

J-PARCニュートリノビームを 使った超新星背景ニュートリノ 精密観測

瀬戸内ニュートリノ研究会 (OLivES2026)

豊島エスPOWERパーク

日野 陽太

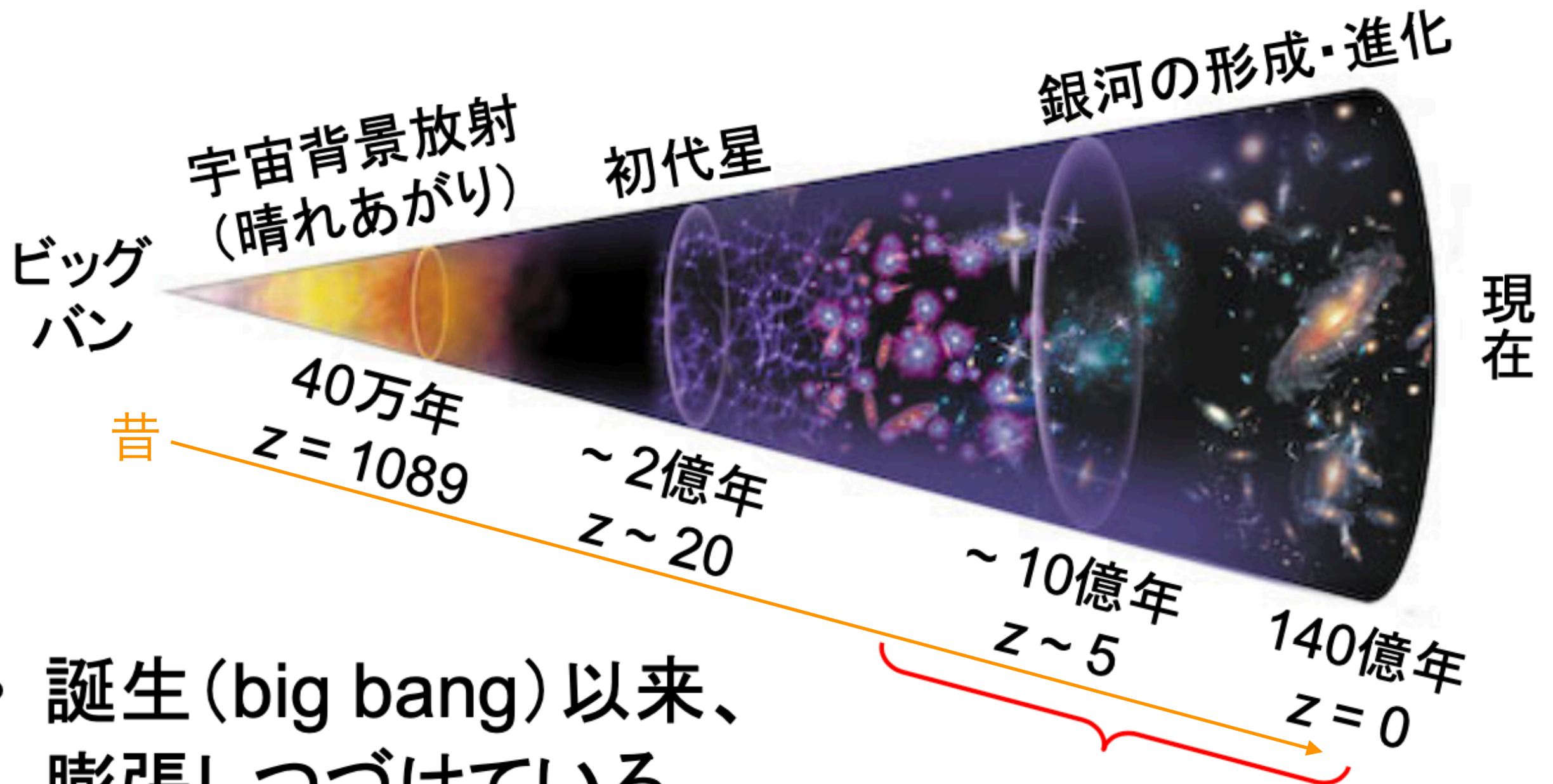
高エネルギー加速器研究機構 (KEK)/ J-PARCセンター

Contents

- 超新星由来のニュートリノを探す
 - ニュートリノとは
 - 超新星爆発とは
 - 過去の超新星の残滓
 - ▶ どんなニュートリノなのか？何がわかるのか？
- どうやって探す？
 - J-PARCの人工ニュートリノがどう活用されるのか？？
 - NCQE in SK7.5
 - 最新結果@NEUTRINO2026

Diffuse Supernova Neutrino Background

History of Universe

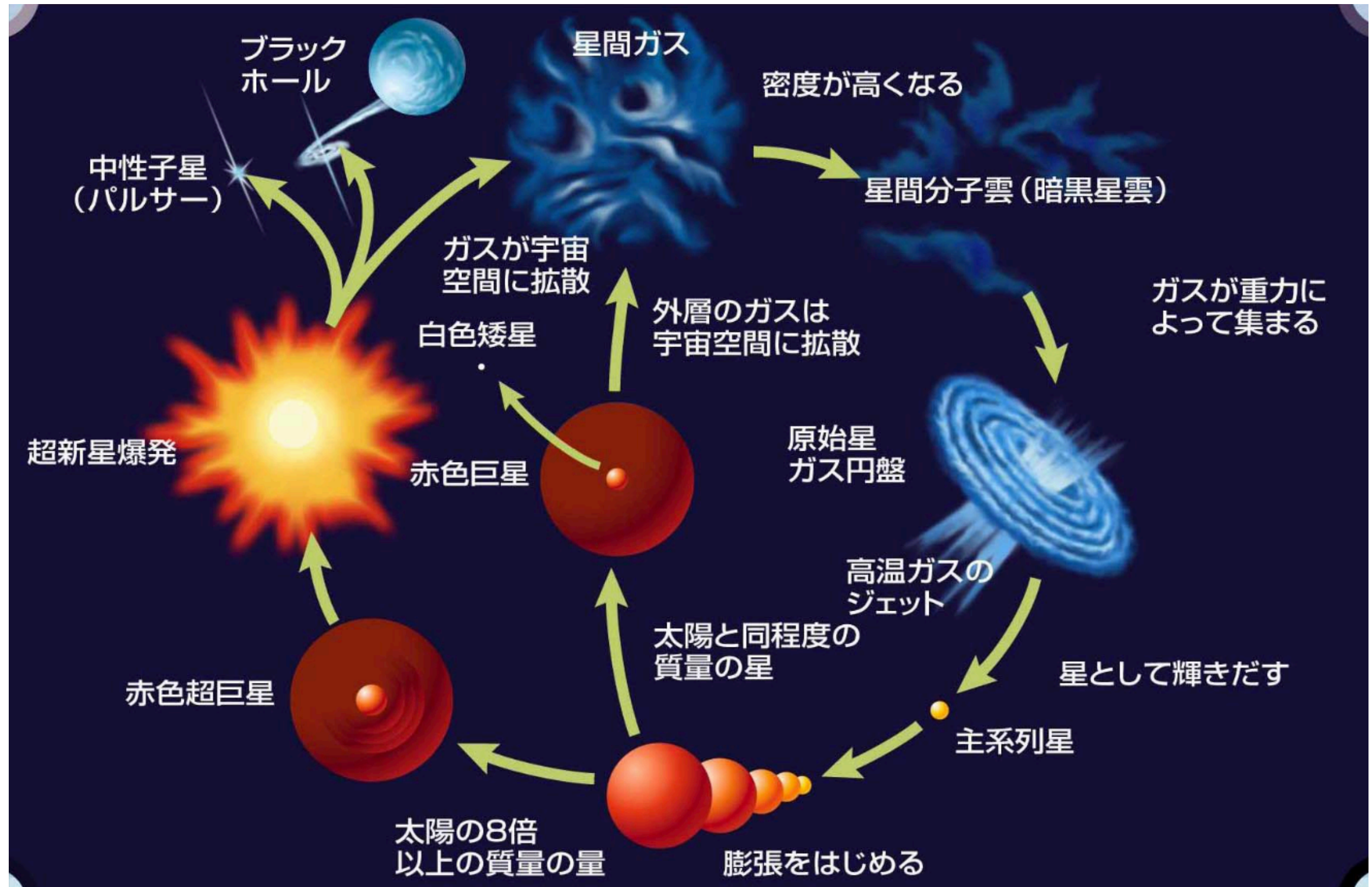


- 誕生 (big bang) 以来、膨張しつづけている。
- 「時間」として赤方偏移 z を用いる。

この間、無数の星が生まれ死んでいった

Life of Star

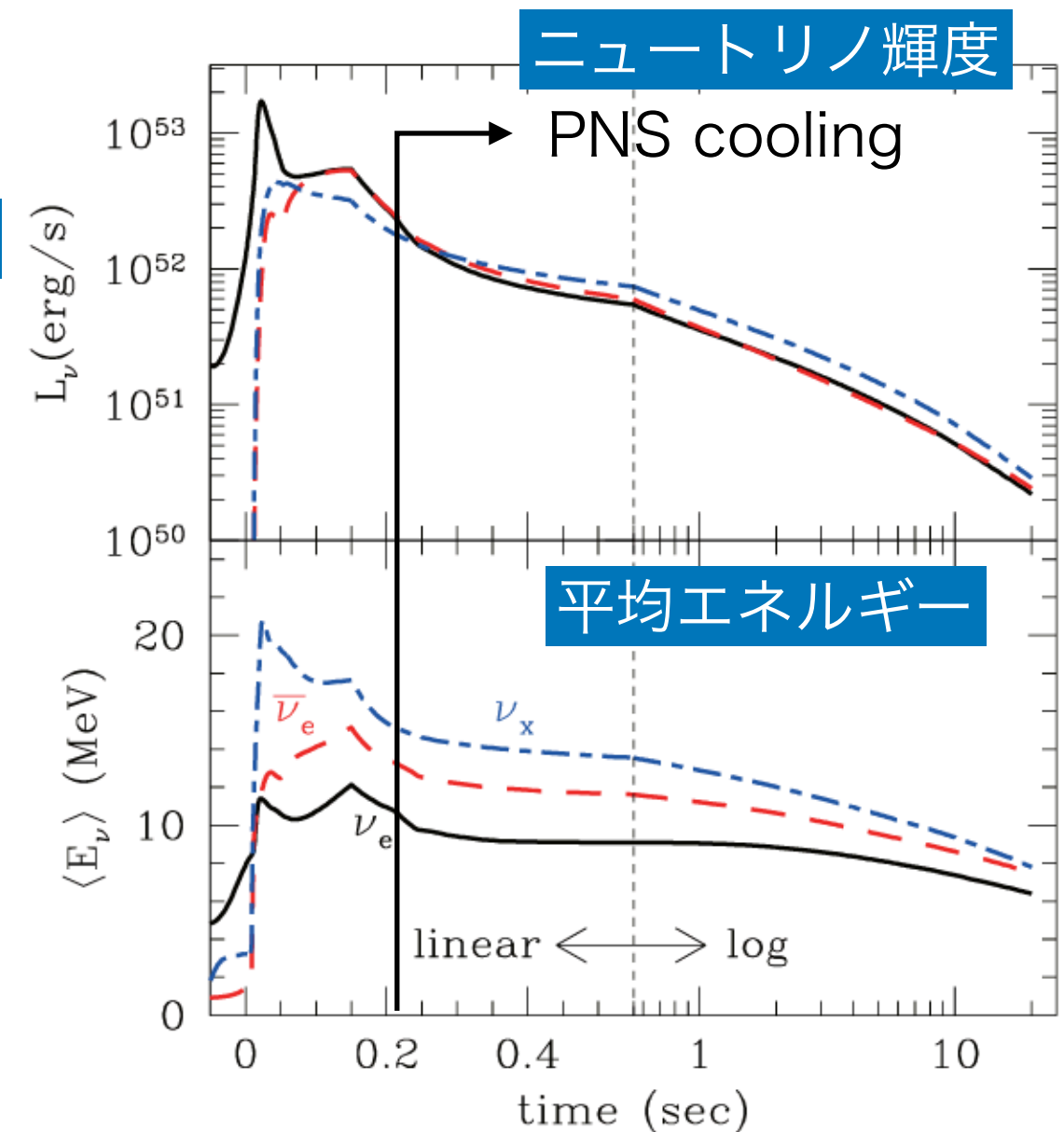
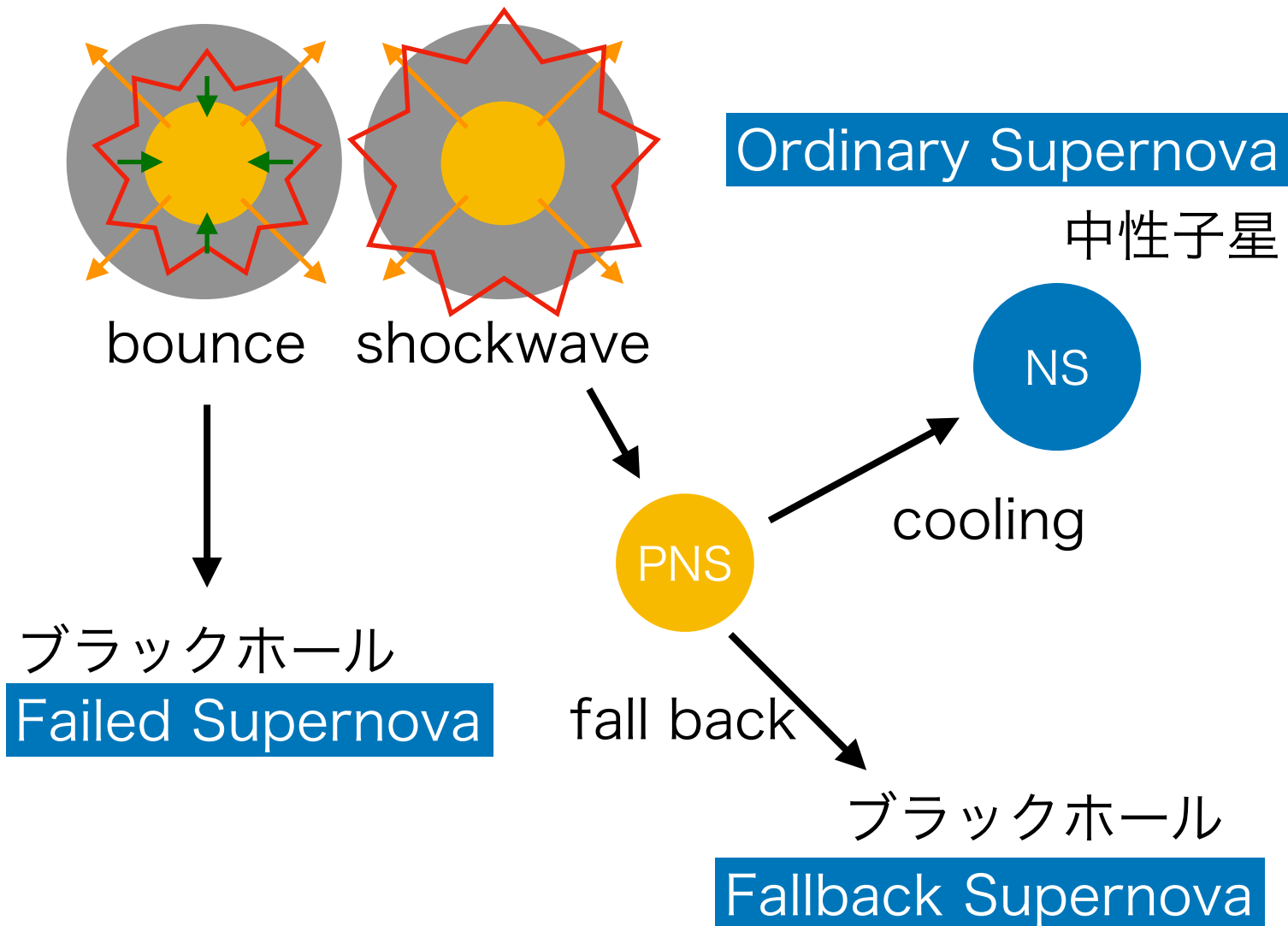
- 宇宙の歴史の中で星は輪廻転生している。超新星爆発は星の終焉のひとつ。



Supernova Neutrinos

6

Core-Collapse Supernova:



Nakazato et al 2015 ApJ 804 75

- 99%のエネルギーがニュートリノとして放出
- 質量によっては中性子星にならずにブラックホールを作る
 - ブラックホールになり光は出なくてもニュートリノは放出される！
- 過去の無数の超新星爆発でもニュートリノが放出されてきた
 - > ニュートリノは反応しにくいため、今でもその残骸 (Relic) が残っているはず

Diffuse Supernova Neutrino Background

超新星背景ニュートリノ (DSNB):

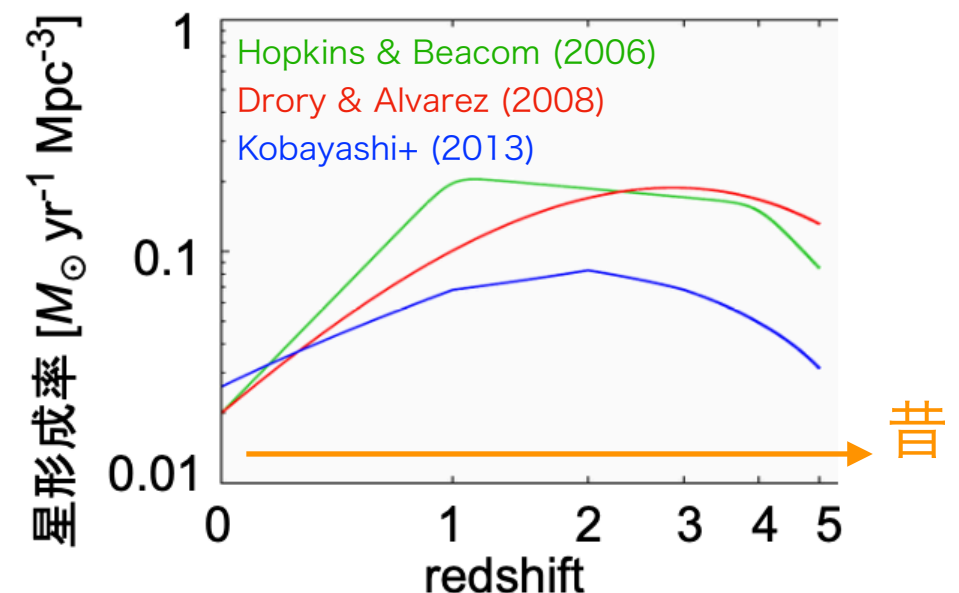
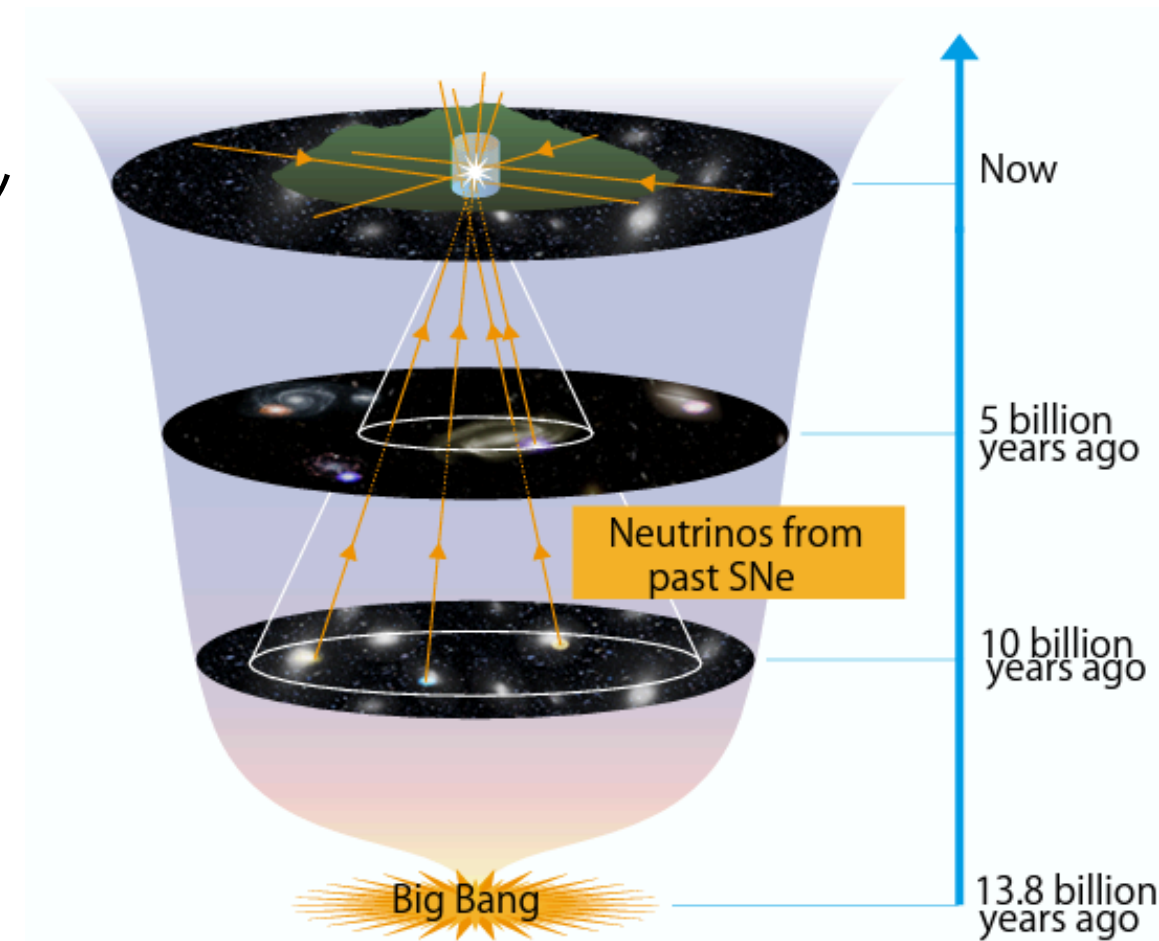
過去の超新星爆発で放出され宇宙を漂うニュートリノ

↑ 超新星爆発がニュートリノを出すことは発見済み
=> 背景ニュートリノは必ず存在するはず!

$$\Phi_{\text{DSNB}}(E) \propto \int \underbrace{R_{\text{SN}}(z)}_{\text{Supernova Rate}} \underbrace{\frac{dF_{\bar{\nu}}(E, z)}{dE}}_{\text{SN } \nu \text{ emission}} \underbrace{\left| \frac{dt}{dz} \right| dz}_{\text{Red shift}}$$

Supernova Rate SN ν emission

- 宇宙の歴史を反映したスペクトルをもつ
 - 星形成率の時間変化
 - 星の金属量
 - 超新星爆発ニュートリノスペクトル
 - ブラックホールになる超新星の割合など
- 観測・理論からなる多数のモデルが提唱されている

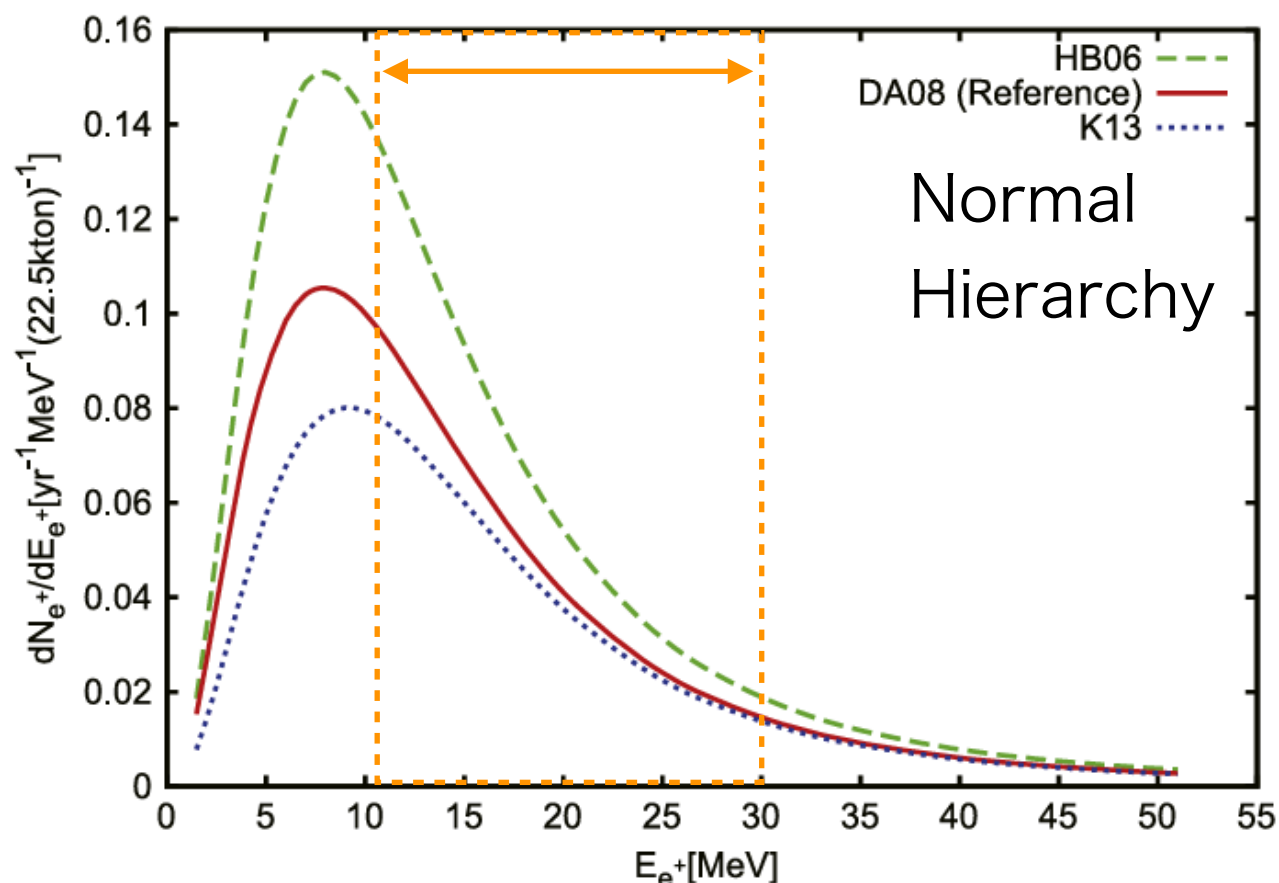


Star Formation Rate on DSNB

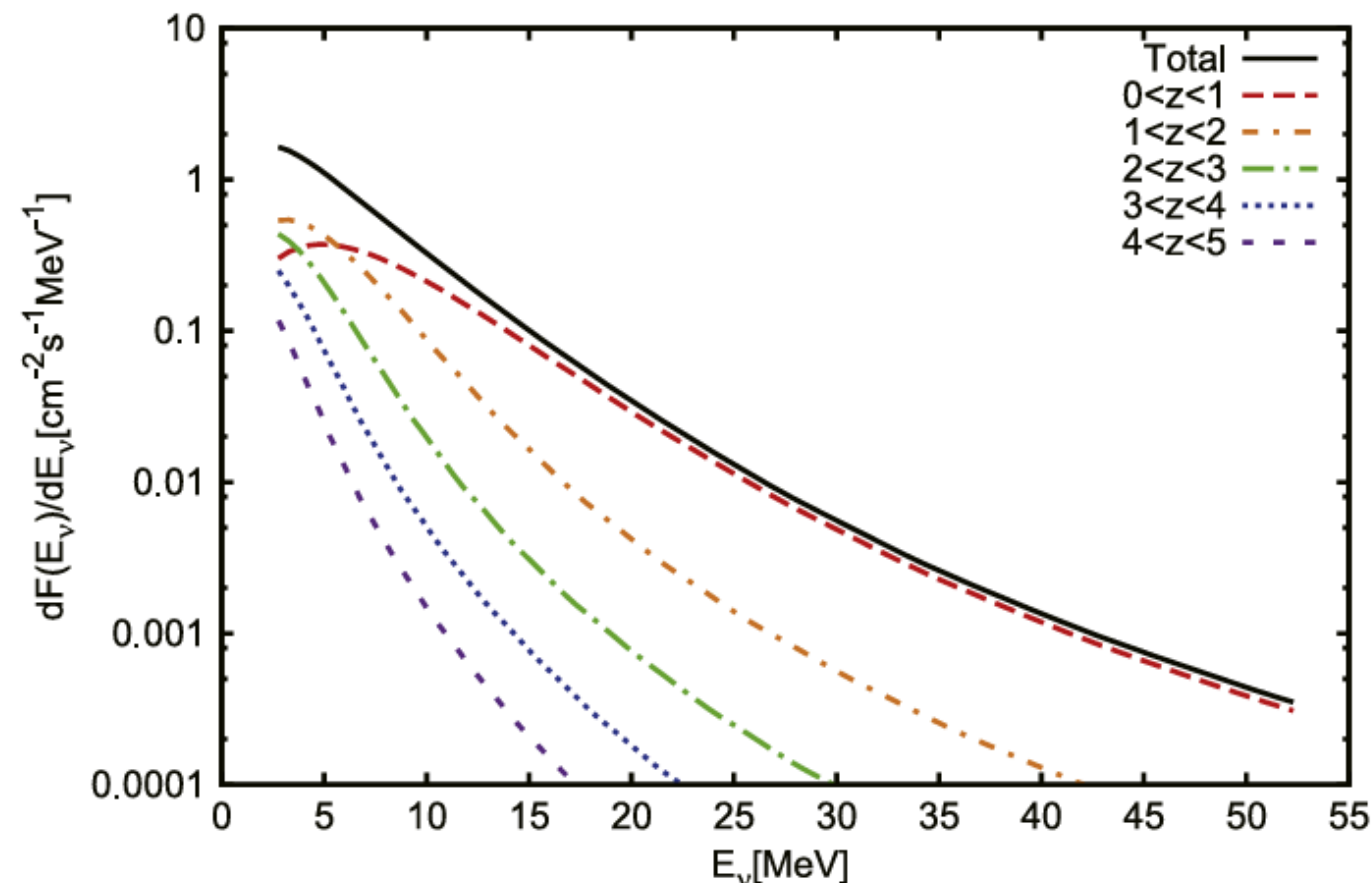
- 例えば、星形成率の歴史が観測量にどう乗るのか？

Nakazato et al 2015 ApJ 804 75

観測されるエネルギースペクトル



赤方偏移ごとのDSNBフラックス

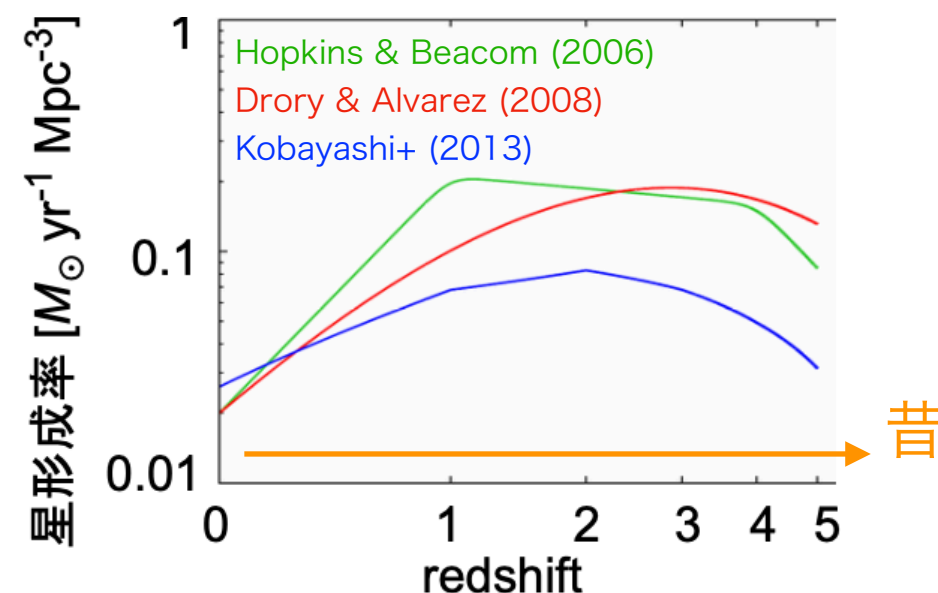


- 星形成率の歴史によって観測できるニュートリノの数に違いが現れる。

- とくに低いエネルギーで顕著

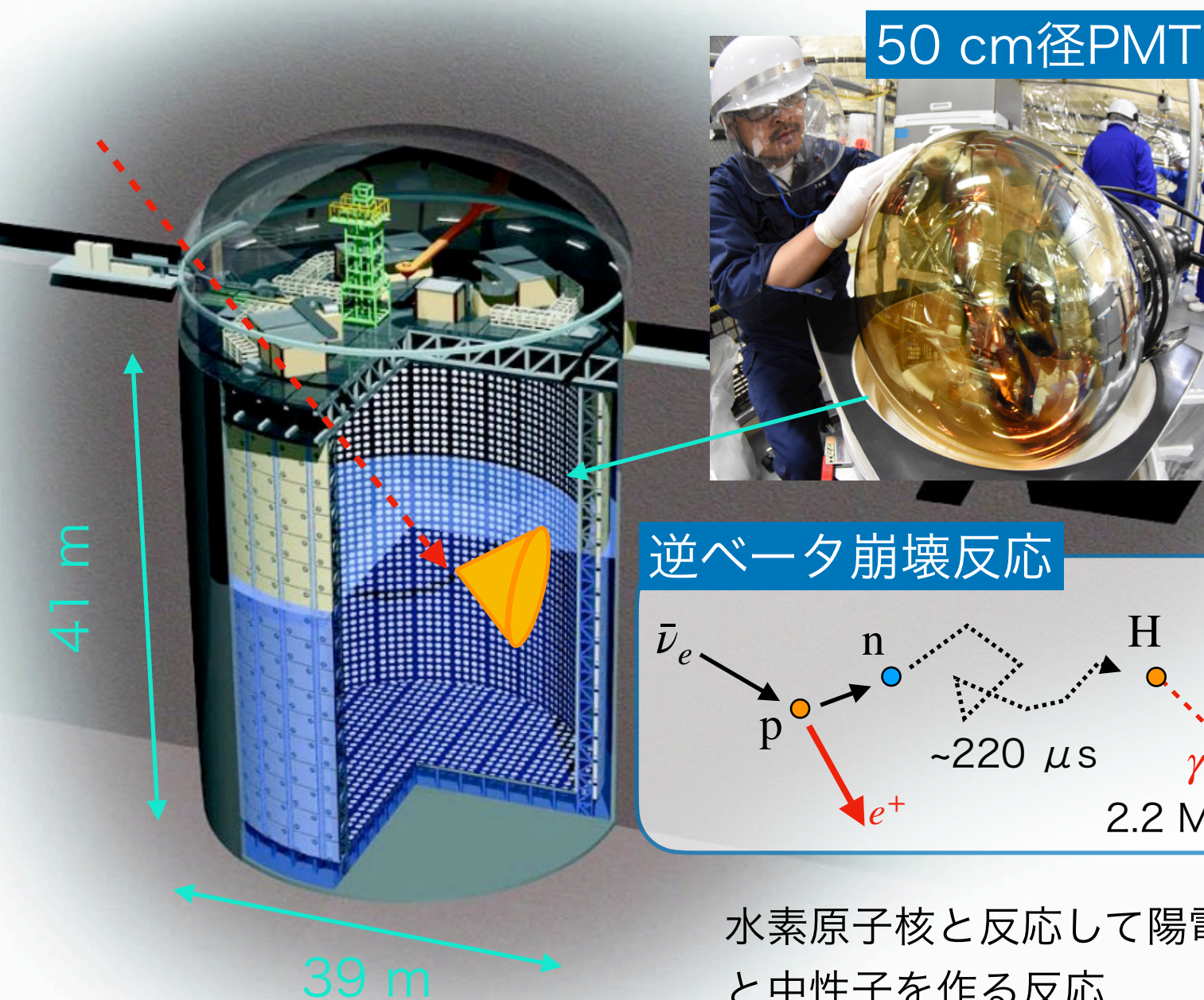
低いエネルギーまで観測できる巨大なニュートリノ検出器があれば...

=> **Super-Kamiokande**で挑む！

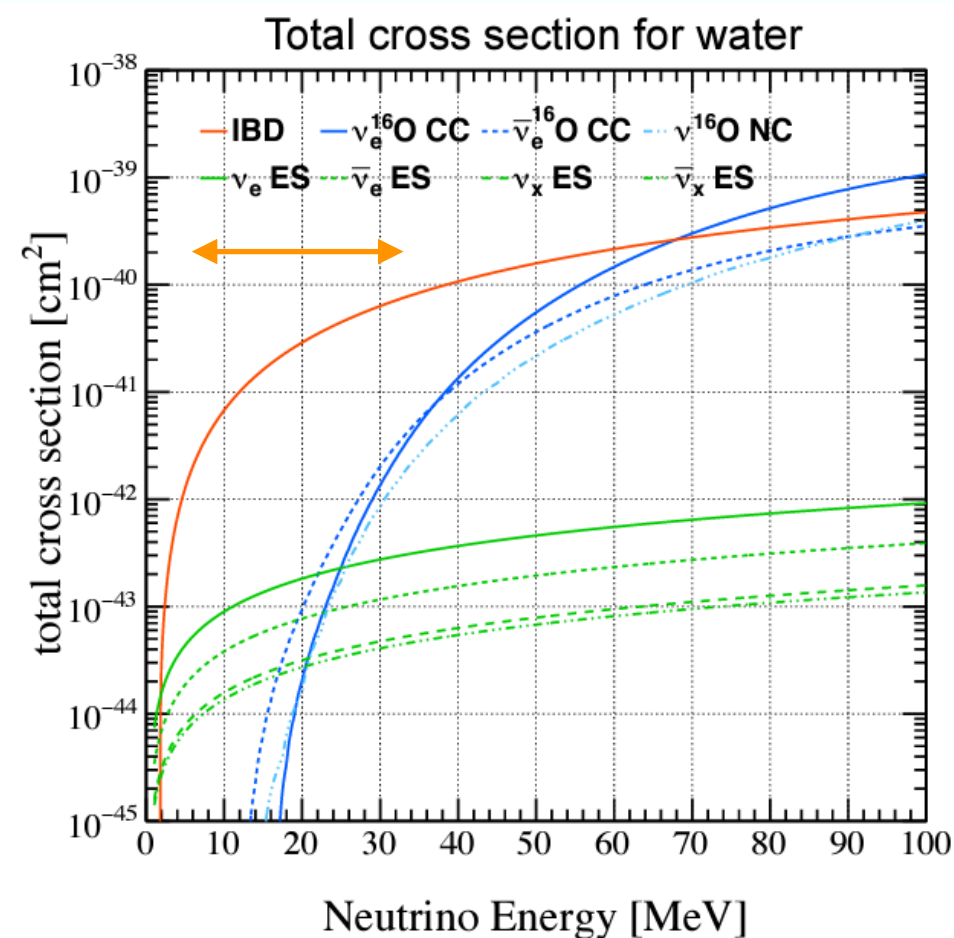


Search for DSNB

Super-Kamiokande



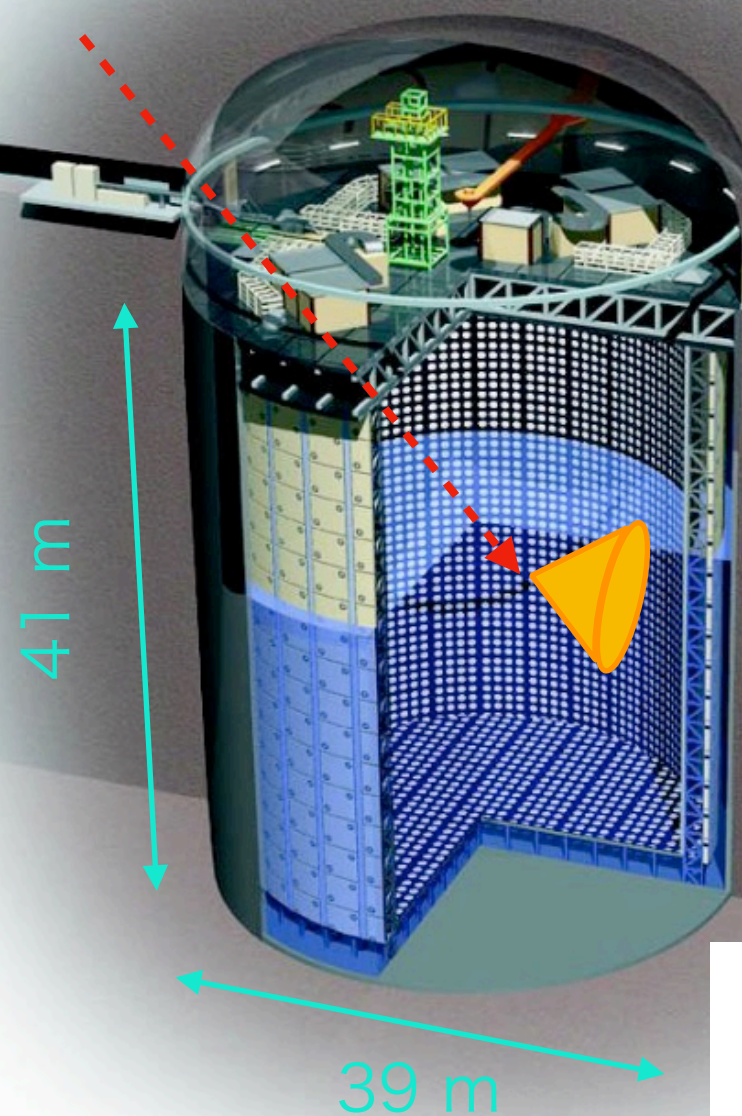
- 50キロトンの超純水を使った検出器
- 反応で出るチェレンコフ光を約1万本の光電子増倍管で観測
-> 粒子のエネルギーや方向を測定
- 断面積 ($\propto$ 反応確率) の高い逆ベータ崩壊反応を利用して超新星由来のニュートリノを探索可能！



陽電子と中性子を両方検出できると、
ニュートリノがきたことをより確実に
判別できる。。。
-> 中性子検出能力を向上する改造を！

SK-Gd Project

Super-Kamiokande

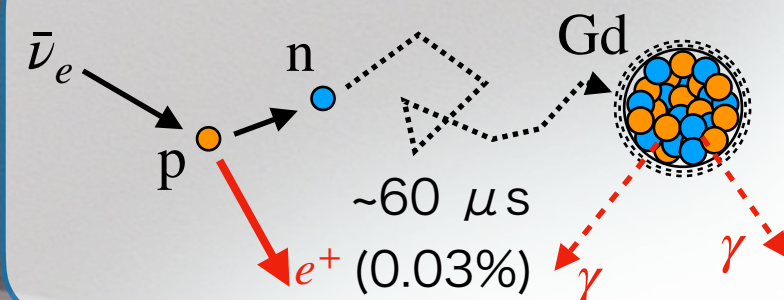


Gd Water System



- 50 ktonの水チェレンコフ検出器
- ガドリニウムを溶解した観測が始動
2020-2022: Gd 0.01%
2022-現在: Gd 0.03%
=> 中性子を伴うニュートリノ反応を効率よく識別可能！

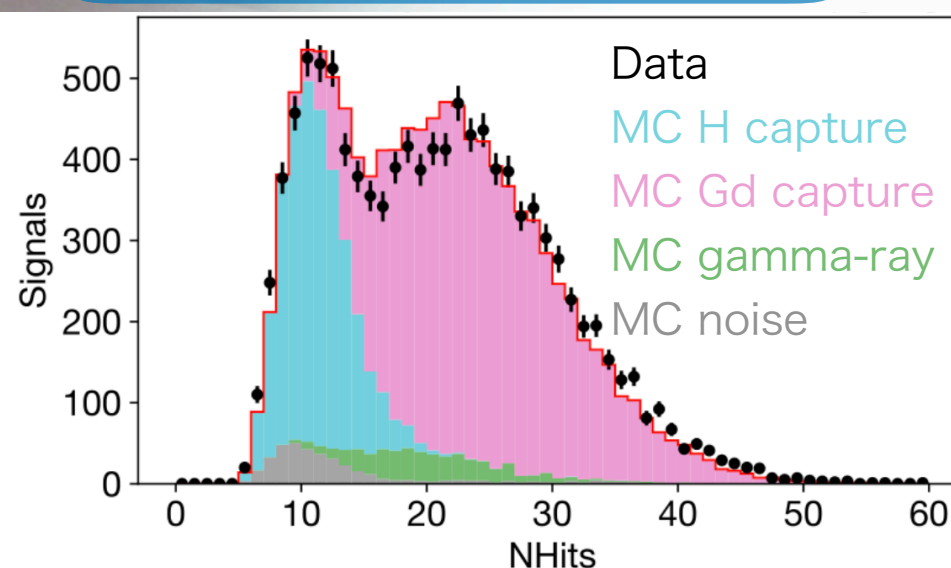
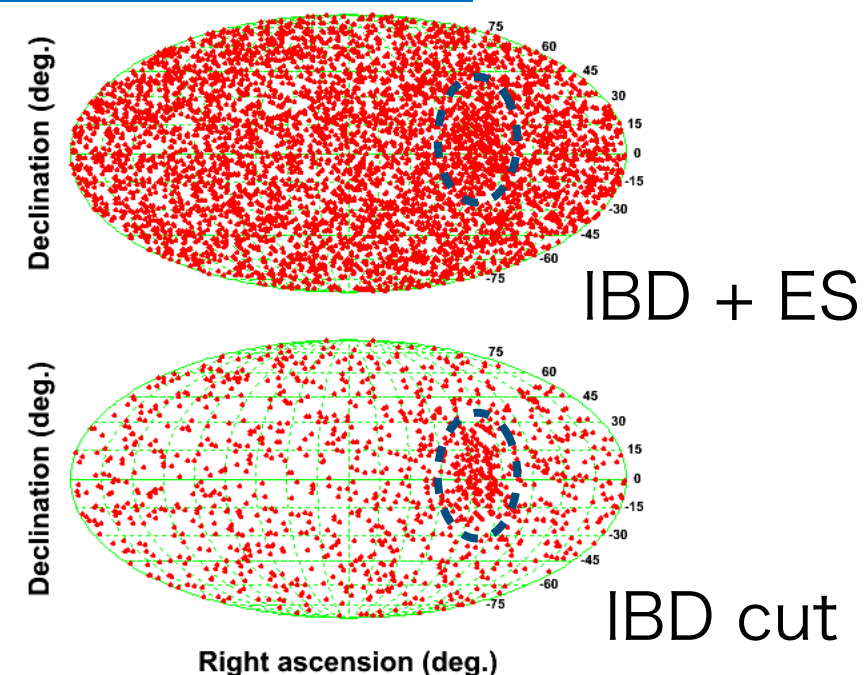
逆ベータ崩壊反応



Gd (主に¹⁵⁵Gd、¹⁵⁷Gd)

- 熱中性子捕獲断面積が最大
- 捕獲時に合計8 MeVの γ 線

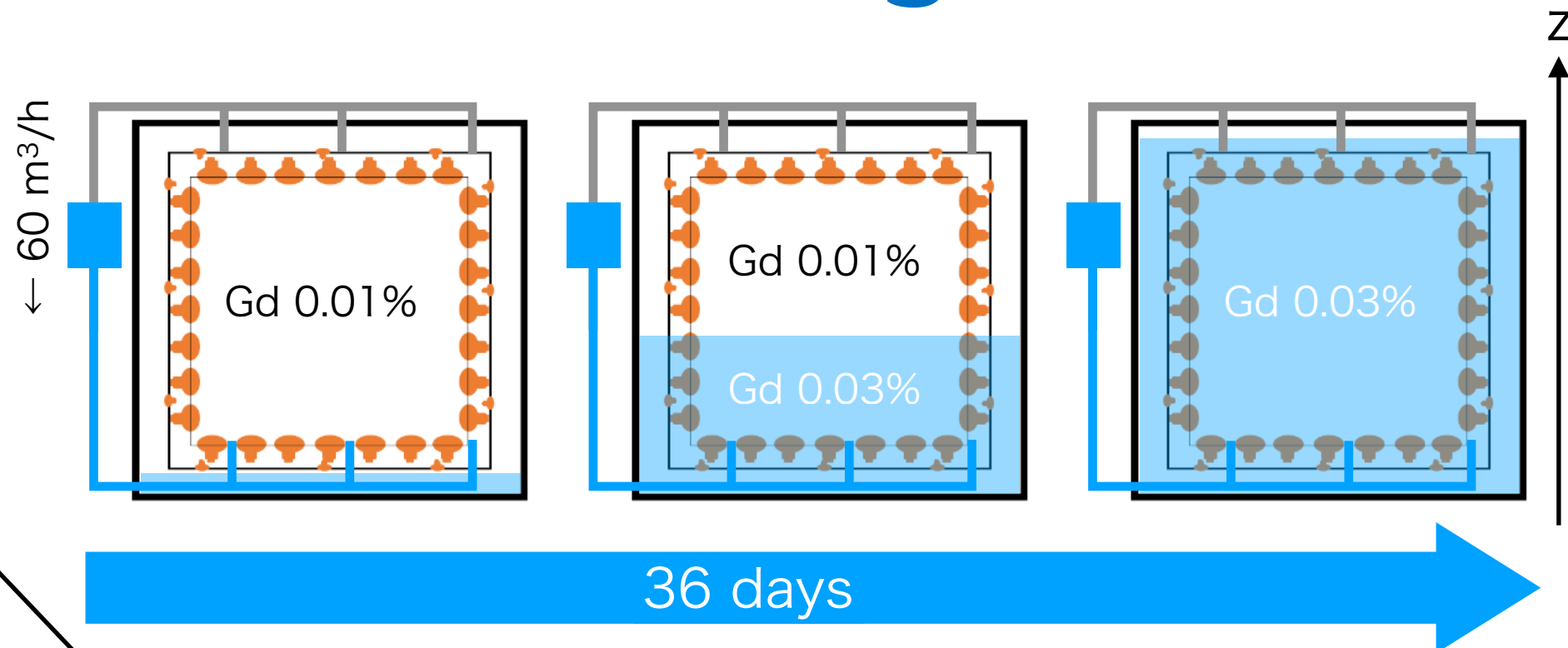
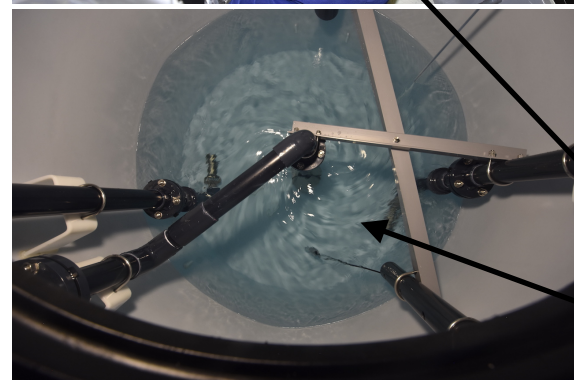
SN Burst Pointing



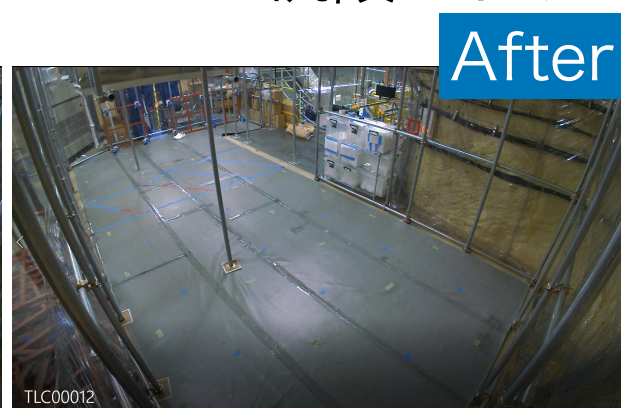
S. Han, Ph. D. Thesis (2023)



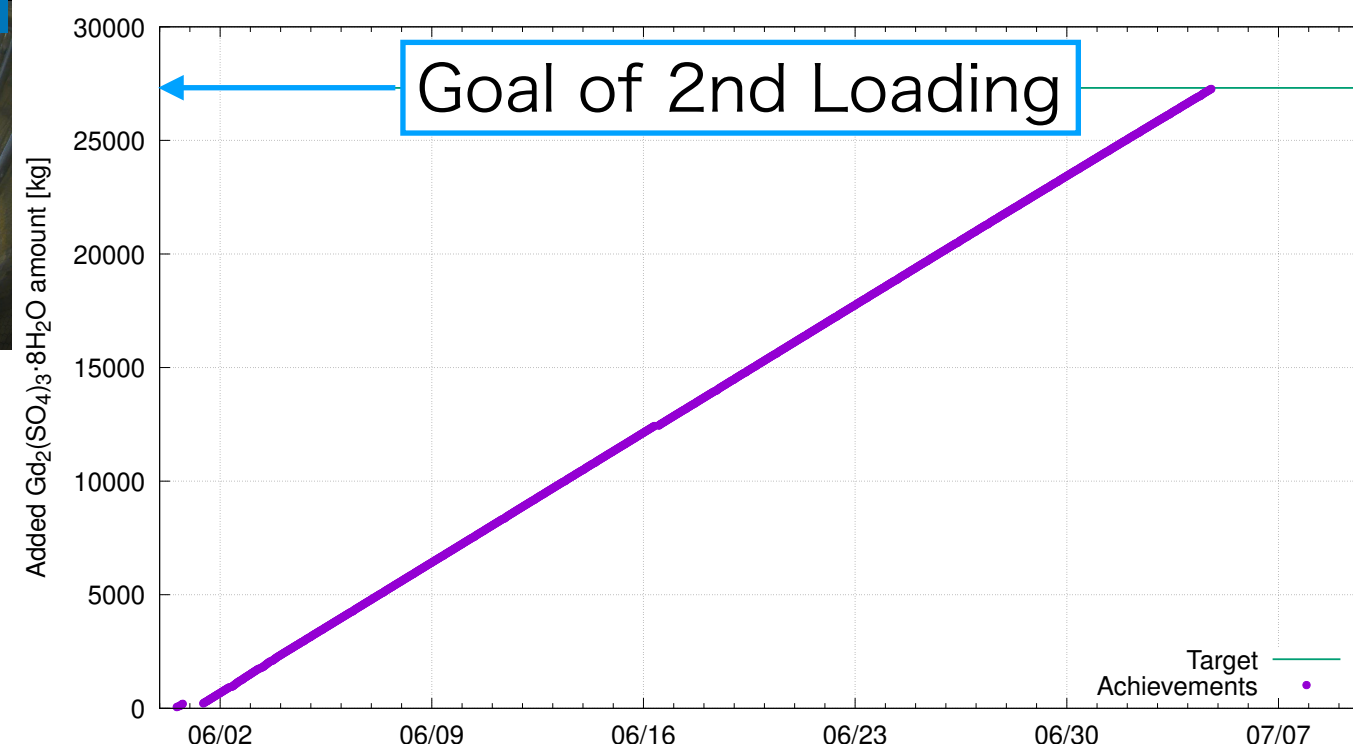
Additional Gd Loading in 2022



硫酸ガドリニウム八水和物を少しずつ溶かして送る



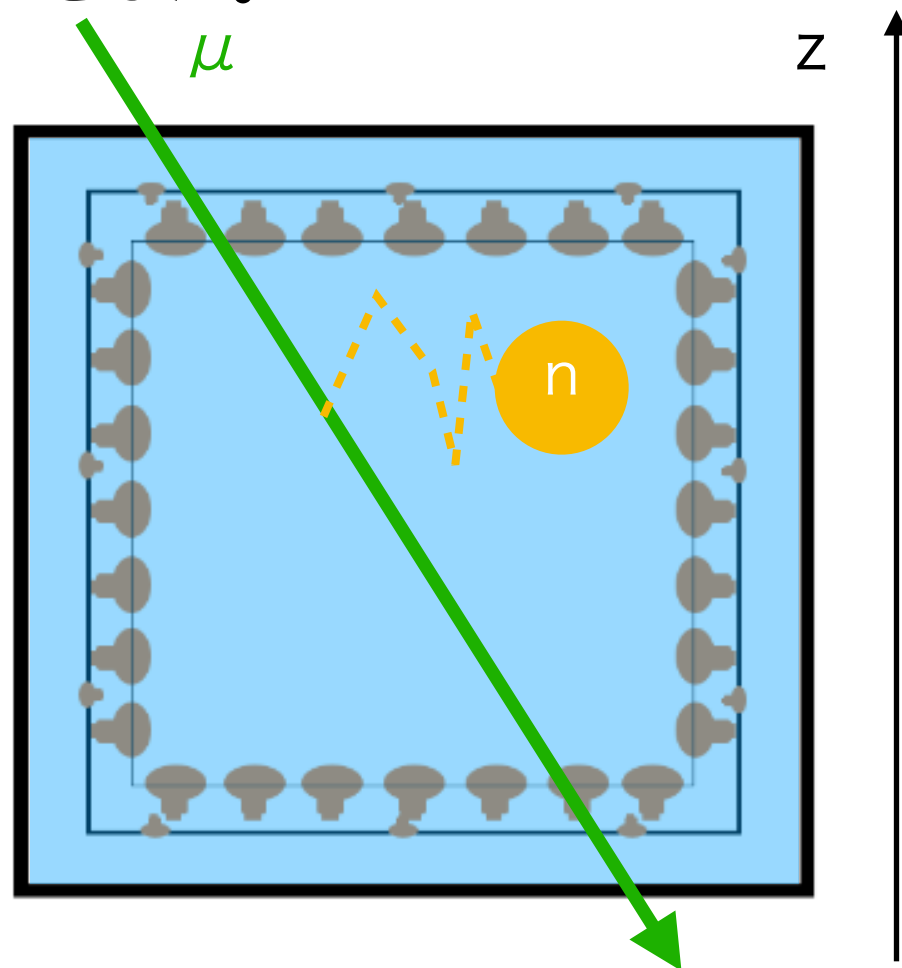
- ・ 段階的に濃いGd水で置き換えていく
=> 800 kg/日で導入
 - 約1ヶ月で27トン溶かした
- ・ 実データでGdが導入をモニター



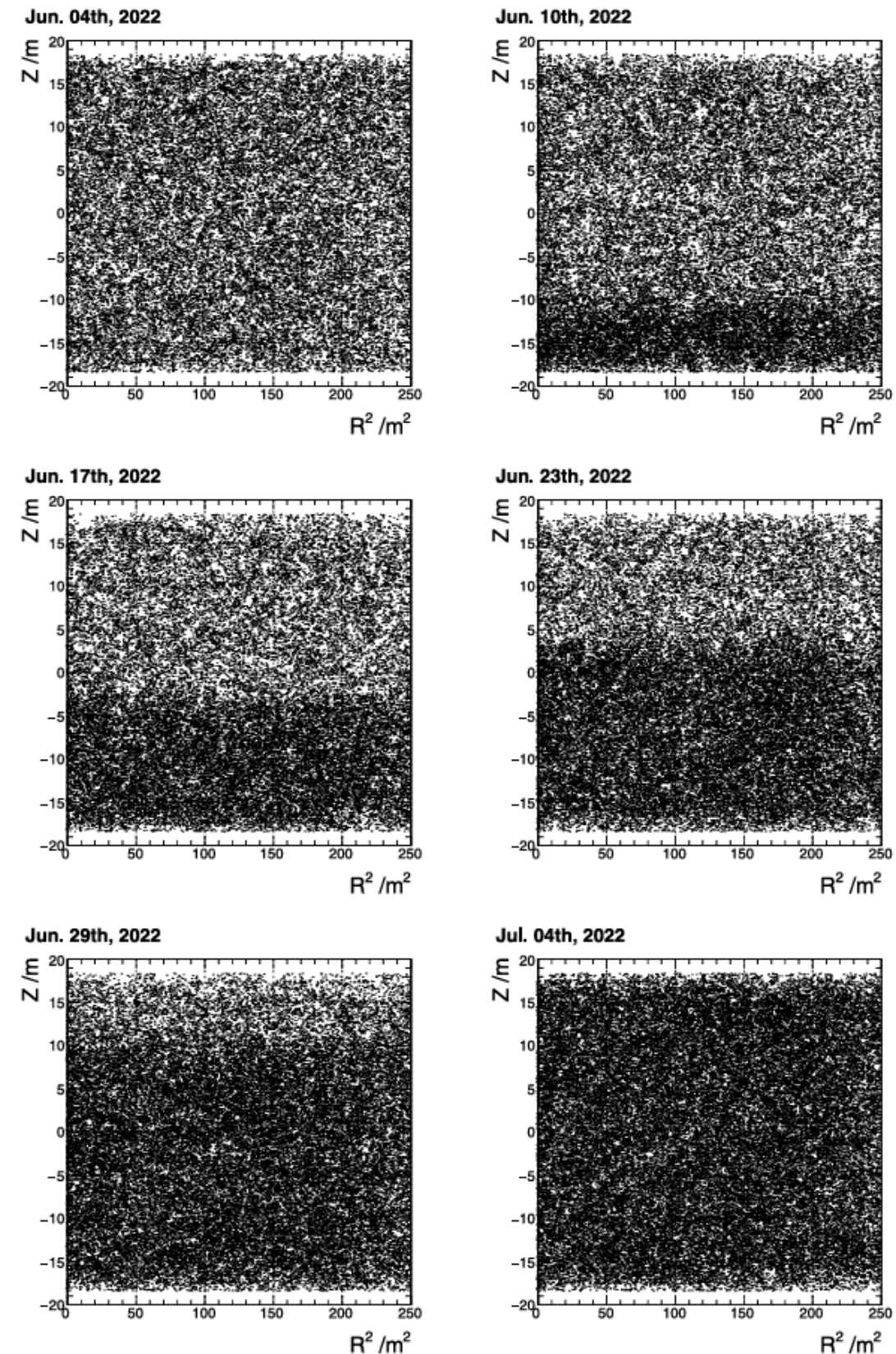
Gd Monitor using Muon

13

- ガドリニウムが濃くなると中性子検出数が増える！
=> 宇宙線ミュオンが通過したときに作られる中性子を測ってガドリニウム濃度のモニターをした。



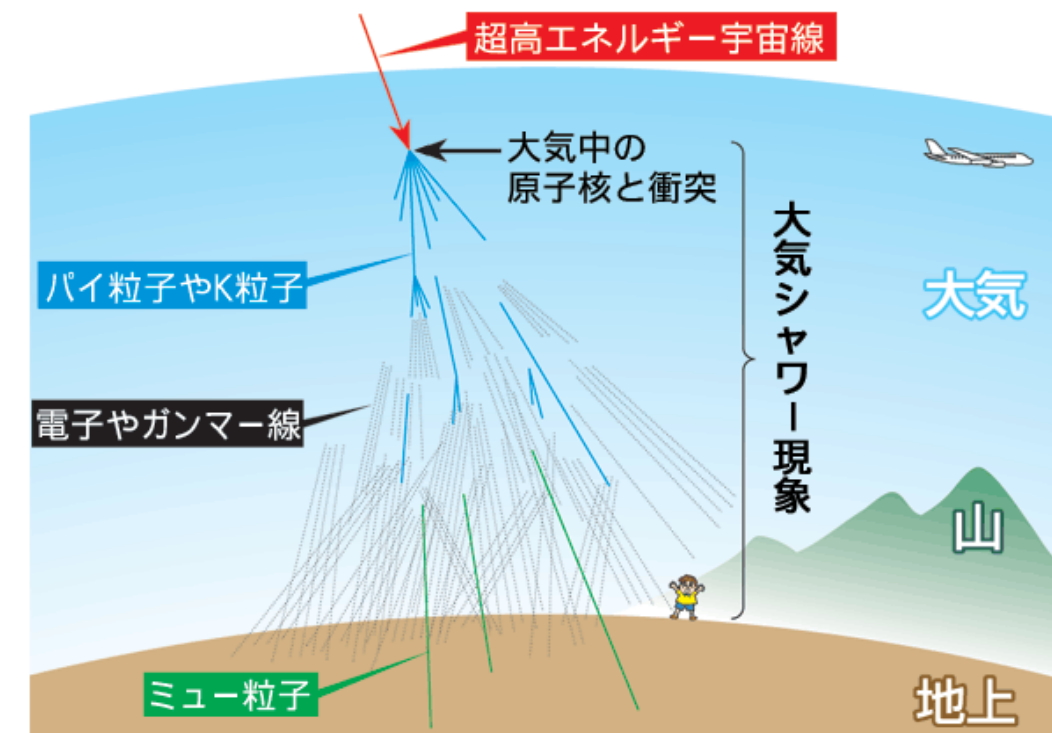
ガドリニウム導入は無事完了！
性能を向上して観測を継続中



Backgrounds of DSNB ¹⁴

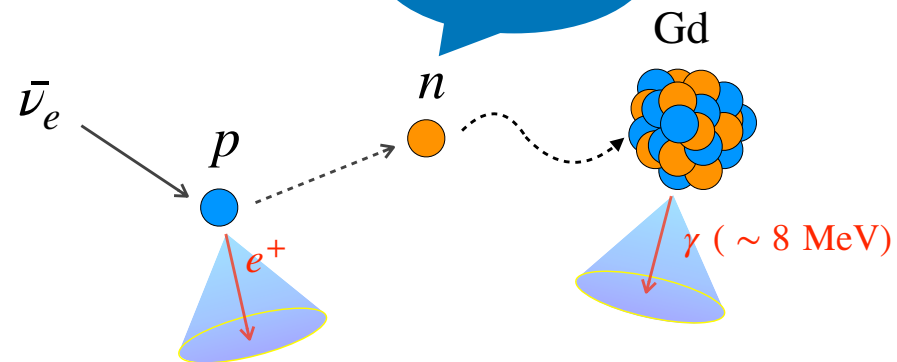
- 大気ニュートリノは、一次宇宙線 (陽子) と大気中の原子核 (窒素など) の反応で作られたハドロンの崩壊で生成され、地表に降り注いでいる。

信号: 逆ベータ崩壊反応 (IBD)



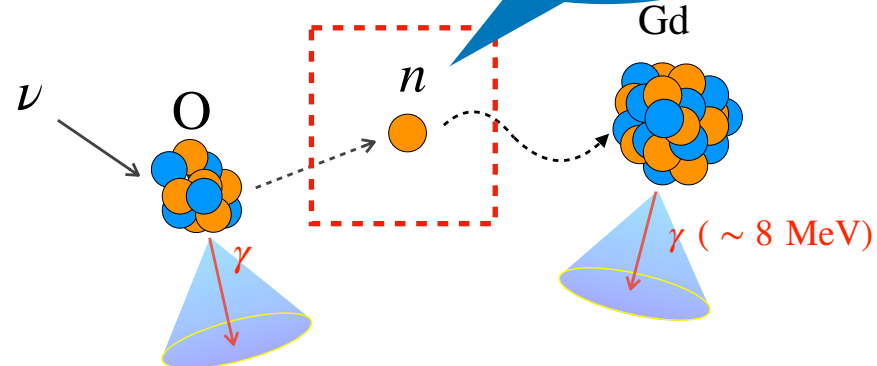
IBD (DSNB)

O(1) MeV

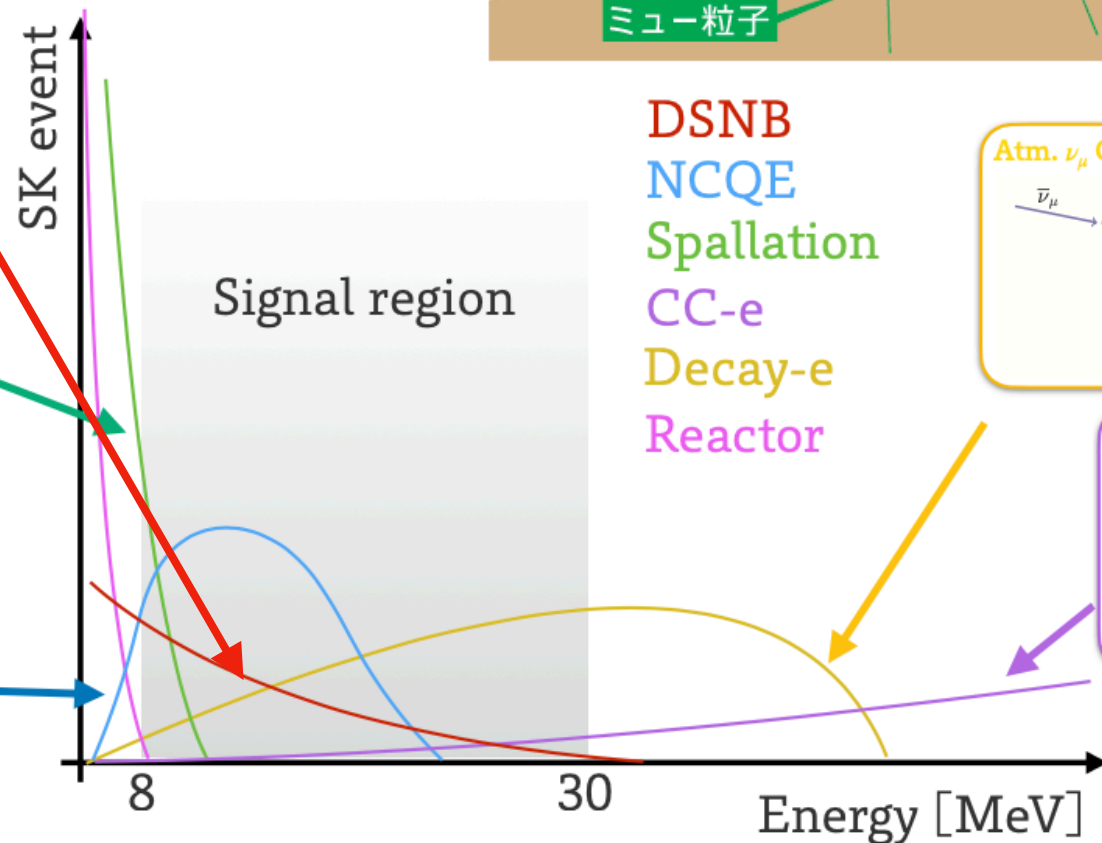


NCQE (Atm. ν)

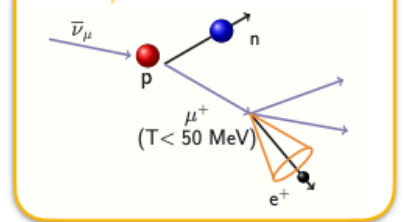
O(10²) MeV



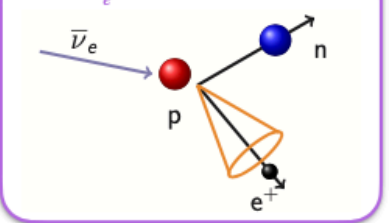
背景事象: 中性カレント準弾性散乱 (NCQE)



Atm. ν_μ CC interaction



Atm. ν_e CC interaction



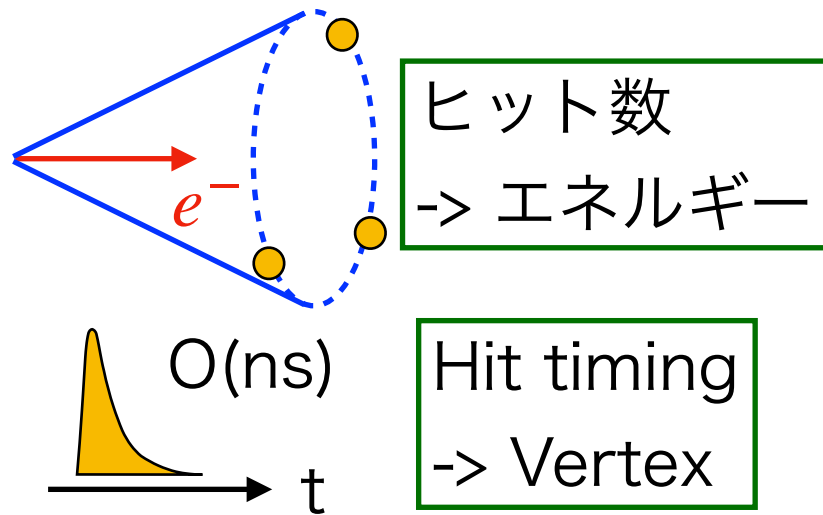
大気ニュートリノ Charged-Current と宇宙線 Spallation の谷間が DSNB の信号領域
しかし、NCQE は IBD と区別が難しい -> よく理解しておく必要がある。。。

DSNB Search in SK

15

SK LowE解析の物理変数

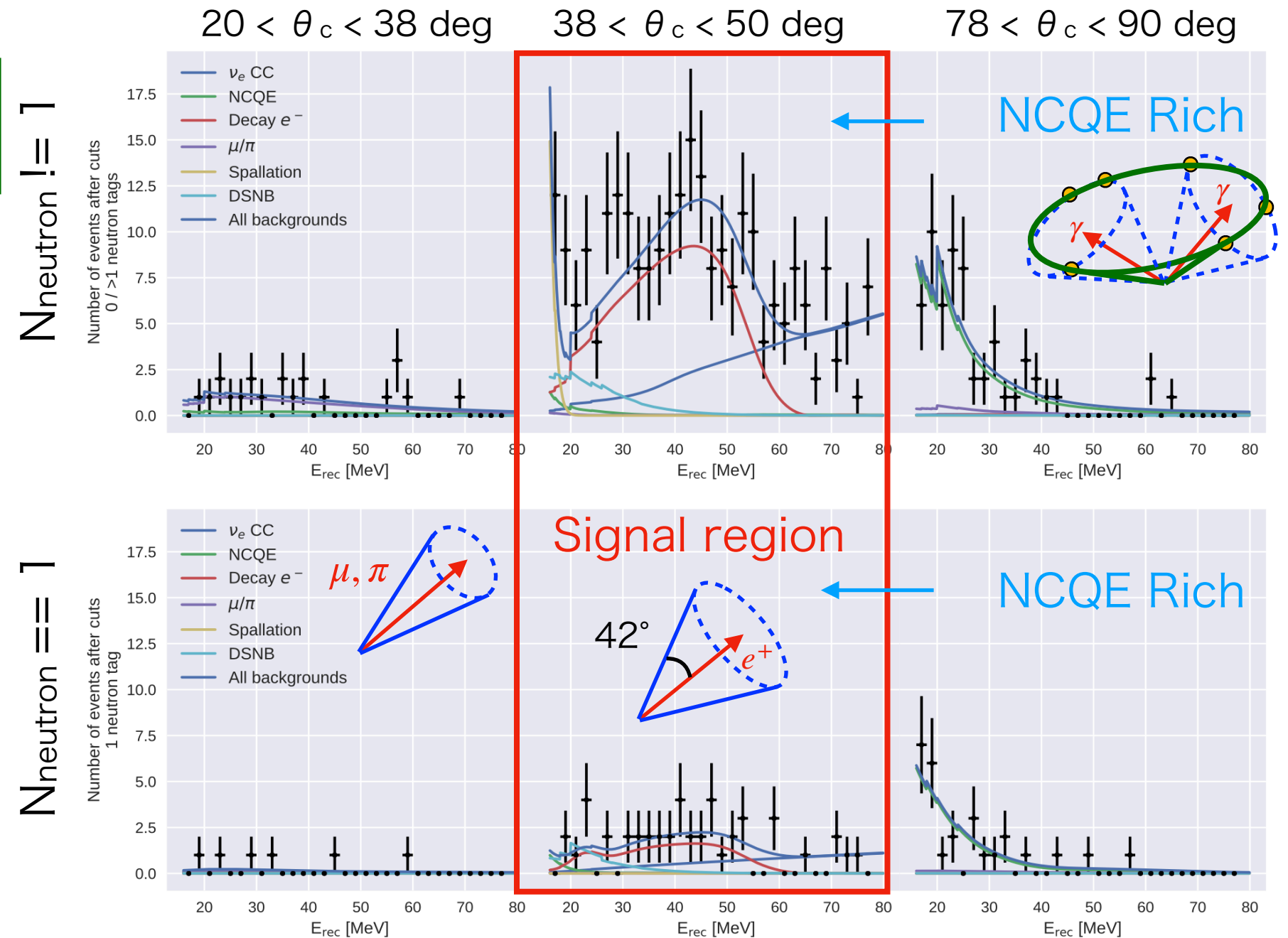
3-hit combination
-> チェレンコフ角



- DSNB信号はIBDのため
 - (陽)電子らしさ
 - 中性子数 1個を要求。
- Side Bandも使って
Unbinned spectral fit
-> 信号領域の背景事象量をconstraintする

- SKの物理解析では、PMTのヒット数、パターン、タイミングで観測した物理事象を特徴づけている。(60 MeV以下の話)

SK-IV DSNB paper, PRD 104(12):122002, 2021



cross sectionだけでなく分布も把握したい => ニュートリノビームで測る！

Why NCQE in T2K?

16

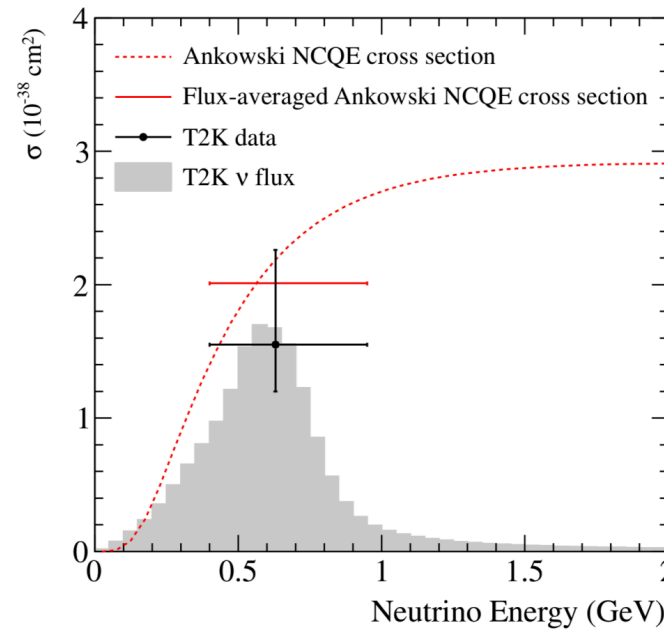
- 大気ニュートリノとエネルギーが似ている
+ $\nu/\bar{\nu}$ を分けて測定可能
(NCだからフレーバー依存なし)

- 大気 ν はランダムのためDSNBサンプルと分離できない
-> 信号領域を避けた解析 :(
- ビームはタイミングがわかる
= 完全に独立なNCQEサンプル
-> 信号領域内の特徴も測れる！

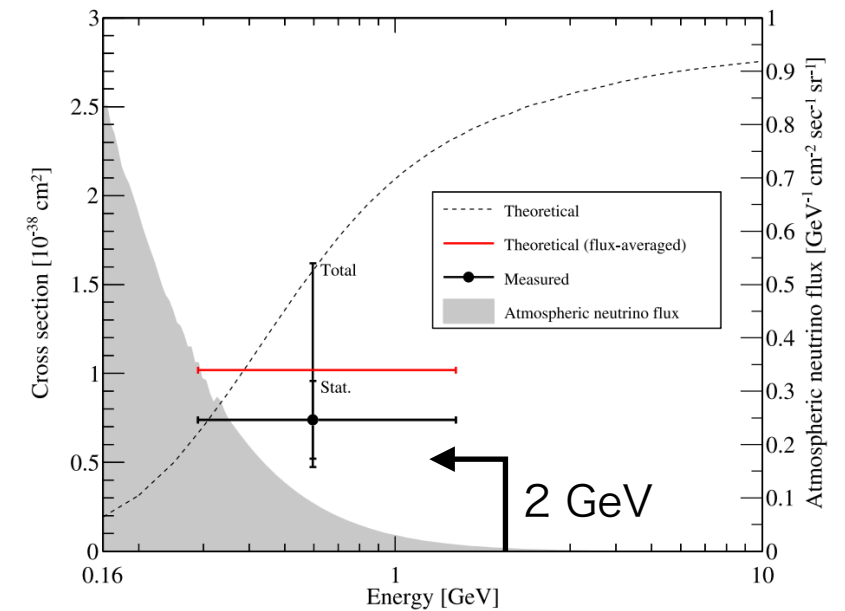
- チェレンコフ角
... などのヒットパターン
- 中性子多重度

これが可能なのはSK/T2Kだけ！

J-PARC ν ビーム (FHC)

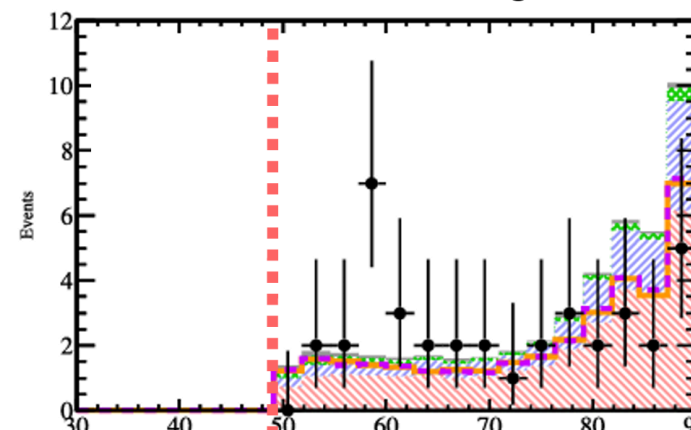


大気 ν ($\nu/\bar{\nu}$)

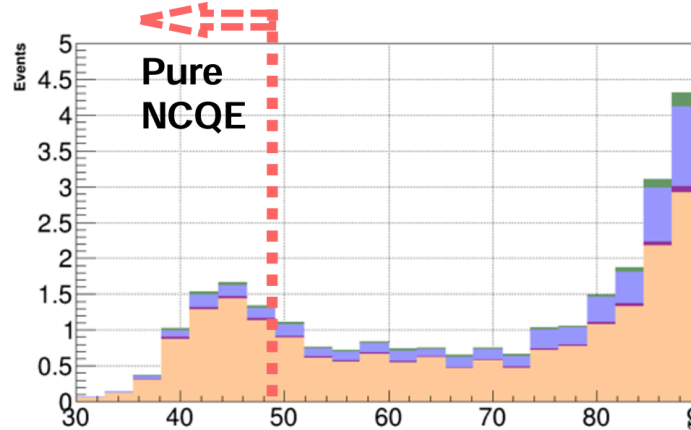


Cherenkov Angle

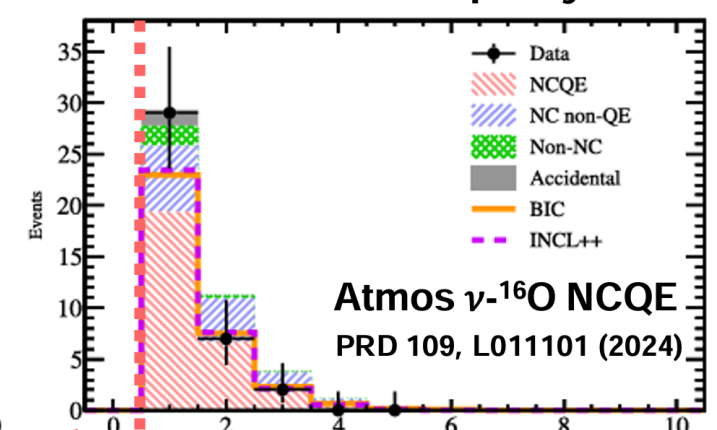
SK atm. ν



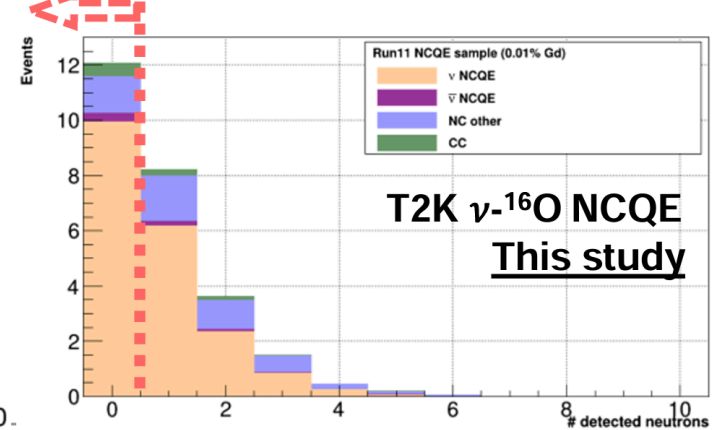
T2K beam ν



Neutron Multiplicity



Atmos ν - ^{16}O NCQE
PRD 109, L011101 (2024)



T2K ν - ^{16}O NCQE
This study

チェレンコフ角 /deg

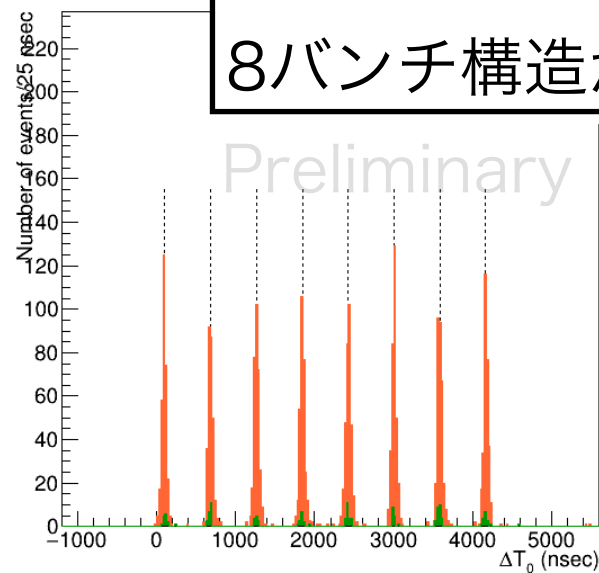
中性子多重度

T2K

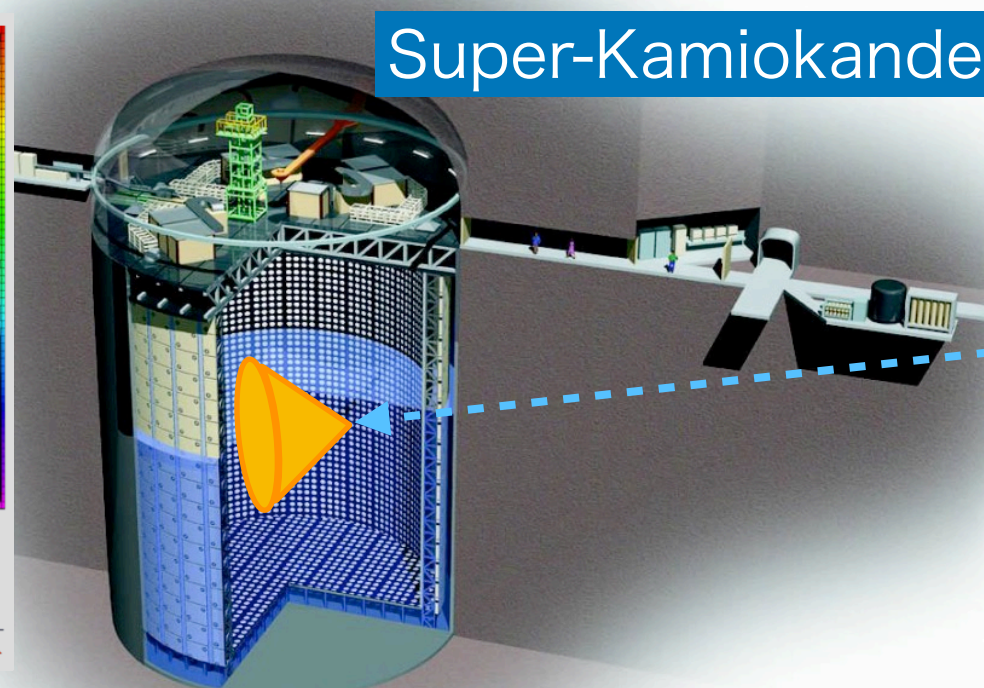
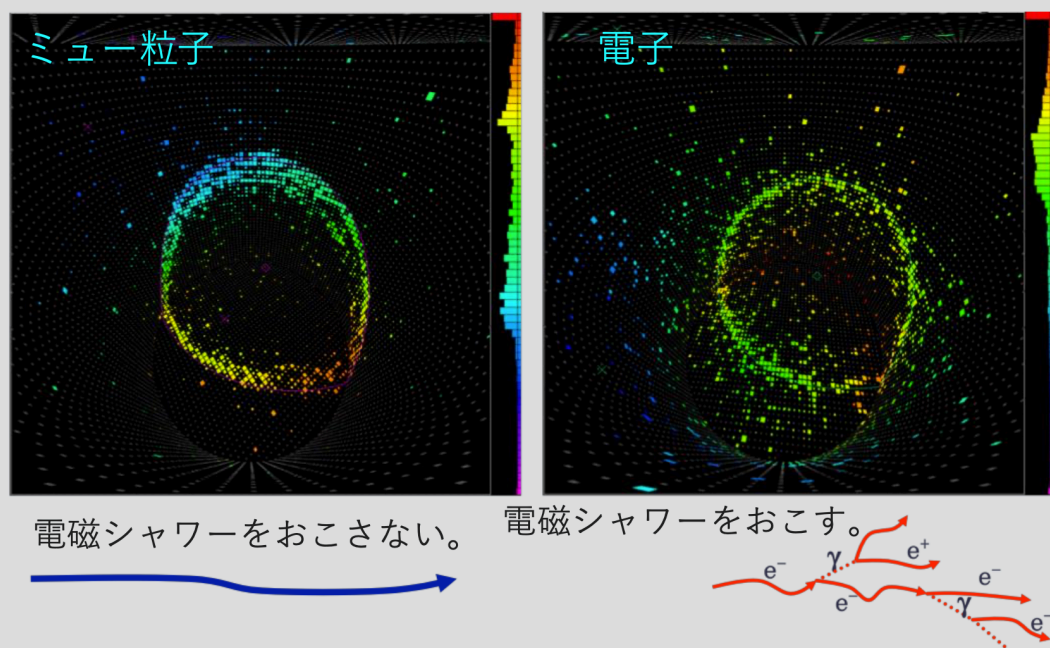
- ・ 東海-神岡間 長基線ニュートリノ振動実験
- ・ 14カ国、75機関から約575人が参加する国際共同利用実験

ホームページ <https://t2k-experiment.org/ja/>

J-PARCの陽子ビームと同じ
8バンチ構造がみえる！



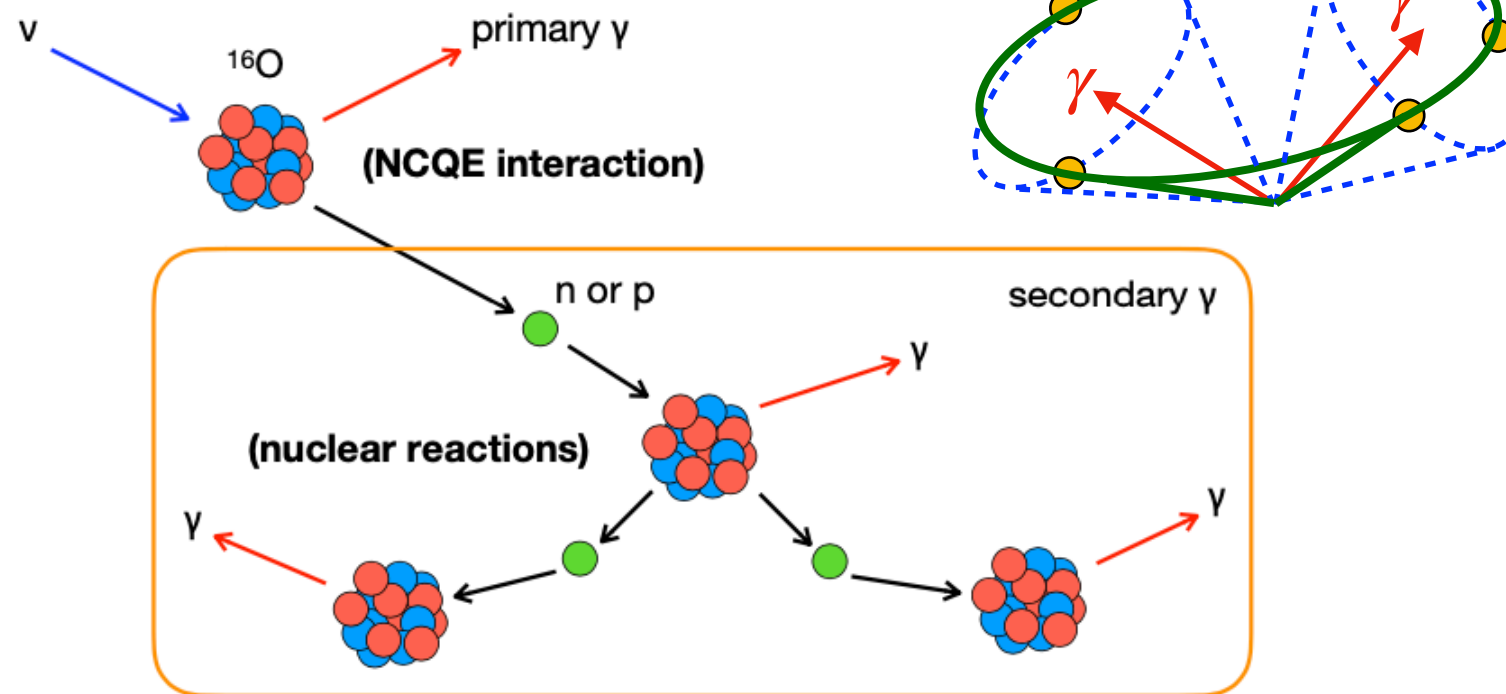
ニュートリノ事象
タイミング



注) 低エネルギーではこんなに綺麗に見えない

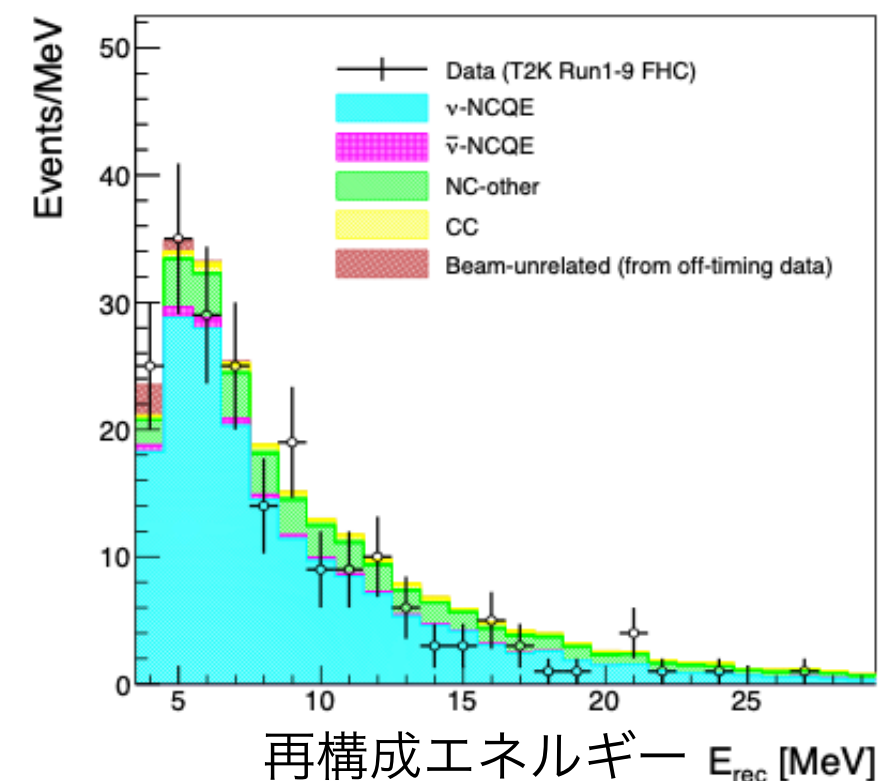
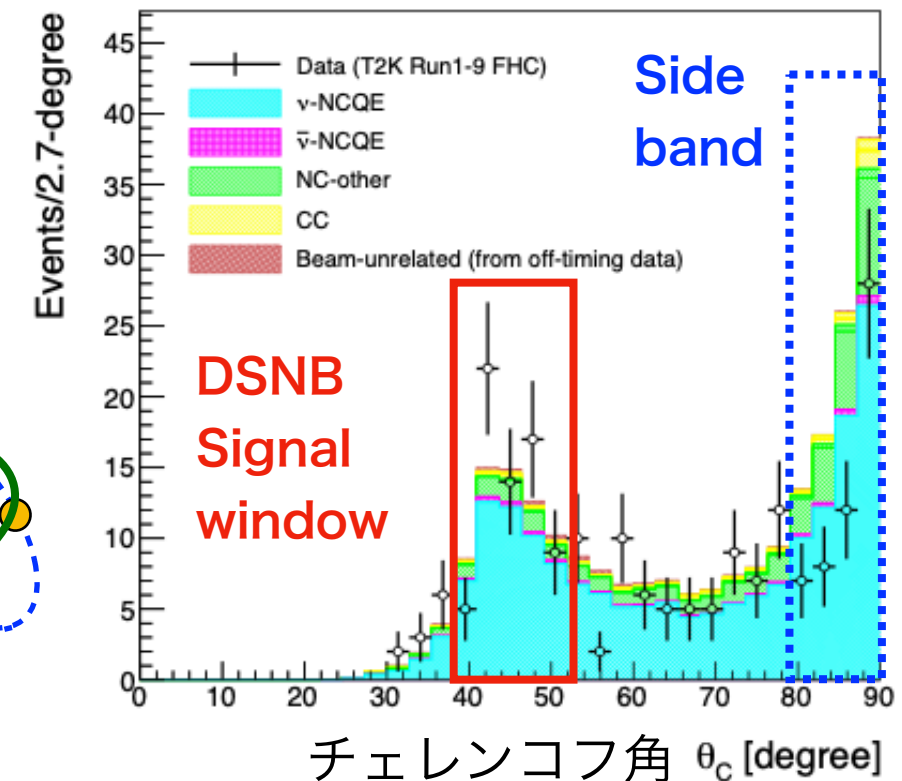
Understanding so far ¹⁹

- T2KのRun1 - 9のデータでNCQE反応断面積を測定
 - 再構成チェレンコフ角分布データとシミュレーション予測に大きな不一致を発見@DSNB side band
 - 角度が大きい領域 = ガンマ線が複数本出るような事象がこのような特徴をもつ



- NCQEで生じた中性子が水中で2次反応を起こすとこのような現象が説明できる。
=> NCQE背景事象の精密予測には、中性子 (< GeV) と酸素原子核の反応を正確に理解する必要がある！

PRD 100, 112009 (2019).

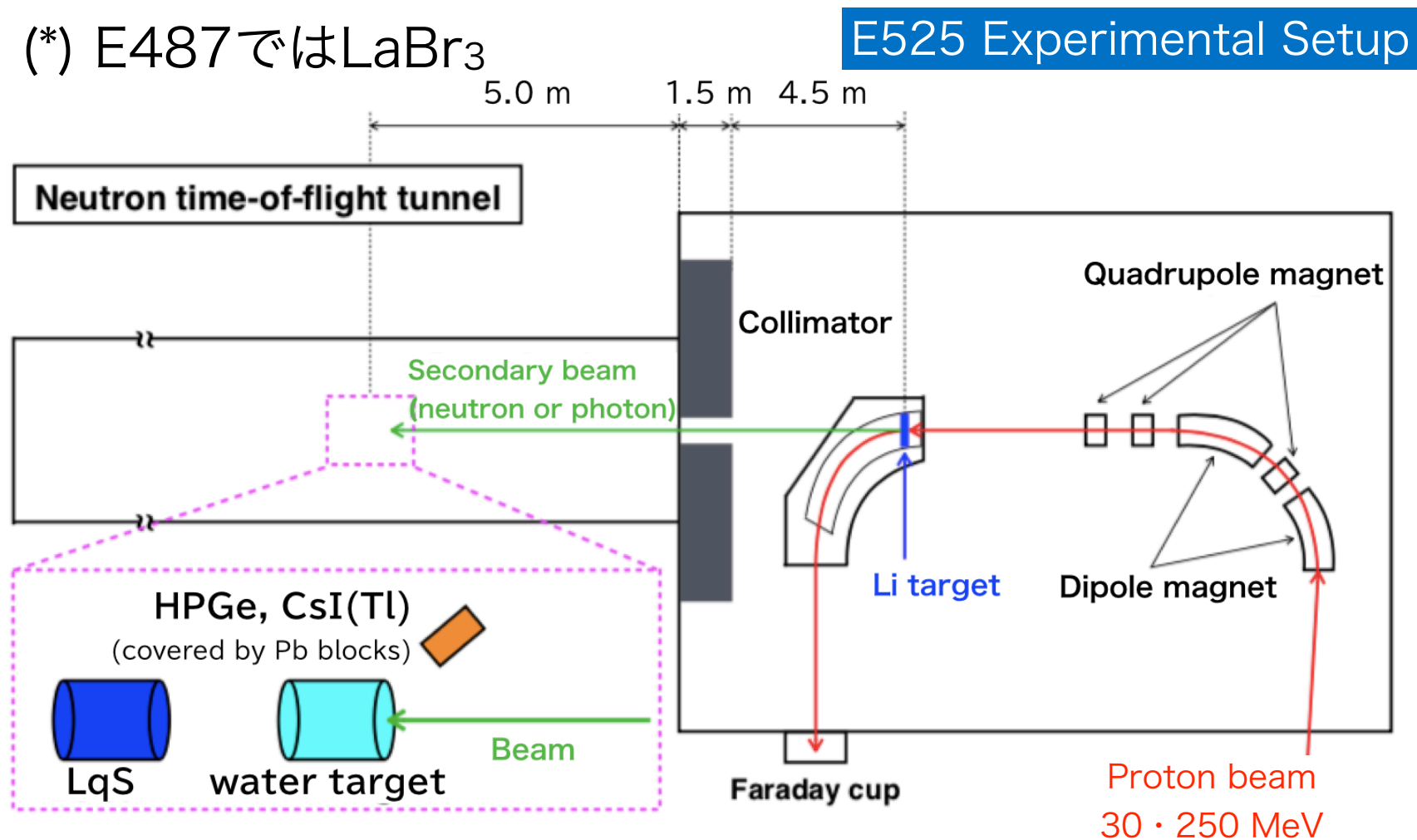


RCNP E525 Experiment²⁰

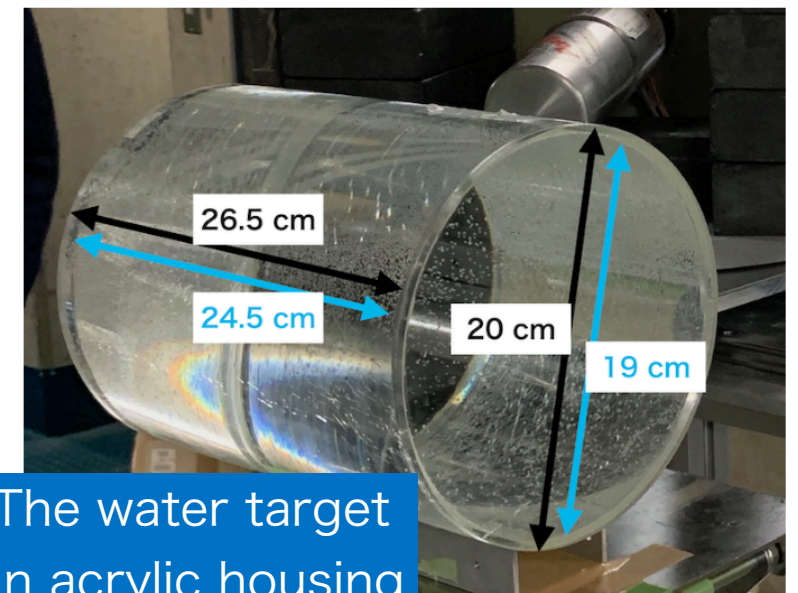
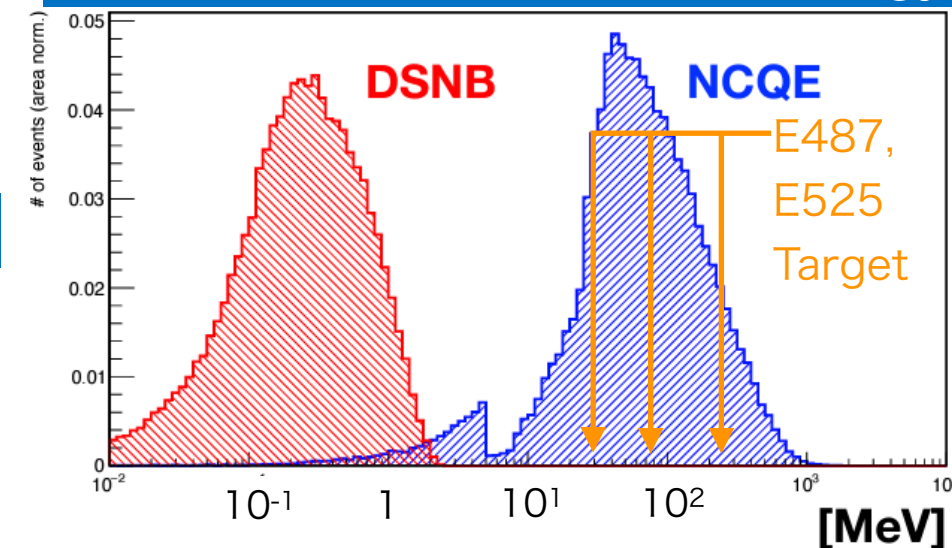
T. Tano et al, PTEP 113D01, 2024

- T2Kの測定から正確な中性子反応モデルが必要であることがわかった。
-> 自前で実験してより良いシミュレーションモデルを作ってしまうおう！
- RCNP E525: n-O非弾性散乱のガンマ線生成断面積を測定
 - 阪大RCNPの準単色中性子ビームを水標的に照射
 - ガンマ線はゲルマニウム検出器(*)で測定
 - > 高分解能でスペクトルを測定

(*) E487ではLaBr₃



Neutrino-induced Neutron Energy



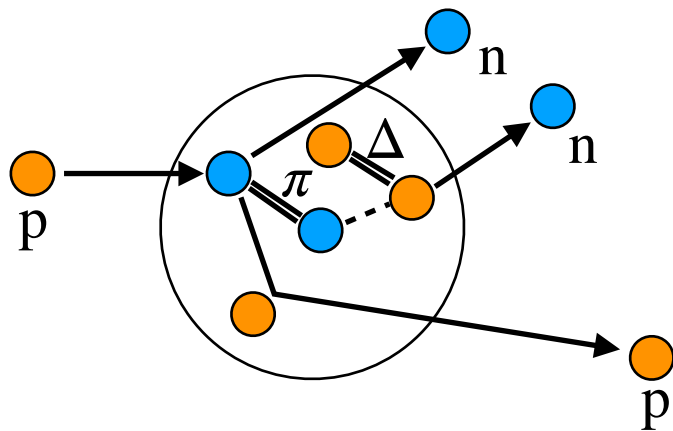
The water target in acrylic housing

Model Update

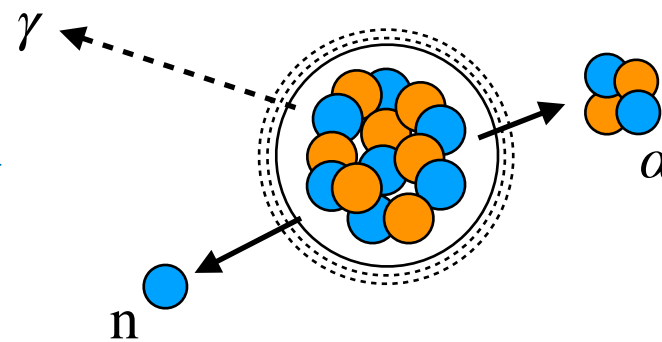
EPJC, 86, 148 (2026)

- MC simulation v.s. the E525 result.
- Geant4で利用可能なHadron Inelasticモデル:

核内カスケードモデル



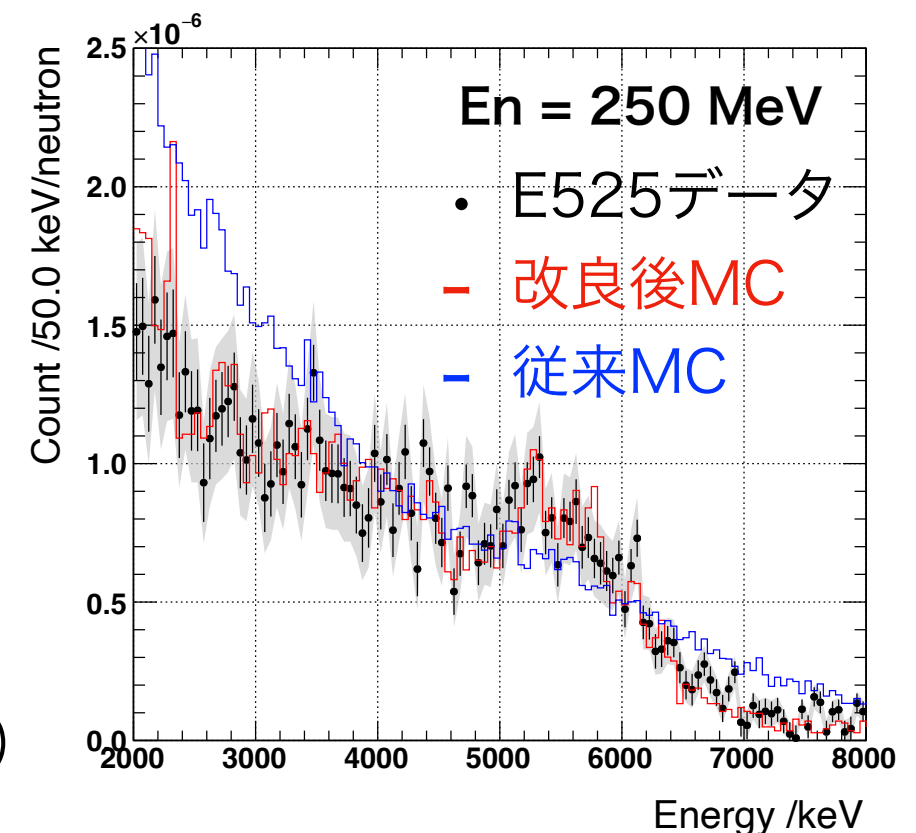
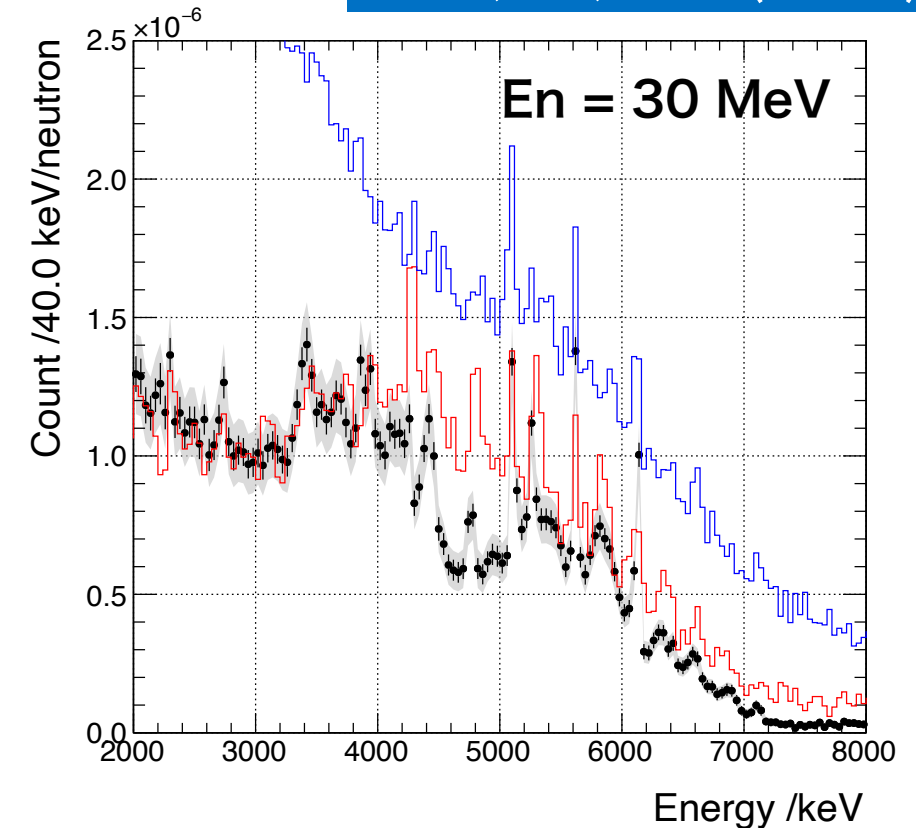
脱励起モデル



- INCL++
 - BIC
 - Bertini
 - G4PreCompound
 - ABLA
 - NucDeEx v2.1 (*)
 - G4cascade unique
- solid line: default choice

- INCL++にNucDeExの脱励起モデルを組み合わせる
-> ガンマ線の多重度、スペクトルともに改善された

(*) S. Abe, PRD 109, 036009 (2024)
またはNeutrino2024 Poster #168



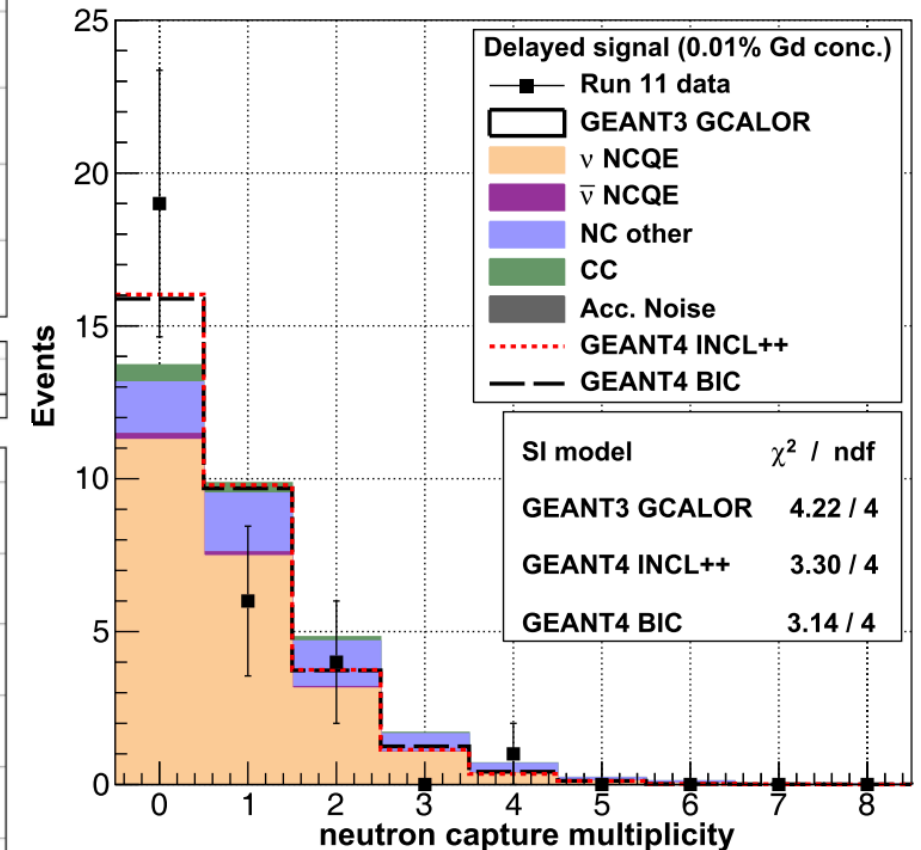
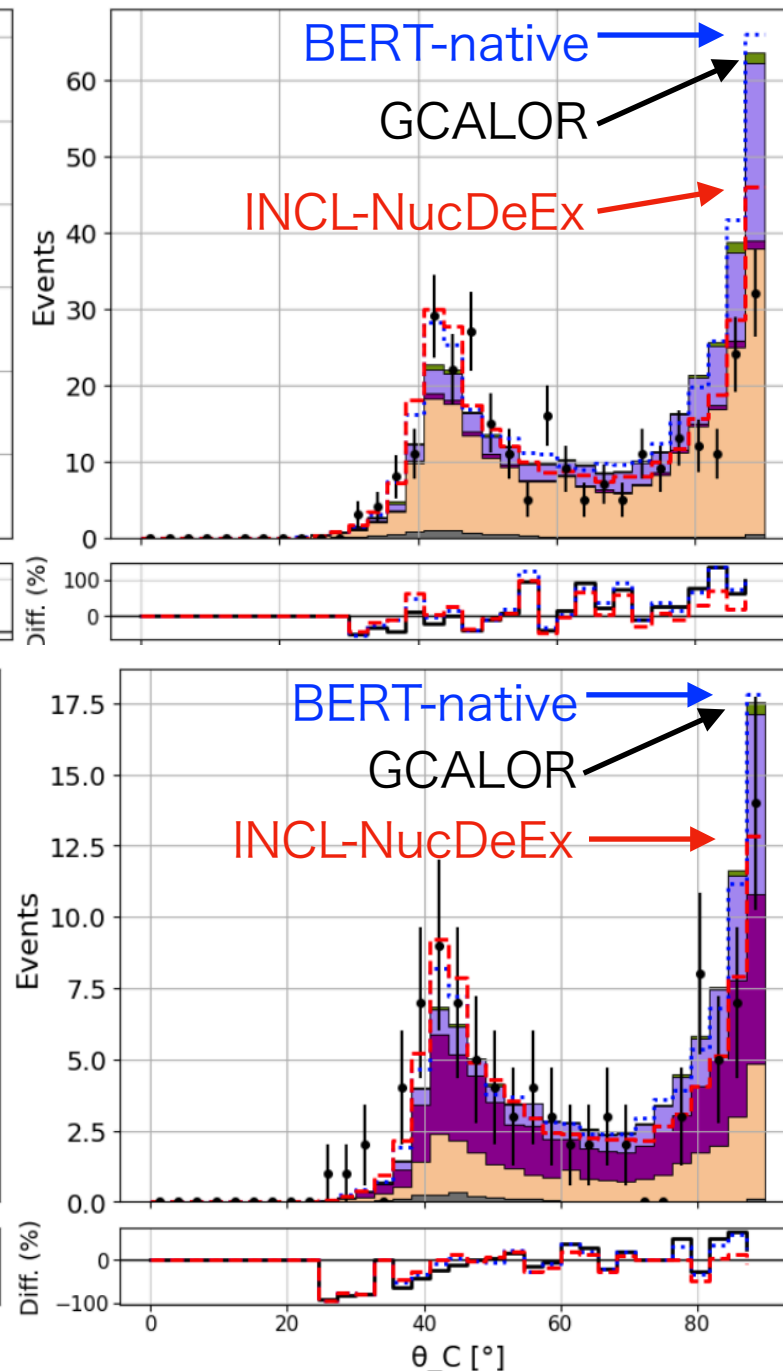
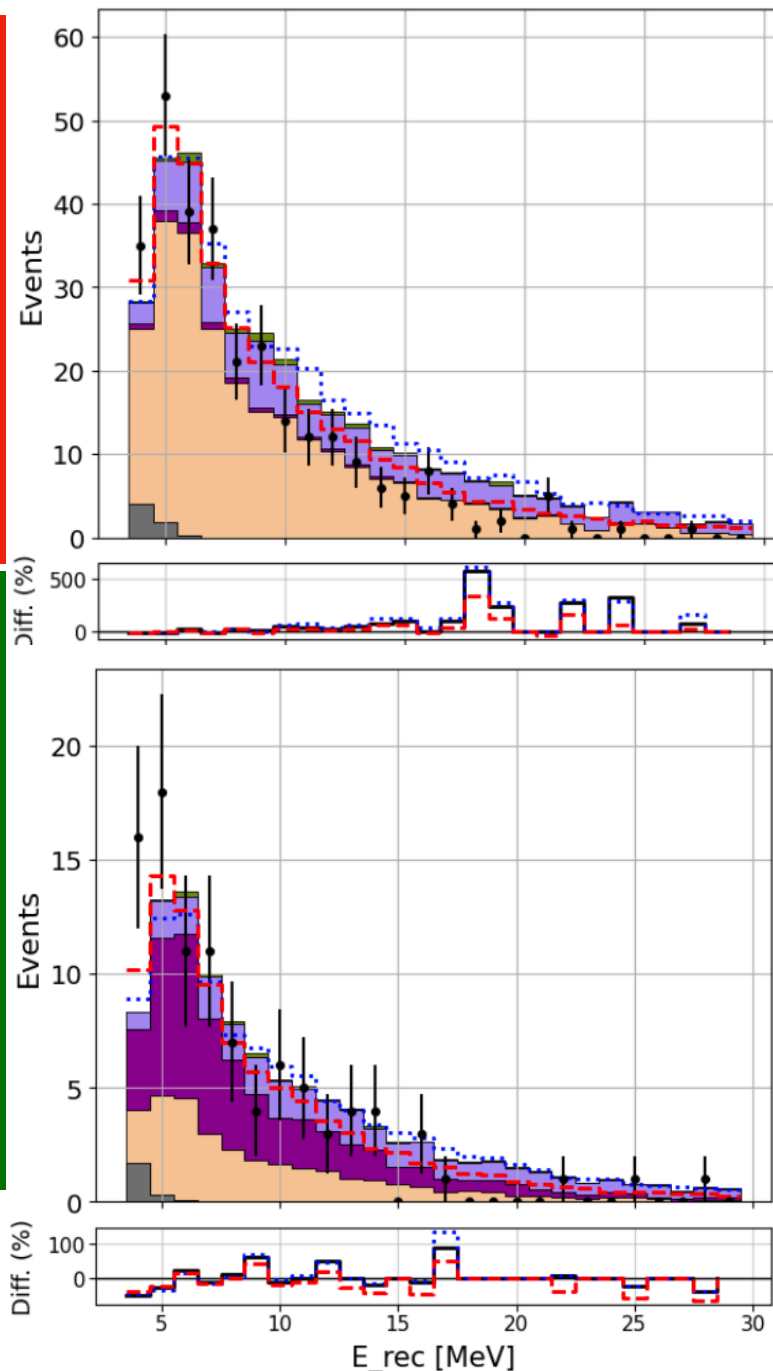
NCQE in T2K Run1-11²²

再構成エネルギー

チェレンコフ角

- SK-Gd期のT2Kデータ (Run11) ではNCQEの中性子数も測定

中性子多重度



PRD 112, 032003 (2025)

(*) BERT-native $\doteq$ GCALOR

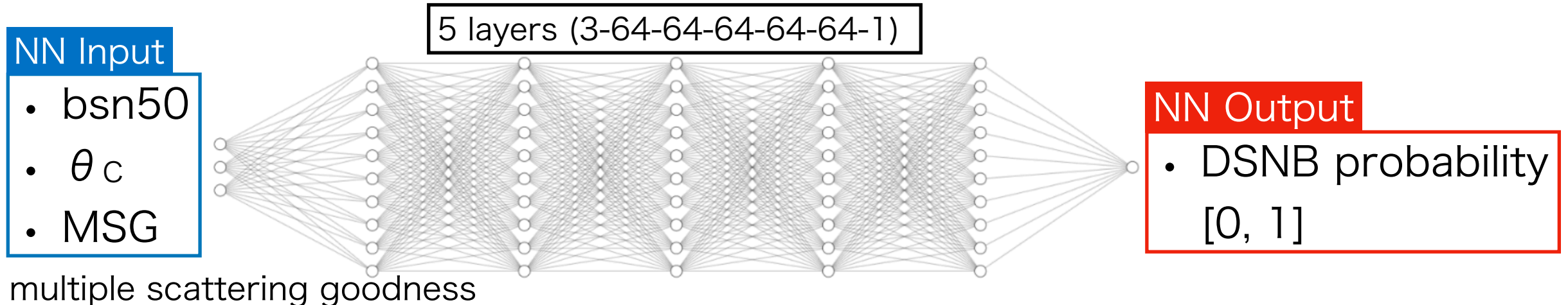
- INCL++ (+ NucDeEx)を採用したシミュレーションがデータをより再現
-> DSNB探索におけるNCQE反応背景事象をより正確に見積もることが可能になった！

ニュートリノモード

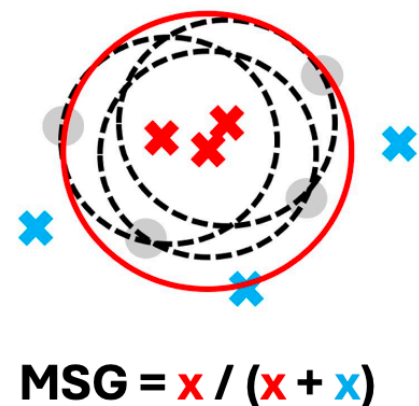
反ニュートリノモード

Neural Network Classifier²³

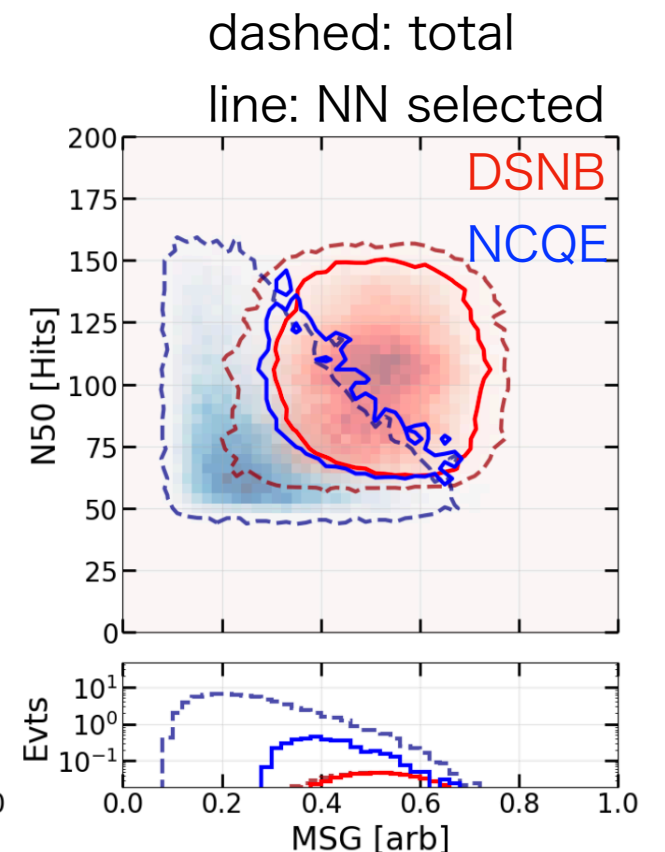
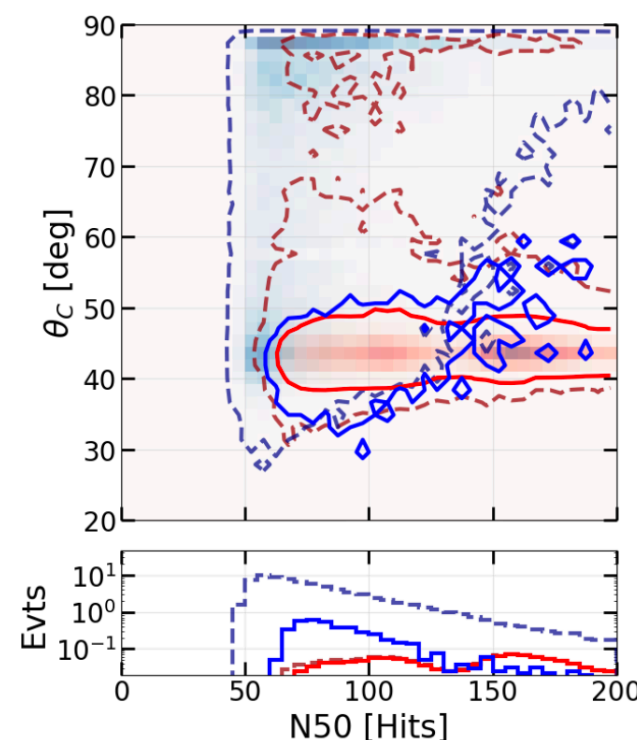
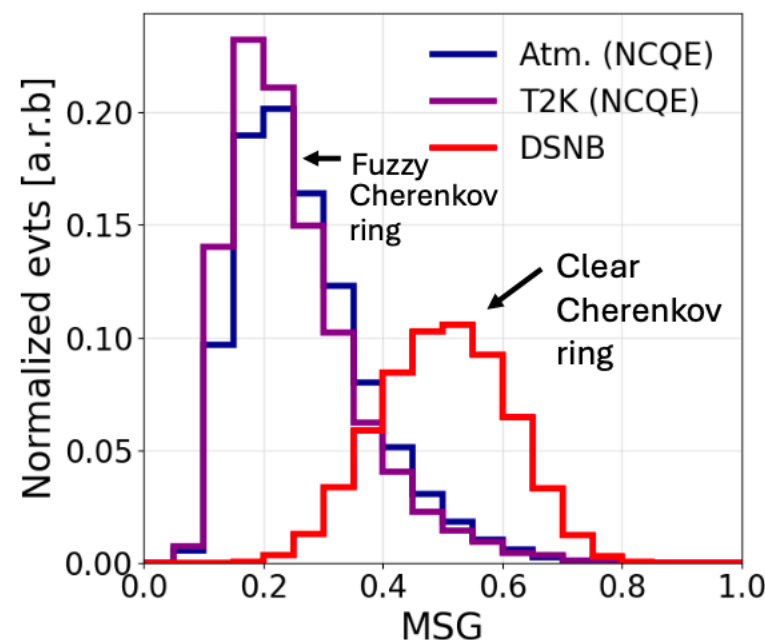
- Improvement of NCQE behavior. Then, further reduction of NCQE BG in DSNB.
-> electron (IBD) and gamma-ray (NCQE) classifier development!



- Constructed the reduction methods using #hits, angle and MSG:
 - 2-dim. event selection (MSG-linear cut)
 - neural network classifier (NN cut)



Fuzziness of
Cherenkov ring



More NCQE Reduction? ²⁴

- NCQE反応の振る舞いがわかってきたが、見積もるだけでなく削減する方法はないか？
→ ニューラルネットワークで陽電子 (DSNB) とガンマ線 (NCQE) を分離する！

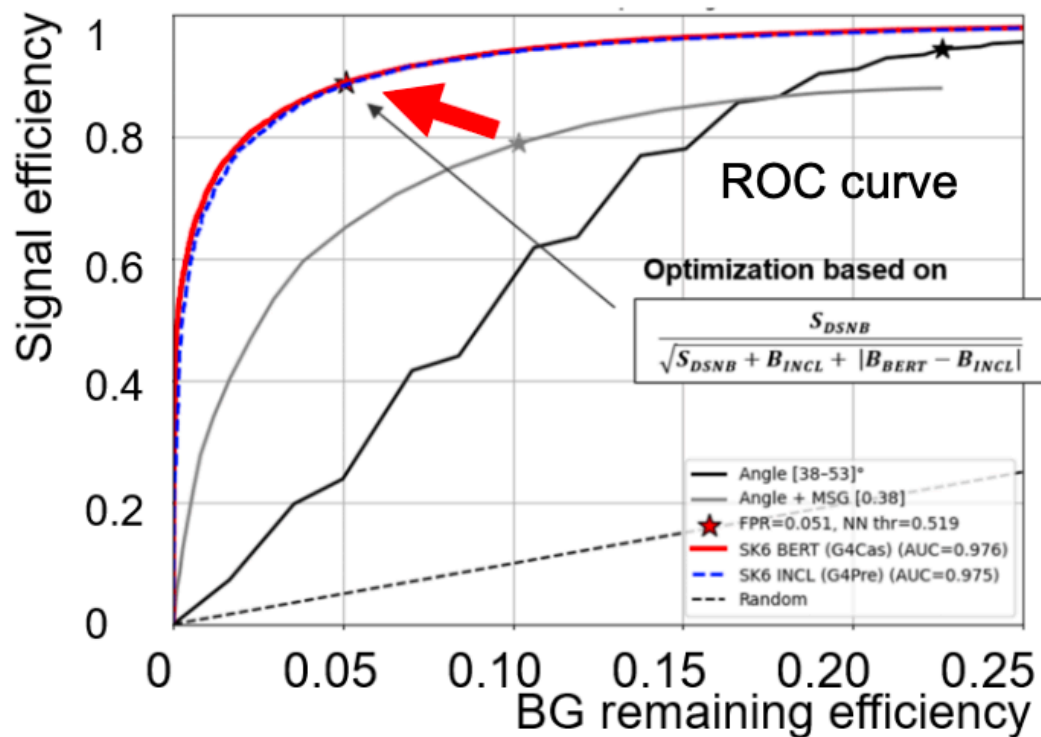
NN Input

- ヒット数
- チェレンコフ角
- MSG

5 layers (3-64-64-64-64-1)

NN Output

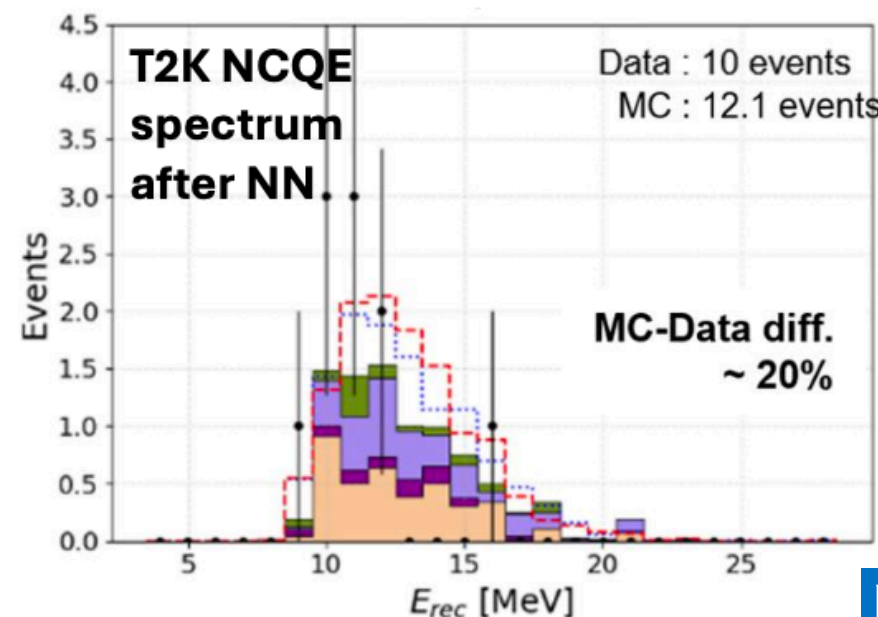
- DSNB 確率
[0, 1]



(Sig. eff., BG eff.)

= (80%, 10%) → (90%, 5%)
2024年解析 最新解析

- NN Cutにより
10%信号効率改善 & NCQE背景事象を半減
- 大気ニュートリノのシミュレーションでTrainingし、T2KのNCQEデータでvalidation!



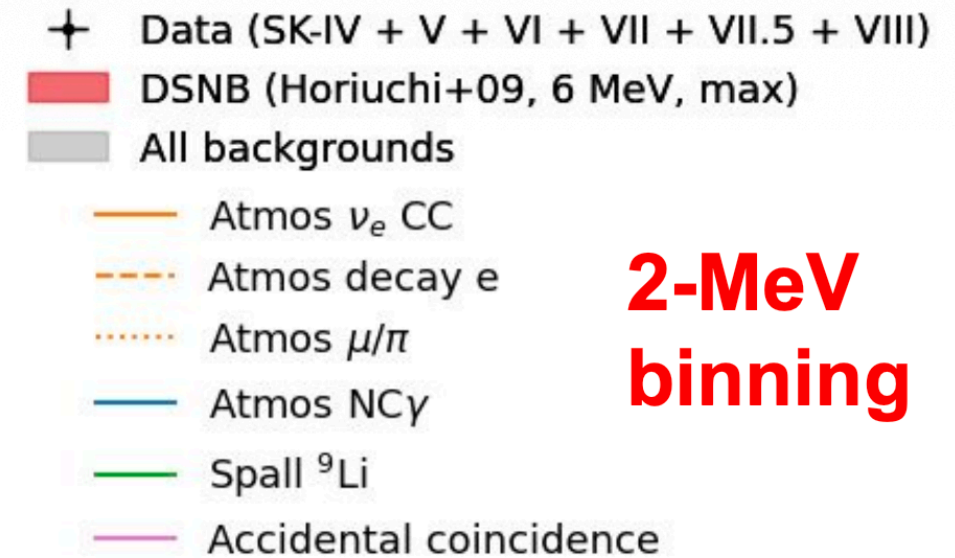
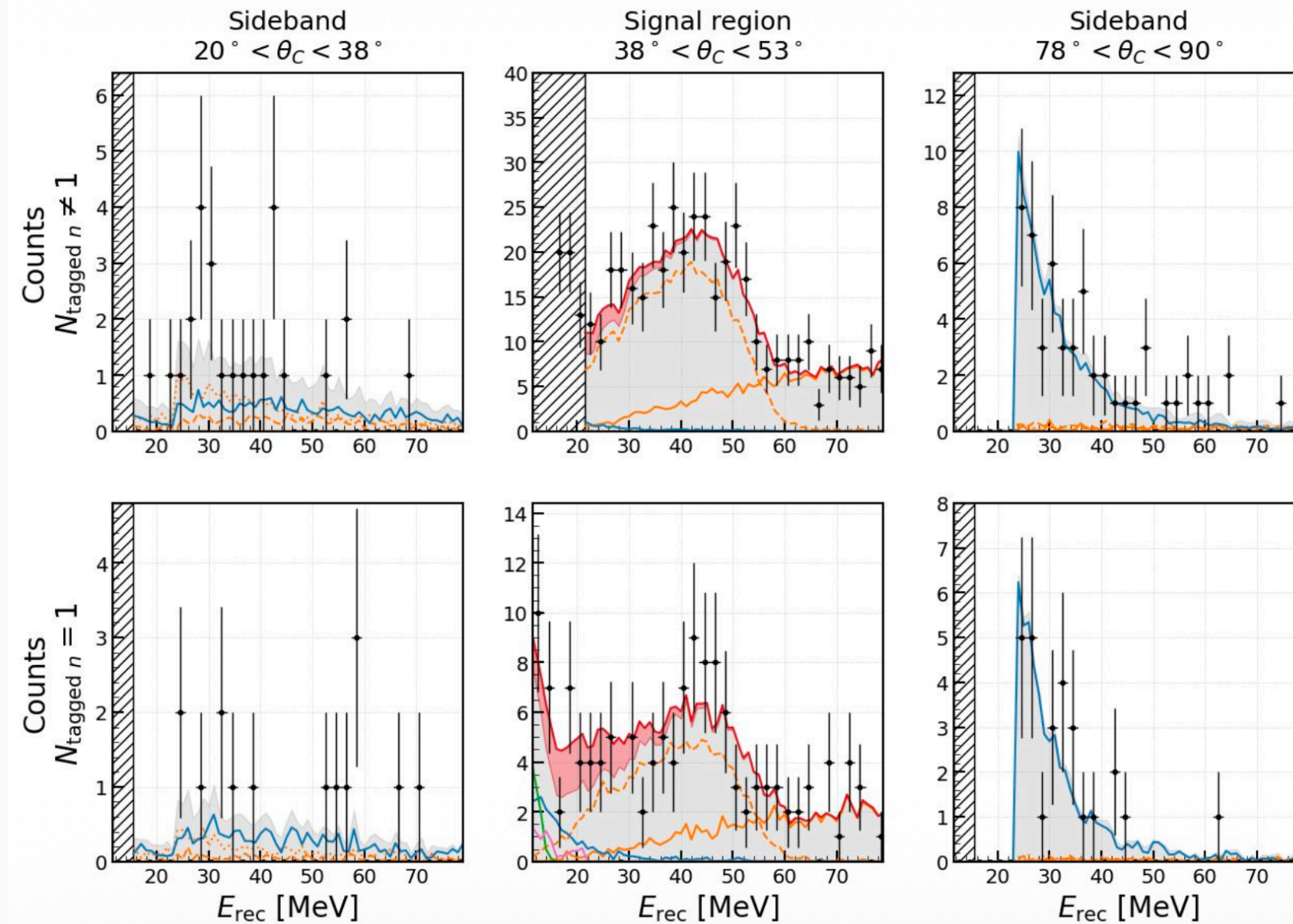
データ*に基づいた
系統誤差の見積もり
NN Cut込みで
Total Syst. 45%
(2024年解析では71%)

* coil-offも評価

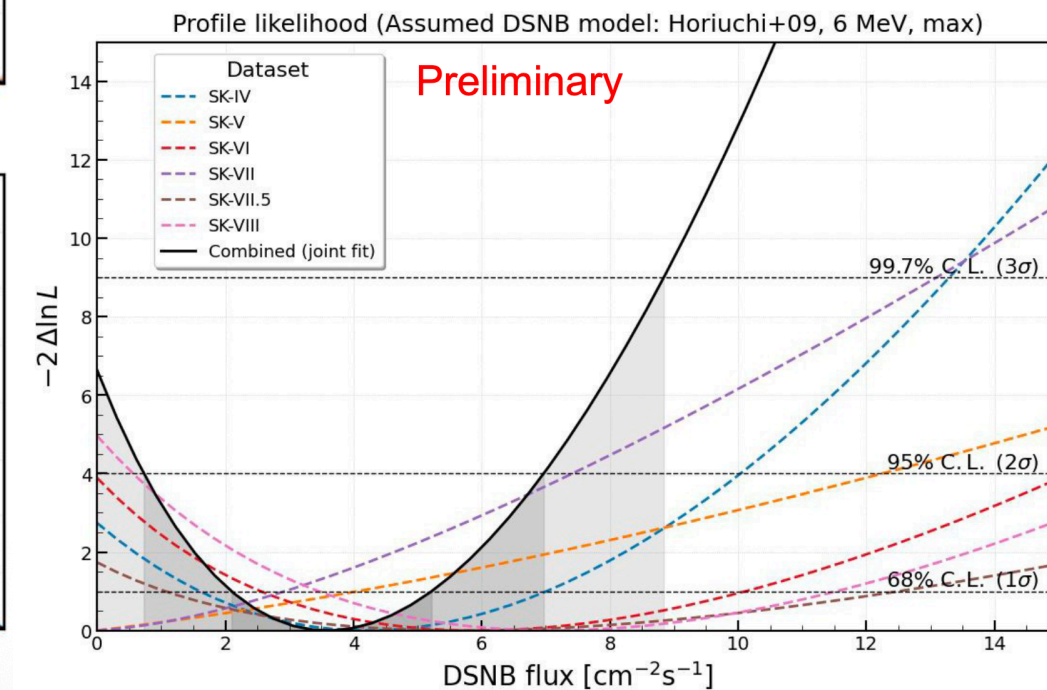
Latest DSNB Search

25

H. Sekiya, S. Fujita, NEUTRINO2026



2-MeV
binning



スペクトルフィッティング結果:

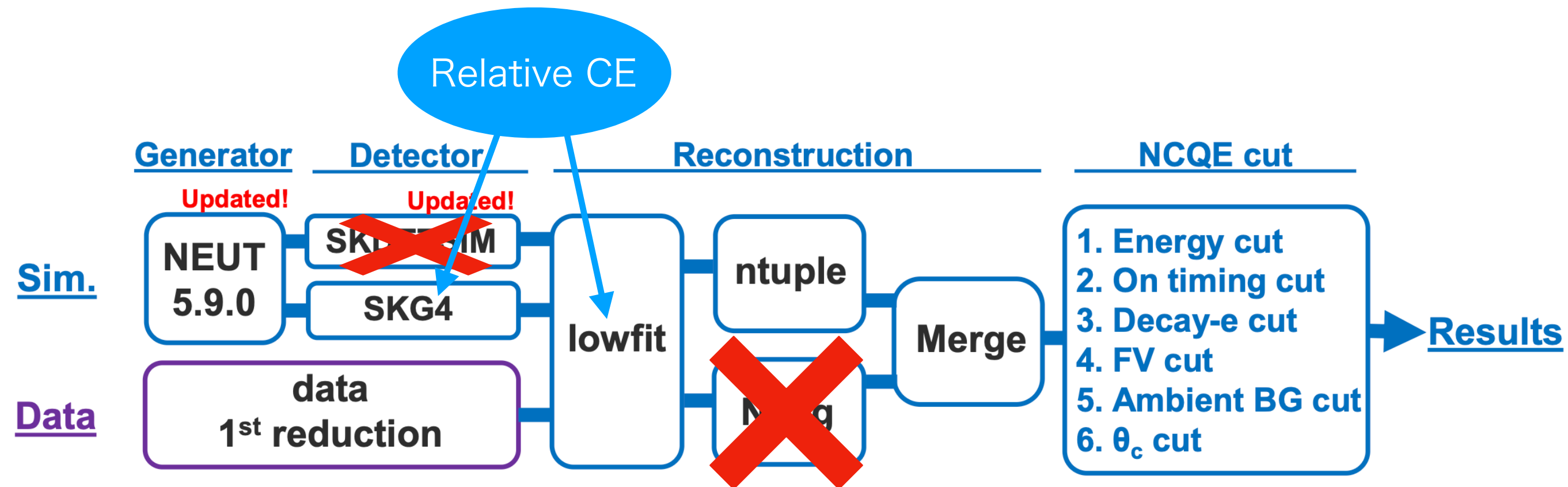
- 純水 ~3350日 + Gd ~1650日(*)のデータで、null hypothesisを **2.6σ** で棄却！
- Best fit flux: $3.6^{+1.6}_{-1.5} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (ニュートリノエネルギー > 13.3 MeV)
↑ モデル予測 $2.1 - 3.9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Horiuchi+09, 6 MeV) とconsistent

* 磁気補償コイル故障の192日を含む

Run13-SK7.5

analysis

Analysis Flow

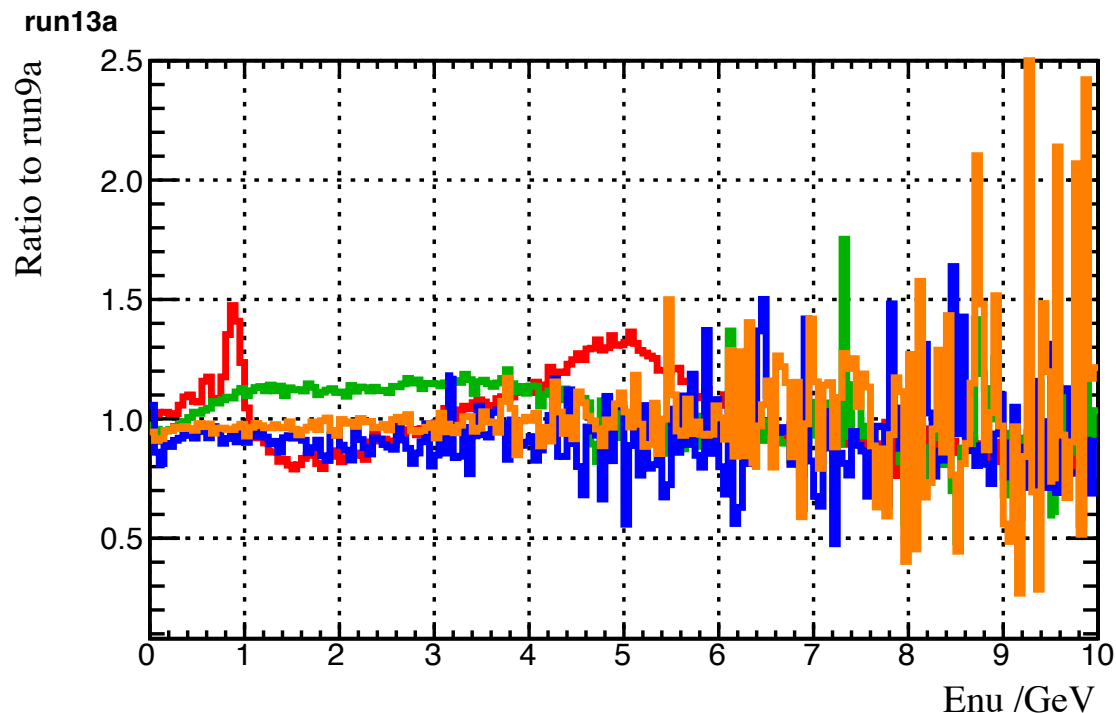
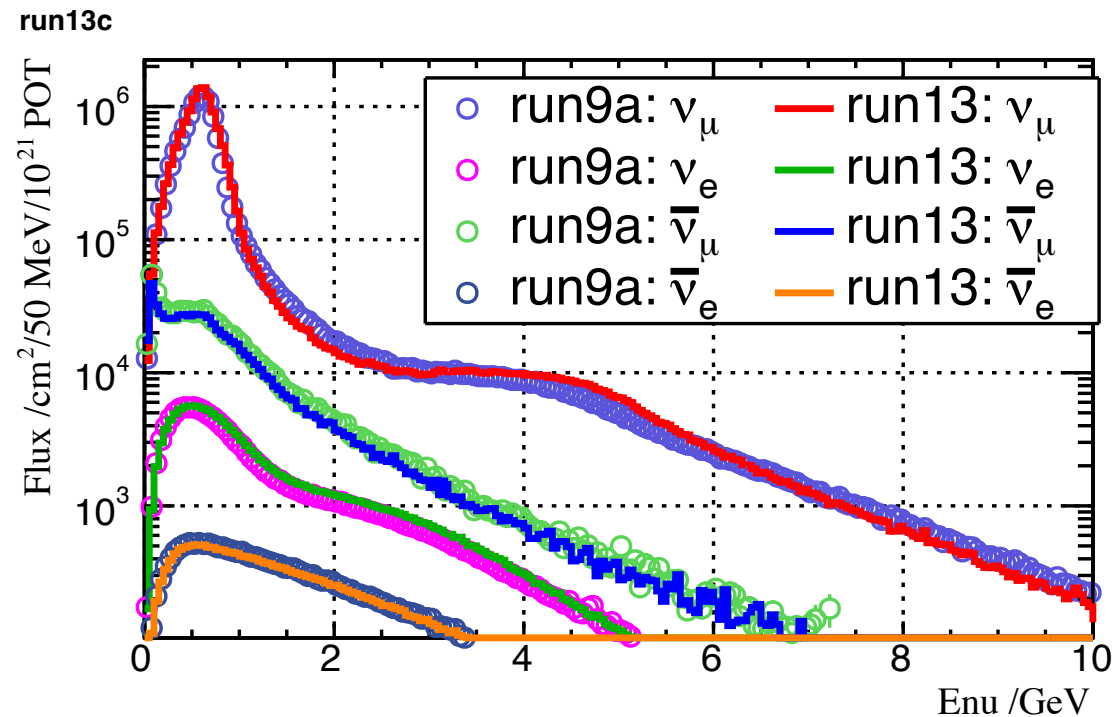


Information related to this study:

- Flux release 25av1, NEUT5.9.0 + NucDeEx v2.1
- Good spills after coil No.5 off ($sk_quality_flag > 0 \ \&\& \ good_spill_flag > 0$)
 - Run13a: 572032 spills, 1.082×10^{20} POT (Nov.-Dec. 2023)
 - Run13b: 519321 spills, 0.970×10^{20} POT (Jan.-Feb. 2024)
 - Run13c: 865502 spills, 1.876×10^{20} POT (Jun. 2024)
- PMT-per-PMT relative CE correction was introduced to the energy reconstruction (lowfit) and the detector simulation (SKG4).

Flux

Flux: Run13a



- Run13 (release 25av1) vs Run9a
 -> FHC 320kA vs 250kA

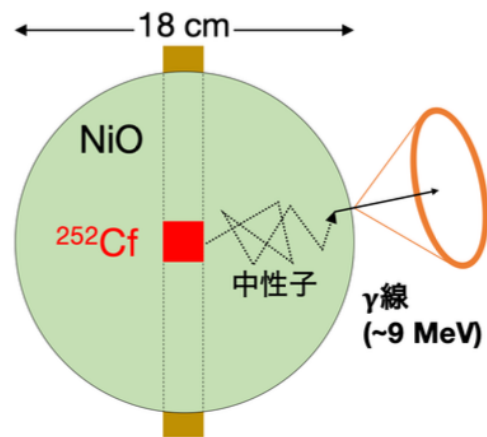
- Integrated Flux (0-10 GeV) /cm² /10²¹ POT

	Run13a	Run9a	Ratio
ν_μ	1.325×10^7	1.200×10^7	1.104
ν_e	1.543×10^5	1.444×10^5	1.068
$\bar{\nu}_\mu$	7.495×10^5	8.208×10^5	0.913
$\bar{\nu}_e$	2.231×10^5	2.301×10^5	0.970

- The horn current upgrade leads to
 - increase in the ν flux thanks to focusing in FHC
 - decrease in the anti- ν flux due to defocusing in FHC
- => The larger NCQE event rate (per POT) is expected in Run13 than Run1-9 FHC.

Relative CE

- To reflect the coil failure effect, the relative CE at each PMT was measured:
- Ratio of PMT hit rate before and after the coil No.5 off



Ni-Cf source

$$N(i) \propto \boxed{\varepsilon_{cut}} \times CE(i) \times \boxed{QE(i)} \times \boxed{etc}$$

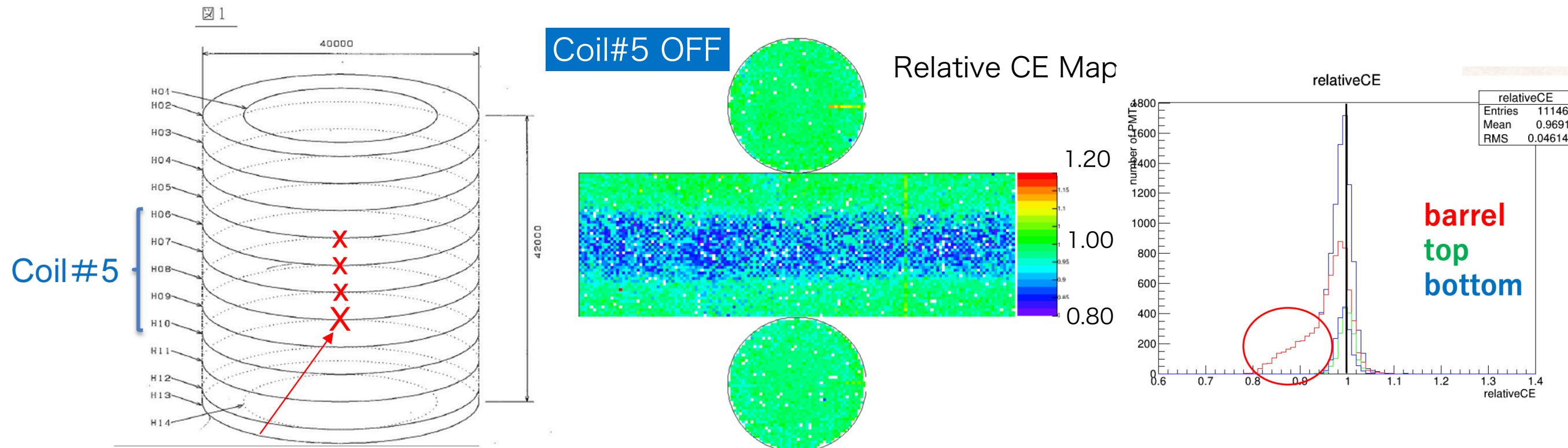
Cut efficiency

Align with coil on and off.

Same if PMT is the same.

Water effect
Reflection effect
Assume the same

-> will be applied to energy reconstruction and MC response



LowE Energy Reconstruction

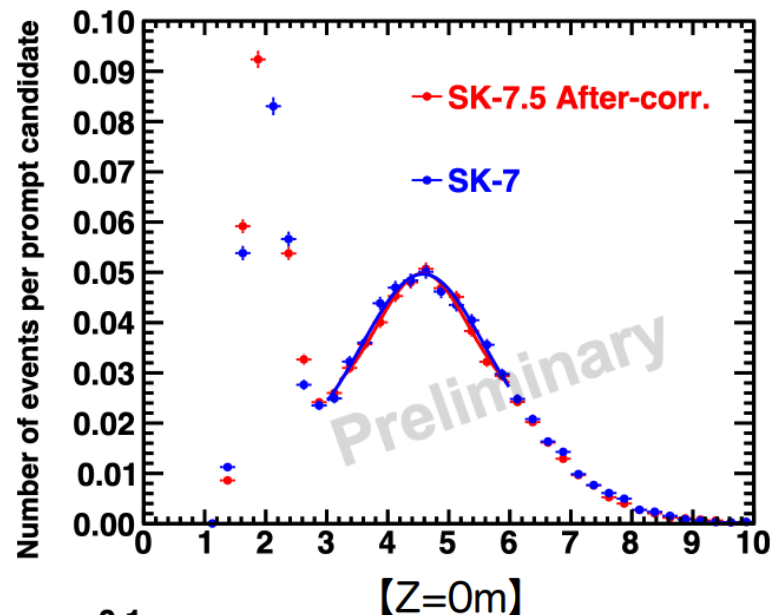
$$\text{bsenergy} \Leftrightarrow N_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^{N_{50}} (X_i + \epsilon_{\text{tail}} - \epsilon_{\text{dark}}^i) \frac{N_{\text{all}}}{N_{\text{normal}}} \frac{R_{\text{cover}}}{S(\theta_i, \phi_i)} \exp\left(\frac{r_i}{\lambda_{\text{run}}}\right) \boxed{\frac{1}{QE_i}} \text{xCE}$$

nGd from AmBe

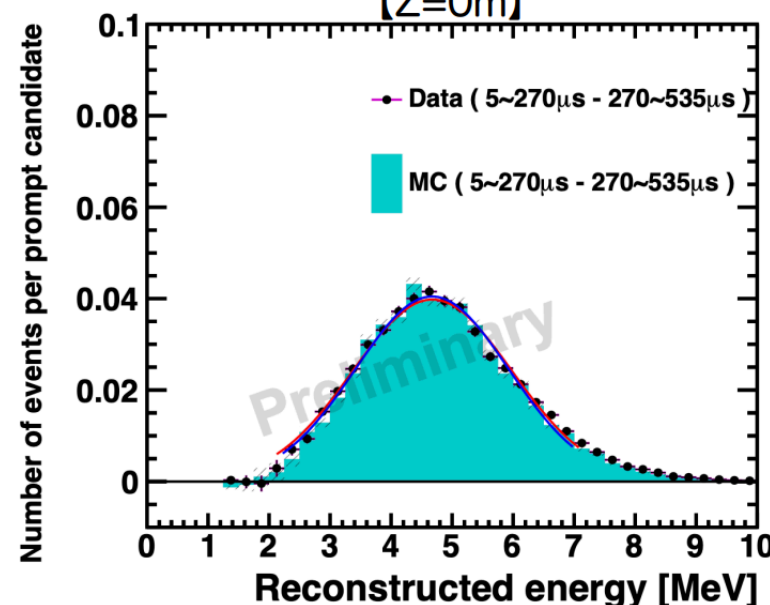
Reconstructed energy distribution :
SK-7 vs SK-7.5 (after CE correction)

qetable7_5_1 ... the relative QE variation of each PMT
corrected with the measured relative CE

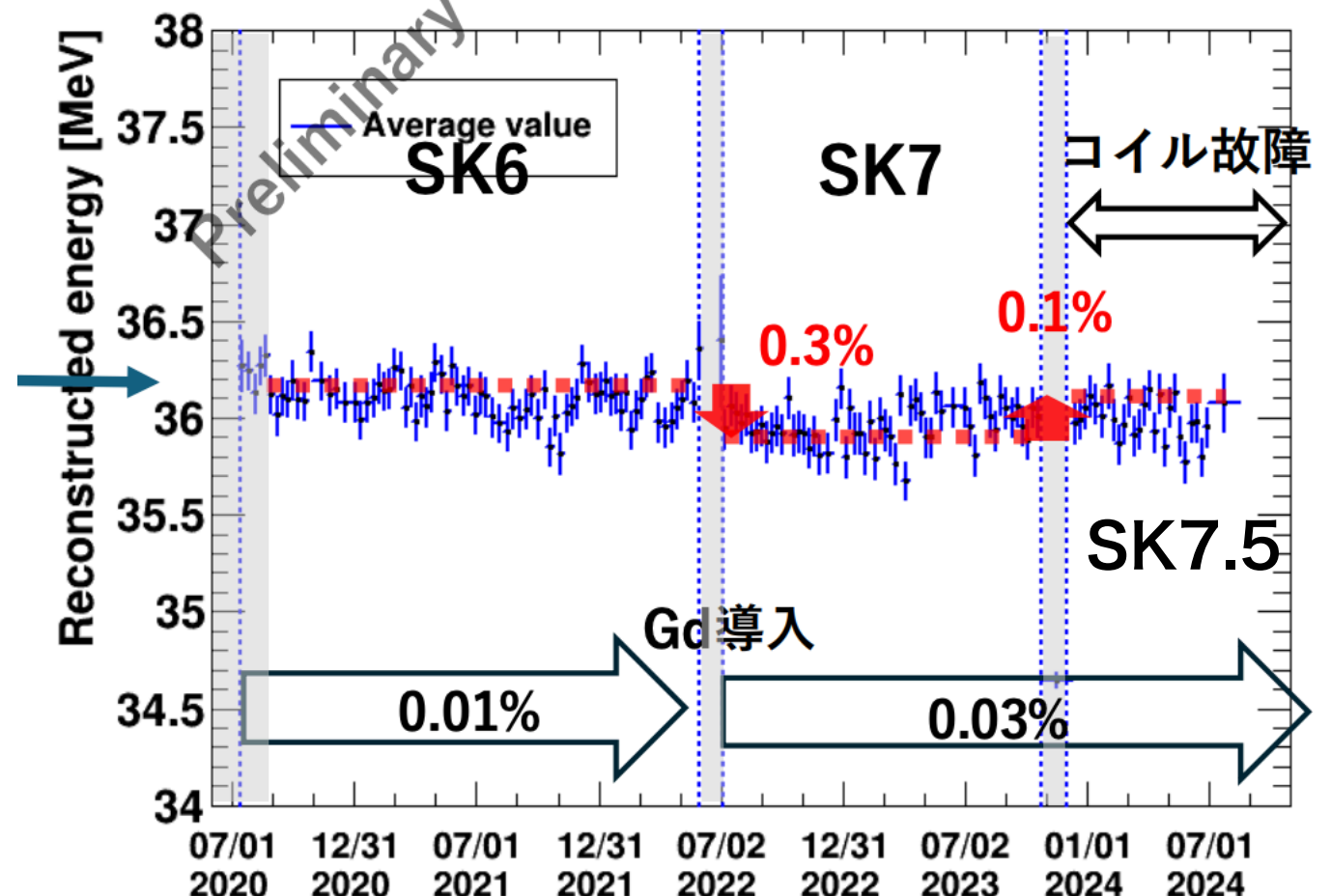
-> works well in the LowE energy reconstruction.



SK-7.5
SK-7



Michel electron Y. Masaki, JPS2025Fall



Event Selection

1. Good Spill Selection (count POT during SK7.5 for MC)
2. Timing Cut (data only): within 100 ns r.w.t each bunch
3. Energy Cut: $4 < \text{bsenergy} < 30 \text{ MeV}$
4. Fiducial Volume Cut: $\text{dwall} > 200 \text{ cm} \ \&\& \ \text{effwall} > 200 \text{ cm}$
5. Ambient BG Cut: bsenergy dependent cut to dwall, effwall, ovaq
e.g., $(\text{dwall}) > a + b \times (\text{bsenergy})$
-> used the same cut as run 11 for run13a to 13c.
6. CC interaction Cut: bsenergy dependent cut to Cherenkov angle
 $(\text{angle}) > 1.67832 \times (\text{bsenergy}) + 17.7273$
↑ also same as Run11 analysis

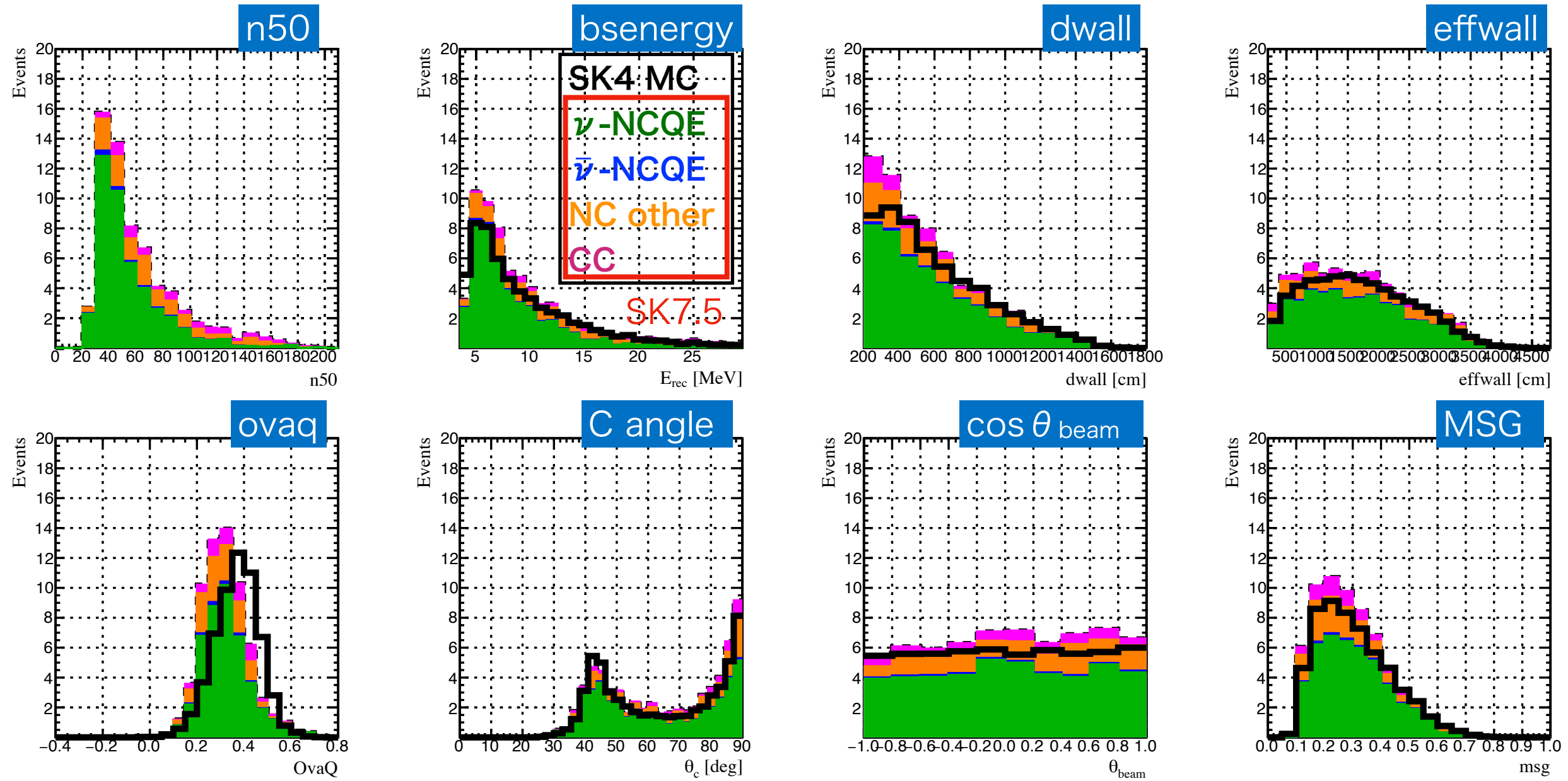
The beam-unrelated BG and CC remaining rates were not optimized for Run13.

From TN-514, parameters for the ambient BG cut.

Run	a_wall	b_wall	a_eff	b_eff	a_ovaq	b_ovaq
11	580.0	-80.0	1941.5	-314.0	0.4125	-0.042
13a	580.0	-80.0	1941.5	-314.0	0.4125	-0.042
13b	580.0	-80.0	1941.5	-314.0	0.4125	-0.042
13c	580.0	-80.0	1941.5	-314.0	0.4125	-0.042

SK7.5 vs SK4 (Run1-9)

- Compared SK7.5 with SK4 MC by LiCheng. (SK4 POT normalized to SK7.5).
 - Horn current: 250 (SK4) -> 320 kA (SK7.5) gives higher event rate at SK.

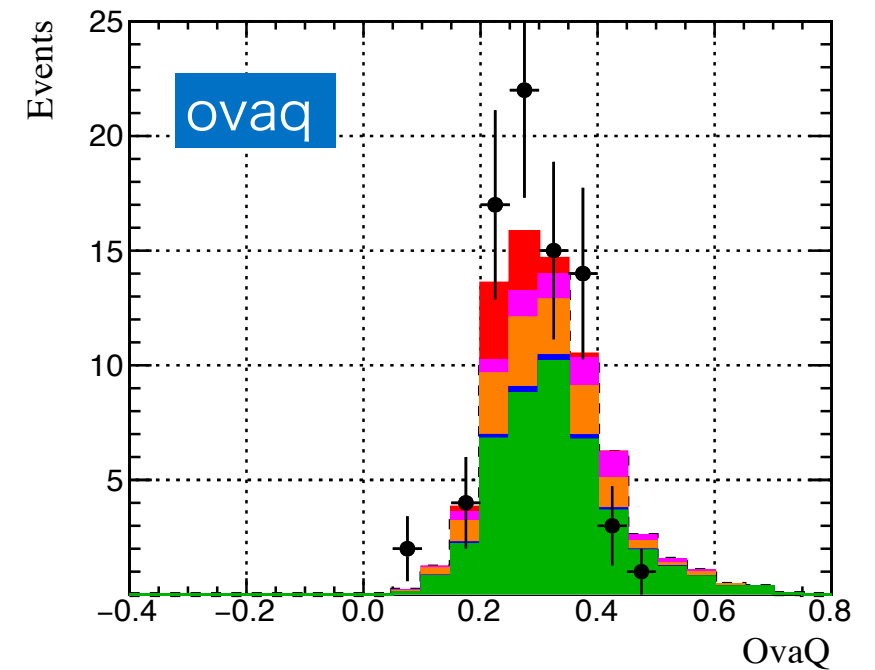
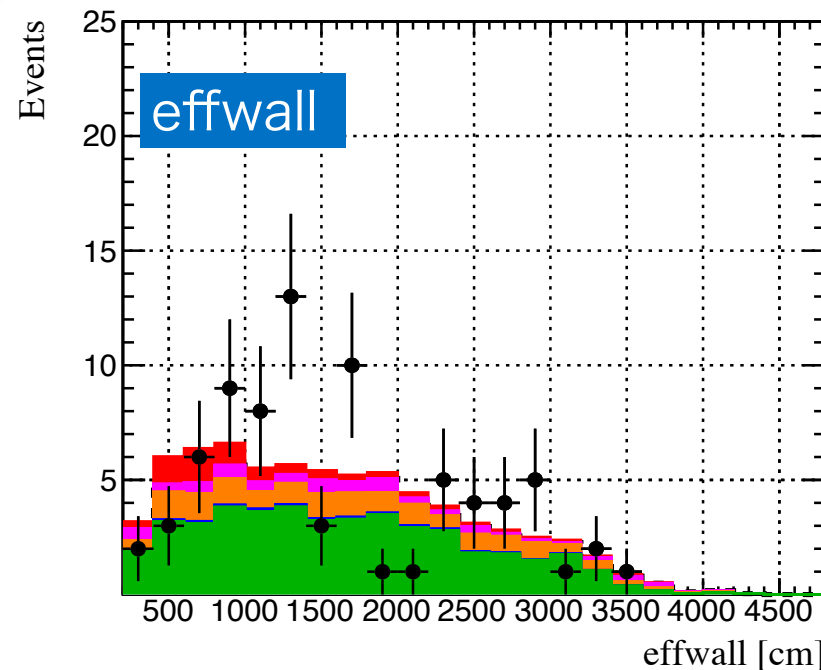
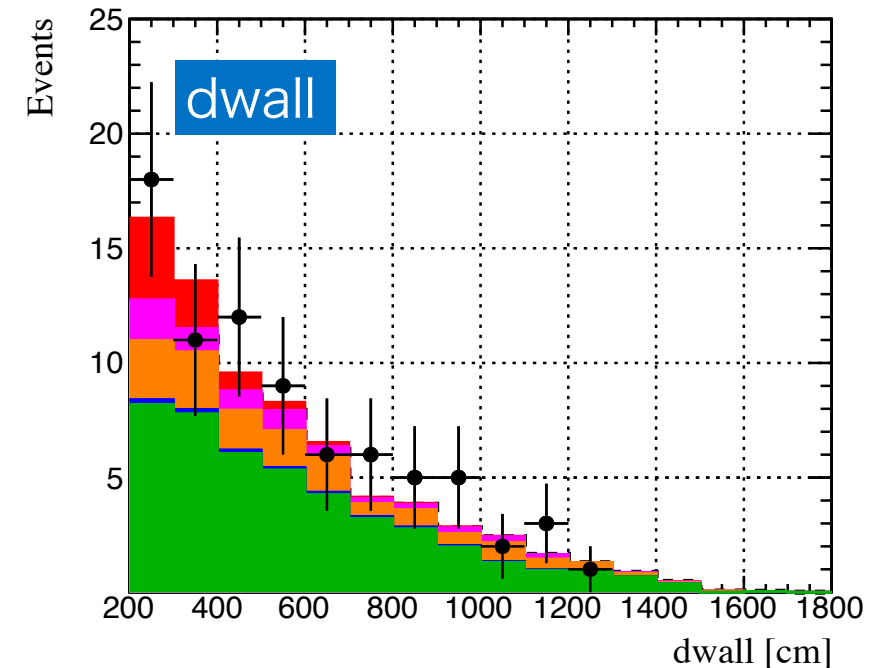
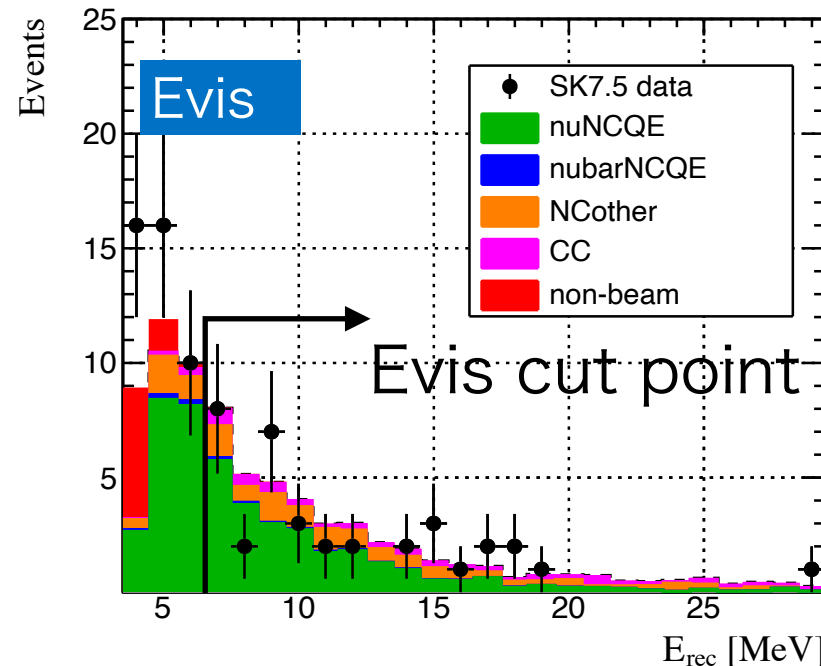


	ν -NCQE	$\bar{\nu}$ -NCQE	NC others	CC	Total
SK7.5	43.8	1.2	13.6	6.2	64.8
SK4 (*)	37.7	1.3	14.4	3.4	56.8

Data Open: NCQE Selection

- Usual NCQE Selection (same criteria with the Run11 analysis)
- Basically, consistent.
- An excess in the lowest bins of Evis spectrum like N50.

-> this part, as well as the non-beam component, will be eliminated by the DSNB analysis threshold.

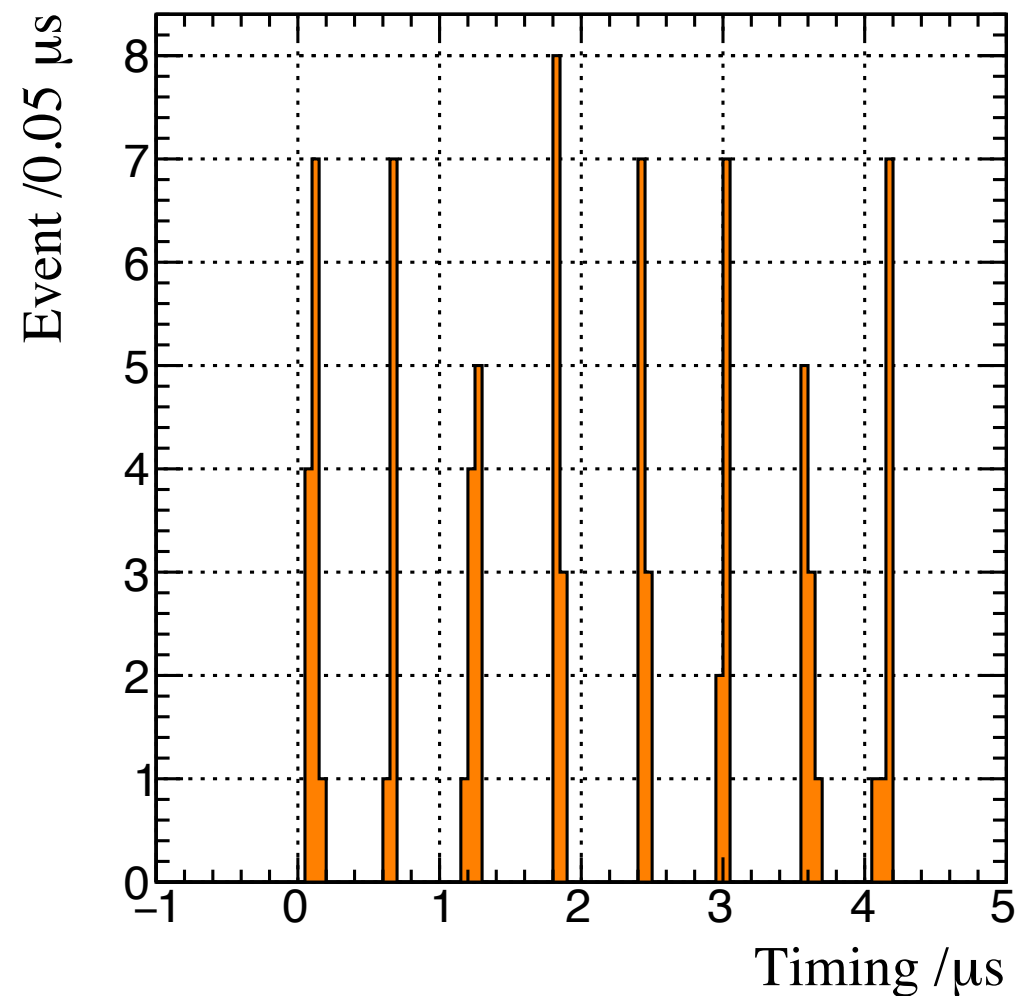


ν -NCQE	$\bar{\nu}$ -NCQE	NC others	CC	Amb. BG	Total	Data
43.78	1.15	13.68	6.23	7.23	72.07	78 ± 8.8

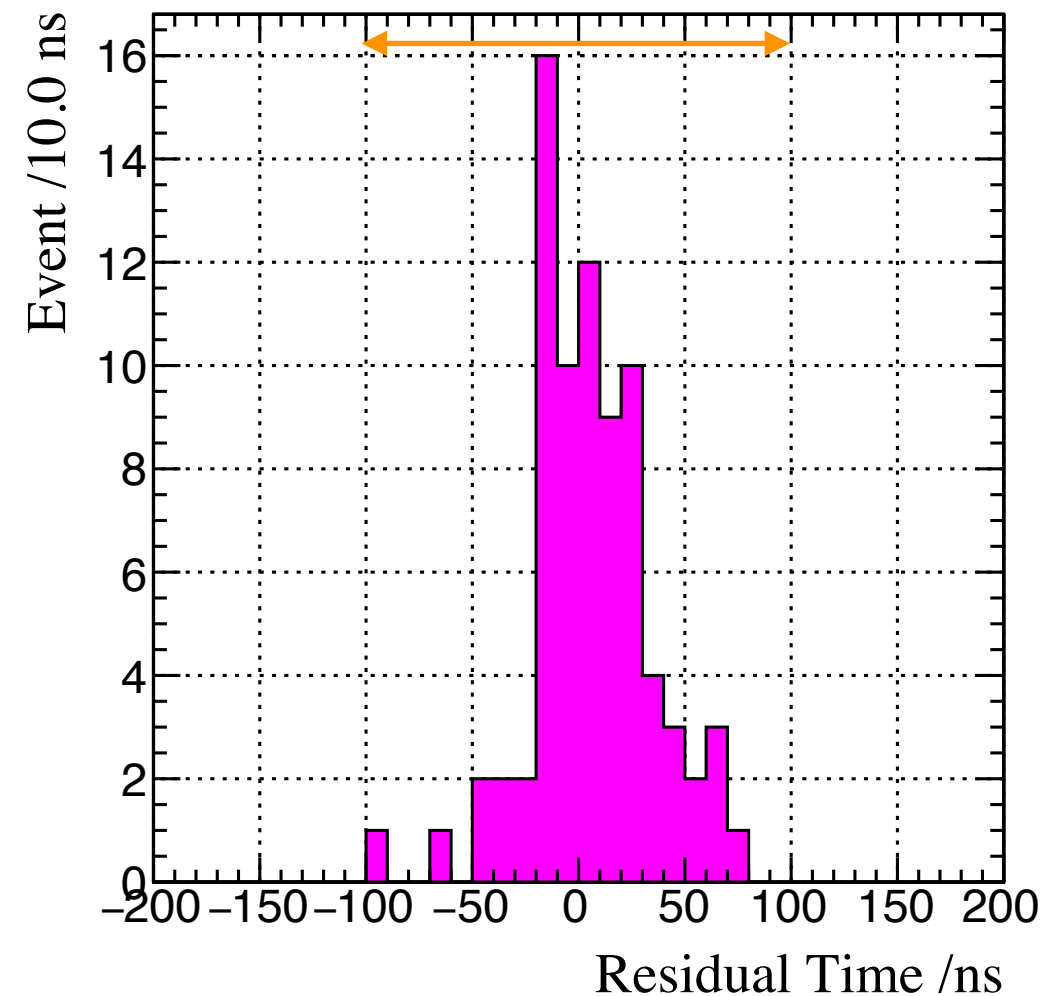
NCQE Event Timing

34

NCQE event timing in T2K window



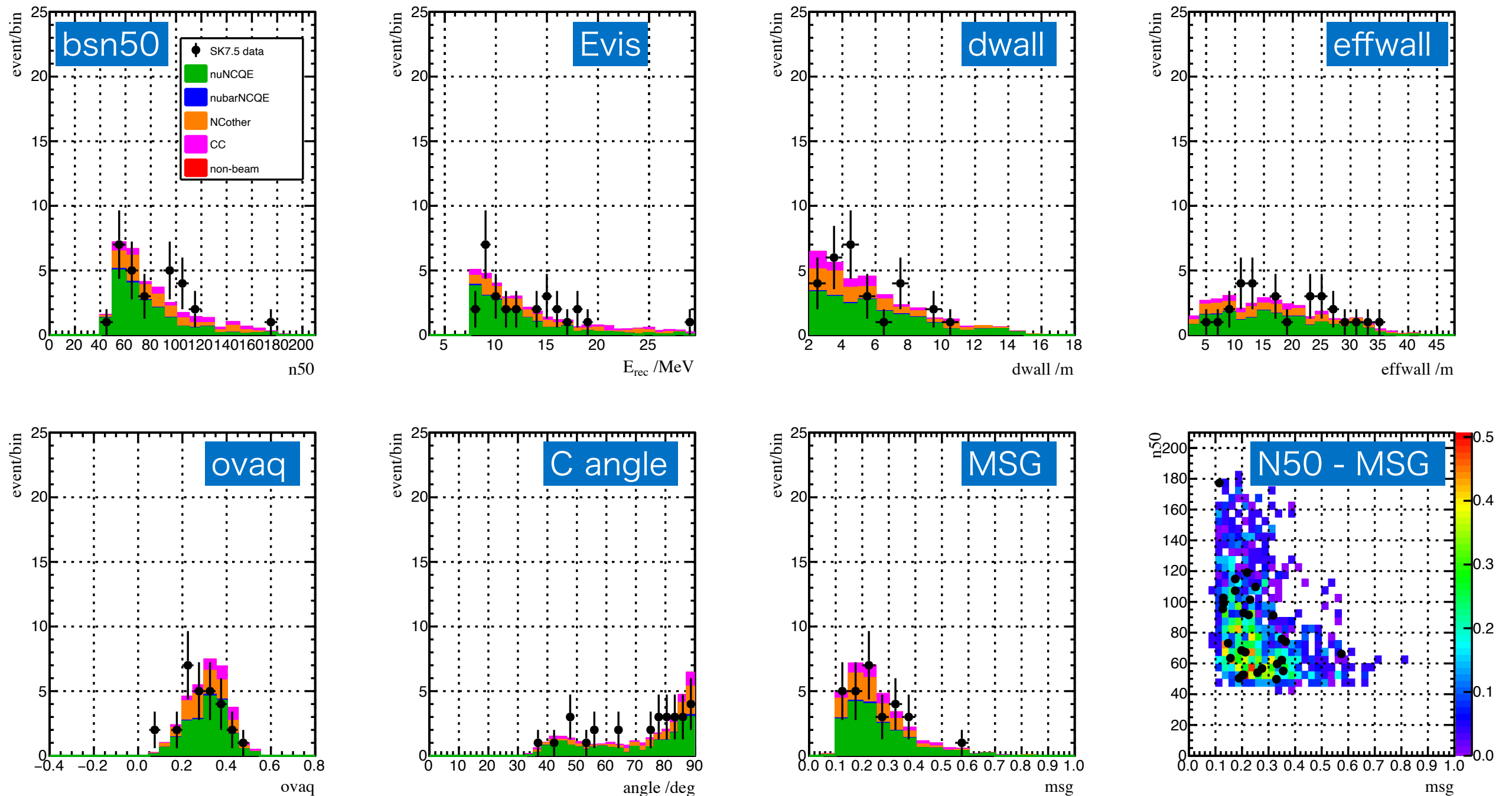
Residual from the nearest bunch



- Timing distribution of the selected NCQE candidates:
 - NCQE candidates well reflected J-PARC's 8-bunch beam timing profile!
 - Residual from the nearest bunch timing within 100 ns.

Basic Distributions

- Added $E_{\text{vis}} \in [7.5, 29.5 \text{ MeV}]$, #events and distributions are consistent.



ν -NCQE	$\bar{\nu}$ -NCQE	NC others	CC	Amb. BG	Total	Data
18.68	0.54	9.04	4.79	0	33.05	28 ± 5.3

NCQE Rejection Test in SK7.5

- For validation of NCQE reduction in SK7.5 for DSNB analysis, we would like to check NCQE events and behavior in T2K Run13 (after SK coil No.5 off period).

TN-514: NCQE event remaining rate at each selection method

NCQE Run 1-11 FHC						
MC setting (FHC)	NCQE selection	E_{vis} [7.5, 29.5]MeV	$E_{\text{vis}} + \theta_C$	$E_{\text{vis}} + \theta_C + \text{MSG}_{\text{dis}}$	$E_{\text{vis}} + \theta_C + \text{MSG}_{\text{lin}}$	$E_{\text{vis}} + \text{NN}$
NEUT-BERT-G4Cas	370.3 (100.0%)	220.4 (59.5%)	32.6 (8.8%)	11.8 (3.2%)	9.4 (2.5%)	8.9 (2.4%)
NEUT-BERT-G4Pre	348.6 (100.0%)	188.5 (54.1%)	33.5 (9.6%)	11.8 (3.5%)	9.4 (2.7%)	8.7 (2.5%)
NEUT-INCL-G4Pre	343.3 (100.0%)	177.6 (51.7%)	32.9 (9.6%)	12.6 (3.7%)	9.9 (2.9%)	9.2 (2.7%)
NEUT564-INCL-G4Pre	352.1 (100.0%)	185.3 (52.6%)	36.6 (10.4%)	13.4 (3.8%)	10.4 (2.9%)	9.8 (2.8%)
NEUT-INCL-NucDeEx	345.1 (100.0%)	181.2 (52.5%)	33.0 (9.6%)	12.3 (3.6%)	9.4 (2.7%)	9.3 (2.7%)
NEUTNuc-INCL-NucDeEx	315.5 (100.0%)	163.1 (51.7%)	31.6 (10.0%)	12.8 (4.1%)	10.1 (3.2%)	9.5 (3.0%)
NEUTNuc-GCALOR	346.5 (100.0%)	198.8 (57.4%)	26.1 (7.5%)	8.3 (2.4%)	6.6 (1.9%)	6.7 (1.9%)
Data (FHC)	289 (100.0%)	125 (43.3%)	24 (8.3%)	11 (3.8%)	7 (2.4%)	6 (2.1%)

There are no exact number and information for MSGdis cut and NN in TN-514.
 -> tested the condition in red boxes.

SK7.5 MC

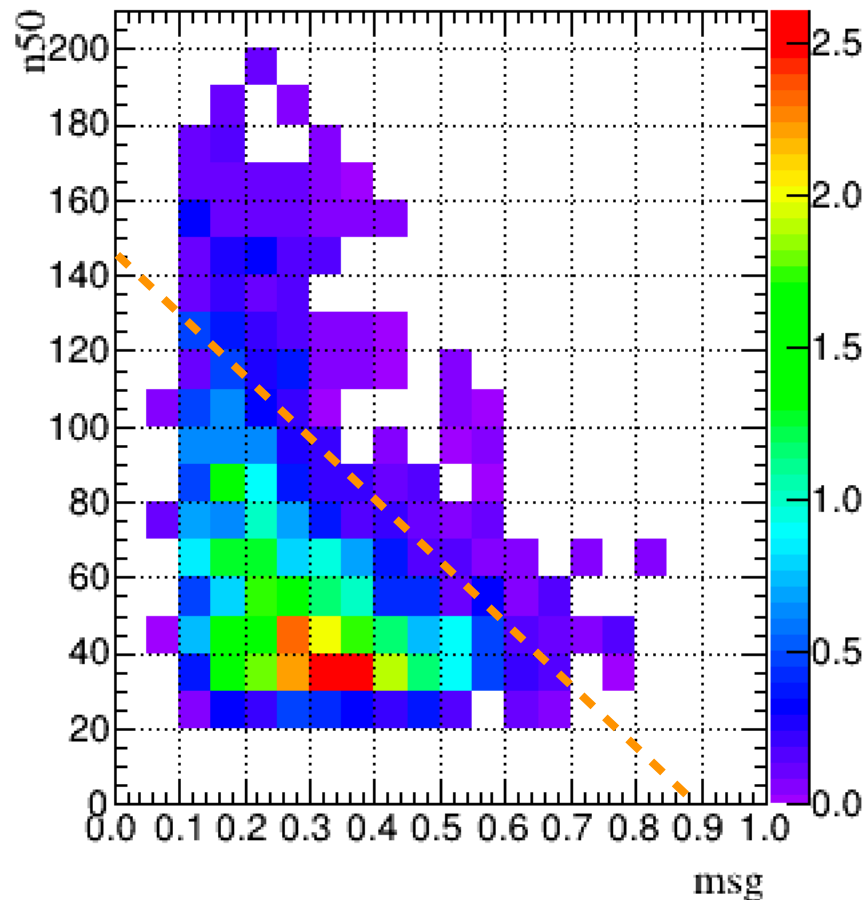
N50 > -163.84 * MSG + 146.48

NCQE selection	Evis [7.5, 29.5]	Evis + θ	Evis + θ + MSGlin
64.8 (100%)	33.0 (51.0%)	6.4 (9.9%)	1.5 (2.3%)

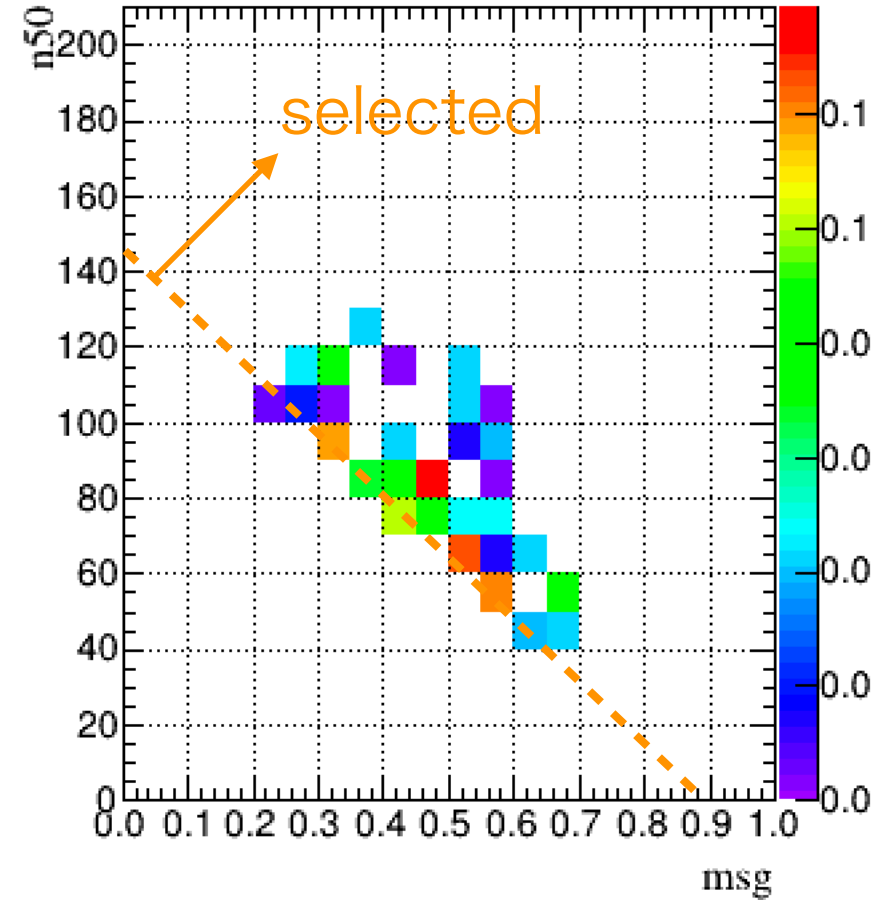
- No ambient BG included in this number. But it will be negligible after the Evis cut.
- The reduction power is reasonably consistent with the Run1-11 FHC.
- > the estimated systematics on these cuts will valid in even SK7.5.

MSGlin cut in 2D

NCQE selection



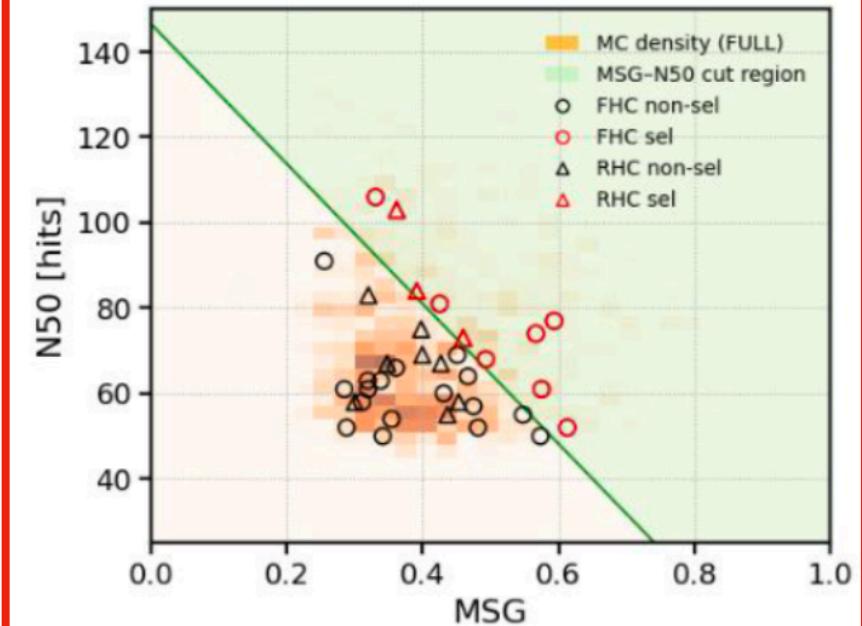
Evis + θ + MSGlin



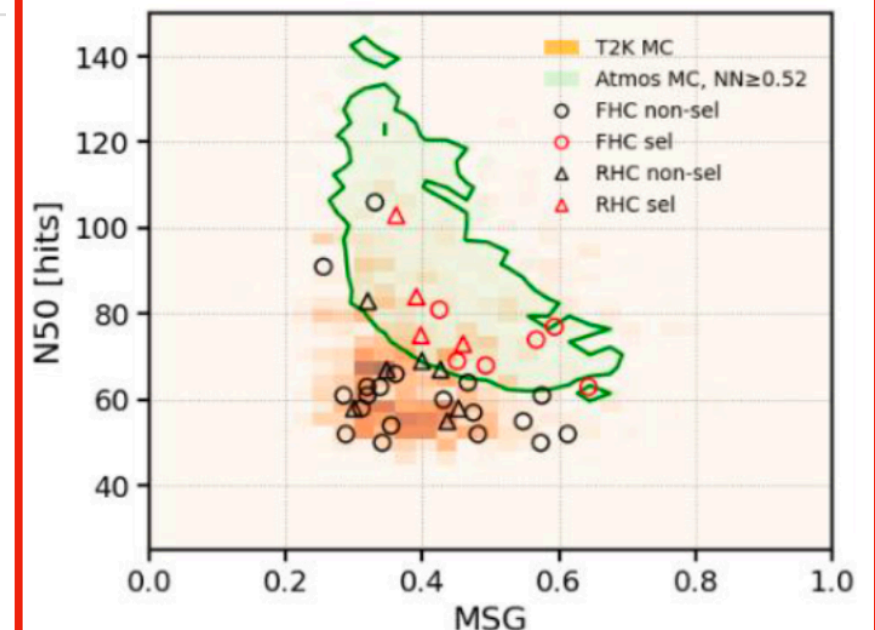
- The reduction power is reasonably consistent with the Run1-11 FHC. We can expect the same trend in the NN cut.
- If the SK7.5 data distributions are consistent with the SK7.5 MC, we can conclude that the NN cut works also in SK7.5 with the estimated systematics in TN-514.

TN-514

Evis + θ + MSGlin

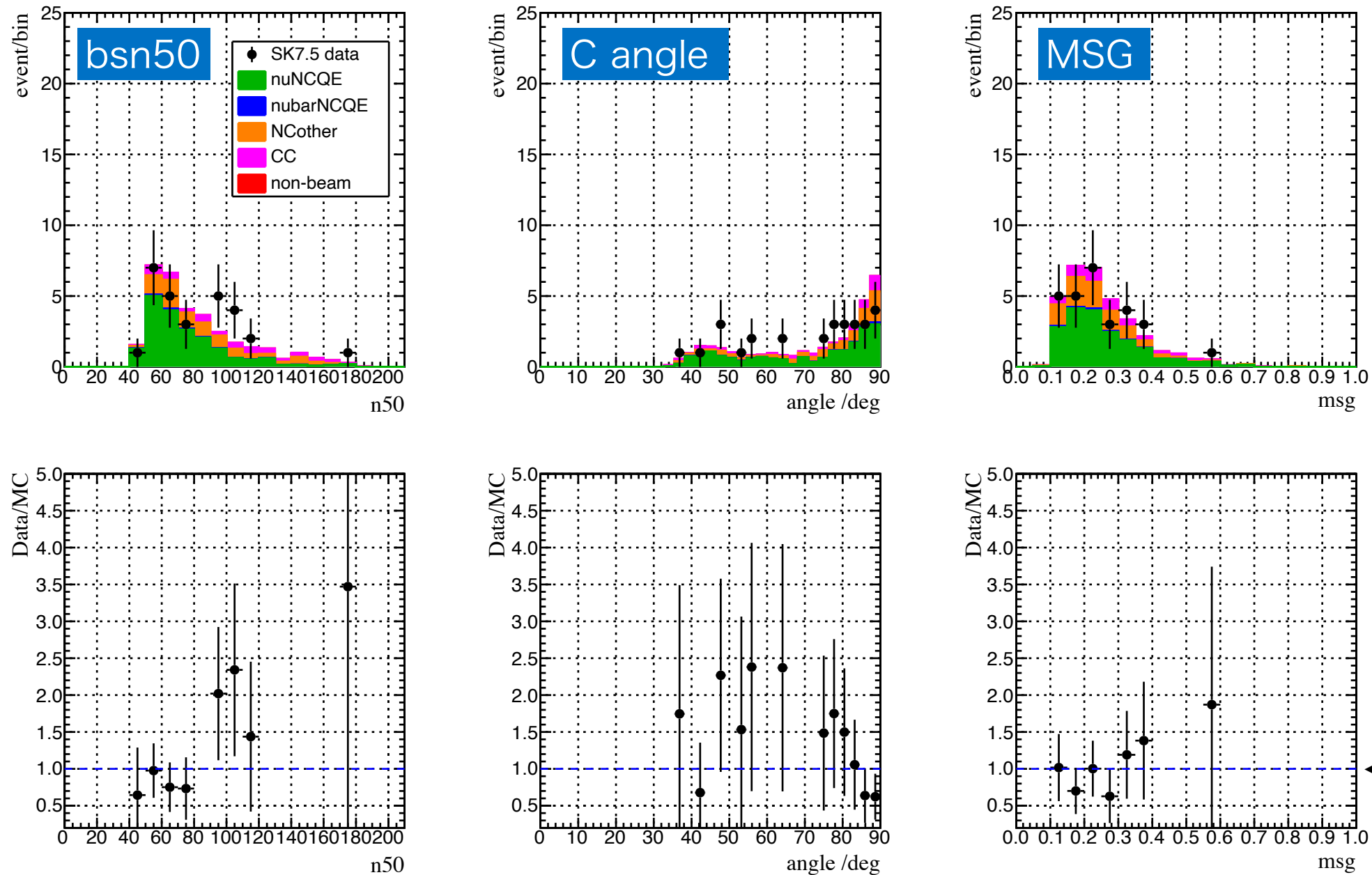


Evis + NN



Distribution Shape Check

- Residual (Data/MC ratio) w/ the Evis cut ($E_{\text{vis}} \in [7.5, 29.5]$ MeV)
 -> the shapes are also consistent within stat. error in each variable.

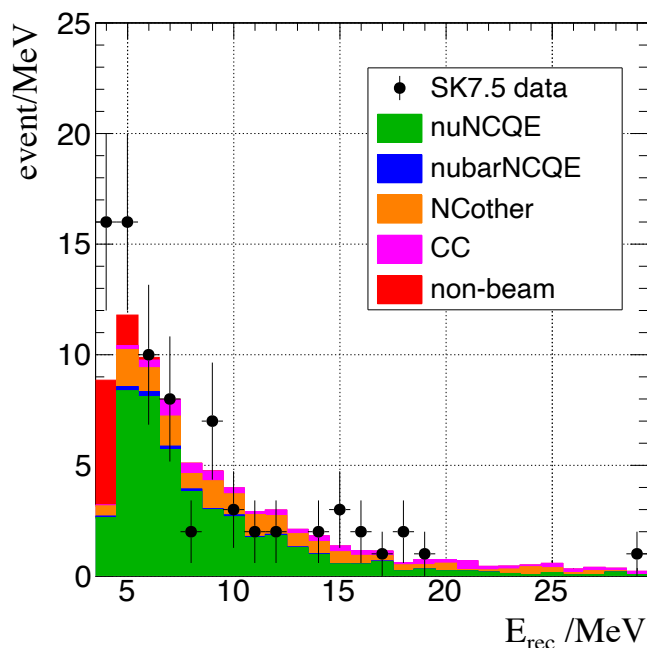


ν -NCQE	$\bar{\nu}$ -NCQE	NC others	CC	Amb. BG	Total	Data
18.68	0.54	9.04	4.79	0	33.05	28 ± 5.3

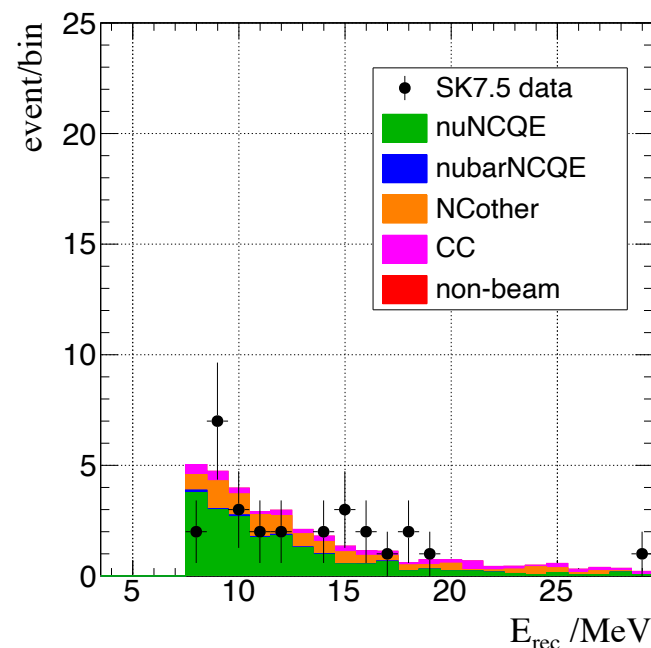
Reduction Check

- Reduction power at each step displayed in the Evis distribution.
- The remaining number of events are consistent with the expectation at each step within statistical unc. => concluded to apply the same NN for SK7.5 data.

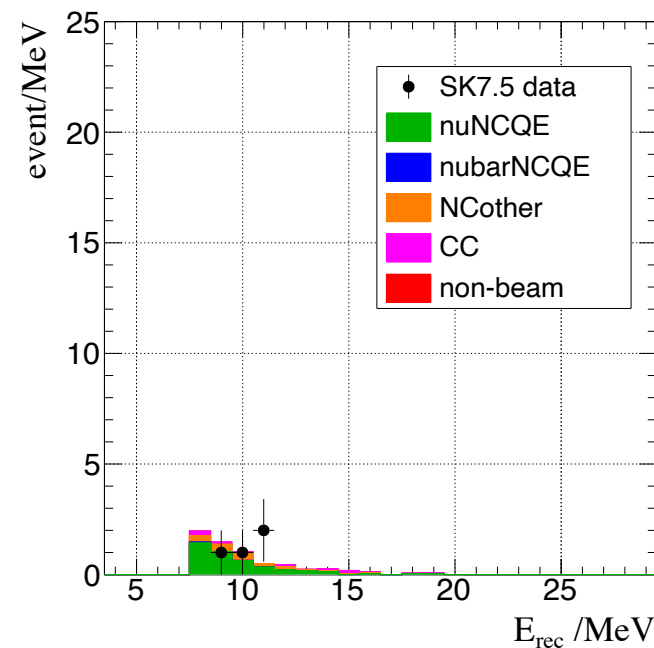
NCQE selection



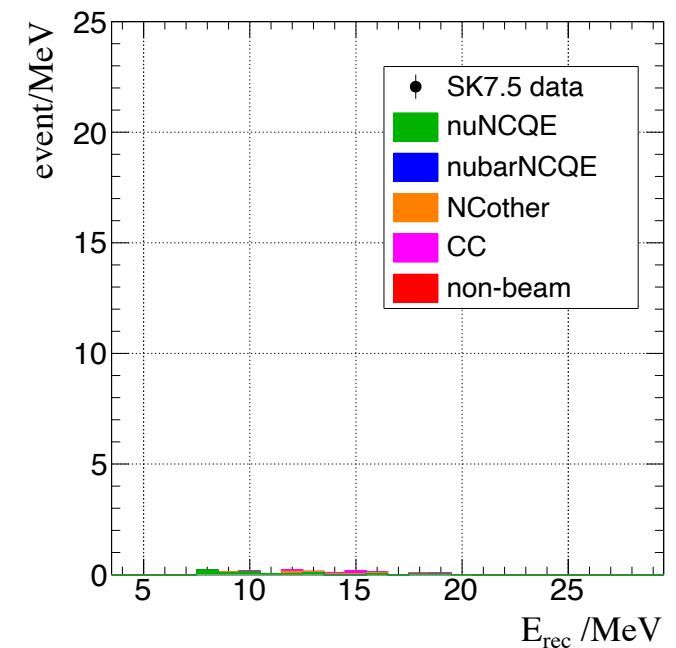
Evis cut



Evis + θ



Evis + θ + MSGlin



SK7.5 MC and data

$$N50 > -163.84 * MSG + 146.48$$

	NCQE selection	Evis [7.5, 29.5]	Evis + θ	Evis + θ + MSGlin
MC	64.8 + 7.2 (100%)	33.0 (45.8%)	6.4 (8.9%)	1.5 (2.3%)
Data	78 ± 8.8 (100%)	28 ± 5.3 (35.9%)	4 ^{+3.2} _{-1.9} (5.1%)	0 ^{+1.8} ₋₀ (0%)

(*) stat. error

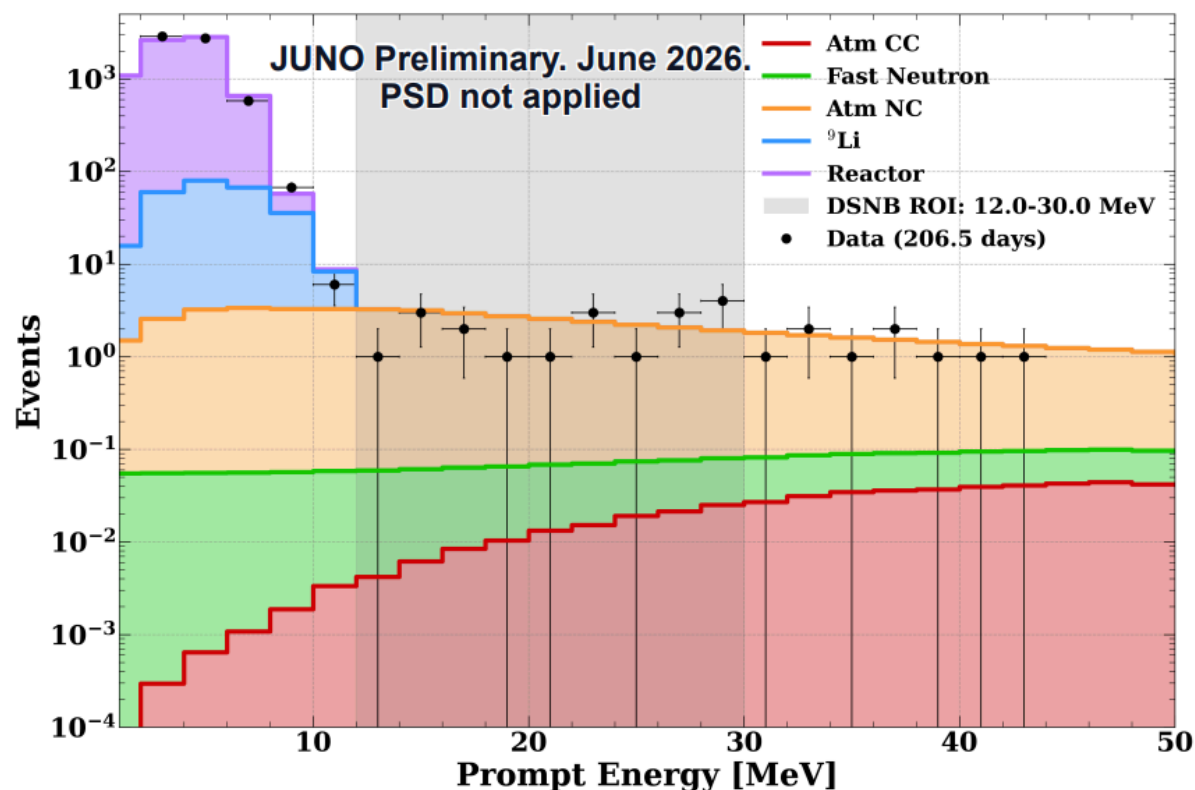
Summary

- 過去の超新星爆発で生じたニュートリノが今も宇宙を漂っており、超新星背景ニュートリノと呼ばれている。このニュートリノを捉えると宇宙の、星の進化の歴史を知るための鍵になると考えられている。
- スーパーカミオカンデでは超新星背景ニュートリノを捉えるためガドリニウムを超純水に導入し (SK-Gd) 、高感度の探索を行っている。
 - 大気ニュートリノによるノイズ事象 (NCQE反応) が超新星背景ニュートリノの信号に類似しているため問題になる。
 - > J-PARCのニュートリノビームを利用してこれを精密に測っておく！
- T2KのNCQE測定から、実はニュートリノ反応を精密に理解するためには、中性子の振る舞いが重要なことがわかってきた。
 - > 自前で測って、シミュレーションを改善！
 - => 最新のT2K測定のデータをよく再現できるようになってきた！さらにNCQEを除外する研究も可能になった。
- 超新星背景ニュートリノの発見まであと少し (現在は 2.6σ)。今後のSK-Gdに期待。
 - ハイパーカミオカンデでより詳細にわかるかも…？

Backups

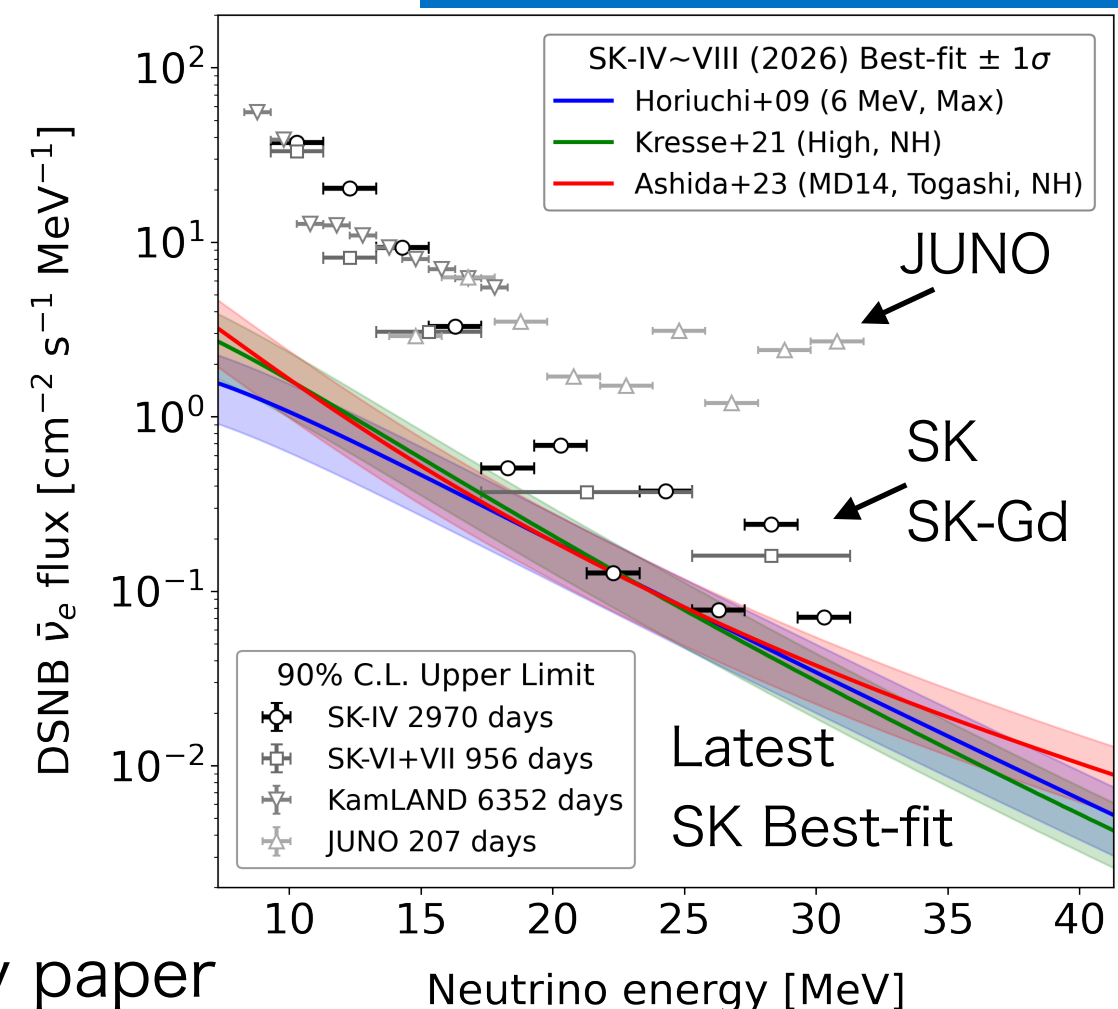
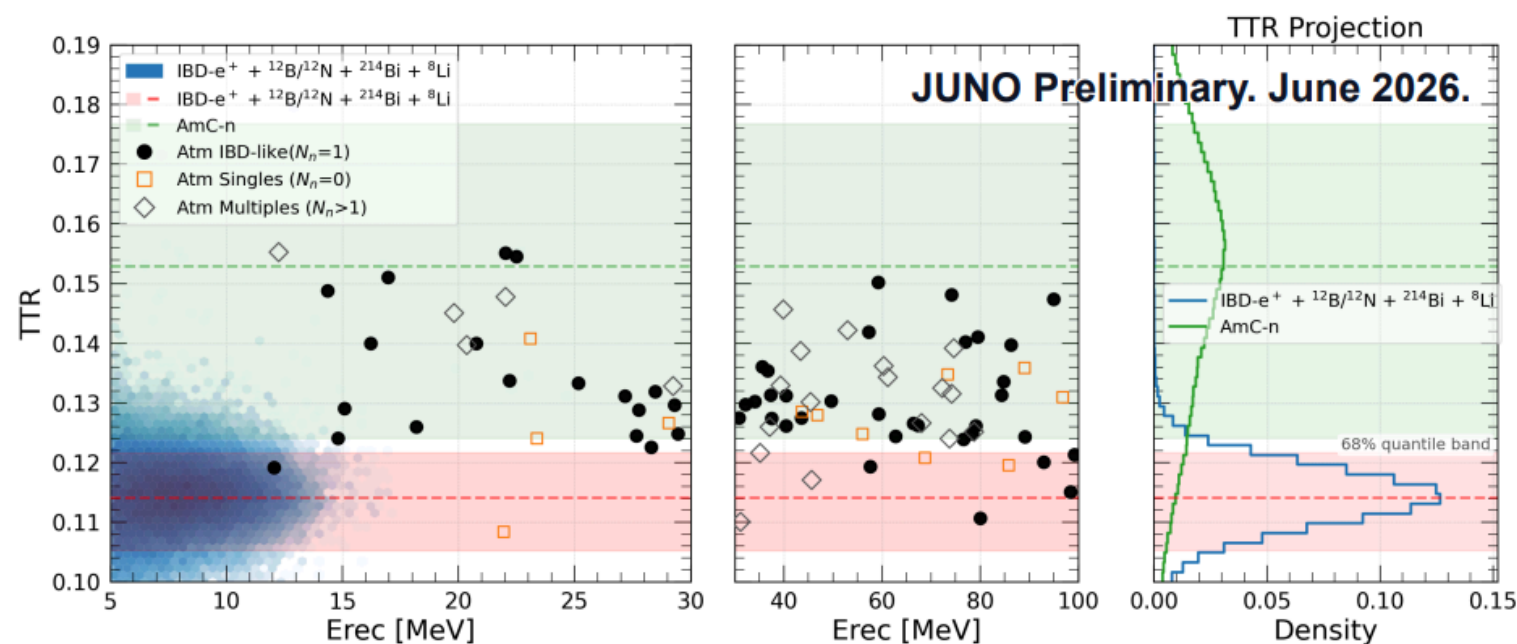
JUNO DSNB

- The most concern of SK-Gd is the status of JUNO-DSNB analysis...



- 19 event with 207 days-exposure.
 - consistent with BG (21.3 ± 10.5 evt)
 - PSD may improve S/N, sensitivity.
- under development, their scenario $\downarrow$
 $3\sigma @ 3y$ with $\sim 80\%$ eff. and 99% BG red.

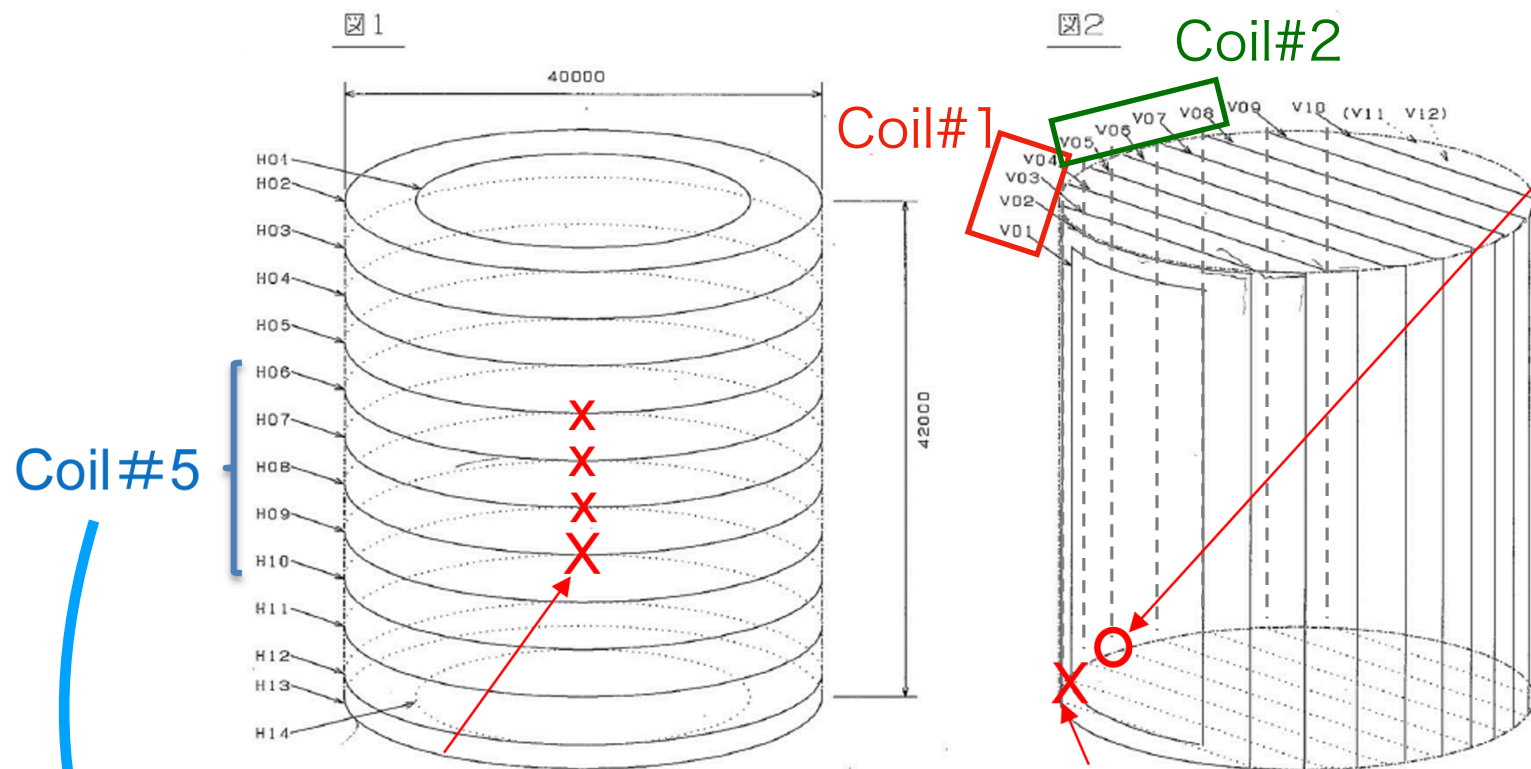
90%CL limit of DSNB flux



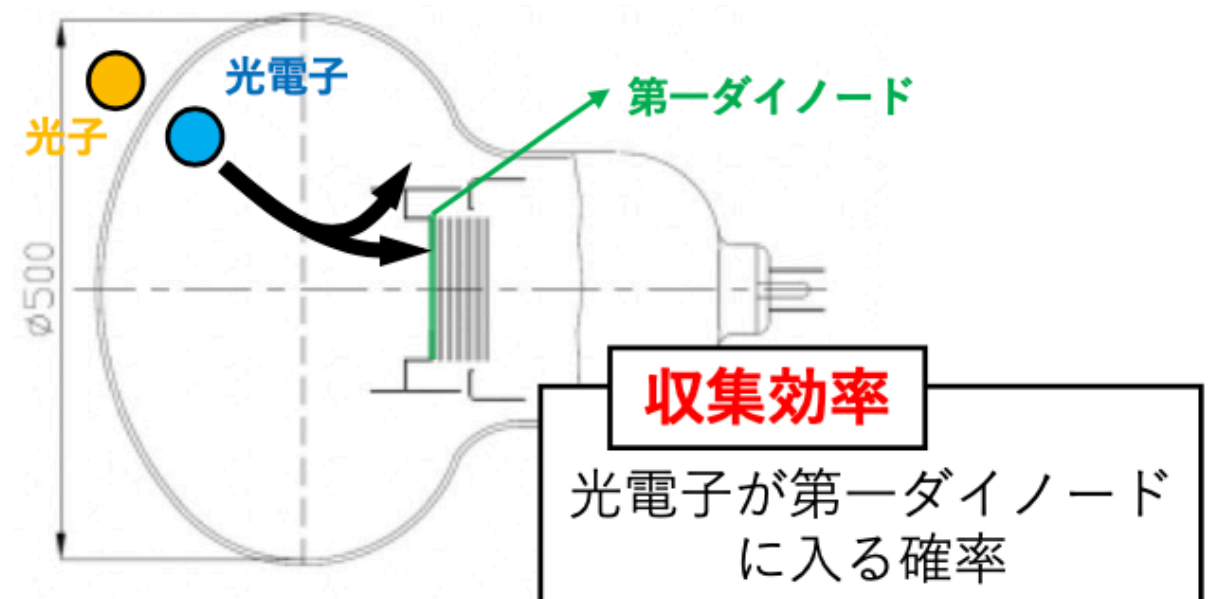
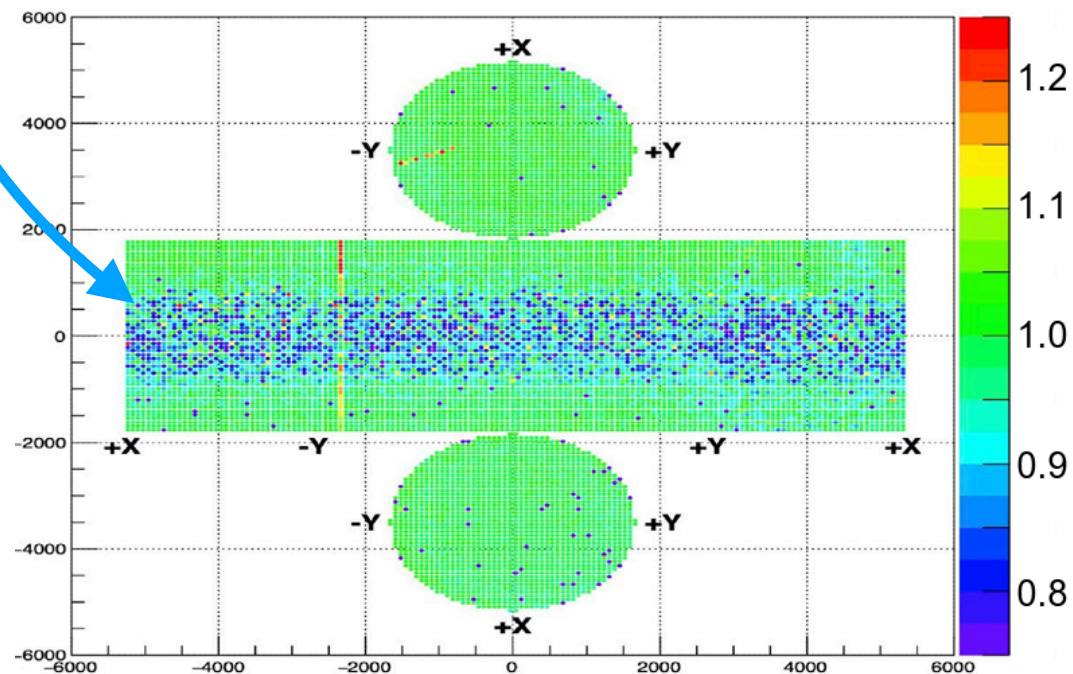
Initial PSD capability is far from the sensitivity paper

Coil Failure

- 2023年11月から12月にかけて3箇所の磁気補償コイルが故障。



- 4本1組で通電
- Coil#1と2では実際に切れたV01とV06を迂回して通電することでそれぞれ対処した。
- Coil#5は検出器外から対処できなかった。→ 2024年7月までCoil#5 offで運転 (SK-VII.5)
- 新たに水平・垂直コイルを設置するコイル修理を7-8月に行った。

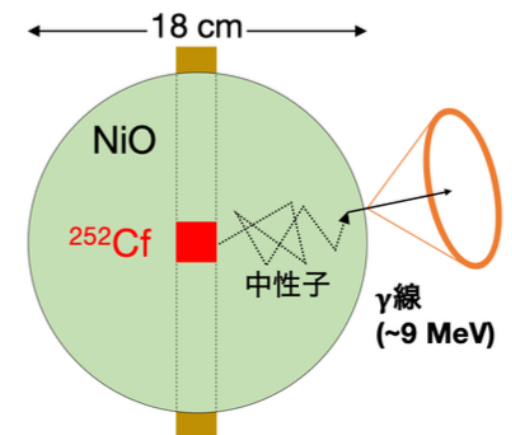


Geomagnetic Compensation Back!

- コイル修理前後の検出器の均一度をNiCf校正データから評価。
- コイル破損前との相対的なcollection efficiencyをPMTごとに測定。

-> 一様なCEの回復を確認！

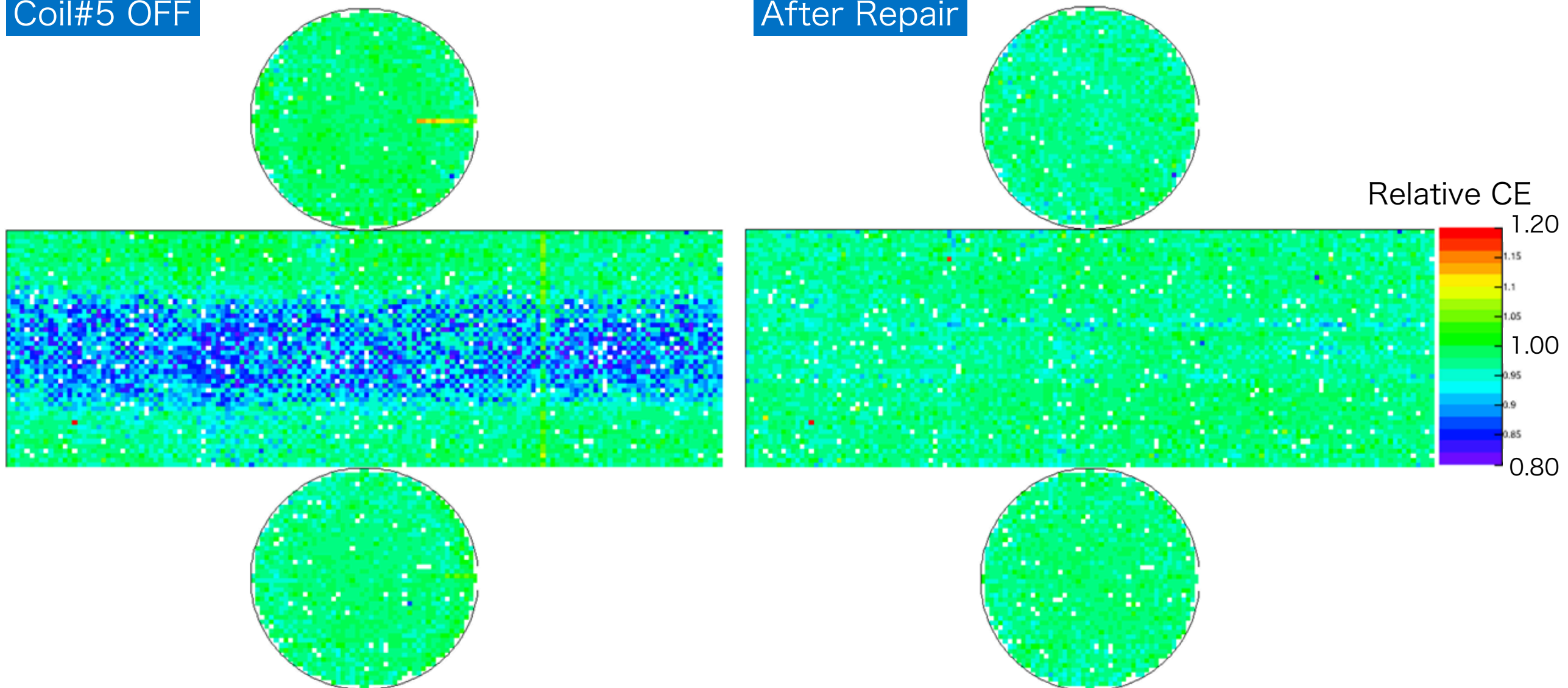
$$R_{CE} = \frac{\epsilon'_{CE}}{\epsilon_{CE}} = \frac{N'_{NiCf}}{N_{NiCf}}$$



一様等方な低光量源

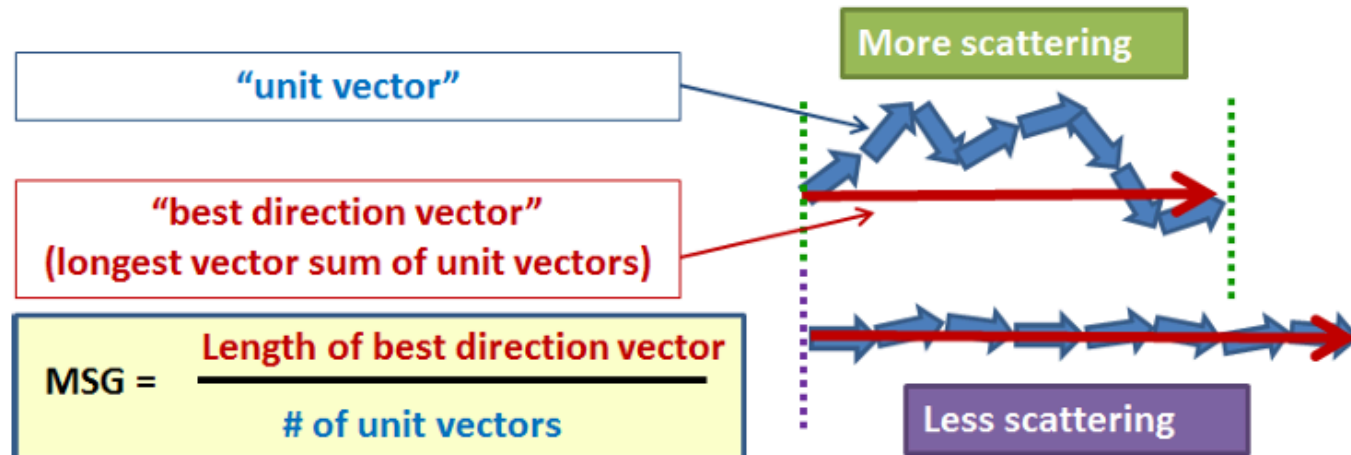
Coil#5 OFF

After Repair



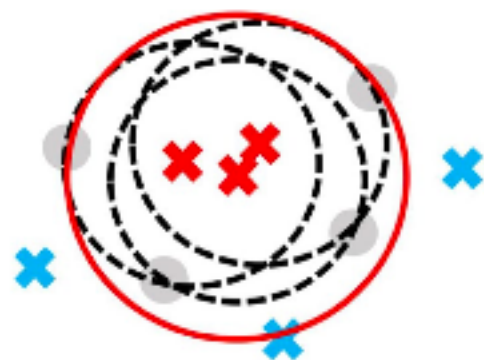
MSG

Multiple Scattering Goodness … 元々はSolar ν 解析で電子事象を選ぶための変数

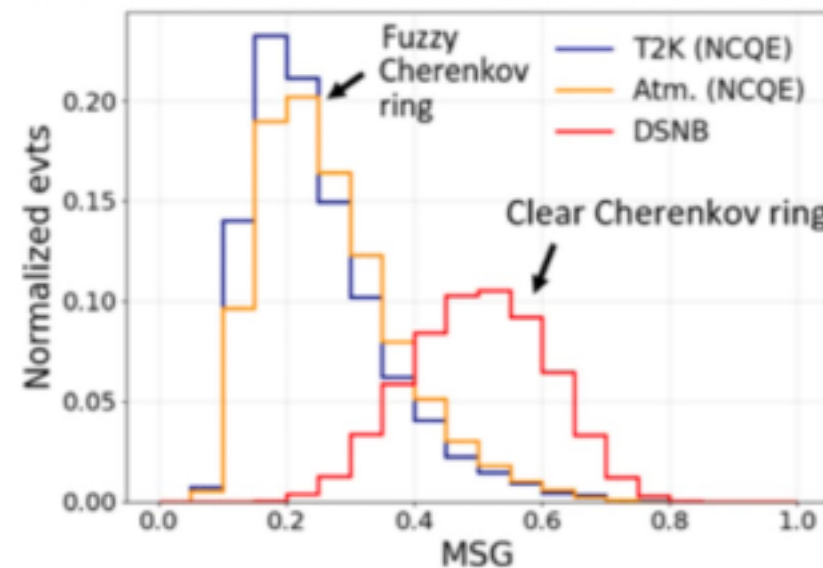


ガンマ線はscatteringでばらけて見える

荷電粒子は比較的まっすぐ進む

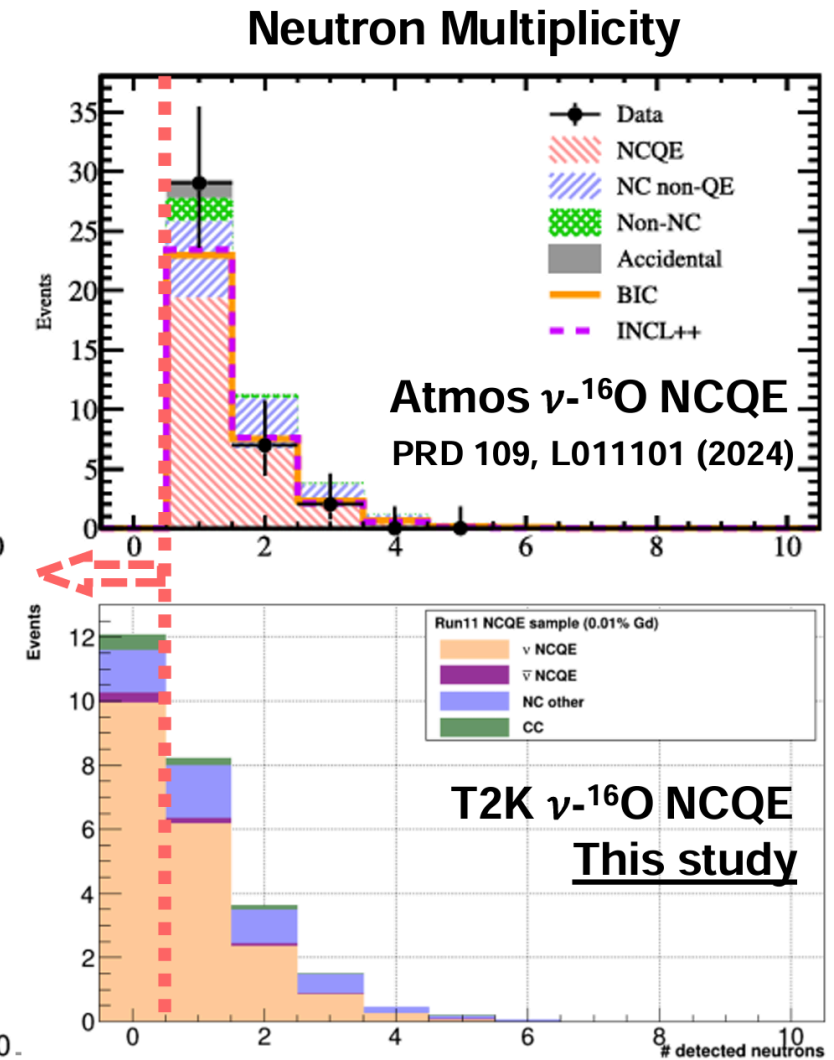
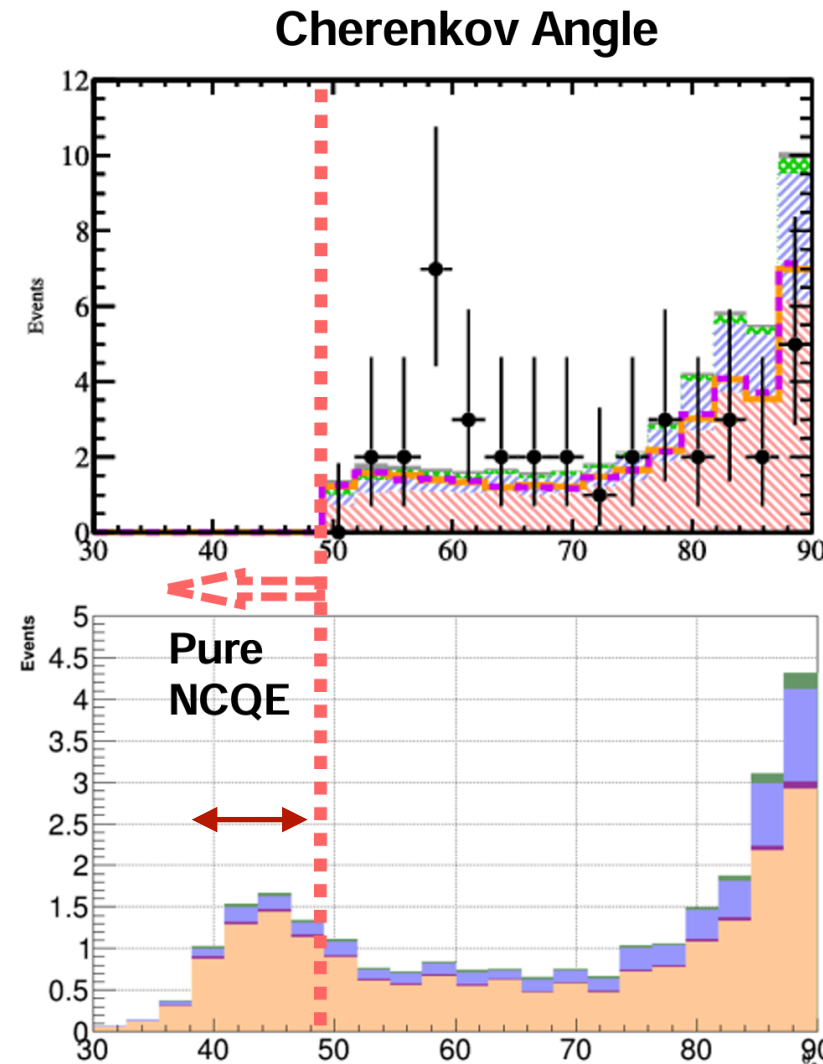
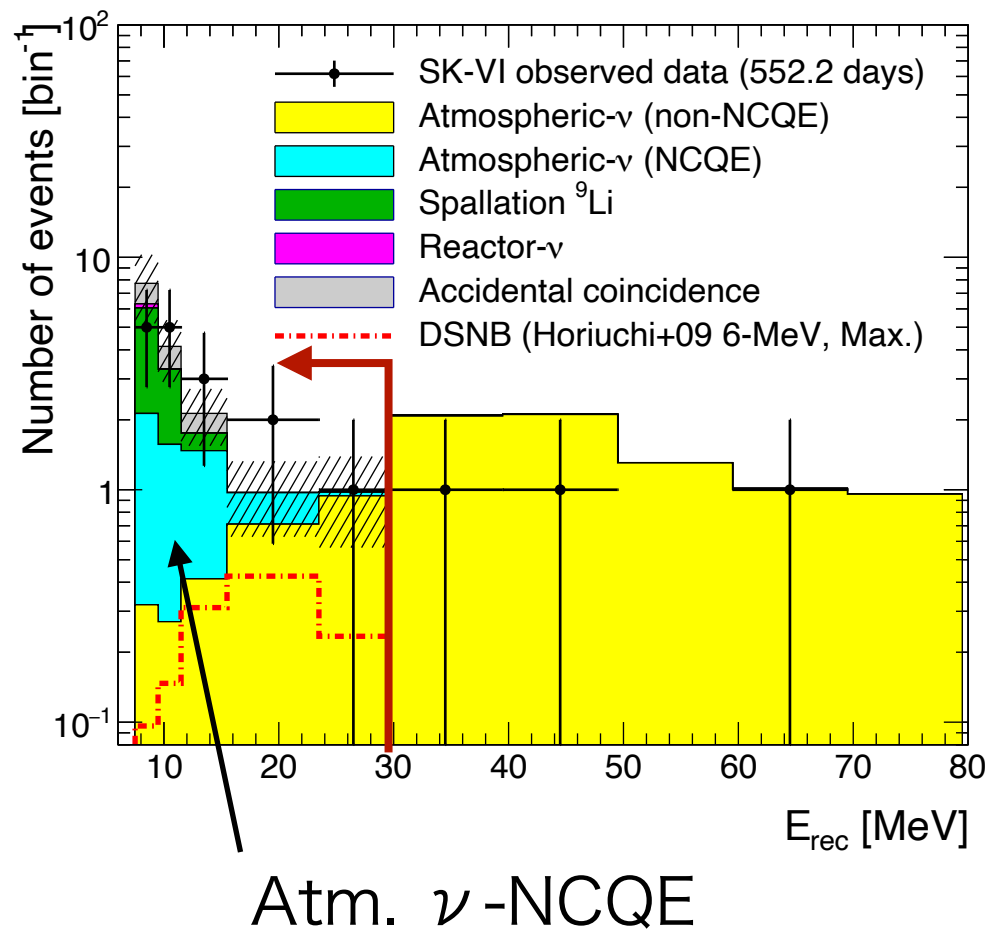


$$\text{MSG} = \frac{x}{x + x}$$



NCQE in T2K

Harada et al, ApJ Let. 951:L27 (2023)



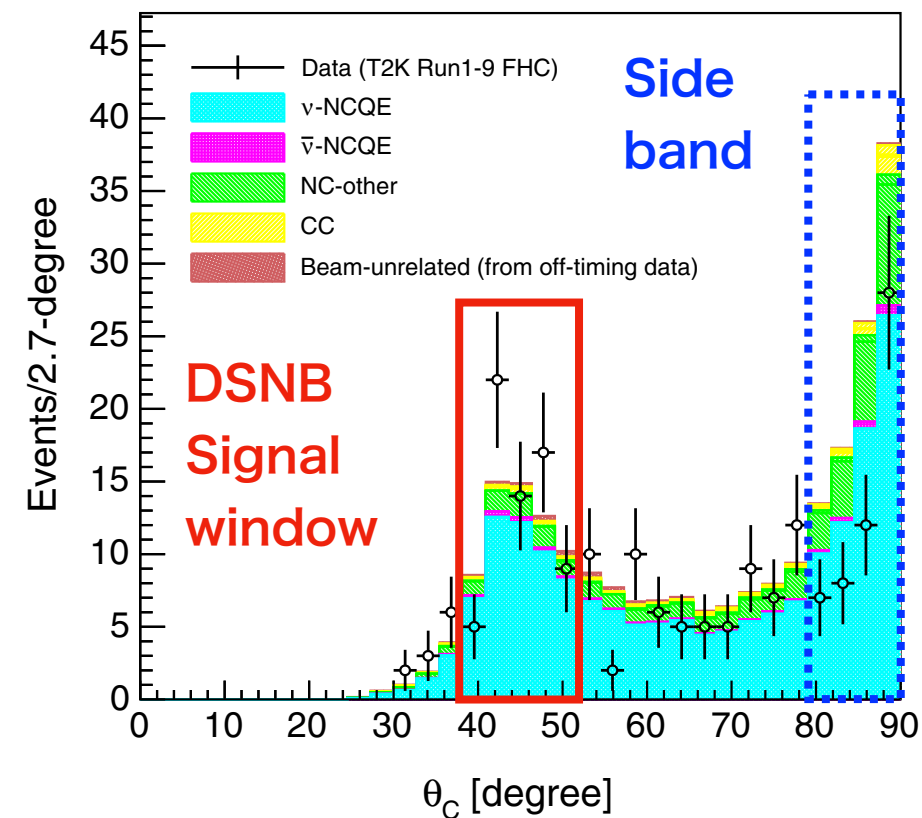
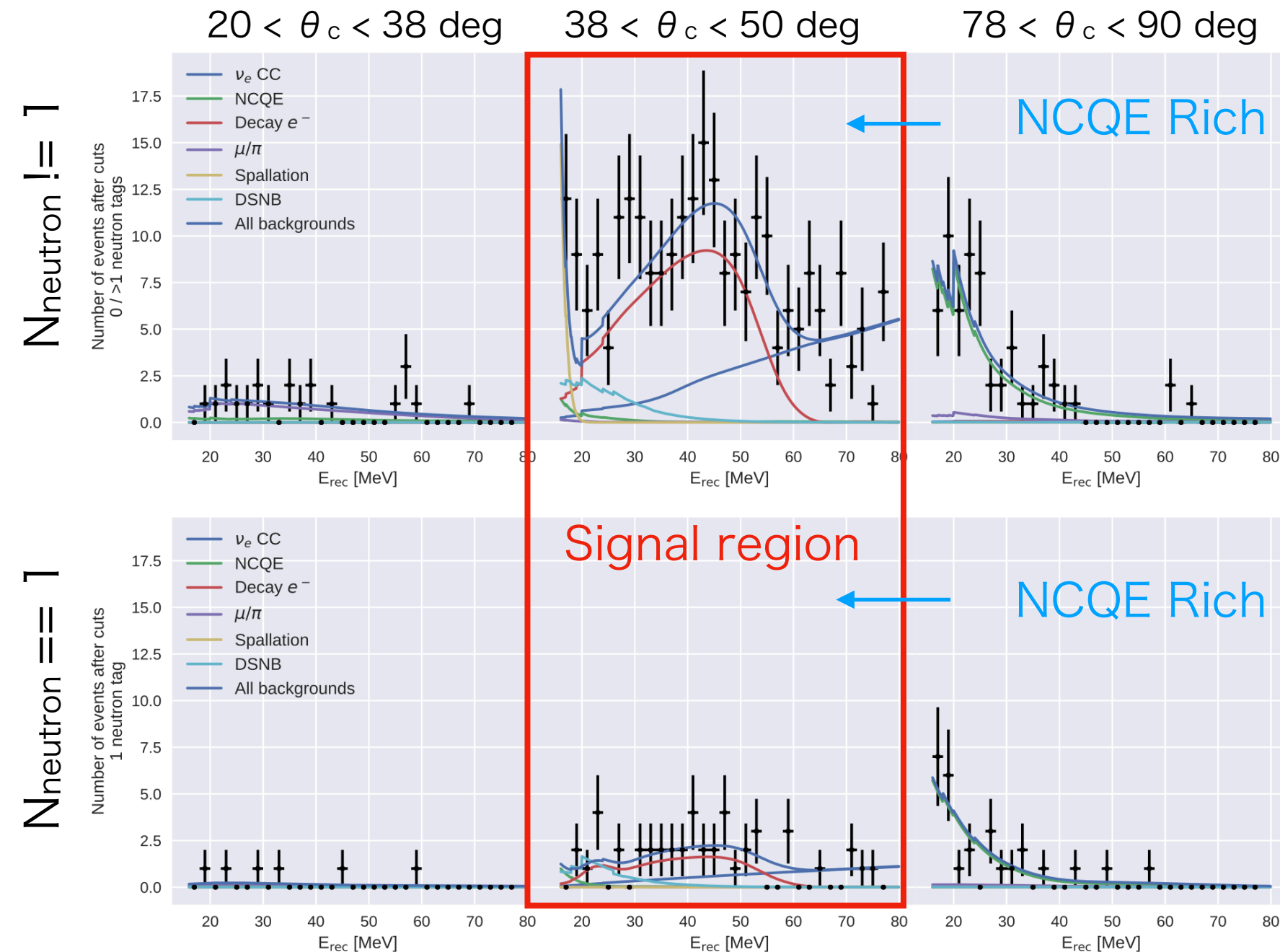
- Atm. ν -NCQE is a major concern in SK DSNB search.
- Because Atm. ν -NCQE analysis in SK overlaps with the DSNB sample, we can not study the NCQE behavior in the DSNB signal window.
-> T2K-NCQE can! as well as comprehensive studies to estimate systematics coming from the reaction and with small accidental BG.
- Possible to examine a NCQE reduction method based on the data!

Why θ_c and Neutron? ⁴⁷

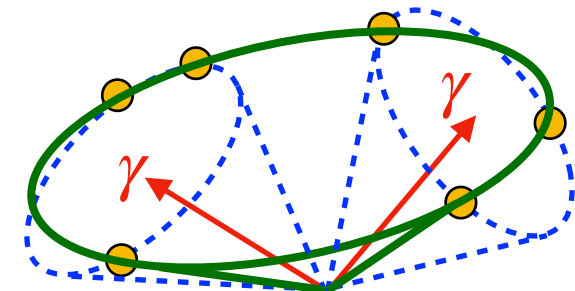
- BGs in the DSNB signal region are constrained using Cherenkov angle θ_c and the number of tagged neutron (multiplicity) in the spectral fit analysis.
- > misunderstanding of these leads to systematic uncertainties.

SK-IV DSNB paper, PRD 104(12):122002, 2021

But in run 1-9 shows...
and no neutron info.

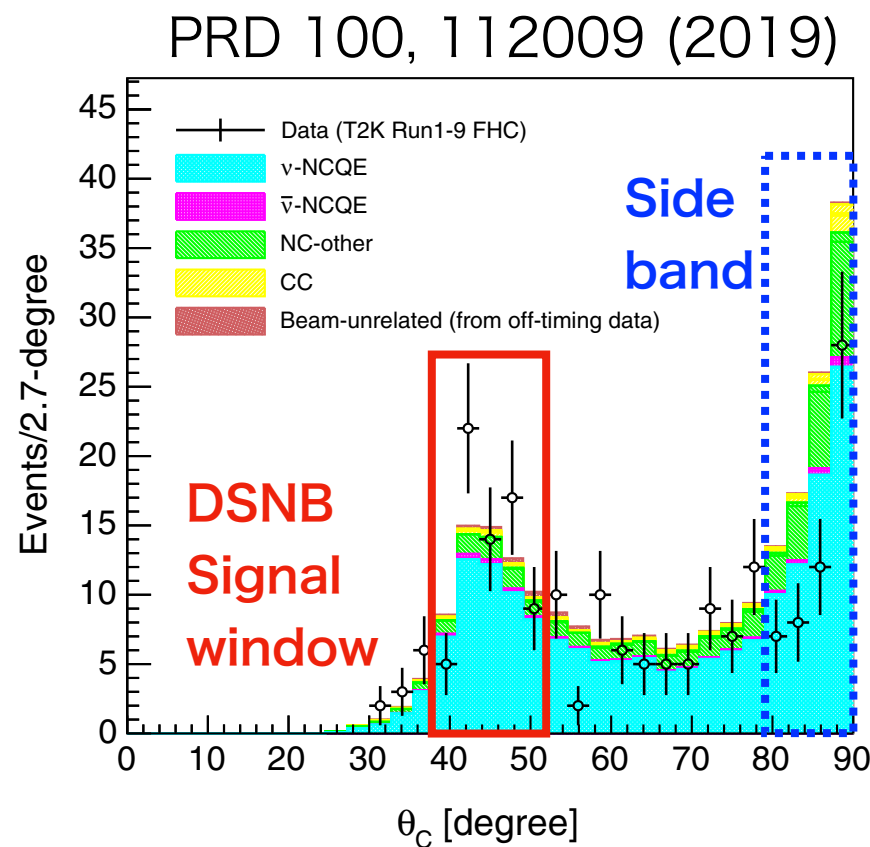


PRD 100, 112009 (2019)

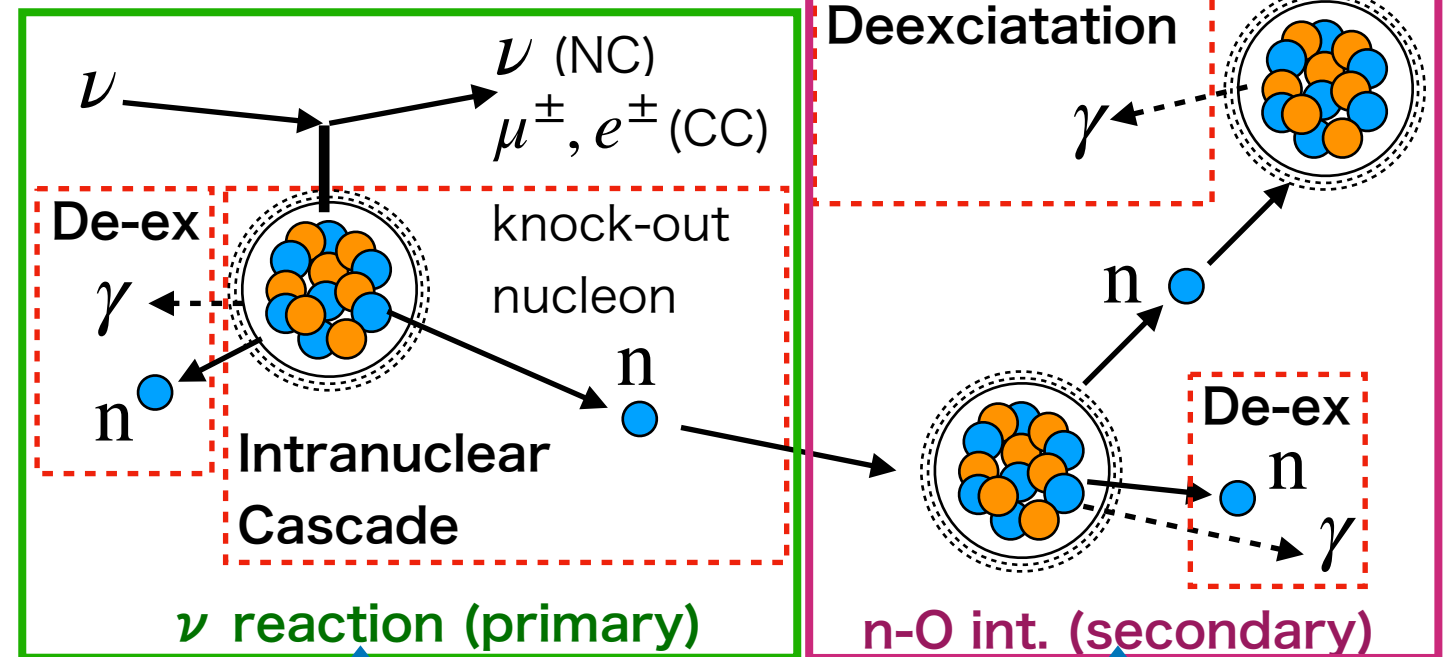


For Further Improvement

- Re-visit run1-9 analysis with the different MC models.



Background: Atm. ν -NCQE



int. model update

Add G4-det. simulation likewise run1 analysis

- Combine run 1-13 (pure + Gd-loaded water phases)

Run 1-13 :

Statistic

Run 1-9 (POT)	Run 1-11 (POT)	Run 1-13 (POT)
FHC: 14.94×10^{20}	$\rightarrow 21.47 \times 10^{20}$	$\rightarrow 27.00 \times 10^{20}$ ($\sim 1.8 \times$ Run 1-9)
RHC: 16.35×10^{20}	$\rightarrow$ No increase	$\rightarrow$ No increase (+ 0% RHC)

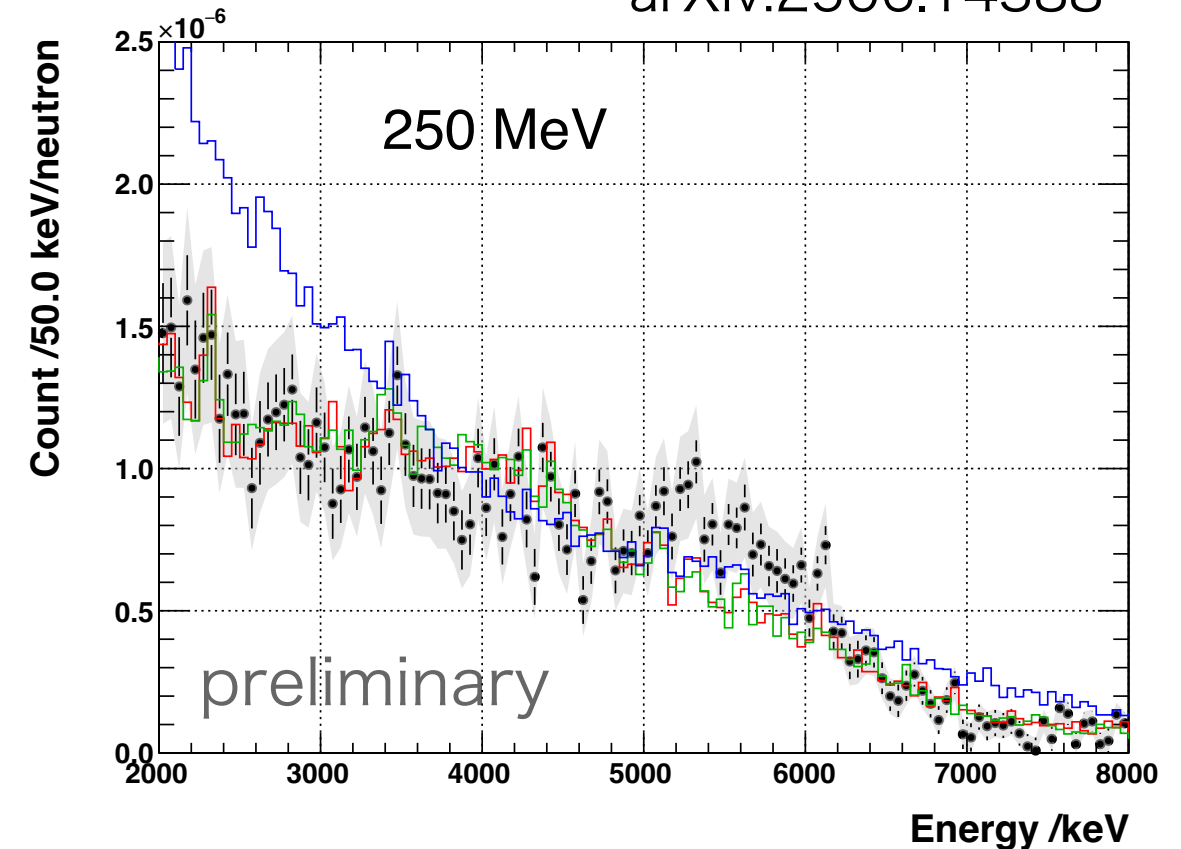
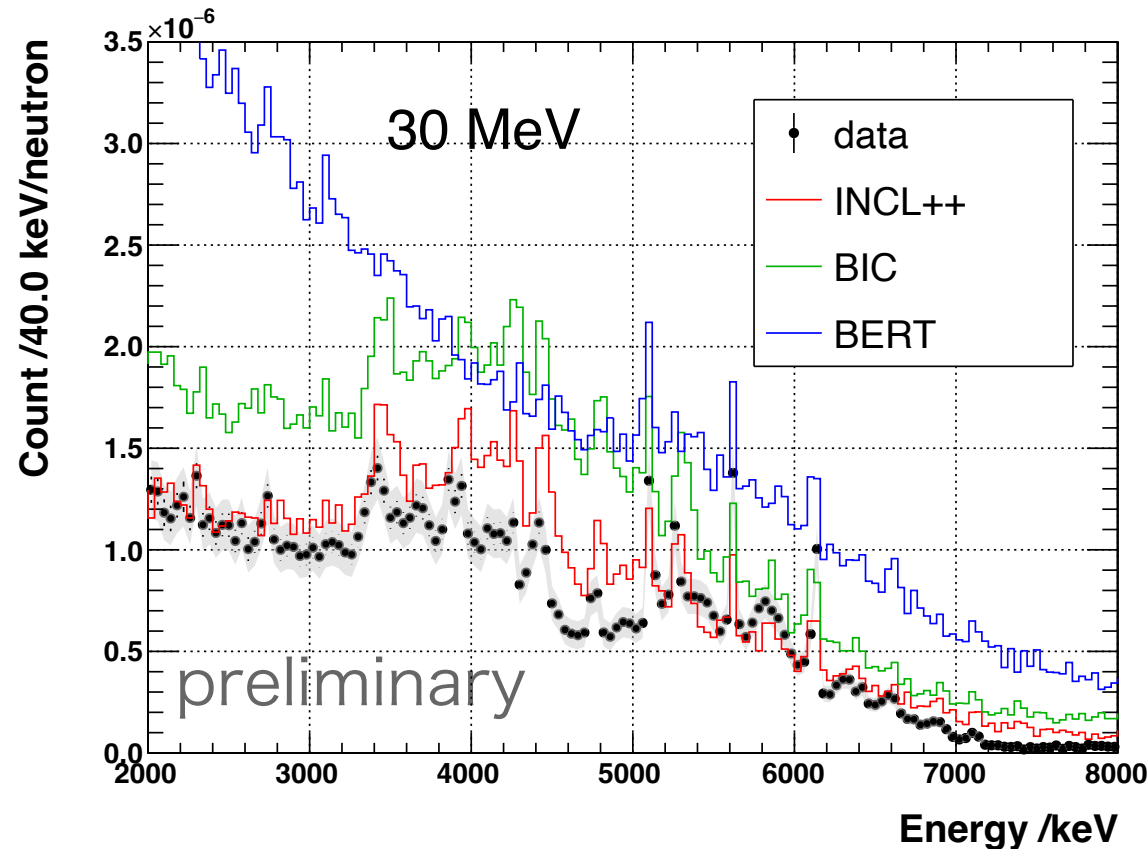
NCQE neutron numbers:

Run 1-9	: # 61 (FHC, 19% ntag eff.) # 21 (RHC, 19% ntag eff.)
Run 11	: # 21 (FHC, 50% ntag eff.)
Run 12-13	: ~ 85 (FHC, 65% ntag eff.)

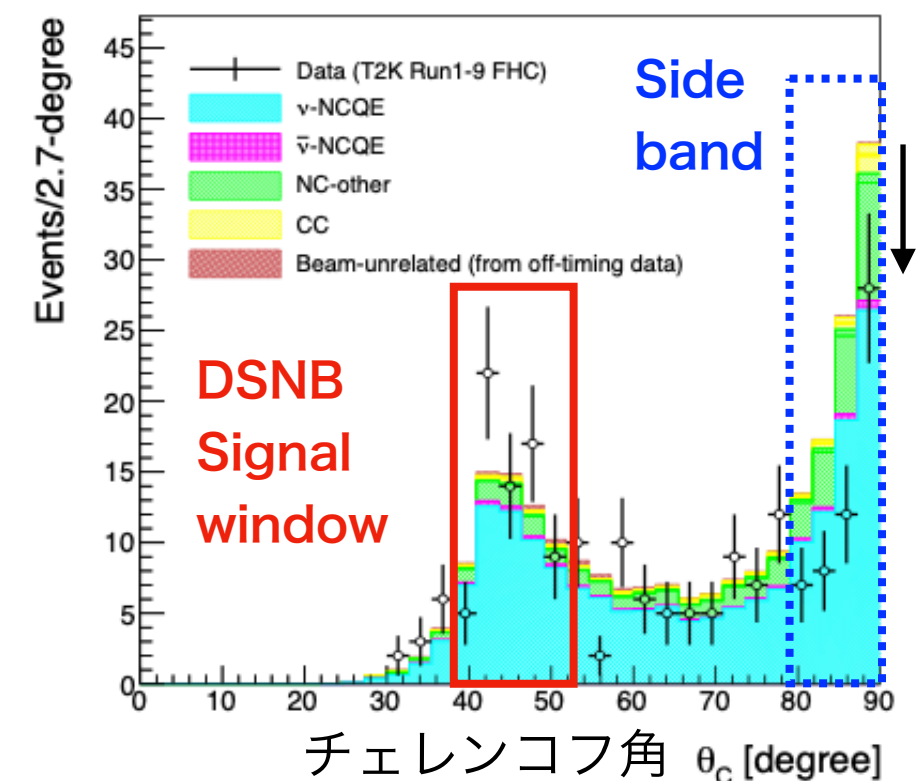
-> **SKG4 in pure water phase** is necessary! Now in progress!

Data vs Simulation

arXiv:2506.14388

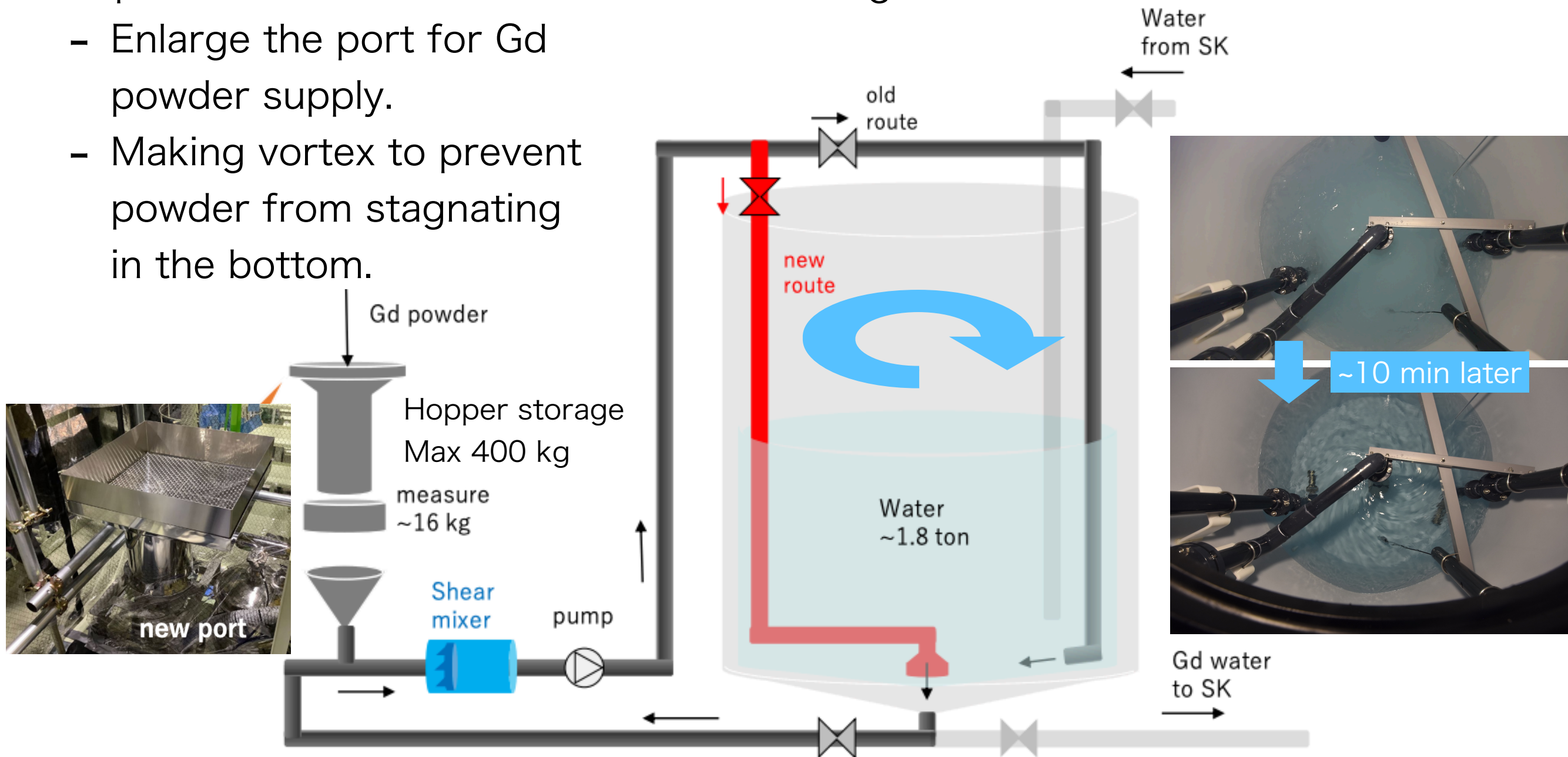


- E525 (30, 250 MeV) のデータとシミュレーションの比較: 中性子反応あたりのガンマ線生成量
- 従来使われてきたモデル (青線) はデータを再現しないことを確認。→ T2Kの測定を支持！
- よりデータを再現するモデル (赤線: INCL++) は従来より少ないガンマ線生成
→ 大角度のチェレンコフ角をもつ事象を減らす方向に！



Gd Dissolving System⁵⁰

- Improvements for double amount dissolving
 - Enlarge the port for Gd powder supply.
 - Making vortex to prevent powder from stagnating in the bottom.



- Dissolved 17 kg powder into 1.8 ton water at each batch (~ 30 min).
- Powder replenishment and lot management was done by the expert shifters.
 - supplied ~260 kg at each shift.

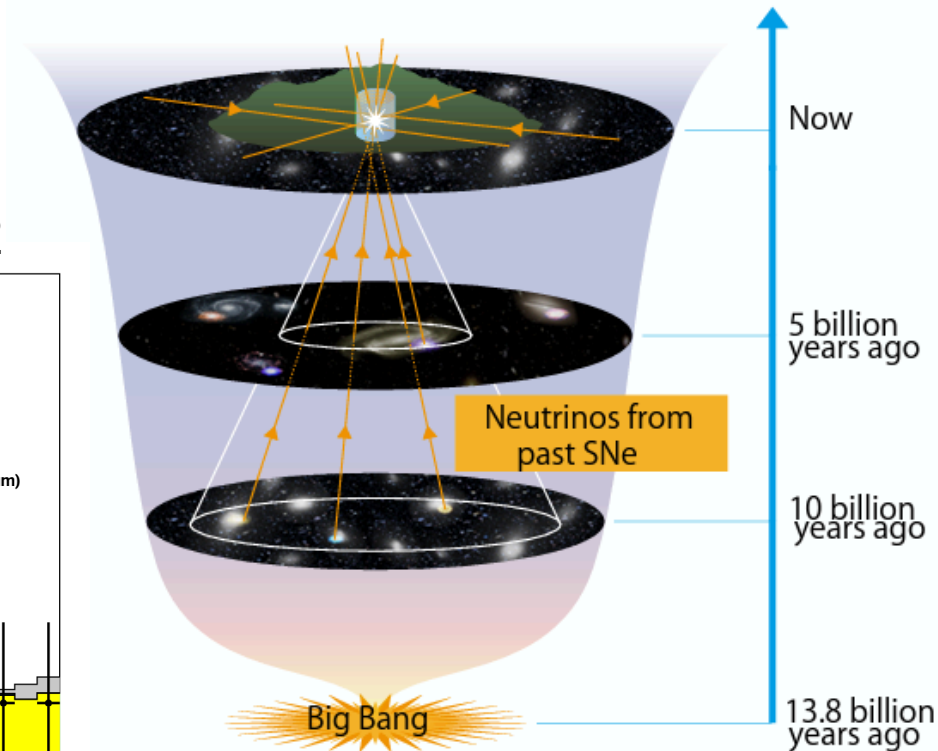
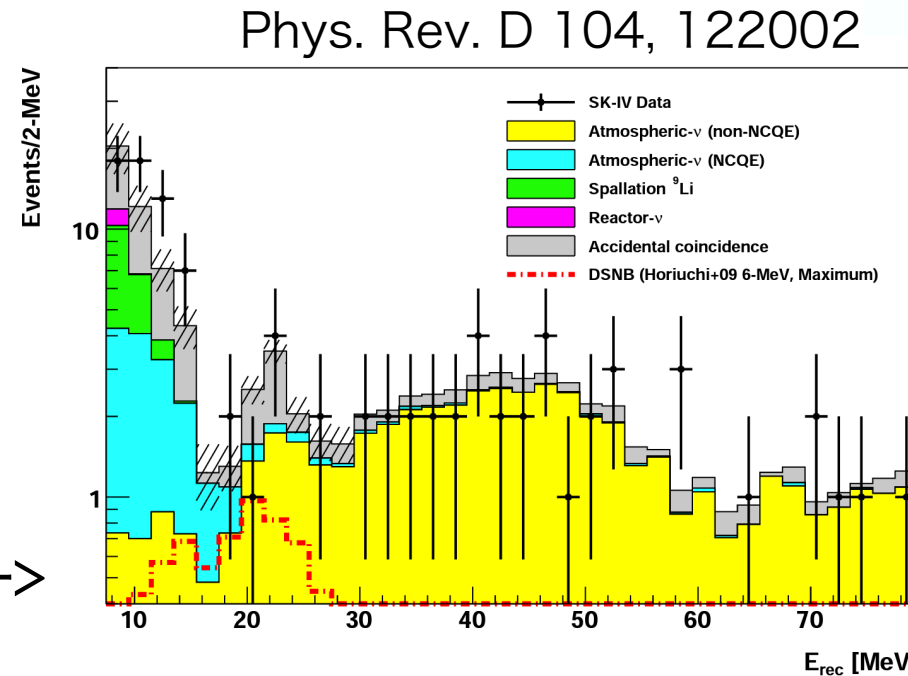
Physics in SK-Gd

- Diffuse Supernova Neutrino Background (DSNB)

- accumulated flux of ν from past CCSNe

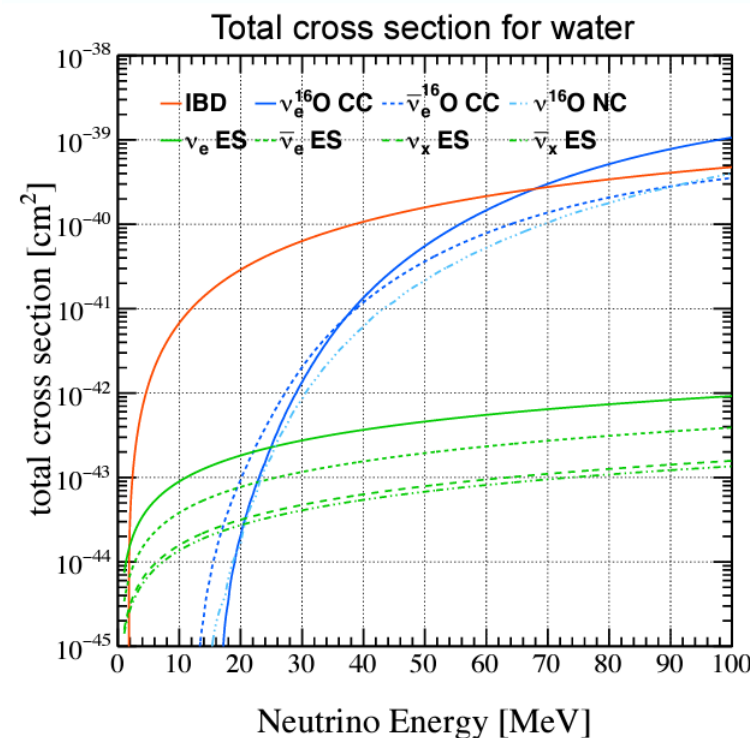
- both sig. eff. and BG rejection will be improved by Gd n tag
-> further sensitivity towards discovery.

pure water ~10 years ->

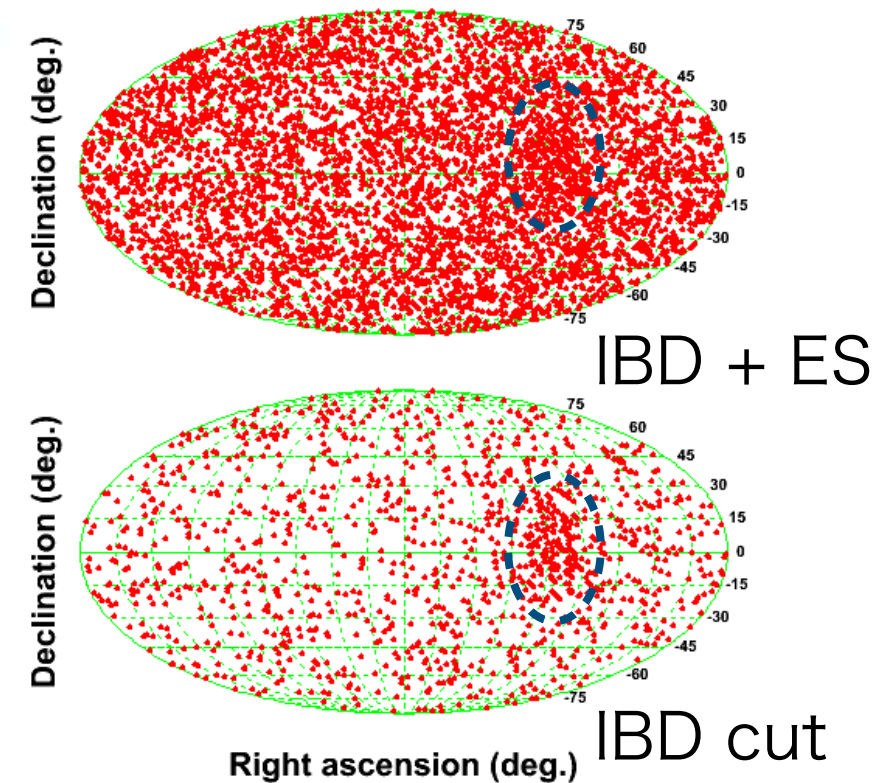


- Galactic Supernovae (e.g., SN burst Pointing)

- elastic scattered e^- keeps directionality of incident ν_e .
 - IBD will be BG due to loss of directionality in IBD e^+ .
-> Removing IBD by neutron tagging improves SN burst pointing accuracy.

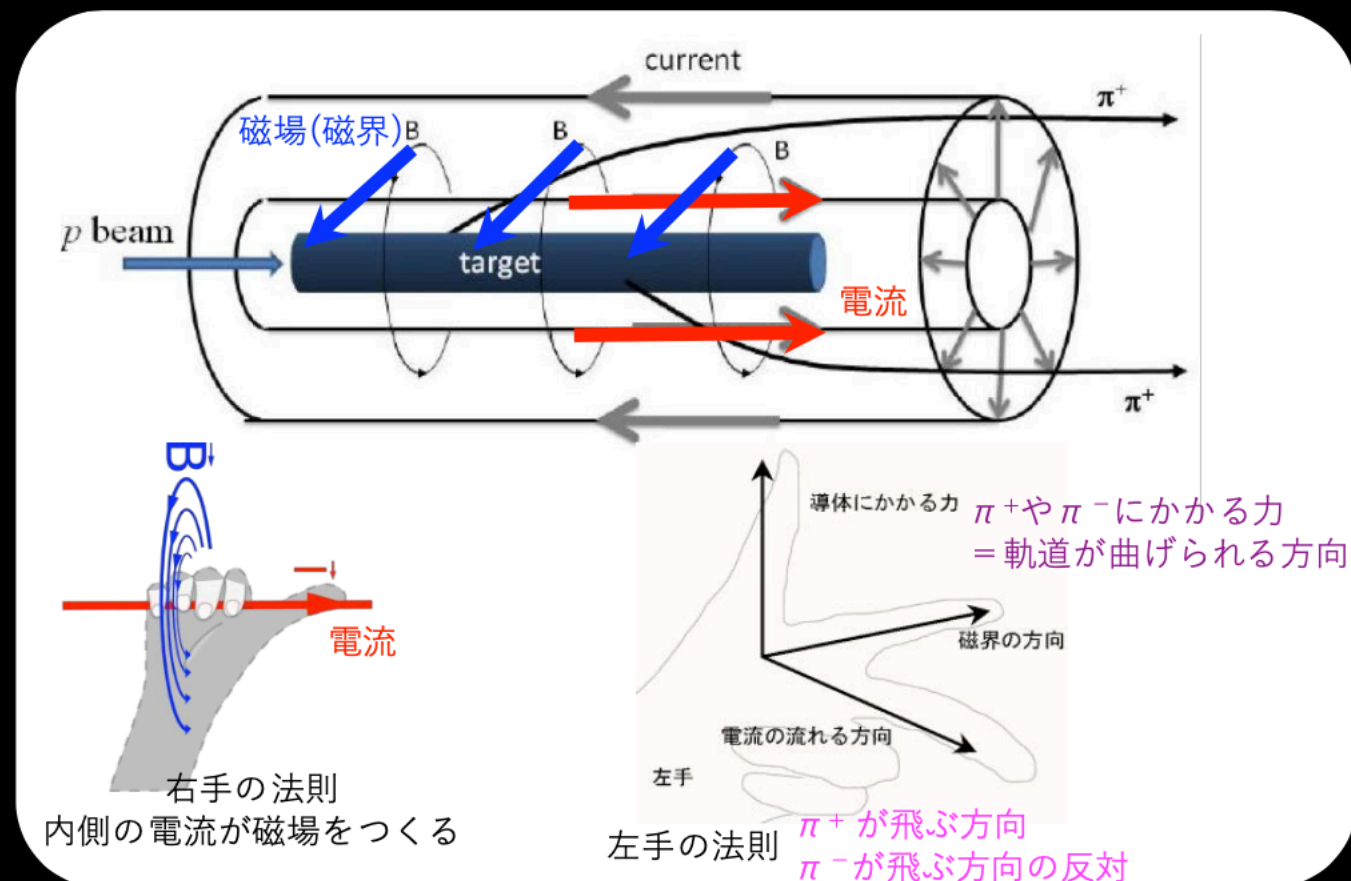
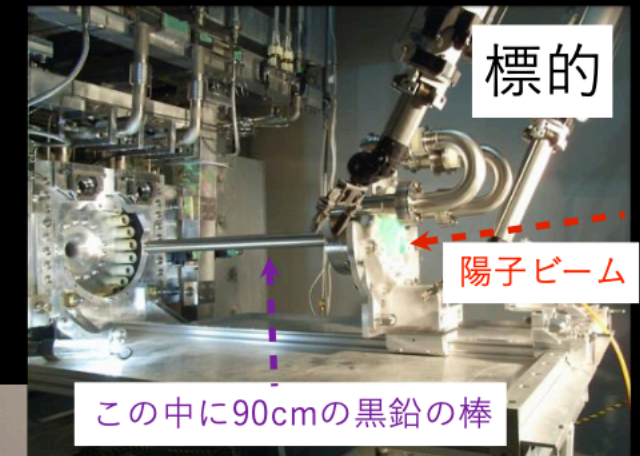


SN Burst Pointing



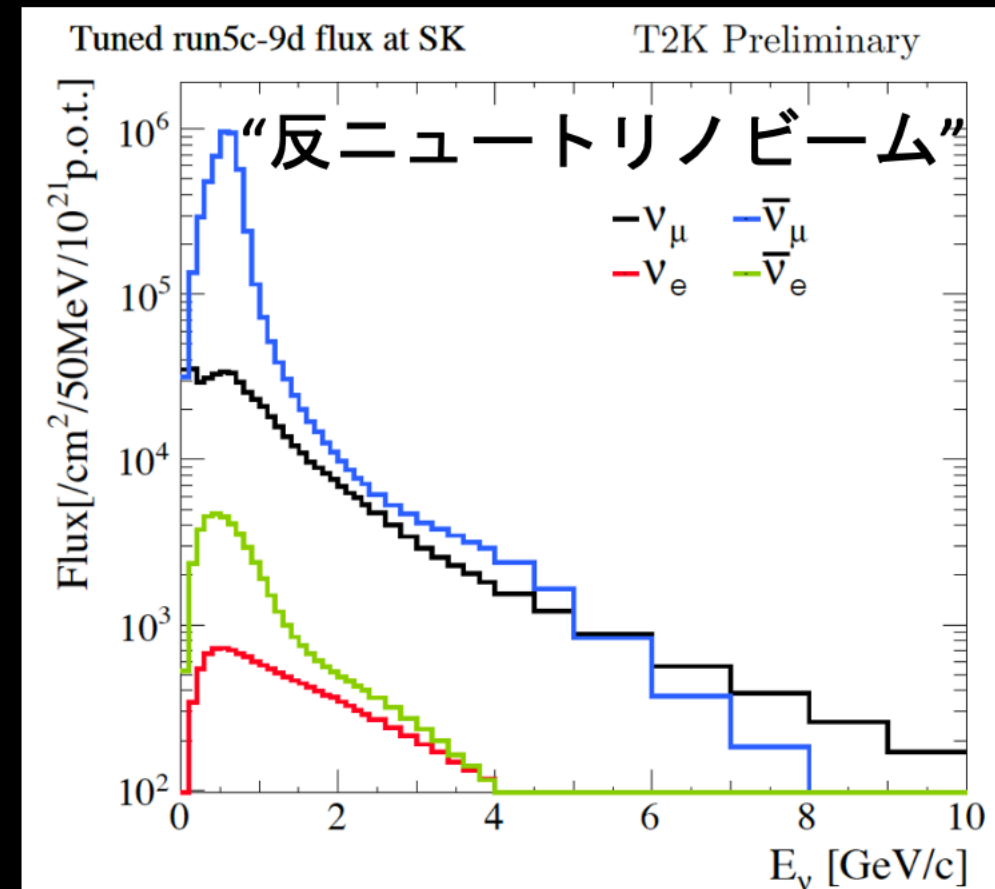
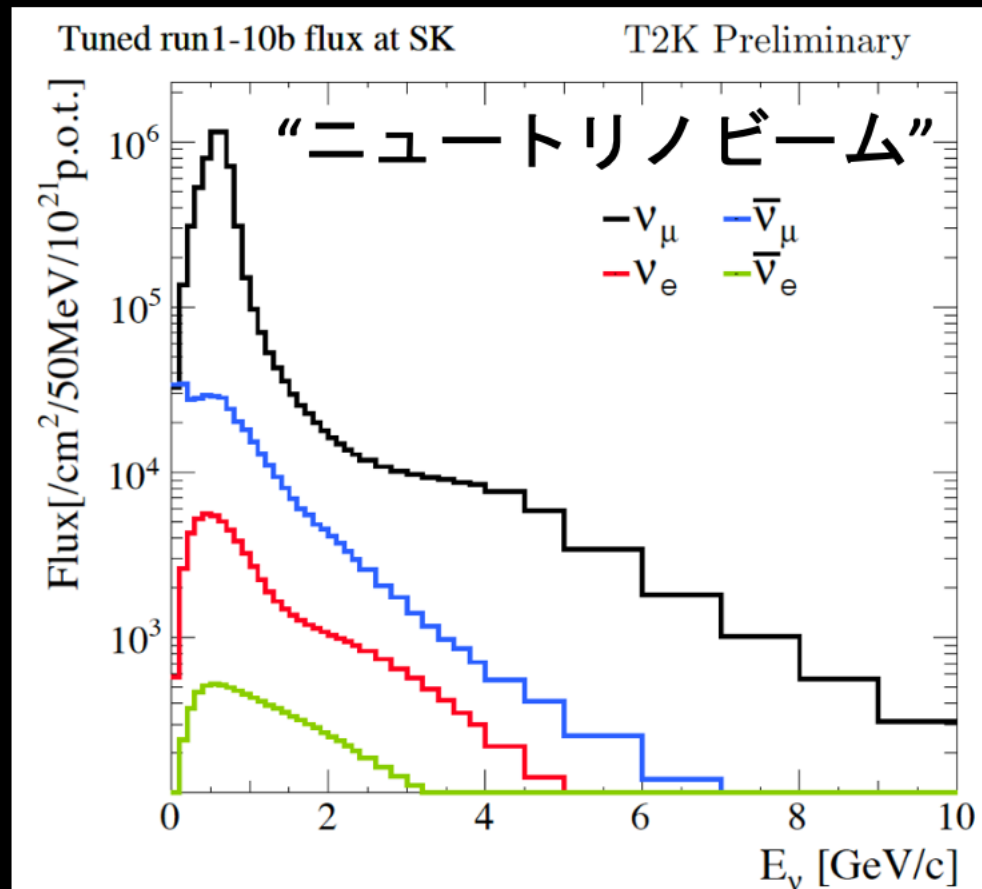
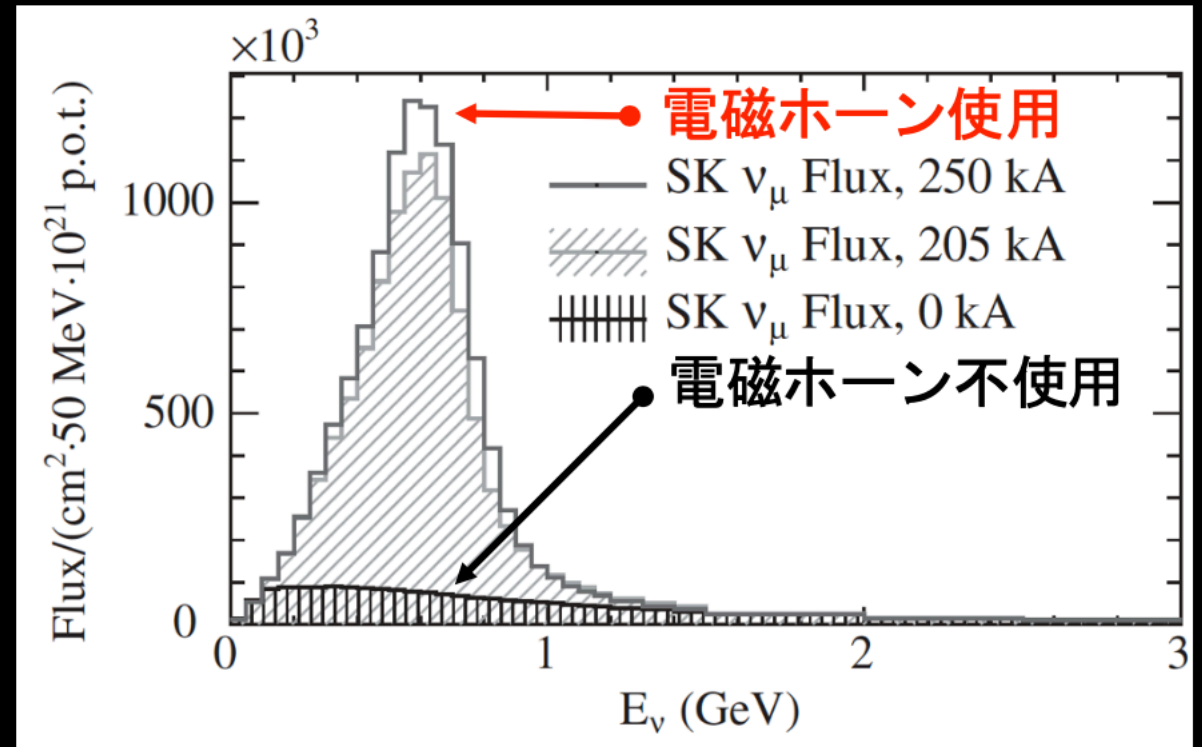
Horn Focused Beam

- 標的：世界最高強度の陽子ビームの照射に耐える
- 三台の電磁ホーン：磁場で荷電パイ中間子を収束する。
- 原理は有名な法則に従っています。
 - アンペールの右手の法則(右ネジの法則)：電流を流すと、周りに磁場(磁界)が発生する。
 - フレミングの左手の法則：荷電パイ中間子の流れ(=電流)は磁場(磁界)から力を受け、曲がる。
- **32万アンペア**という大電流で最大2.4Tの磁場を発生させる
(数百分の1秒の間ですが....)



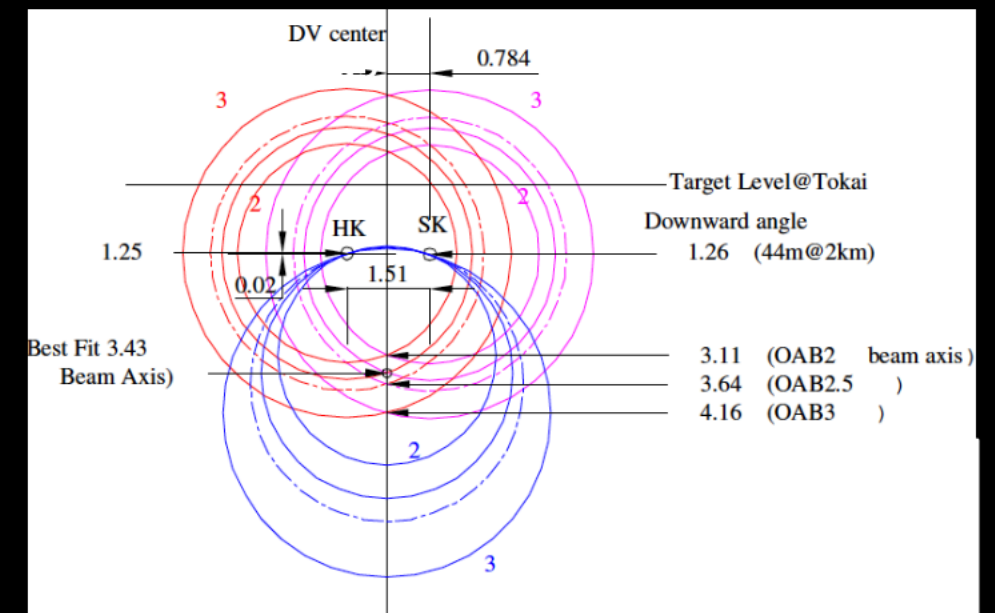
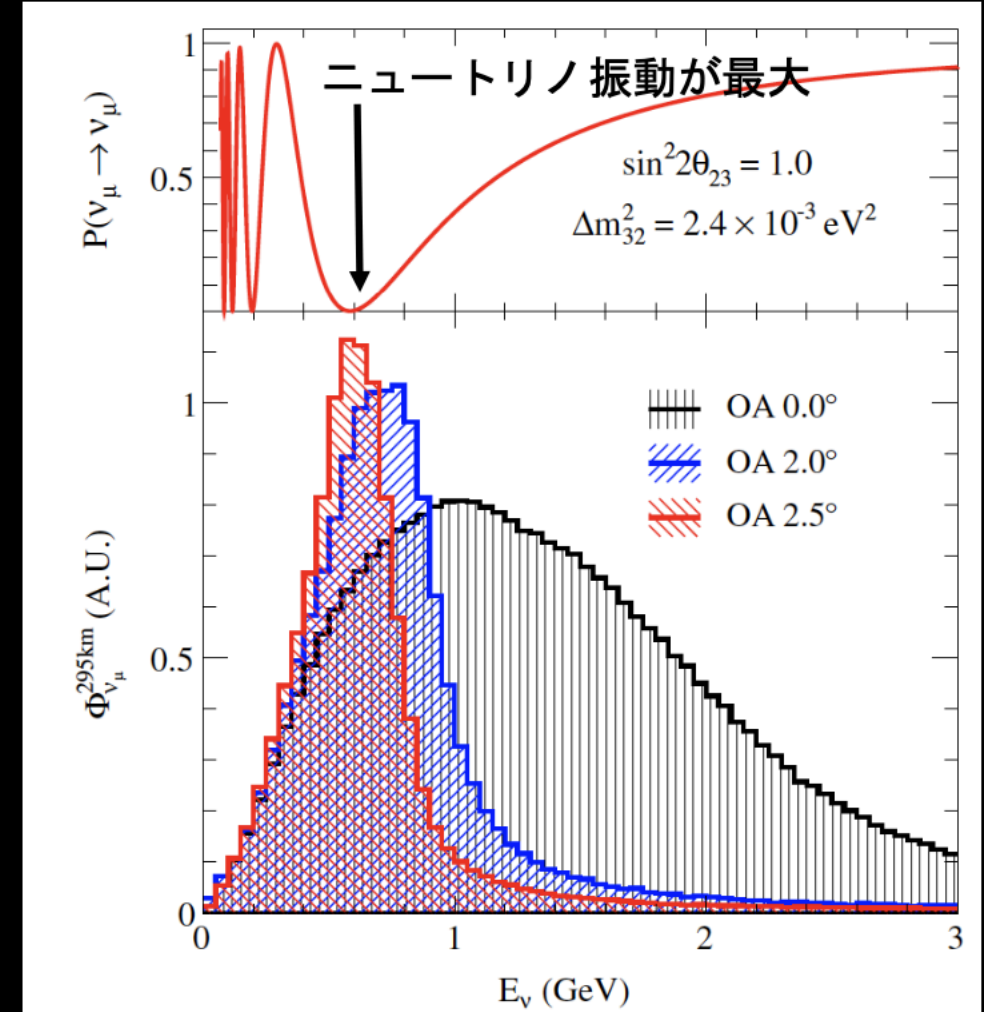
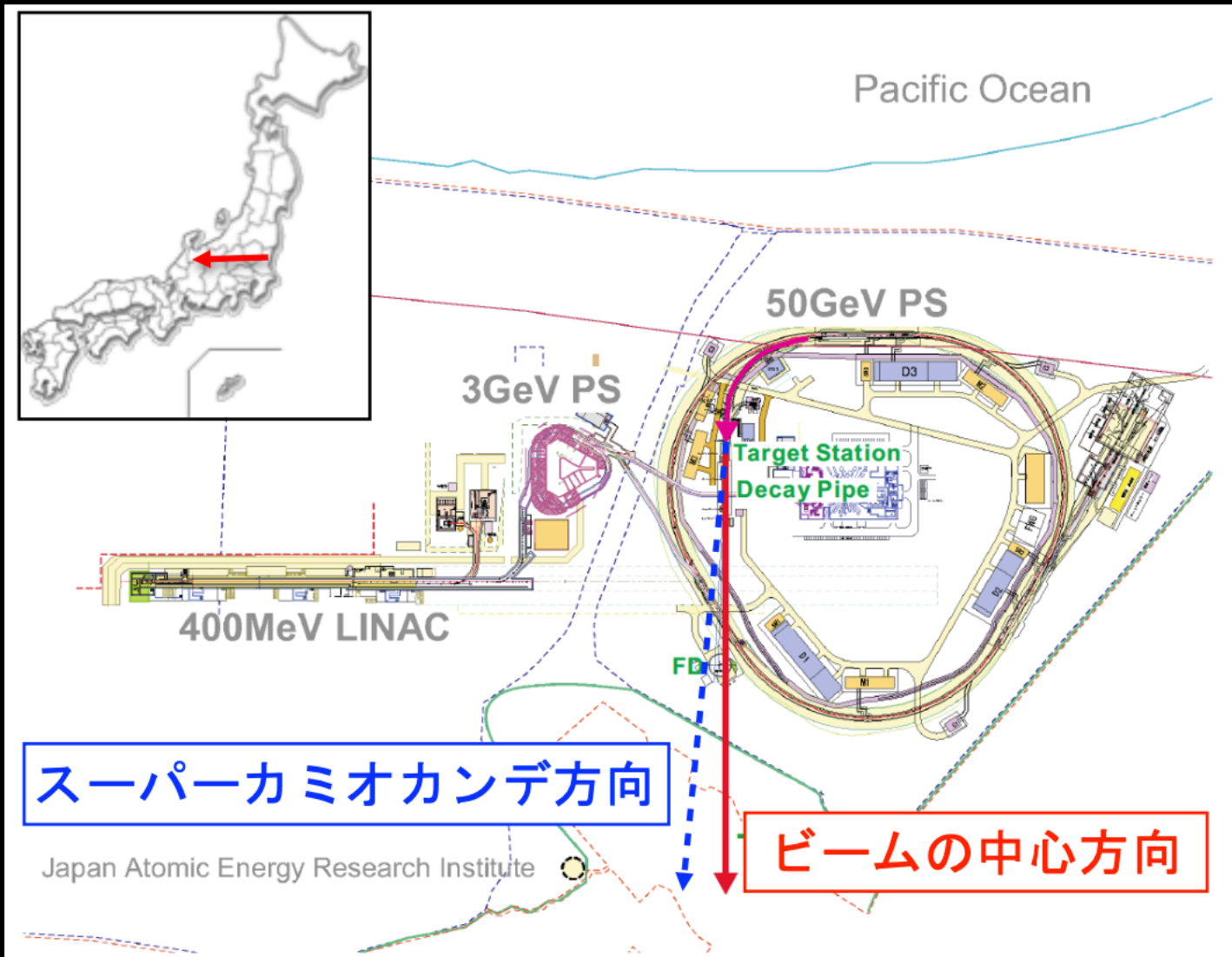
Neutrino Beam

- 電磁ホーンの効果は絶大
- “ニュートリノビーム”, “反ニュートリノビーム” は純度100%ではないので、ビーム生成直後にあらかじめ測定して見積もっておく必要がある。



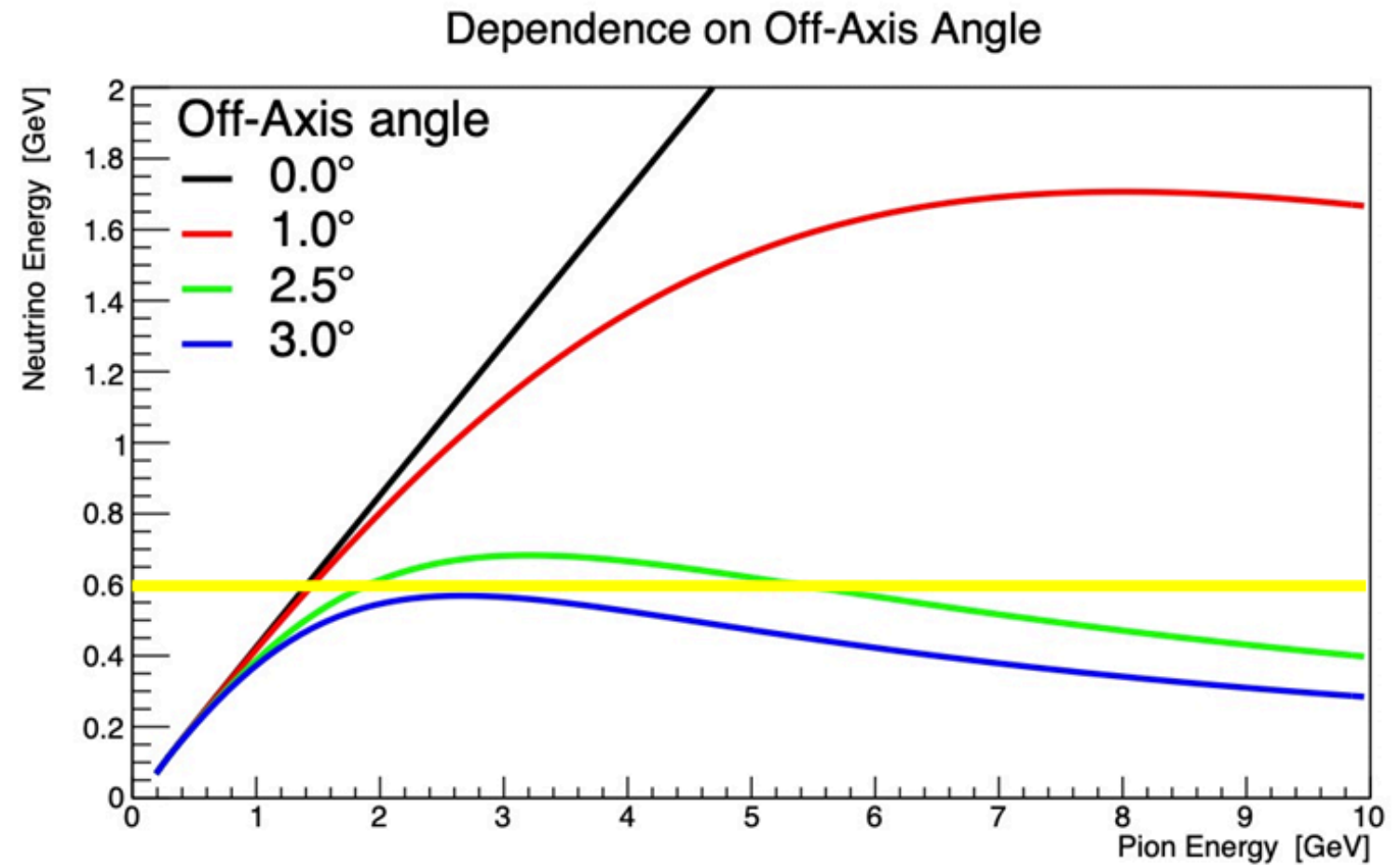
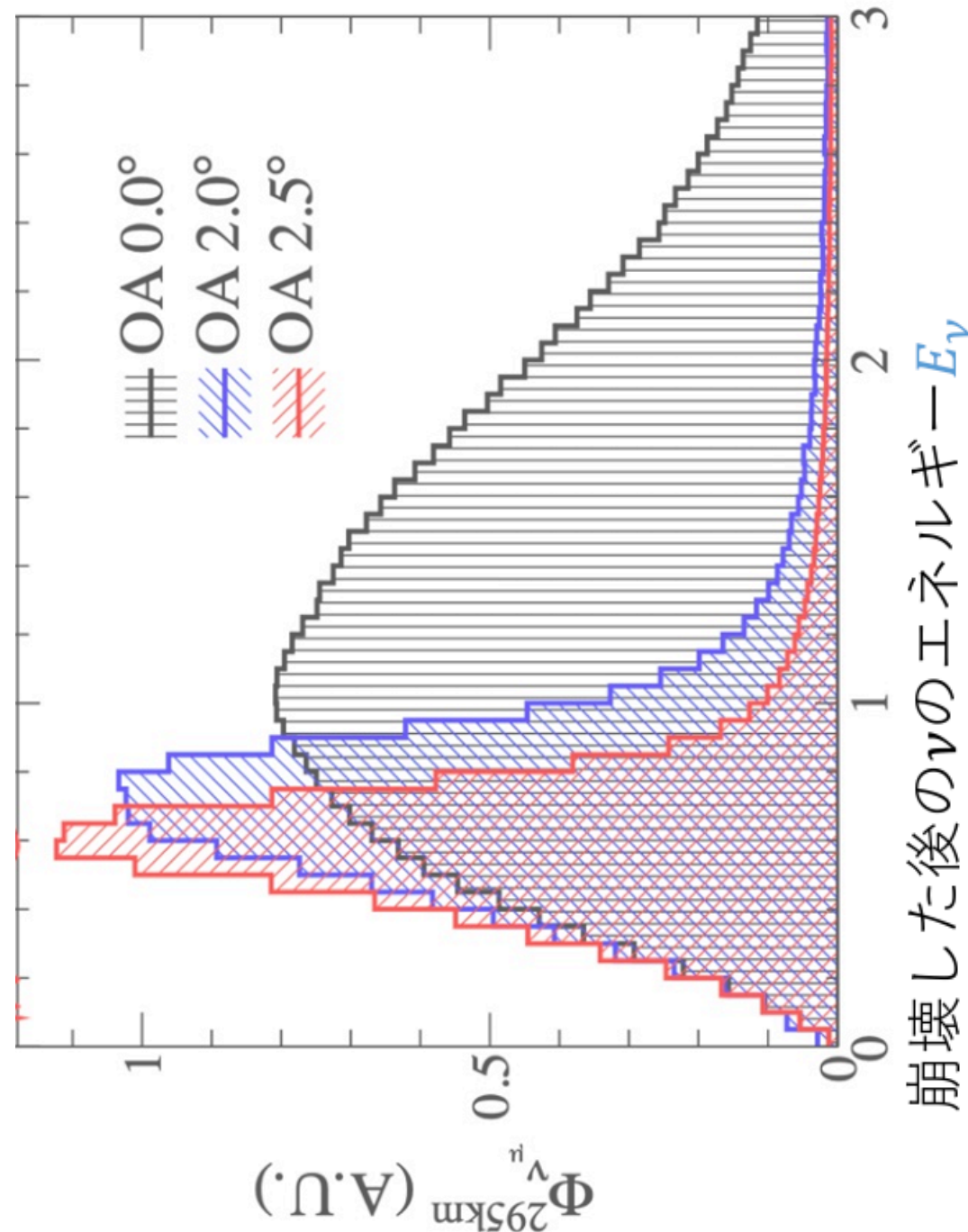
OFF-Axis Beam

- ニュートリノビームの方向をわざとずらし、
そのエネルギーを揃える。
→ニュートリノ振動の効果が最大限に現れる
ビーム条件を実現
- ビームの方向をよく制御・測定しておく必要がある。



OFF-Axis Beam

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2E_\pi} \frac{1}{1 - \cos\theta \sqrt{1 - \frac{m_\pi^2}{E_\pi^2}}}$$



崩壊する前の π のエネルギー: E_π

