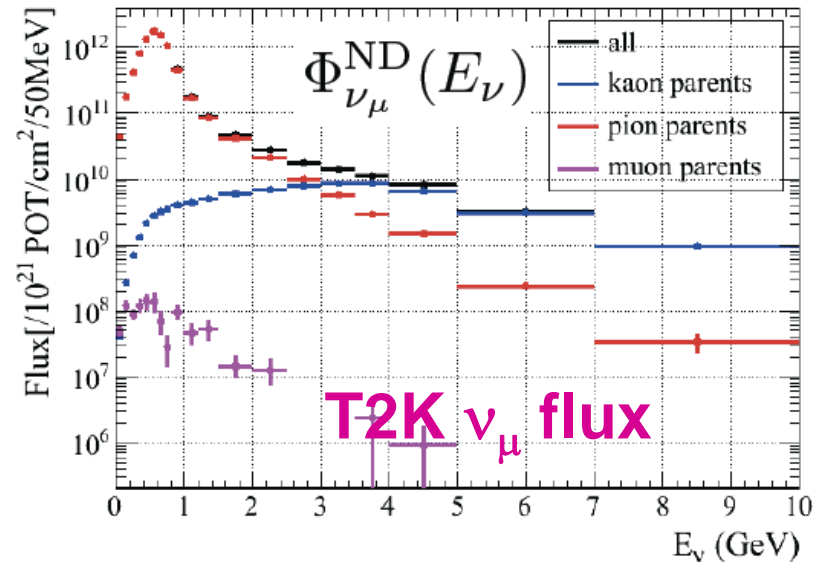
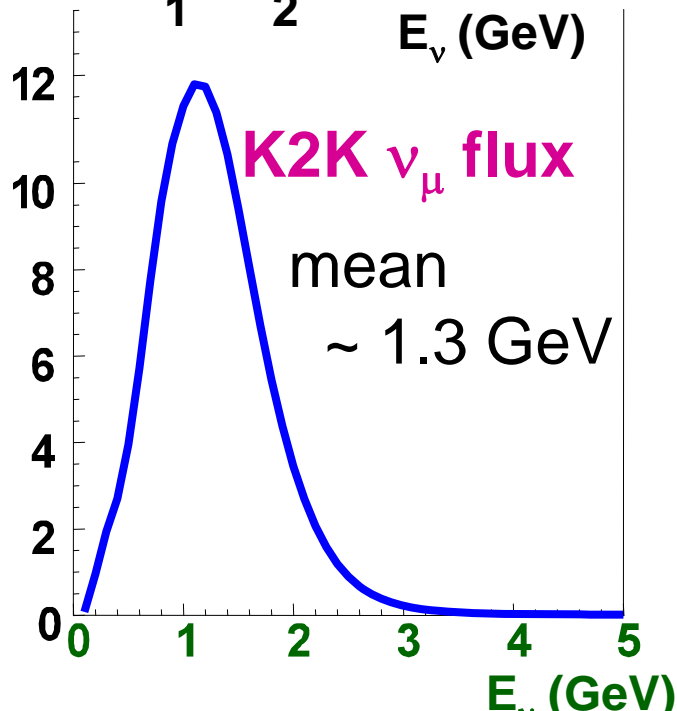
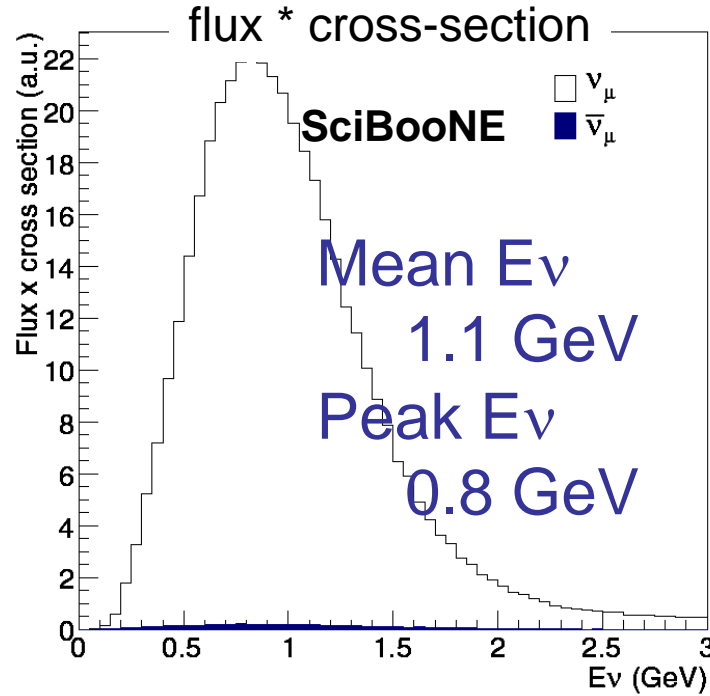
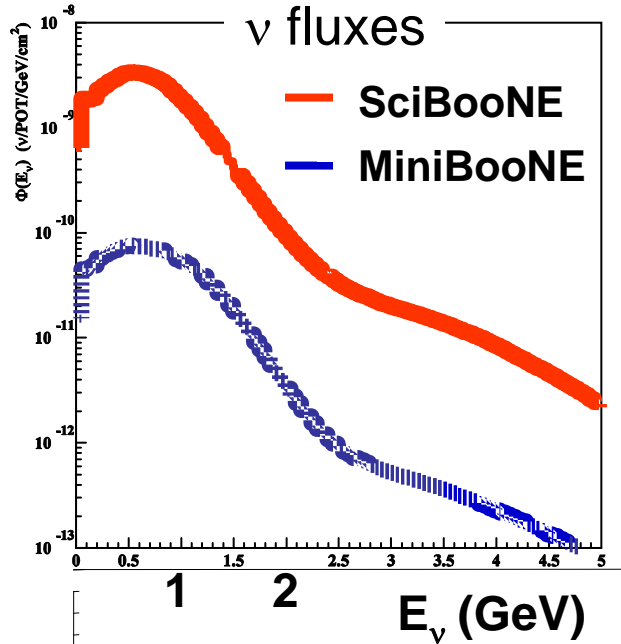


ニュートリノ反応 実験を行う上からの課題

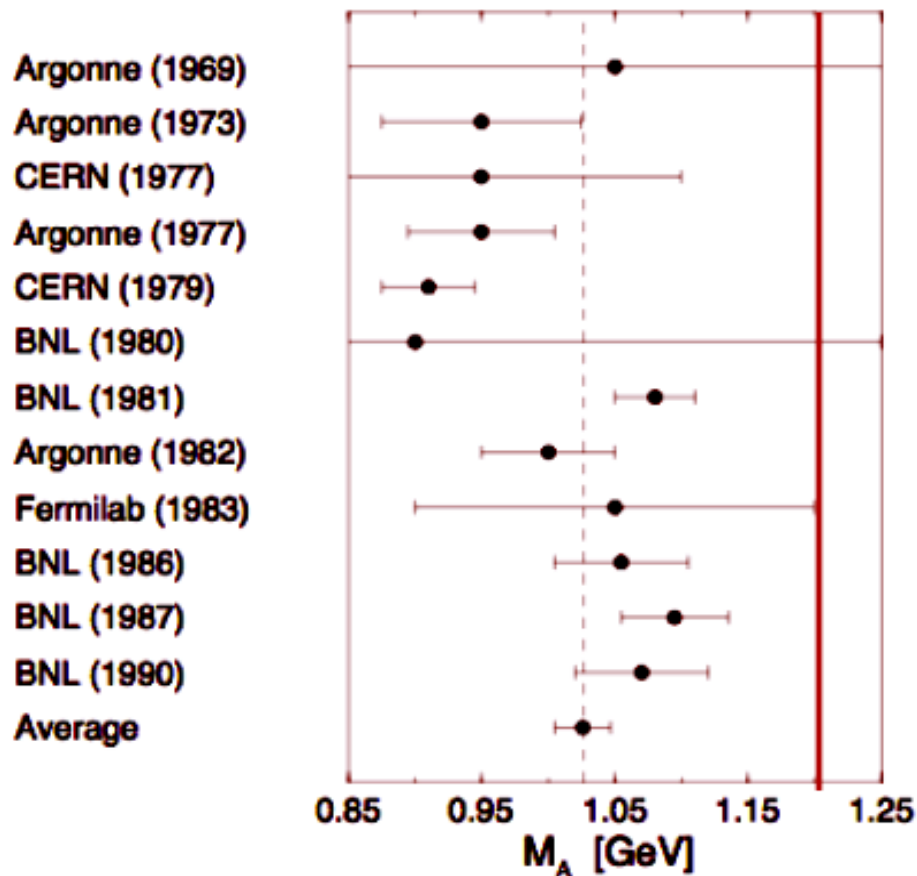
Kamioka, ICRR
Yoshinari Hayato

Neutrino fluxes ~ Various experiments



1. Charged current quasi-elastic scattering

全散乱断面積、微分散乱断面積を用いた M_A の測定



Experiment	Target	Cut in Q^2 [GeV ²]	M_A [GeV]
K2K ⁴	oxygen	$Q^2 > 0.2$	1.2 ± 0.12
K2K ⁵	carbon	$Q^2 > 0.2$	1.14 ± 0.11
MINOS ⁶	iron	no cut	1.19 ± 0.17
MINOS ⁶	iron	$Q^2 > 0.2$	1.26 ± 0.17
MiniBooNE ⁷	carbon	no cut	1.35 ± 0.17
MiniBooNE ⁷	carbon	$Q^2 > 0.25$	1.27 ± 0.14
NOMAD ⁸	carbon	no cut	1.07 ± 0.07

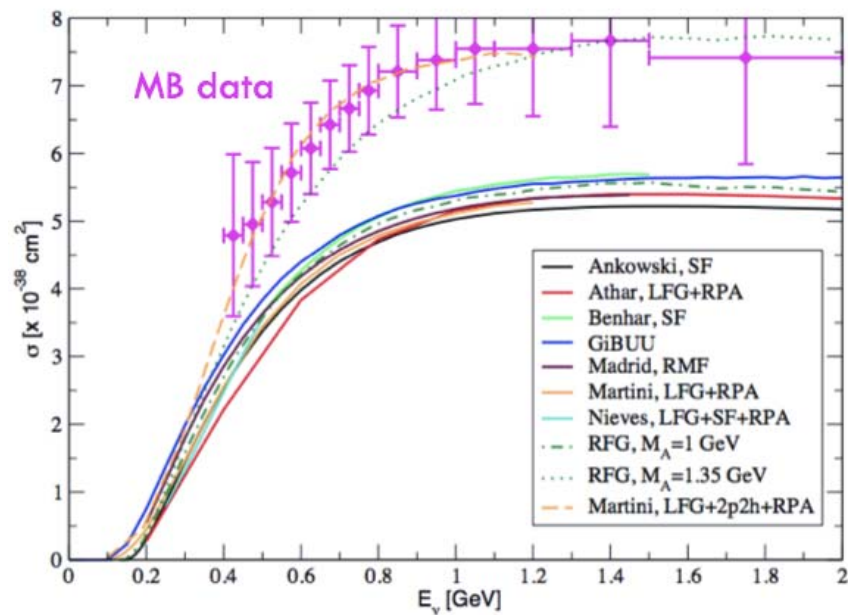
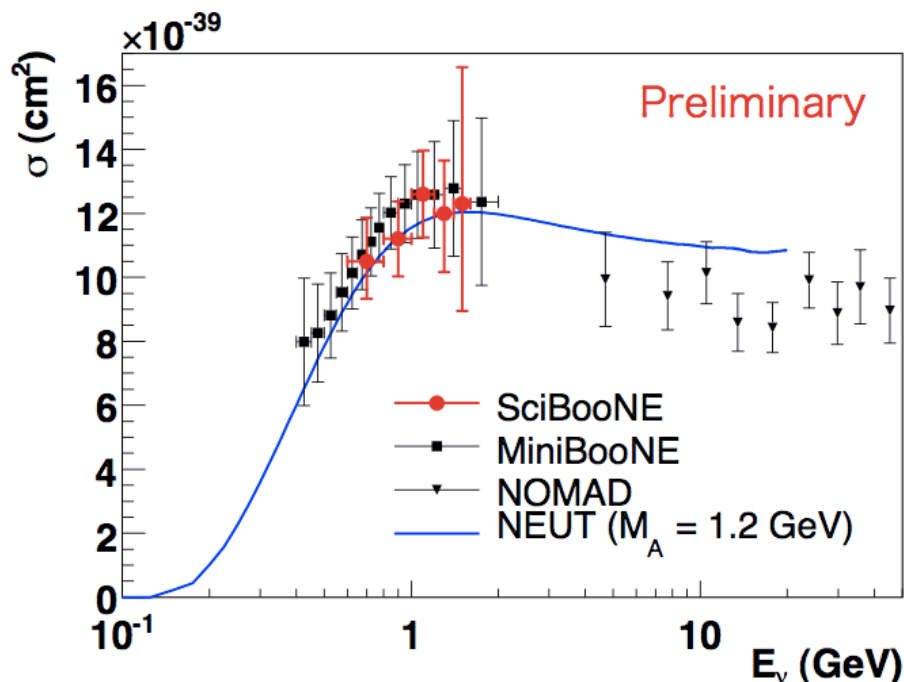
1970～80年代の実験(主に泡箱を用いていた)では、 $M_A \sim 1.0 \text{ GeV}/c^2$

1990～2000年代に入ってからの実験では、

低エネルギーのニュートリノ実験では M_A が大きく出ている。

高エネルギーの実験(NOMAD)では M_A は $1.1 \text{ GeV}/c^2$ 程度

1. Charged current quasi-elastic scattering



1980年代までの実験の問題点

- 統計が少なかった (多くても1000前後)
- ニュートリノフラックスの系統誤差が不明

しかし、NOMAD実験が $M_A \sim 1.1$ GeV/c²という結果をだした。

エネルギーの違いからきている？

検出器・解析手法の違いから Quasi-elastic 以外のものを見ている？

1. Charged current quasi-elastic scattering

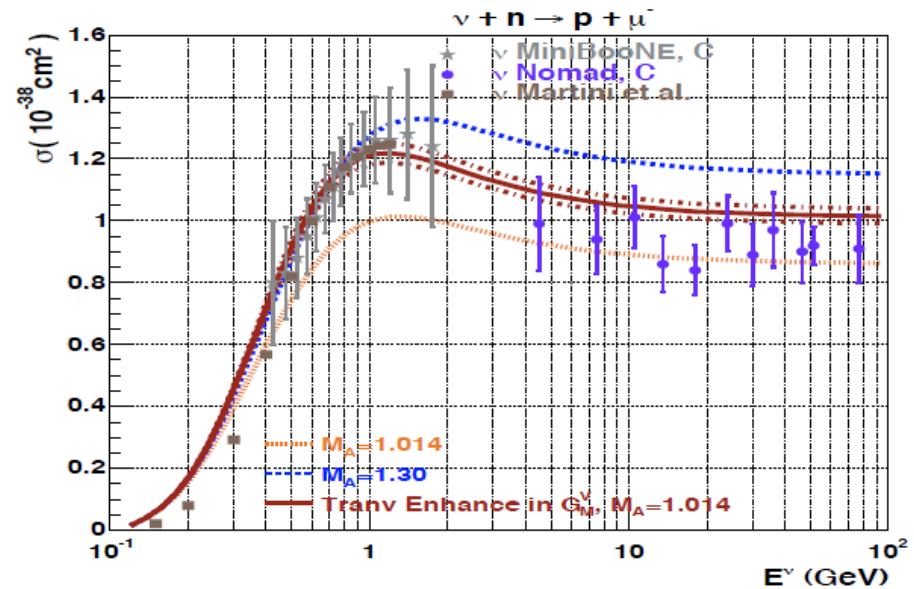
- Multi-particle effect?

Single nucleon recoil モデルの限界?

Meson exchange current?

A. Bodek et al.

arXiv:1108.0903



- Nucleus (A) dependence

Simple Fermi gas model の限界

Spectral function を用いる可能性

複数の核種をサポートする必要がある : どうするか。

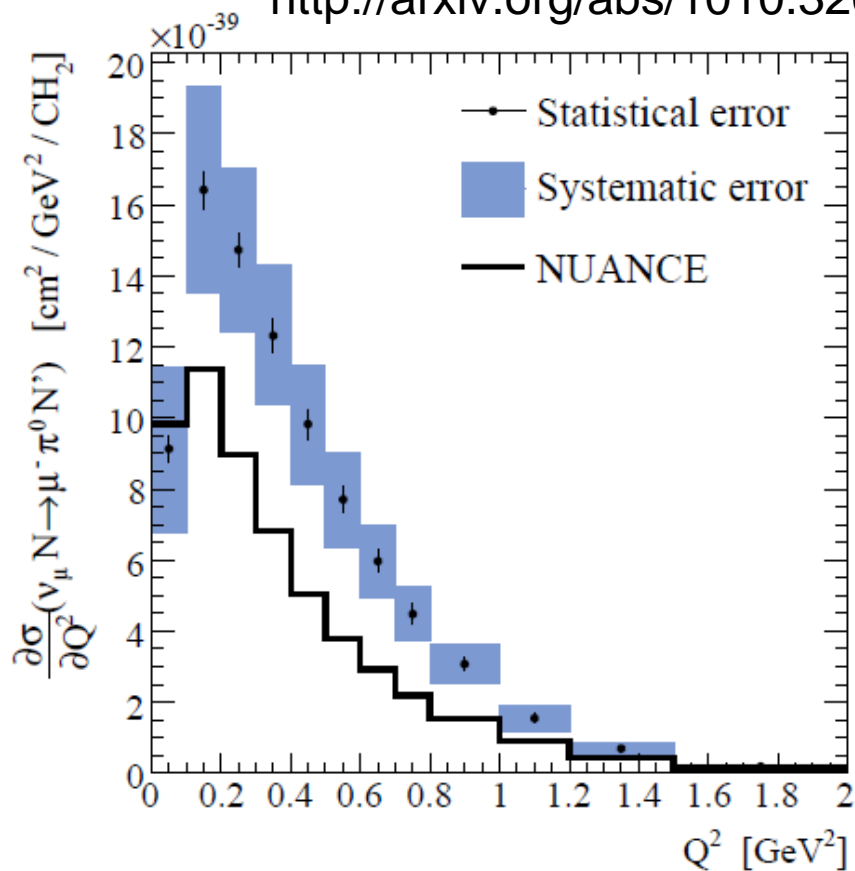
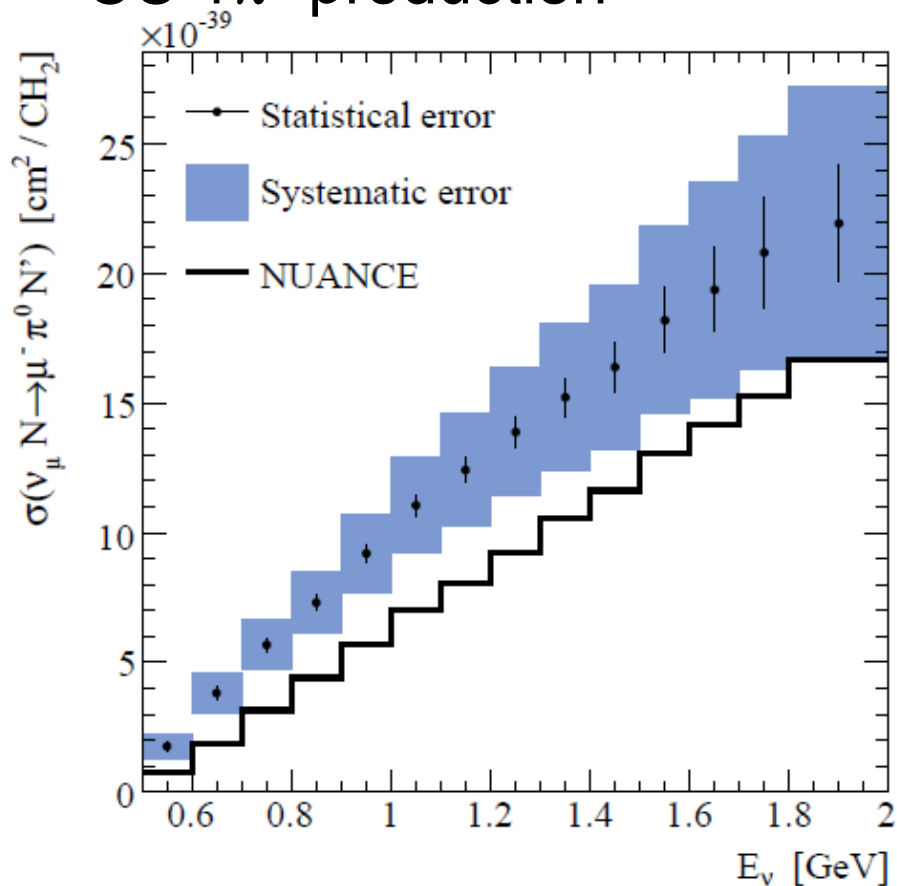
- 終状態の核子の kinematics

散乱、複数核子の放出

2. Single pion productions

CC $1\pi^0$ production

<http://arxiv.org/abs/1010.3264>



1980年代までの実験では $M_A \sim 1.0 \text{ GeV}/c^2$ 程度

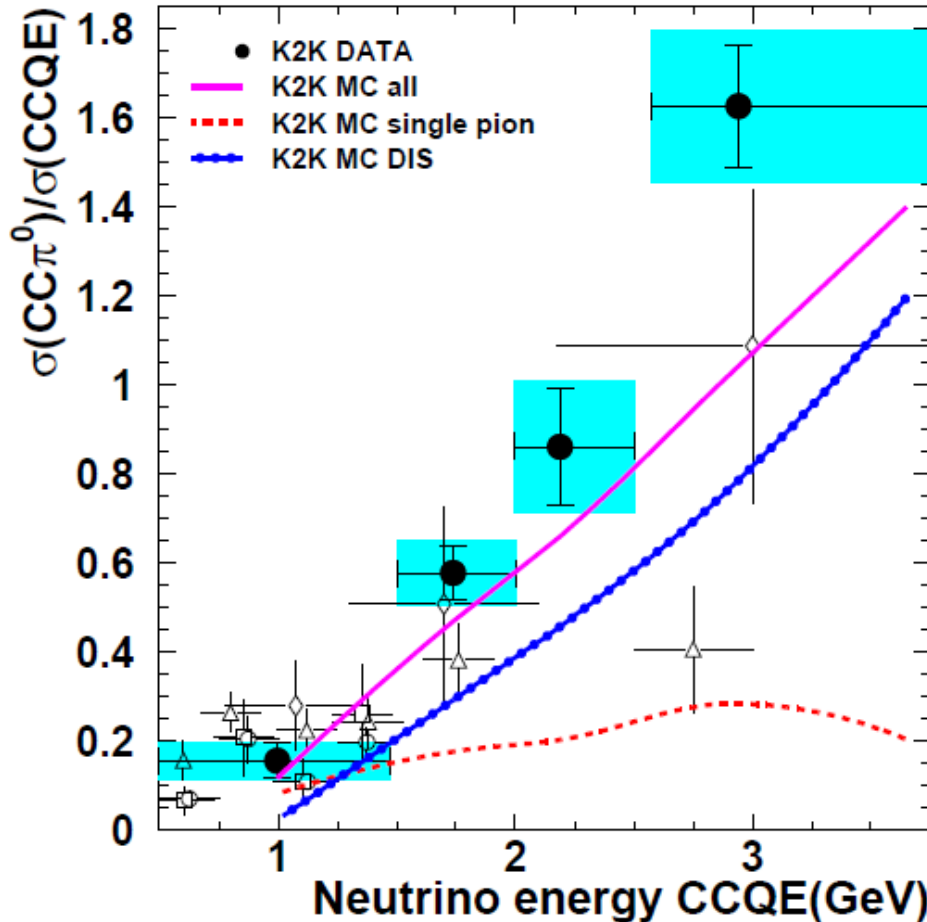
MiniBooNE実験はsimulationに依存しない解析を目指している。

結果は、 $M_A = 1.1 \text{ GeV}/c^2$ では小さすぎる？

(この線は $M_A = 1.1 \text{ GeV}/c^2$) $\sim 30\%$ 以上あわない

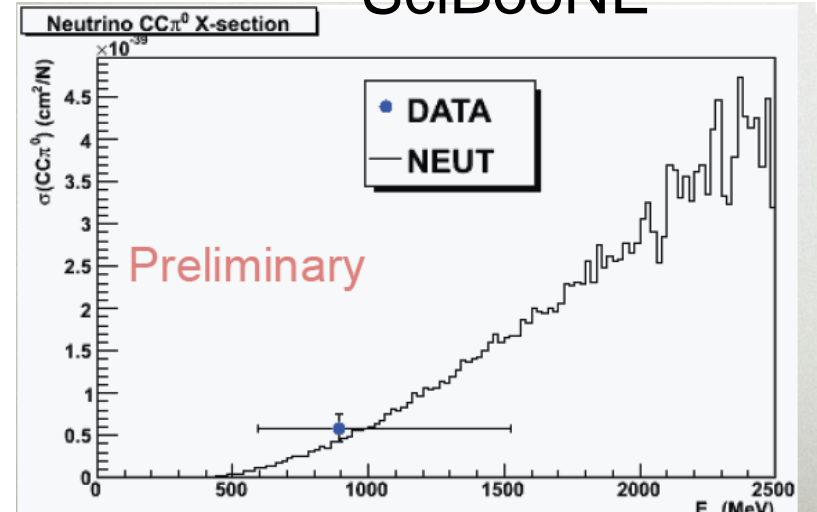
2. Single pion productions

K2K SciBar (Scintillator detector)



High energy 側では
simulation が小さく出ているが
single π の割合も少ない

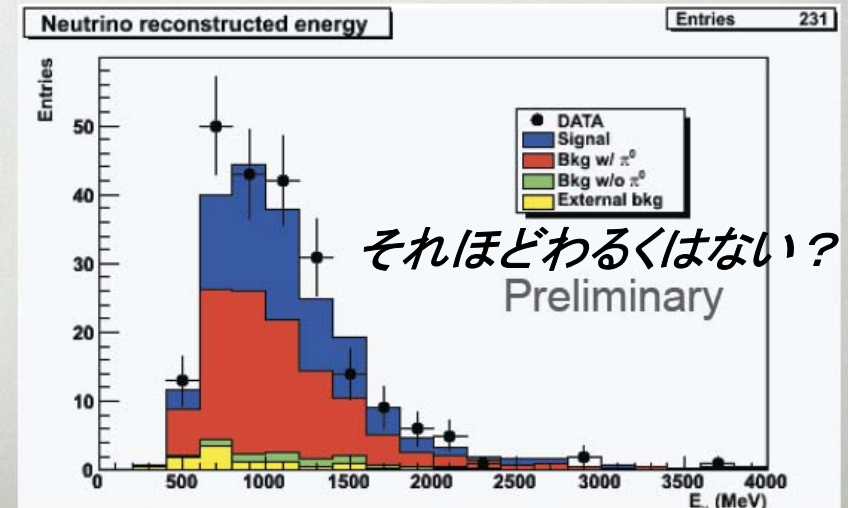
SciBooNE



Ev reconstruction

$$E_{\nu}^{rec} = \frac{m_p^2 - m_n^2 - m_X^2 + 2m_n E_X}{2(m_n - E_X + |p_X| \cos(\theta_{\nu X}))}$$

$$p_X \equiv p_{\mu} + p_{Y1} + p_{Y2}$$



2. Single pion productions

CC $1\pi^0$ production

K2K実験の水チェレンコフ検出器で、 $\mu+\pi^0$ 事象を用い
陽子崩壊のバックグラウンドスタディを行った

<http://arxiv.org/abs/0801.0182>

観測数(データ) 24

NEUT(K2K/SK実験で用いているシミュレーション、
ただし旧版)

21.4 ± 3.8

NUANCE(MiniBooNE 実験で用いているものの旧版)

13.6 ± 4.4

二つの simulation program

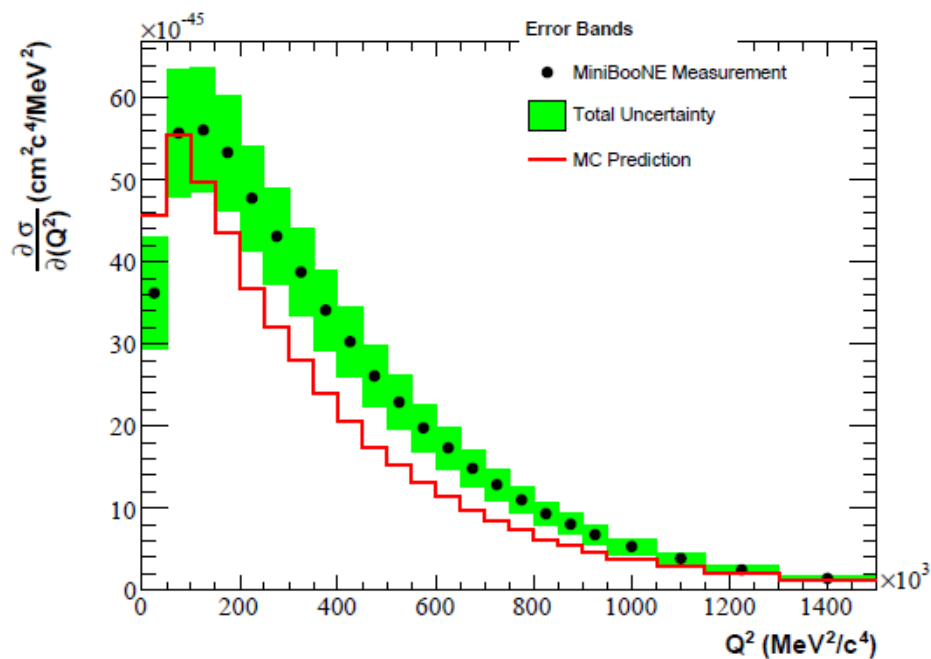
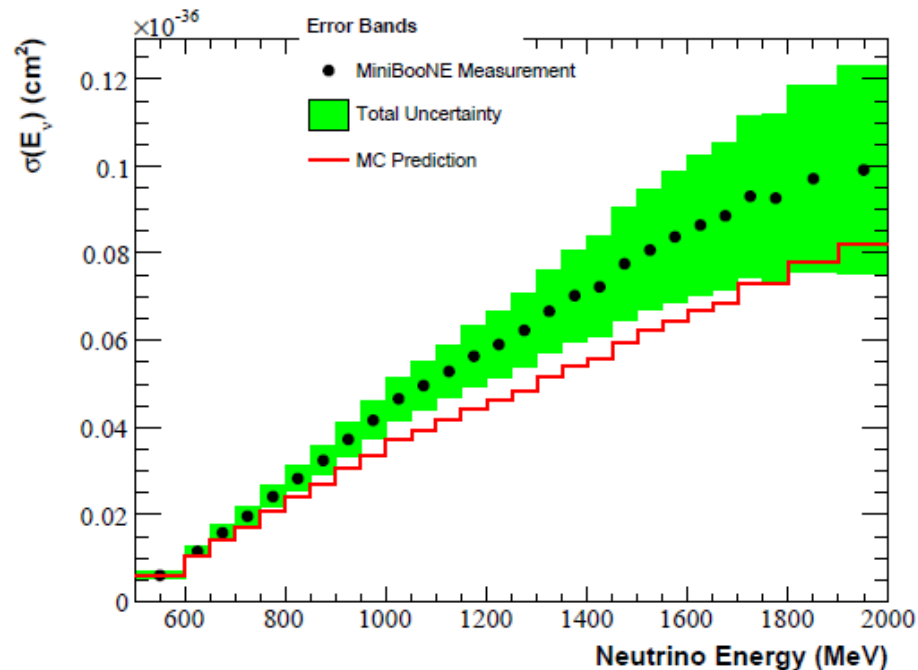
原子核内での π の扱いが全く違う。

どちらのシミュレーションプログラムは、Rein & Sehgal のモデル
Form factor が適切ではない？

primary process はほぼ核子散乱を仮定している ~ 不定性は？
(resonance decay の pauli blocking は考慮)

2. Single pion productions

CC $1\pi^+$ production



こちらのモードでも、最近のMiniBooNE実験結果では、
 $M_A = 1.1 \text{ GeV}/c^2$ では小さすぎる？

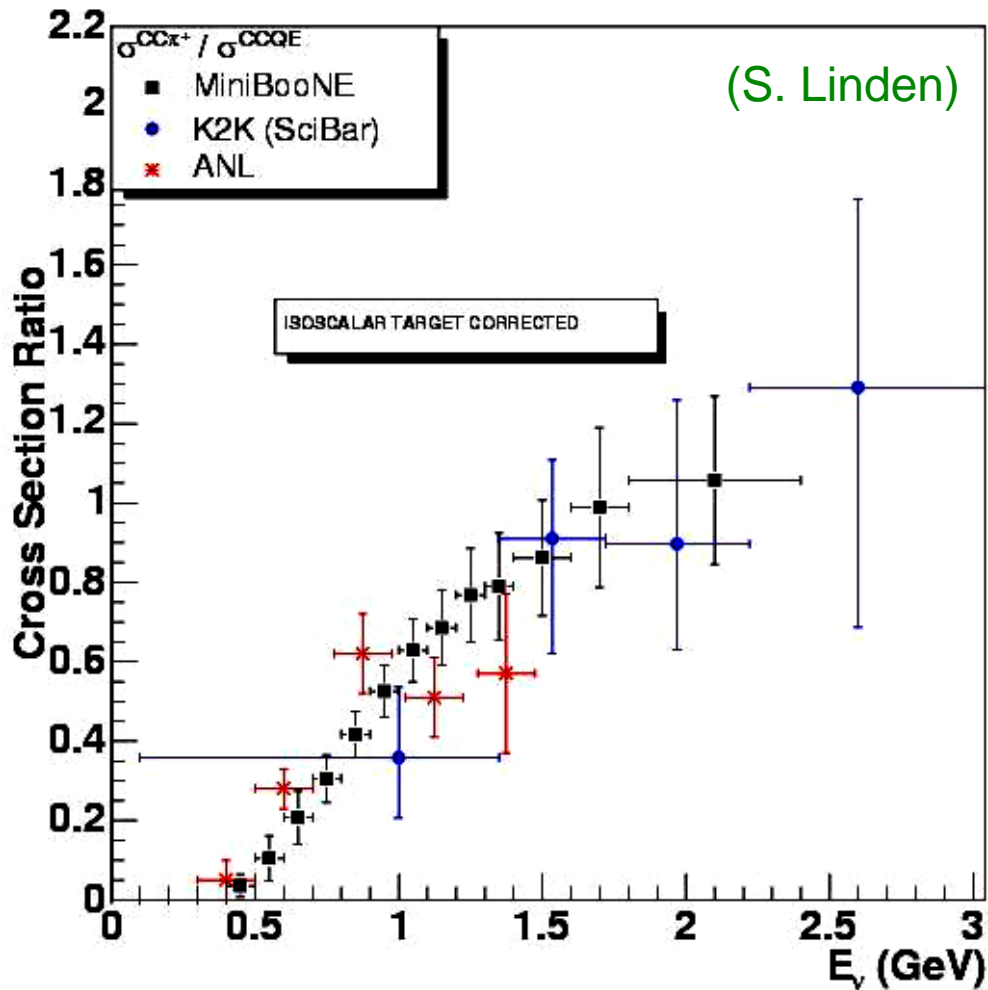
arXiv:1011.3572

(π の核内反応の systematic error はどのくらい？)

2. Single pion productions

CC $1\pi^+$ production

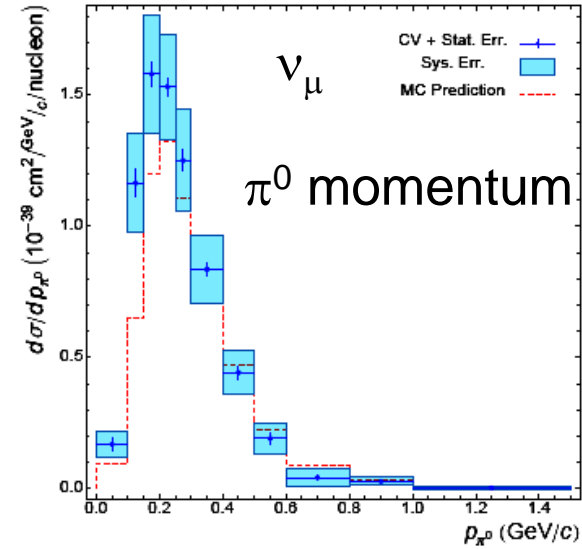
CC π^+ / CC QE cross-section ratio



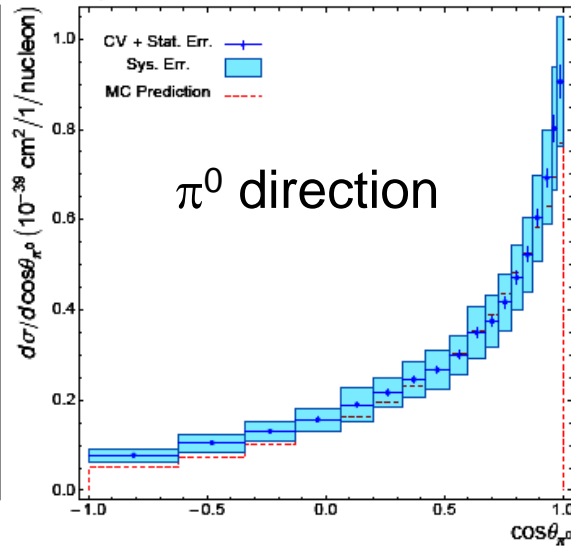
2. Single pion productions

NC $1\pi^0$ production

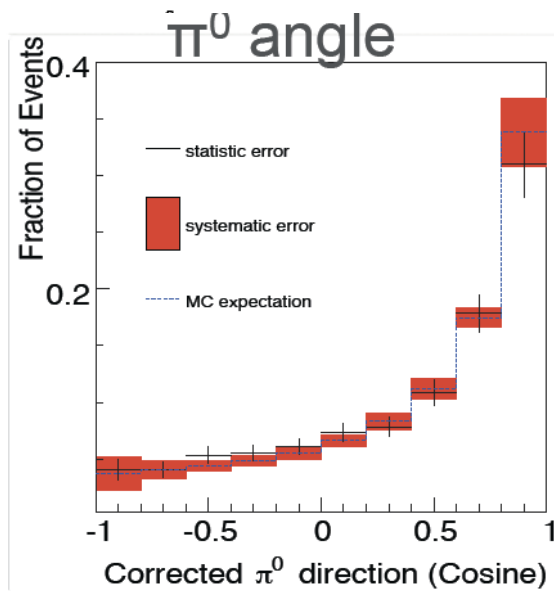
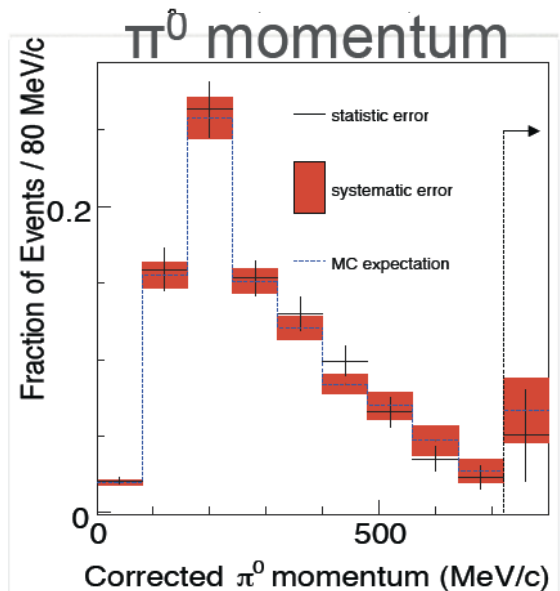
ν_μ NC $1\pi^0$ Production Cross Section on CH_2



ν_μ NC $1\pi^0$ Production Cross Section on CH_2



MiniBooNE、SciBooNE
比較的良くあっている？

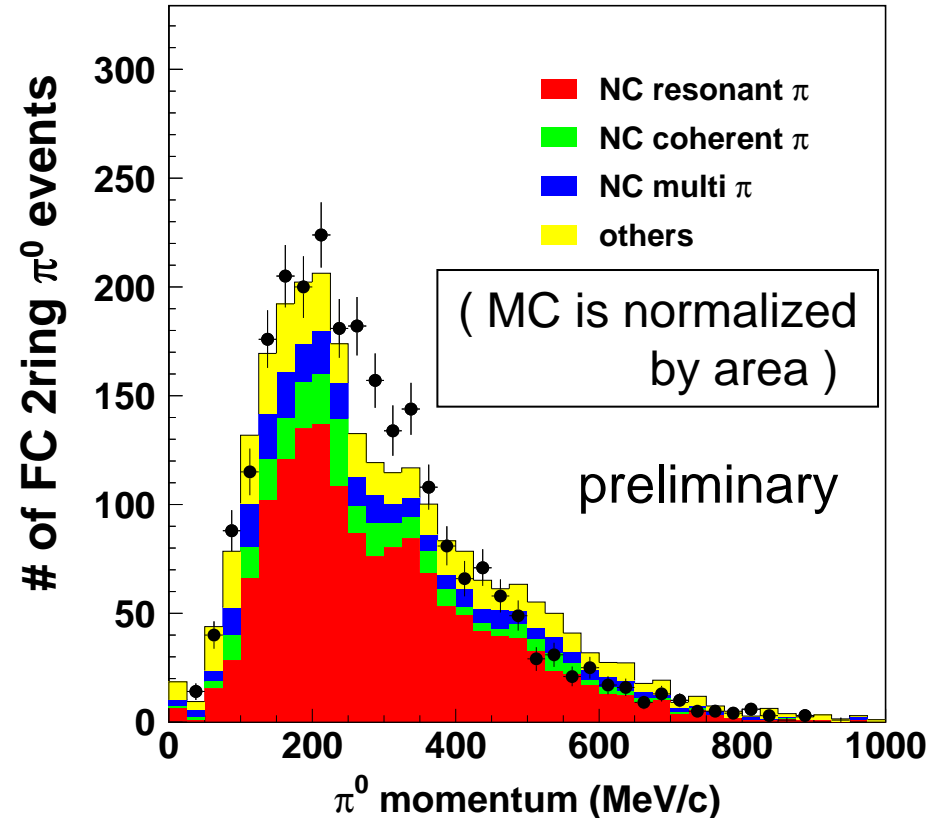
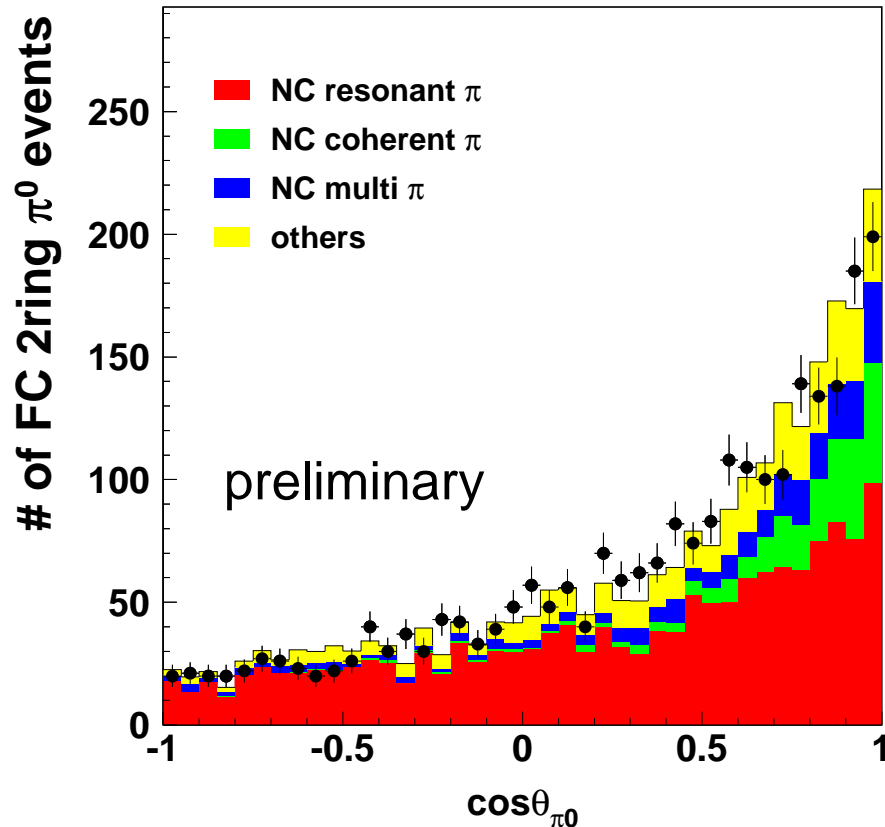


2. Single pion productions

NC $1\pi^0$ production

momentum and direction of π^0

K2Kも良くあった



NC π^0 は、ニュートリノのエネルギーがわからないため、flux averaged になってしまう。

3. Multi pion production ~ Deep inelastic scattering

Low q^2

Bodek-Yang correction

Form factor への補正をいれている。

F2, xF3への補正

シミュレーション (NEUT) における課題

- 1) multiplicity ($W \sim 2\text{GeV}$) はどのくらい正しいか
- 2) Neutral current を neut では近似的に扱っている
 - a) Charged current * factor
 - b) Bodek-Yang の補正を NC にも入れている
本来は正しくないはず。

原子核に対しても、核子と同じ扱い

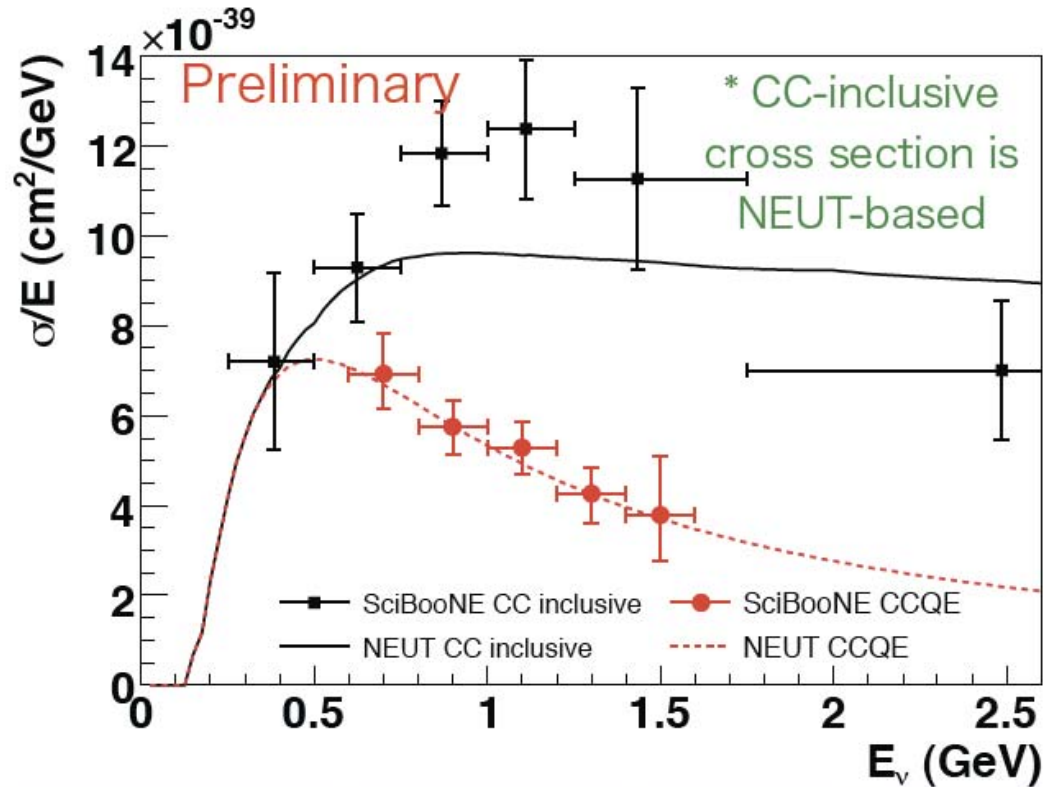
散乱断面積は p と n の個数倍

生成 hadron の核内反応は simulation している。

4. CC inclusive

SciBooNE

Cross section per nucleon in CH



5. これからの課題

- 1) Charged current quasi-elastic scattering の本当の不定性
meson exchange current などの影響
実験的に区別できるのか
どう simulation するのか
どう 評価するか (系統誤差として)
nucleon が見えない事象が実はかなりある
neutron が出ているのか?
終状態の核子の運動量・方向の分布は
どう simulation すべきなのか
核内での核子の再散乱の評価、
複数核子放出の可能性、シミュレーション手法
Fermi Gas model 以外の可能性
Spectral function の一般化 (多核種への対応)
Neutrino oscillation という観点からは、
今後 CCQE 以外の事象の寄与の
系統誤差評価が重要。

5. これからの課題

2) Single pion production

Charged current で、MiniBooNE 実験の

散乱断面積がかなり大きい。

K2K 実験の結果との consistency ?

SK 大気ニュートリノのデータとは比較的良くあう。

(早急に定量的評価を行う予定)

T2K 実験の結果はそのうちでてくる。

MinernA (FNAL) 実験の結果もそのうち出てくる

Neutral current p_0 はそれなりにあっているようにみえる。

核種への依存性の系統誤差をどう見積もるべきか

散乱断面積は n, p 数に比例でよいのか？

これらが矛盾しないのかをよく考えなくてははいけない。

5. これからの課題

3) Multi pion production ~ Deep Inelastic scattering

Low energy 側では underestimate なのかもしれない

Bodek-Yang correction の正当性評価および、

$x F_3$ の扱い方

Small W 領域での pion (meson) multiplicity

Neutral current の扱いをより正しくしたい

Bodek-Yang correction の Neutral current への

ただしい入れ方を考える必要もある

核種への依存性の系統誤差をどう見積もるべきか

散乱断面積は n,p 数に比例でよいのか？