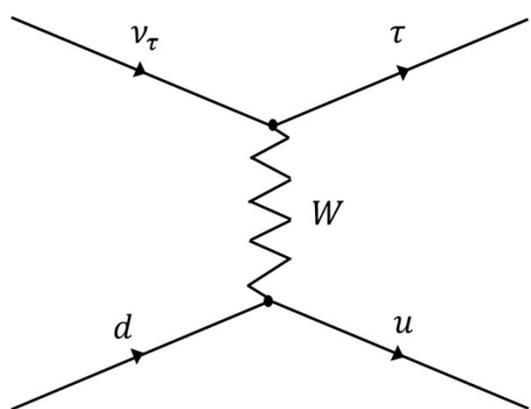

原子核乾板を用いた薄型スペクトロメータ の性能評価と現状

東邦大学 関川 拓斗

タウニュートリノの断面積測定

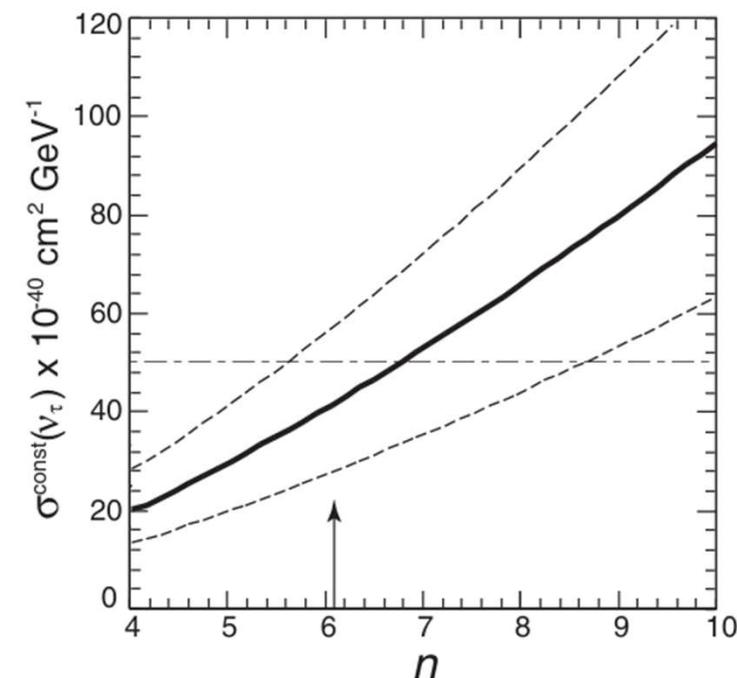


タウニュートリノを直接検出するためには、
寿命の短い($c\tau = 87.03\mu\text{m}$)タウの崩壊を観測する必要がある
⇒長年直接観測が難しかった

- DONuT実験で初めて合計9例の ν_τ のCC反応を観測
- 統計およびフラックス起源の大きな不確かさを伴う

未達成の ν_τ 物理

- ◇断面積の精密測定
- ◇断面積のエネルギー依存性
- ◇粒子と反粒子を識別した実験検証



出典：DONuT Collaboration, PhysRevD.78.052002 Fig.16

ν_τ -cc反応と構造関数における質量効果

$$\frac{d^2\sigma^{\nu(\bar{\nu})}}{dxdy} = \frac{G_F^2 M E_\nu}{\pi(1+Q^2/M_W^2)^2} \left(\left(y^2 x + \frac{m_\tau^2 y}{2E_\nu M} \right) F_1 + \left[\left(1 - \frac{m_\tau^2}{4E_\nu} \right) - \left(1 + \frac{Mx}{2E_\nu} \right) y \right] F_2 \right. \\ \left. \pm \left[xy \left(1 - \frac{y}{2} \right) - \frac{m_\tau^2 y}{4E_\nu M} \right] F_3 + \frac{m_\tau^2 (m_\tau^2 + Q^2)}{4E_\nu^2 M^2 x} F_4 - \frac{m_\tau^2}{E_\nu M} F_5 \right)$$

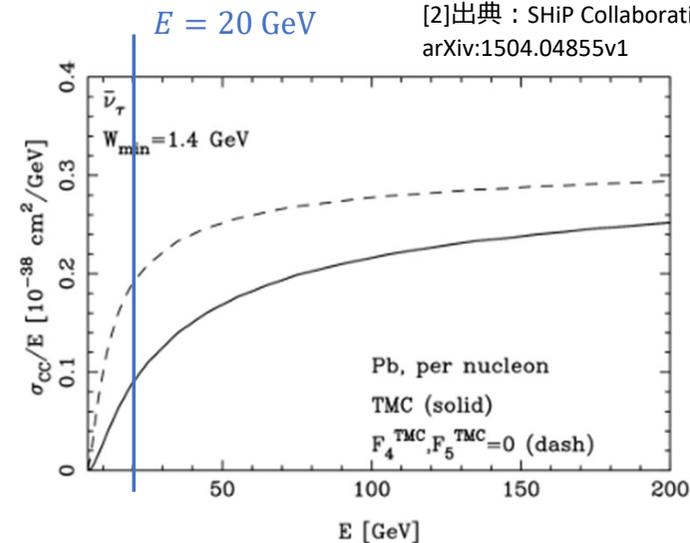
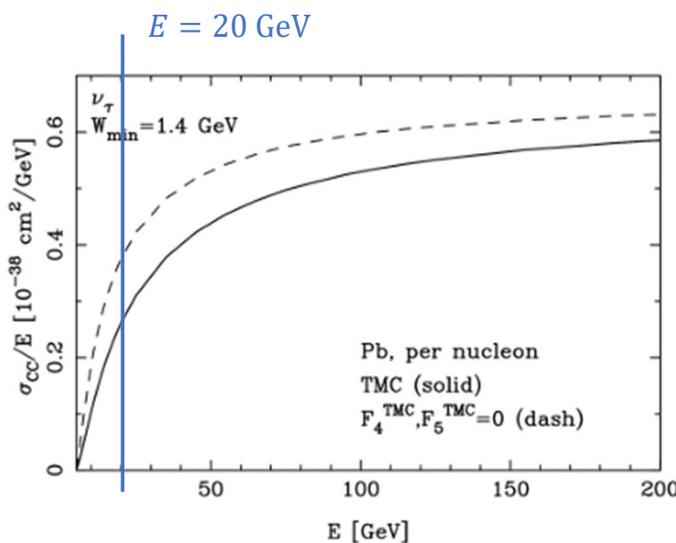
$\nu_\tau(\bar{\nu}_\tau)$ のCC微分断面積

F_4, F_5 の効果を含めることで、
 $E = 20$ GeVにおいて
 ν_τ は約30%、 $\bar{\nu}_\tau$ は約53%程度
 cc断面積が低下する[2]



**数GeV~数十GeV領域の
 タウニュートリノビームが必要**

$\nu_e, \nu_\mu \Rightarrow E_\nu \gg m_l$
 F_4, F_5 の寄与が抑制される
 $\nu_\tau \Rightarrow m_\tau \gg m_\mu, m_e$
 F_4, F_5 の効果が
実験的に観測される可能性がある



[2]出典：SHiP Collaboration
 arXiv:1504.04855v1

図： $\nu_\tau(\bar{\nu}_\tau)$ の鉛標的中でのエネルギー規格化された断面積

ビームダンプ法による ν_τ 生成

陽子をターゲットに照射し中間子が生成

↓ 長寿命

崩壊前に散乱し
ビーム軸から逸れる

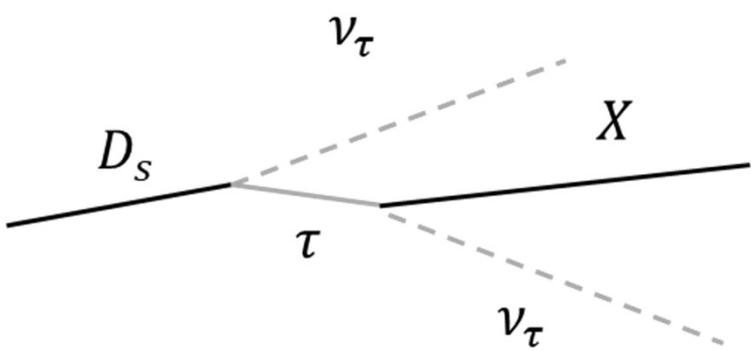
↓ 短寿命

散乱前に崩壊し
ビーム軸にニュートリノ
が残る

- ☑ π, K などは散乱され ν_e や ν_μ は逸れる
- ☑ D_s は散乱前に崩壊し ν_τ が残る



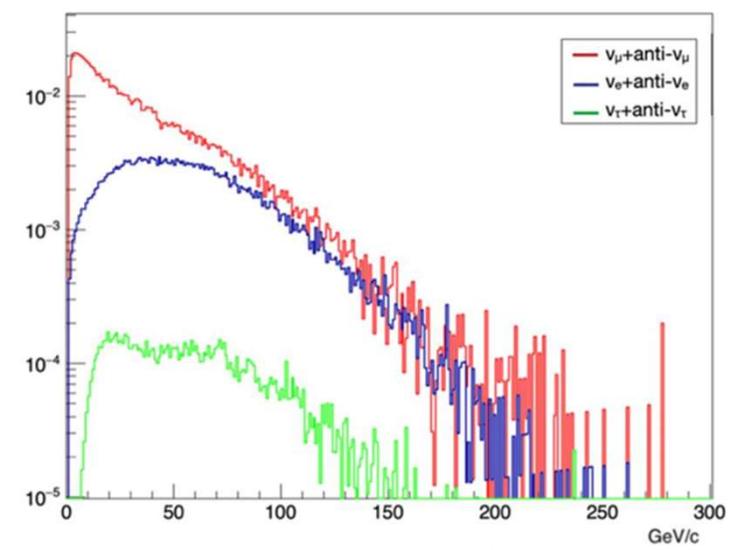
ν_τ が多く含まれるビームが生成される



	CC DIS
N_{ν_e}	2.0×10^6
N_{ν_μ}	5.8×10^6
N_{ν_τ}	5.9×10^4
$N_{\bar{\nu}_e}$	4.0×10^5
$N_{\bar{\nu}_\mu}$	1.3×10^6
$N_{\bar{\nu}_\tau}$	4.3×10^4

表:予想される荷電カレント反応事象数

出典：SHiP Collaboration SHiP Experiment PROGRESS REPORT(2019)



ニュートリノのエネルギースペクトル

電荷識別によるタウニュートリノ直接検証

電荷識別を行うメリット

- ☑ $\nu_\tau/\bar{\nu}_\tau$ のフラックス比や相互作用の違いなどの理論的仮定によらず直接的な検証が可能
- ☑ 粒子と反粒子を識別した物理量の実験検証が可能

従来の検出器構成

- ・ ターゲットの下流にスペクトロメータを設置
- ・ タウのミュオン崩壊モードのみ電荷識別可能



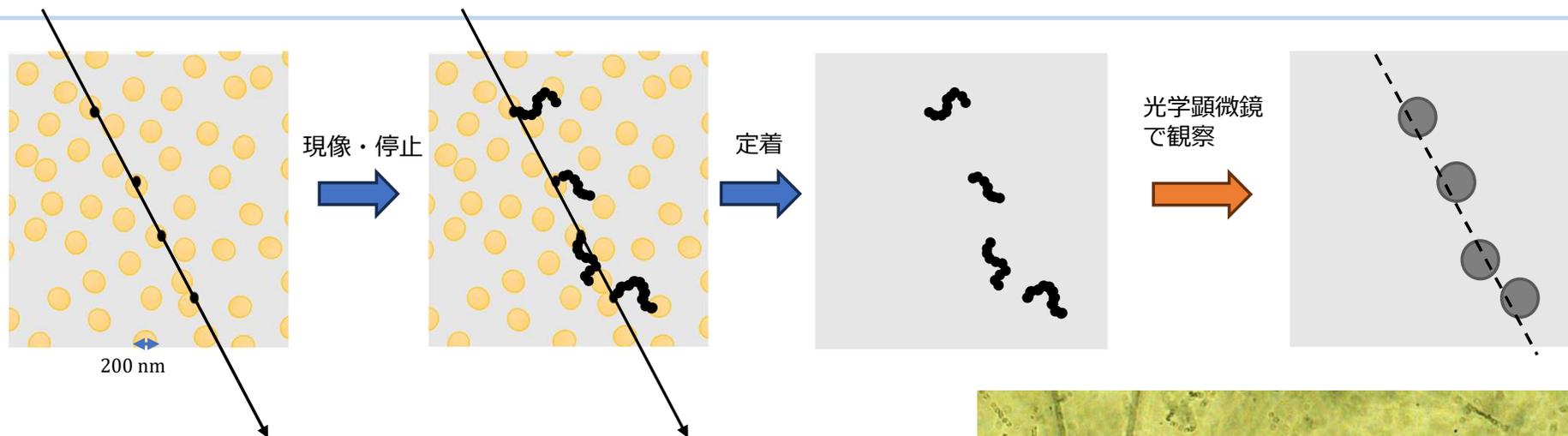
新たな検出器構成

- ・ ターゲット直下にスペクトロメータを設置
- ・ 分岐比の約6割を占めるハドロン崩壊事象でも電荷識別可能

channel	branching ratio
$\tau^- \rightarrow e^- \nu_\tau \bar{\nu}_e$	17.8%
$\tau^- \rightarrow \mu^- \nu_\tau \bar{\nu}_\mu$	17.7%
$\tau^- \rightarrow h^- \nu_\tau (n\pi^0)$	49.5%
$\tau^- \rightarrow h^- h^- h^- \nu_\tau (n\pi^0)$	15.0%

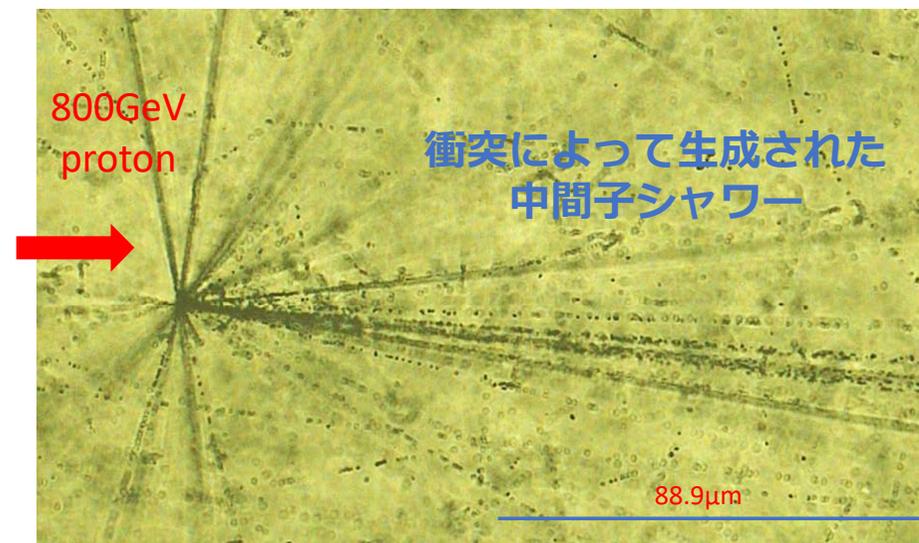
タウの主な崩壊分岐比

原子核乾板



- ☑ゼラチン内に200nmのAgBr結晶が均一に分散
- ☑結晶一つ一つが検出素子
- ⇒サブミクロンの飛跡検出が可能

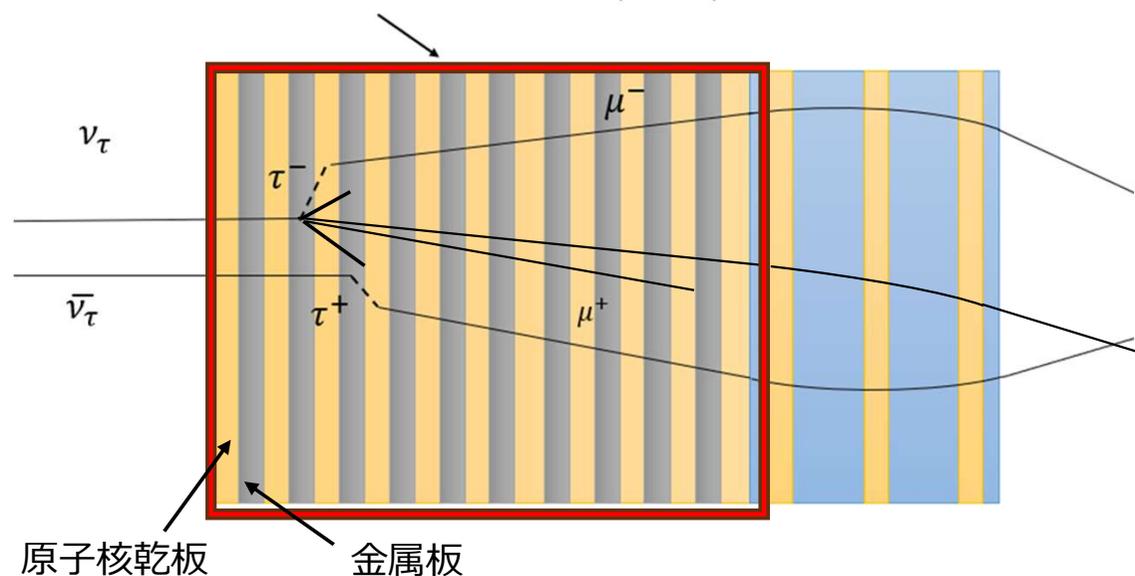
タウニュートリノの直接検出実績を持つ



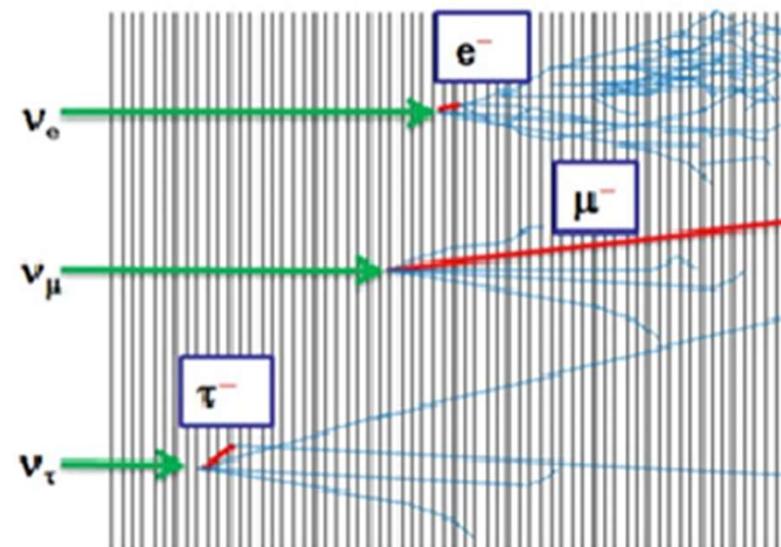
800GeVの陽子と原子核の衝突イベント

Emulsion Cloud Chamber(ECC)

Emulsion Cloud Chamber(ECC)



- ◇原子核乾板と厚さ1mmのタングステンが交互に積層
- ◇多重電磁散乱から運動量を測定

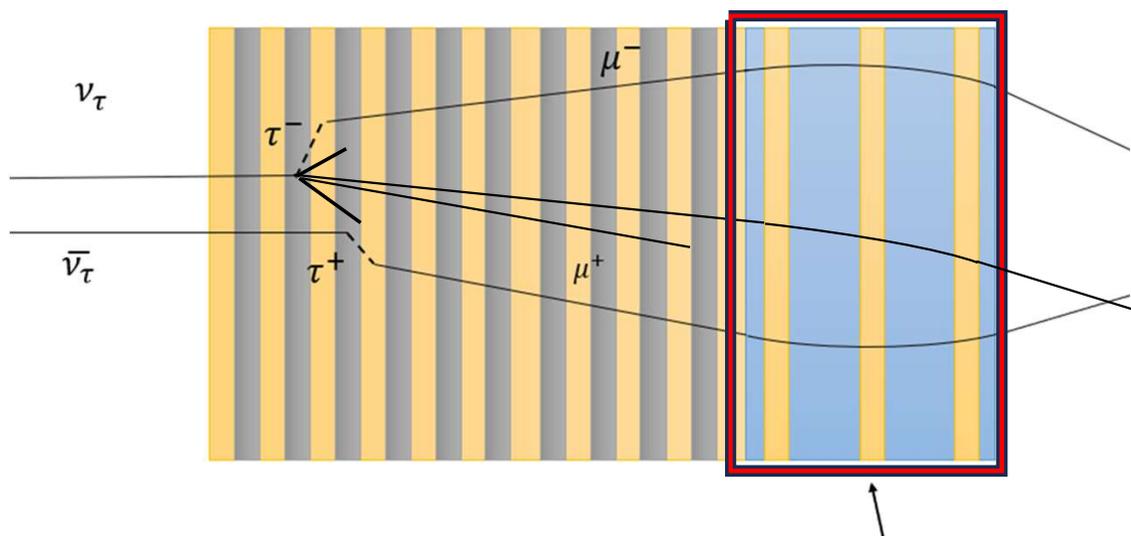


ECC中でのニュートリノ反応識別

ECC内

ν が相互作用してレプトンが生成
 \Rightarrow 世代ごとに飛跡の特徴が異なる
 \Rightarrow ニュートリノフレーバーを特定

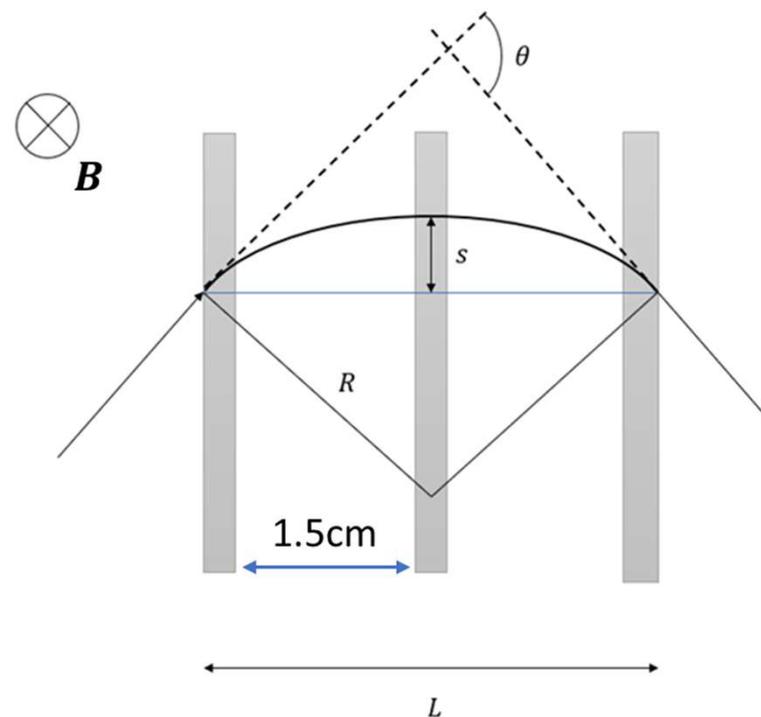
Compact Emulsion Spectrometer(CES)



Compact Emulsion Spectrometer(CES)

$$s = \frac{0.3zBL^2}{8p} = x_2 - \frac{x_1 + x_3}{2}$$

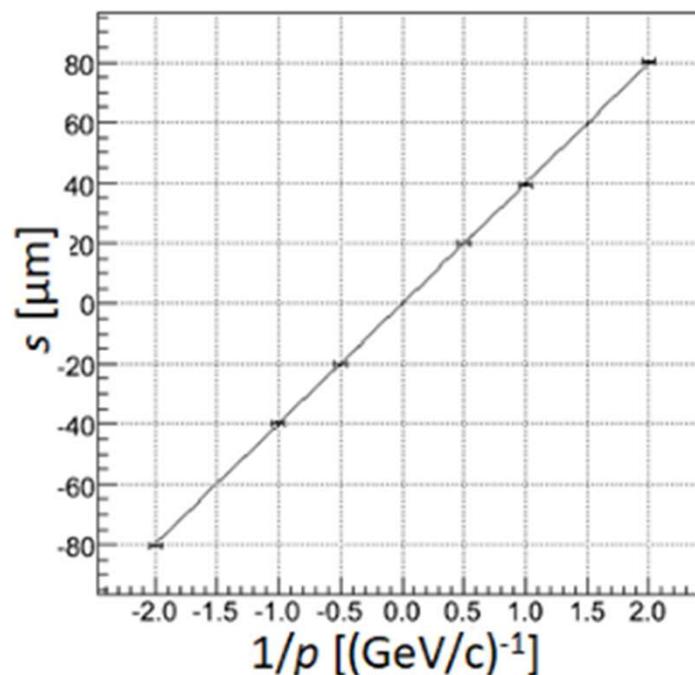
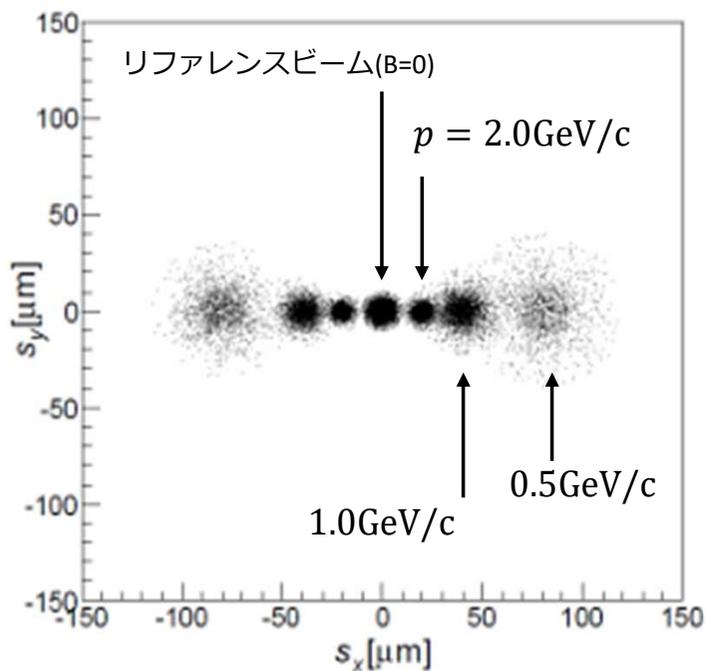
s : サジッタ
 z : 電荷
 B : 磁場
 L : 検出器サイズ
 p : 運動量



- ☑磁場での曲がりから電荷識別可能
- ☑サジッタ s は運動量 p に反比例
- ⇒運動量測定ができる

先行研究での原理実証

出典：C. Fukushima 「A thin emulsion spectrometer using a compact permanent magnet(2008)」



2005年

- 1Tの磁場中にCESを設置
- $2 \times 2 \text{ cm}^2$ の乾板に π^\pm を垂直に照射



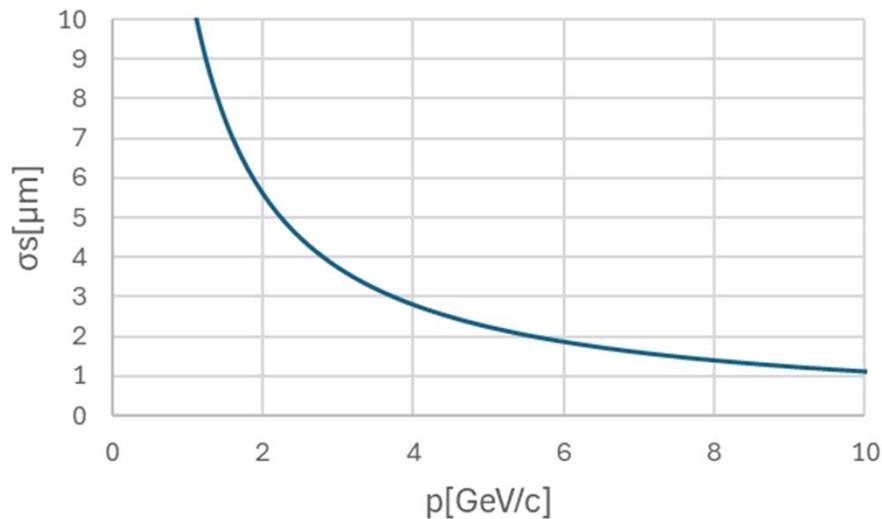
2 GeV/cまでは十分な
電荷識別精度を持つ
ことが確認

実用化に向けて

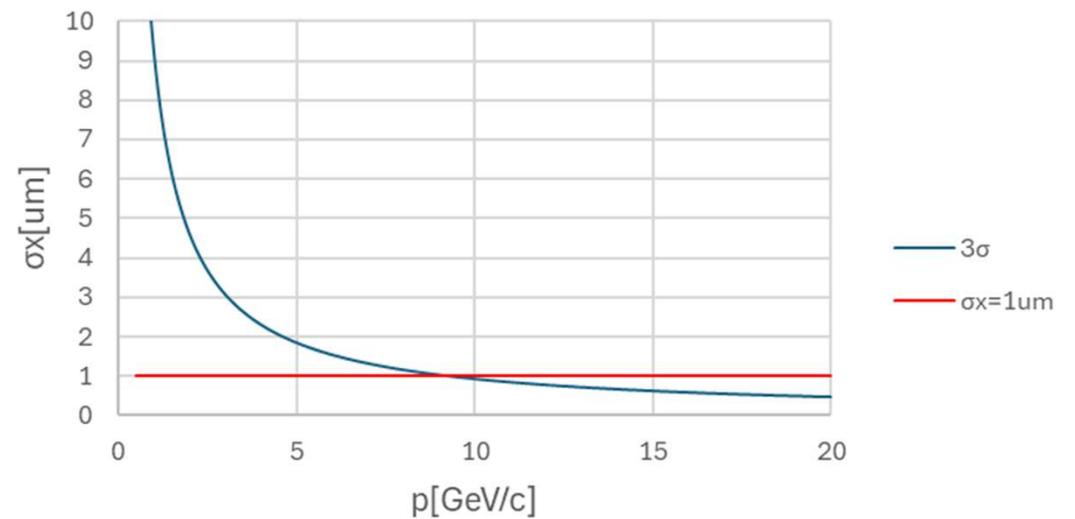
- ◇ 検出器サイズを大きくしても同様の精度
- ◇ 電荷識別可能な運動量領域の拡大

電荷識別のために要求される位置分解能

運動量ごとの必要サジッタ分解能(3 σ)



運動量ごとの必要位置分解能



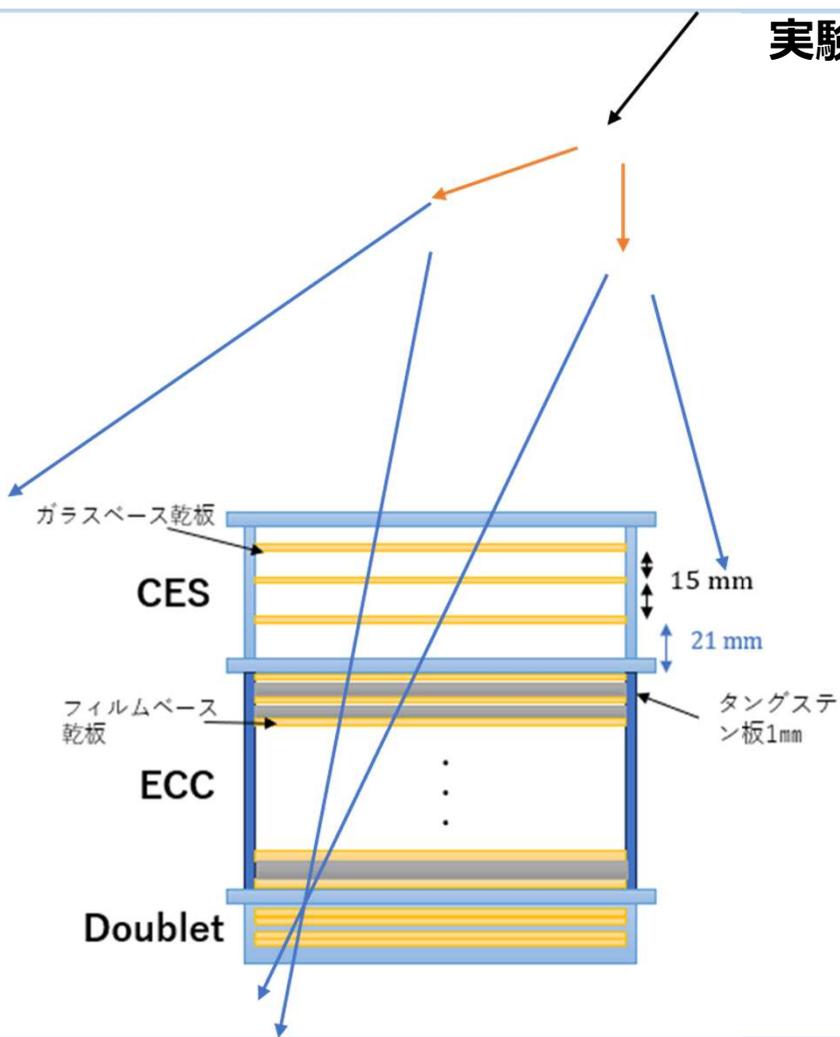
$$s = x_2 - \frac{x_1 + x_3}{2}$$

$$\Rightarrow \sigma_s = \sqrt{\frac{3}{2}} \sigma_x$$

σ_s : サジッタ分解能
 σ_x : 乾板の位置決定精度

実験のためには数十GeV領域のタウニュートリノの娘粒子の電荷識別が必要であり、
 $p=10\text{GeV}/c$ での電荷識別精度 3σ のためには
 位置決定精度が $1\mu\text{m}$ 以下であることが要求される。

宇宙線照射実験



実験の流れ



◇照射時間 24h
◇検出器面積 $10 \times 12.5 \text{ cm}^2$



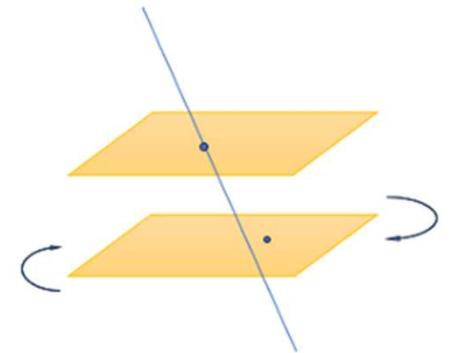
HTS1の写真
名古屋大学にあるHyper Track Selector(HTS)で垂直トラックの位置と角度を取得

アライメント

スキャンされた乾板のデータはそれぞれ固有の座標系をもつ



元の検出器の座標系に戻す必要がある



$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix}$$

伸縮
回転
平行移動

伸縮、回転、平行移動の三つの
パラメータで位置関係補正を行う

飛跡の接続

条件に当てはまる
位置差・角度差のtrackを接続

角度外挿

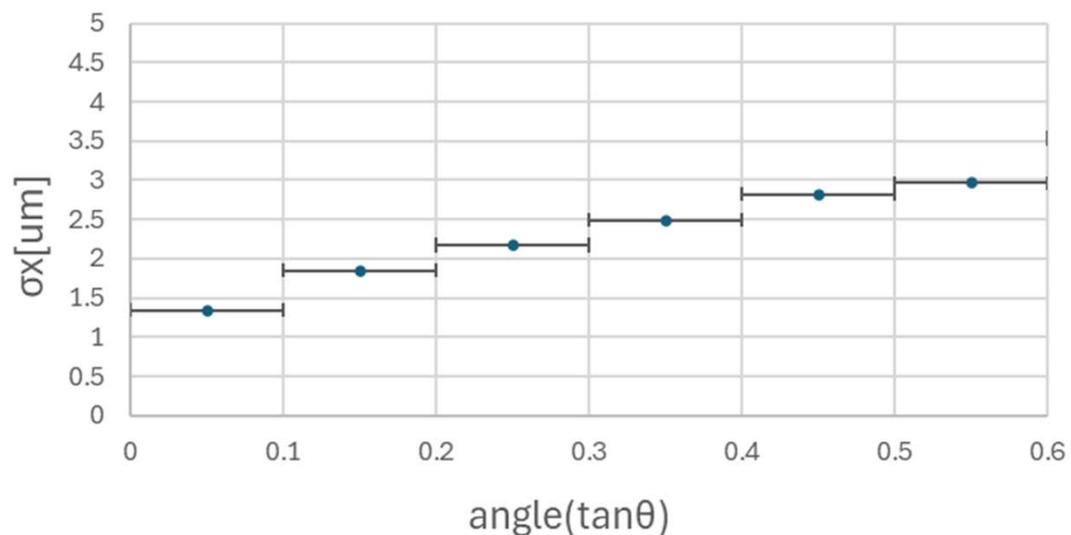
トラック角度×乾板間距離
で片側の位置に外挿

アライメントパラメータの
取得

位置と位置差の相関から
アライメントパラメータを決定

位置測定精度

位置決定精度



- ◇乾板の位置測定精度は $0 \leq \tan \theta < 0.1$ で $1.34 \mu\text{m}$
- ⇒原理的には $7 \sim 8 \text{ GeV/c}$ 領域でも 3σ で電荷識別が可能
- ◇角度が大きくなるほど位置測定精度も低下した

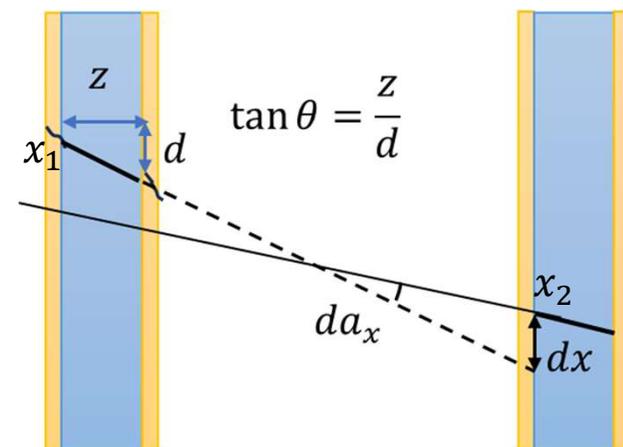
乾板間の位置差は

$$dx = x_2 - x_1$$

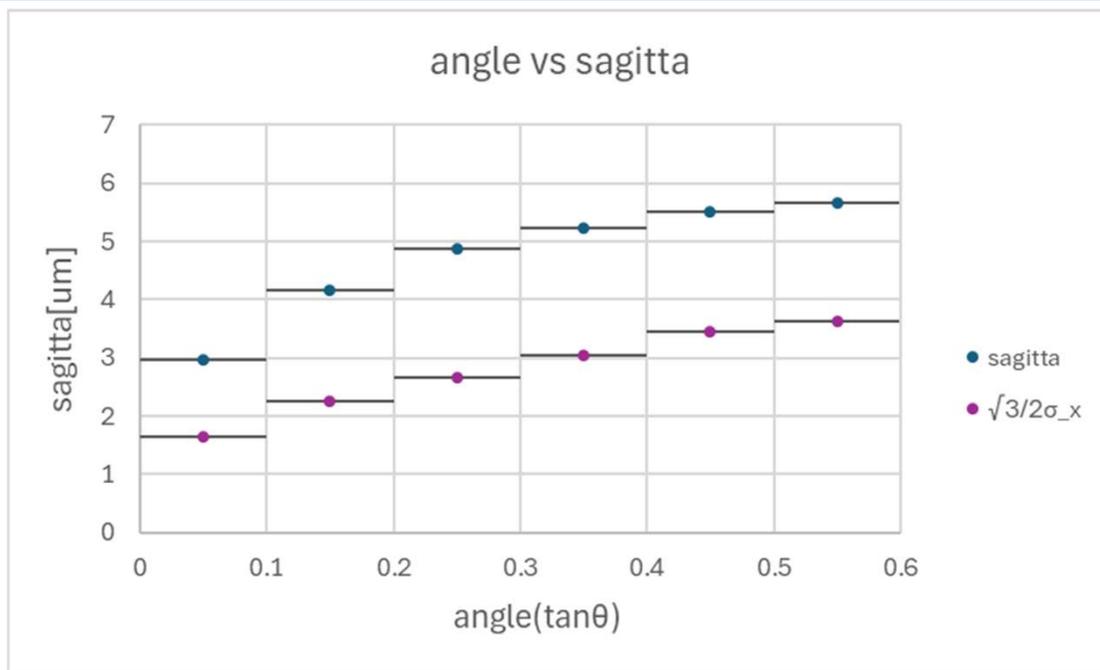
位置差分布幅はそれぞれの乾板の位置測定精度の誤差伝搬であり、それぞれ同じ位置測定精度を持つとすると、

$$\sigma_x = \frac{1}{\sqrt{2}} \sigma_{dx}$$

となる。



現状の電荷識別精度



サジッタ分解能の角度依存性

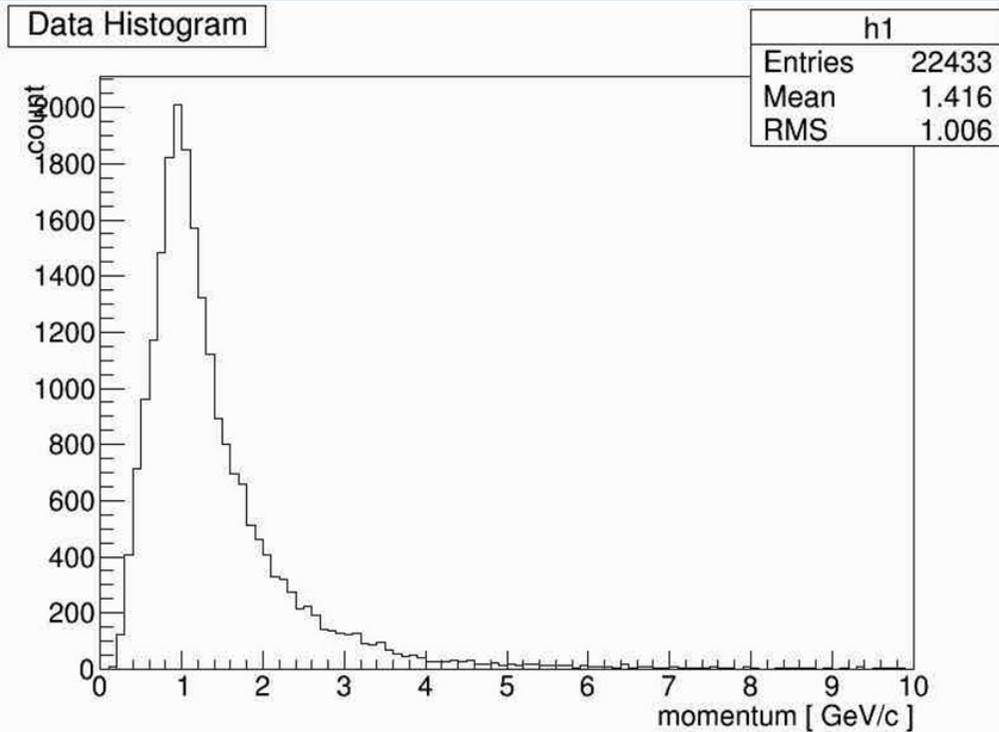
位置測定精度のみのサジッタ分解能と
実際のサジッタ分解能を比較

- $0 \leq \tan \theta < 0.1$ で $\sigma_s = 2.97 \mu\text{m}$
⇒ **3GeV/c まででは 3σ で電荷識別可能**
- 位置測定精度のみのものと差があり、
検出器内での**散乱の影響**や乾板間の距離
が大きいためによる**位置測定精度の
低下**が考えられる。

より高運動量での電荷識別のために

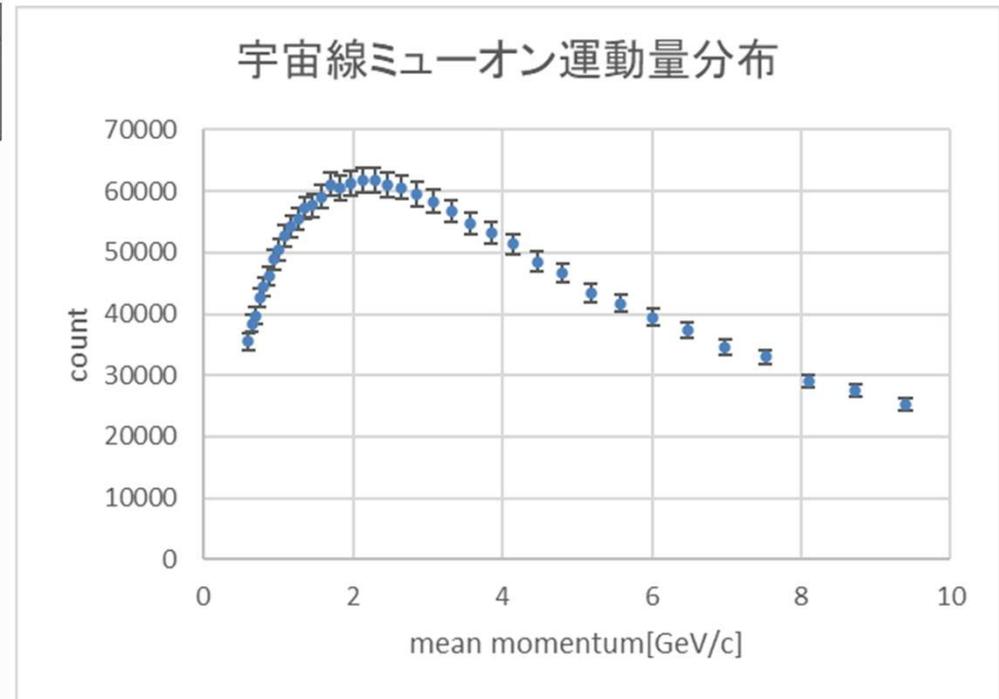
- ◇ 乾板自体の位置測定精度を損なわない解析手法の開発
- ◇ 乾板自体の位置測定精度向上のための乾板作成のクオリティの向上
- ◇ 散乱の影響が少ない検出器の開発

ECCでの運動量測定の結果



ECCで測定した宇宙線ミュオンの運動量分布

ECCで測定された運動量分布は
期待される宇宙線ミュオンの運動量分布と合わない



BESS 実験による大気ミュオンフラックス測定結果 [3] を基に、
検出器面積および照射時間を掛けて期待事象数に換算した
宇宙線ミュオンの運動量分布

検出面積 : 125 cm²
照射時間 : 24 h

[3] M. Motoki et al., Precise Measurements of Atmospheric Muon Fluxes with the BESS Spectrometer

まとめ・展望

まとめ

- ◇ターゲット直下にスペクトロメータを設置するために、原子核乾板を用いた小型スペクトロメータの開発を行っている。
- ◇宇宙線を用いた性能評価実験を行い、現状では3GeV/cまで運動量の粒子での電荷識別精度を持つことがわかった。

展望

- ◇散乱の影響を考慮するためにECCを用いて運動量測定を行ったが、解析上の問題で運動量測定が達成できておらず、現在運動量解析に取り組んでいる。
- ◇今後、電荷識別可能な運動量領域を広げるために、解析・検出器作成の両面から改善を目指す。