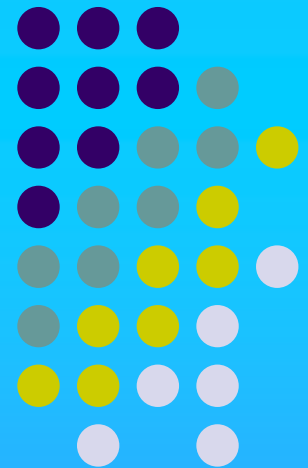




原子核乾板における 新しい自動飛跡認識技術

Development of new automatic tracking technique
in nuclear emulsion

福田 努（東邦大学）



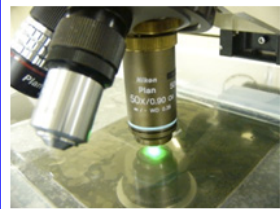
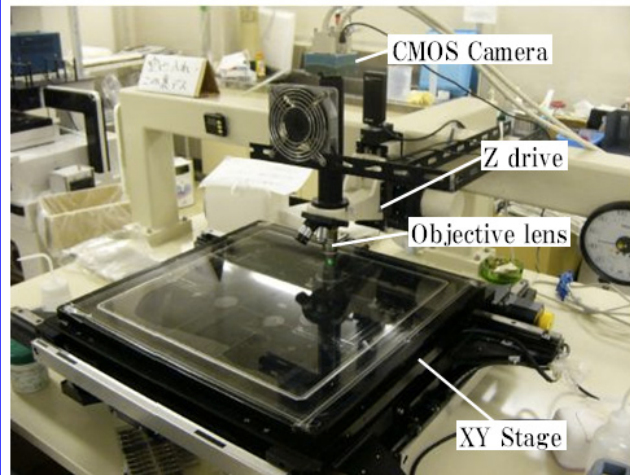
イントロダクション



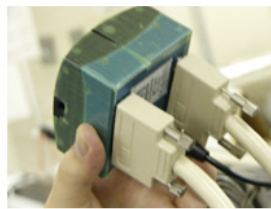
- 近代の原子核乾板の利用は自動飛跡読み取り装置TS (Track Selector) の開発とともに進展してきた。
- これまでのTSは主に”高速化”に重点を置いて技術開発が進められてきた。
- 本研究では従来とは質的に異なる開発指針、TSの”大角度化”と”高精度化”を進めた。

● Fine Track Selector (FTS)

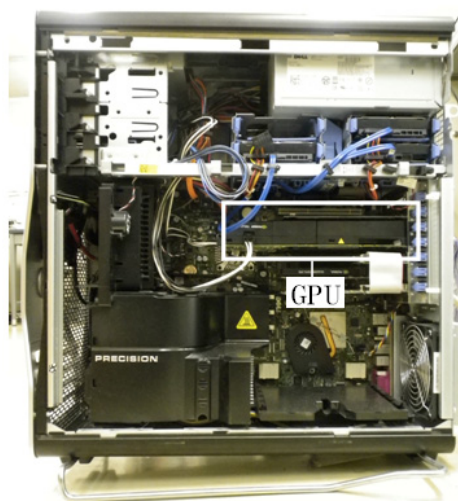
● system overview



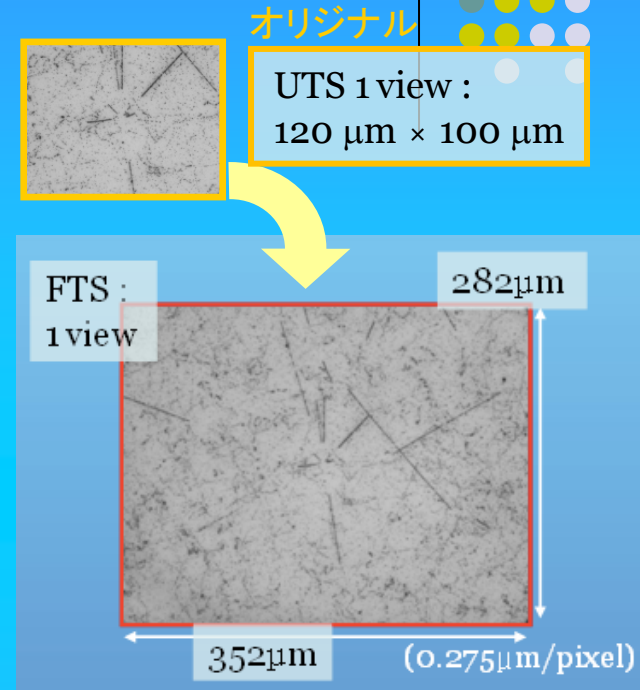
Objective lens
Nikon CFI Plan x50
oil immersion lens



CMOS Camera
Mikrotron
Eosens MC 1362



Graphics Processing Unit (GPU)
NVIDIA Tesla C2050



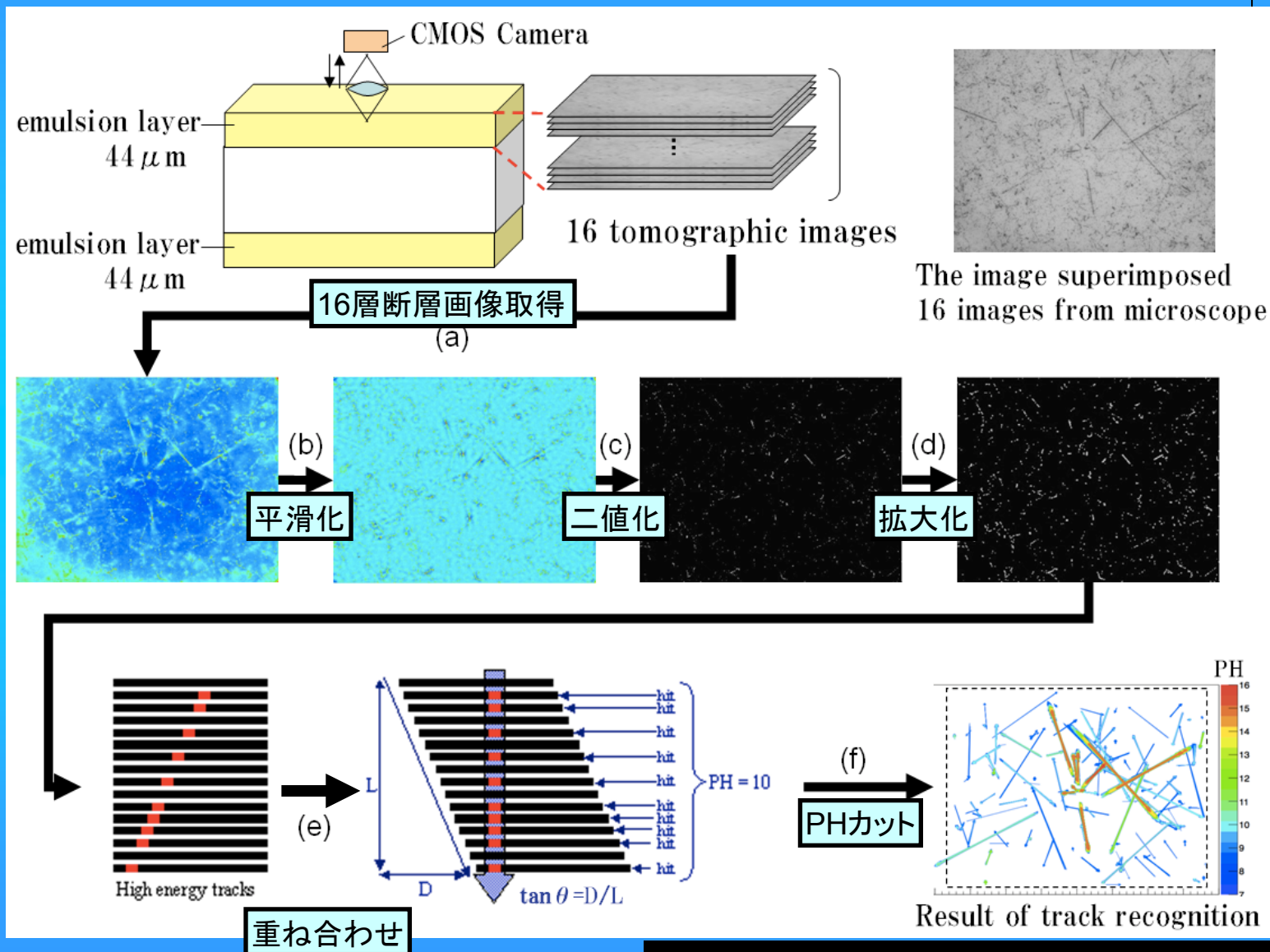
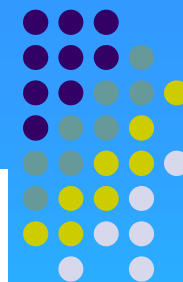
Large view size

→ enough size for large angle track within one view.

Tracking at GPU

→ good flexibility to improve tracking algorithm.

● 原子核乾板における自動飛跡認識

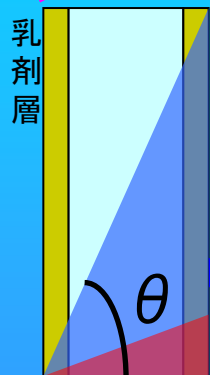
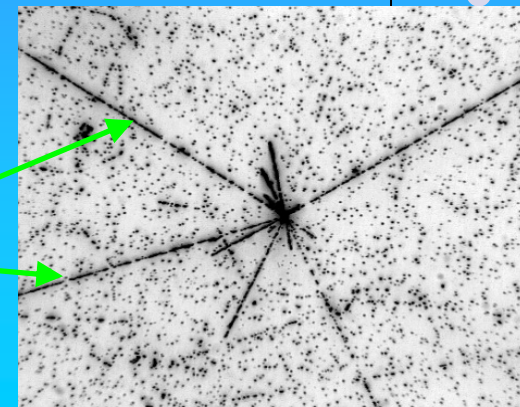
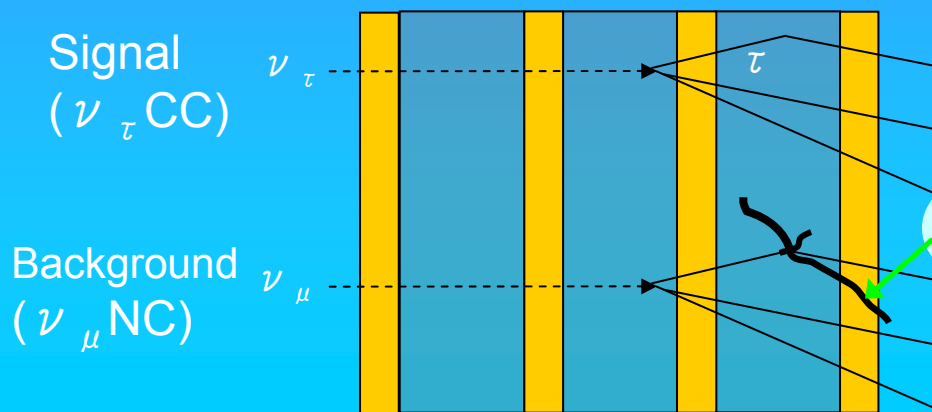


乳剤層を貫く直線飛跡を検出する。

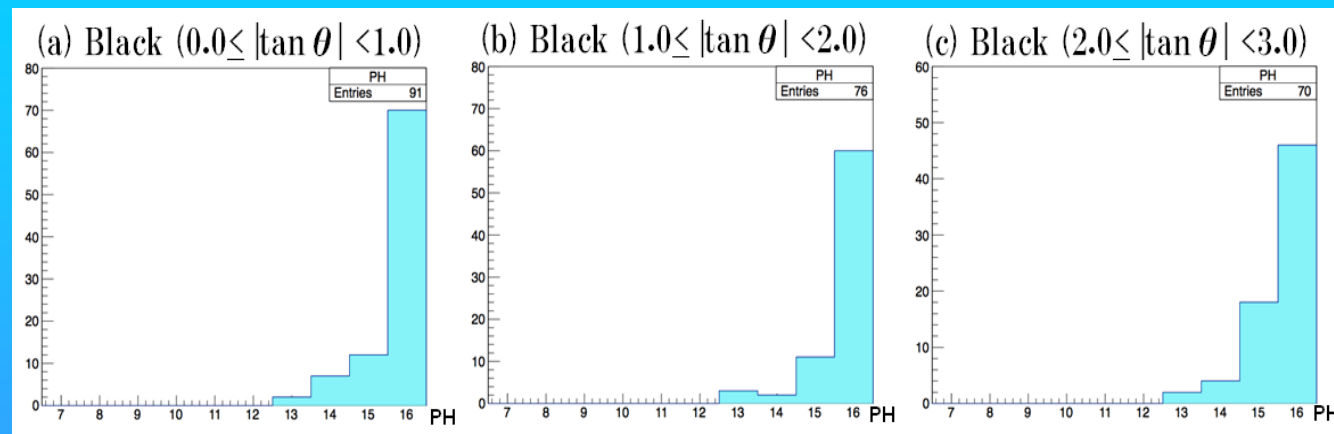
● 大角度飛跡認識

大角度化

- OPERA実験における ν_τ 反応とBG事象の識別



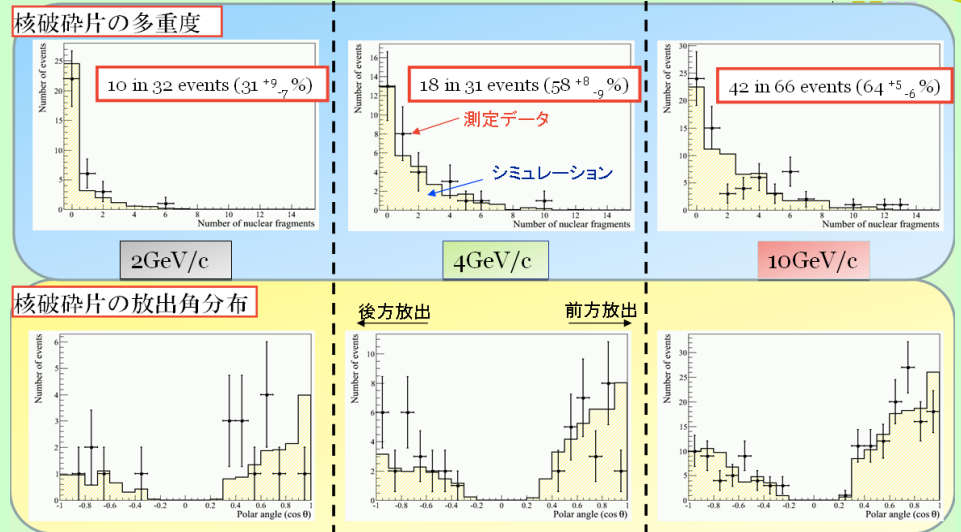
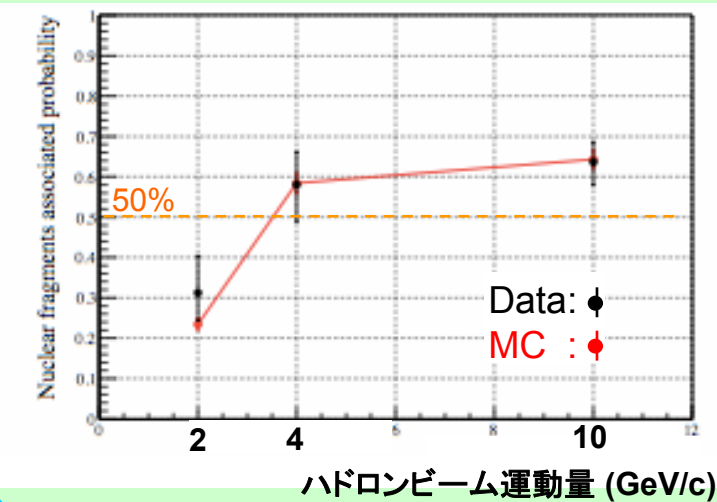
従来の角度測定範囲
($|\tan \theta| \leq 0.6$)



eff = 99.8% @ 90% C.L (PH ≥ 13 ; $2.0 \leq |\tan \theta| < 3.0$)

● FTSを用いて得られた結果

OPERA ECC での ハドロン反応における核破碎片付随率



OPERAで検出したタウニュートリノ反応候補に適用し、
ハドロンバックグラウンドを30%低減した。

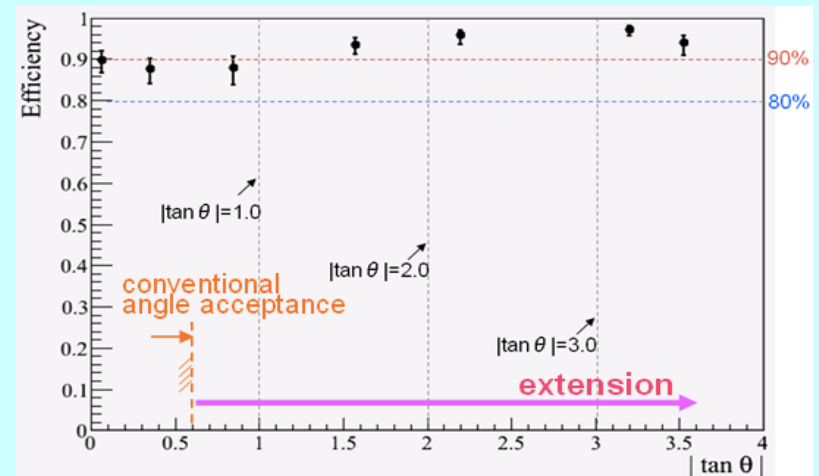
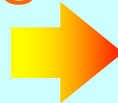
大角度 最小電離粒子飛跡 の自動認識

解析を進める中で、検出効率が高いことに気付いた。
(ここまでの大角度はこれまで検討されてこなかった)



Conventional emulsion gel
(G.D. = 34/100 μ m)

テスト実験
@ CERN



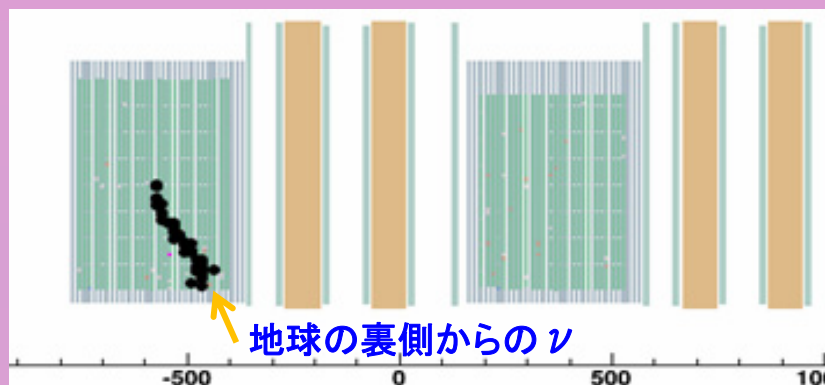
高い検出効率で自動認識できることを実証した。

大角度飛跡解析の展望

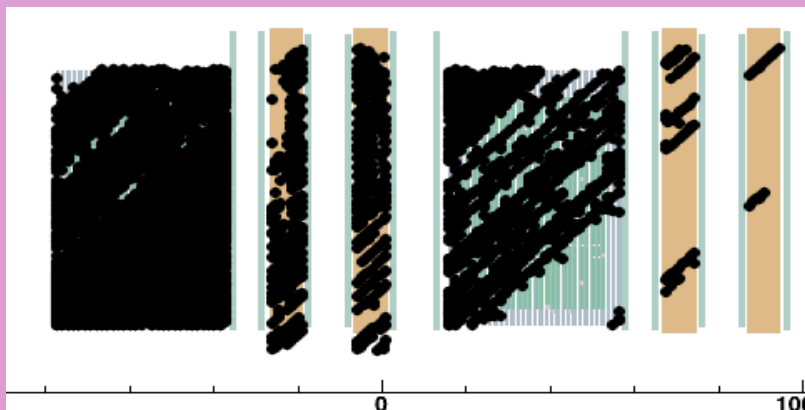
大角度化

OPERA検出器による宇宙線の解析

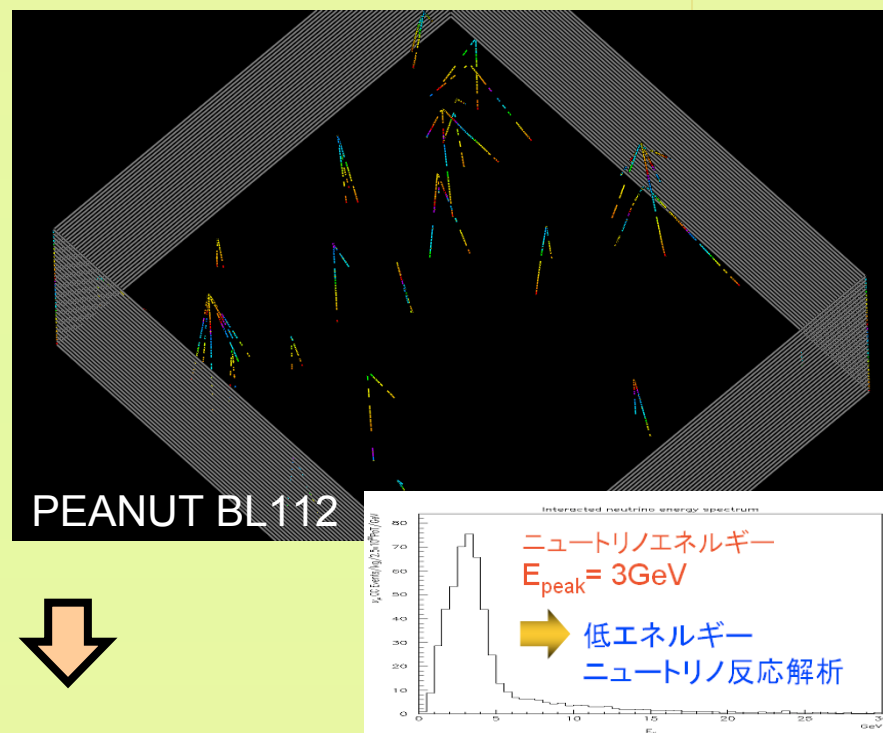
① 大気ニュートリノ振動による ν_τ 出現事象の探索



② 高エネルギー宇宙線事象の詳細解析



低エネルギーニュートリノ反応の研究



PEANUT解析及び将来実験において、

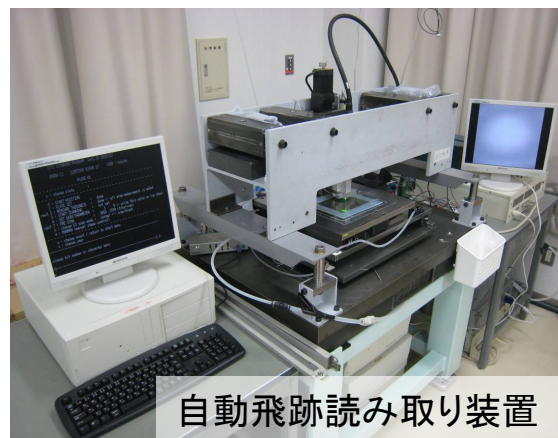
低エネルギーニュートリノ反応の検出効率、
低エネルギー電子飛跡の検出効率・
エネルギー測定精度
の向上が期待できる。

● 近代の原子核乾板の解析

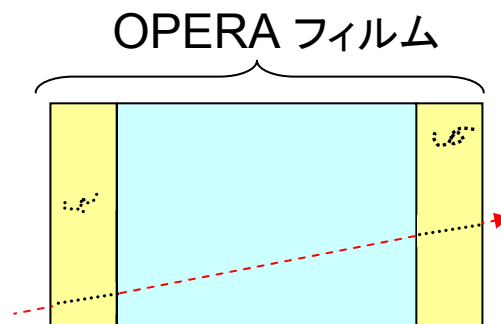
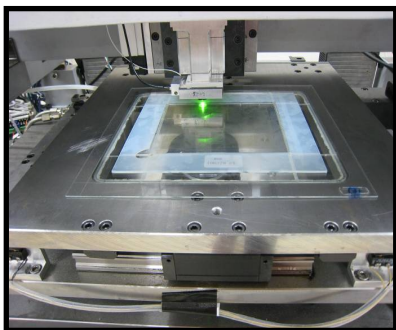
高精度化

- ① 自動飛跡読み取り装置を用いてフィルムをスキャン
スキャンは高速だが、ノイズも読み取ってしまう。
- ② 肉眼観察を行い、最終判定(シグナル/ノイズ分別)を行う。

最小電離粒子(フィルムを貫く直線飛跡)の認識手順

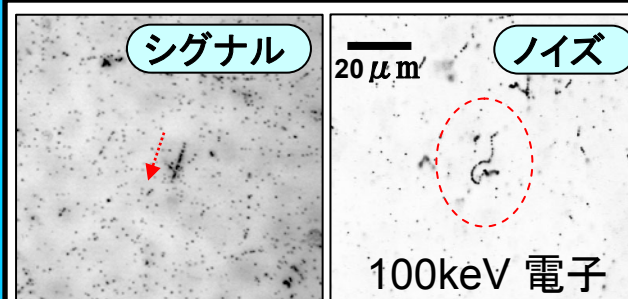
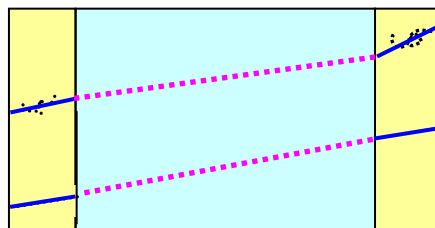


自動飛跡読み取り装置



直線に並ぶ銀粒子の列を読み取る。

直線でなくとも、直線状の成分があれば読み取ってしまう。



シグナル

20 μm

ノイズ

100keV 電子

肉眼観察



膨大な肉眼観察がボトルネック→これを低減して、解析を高速化する。

● 飛跡選別の高精度化 (@ OPERA)

飛跡クオリティを、濃さ情報と直線性の確率密度関数に基づいた尤度比により数値化
 → 肉眼観察量の低減 (Track Ranking 法: T.Fukuda et al., 2010 JINST 5 P04009)

シグナルらしさ

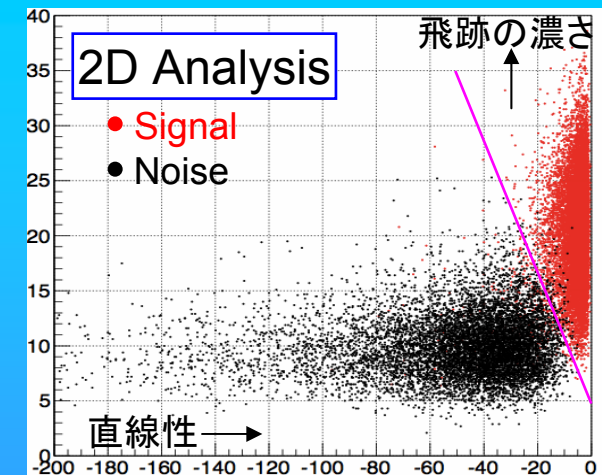
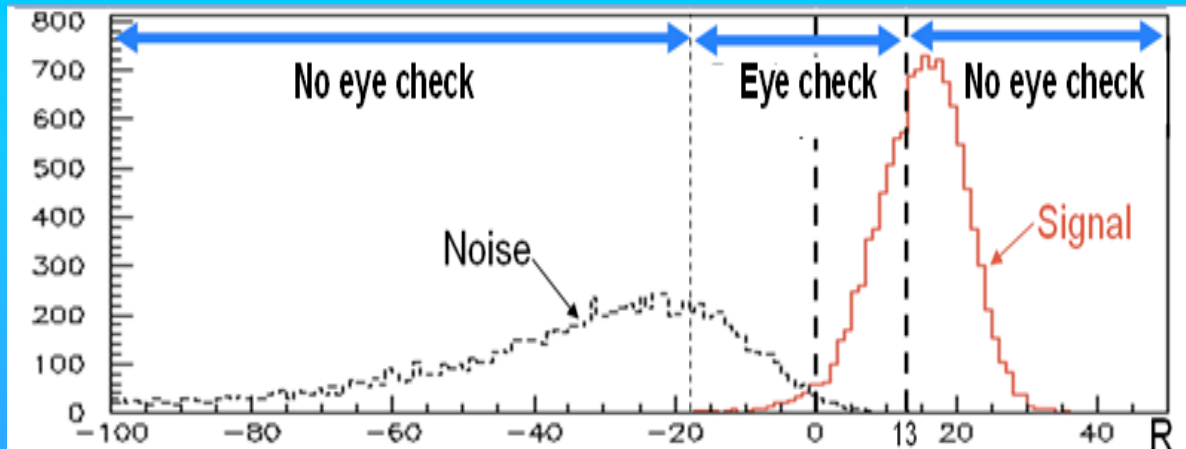
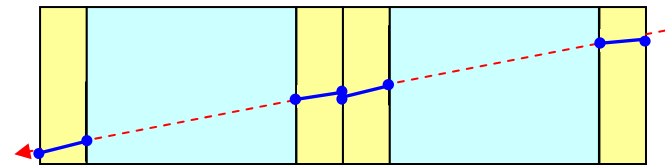
$$L^{signal} = \prod_{i=1}^4 P_{VPH_i}^{signal}(\theta) * \prod_{i=1}^8 P_{dAmicro_i}^{signal}(\theta, ph) * \prod_{i=1}^2 P_{dAbase_i}^{signal}(\theta) * \prod_{i=1}^2 P_{dXbase_i}^{signal}(\theta)$$

ノイズらしさ

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

最小電離粒子らしさ

$$Track\ Ranking\ Score\ (R) = \log \frac{L^{signal}}{L^{noise}}$$



選別パラメータを使い切っているため、さらなる高精度化へ向けて
 飛跡認識アルゴリズムを改良し、新たな選別情報を抽出する必要がある。

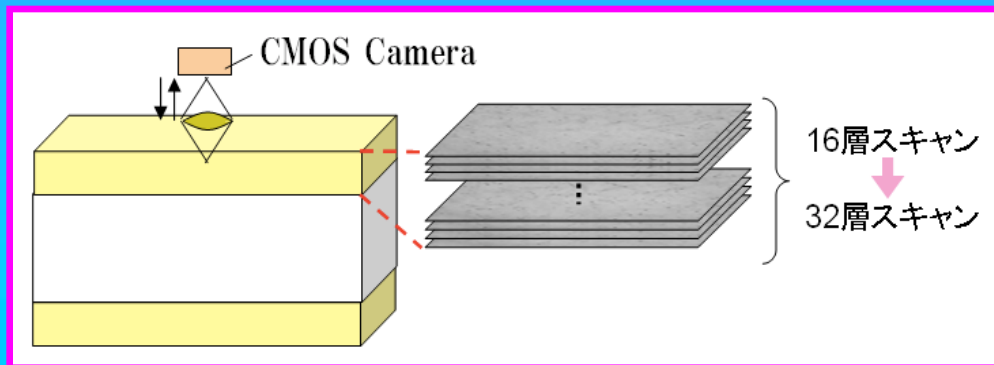
Tracking in FTS

高精度化

高精度化のコンセプト

1. 肉眼観察レベルに画像情報量を増やす。
2. 肉眼観察で行っている選別方法を反映させる。

1. 画像情報量を増やす。

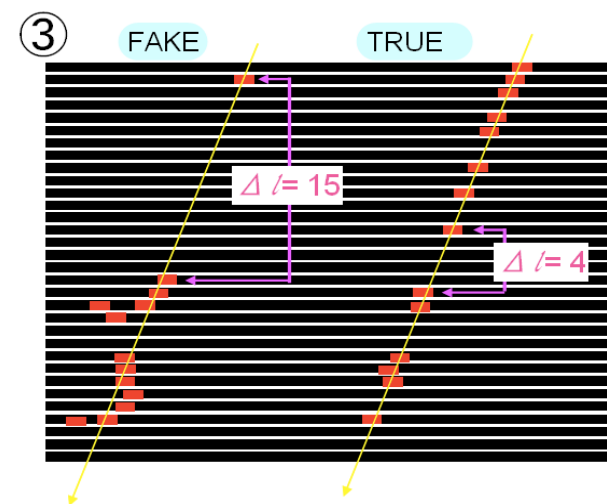
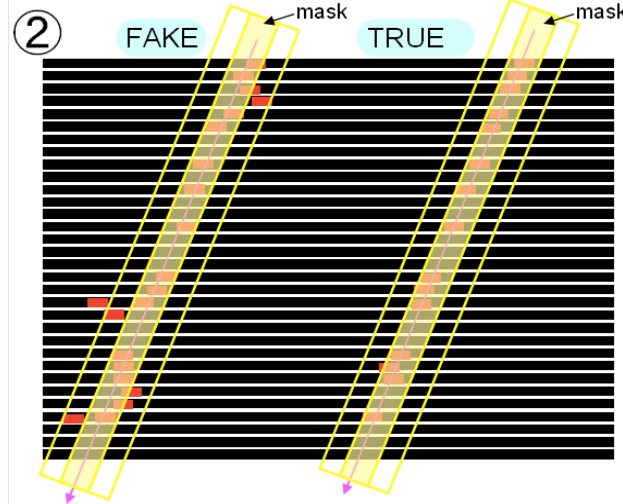
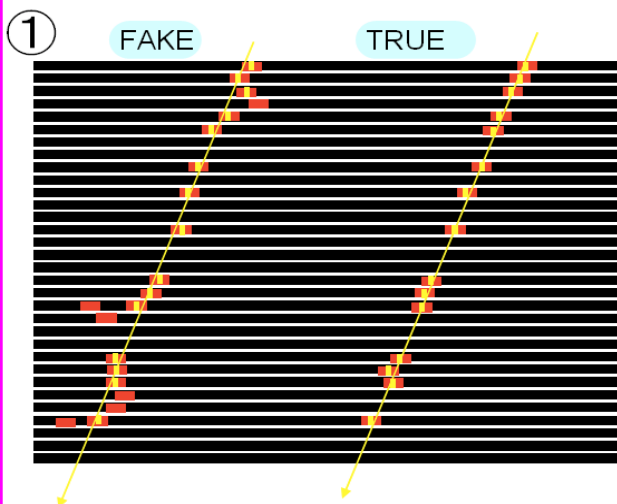


2. 新しい選別パラメータの抽出。

銀粒子の直線性

飛跡の周囲の銀粒子数

銀粒子間距離の最大層数

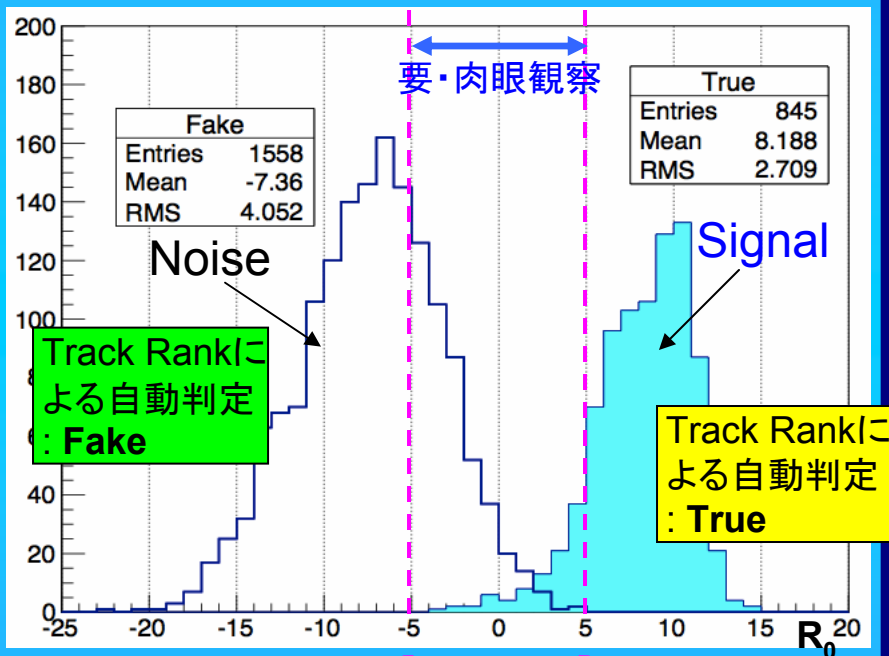


● 32層スキャン

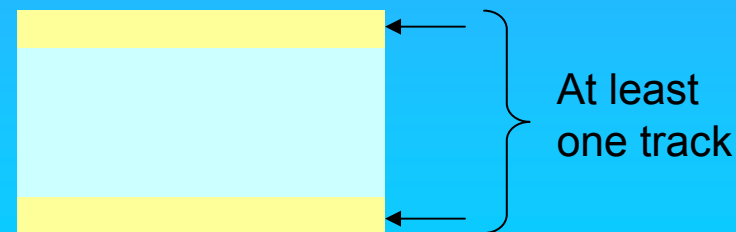
高精度化

飛跡認識に使用する断層映像層数を従来の16層から32層に増やし、FTSで再測定。
両面の乳剤層のうち、いずれか一方でも飛跡が再認識されていることを要求する。

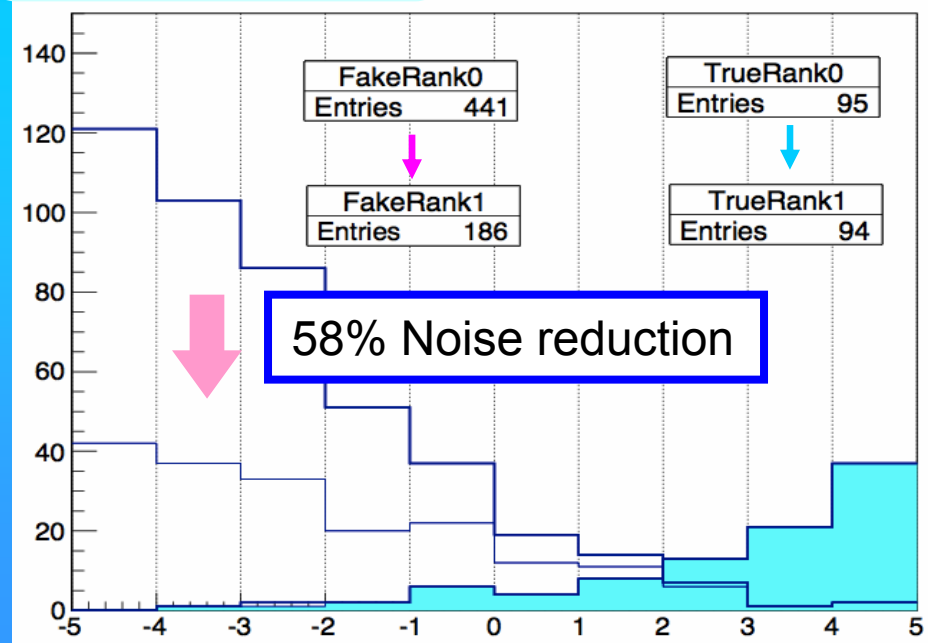
評価サンプル



評価サンプル:
シグナル → 95本
ノイズ → 441本



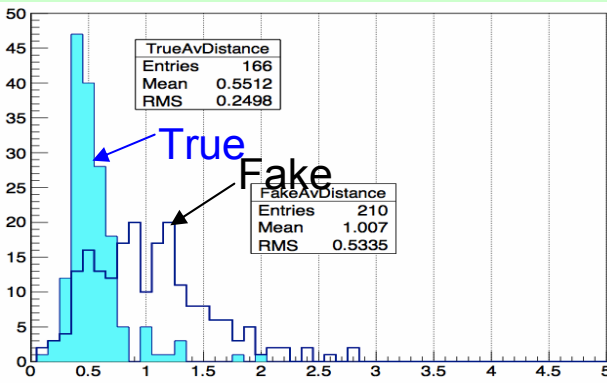
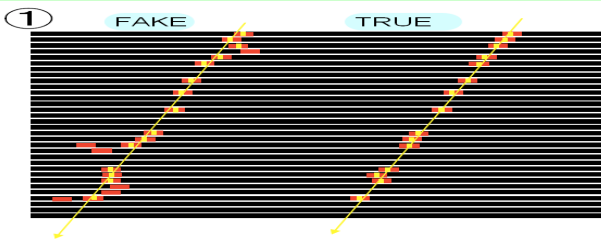
Noise reduction rate



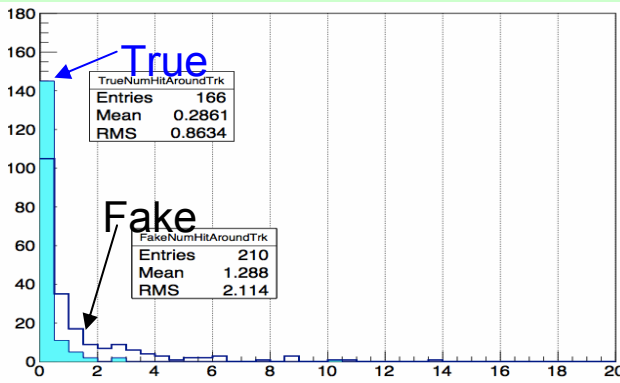
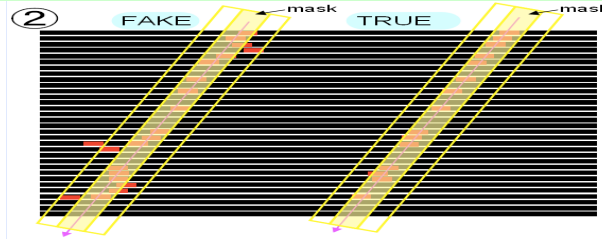
● 新たな選別パラメータ

高精度化

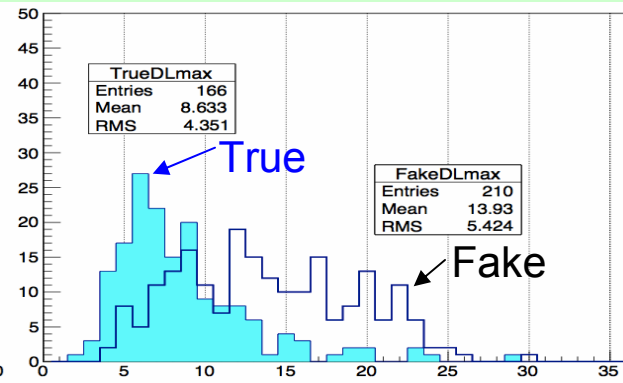
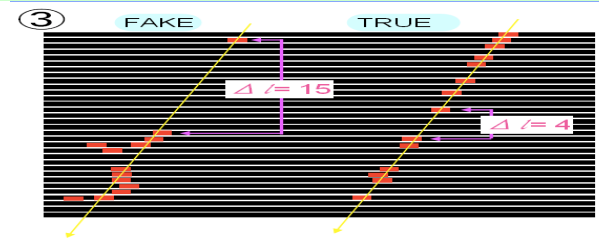
飛跡を構成する銀粒子の直線性



飛跡の周りの銀粒子数



銀粒子間距離の最大層数

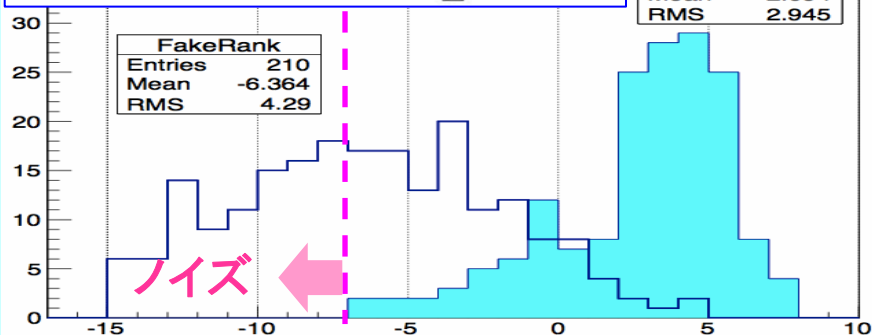


新パラメータも Track Ranking に含める。

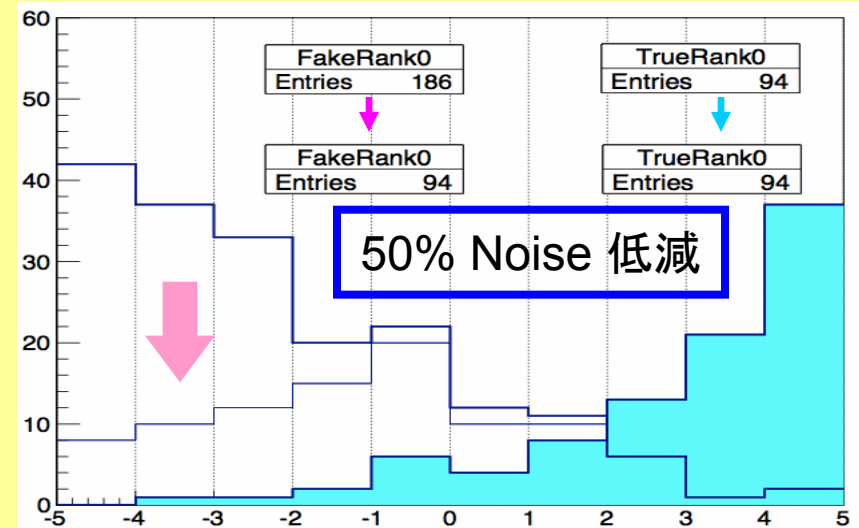
$$L_{\text{signal}} = P_{[1]}^{\text{signal}} \times P_{[2]}^{\text{signal}} \times P_{[3]}^{\text{signal}}$$

$$L_{\text{noise}} = P_{[1]}^{\text{noise}} \times P_{[2]}^{\text{noise}} \times P_{[3]}^{\text{noise}}$$

$$\text{New TRank score} = \log \frac{L_{\text{signal}}}{L_{\text{noise}}} + R_0$$

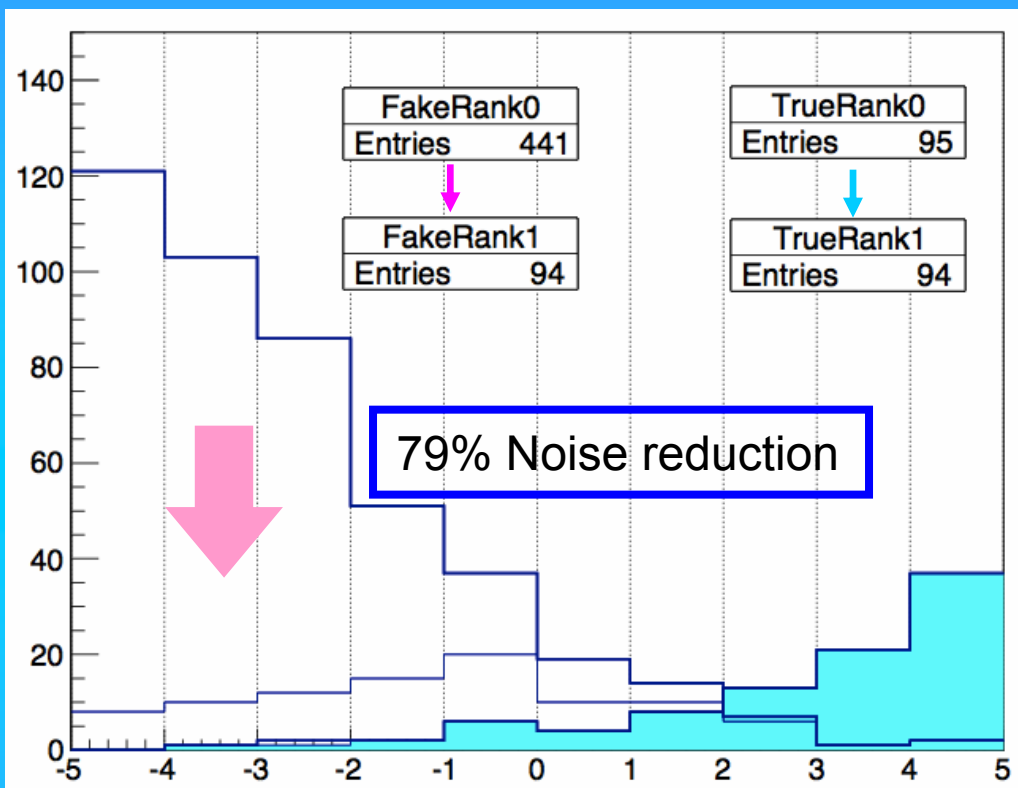


ノイズ飛跡を含むTrackを除く



● FTSによるS/N選別

高精度化



従来の選別方法で識別が困難だった
シグナル飛跡 95本、
ノイズ飛跡 441本 に対して
FTSによる再選別を行った。

OPERAフィルム1枚に対して、
シグナル飛跡 再認識率 → 99%
ノイズ飛跡 再認識率 → 21%

OPERAフィルム2枚に対して、
シグナル飛跡 再認識率 → 98%
ノイズ飛跡 再認識率 → 5%

	FTS: 32 layer scan	FTS: new prm	for OPERA film	for OPERA film doublet
Signal	95 → 94	94 → 94	$94/95=0.99$	0.98
Noise	441 → 186	186 → 94	$94/441=0.21$	0.05



● 高精度飛跡認識の展望

パラメータをチューニングして
OPERAフィルムに最適化

➡ OPERA、PEANUT解析に適用し、解析を高速化

HTS→FTSの流れを確立

新乳剤に対するチューニング

➡ 次期低エネルギーニュートリノ研究の解析に適用

高精度飛跡認識アルゴリズムのさらなる改良

- ➡
- Grain by grain の認識による高精度化
 - Sub-MeV～MeVの低エネルギー電子の自動認識

● まとめ



- 原子核乾板実験の解析において自動飛跡認識の「高速化」と相補的な役割を担う、「大角度化」及び「高精度化」について開発研究を行った。
- 新たにFTSを開発し、これまでの約6倍に渡る角度測定範囲において核破碎片や最小電離粒子を高い効率で自動飛跡認識できることを明らかにした。
- FTSの大角度飛跡測定技術を用いて、OPERA実験におけるタウニュートリノ反応のハドロンバックグラウンドを30%低減した。また、OPERA検出器での大気ニュートリノ振動による ν_τ 出現探索や宇宙線解析等といった新たな研究テーマも生まれてきた。
- 従来の2倍の画像情報、銀粒子の直線性・飛跡の周囲の銀粒子数・銀粒子間距離を用いた新たな飛跡選別アルゴリズムを考案し、シグナル飛跡再認識率98%の元で、ノイズ飛跡の95%を低減させることに成功。
- 肉眼観察の自動化を追究することでOPERA実験・PEANUT実験・将来のニュートリノ実験での解析速度が大きく向上すると考えられる。
- 原子核乾板自動飛跡認識の「大角度化」・「高精度化」は汎用的な解析技術で、ニュートリノ研究のみならず、様々な将来計画にも波及すると考えられる。

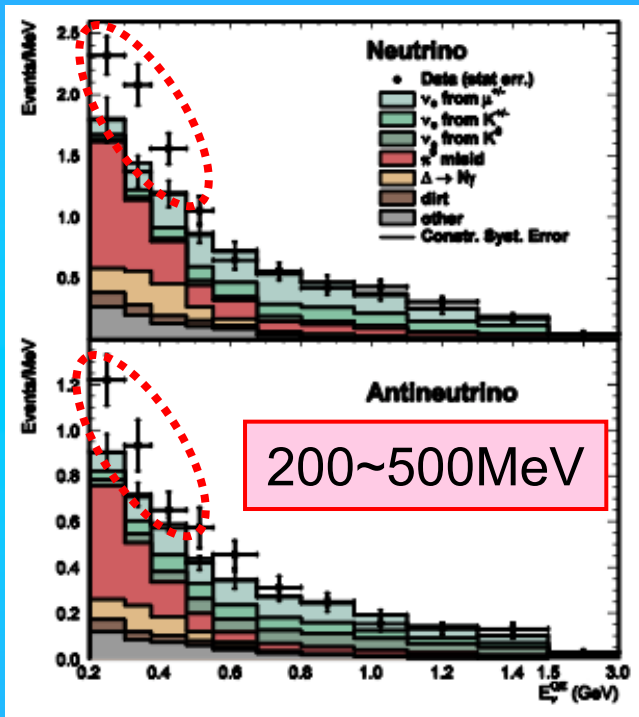


ばっくあっぷ やで。

● 低エネルギーニュートリノ反応の研究



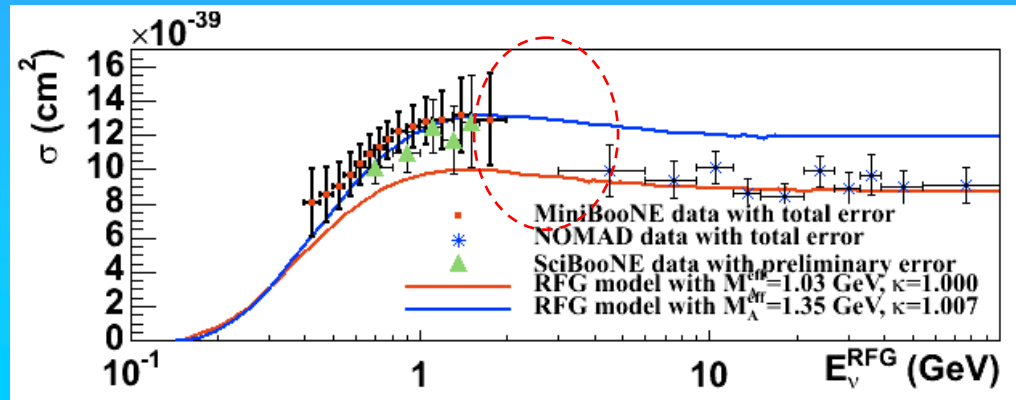
● Sub-GeV~数GeVのニュートリノ研究



MiniBooNE実験のexcess



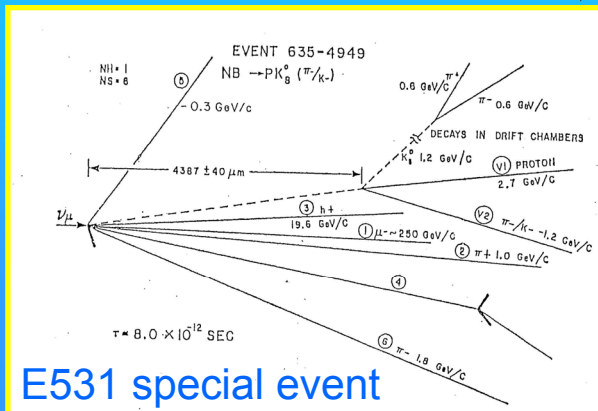
第4世代目？
ダークマター？



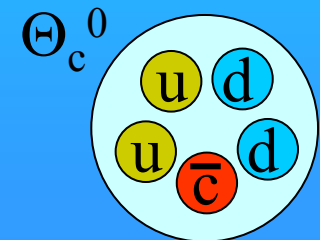
ニュートリノ反応断面積データの不一致

Charm Penta quark ?

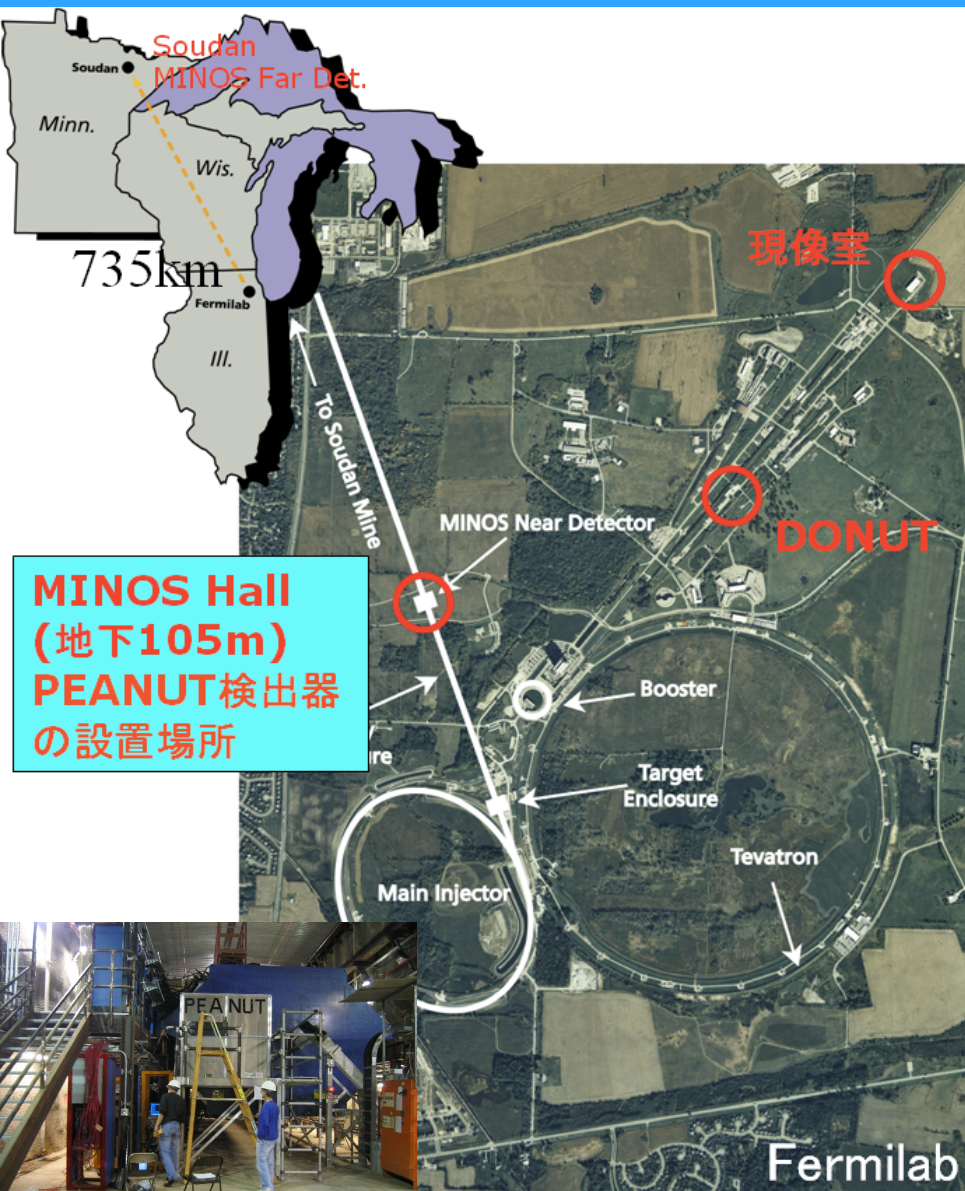
Λ_c のProduction threshold energy でテスト



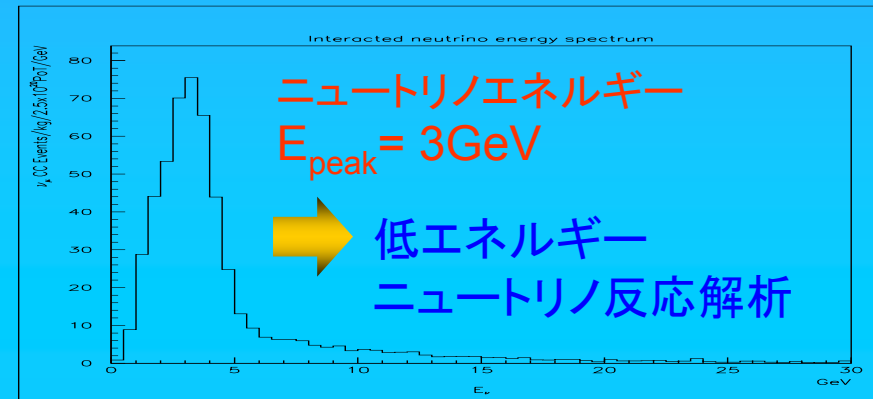
E531 special event



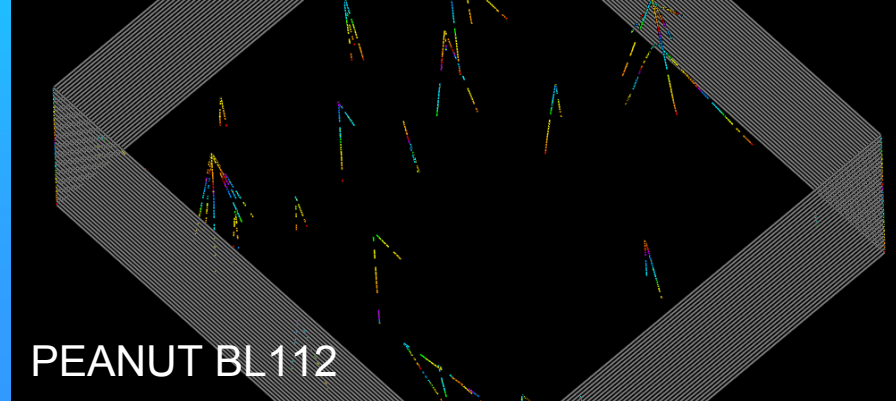
● PEANUT実験



- 2005年～2008年にかけて Fermi研究所(米)で行った OPERA実験のリハーサル



既に原子核乾板へのビーム照射は終わっており、多数のニュートリノ反応が蓄積。

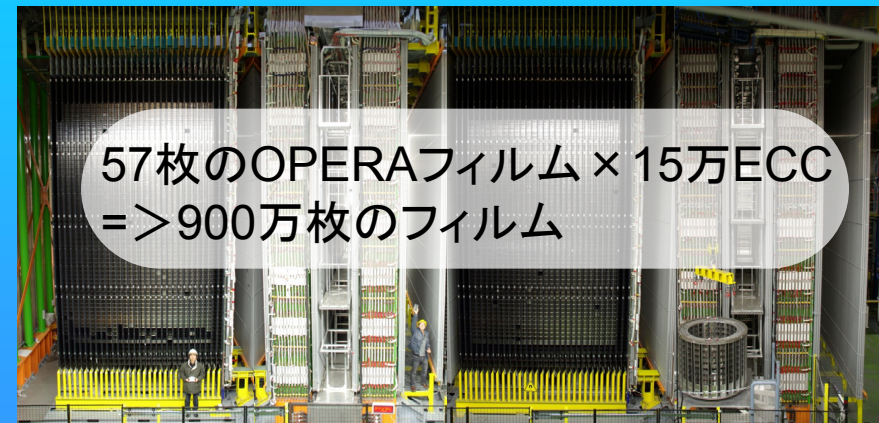


● 現在進行中：史上最大規模の原子核乾板実験 長基線ニュートリノ振動実験 OPERA

ニュートリノに質量があれば振動する(牧・中川・坂田)→SKで示唆
ただし、素粒子標準理論ではニュートリノの質量はゼロとされている。
→ ニュートリノ振動解明は、素粒子物理学における重大な課題



飛跡検出器：OPERA film

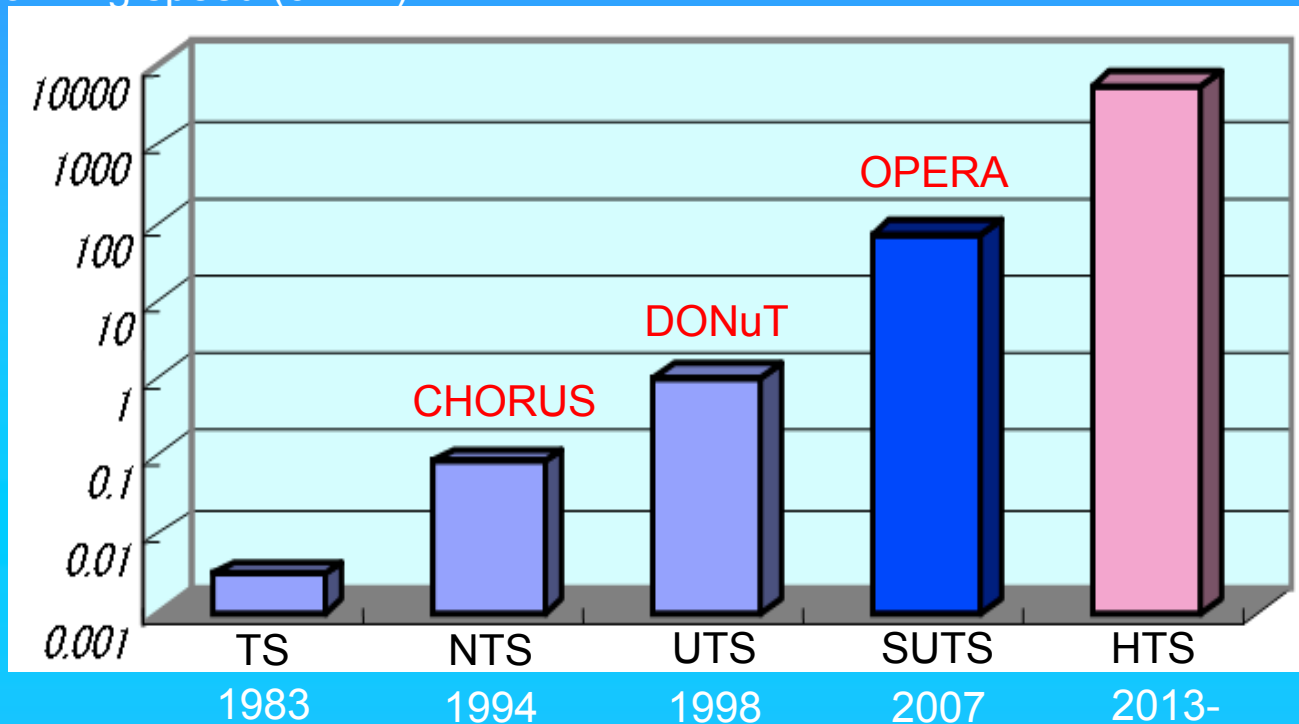


● 最大の課題：大量(大面積)のフィルムを如何にして解析し切るか。

●飛跡読み取り速度の高速化と課題

高精度化

Scanning speed (cm²/h)



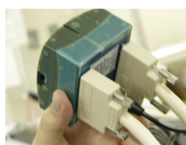
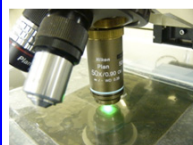
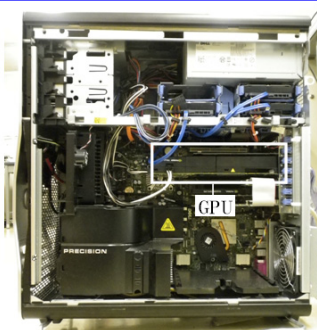
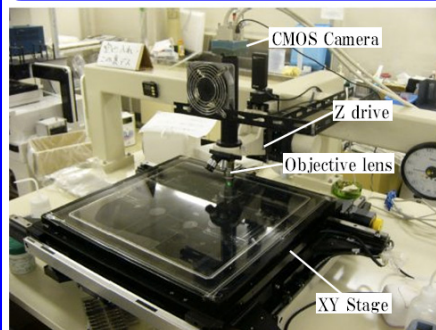
- ・原子核乾板の高速読み取り技術の発展とともに規模を拡大してきた。
- ・将来実験に向けてさらなる高速化が進められている。

ただし、100倍の速度向上は、単位時間当たり100倍の肉眼観察が発生することを意味する。

現実の解析

飛跡読み取りの高速化が進み、大量のスキャンデータが発生し、肉眼観察も大量発生することになった。

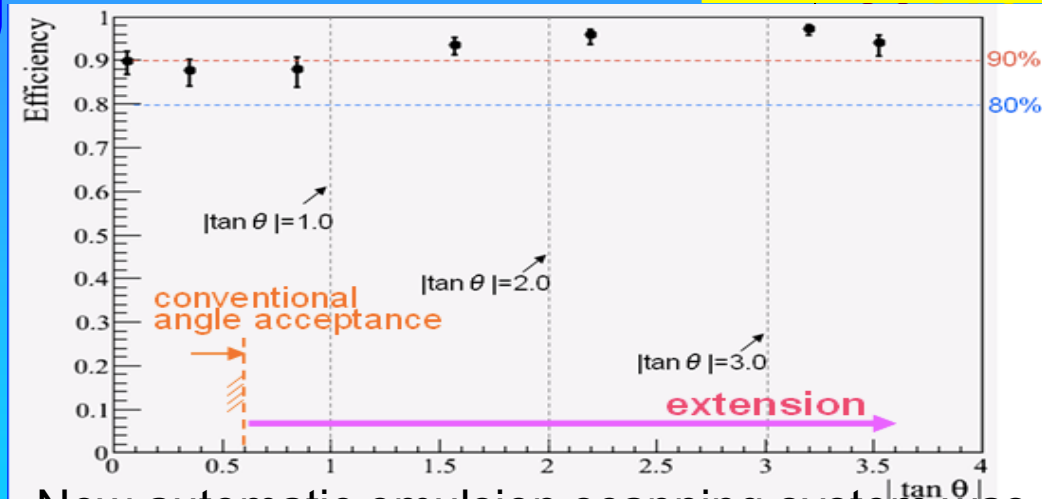
New automatic emulsion scanning system with wide-angle acceptance



Objective lens
Nikon CFI Plan x50
oil immersion lens

CMOS Camera
Mikrotron
Eosens MC 1362

Graphics Processing Unit (GPU)
NVIDIA Tesla C2050

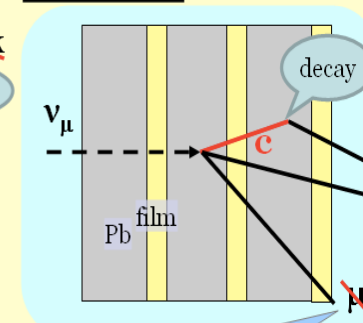
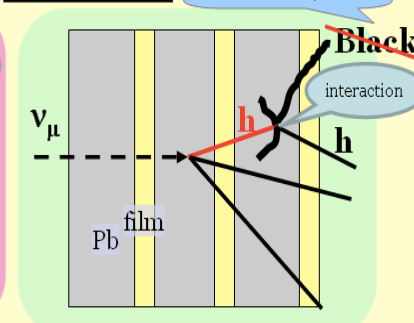
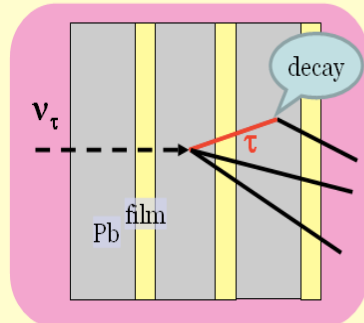


New automatic emulsion scanning system was developed to detect large angle tracks which are out of angle acceptance of a conventional scanning system.

Signal

Hadron BG

Charm BG



for Hadron BG: already applied
→ 30% BG reduction

for Charm BG: under study

New developments & BG reduction