



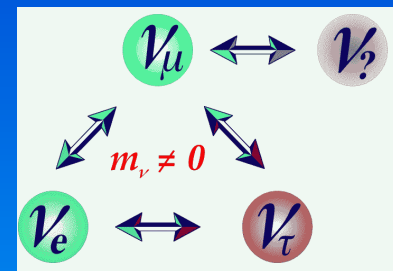
OPERA実験における タウニュートリノ反応背景事象の詳細研究

東邦大学 福田 努

On behalf of Toho emulsion group

The OPERA experiment

Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus



Belgium
ULB Brussels



Italy
Bari
LNF Frascati
L'Aquila
LNGS
Naples
Padova
Rome
Salerno



Korea
Jinju



Croatia
IRB Zagreb



Russia
INR RAS Moscow
LPI RAS Moscow
ITEP Moscow
SINP MSU Moscow
JINR Dubna



France
LAPP Annecy
IPNL Lyon
IPHC Strasbourg



Japan
Aichi edu.
Kobe
Nagoya
Toho
Utsunomiya



Switzerland
Bern
ETH Zurich



Germany
Hamburg



Israel
Technion Haifa



Turkey
METU Ankara

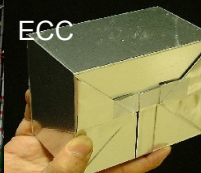


160 scientists, 11 countries, 30 institutes



OPERA Detector

x 150,000 ECC



Lead plate

OPERA film

★ OPERA design

Expected number of neutrino interaction
(22.5×10^{19} pot/5yr/1.25kton)

~23600 ν_μ CC + NC

~160 $\nu_e + \nu_e$ CC

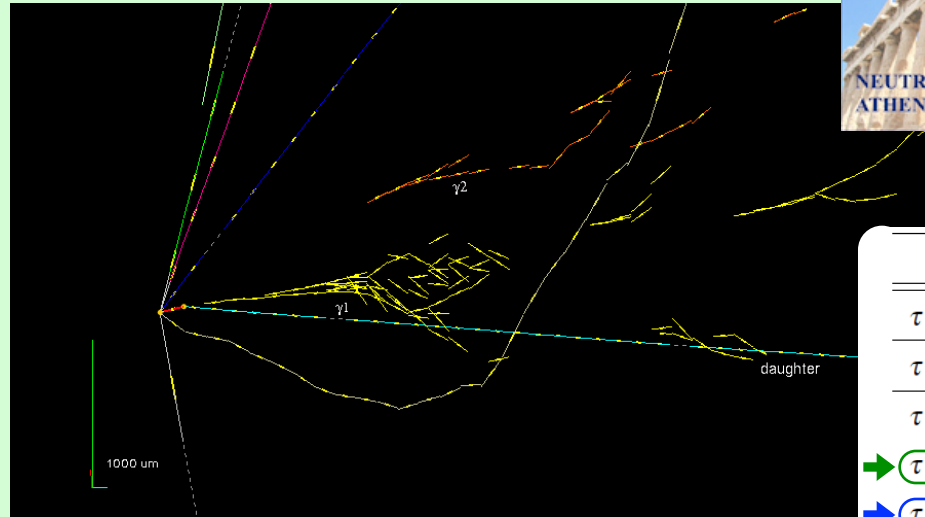
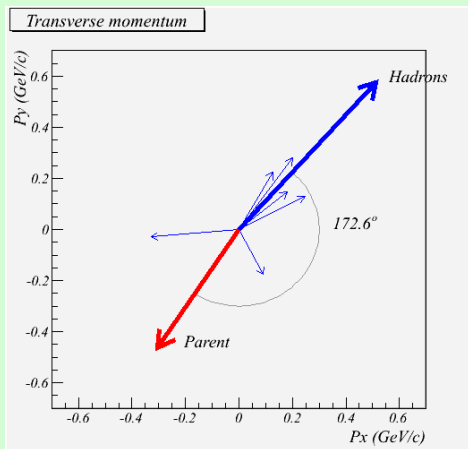
~115 ν_τ CC ($\Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$)

~10 ν_τ CC identified (BG < 1)

$\nu_\mu \Rightarrow \nu_\tau$ ニュートリノ振動を ν_τ の "出現" で検証し、ニュートリノ振動現象の有無の最終決着をつける。

ν_τ appearance

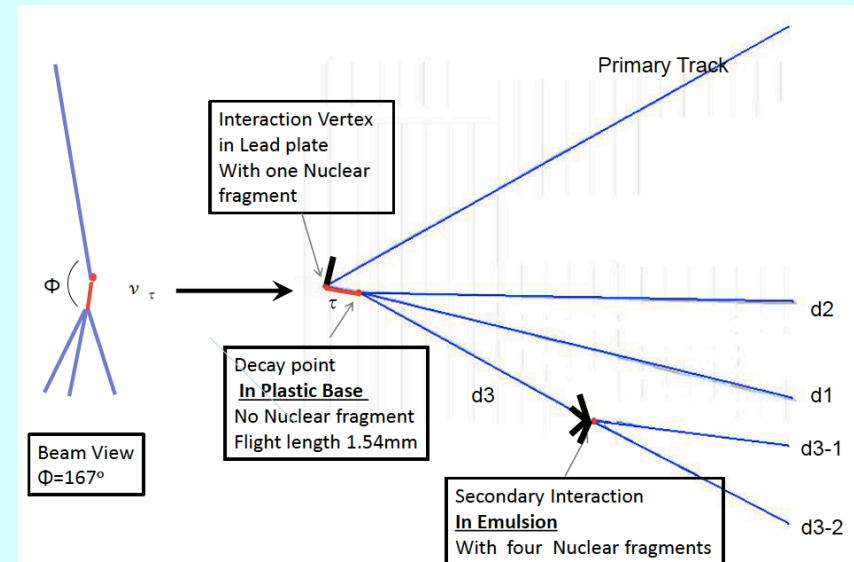
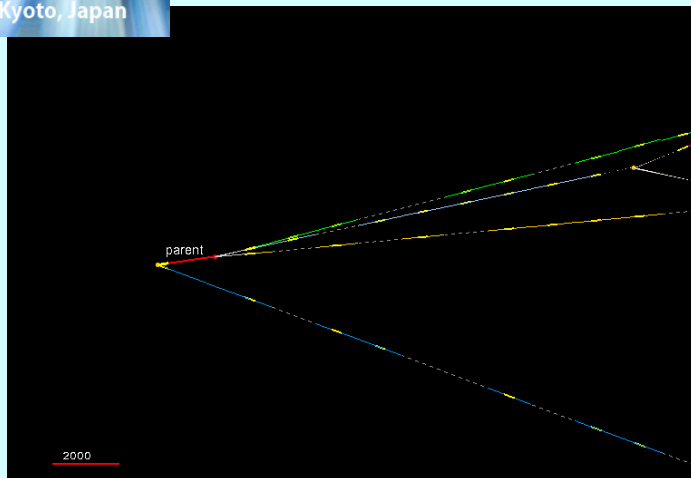
1st event



崩壊モード	分岐比
$\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$	17.4%
$\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$	17.8%
$\tau^- \rightarrow h^- \nu_\tau$	11.6%
$\tau^- \rightarrow h^- \nu_\tau X^0$	37.0%
$\tau^- \rightarrow h^- h^- h^+ \nu_\tau X^0$	15.2%

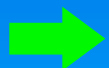
NEUTRINO 2012
June 3-9 2012 Kyoto, Japan

2nd event



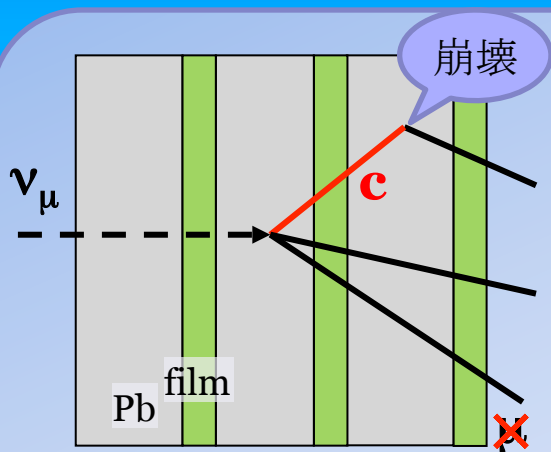
# of events for Decay search	Expected ν_τ (Preliminary)	Observed ν_τ	Expected BG for ν_τ (Preliminary)
4126	2.1	2	0.2

OPERAでのニュートリノ振動研究

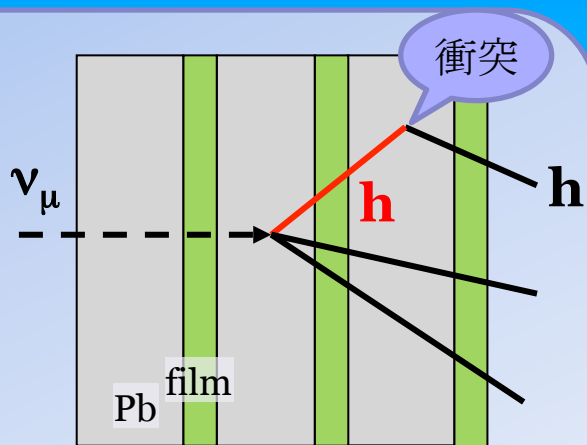


- 第三, 第四の ν_τ 反応の探索
- バックグラウンド事象の詳細解析

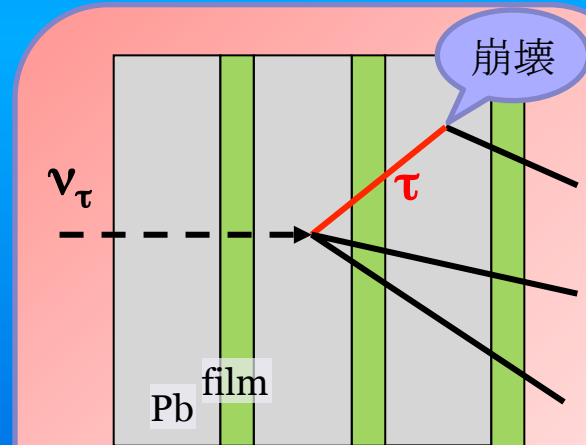
Main background source



① charm崩壊事象



② ハドロン衝突事象



Signal: τ 崩壊事象

① τ 粒子と同じ程度の寿命を持つCharm粒子の崩壊

② ハドロンが鉛中の原子核と衝突を起こす2次反応

← This talk

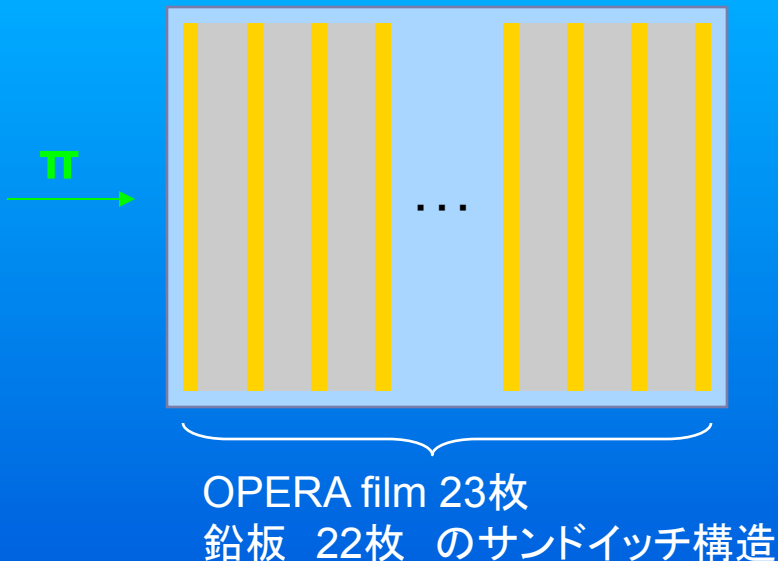
OPERA ECC での Hadron interaction study

研究目的

- $\tau \rightarrow h$ BG の推定に使用しているシミュレーションの実験的検証
- 新たに提案した、反応起因の核破碎片探索によるBG低減法の確立

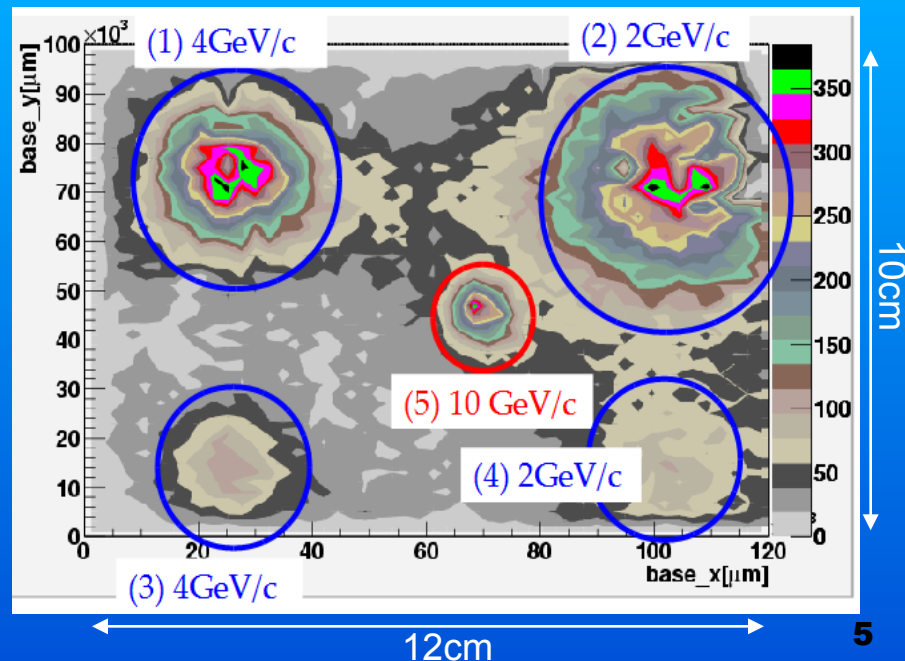
OPERAと同構造のECCにCERNで 2, 4, 10GeV/c π^- beamを照射 (2001年5月)

Chamber 構造



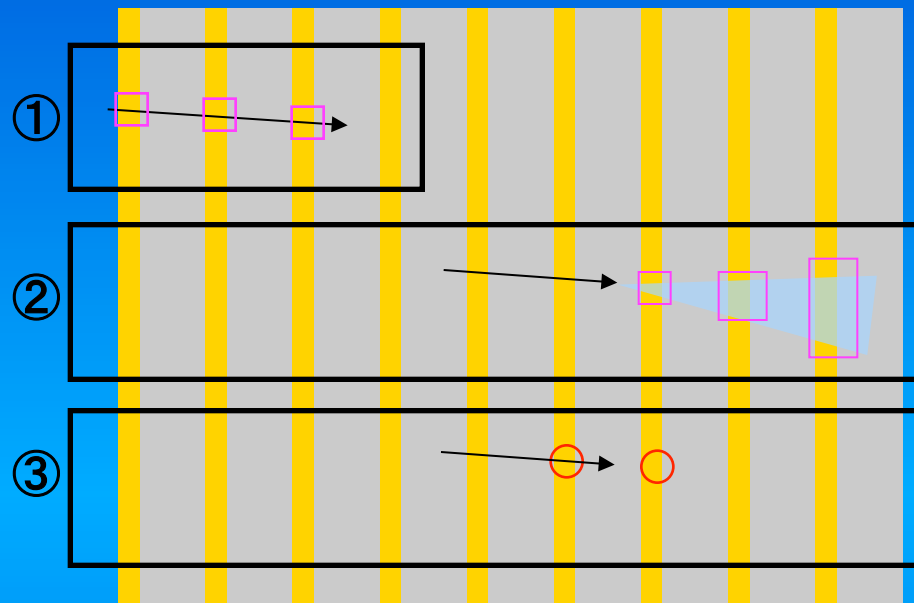
昨年 6月より解析開始

ビーム密度分布

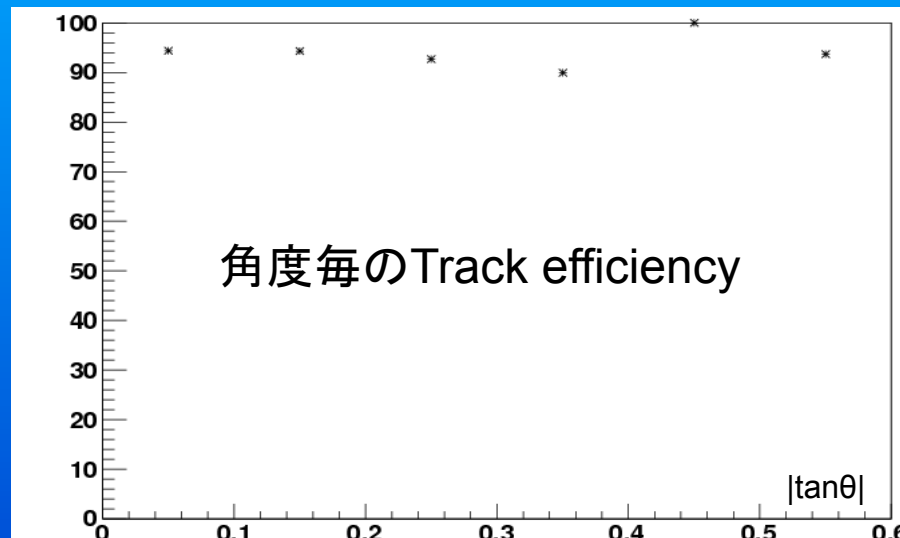
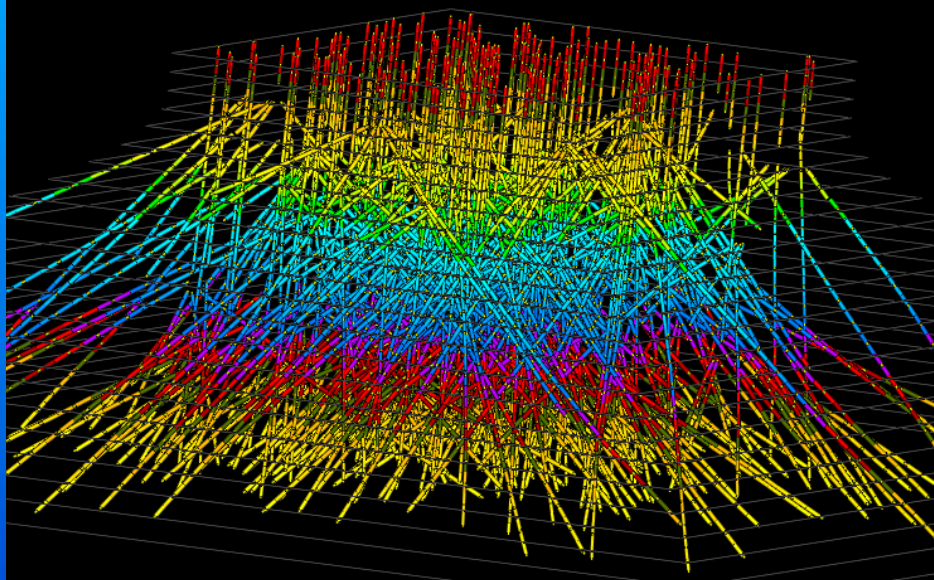


Hadron反応の解析：Hadron interaction の検出

- ① Beam centerを中心とした 1cm^2 , 最上流3枚でbeamをpick up
- ② Beam stop 候補をpick up
 - Kink angle $< 20\text{mrad}$
 - 下流3枚にTrackがない。
- ③ 目視確認でbeam stopをconfirm

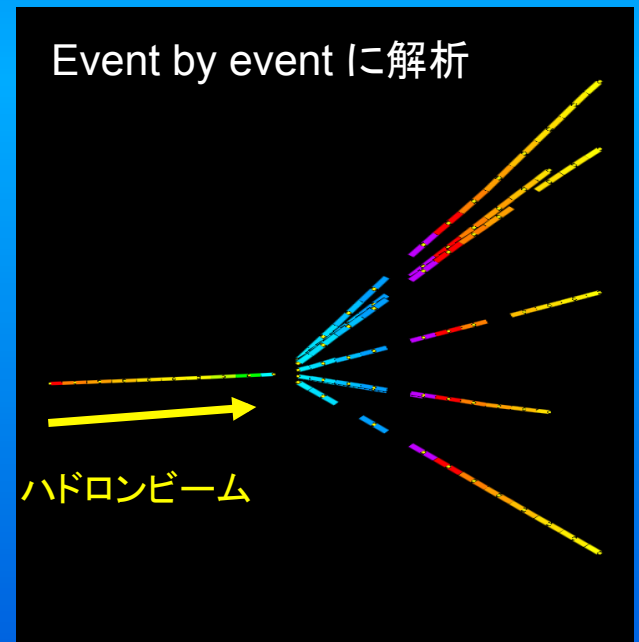
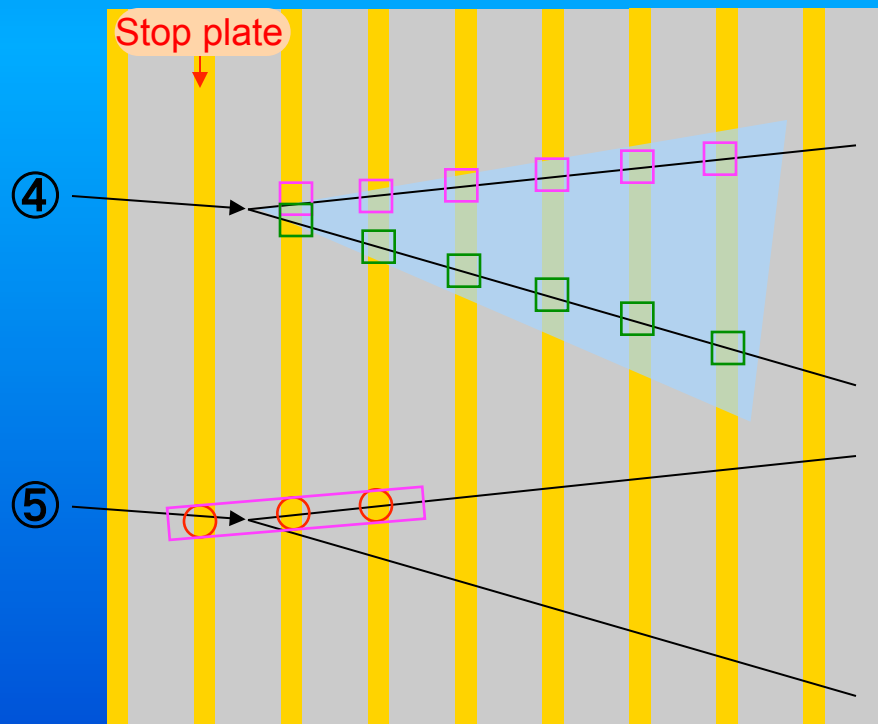


再構成したTrack data



Hadron反応の解析：2次粒子探索

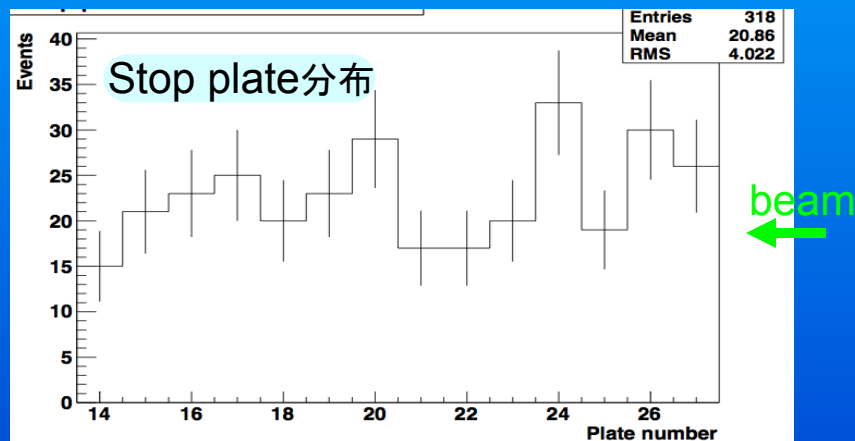
- ④ 2次粒子候補をpick up
 - Stop plate の下流6枚中3枚以上繋がる。
 - 親Track に対する Minimum distance $< (10+0.01 \times \text{depth}) \mu\text{m}$
- ⑤ 2次粒子をconfirm
 - 2次粒子を目視確認
 - Stop plate で2次粒子の突き抜けチェック



Total 目視観察数 $> 10,000$

検出したHadron反応数

		10GeV	4GeV	2GeV
Reconstructed tracks		2215 tracks	907 tracks	584 tracks
Total track length	In ECC	38.5 m	12.6 m	8.5 m
	In lead	29.7 m	9.7 m	6.5 m
Interactions	In ECC	173 events	68 events	77 events
	In lead	170 events	68 events	75 events



今回解析したハドロンTotal track lengthは現在のOPERAの解析の約9倍相当にあたる。

測定結果

OPERAのシミュレーションで生成したハドロン反応を実験と同じ条件で解析

測定結果とシミュレーションの比較を行う。

Comparison between data and MC

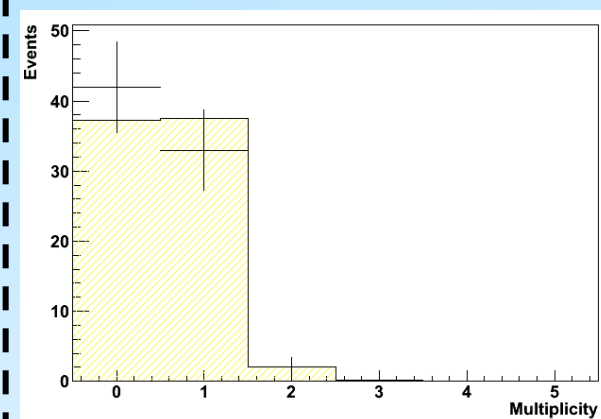
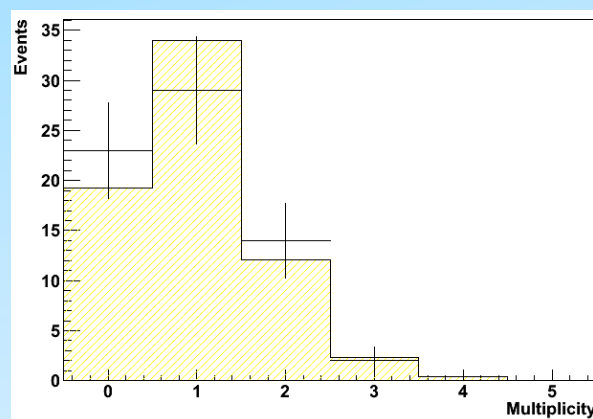
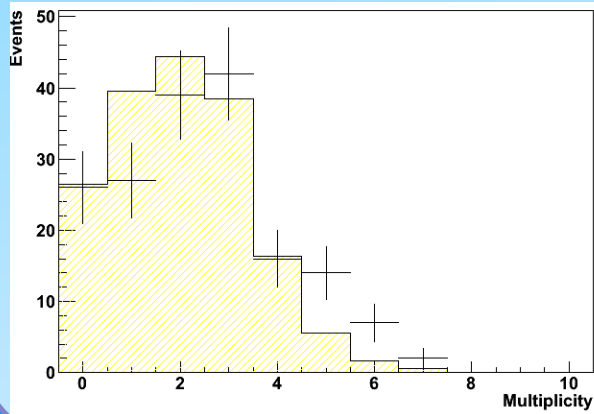
Topological analysis

10GeV/c

4GeV/c

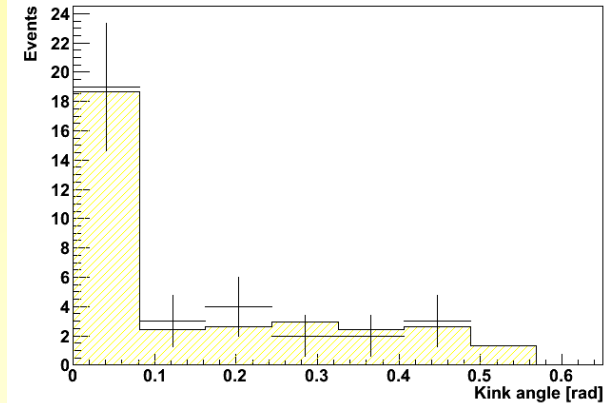
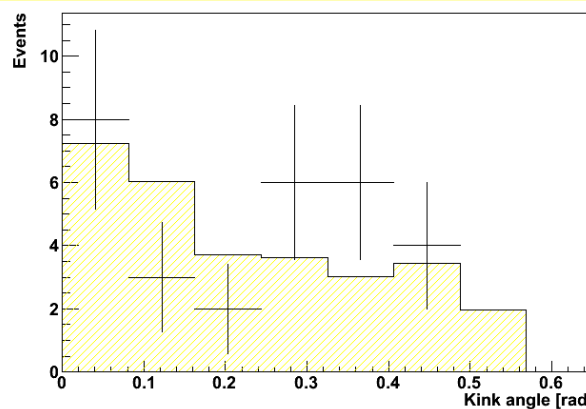
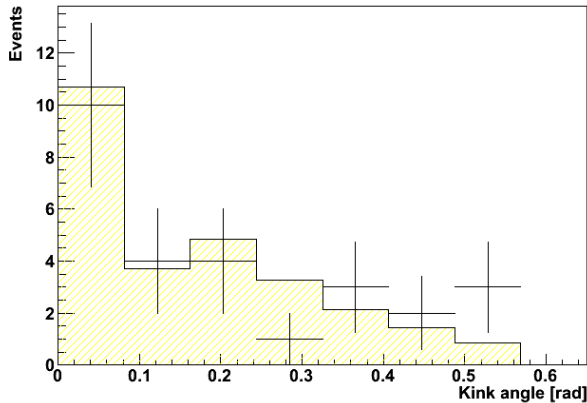
2GeV/c

Multiplicity



Kink angle (1-prong)

Error bars : Experimental data
Histogram : Simulated data



Comparison between data and MC

2次粒子の $P_T - P$ 分布 1-prong events

10GeV/c

4GeV/c

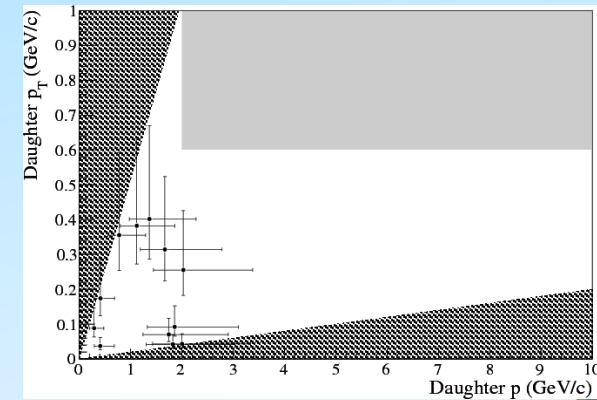
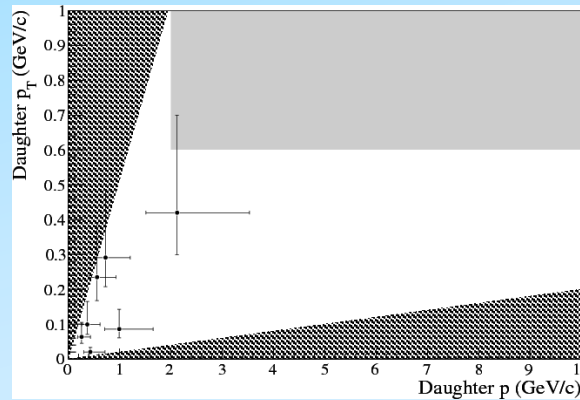
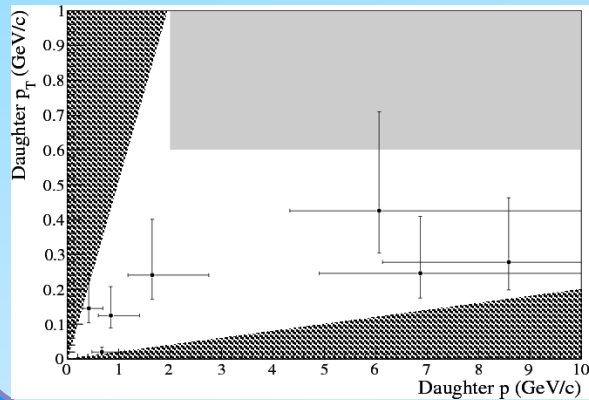
2GeV/c

Data

10 tracks

7 tracks

12 tracks

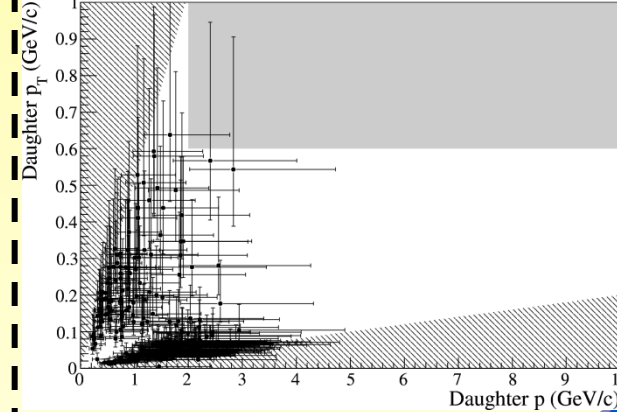
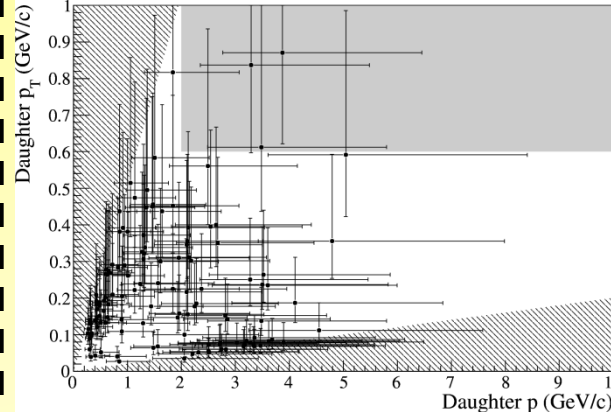
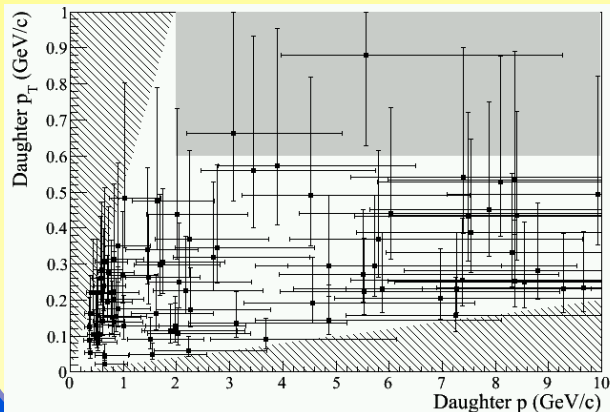


MC

In signal region : 4.4 %

In signal region : 2.4 %

In signal region : 0.0 %



Comparison between data and MC

2次粒子の $P_T - P$ 分布

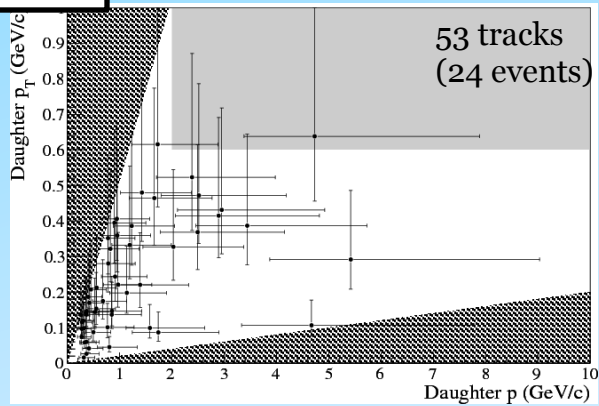
3-prong events

10GeV/c

4GeV/c

2GeV/c

Data In signal region : 1/53 (1.9 %)

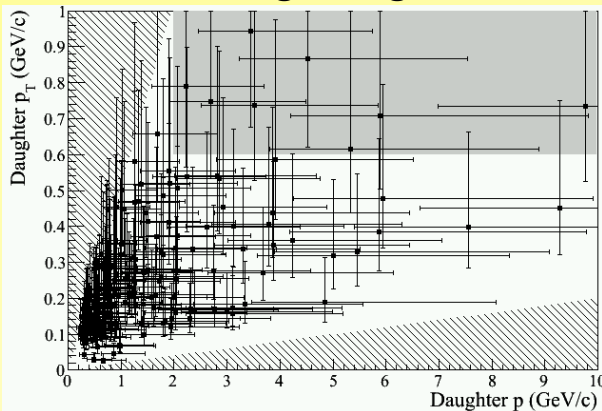


No data

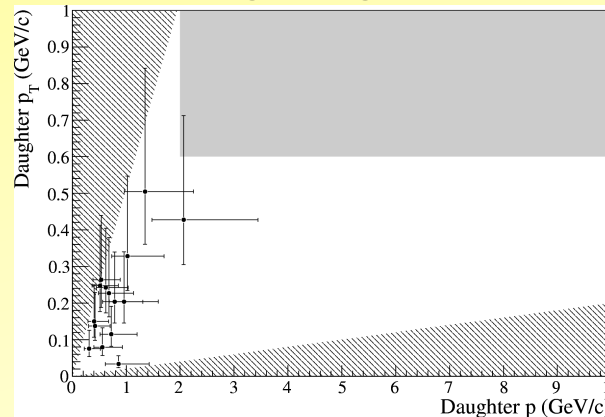
No data

MC

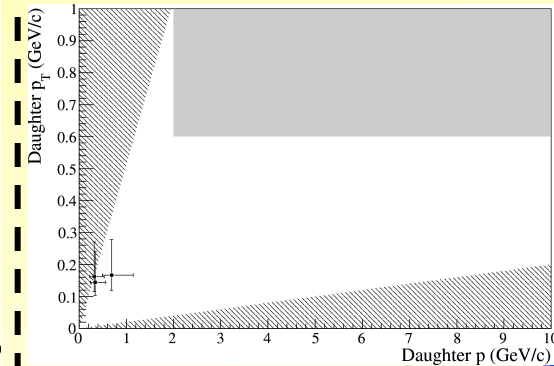
In signal region : 4.1 %



In signal region : 0.0 %

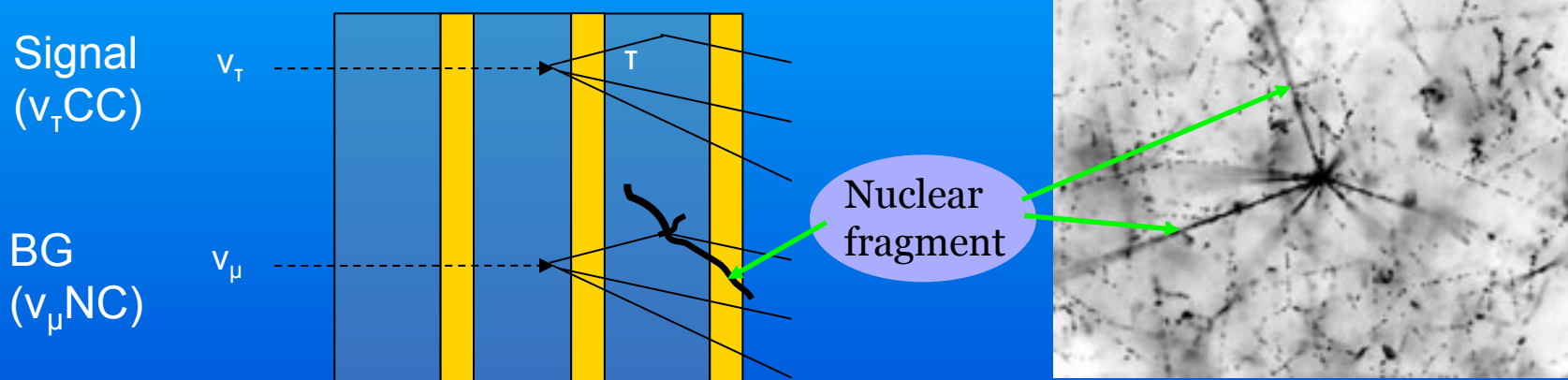


In signal region : 0.0 %



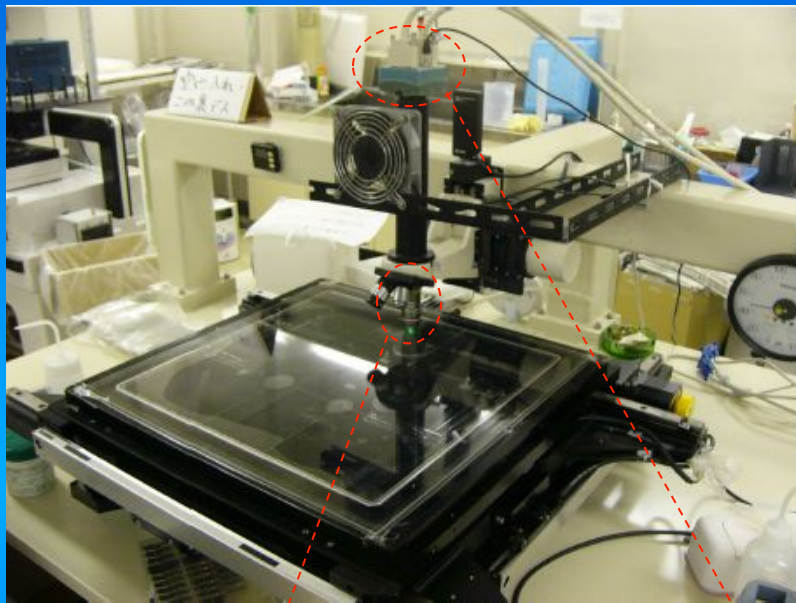
核破砕片探索によるBG低減法の確立

- これまで使われてこなかった新たな情報として反応点から放出される核破砕片を利用することを提案した。(2010年9月)
- 核破砕片は崩壊事象には付随しないため、ハドロン反応の強いプローブとなる。
- ただし、核破砕片は近似的には等方的に放出されるため、従来よりも大角度の飛跡を検出する必要がある。
- 大角度飛跡を検出する技術を確認し、ハドロン反応から放出される核破砕片を系統的に分析する。



従来は $|\tan\theta| \leq 1.0 \Rightarrow$ 新装置: $|\tan\theta| \leq 3.0$

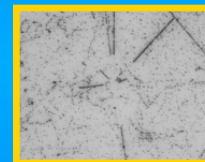
新型原子核乾板自動飛跡読み取り装置の開発



- 昨年5月から目視観察用に使用していた顕微鏡システムを自動飛跡読み取り装置へと改良を始めた。
- 大角度飛跡を効率良く検出するために視野の大きなレンズ, カメラを採用した。

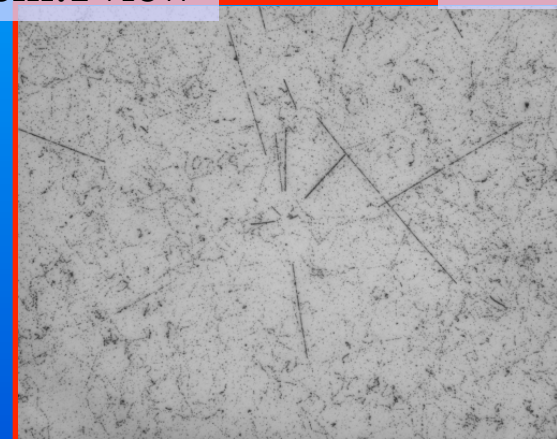
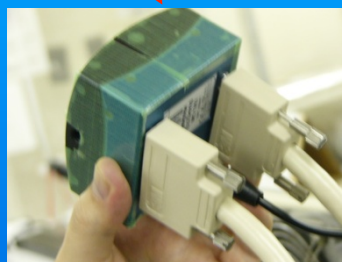
オリジナル

UTS 1 view :
120 μm x 100 μm



New system: 1 view

282 μm



Nikon CFI Plan x50 oil immersion lens
(N.A.=0.90, WD=0.35mm)

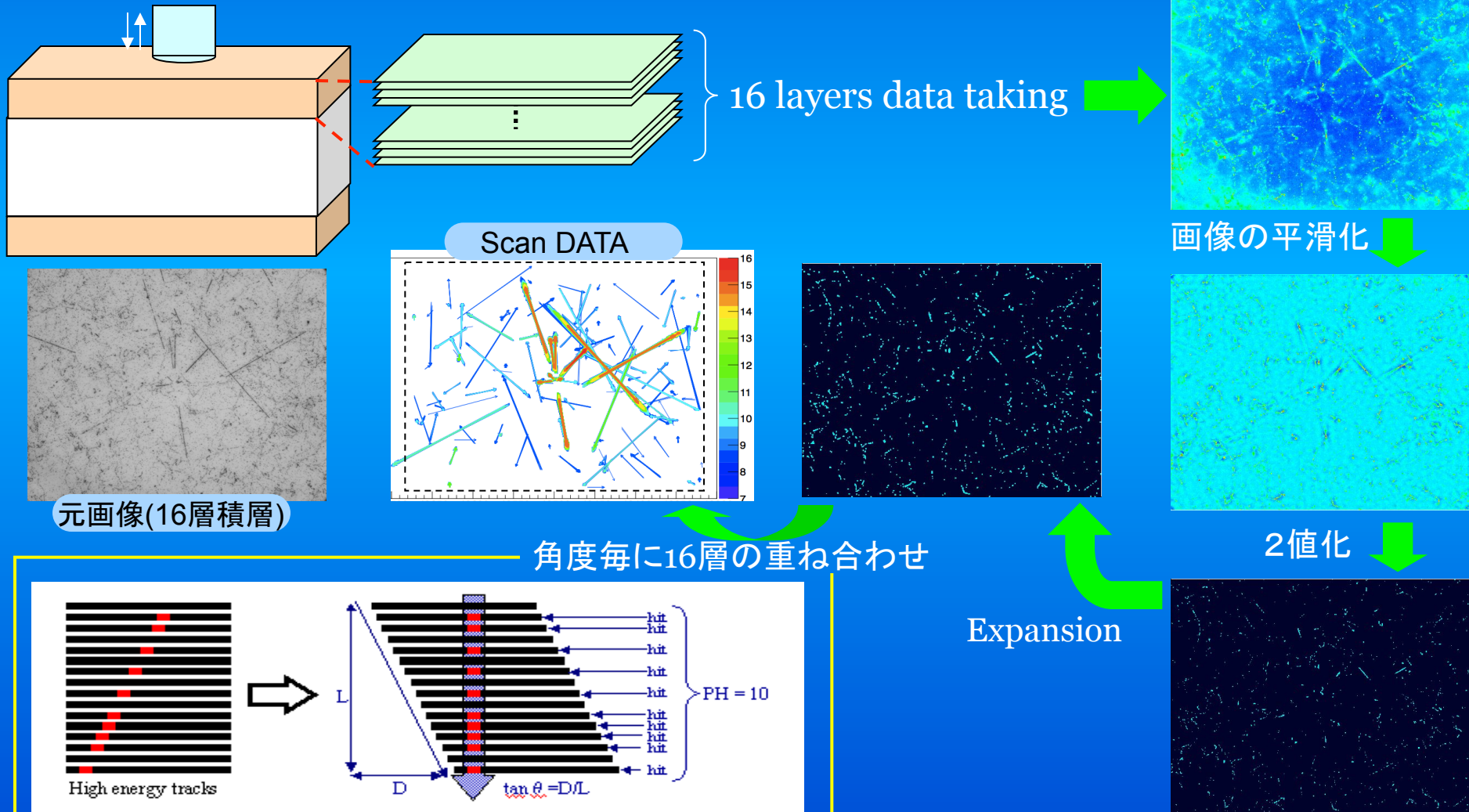
CMOS Camera Eosens MC 1362 (Mikrotron), 1024 x 1280 pixels, 506fps

0.275 μm /pixel

352 μm

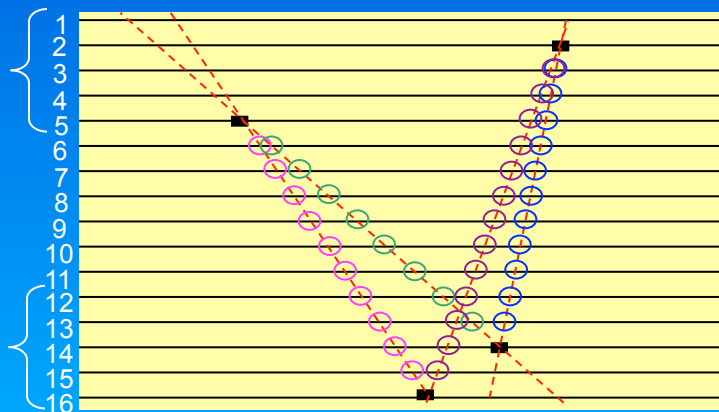
Automatic Track recognition

- 自動飛跡認識部を開発した。飛跡認識アルゴリズムはこれまでの自動飛跡読み取り装置のアルゴリズムを踏襲している。

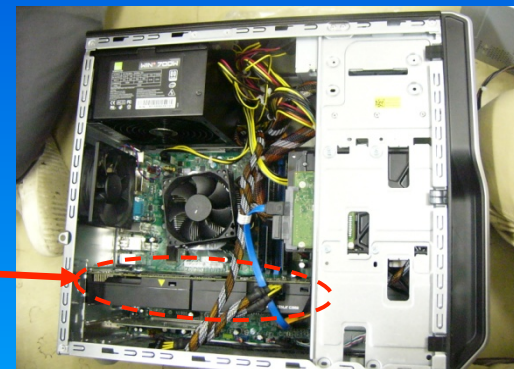


1 視野あたりの自動飛跡認識処理速度

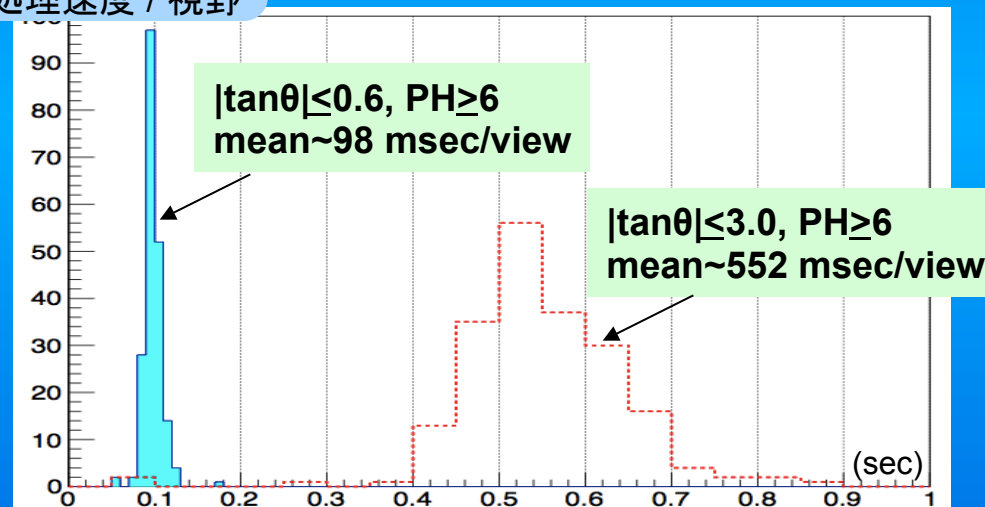
実装している飛跡認識処理のアルゴリズム



1. 1~5 層目にあるヒットと、12~16 層目にあるヒットで直線を作る。
2. できた直線が通るピクセルがヒットしているか調べる。(→ ヒット数をPHと呼ぶ)
3. PHがある閾値以上のものをTrackとして出力する。(通常は、PH=7 が閾値)



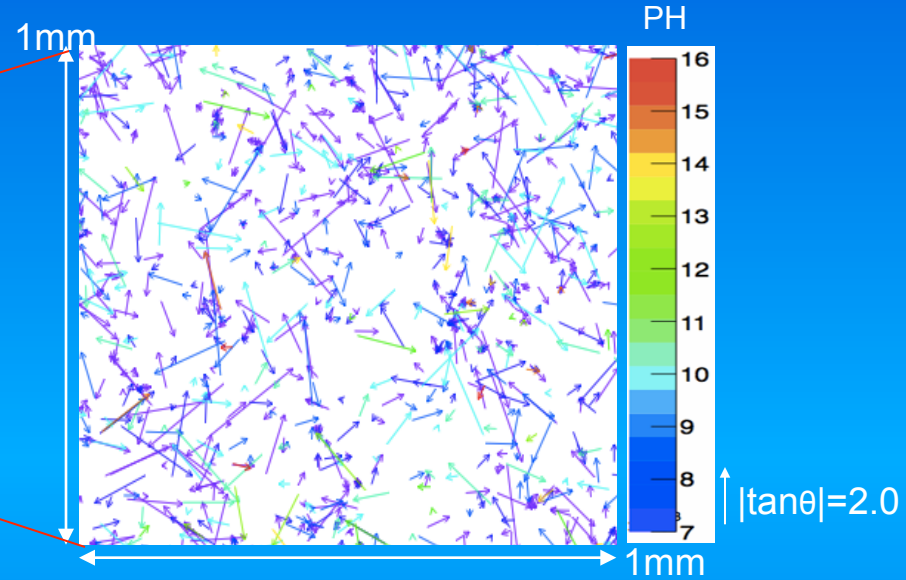
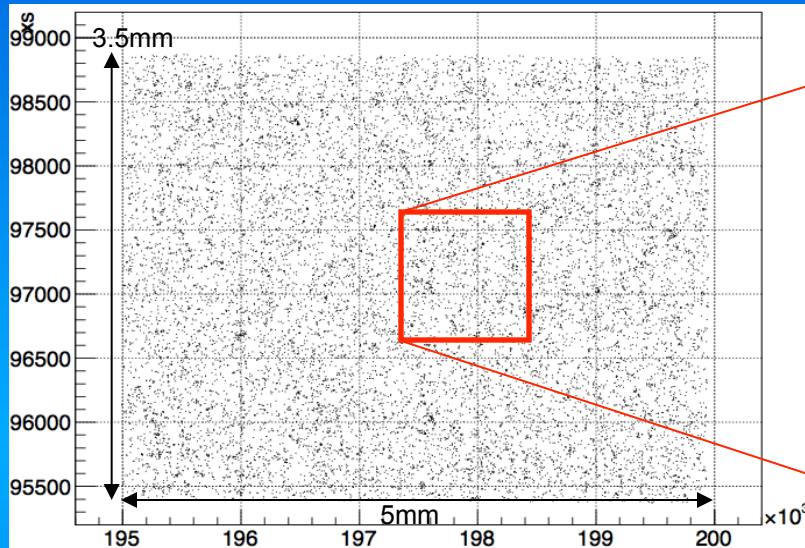
処理速度 / 視野



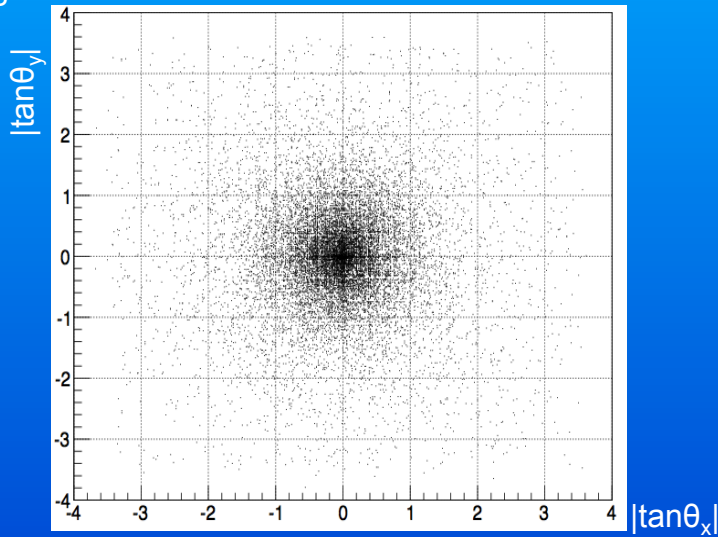
- 新型自動飛跡読み取り装置では、Graphics Processing Unit (GPU) を搭載して飛跡認識プロセスを超並列処理した。
- 1 視野あたりの処理速度は、 $|\tan\theta| \leq 0.6$ で ~100ms、 $|\tan\theta| < 3.0$ で ~550ms。CPUの約10倍の処理速度で、解析にとって十分な処理速度を達成した。 15

Automatic Scanning

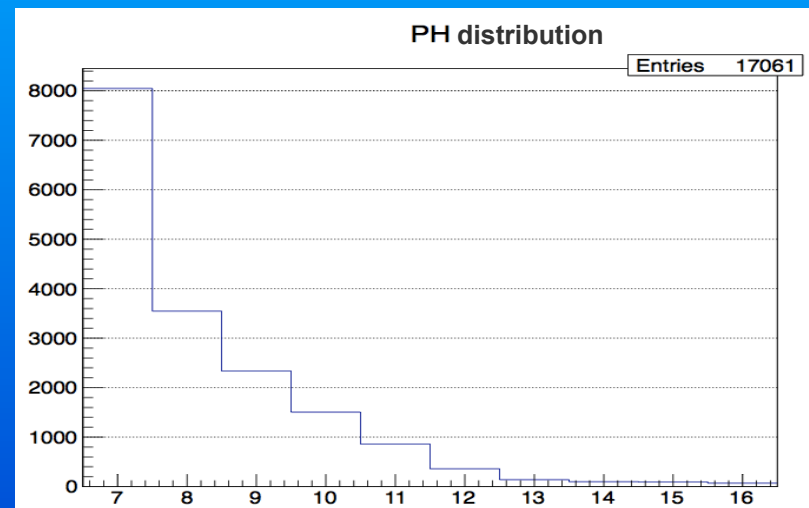
Position distribution



Angle distribution



PH distribution



核破碎片のスキャン結果

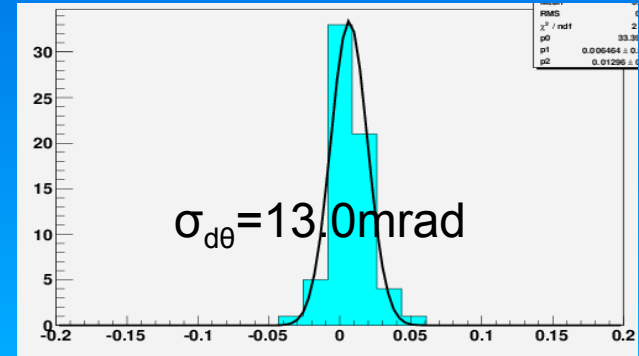
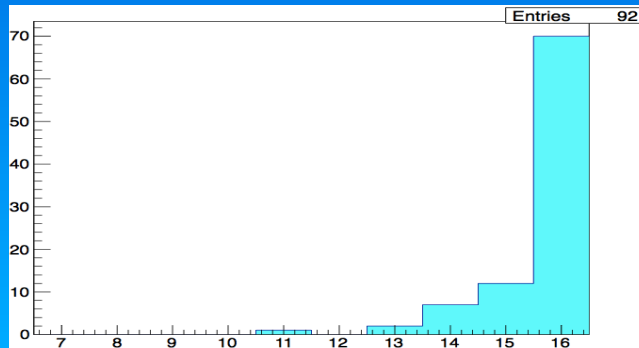
- 目視確認した核破碎片は100%検出できた。

Angle

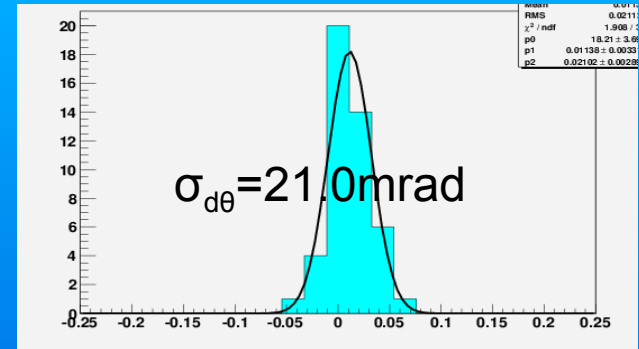
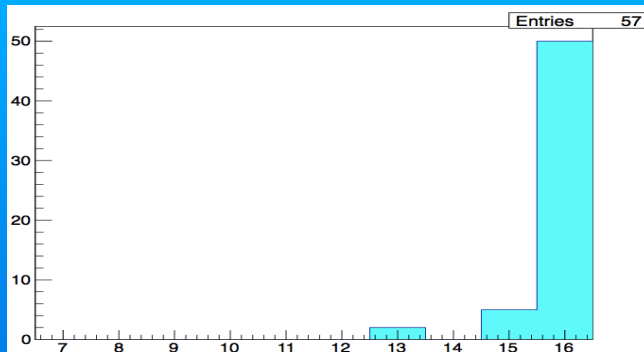
PH distribution

Angle accuracy

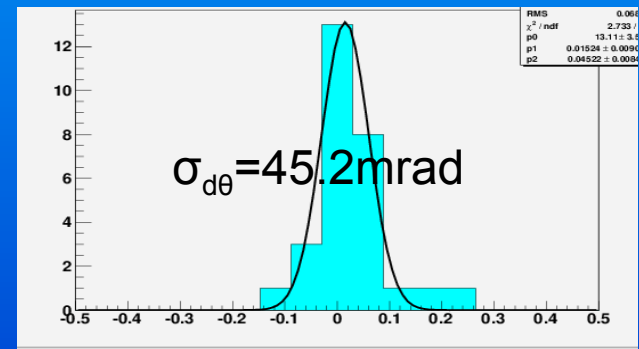
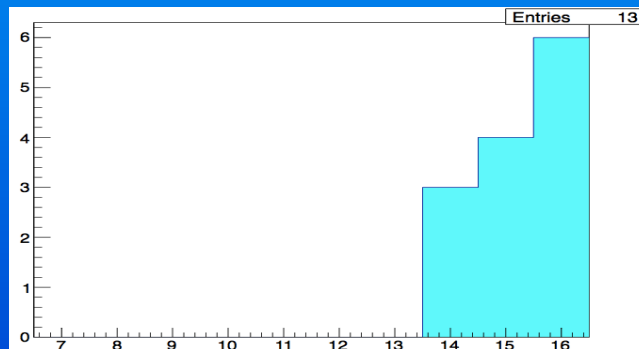
$0 \leq |\tan\theta| < 1$



$1 \leq |\tan\theta| < 2$



$2 \leq |\tan\theta| < 3$



最小電離粒子のスキャン結果

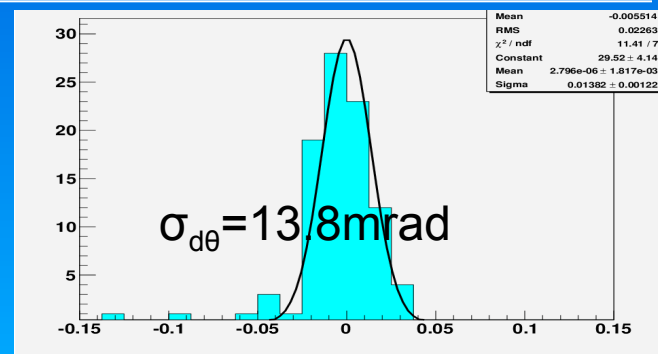
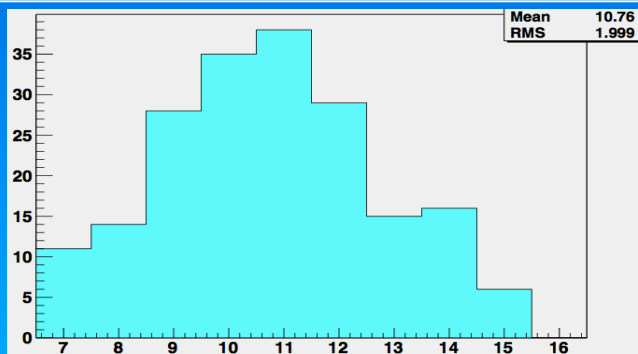
- 従来のスキヤニングシステムと同程度のクォリティを確保。

Angle

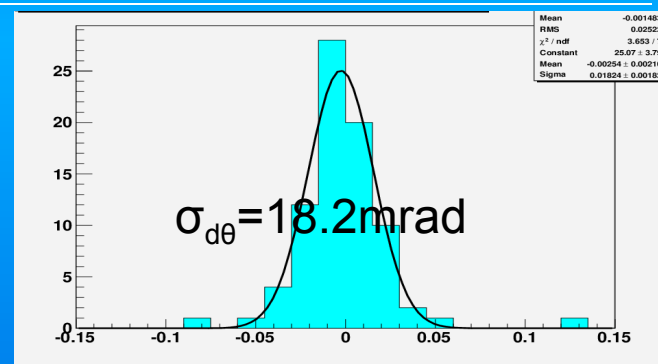
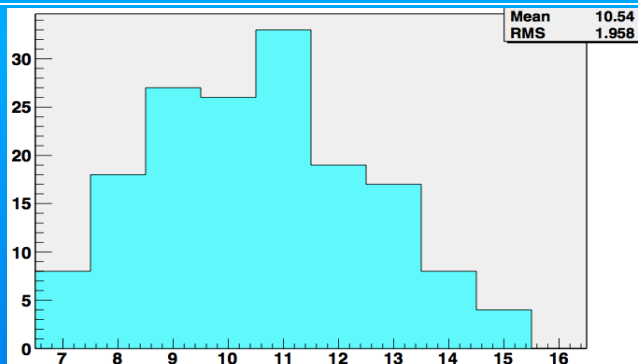
PH distribution

Angle accuracy

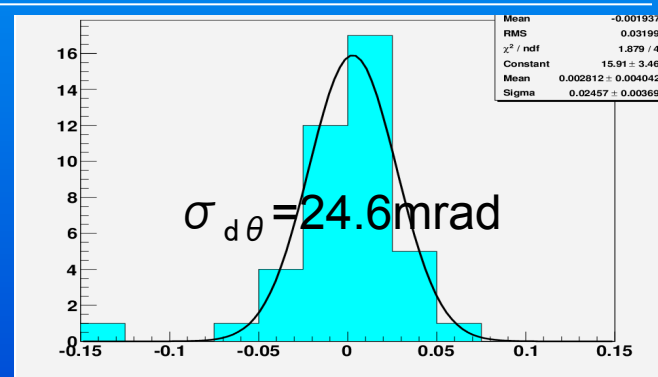
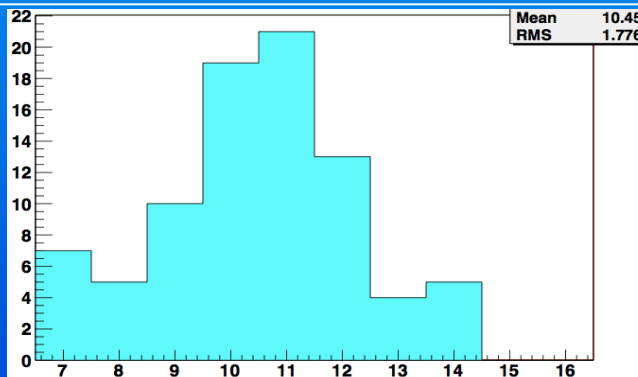
$0.0 \leq |\tan\theta| < 0.2$



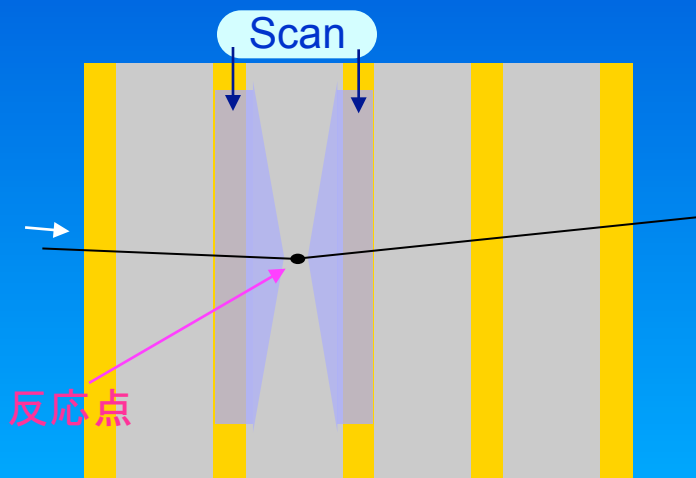
$0.2 \leq |\tan\theta| < 0.4$



$0.4 \leq |\tan\theta| < 0.6$



新システムを用いてHadron反応からの核破碎片探索



探索条件

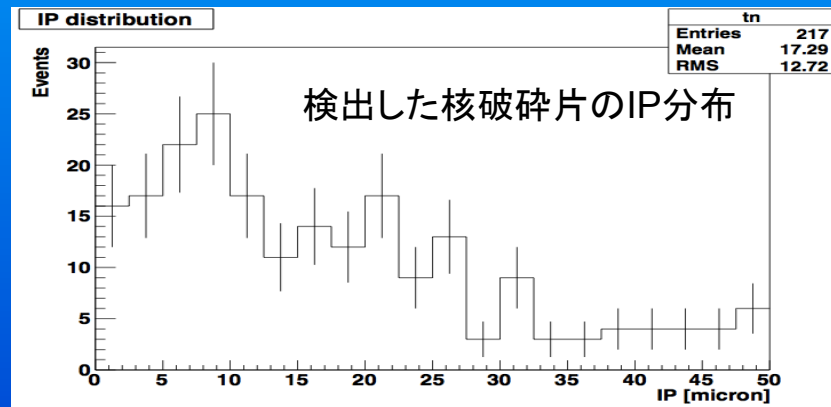
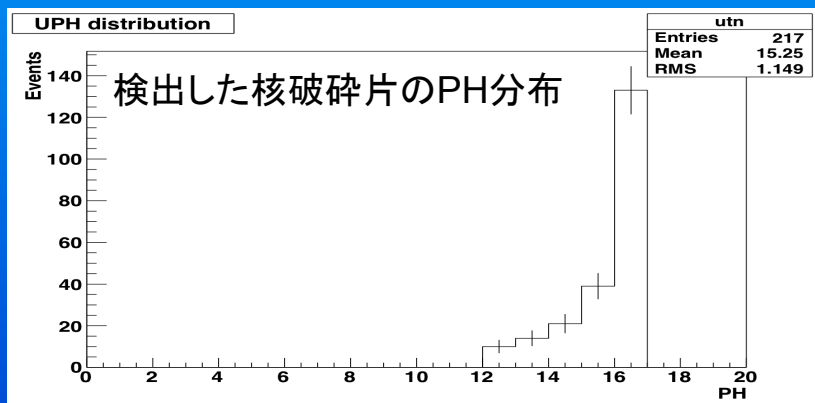
- Scan area: 反応点の上plateと下plate [2.5mm x 3.5mm]
- Angle acceptance: $|\tan\theta| \leq 3.0$
- $IP < (50 + 0.01 \times \text{depth}) \mu\text{m}$
- $PH \geq 12$

- 1-prong と 3-prong の event
Total scan area $\sim 11.4\text{cm}^2$ / 130events
- dummy の反応点 1100events
→ BG estimation ~ 0.035 tracks / event

→ 選び出されたTrackを目視観察



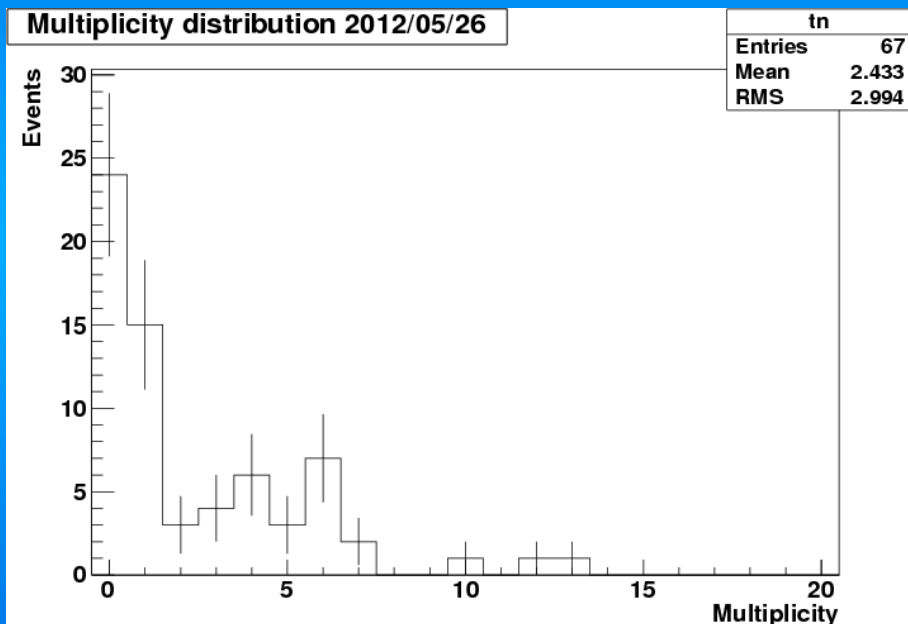
217本の核破碎片を検出



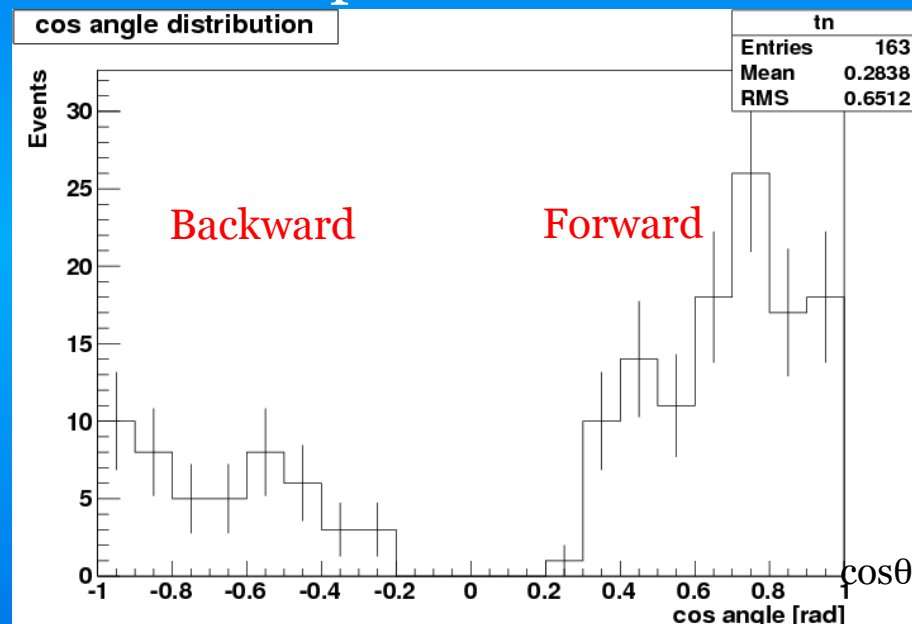
10GeV/cのHadron反応からの核破碎片探索結果

1, 3 – prong events

Multiplicity



Slope distribution

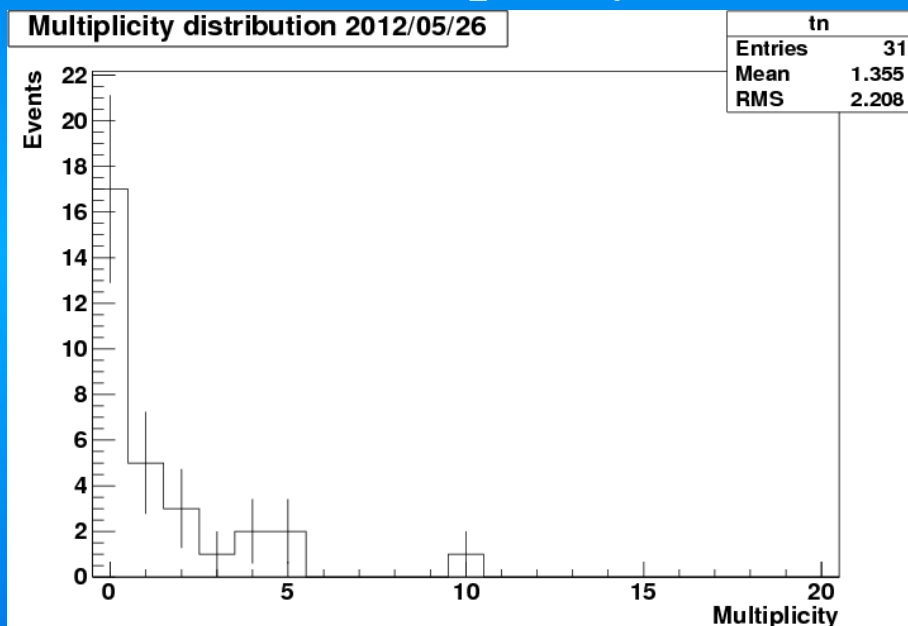


核破碎片付随率 = $(64 \pm 6)\%$ (43events/67events)

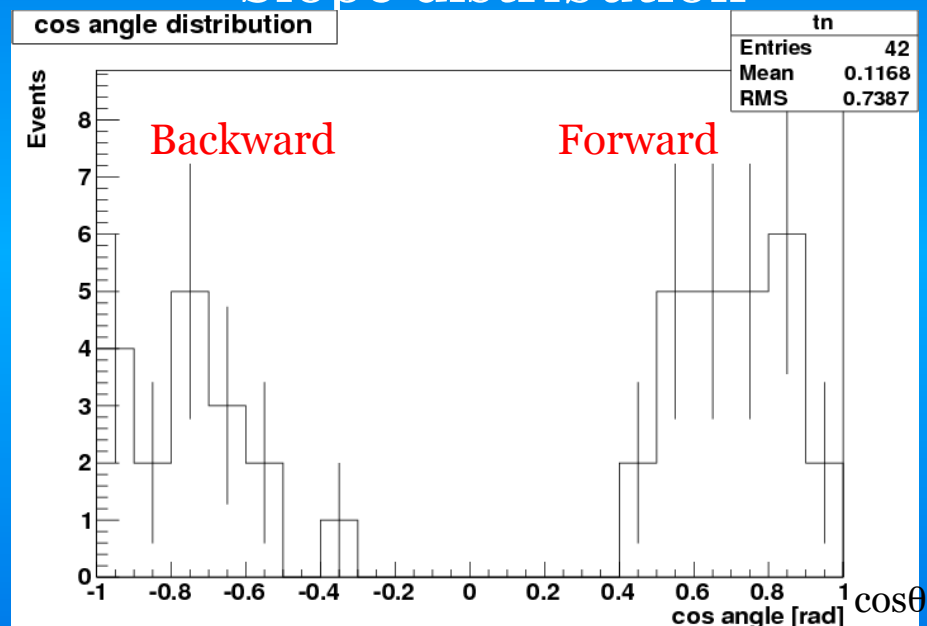
4GeV/cのHadron反応からの核破碎片探索結果

1, 3 – prong events

Multiplicity



Slope distribution

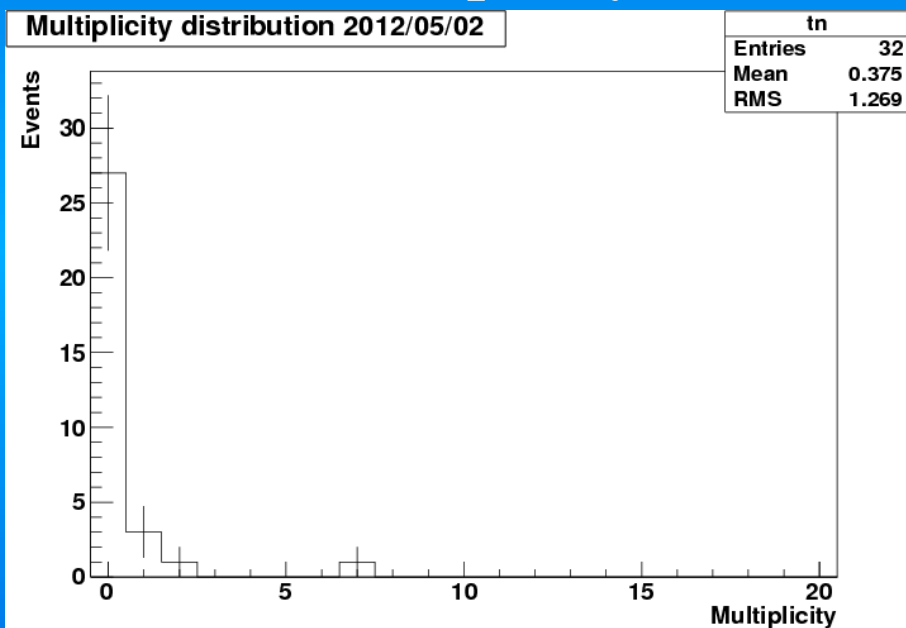


核破碎片付随率 = $(45 \pm 9)\%$ (14events/31events)

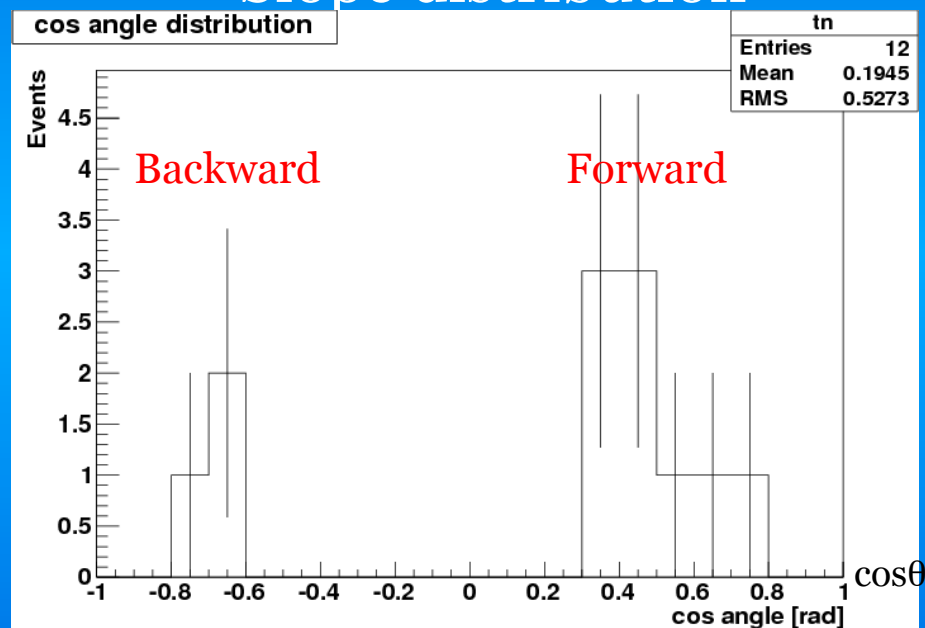
2GeV/cのHadron反応からの核破碎片探索結果

1, 3 – prong events

Multiplicity

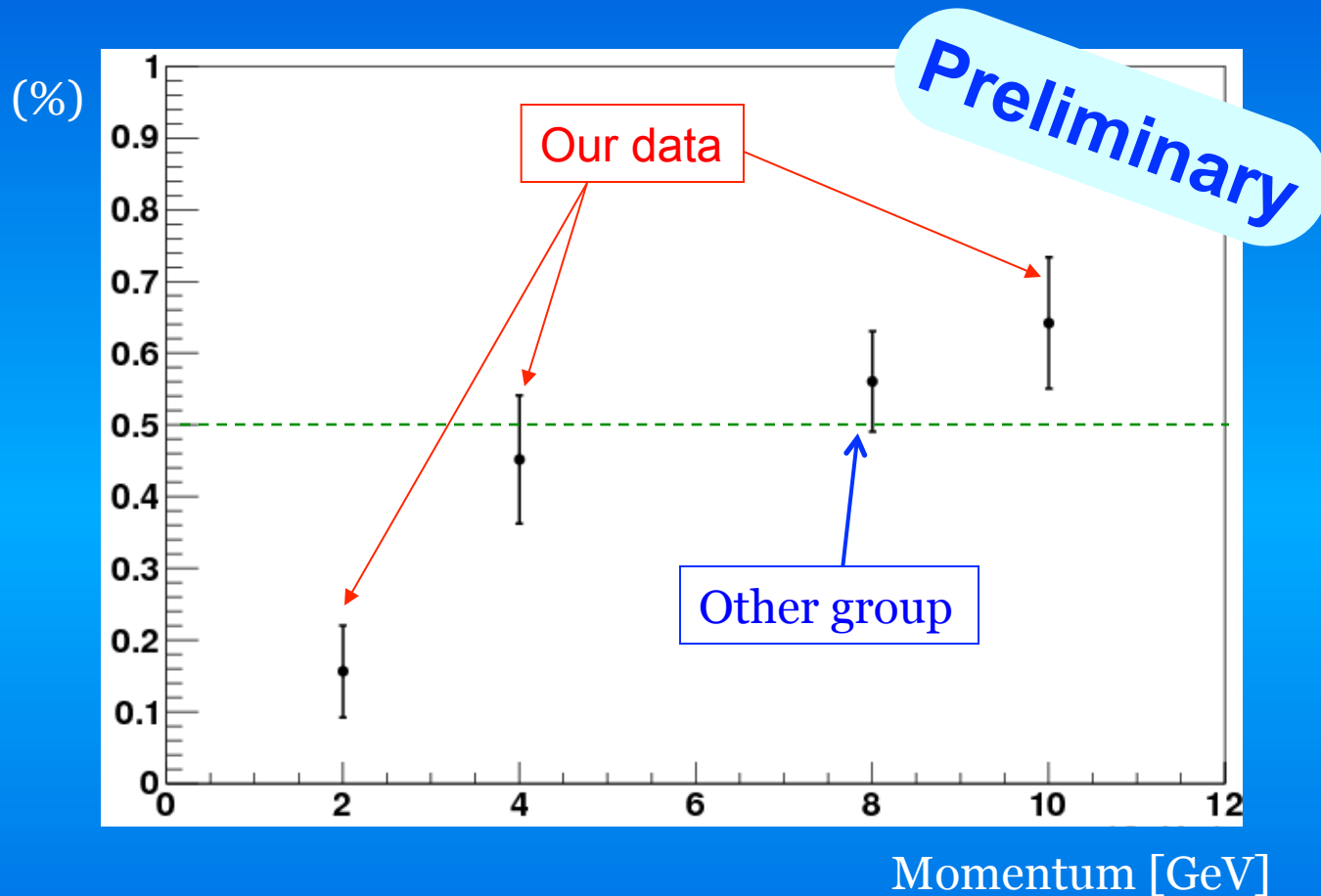


Slope distribution



核破碎片付随率 = $(16 \pm 6)\%$ (5events/32events)

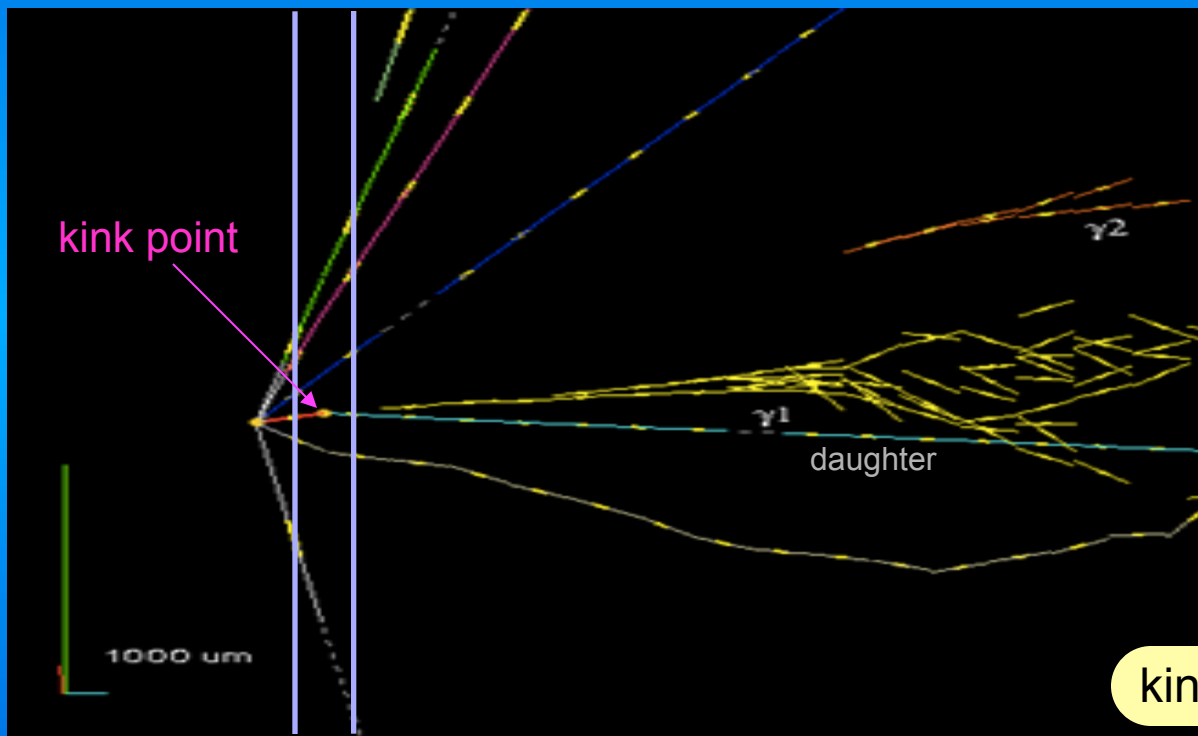
核破碎片付随率の入射ビーム運動量依存性



8GeV/c以上の運動量のハドロン反応では、**50%**以上のeventで核破碎片を少なくとも1本以上検出できる。
従って、 $\tau \rightarrow$ ハドロンバックグラウンドの低減に有効だと考えられる。
今後、これらのデータを基にバックグラウンド低減率を評価する。

1st ν_τ event に核破碎片探索を適用

ハドロン反応での核破碎片探索と同じ方法で、kink point からの核破碎片を探索した。



P_{daughter} (GeV/c)	12^{+6}_{-3}
$E_{\gamma 1}$ (GeV)	$5.6 \pm 1.0 \pm 1.7$
$E_{\gamma 2}$ (GeV)	$1.2 \pm 0.4 \pm 0.4$



kinkの親の運動量は10GeV/c以上

→ 核破碎片はなかった

Preliminary

まとめ

- OPERA実験のタウニュートリノ反応背景事象のmain componentであるハドロン反応を詳細に理解するために、2, 4, 10GeV/cの π ビームが照射されたOPERA型ECCを解析した。
- 検出したハドロン反応のデータとOPERAで使用しているシミュレーションの比較を行い、両者がよく一致していることを確認した。
- ハドロン反応からの核破碎片探索を遂行するために必須である、大角度飛跡検出が可能な新型原子核乾板自動飛跡選別装置を開発した。
- GPUを搭載した飛跡認識装置を初めて実用化し、演算を並列化させることで解析にとって充分な演算速度を達成した。
- 新装置において核破碎片・最小電離粒子の検出効率・角度精度を評価し、解析にとって充分であることを確認した。
- ハドロン反応から放出する核破碎片を系統的に分析し、核破碎片付随率の入射エネルギー依存性や、前方放出の方が後方放出より多くなる異方性を示した。
- 比較的高いエネルギーにおいては核破碎片付随率が50%を越え、 $\tau \rightarrow$ ハドロンバックグラウンドの低減に核破碎片探索が有効であることを示した。
- 1st タウニュートリノイベントの崩壊点からの核破碎片探索を行い、核破碎片がついていないことを確認した。(Preliminary)

謝辞

本研究は、科学研究費補助金（若手研究B）

「 ν_τ 直接検出による $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ ニュートリノ振動実験の
バックグラウンド事象の詳細研究」

（研究代表者：福田 努，平成23年度～平成24年度）

によってサポートして頂きました。



Supplement

これまでの研究

2000年 OPERA実験が正式に承認。

参加

検出器準備

2003年～ OPERAフィルムの大量生産開始。
東濃鉱山地下にてRefresh処理。

解析体制準備

2005年～ KEK, Fermi Labでテスト実験開始。
→ OPERAの解析リハーサルを実施。

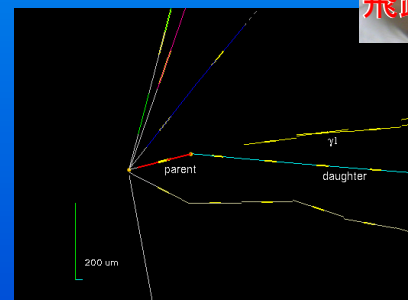
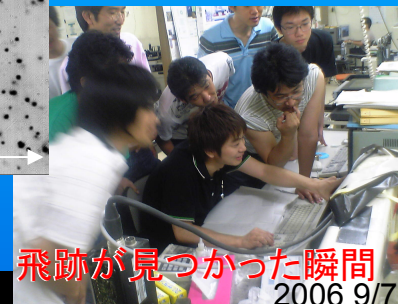
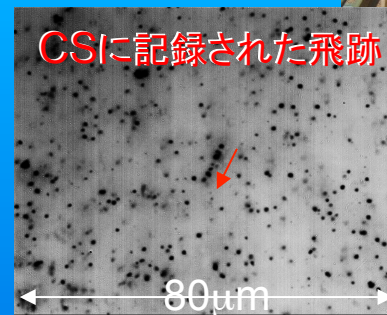
ニュートリノビーム照射

2006年 CERNからニュートリノビームのテスト
照射。OPERAで初めて原子核乾板上
にニュートリノ反応からの飛跡を検出。

2008年～ 検出器完成。ニュートリノビーム本格照射。
OPERA実験本番開始。

2010年 **1st タウニュートリノ反応候補検出。**

20代の青春をOPERAに捧げてきました。
この4月でOPERA歴10年目に突入しました。



原子核乾板

- 原子核乾板は最小電離粒子に感度を持つ特殊な写真フィルムである。
- 荷電粒子が乳剤中を通過すると、電離作用によりその通過経路に沿って潜像核が形成される。
- 現像プロセスを経て、光学顕微鏡で認識できる現像銀粒子に増幅される。

荷電粒子の飛跡が記録される
(最小電離粒子に対するG.D.=33)

50 micron

Resolution of 0.3 micron

光学顕微鏡写真

Sub-micronの解像力を持つ3次元放射線飛跡検出器

これまでの主要な素粒子物理学への寄与

1896 (A.H.Becquerel)
放射線の発見

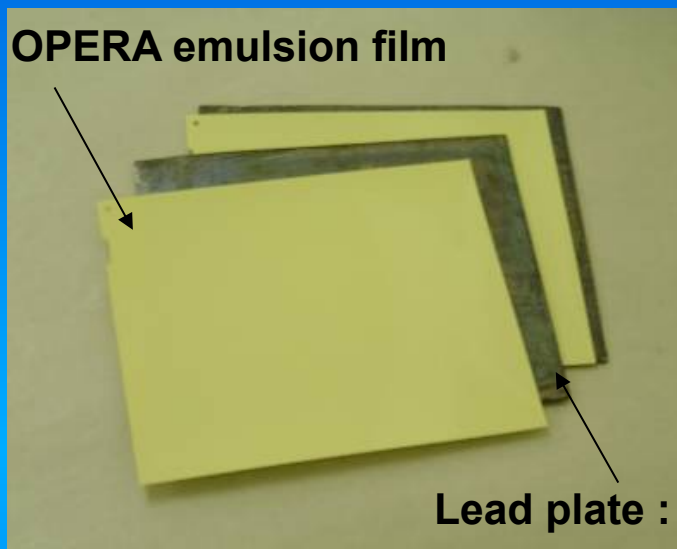
1947 (C.Powell et al.)
 π 中間子の発見

1971 (K.Niu et al.)
Charm 粒子の発見

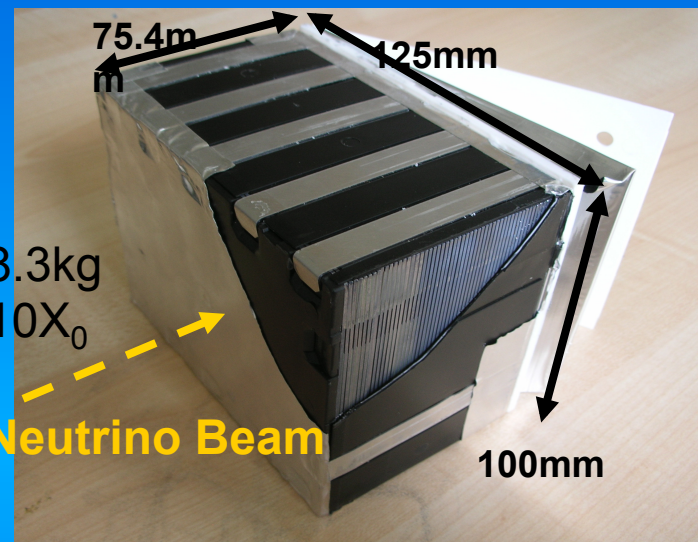
2001 (K.Niwa et al.)
世界初の ν_τ の直接観測

2010 (OPERA Collaboration)
 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ ニュートリノ振動によって
出現した ν_τ 反応候補事象の初観測

OPERA-film



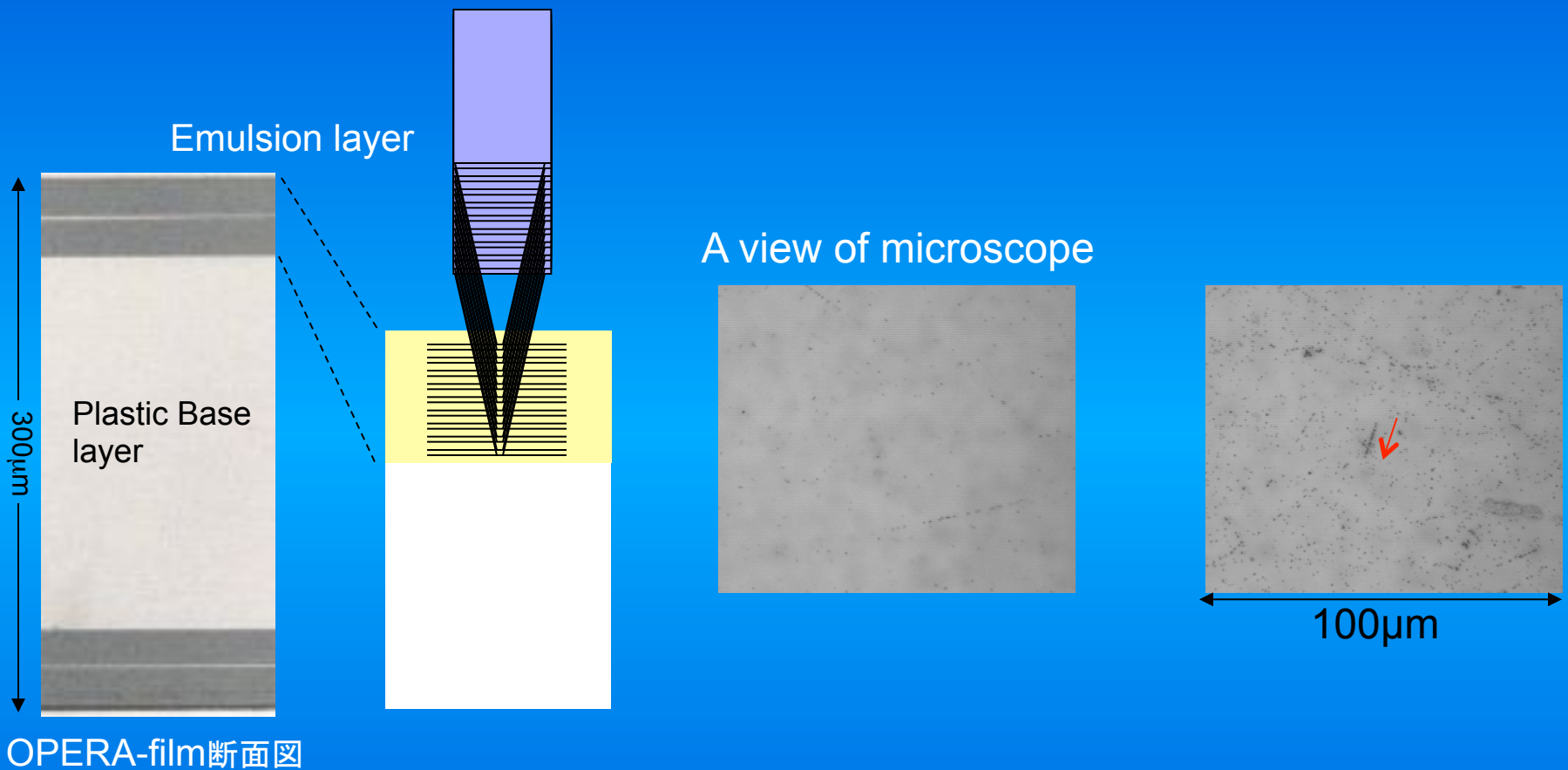
57 枚のOPERA film と
56 枚の鉛板を
交互に積層する。



Emulsion Cloud Chamber (ECC)

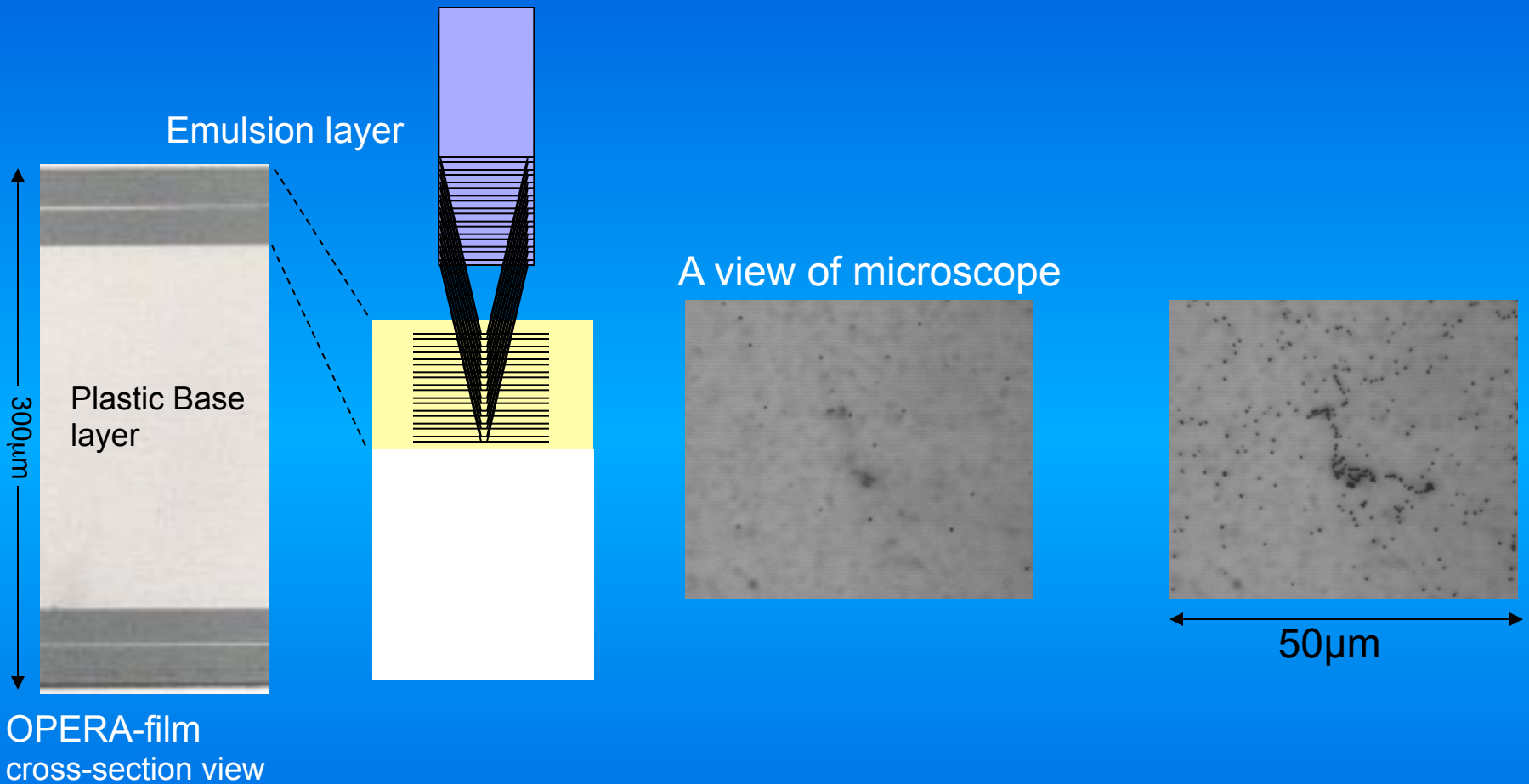
- OPERA実験では、ECCを標的兼飛跡検出器として用いている。
- 現在、原子核乾板を用いた将来実験のために新たな原子核乳剤が開発されている。

高エネルギー荷電粒子の飛跡



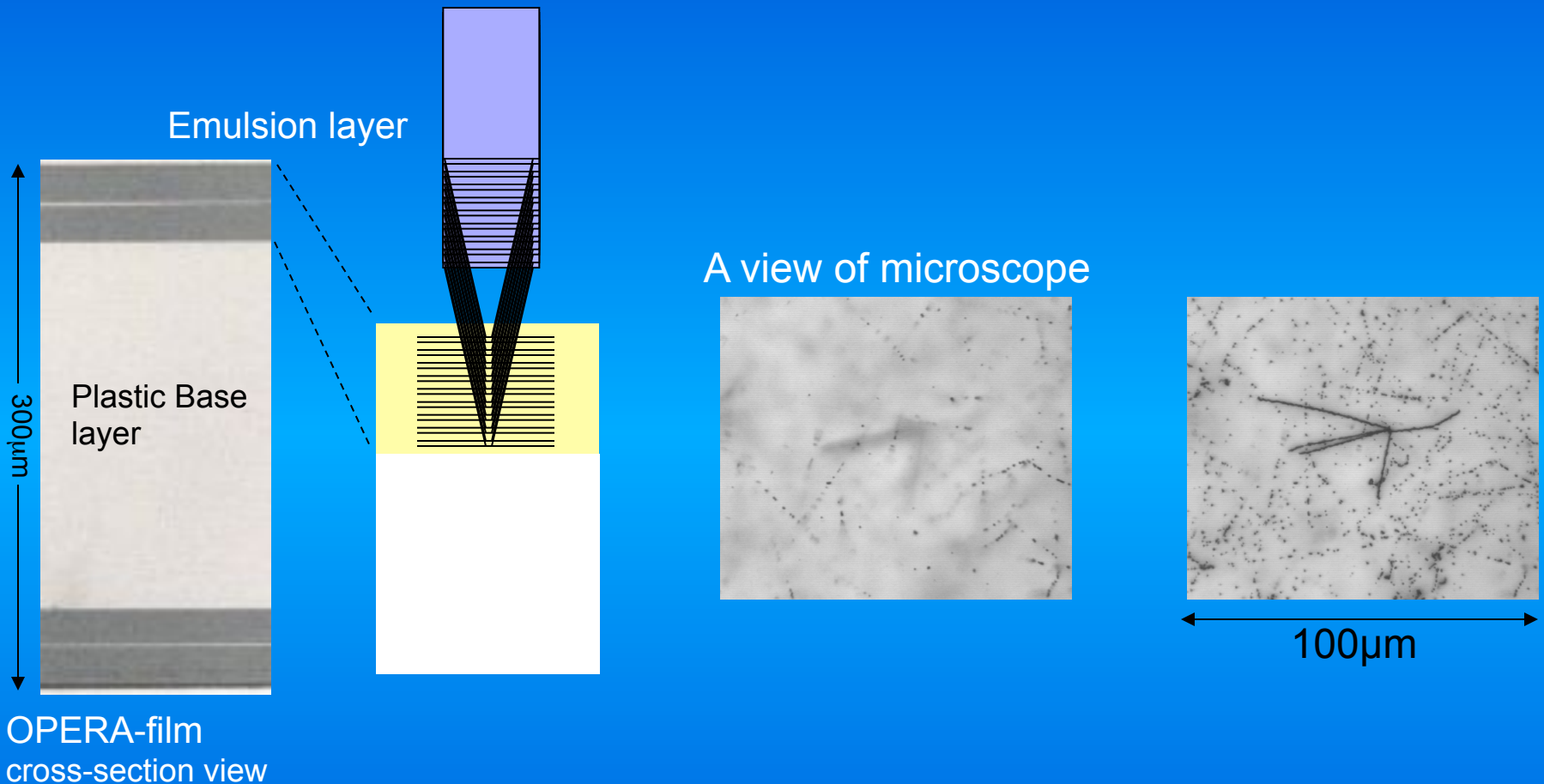
- 顕微鏡を鉛直方向に上下させることで、焦点面を移動させて観測する。
- 高エネルギー荷電粒子の飛跡は乳剤中での多重電磁散乱が小さく、直線的に見える。

Noise track : low energy electron



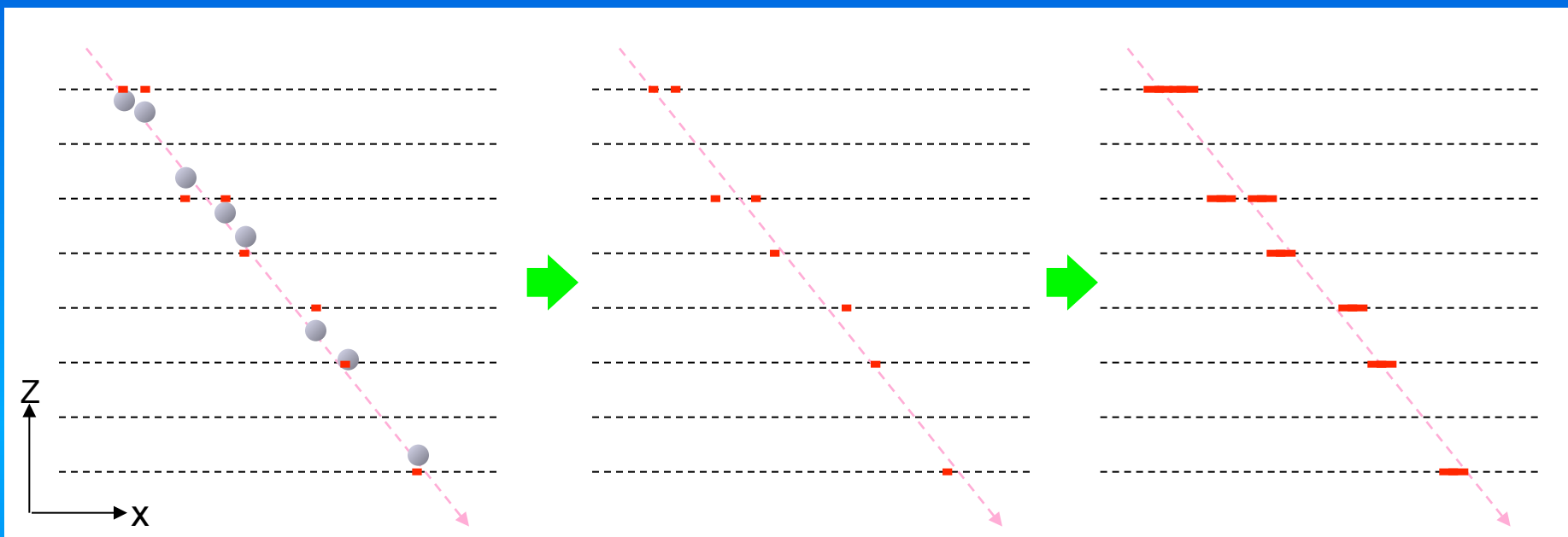
- Sub MeV~a few MeV energy electron from environment draw crooked track because of multiple coulomb scattering by nucleus.

α decay in radioactive nucleus

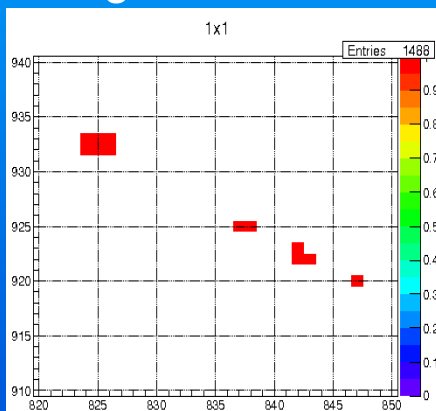


- Radioactive nucleus in emulsion decay and emit α, β, γ -ray.

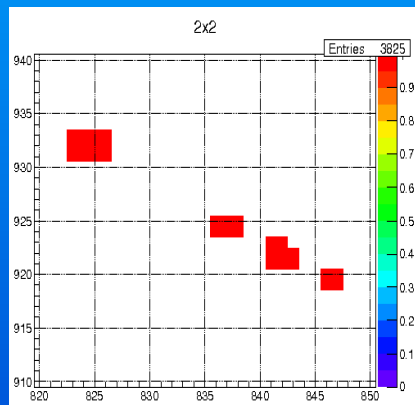
飛跡認識処理: expansion



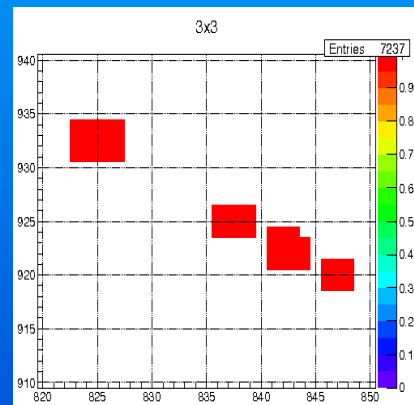
Original hit data



1hit → 2x2 hit



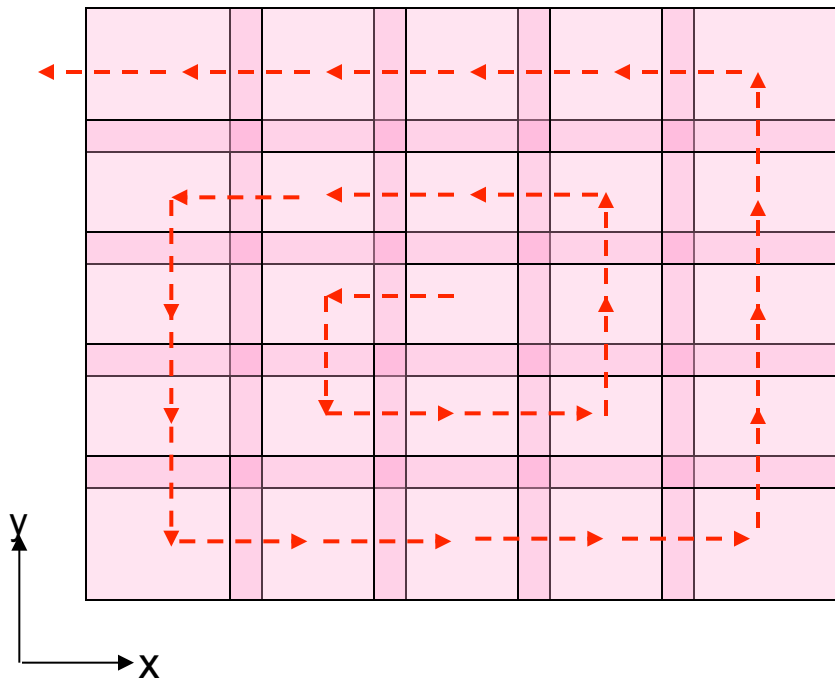
1hit → 3x3 hit



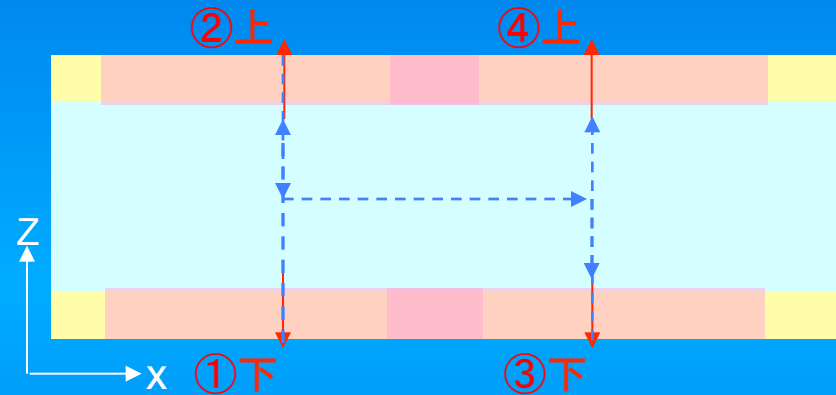
通常は3x3
Processing
time < 0.01sec

ステージ、光学系の駆動

Stageの駆動



光学系の駆動



- ① Z軸を駆動させ、下面をスキャン
- ② Z軸を駆動させ、上面をスキャン
X(Y)ステージを駆動、視野を移動する。
- ③ Z軸を駆動させ、下面をスキャン
- ④ Z軸を駆動させ、上面をスキャン



乳剤層の厚みが $44\mu\text{m}$ なので、視野境界領域の $|\tan\theta| = 3.0$ の飛跡をもらさず認識するためには、 $44 \times 3 = 132\mu\text{m}$ の重複領域が必要。→広視野が活きる。

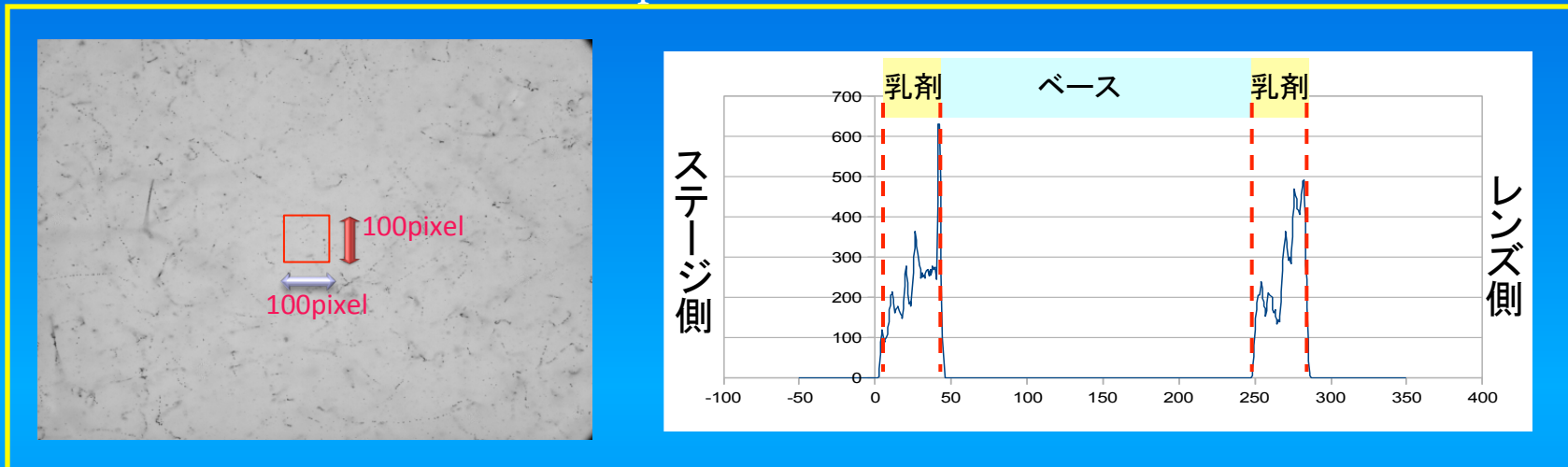
X方向の駆動は、 $352 - 132 = 220\mu\text{m}$

Y方向の駆動は、 $282 - 132 = 150\mu\text{m}$ ピッチで駆動する。

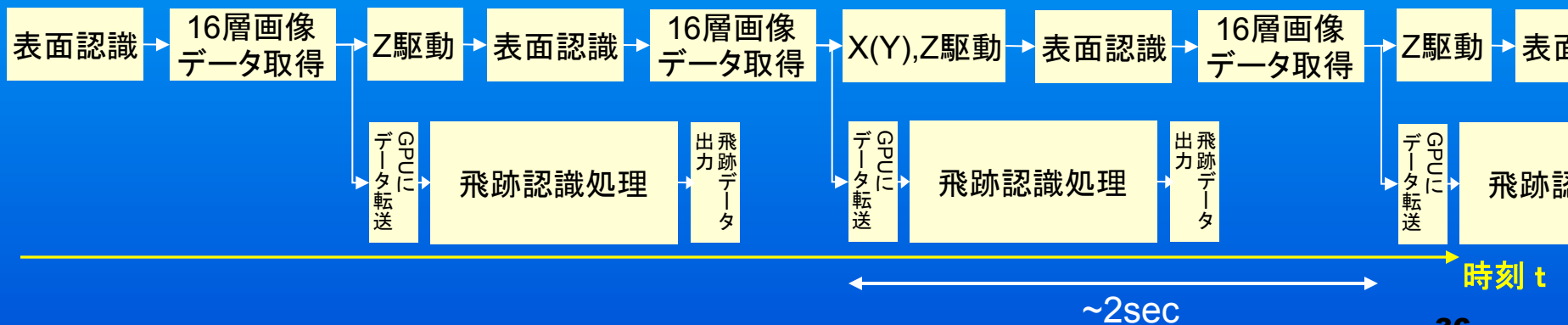
表面認識・駆動と飛跡認識処理の並列化

表面認識

画面中心100x100pixelの合計輝度に閾値を設定して表面を認識する。

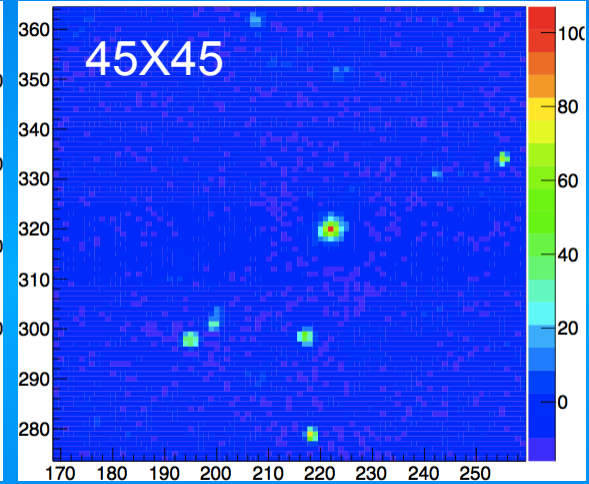
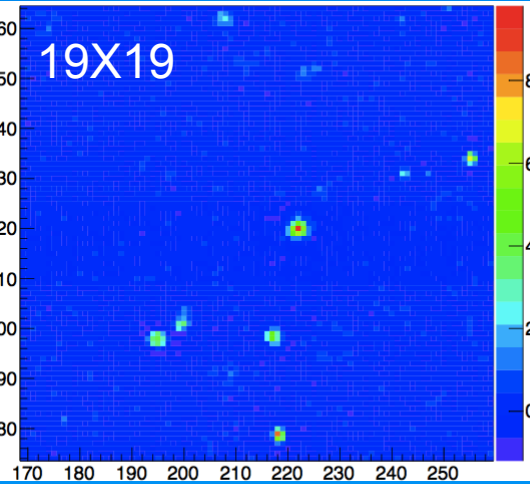
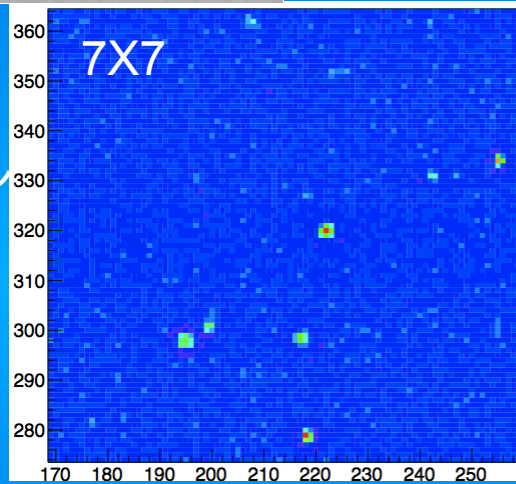


マルチスレッド化し、飛跡認識処理をしている間に、次のスキャンエリアに移動→画像取得を行う。

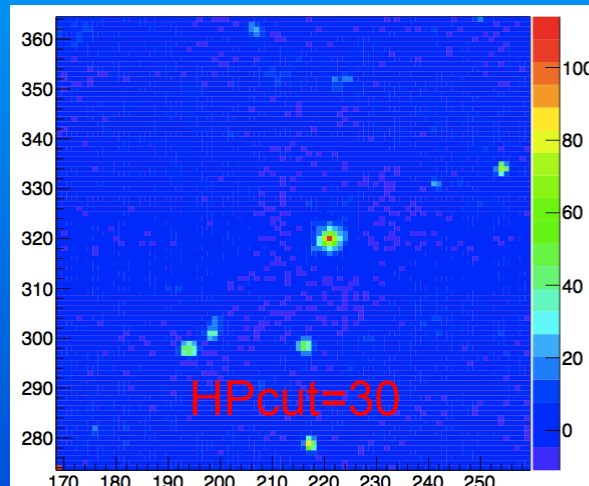
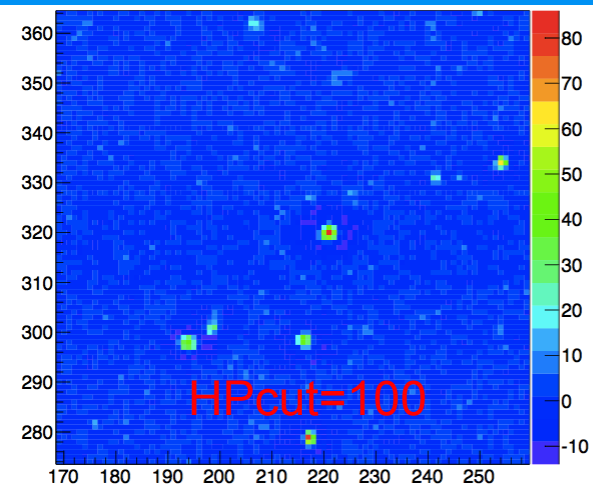


フィルタ比較

ガウシアン
フィルター



FFT
フィルター

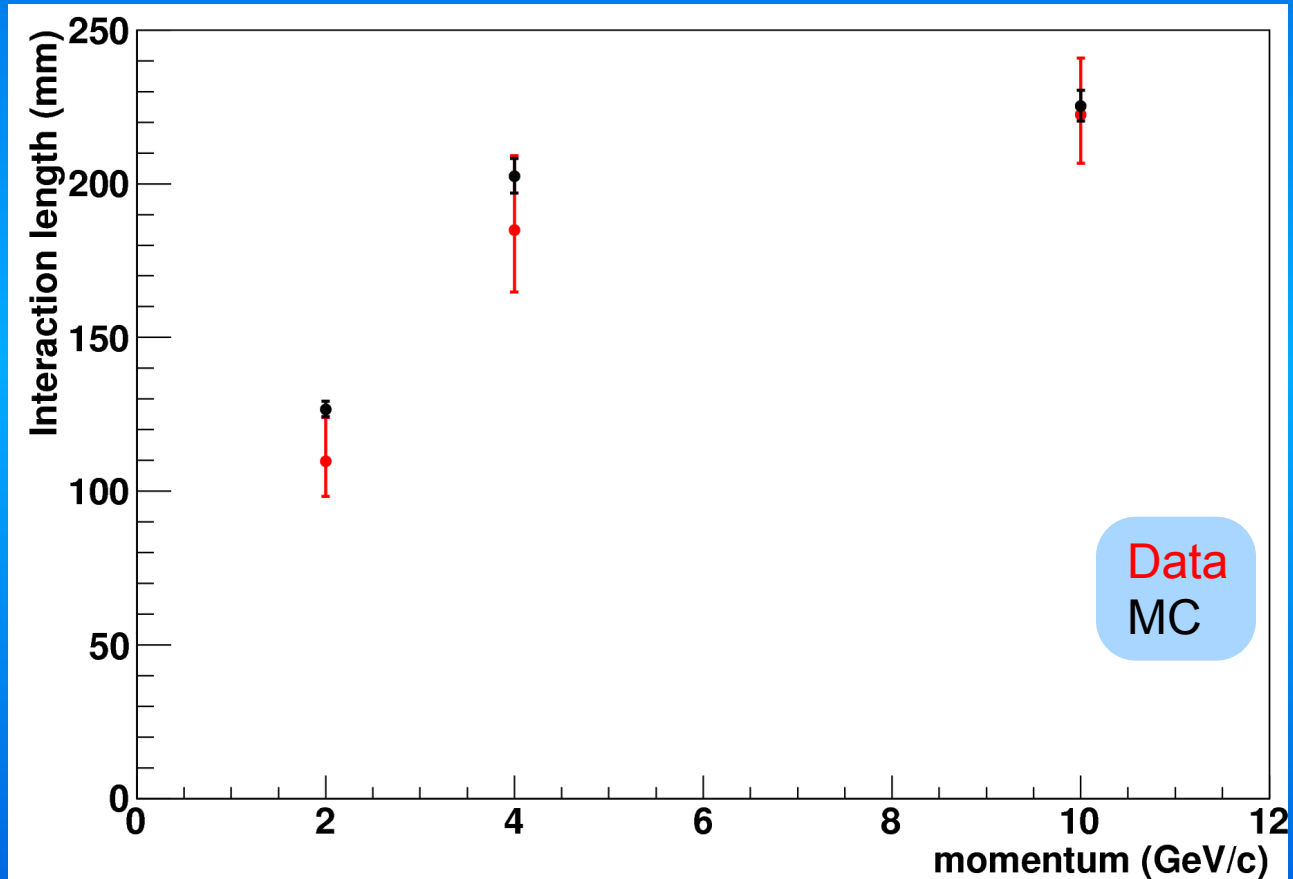


ビーム照射セットアップ

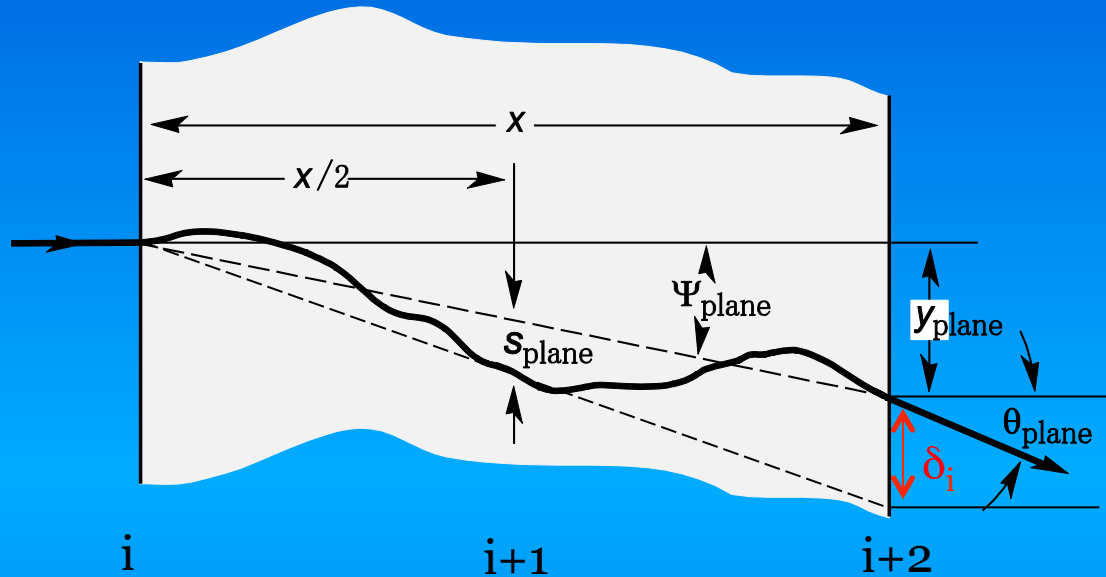


CERN PS T7 beam line (2001-May-17)

Comparison between Data and MC Interaction length in ECC



Coordinate method



$$\theta_{plane}^{rms} = \theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{\text{cell}}{5.6}} \left\{ 1 + 0.038 \ln \left(\frac{\text{cell}}{5.6} \right) \right\}$$

2nd difference $\delta_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} (x_{i+2} - x_{i+1}) + (y_{i+1} - y_{i+2})$

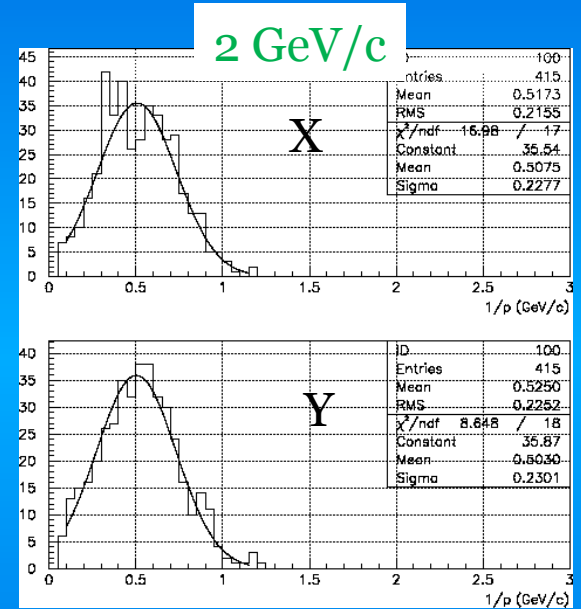
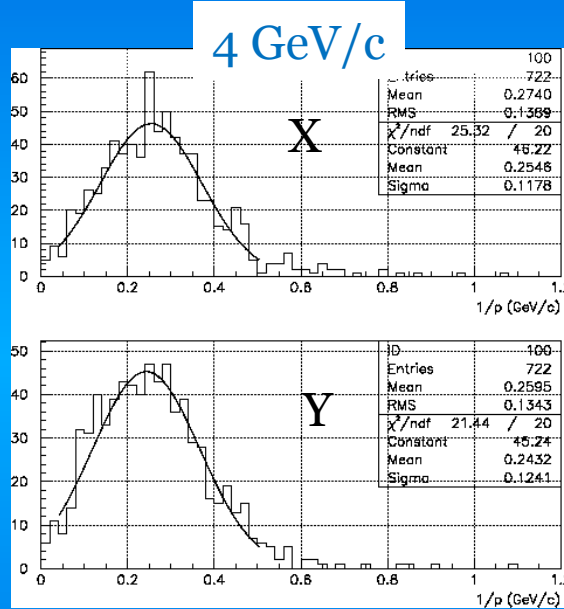
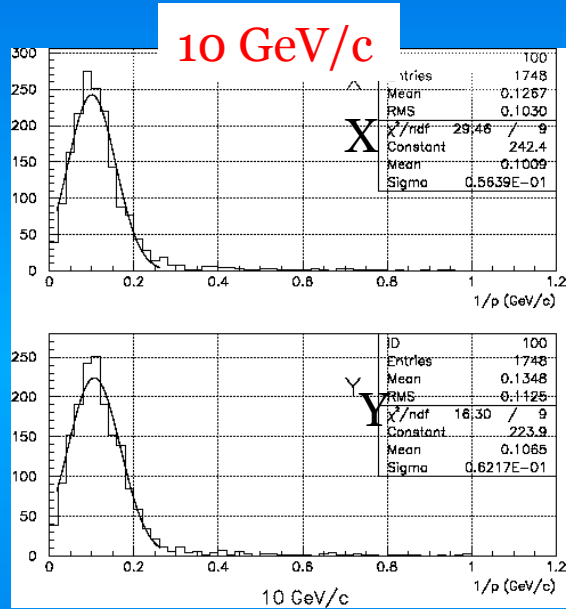
2nd difference $\delta_{plane}^{rms} = 2s_{plane}^{rms}$

sagitta $s_{plane}^{rms} = \frac{1}{4\sqrt{3}} \text{cell} \theta_0$

Beam momentum by the coordinate method

1/p distribution

$$P = (1/p)^{-1}$$



X 1/p : 0.1009
P : $9.9^{+0.13}_{-0.12}$ GeV/c

X 1/p : 0.2546
P : $3.9^{+0.06}_{-0.06}$ GeV/c

X 1/p : 0.5075
P : $2.0^{+0.04}_{-0.04}$ GeV/c

Y 1/p : 0.1065
P : $9.4^{+0.13}_{-0.12}$ GeV/c

Y 1/p : 0.2432
P : $4.1^{+0.07}_{-0.07}$ GeV/c

Y 1/p : 0.5030
P : $2.0^{+0.04}_{-0.04}$ GeV/c

Measured momenta of X and Y are consistent.