

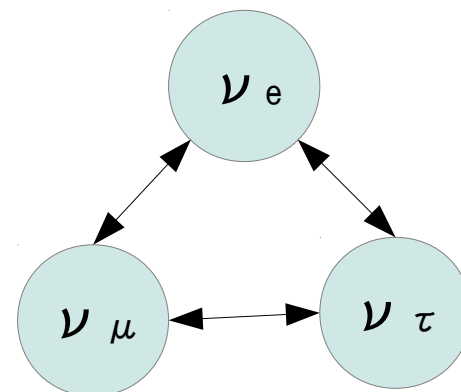
ニュートリノ振動実験OPERAにおける 崩壊事象探索へのCSの飛跡の活用

- ニュートリノ振動
- OPERA実験
- NC-likeイベントの検出効率について
- 崩壊事象探索へCSの活用のコンセプト

名古屋大学理学研究科 F研究室
大村拓也

ニュートリノ振動

ニュートリノ振動：
 ニュートリノに質量があれば、飛行中に別の種類に変化
 (1962年、牧、中川、坂田)



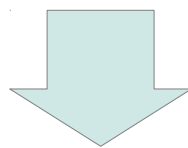
$$\begin{pmatrix} |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_\tau\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_2\rangle \\ |\nu_3\rangle \end{pmatrix} \longrightarrow$$

シュレーディンガー方程式によって時間とともに混合の割合が変化

弱い相互作用
の固有状態

質量固有状態

$$\text{振動確率: } P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau; L) = \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \frac{1.27 \cdot \Delta m^2 [\text{eV}^2] \cdot L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]}$$



振動によってある種の
ニュートリノが消滅
(減少する)

振動によって別種の
ニュートリノが出現す
る

$$\Delta m^2 = 2.4 \times 10^{-3} [\text{eV}^2], \quad \sin^2 \theta_{23} \sim 1 \quad (\text{SK})$$

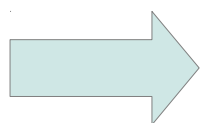
OPERA実験

OPERAの目的：

$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ 振動チャンネルを用い、 ν_{τ} CC反応の直接検出によってニュートリノ振動現象の存在に決着を付ける

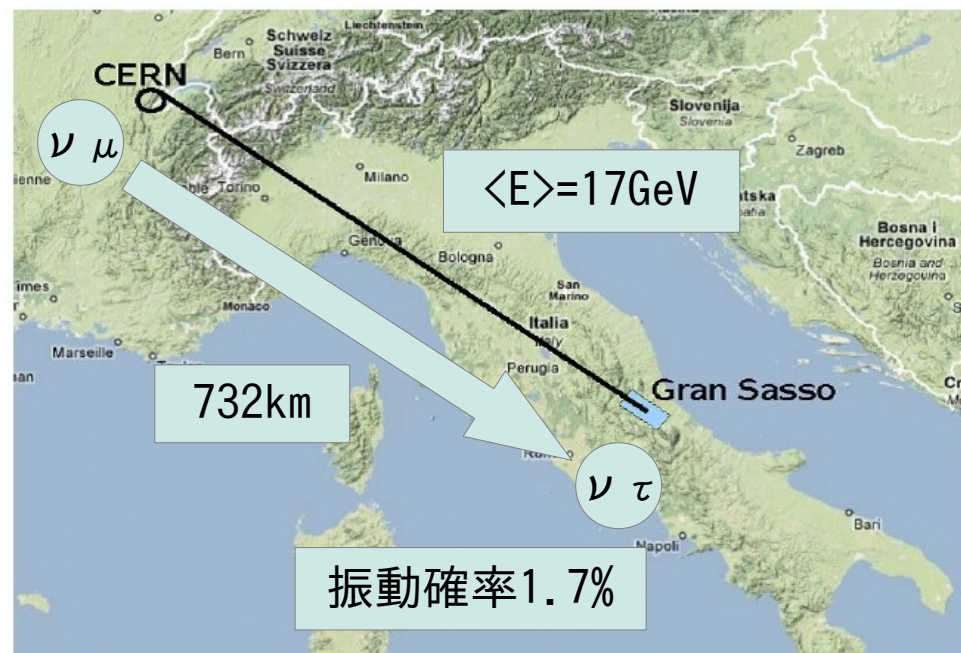
大統計のニュートリノ反応
→大質量のターゲット

τ 粒子検出(飛程数百マイクロン)
→高分解能



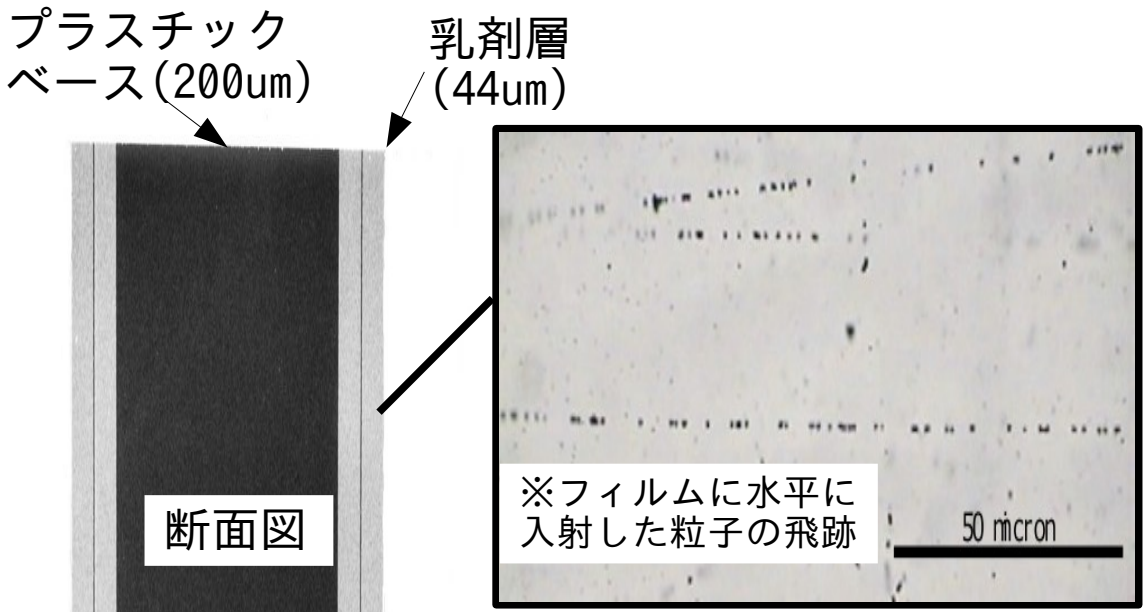
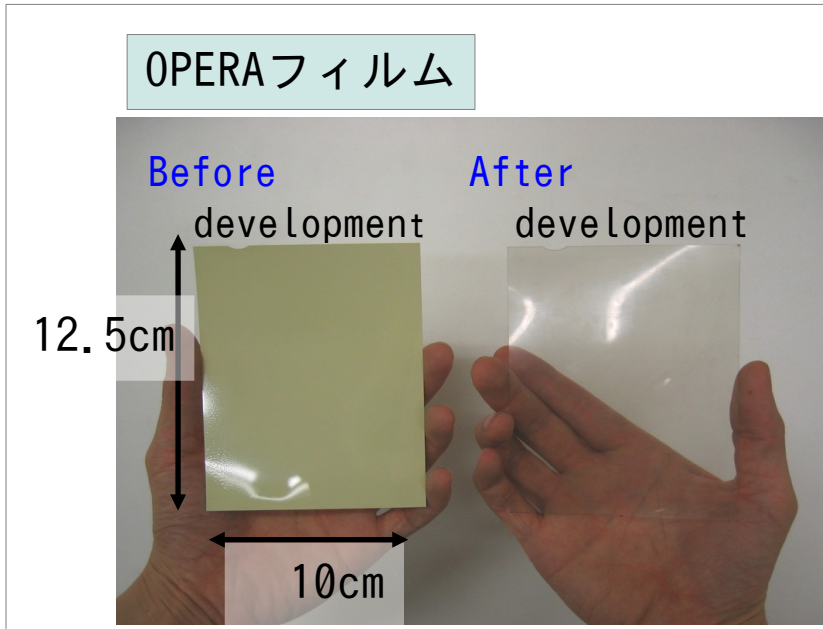
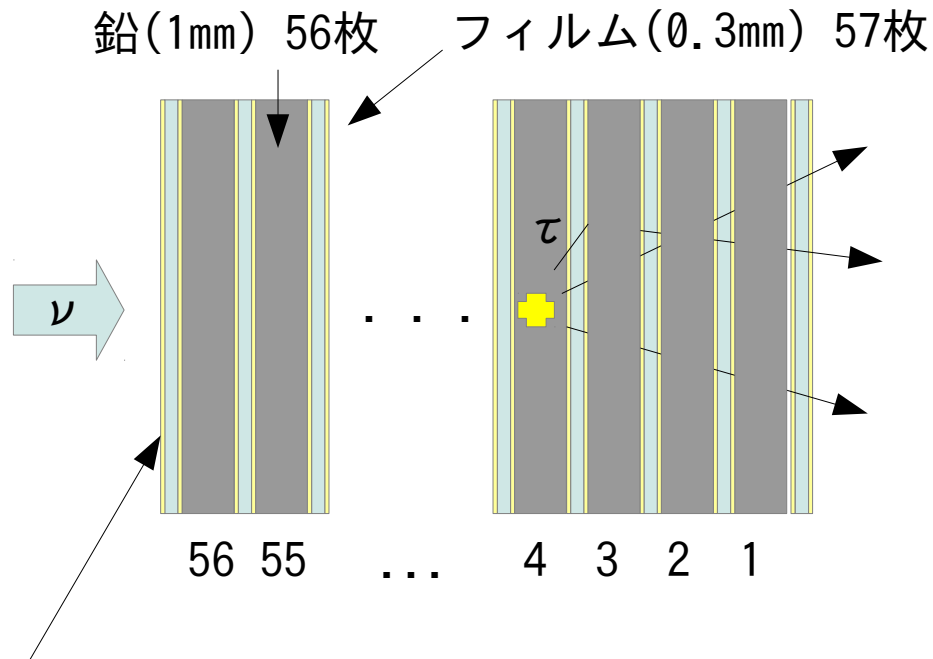
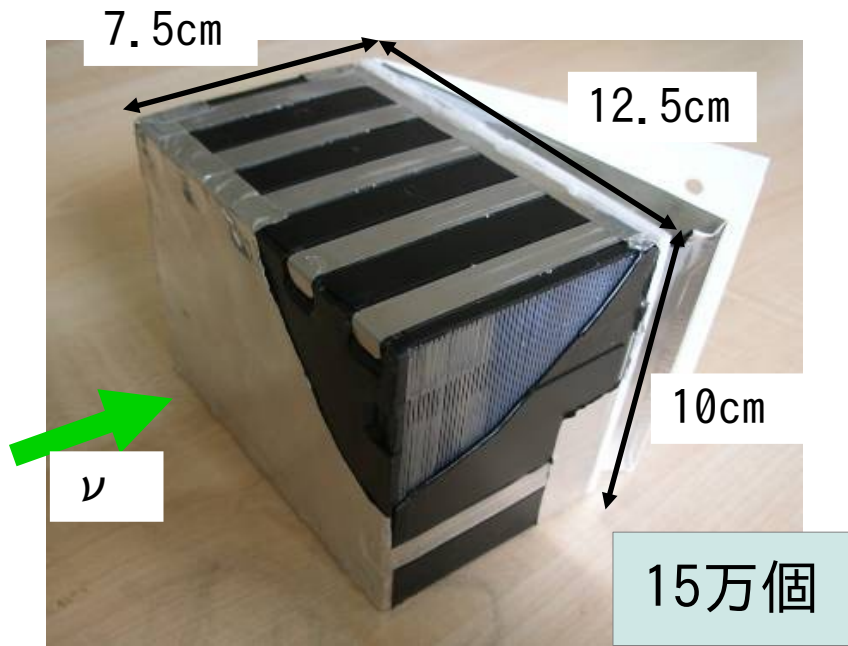
原子核乾板

(サブマイクロンの分解能)

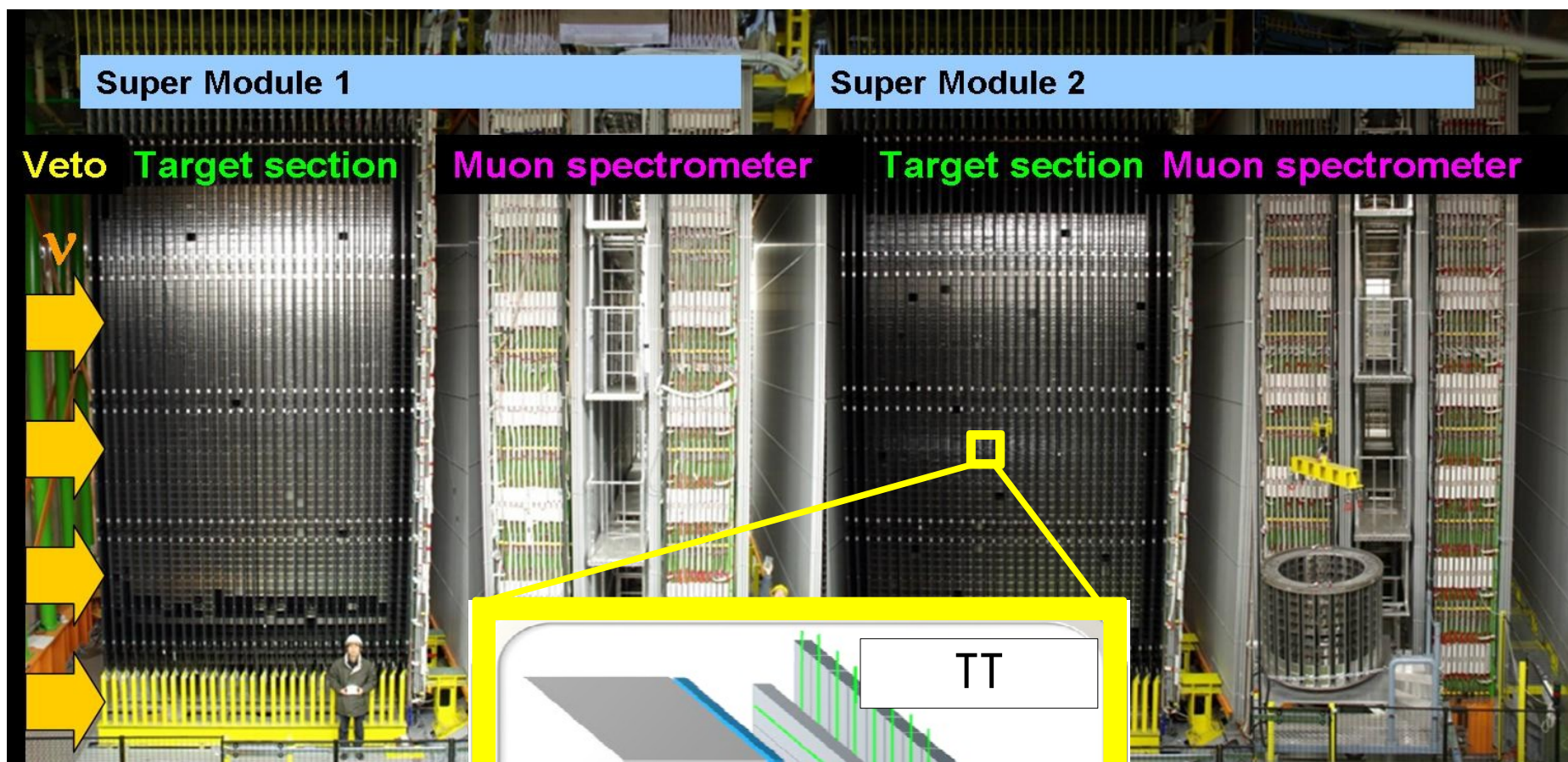


- 2008年度から、5年間のラン
- 11カ国、30機関による国際共同実験
- ニュートリノ反応の半数を日本グループが解析

Emulsion Cloud Chamber (ECC)

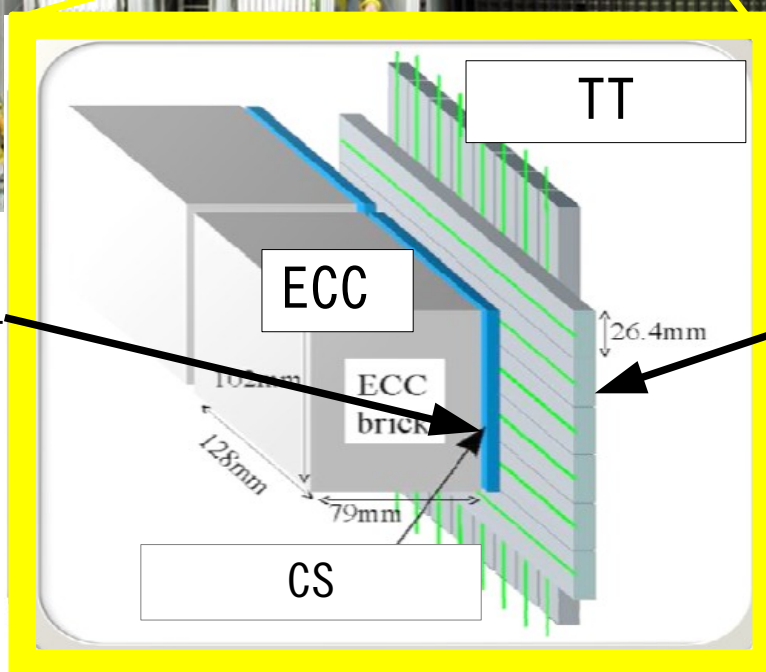


検出器の構成



Changable Sheets (CS)
密着したフィルム2枚組
(ECCから取り外し可能)

→ECCの確定
→ECC解析の足がかり

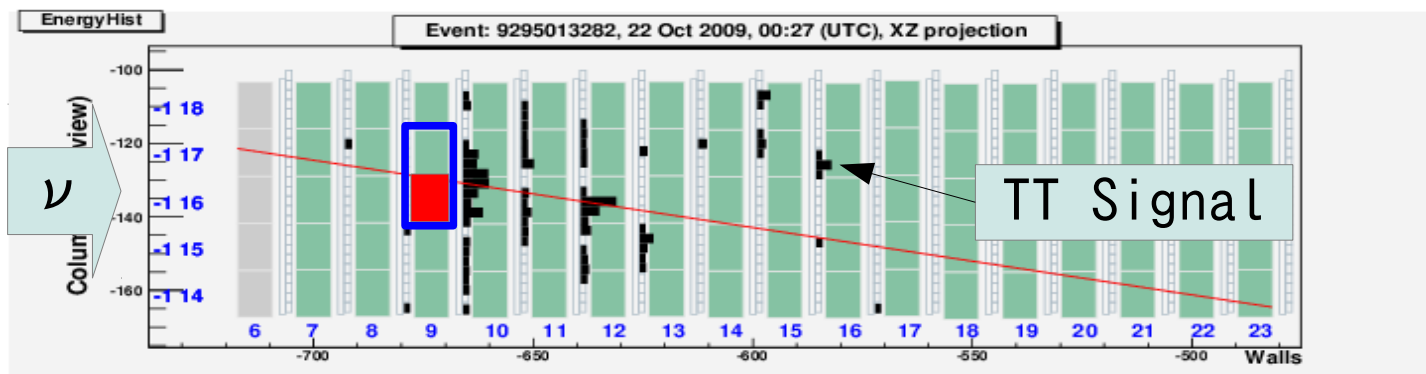


Target Tracker (TT)
シンチレーションカ
ウンター(幅2.6cm)

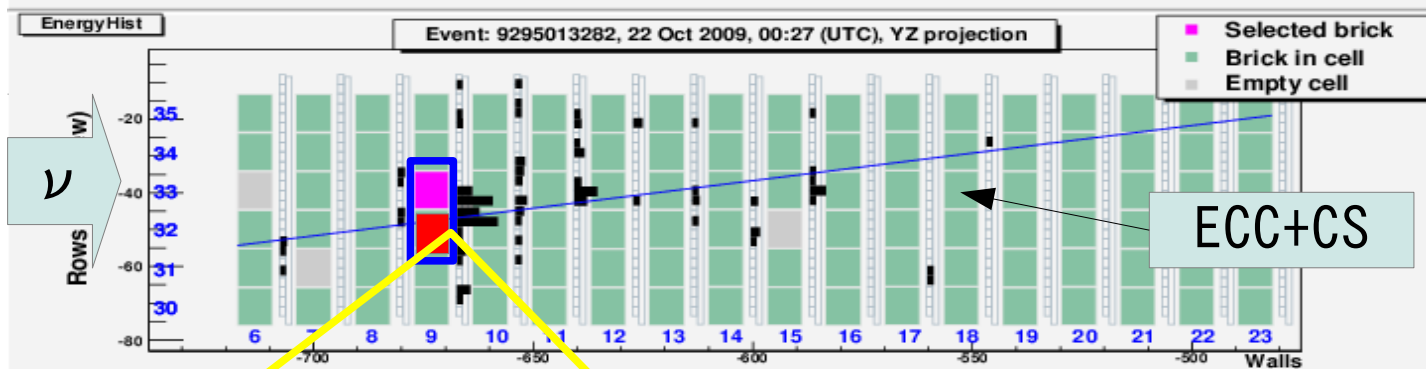
→イベントトリガー
→候補ECCの絞込み

CSでECCを特定する

Top View



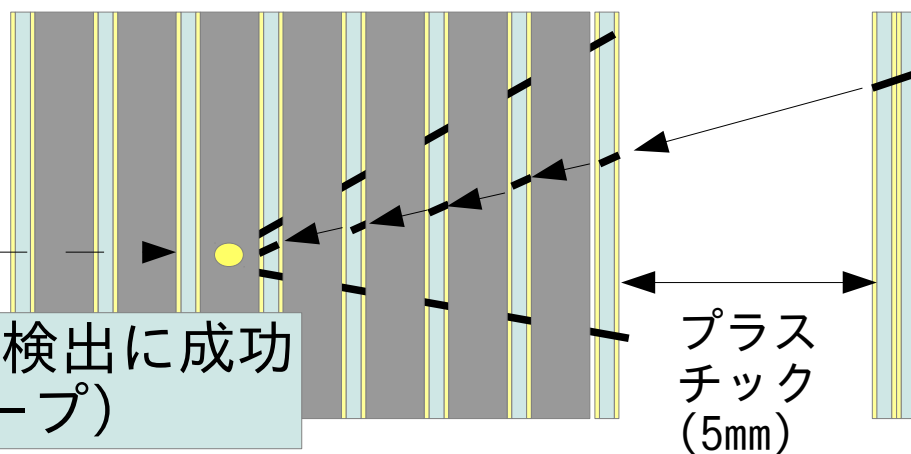
Side View



ECC

CS

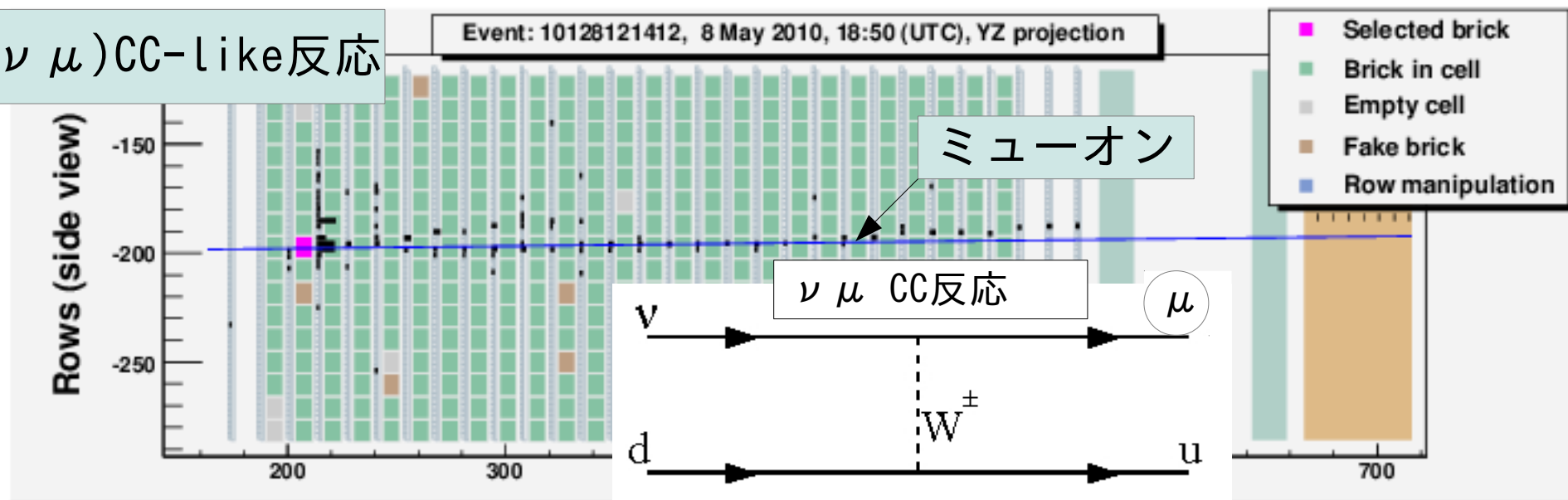
TT



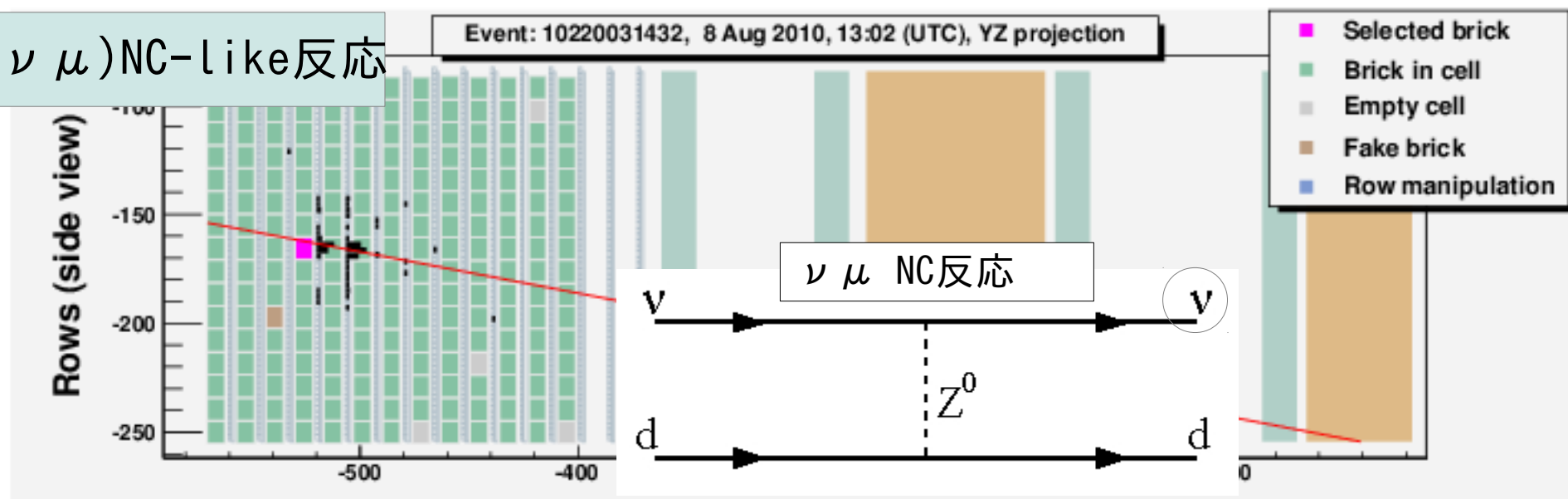
約2000個の反応点検出に成功
(日本グループ)

イベントの種類

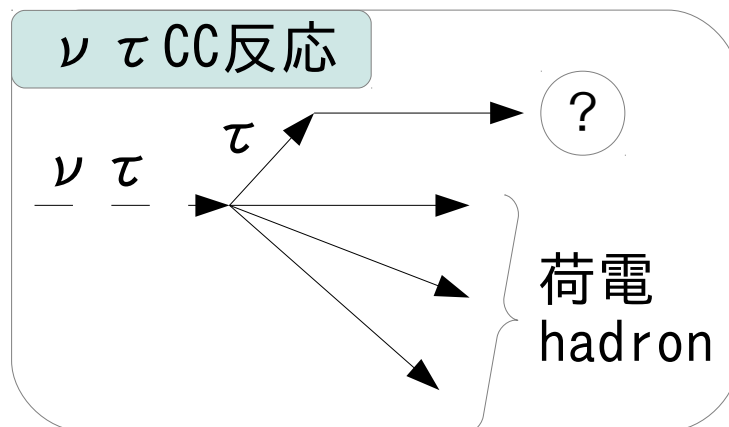
($\nu \mu$)CC-like反応



($\nu \mu$)NC-like反応



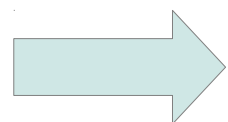
NC-likeイベントの重要性



Decay topology	Decay mode	Branching (%)
Kink	$\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$	18
	$\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$	17
	$\tau^- \rightarrow h^-(nh^0) \nu_\tau$	50
Trident	$\tau^- \rightarrow h^- h^- h^+ (nh^0) \nu_\tau$	15
計		100

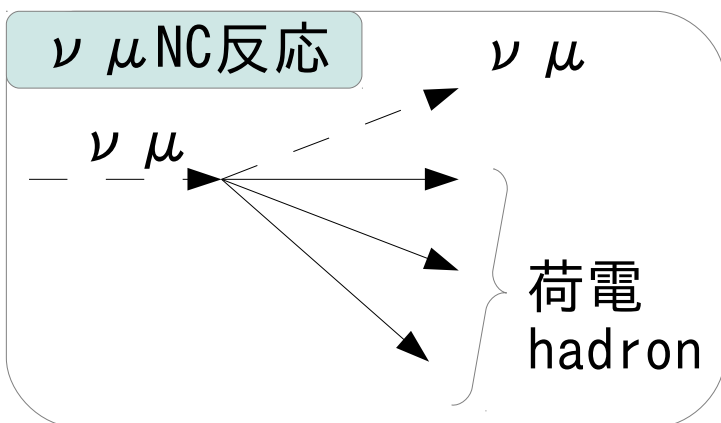
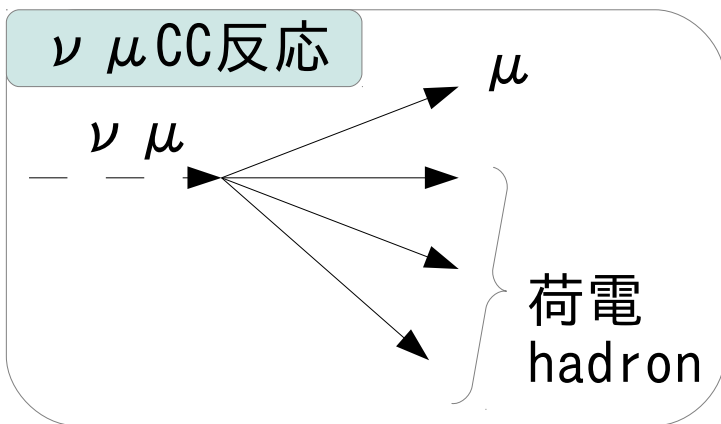
NC-like

イベント数の比率 → CC反応:NC反応~3:1

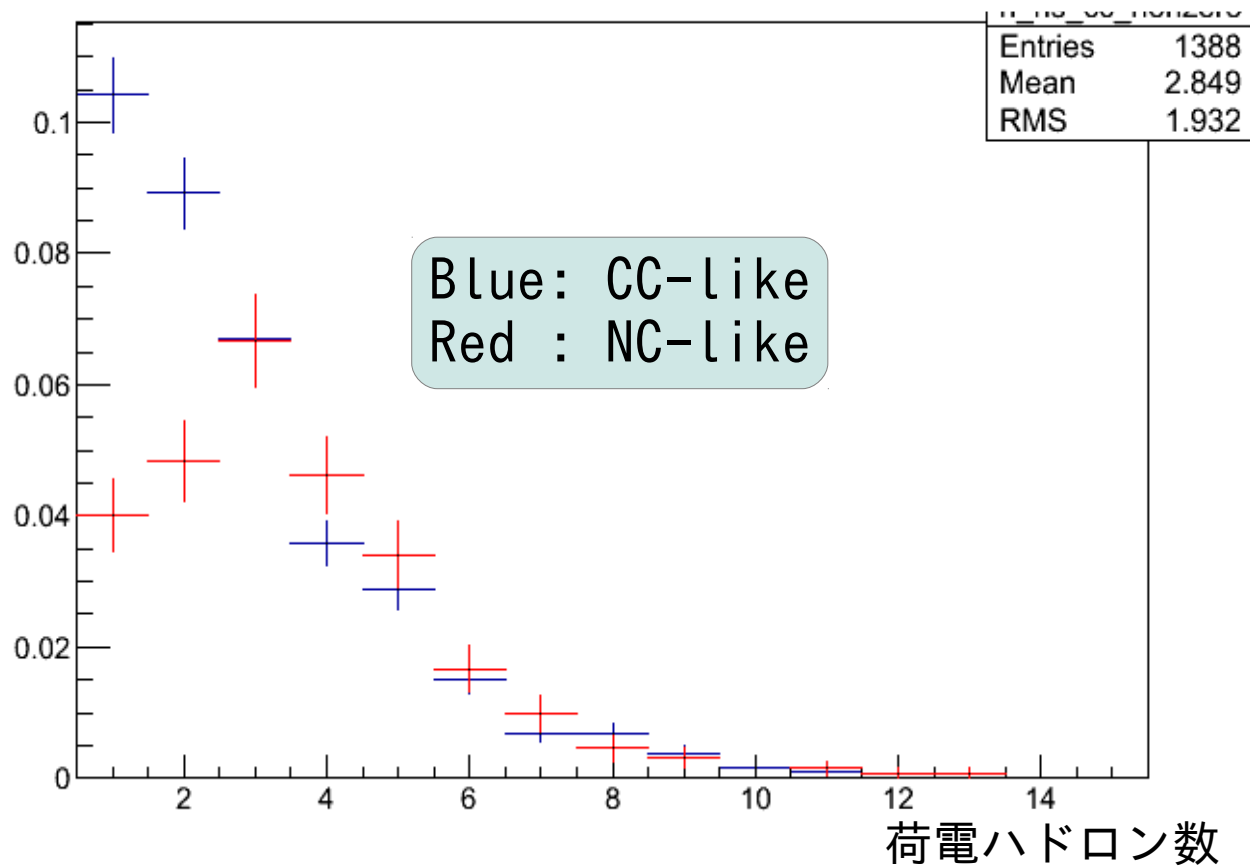


NC-like反応のひとつの重みはCC-like反応に対して約12倍

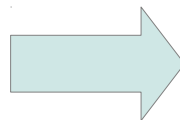
CC-like反応に対するNC-like反応の検出効率



反応点が確定したイベントの荷電ハドロン数による分布
(CC-like、NC-like別トリガー数に対する割合)

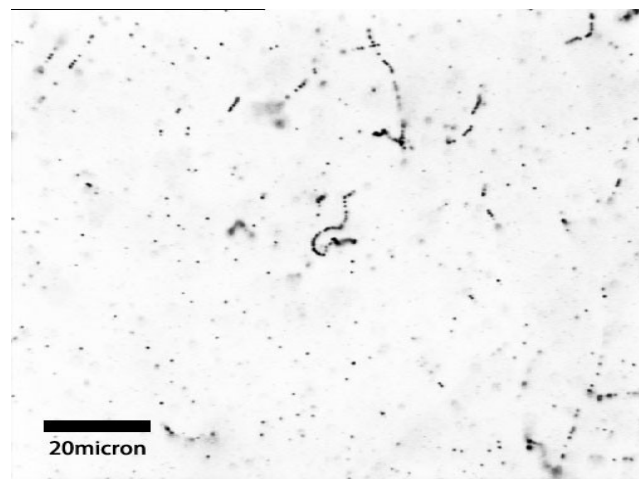
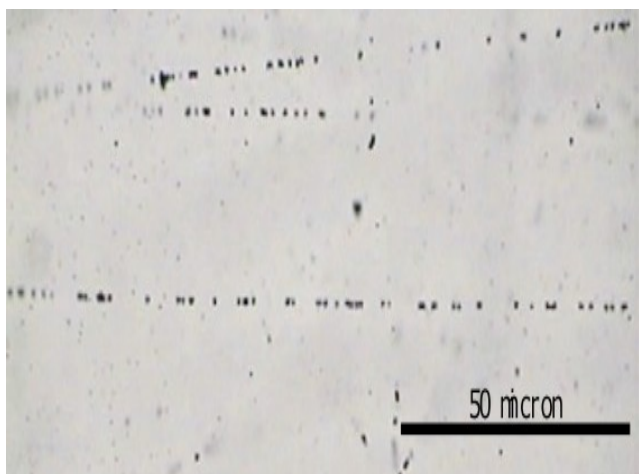


荷電ハドロン数=1,2で
NC-likeイベントのロス



飛跡の検出効率の検証が必要

CSの飛跡再構成

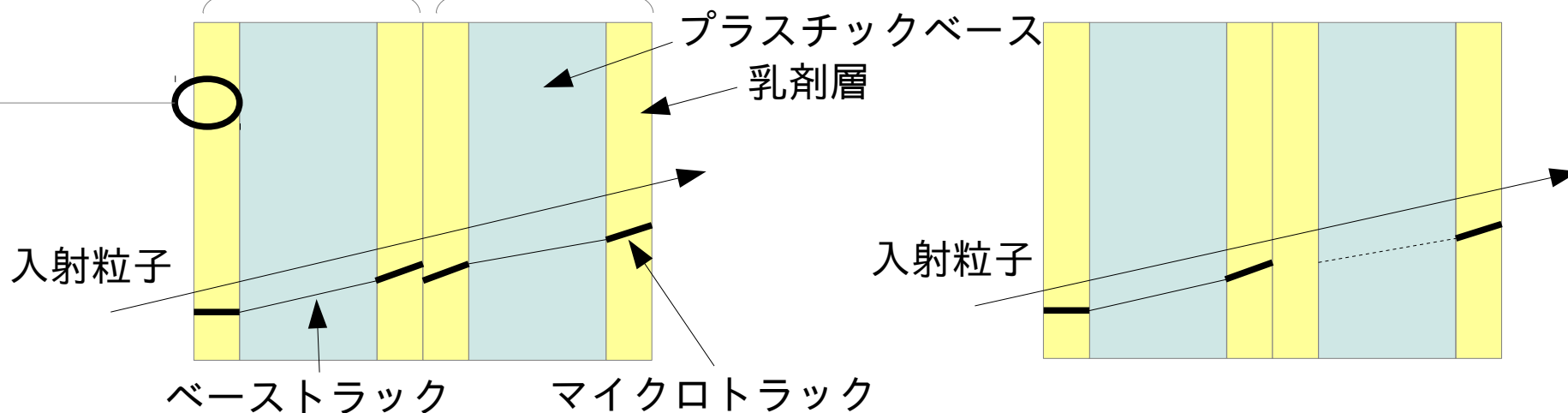


自動飛跡読み取り装置でのスキャンニング(数十cm²) → 100万本/cm²

4レイヤートラック → 10本/cm²

3レイヤートラック

フィルム フィルム



ライクリフト法による飛跡の信頼度

本物の飛跡と偽物の飛跡の確率密度分布から本物らしさを評価。

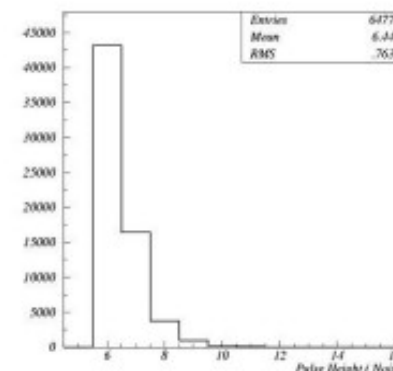
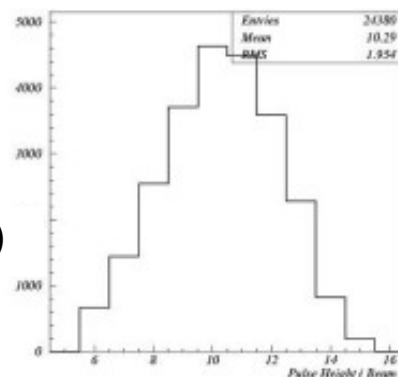
使用パラメーター：

- 飛跡の濃さ
- ベーストラック同士の角度ズレ
- ベーストラックとマイクロトラックの角度ズレ

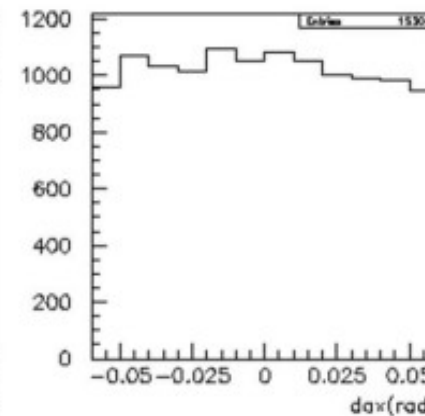
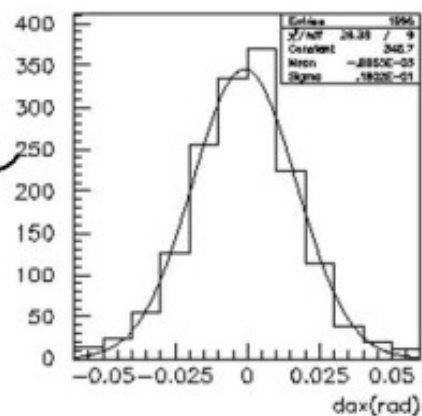
高エネルギー粒子

コンプトン電子

PH分布
(飛跡の濃さ)



角度ズレ
分布

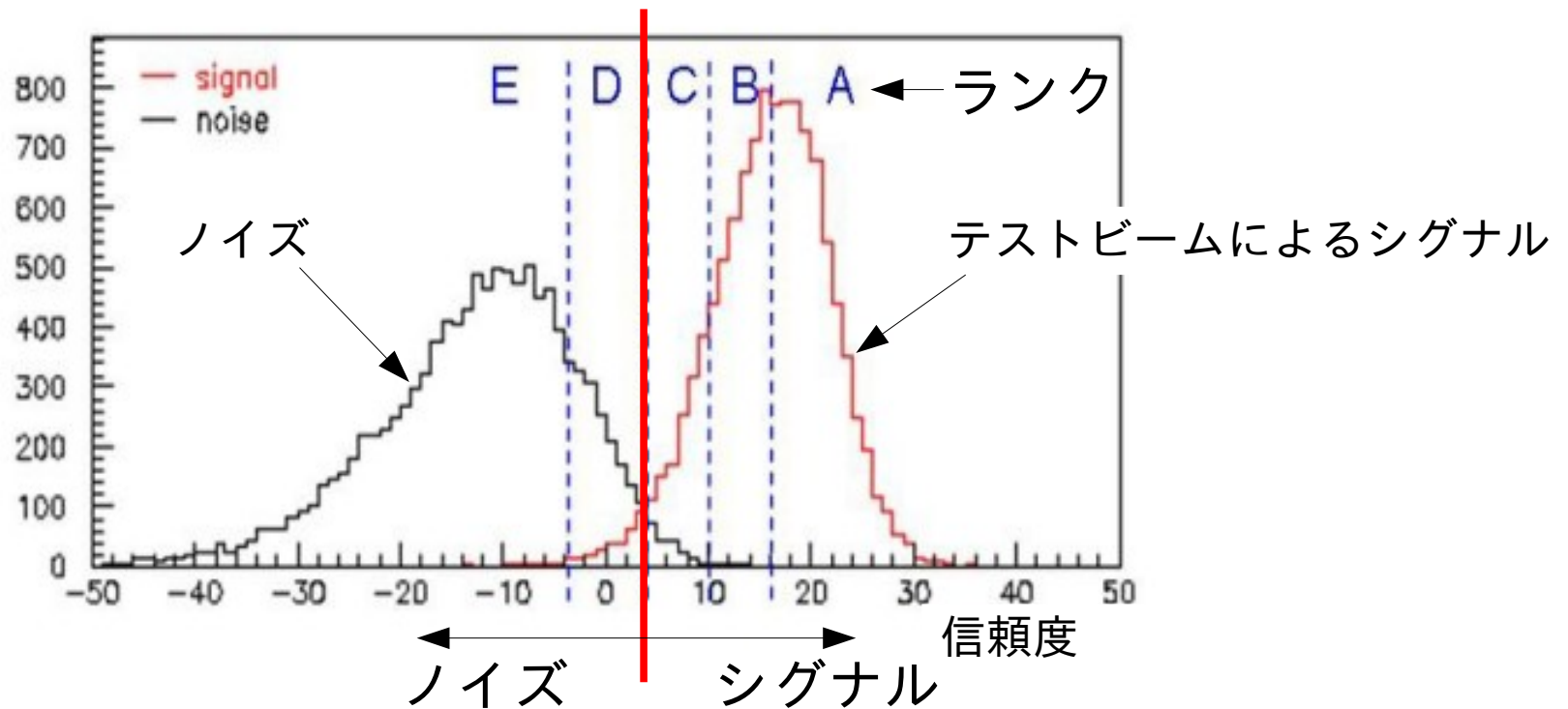


$$L^{signal} = \prod_{i=1}^4 P_{PH_i}^{signal}(\theta) * \prod_{i=1}^8 P_{dAmicro_i}^{signal}(\theta) * P_{dAbase_i}^{signal}(\theta) \quad (\text{福田D論})$$

$$L^{noise} = \prod_{i=1}^4 P_{PH_i}^{noise}(\theta)$$

信頼度 Reliability Value: $R = \log \frac{L^{signal}}{L^{noise}}$

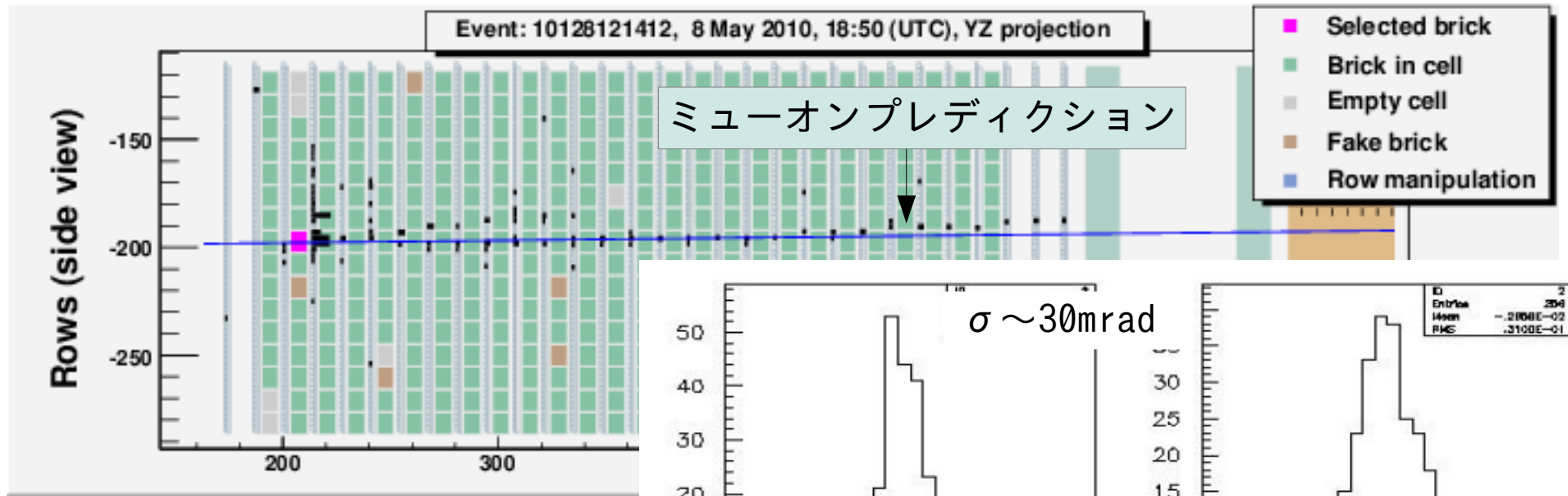
飛跡の信頼度と検出効率見積もり



シグナル

Track Rank	The reliability as real track	Tracking efficiency (%)	BG density (/cm ²)
A	$R > 16$	43	0.001
B	$16 > R \geq 10$	68 (A, B)	0.01
C	$10 > R \geq 4$	77 (A~C)	0.2
D	$4 > R \geq -4$	79 (A~D)	1.6
E	$-4 > R$	79 (A~E)	8

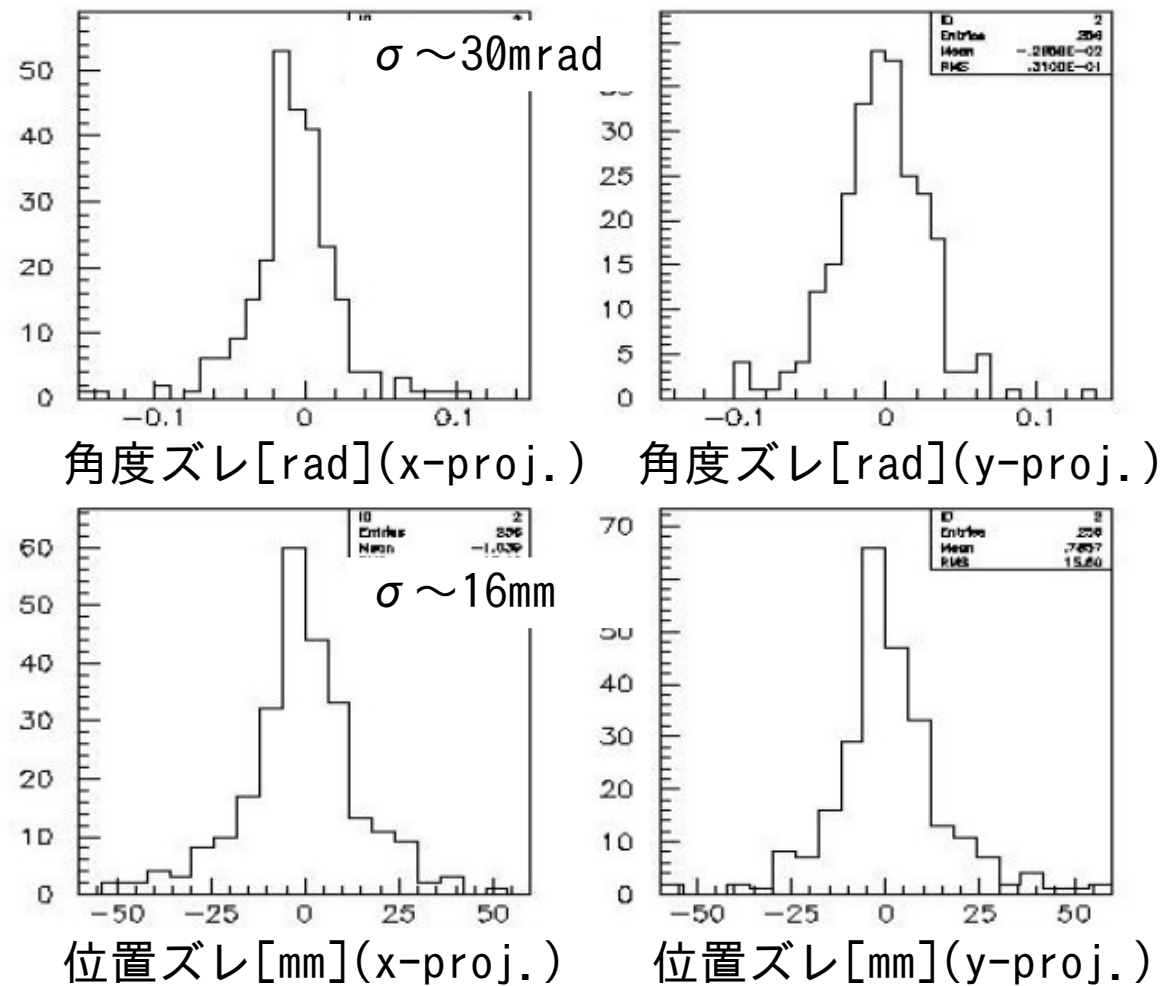
ミューオンに対する3レイヤートラック探索



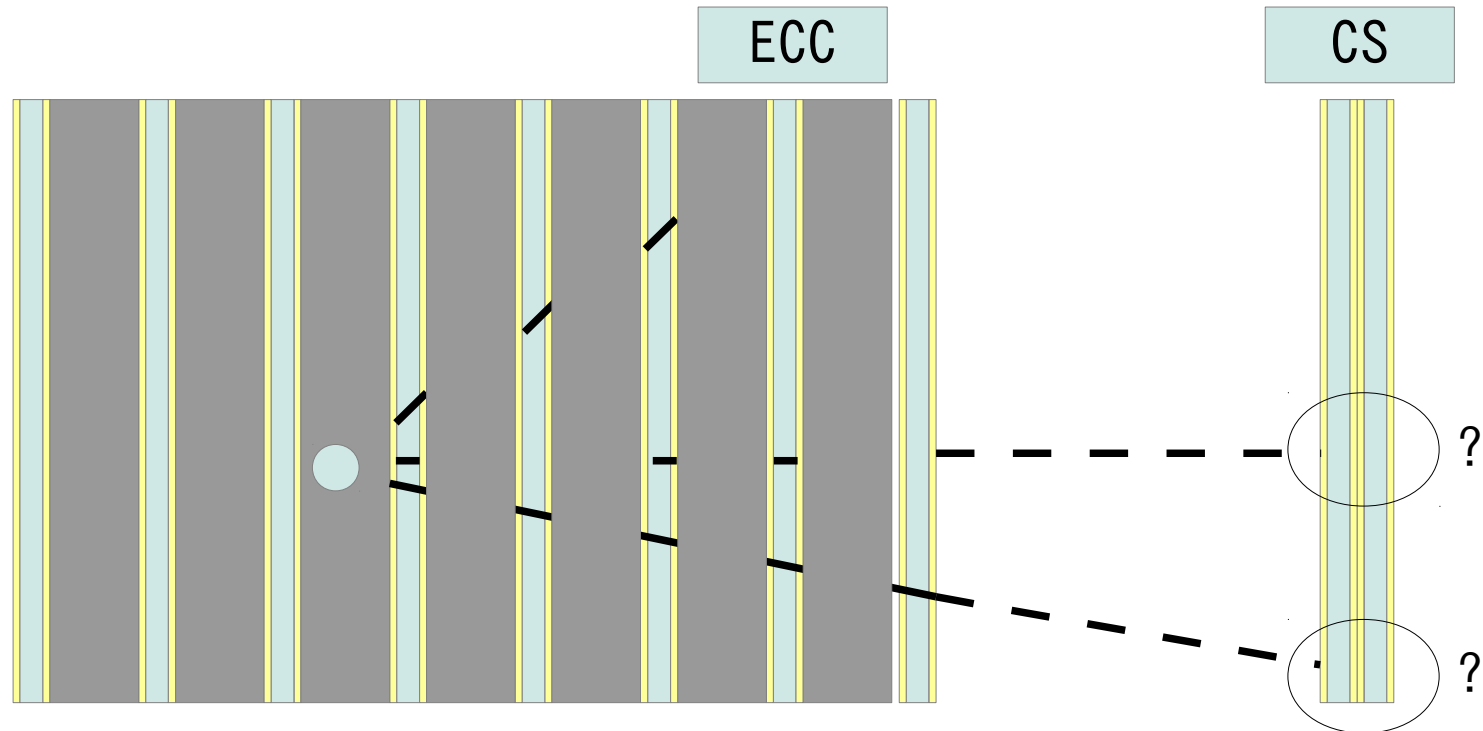
TTの予想位置、角度からのズレにより探索領域を絞る。

3レイヤートラックのランクの高いものを10個程度チェック。

テストビームによる検出効率の見込み95%。



検出効率の検証



確定した反応点から出ている最小電離粒子の飛跡をCSに延長し、3レイヤートラックまで探索。

運動量 $> 1 \text{ GeV}$ 。

→ 72本の飛跡に対しCSで検出されているかを調査

CSの飛跡探索条件：

- 信頼度 ≥ 0
- 位置ずれ $< 25 \text{ mm}$
- 角度ずれ $< 50 \text{ mrad}$

結果

3 or 4 レイヤー	ランク	検出効率	見積もり
4	A	0.25 ± 0.05	0.43
	B	0.44 ± 0.06	0.68
	C	0.61 ± 0.06	0.77
	D	0.67 ± 0.06	0.79
	E	0.67 ± 0.06	
3	A	0.75 ± 0.05	0.99
	B	0.83 ± 0.04	
	C	0.89 ± 0.04	
	D	0.89 ± 0.04	
	E	0.89 ± 0.04	

ハドロン検出効率：61%
(4レイヤーCランクまで)

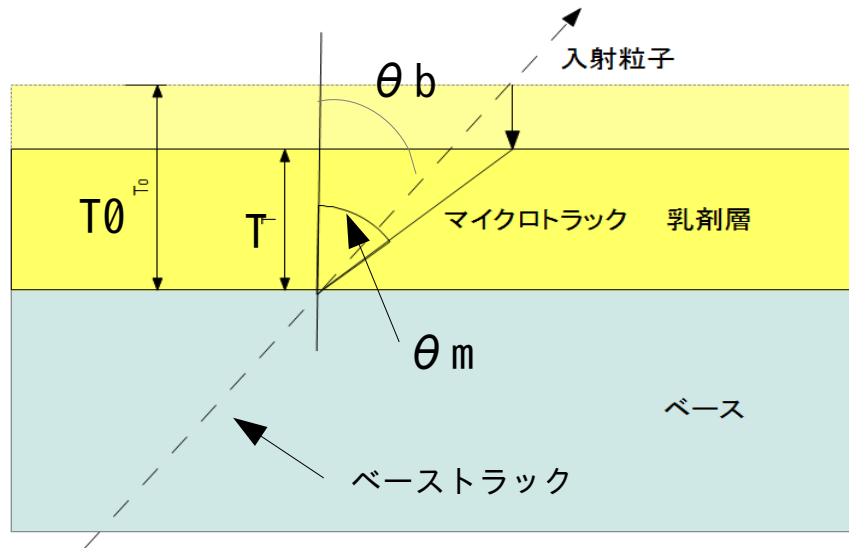
ミューオン検出効率最大：89%
(3レイヤートラックまで)

多くのフィルムを扱うことによるバラツキを補正しきれていない？

————▶ ばらつきを起こす一因として乳剤の厚み変化を検討

乳剤層の厚み

シュリンク…現像時のグリセリン吸収量や外気の温度、湿度などによる乳剤の厚みの変化



T_0 : 入射時の厚み

T : スキャン時の厚み

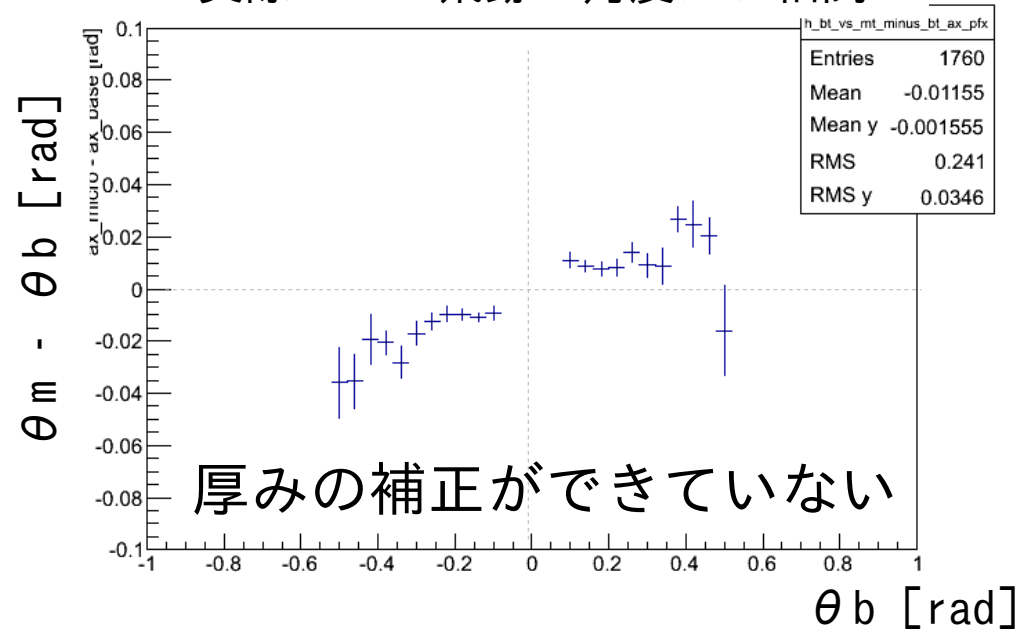
θ_m : マイクロトラックの角度

θ_b : ベーストラックの角度
(=入射粒子の角度)

$$\theta_m = \frac{T_0}{T} \theta_b$$

$$\theta_m - \theta_b = \left(\frac{T_0}{T} - 1 \right) \theta_b \rightarrow$$

実際のCSの飛跡の角度ズレ相関



厚みの補正值の推定

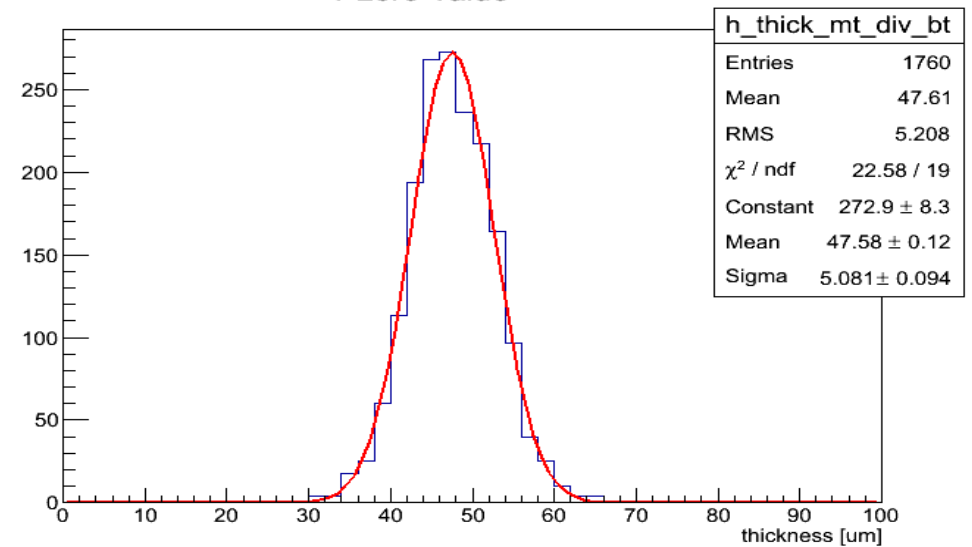
これまでにCSで検出された飛跡について

$$\theta_m = \frac{T_0}{T} \theta_b$$

により補正值 T_0 を算出。

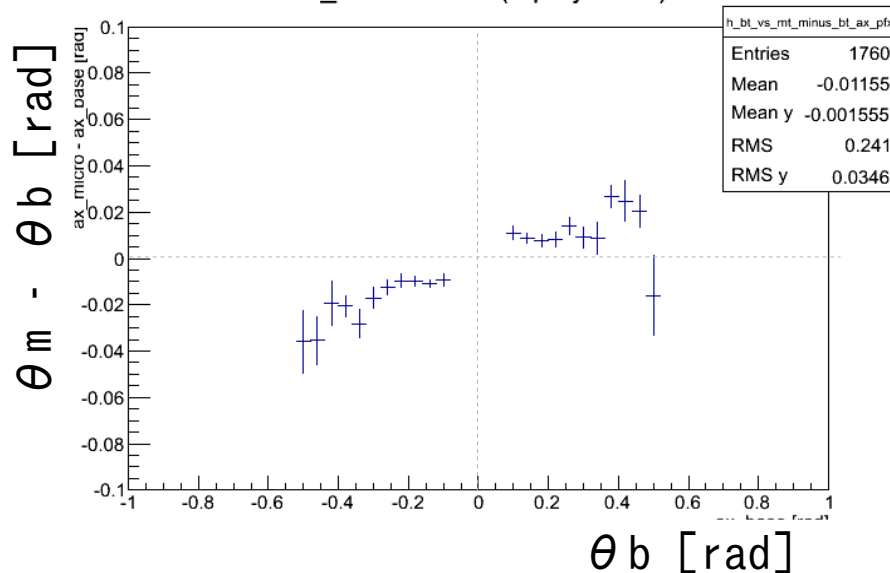
→ $47.6 \pm 5.1 \mu\text{m}$

T-zero Value



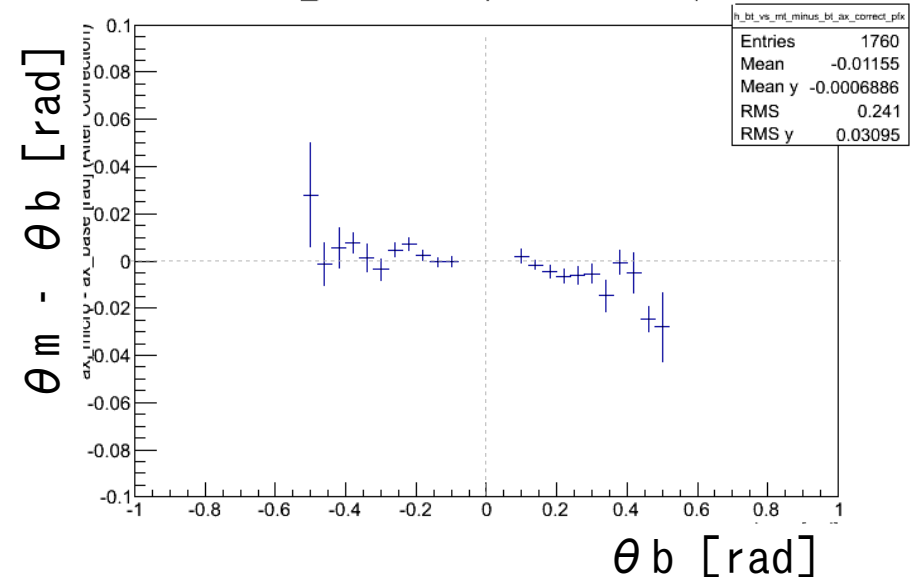
補正前

ax_base vs dax (x-projection)



補正後

ax_base vs dax (After Correction)



厚みの補正によるランクの変化

検出効率評価に使った飛跡サンプルにシュリンク補正を施す。

- 4レイヤートラックの20%についてランクが向上。4%についてランクが低下。
- 新たに見つかった飛跡はなし。
- ハドロン検出効率2%向上。

レイヤー	ランク	検出効率		見積もり
		シュリンク補正前	シュリンク補正後	
4	A	0.25 ± 0.05	0.29 ± 0.05	0.43
	B	0.44 ± 0.06	0.53 ± 0.06	0.68
	C	0.61 ± 0.06	0.63 ± 0.06	0.77
	D	0.67 ± 0.06	0.65 ± 0.06	0.79
	E	0.67 ± 0.06	0.67 ± 0.06	

他の可能性：

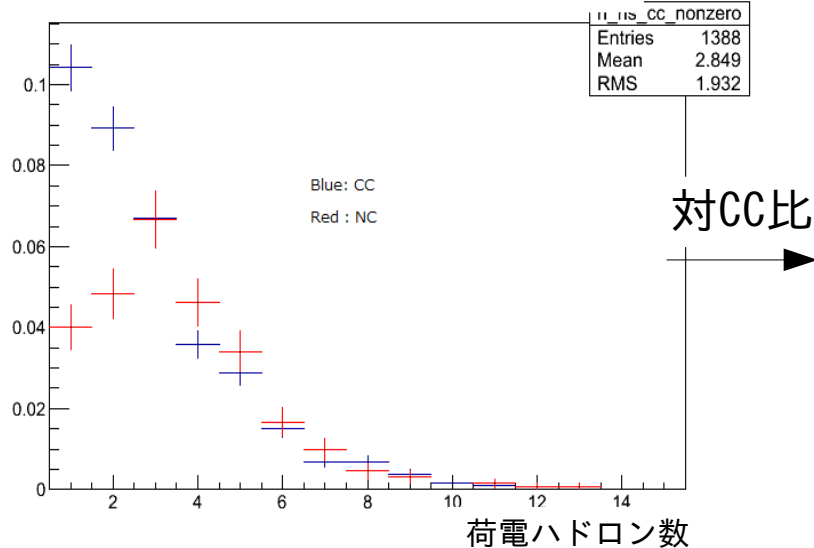
非一様に生じる歪み

潜像退行現象による飛跡の濃さの減少

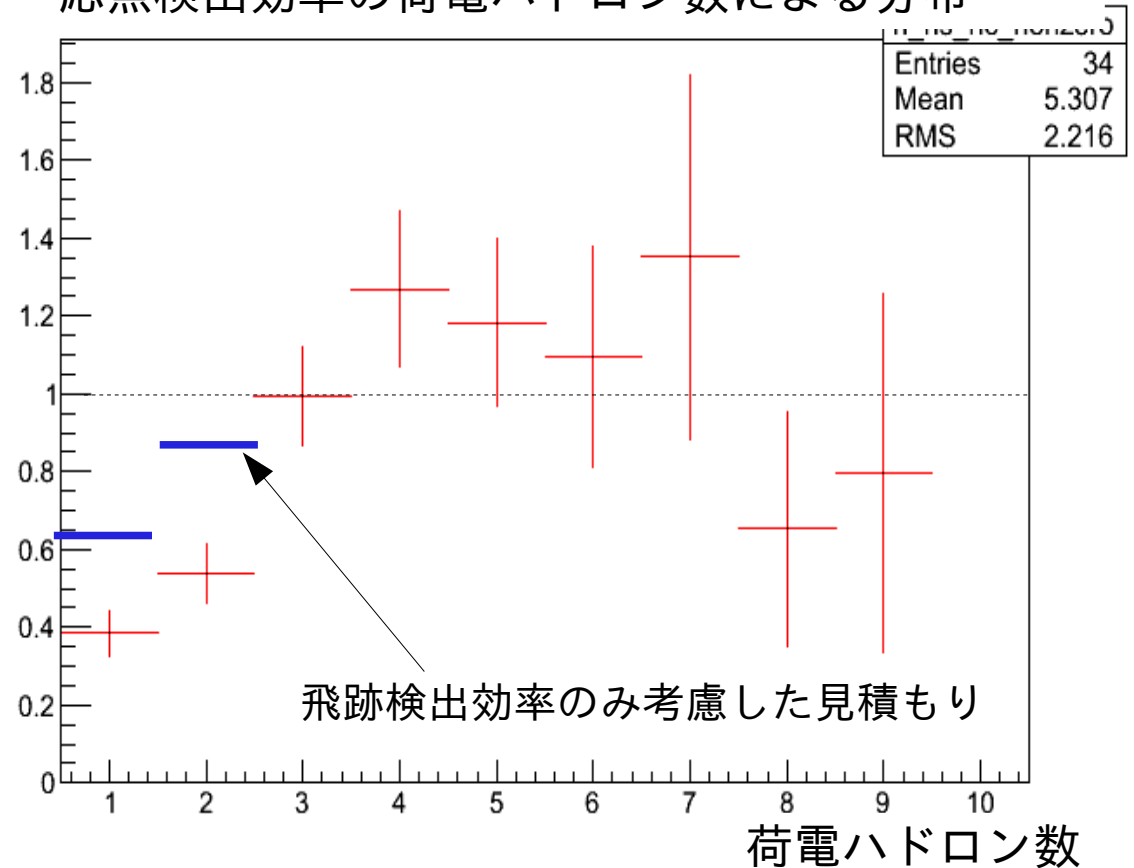
→ 今後の課題

NC-like反応の検出効率(対CC-like反応比)

反応点が確定したイベントの荷電ハドロン数による分布(CC-like、NC-like別)にトリガー数に対する割合



NC-likeイベントのCC-likeイベントに対する反応点検出効率の荷電ハドロン数による分布

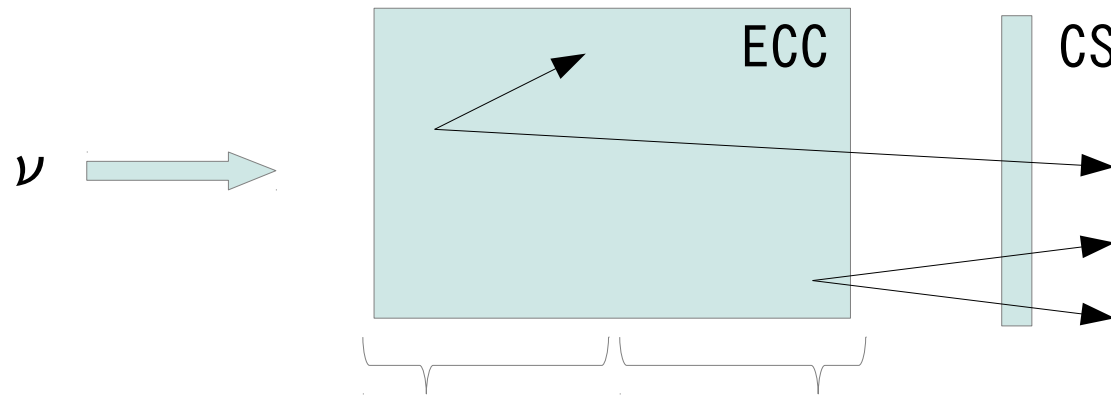


対CC-likeイベント比でのロス考えられる可能性:

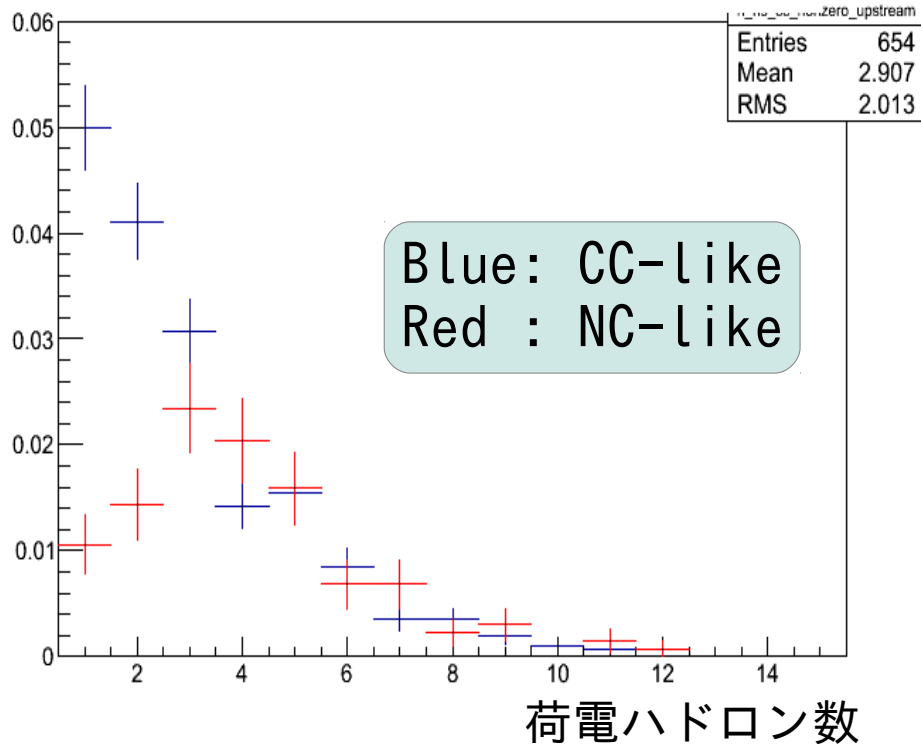
- 二次反応
- 角度、運動量のアクセプタンス
- 反応点の確定が困難
- 解析したCSの数が不十分

→ 今後詳しい検討を進める

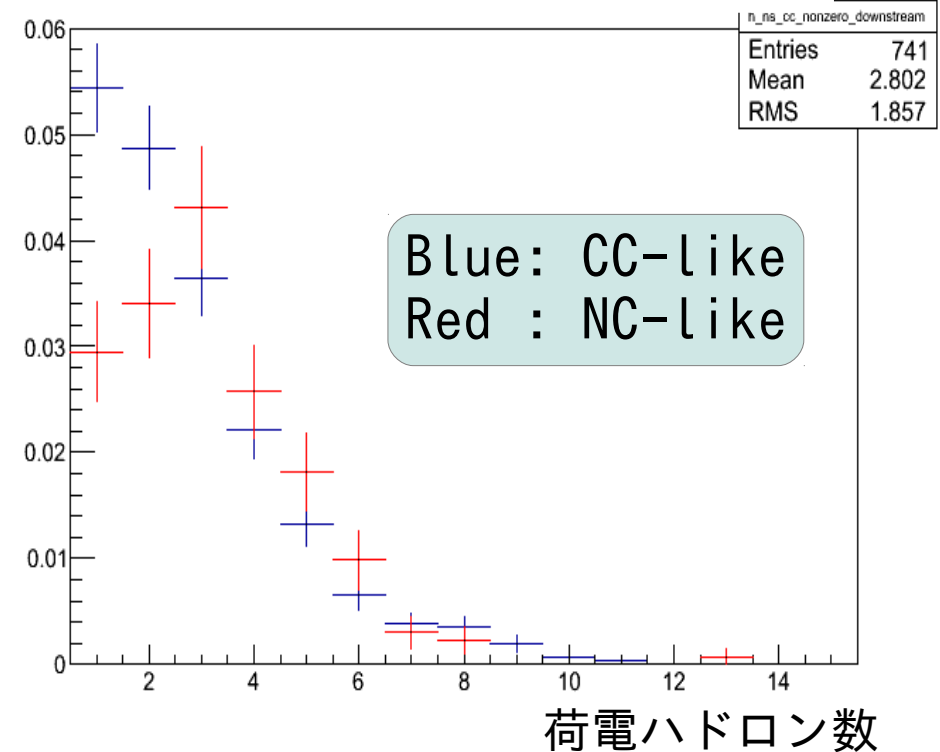
ECCの上流と下流で分類



確定した反応点の分布(上流)

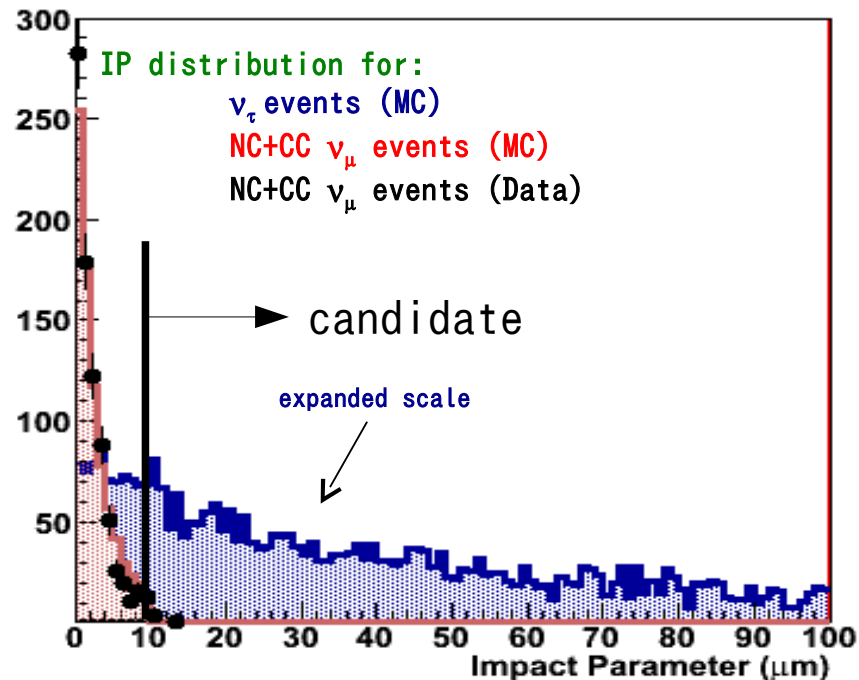
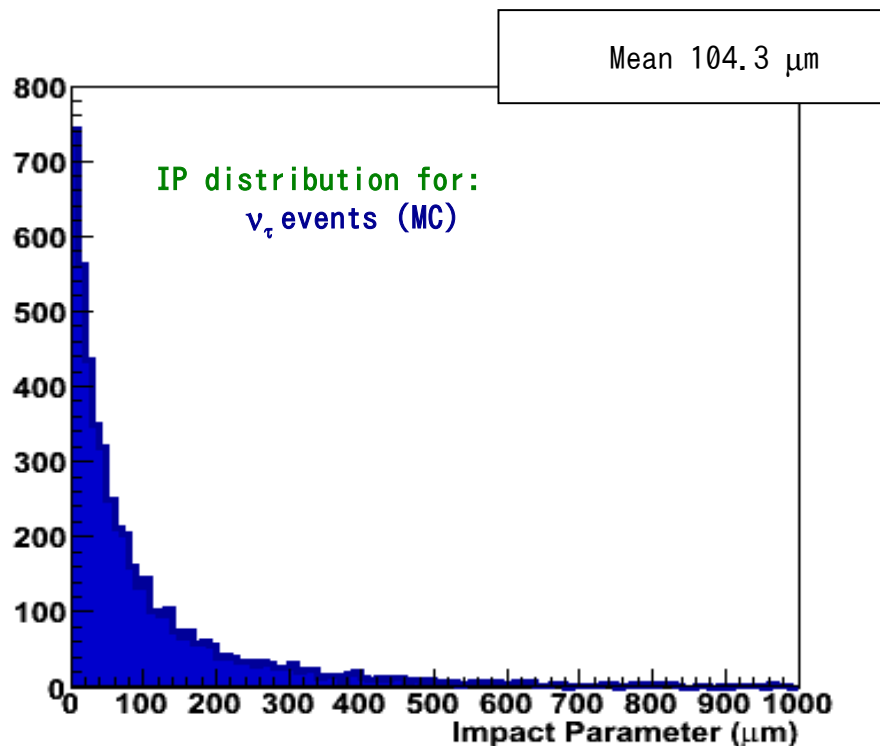


確定した反応点の分布(下流)



二次反応の兆候あり

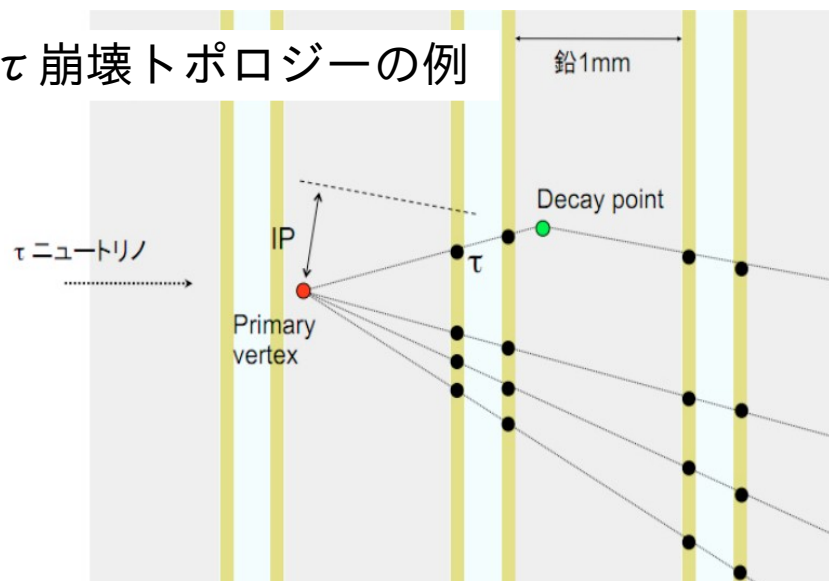
現状の崩壊粒子探索



崩壊の娘粒子候補：

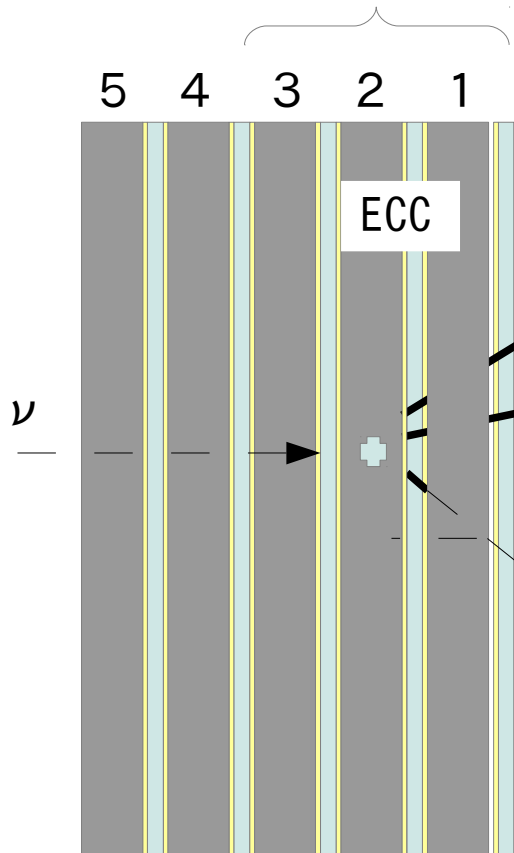
- $10 < IP < 500$ [μm]
- ECCフィルム3枚以上で再構成されていることを要求

τ 崩壊トポロジーの例



CSの情報を加味した崩壊事象探索

通常の崩壊事象探索
における不感領域



CSを使った新しい取り組み

CSでは検出されているが、ECCでは検出されていない飛跡

→崩壊の娘候補

- IP評価 (study中)
- ECC中の飛跡探索

ECCでは検出されているが、CSでは検出されていない飛跡

→崩壊の親候補

- CSの飛跡を3レイヤートラックまで探索
- CSで娘候補を探索 (飛跡探索効率~90%)

まとめ

- OPERAでは、CSで飛跡を見つけられるかが反応点検出の決定的なポイント。
- NC-like反応はCC-like反応に比べて τ の重みが大いだが、荷電ハドロン数の少ないイベントでロスがあることを特定。
- 実際のデータを用いてCSの飛跡検出能力を検証した。
→ハドロンに対して61%、ミューオンに対して89%。
- 乳剤の厚みを補正することによる検出効率の向上を検討。
→飛跡のランクが向上し、ハドロン検出効率UP。
- NC-likeイベントに対する検出効率の理解を進めている。
→荷電ハドロンの二次反応および角度や運動量分布を検証し、更なる理解を目指す。
- ECC下流のイベントに対してCSを活用することで、崩壊事象探索の不感領域をなくす試みが進行中。