

ニュートリノフラックスと
ニュートリノ原子核反応における
ミューオン生成断面積

大阪大学

村田知也 佐藤透

contents

- Introduction
- Maximum Entropy Method
- Neutrino Flux, Neutrino-nucleus cross section,
Muon energy distribution
- Results
- Summary

ニュートリノ振動とフラックス

ニュートリノ振動パラメタ

$$\sin^2(2\theta_{12}) = 0.875 \pm 0.024$$

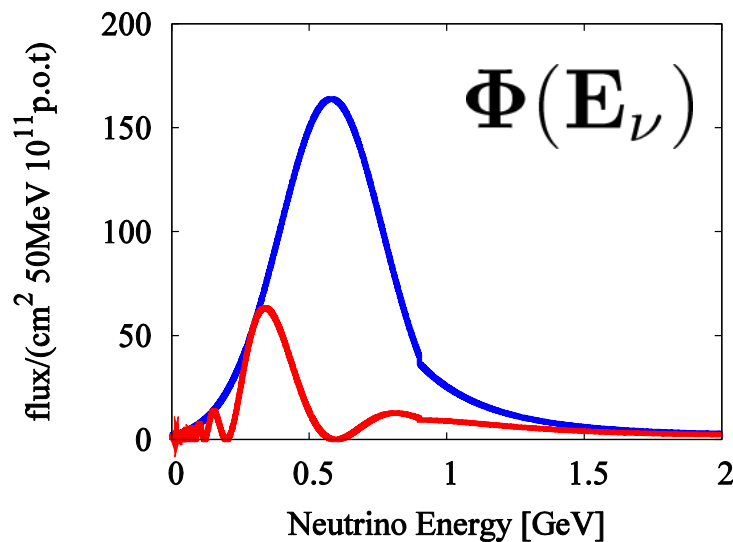
$$\sin^2(2\theta_{23}) > 0.95$$

$$\sin^2(2\theta_{13}) = 0.095 \pm 0.010$$

$$\delta(\text{CP}) = ??$$

PDG 2103

ニュートリノフラックス(例 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$)



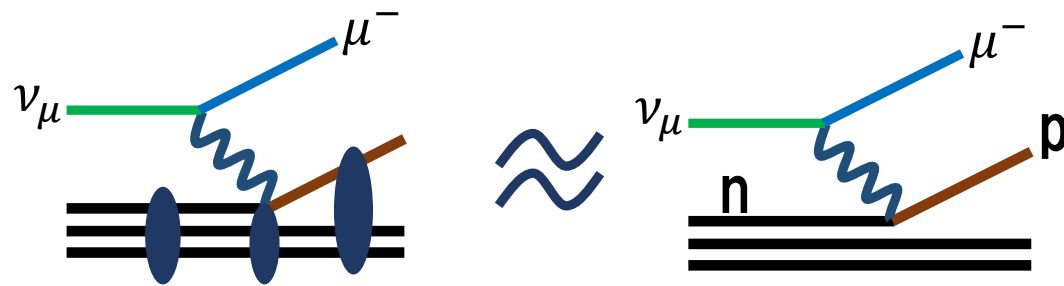
two flavor oscillation

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{23}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]} \right)$$

- without oscillation
- with oscillation

ニュートリノフラックスの抽出

原子核におけるQuasi Free過程



$$E_{\nu}^{\text{QF}}(E_{\mu}, \theta_{\mu}) = \frac{E_{\mu} - m_{\mu}^2/(2M)}{1 - (E_{\mu} - P_{\mu} \cos \theta)/M}$$

原子核多体効果: binding, correlation (2P2H), π -production/absorption

→ $\left[\begin{array}{l} E_{\nu}^{\text{QF}}(E_{\mu}, \theta_{\mu}) \neq E_{\nu} \\ \text{QF can't be separated.} \end{array} \right.$

Inclusive reaction

$$\sigma(\nu_{\mu} + \mathbf{A} \rightarrow \mu^{-} + \mathbf{X}) \implies \Phi(E_{\nu})$$

本研究の目的

観測量: ニュートリノフラックスで平均化された断面積
(ミュオンのエネルギー、角度分布)

Inclusive 反応断面積
の理論値

$$\left\langle \frac{d^2\sigma}{d\Omega_\mu dE_\mu} \right\rangle = \int dE_\nu \frac{d^2\sigma}{d\Omega_\mu dE_\mu} \Phi(E_\nu) \rightarrow \text{ニュートリノフラックス}$$

inclusive cross section の情報のみを用いて、neutrino flux を再構成(逆問題)

本研究では $\left\langle \frac{d^2\sigma}{d\Omega_\mu dE_\mu} \right\rangle$ と $\frac{d^2\sigma}{d\Omega_\mu dE_\mu}$ を既知と仮定し、最大エントロピー法を用いて $\Phi(E_\nu)$ を再構成する可能性を検討する。

Maximum Entropy Method

実験データ \bar{G} 、事前知識 I があるときに、ニュートリノフラックスが $\Phi(E_\nu)$ となる確率 $P[\Phi|\bar{G}, I]$ が最大となるような $\Phi(E_\nu)$ を求める。

実験データ $\bar{G} : (\bar{G}_l, \sigma_l)$

事前知識 $I : (m_i)$

$$\begin{aligned} P[\Phi|\bar{G}, I] &\propto P[\bar{G}|\Phi, I]P[\Phi|I] \\ &= \exp\left[-\left(\frac{1}{2}\chi^2 - \alpha S\right)\right] \end{aligned}$$

これを最小にするような $\Phi(E_\nu)$ を探す

$$\chi^2 = \sum_l \left(\frac{\bar{G}_l - G_l}{\sigma_l} \right)^2$$

$$S = \sum_i \left(\Phi_i - m_i - \Phi_i \ln \frac{\Phi_i}{m_i} \right)$$

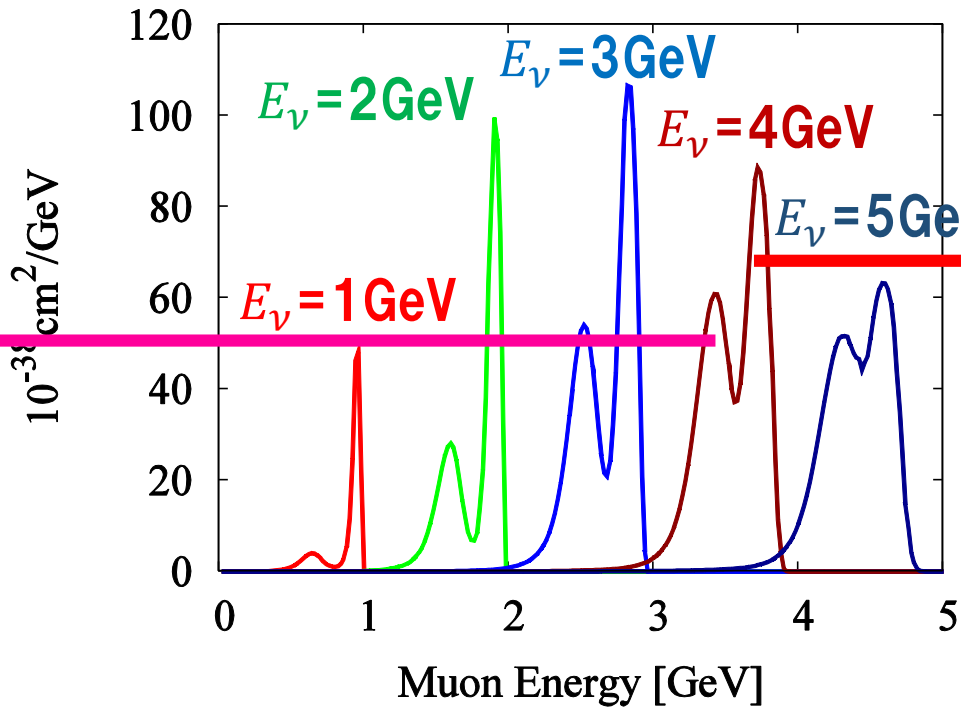
ここにフラックスについての事前情報を入れることができる
(Default Model)

Neutrino Flux, Neutrino-nucleus cross section, Muon energy distribution

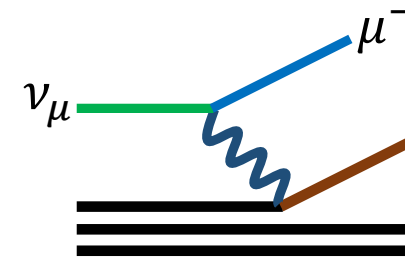
MEM

$$\left\langle \frac{d^2\sigma}{d\Omega_\mu dE_\mu} \right\rangle = \int dE_\nu \frac{d^2\sigma}{d\Omega_\mu dE_\mu} \Phi(\mathbf{E}_\nu)$$

Set up (Inclusive cross section)



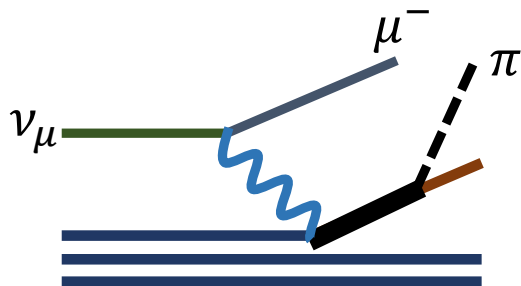
quasi-free



スペクトル関数

O.Benhar et al. PRD72 053005

pion-production



スペクトル関数

+

dynamical model

B.Szczerbinska , T.Sato , K.Kubodera , T.-S.H.Lee
PLB649 132

T.Sato , D.Uno , T.-S.H.Lee
PRC67 065201

Set Up (Neutrino flux)

Neutrino Flux at Near Detector

Phys. Rev. D 87, 012001
(2013) 34

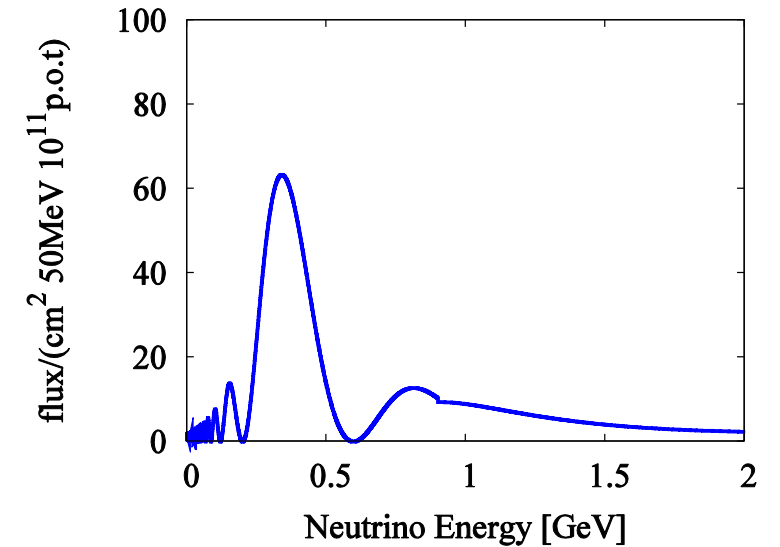
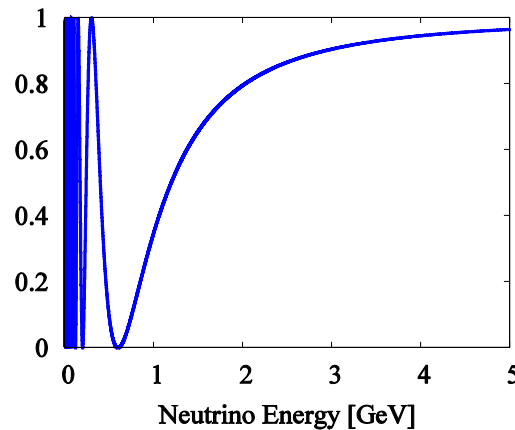
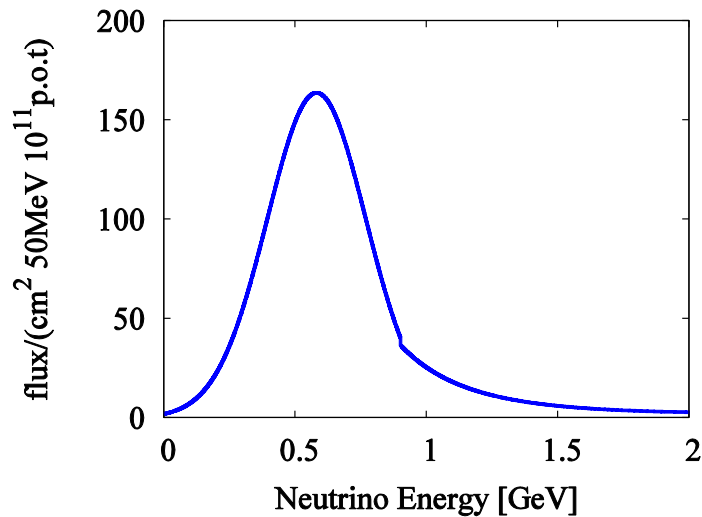
two flavor neutrino oscillation

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{23}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]} \right)$$

$$\Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{eV}^2$$

$$L = 295 \text{km} \quad \sin^2 2\theta_{23} = 1.0$$

‘ Neutrino Flux ’
at Super Kamiokande



Neutrino Flux, Neutrino-nucleus cross section, Muon energy distribution

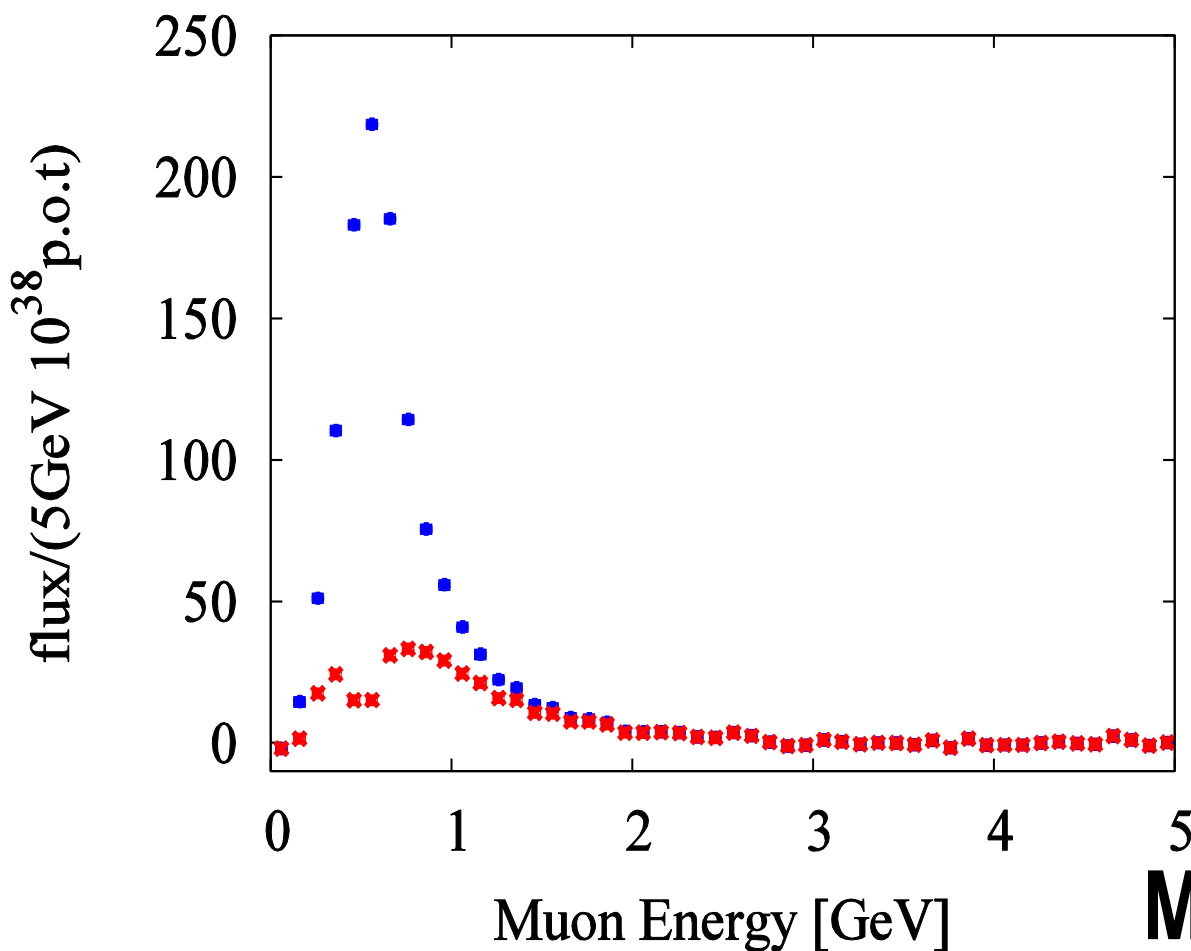
MEM

$$\left\langle \frac{d^2\sigma}{d\Omega_\mu dE_\mu} \right\rangle = \int dE_\nu \underbrace{\frac{d^2\sigma}{d\Omega_\mu dE_\mu}}_{\text{MEM}} \Phi(\mathbf{E}_\nu)$$

Result $\theta = 30^\circ$ with(out) oscillation

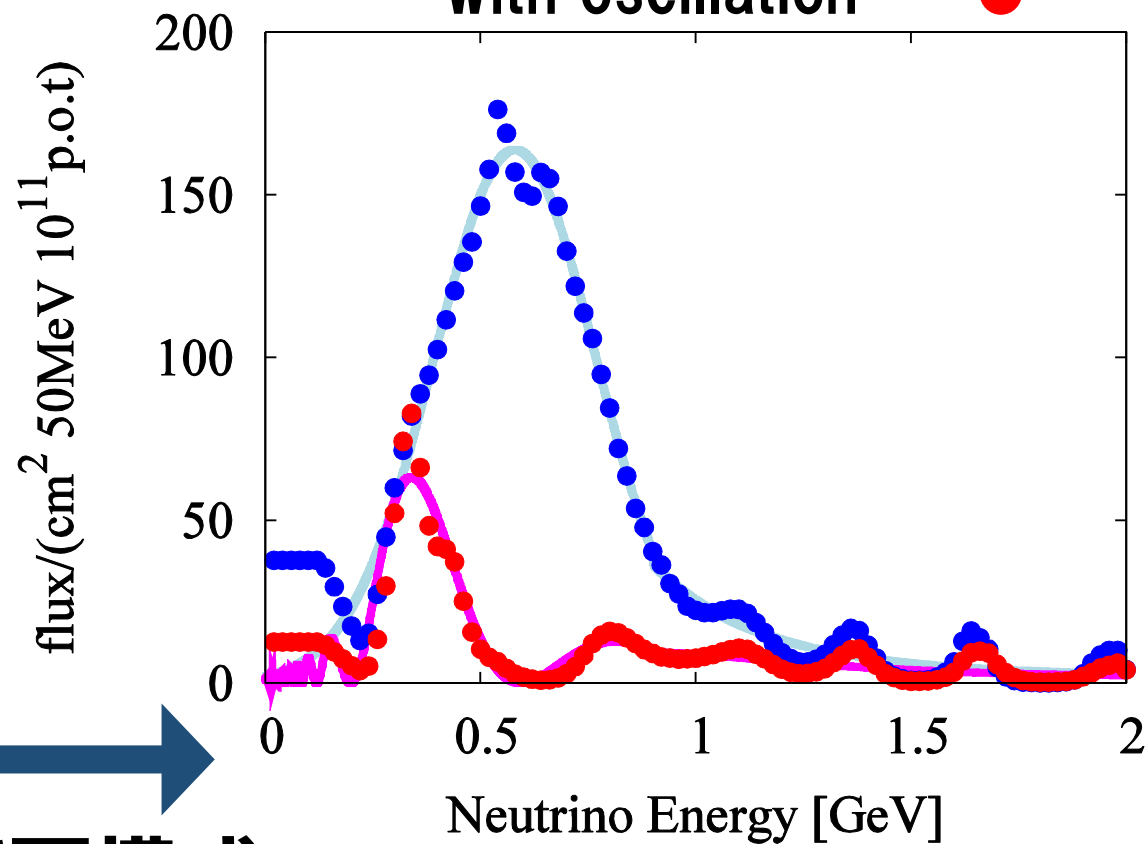
模擬 '実験データ'

Without oscillation ●
With oscillation ×



再構成したニュートリノフラックス

Without oscillation ●
With oscillation ●

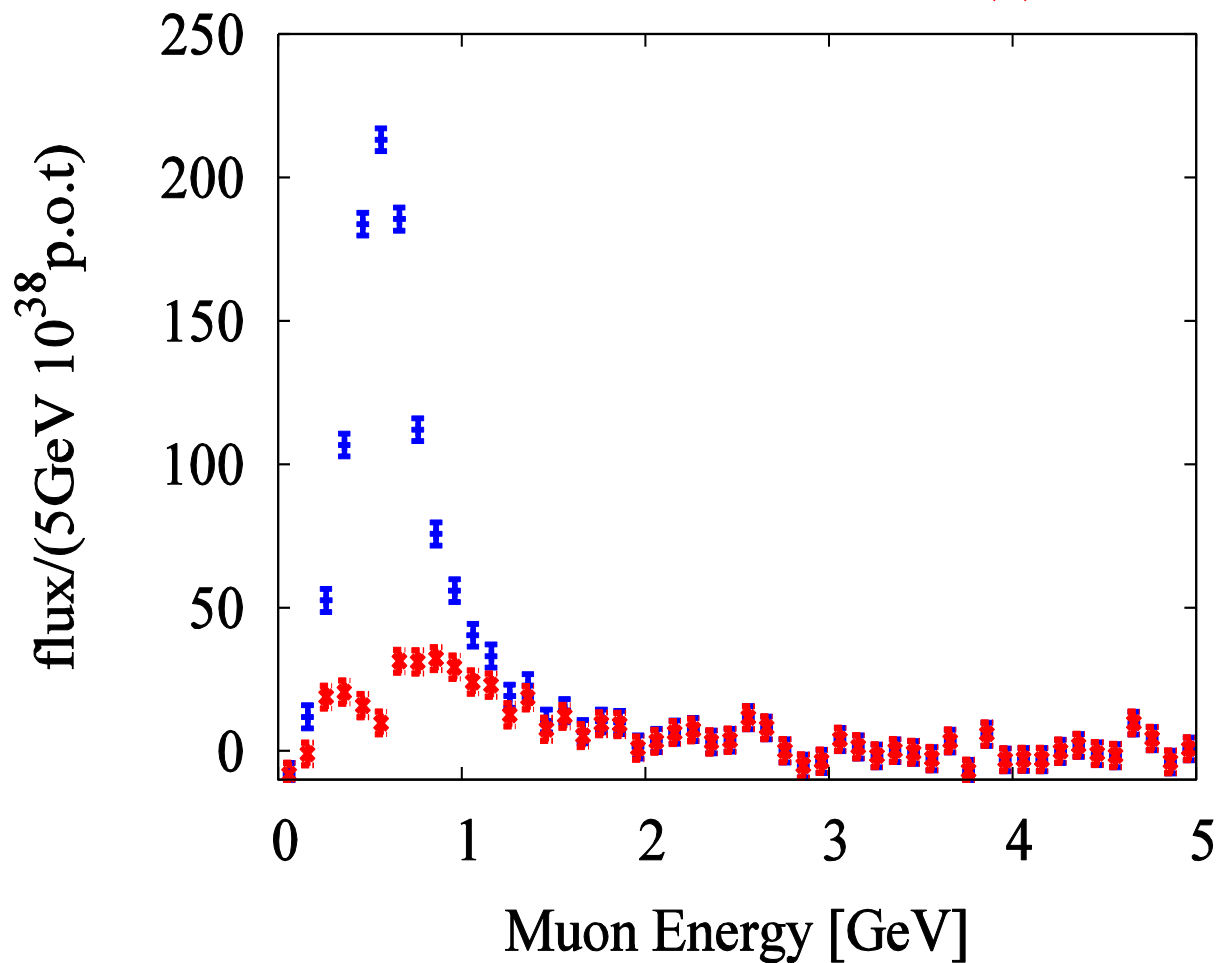


MEMで再構成

Result $\theta = 30^\circ$ with(out) oscillation

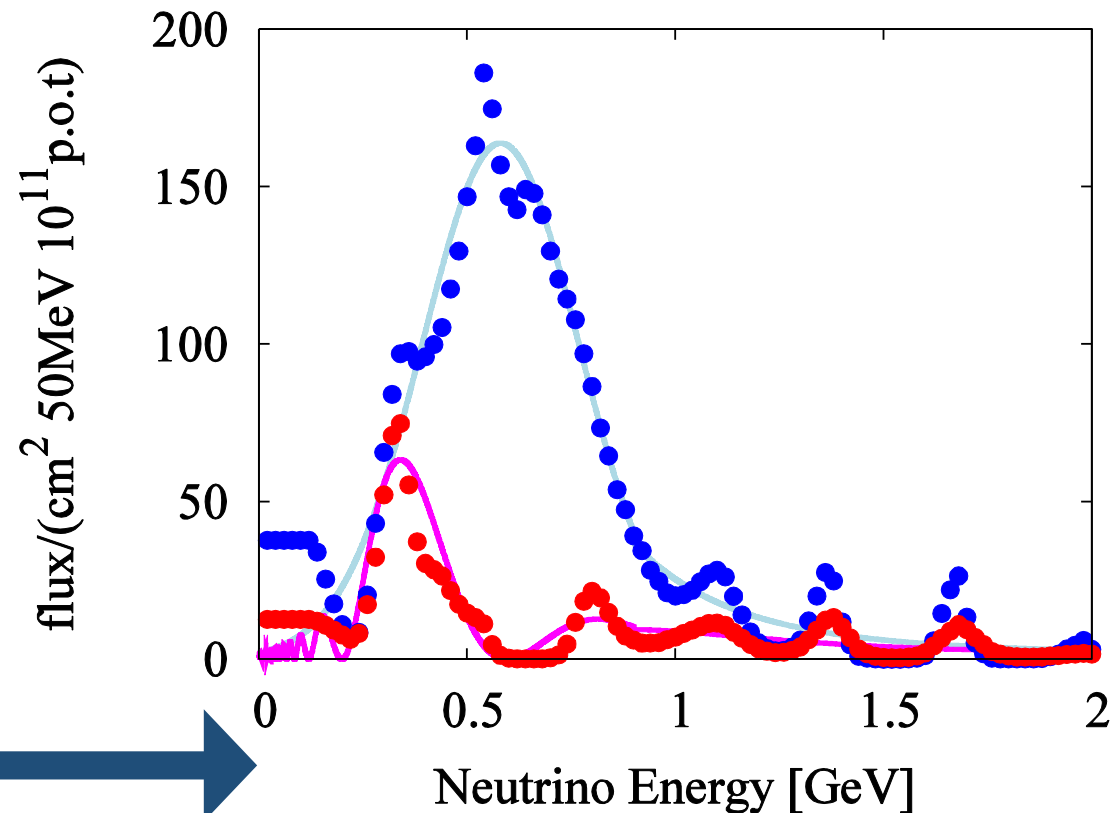
模擬 '実験データ'

Without oscillation ●
With oscillation ×



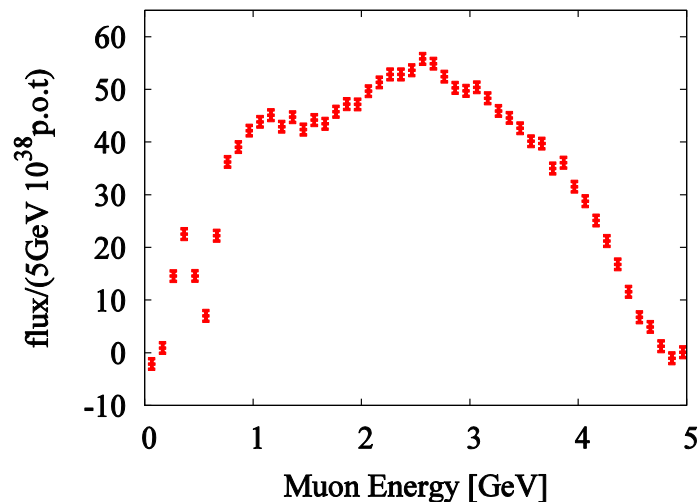
再構成したニュートリノフラックス

Without oscillation ●
With oscillation ●

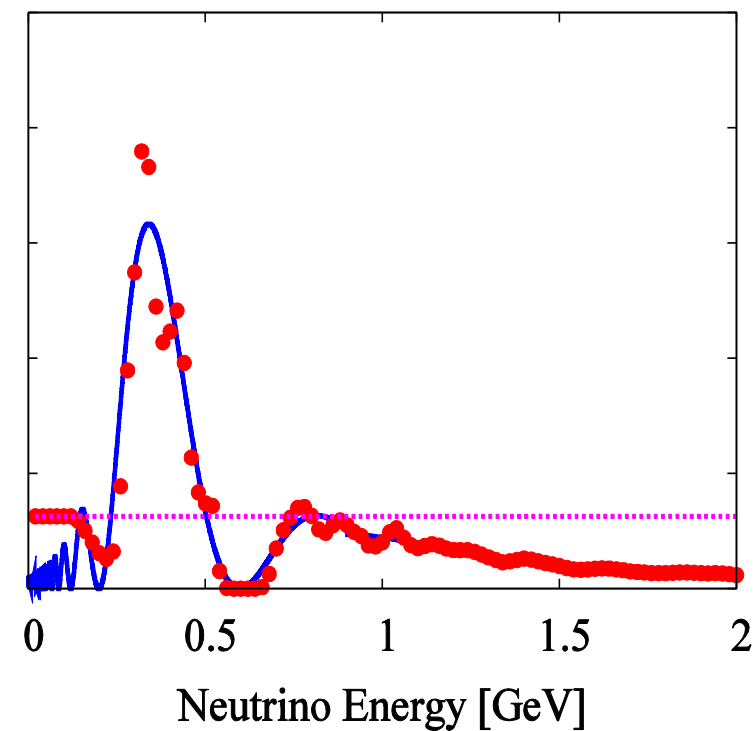
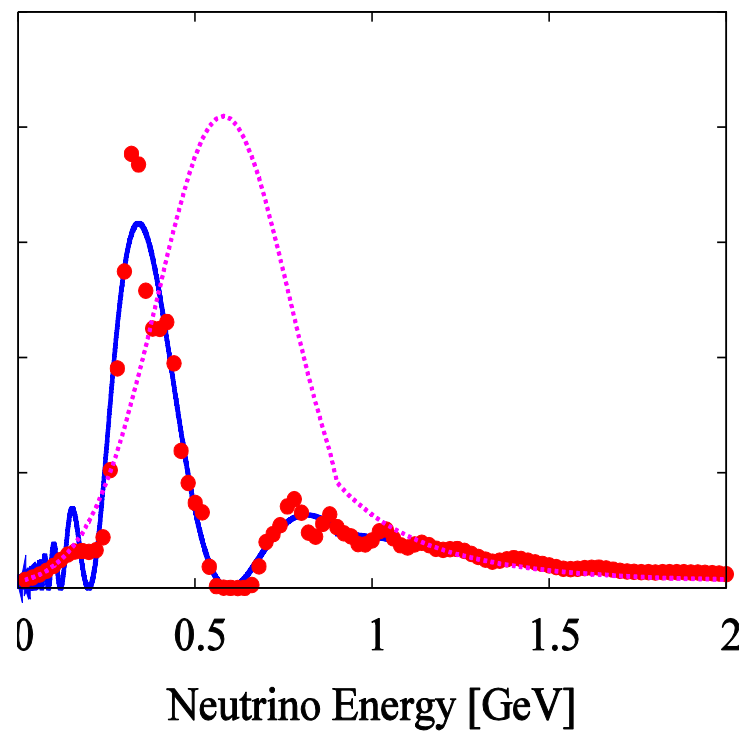
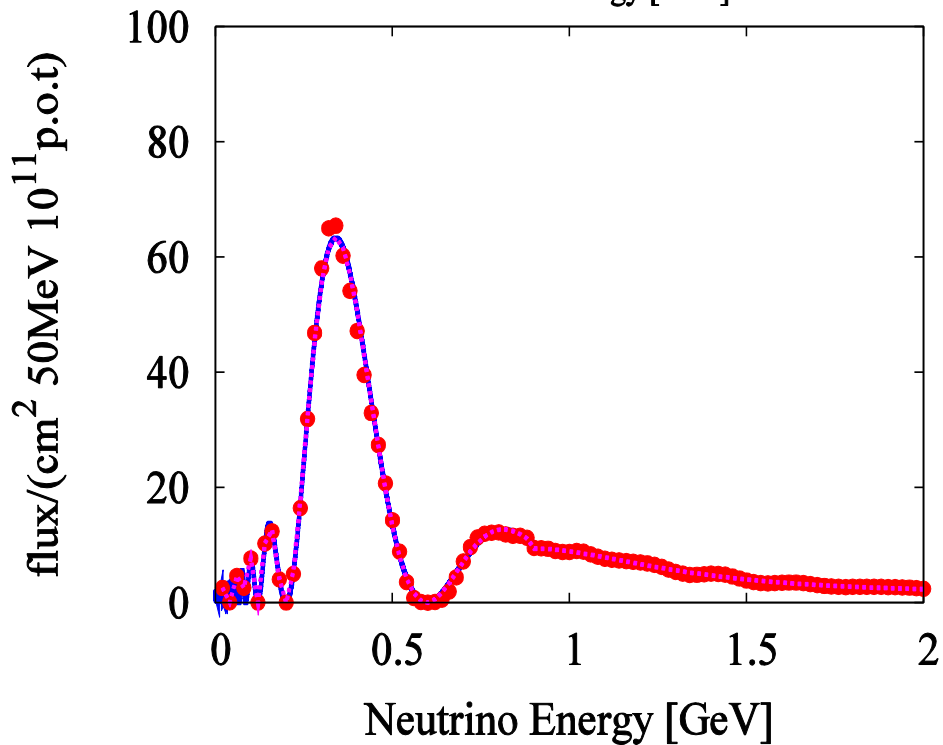


MEMで再構成

Result (default model dependence)



Original flux 
Reconstruct by MEM 
Default model 



Summary

- ◆ ミューオンニュートリノ原子核(^{12}C)荷電反応において、ニュートリノエネルギー分布を抽出する方法を検討した。
- ◆ ミューオン包含反応における、準弾性散乱、pion生成領域のミューオンエネルギー角度分布のデータからニュートリノエネルギー分布を得る過程を逆問題ととらえ、MEMの方法を調べた。

$$\left\langle \frac{d^2\sigma}{d\Omega_\mu dE_\mu} \right\rangle = \int dE_\nu \frac{d^2\sigma}{d\Omega_\mu dE_\mu} \Phi(E_\nu)$$

その際、ニュートリノ原子核包含反応断面積の模型、生成したミューオン分布からニュートリノフラックスを準弾性散乱を仮定せずに抽出した。

- ◆ その結果、ほぼニュートリノフラックスを再現できることがわかった。

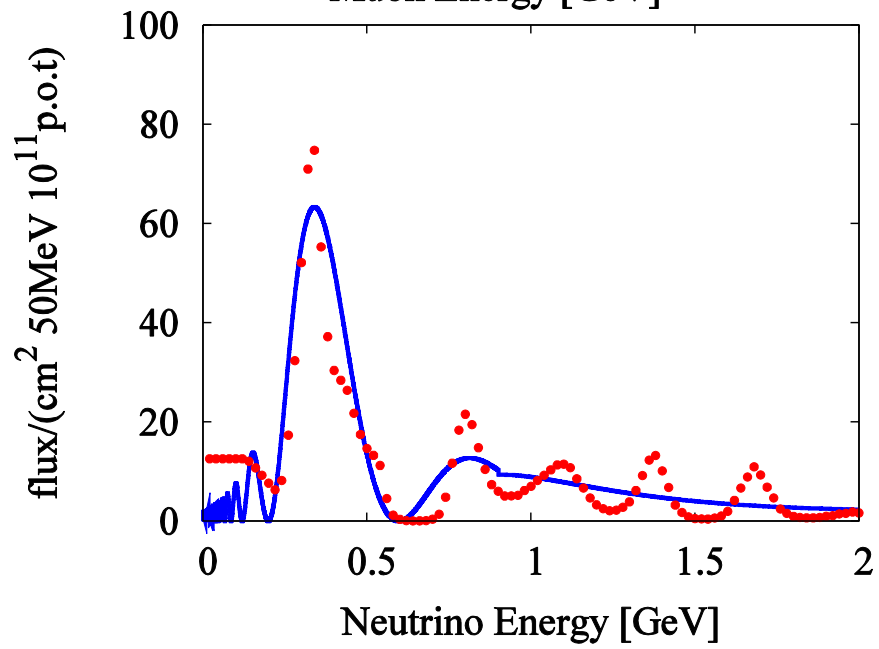
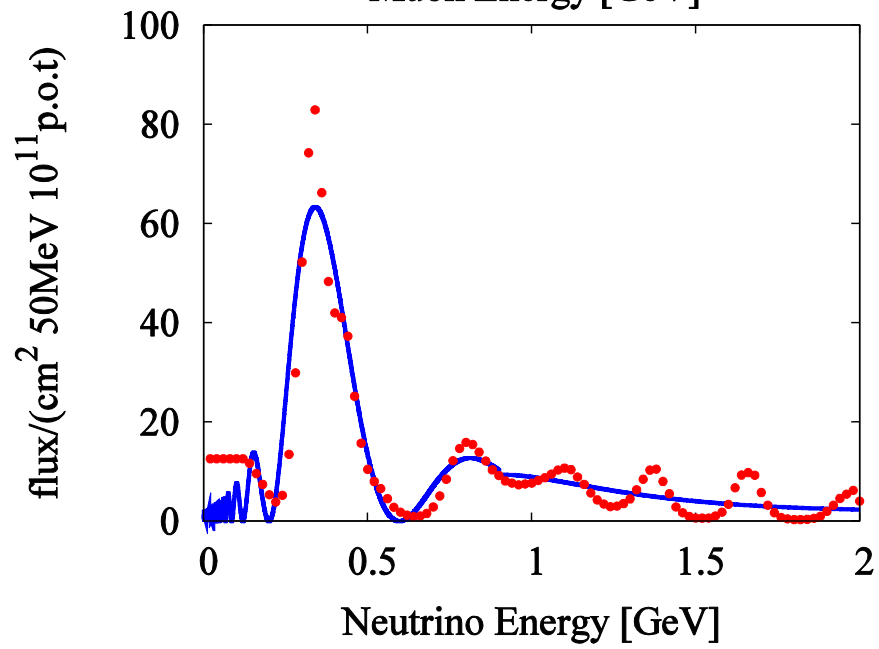
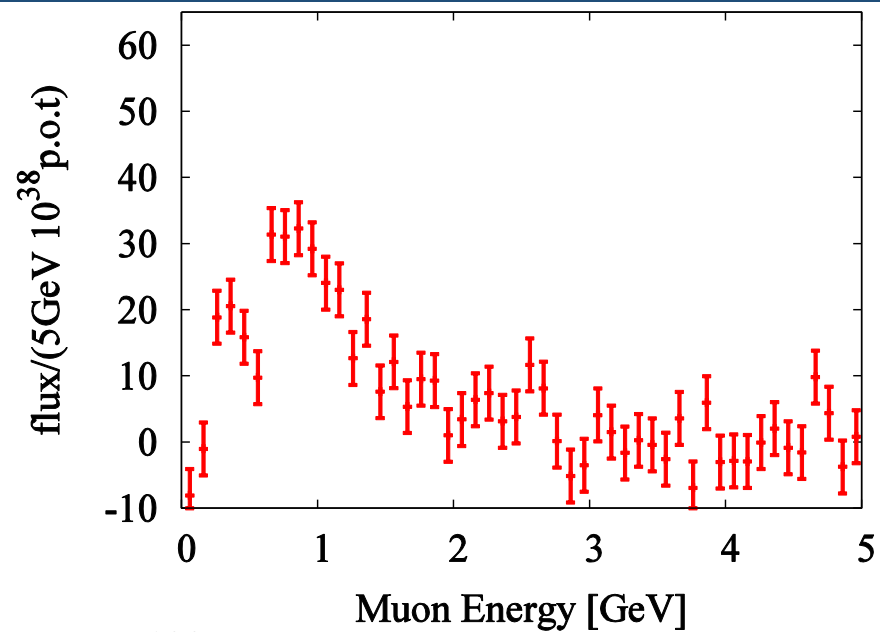
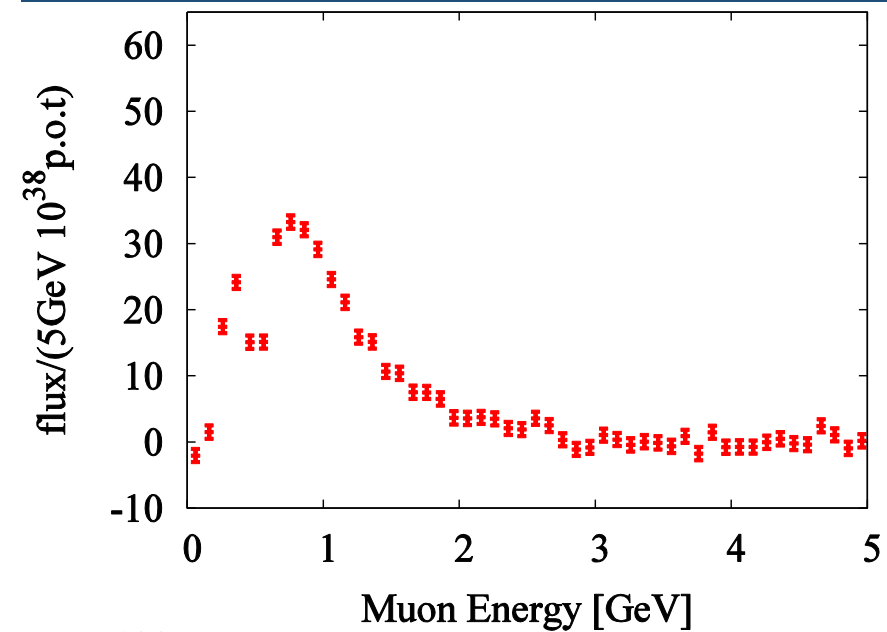
Future Works

- 抽出したフラックスの誤差を評価する。
- 2p2h反応過程のニュートリノフラックスへの寄与などを調べる。
- ν_e appearance について調べる。
- DIS領域に適用できるか検討する。

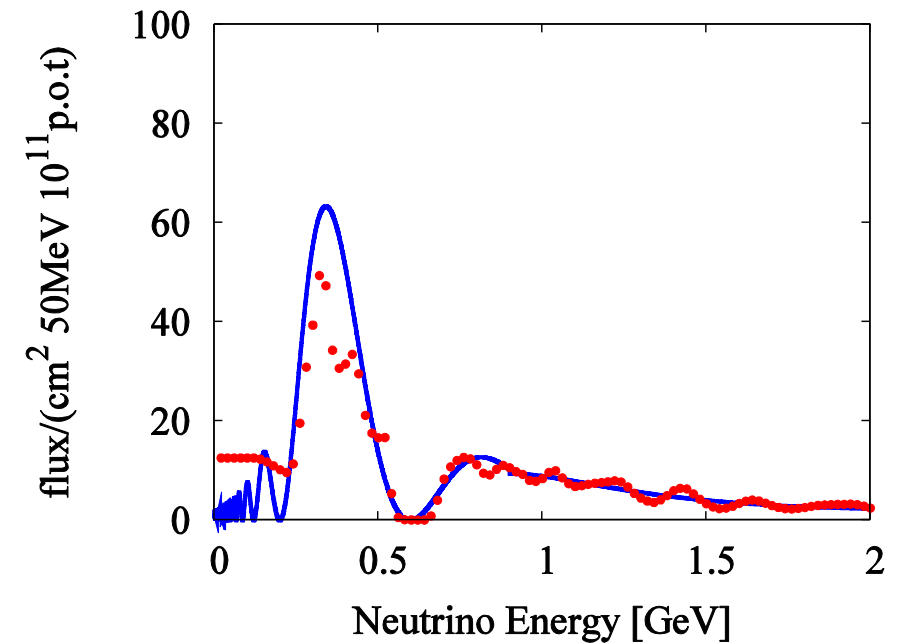
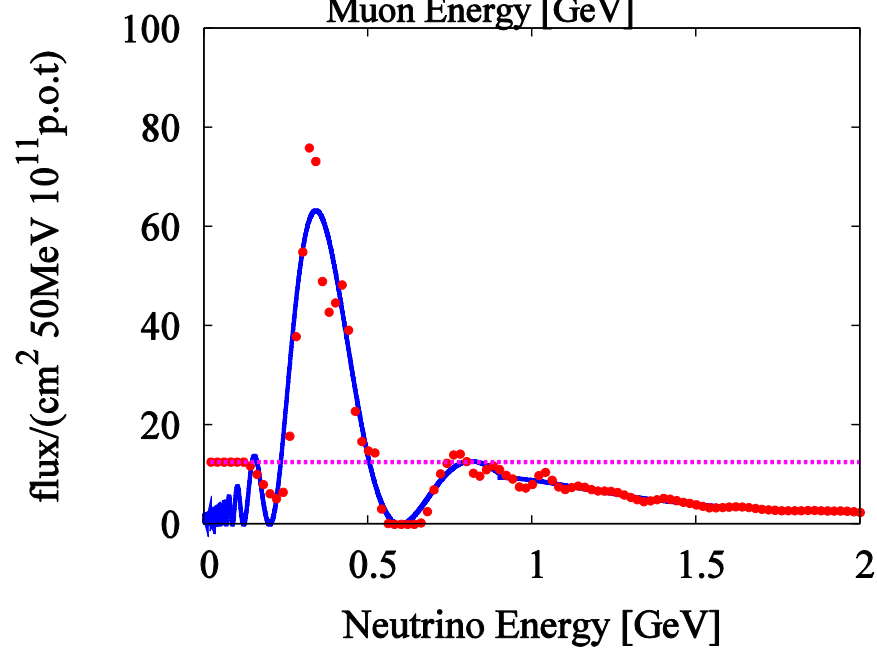
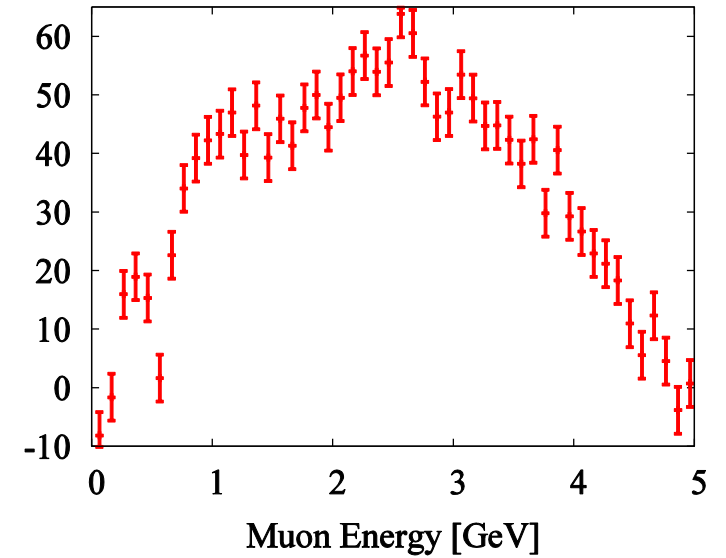
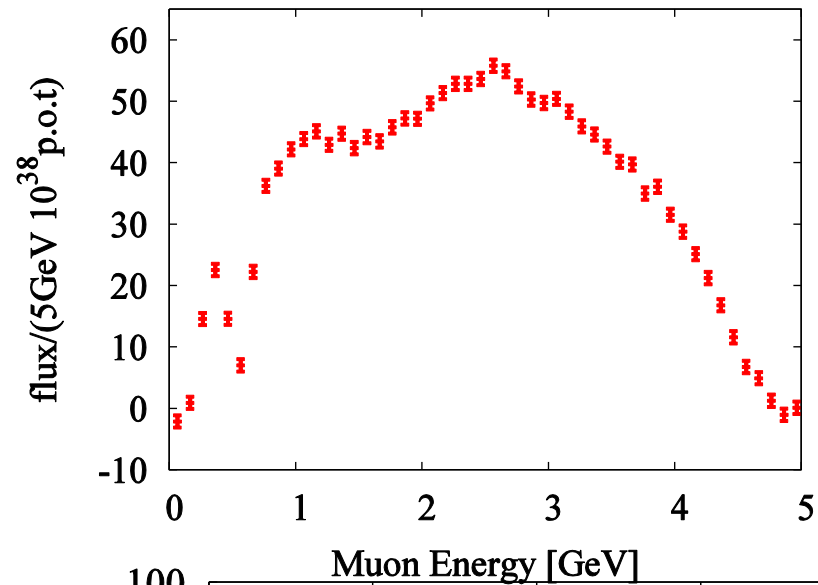
Thank You .

Back Up

Error dependence ($\theta = 30^\circ$)



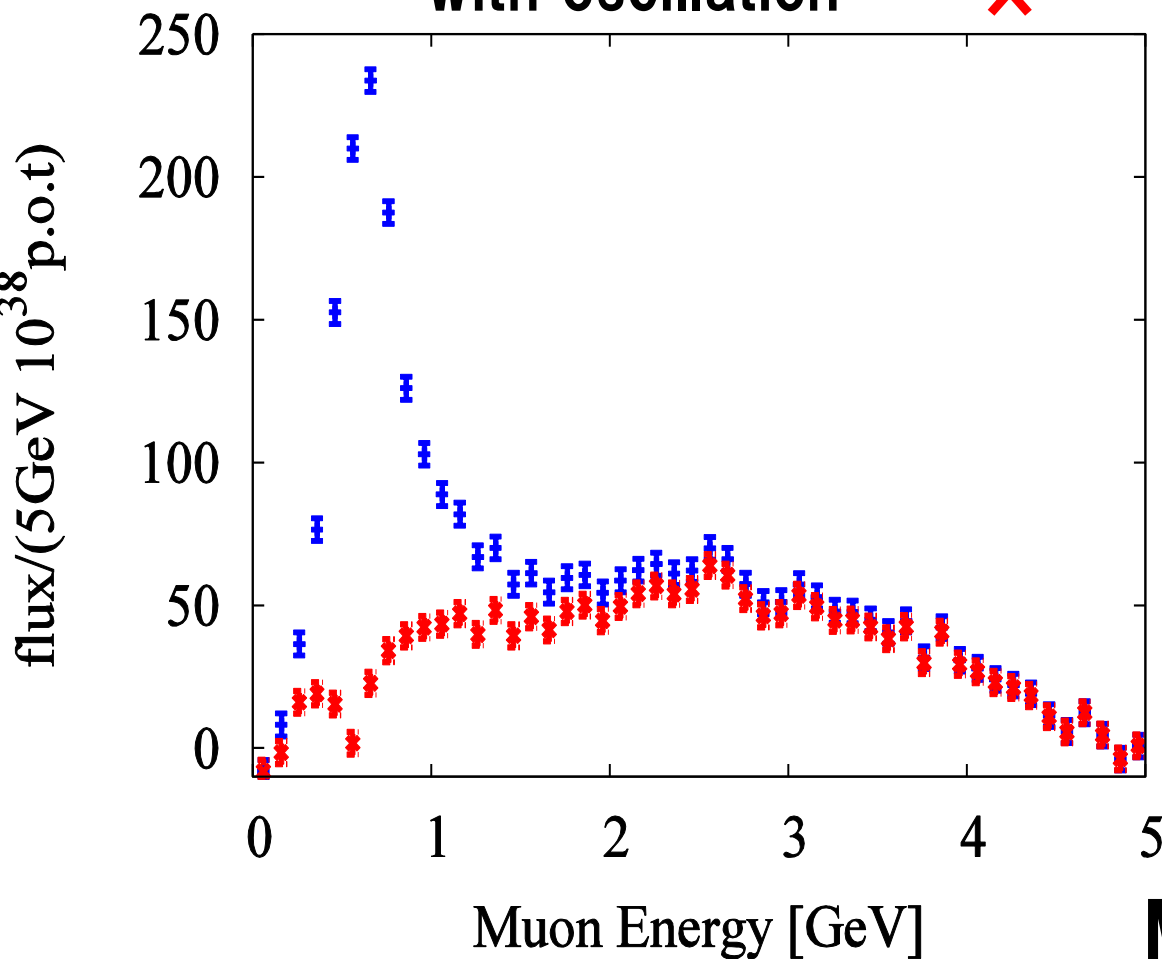
Error dependence ($\theta = 10^\circ$)



Result $\theta = 10^\circ$ with(out) oscillation

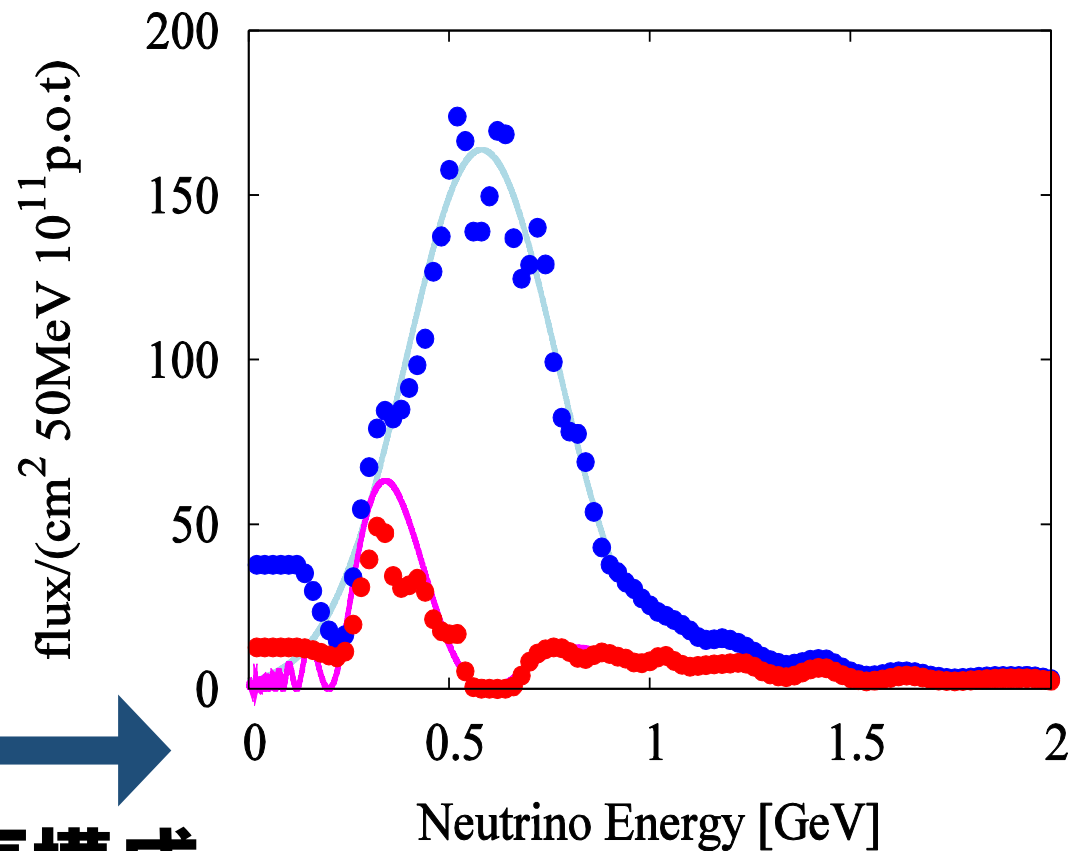
模擬 '実験データ'

Without oscillation ●
With oscillation ×



再構成したニュートリノフラックス

Without oscillation ●
With oscillation ●

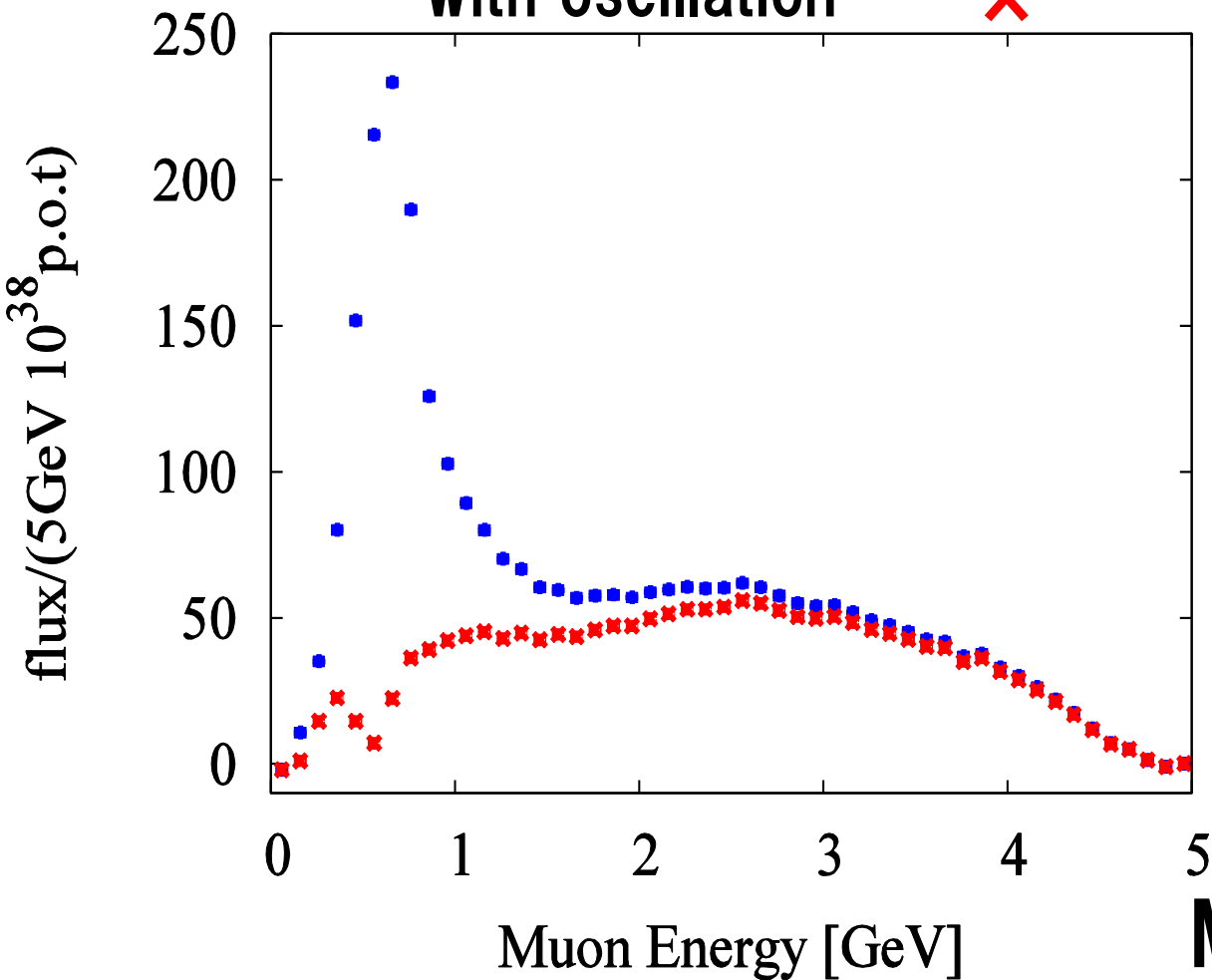


MEMで再構成

Result $\theta = 10^\circ$ with(out) oscillation

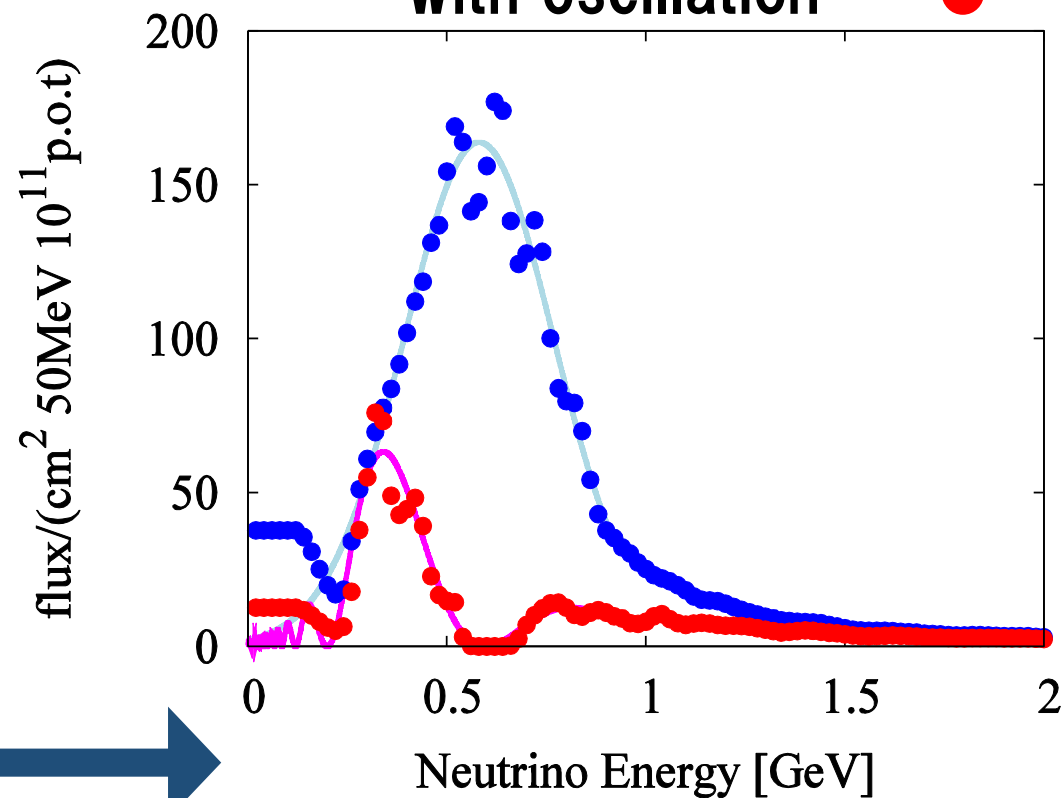
模擬 '実験データ'

Without oscillation ●
With oscillation ×



再構成したニュートリノフラックス

Without oscillation ●
With oscillation ●



MEMで再構成