

Introduction

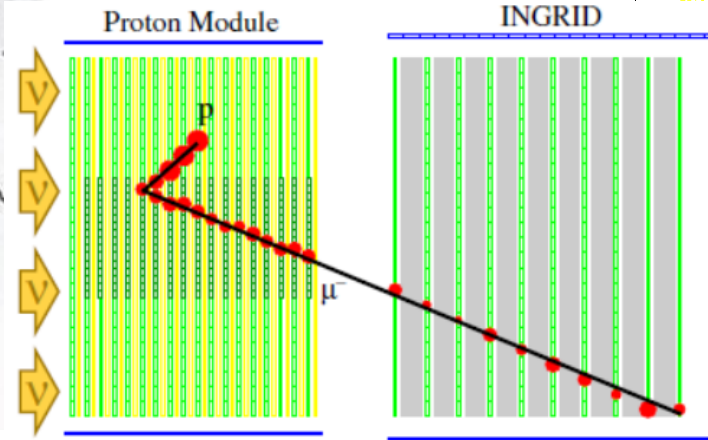
Why neutrino-nucleus interactions are so important?

Yoshinari Hayato (Kamioka, ICRR, U-Tokyo)

Neutrino experiments ~ observation of neutrinos

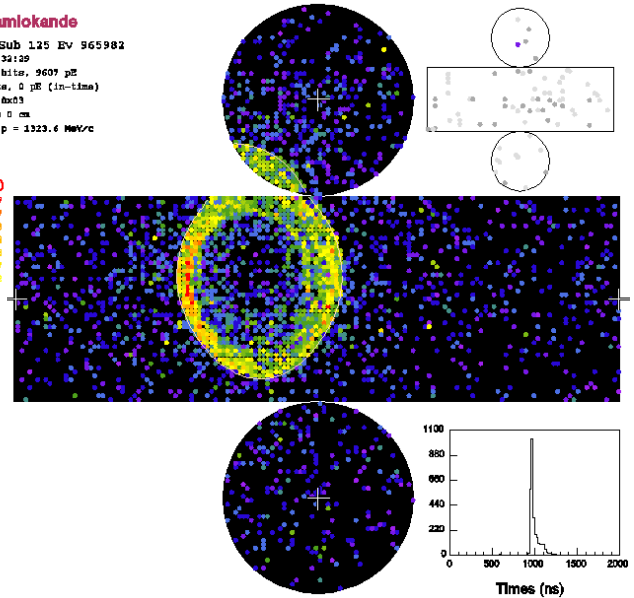


T2K near detector

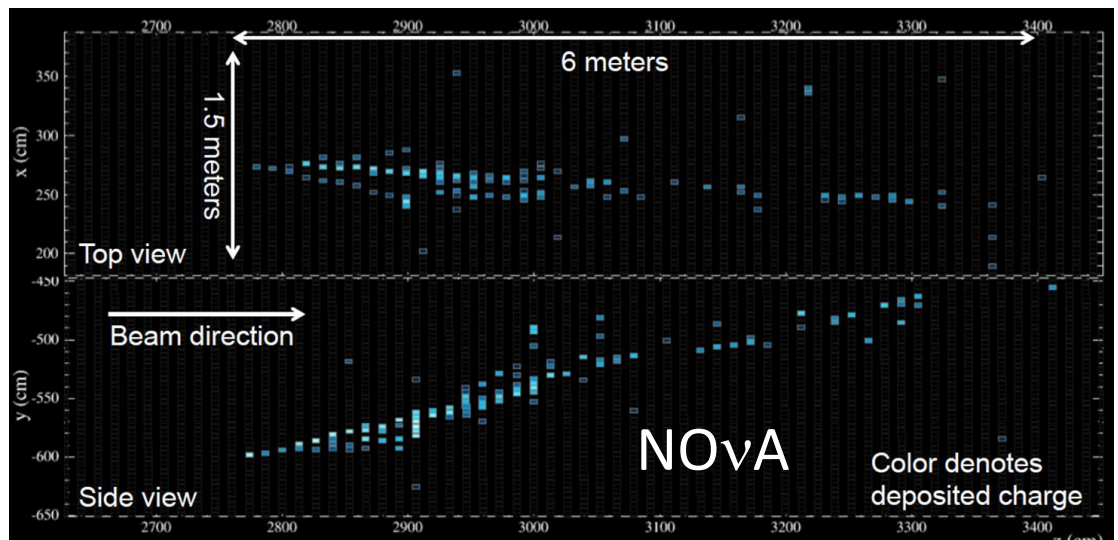
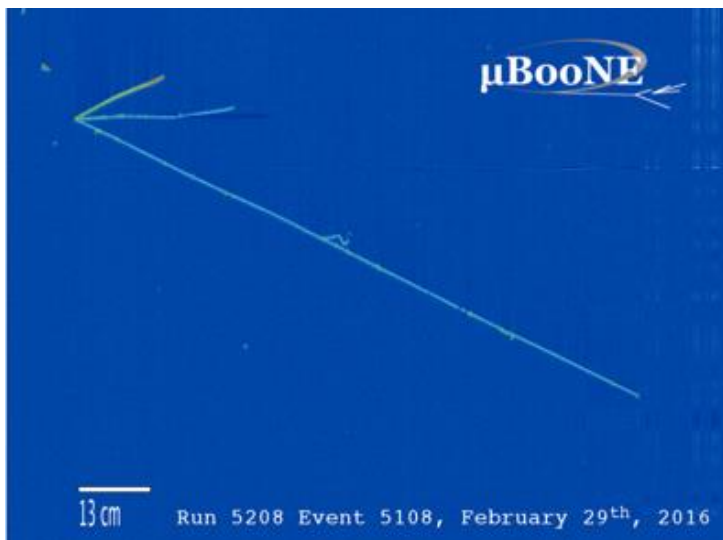


Super-Kamiokande
 Run 3962 Sub 125 Ev 565982
 97-05-0115:32129
 Inner: 2887 hits, 9609 pE
 Outer: 1 hits, 0 pE (in-time)
 Trigger ID: 0x03
 D wall: 1690 0 cm
 PC mu-like, p = 3223.6 MeV/c

Charge (pe)
 • >26.7
 • 23.3-26.7
 • 20.2-23.3
 • 17.3-20.2
 • 14.7-17.3
 • 12.2-14.7
 • 10.0-12.2



Super-Kamiokande



Neutrino experiments ~ detection of neutrinos

- 反応したあとの粒子しか見られない
 - ~ 反応した後の粒子を観測することで、
ニュートリノの種別、エネルギーなどを
再構成する必要がある。
 - 反応後の全ての粒子が測定(検出・観測)できるわけではない
 - 大半のニュートリノはエネルギーに広がりを持っている
 - ~ エネルギーが既知でない
 - 反応数が少ない ~ 弱い相互作用のみ
大質量の検出器が必要
 - ~ 統計量と検出器の精度の兼ね合い
- ➡ シミュレーションとの比較によって、
エネルギー測定や種別判定の精度を見積る
- ➡ ニュートリノ反応の理解が重要
(反応して生成した粒子の検出器内での反応
の理解も重要)

Major neutrino interactions $\sim E_\nu \geq 100 \text{ MeV}$

荷電カレント 擬弾性散乱

Charged current quasi-elastic scattering



中性カレント 弾性散乱

Neutral current elastic scattering



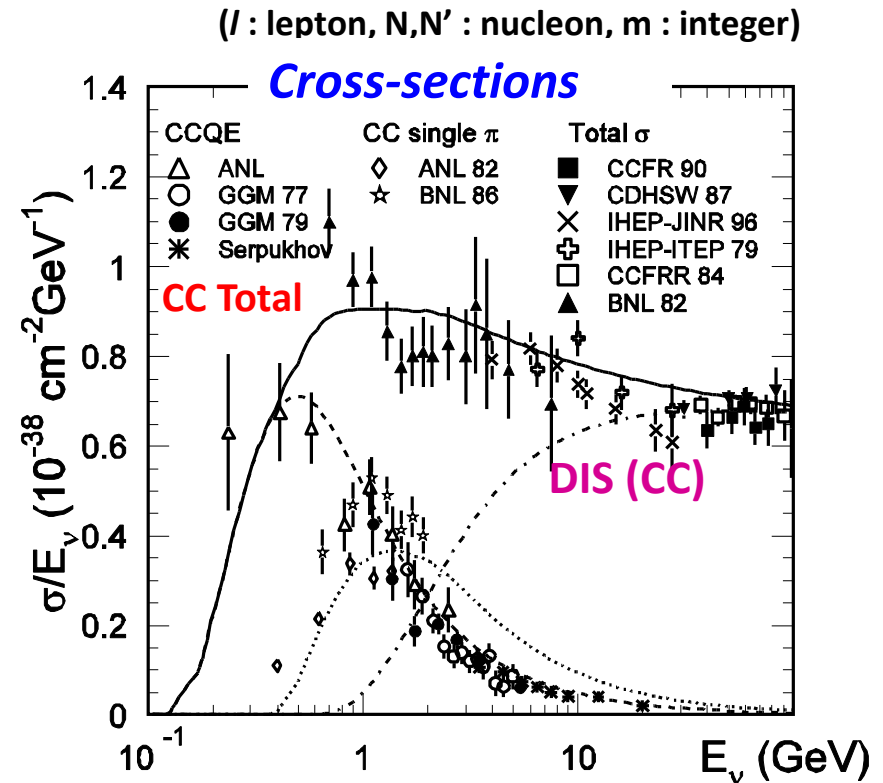
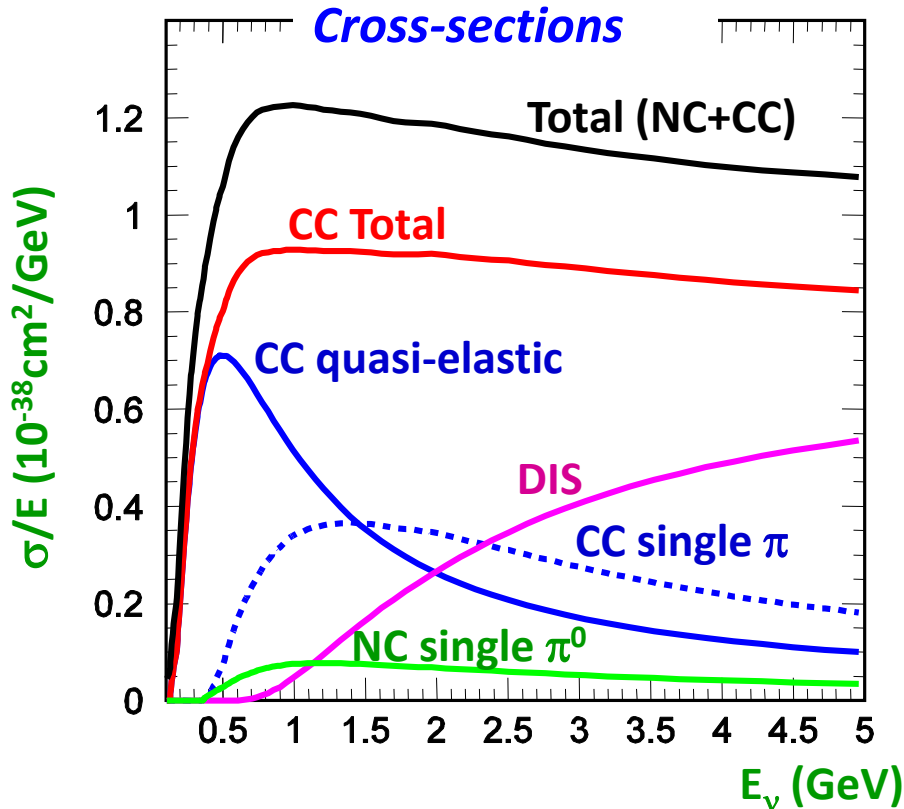
単一メソン生成

Single meson productions



深非弾性散乱

Deep inelastic scattering



ニュートリノ実験の例

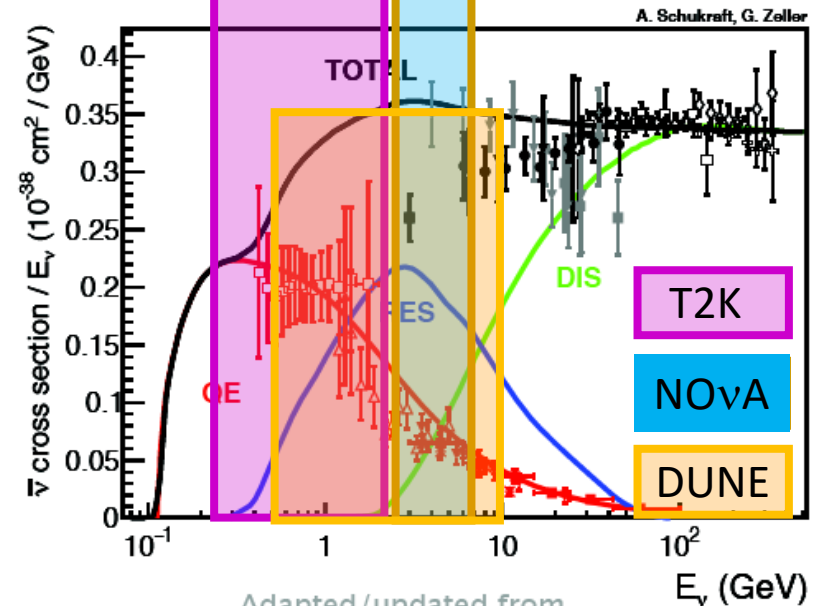
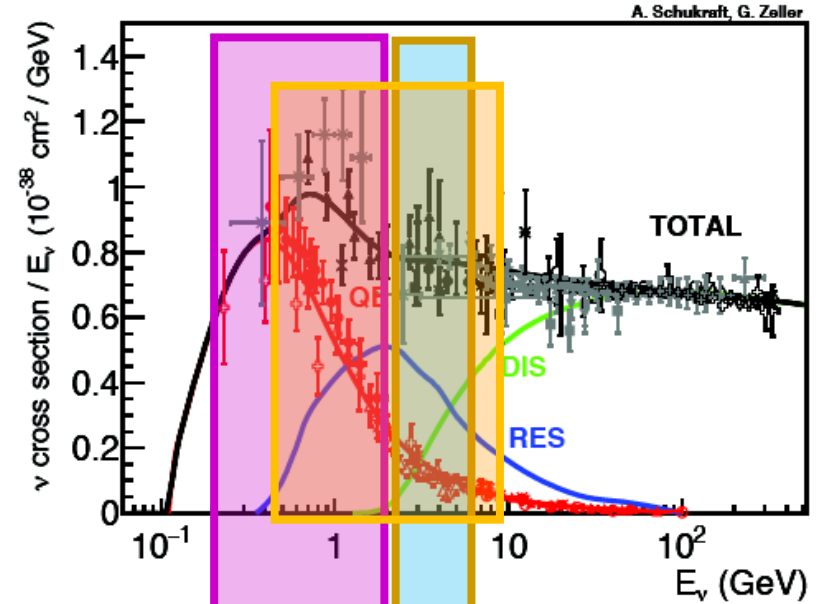
加速器を用いたニュートリノ実験

近年の加速器長基線ニュートリノ振動実験は、数百MeV～数GeVのエネルギーのニュートリノを利用。

これらの実験は原子核標的を持つ検出器を用いている。

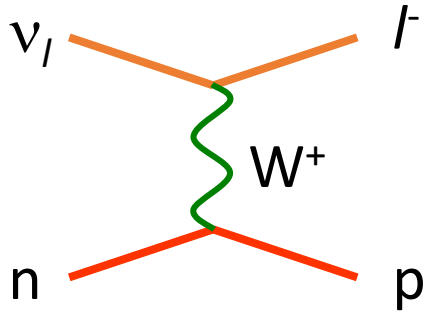
T2K	CH, H ₂ O (near) H ₂ O (far)
NOvA	CH (near and far)
DUNE	Argon (far)

これらの実験では、系統誤差を数パーセント以下に抑えることが必要となってきた。



Charged current Quasi-elastic scattering

低エネルギー領域(数百MeV)の主要な反応

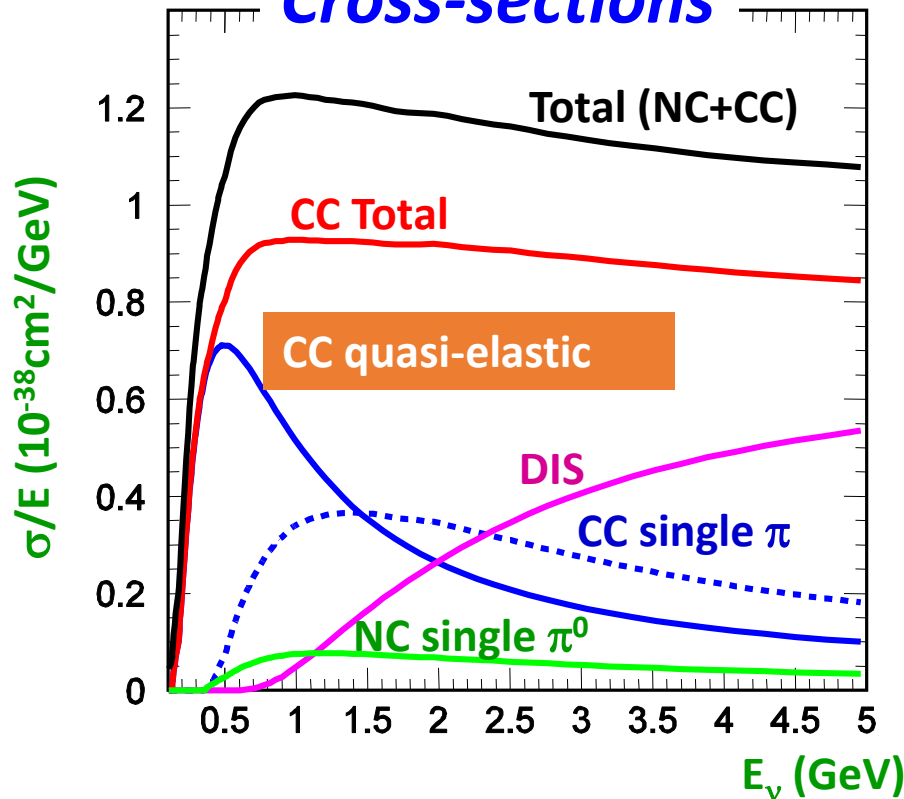


2体反応

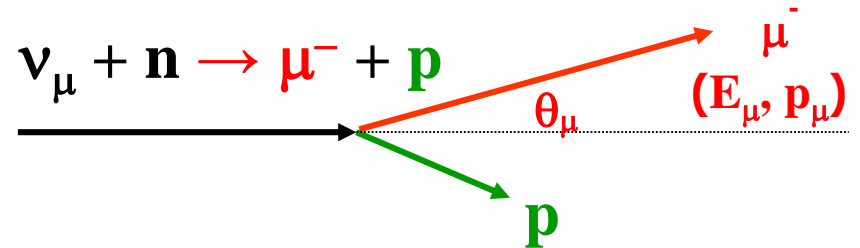
~ 標的核子が静止していれば、
荷電レプトンの情報のみで

ニュートリノエネルギーの再構成可能

Cross-sections



低エネルギーニュートリノビームの
スペクトラム測定に利用される



$$E_\nu = \frac{m_N E_\mu - m_\mu^2/2}{m_N - E_\mu + p_\mu \cos \theta_\mu}$$

(核子が静止しているとき)

ニュートリノ実験の例

加速器を用いたニュートリノ実験

ニュートリノの方向は既知

Case 1: $E_\nu = 100 \sim 1 \text{ GeV}$

事象選別 : $\nu + N \rightarrow l + N'$

Charged current quasi-elastic scattering events

解析の例

1. 観測された荷電レプトンの運動量及び方向から
ニュートリノのエネルギーを再構成
(散乱断面積測定、ニュートリノ振動解析)
2. 観測された荷電レプトンの運動量と方向を、
シミュレーション結果と比較する。
(ニュートリノ振動解析 例:T2K)

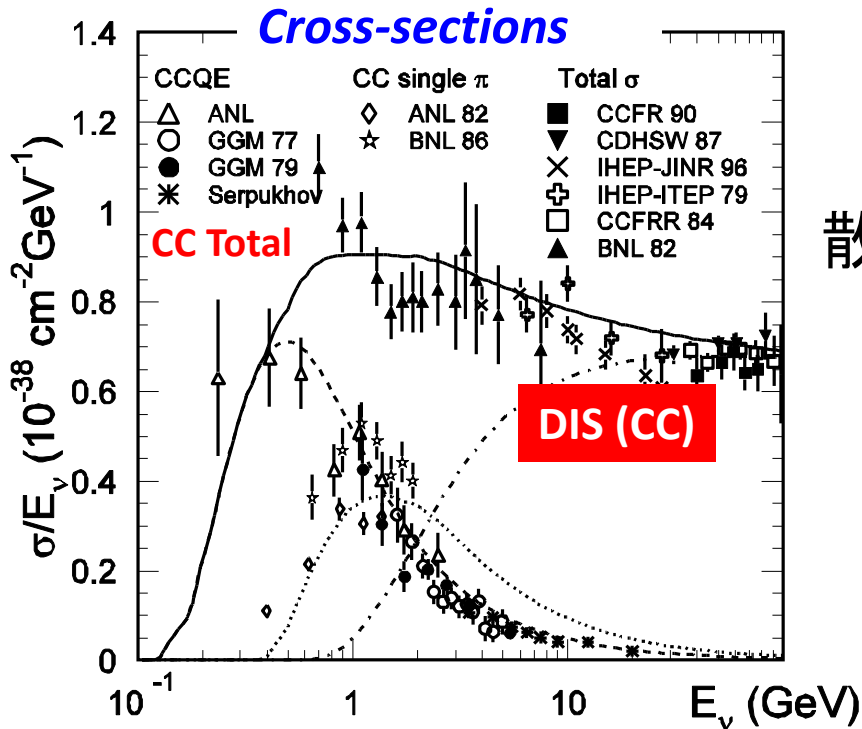
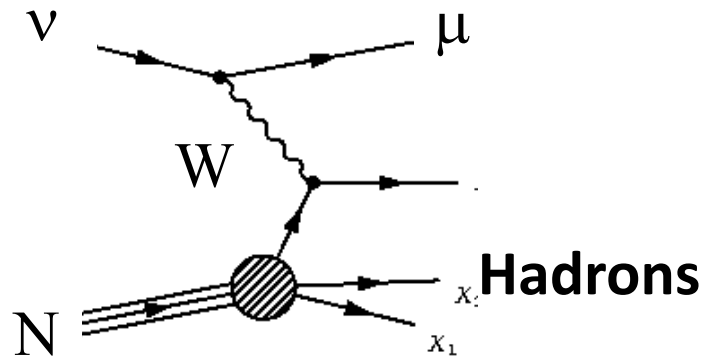
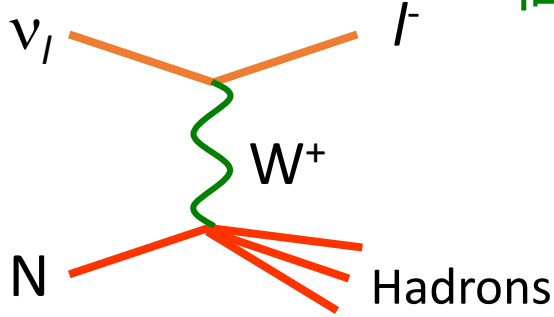
各反応種別の、荷電レプトンの運動量・方向分布、
反応種別同定における

事象選択効率や純度、背景事象の混ざりこみ、
シミュレーションを用いて評価する。

Charged current Deep inelastic scattering

高エネルギー領域 (~数十GeV) の主要な反応

ニュートリノが quark と散乱していると
近似できる



散乱断面積も“比較的”

精度良く決まっている

高エネルギーニュートリノビームの
スペクトラム測定などに用いられる

$E_\nu \sim \text{lepton energy} + \text{Hadron energy}$

(Calorimetric method)

ニュートリノ実験の例

加速器を用いたニュートリノ実験

ニュートリノの方向は既知

Case 2: $E_\nu > \text{several GeV}$

事象選別 : 荷電カレント反応

主に $\nu + N \rightarrow l + N' + \text{hadrons}$

Charged current deep inelastic scattering events

解析の例

1. 観測された荷電レプトンの運動量と方向と、
ハドロンのエネルギーを用いて、
ニュートリノのエネルギーを再構成。
(散乱断面積測定、ニュートリノ振動解析)
2. 観測された事象とシミュレーションによる事象の
パターンを比較、事象種別を判定
(荷電/中性カレントを判別)
(ニュートリノ振動解析
例: MINOS電子ニュートリノ出現事象解析)

ニュートリノ実験の例

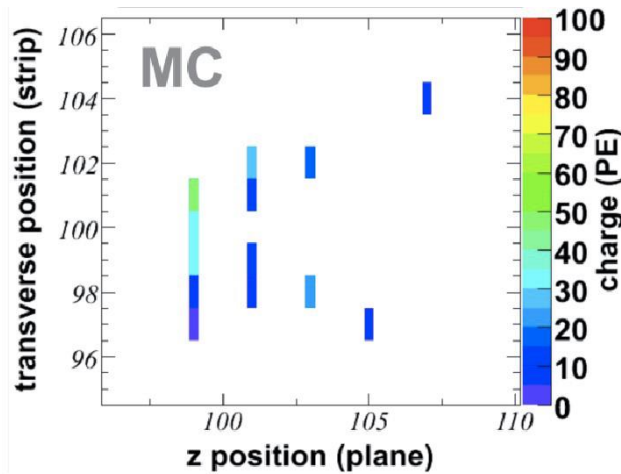
加速器を用いたニュートリノ実験

ニュートリノの方向は既知

Case 2: $E_\nu > \text{several GeV}$

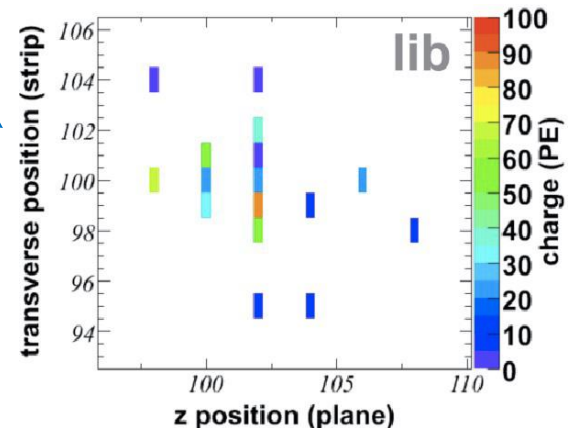
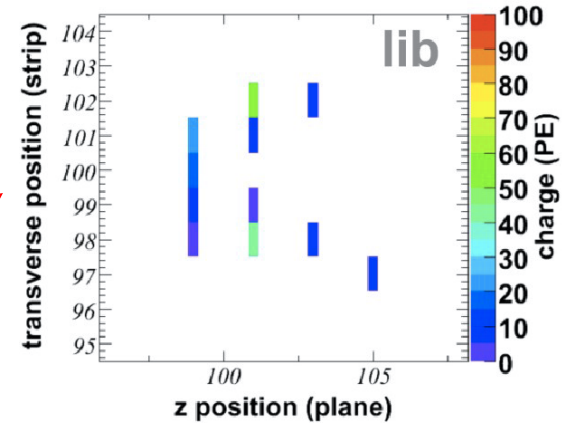
電子ニュートリノ事象と中性カレント事象の識別 (MINOS実験)
観測事象と大量のシミュレーション事象のパターンを比較、
「類似度」を用いて事象種別を判定

比較の例



似てる

似てない



シミュレーションのデータ再現性の
高さが重要となる

ニュートリノ実験の例

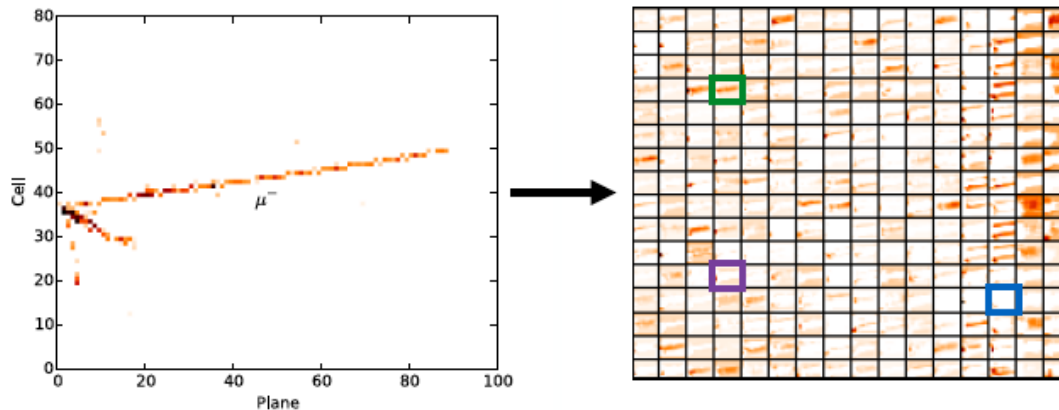
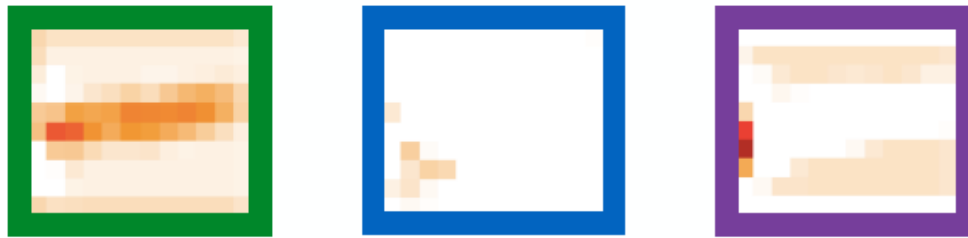
加速器を用いたニュートリノ実験

ニュートリノの方向は既知

Case 2: $E_\nu > \text{several GeV}$

反応種別の識別 (NO ν A実験)

ニューラルネットワーク教育用にシミュレーション事象を用いる。
ニューラルネットワークの出力を事象種別判定に用いる。



A. Aurisano et al., arXiv:1604.01444

ニュートリノ実験の例

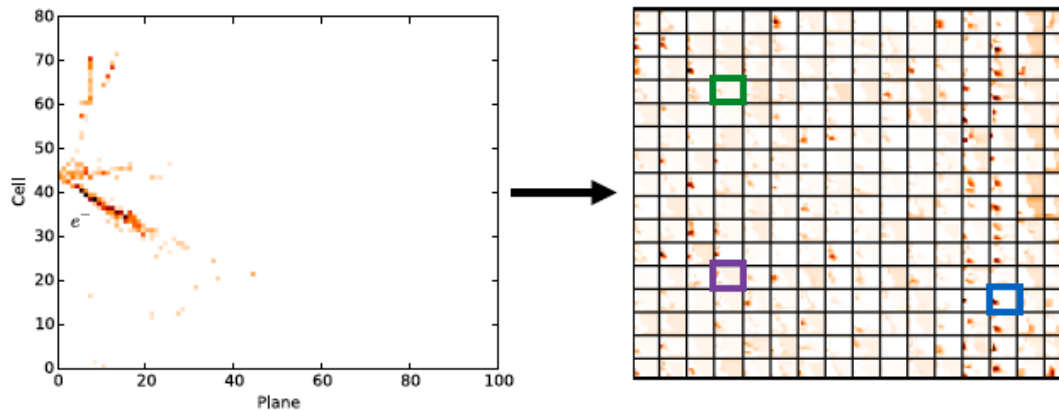
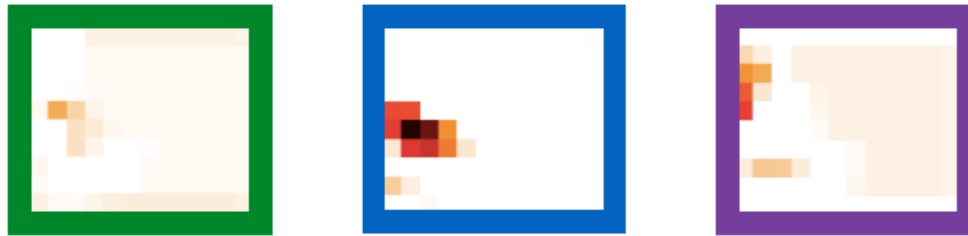
加速器を用いたニュートリノ実験

ニュートリノの方向は既知

Case 2: $E_\nu > \text{several GeV}$

反応種別の識別 (NO ν A実験)

ニューラルネットワーク教育用にシミュレーション事象を用いる。
ニューラルネットワークの出力を事象種別判定に用いる。



Improvement in sensitivity from CVN
equivalent to 30% more exposure

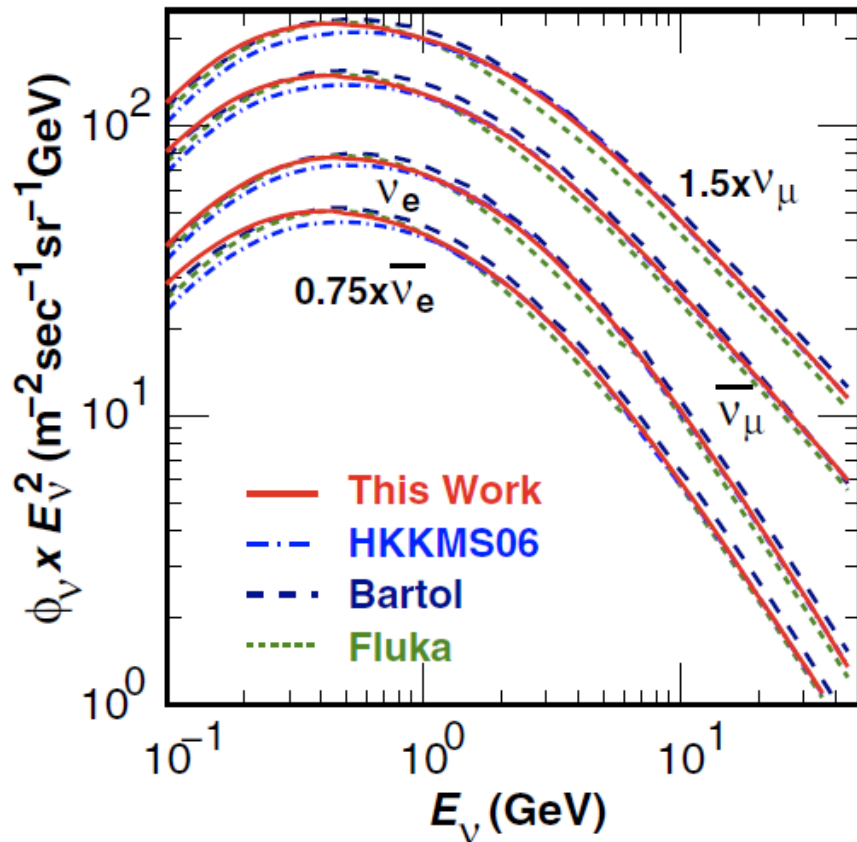
ニュートリノ実験の例

大気ニュートリノ観測実験

ニュートリノの飛来方向は不明

観測されたレプトン及び他の粒子の運動量及び方向を用いる。

大気ニュートリノフラックス



M. Honda et al., Phys. Rev. D 83, 123001 (2011)

エネルギーレンジが広い
(数百MeV ~ TeV 以上)

ニュートリノの飛距離の幅が広い
10 Km ~ 13,000 km

全てのニュートリノフレーバーが
混ざっている。

→ データをうまく使えば、
様々なニュートリノの性質
(質量階層・CP非保存など)
の解析も可能に。

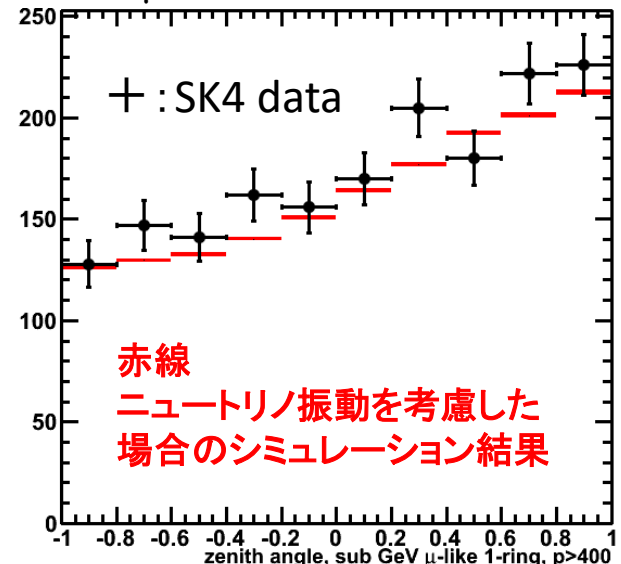
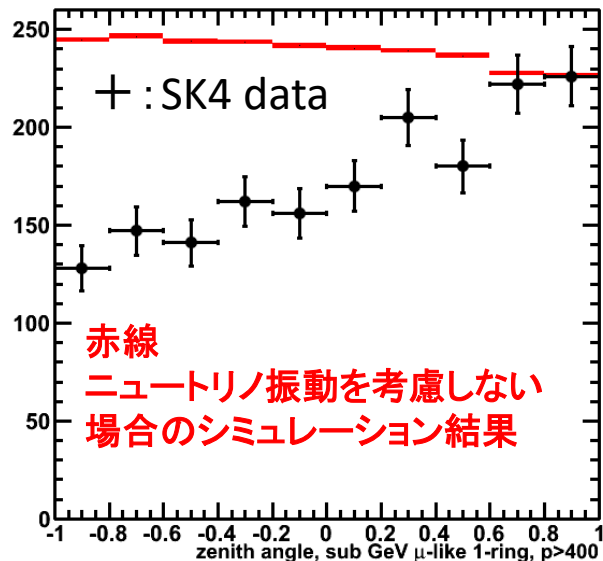
ニュートリノ実験の例

大気ニュートリノ観測実験

ニュートリノの飛来方向は不明

観測されたレプトン及び他の粒子の運動量及び方向を用いる。
複数のデータサンプル(19種類)の観測データの分布と
ニュートリノ振動を考慮にいれたシミュレーション結果を
比較、それらの一致度を用いることで
ニュートリノ振動パラメータを決定

データサンプルの比較例 (解析に用いられる binning とは別)
(μ -like, 1ring, $1.3 \text{ GeV}/c > P_{\mu} > 0.4 \text{ GeV}/c$)



ニュートリノ実験の例

大気ニュートリノ観測実験

- Matter effect ~ from mass hierarchy

Possible ν_e enhancement in several GeV

passed through the earth core

Difference in # of electron events:

$$\Delta_e \equiv \frac{N_e}{N_e^0} \cong \Delta_1(\theta_{13})$$

← Matter effect

← Solar term

$$+ \Delta_2(\Delta m_{12}^2)$$

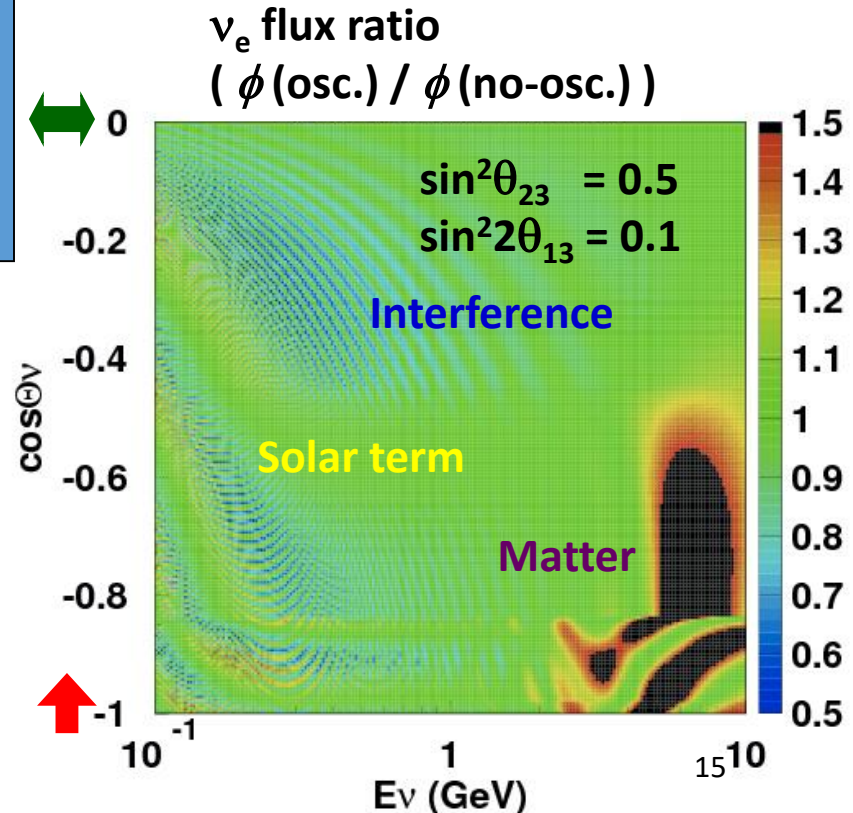
← Interference

$$+ \Delta_3(\theta_{13}, \Delta m_{12}^2, \delta)$$

ニュートリノと反ニュートリノで物質効果に違い
~ 微分散乱断面積の違い

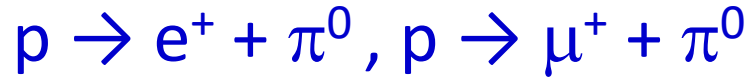
(lepton / hadron energy balance,
multiplicity of hadrons など) を用い
ニュートリノと反ニュートリノの識別を
統計的に行おうとしている。

Gd導入後は、中性子数の情報も使える可能性。

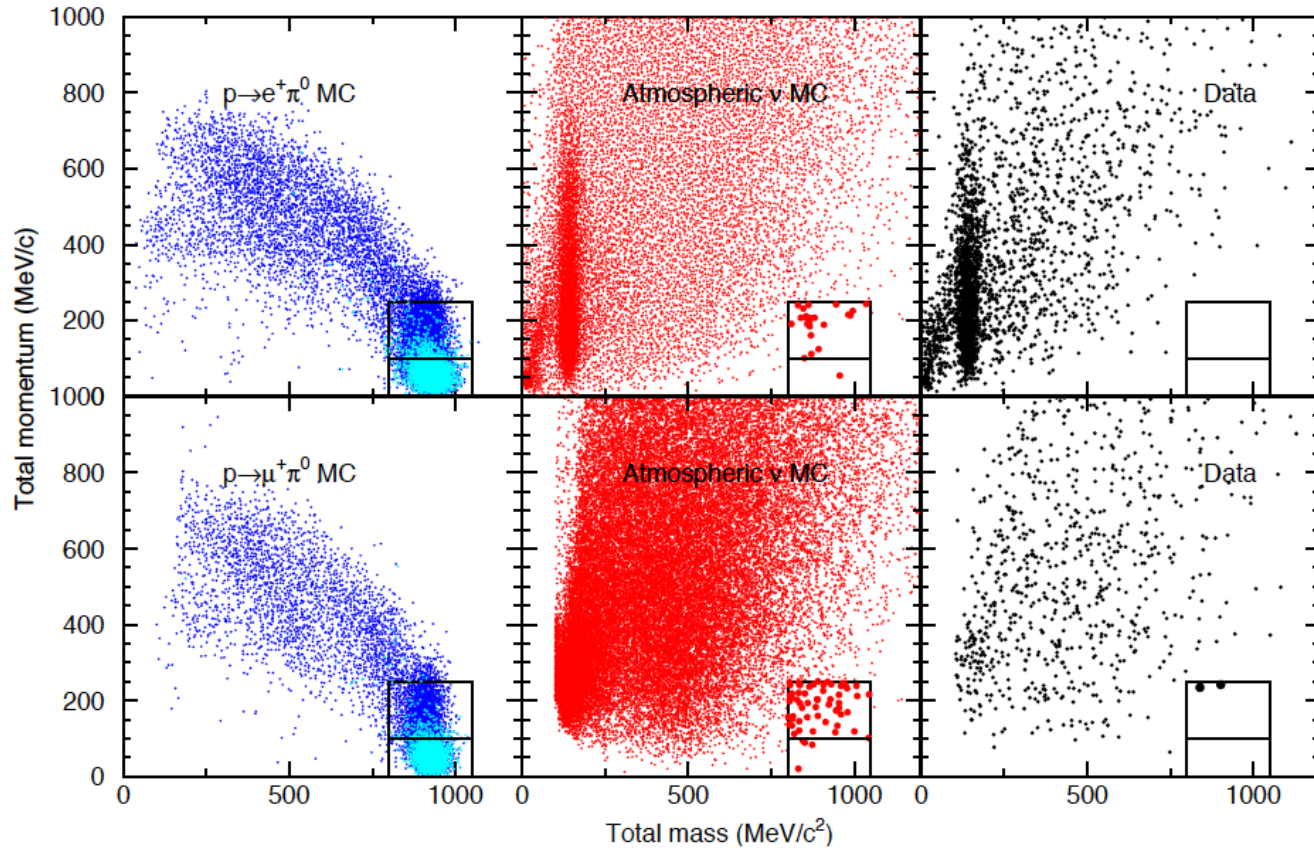


ニュートリノが背景事象になる例

陽子崩壊探索



大気ニュートリノによる π 粒子生成反応が主要な背景事象になる



Partial lifetime limit = 1.6×10^{34} year



Partial lifetime limit = 7.7×10^{33} year

ニュートリノ反応シミュレーションプログラム (Neutrino event generator)

Procedure of the neutrino event generation

(Event generator)

- ニュートリノエネルギーの決定

最終的な事象のエネルギー分布が

neutrino flux ($\phi(E_\nu)$) と total cross-section ($\sigma_{total}(E_\nu)$)
の積の分布を再現するように。

- 反応種別の決定

各反応種別毎の散乱断面積を用いて、反応種別を決定。

(各反応の散乱断面積が計算できていることが必要)

- 素過程ニュートリノ反応のシミュレーション

生成粒子数を決定、

各粒子の粒子種別及び運動量(方向)を決定。

- 生成粒子の原子核中での散乱シミュレーション(必要なら)

原子核中で発生した各粒子(ハドロン)の核内での散乱を

シミュレーションし、各粒子が原子核から出た時の状態を決定。

(吸収・散乱・粒子生成・荷電変換反応などが起こりうる)

Procedure of the neutrino event generation

ニュートリノエネルギーの決定

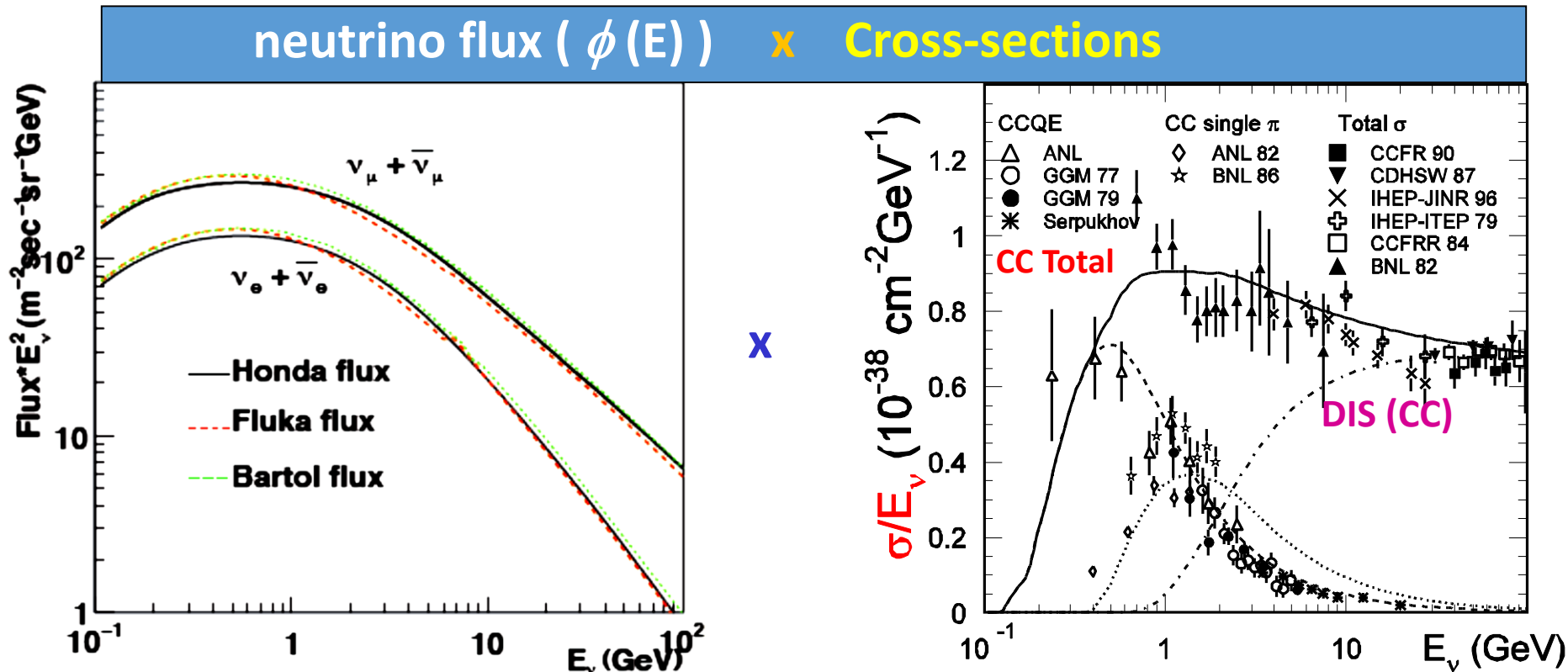
最終的な事象のエネルギー分布が

neutrino flux ($\phi(E_\nu)$) と total cross-section ($\sigma_{total}(E_\nu)$)
の積の分布を再現するように。

example)

Atmospheric neutrino

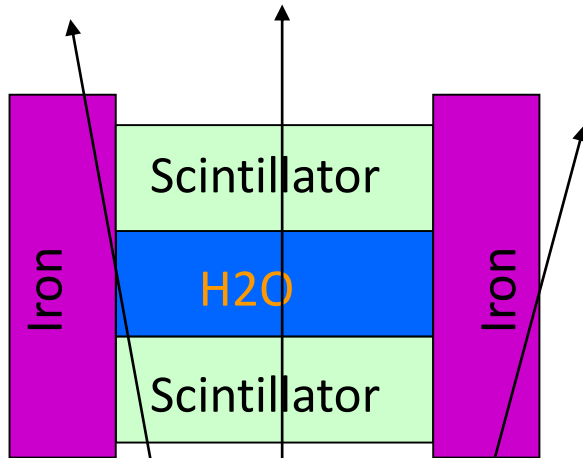
(Angular distribution is also taken into account in the actual simulation.)



Procedure of the neutrino event generation

ニュートリノエネルギーと反応位置の決定

(T2K 実験前置検出器の例)



- T2K ニュートリノビームシミュレーションから
ニュートリノの種類 (flavor)、方向、エネルギー
を得る。



- 各検出器内の各物質について、
通過する距離 (L) = 厚さ を計算する。

L(Iron), L(Scintillator), L(H2O) etc...



- 各物質についての反応確率を計算する

$$P(\text{Iron}) = L(\text{Iron}) \times \sigma_{\text{Iron}}(E\nu)$$

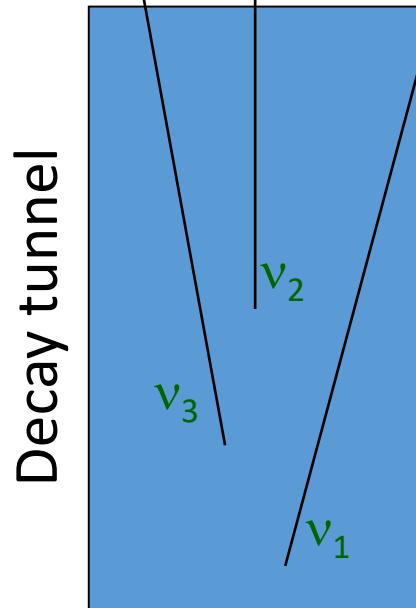
$$P(\text{Scintillator}) = L(\text{Scint.}) \times \sigma_{\text{Scint.}}(E\nu)$$

$$P(\text{H2O}) = L(\text{H2O}) \times \sigma_{\text{H2O}}(E\nu)$$

$$P_{\text{Total}} = P(\text{Iron}) + P(\text{Scint.}) + P(\text{H2O})$$



- 反応したか、どの物質で反応したかを決めた後、
検出器内での反応位置を決める



Procedure of the neutrino event generation

反応種別の決定

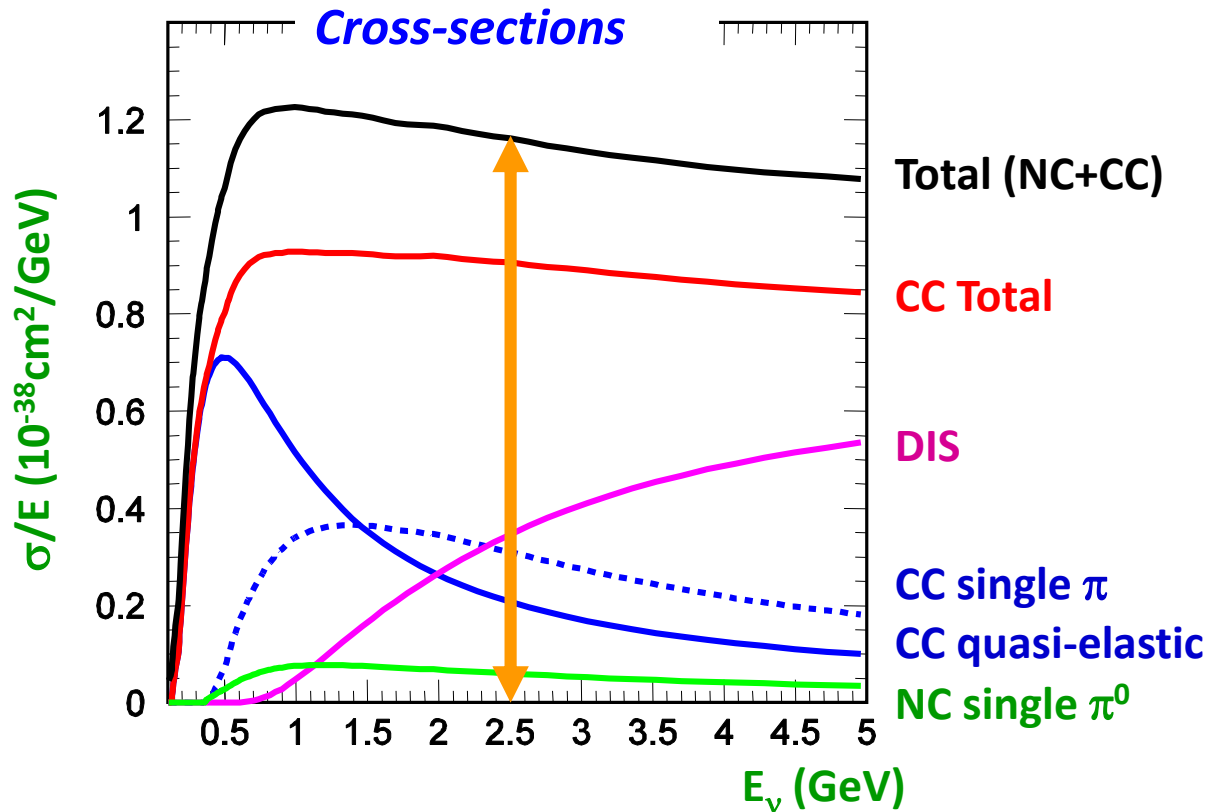
前のステップで決めたエネルギーにおける、

反応種別ごとの散乱断面積を用い、反応種別を選択

(シミュレーションプログラム内では、

生成する反応種別それぞれの散乱断面積の情報が必要となる)

Example) このオレンジ色の線上の割合となるよう、反応種別を選択

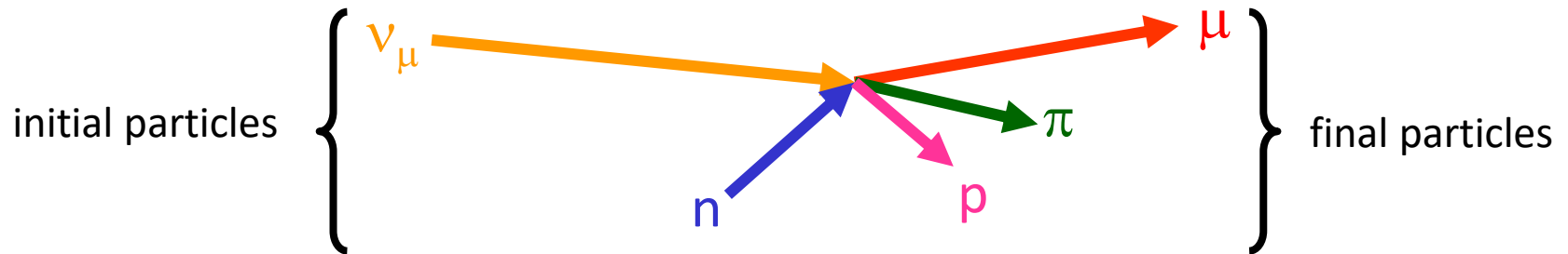


Procedure of the neutrino event generation

反応から生成する粒子種類、数、方向、運動量を決める

Example) 荷電カレント 単一 π 粒子生成事象

あらかじめ決定したエネルギーでの反応によって生成する
全ての粒子について、方向とエネルギー(運動量)を与える
(初期状態の核子の方向とエネルギー(運動量)もここで決める)

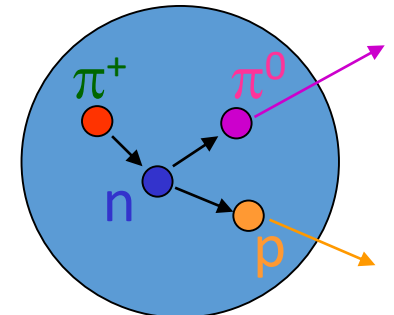


原子核内での生成粒子の再散乱を考慮する

前ステップで生成した粒子のうち、原子核内で再散乱する可能性のある
粒子についてシミュレーションを行う。
各粒子について、原子核から出るときの方向とエネルギー(運動量)を決める。

Example) π 荷電交換反応

π 粒子の原子核内での軌跡を追跡、
反応可能性を調べ、反応した場合には
粒子種別、運動量などを変化させる。

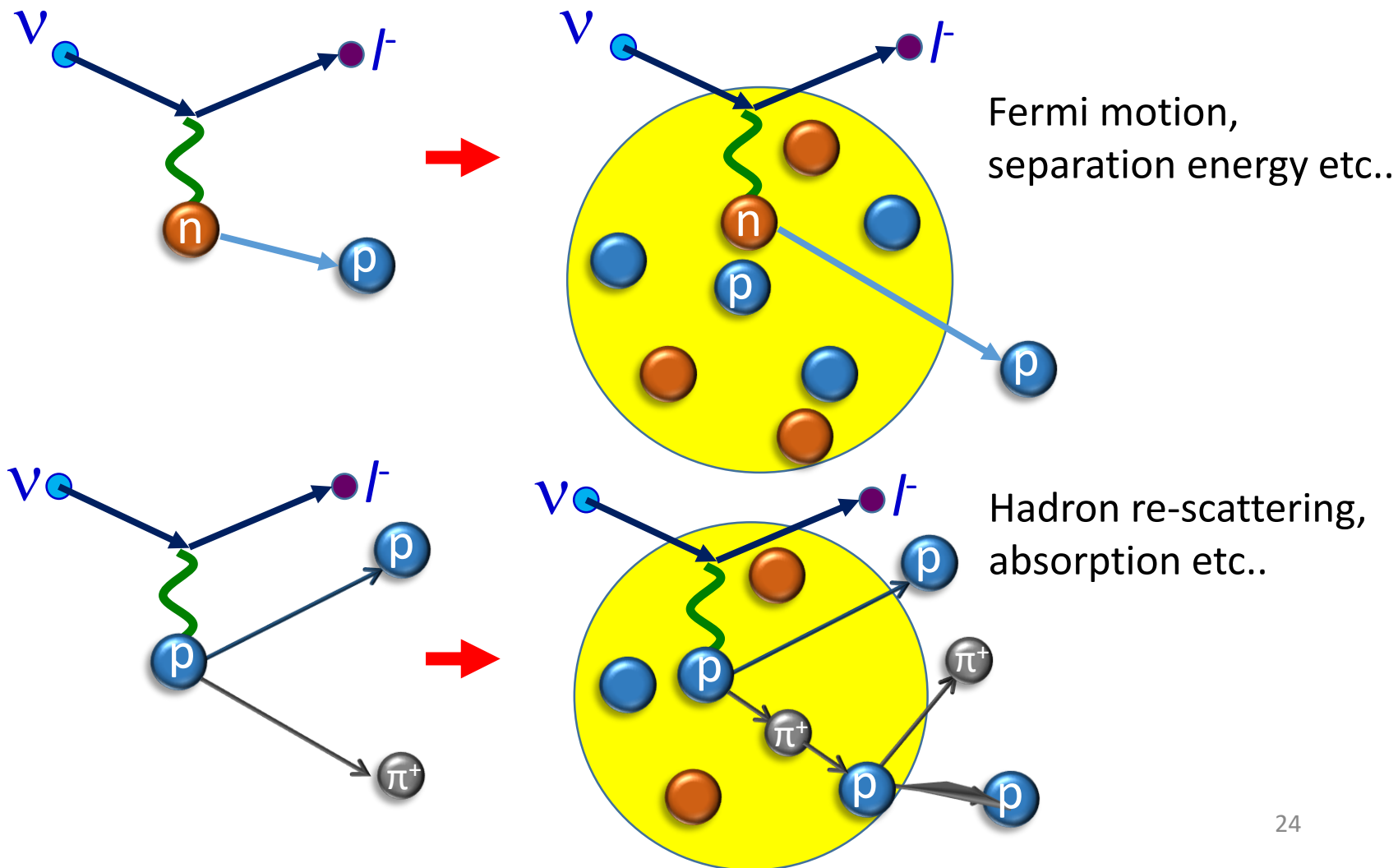


Current issues

Current issues

検出器は原子核標的を使っている

様々な「原子核効果」を考慮しなければならない



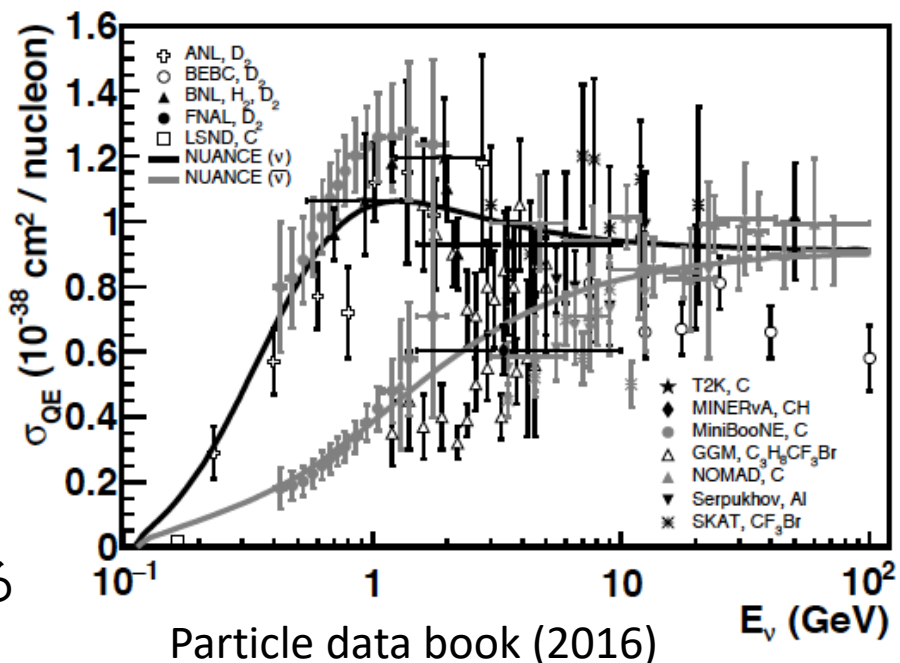
Current issues

CCQE反応の散乱断面積

最近の原子核標的を用いた実験
～散乱断面積が大きく出ている

素過程の散乱断面積を決めるパラメータが、
昔の実験で正しく測定できていなかった

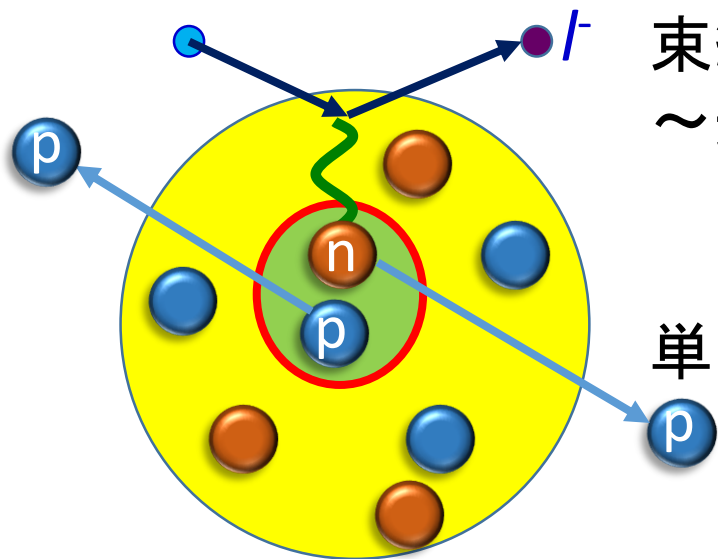
インパルス近似で単一粒子散乱だけを考える
のではなにか不足している？



束縛された2核子との散乱の寄与？

～近年の実験では、低運動量の核子は
測定できていない

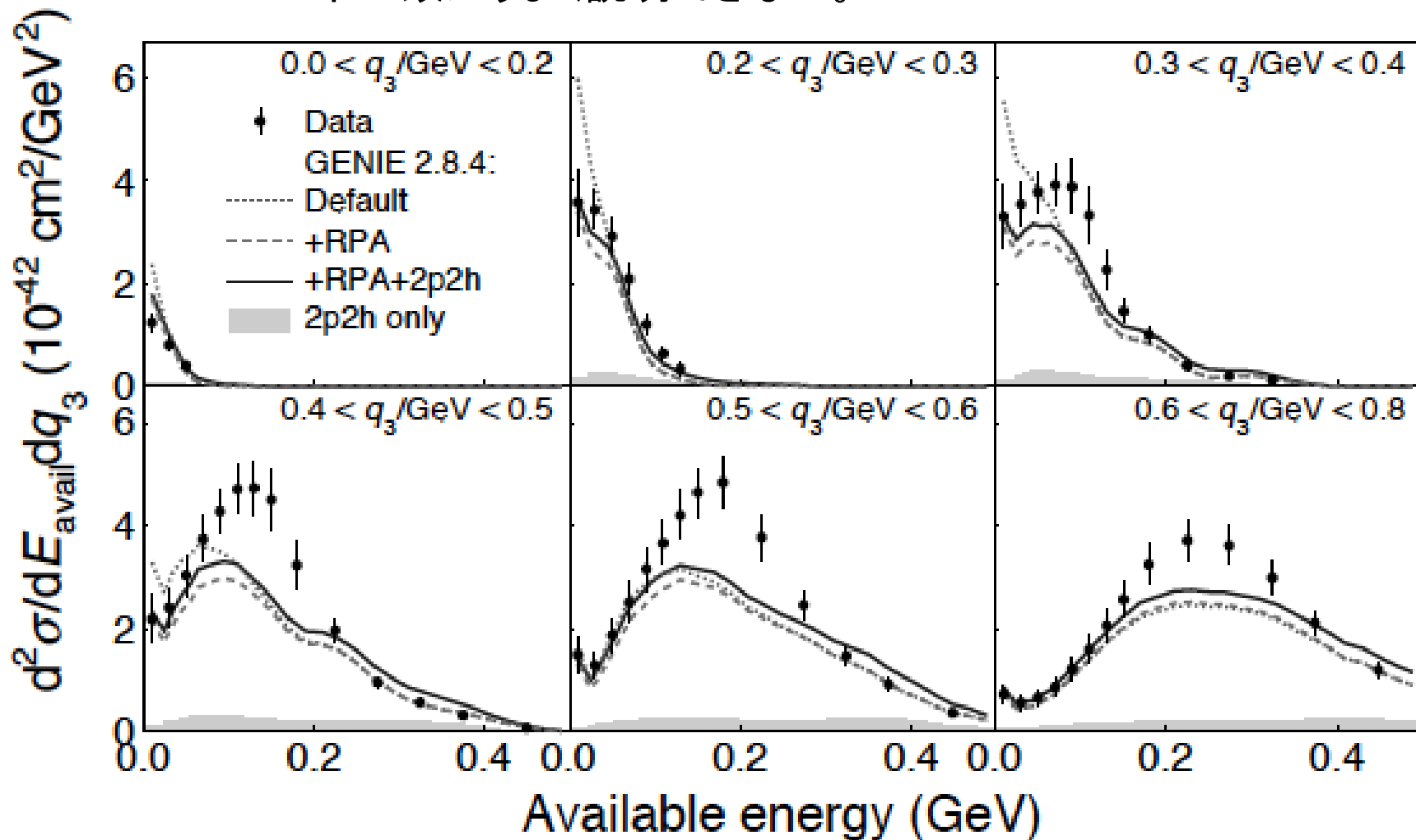
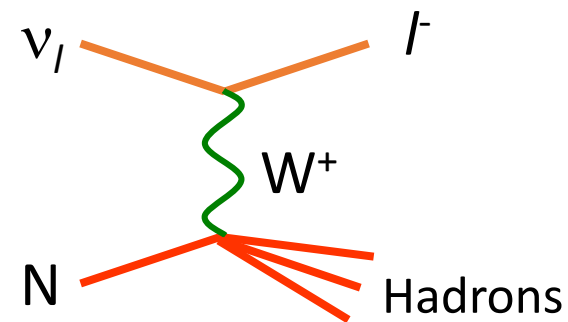
単一核子との散乱と、複数核子との散乱
の区別は明確にはできない。



(運動量移行の小さい領域ではsuppressionが単純なモデルの予想より大きい)

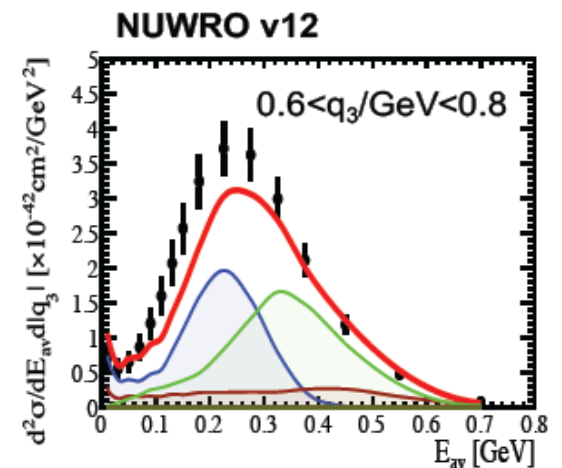
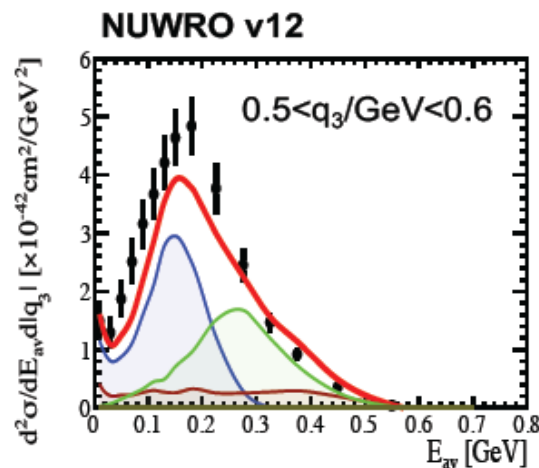
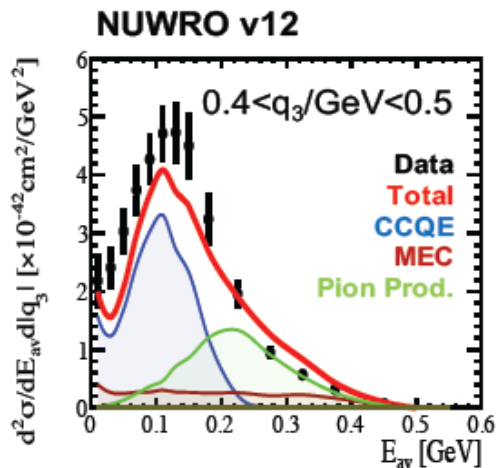
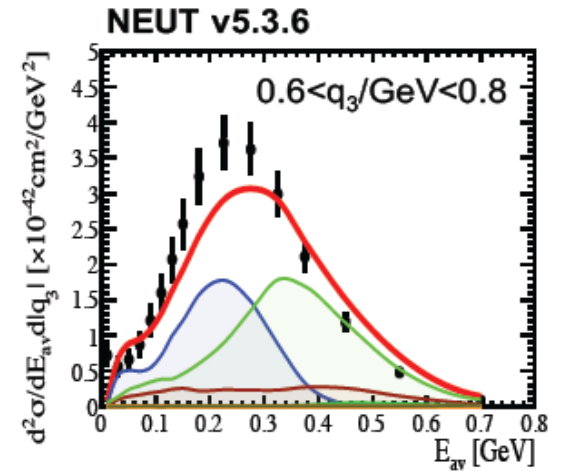
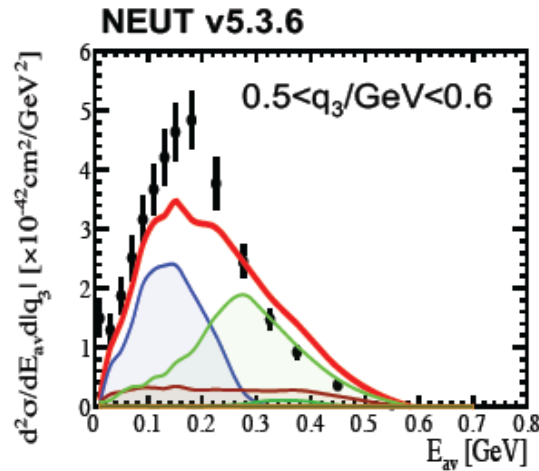
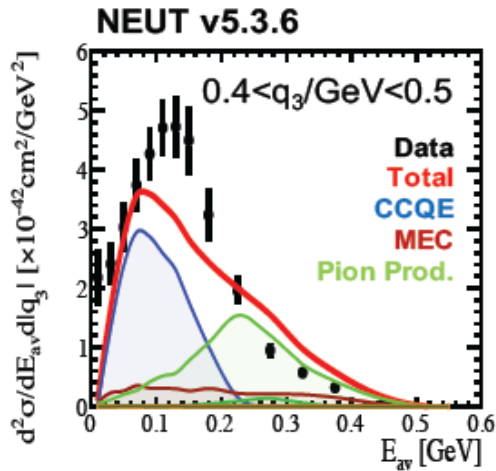
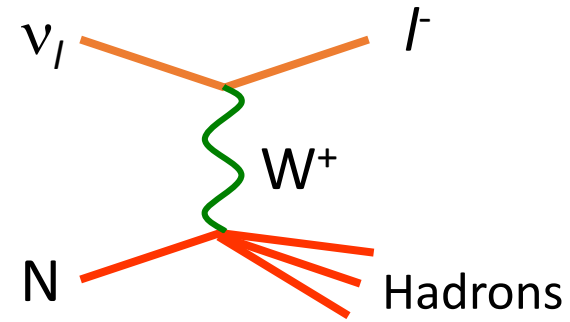
Current issues

MINERvA 実験はレプトンの運動量移行と
(検出可能な)ハドロンエネルギーの関係を測定した。
既存の2核子散乱モデルでは、
不一致がうまく説明できない。



Current issues

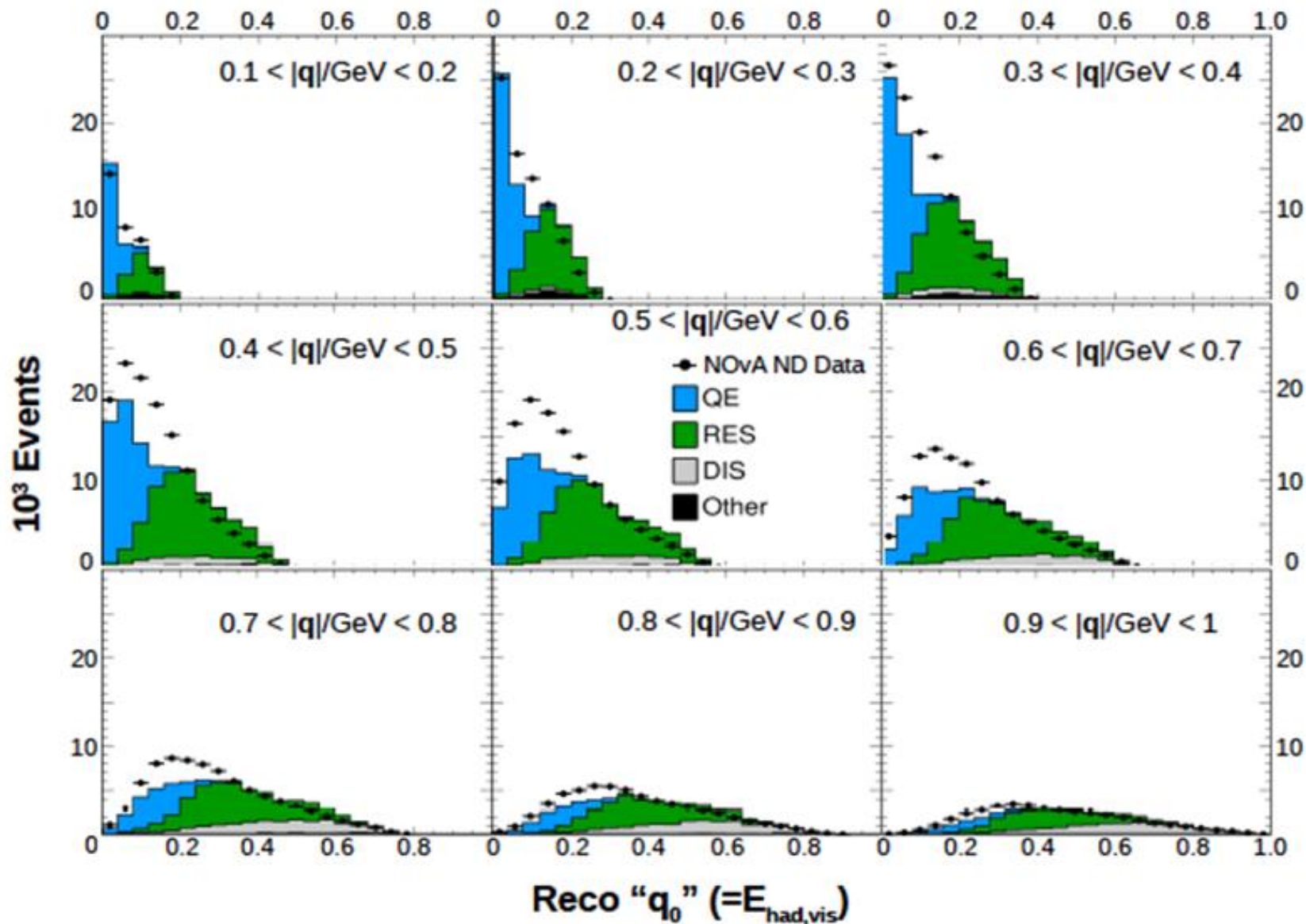
MINERvA 実験はレプトンの運動量移行と
(検出可能な)ハドロンエネルギーの関係を測定した。
既存の2核子散乱モデルでは、
不一致がうまく説明できない。



Current issues

NOvA 実験でもおなじようなかい離がみられた

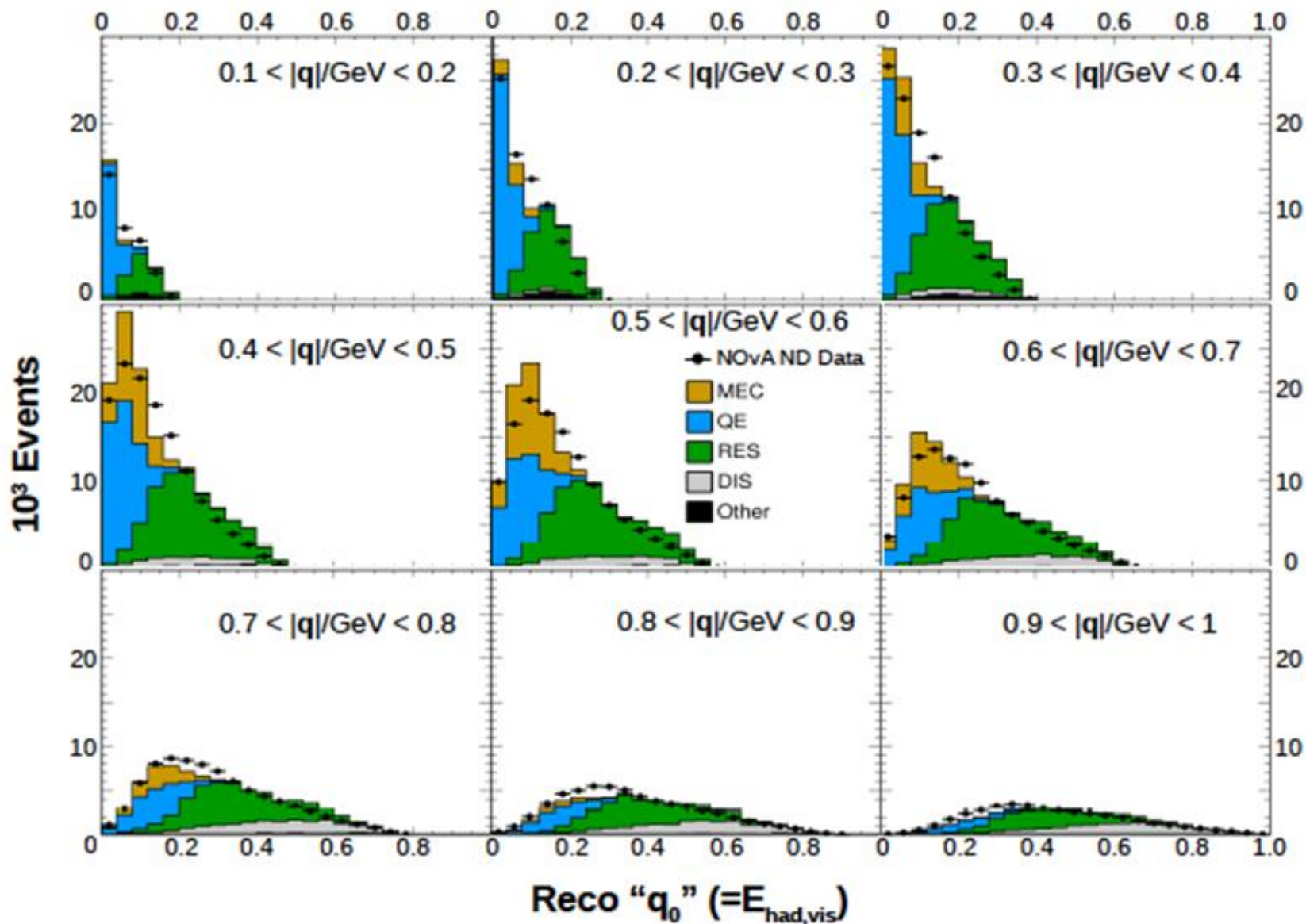
NOvA Preliminary



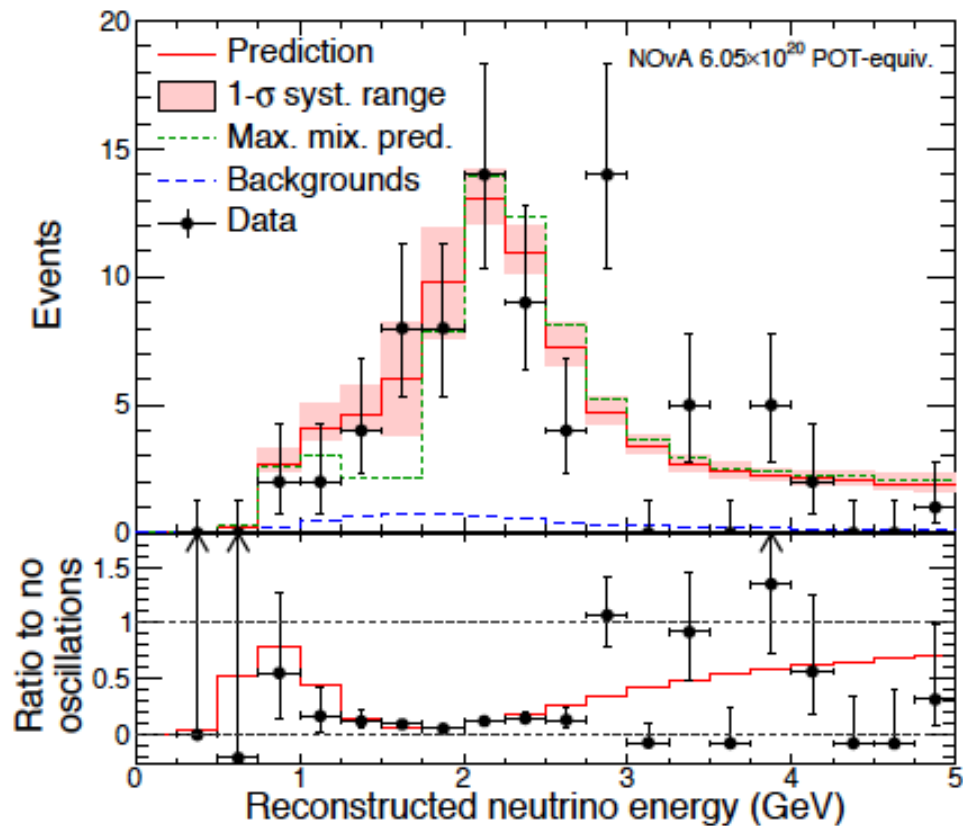
Current issues

empiricalなモデルを導入して対応した。

NOvA Preliminary

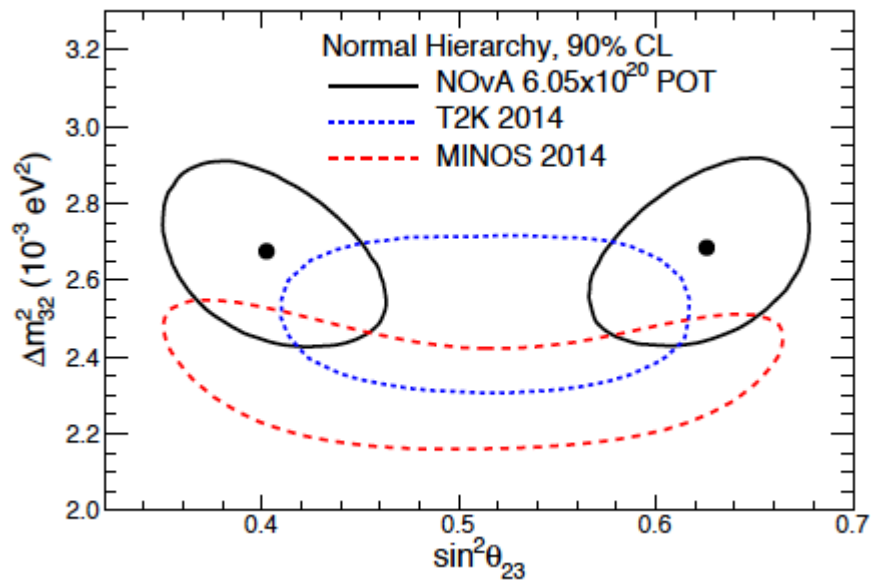


NOvA ν_μ disappearance analysis

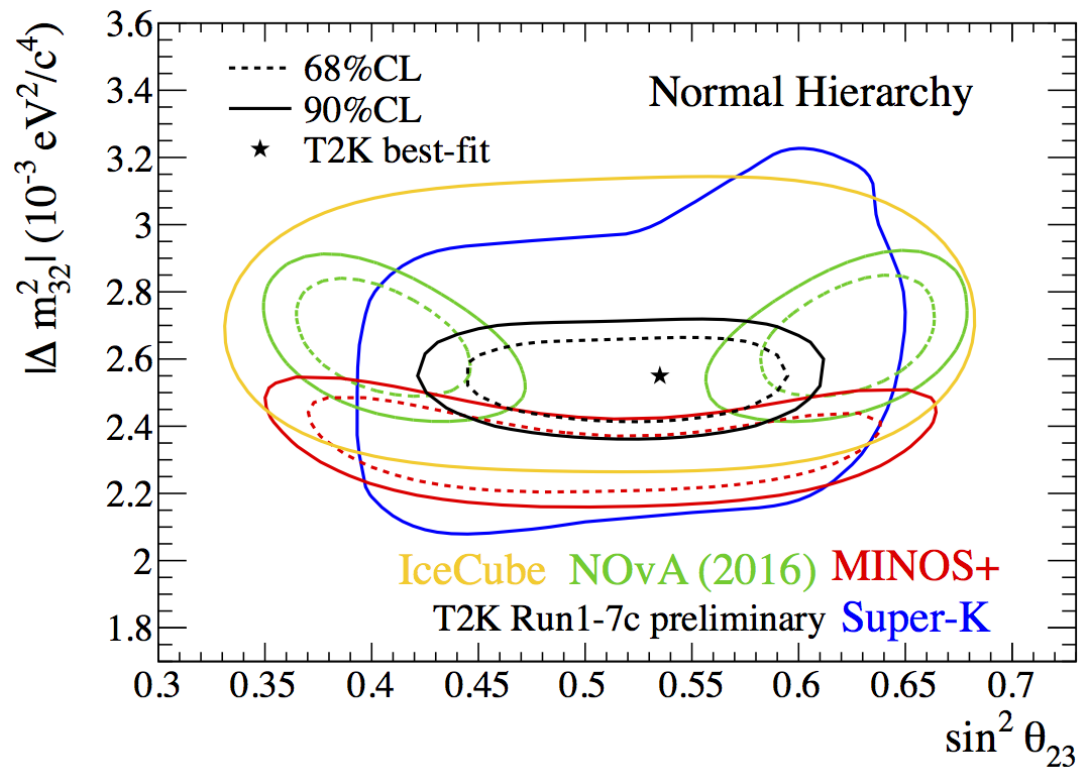
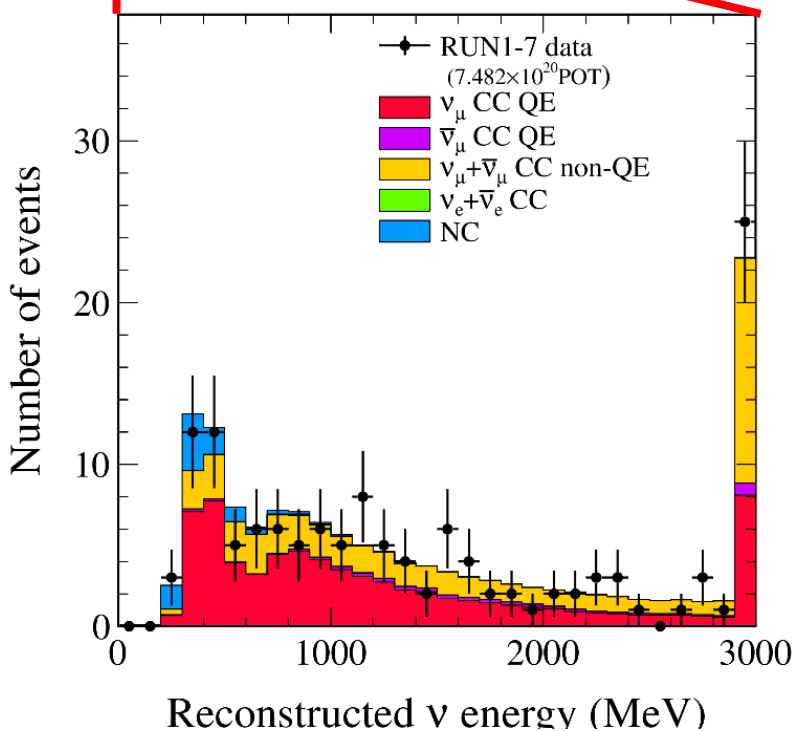
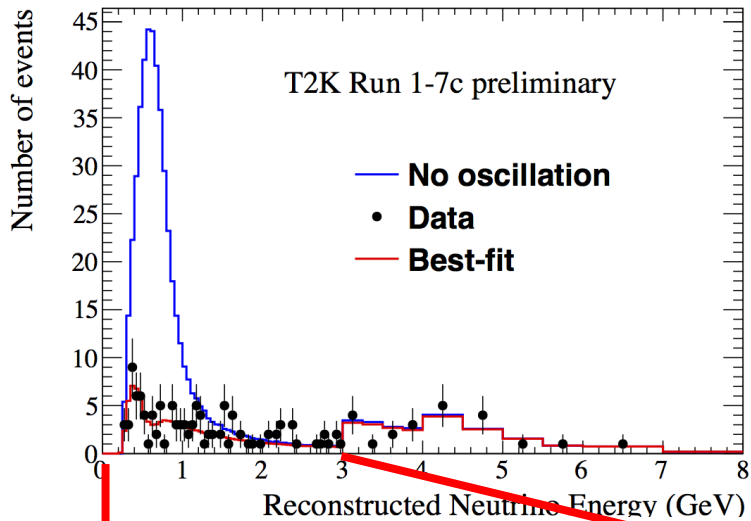


Best fit

$$\sin^2\theta_{23} = 0.404 \text{ and } 0.624.$$



T2K ν_μ disappearance results



$$\sin^2 \theta_{23} = 0.532^{+0.046}_{-0.068} \text{ (NH)}$$

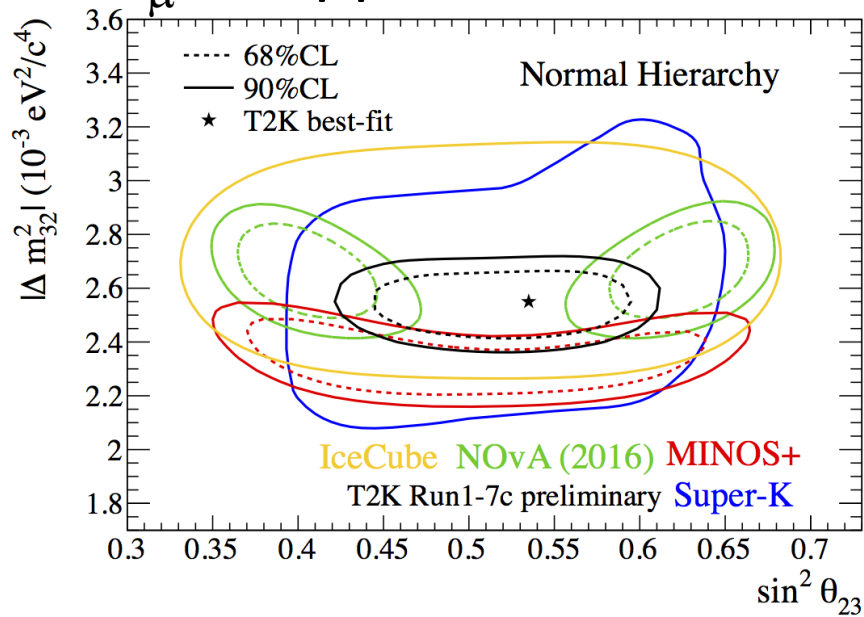
$$= 0.534^{+0.043}_{-0.066} \text{ (IH)}$$

$$|\Delta m_{32}^2| = 2.545^{+0.081}_{-0.084} \text{ (NH)}$$

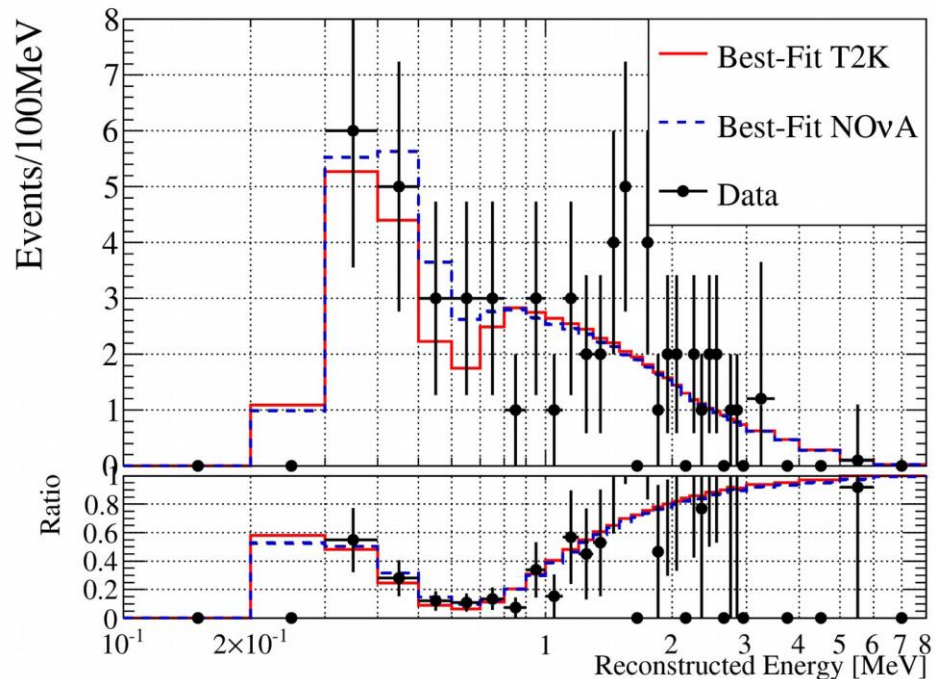
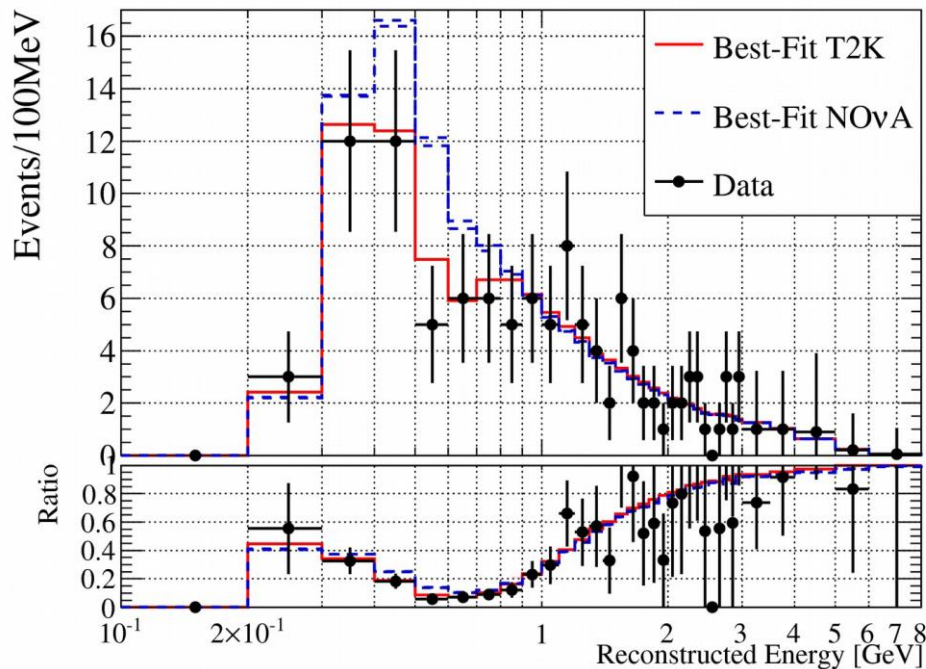
$$= 2.510^{+0.081}_{-0.083} \text{ (IH)}$$

(× 10⁻³ eV²)

T2K ν_μ disappearance results



NOvA Best fit parameter (Neutrino 2016)
を用いた時、T2Kではどのようなspectrum
が期待されるかを確認した。



Uncertainties in neutrino oscillation analysis ~ T2K ~

1 ring muon サンプルの事象数に対する系統誤差

Source of uncertainty	ν 1 ring μ	$\bar{\nu}$ 1 ring μ
SK detector	3.9%	3.3%
SK final state & secondary interactions	1.5%	2.1%
Flux & ν interactions constrained by ND280	2.8%	3.3%
Neutral current interactions	0.8%	0.8%
Total	5.0%	5.2%

ニュートリノフラックスおよびニュートリノ反応の誤差は
前置検出器の測定によって大幅に小さくなっている。
(Without ND280 constraints ~ 12 %)

Uncertainties in neutrino oscillation analysis \sim NOvA \sim

Systematic error of NOvA ν_μ disappearance

Source of uncertainty	Uncertainty in $\sin^2\theta_{23}(\times 10^{-3})$	Uncertainty in $\Delta m_{32}^2 (\times 10^{-6} \text{ eV}^2)$
Absolute muon energy scale [$\pm 2\%$]	+9 / -8	+3 / -10
Relative muon energy scale [$\pm 2\%$]	+9 / -9	+23 / -14
Absolute hadronic energy scale [$\pm 5\%$]	+5 / -5	+7 / -3
Relative hadronic energy scale [$\pm 5\%$]	+10 / -11	+29 / -19
Normalization [$\pm 5\%$]	+5 / -5	+4 / -8
Cross sections and final state interactions	+3 / -3	+12 / -15
Neutrino flux	+1 / -2	+4 / -7
Beam background normalization [$\pm 100\%$]	+3 / -6	+10 / -16
Scintillation model	+4 / -3	+2 / -5
$\delta_{\text{CP}} [0 - 2\pi]$	+0.2 / -0.3	+10 / -9
Total systematic uncertainty	+17 / -19	+50 / -47
Statistical uncertainty	+21 / -23	+93 / -99

Error @ $\sin^2\theta_{23} = 0.626$.

Uncertainties in neutrino oscillation analysis ~ T2K ~

1 ring electron サンプルの事象数に対する系統誤差

Source of uncertainty	ν 1 ring e	$\bar{\nu}$ 1 ring e
SK detector	2.4%	3.1%
SK final state & secondary interactions	2.5%	2.5%
Flux & ν interactions constrained by ND280	2.9%	3.2%
NC 1γ production ($\nu + N \rightarrow \nu + N' + \gamma$)	1.4%	3.0%
Cross-section ratio (ν_{μ} to ν_e)	2.7%	1.5%
Other neutral current interactions	0.2%	0.3%
Total	5.5%	6.2%

ニュートリノフラックスおよびニュートリノ反応の誤差は
前置検出器の測定によって大幅に小さくなっている。

Importance to understand neutrino-nucleus interactions

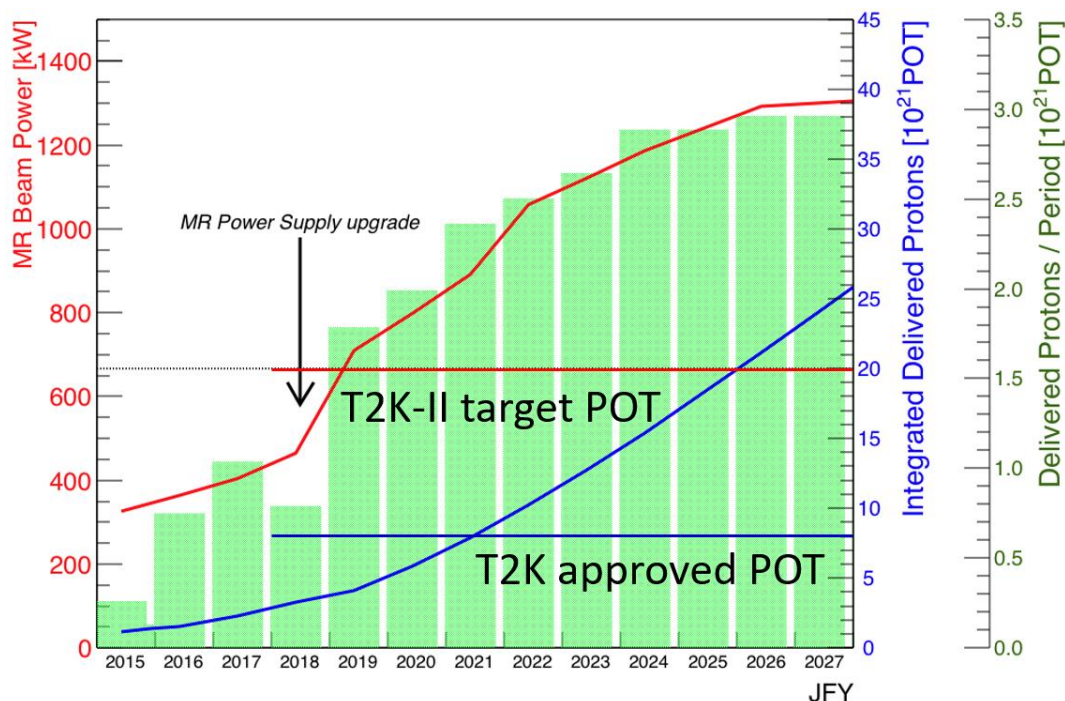
- T2K-II として 20×10^{21} POT のデータを2025~26ころまでに取得
- 実効的な統計を50%程度増やすことを目指す

電磁ホーンの電流増強

SKの有効体積エリア増加

新たなデータサンプルの利用

- 系統誤差を現状の6%程度から4%に低減



Expected number of events (1:1 ν : $\bar{\nu}$ running case)

ν_e sample : 455 events $\pm 20\%$ depending on δ_{CP}

$\bar{\nu}_e$ sample : 129 events $\pm 13\%$ depending on δ_{CP}

Importance to understand neutrino-nucleus interactions

Reduction of the systematic uncertainties from neutrino interactions

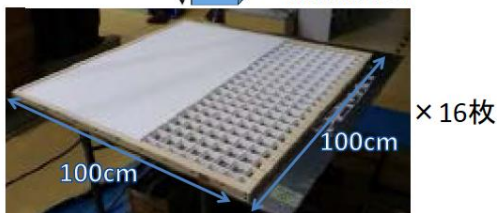
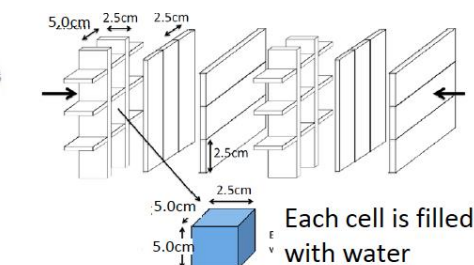
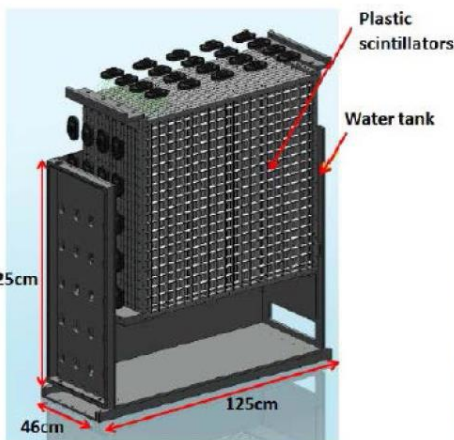
ニュートリノ・原子核反応の不定性が
最後まで残る系統誤差の一つと考えられている。

現在使われていないデータサンプルの利用を検討中
現在のND280検出器は、主に炭素標的(一部が水)だが、
Super-Kamiokandeは水(H₂O)標的。

また、検出器のアクセプタンスもいろいろな点で異なる。

- 1) 水標的と炭素標的の違いのより詳細な測定
- 2) 反応点近傍での生成粒子のより詳細な測定

シンチレータで作ったセル中+水標的
WAGASCI ~ INGRID Water mod./ J-PARC T59 ~



水標的+原子核乾板検出器(J-PARC T60)

