



T2KビームによるKamLANDでの 中性子生成シミュレーション

A班若手研究会
11月9日

東北大学 ニュートリノ科学研究センター
M1 安部清尚

T2K実験 (Tokai to Kamioka)

長基線ニュートリノ振動実験

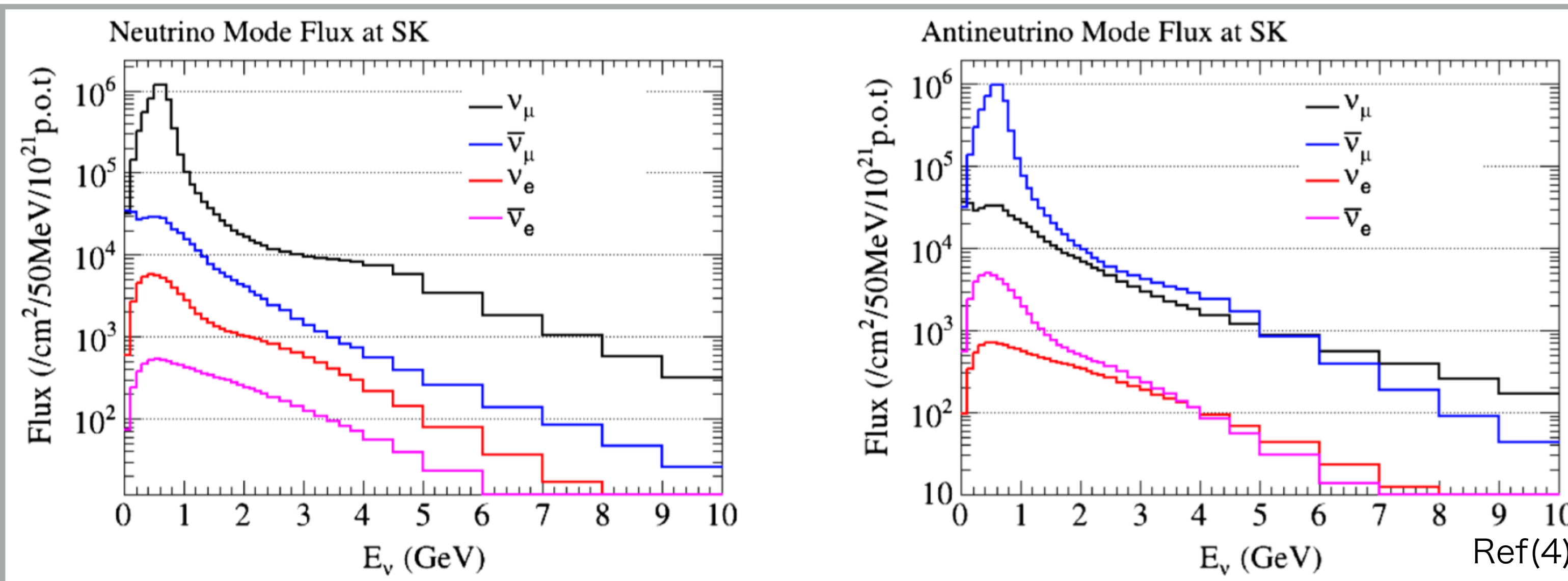
- J-PARC → Super-Kamiokande (SK)
 - ほぼ真西へ295km
- 2010年よりデータ収集開始
- 2013年 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動現象を初めて観測
- ニュートリノ振動パラメーターの精密測定を目的とする
 - δ_{cp} (CP violation)
 - Mass hierarchy ($m_1 < m_2 < m_3$ or $m_3 < m_1 < m_2$)
- 2つのmode(numode, nubarmode)

Super-Kamiokande

- 岐阜県飛騨市神岡町
- 50kt 水チェレンコフ検出器

J-PARC

- 茨城県那珂郡東海村
- 陽子加速器



Total delivered POT: 3.16e21

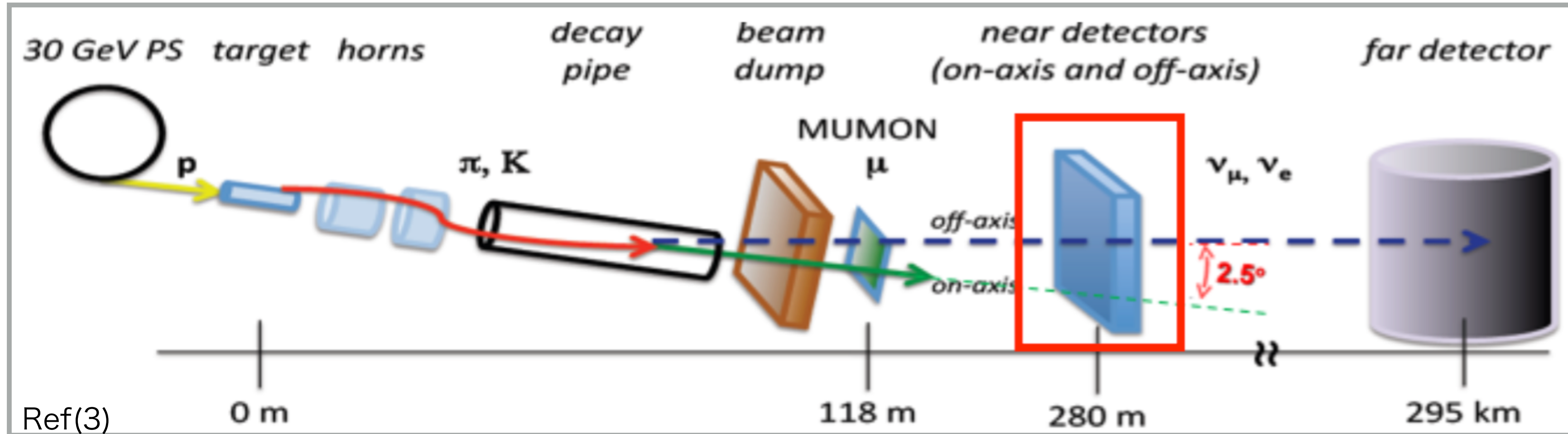
- numode POT : 1.51e21
- nubarmode POT : 1.65e21 Ref(3)

2017年12月までのデータ解析で用いられたイベント数

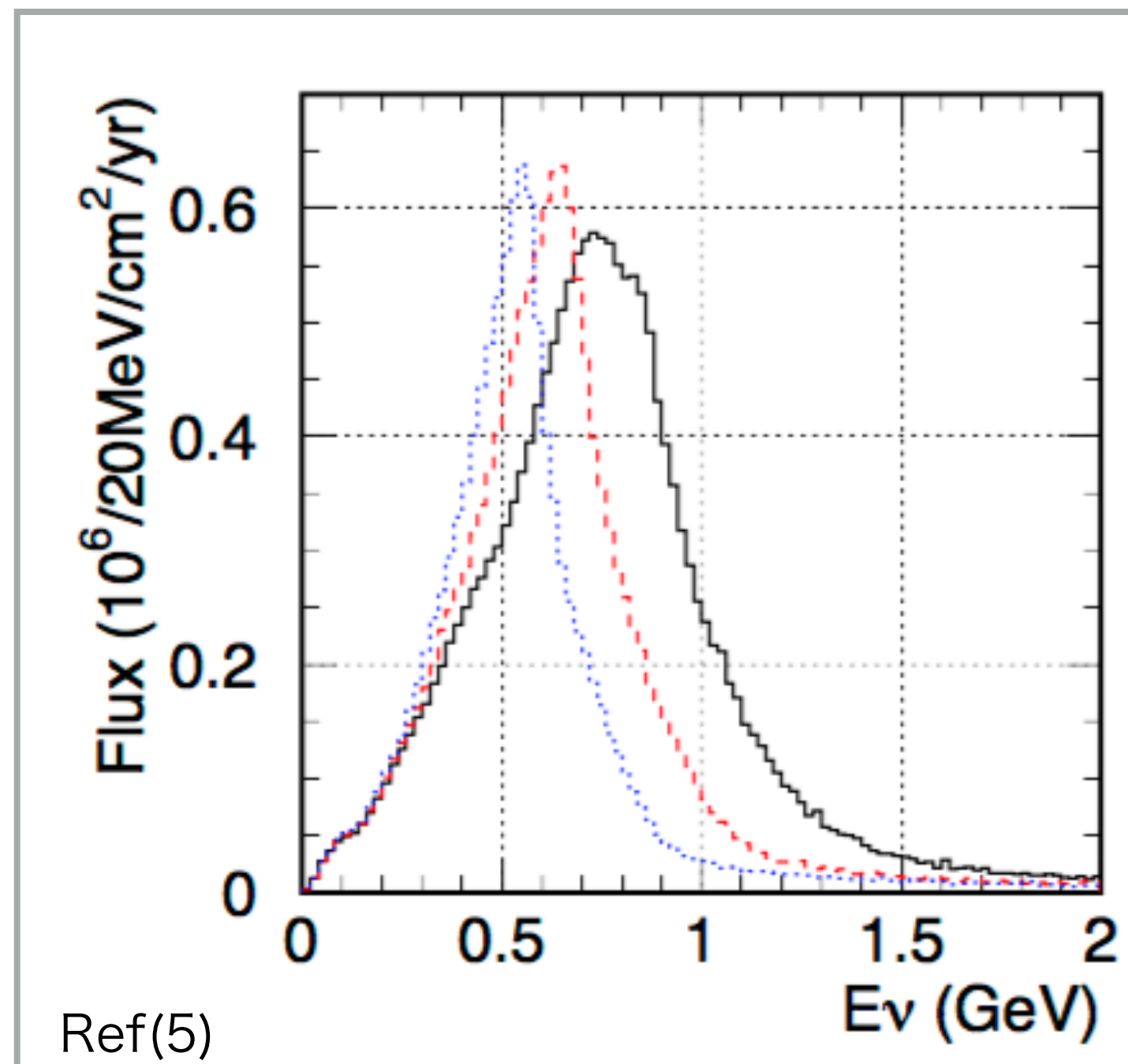
444 events Ref(3)

numode, nubarmodeを比べることで δ_{cp} への感度を得られる

T2K Beam



Ref(3)



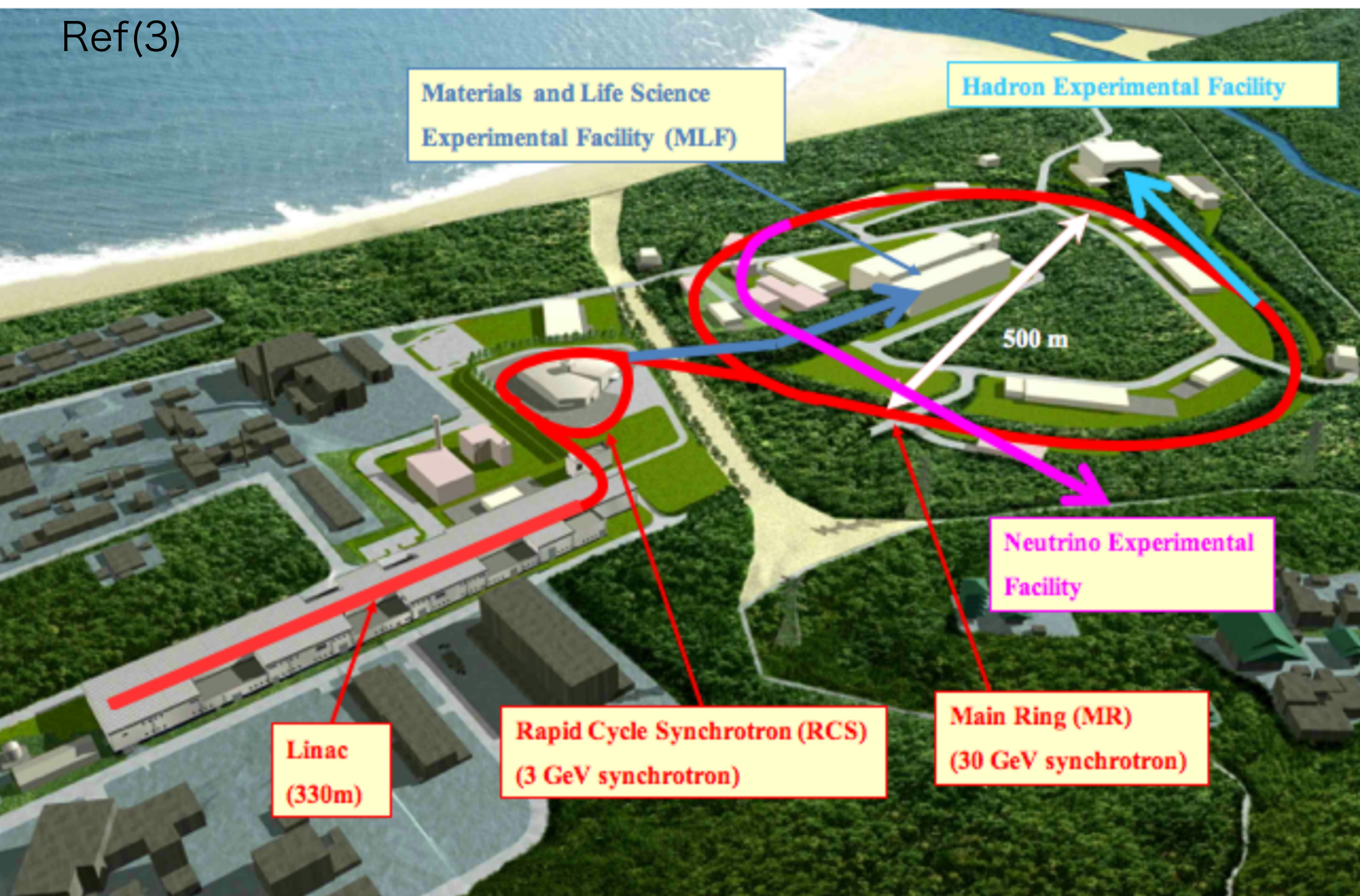
Ref(5)

黒 : 2°

赤 : 2.5°

青 : 3°

Ref(3)



Off-axis法を採用

- SKには 2.5° ずれたビームが届いている
- これによりEnergy spectrumのピークが ~0.6GeVになる
- 距離295kmにおいては ~0.6GeV で $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動確率が最大となる

J-PARCから見たSKとKamLAND(KL)の角度差

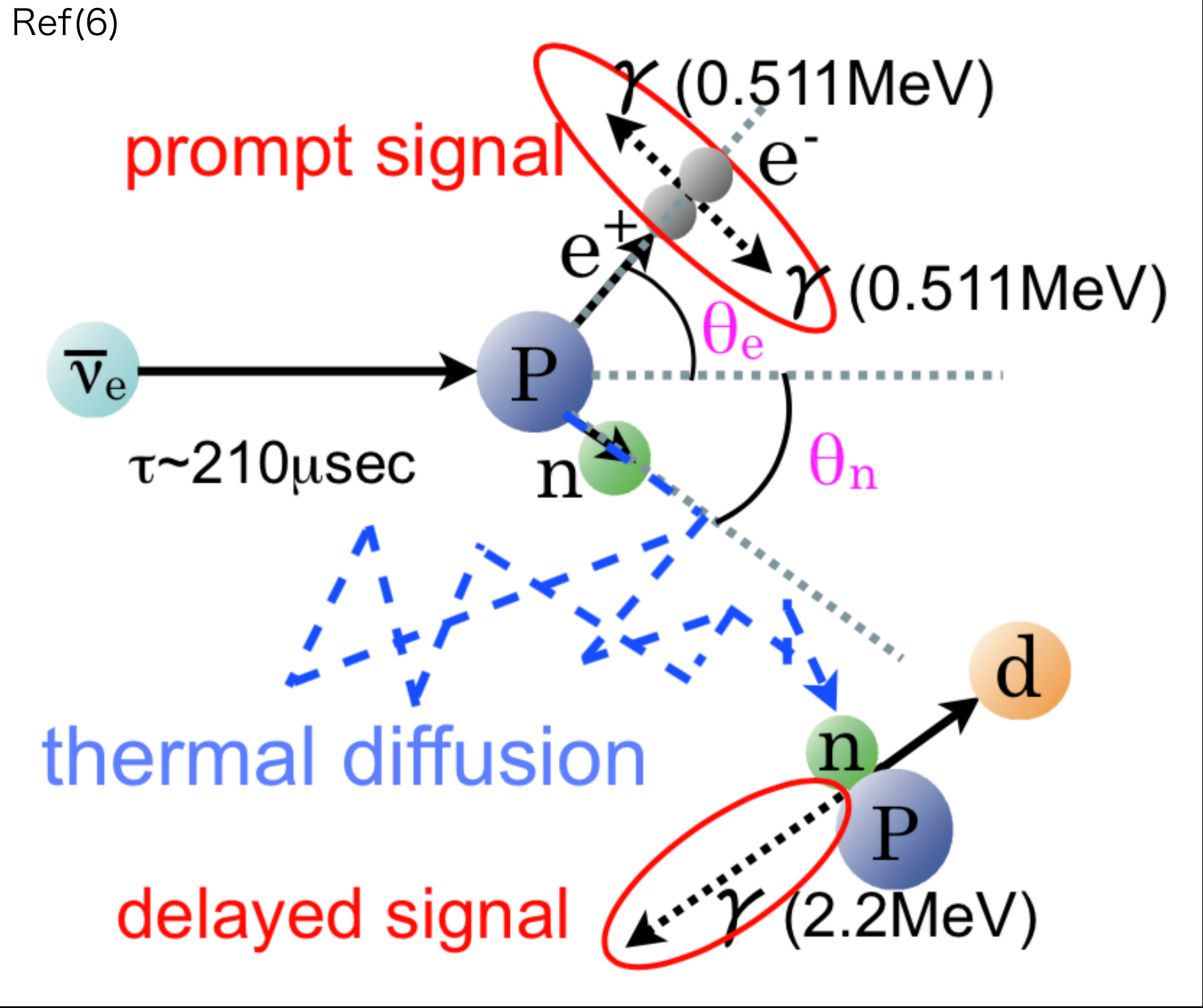
- J-PARC ↔ SK(KL) の距離は~295km。SK ↔ KL の距離 ~1km。
- 角度差は最大で 0.2°
- KLでも観測可能な強度でbeamが入射している上に、SKとそれほどスペクトルが変わらないと考えられる

Neutron Capture

SK・KL ともに 1H による中性子捕獲が支配的

- 平均 $\sim 200\mu\text{sec}$ でcapture
- 2.2MeV γ 線を放出

Target	Cross Section (mb)	γ Energy (MeV)
1H	~ 333	~ 2.2
12C	~ 3.9	~ 5.0
16O	~ 0.2	~ 4.2

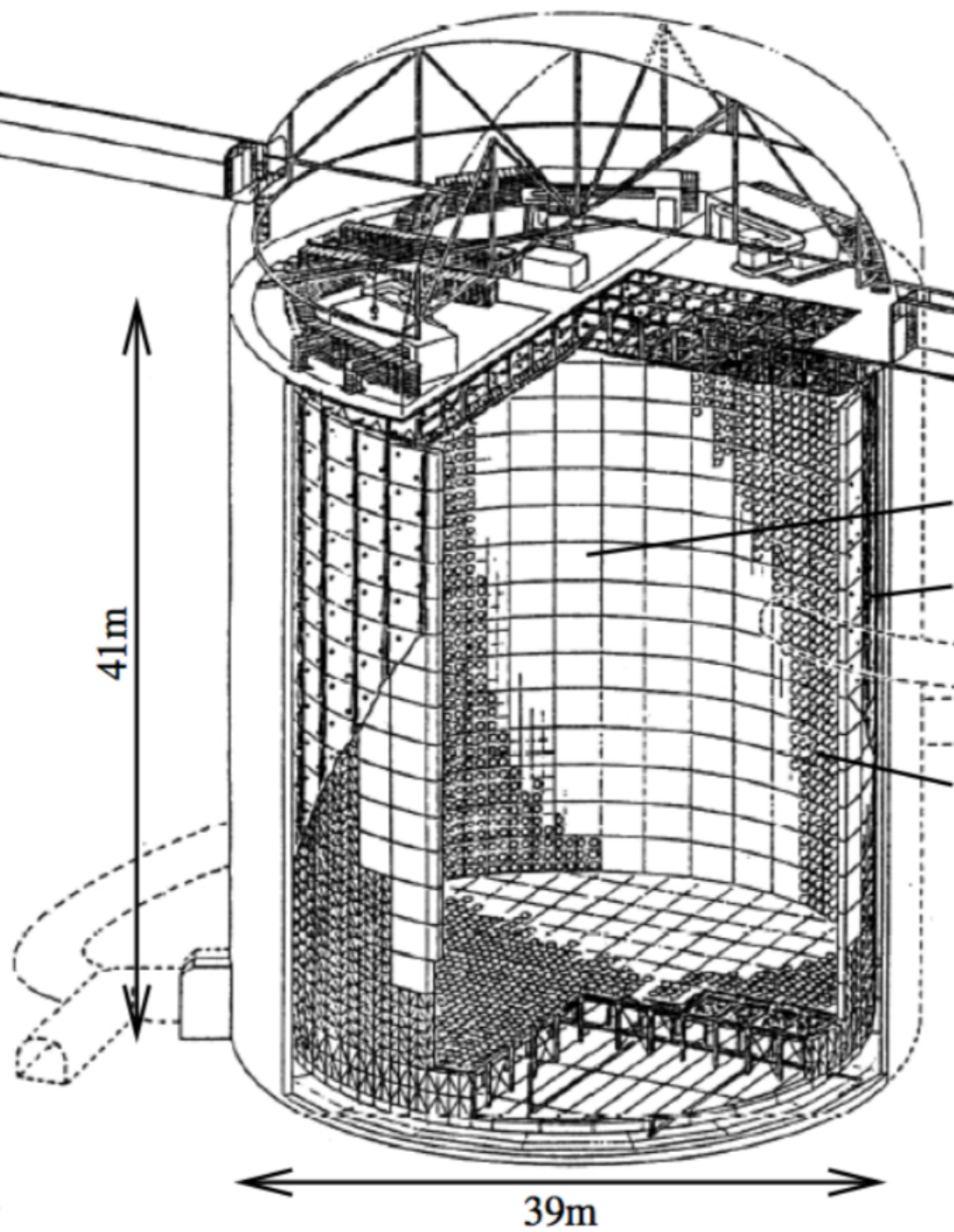


n captureを利用した左図のような遅延同時計測が可能

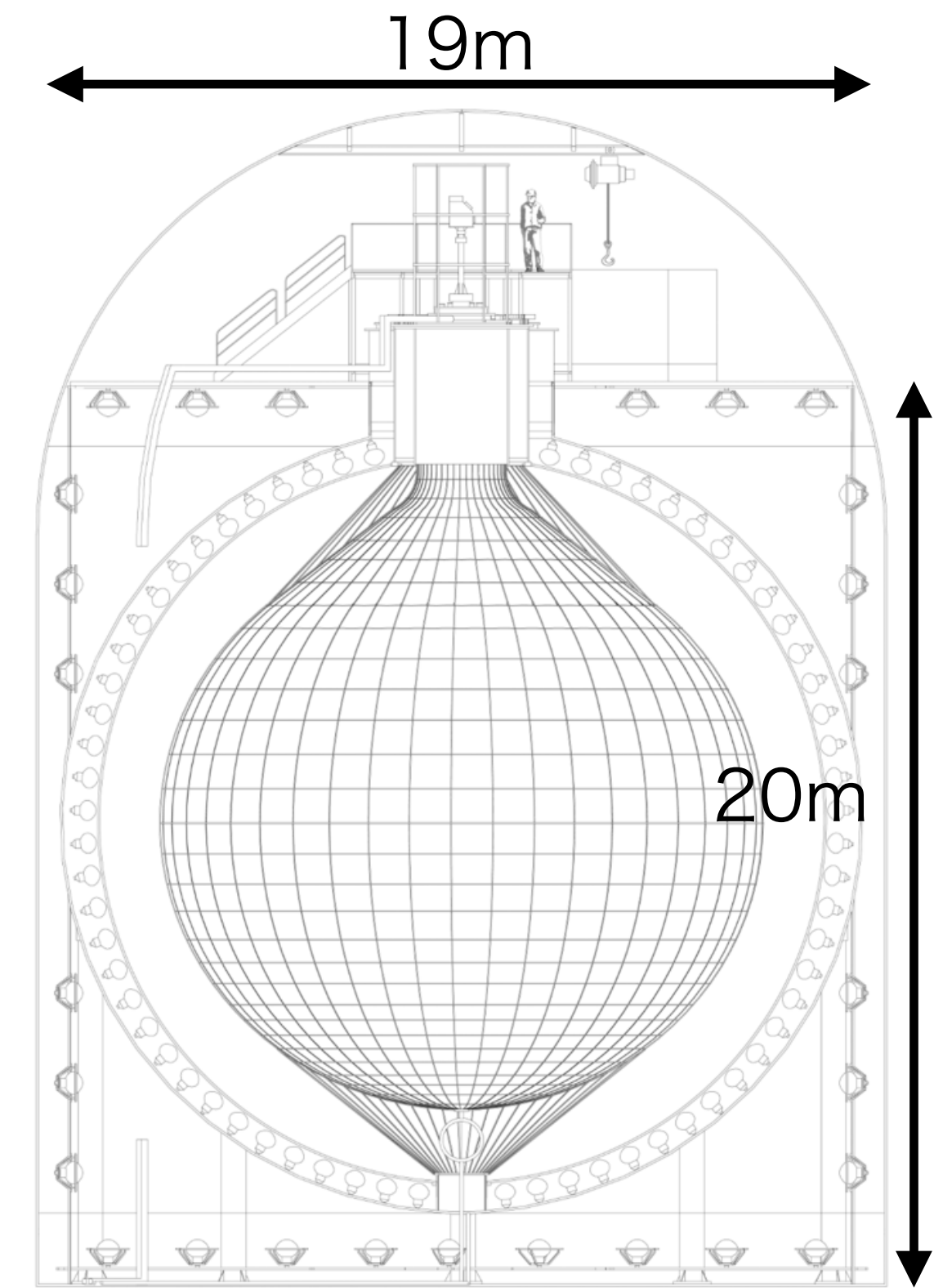
- KL高いneutron captureに対するefficiencyを誇るため、良い精度で可能
- 一方SKにおいては 2.2MeV の γ 線は、SKの約11000本(ID)のPMTのうち6本ほどしかヒットさせない (KLでは ~ 300 ヒット)
- ハードウェアトリガー条件の閾値をそこまで下げるわけにはいかない
- ソフトウェアトリガー(データ解析段階でのトリガー)である程度は改善はできるが、efficiencyは低いまま($\sim 30\%$)である

n captureの遅延同時計測はanti-neutrino反応特有のものであり、neutrinoとの区別を可能にする

SK vs KL



50kt 水チェレンコフ	検出器	1kt 液体シンチレータ
直径34m 高さ36m 円筒形	ID 構造	18m 球形
~11000	PMT本数 (ID)	~1800
大気 (~GeV)	主なターゲット	地球・原子炉 (~MeV)



- ・チェレンコフリングによるTrack再構成
- ・Ring形状によるPID (ex. 大気ニュートリノ)
- ・高エネルギーイベントもID内で止まりやすい
- ・大きいのでイベントも多い

← Advantage →

- ・大光量・低thresholdによる低エネルギー領域での感度
- ・高い中性子捕獲イベントのefficiency

- ・Cherenkov threshold
- ・中性子捕獲イベントに対するinefficiencyの大きさ

← Disadvantage →

- ・高エネルギー領域のsaturation
- ・高エネルギーイベントだとODへ抜けてしまう

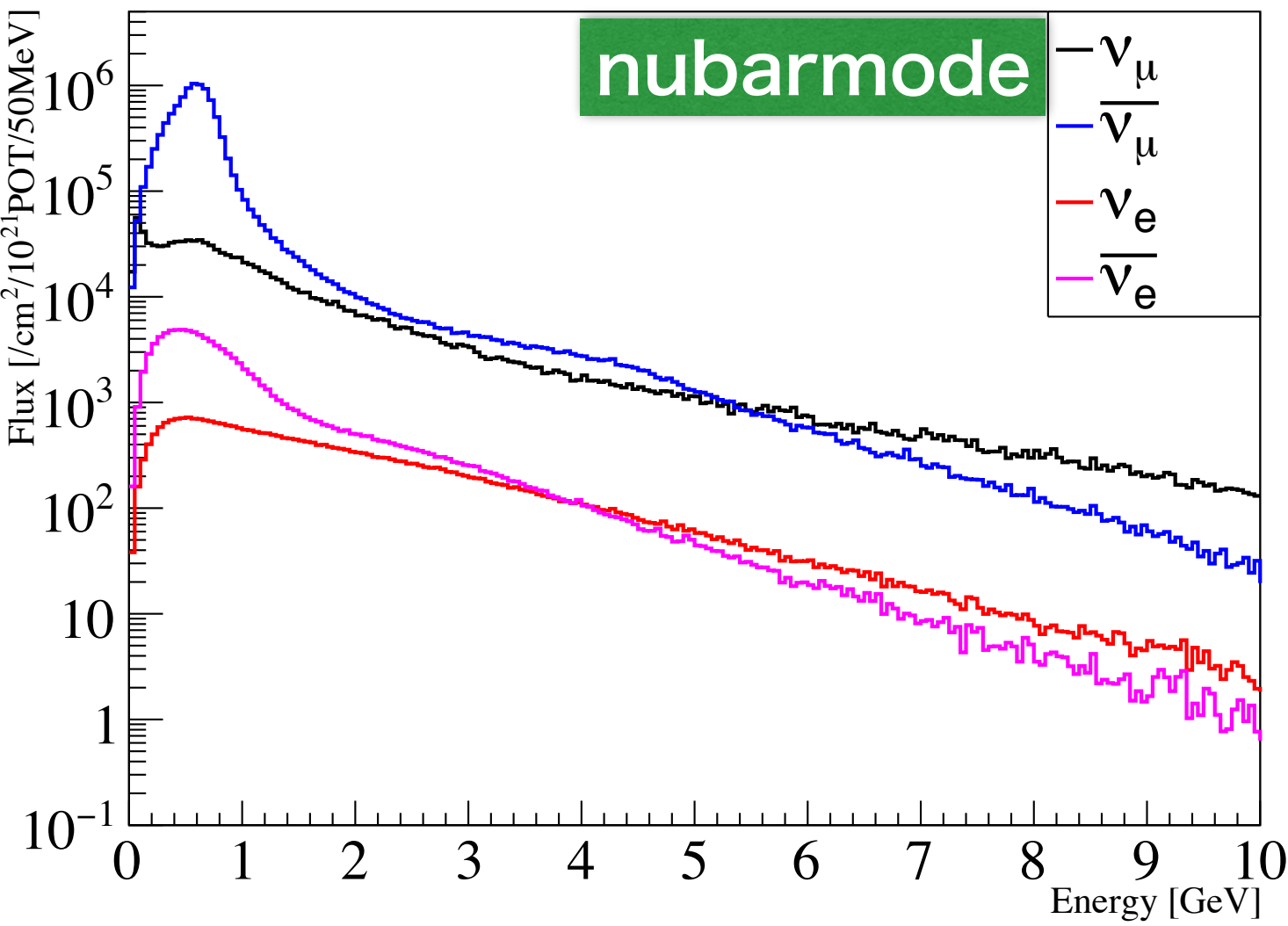
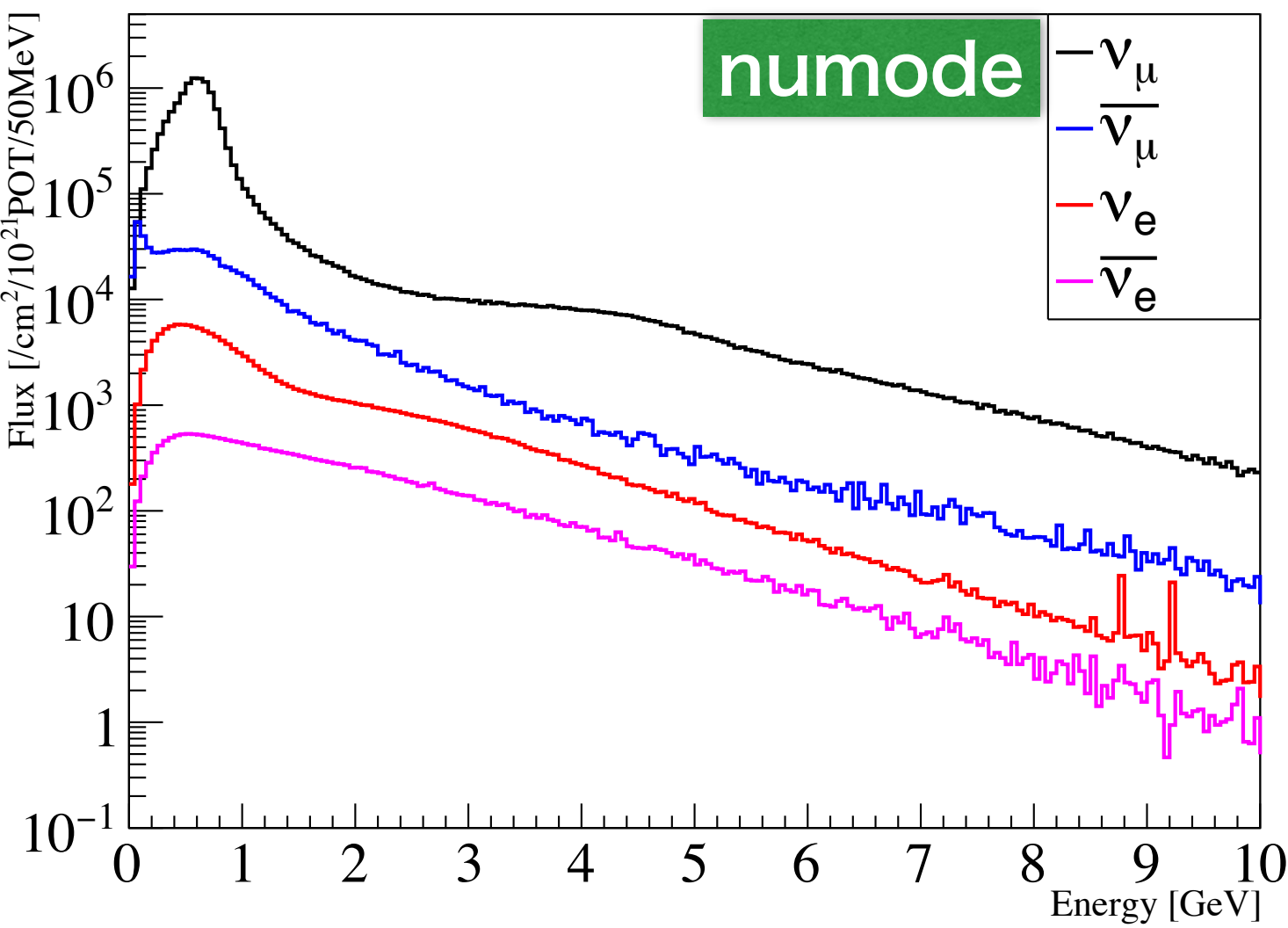
T2K neutrinoにおいて中性子捕獲を捉えることは非常に重要

- neutrino・antineutrinoの区別が可能になるため
- T2K解析でのノウハウを大気ニュートリノ解析にも応用できる

T2K Flux at SK

T2K flux w/o osc. at SK は公式HPより

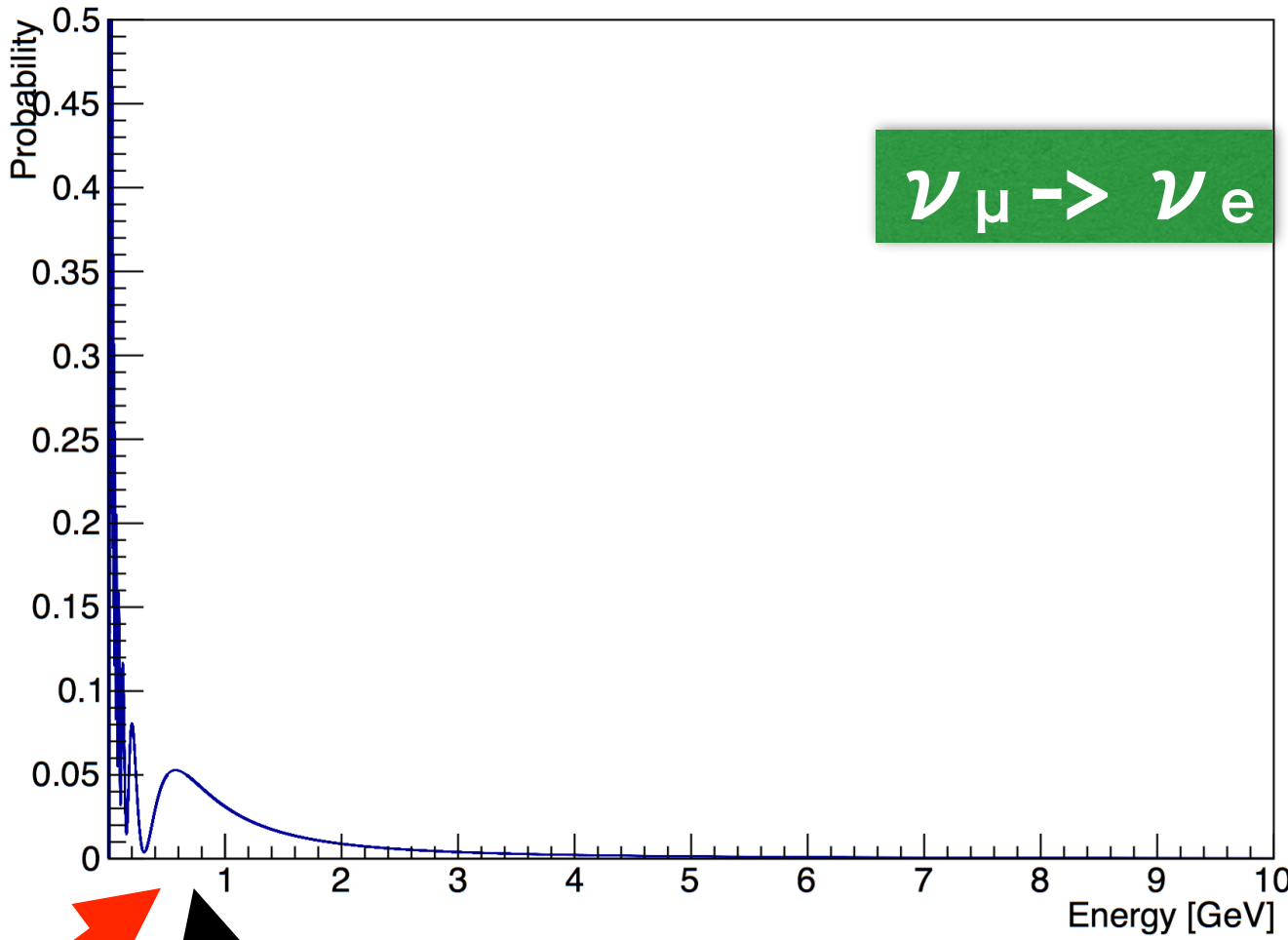
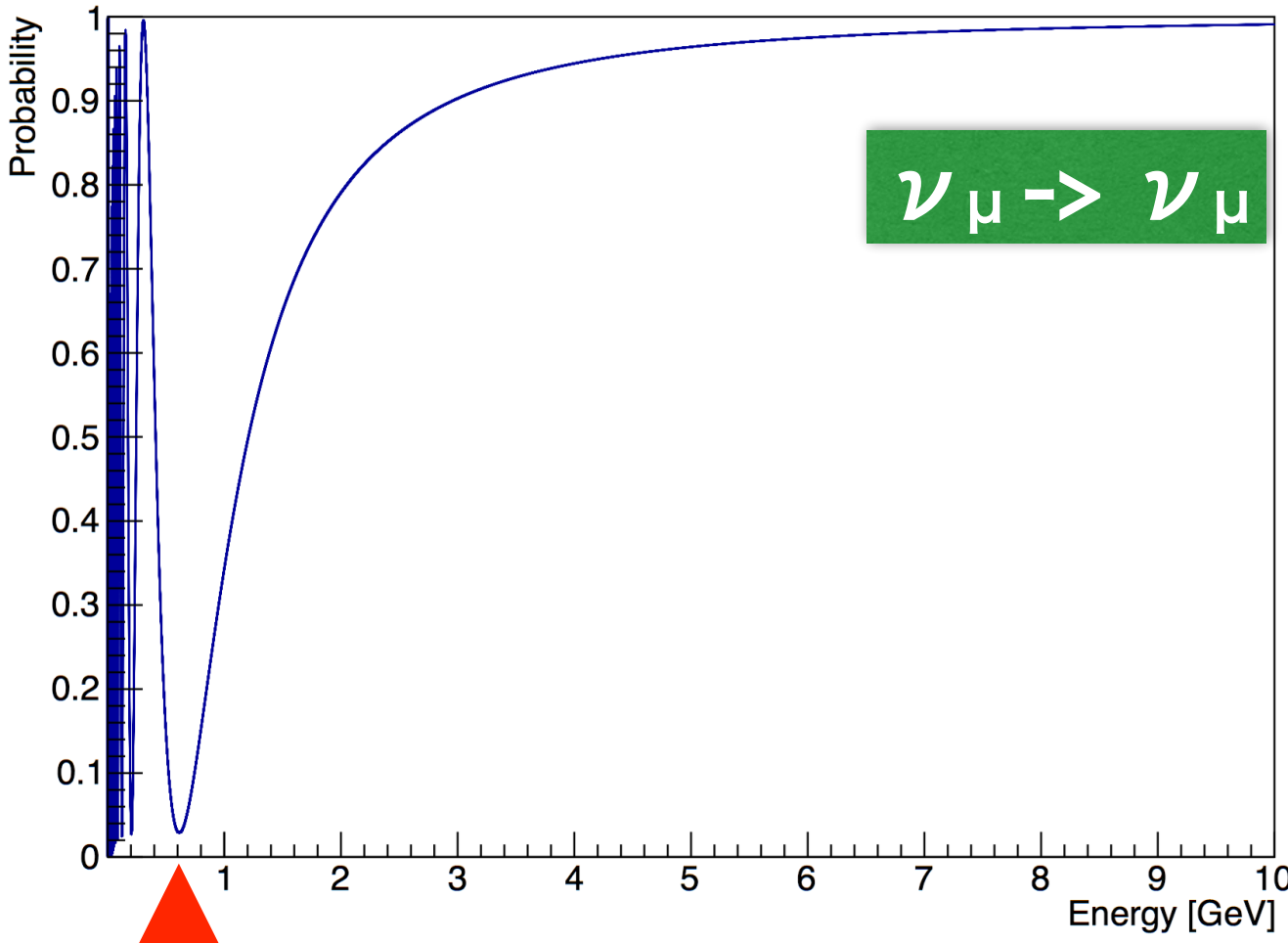
- ~0.6GeVにピーク



Oscillation Probability

- パラメータはPDG 2018()よりbest-fit値
- Normal hierarchy
- $\delta_{cp} = 1.5\pi$
- 物質密度 $\rho = 2.7\text{g/cm}^3$
- $L = 295\text{km}$

Δm^2_{21}	7.37e-5 [eV ²]
Δm^2_{31}	2.56e-3 [eV ²]
$\sin^2 \theta_{23}$	0.425
$\sin^2 \theta_{13}$	0.0215
$\sin^2 \theta_{12}$	0.297



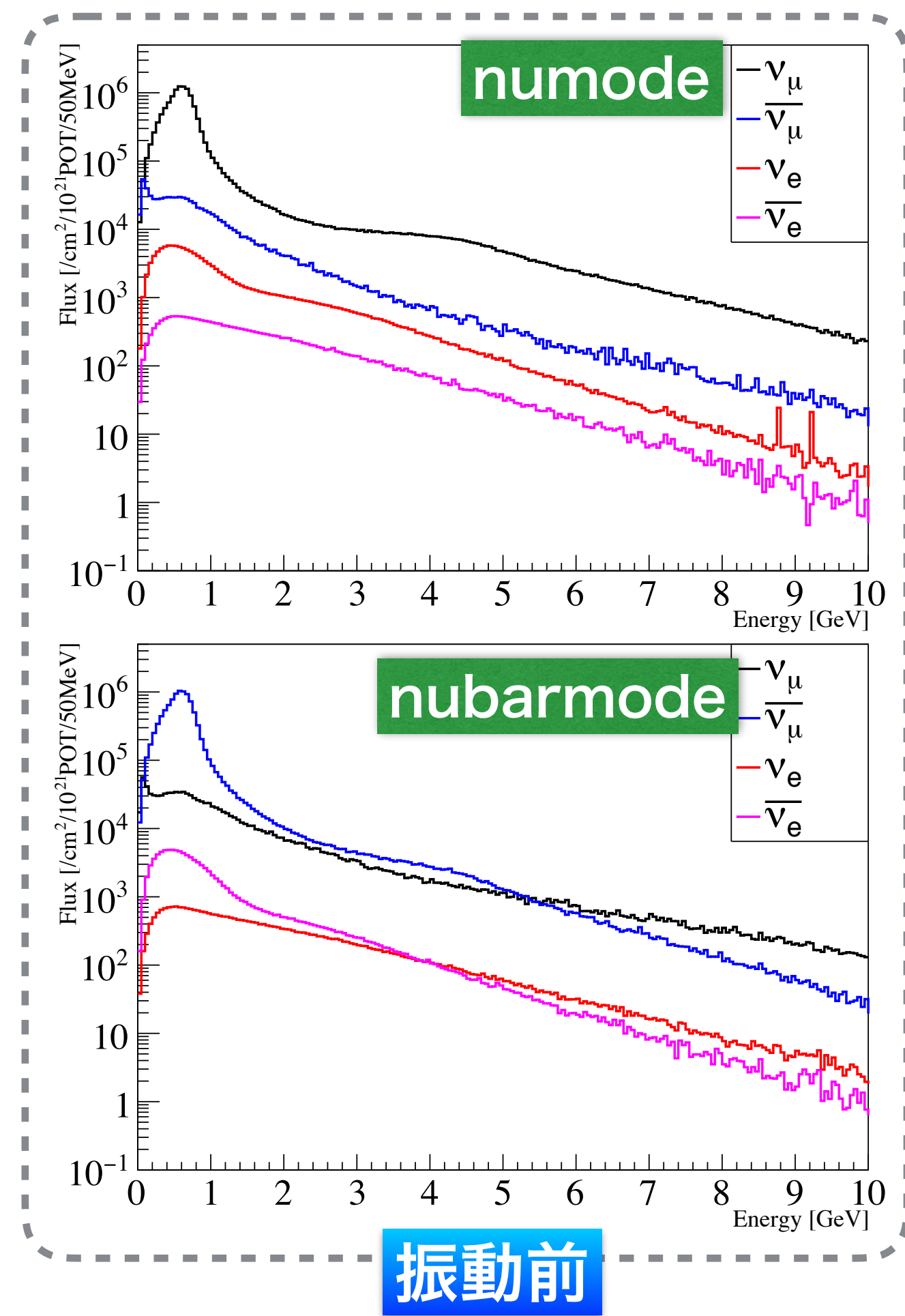
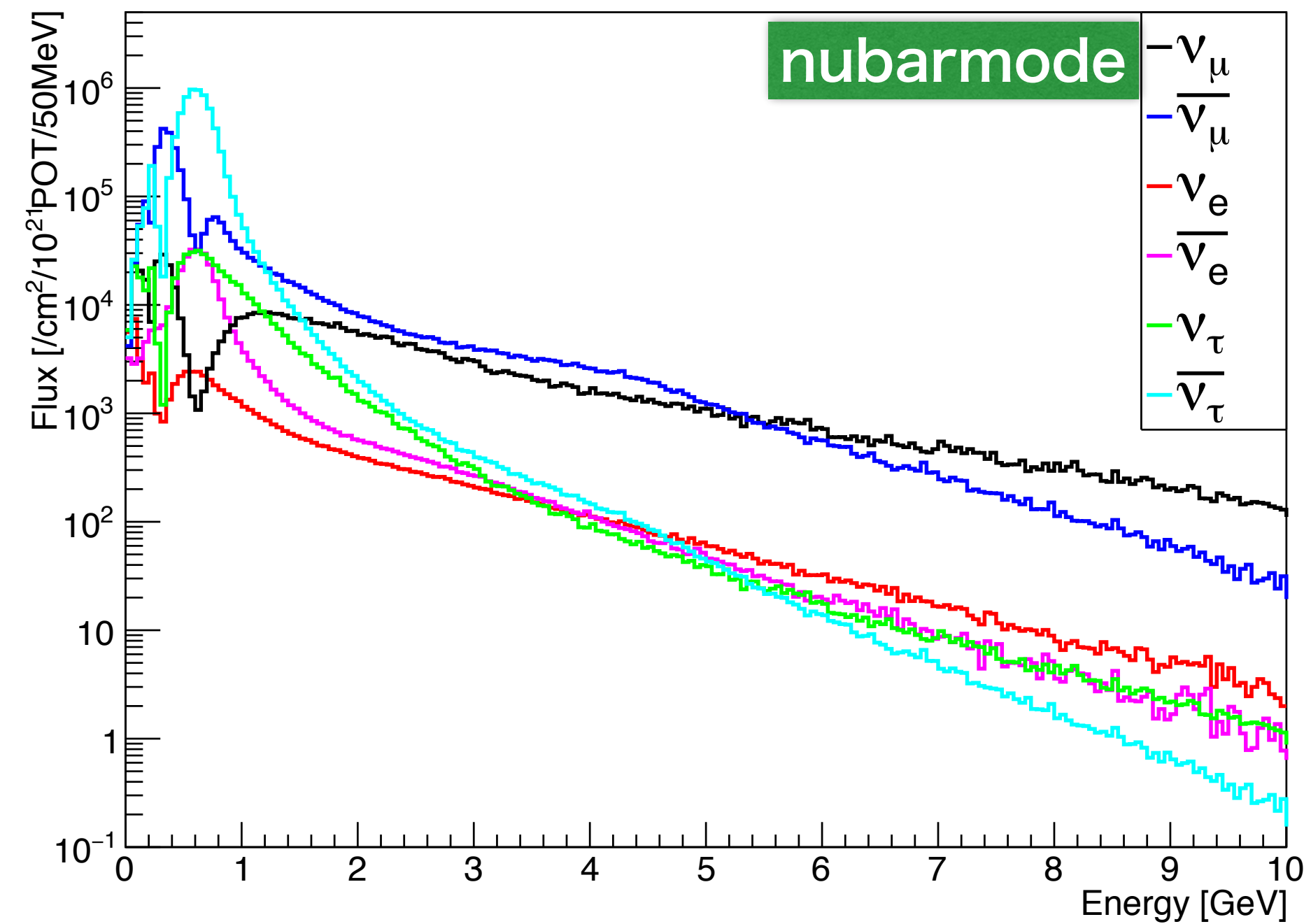
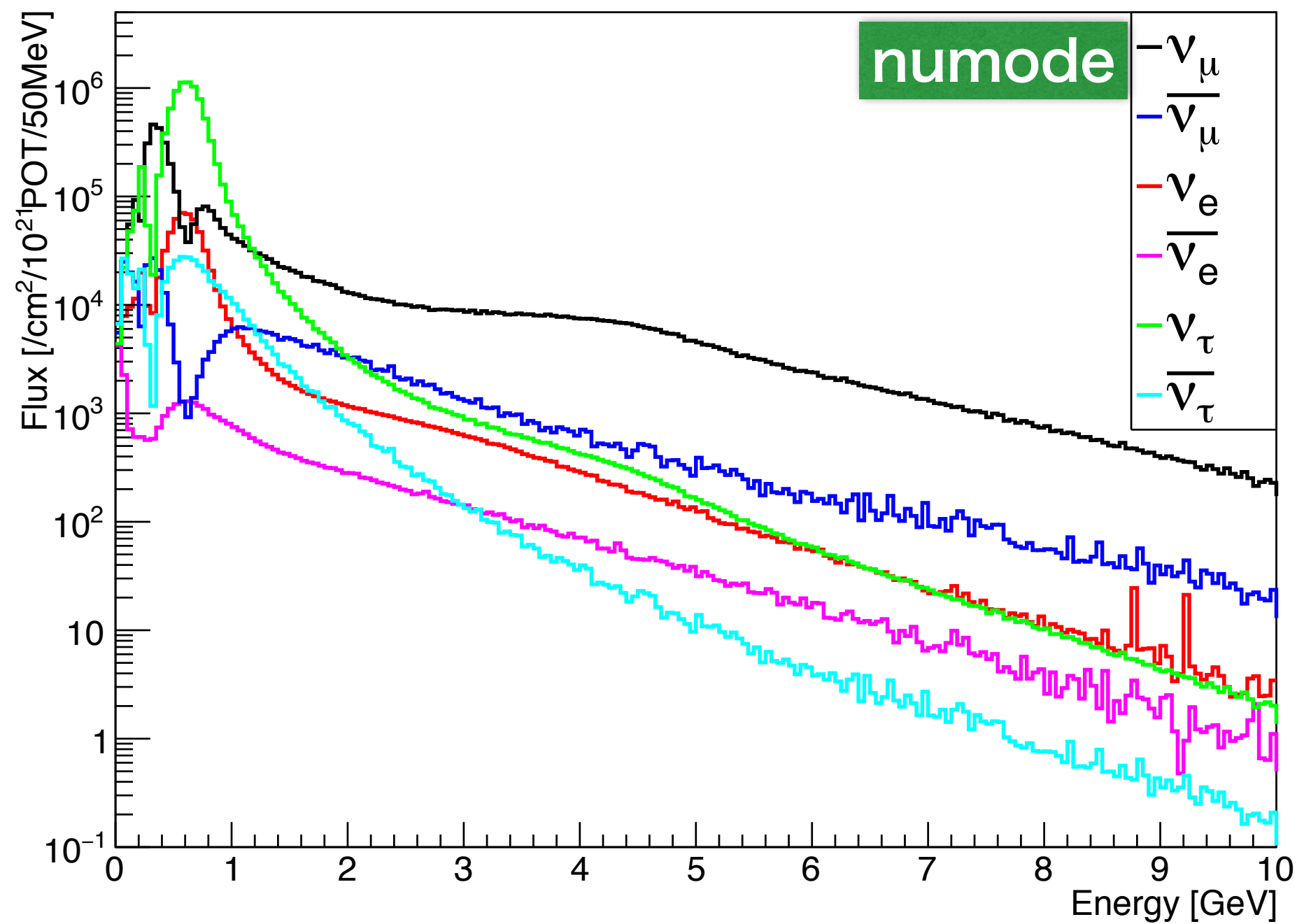
T2K fluxのピーク位置 = ~0.6 GeV

このピークが大きくなるのが $\delta_{cp} = 1.5\pi$ の特徴
 $\delta_{cp} = 0.5\pi$ だと小さくなる(最大±27%の違い)

-> T2K実験における δ_{cp} への感度

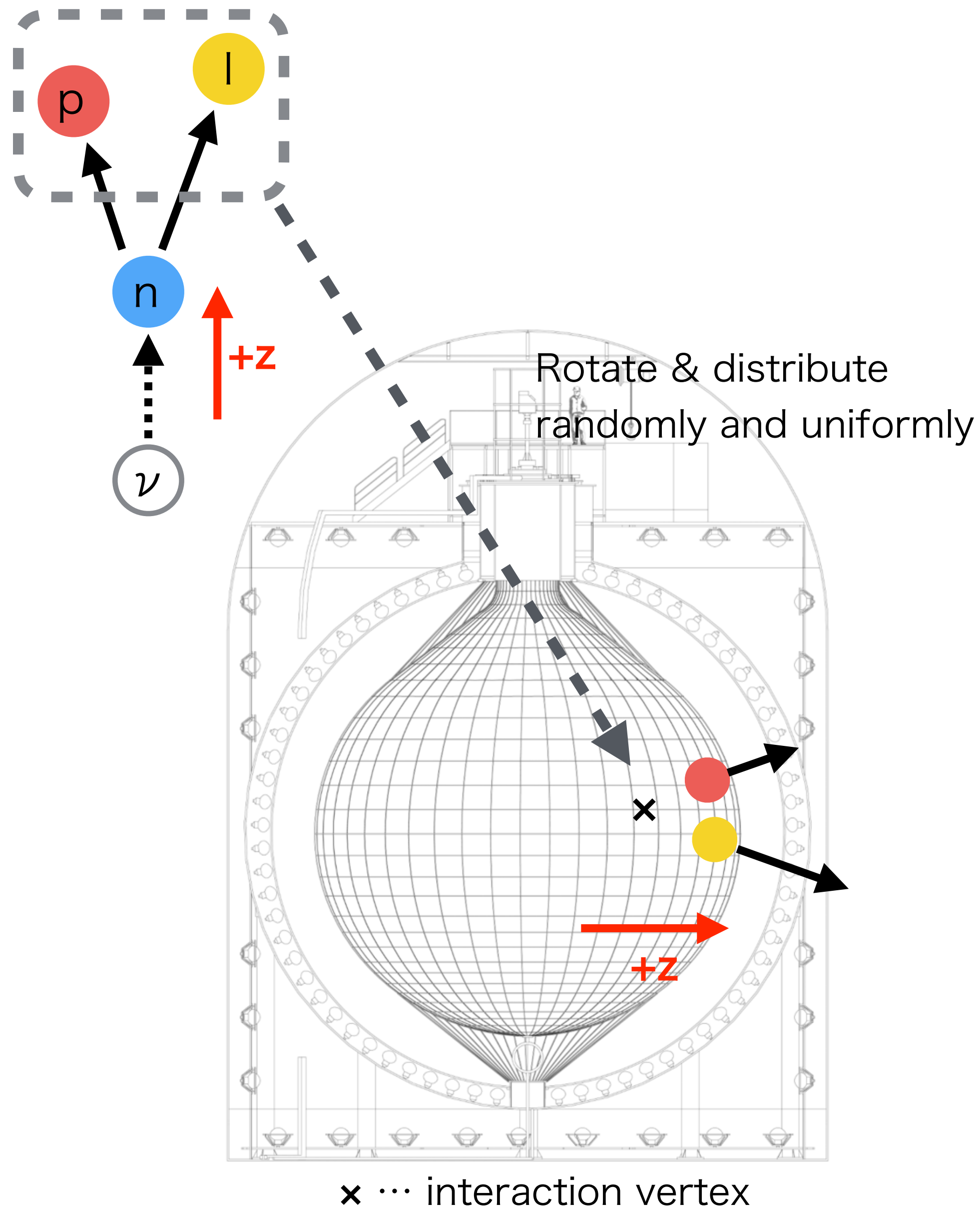
T2K fluxとOscillation probabilityを掛け合わせて、T2K flux w/ osc. を計算

T2K Flux w/ osc.



- ~ 0.6 GeV のピークの多くは ν_τ (bar) に変化
- ν_μ (bar) は2つの小さなピークを持つ (~ 0.4 , ~ 0.9 GeV)
- 高エネルギー領域は振動による変化は小さい

Overview of Simulation



Step1: Generate neutrino interaction by GENIE

- Simulation tool for generating neutrino scattering
- Output generated particle information
- Use calculated T2K flux w/ osc.
- GENIEでは+z方向にneutrinoが来た設定になっている

Step2: Input results of GENIE into Geant4

- Input momentum of each particle
- Distribute interaction vertex uniformly and randomly
- GENIEの結果におけるx,y,z軸を回転させ、実際のT2Kビームの様に横からneutrinoが来たように設定する

Mainly focus on neuron multiplicity

Setup of GENIE

Neutrino: ν_e, ν_μ, ν_τ & bar

- 10^5 interactions for each

Spectrum: T2K beam at SK w/ osc.

Energy: $0.003 \leq E \leq 10$ [GeV]

- 低エネルギーはKamLANDにおけるBGイベント領域を除外

Target: CH2

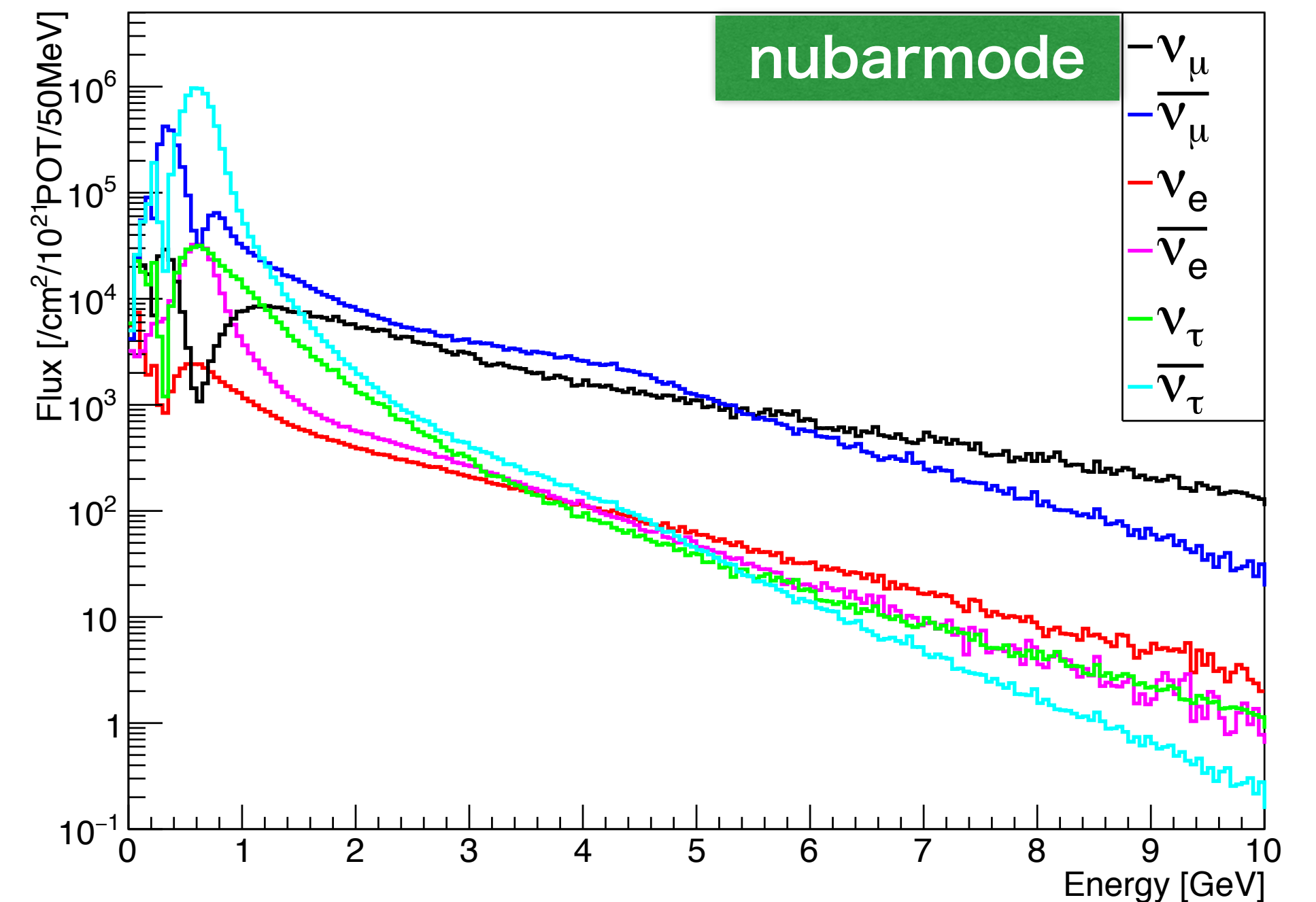
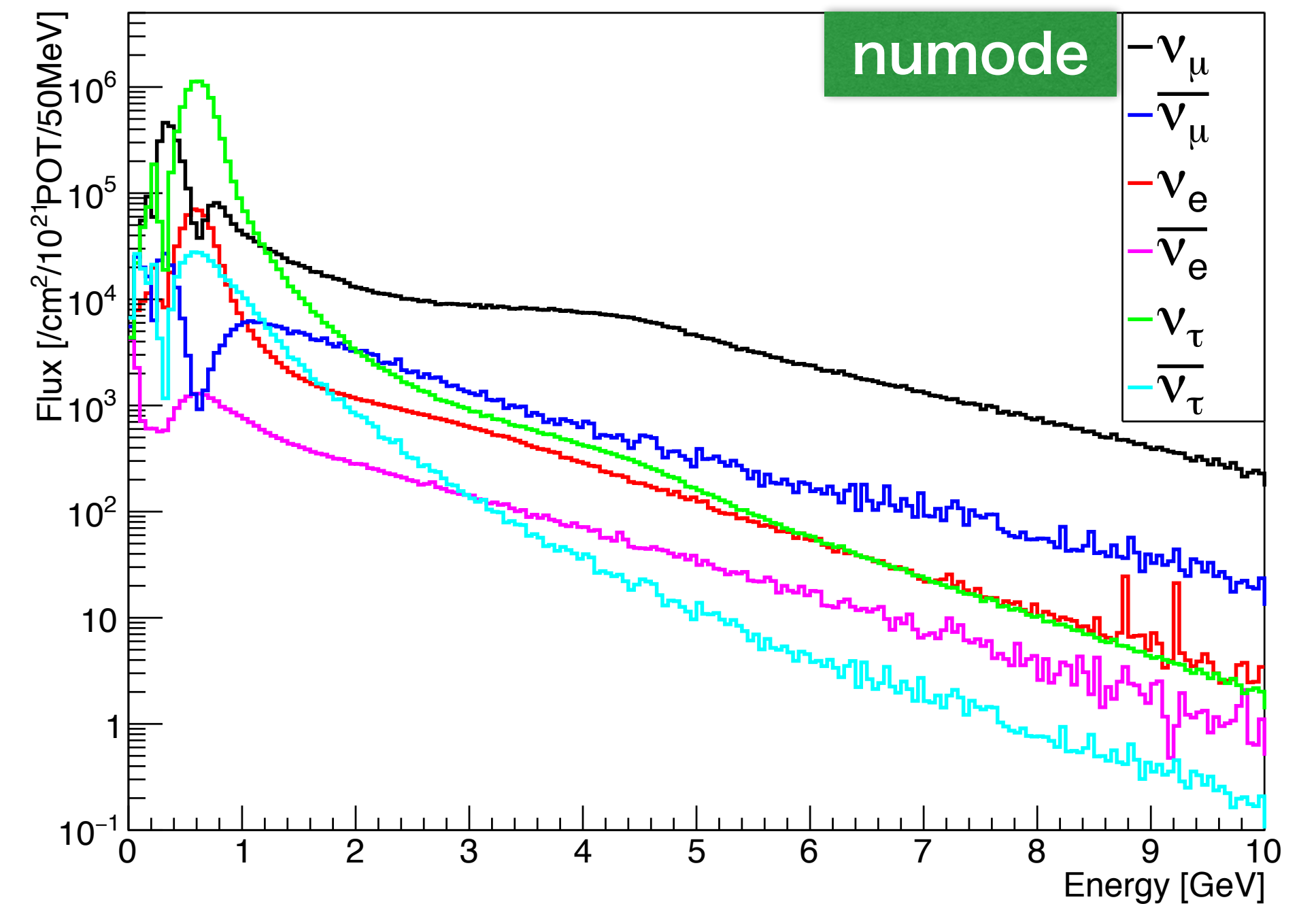
- C: 33.333%, H: 66.667%
- Roughly near to LS & BO chemical composition

Cross section: gxspl-FNALsmall.xml

- Pre-computed by Fermi National Accelerator Laboratory

GENIE version: 2.12.6

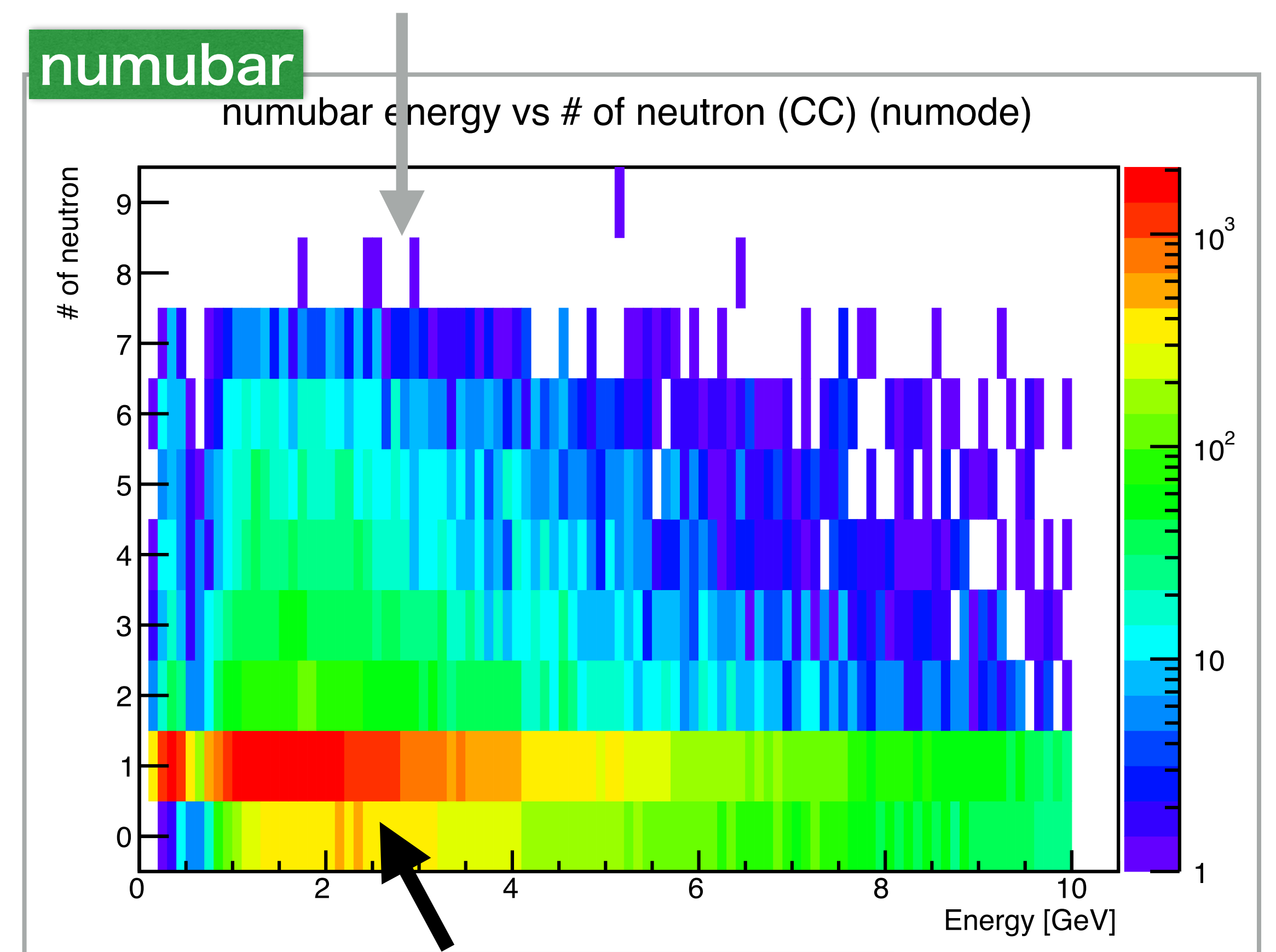
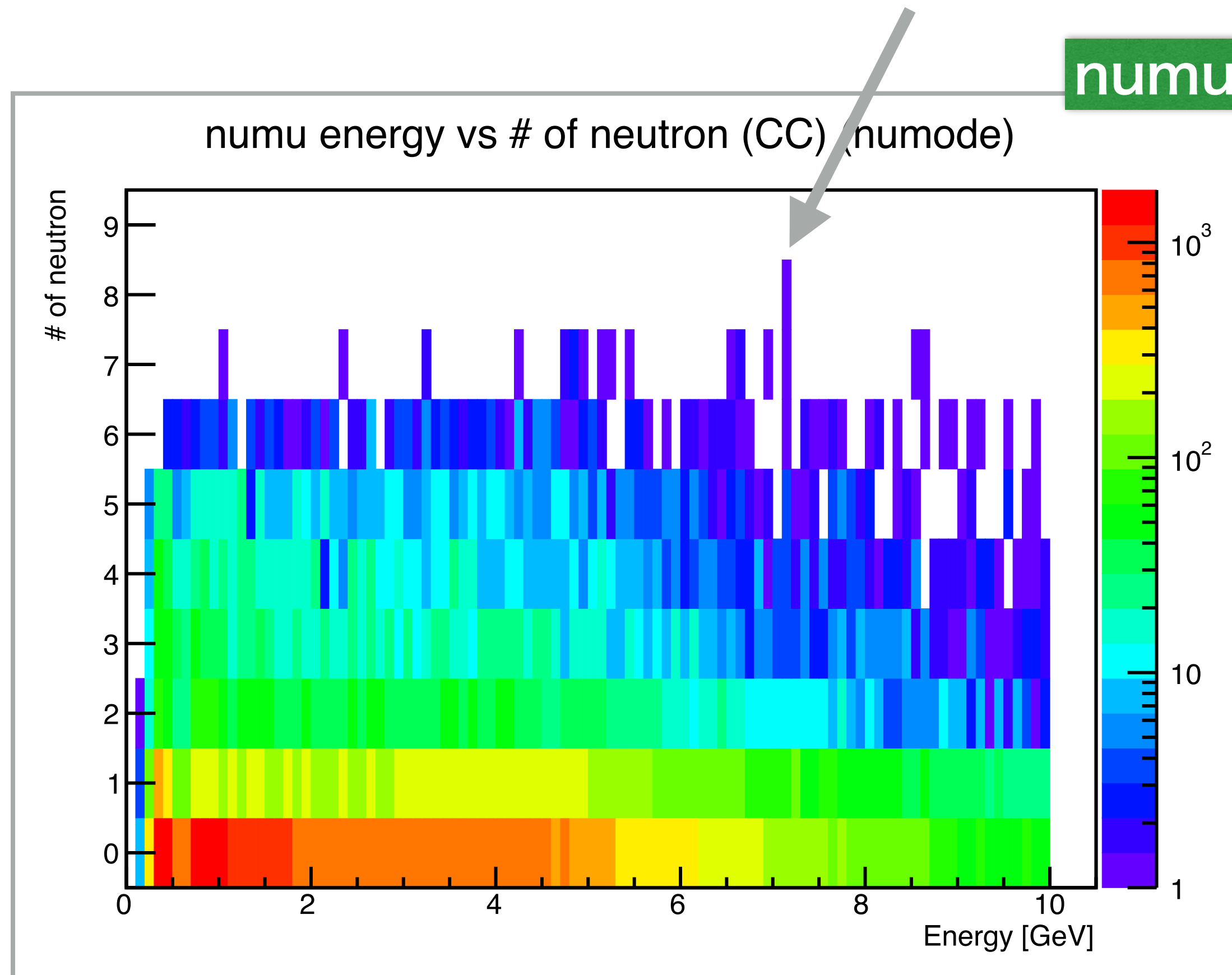
GENIEは以上の情報を読み込んで、
ニュートリノ反応・核内相互作用等を計算



Neutrons

- ・一例としてnumodeのnumu, numubarのCC

原子核破碎や核内相互作用等で大量の中性子が発生



#n=1のイベントが多い

確かに neutrino, anti-neutrinoでneutron生成数に大きな違いが出ている

- anti-neutrinoのCC反応では必ずneutronが生成されるため
- KamLANDでこの差を検証することができる

Setup of Geant4

Geometry: Figure→

- KamLAND-like geometry
- No PMTs

PrimaryGenerator: Input GENIE's results

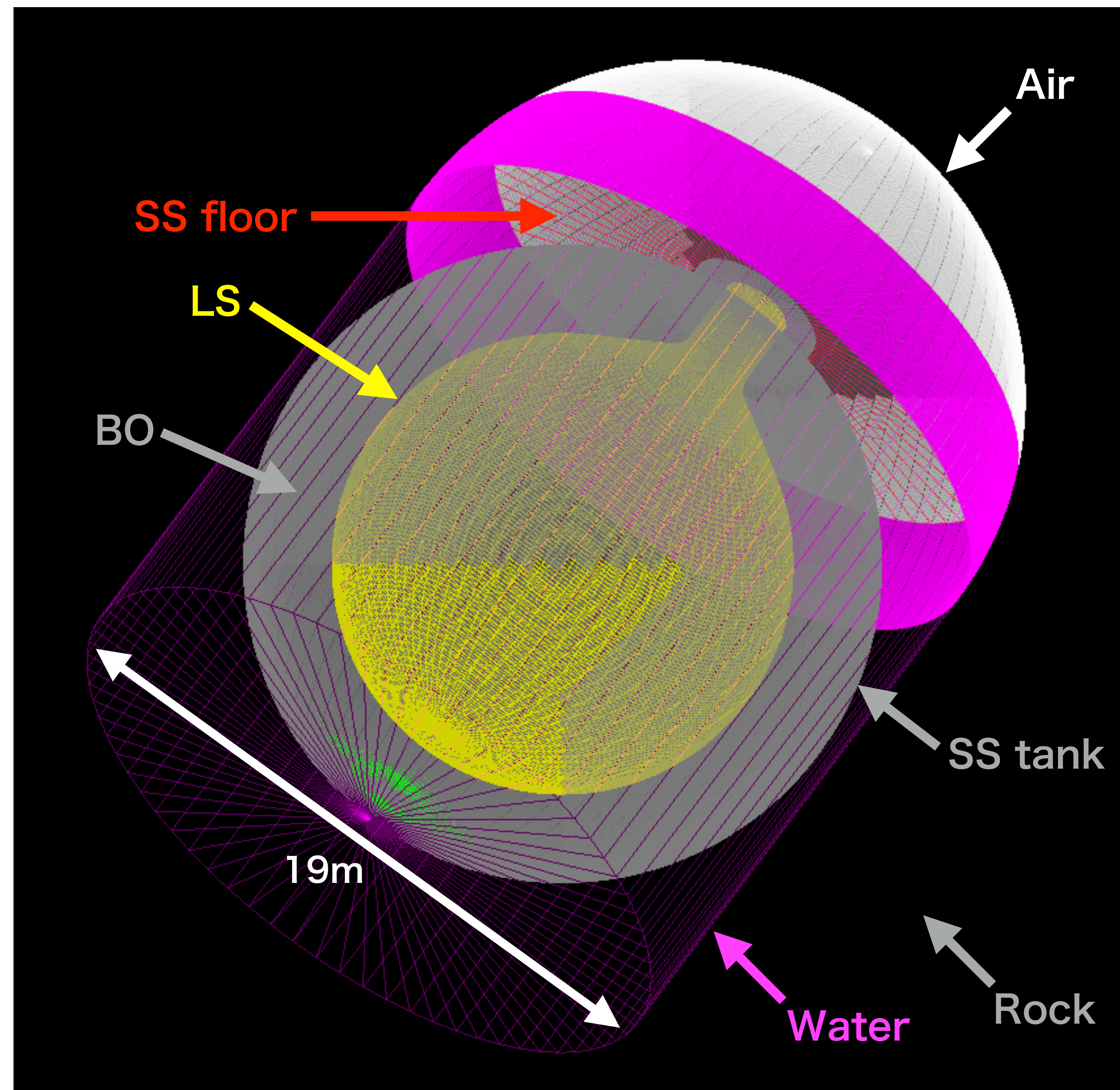
- 10^5 interaction for each flavor
- Interaction points are distributed uniformly and randomly ($R < 8.25\text{m}$) (inside of SS tank)
- Neutrino come from -x direction (horizontal)
- No residual nuclei

PhysicsLists: FTFP_BERT_HP

- Precise neutron model is used
- No optical photon

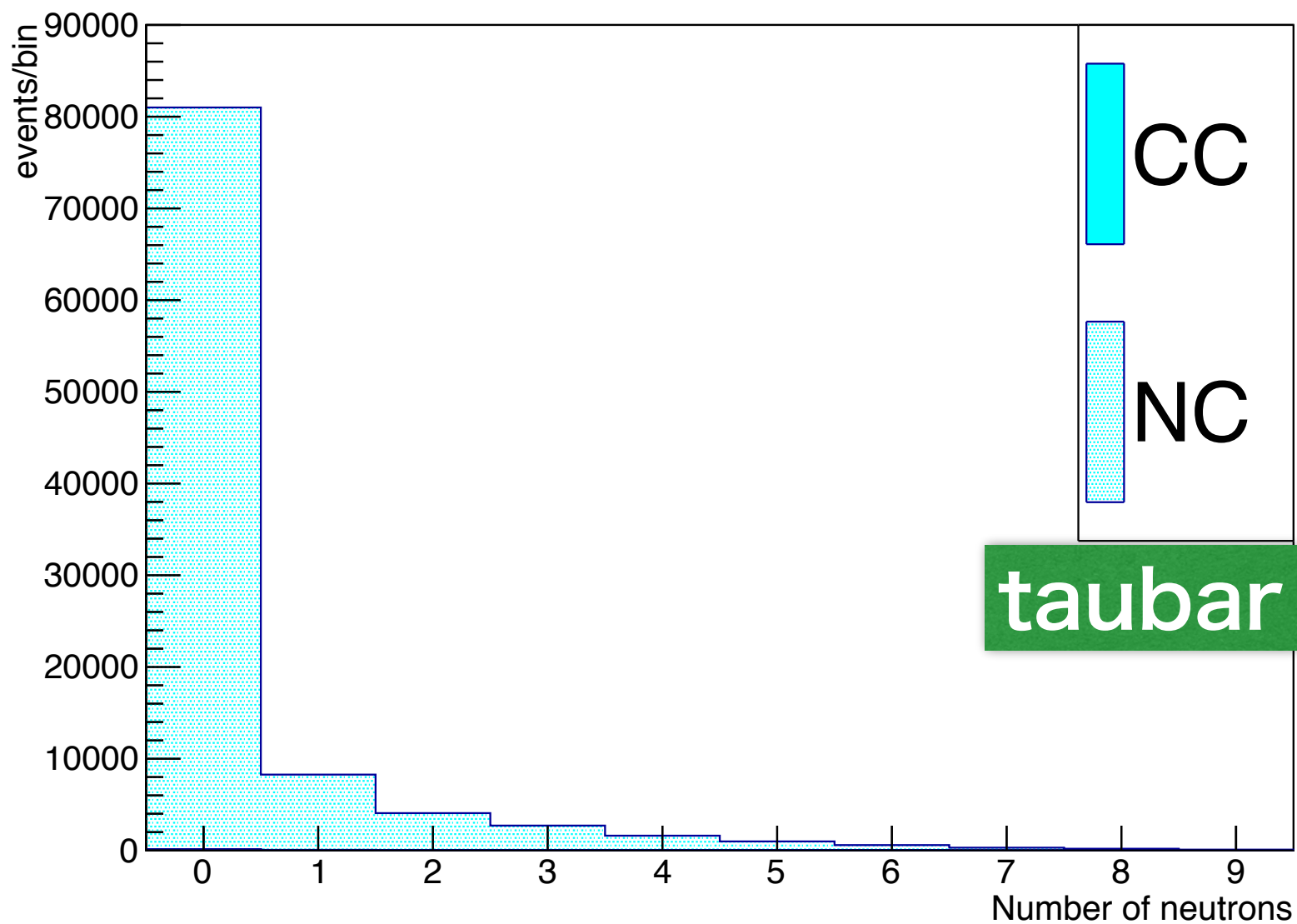
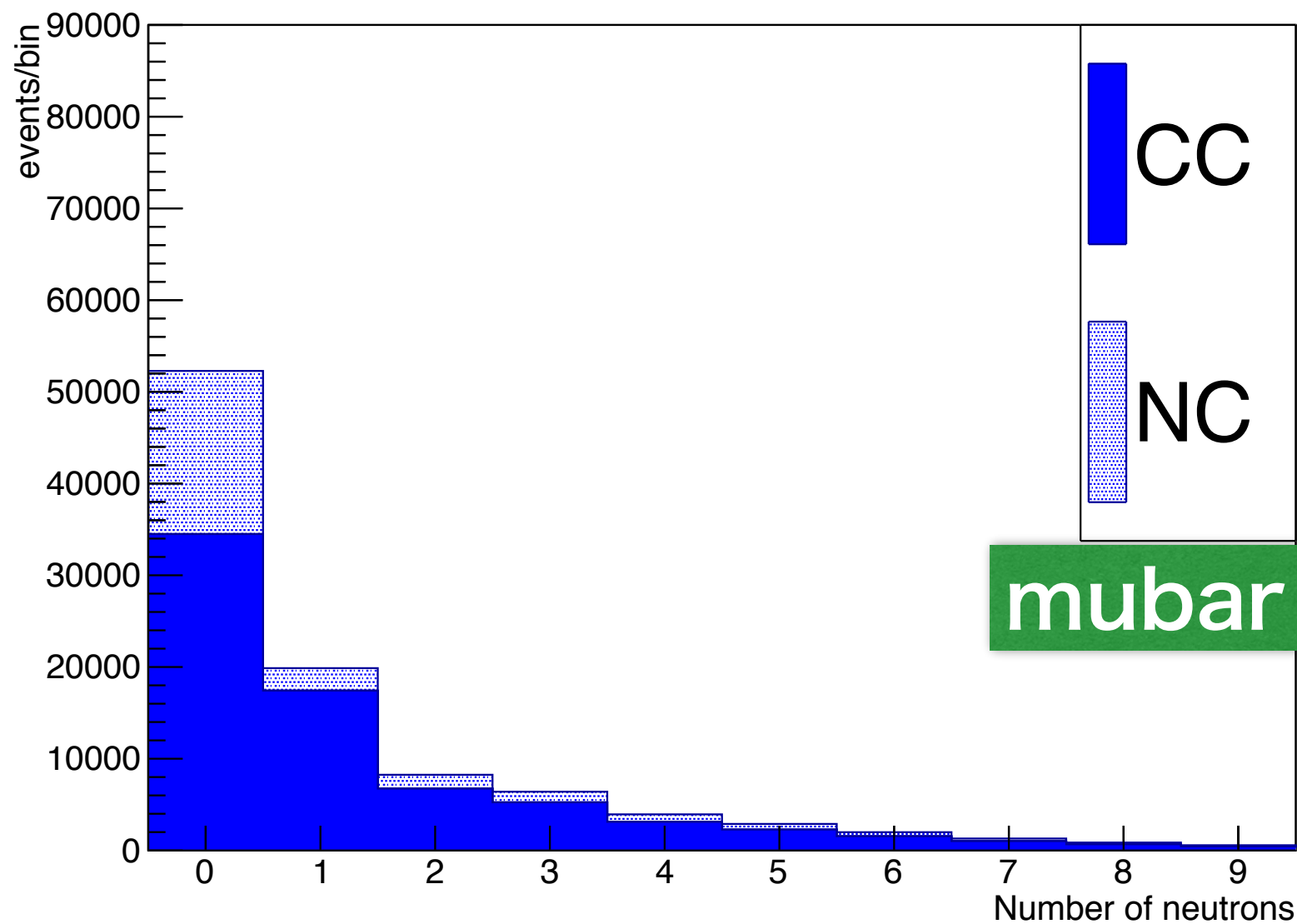
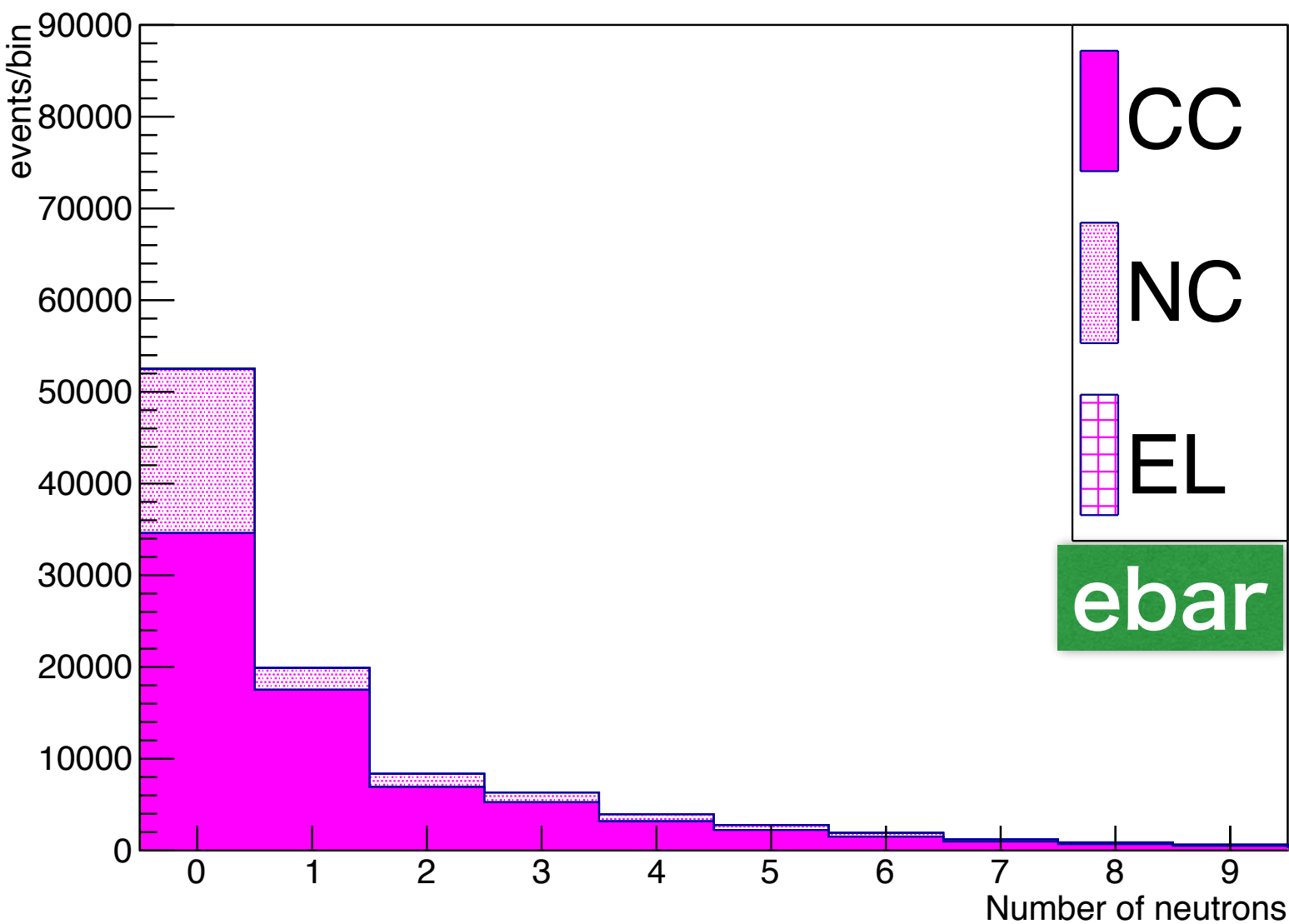
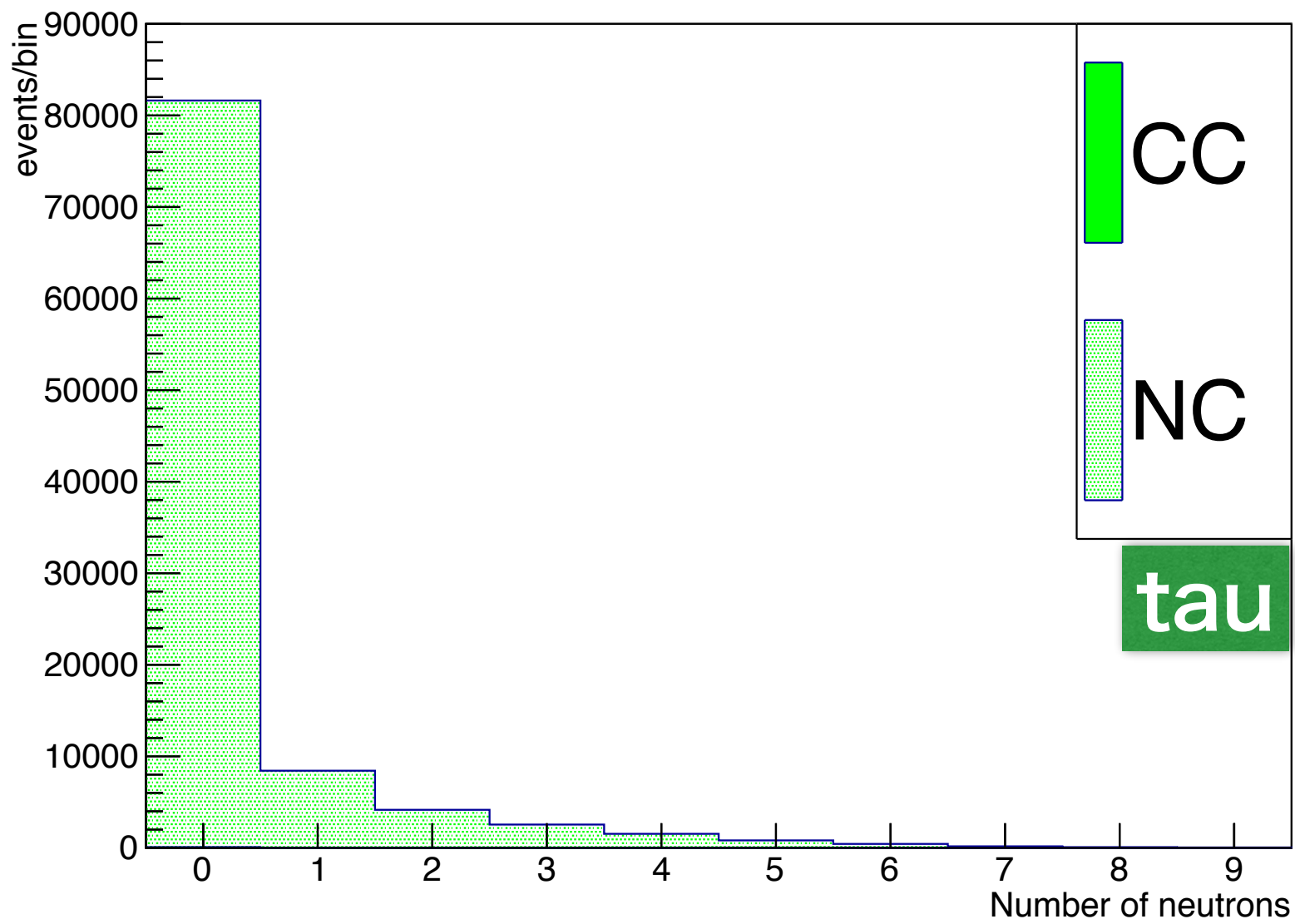
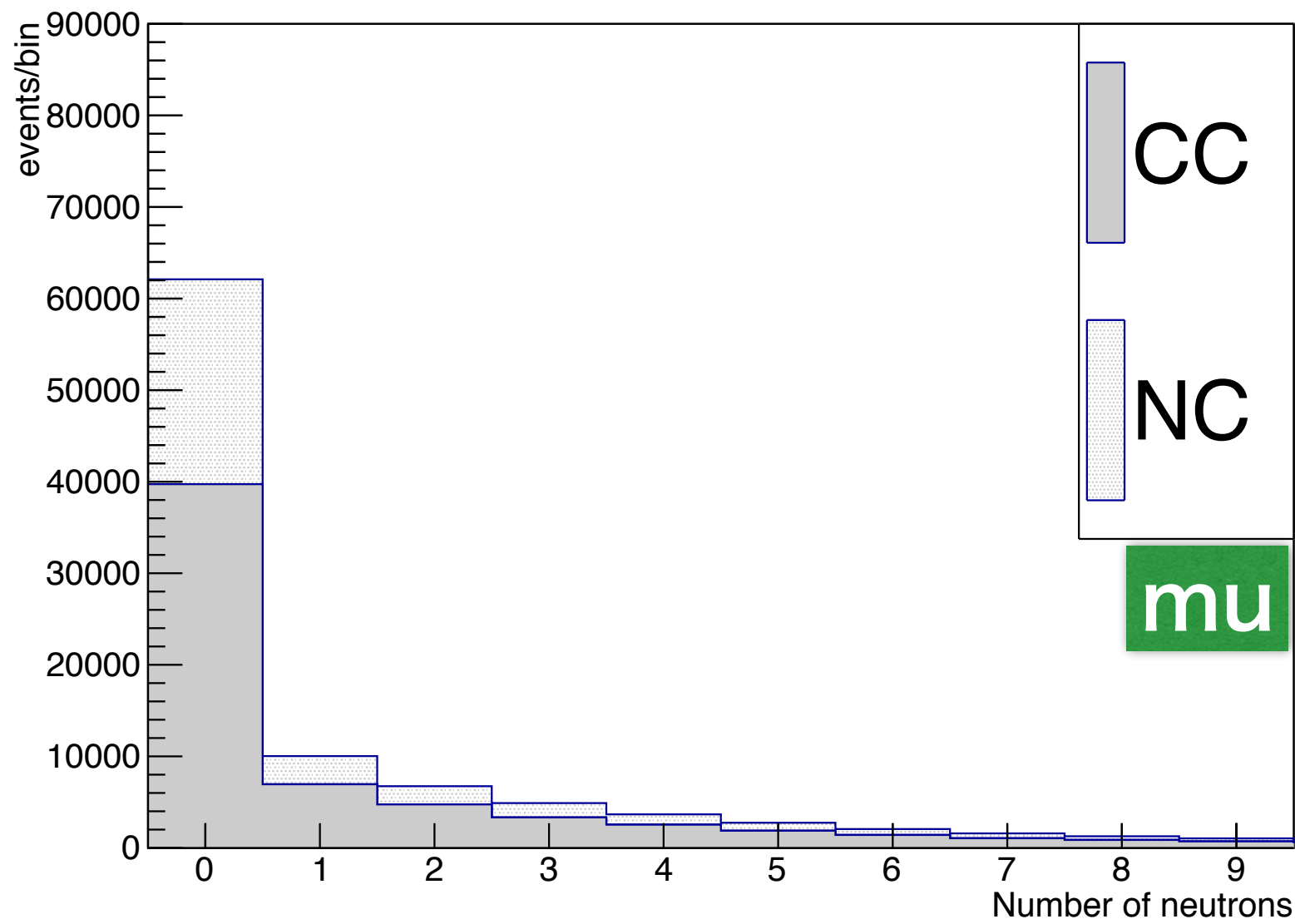
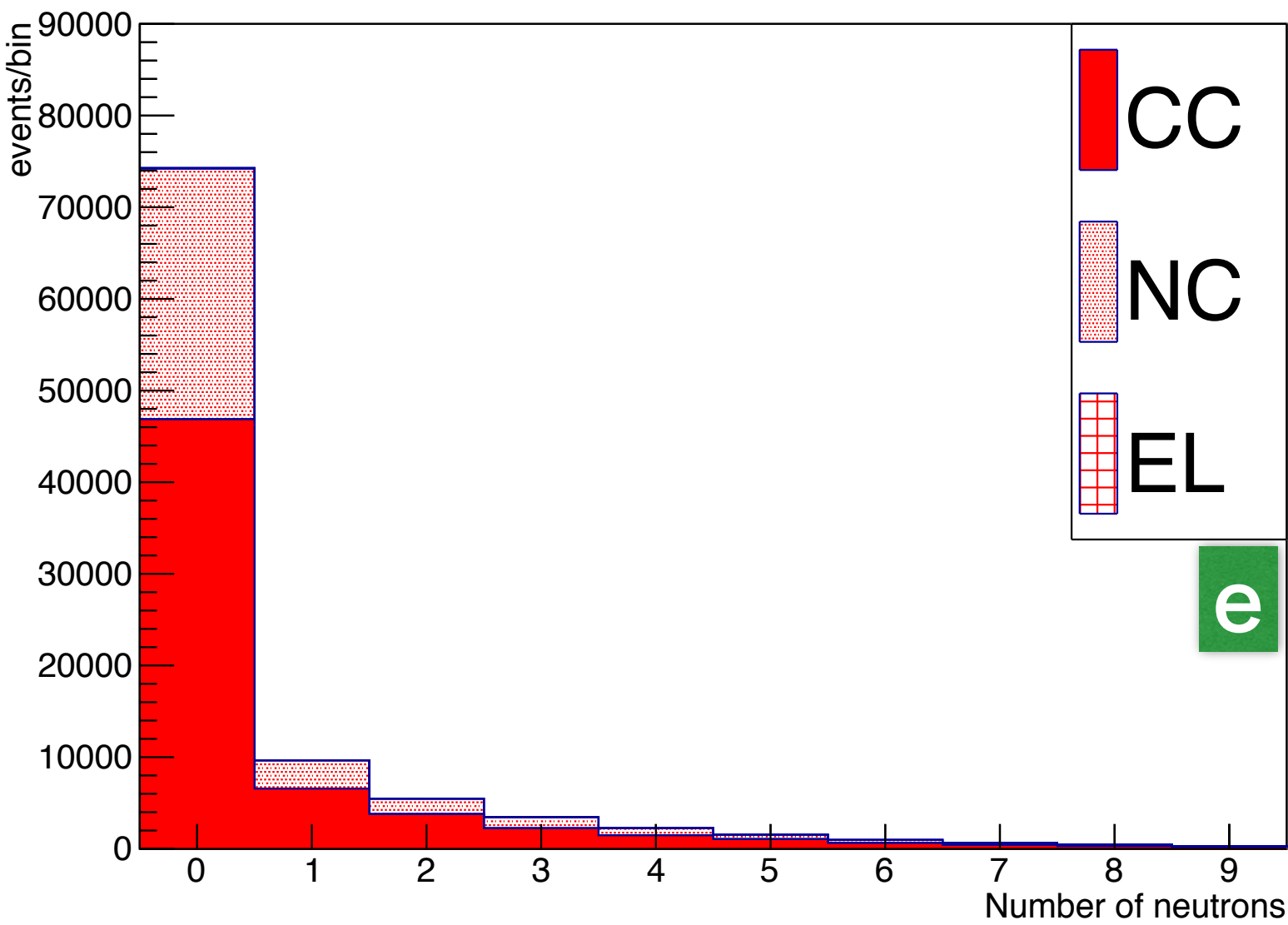
Geant4 version: 10.03.p01

LS中で捕獲された中性子の数をカウント



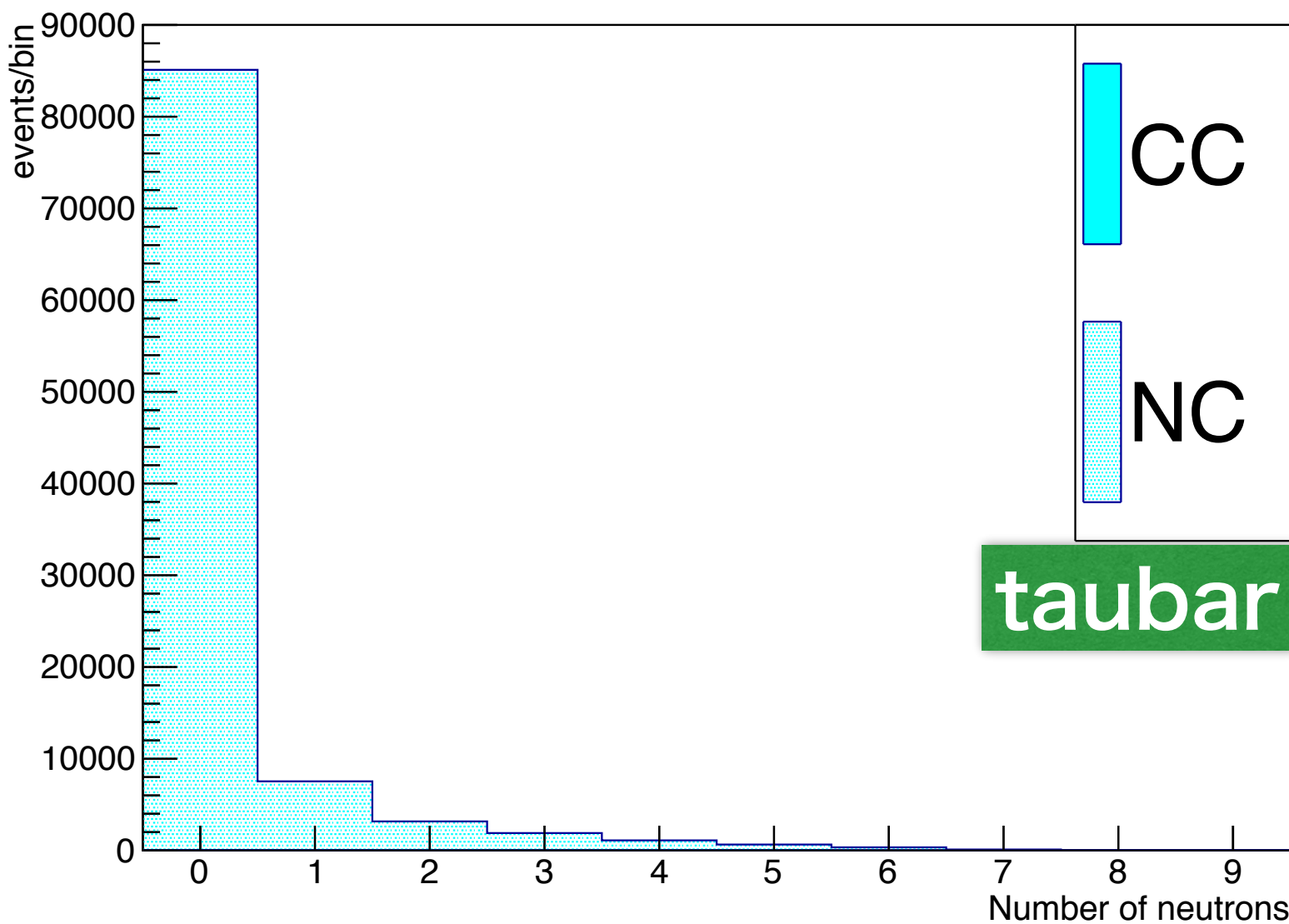
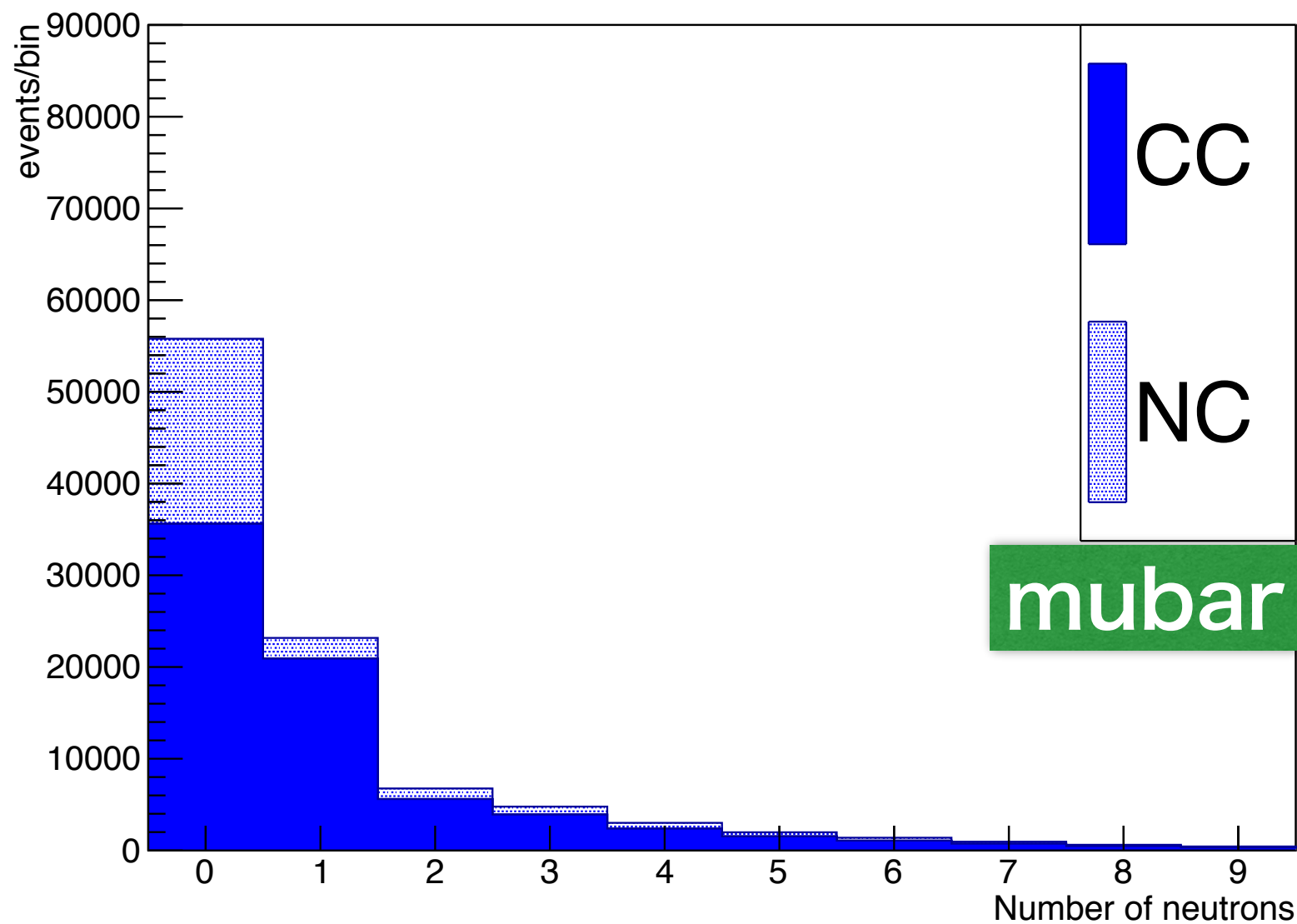
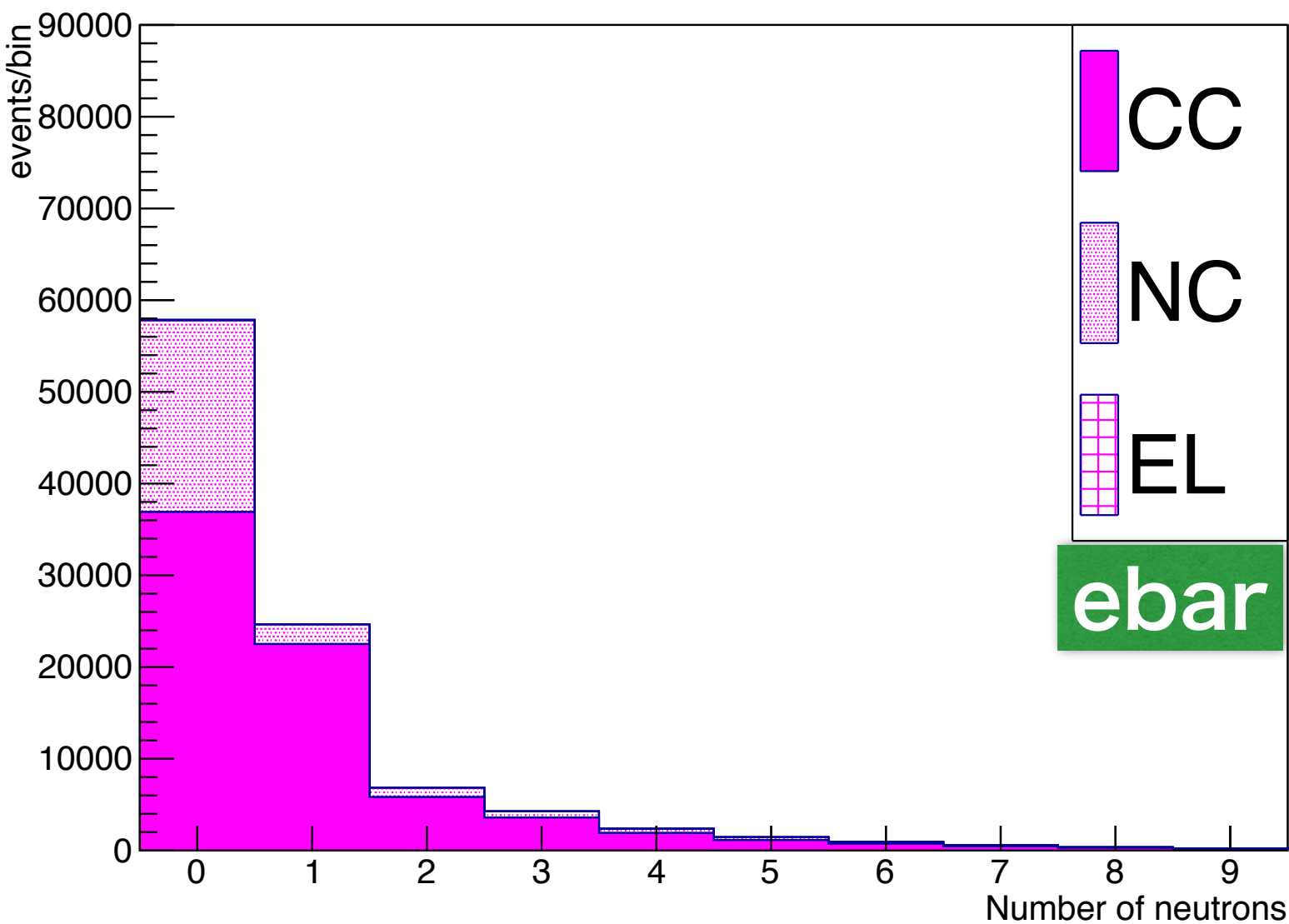
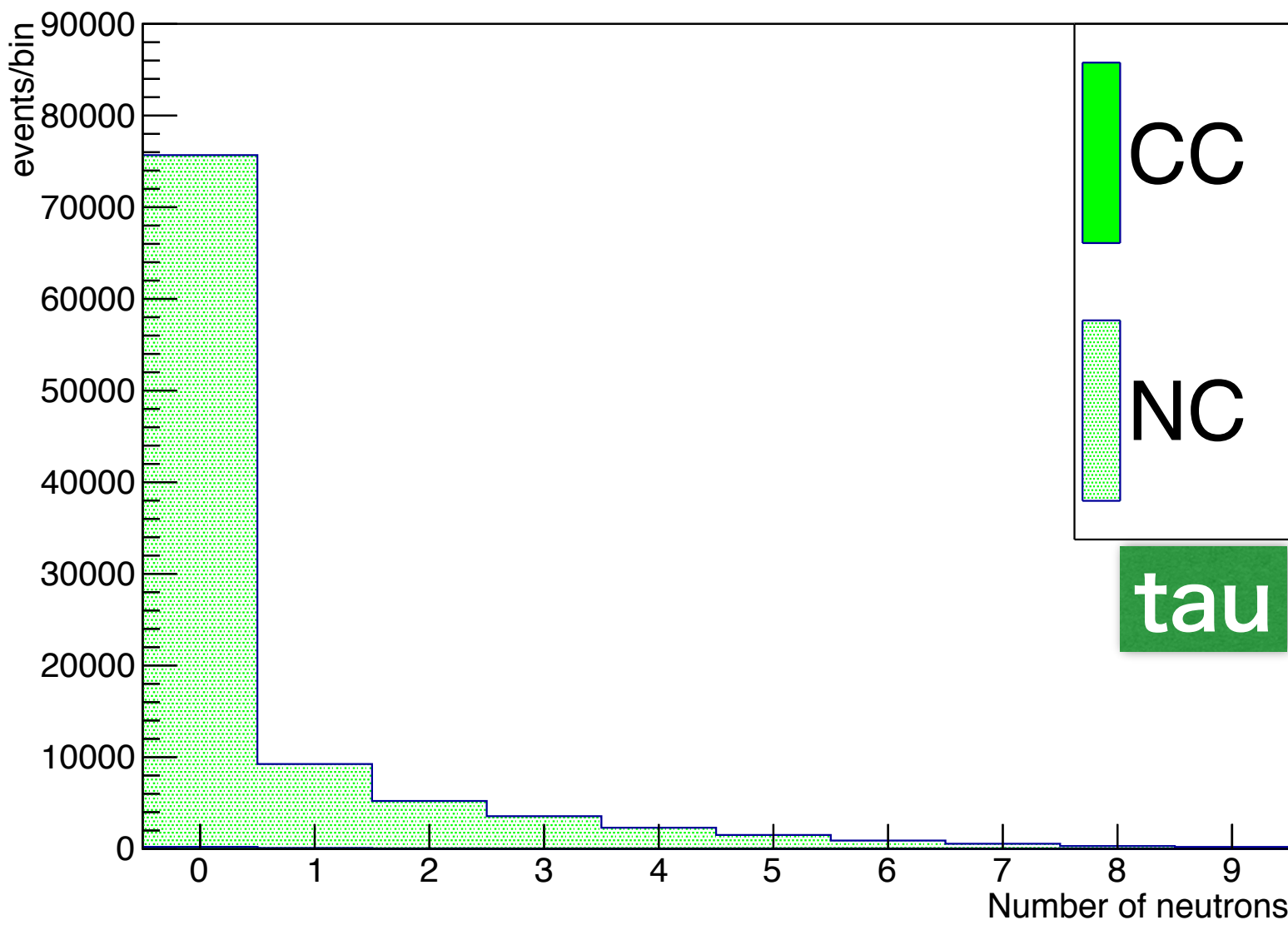
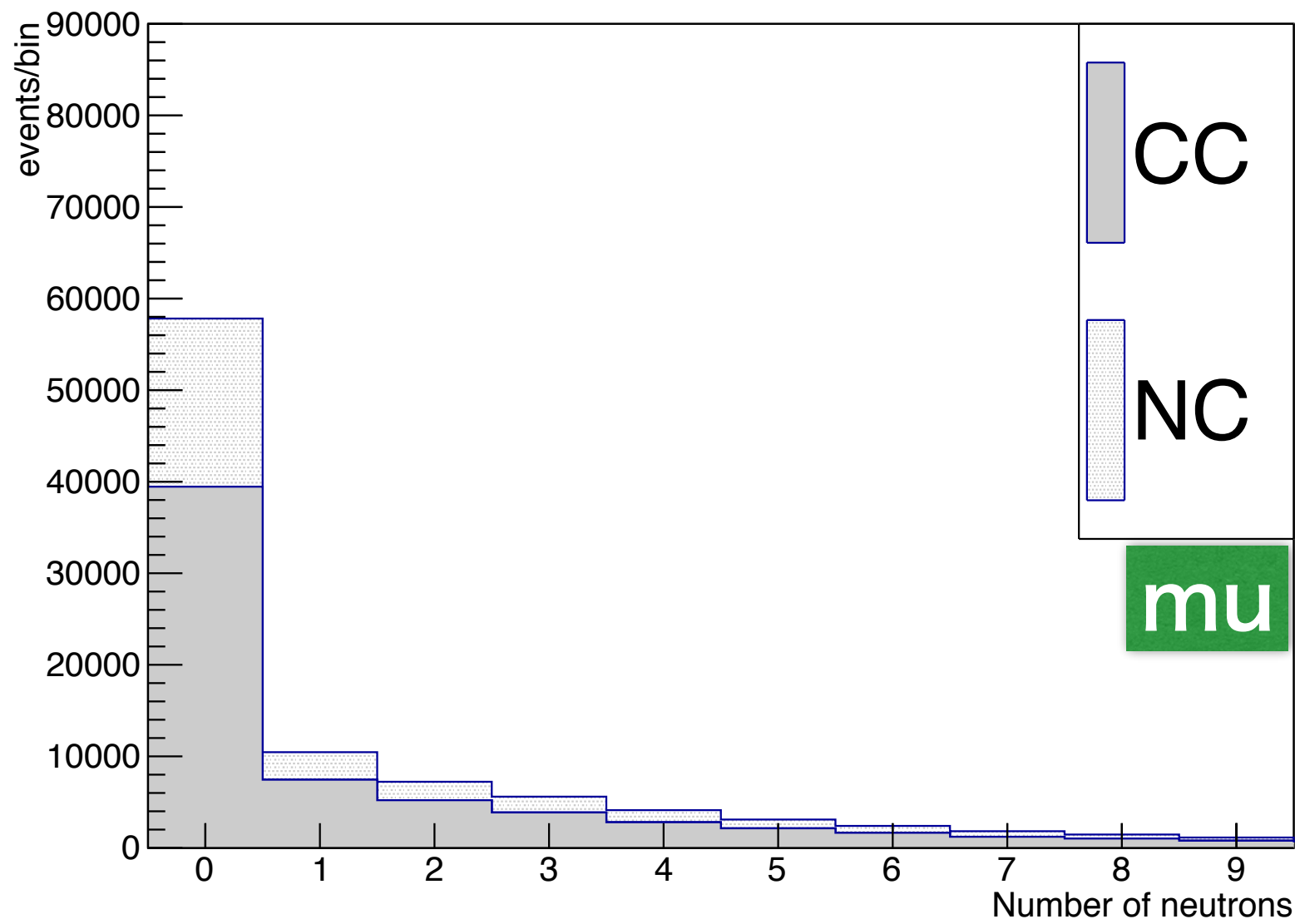
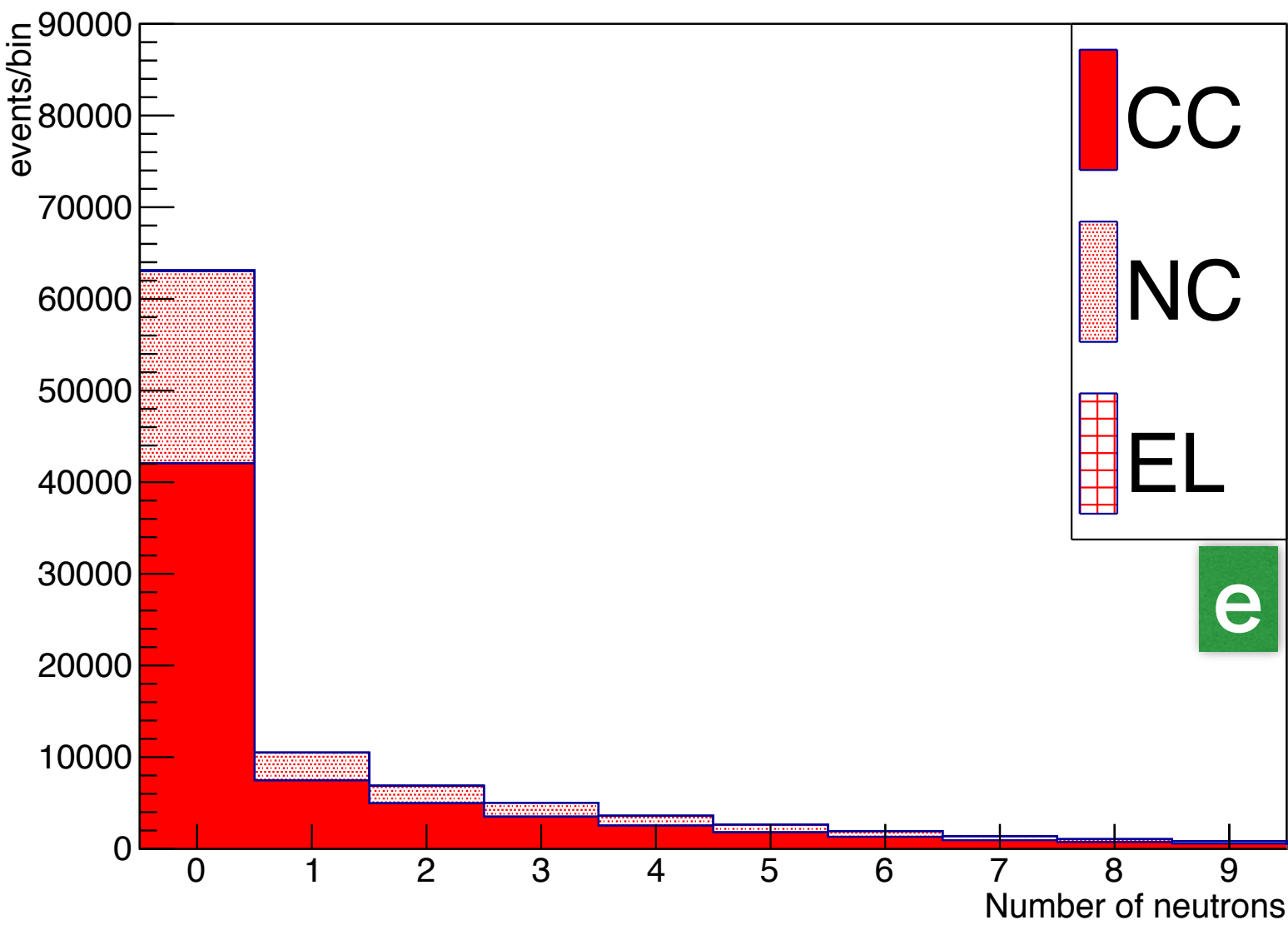
Neutron Multi. in LS numode

10⁵ interactions for each



Neutron Multi. in LS nubarmode

10⁵ interactions for each



Expected Number of Events

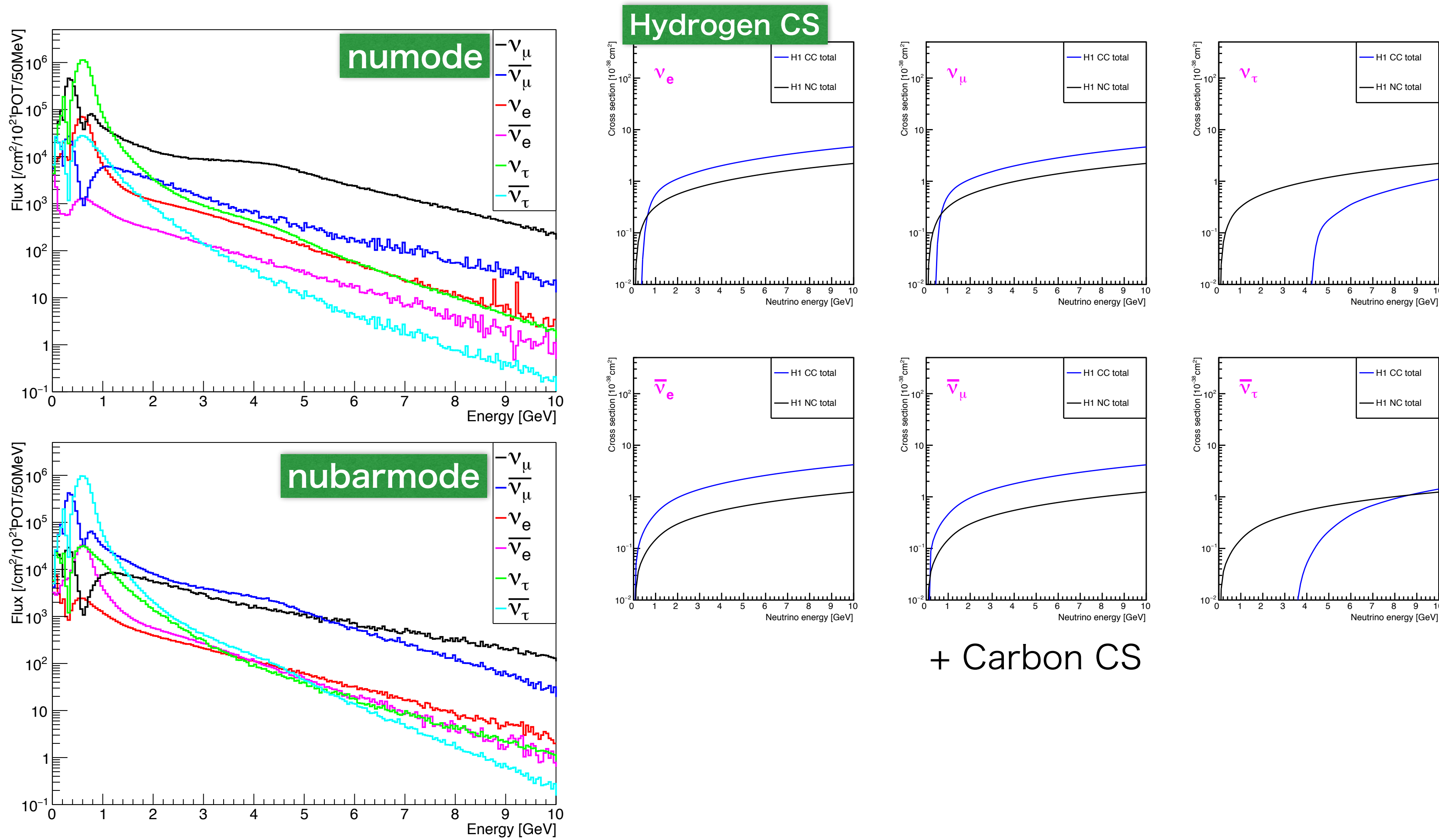
期待イベント数 R の計算

- ρ : 物質密度 (0.778g/cm3)
- M : 質量数 (CH2→14)
- N_A : アボガドロ数 (6.022e23)
- V : 標的の体積 (R=8.25m 球体)
- P : POT
- f : Flux
- σ_c : Carbon Cross Section(CS)
- σ_H : Hydrogen CS

$$R = \frac{\rho}{M} N_A V P \sum_E f(\sigma_C + 2\sigma_H)$$

Total deliverdered POT: 3.16e21

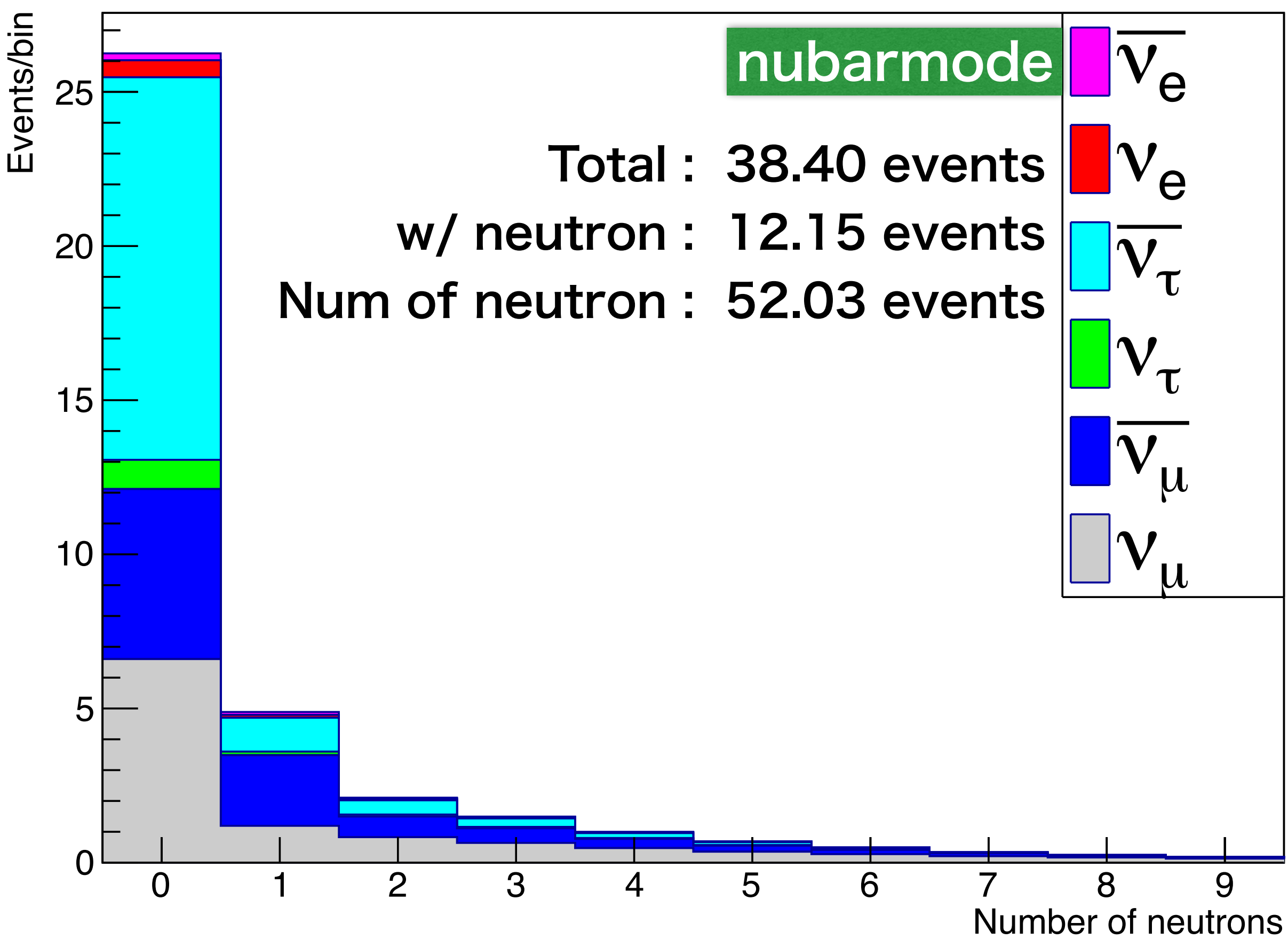
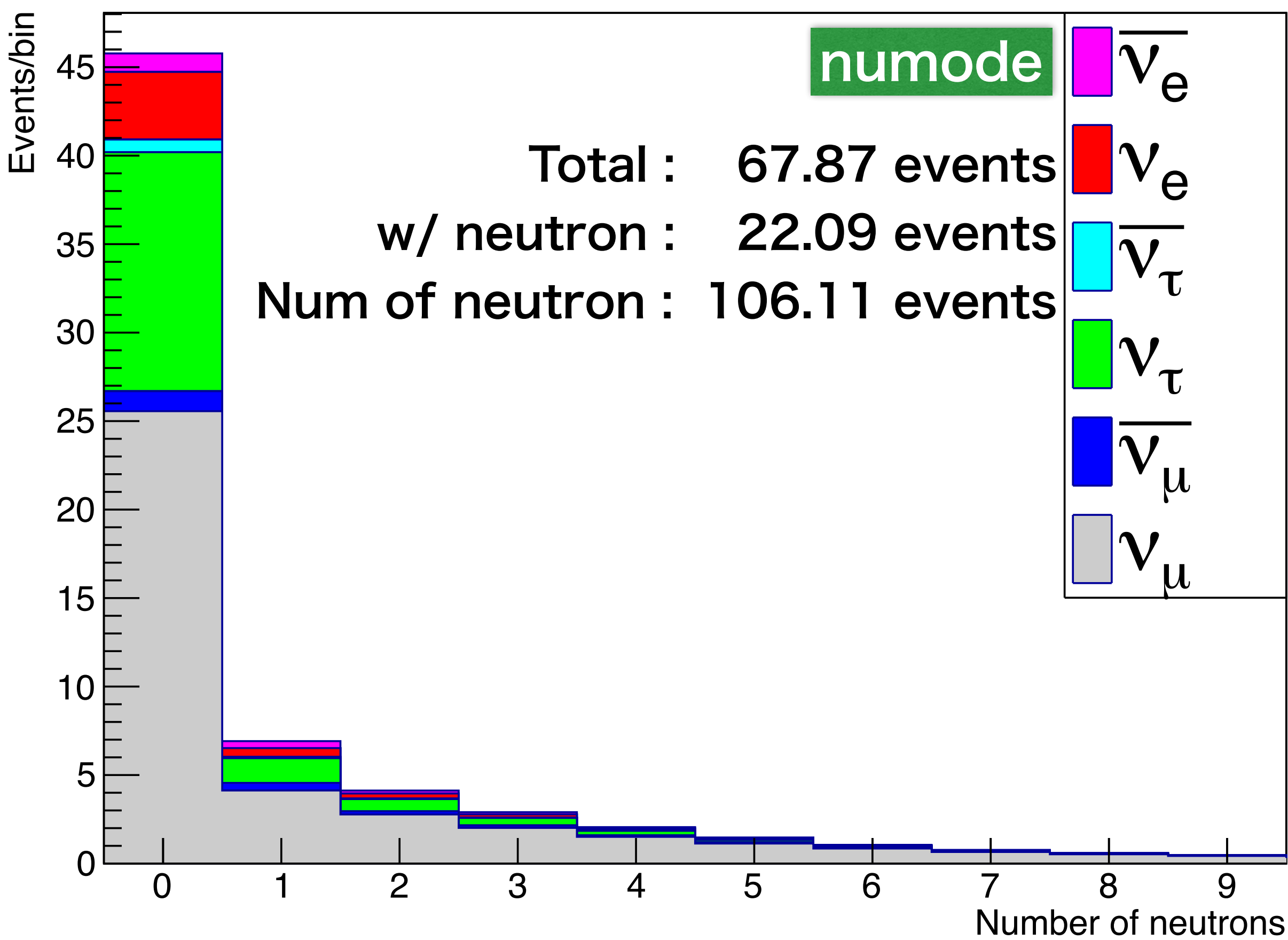
- numode POT : 1.51e21
- nubarmode POT : 1.65e21 Ref(3)



	nue	nuebar	numu	numubar	nutau	nutaubar	Total
numode	5.14	1.99	41.16	2.16	16.55	0.88	67.87
nubarmode	0.87	0.39	11.42	9.89	1.25	14.58	38.40

~100 events at KL

Expected Neutron Multi.



	nue	nuebar	numu	numubar	nutau	nutaubar	Total
nu	5.14	1.99	41.16	2.16	16.55	0.88	67.87
nubar	0.87	0.39	11.42	9.89	1.25	14.58	38.40

- modeによる違いはあまり見受けられない
- nubarmodeでも ν_μ は多く見られる(特にmultiplicityが高いイベント)
 - 両modeでの高エネルギー ν_μ のfluxの多さが原因か
 - Energy deposit と neutron multi. の関係性をみる必要がある

Summary

KamLANDにおいてもSKと大差なくT2K beamが入射していることが期待される

- T2Kは Off-axis法を採用しているため、SKには 2.5° ずれたbeamが届いている
- J-PARCからみたKamLANDとSKの角度差は $\sim 0.2^\circ$ と十分に小さい

Expected T2K events at KamLAND is ~ 100 events

- ~ 450 events are observed at SK.
- このイベント数は $R < 8.25\text{m}$ の体積で計算されたものなので、実際はさらに多くのイベントが見えると考えられる
- 反応体積の拡張が必要

Precise neutron capture measurement is advantage of KamLAND

- 中性子捕獲イベントのinefficiencyの高さはSKの欠点の1つ
- Simulation結果より、 ~ 150 個の中性子捕獲イベントがKamLAND LS中で起きると考えられる
- 現状ではどのflavorのどのエネルギー領域が支配的なのかがわからないので、energy depositとの関係性をしらべる必要がある

さらに…

T2K beam発射タイミングのデータをもらっており、データ解析も進行中

- データをお見せできる日が遠くないよう精進します

Back Up

T2K Events at SK

T2K *Signal and Background Summary*

	Expected							Data
	$\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ CC	Beam $\nu_e + \bar{\nu}_e$ CC	NC	BG total	$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$	$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$	MC total	
ν_e CCQE	0.269	8.79	4.21	13.3	58.5	0.79	72.2	75
ν_e CCQE	0.093	2.65	1.58	4.32	2.01	5.40	11.7	9
ν_e CC1 π	0.164	0.926	0.383	1.47	5.64	0.007	7.13	15
	Expected							Data
	$\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ CC non-QE	$\nu_e + \bar{\nu}_e$ CC	NC	BG total	ν_μ CCQE	$\bar{\nu}_\mu$ CCQE	MC total	
ν_μ CCQE	36.8	0.080	8.31	45.1	210.6	12.2	268.0	243
ν_μ CCQE	16.2	0.010	2.37	18.6	25.4	48.7	92.7	102

Background (MC) Signal (MC) Data

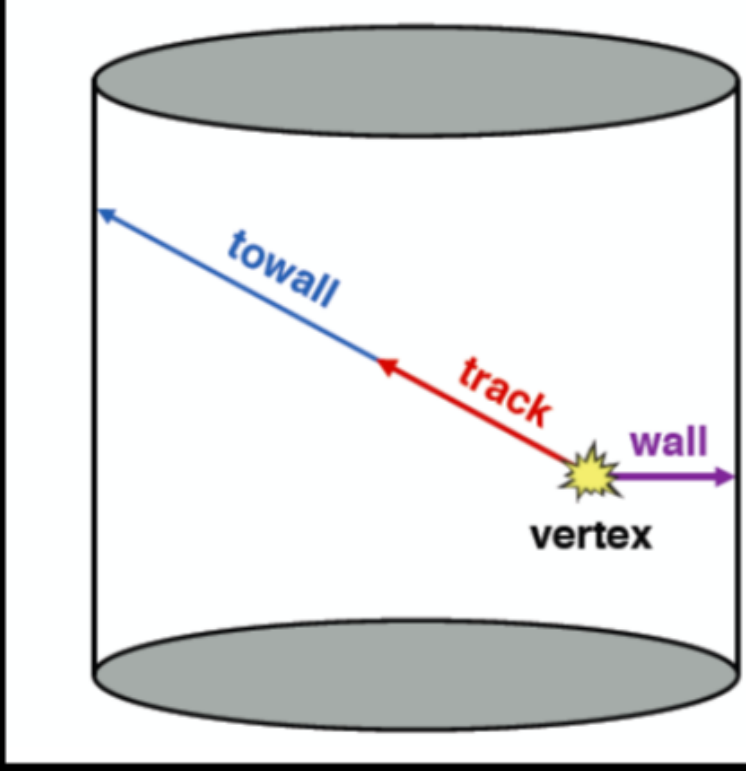
Data set

- ν -mode: 1.49×10^{21} POT
- ν -bar-mode: 1.12×10^{21} POT
- Until Dec. 2017

- 1 ring CCQE e-like (numode)
- 1 ring CCQE e-like (nubarmode)
- 1 ring CC1 π e-like (numode)
- 1 ring CCQE μ -like (numode)
- 1 ring CCQE μ -like (nubarmode)

Expected Number of Events

KamLANDでの期待イベント数は ~100 events であった
SKの結果 ~450 events と比べると多すぎるのではないか？

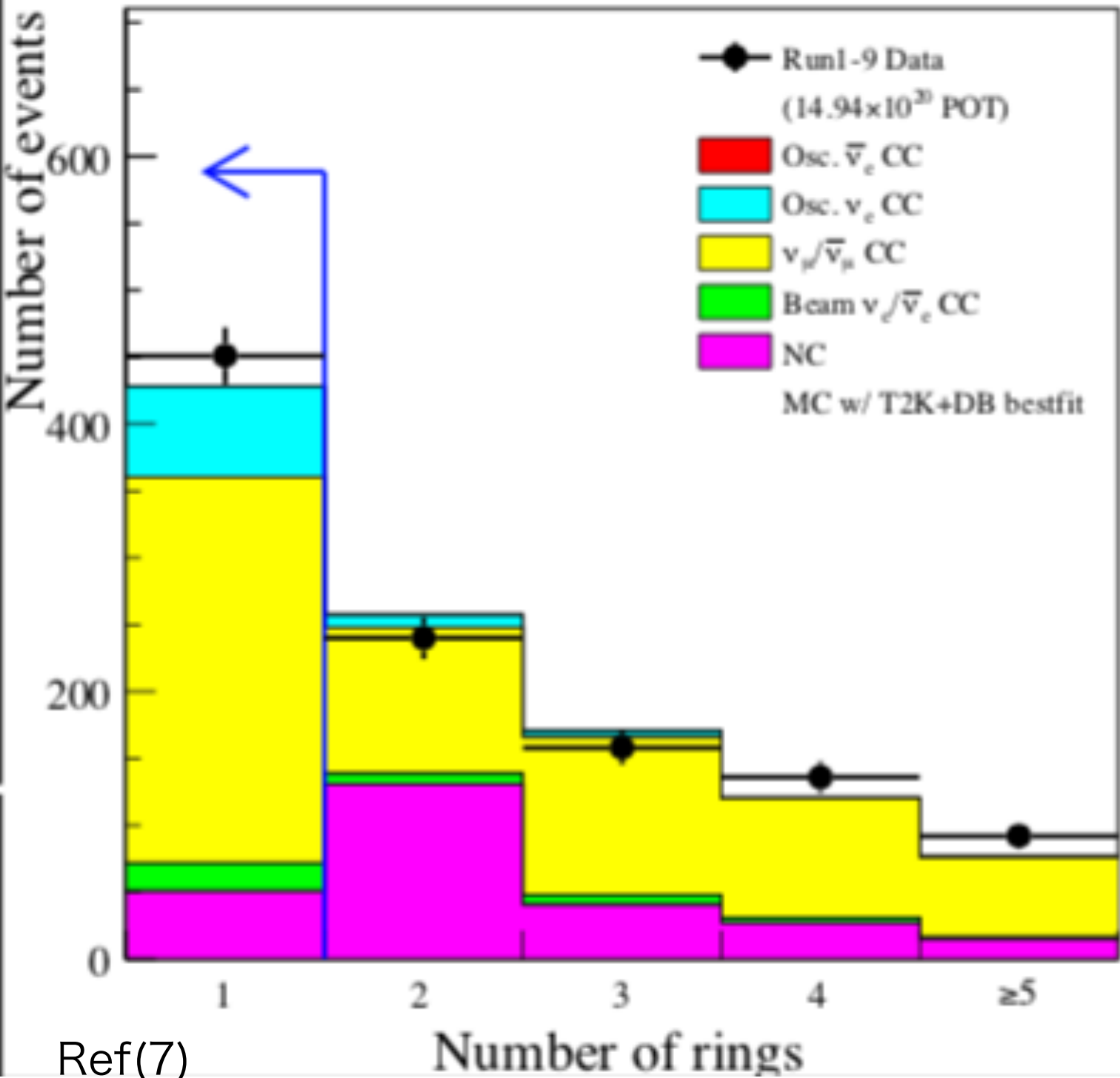


Ref(7)

SKの Event selection は oscillation analysis のために purity の高いものを選んでる

- multi ringはカット(1ringのイベントのみ)
- Towall cut & wall cut を採用 (Only fully-contained fiducial events are selected)
 - ODへ抜けるイベントはcut
 - ODから入ってくるイベントもカット

Sample	Towall Cut	Wall Cut
CCQE 1-Ring e-like FHC	170 cm	80 cm
CCQE 1-Ring μ -like FHC	250 cm	50 cm
CC1 π 1-Ring e-like FHC	270 cm	50 cm
CCQE 1-Ring e-like RHC	170 cm	80 cm
CCQE 1-Ring μ -like RHC	250 cm	50 cm



先ほどのKL期待イベント数について、OD hit判定されるものをcutすると激減すると考えられる。
また低エネルギーの反応断面積は大きくはないので、この結果は低エネルギー領域が見える効果
というよりは、何のselectionも施していないことによる効果のほうが大きいと言える

←実際に多くのmulti. ring eventがcutされているのが確認できる
(このイベントはすでに Towall cut & wall cutされている)

J-PARC

to generate neutrino beam...

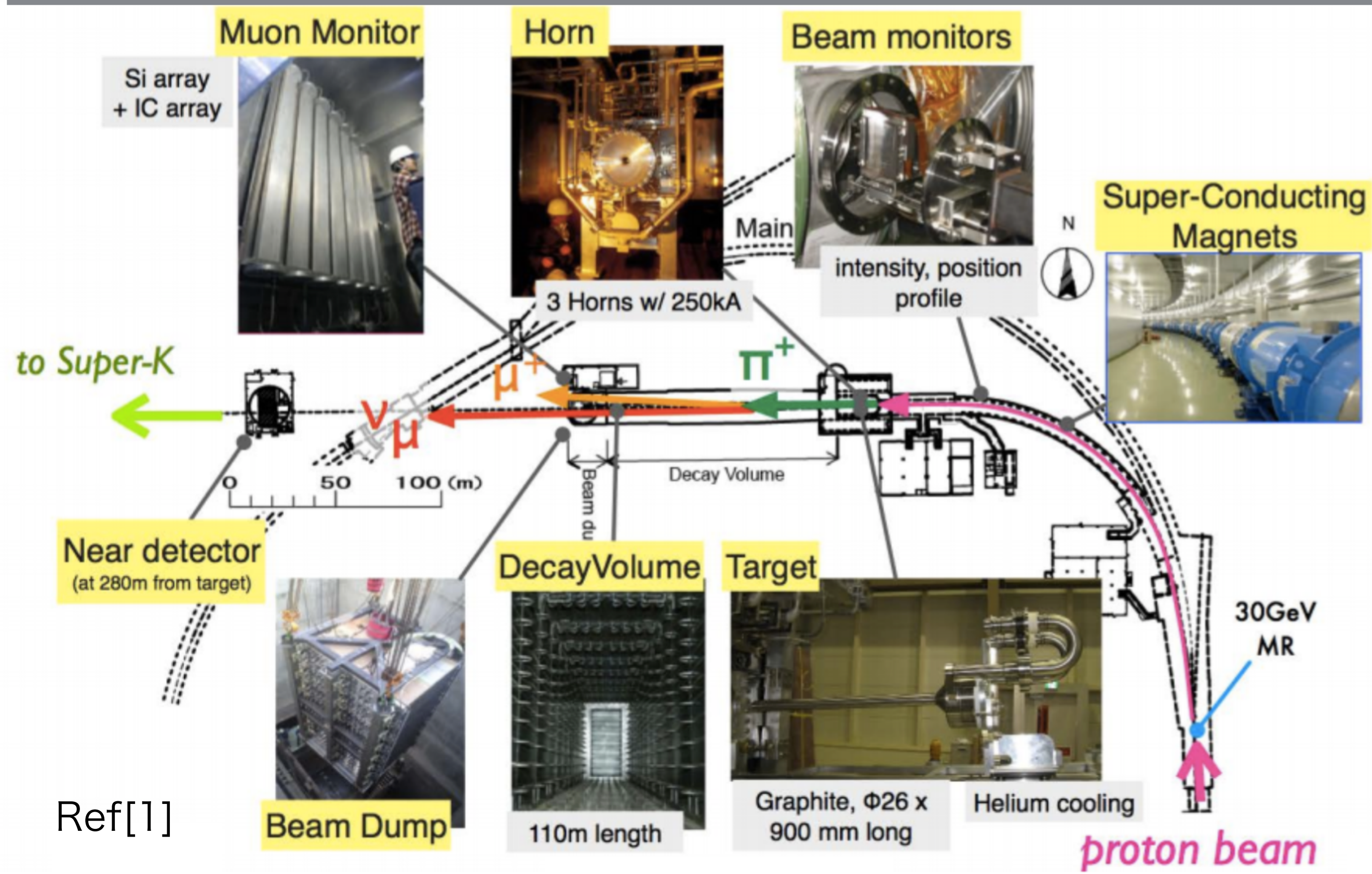
- Graphite target

Proton beam transform into π beam by graphite target

- π -decay

$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ or $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ in decay volume(110m)

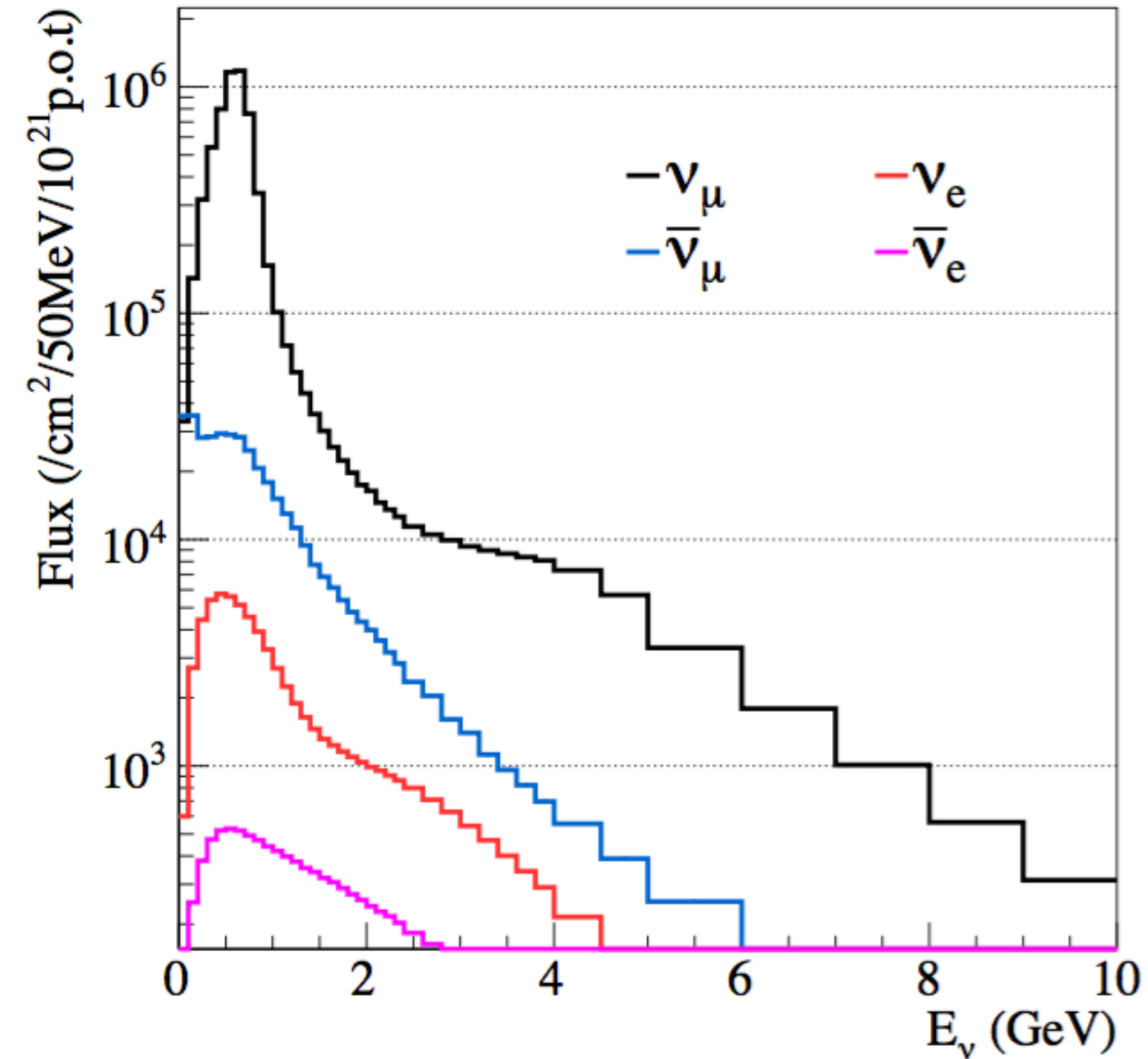
At the end of the decay volume, beam dump is set to absorb μ & π



Ref[1]

Neutrino Mode Flux at SK

Ref[1]



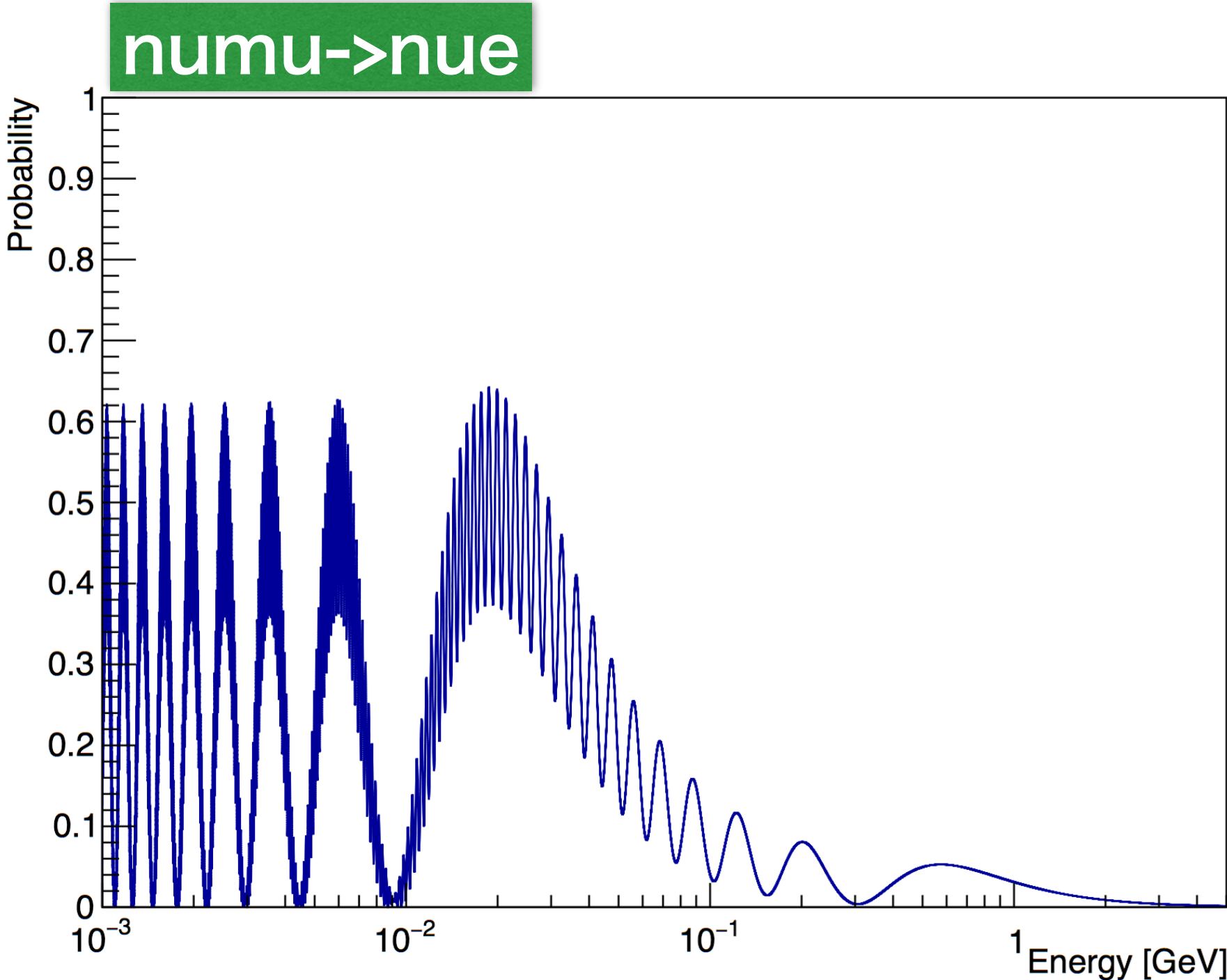
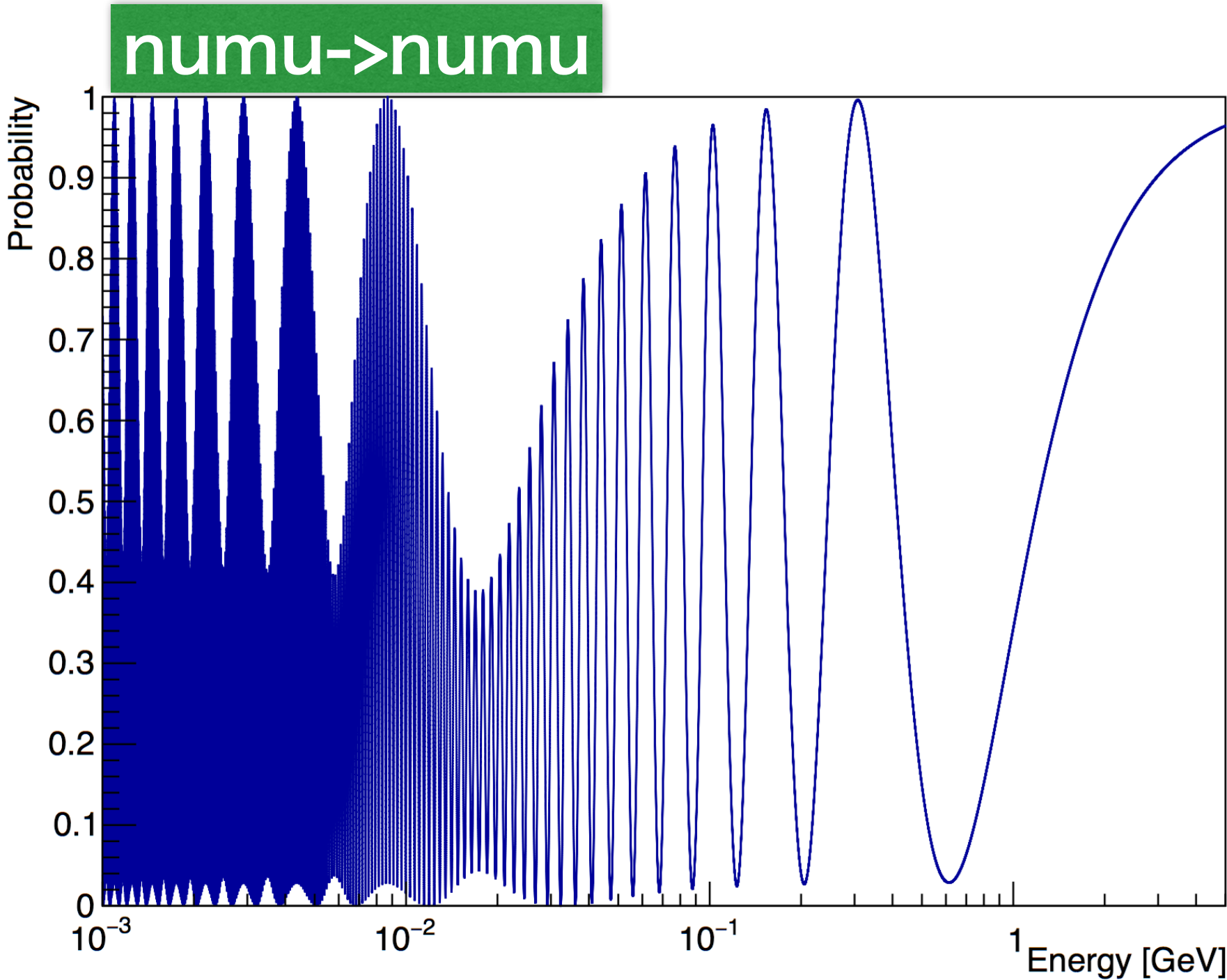
$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$ are dominant in almost all energy
-> Consider $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$ interaction mainly

Oscillation Probability

Prob3++ を用いて計算

- SK collaboration によって作成されたoscillation計算パッケージ
- 振動パラメータは PDG 2018(Phys. Rev. D 98, 030001 (2018)) よりbest-fit値
 - Normal hierarchy
 - $\delta_{cp}=1.5\pi$
 - 物質密度 $\rho=2.7\text{g/cm}^3$
 - $L=295\text{km}$
- $0<\text{Energy}\leq 30\text{GeV}$ を0.1MeVごとに計算

Δm^2_{21}	7.37e-5 [eV ²]
Δm^2_{31}	2.56e-3 [eV ²]
$\sin^2 \theta_{23}$	0.425
$\sin^2 \theta_{13}$	0.0215
$\sin^2 \theta_{12}$	0.297

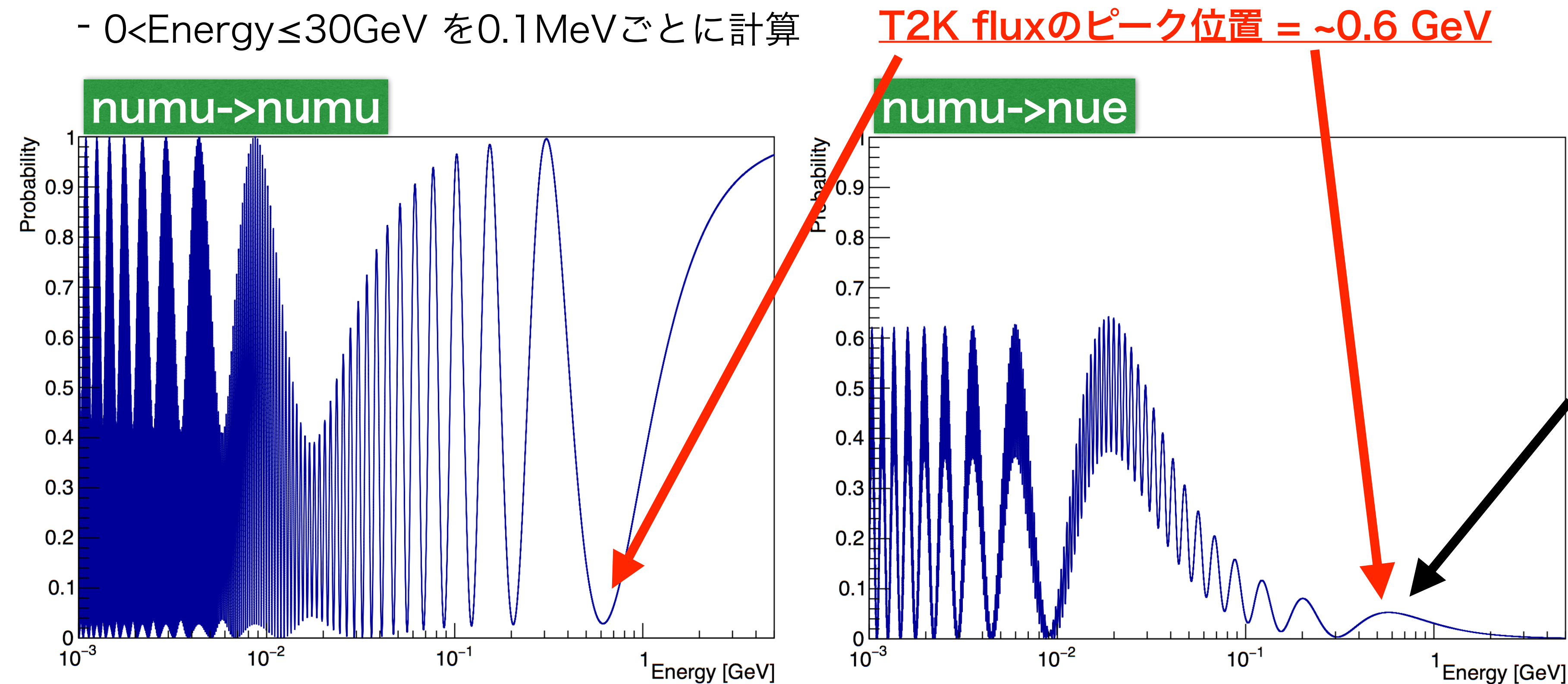


Oscillation Probability

Prob3++ を用いて計算

- SK collaboration によって作成されたoscillation計算パッケージ
- 振動パラメータは PDG 2018(Phys. Rev. D 98, 030001 (2018)) よりbest-fit値
 - Normal hierarchy
 - $\delta_{cp}=1.5\pi$
 - 物質密度 $\rho=2.7\text{g/cm}^3$
 - $L = 295\text{km}$
- $0 < \text{Energy} \leq 30\text{GeV}$ を0.1MeVごとに計算

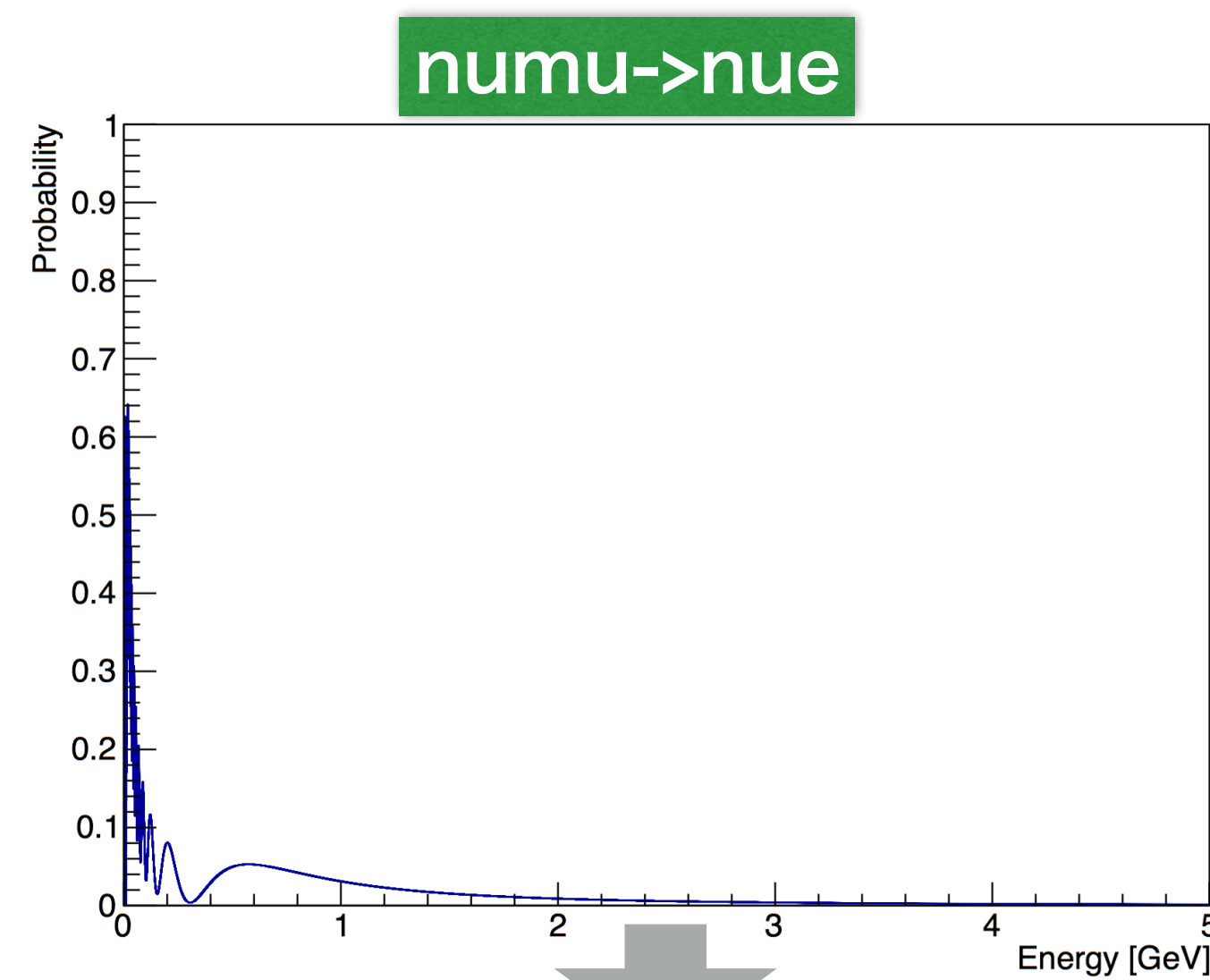
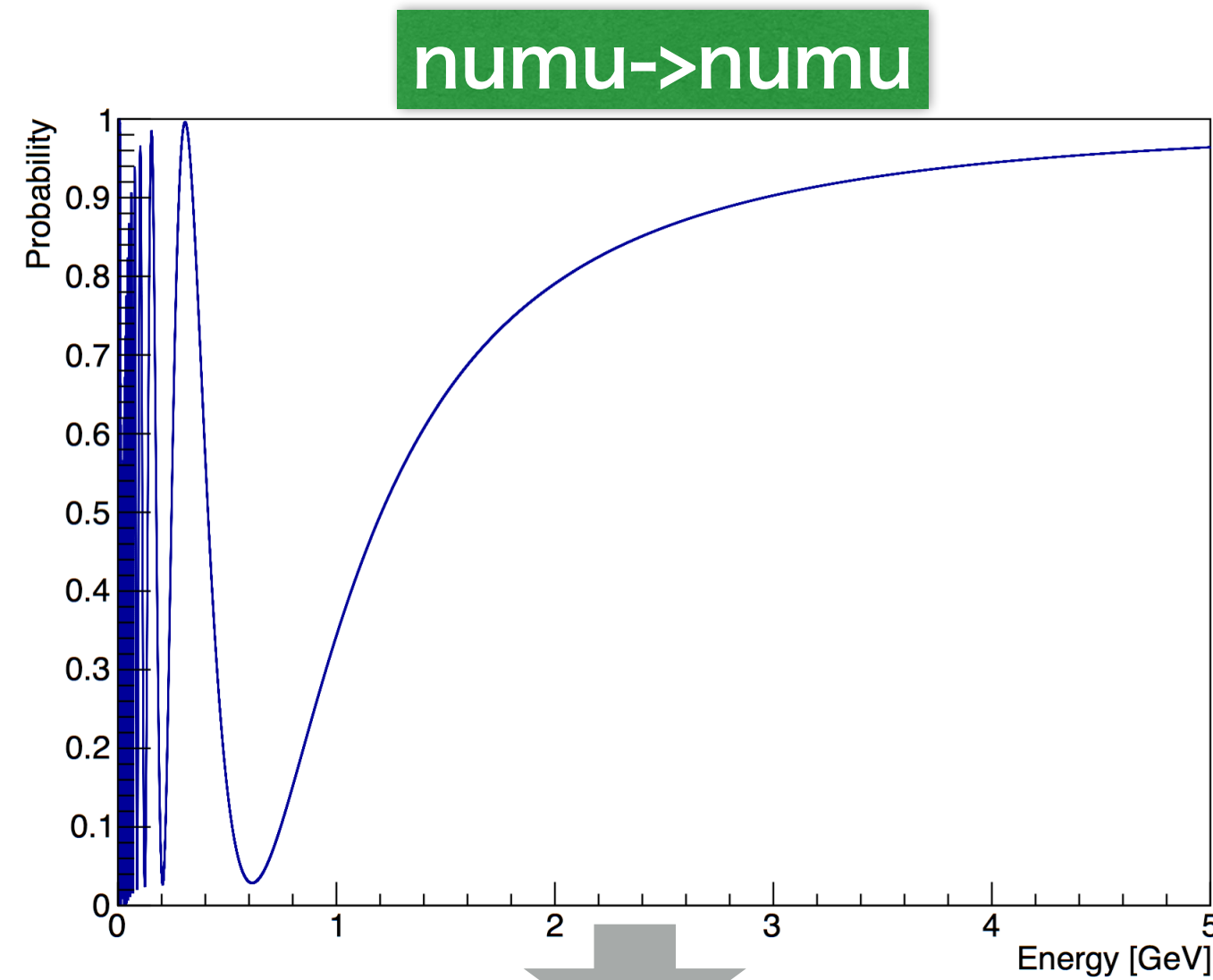
Δm^2_{21}	7.37e-5 [eV ²]
Δm^2_{31}	2.56e-3 [eV ²]
$\sin^2 \theta_{23}$	0.425
$\sin^2 \theta_{13}$	0.0215
$\sin^2 \theta_{12}$	0.297



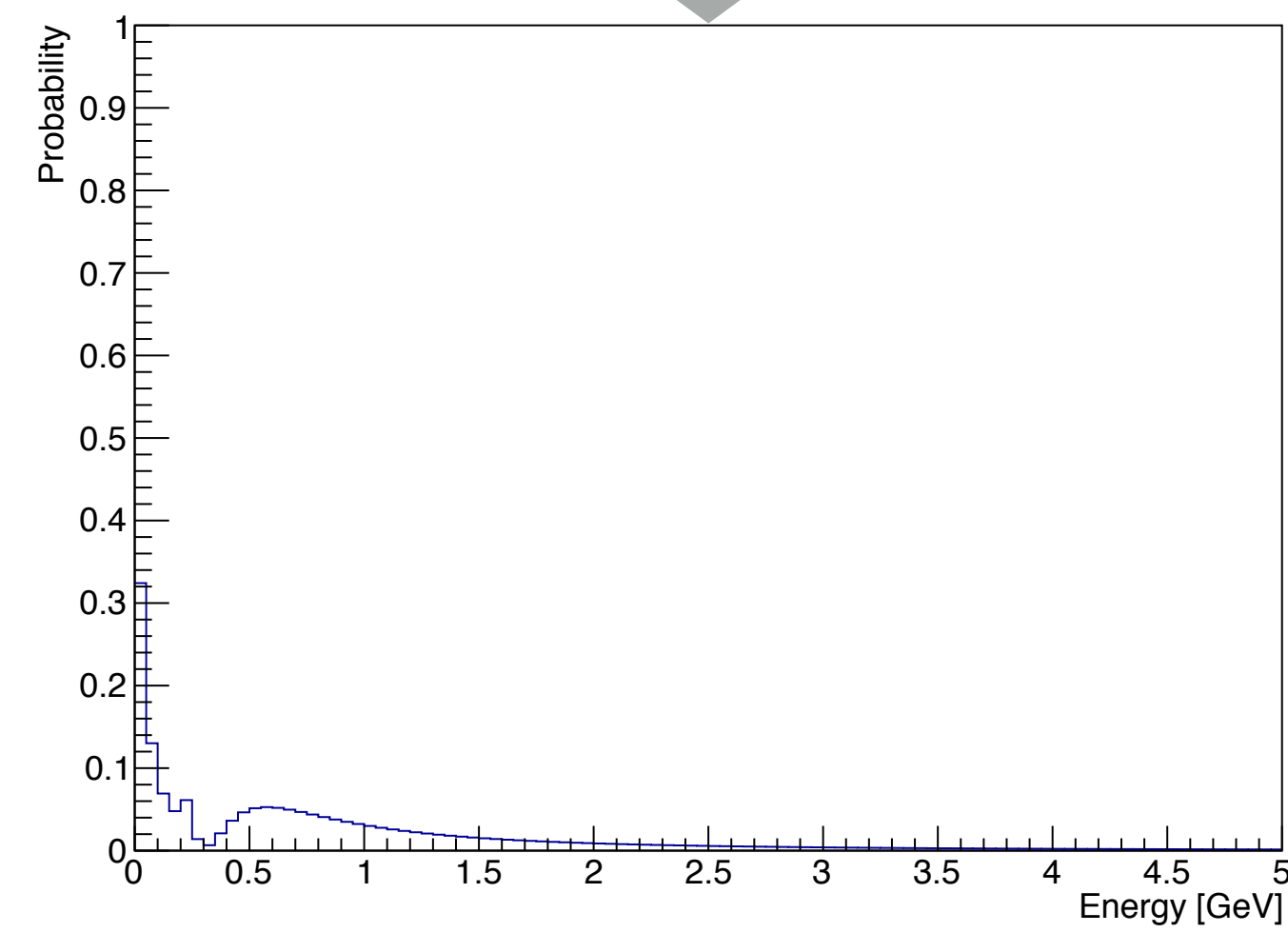
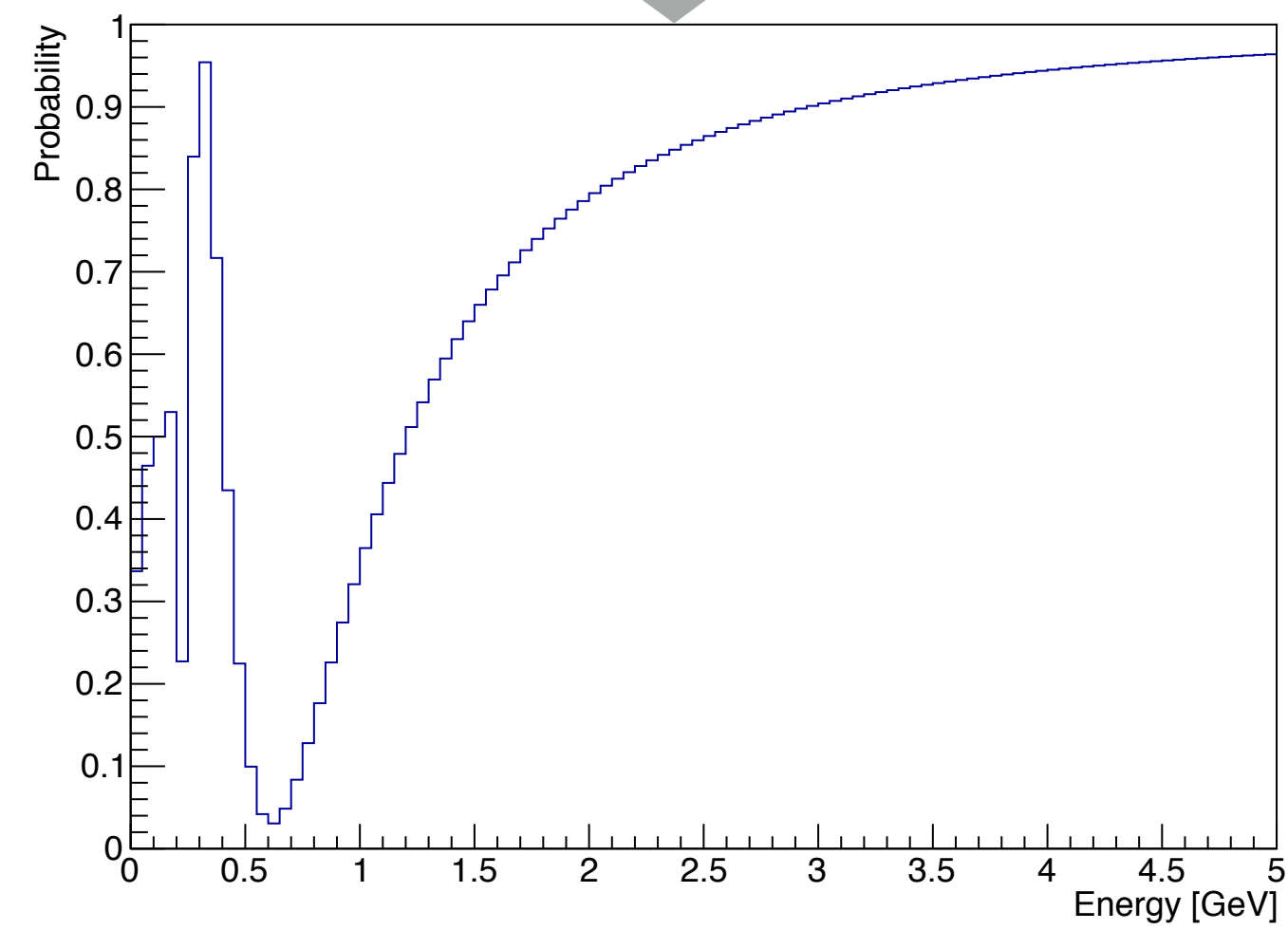
T2K Flux w/ osc.

Flux w/o osc と osc. probability を用いて計算

- Binをfluxのデータに合わせて(50MeV bin)、その範囲のprobabilityの平均を掛け合わせる
- nubarについては CPT conservation を仮定し計算

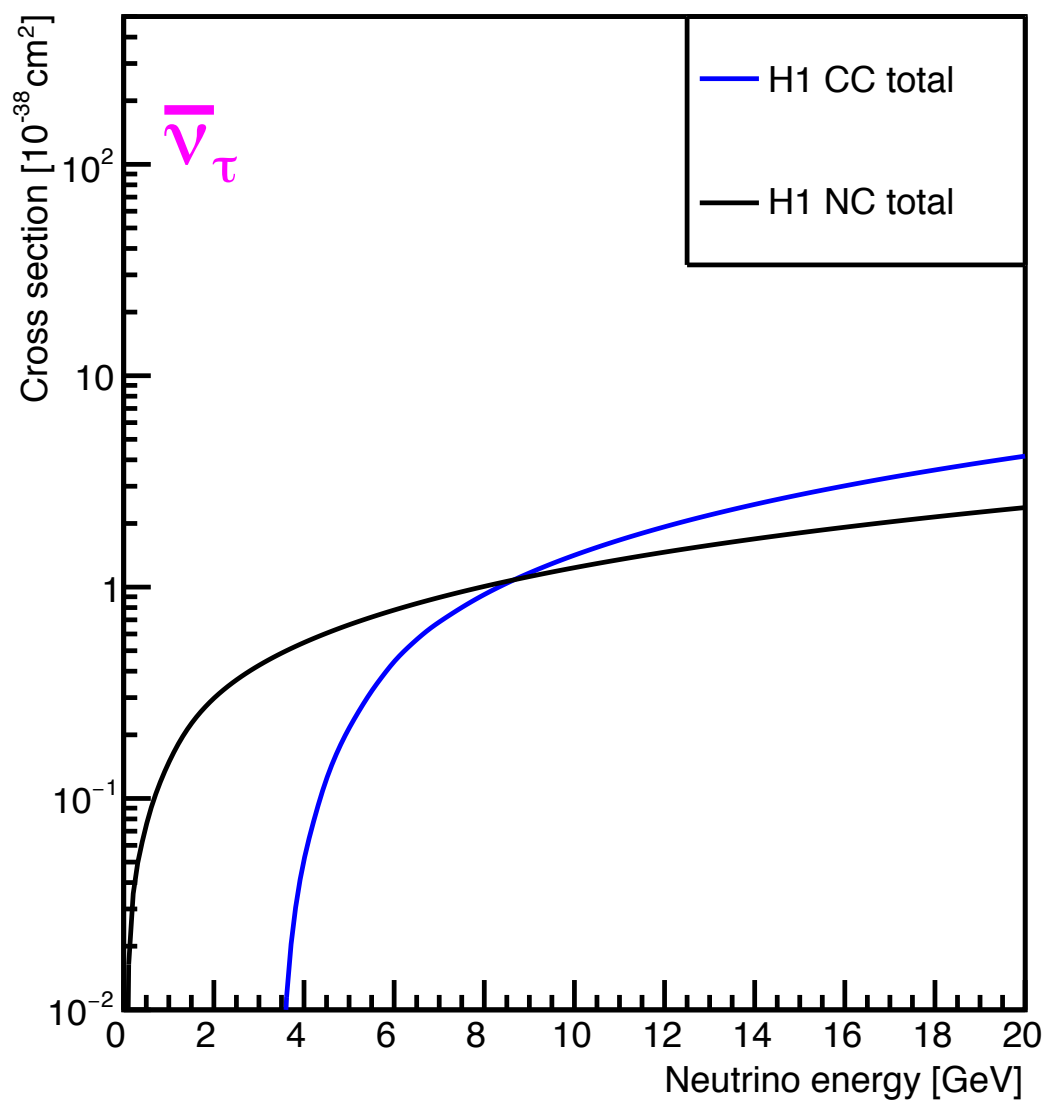
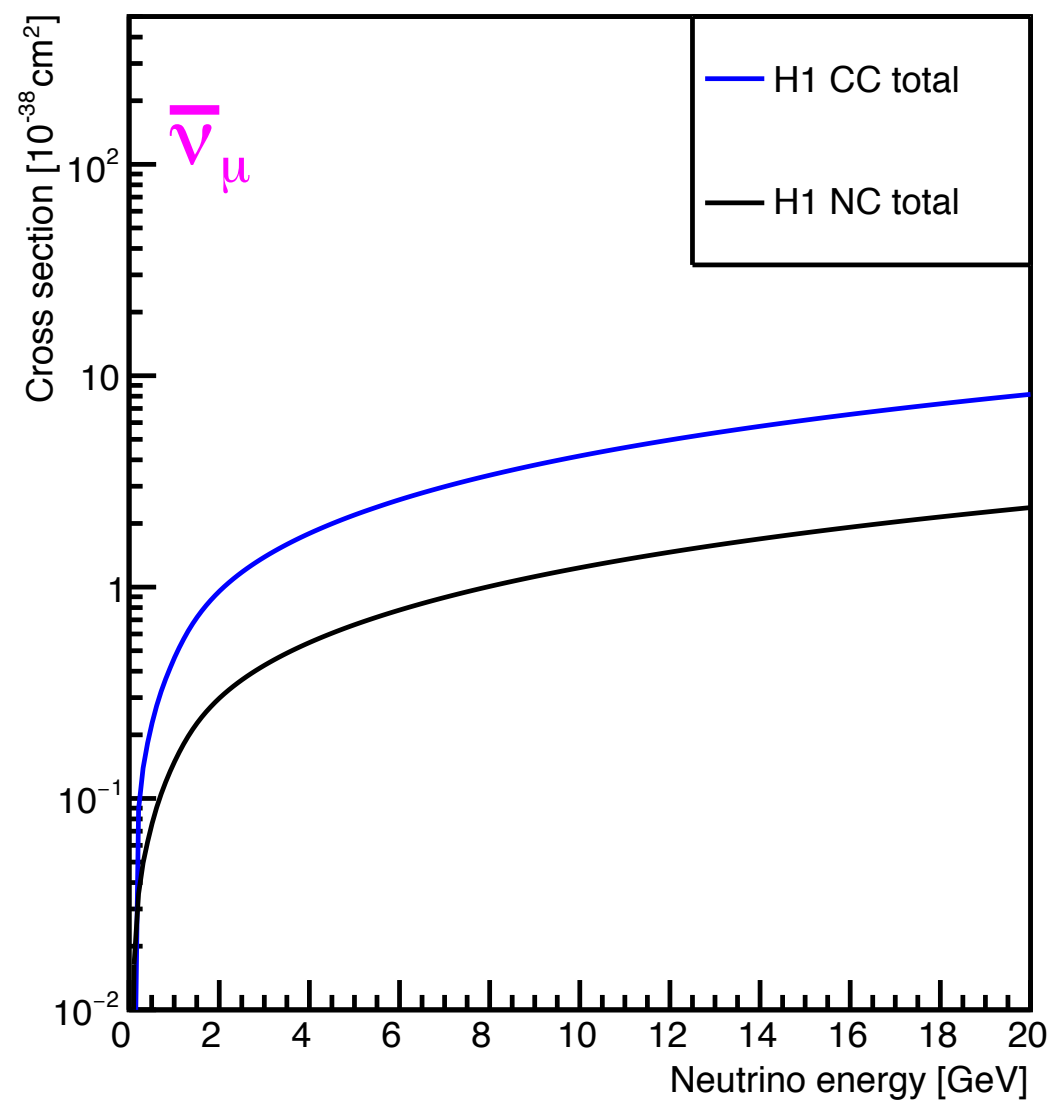
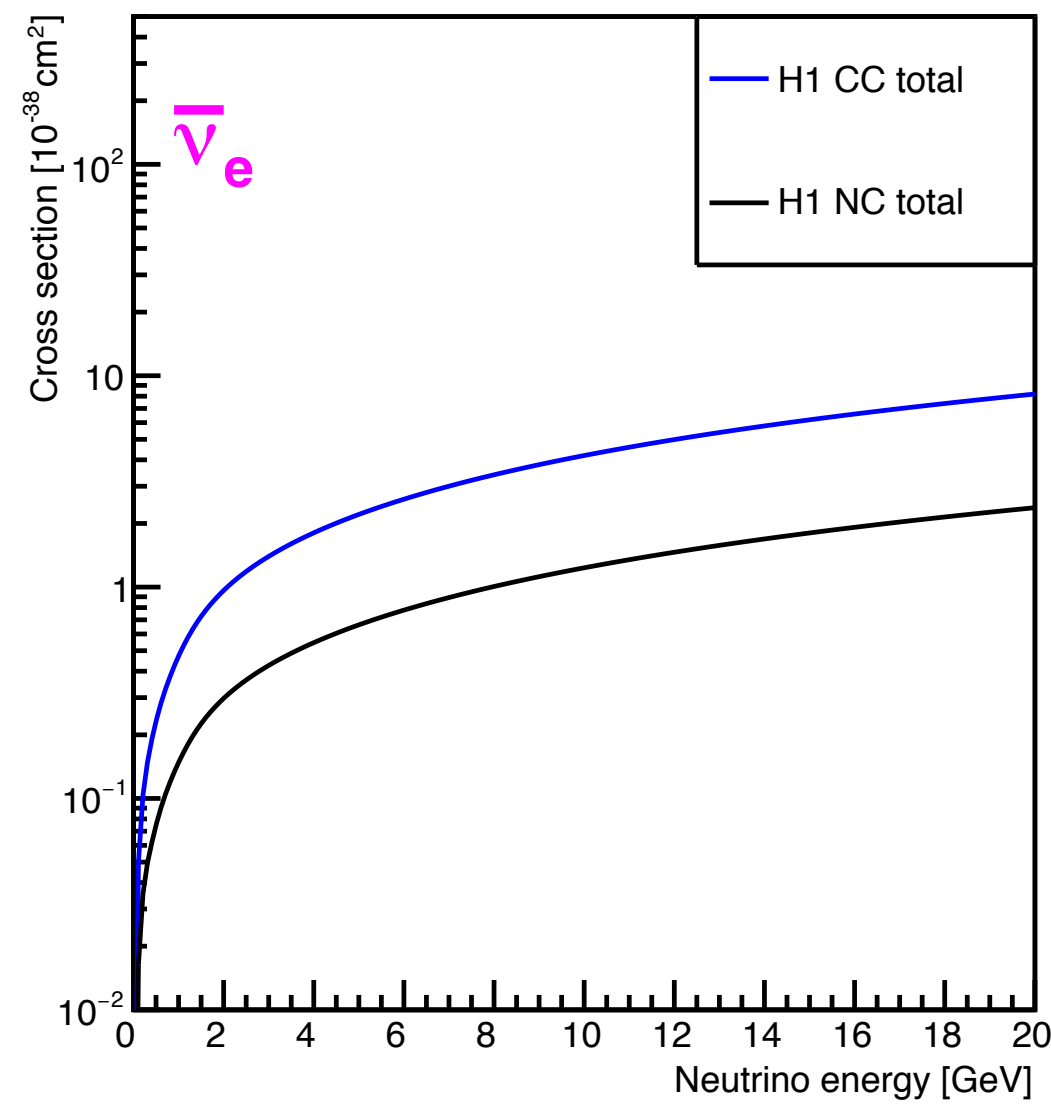
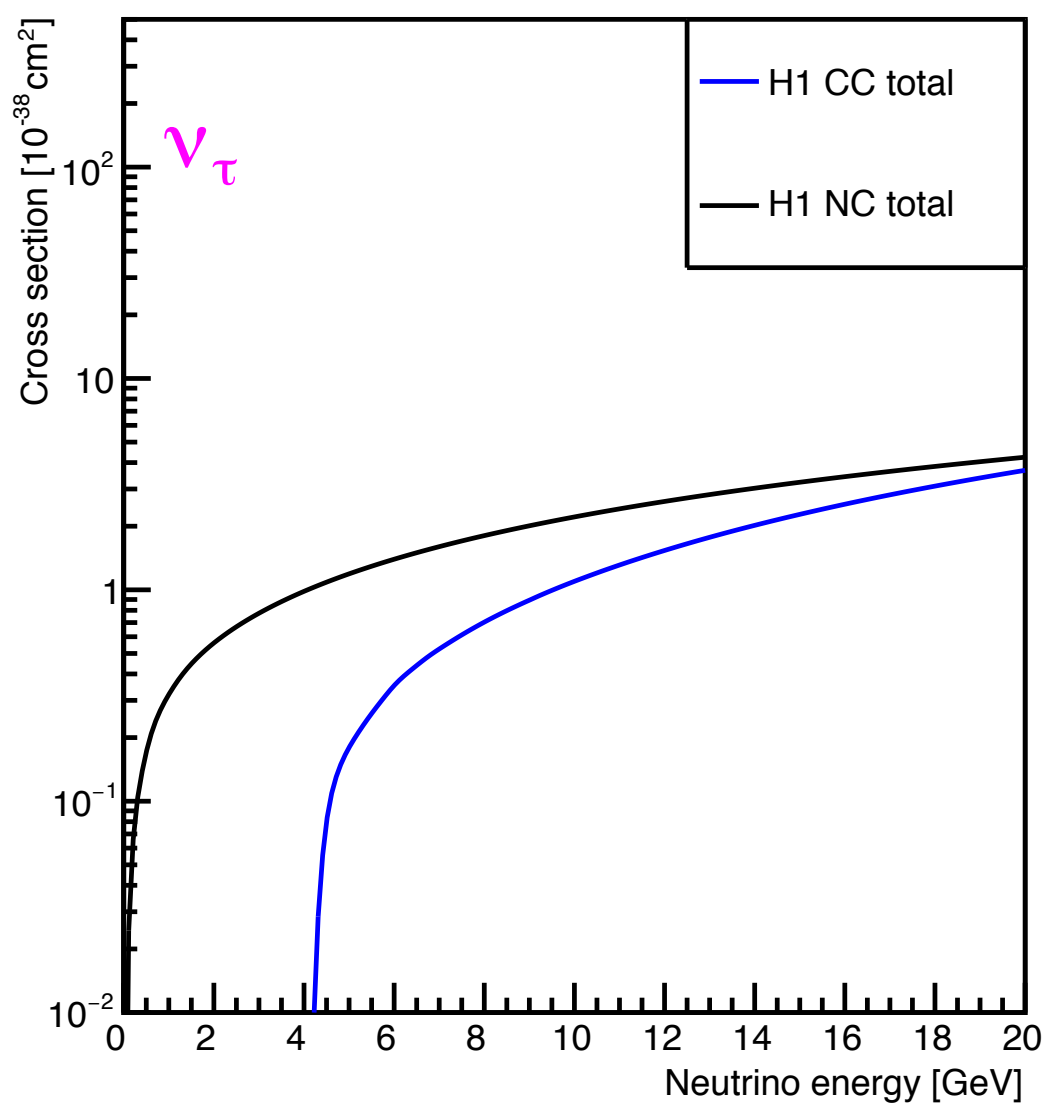
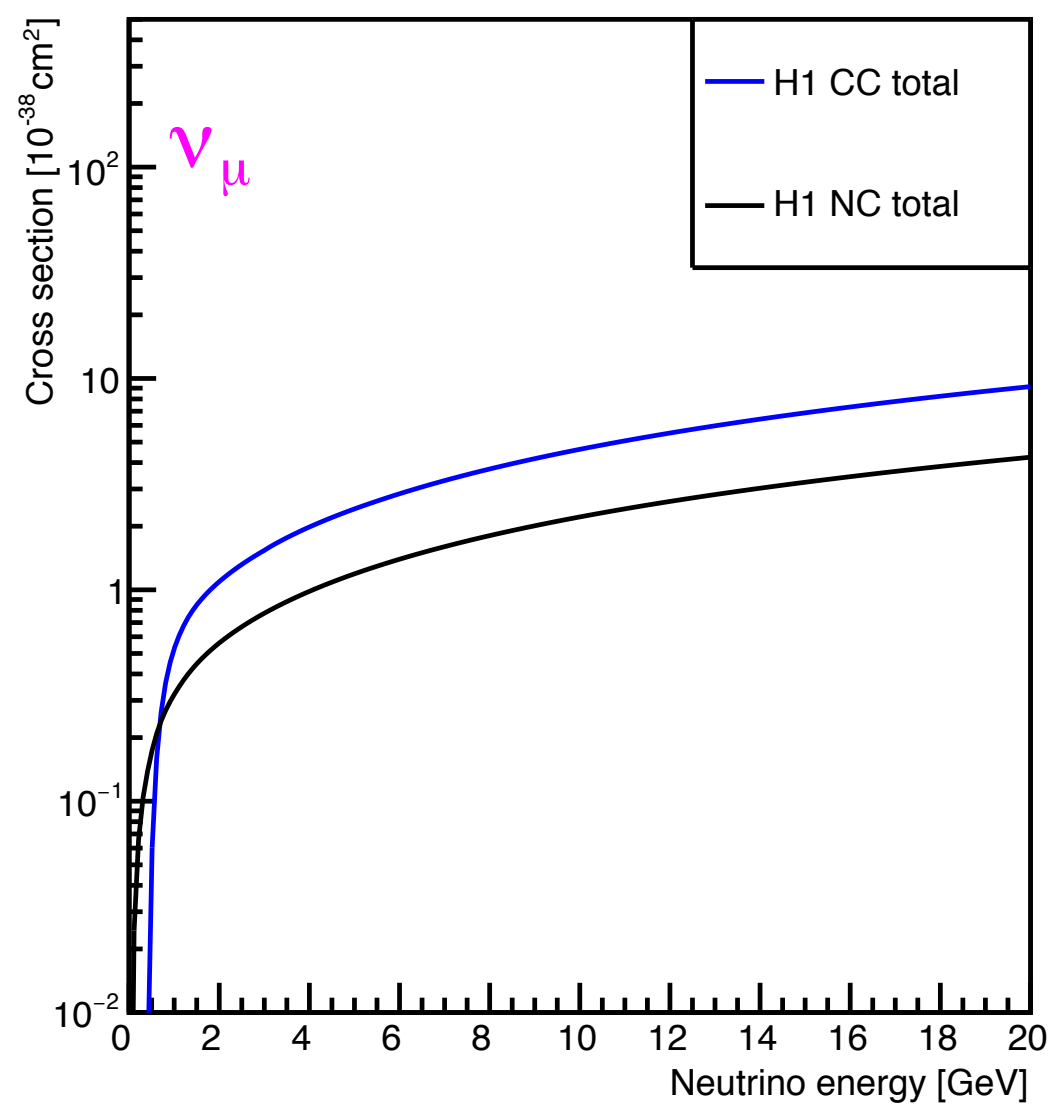
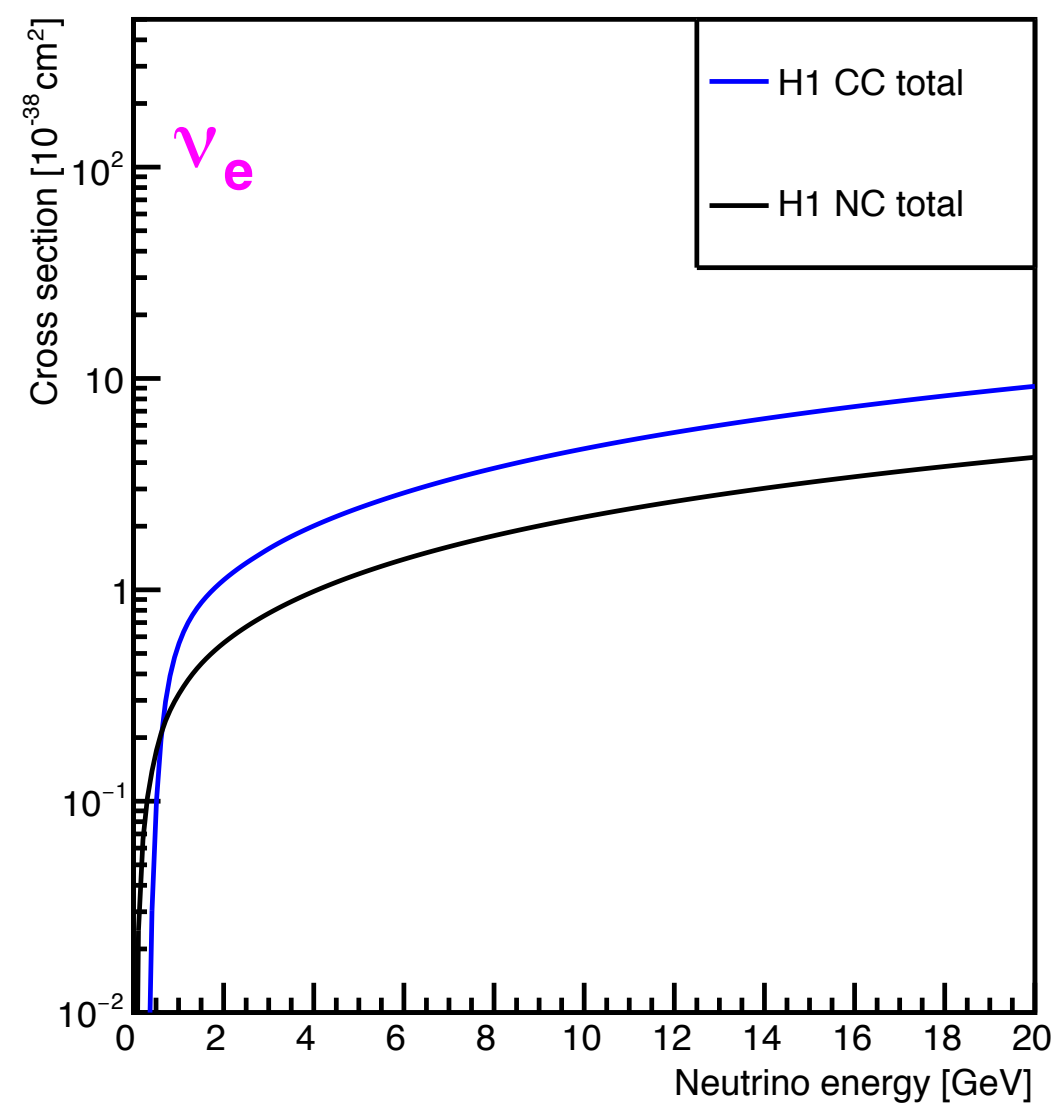


← 計算結果

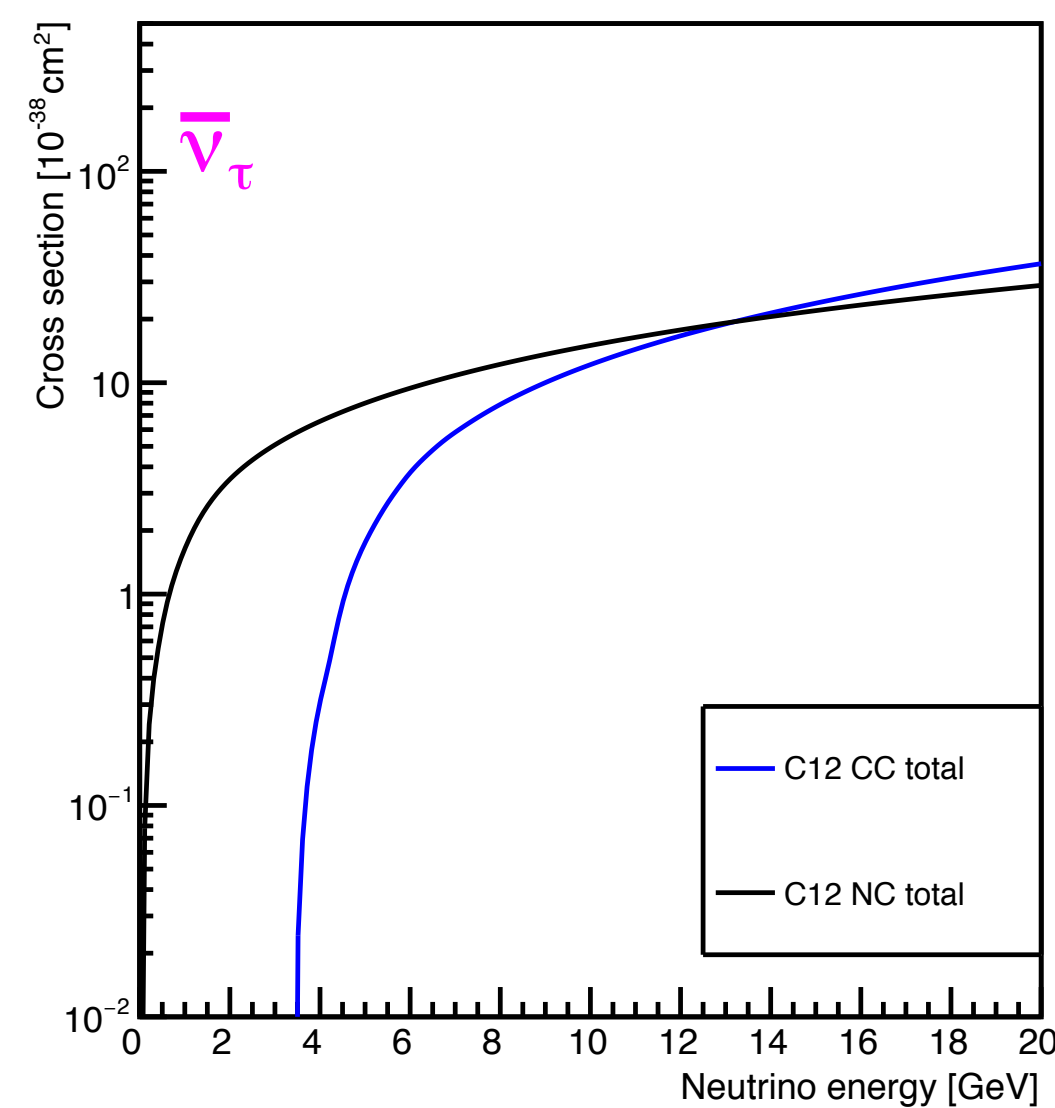
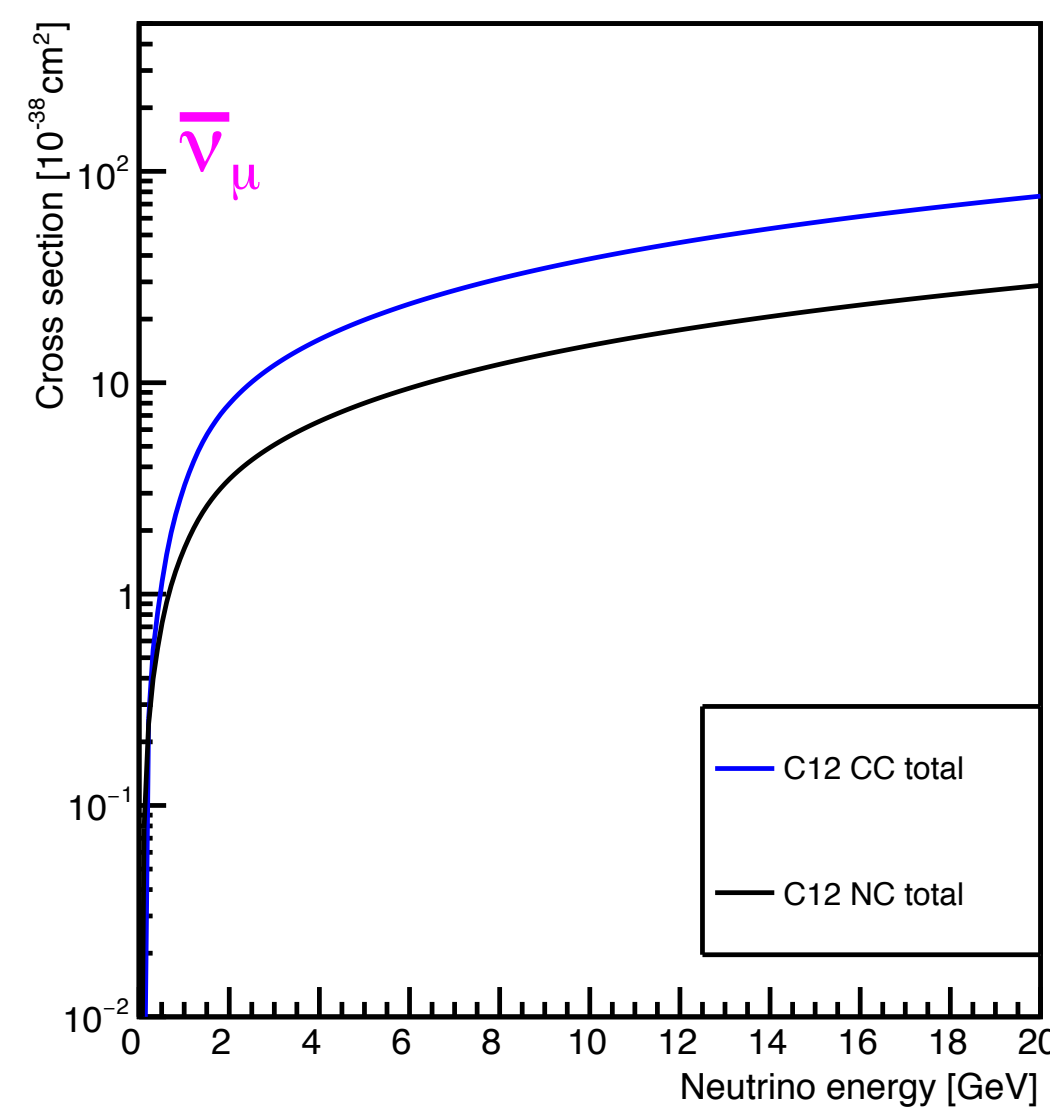
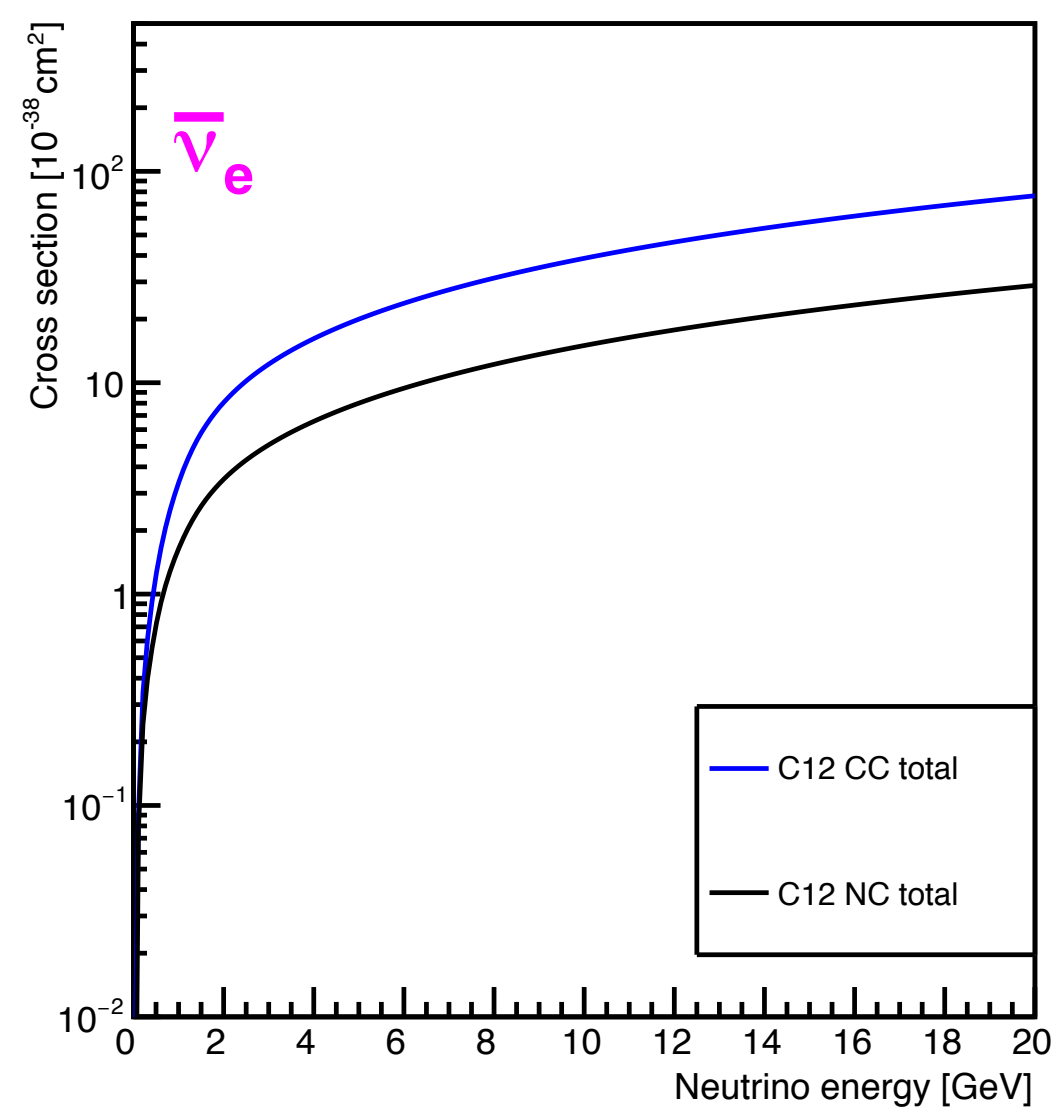
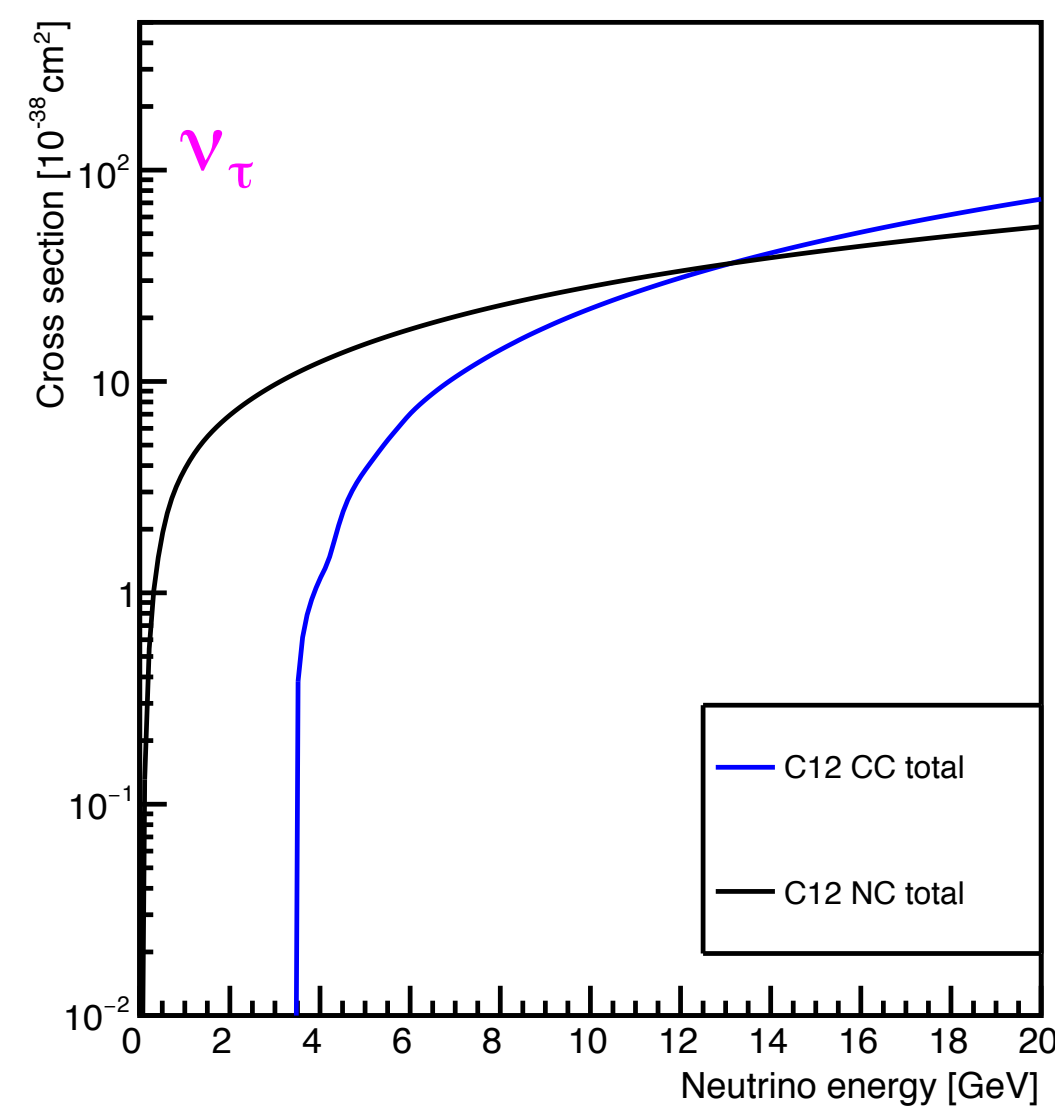
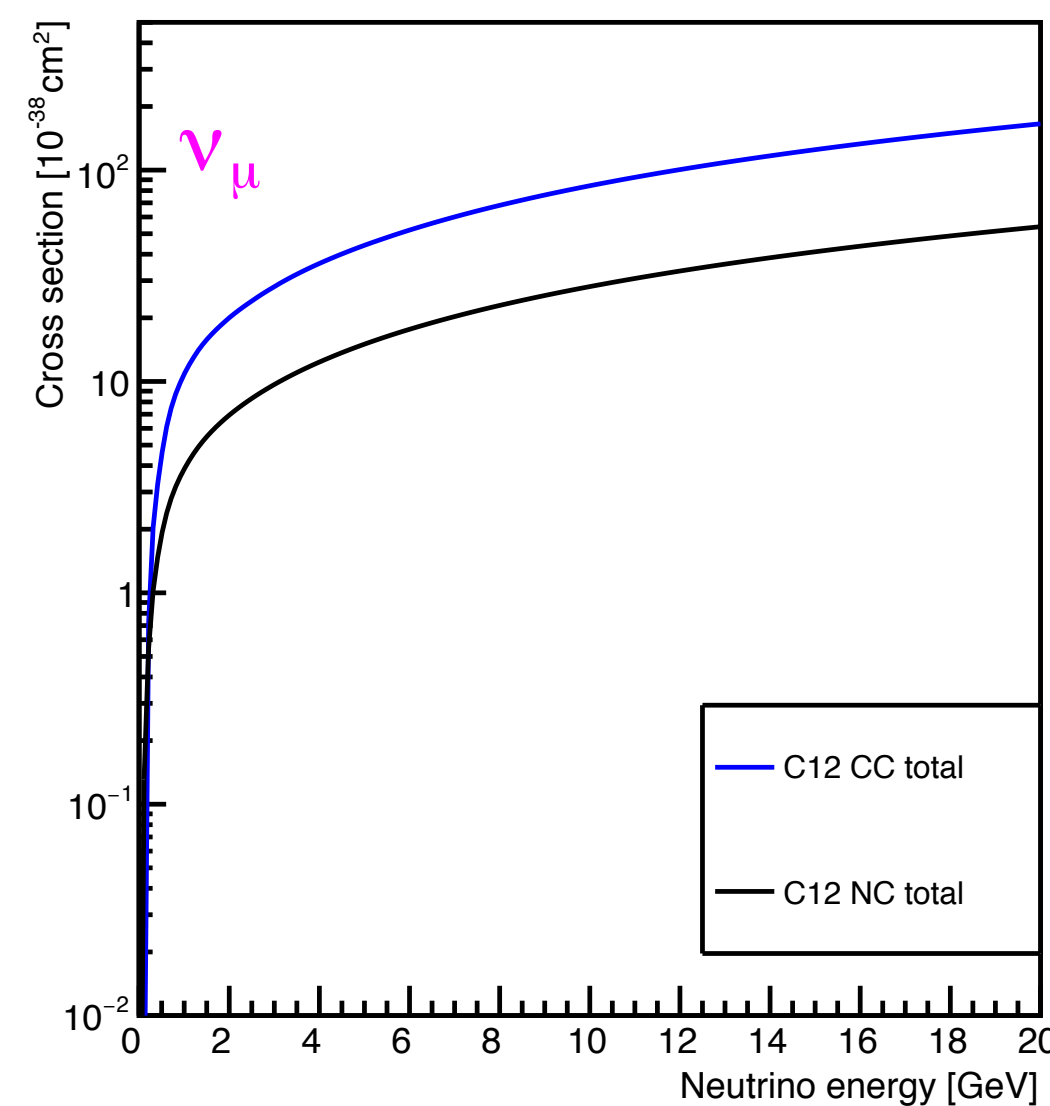
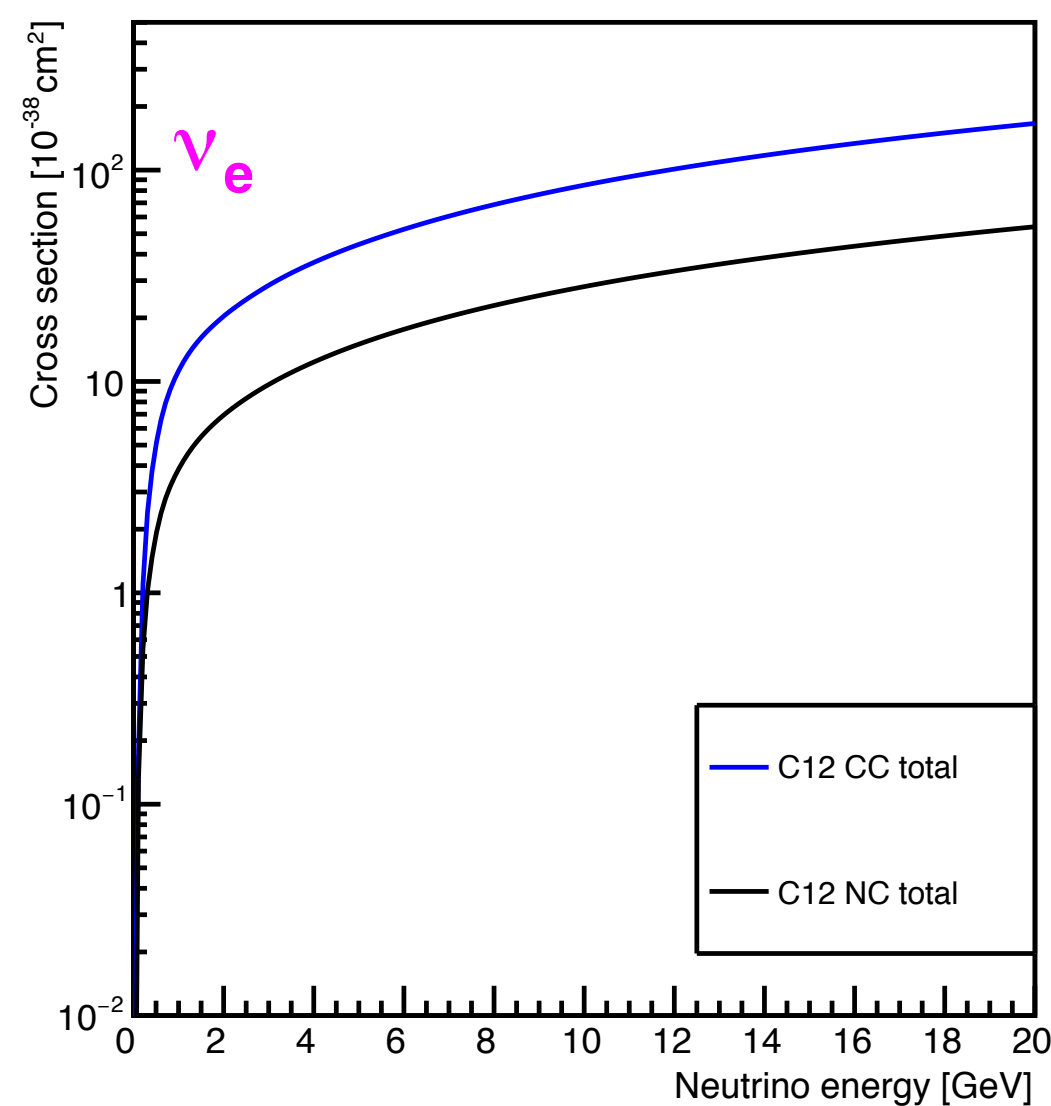


← 50MeVずつ平均を取ったもの

Cross Sections (H1)



Cross Sections (C12)



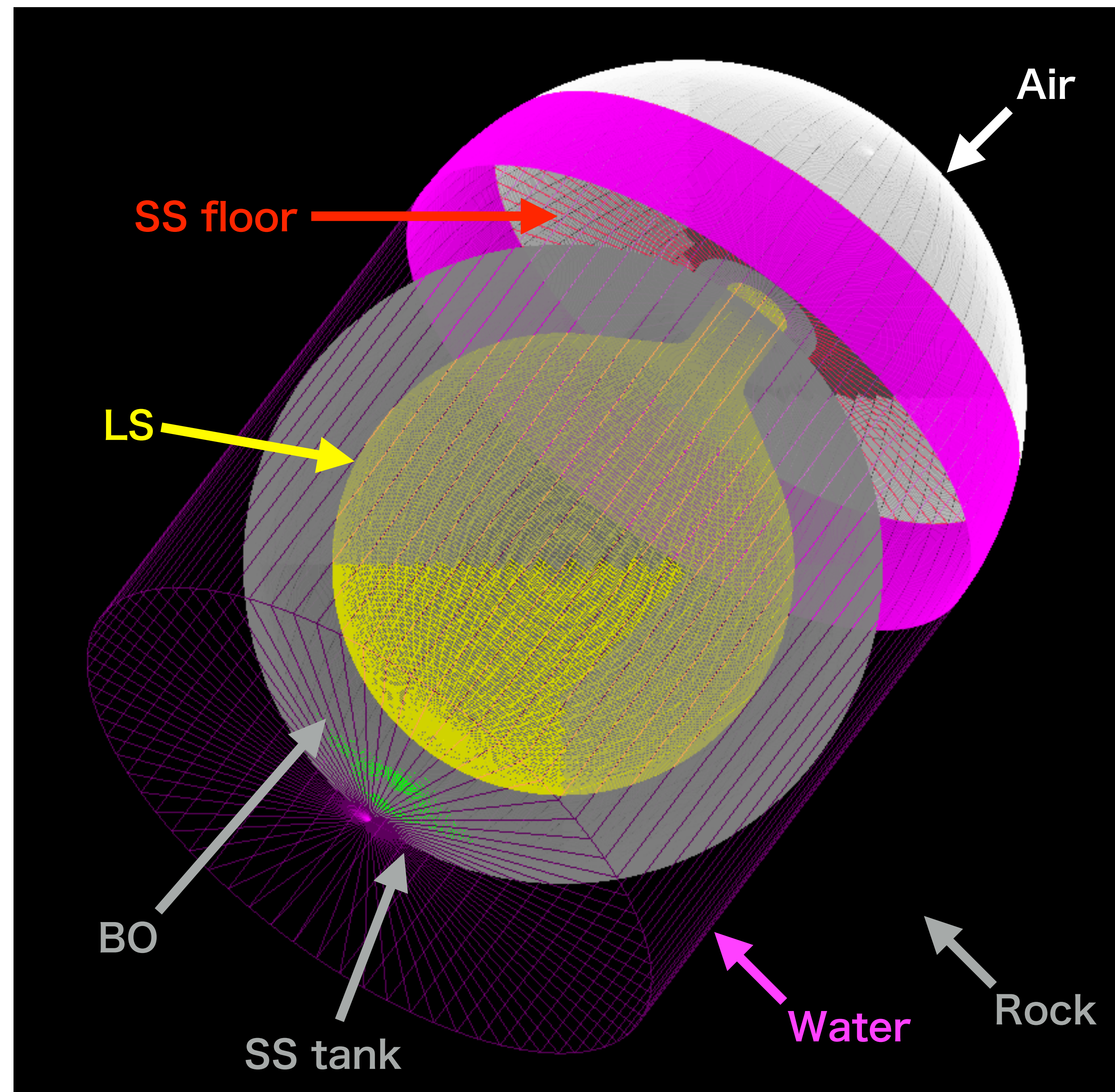
High n multi. Event

GENIE GHEP Event Record [print level: 3]												
Idx	Name	Ist	PDG	Mother		Daughter		Px	Py	Pz	E	m
0	nu_e	0	12	-1	-1	4	4	0.000	0.000	1.793	1.793	0.000
1	C12	0	1000060120	-1	-1	2	3	0.000	0.000	0.000	11.175	11.175
2	proton	11	2212	1	-1	5	5	-0.063	0.088	-0.022	0.922	**0.938
3	B11	2	1000050110	1	-1	21	21	0.063	-0.088	0.022	10.253	10.253
4	nu_e	1	12	0	-1	-1	-1	0.234	0.008	0.138	0.272	0.000
5	HadrSyst	12	2000000001	2	-1	6	9	-0.297	0.081	1.633	2.443	**0.000
6	neutron	14	2112	5	-1	10	11	-0.013	0.153	0.613	1.132	0.940
7	pi+	14	211	5	-1	12	12	-0.083	-0.169	0.717	0.755	0.140
8	pi+	14	211	5	-1	17	18	-0.085	0.193	0.217	0.333	0.140
9	pi-	14	-211	5	-1	19	20	-0.116	-0.096	0.087	0.223	0.140
10	neutron	1	2112	6	-1	-1	-1	0.149	-0.062	0.134	0.963	0.940
11	neutron	1	2112	6	-1	-1	-1	0.012	0.319	0.488	1.106	0.940
12	HadrClus	16	2000000300	7	-1	13	16	-0.083	-0.169	0.717	0.755	**0.000
13	neutron	1	2112	12	-1	-1	-1	-0.325	-0.483	0.282	1.141	0.940
14	neutron	1	2112	12	-1	-1	-1	0.010	0.529	0.316	1.124	0.940
15	neutron	1	2112	12	-1	-1	-1	-0.448	0.003	-0.110	1.047	0.940
16	neutron	1	2112	12	-1	-1	-1	0.679	-0.219	0.229	1.202	0.940
17	pi+	1	211	8	-1	-1	-1	0.112	-0.080	0.049	0.202	0.140
18	proton	1	2212	8	-1	-1	-1	-0.313	0.233	0.314	1.064	0.938
19	proton	1	2212	9	-1	-1	-1	-0.393	0.233	0.129	1.052	0.938
20	neutron	1	2112	9	-1	-1	-1	0.192	-0.125	-0.305	1.014	0.940
21	HadrBlob	15	2000000002	3	-1	-1	-1	0.092	-0.355	0.128	2.783	**0.000
Fin-Init:								0.000	-0.000	-0.000	-0.000	
Vertex:		nu_e @ (x = 0.00000 m, y = 0.00000 m, z = 0.00000 m, t = 0.000000e+00 s)										
Err flag [bits:15->0] :				00000000000000000								
Err mask [bits:15->0] :				11111111111111111								
				1st set: none								
				Is unphysical: NO Accepted: YES								
sig(Ev) =				2.53610e-39 cm^2 d2sig(x,y;E)/dxdy = 1.50325e-38 cm^2 Weight = 1.00000								

NC DIS

Setup of Geant4

- Rock: SiO_2 , 2.7g/cm^3
- Air: N, O, $1.29 \times 10^{-3}\text{g/cm}^3$
 - N 70%, O 30%
- Water: H_2O , 1.0g/cm^3
- SS tank&floor: Fe, Cr, Ni, 7.87g/cm^3
 - Fe 71%, Cr 19%, Ni 10%
- BO: CH_2 , 0.77g/cm^3
- LS: Mix of Dodecane, PC, PPO,
 - Dodecane($\text{C}_{12}\text{H}_{26}$) 0.75g/cm^3
 - PC(C_9H_{12}) 0.8758g/cm^3
 - PPO($\text{C}_{15}\text{H}_{11}\text{NO}$) 1.094g/cm^3
 - Mix these with
 - PPO: 1.36g/L
 - Dodecane: 80.2%
 - PC: 19.8% (by volume)



Location from Google



Neutrino beam is almost west(-x) direction

Reference

- (1) Mark Hartz “T2K NEUTRINO OSCILLATION RESULTS WITH DATA UP TO 2017 SUMMER”, KEK Colloquium, Aug 4, 2017
- (2) Morgan Wascko “T2K Status, Results, and Plans”, Neutrino 2018, June 4, 2018
- (3) Tetsuro Sekiguchi “Latest Neutrino Oscillation Results from T2K Experiment”, KEK seminar, June 5, 2018
- (4) K. Abe et al. : Measurement of neutrino and antineutrino oscillations by the T2K experiment including a new additional sample of ν_e interactions at the far detector. Phys Rev. D **96** , 092006 (2017)
- (5) 平出克樹 “J-PARCニュートリノ振動実験のためのoff-axis全周検出器の基本設計およびAPD読み出し系の開発” 修士論文, 京都大学大学院理学研究科 (2005)
- (6) H. Watanabe “Comprehensive Study of Anti-neutrino Signals at KamLAND” Ph.D thesis, Tohoku univ. (2011)
- (7) E.D.Zimmerman “NEUTRINO PHYSICS RESULTS FROM T2K”, NOW2018, Sep 10, 2018