

原子核乾板を用いた低エネルギー ニュートリノ反応の研究 (PEANUT)

北川暢子 (名古屋大学)

新学術領域「ニュートリノフロンティアの融合と進化」 研究会
2013年12月8日

本研究の目的

J-PARCで原子核乾板を用いたニュートリノ実験を行う意義

➤ 低エネルギーニュートリノ反応の理解

原子核乾板はニュートリノ反応から放出される全荷電粒子を記録

- ・高分解能な位置精度 → 放出角分布 → シミュレーションとの比較
- ・粒子同定・運動量測定 → ν 反応の分類

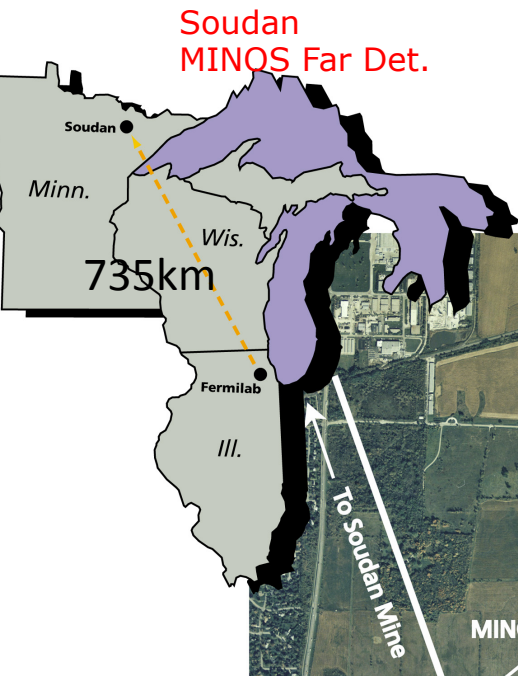
➤ ν_e 反応断面積の測定

極低バックグラウンド下で ν_e 反応を検出

上記の研究を計画・実行するための準備として、PEANUT(Fermi labのNuMIニュートリノビームを照射)のECCを用いて解析手法の開発を行う

- 電子検出器のトリガーに依らないノンバイアスなニュートリノ反応の検出手法の開発
- J-PARCでのニュートリノ実験にむけた検出器の考案
 - ν_e 反応の検出・電子同定に最適化したECC構造の検討
 - muon IDのための電子検出器の検討

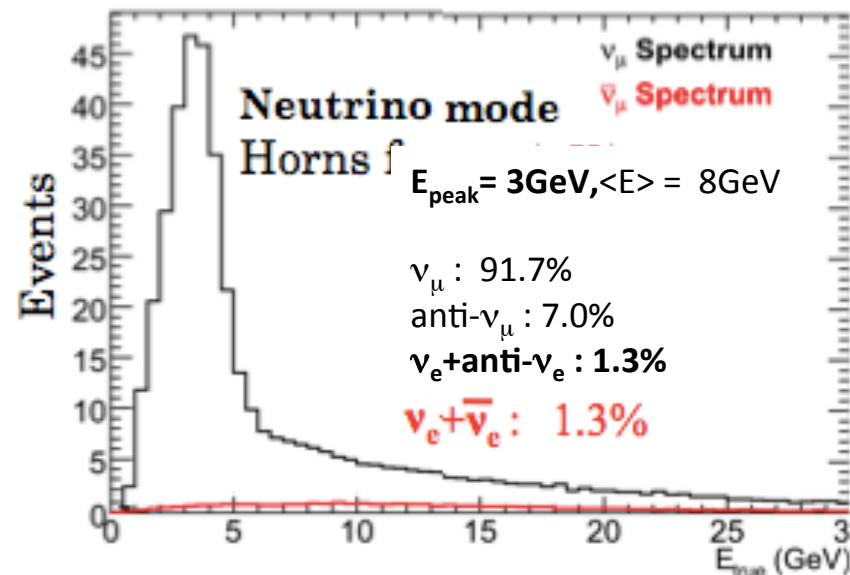
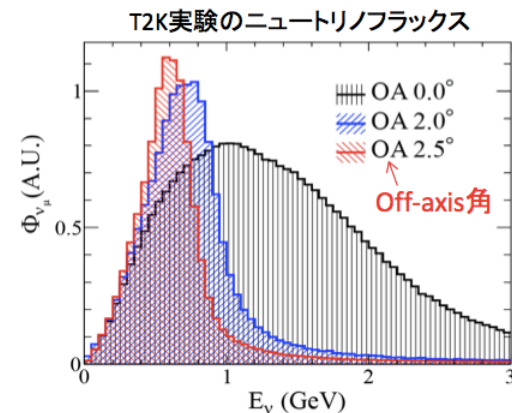
The NuMI beam



MINOS Hall
(地下105m)
PEANUT検出器
の設置場所



- ★ 120 GeV protons
- ★ 8.7 μ s spill time
- ★ 1.9 s cycle time
- ★ 8.7 μ s every 1.9 s
- ★ 2.5×10^{13} protons/spill
- ★ 2.5×10^{20} protons/year
- ★ 0.3 MW on target



PEANUT検出器の設置

RUN1 : 2005.09 – 2007.03
(OPERAのリハーサル)

RUN2 : 2007.06 – 2008.09

ビームの拡がり
直径: 約2m以上

MINOS
前置検出器

PEANUT
検出器

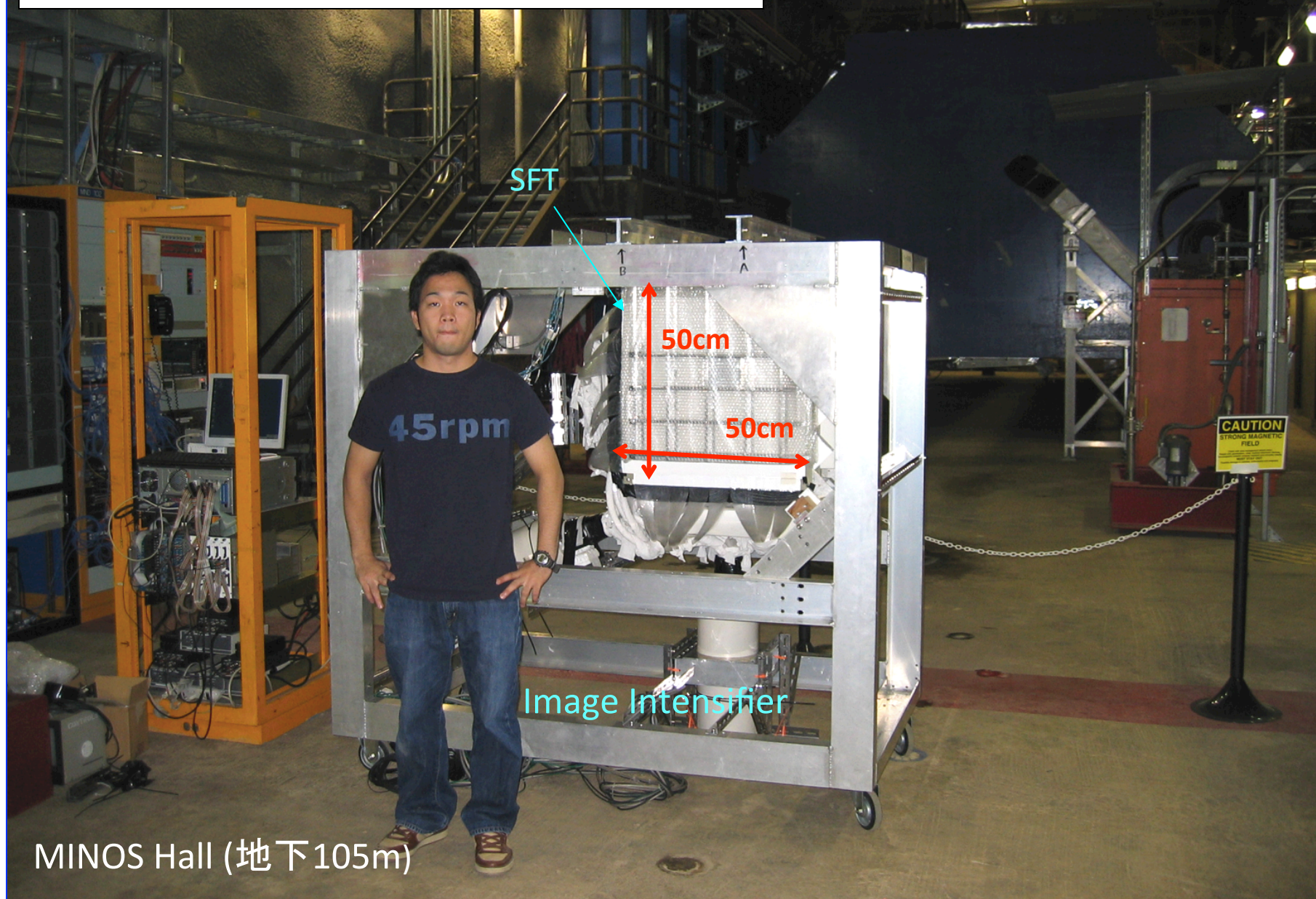
CAUTION
STRONG MAGNETIC
FIELD

CAUTION
STRONG MAGNETIC
FIELD

Rock Muon: $1 \sim 2 / \text{cm}^2 / \text{day}$

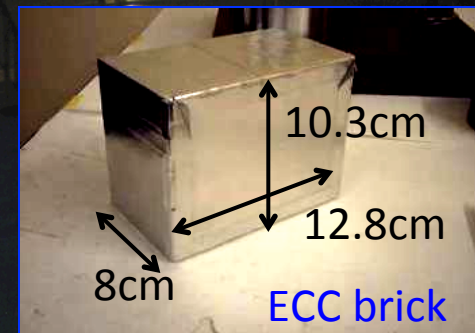
MINOS Hall (地下105m)

SFT(Scintillation Fiber Tracker)

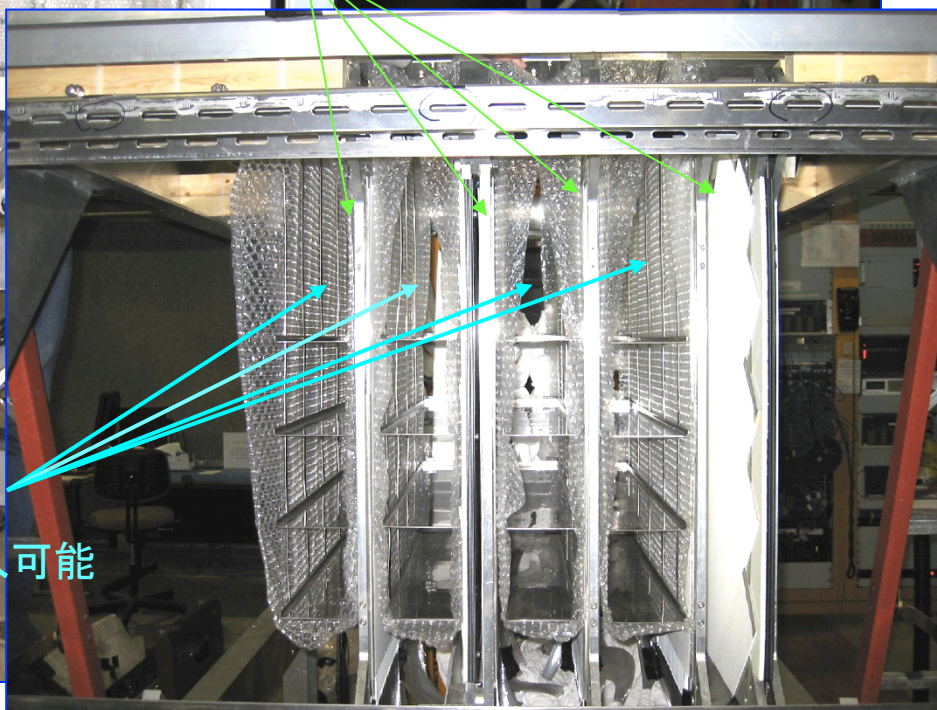


MINOS Hall (地下105m)

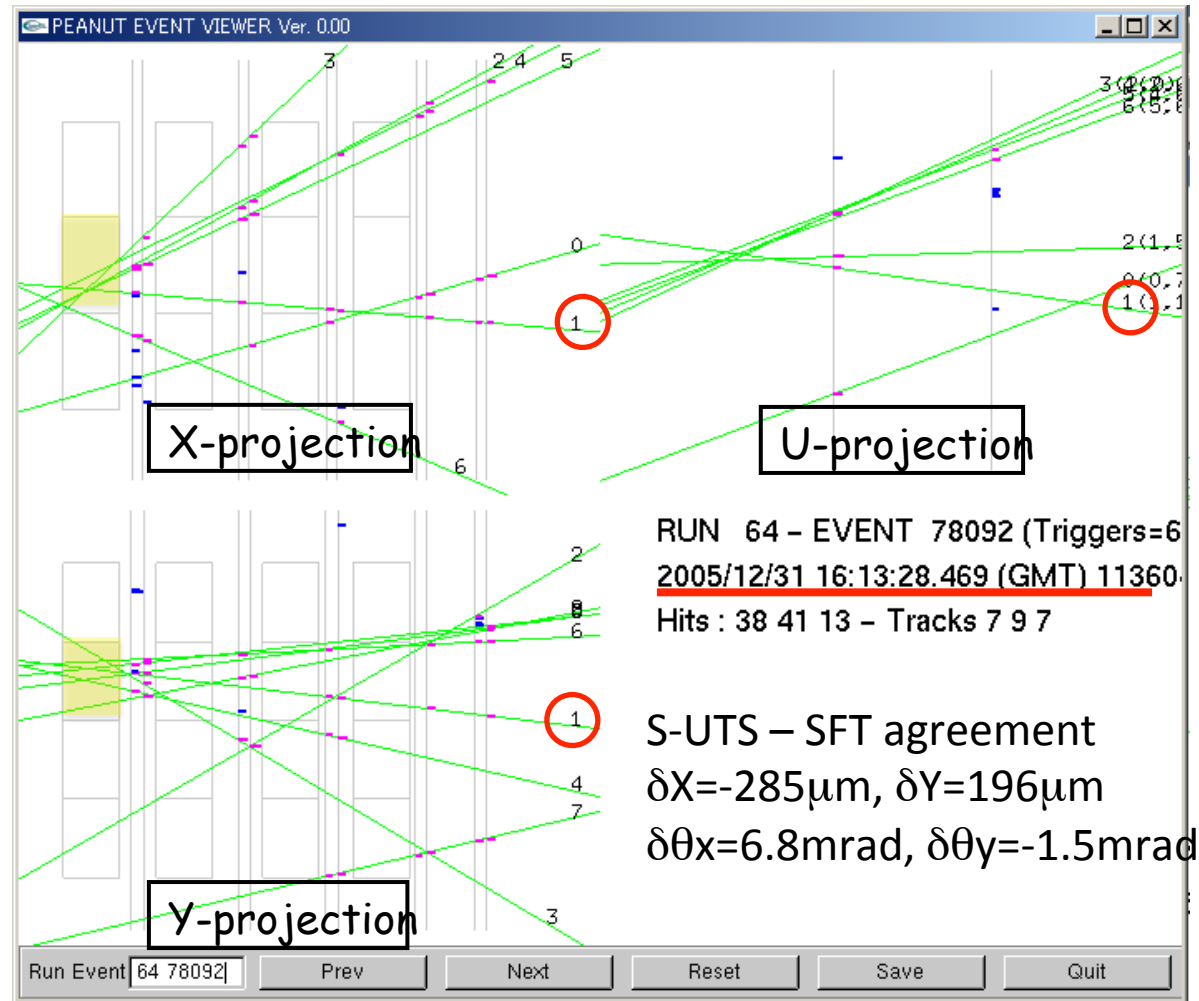
SFT(Scintillation Fiber Tracker)



Wall (ECCの為の補助台)
最大48個挿入可能

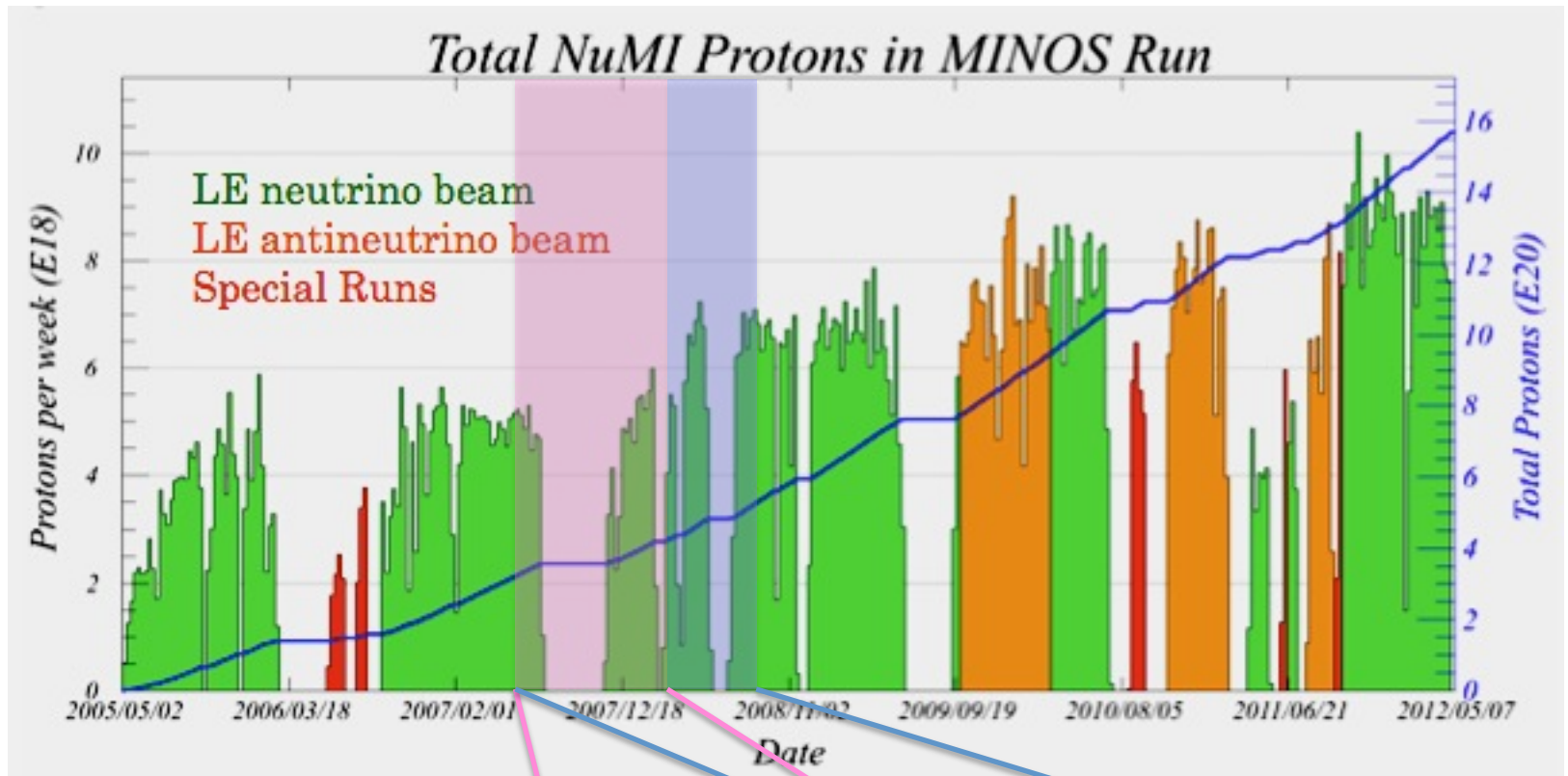


SFT で選び出したニュートリノイベント (PEANUT RUN1)



SFTで飛跡の選び出し→ECCに接続→ニュートリノ反応点探索

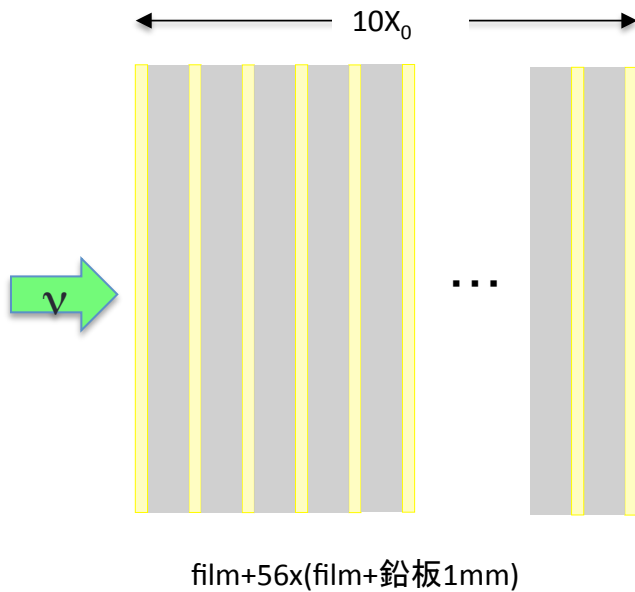
ニュートリノ照射 (RUN2)



Exposure	2007.06 – 2008.02	2007.06 – 2008.09
# of ECC	24	12
expected ν int	~6000	~4000

ECCの構造と特徴

OPERA
(for high energy)

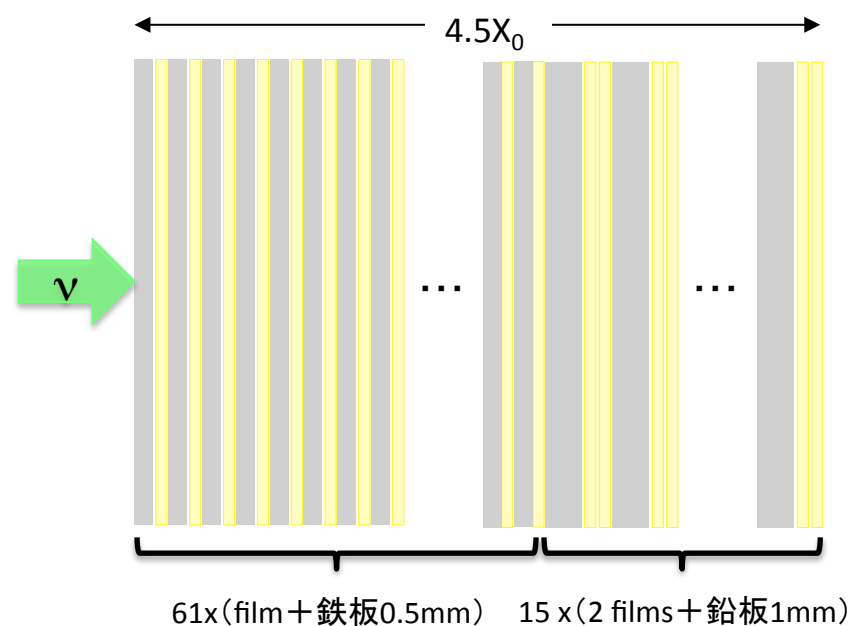


鉛板1mm = $0.18X_0$

π^0 BG / ν_e CC反応 = 0.1%
@OPERA($\langle E_\nu \rangle = 17\text{GeV}$)

low BG from π^0

PEANUT RUN2
(for low energy)



鉄板0.5mm = $0.03X_0$

より細かいセグメンテーション

↓
 ν 反応点近傍の詳細解析
 π^0 からのBGはnegligible? (ν_e の検出)

ノンバイアスなニュートリノ反応の検出

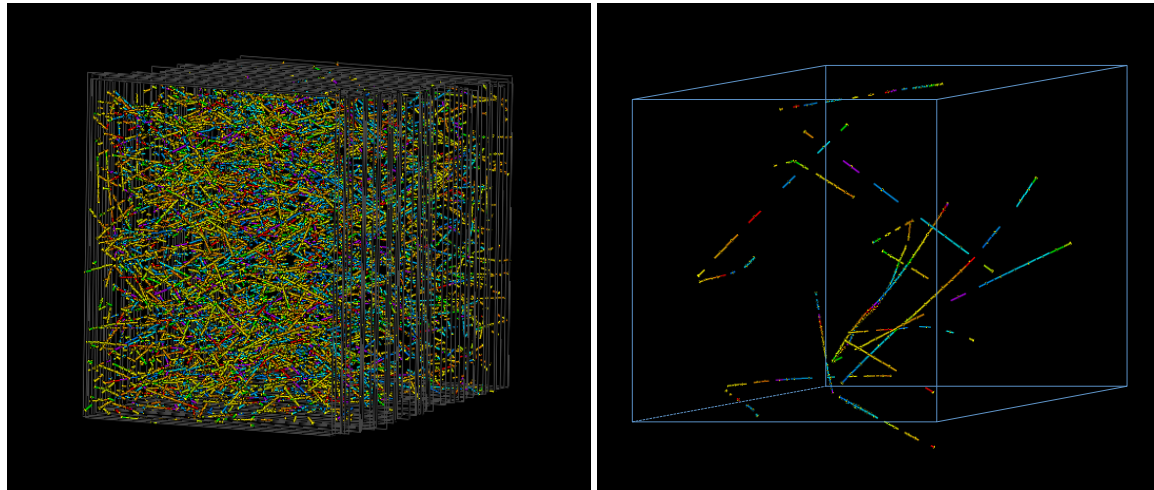
OPERA実験は

- ・電子検出器によるトリガーをかけた事象選択を行っている
- ・1 ECCに1 イベント(限られた領域のデータを用いたニュートリノ反応点の特定)

1 ECCに～200イベントを蓄積した原子核乾板の全面積のデータを用いて、
飛跡再構成から自動的にニュートリノ反応を検出する手法の開発を行う



低エネルギーニュートリノ反応や ν_e 反応を高効率で検出可能にする



↑ 2007年当時の手法による ν 反応の検出
低運動量の飛跡の再構成、QE反応の検出が困難であった

スキャンと検出効率の推定

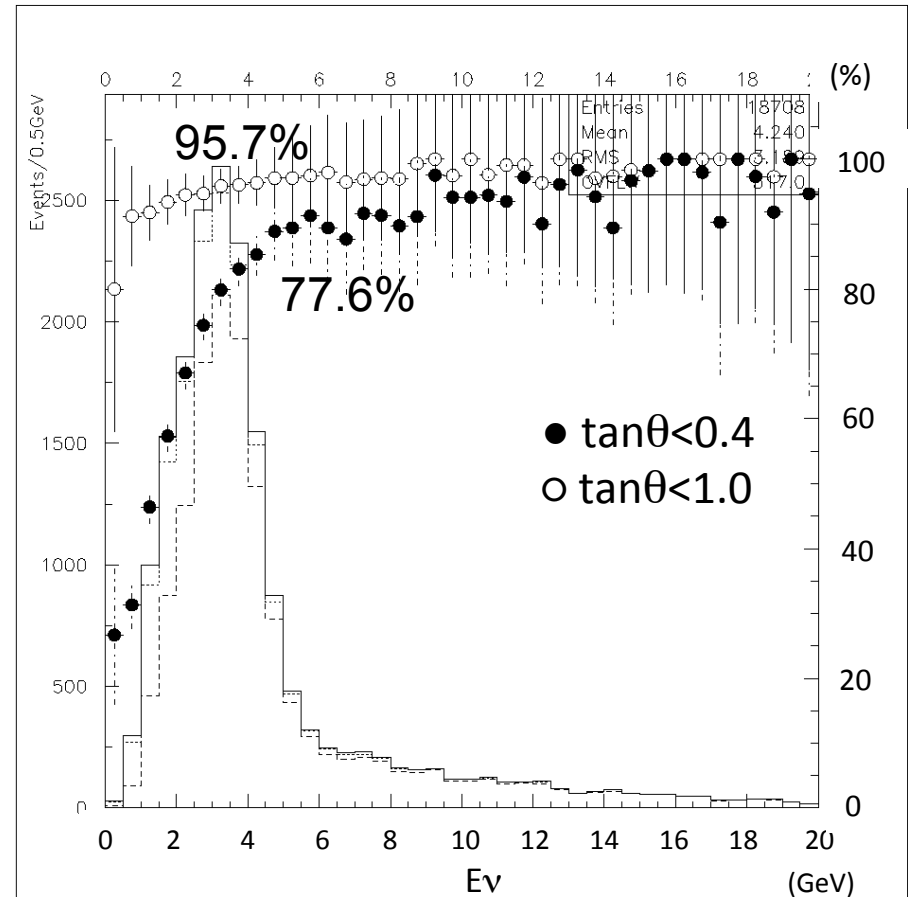
通常のOPERAのlocationでは
S-UTS 4h/1枚 ($100\text{cm}^2, \tan\theta < 0.6$)
でデータ取得



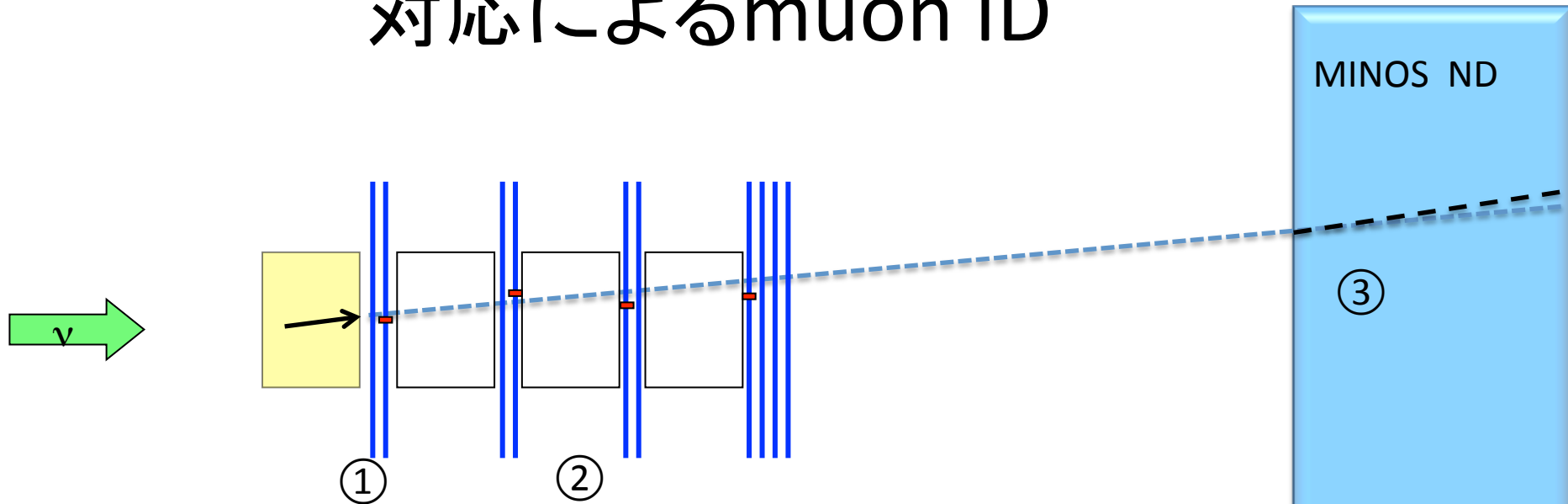
ノンバイアスなニュートリノ反応検
出のためのハイスピード全面積ス
キャン (HTSによる100倍のスピード)

低エネルギーの反応を $\sim 95\%$ で検
出するための $\tan\theta < 1.0$ でのデータ
取得

Location efficiency as a function of ν energy



ECC中の飛跡とSFT、MINOS NDとの 対応によるmuon ID



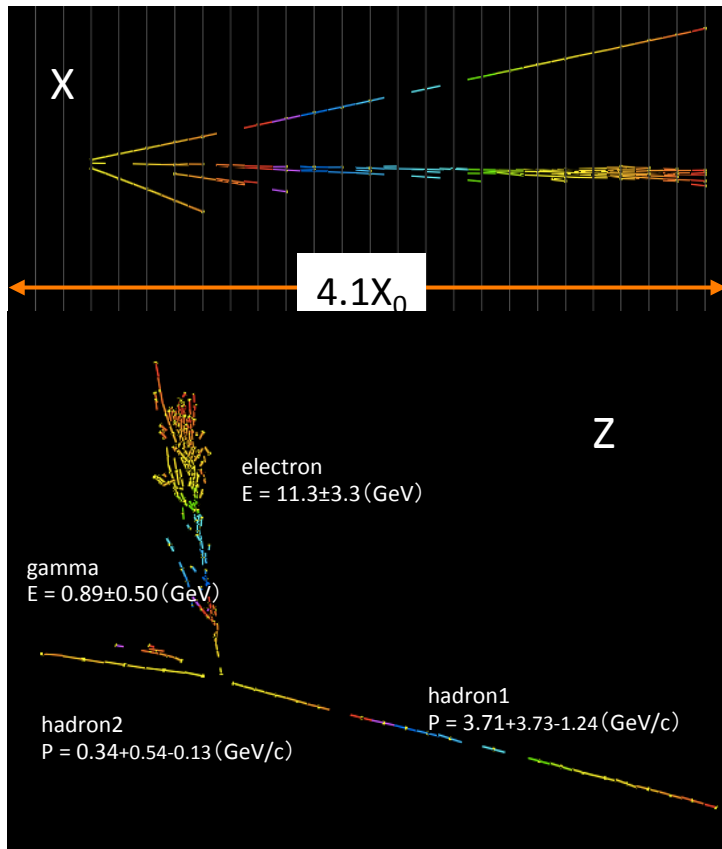
- ① ECC中で検出された飛跡をSFTに外挿する
- ② ECCの飛跡と一致するヒットを探索して、その飛跡の時間情報を付加する
- ③ 更にMINOSのNDに外挿し、時間・位置・角度に一致が見られるmuonの飛跡かどうかを識別する

このようなセットアップの時のmuon ID efficiencyをデータで検証すると共に、J-PARCに設置した場合のmuon IDの手法の提案を行う。

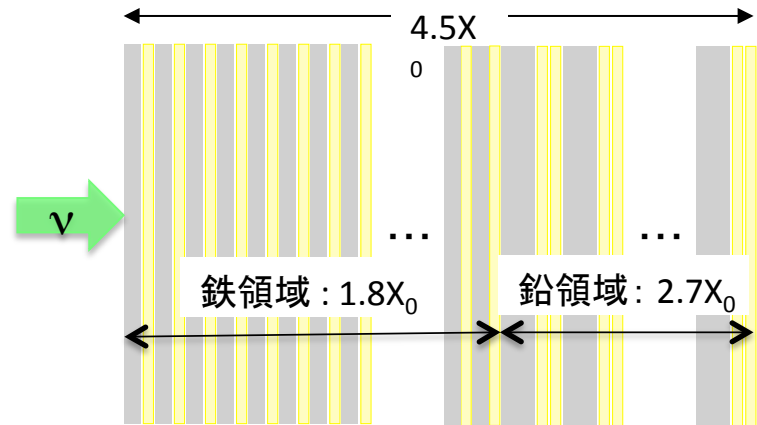
electron ID

- OPERA ($10X_0$ / 1ECC, $\langle E_\nu \rangle = 17\text{GeV}$)

電磁シャワーの発達により電子同定



- PEANUT ($4.5X_0$ / 1ECC, $E_{\nu \text{ peak}} = 3\text{GeV}$)

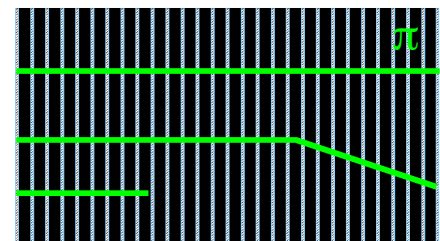
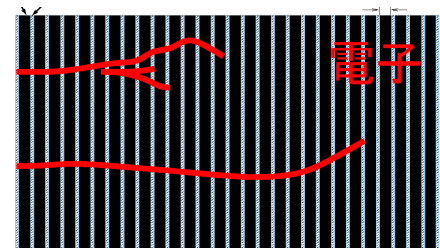


電子 : $E = E_0 \exp(-x/X_0)$

π : $E = E_0 \sim P_0$

の違いによる電子同定

同定効率とエネルギー分解能については、電子ビームによるテスト実験で検証する



まとめ

J-PARCでの原子核乾板を用いたニュートリノ実験の立案のためにPEANUT(Fermi labのNuMIニュートリノビームを照射した)実験のECCの解析を行う。

- 低エネルギー ν 反応、 ν_e 反応を高効率で検出するために、原子核乾板のデータのためのノンバイアスなニュートリノ反応を検出する手法を開発する
- J-PARCでのニュートリノ実験にむけた検出器の考案を行う
 - ν_e 反応の検出・電子同定に最適化したECC構造の検討
(検出効率、電子同定、エネルギー分解能の推定)
 - muon IDのための電子検出器の検討
(ECCとSFT、MINOS NDとのcoincidenceによるmuonの同定効率の検証)

back up

エマルシオントラックとSFTの対応

Offset = SFTの位置精度

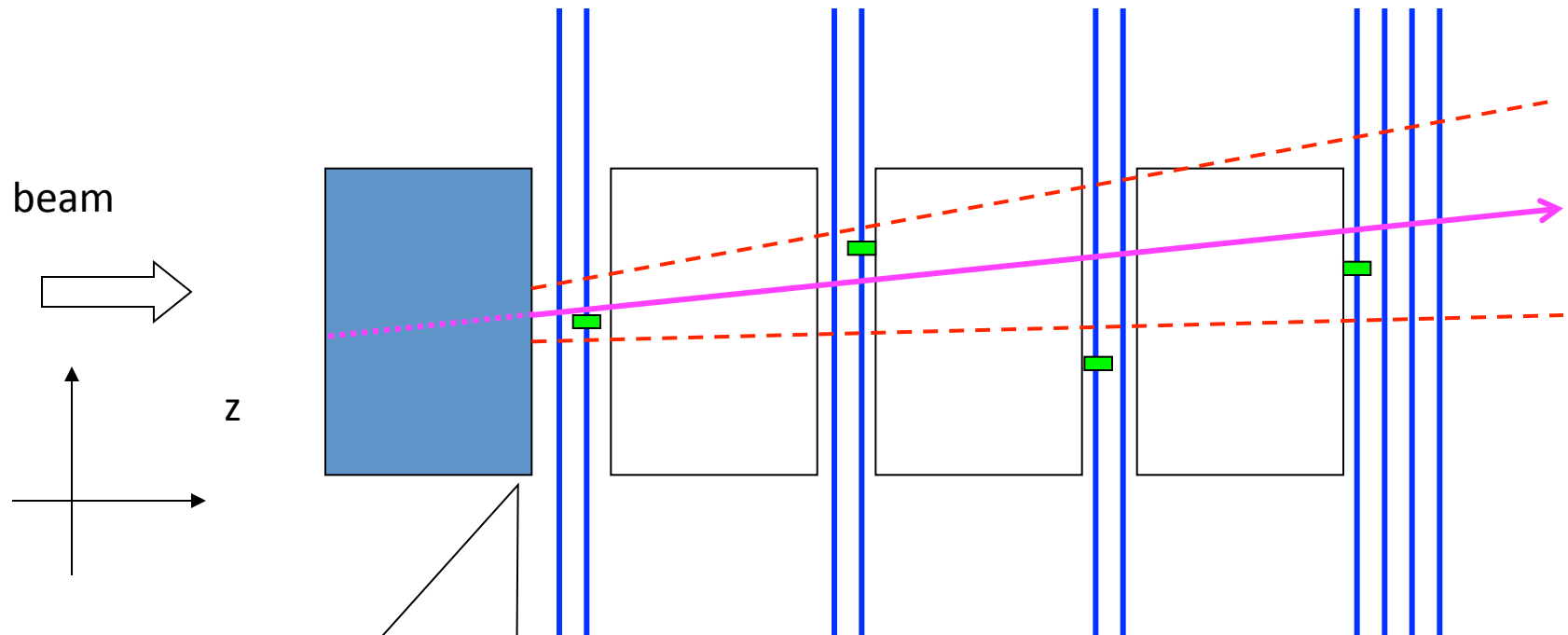
Meserr = エマルシオントラックの角度測定精度

位置ズレ許容値 = $\text{Offset} + \text{Meserr} \times z + (\text{散乱エラー})$

BaseTrack角度精度

rms : $\sim 3\text{mrad}$

今回の設定: $(\text{offset}, \text{meserr}) = (0.5, 0.005), (1.0, 0.010)$



エマルシオントラック
(最下流プレートでの位置、角度)

X-10layer, Y-10layer, U-2layer

ECCで測定可能な物理量

- 反応点直後(0.5mm,0.25mm)の荷電粒子飛跡の測定
 - 約75%の荷電粒子の飛跡を解析可能
 - 2mrad, μm 精度の測定(MINOSは4cmセグメントのシンチ)
- 運動量測定
 - 多重散乱を用いた運動量($p\beta$)測定 ($dP/P \sim 20\%$)
 - Visible energy の測定
- Particle ID
 - muon ID
 - MINOS near detector を muon spectrometer として利用
 - electron ID
 - $E = E_0 \exp(-x/X_0)$ と $E = E_0 - dE/dX$ の違いによる電子同定
 - Low Energy beam でも約90%のIDが可能
 - proton ID
 - dE/dX の測定と多重散乱からの $p\beta$ 測定
 - 60%程度のproton をID可能

粒子同定

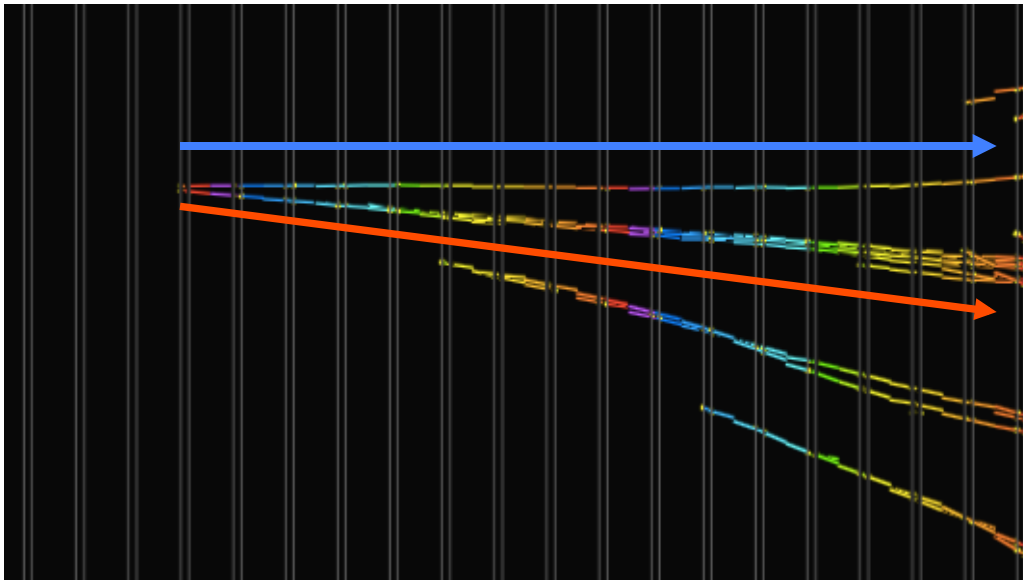
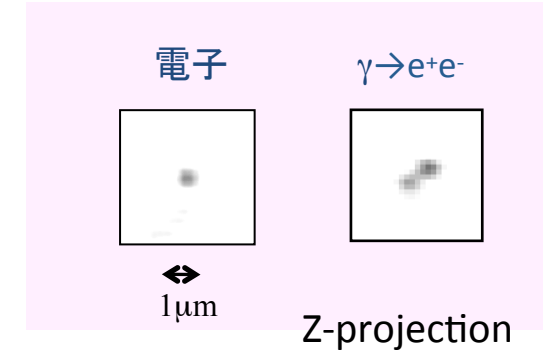
① $\gamma \rightarrow e^+e^-$ の識別

飛跡の発生点を目視確認により、反応点近傍の電子対を除去

② 電子／ハドロンの識別

候補となる飛跡を1枚1枚下流へ追い下げる

- ・ 候補飛跡の近傍で(半径 $50\mu\text{m}$ 以内)の飛跡本数の変化
- ・ 多重散乱による角度の変化量



物質中での電離損失

電子: $E(x) = E_0 \exp(-x/X_0)$

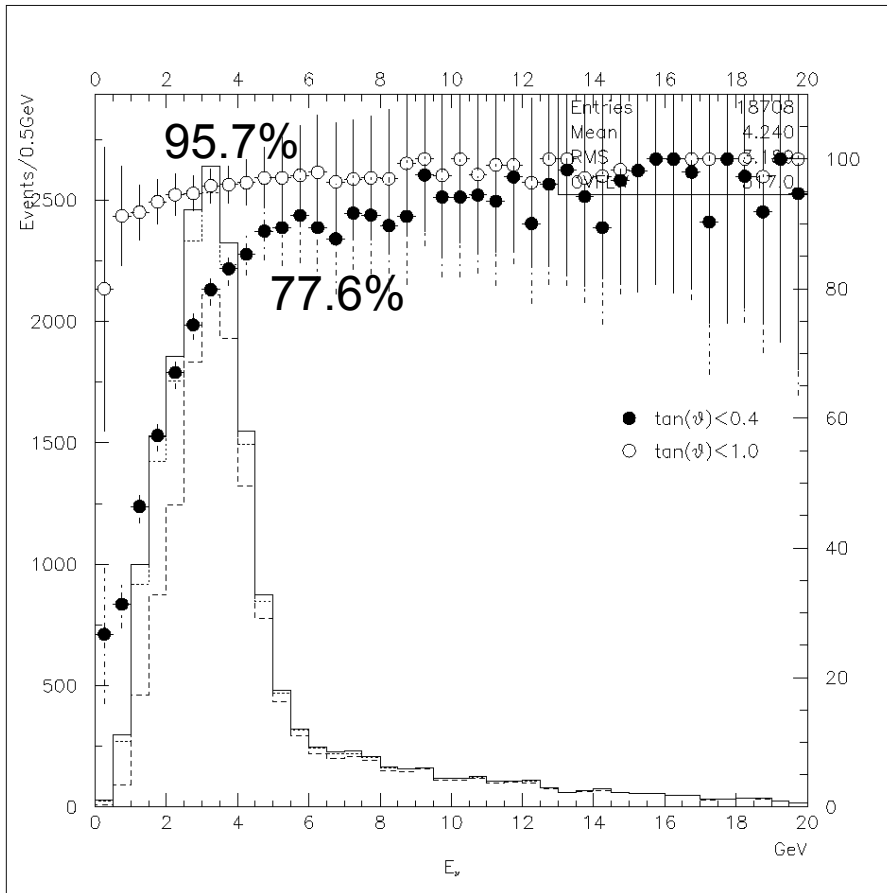
ハドロン: $E(x) = E_0 \sim P_0$

多重散乱による物質中での角度変化

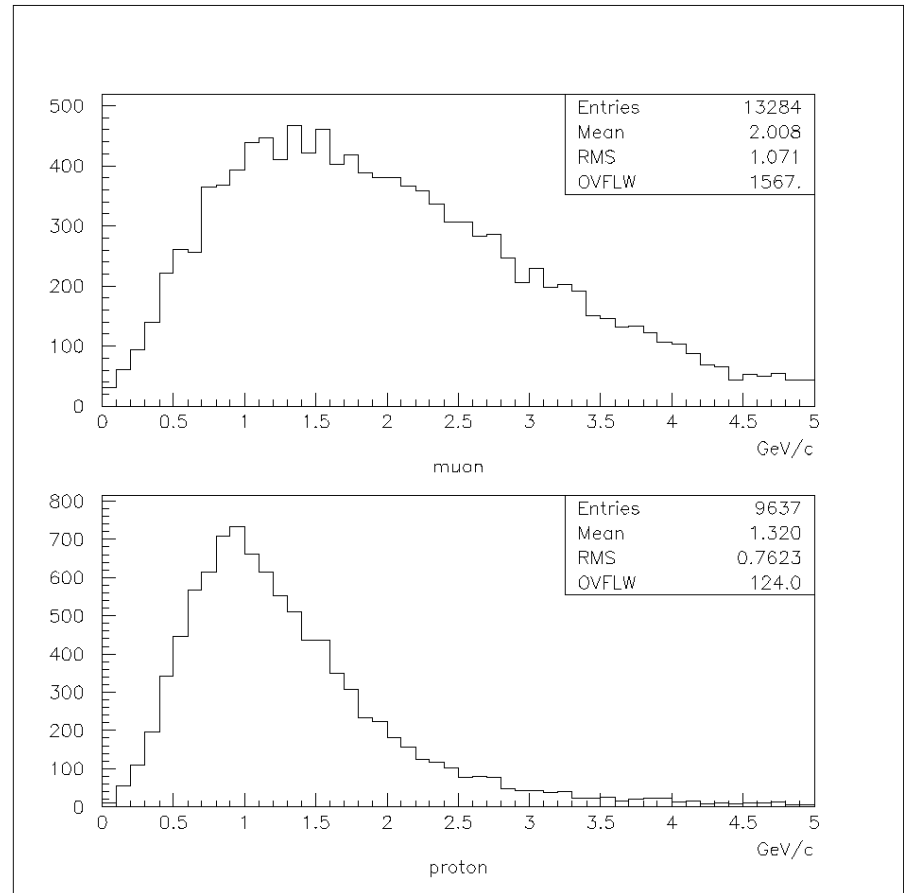
$$\delta\theta = \frac{13.6 \text{ MeV}}{P} \sqrt{\frac{x}{X_0}}$$

NuMI Low Energy interaction

Location efficiency as a function of neutrino energy



Momentum distribution for muon and proton @ LE



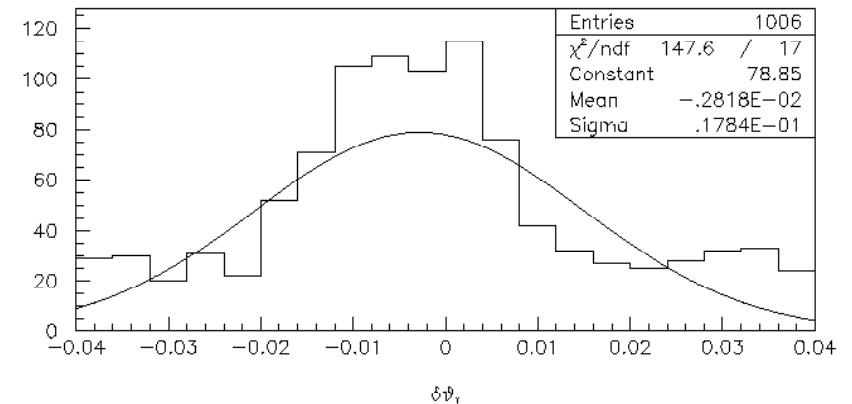
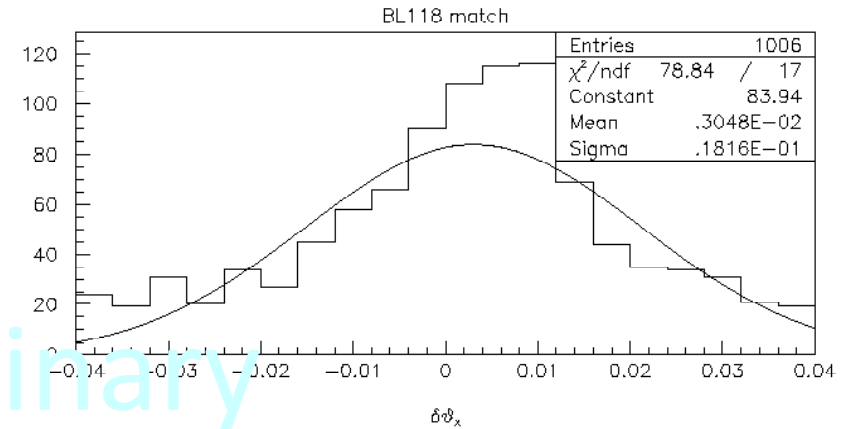
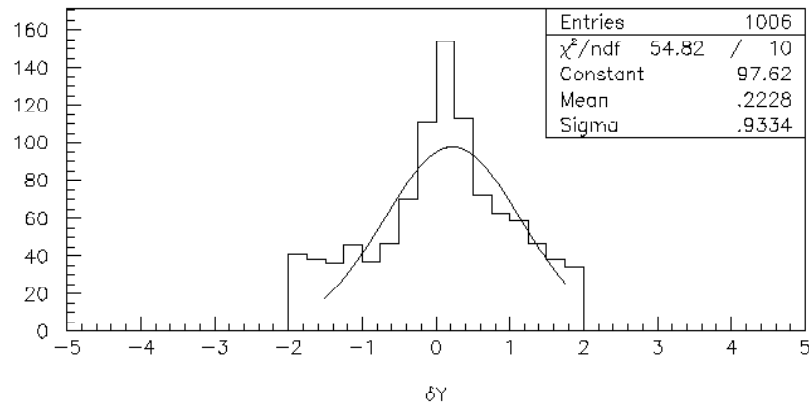
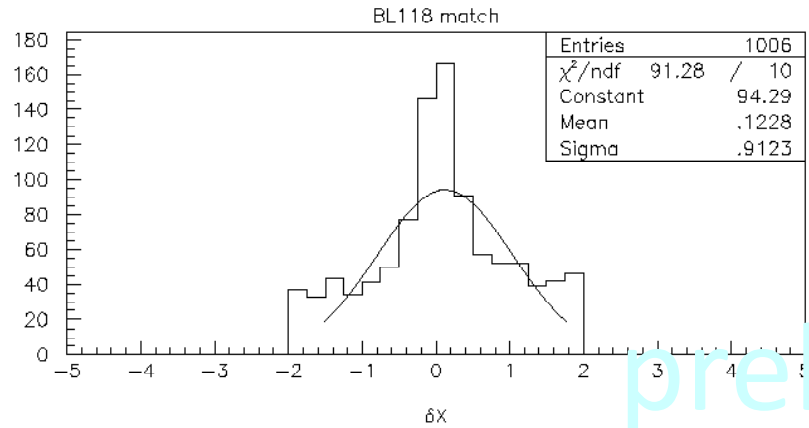
ECCでの物理量測定

運動量測定 (多重散乱による $p\beta$ の測定 $dp/p \sim 20\%$)

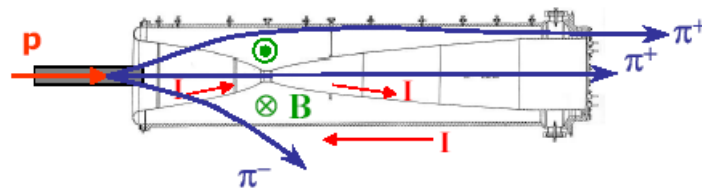
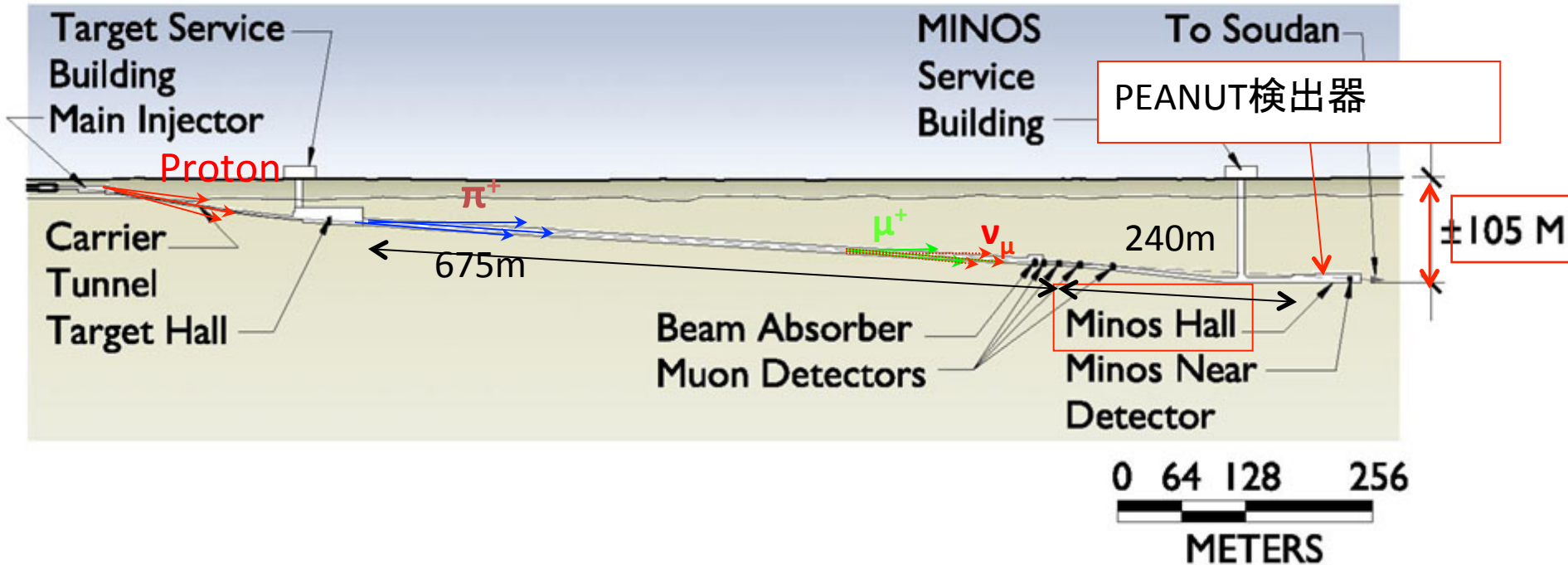
Electron ID ($E = E_0 \exp(-x/X_0)$ と $E = E_0 - dE/dX$ の違いによる電子同定)

Low energy proton ID (dE/dX 測定と多重散乱による $p\beta$ 測定から)

ECC(BL118)トラックとSFTトラックの 位置、角度ズレ



ニュートリノビーム



標的: グラファイト(カーボン)

Horn Magnet

PEANUT検出器の配置

