

# OPERA

(Oscillation Project with  
Emulsion-tRacking Apparatus)



## Observation of a first $\nu_\tau$ candidate in the OPERA experiment in the CNGS beam

論文講読 2011.01.19

加藤 恵里子

※OPERAの皆様からたくさんの図なり絵を引用させていただいております。  
ご了承ください。

# 目次

- ニュートリノ実験の歴史
  - SuperKamiokande実験
  - DONuT実験
- OPERA実験の動機
- 原理
  - 加速器(CNGS beam)
  - 測定器(Emulsion tracking)
  - 解析
- 結果
- 今後

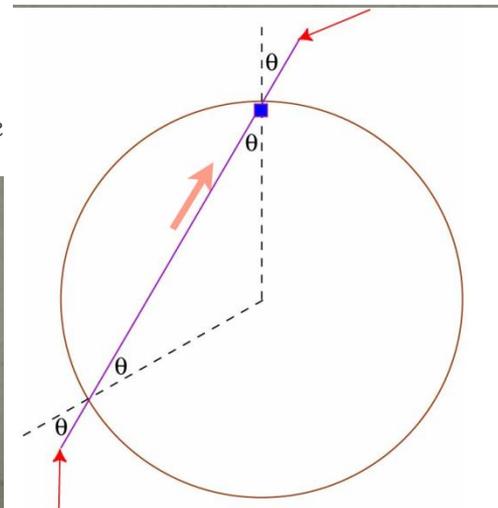
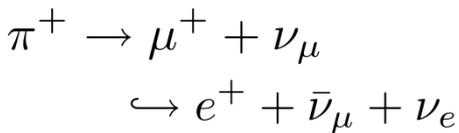
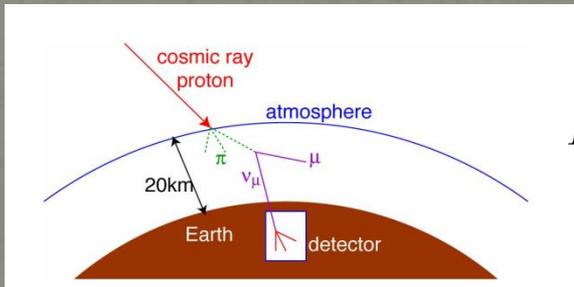
# Super Kamiokande

## ■ 大気ニュートリノ ( $\nu_\mu$ disappearance) 1998年

Super Kamiokandeは、 $\nu_\mu, \nu_e$  測定可能。

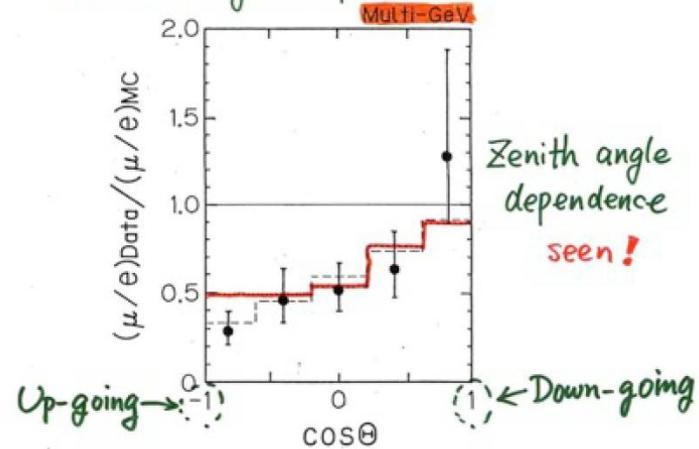
太陽ニュートリノ、加速器ビーム実験で $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ がより理解され

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ ニュートリノ振動がdominant modeとしての存在を示唆。



$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2(1.27 \Delta m^2 L/E)$$

• Zenith angle dependence

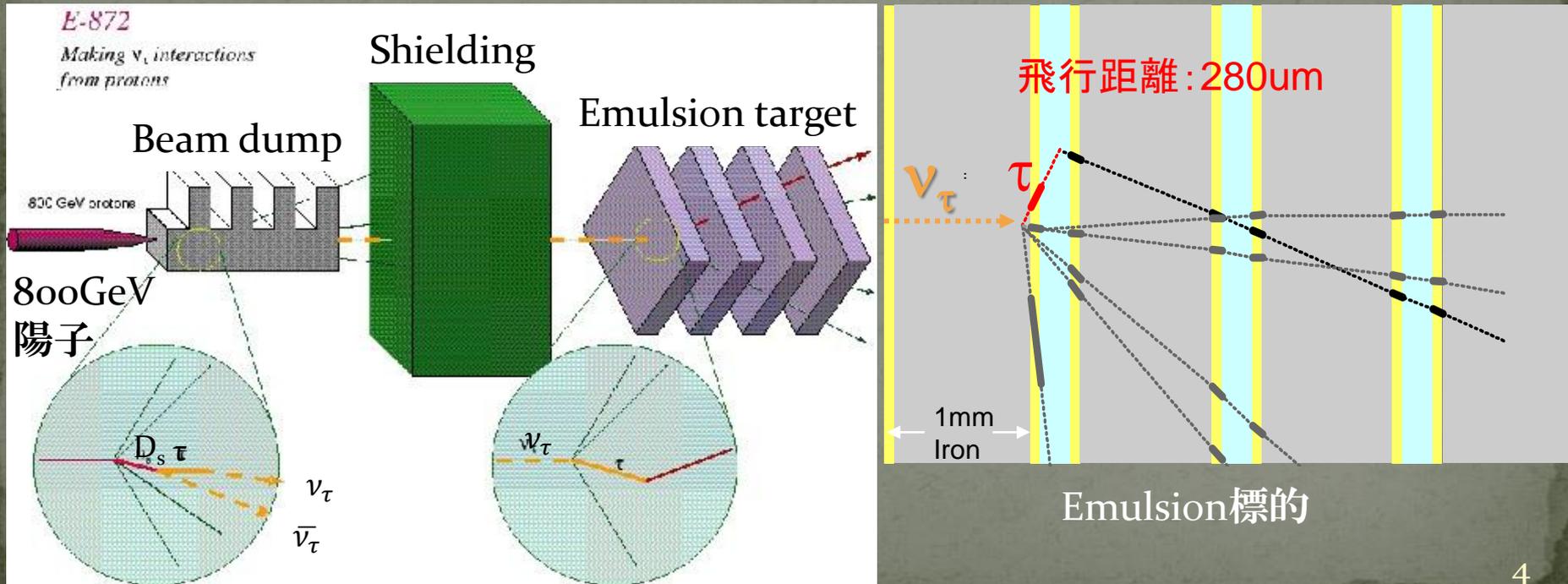


$$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau (1.6 \times 10^{-2} \text{ eV}^2, 1.0)$$

# DONuT実験

## (Direct Observation of the NU Tau)

- Tevatron 800 GeV 陽子ビーム  $\Rightarrow$  W(標的)
- $D_s \rightarrow \bar{\nu}_\tau + \tau$ .  $\tau \rightarrow \nu_\tau$   $\nu_\tau$ ビーム
- 2001年 $\nu_\tau$ 初観測！(9イベント)

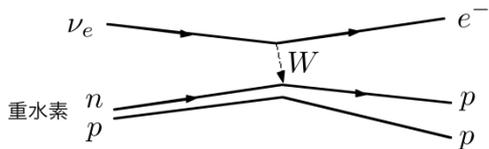


# ニュートリノ信号

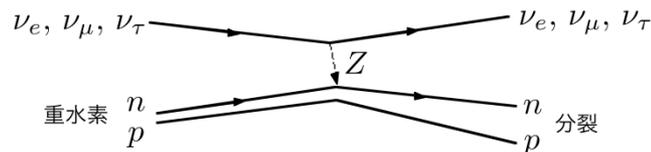
- CC(Charged Current)、NC(Neutral Current)

高エネルギー  
ビームで  
他の粒子も  
生成させる  
ようにする。

荷電カレント反応は $\mu^-$ 、 $\tau^-$ を作るのにエネルギーが足りないため  
 $\nu_e$ のみ反応する。

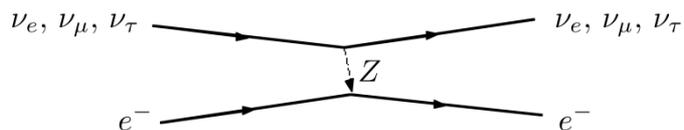


中性カレント反応は全て同じように起きる。

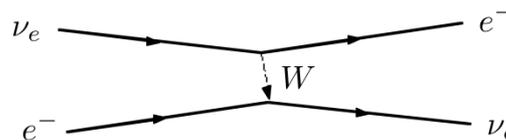


- ES(Electron Scattering)

中性カレント反応は同じ。



電子ニュートリノだけ荷電カレント反応もできる。



- 電子ニュートリノ反応断面積の方が6倍大きい。

# OPERA実験の動機

■ ニュートリノ振動における $\nu_\tau$ のappearanceを見る。

■ 観測条件

- 高ニュートリノエネルギー: CCイベントの $\tau$ を生成。
- 長基線: ビームエネルギーを大きくした分、振動緩やかになるので、距離を長くして振動確率を高める。

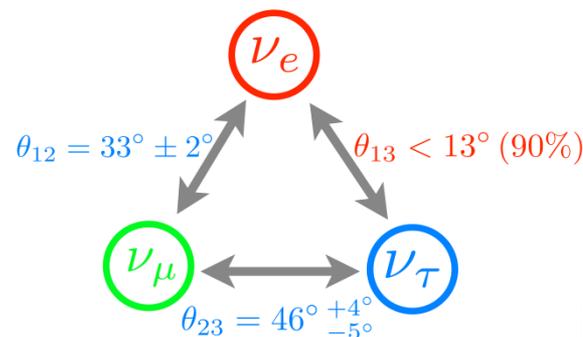
$$(\Delta m_{23}^2 = 2.0 \times 10^{-3} \text{eV}^2)$$

- 高ビーム強度
- Emulsion検出器: 短寿命 $\tau$ の検出

※ベースライン: short (L 1 km), medium (L 10 km), long (L 1000 km)

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) \sim \sin^2 2\theta_{23} \cos^4 \theta_{13} \sin^2(\Delta m_{23}^2 L / 4E)$$

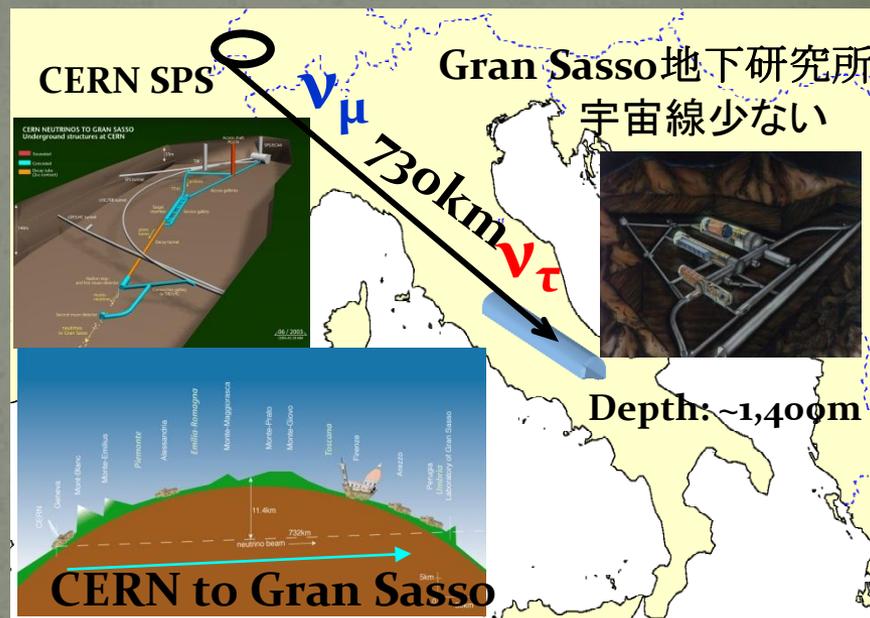
Full mixing,  
5 years run,  
 $4.5 \times 10^{19}$  pot / year  
target mass = 1.3 kton



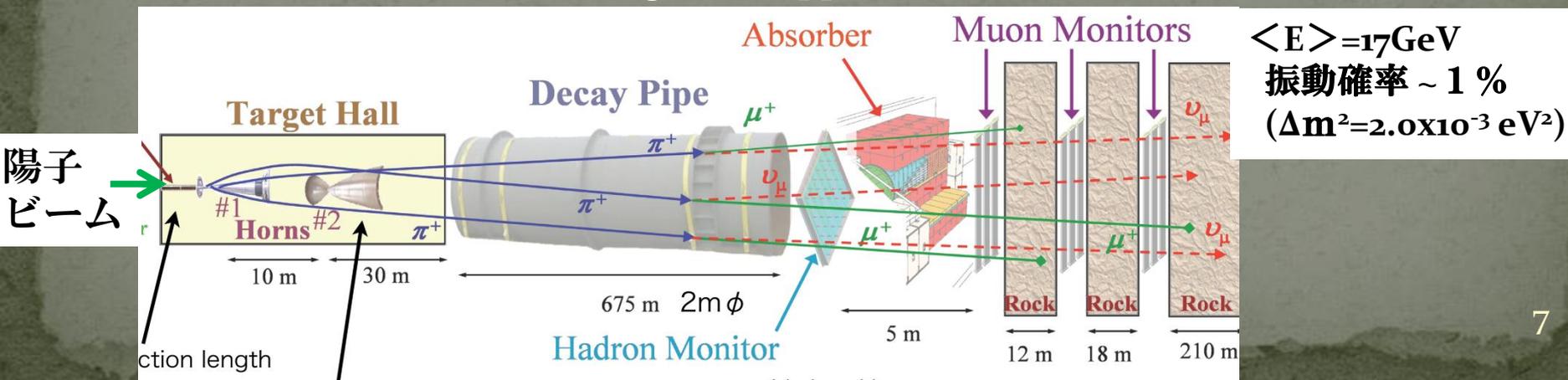
# CNGSビームライン

## ■ CNGS(CERN to GranSasso)

- $22.5 \times 10^{19}$  pot で予測される反応数  
(5 years for 1.25kton target)
- ~23600  $\nu_{\mu}$  CC + NC
- ~160  $\nu_e + \bar{\nu}_e$  CC
- ~115  $\nu_{\tau}$  CC ( $\Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ )
- ~10  $\nu_{\tau}$  CC identified (BG < 1)



No near detector (OK for low background appearance search)



# 検出器 ～Emulsion検出器～

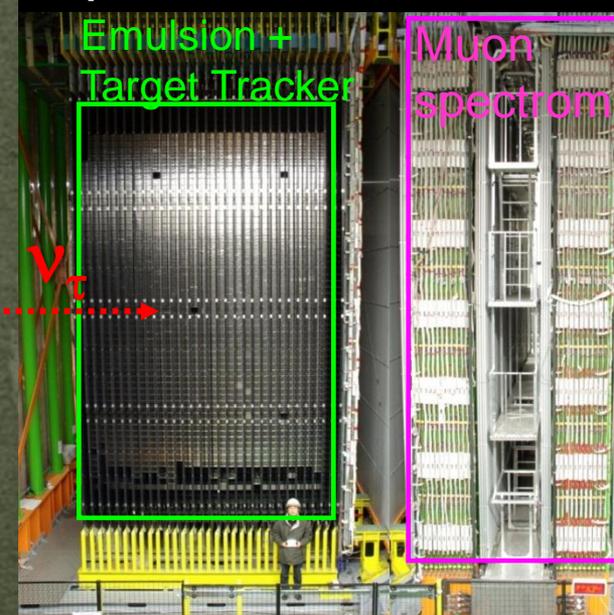
## ■ $\tau$ の特徴

- 短寿命、kink大きい、track数が多い。
- $\tau$ の生成点、崩壊点、topologyを知りたい。

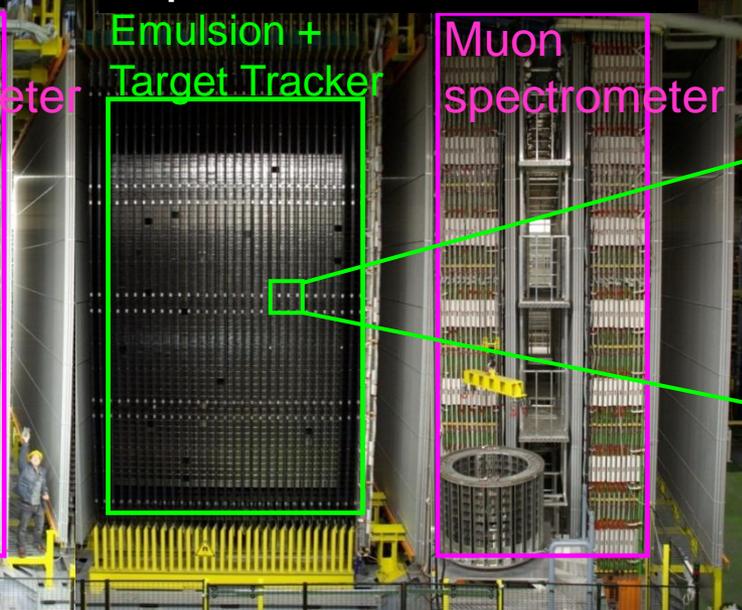
## ■ Emulsion検出器の利点:

- 重金属標的、 $1\ \mu\text{m}$ 以下のtrackを分解できる。
- 標的と検出器両方としての機能を持つ。

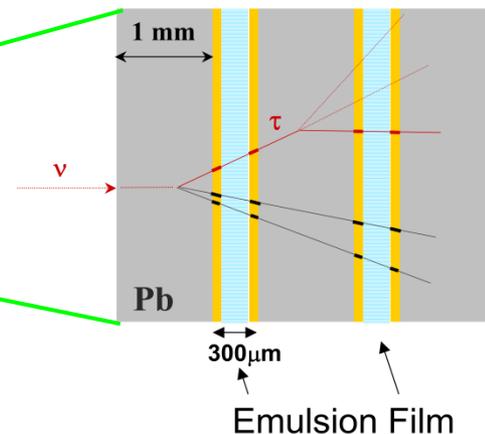
Super Module 1



Super Module 2

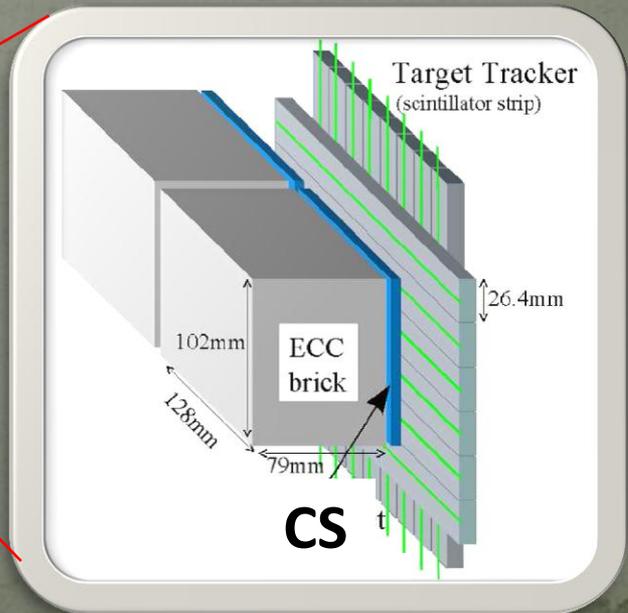
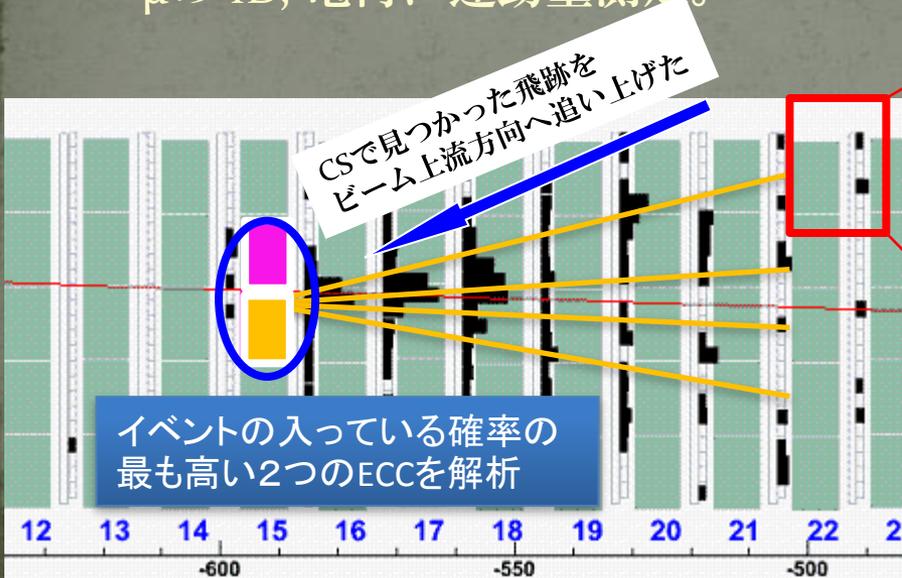


Emulsion Detector (ECC)



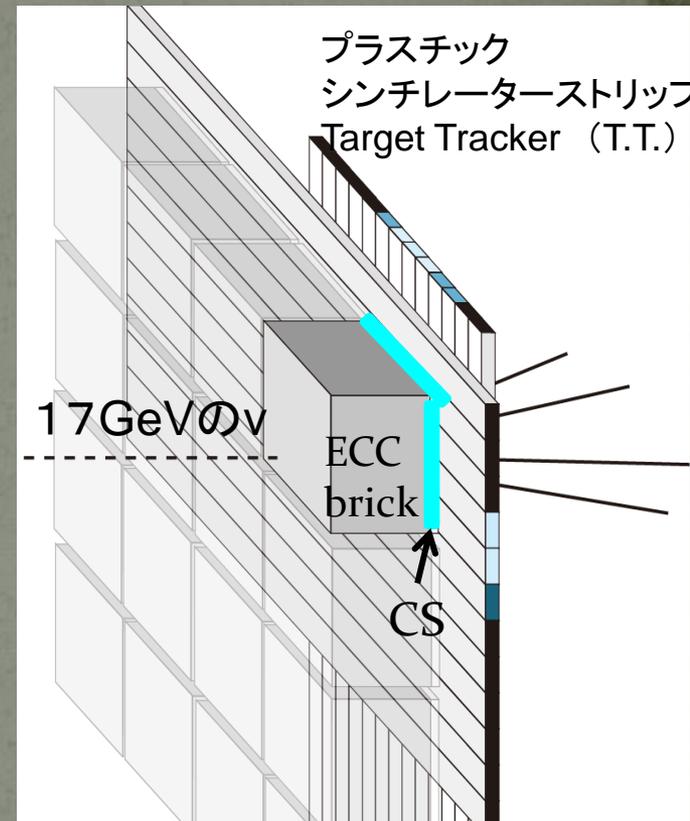
# 検出器

- TT(Target Trackers) ~9800イベントに
  - シンチレーターストリップ検出器。荷電粒子検出。トリガーとして働く。
- CS(Changeable Sheets)
  - 簡単に現像し取り換えることのできる,CSを抽出し現像する。全部見ていくより10倍速度UP
- ECC(Emulsion Cloud Chamber)
  - $\tau$ の生成点、崩壊点、topologyをみる
- Spectrometer
  - $\mu$ の ID, 電荷、運動量測定。



# 検出器

- TT(Target Trackers) 今～9800イベント
  - シンチレーター検出トリガー。
- CS(Changeable Sheets)
  - 飛跡あり ECC正しいと判断。ECC解体、現像。
  - 飛跡なし 次の候補Brickを取り出しCS解析。  
新しいCSを貼り,OPERA検出器へ返却。
- ECC(Emulsion Cloud Chamber)
  - Pb/Em 両方標的として働く。
  - CSの飛跡をECCにつなぐ
  - 上流へ向かってつないでいく (Scanback)
  - 止まったところがニュートリノ反応点
  - そのまわりをスキャン (Netscan)
  - $\tau$ の生成点、崩壊点、topologyをみる
- Spectrometer
  - $\mu$  ID。Primary vertexにレプトンついているか見る。



2008年のイベント数

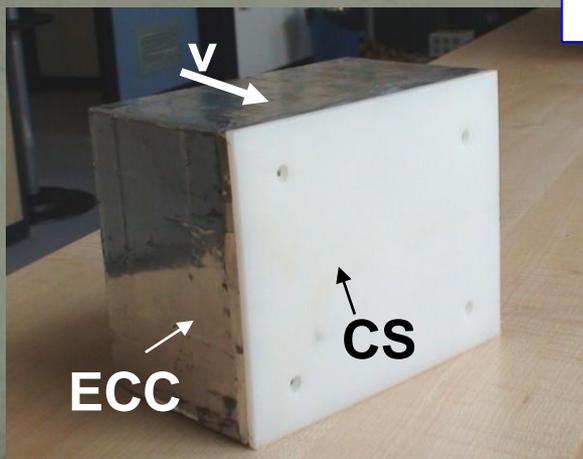
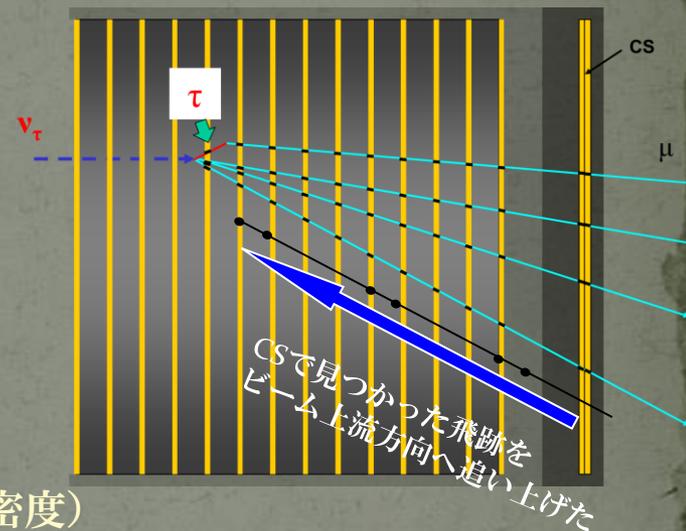
# Emulsion Cloud Chamber(ECC)

## ■ CS(Changeable Sheets)

- CSの役割：① Event Brick の tag  
② Scan back trk の pick up
- 要求: **BG trk < 1本/CS** 低Background  
**Tracking efficiency > 99%** 高efficiency

## ■ ECC

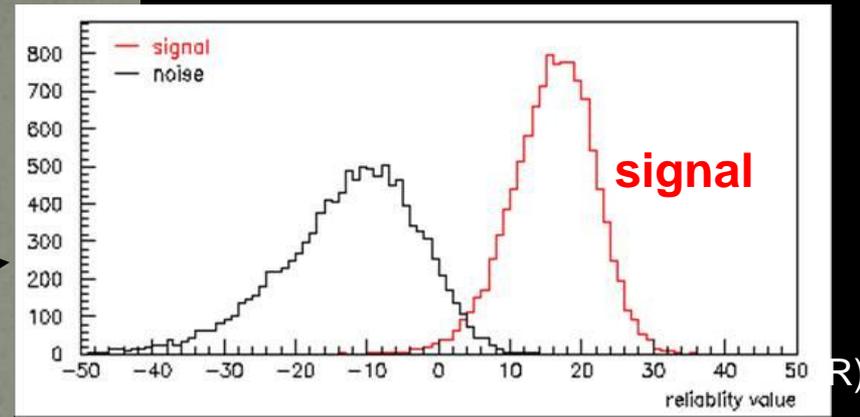
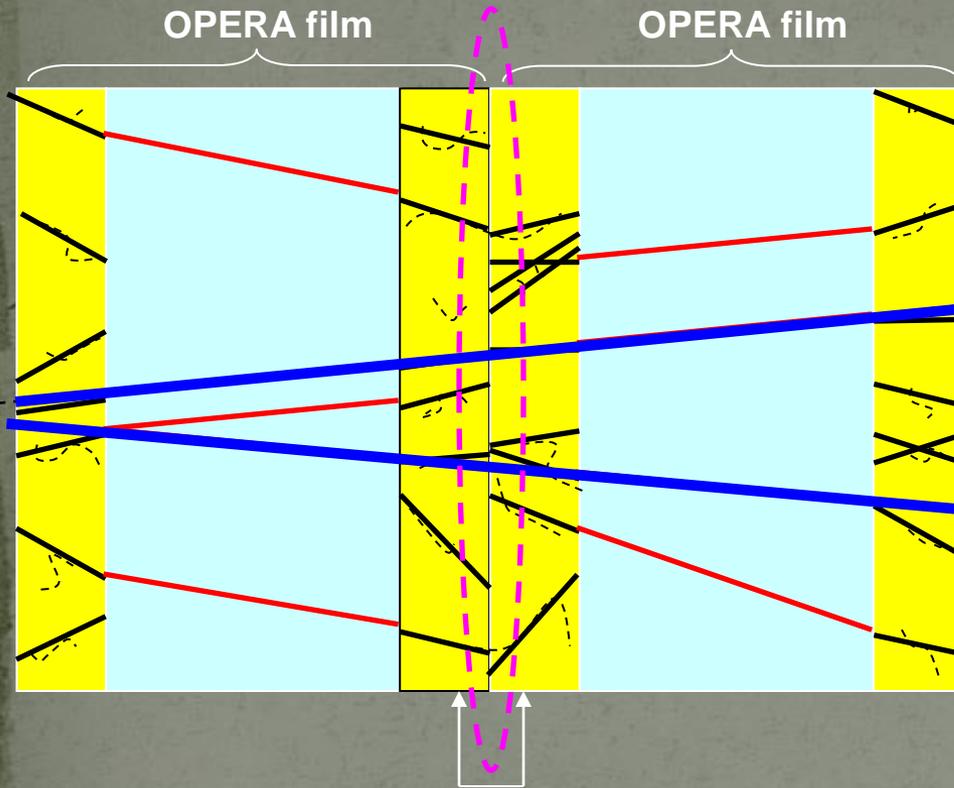
- 57 emulsion films and 56 Pb 板のサンドイッチ構造.
- 現像max ~20 ECC/day
- 得られる情報 → track の位置、角度、濃さ (銀粒子密度)



1 brick



# CS analysis



$$L^{signal} = \prod_{i=1}^4 P_{ph_i}^{signal}(\theta) * \prod_{i=1}^8 P_{dAmicro_i}^{signal}(\theta, ph) * \prod_{i=1}^2 P_{dAbase_i}^{signal}(\theta)$$

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

$$ReliabilityValue(R) = \log \frac{L^{signal}}{L^{noise}}$$

Likelihood analysisによって、本物Trackと偽物Trackを選別

1. 4層 コインシデンス

New 2. 低エネルギー電子を用いた精密アライメント

New 3. 定量的なTrack クオリティの評価

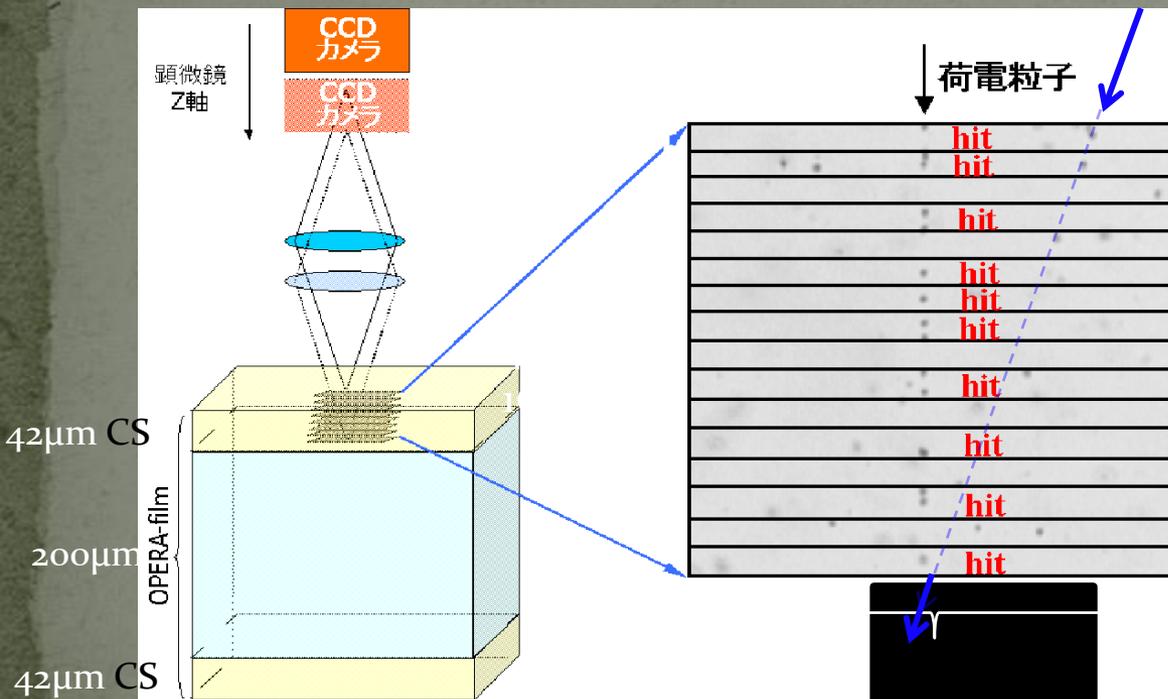


10<sup>8</sup>のノイズを消去して本物Trackを選別 (検出効率=77%)

# CS scan

## ■ 自動飛跡読み取り装置(UTS)

- xy方向分解能： $0.2\mu\text{m}$ (現像された $0.7\mu\text{m}$ の銀粒子を $3\times 3$ に分割できる)
- Z方向分解能: $2.5\mu\text{m}$



## ■ プロセス

CCDカメラスキャンで  
 $0.2\times 0.2\times 2.5\mu\text{m}^3$ 角をスキャン

↓  
Bit情報に直す。

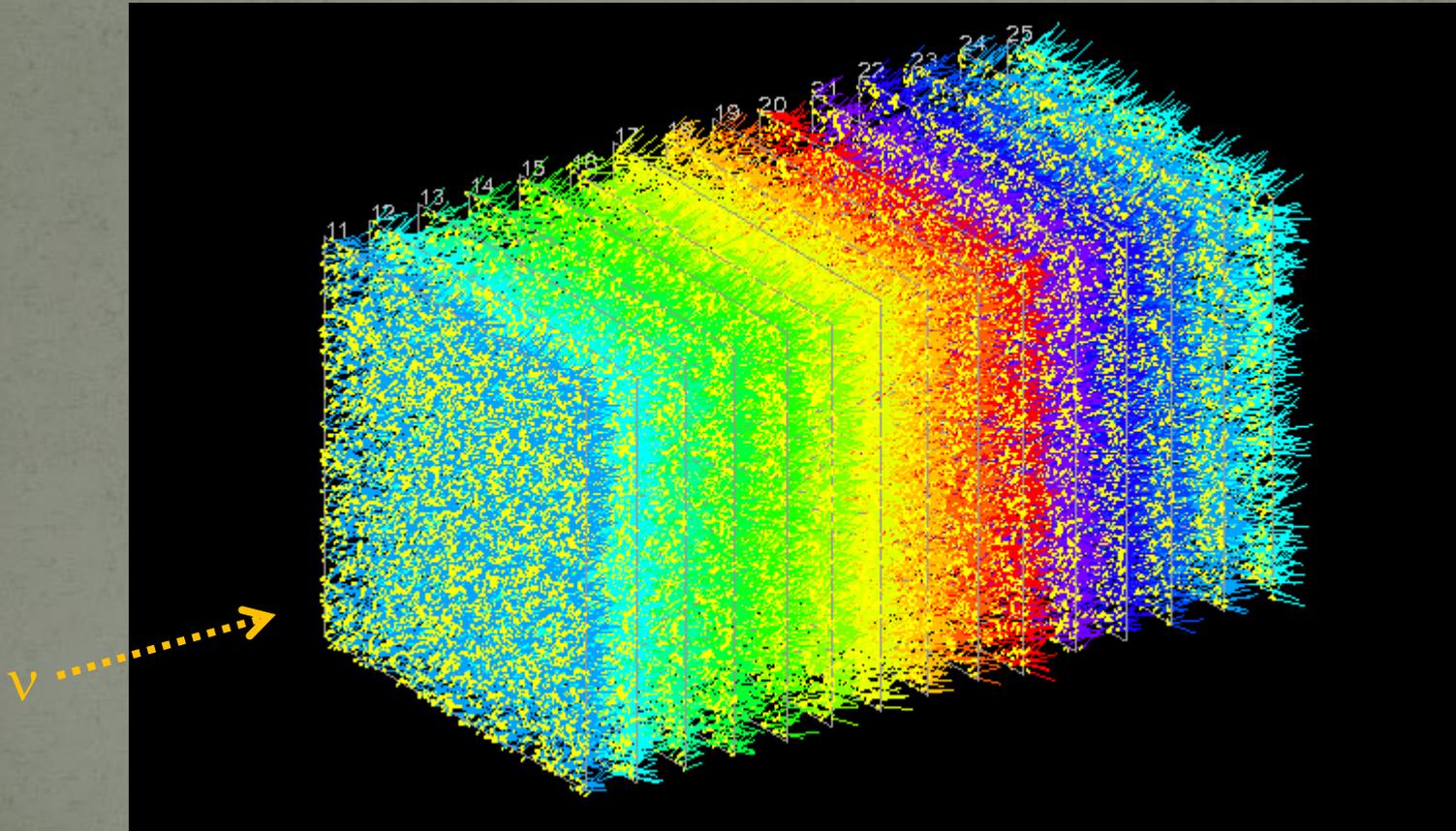
↓  
あらゆる角度から射影。  
7/16 hit重なったらtrackとして認識

7/16hitがthreshold

大面積の高速Scanが可能。4mm×3mmを約5分でScanする。1枚4時間

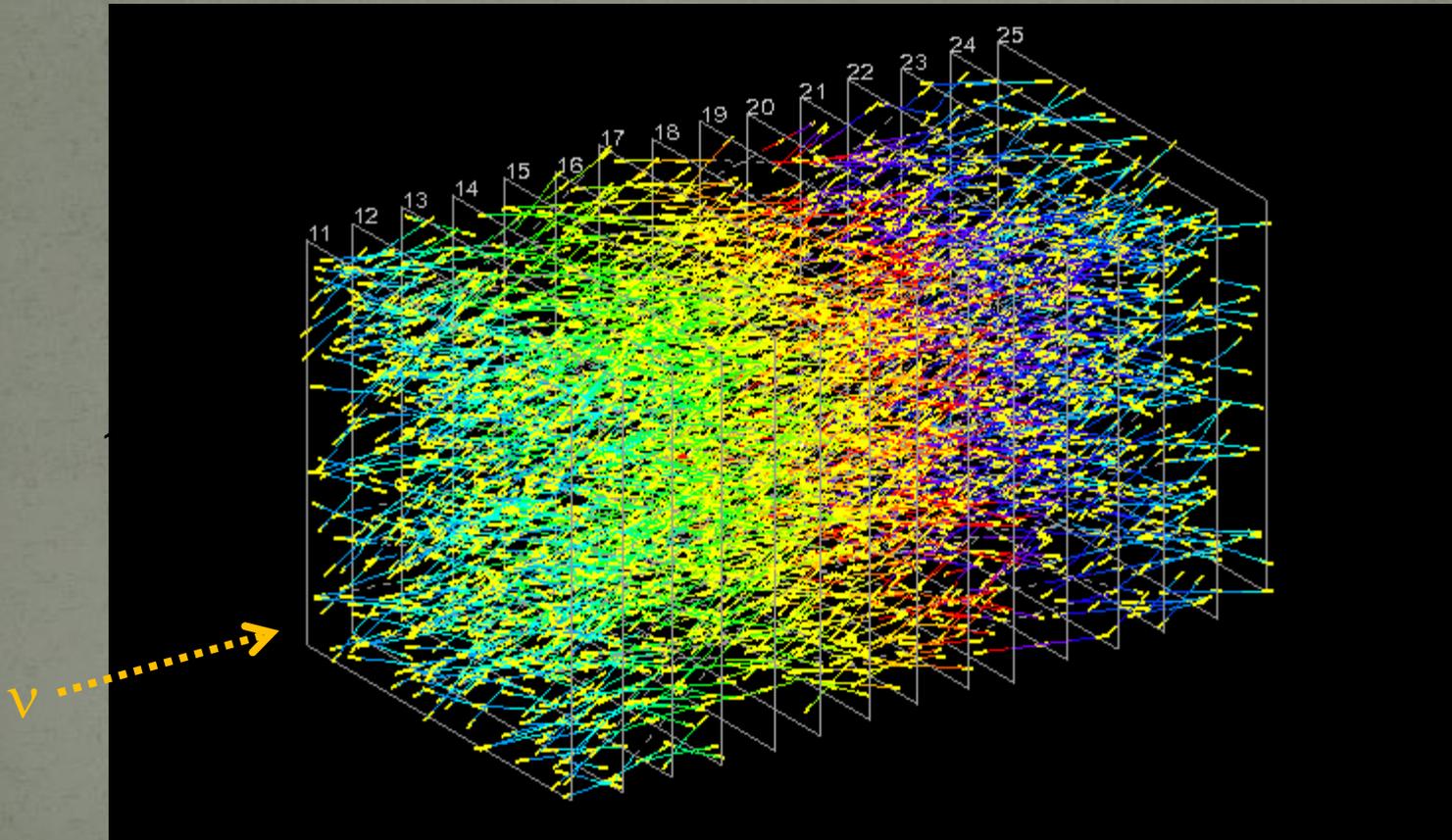
# ECC brickでのニュートリノ検出

下流から上流にScanbackして表示しただけ。



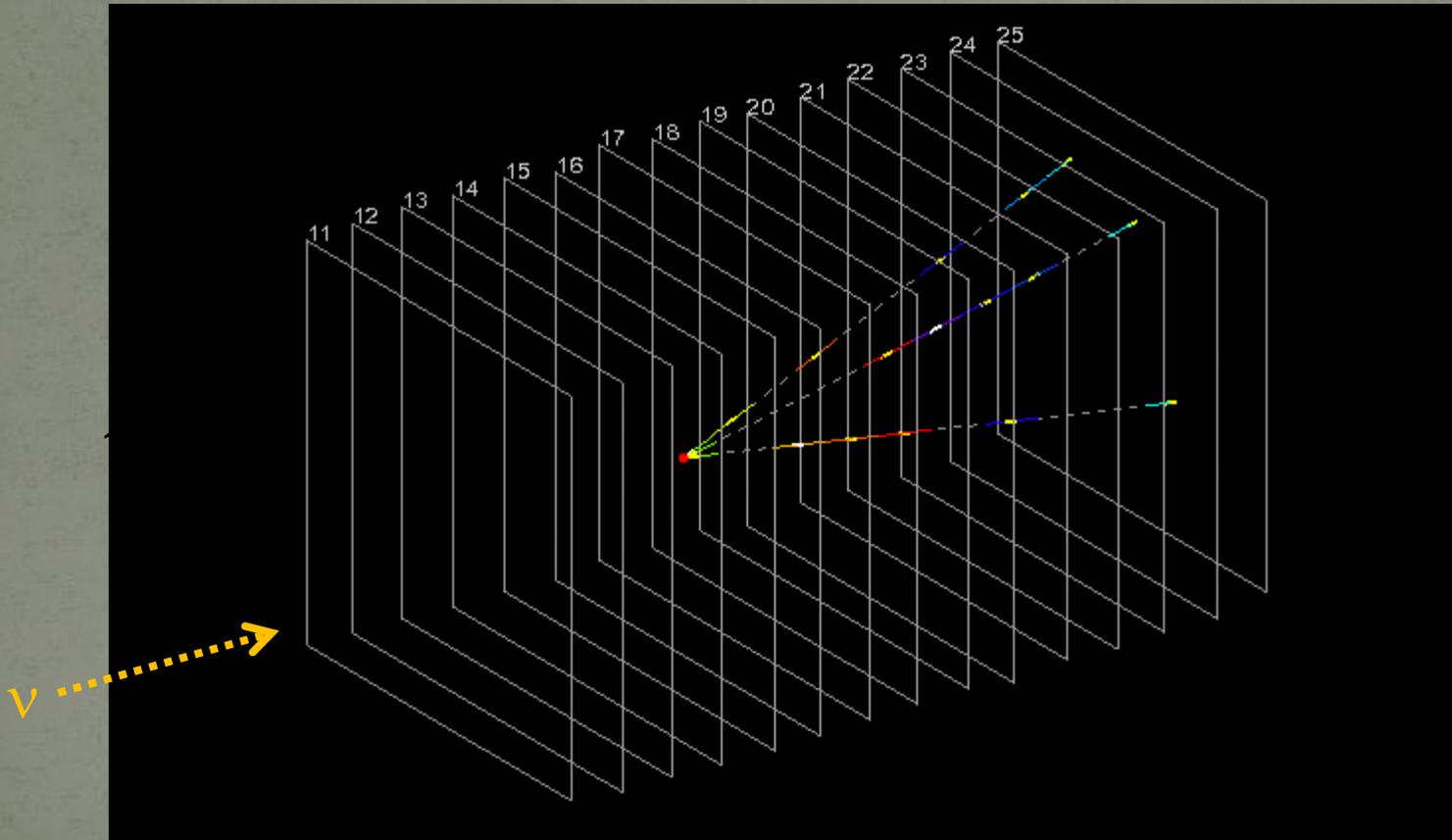
# ECC brickでのニュートリノ検出

数枚の層しか通過しないtrackを取り除いたとき



# ECC brickでのニュートリノ検出

ニュートリノ反応によってできるvertexを作るtracksを探すと、



# Track analysis

## ■ ECCから得られる情報

- track の位置, 角度, 濃さ(銀粒子密度)

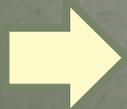
## ■ 銀粒子密度から分かること

- Emulsion(AgBr)のイオン化の際、粒子はエネルギーを失う。

### • 損失エネルギー

- ゼラチンをイオン化エネルギー
- 原子の電子にエネルギーを渡す。  $\Delta ray$  として現れる。
- 現像による銀粒子密度の変化 だが、、、

- 1track長あたり銀粒子数  $\propto$  エネルギー損失rate



これは、主に暗黒物質探索で用いられているメソッド  
N<sub>T</sub>探索では、主に多重散乱から運動量を導出する。

# Track analysis

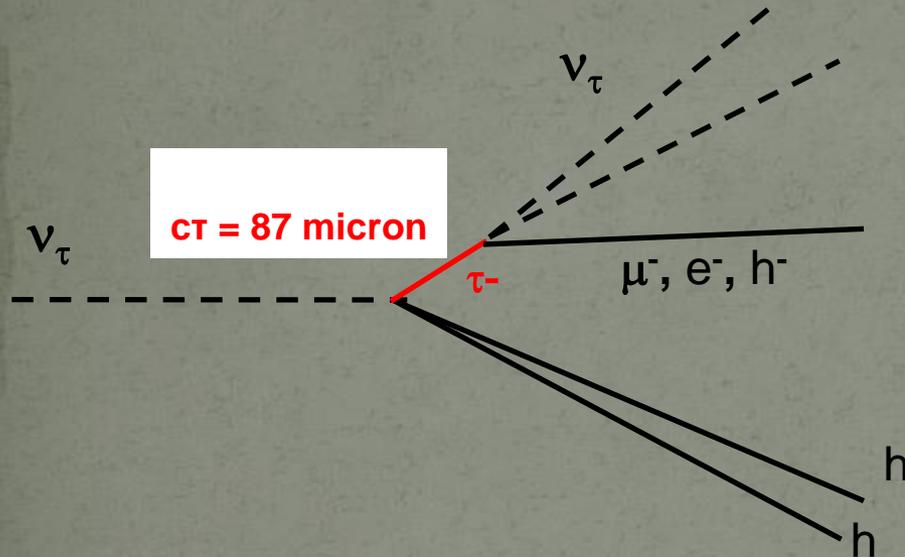
## ■ 運動量測定

- 低運動(6GeV以下)
  - 鉛標的による、角度のずれ、多重散乱(22%)
- 高運動量
  - 標的による位置のずれ(33%)
- 多重散乱させたい(厚く)が、角度分解能をよくしたい(薄く)⇒1mm厚の鉛板

## ■ $\gamma$ -ray

- 電磁シャワーの形、多重散乱後のtrack
- どのvertex由来かの情報が重要(角度分解能)

# $\tau$ ニュートリノ検出原理



## Topology

Kink	$\tau^- \rightarrow e^-$	17.8 %
	$\tau^- \rightarrow \mu^-$	17.4 %
	$\tau^- \rightarrow h^-$	49.5 %
Trident	$\tau^- \rightarrow h^- h^- h^+$	15.2 %

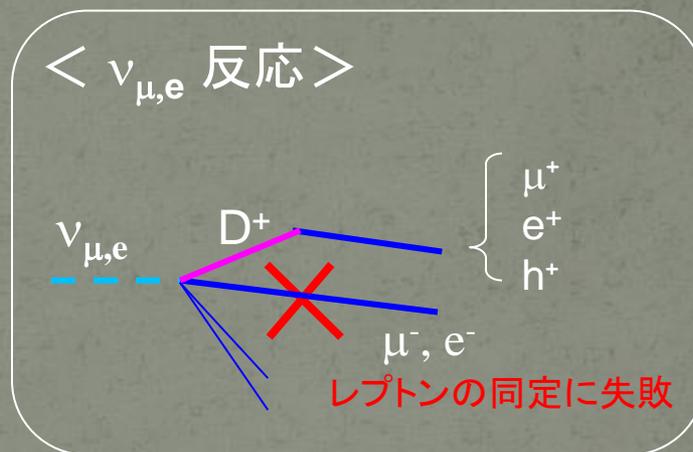
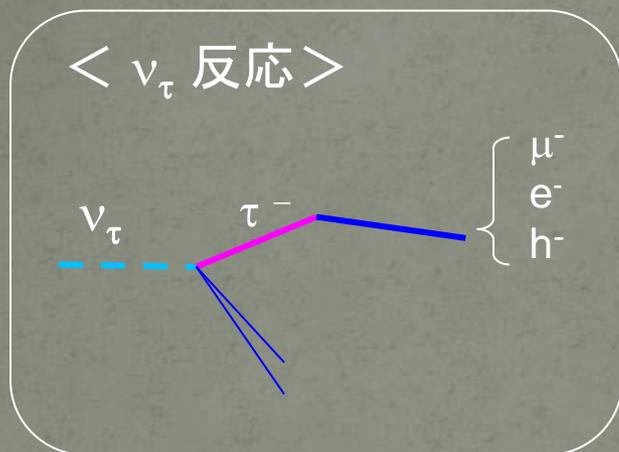
$\tau$  短寿命 → 生成点～崩壊点のimpact パラメータ 小さい  
→ 原子核乾板emulsion (  $\mu\text{m}$ 以下分解能)

$\nu_\tau$  イベントの特徴

- 第一崩壊点以外レプトントラックない。
- > ECC + muon spectrometerで測定

# チャームバックグラウンド

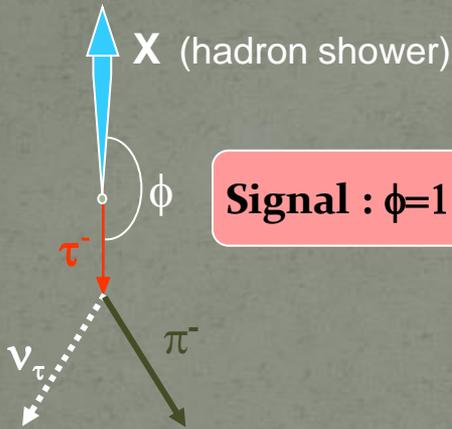
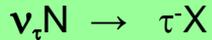
- チャーム粒子は  $\tau$  粒子と似た崩壊トポロジーをしている



- チャーム粒子をともなうニュートリノCC反応イベントにおいて、muon、electronの同定( $\sim 95\%$  muon ID)に失敗した場合にBGとなる
- 1-prong hadronic mode に対して、 $0.007 \pm 0.004$  (syst)バックグラウンドイベントが統計的に期待される

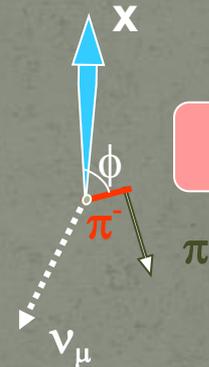
# $\nu_\mu$ バックグラウンド

$\nu_\tau$ 反応



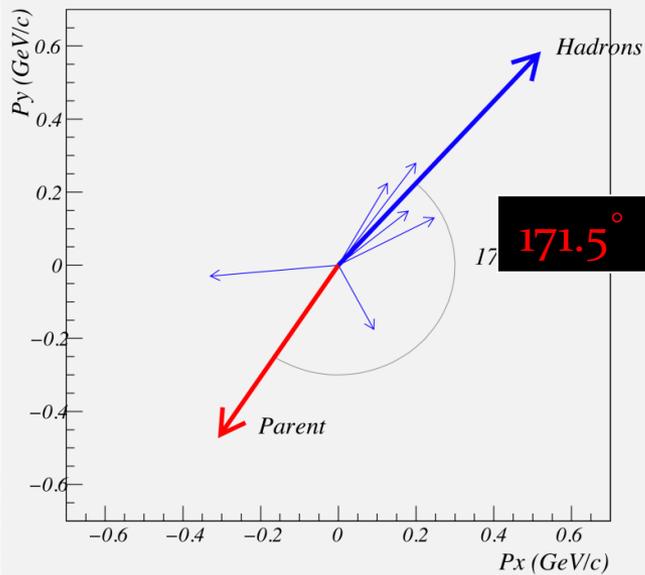
Signal :  $\phi=180^\circ$

$\nu_\mu$ NC反応

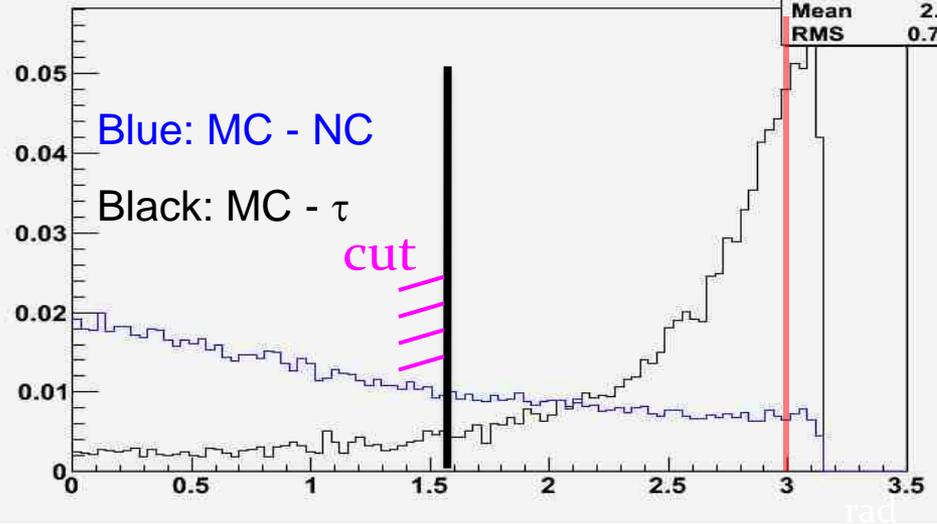


BG : small  $\phi$

Transverse momentum

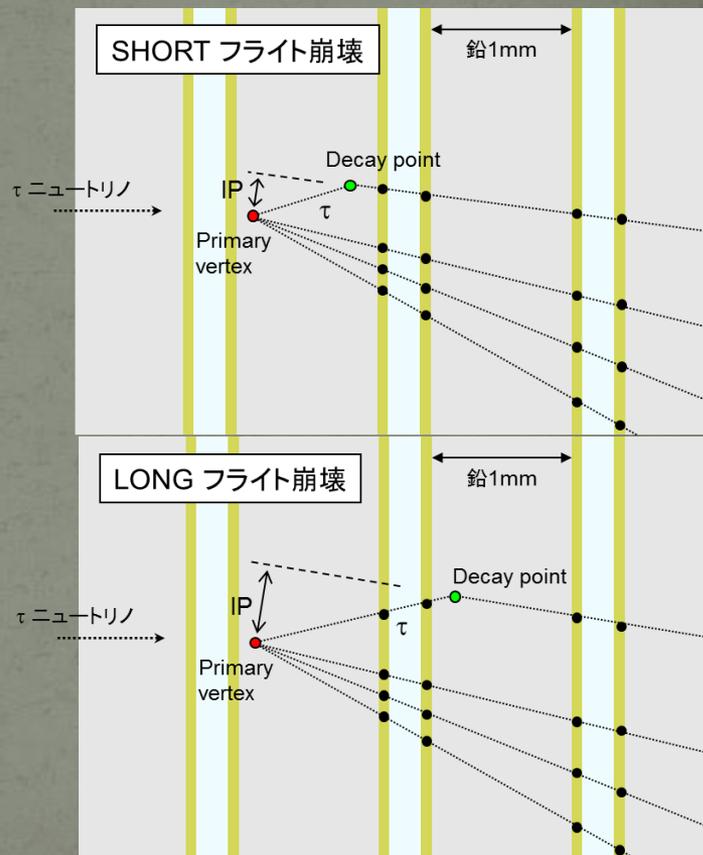


Sm + Ang + Pho + Finite - Angle between MTH(All Charged +Pho+ cut) & Had



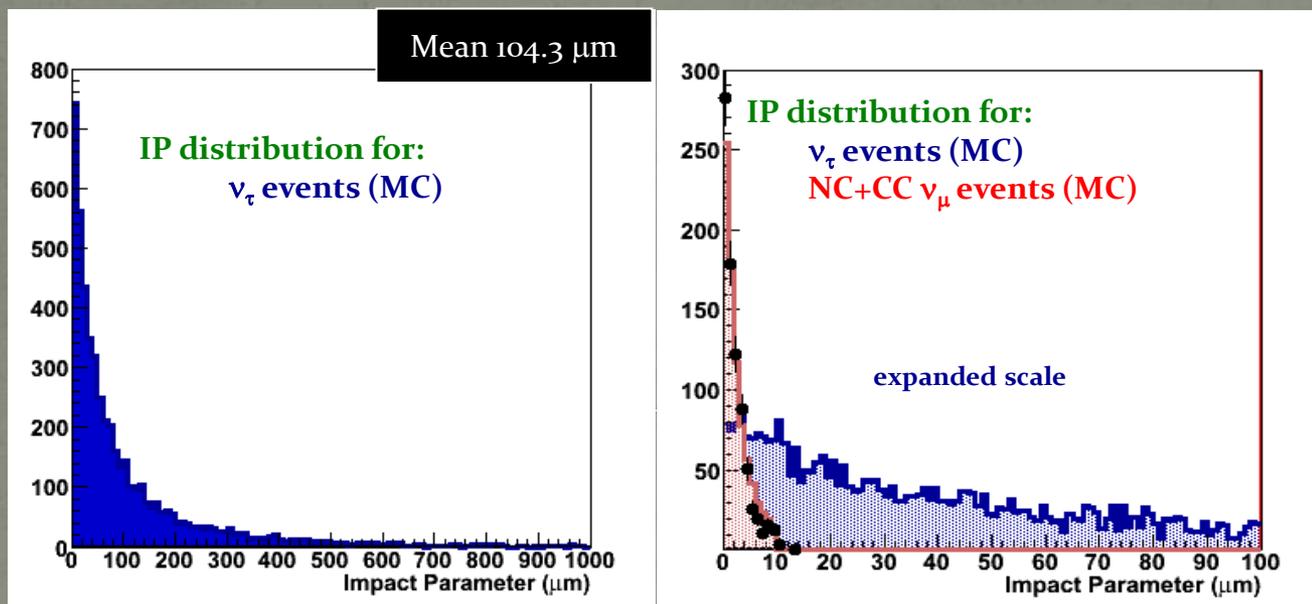
# 解析

- Short flight
  - IPの大きさ
- Long flight
  - $\tau$  粒子の飛跡,及びIPの大きさ



# 崩壊探索方法

MCによるニュートリノ反応のIP分布



- (i)  $10 < IP < 500$  [ $\mu\text{m}$ ] の飛跡を候補として選別する
- (ii) IPが大きい理由を特定する  
[ IPが大きくなる理由 ]
  - ・実際に崩壊様式
  - ・鉛による多重電磁散乱
- (iii) 運動力学的カット

# Refresh処理

$\tau$ の崩壊様式は、59.4%が終状態に電磁成分を含む( $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ )

$\tau^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu + \nu_\tau$	17.4%
$\tau^- \rightarrow e^- + \nu_e + \nu_\tau$	17.8% ○
$\tau^- \rightarrow h^- + \nu_\tau$	11.8%
$\tau^- \rightarrow h^- + \pi^0 + \nu_\tau$	25.9% ○
$\tau^- \rightarrow h^- + \geq 2\pi^0 + \nu_\tau$	10.8% ○
$\tau^- \rightarrow h^- h^- h^+ + \nu_\tau$	10.0%
$\tau^- \rightarrow h^- h^- h^+ + \geq 1\pi^0 + \nu_\tau$	4.9% ○

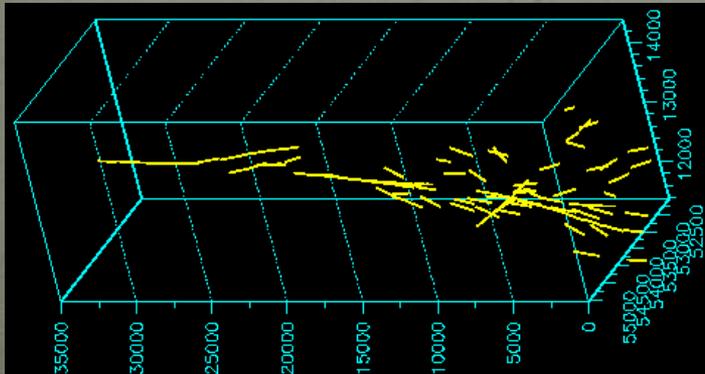
電磁カスケードシャワーによる電子同定  
およびエネルギー測定精度の向上



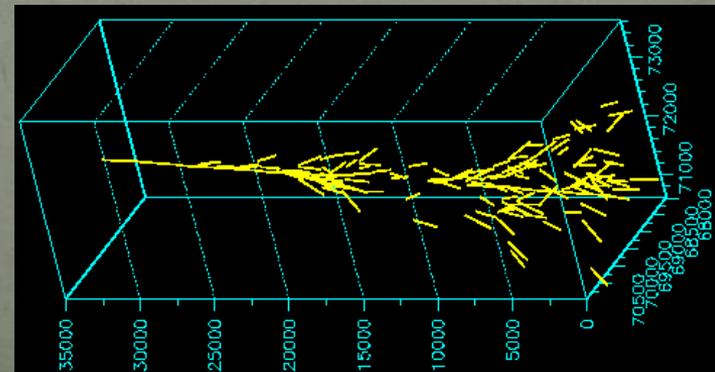
$\nu_\tau$ の検出効率が飛躍的に上がる！



Fuji film社での製造から使用までの間に  
蓄積する宇宙線などのBackground飛跡を  
消去(Refresh)せねばならない。

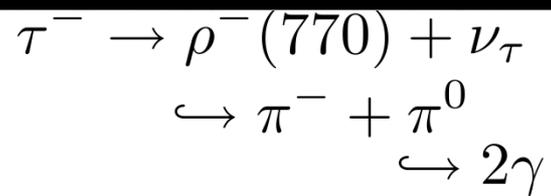
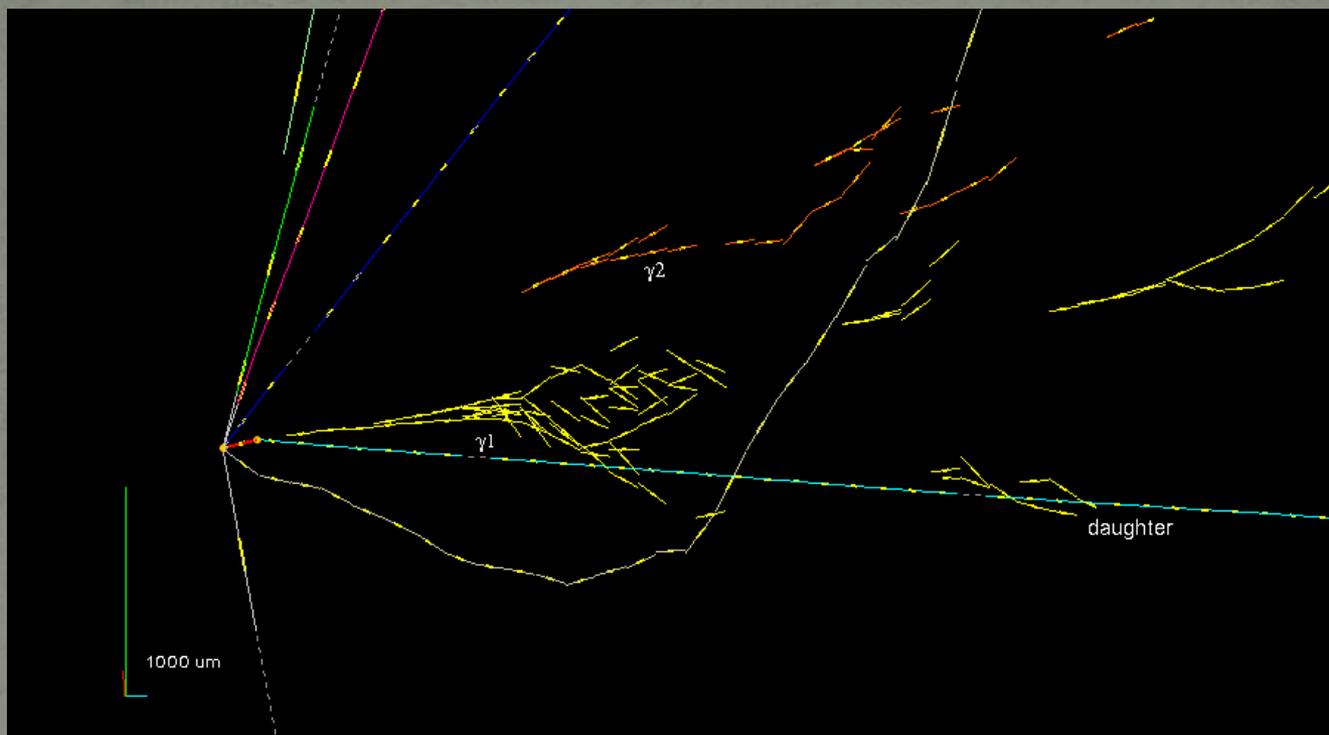


2GeV 電磁カスケードシャワー



4GeV 電磁カスケードシャワー

# $\tau$ ニュートリノ候補イベント



# Statistical significance

<1-prong hadron  $\tau$  崩壊で1イベント観測。>

このとき予想される背景事象

0.011 events (reinteraction)

0.007 events (チャーム)



1-prong hadronには  $0.018 \pm 0.007$  (syst) イベント

全崩壊過程: 1-prong hadron, 3-prongs

+ 1-prong  $\mu$  + 1-prong  $e$  :

全BG:  $0.045 \pm 0.020$  (syst) イベント

- 1-prong hadron だけを考えた場合、観測した1イベントが背景事象のふらつきである確率は1.8%, 統計有為性は  $2.36 \sigma$
- 全崩壊過程を考えたとき、観測した1イベントが背景事象のふらつきである確率は4.5%で統計有為性は  $2.01 \sigma$ .

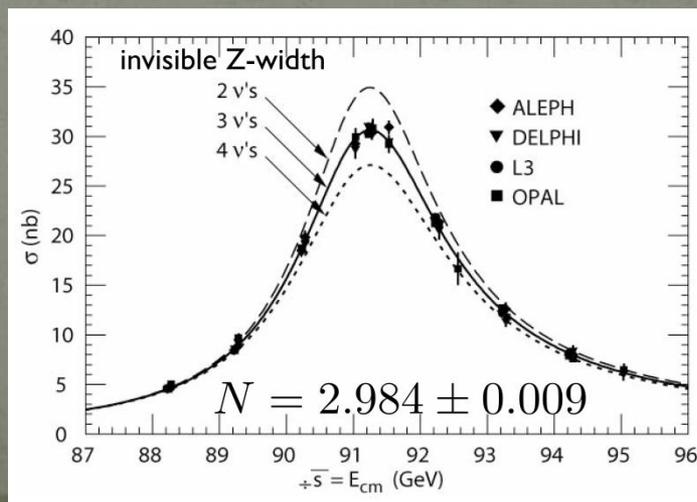
# 結果

- $\tau$ 候補がひとつ見えた。
  - $h^-(\pi^0)\nu_\tau$ がバックグラウンドfluctuationでない有為性:
    - $2.36\sigma$
- まだ $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ が見えたことにはならない。
- あと数個の検出が必要。

# Backup

# 今までのニュートリノ物理

- Super Kamiokande
- どのパラメータ領域から来るかわかる。(chorus実験短基線は失敗)
- DoNUT実験によって $\nu_{\text{tau}}$ の発見。
- SKで示されたパラメータ領域でのニュートリノ振動
- 長基線ニュートリノ振動で $\nu_{\text{tau}}$ のappearanceをとらえる。 OPERA



簡単のために2世代間の混合を考える。

$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

$$\therefore |\nu_\alpha\rangle = \cos \theta |\nu_1\rangle + \sin \theta |\nu_2\rangle$$



時間発展

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = e^{-i\frac{m_1^2}{2E_1}L} \cos \theta |\nu_1\rangle + e^{-i\frac{m_2^2}{2E_2}L} \sin \theta |\nu_2\rangle$$

エネルギーE(GeV)の $\nu_\alpha$ が距離L(km)飛んだ時の生存確率は

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) &= \langle \nu_\alpha | \nu_\alpha(t) \rangle \\ &= 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2 \left( 1.27 \Delta m^2 \frac{L}{E} \right) \end{aligned}$$

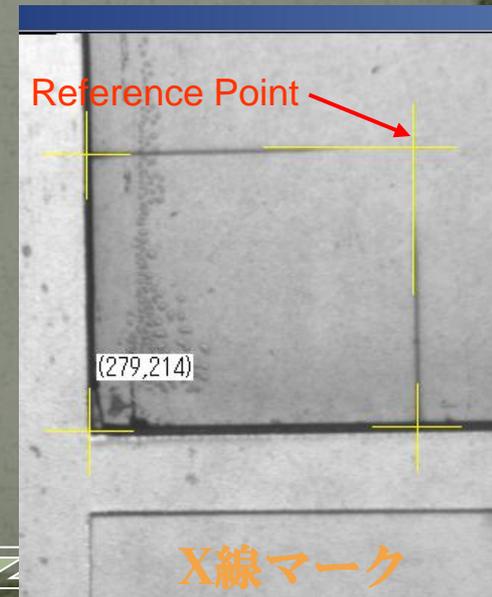
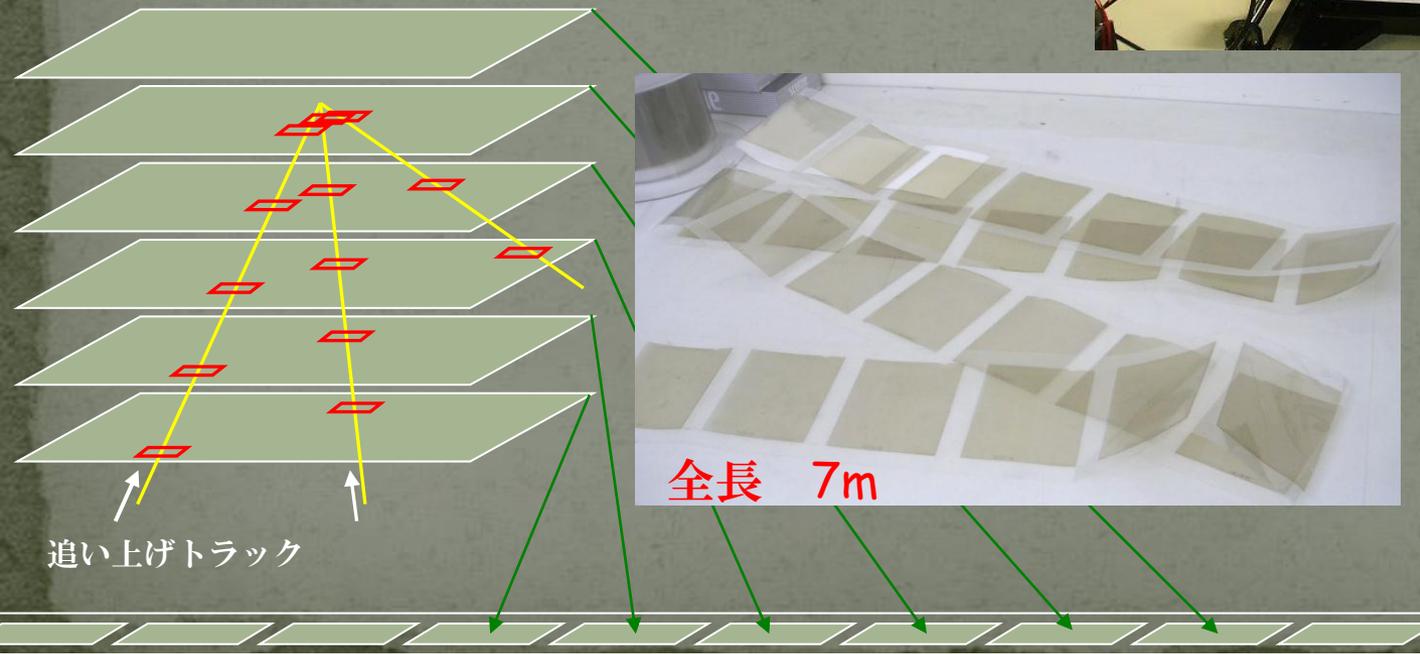
# Emulsion(原子核乾板)検出器原理

- 原理(写真と同じ)潜像→現像→定着
- AgBrのgrainがゼラチン中で浮遊している。
- 荷電粒子反応:原子核とのクーロン散乱によってイオン化。
- 光子反応:光電効果で飛び出す電子によってイオン化。
- 荷電粒子のionization現象。
- まずphoto sensitive grainは取り除く。(back groundになる)
- TrackはIncident particleだけでなく,grain(AgBrがcommon)の濃度,大きさにも依存。  
→small grain size and spacing がeffective.現在 $\mu\text{m}$  order分解能
- 潜像
- 潜像の破壊 fading $\propto$  expo(温度,湿度)、媒介粒子、grain size
- 高エネトラックはgrainに残すsmaller size trackによりfadeしやすい。
- 現像：
  - イオン化した粒子は現像液に反応するようになっている。
  - 銀がイオン化点で蓄積。これはイオン化は起きるとき電子が伝導帯に移動して結晶配列中を移動するから。すると電子トラップが電子を捕獲して負電荷獲得。Ag<sup>+</sup>イオンはこういう電子トラップにひきつけられる。電子によって

# 反応点探索の自動化

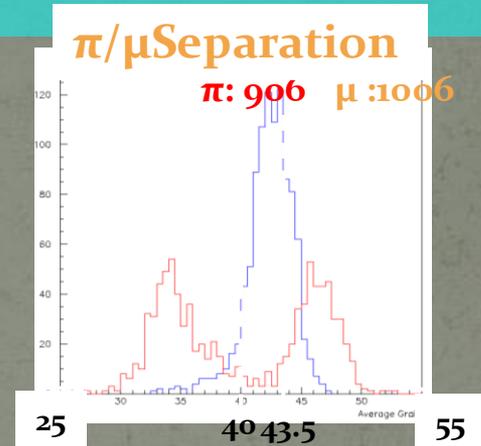
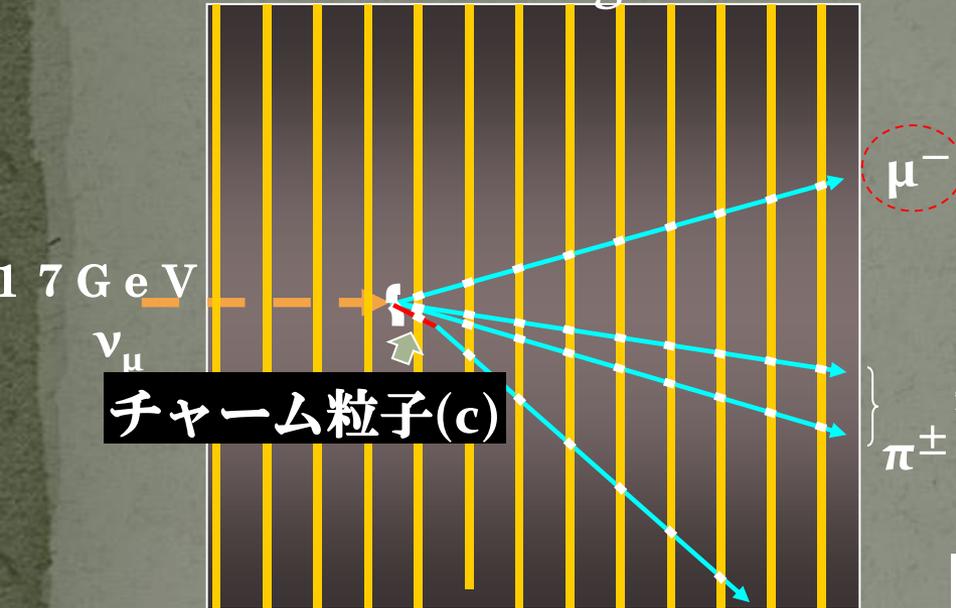
## Plate Changer System の開発

film をSheet に貼り付け、自動で slide させ、film の edge にあるX線マークを読みとることにより、film 交換の時間短縮を達成(5分 → 4秒)。また、Online scan back program を開発した。これにより、反応点まで自動で到達することが可能となる。現在テスト中。



# dE/dX 測定

## Charm Background

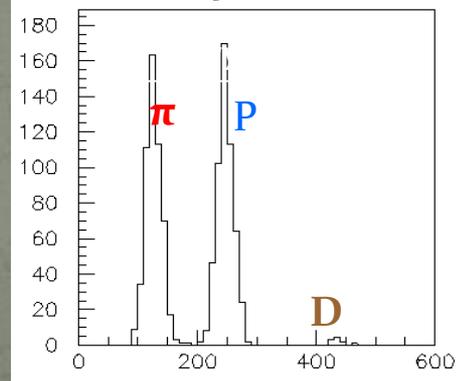


銀粒子密度(G.D.)を測定することで $\pi/\mu$ を分離でき

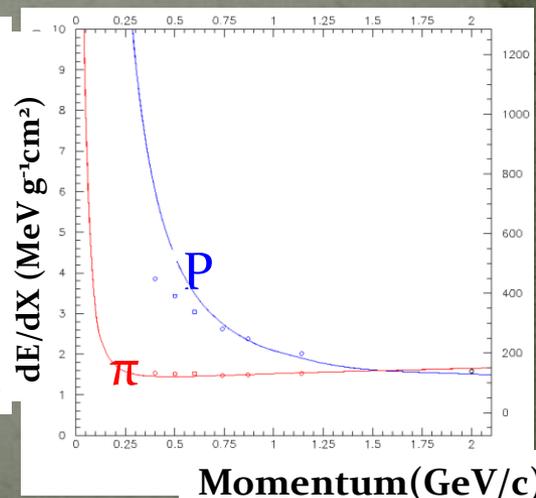
Vertical trk 黒化度測定 data

VPH-dE/dX

0.87 GeV/c



垂直trkの黒化度測定  
による $p/\pi$ 識別



## ■ $\nu_\tau$ 反応の最大のBG

- 低運動量 $\mu$ 、charm粒子生成事象。
- これをECC中で $dE/dX$ から $\beta$ を測定し、Range- $\beta$ の関係から
- $\pi/\mu$ 粒子識別を行い、Backgroundを落とす!