T2K前置検出器での測定

池田一得

2012年7月7日

特定領域「フレーバー物理の新展開」研究会 2012

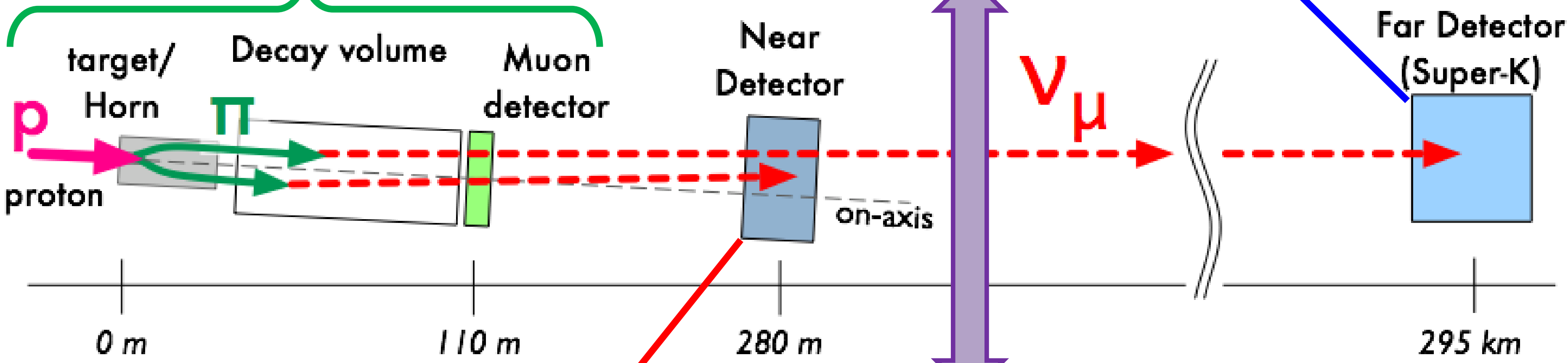
もくじ

- 実験概要
- 前置検出器の紹介
- 振動解析へのインプット
  - フラックスの不定性 ← 鈴木君の話
  - ニュートリノ断面積の不定性
- その他の測定の現状
  - ビームνe
  - NCπ0
  - 断面積測定

T2K実験セットアップ概要

p,μビームの測定
フラックスの計算

ニュートリノ数、
運動量、角度の測定

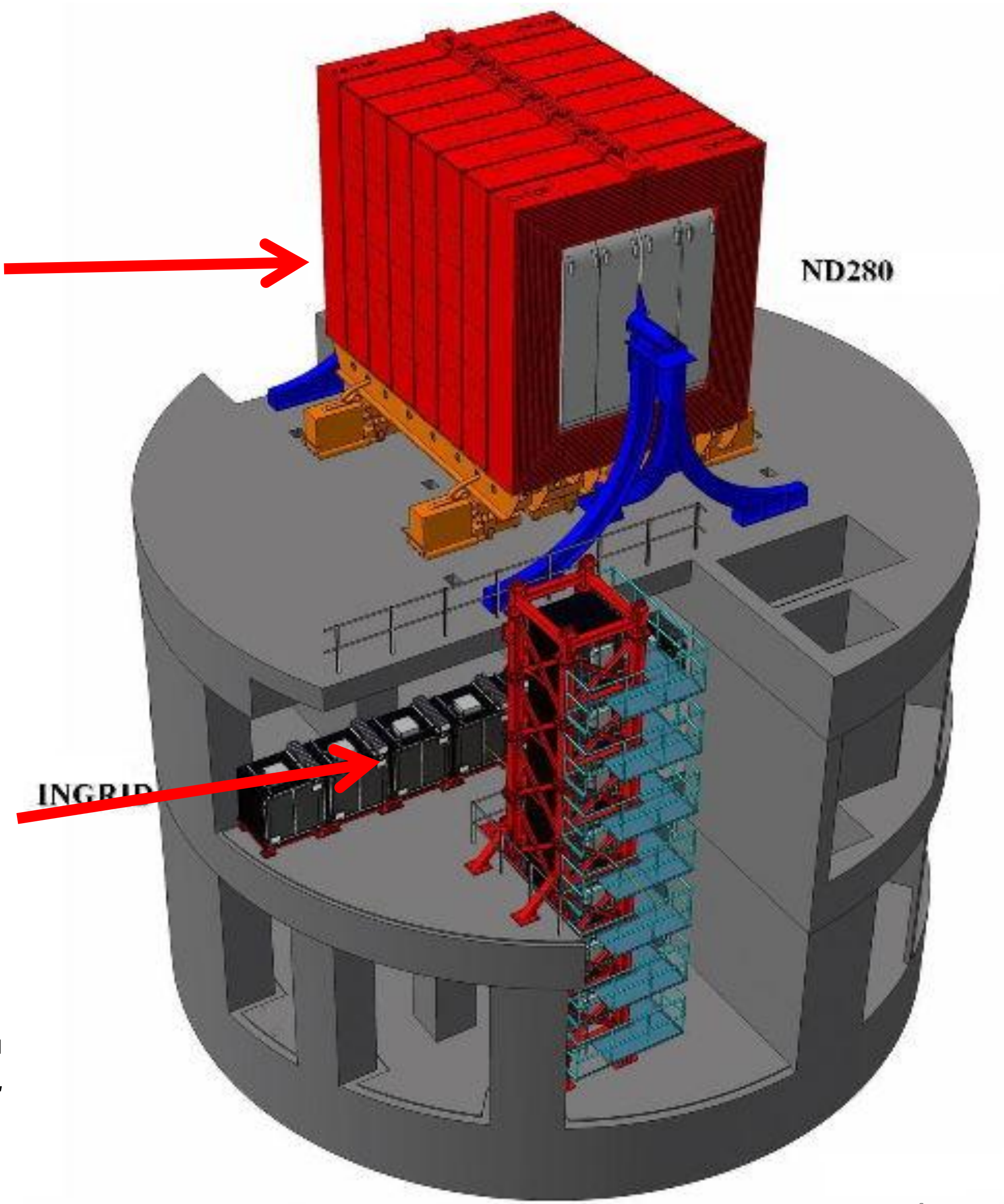


前置検出器での
振動前のニュートリノ測定:
フラックス×断面積
に制限を与える。

ニュートリノ振動を考慮して
SKでのニュートリノ事象を
予想する

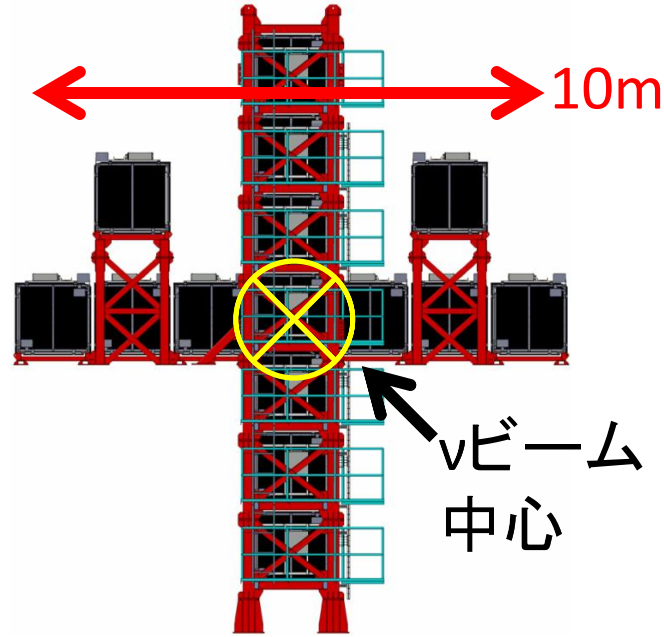
前置検出器

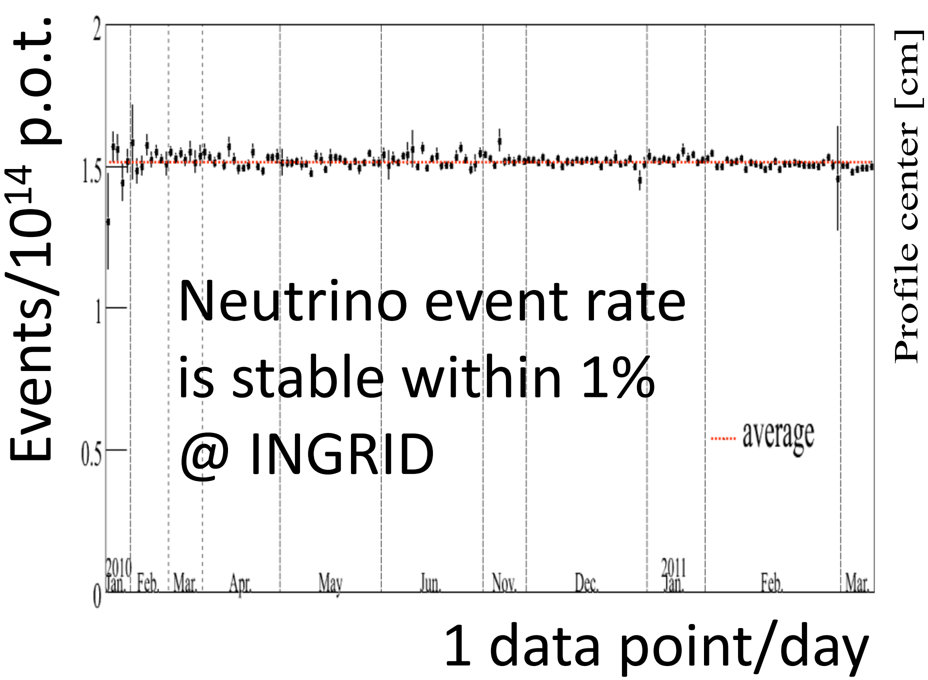
- ND280(多国籍軍)
  - 5つの検出器
  - 磁場の中にある
  - Off axis (SK方向)を向いている。
- INGRID (主に京大)
  - 検出器の中心はOn axis
  - ビーム方向の測定

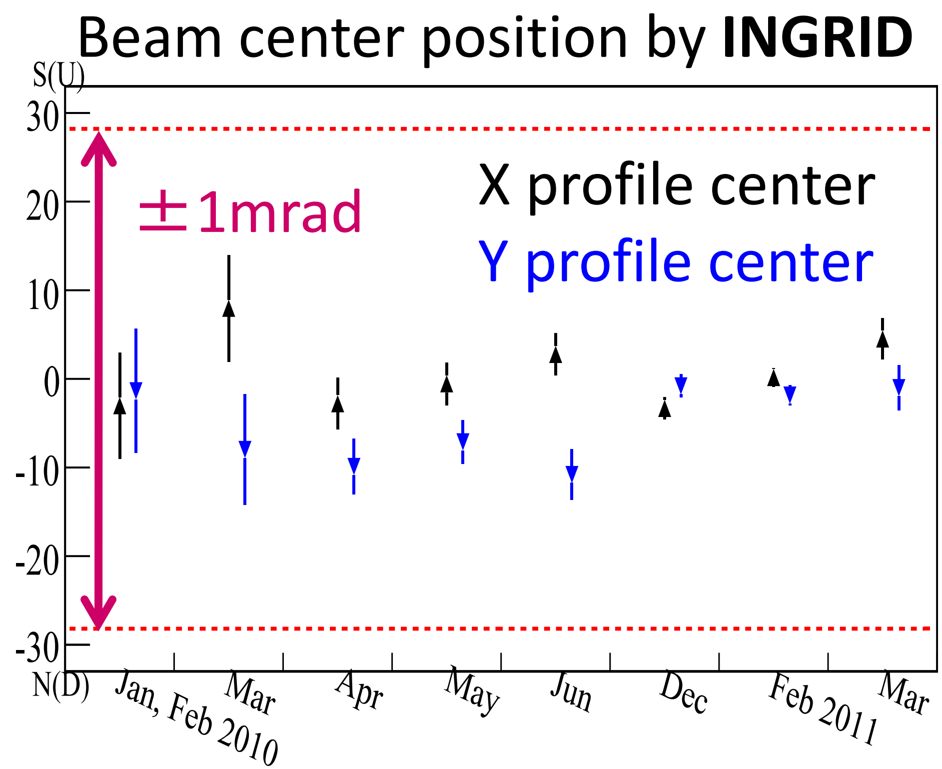


INGRID(鉄とシンチのサンドイッチ)

- 全期間にわたって以下を測定
  ニュートリノイベントレート(日毎)
  ニュートリノビーム中心(月毎)
- **イベントレートは1%以内**
  ビーム中心は1mrad以内で安定

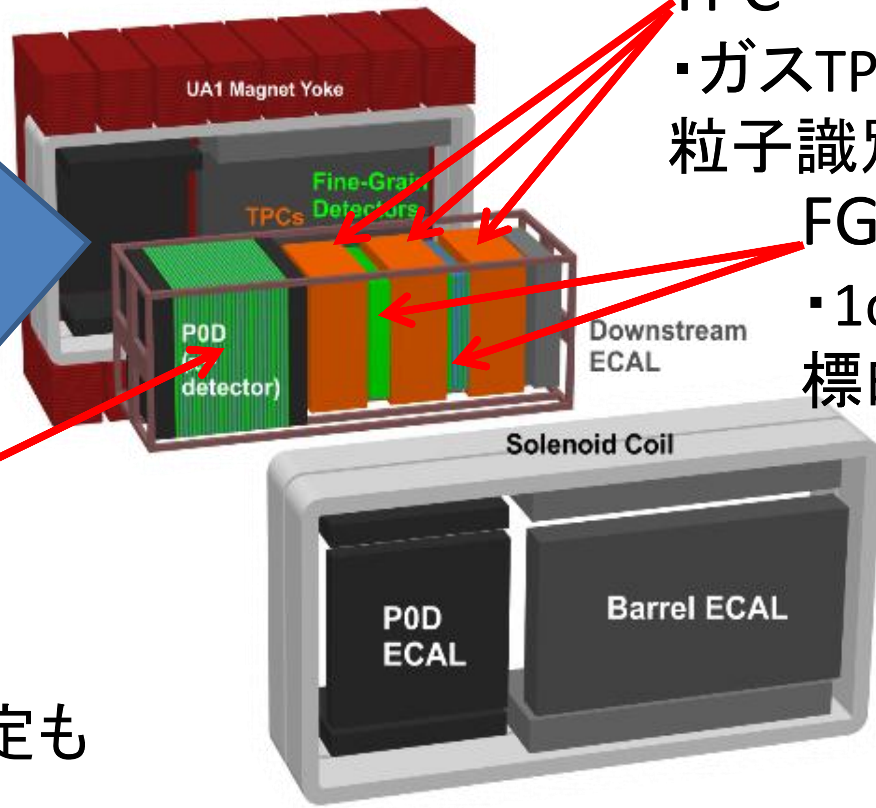






ND280

νビーム

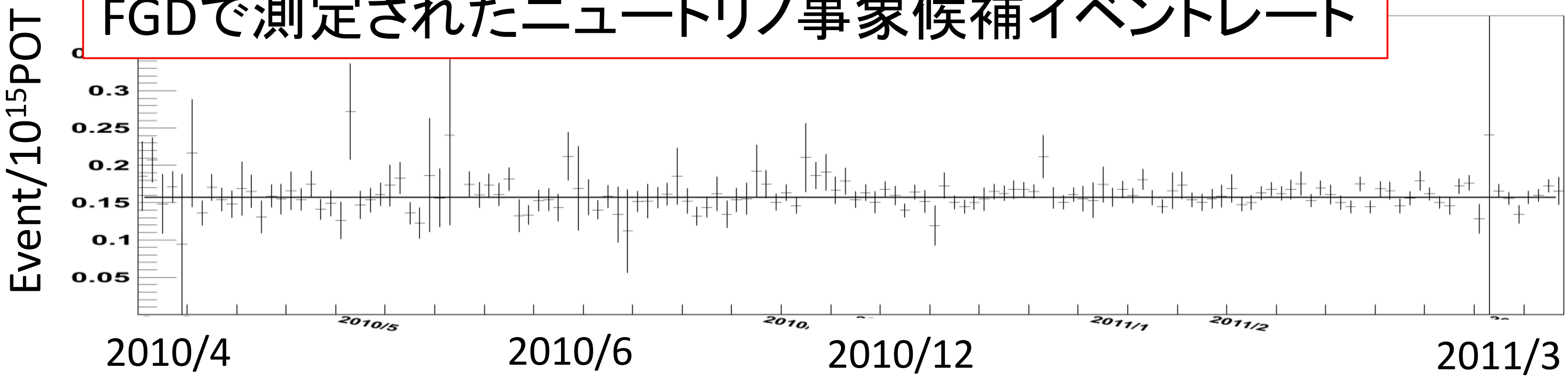


TPC
・ガスTPC
粒子識別、運動量

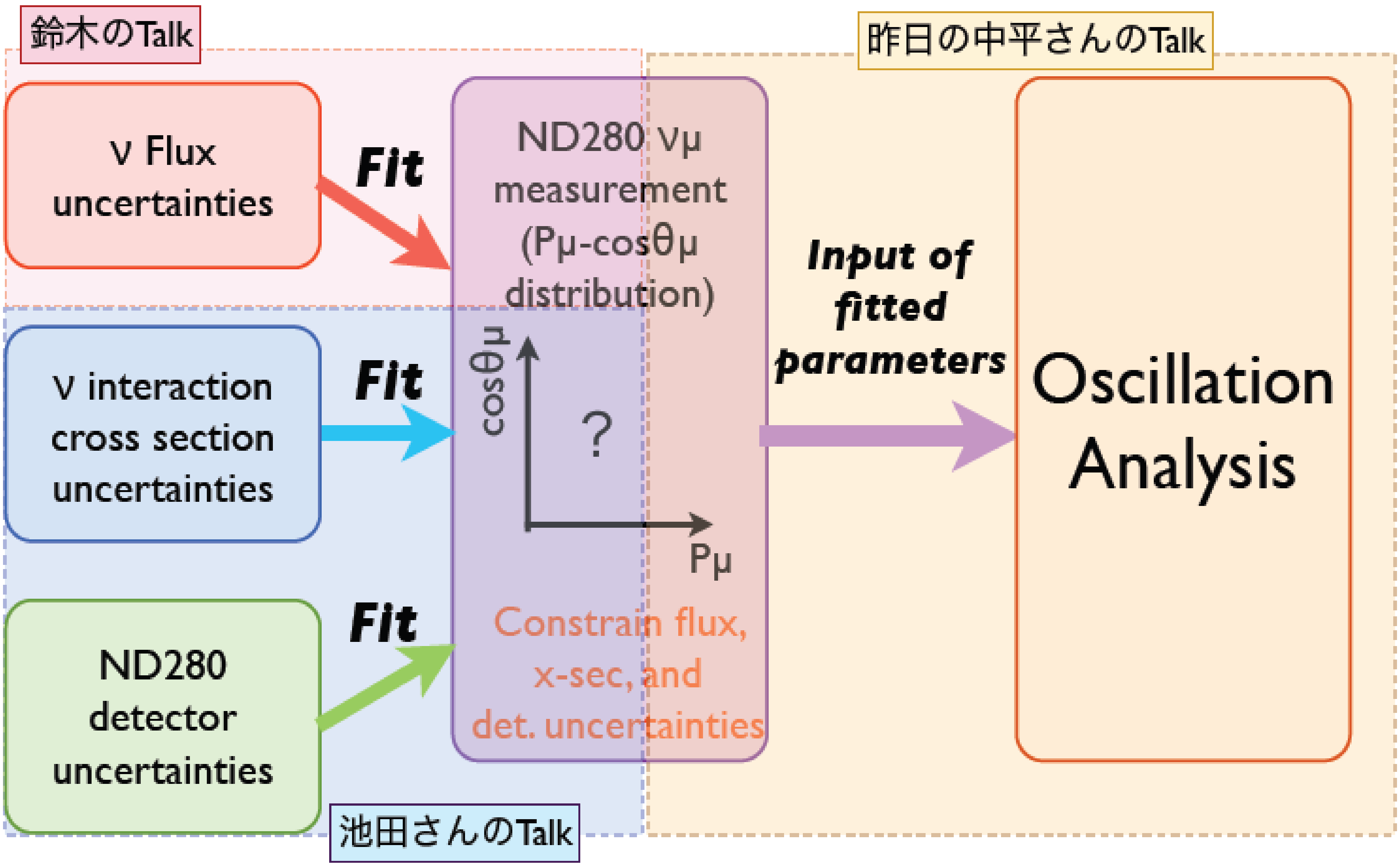
FGD
・1cm角のシンチバー
標的・飛跡検出器

Pi0 Detector
（P0D）
・SKのBGになる
反応を測定
・ビームν_eの測定も

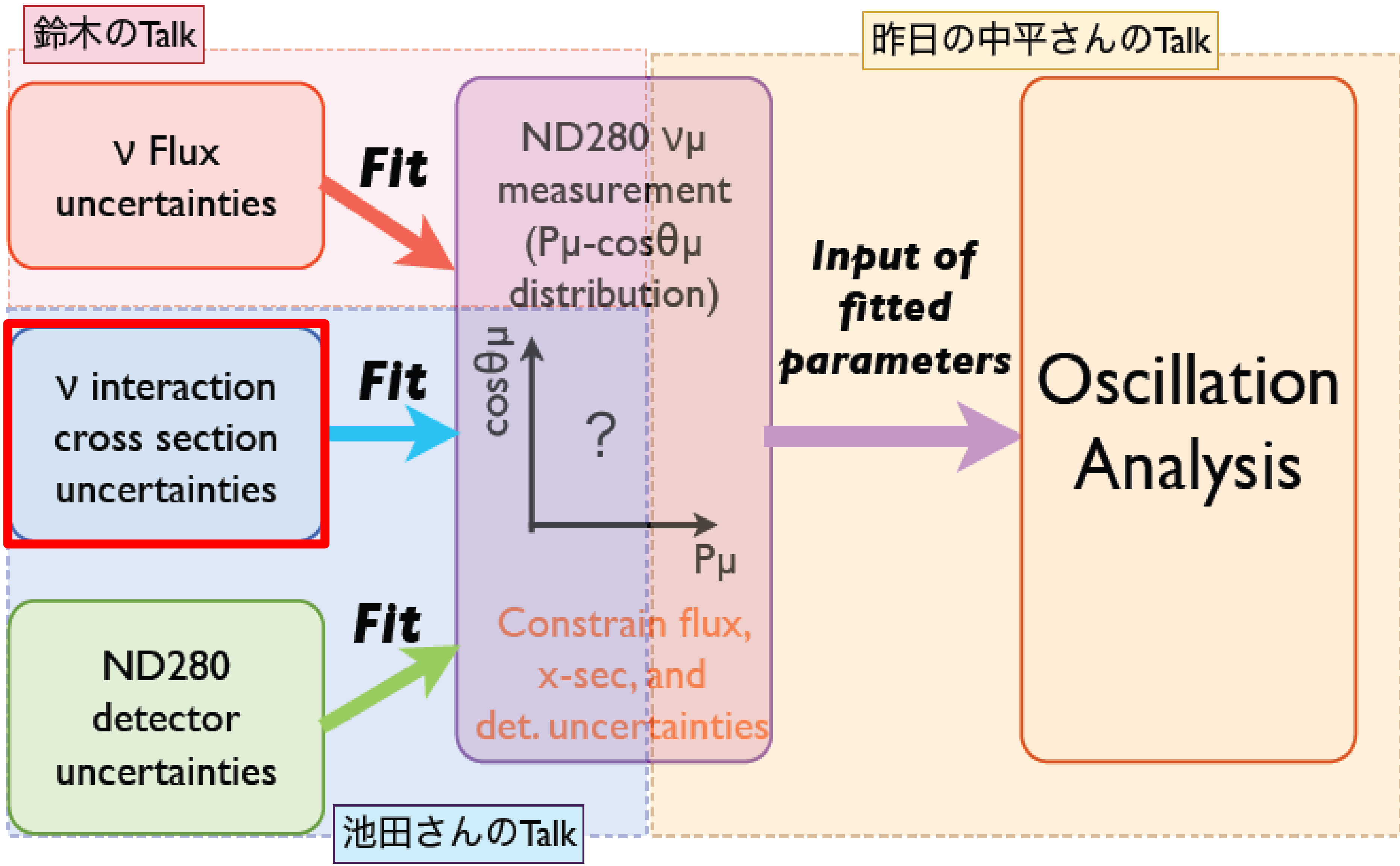
FGDで測定されたニュートリノ事象候補イベントレート



振動解析方法(鈴木スライドより)



振動解析方法(鈴木スライドより)

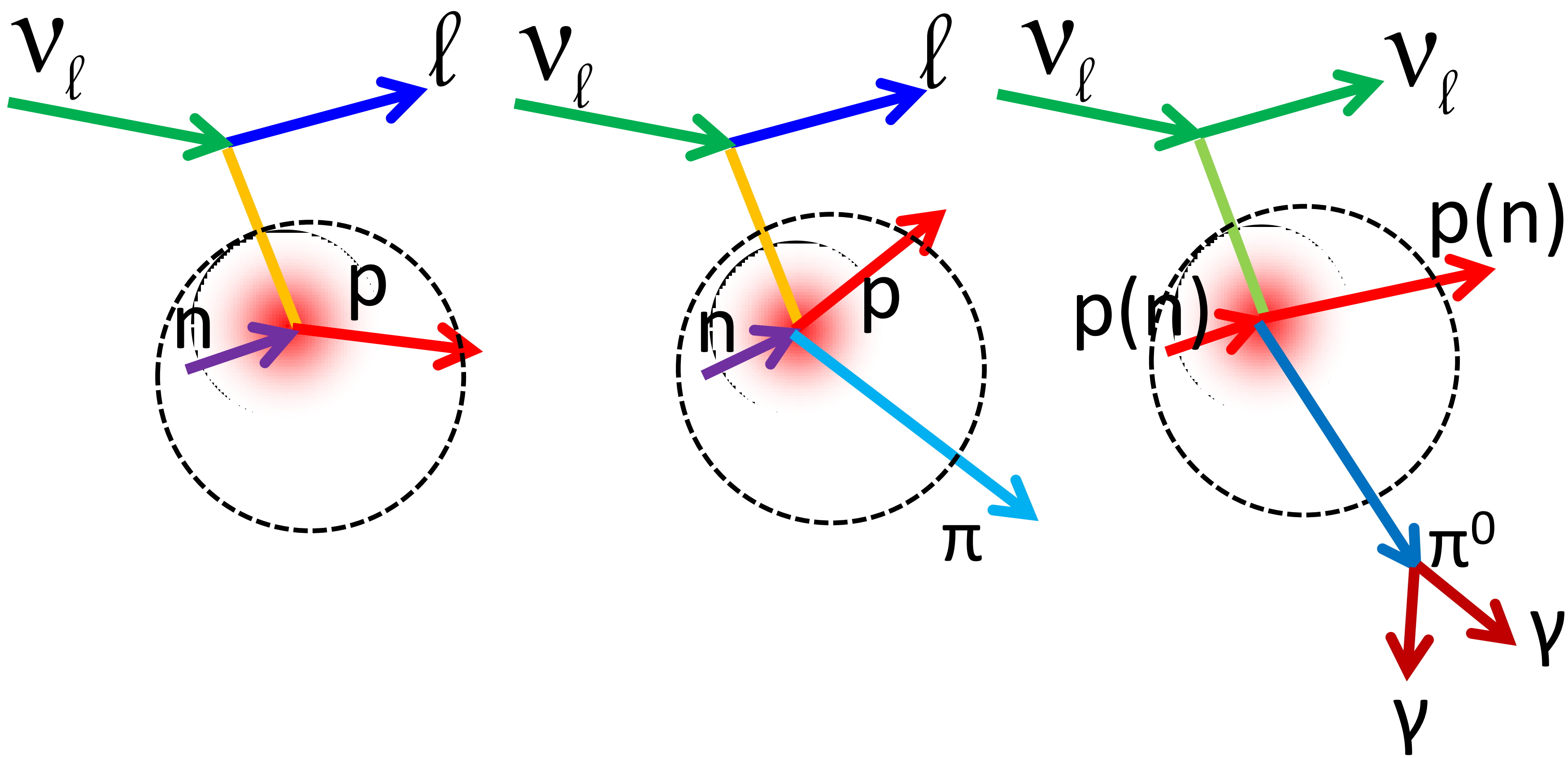


主なニュートリノ断面積パラメータ

Charged Current
Quasi Elastic
(CCQE)

Charged Current
1 π production
(CC1π)

Neutral Current
1 π^0 production
(NC1π^0)

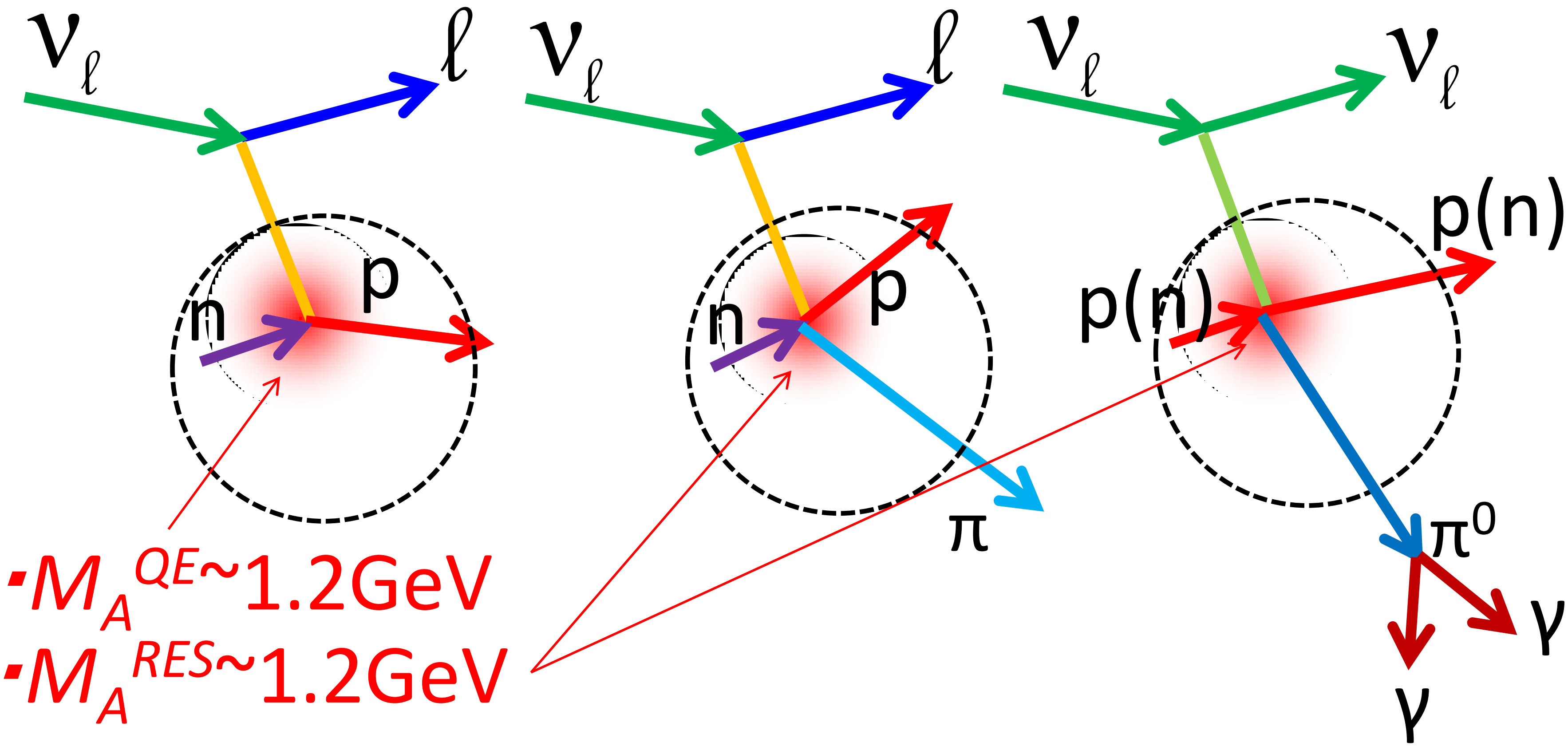


主なニュートリノ断面積パラメータ

Charged Current
Quasi Elastic
(CCQE)

Charged Current
1 π production
(CC1π)

Neutral Current
1 π^0 production
(NC1π^0)



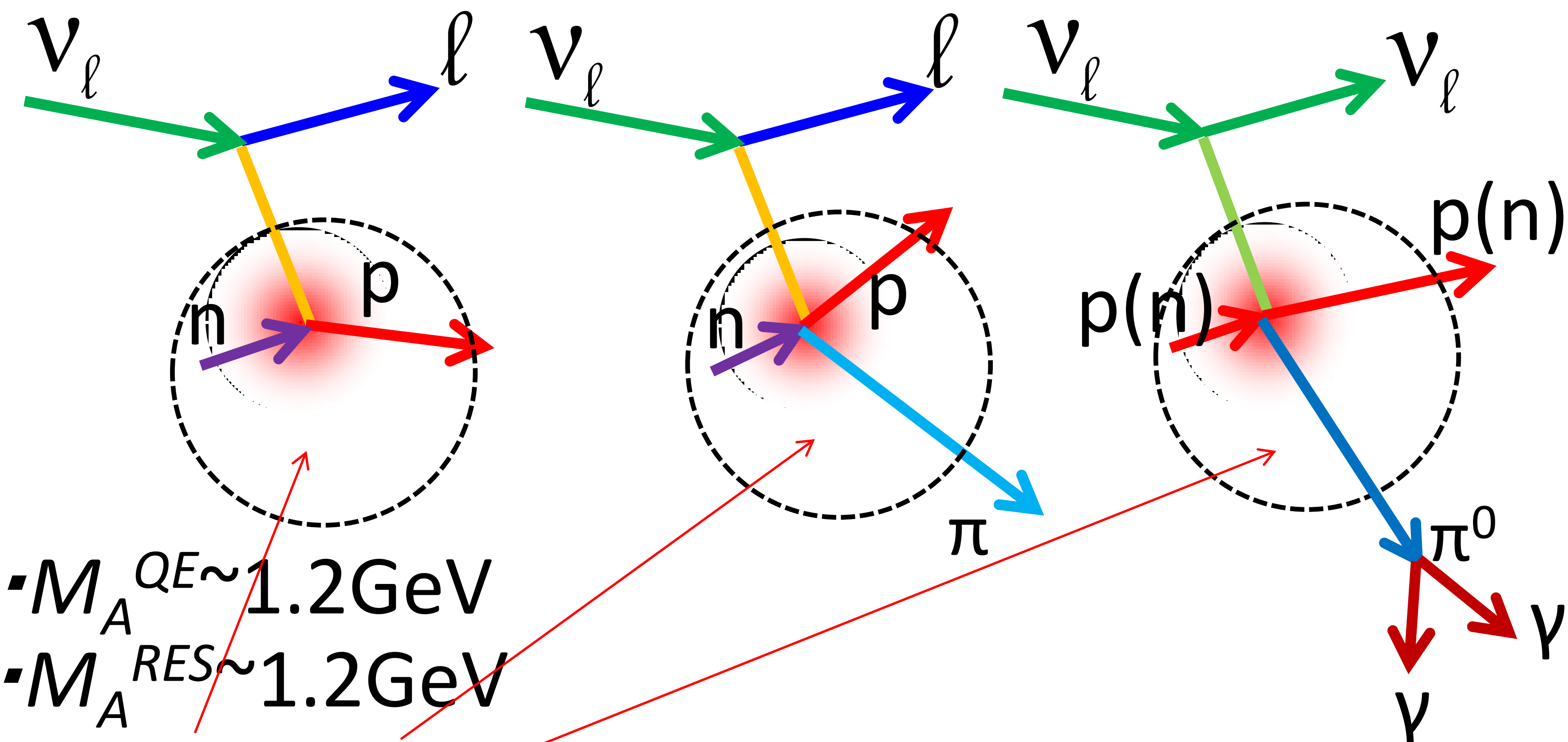
- M_A^{QE}~1.2GeV
- M_A^{RES}~1.2GeV

主なニュートリノ断面積パラメータ

Charged Current
Quasi Elastic
(CCQE)

Charged Current
1 π production
(CC1π)

Neutral Current
1 π^0 production
(NC1π^0)



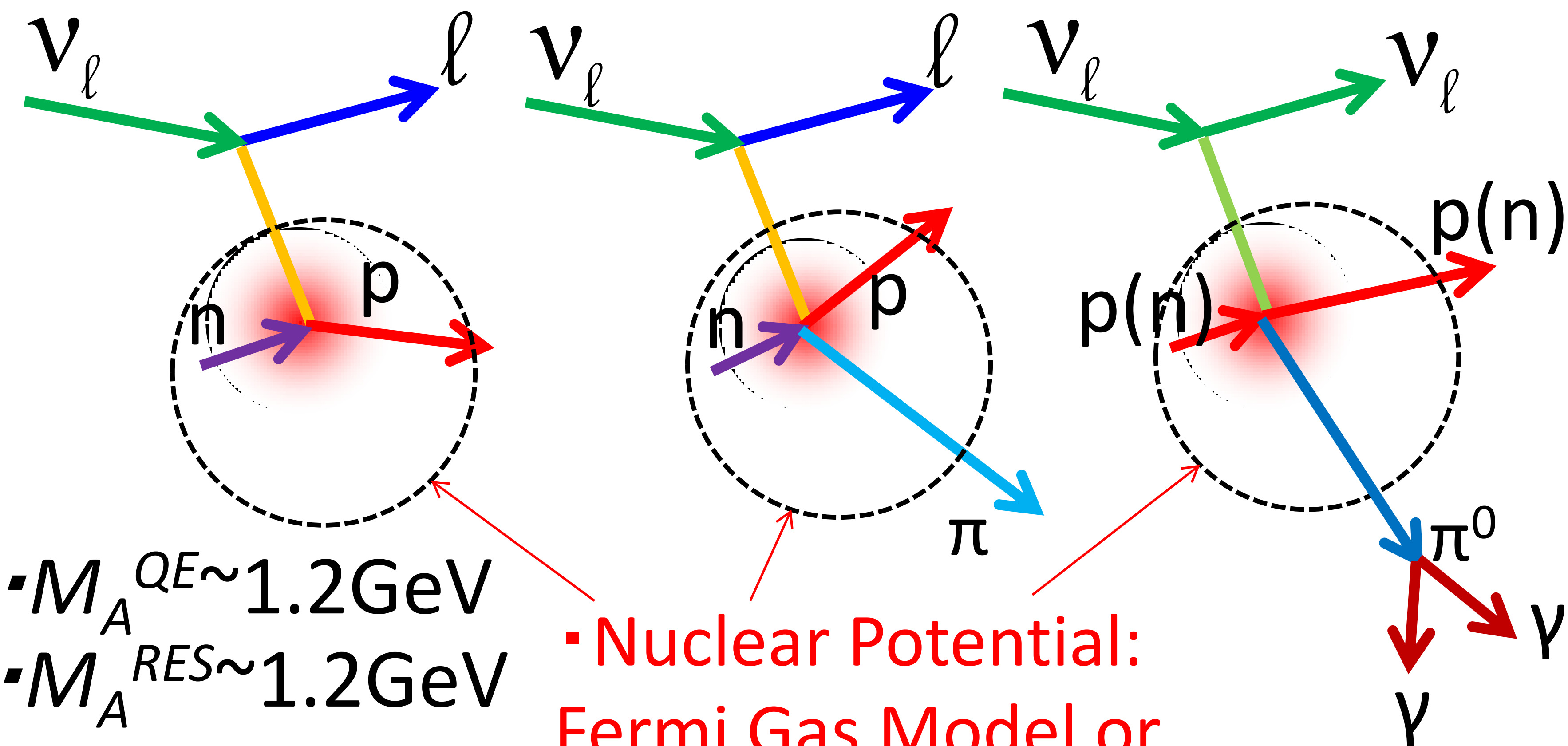
- M_A^{QE}~1.2GeV
- M_A^{RES}~1.2GeV
- p_F~200MeV/c

主なニュートリノ断面積パラメータ

Charged Current
Quasi Elastic
(CCQE)

Charged Current
1 π production
(CC1π)

Neutral Current
1 π^0 production
(NC1π^0)



- M_A^{QE}~1.2GeV
- M_A^{RES}~1.2GeV
- p_F~200MeV/c

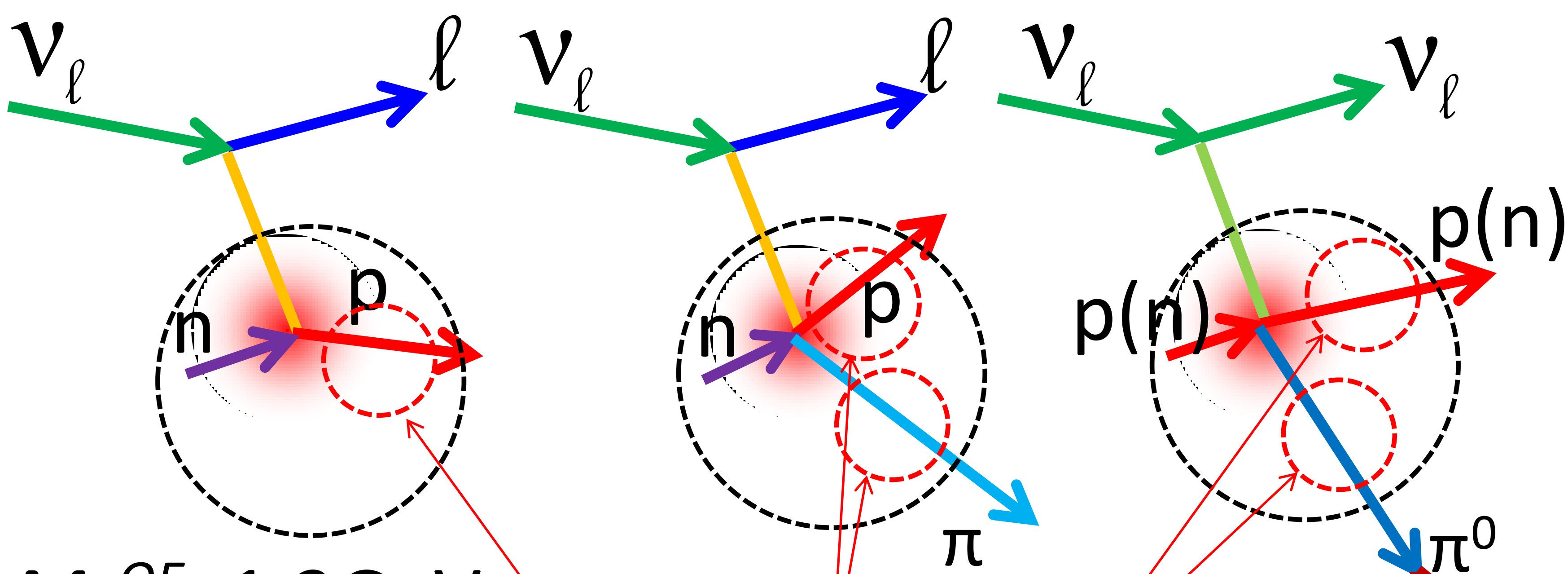
- Nuclear Potential: Fermi Gas Model or Spectral function

主なニュートリノ断面積パラメータ

Charged Current
Quasi Elastic
(CCQE)

Charged Current
1 π production
(CC1π)

Neutral Current
1 π^0 production
(NC1π^0)

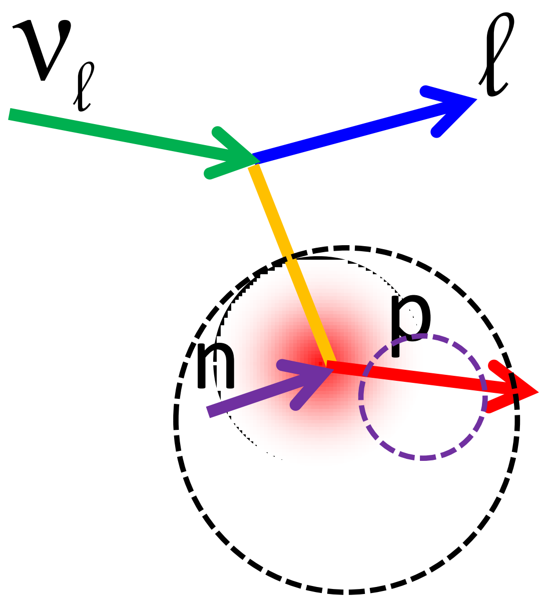


- M_A^{QE}~1.2GeV
- M_A^{RES}~1.2GeV
- p_F~200MeV/c

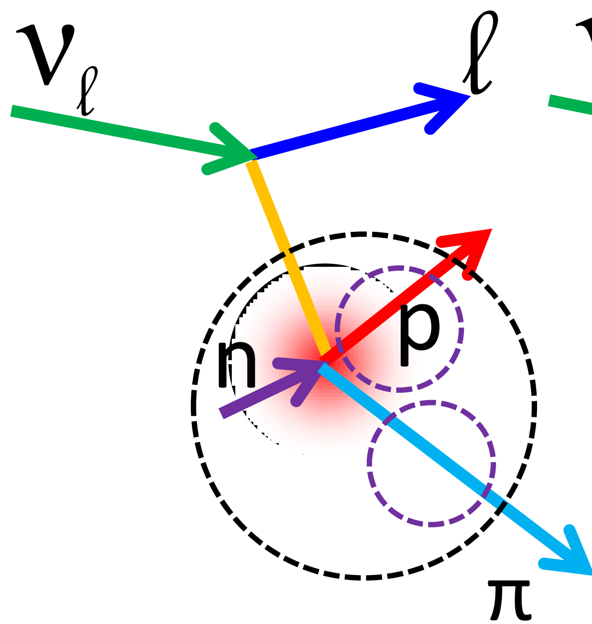
- Nuclear Potential
- Final State Interaction (FSI)

主なニュートリノ断面積パラメータ

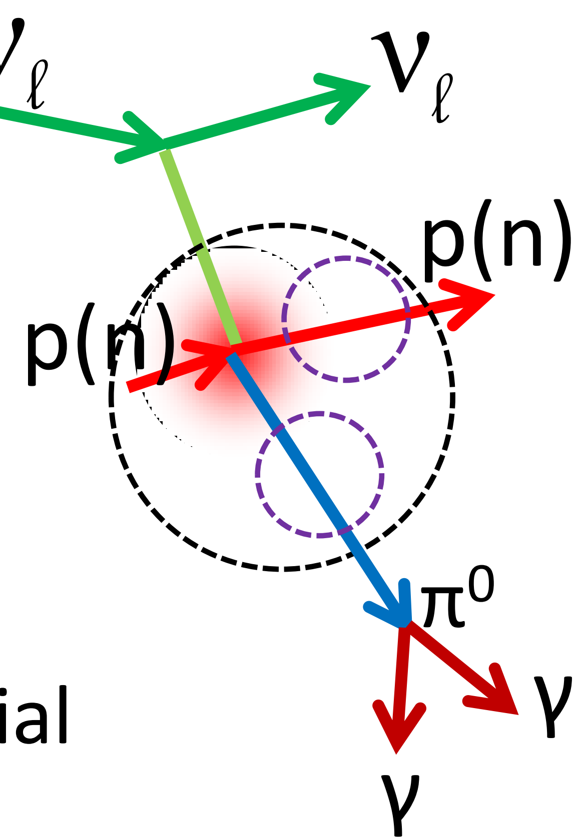
Charged Current
Quasi Elastic
(CCQE)



Charged Current
1 π production
(CC1π)



Neutral Current
1 π^0 production
(NC1π^0)



- M_A^{QE}~1.2GeV
- M_A^{RES}~1.2GeV
- p_F~200MeV/c

- Nuclear Potential
- Final State Interaction (FSI)

SKでの予想(N_{sk})の不定性を抑える

なにやら難しいことを言っているようですが、

$$N_{sk} = Flux_{SK} \times Xsec_{SK} \times 水_{22.5kt}$$

$$\frac{\sigma_{Nsk}}{N_{sk}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{Flux}}{Flux_{SK}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{Xsec}}{Xsec_{SK}}\right)^2 + \frac{2COV}{Flux \cdot Xsec}}$$

$$N_{ND280} = Flux_{ND} \times Xsec_{ND} \times シンチ$$

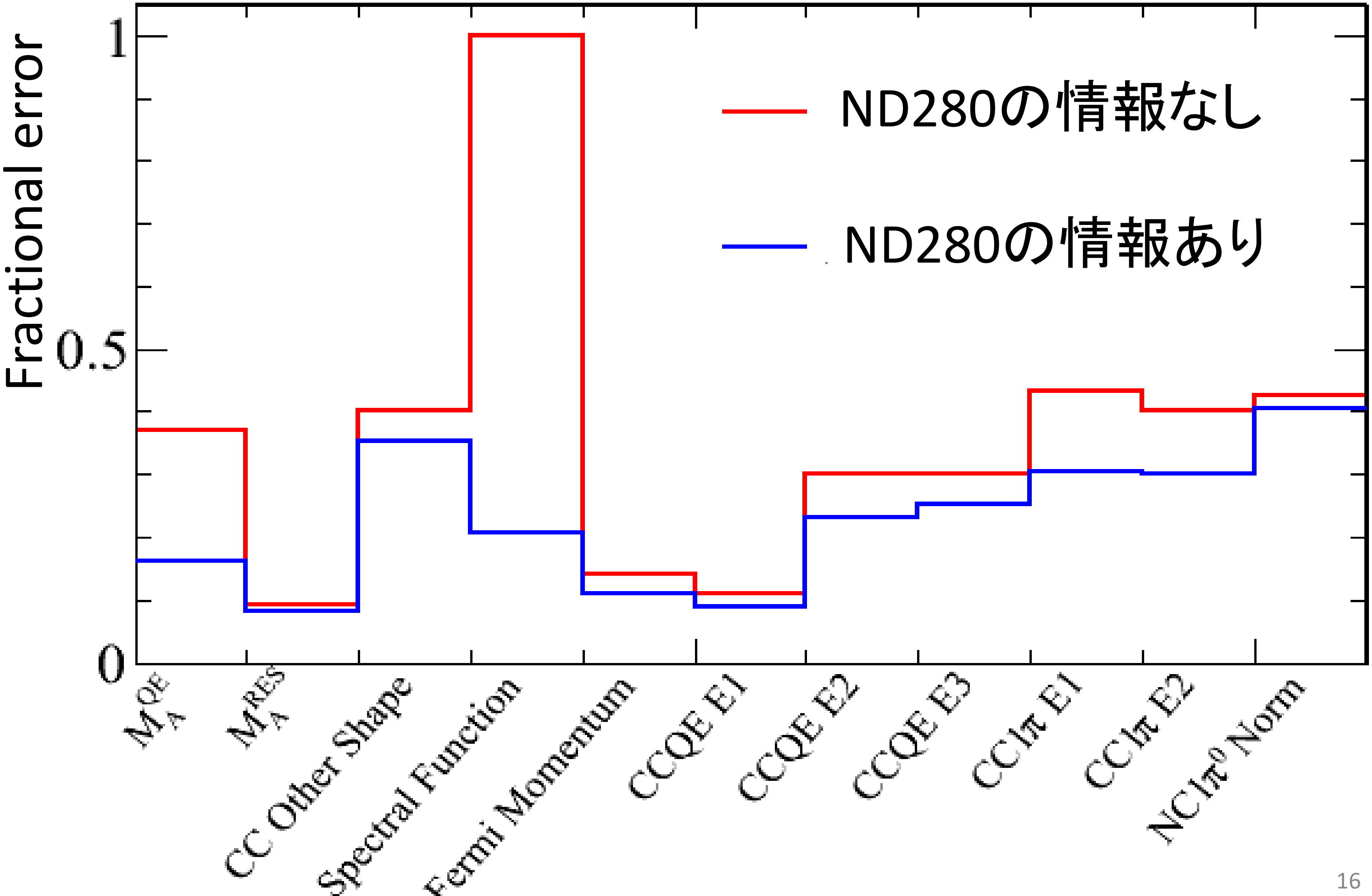
相関

逆相関

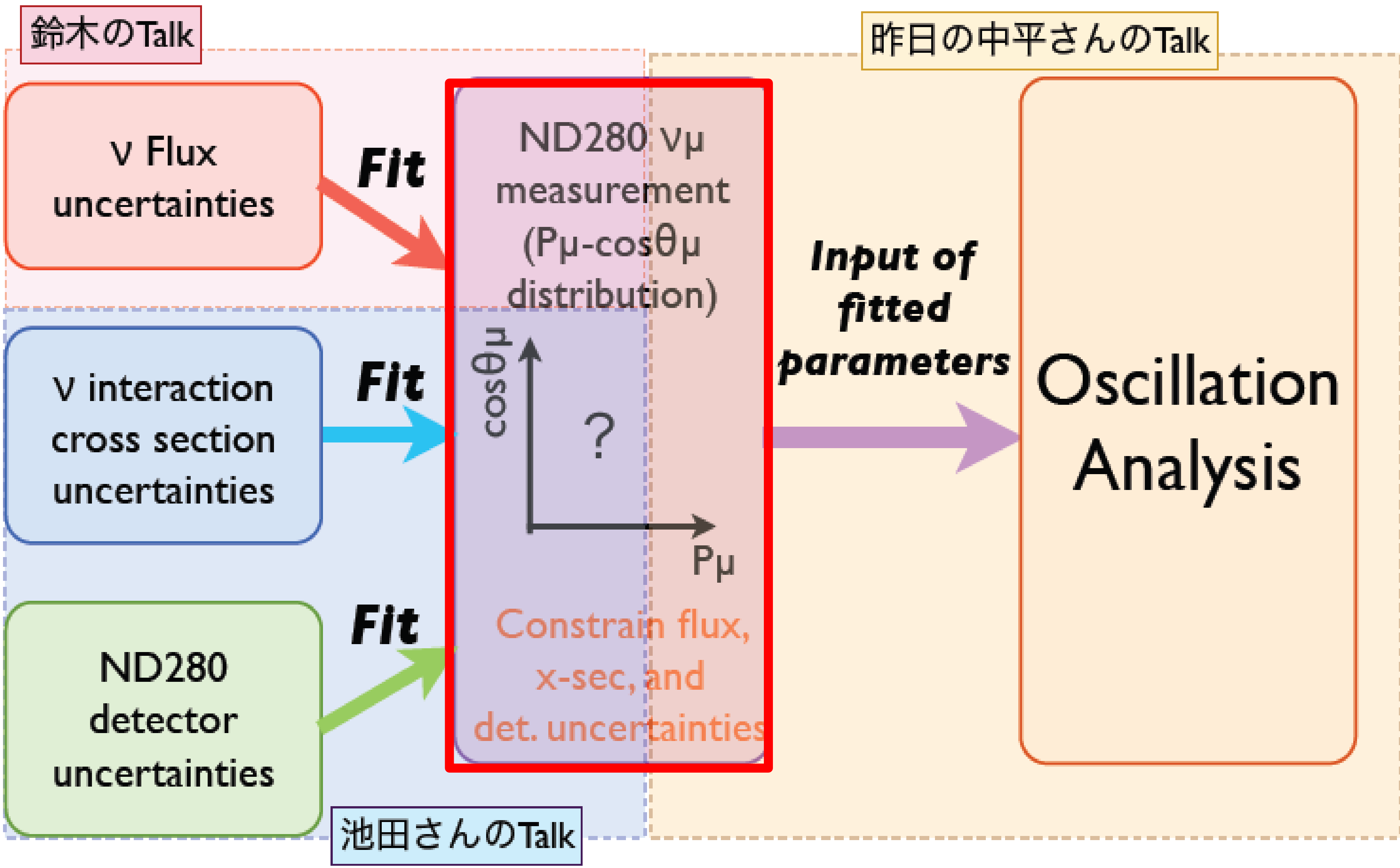
相関

$Flux_{SK}$ $Xsec_{SK}$

ニュートリノ断面積起源の不定性



振動解析方法(鈴木スライドより)

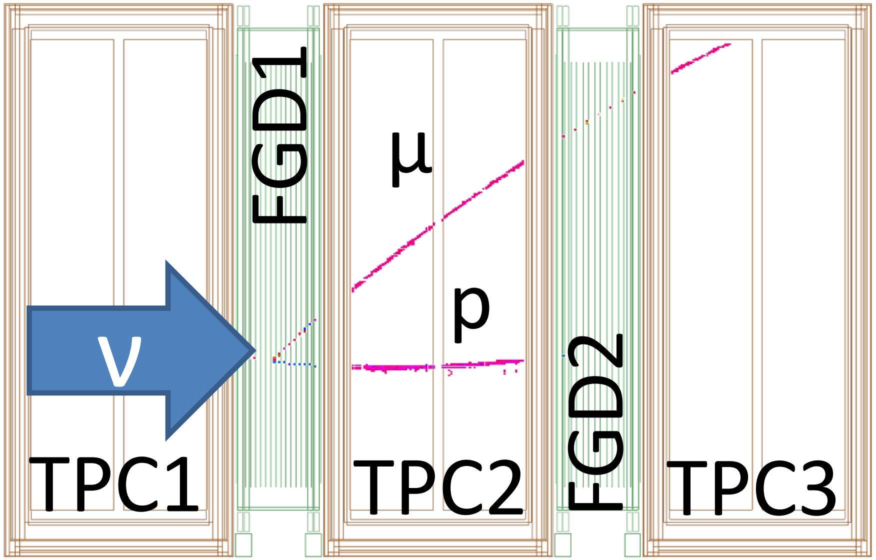


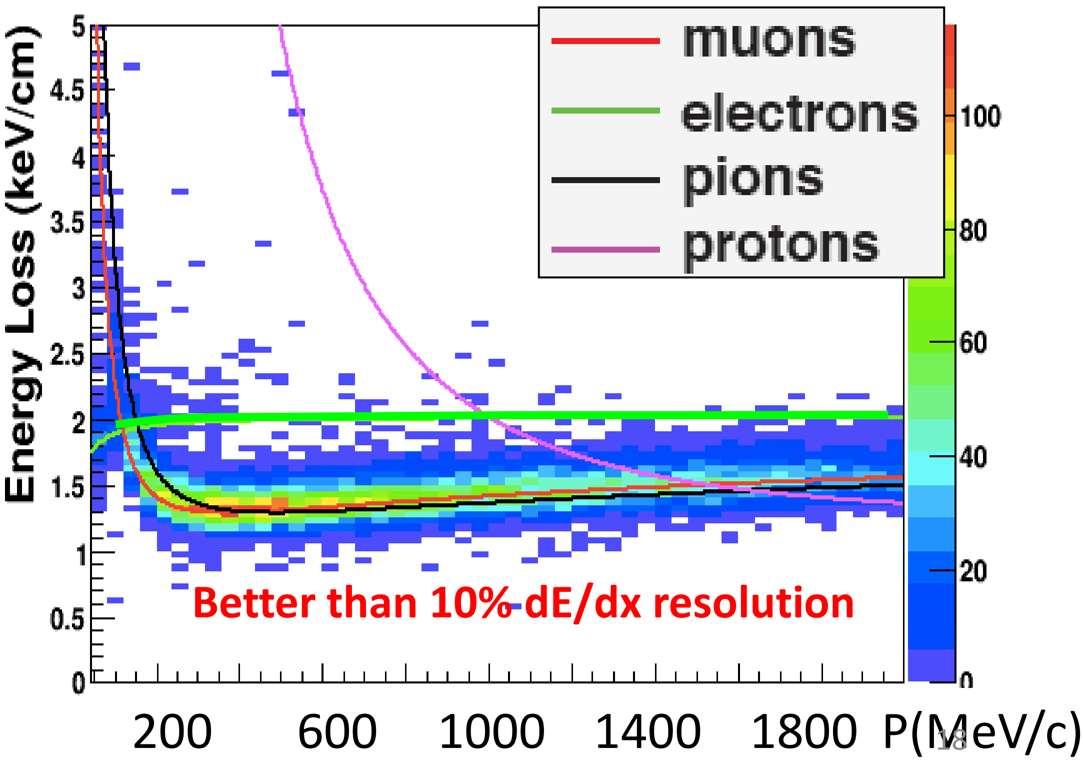
ν_μの測定@ND280

TPCとFGDを使用

CC inclusive事象選択

- 少なくとも1つの飛跡がTPC-FGDにまたがっていて、FGDの有効体積内から始まっている。
- 一番エネルギーの高い負電荷の飛跡はμである(TPCより)
- TPC1→FGD1 の事象をカット(TPC1Veto)





CCQE, CCnQE

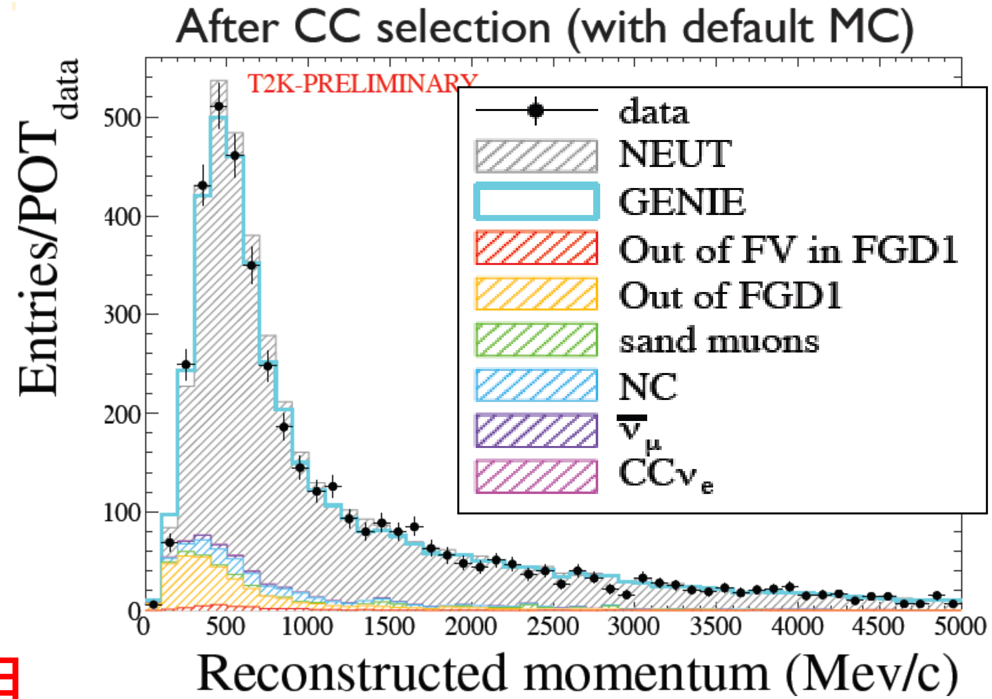
- TPC-FGCトラックが1つ
- Decay-eがない

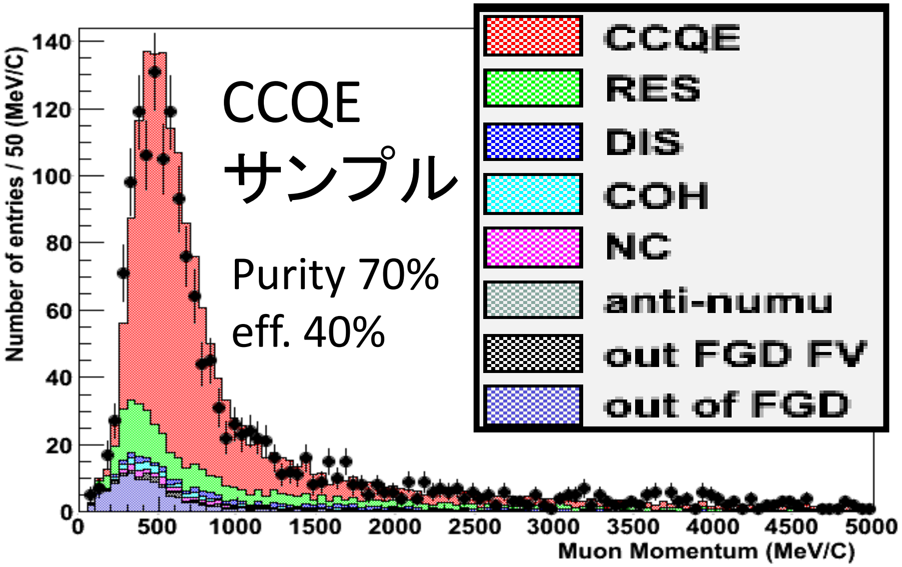
CCQEサンプル

それ以外

CCnQE サンプル

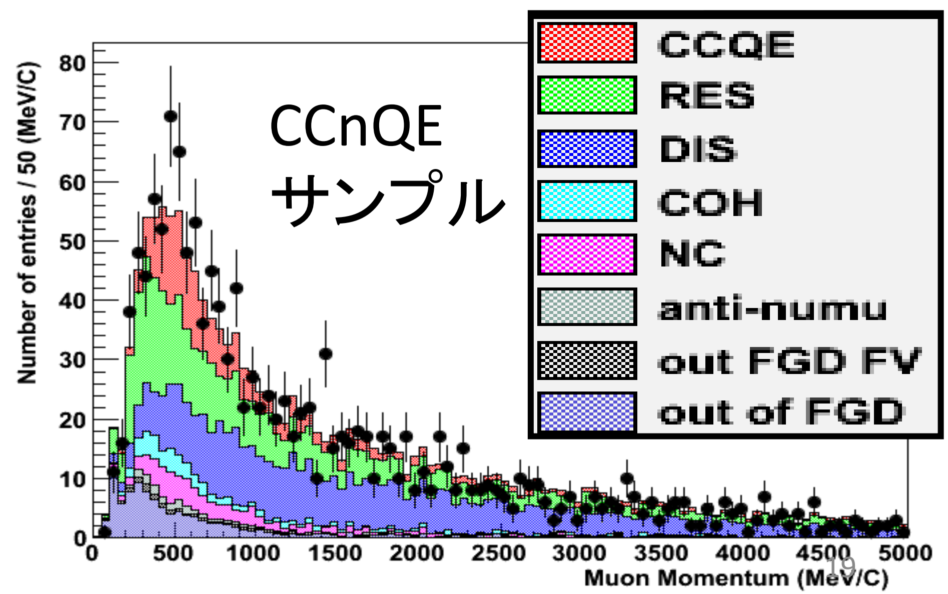
→両方とも振動解析に使用





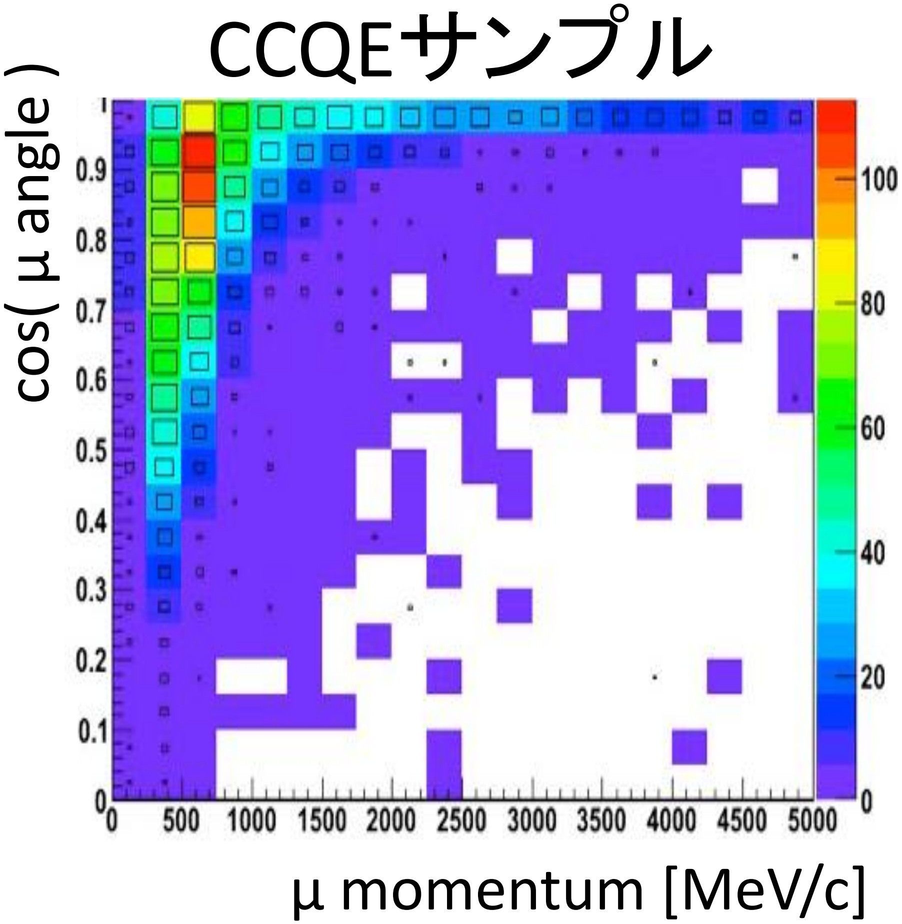
CCQE サンプル

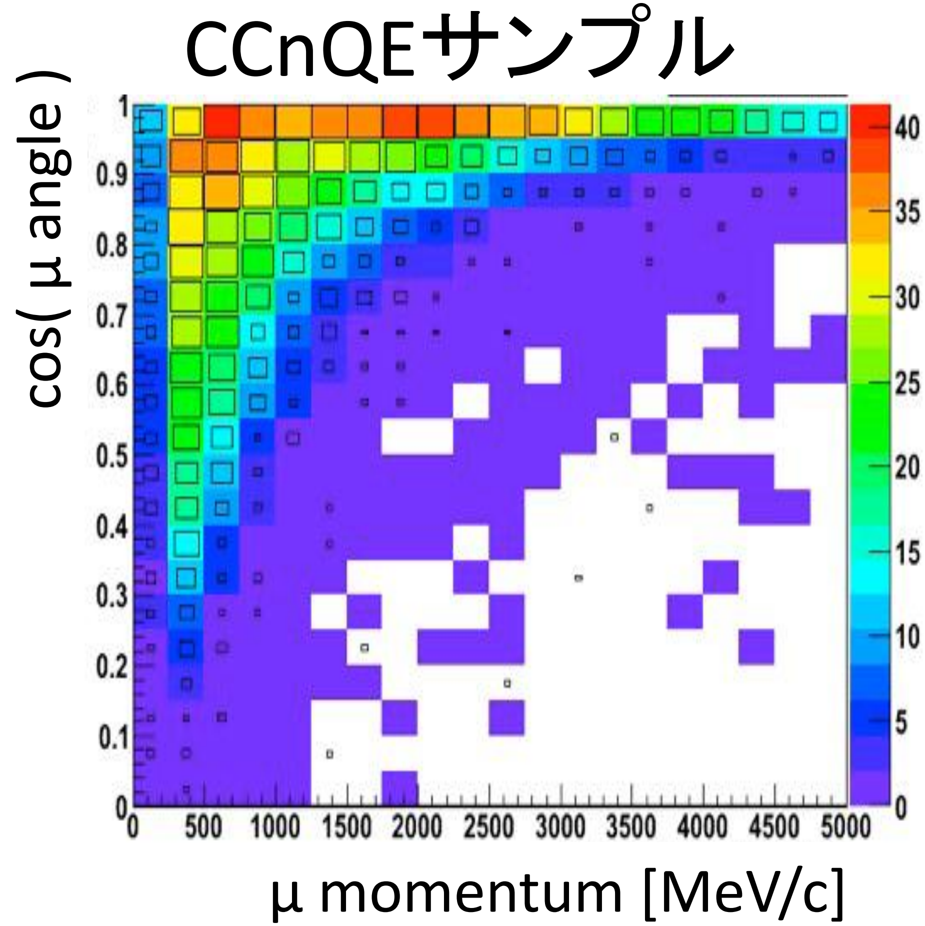
Purity 70%
eff. 40%



CCnQE サンプル

p_μ,θ分布 カラー：MC、Box:データ

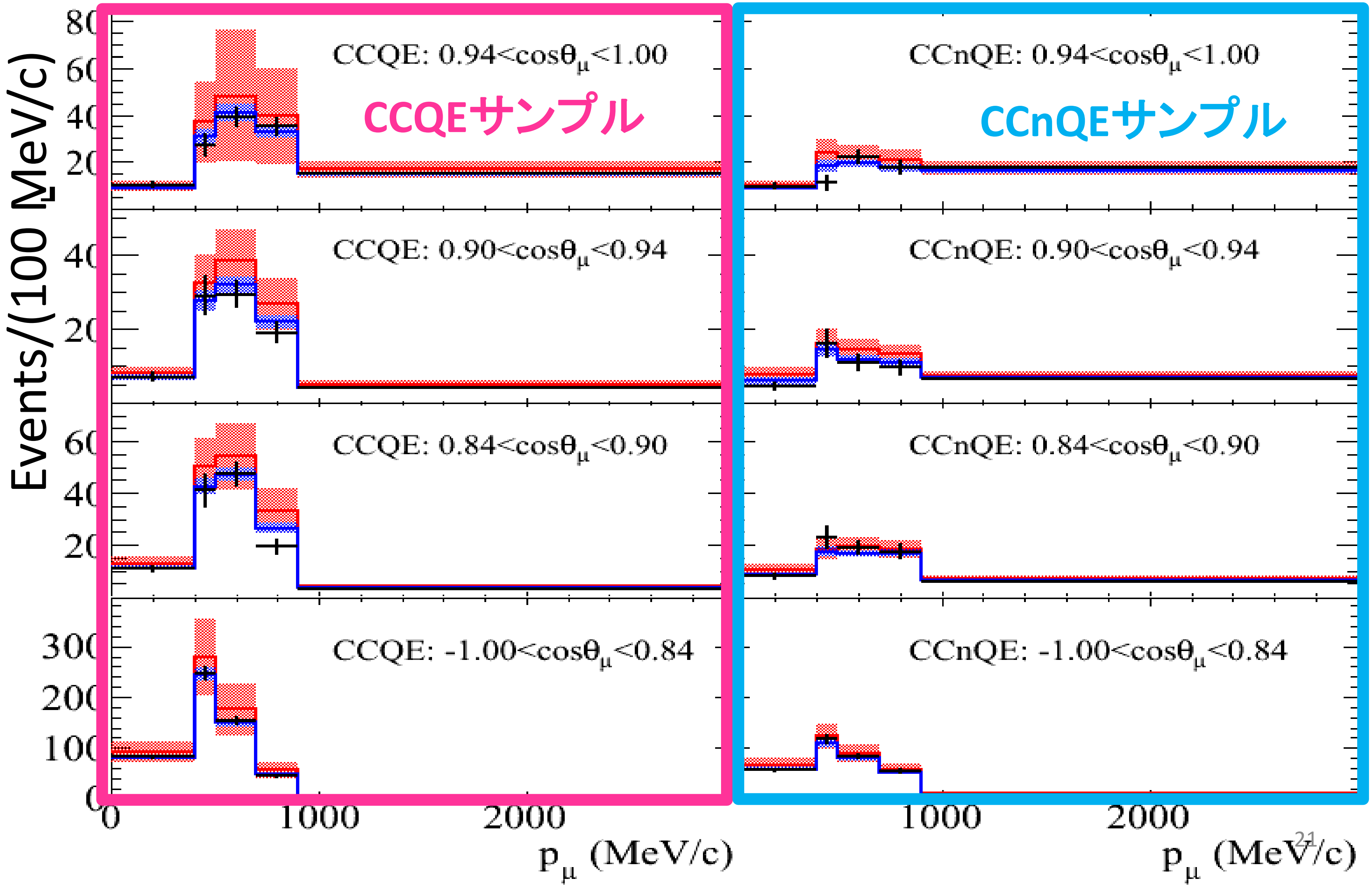




- ND280のp,θ分布を使ってSKにおけるp,θ分布を予想する。
- 不定性は数%(大きいところでも~10%)

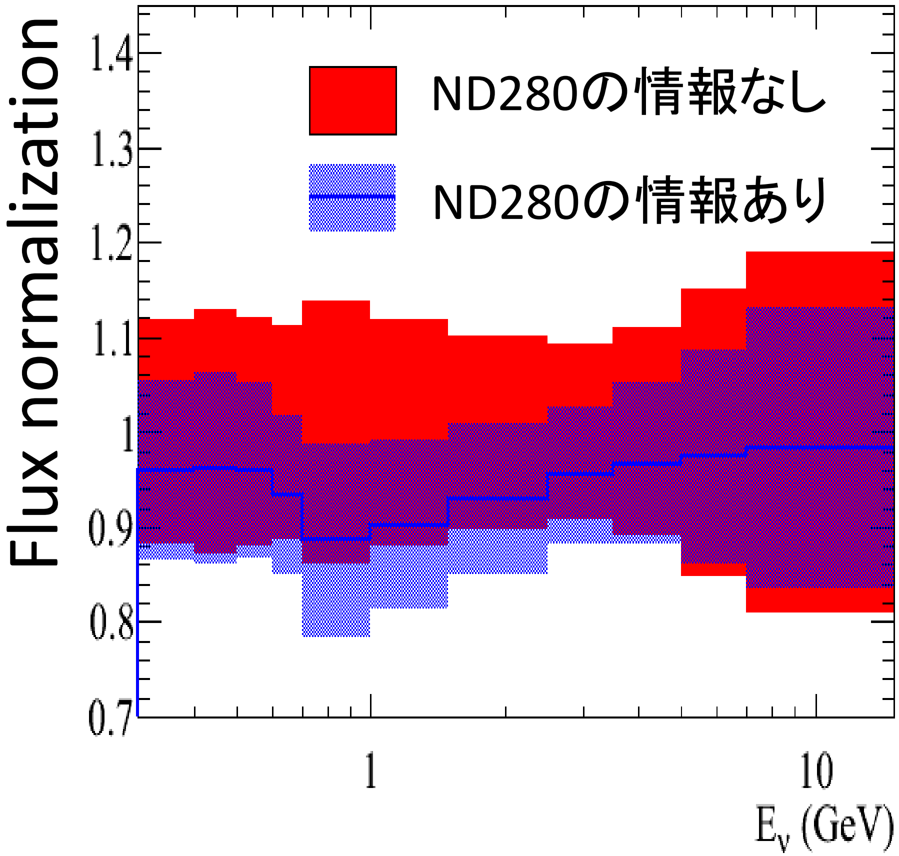
ND280データをフィット

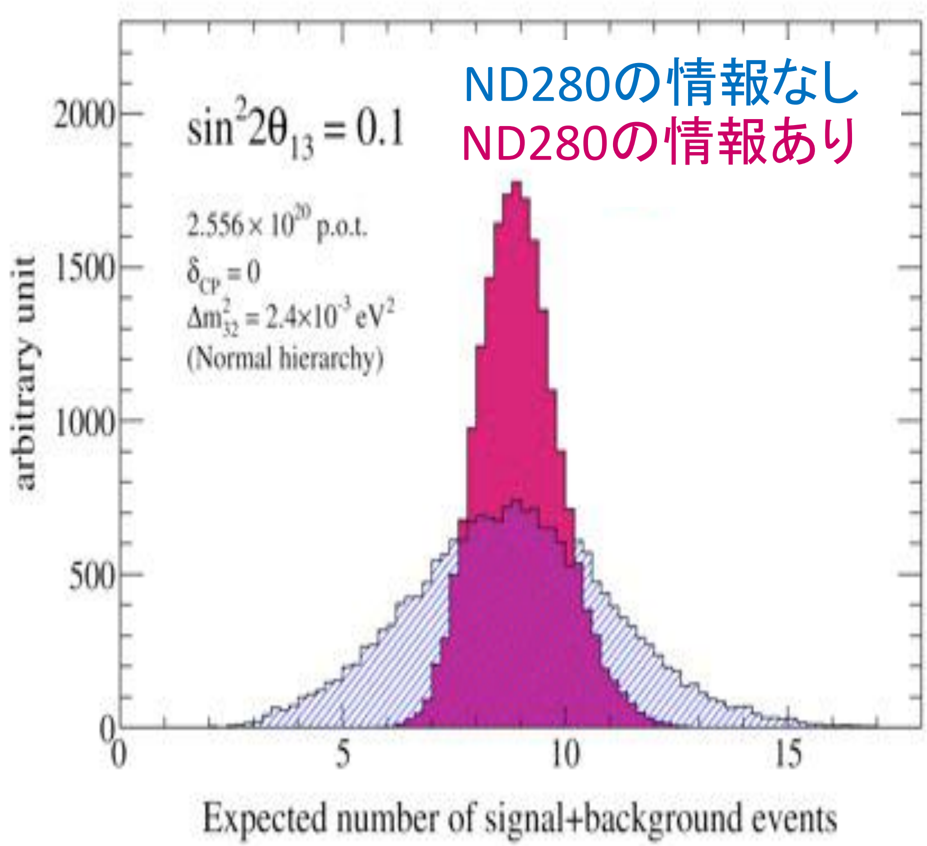
黒：ND280データ、赤：データフィット前のMC、青：ベストフィットMC



ND280データによる制限

SK でのν_μFlux予想の補正ファクター





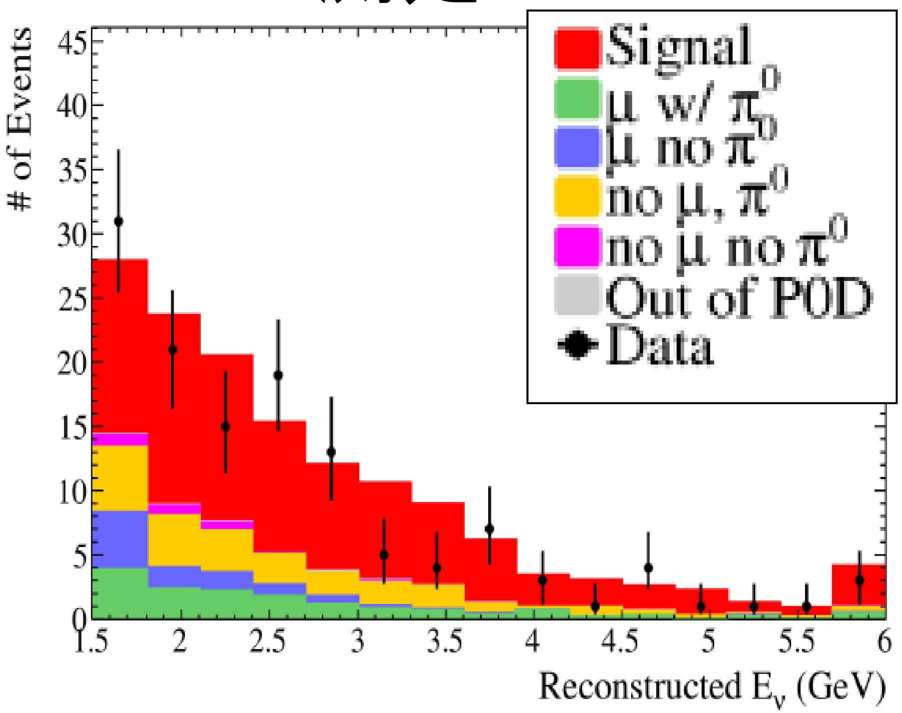
SKでの不定性を抑えることに成功！

その他の測定

- ビームνe
- $NC\pi^0$
- ニュートリノ断面積測定

ビーム中のν_eの測定

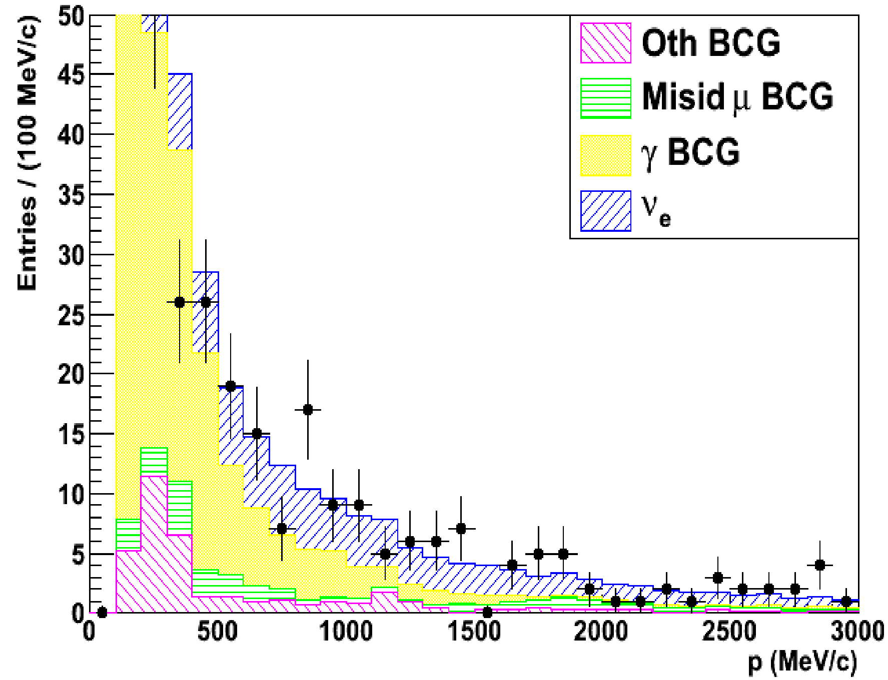
PODの測定



・シャワーlikeな飛跡が1つだけの事象を選択

・1.5GeV以上の事象を選択

TPC+FGD+ECALの測定



・最大運動量の負電荷飛跡がFGDで始まる。

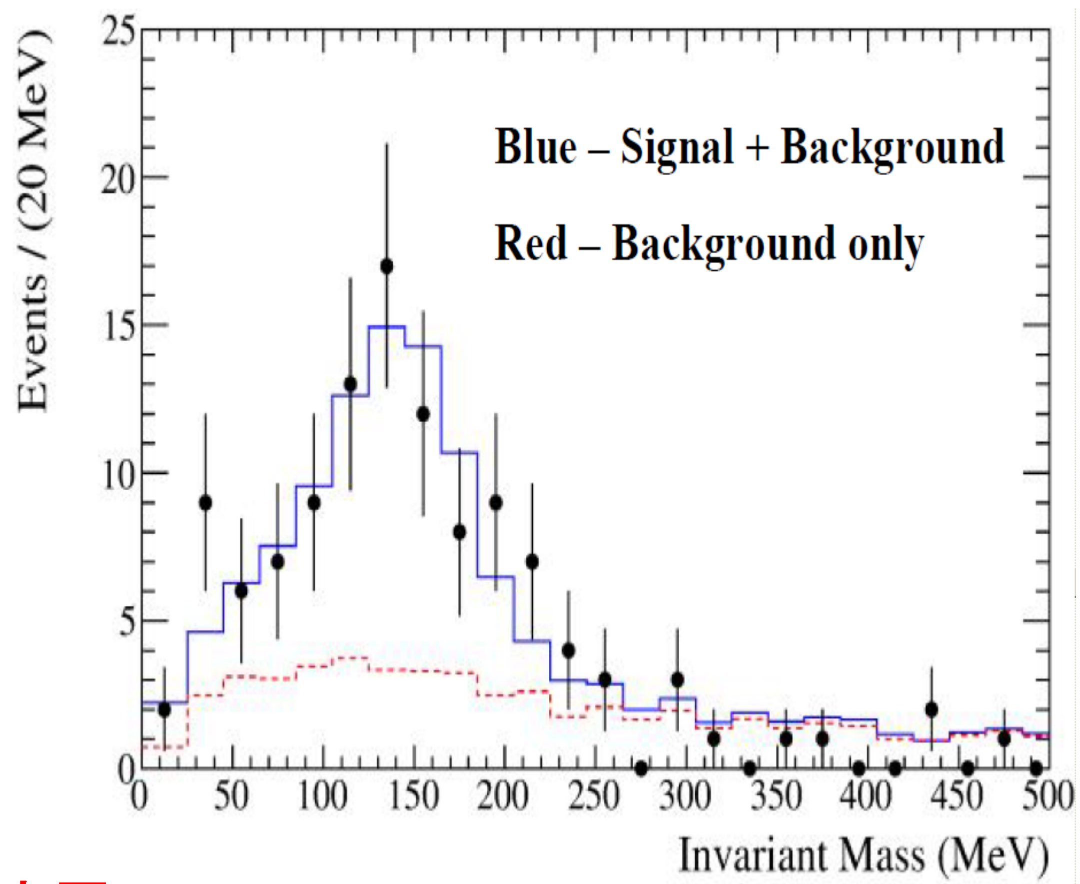
・その飛跡が電子飛跡である(TPCのde/dx,Ecalでシャワーlike)

どちらもMCの予想と矛盾しない結果

PODでのNCπ^0測定

- SKでのνe事象の主なBGであるNCπ^0の測定

事象選択
- μlike な飛跡がない。
- EM likeな飛跡が2つ。
- μ崩壊電子がない。
- 前方散乱を選択。
- 飛跡間距離が5cmより離れている。

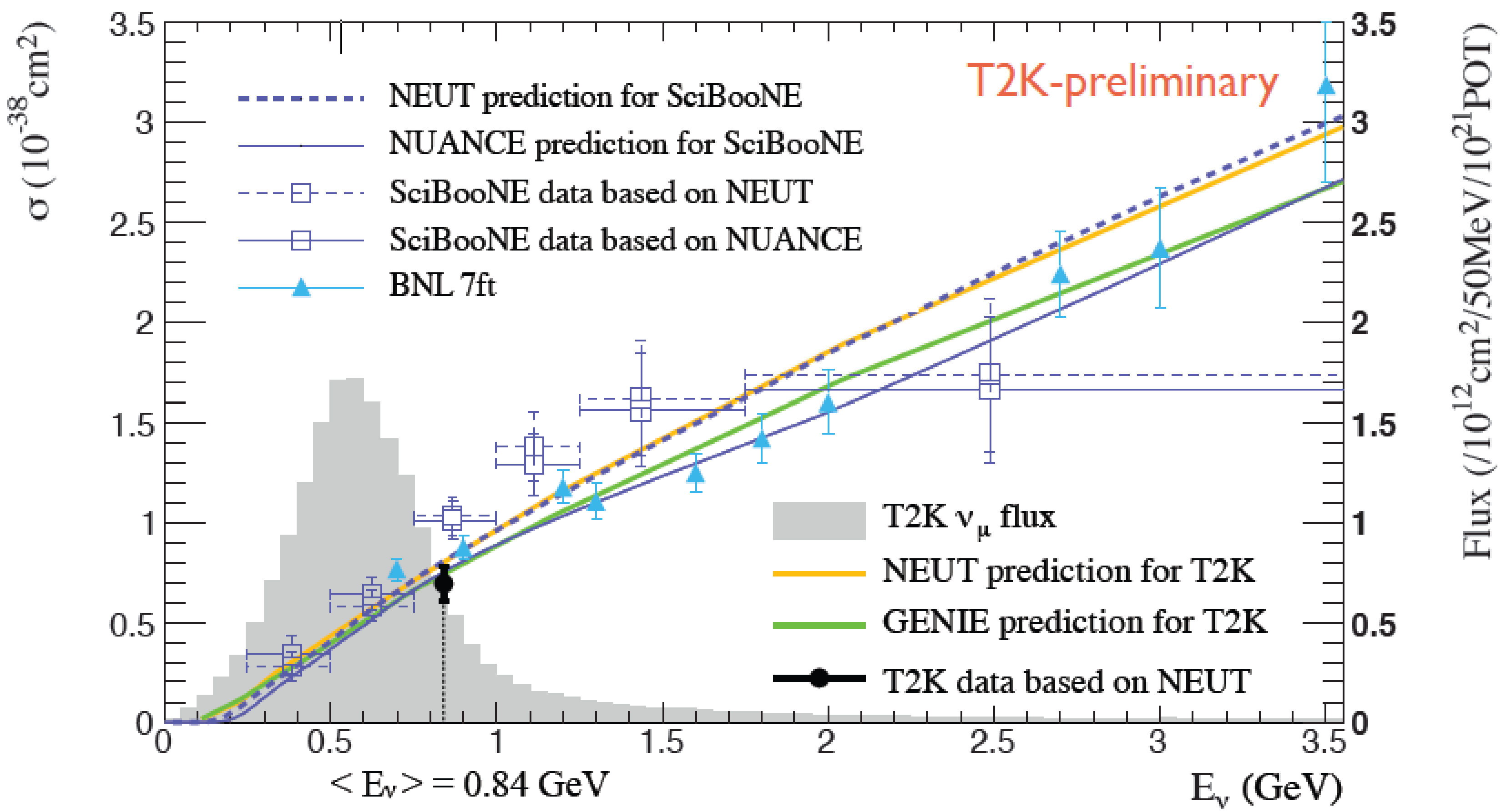


Data/MC =
0.84 ± 0.16 (stat)
± 0.18(sys)

MC予想と矛盾のない結果

CC Inclusive 断面積測定

$$\langle\sigma_{CC}\rangle_{\phi} = (6.93 \pm 0.13(stat) \pm 0.85(syst)) \times 10^{-39} \frac{\mathrm{cm}^2}{\mathrm{nucleons}}$$



MC予想と、誤差の範囲内で一致している

まとめ

・ND280のνμ測定情報を用いることで、SKにおけるニュートリノスペクトル、角度分布の不定性を小さくできることができた。

・ν_μ以外の測定結果もそろい始めている。

今後、

・ まだν_μの測定情報しか考慮していないので他の測定情報も振動解析に入れる。

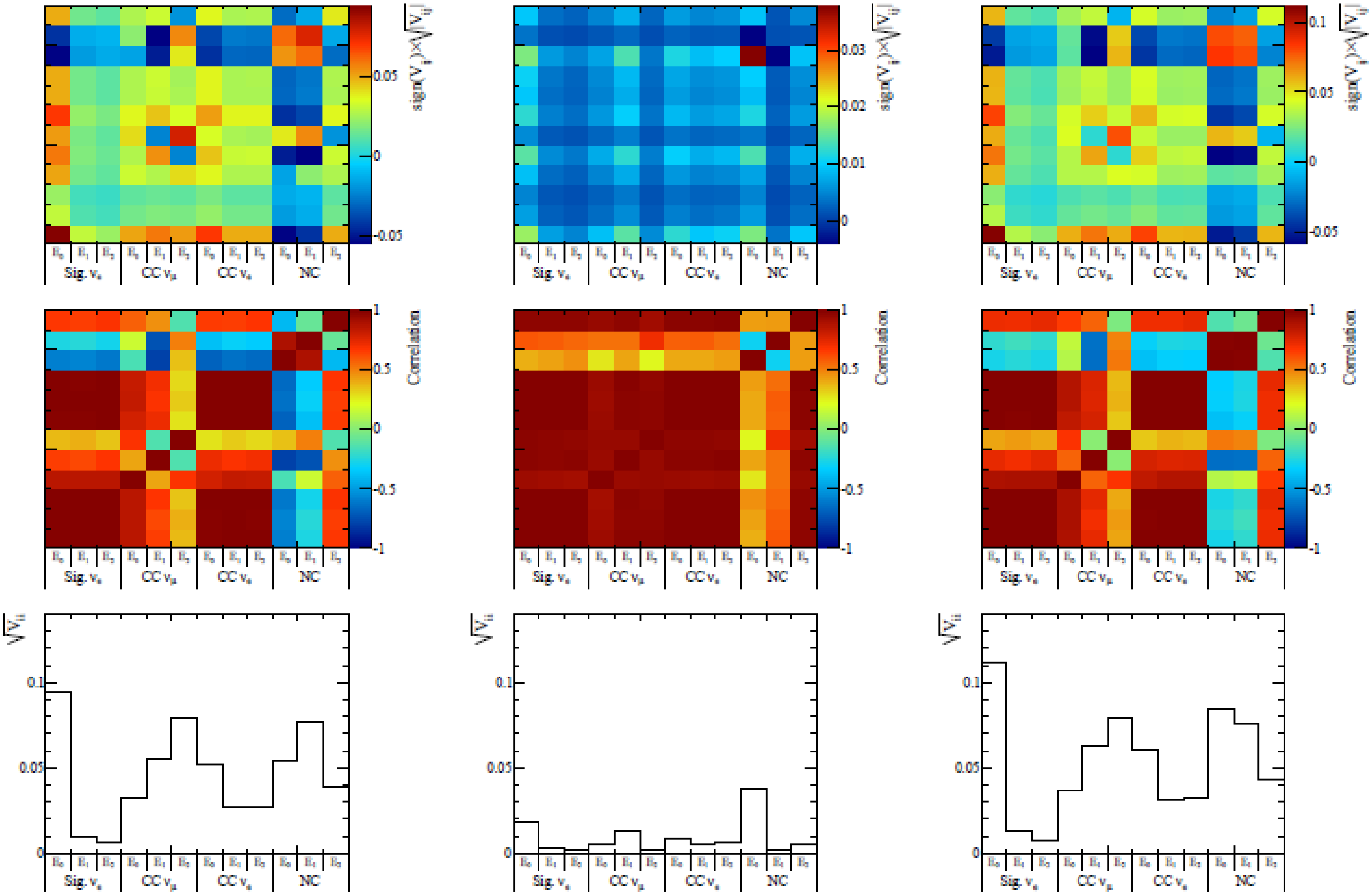
・ いろいろな反応の断面積測定精度よく行う。

Fitted Neutrino Interaction Model Parameters

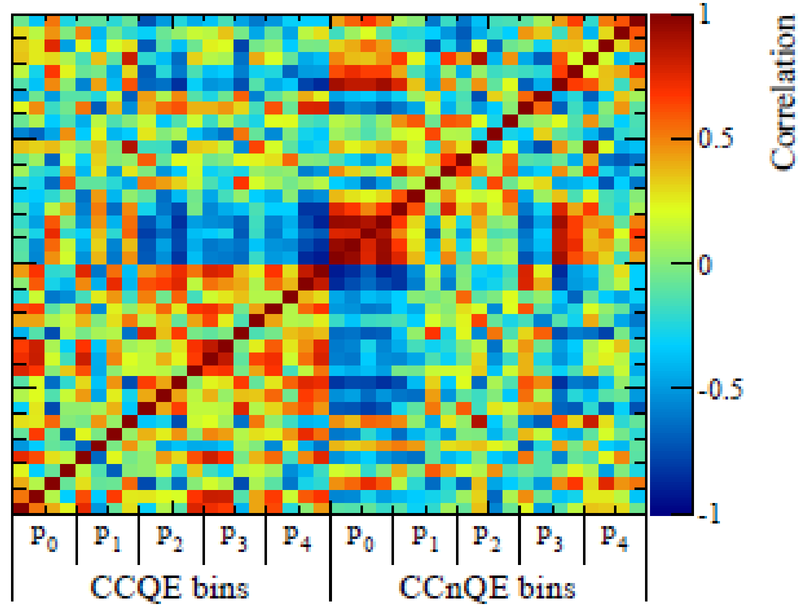
Parameter	Prior Value	Fitted Value
M_A^{QE} (GeV)	1.21 ± 0.45	1.19 ± 0.19
M_A^{RES} (GeV)	1.162 ± 0.110	1.137 ± 0.095
CCQE Norm. < 1.5 GeV	1.0 ± 0.11	0.941 ± 0.087
CCQE Norm. 1.5-3.5 GeV	1.0 ± 0.30	0.92 ± 0.23
CCQE Norm. > 3.5 GeV	1.0 ± 0.30	1.18 ± 0.25
CC1π Norm. < 2.5 GeV	1.63 ± 0.43	1.67 ± 0.28
CC1π Norm. > 2.5 GeV	1.0 ± 0.40	1.10 ± 0.30
NC1π^0 Norm.	1.19 ± 0.43	1.22 ± 0.40
Spectral Function	0 (off) ± 1 (on)	0.04 ± 0.21
p_F (MeV/c)	217 ± 30	224 ± 24
CC Other Shape (GeV)	0.0 ± 0.4	-0.05 ± 0.35

model parameters	Before FIT	After FIT
CCQE M_A [GeV]	1.21±0.45	**1.19±0.19**
CC1π(resonance) M_A [GeV]	1.16±0.11	**1.14±0.10**
Fermi momentum surface P_F [MeV]	217±30	224.6±23.5
Spectral Function	0[off] - 1[on]	0.04±0.21
CC-other cross section shape	0.0±0.4	-0.05±0.35
CCQE E-dependence	1.0±0.11, 1.0±0.11, 1.0±0.11	**0.94±0.09**, 0.92±0.23, 1.18±0.25
CC1π(resonance) E-dep.	1.63±0.43, 1.0±0.4	**1.67±0.28**, 1.10±0.30
NC-π^0 cross sections	1.19±0.43	**1.22±0.40**
CC-coherent π cross section	1−1	from other experiments
NC-coherent π cross section	1.0±0.3	from other experiments
NC other cross section	1.0±0.3	from other experiments
W shape in resonance model [MeV]	87.7±45.3	from other experiments
π-less Δ decay	0.0±0.2	from other experiments
CC-1π,rNC-1π^0 energy shape	0.0±0.5	from other experiments

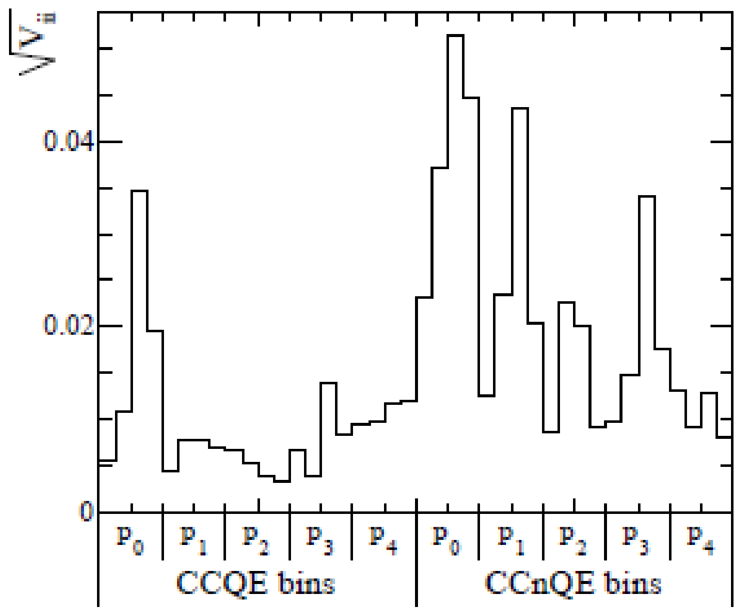
Parameter	E_ν Range	Nominal	Error	CCQE	CCnQE	Total	Class/Cat.
M_A^{QE}	all	1.21 GeV/c^2	0.45	15.5%	5.2%	10.5%	B/1
CCQE E1	$0 < E_\nu < 1.5$	1.0	0.11	6.7%	1.5%	4.2%	A/1
CCQE E2	$1.5 < E_\nu < 3.5$	1.0	0.30	6.7%	1.5%	4.2%	A/3
CCQE E3	$E_\nu > 3.5$	1.0	0.30	6.7%	1.5%	4.2%	A/3
p_F ^{12}C	all	217 MeV/c	30	1.6%	0.2%	0.8%	B/2
SF ^{12}C	all	0 (off)	1 (on)	0.9%	0.8%	0.6%	B/2
M_A^{RES}	all	1.16 GeV/c^2	0.11	3.7%	6.0%	4.8%	B/1
CC1π E1	$0 < E_\nu < 2.5$	1.63	0.43	3.7%	6.0%	4.8%	A/1
NC1π^0	all	1.19	0.43	3.7%	6.0%	4.8%	A/1
CC1π E2	$E_\nu > 2.5$	1.0	0.40	1.9%	4.8%	3.2%	A/3
CC Coherent	all	1.0	1.0	1.7%	3.9%	2.7%	C/3
CC Oth shp	all	0.0	0.40	0.7%	3.5%	2.0%	B/3
NC Other	all	1.0	0.30	0.5%	1.6%	1.0%	C/3
W Shape	all	87.7 MeV/c^2	45.3	0.6%	2.2%	0.9%	C/3
FSI	all	Section 7.2		0.5%	0.7%	0.2%	C/3
Total				17.0%	10.1%	12.8%	


sign(V_ij)×√|V_ij|
Correlation
√V_ii
Sig. ν_e
CC ν_μ
CC ν_e
NC

FSI@ND280

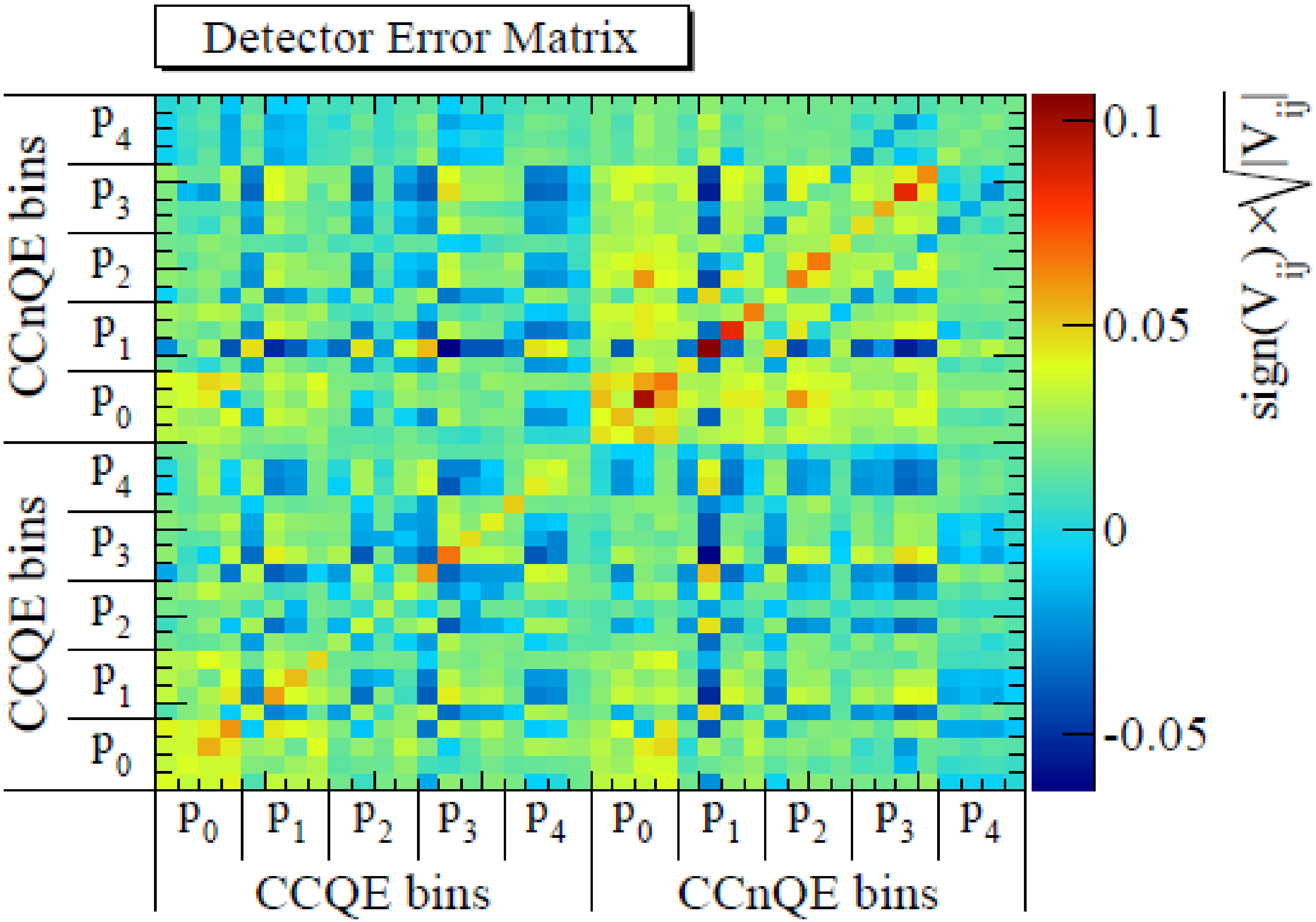


1
0.5
0
-0.5
-1
Correlation
P0 P1 P2 P3 P4 P0 P1 P2 P3 P4
CCQE bins
CCnQE bins



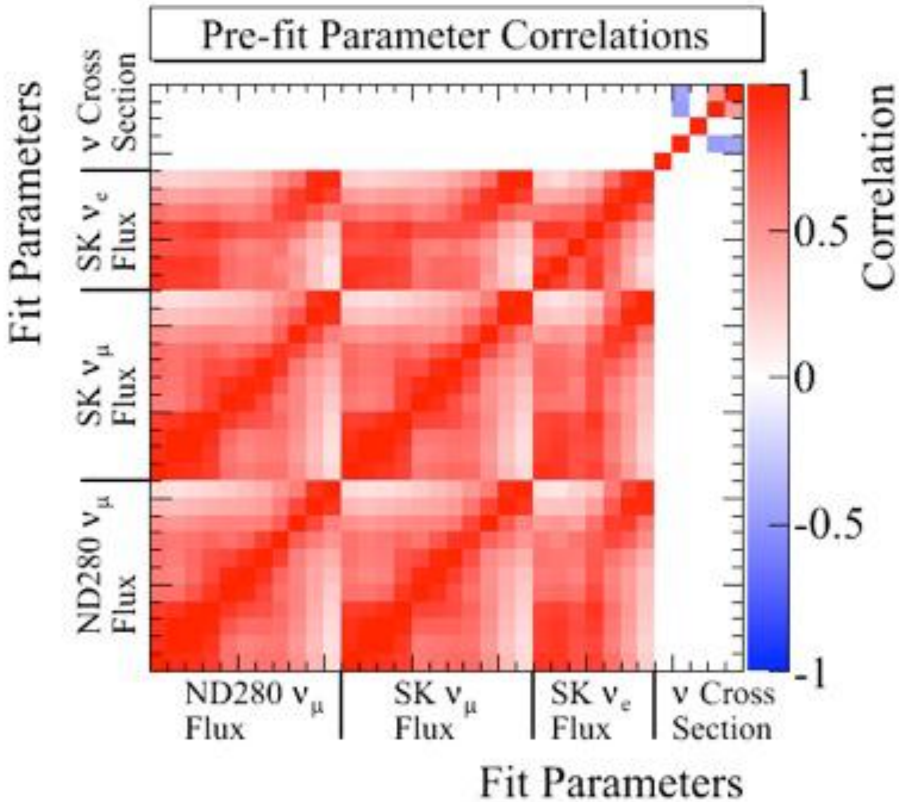
$\sqrt{V_{ii}}$
0.04
0.02
0
P0 P1 P2 P3 P4 P0 P1 P2 P3 P4
CCQE bins
CCnQE bins

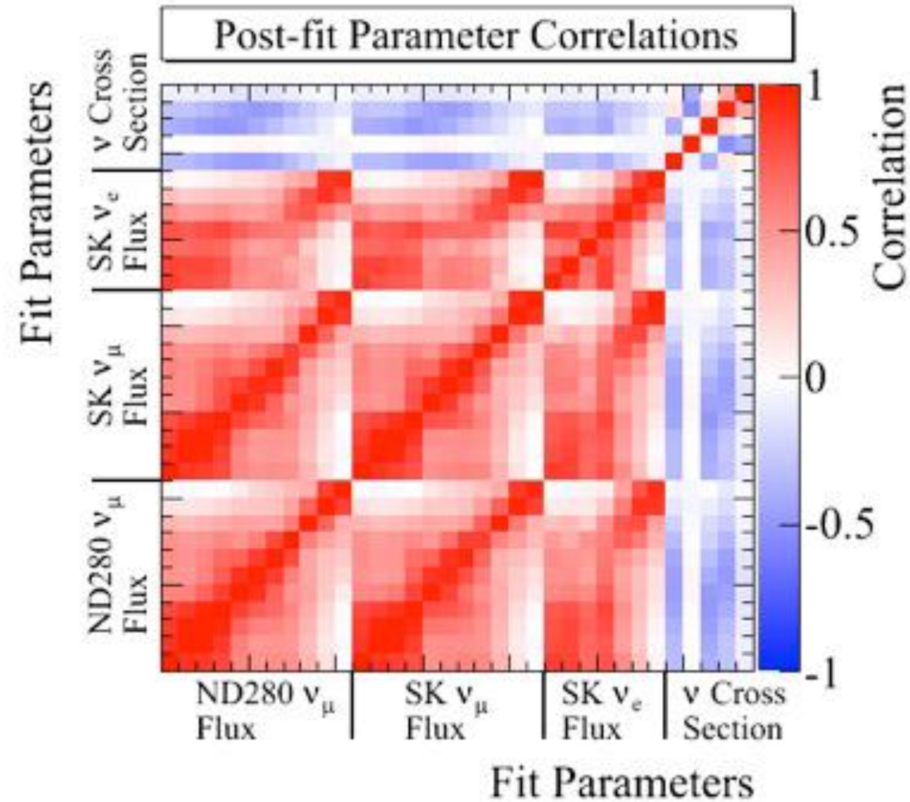
ND280 Detector covariance



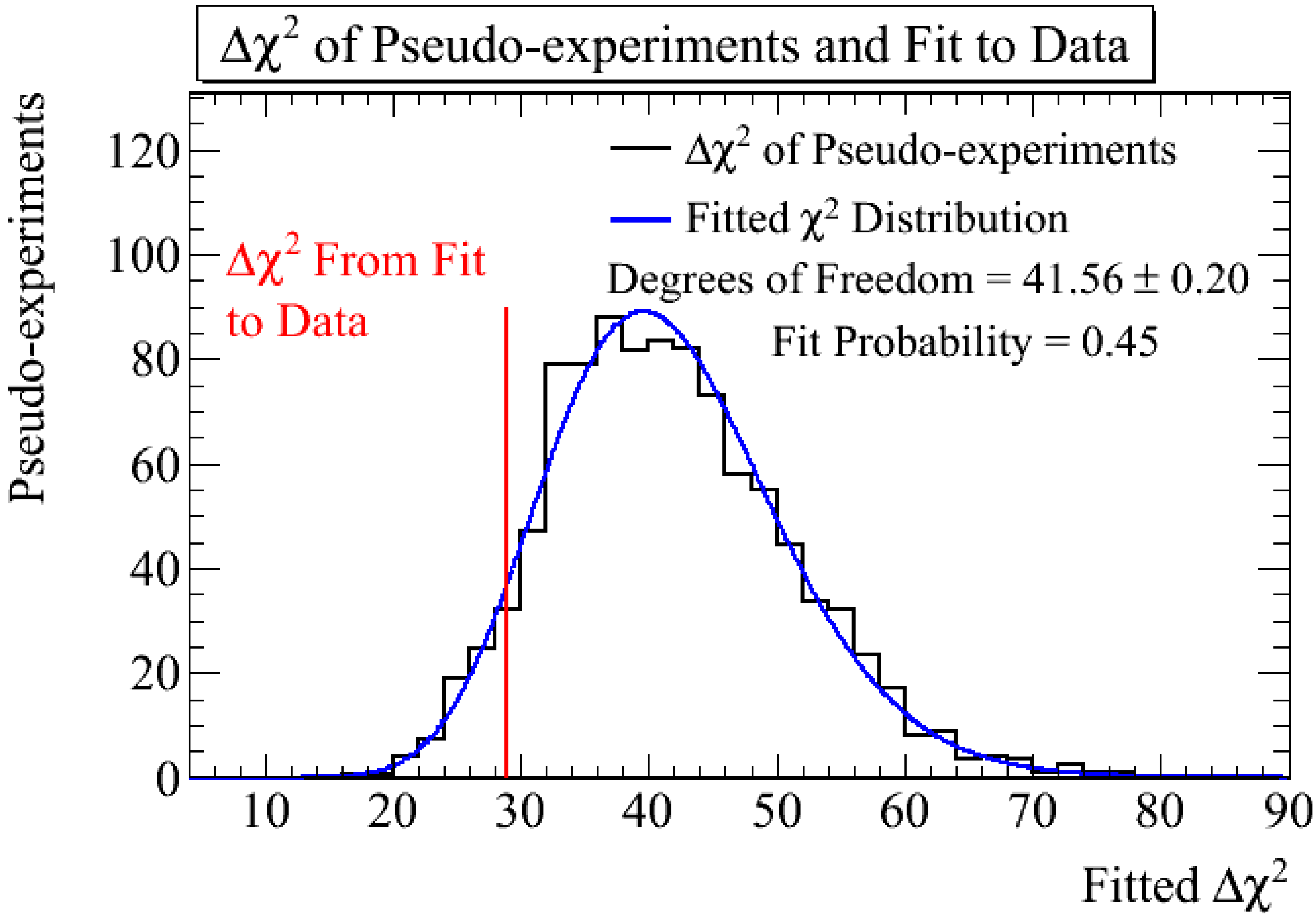
大きいところでも～１０％　(磁場の不定性によるTPC運動量の不定性、外からのBG)

Correlation Matrix





ND280フィット



$\Delta\chi^2$ of Pseudo-experiments and Fit to Data
Pseudo-experiments
$\Delta\chi^2$ of Pseudo-experiments
Fitted χ^2 Distribution
Degrees of Freedom = 41.56 ± 0.20
Fit Probability = 0.45
$\Delta\chi^2$ From Fit to Data
0
20
40
60
80
100
120
10
20
30
40
50
60
70
80
90
Fitted $\Delta\chi^2$

POD ve

Systematic Uncertainty	Signal (%)	Background (%)
EM Scale	7	16
Fiducial Volume	2	2
Muon Rejection	0	4
MC Statistics	3	4
Mass Uncertainty	1	1
Proton Reconstruction	3	6
Final State Interactions	1	12
Flux & Cross-section Parameters	9	5
Total	12	22

POD NCπ0

Source	Error	Contribution to Ratio (%)
Mass Uncertainty	0.8%	0.8%
Detector Alignment	2.5 mm	< 0.1%
Fiducial Volume	7%	7%
Relative Flux Uncertainty	15%	15(6.5)%
Reconstruction Uncertainties	4.7%	4.7%
Energy Resolution	10%	0.5%
Shape Uncertainty	13.7%	13.7%
Total	—	22(17)%

FluxをCCinclusive でnormalize

断面積不定性

Table 17: Summary of the systematic errors. The error on the number of target (0.67 %) have been added in quadrature to the total systematic error. ϕ, $det.$, FSI label the systematic uncertainty of the beam flux, detector response and FSI changed systematically following the covariance matrix showed in Fig. 9,11,10,12, x-s design the influence of the change of all the cross-section modeling parameter and channel rate.

P_μ (GeV/c)	$\cos\theta_\mu$	algo. (%)	ϕ (%)	x-s (%)	det. (%)	FSI (%)	syst (%)	stat (%)	tot (%)
[0.0, 0.4]	[−1, 0]	0.03	11.92	15.45	2.97	0.96	19.78	2.86	19.98
	[0, 0.84]	0.10	12.82	5.44	3.70	1.23	14.49	5.03	15.34
	[0.84, 0.9]	0.06	13.17	10.25	2.67	1.35	16.98	9.37	19.39
	[0.9, 0.94]	0.06	13.95	10.02	4.73	3.32	18.14	11.82	21.65
	[0.94, 1]	0.24	14.00	11.09	4.49	2.57	18.61	13.78	23.16
[0.4, 0.5]	[−1, 0]	0.98	12.05	48.06	2.79	0.47	49.64	3.52	49.77
	[0, 0.84]	0.13	11.39	5.68	1.31	0.34	12.83	4.27	13.52
	[0.84, 0.9]	0.18	11.41	4.96	0.94	0.38	12.51	8.55	15.15
	[0.9, 0.94]	0.90	11.71	4.90	1.19	0.44	12.82	9.97	16.24
	[0.94, 1]	0.34	13.12	6.25	2.06	0.83	14.73	11.42	18.64
[0.5, 0.7]	[−1, 0]	7.15	11.22	47.37	1.97	0.63	49.25	30.30	57.83
	[0, 0.84]	0.10	11.12	3.76	1.10	0.37	11.83	3.86	12.44
	[0.84, 0.9]	0.10	10.87	3.25	0.79	0.29	11.41	6.18	12.98
	[0.9, 0.94]	0.55	11.06	5.62	0.76	0.32	12.48	7.18	14.39
	[0.94, 1]	0.22	11.71	9.15	0.98	0.24	14.92	7.67	16.77
[0.7, 0.9]	[−1, 0]	3.18	13.48	101.82	1.59	0.48	102.77	28.89	106.75
	[0, 0.84]	0.19	11.35	2.93	1.14	0.41	11.81	5.23	12.92
	[0.84, 0.9]	0.23	10.93	5.84	0.83	0.19	12.45	6.85	14.21
	[0.9, 0.94]	0.04	10.75	10.59	0.95	0.40	15.15	7.57	16.94
	[0.94, 1]	0.03	11.01	15.59	0.79	0.30	19.13	6.90	20.34
[0.9, 30.0]	[−1, 0]	-	-	-	-	-	-	-	-
	[0, 0.84]	0.20	11.83	4.97	1.46	0.69	12.97	5.88	14.24
	[0.84, 0.9]	0.07	11.30	2.31	0.89	0.26	11.60	6.05	13.09
	[0.9, 0.94]	0.05	11.09	2.08	0.72	0.36	11.34	5.33	12.53
	[0.94, 1]	0.09	10.90	2.25	0.75	0.26	11.19	2.97	11.58

highest contribution

highest contribution

Tracker ve

Syst. source	$\Delta(f(\nu_e))$
Detector systematic errors	0.061
Flux and cross-section	0.088
Total	0.107

- Det.のメインはTPCのPID

The predicted number of events and systematic uncertainties

The predicted # of events w/ 3.01 x 10^{20} p.o.t.

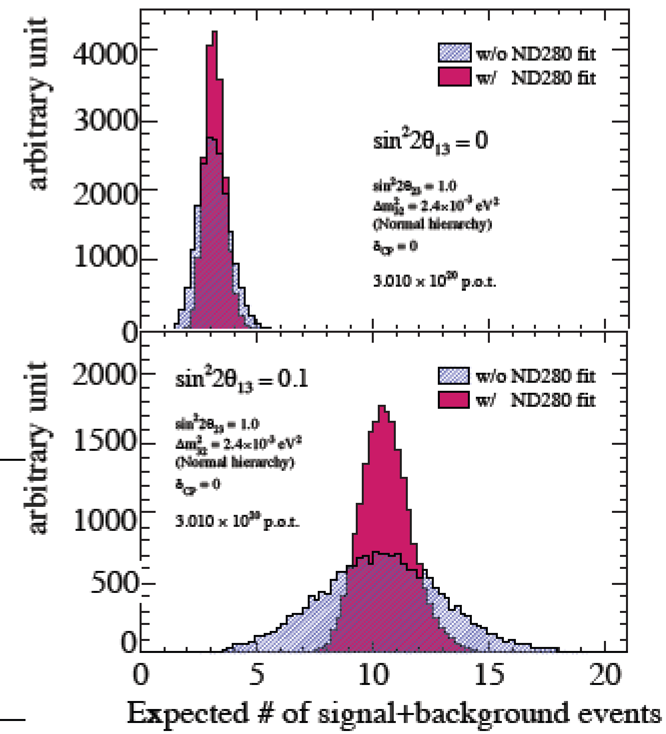
Event category	$\sin^2 2\theta_{13} = 0.0$	$\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$
Total	3.22±0.43	10.71±1.10
ν_e signal	0.18	7.79
ν_e background	1.67	1.56
ν_μ background (mainly NCπ^0)	1.21	1.21
$\overline{\nu}_\mu + \overline{\nu}_e$ background	0.16	0.16

Systematic uncertainties

Error source	$\sin^2 2\theta_{13} = 0$	$\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$
Beam flux+ν int. in T2K fit	8.7 %	5.7 %
ν int. (from other exp.)	5.9 %	7.5 %
Final state interaction	3.1 %	2.4 %
Far detector	7.1 %	3.1 %
Total	13.4 %	10.3 %
(T2K 2011 results:	~23%	~18%)

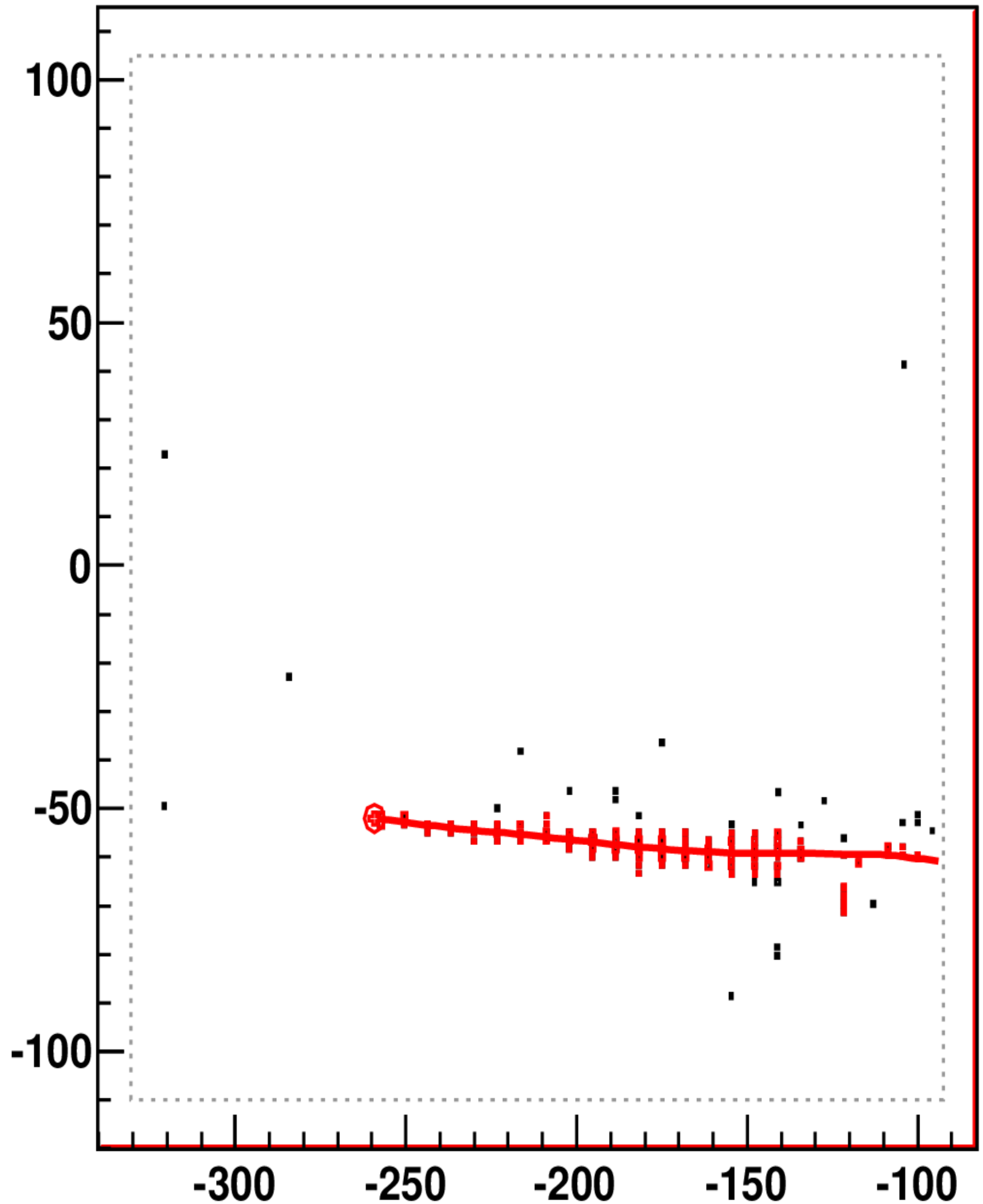
big improvement from 2011 results

the predicted # of event distribution



Uncertainties are reduced after the flux & ν int. xsec fit

νe 候補事象 @POD



PID in TPC and Ecal