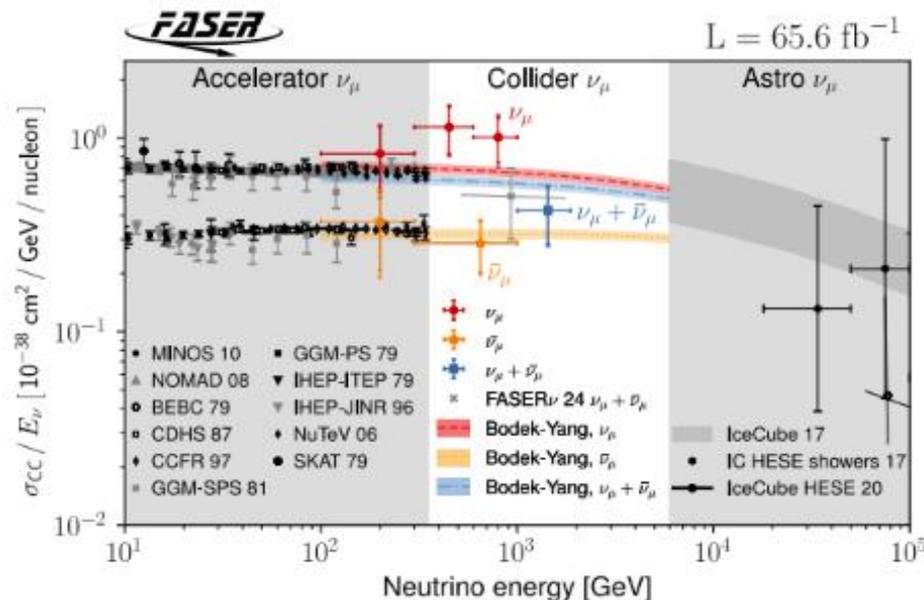
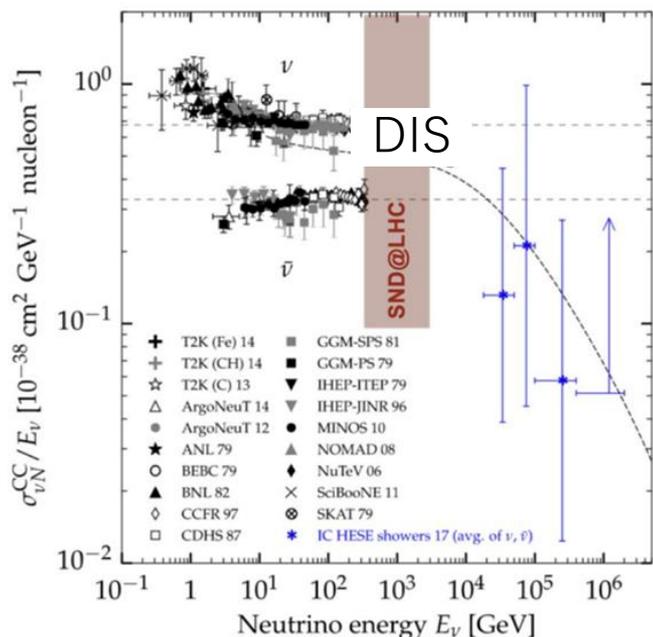


未増感OPERA乾板を用いた ν 反応点 探索の新手法開発

大林顕治¹、小川了¹、中竜大¹、小松雅弘²、木村充宏³
(¹東邦大学、²名古屋大学、³名古屋市陽子線治療センター)



ニュートリノの反応断面積(Faser実験) [3]

高エネルギー ν 実験の物理目的

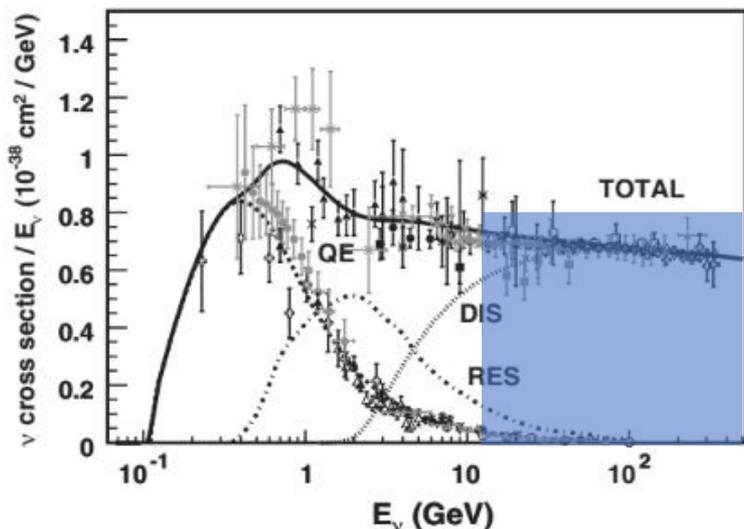
- 精密なParton Distribution Function (PDF)の測定 [1]
- Bjorken scaling極限でのBeyond Standard Model(BSM) の探索 [1]
- 3種類の ν ビームを用いたレプトンフレーバー普遍性についての検証 [2]

[1] arXiv:2407.06731v1 Deep-Inelastic Scattering with LHC Neutrino

[2] CERN-LHCC-2020-013

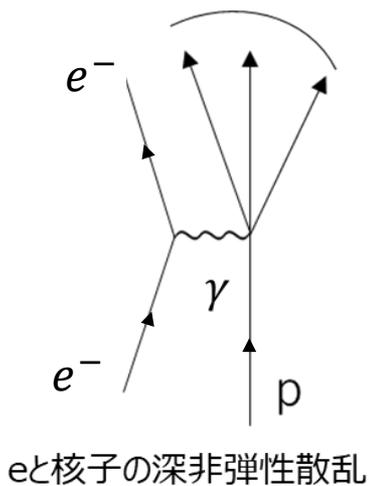
第21回高エネルギーQCD・核子構造勉強会 CERN SND@LHC 実験とSHIP 実験の現状 名古屋大学 小松雅宏

[3] arXiv:2412.03186v3 First Measurement of the Muon ...

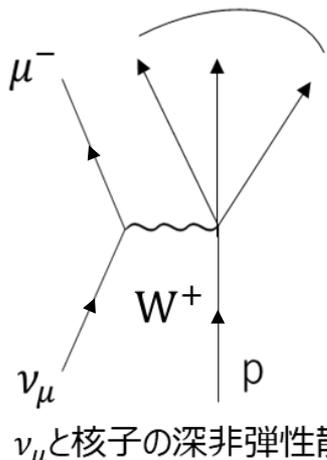


ν のエネルギーと断面積 RevModPhys.84.1307

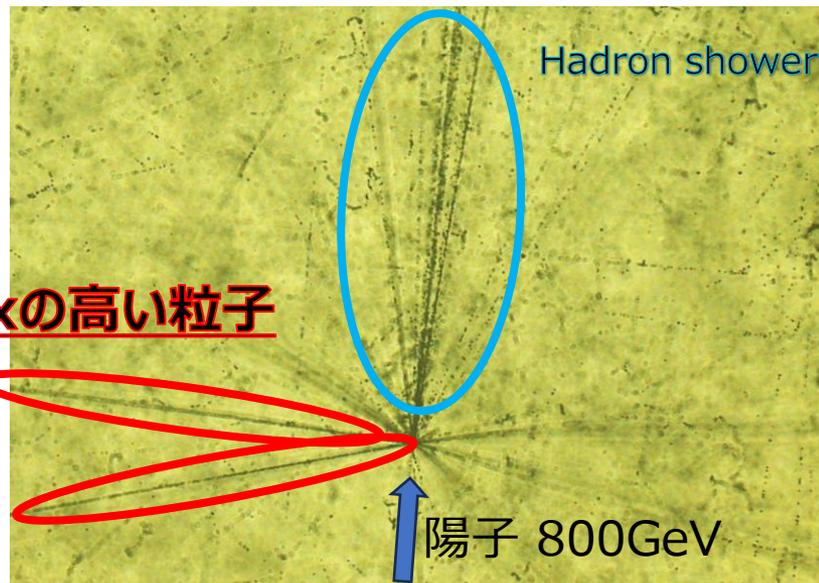
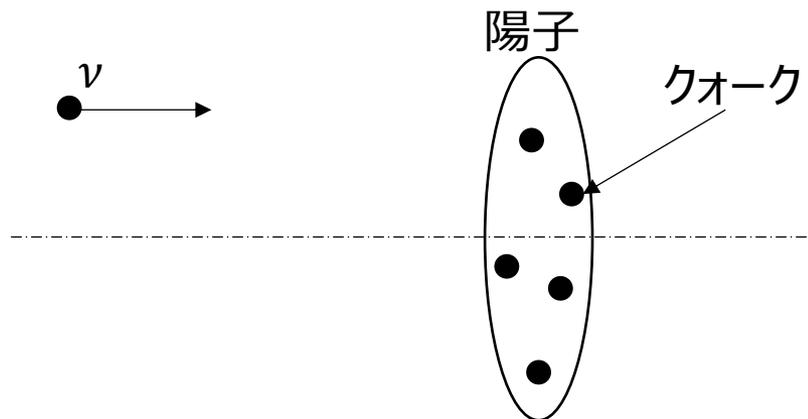
破碎による娘粒子 破碎による娘粒子



eと核子の深非弾性散乱



ν_{μ} と核子の深非弾性散乱

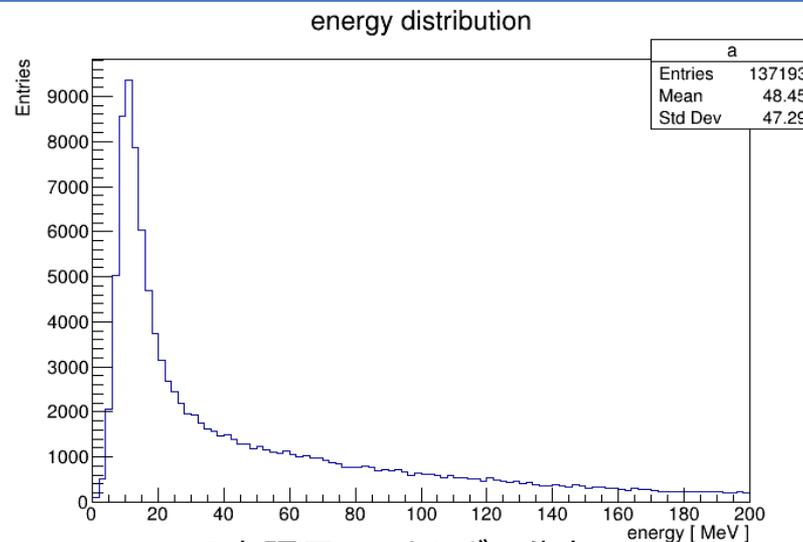


～2次粒子割合～

※Geant4でシミュレーションした2次粒子 (1182807本) を用いた。

条件:250GeV/c,mu

- Proton : 137193 (11.6 %)
- π^- : 29427 (2.5%)
- π^+ : 26441 (2.2%)
- neutron : 653877 (55%)

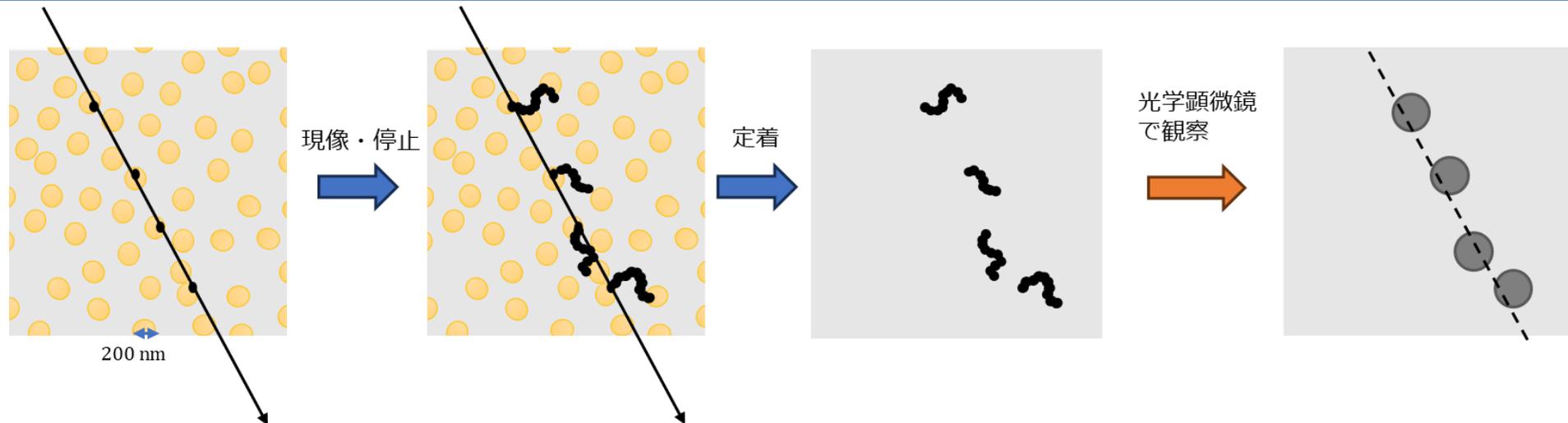


2次陽子のエネルギー分布

これまで、2次のprotonの生成については実際に測定された例がほとんどない

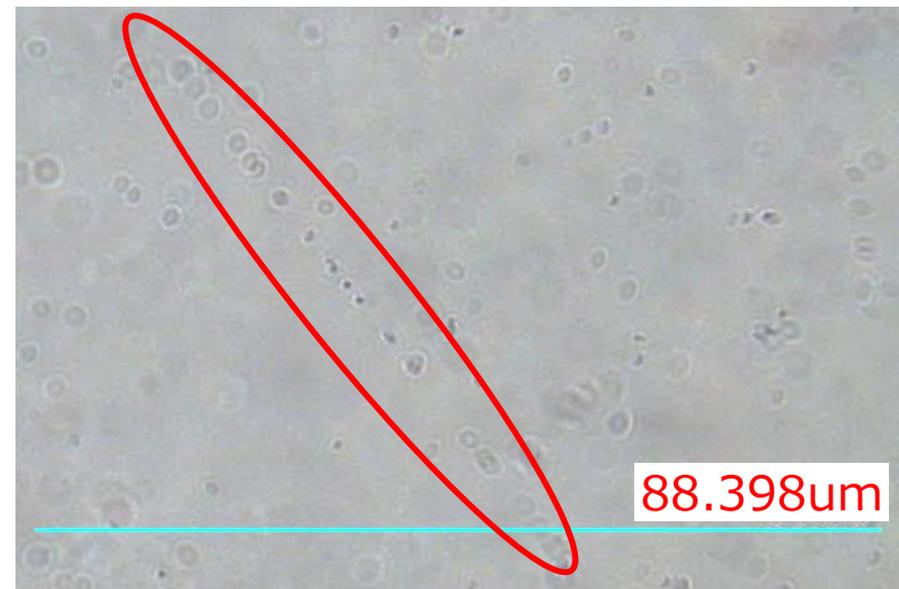


高dE/dx(keV/ μm 程度)の粒子にフォーカスした検出器を用いた新しいニュートリノ反応点探索の新手法開発



検出原理

1. 荷電粒子の電離作用によりAgBr結晶に潜像核（3～4個以上の銀原子）を形成
2. 現像処理工程により潜像核が増幅される。
3. 光学顕微鏡を用いて増幅された銀 (grain) を観察する。

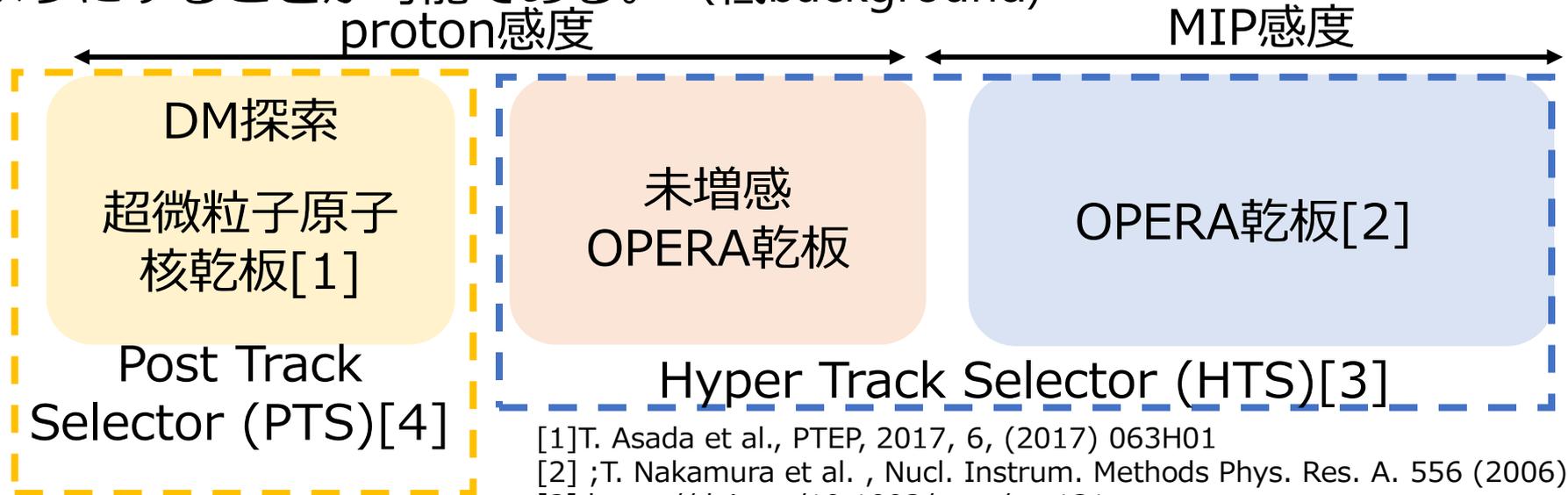


光学顕微鏡で観察したミュー粒子の飛跡

～乾板の特徴～

- sub- μm スケールの空間分解能を持つ
- 単位時間当たりの数え落としが原理上存在しない
- 感度を容易に変更ができる
(粒子径、添加薬品 etc)

→Minimum Ionizing Particle (MIP)の粒子の飛跡を選択的に残さないようにすることが可能である。(低background)



[1] T. Asada et al., PTEP, 2017, 6, (2017) 063H01

[2] ; T. Nakamura et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 556 (2006) 80.

[3] <https://doi.org/10.1093/ptep/ptx131>

[4] T. Katsuragawa et al., JINST, 12, 04, T04002 (2017).

～乾板の特徴～

- sub- μm スケールの空間分解能を持つ
- 単位時間当たりの数え落としが原理上存在しない

• **感度**
(**感度**)

本研究では、

- 結晶size 200nm
- 増感を行わない

→M
残さ

限的に
(und)
度

ここでは、この乾板を

未増感OPERA乾板

と呼ぶ

超微粒
核乾板

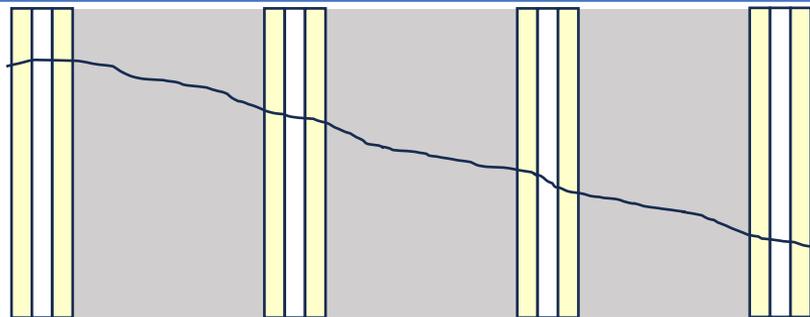
OPERA乾板

乾板

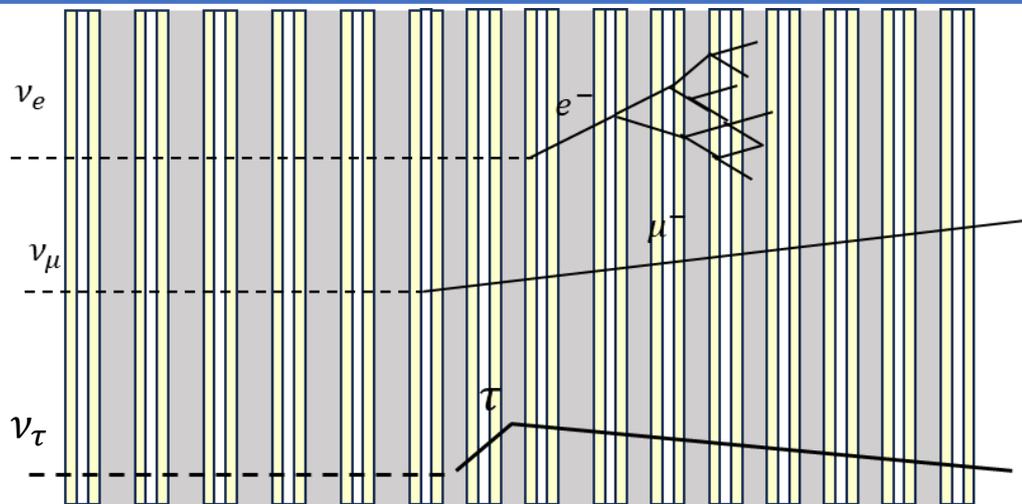
Post Track
Selector (PTS)

Hyper Track Selector (HTS)

Emulsion Cloud Chamber (ECC) 8 / 16



- 金属 (タングステン) 1 mm
- 乳剤層 片面 65um
- ポリスチレンベース 210um



Emulsion Cloud Chamber (ECC)の概略図

Emulsion Cloud Chamber (ECC):
原子核乾板と金属板を交互に積層した検出器。

- 反応点の探索
- 粒子の運動量の推定
- ニュートリノフレーバーの同定

課題：

- 入射粒子数に限りがある。
- 飛跡数密度が大きい場合、乾板間位置関係補正, 反応点探索が難しい
- 頻繁に交換が必要



新しい検出器の提案が必要である

提案する検出器構成：

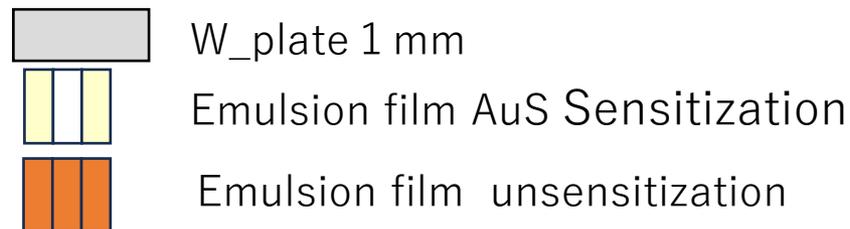
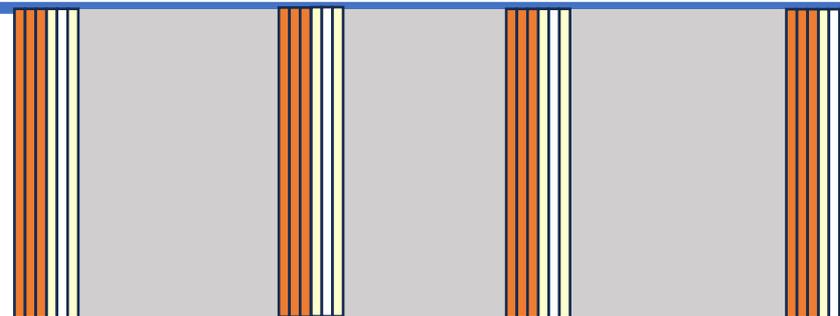
金属板 (W板) と未増感のOPERA乾板、通常増感のOPERA乾板を積層する。

- 通常増感のOPERA乾板：

CC反応の娘粒子の解析

- 未増感のOPERA乾板：

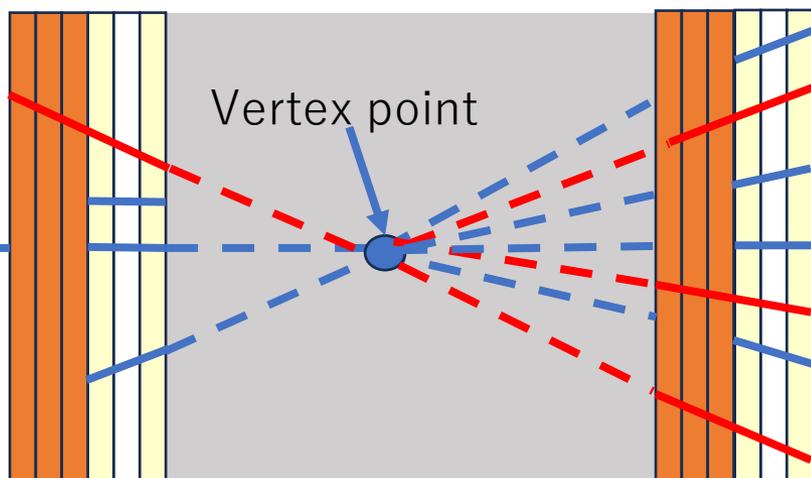
反応点探索の足掛かり



利点：

- 反応点探索の効率化
- 低backgroundでの反応探索
- NC反応の反応点探索にも有効
- HLにも対応できる可能性がある

これまでの乾板と取り扱いが同様



—— MIP粒子 —— 高dE/dx粒子

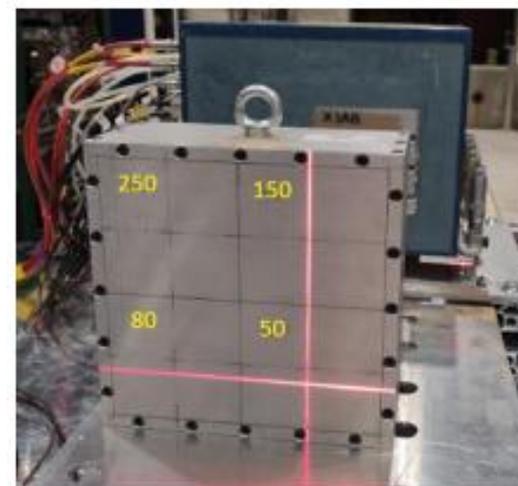
感度評価

- 原理検証
- エネルギーごとの感度
- 角度ごとの感度
- 顕微鏡での認識率の確認



Test beam実験

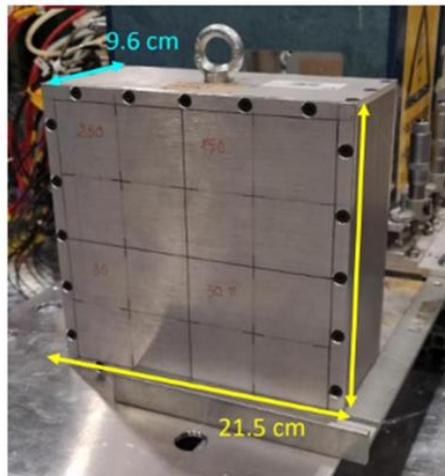
- 高 dE/dx の2次粒子にフォーカスした観測
- 高エネルギー μ ビームを用いた原理検証



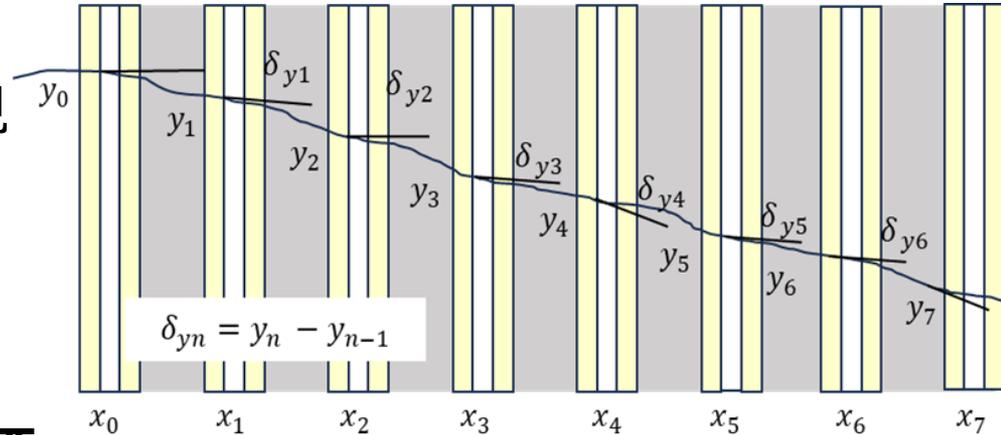
検出器のキャリブレーションなどを目的とした、test beam実験が現在行われている。

乾板については、多重電磁散乱を用いた運動量測定のカリブレーションが行われている。

→新しい検出器の性能について評価を行う



Test beam実験図



位置差法模式図

～照射条件～

照射場所:

CERN SPS North Area H4 Beam

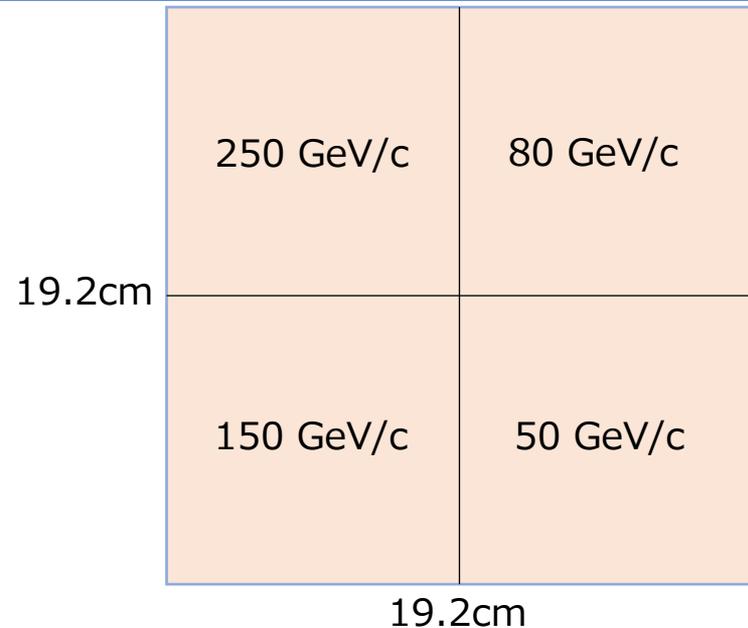
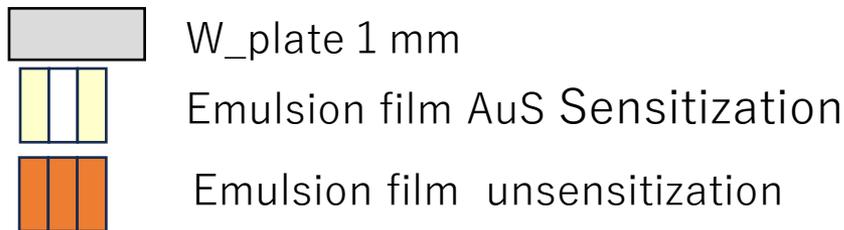
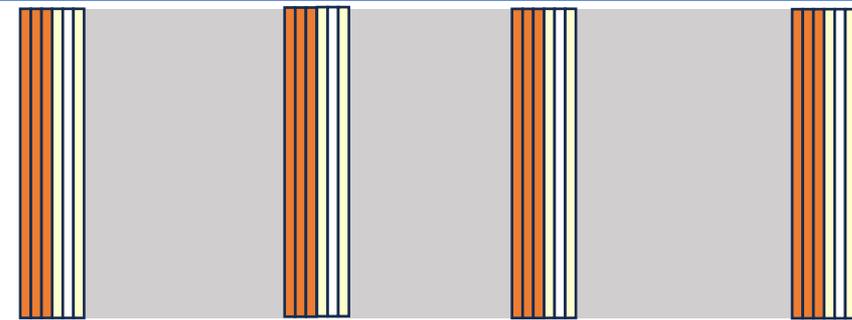
照射量 : 2×10^5 /cm²

エネルギー・粒子種

250 GeV/c (mu), 150 GeV/c (mu),

80 GeV/c (mu),

50 GeV/c (50% mu + 50% pi)



今回のtest beam実験では、

- 通常のOPERA乾板×20枚：
名古屋大学自動塗布装置で製造 [1]
- 未増感のOPERA乾板×20枚：
東邦大学での手塗での塗布

日程：

3月末～4月上旬

未増感のOPERA乳剤の製造

4月中旬～5月中旬

未増感のOPERA乾板の製造

5月27日～6月13日

test beamの照射

[1] Nuclear emulsion film production system for experiments in full-area scanning and analysis era

W板を用いたECCでのミュオンと原子核の相互作用数の見積もり、2次粒子数についてGeant4を用いてシミュレーションを行った。

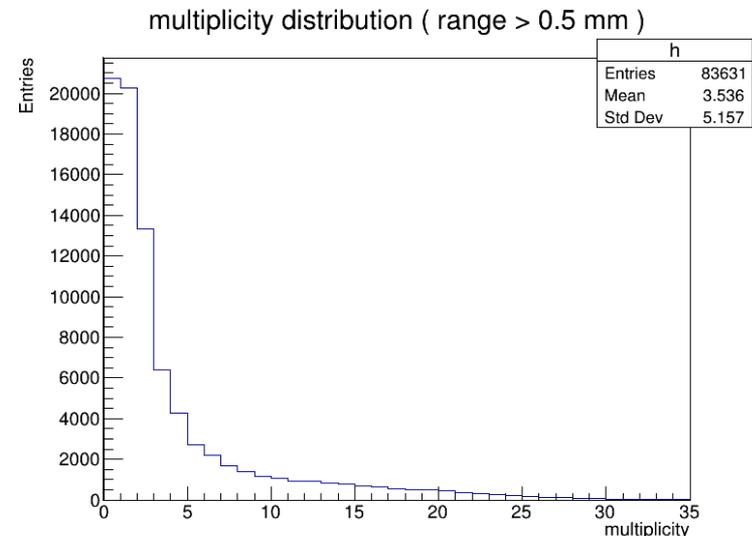
照射条件：

- 照射エネルギー： μ (250 GeV/c, 150 GeV/c, 80 GeV/c, 50 GeV/c)
- 照射量：各エネルギー $2 \times 10^5 / \text{cm}^2$
- 照射面積：各エネルギー 25 cm^2

運動量	Event数
250GeV/c	1054
150GeV/c	935
80GeV/c	795
50GeV/c	695

エネルギーごとの反応数

※event数はGeant4でのmuNuclear反応数



今回のtest beam実験における反応点探索が可能なmuNuclear反応は、**1700 event**

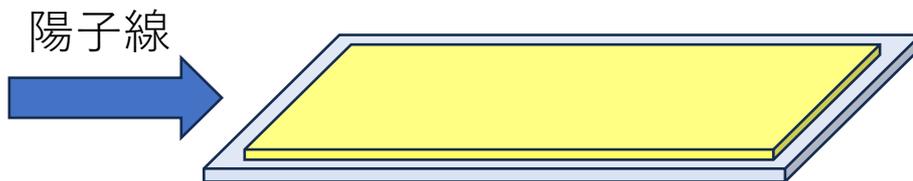
場所：

名古屋市陽子線治療センター G2

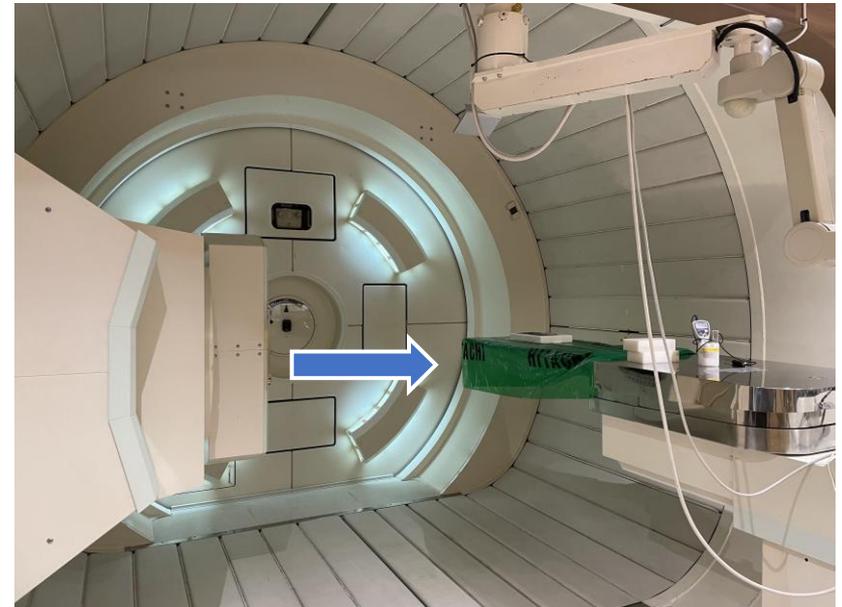
照射目的：

- 未増感のOPERA乾板の感度評価 (30 MeV, 15 MeV, 100 MeV, 120 MeV, 160 MeV, 250 MeV)
- Grain Densityを用いて感度の定量評価を行う

$$G.D = \frac{\text{Grain数}}{\text{飛跡の長さ} [\mu\text{m}]}$$



※感度の評価は、
スライドガラスのサンプルを用いて
横向きtrackのGDで評価する



詳細については、
予備実験として行われた

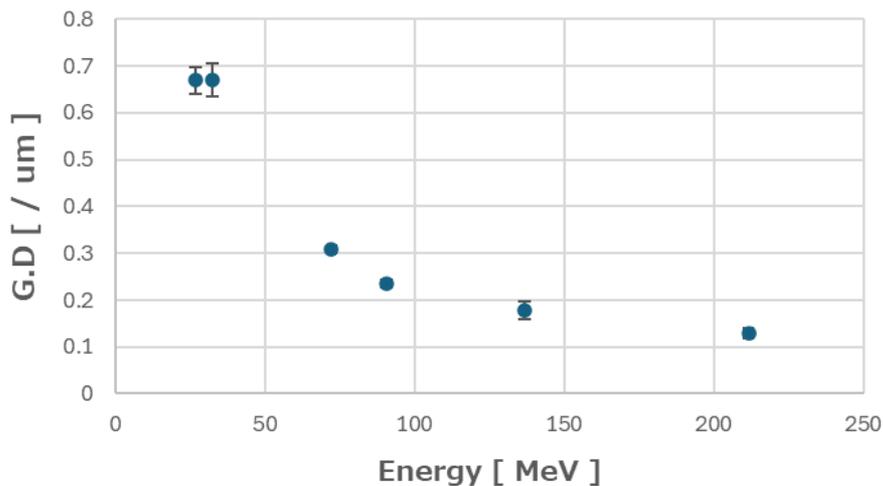
P.25 (原)

の発表を参照



陽子線160 MeVの飛跡画像

energy vs Grain Density



照射したすべての領域で飛跡を観測することができ、感度の評価を行うことができた。



**未増感OPERA乾板での
水平高dE/dx粒子の感度確認**

～今後～

垂直トラックの認識についての検証

～まとめ～

- ニュートリノ反応の反応点探索の効率化を目的とした検出器の開発を行っている。
 - MIP粒子の飛跡を選択的に残さない未増感OPERA乾板を用いた新しい検出器についての提案を行った。
 - 原理検証として陽子線照射を行い感度評価を行っている。
(名古屋市陽子線治療センター)
- 2次陽子の支配的な領域 (数10MeV~100MeV)に対しての感度があることを確認

～展望～

- 垂直trackでの飛跡の認識率や、角度による相関の検証
- CERNでのtest beam実験を用いて実際に新検出器の原理検証
- 高dE/dxの飛跡を用いた現状の実験での解析への応用