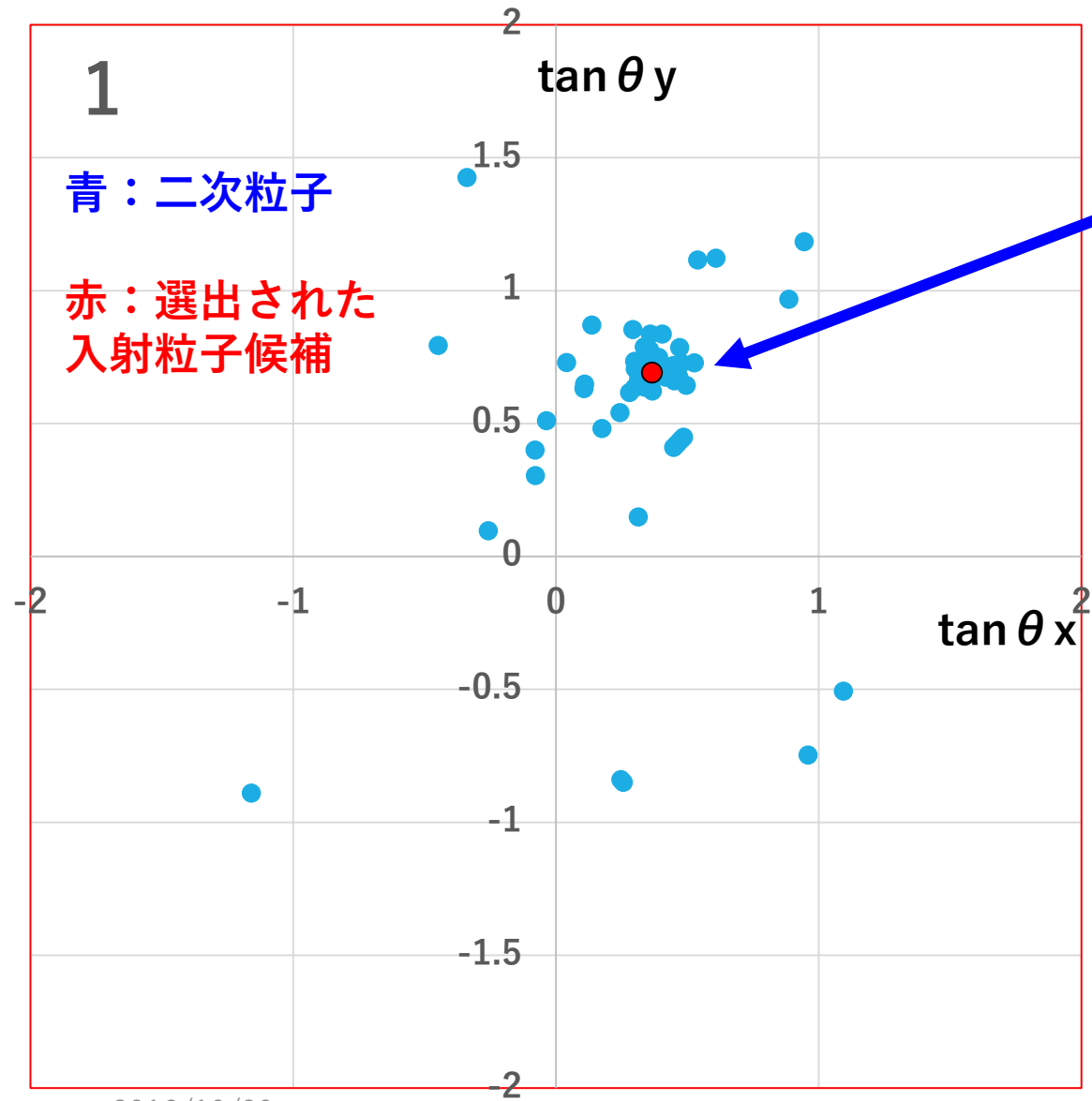


Pseudo Rapidity分布のCenter値 (エネルギー推定)

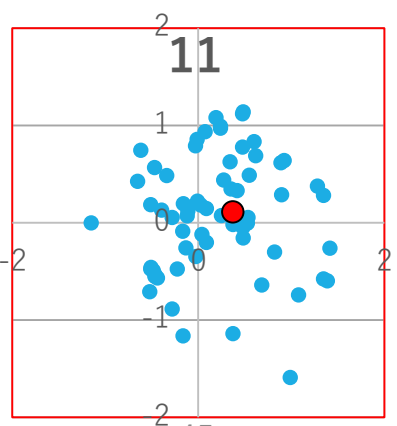
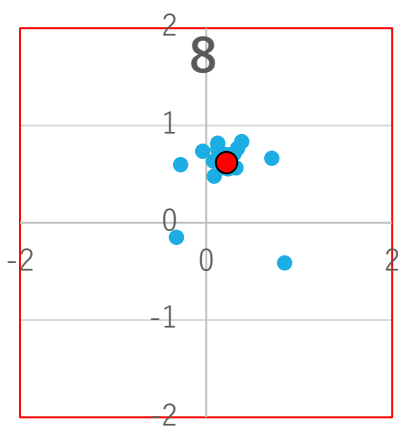
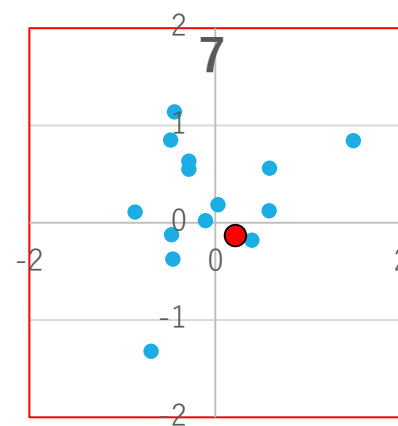
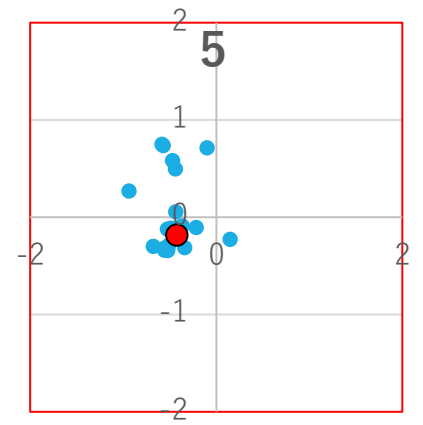
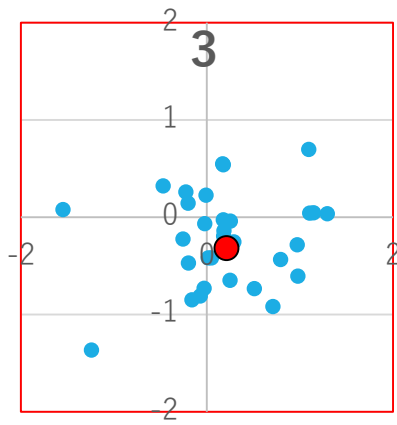


2016/10/30

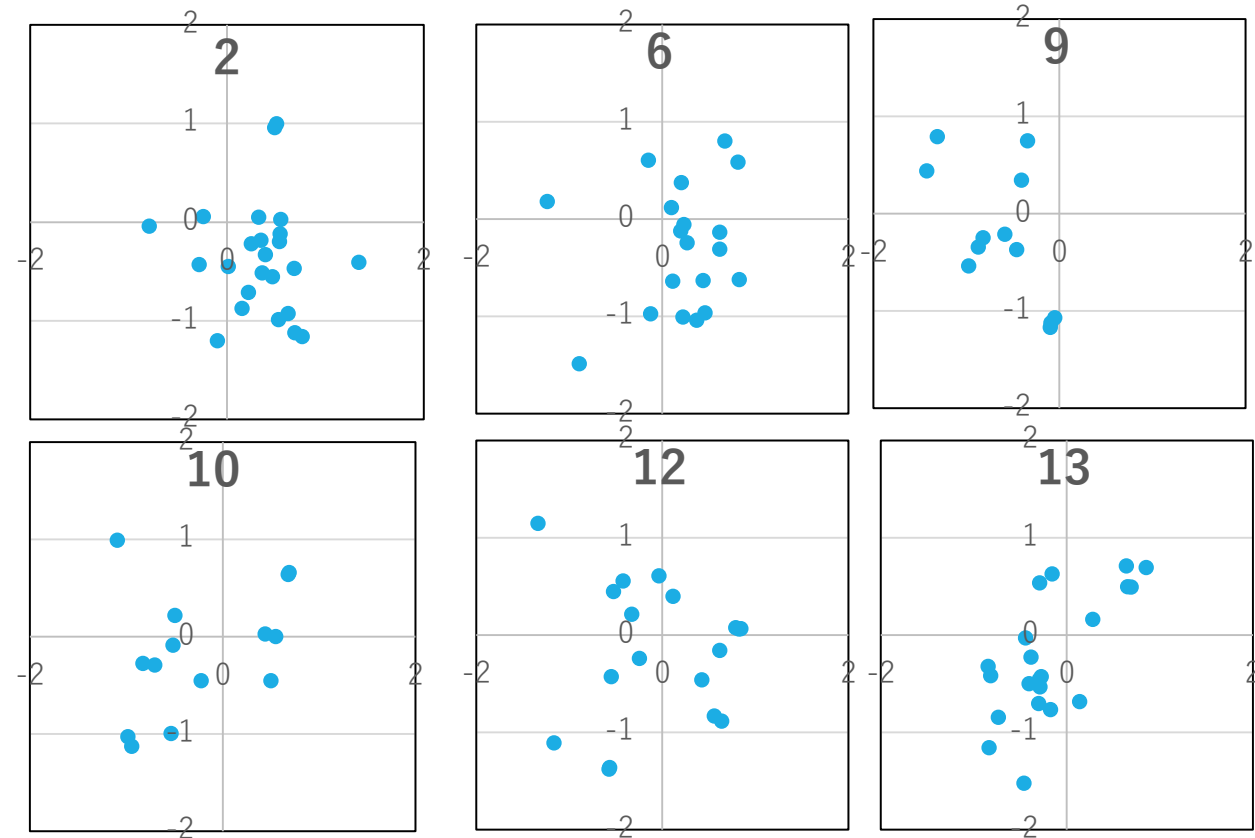
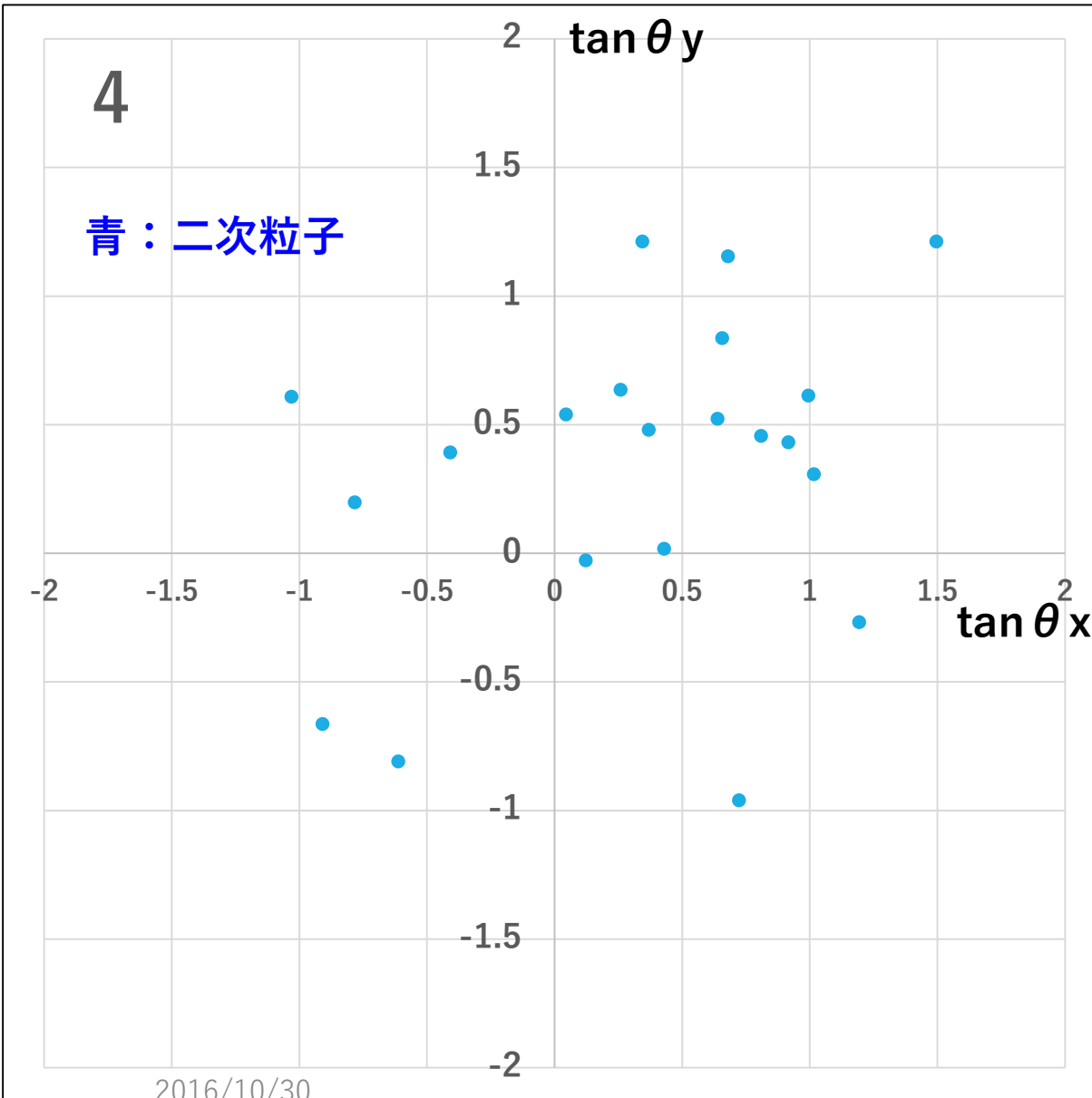
ハドロン反応の二次粒子・入射粒子候補の天頂角分布①



二次粒子の集中部分に入射粒子候補がいることが確認された



ハドロン反応の二次粒子の天頂角分布②（入射粒子候補無し）

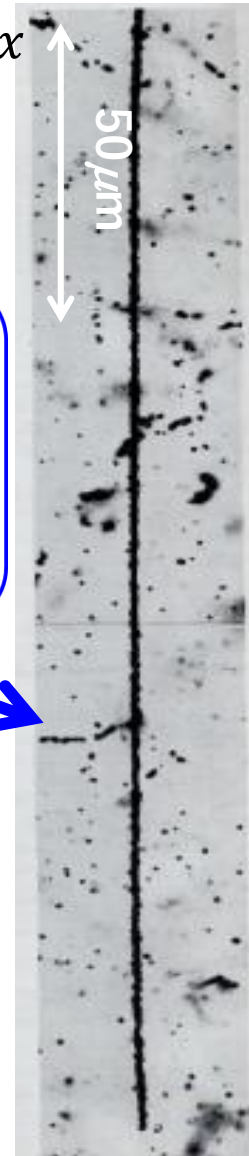
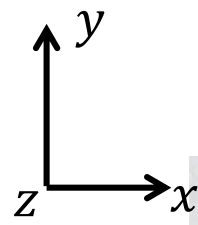
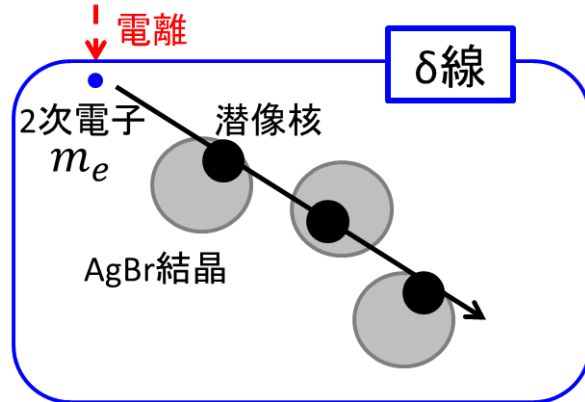
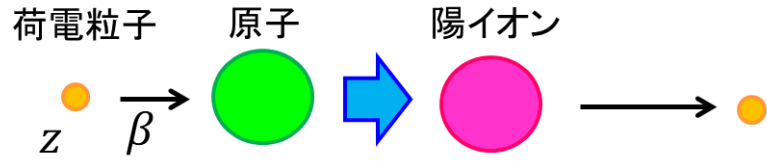


- 入射粒子が読取時の角度アクセプタンス以上の角度で入射
- 自動読取のinefficiency
- 入射粒子が中性粒子

原因の詳細は今後解析していく

入射粒子同定

δ線



δ線の本数： N_δ

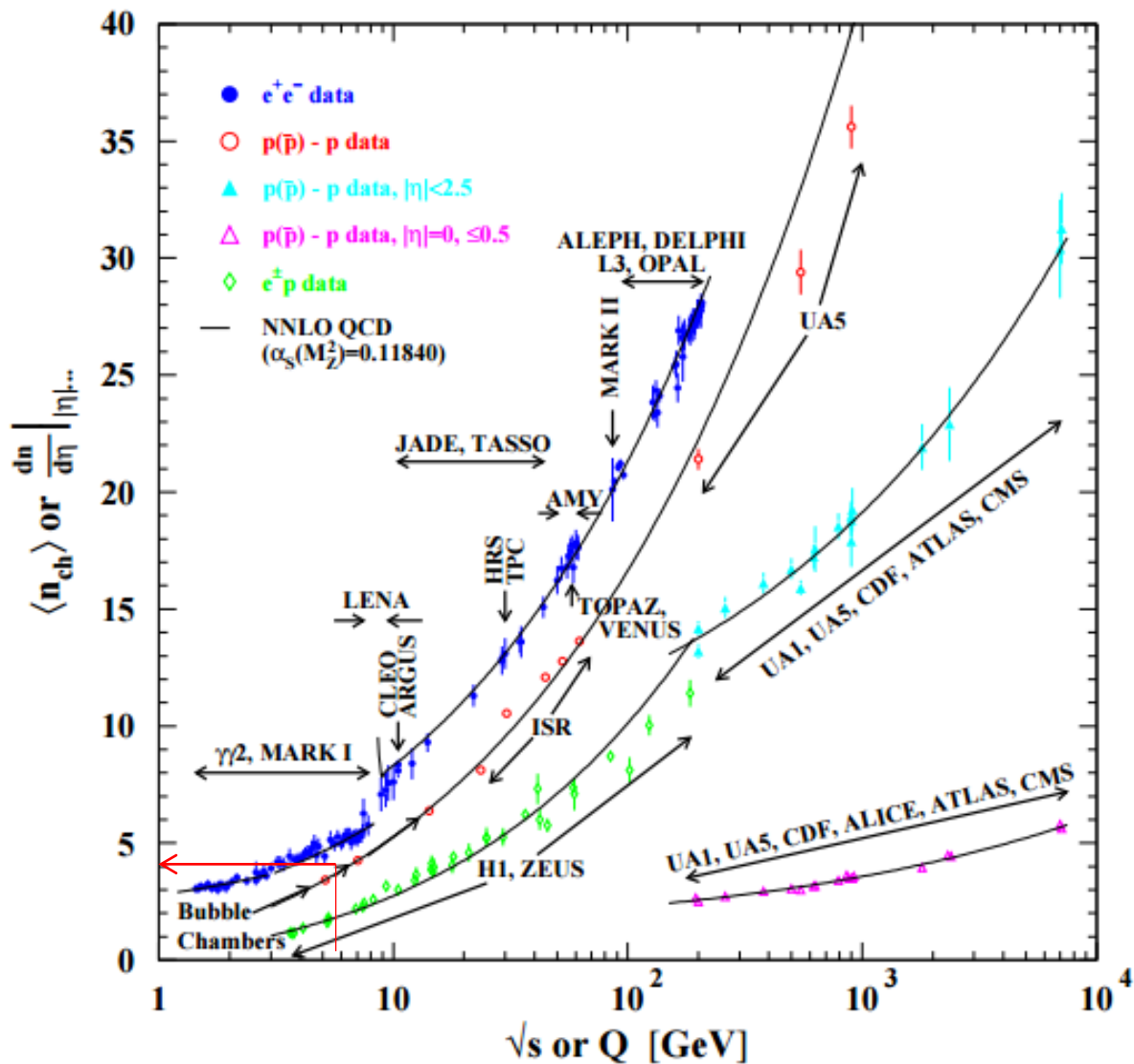
$$N_\delta = H \frac{z^2}{\beta^2} \left(\frac{m_e c^2}{E_1} - \frac{m_e c^2}{E_2} \right)$$

E_1 ：δ線の最小エネルギー
(3, 4個のグレインを作ることができるエネルギー)

E_2 ：δ線の最大エネルギー
= 二次電子の最大エネルギー
 $\Rightarrow E_2 = 2m_e c^2 \beta^2$

出典 The study of Elementary particles by the Photographic

入射粒子の同定



入射粒子のエネルギー
 $30\text{GeV}/A \Rightarrow$
 $\sqrt{s} \sim 7$

$p-p \rightarrow$ multiplicity ~ 4
 ハドロン反応の multiplicity =
 44

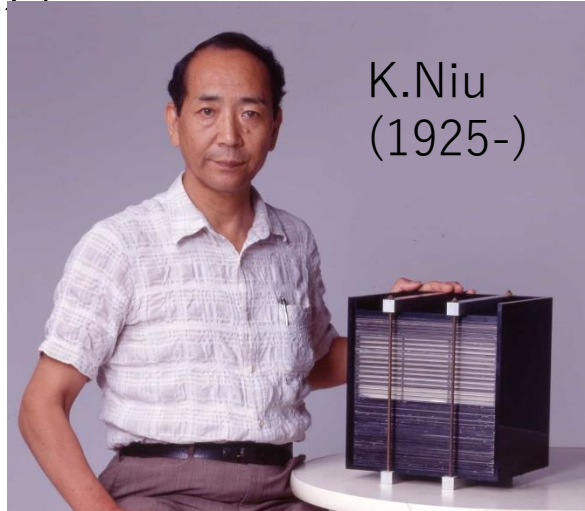
入射粒子 $\rightarrow \sim C, N, O$

チャーム粒子

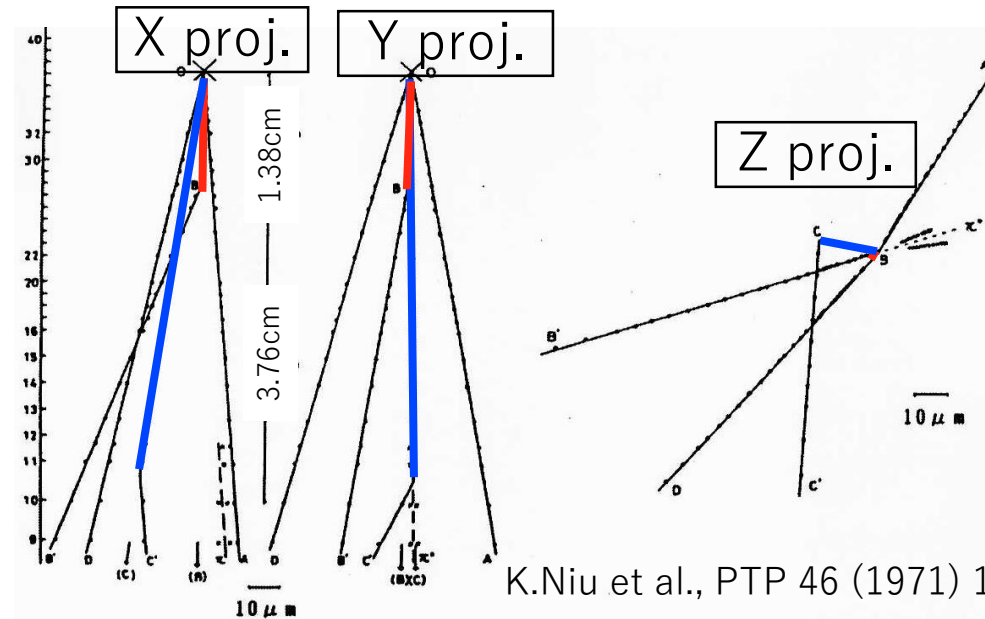
乾板によるチャーム粒子(X particle)

シミュレーション結果...

原子核乾板を用いたCharm粒子検出・解析



emulsion chamber mounted on air plane

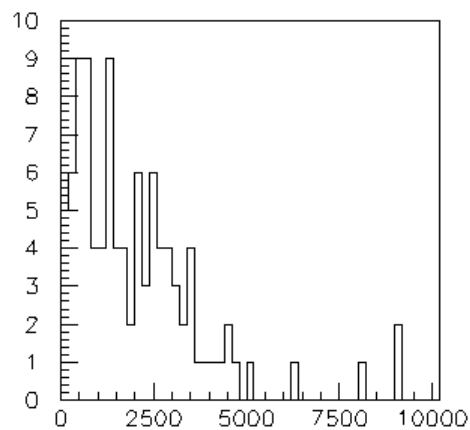
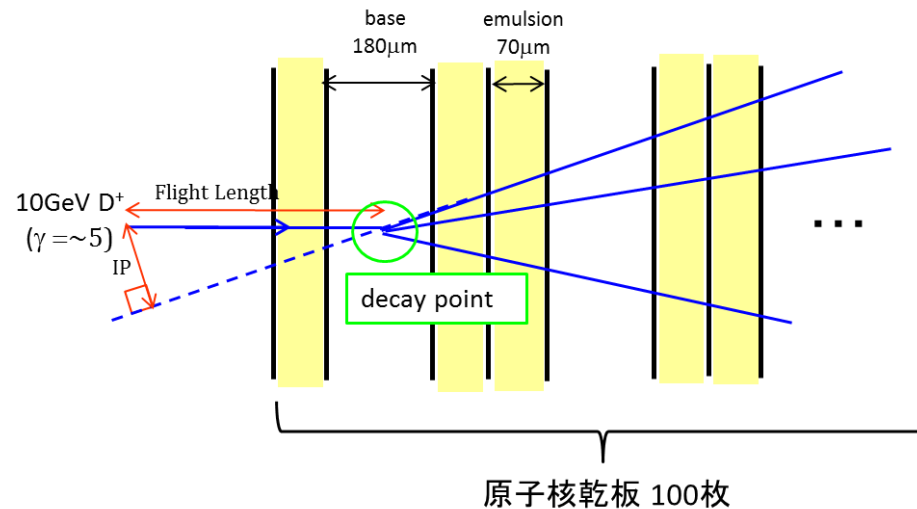


K.Niu et al., PTP 46 (1971) 1644

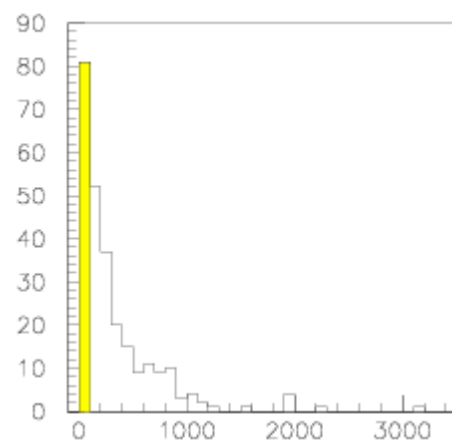
Discovery of Charmed Particle(1971), before J/ψ was confirmed in 1974

コンバータ内でのチャーム粒子崩壊 (simulation)

	D ⁺	D ⁰	D _s	Λ _c
cτ [μm]	311.8	122.9	149.9	59.9
frac.(c→ X)	22%	54%	8%	8%
Charm-v _x	34%	13%	12%	4%
0-prong	-	14%	-	-
1-prong	44%	-	37%	-
2-prong	-	69%	-	-
>3-prong	56%	17%	63%	(3-prong)25%



Flight length [μm]



IP [μm]

