

第2回地下宇宙若手研究会

@神戸大学 先端融合研究環統合研究拠点コンベンションホール

2021年11月26日



ニュートリノ-原子核相互作用モデルを参考にしたMeV領域のエネルギーをもつ暗黒物質と標的核子(原子核)の相互作用の議論

大島 仁 (東邦大理)

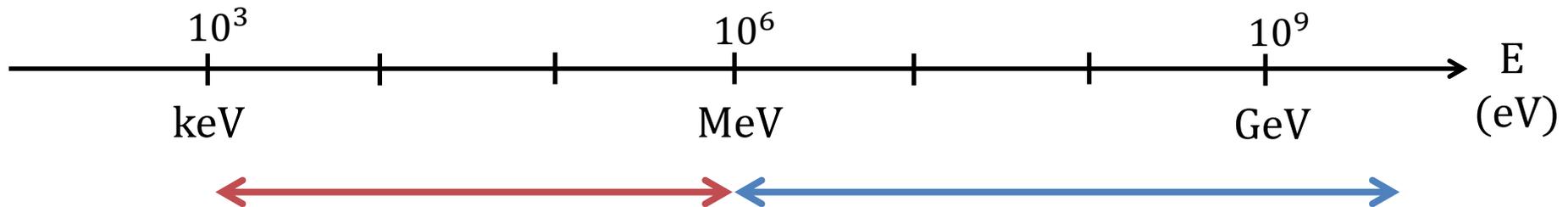
WIMPs-原子核(核子)相互作用のエネルギースケール

標準的なDM

$$v_{\chi,gal} \sim 10^{-3}c, E_{\chi} \sim m_{\chi}v_{\chi,gal}^2$$

$$m_{\chi} = 1 \text{ GeV} \text{ の場合, } E_{\chi} \sim 1 \text{ keV}$$

$$m_{\chi} = 100 \text{ GeV} \text{ の場合, } E_{\chi} \sim 100 \text{ keV}$$



WIMP-原子核相互作用

→ 弾性散乱

Cosmic-ray boosted DM

-原子核(核子) 相互作用

→ 弾性散乱？

MeVを超えるような場合も果たして弾性散乱として考えてよいのか？

弱い相互作用をするニュートリノの場合はどうなっている？

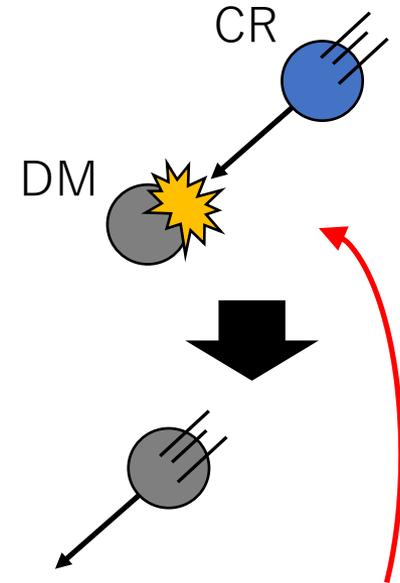
最近流行り(?)のCosmic-ray boosted dark matter

エネルギーをもった宇宙線が、天の川銀河に存在するDMに弾性衝突することでエネルギーをもったDMが生成される可能性が提案されている。

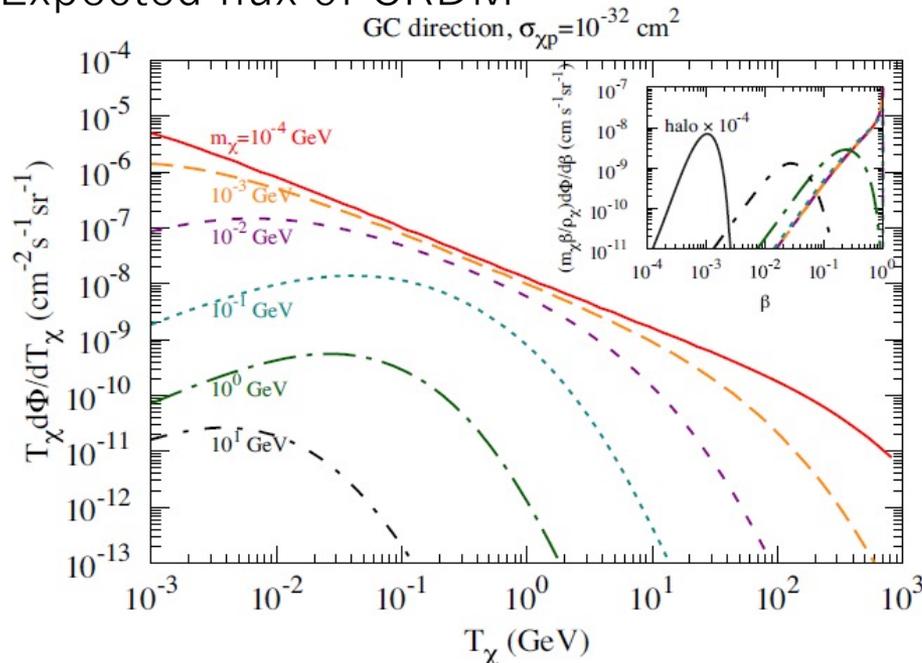
→ low mass DMの検出可能性を訴えている。

T. Bringmann, et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 171801 (2019).

S. Ge, et al., Phys. Rev. Lett. **126**, 091804 (2021).



Expected flux of CRDM



CR-DM相互作用において考慮されている形状因子

$$G_i(Q^2) = \frac{1}{\left(1 + \frac{Q^2}{\Lambda_i^2}\right)^2}$$

$$(\Lambda_p \cong 770 \text{ MeV}, \Lambda_{\text{He}} \cong 410 \text{ MeV})$$

MeV—GeVの高エネルギーでよく使われている双極子(dipole)型の形状因子

CR-DMしかり、CRDM-標的原子核(核子)の相互作用を考えたとき、そもそも弾性散乱なのか？

ニュートリノ・核子反応

荷電カレント反応 (CC)

準弾性散乱 (QE) N : 核子, A : 原子核,

$$\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu^{-} + p \quad X: \text{ハドロン}$$

共鳴 π 生成 (RES)

$$\nu_{\mu} + N \rightarrow \mu^{-} + N' + \pi$$

二核子反応(2p2h)

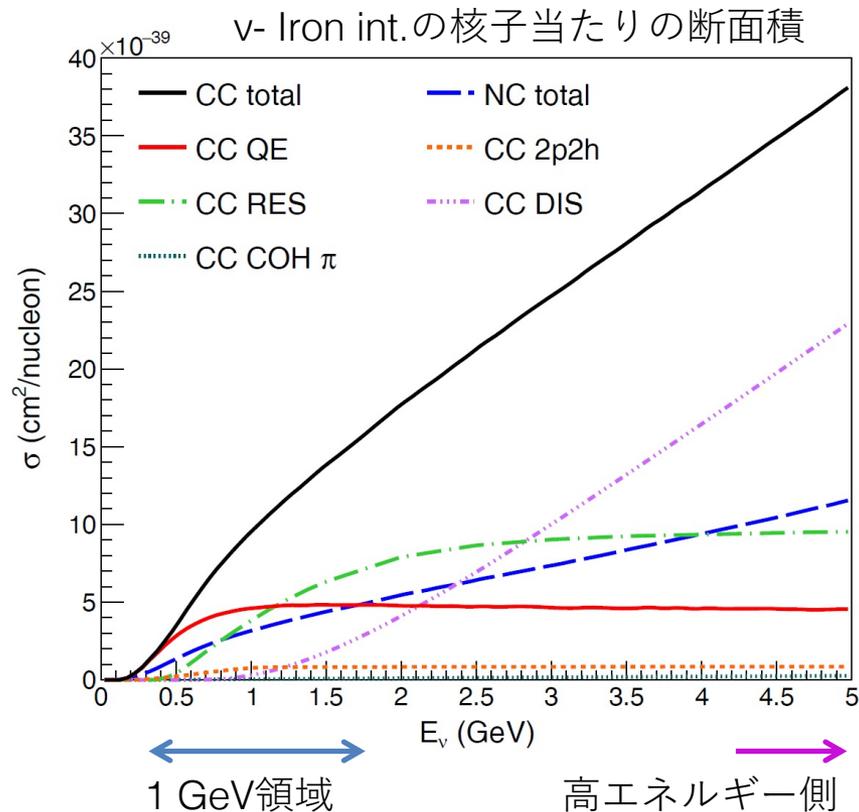
$$\nu_{\mu} + n + N \rightarrow \mu^{-} + p + N$$

深非弾性散乱 (DIS)

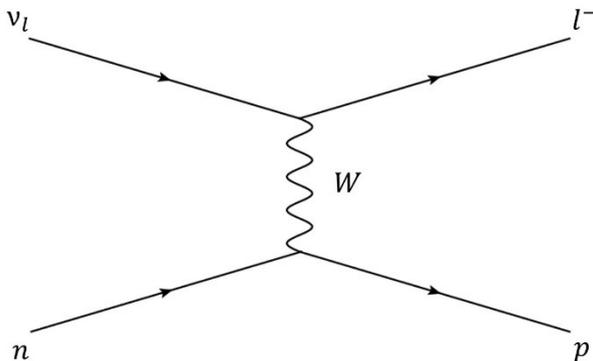
$$\nu_{\mu} + N \rightarrow \mu^{-} + N' + X$$

コヒーレント π 生成 (COH π)

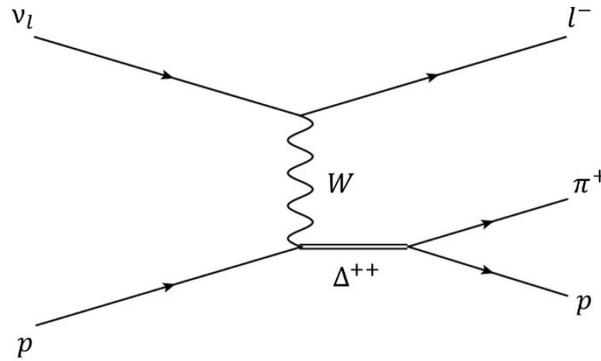
$$\nu_{\mu} + A \rightarrow \mu^{-} + \pi^{+} + A$$



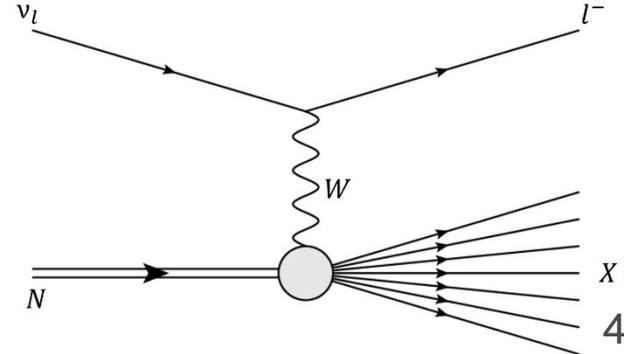
荷電カレント準弾性散乱



荷電カレント共鳴 π 生成



深非弾性散乱



荷電カレント準弾性散乱 (歴史)

- Lewelly-Smithモデルによって反応断面積を記述している。

$$\frac{d\sigma}{dQ^2} = \frac{G_F^2 M^2 \cos^2 \theta_c}{8\pi E_\nu^2} \left[A(Q^2) \mp B(Q^2) \frac{s-u}{M^2} + C(Q^2) \frac{(s-u)^2}{M^4} \right]$$

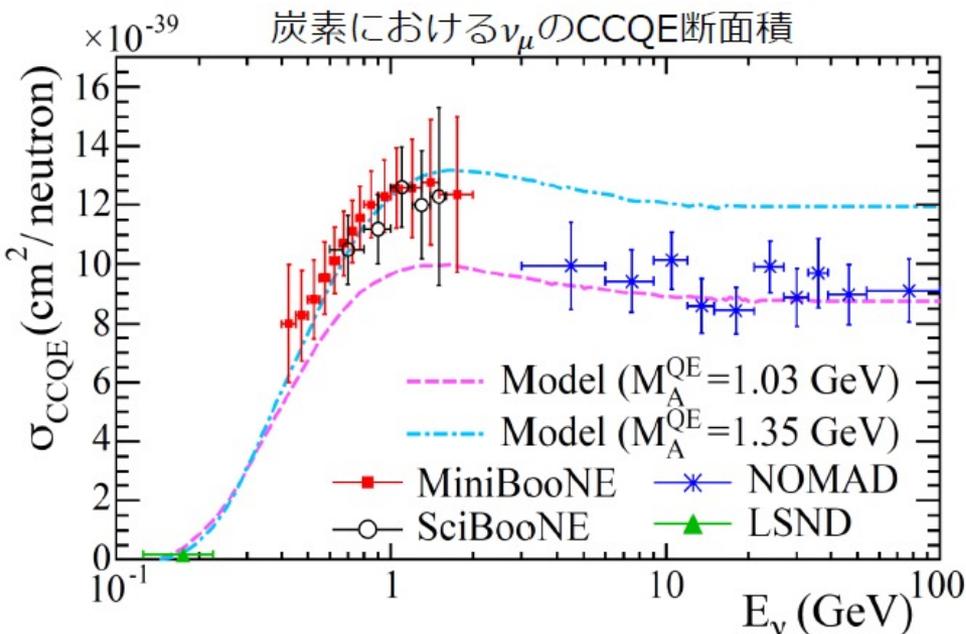
- 重水素を用いた泡箱による実験結果を上手く説明できた。
- 一方で、近年の実験(炭素, 水標的など)の測定結果とは乖離が見られた。

形状因子 (dipole型)

$$F_A(Q^2) = \frac{1}{\left(1 + \frac{Q^2}{M_A^{QE2}}\right)^2}$$

$$G_E^V(Q^2) = \frac{1}{\left(1 + \frac{Q^2}{M_V^{QE2}}\right)^2}$$

$$G_M^V(Q^2) = \frac{1 + \xi}{\left(1 + \frac{Q^2}{M_V^{QE2}}\right)^2}$$



泡箱実験(重水標的) : $M_A^{\text{QE}} = 1.03 \text{ GeV}/c^2$

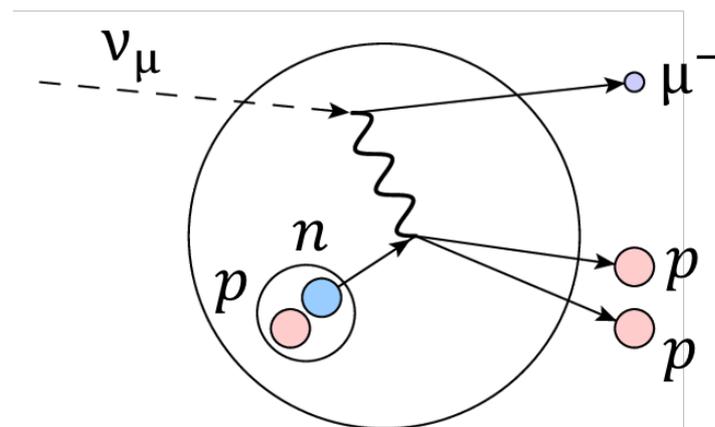
MiniBooNE(炭素標的) : $M_A^{\text{QE}} = 1.35 \text{ GeV}/c^2$

K2K(水標的) : $M_A^{\text{QE}} = 1.20 \text{ GeV}/c^2$

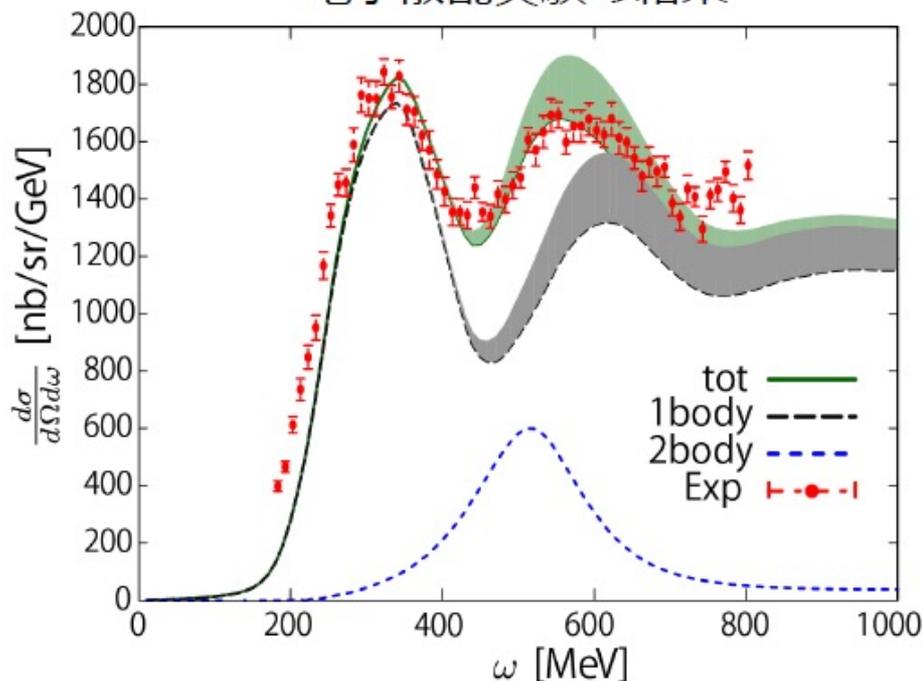
→ これらの測定結果の矛盾は、標的原子核の差から来ていると考えられている。

複数核子反応 (2p2h反応)

- 電子散乱実験によって原子核中の核子間に相関があることがわかった。
- ニュートリノで2p2h反応の確かな測定結果はない
- 原子核モデルと2p2h反応を考慮すると MiniBooNEの測定結果を説明できる。

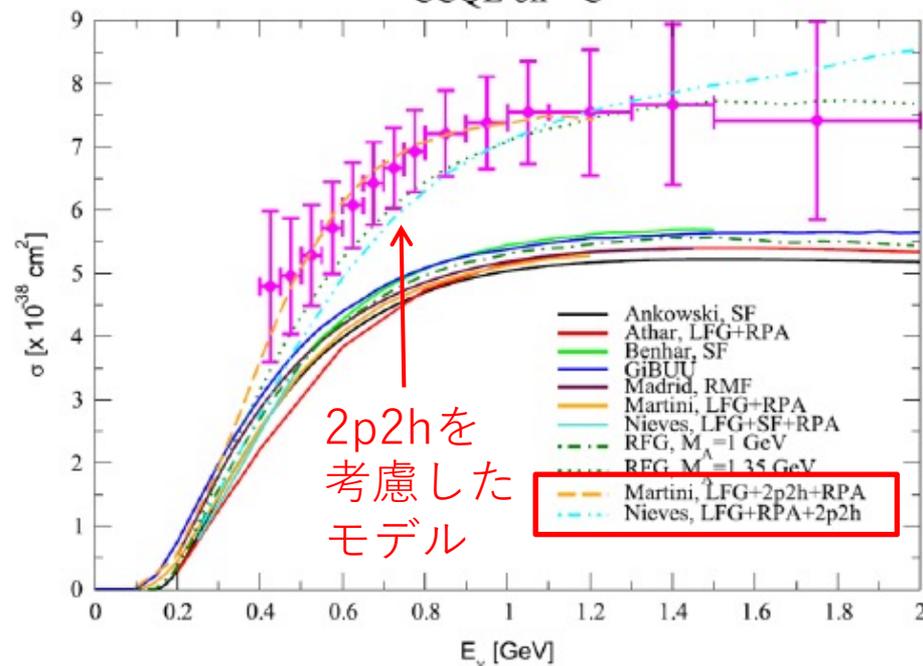


電子散乱実験の結果



T. Kikawa, Shin-gakujutu kick-off meeting (2018).

CCQE on ^{12}C



L. Alvarez-Ruso, et al., New J. Phys. 16, 075015 (2014).

ニュートリノ反応の記述

反応断面積

断面積はレプトニックテンソル $L^{\mu\nu}$ と
ハドロニックテンソル $W_{\mu\nu}$ の積で表される。

$$d\sigma \sim L^{\mu\nu} W_{\mu\nu}$$

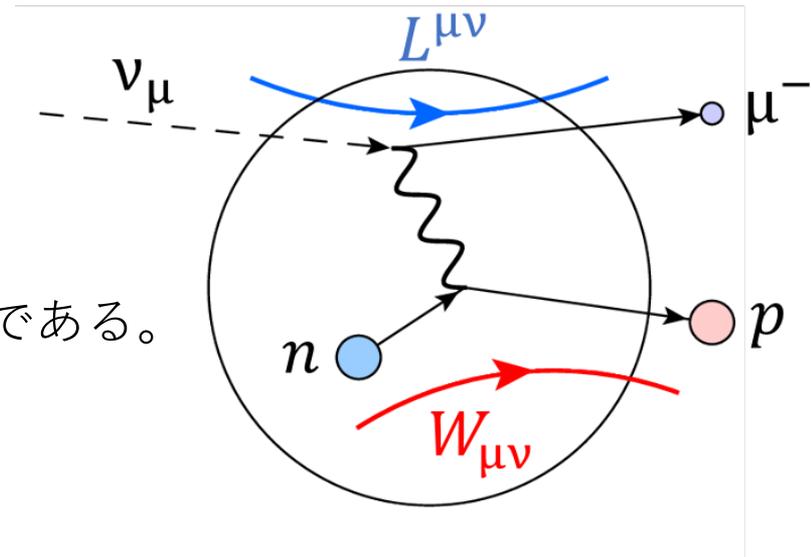
レプトニックテンソル

→ 素粒子標準模型で表されるため記述が容易である。

ハドロニックテンソル

→ 原子核内の物理が入るため記述が難しい。

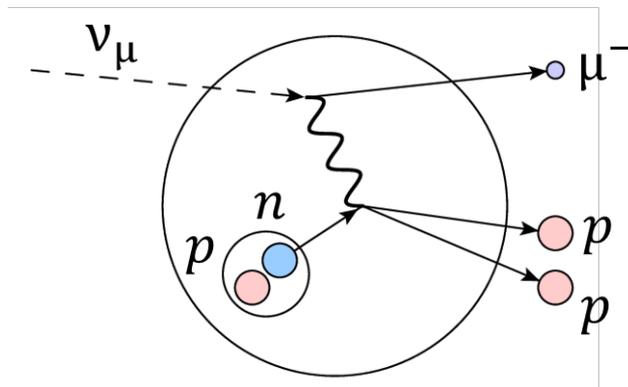
反応モデルによって依存する。



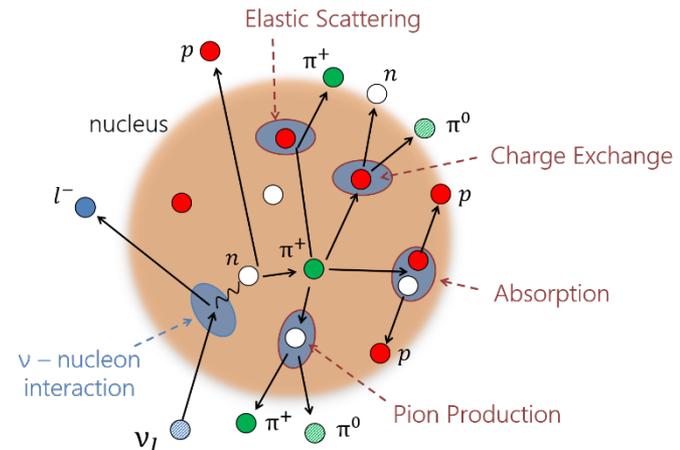
核内効果

断面積の記述や最終的な観測量に影響する。

- 核内モデル
 - 核子の初期状態
- 核子間の相関
 - 2p2h反応
- 終状態反応 (FSI)
 - 核内における再反応



2p2h interaction



FSI (Final state interaction)

本研究の目的

では、なぜなかなか理解が進まないのか？

- ・ 既存のニュートリノ検出器の空間分解能がmm—cmオーダーである
- ・ 陽子運動量閾値が高い (400—700 MeV/c)

ことが原因の一つである。

核内効果を含めた1 GeV領域のニュートリノ反応を理解するためには、陽子・荷電 π 中間子を広角かつ低運動量検出閾値で検出し、測定することが重要である。

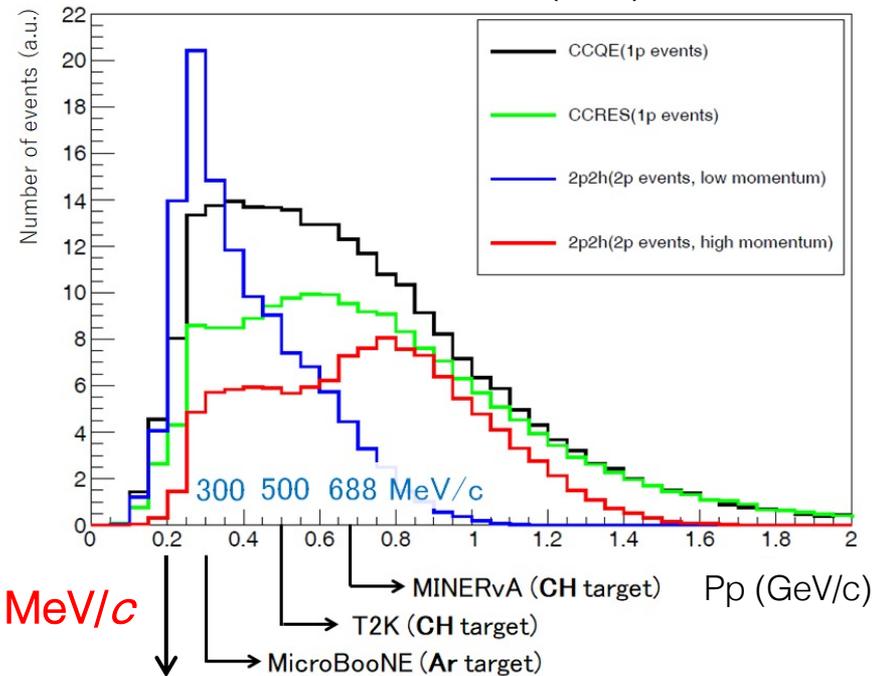


そこで、

- ・ 低運動量閾値
- ・ サブミクロンの分解能
- ・ 広い角度アクセプタンス

をもつエマルジョンチェンバーを用いた。

陽子の運動量分布(MC)

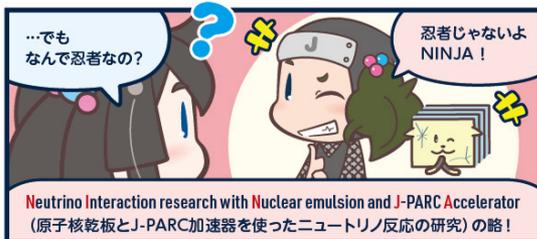
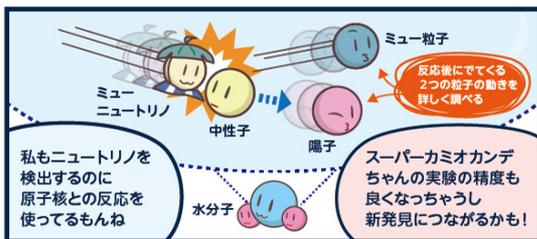


Emulsion Cloud Chamber (Fe, H₂O target)

NINJA experiment

Neutrino Interaction research with Nuclear emulsion and J-PARC Accelerator

J-PARC に NINJA 現る



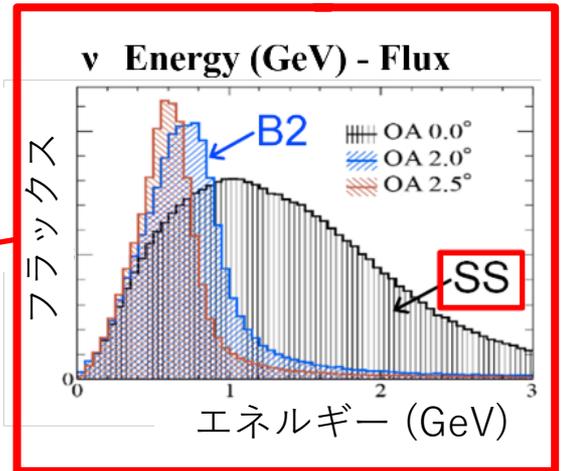
©higgstan.com

原子核乾板検出器を用いたニュートリノ反応の測定を行う。
→ ニュートリノ・原子核反応をsub- μm の精度で研究できる。
→ 様々な標的物質 (Fe, H₂O, C, etc.)を使用できる。

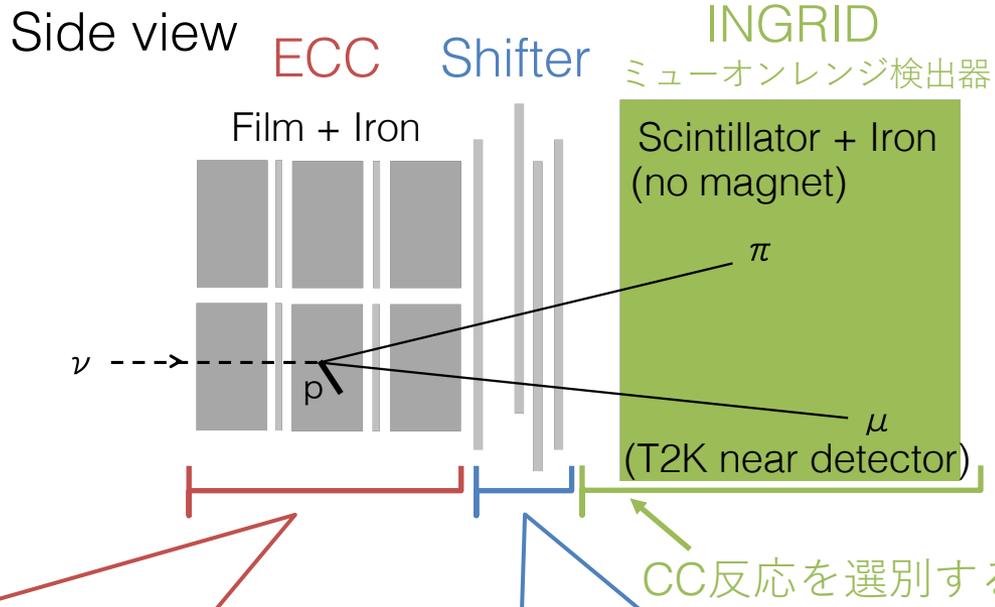
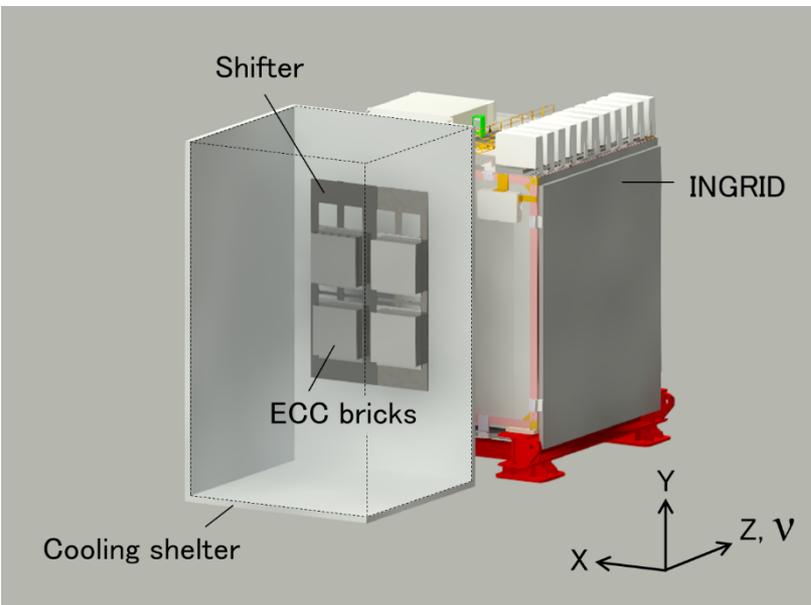
- A) 2kg iron target run (2015, $\bar{\nu}$: 1.38×10^{20} POT) 本トーク
- B) 65kg iron target run (2016, ν : 0.4×10^{20} POT, $\bar{\nu}$: 3.5×10^{20} POT)
- 3kg water target run (2017-2018, $\bar{\nu}$: 7.0×10^{20} POT)
- 9kg heavy water target run (2021, ν : 1.78×10^{20} POT)
- C) 75kg water target run (2019-2020, ν : 4.8×10^{20} POT)



ニュートリノビームライン



NINJA 65 kg 鉄標的実験 (本照射実験) : 検出器



Emulsion Cloud Chamber (ECC)

ν -iron 反応の解析を行う。

原子核乾板 (鉄プレート) :
25cm × 25cm × 0.03 (0.05) cm

ECCブリック :
23 films + 22 iron plates

Total :
12 ECC bricks (264 iron plates, 65 kg)

原子核乾板にデッドタイムはないが、時間分解能もない。

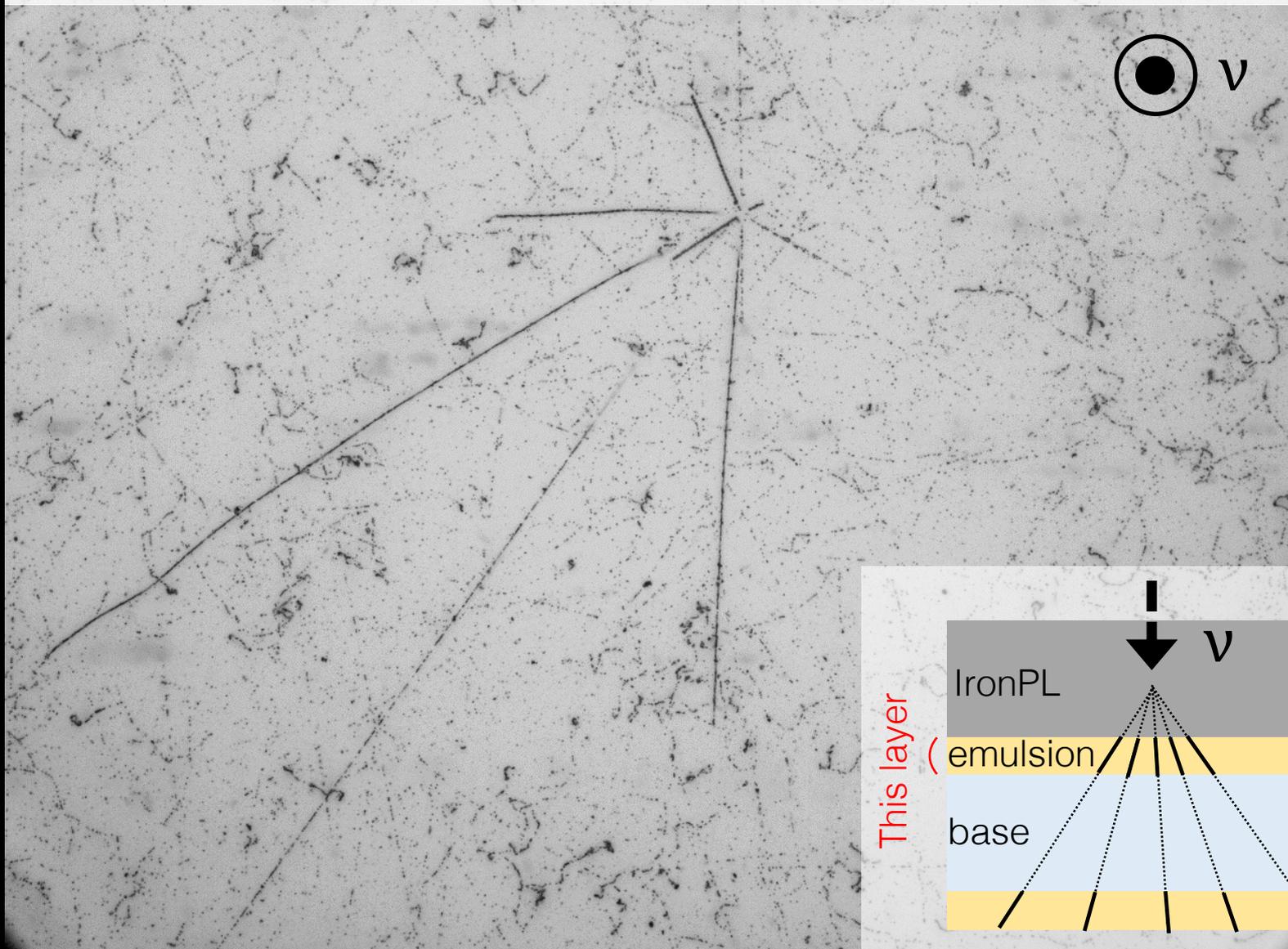
Shifter

ECCトラックに時間情報を付与する。

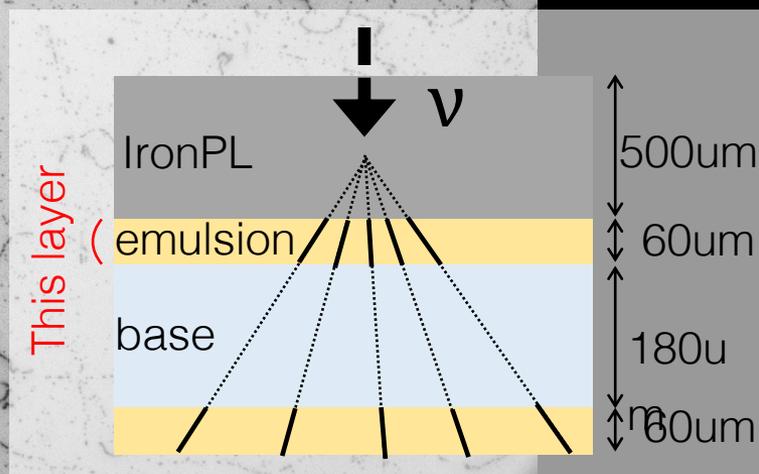
ニュートリノ・鉄荷電カレント反応の荷電粒子のトラックの顕微鏡画像

Emulsion layer image by microscope system (FTS @ Toho Univ.)

281.6 μm



354.6 μm



モンテカルロシミュレーション

(1) ニュートリノビーム :

JNUBEAM 13av6.1

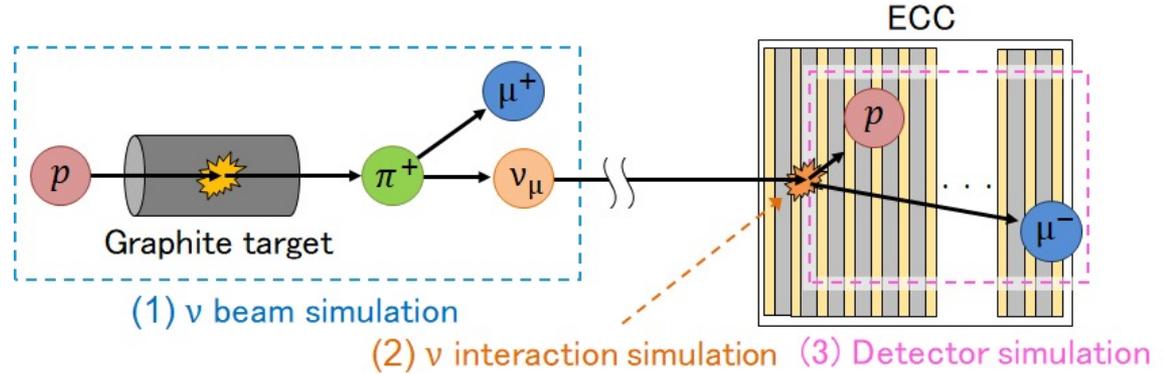
(2) ニュートリノ反応 :

NEUT 5.4.0

(3) 検出器応答 :

GEANT4 (QGSP BERT physics list) (normalize : POT value & target mass)

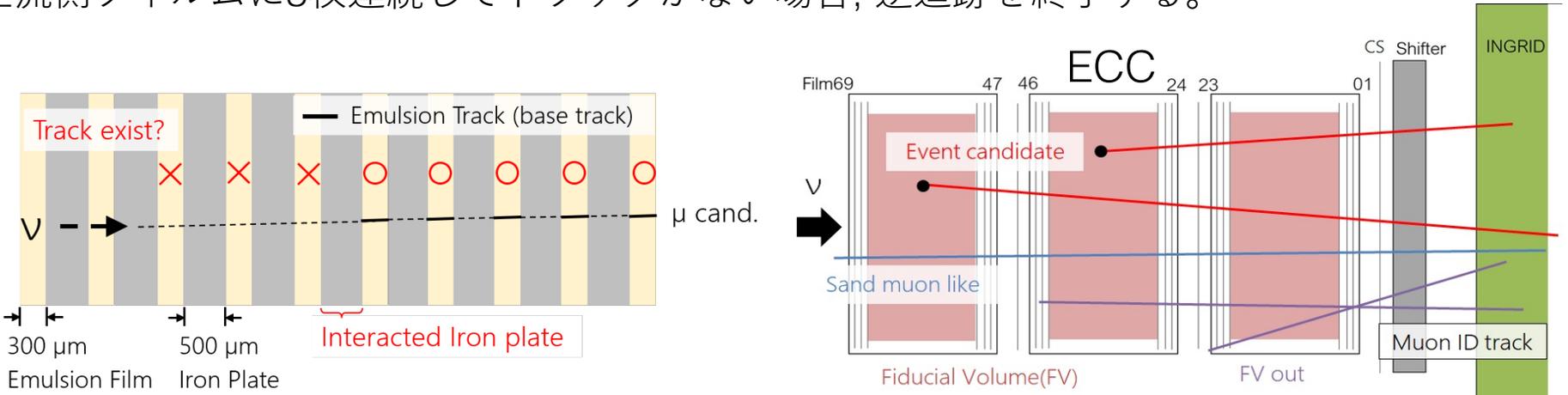
ニュートリノ反応のモデル (NEUT)



Interaction	Model
CC Quasi Elastic scattering	1p1h model by Nieves <i>et al.</i> LFG with RPA correction ($M_A^{QE} = 1.05 \text{ GeV}/c^2$)
2p2h	2p2h model by Nieves <i>et al.</i>
Resonance	Model described by Rein-Sehgal ($M_A^{1\pi} = 0.95 \text{ GeV}/c^2$)
Coherent π	Model described by Rein-Sehgal
Deep Inelastic Scattering	GRV98 PDF with Bodek and Yang correction
Final state interaction	Semi-classical intra-nuclear cascade model

ニュートリノ反応事象の検出と再構成

スキャンバック法：ミューオンIDトラックをECC上流側に逆追跡して反応点を検出する手法。
上流側フィルムに3枚連続してトラックがない場合、逆追跡を終了する。

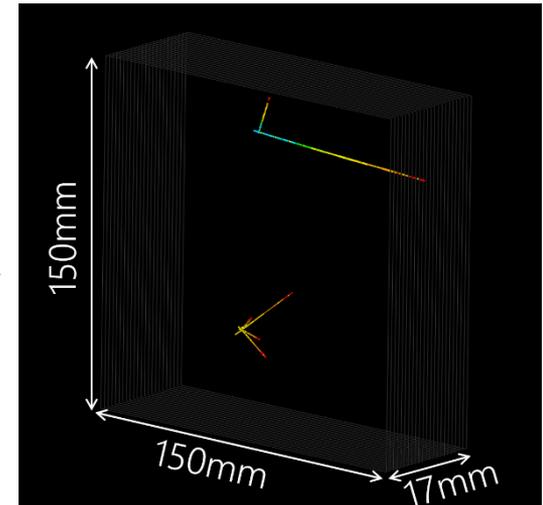
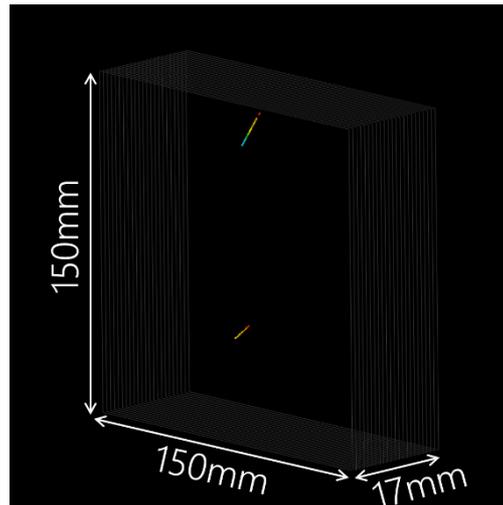
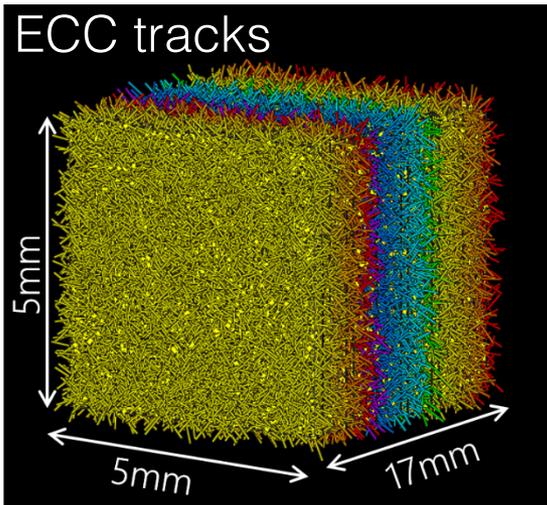


$\nu + \bar{\nu}$ int.(CC+NC) + cosmic-ray

ν CC int. μ cand.

ν CC int. events

ECC tracks



ν CC 反応の検出 (シフター & INGRID)
時間情報付与 + ミューオンID

ニュートリノ反応事象の再構成
二次粒子探索

フラックス平均断面積測定およびミュオンの測定

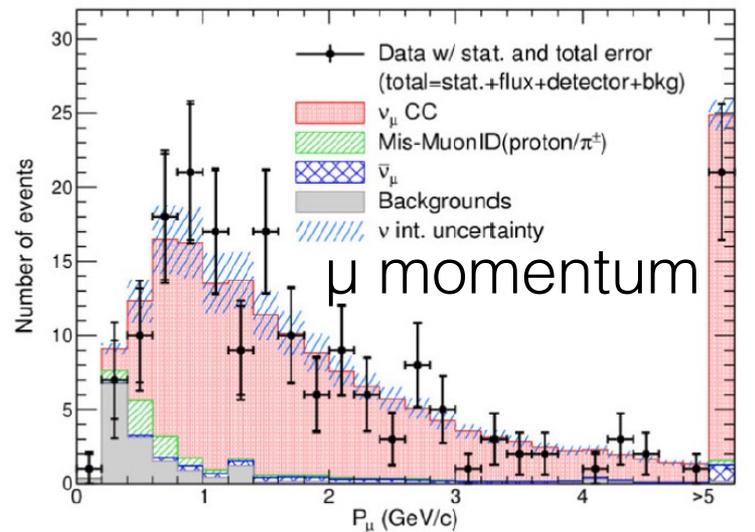
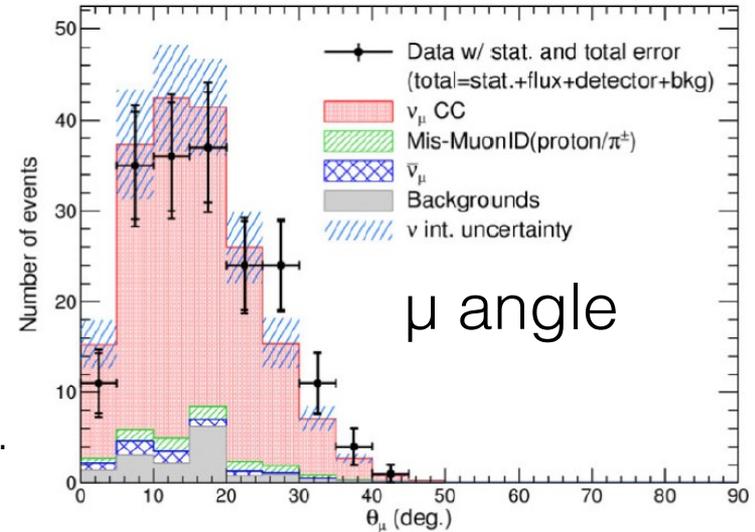
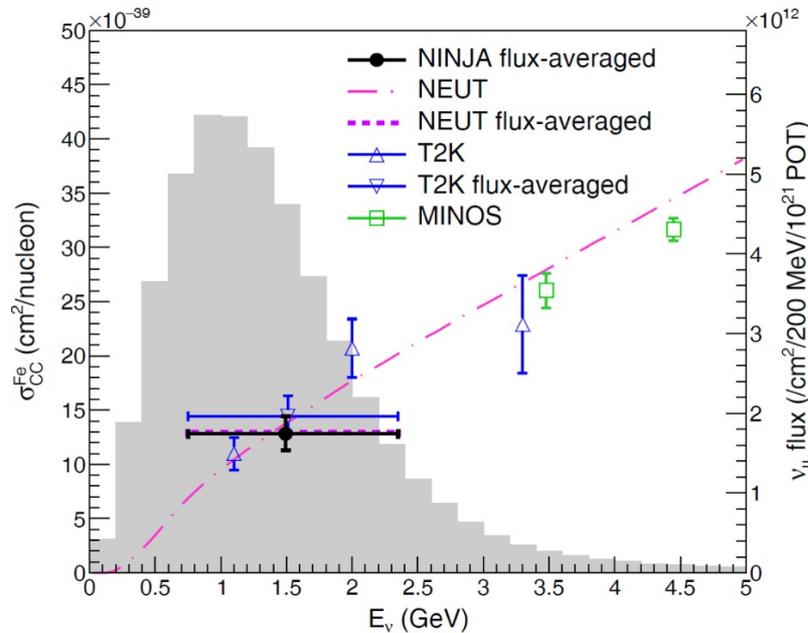
✓ ミューオンの運動学的測定
放出角、運動量

✓ フラックス平均断面積の測定結果

$$\sigma_{CC}^{Fe} = (1.28 \pm 0.11(\text{stat.})_{-0.11}^{+0.12}(\text{syst.})) \times 10^{-38} \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{CC ps}^{Fe} = (0.84 \pm 0.07(\text{stat.})_{-0.06}^{+0.07}(\text{syst.})) \times 10^{-38} \text{ cm}^2$$

PTEP 2021, 033C01 (2021).



これらの断面積の測定結果は、本照射実験の検出器ならびにデータ解析の信頼性を実証している。次のステップとして、ニュートリノ反応由来の陽子・荷電パイ中間子の**本数・放出角・運動量**を測定した。

陽子と荷電パイ中間子の測定

✓多重度分布

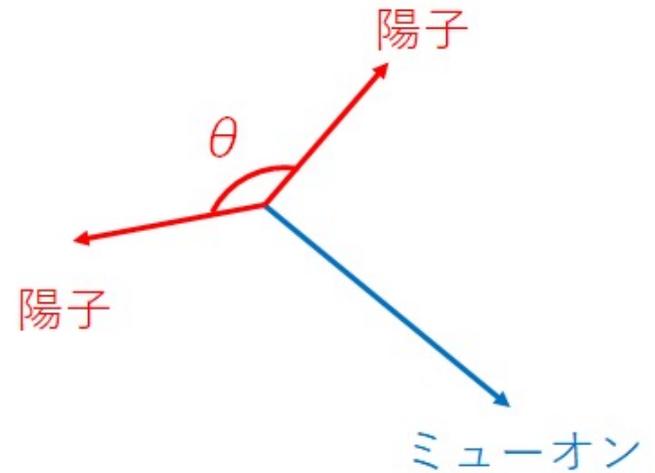
✓運動学的測定（放出角、運動量）

→ 200 MeV/c の低運動量陽子の測定に初めて成功した！

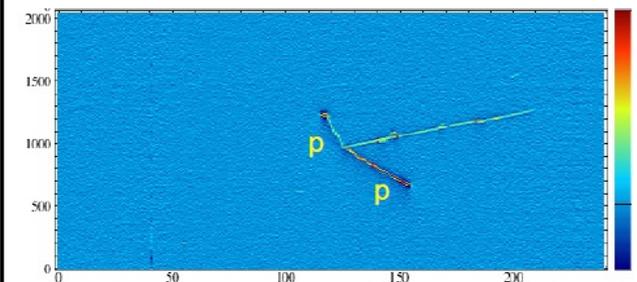
論文公開前のため非公開

CC0 π 2p事象の陽子間の開き角分布

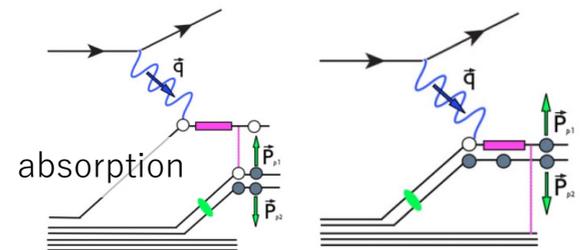
論文公開前のため非公開



ArgoNeuT



Back-to-backの陽子の放出機構：
核子ペアとのCC RES 0π 反応



←
Back-to-back

→
Same direction

まとめ

- ニュートリノ反応の研究
 - 原子核乾板を用いて1GeV領域のニュートリノ反応の研究を行っている。
 - ニュートリノ・鉄反応由来の陽子を200 MeV/cの運動量閾値で検出、測定することに成功した。
 - 原子核の効果を含めたニュートリノ反応を詳細に理解するためのデータとなる。
- MeV領域のDM-原子核(核子)相互作用について
 - CRDMのpaperでは弾性散乱、双極子型形状因子を仮定しているけど、それはよいのか？
 - 数百MeV以上になったら、原子核の効果も加わって理解が難しくなる？

ご清聴ありがとうございました。

Backup

電磁形状因子 (Vector form factor)

核子の電荷および磁気モーメントの空間分布を表している。

電子・核子散乱実験から決定されている。四元運動量が大きい領域 ($Q^2 > 2 \text{ GeV}/c^2$) ではdipole型からの乖離が問題になっている。

$\xi : 0 \rightarrow 1$,

$Q^2 : 0 \rightarrow \infty$

$Q^2 \text{ (GeV}/c^2)^2$

$$G_E^V(Q^2) = \frac{1}{\left(1 + \frac{Q^2}{M_V^{QE 2}}\right)^2}$$

$$G_M^V(Q^2) = \frac{1 + \xi}{\left(1 + \frac{Q^2}{M_V^{QE 2}}\right)^2}$$

Vector mass

$$M_V^{QE} = 0.84 \text{ GeV}/c^2$$

Dipole型関数に対する比

