

講演番号 7pA125-3

# SK-Gd実験における大気ニュートリノ シミュレーションを用いた中性子多重度の研究

酒井 聖矢 (岡山大理)

他 Super-Kamiokande Collaboration

2022年9月7日 日本物理学会 2022年秋季大会

- スーパーカミオカンデ (SK) では超新星背景ニュートリノ (SRN) の世界初観測を目指している

- SRN探索における観測対象

→  $\bar{\nu}_e$ による逆ベータ崩壊反応 ( $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ )

- **SK-Gd実験** (2020年7月 - )

→ SKの超純水中に質量濃度0.1%のGdを導入 (現在は0.03%)

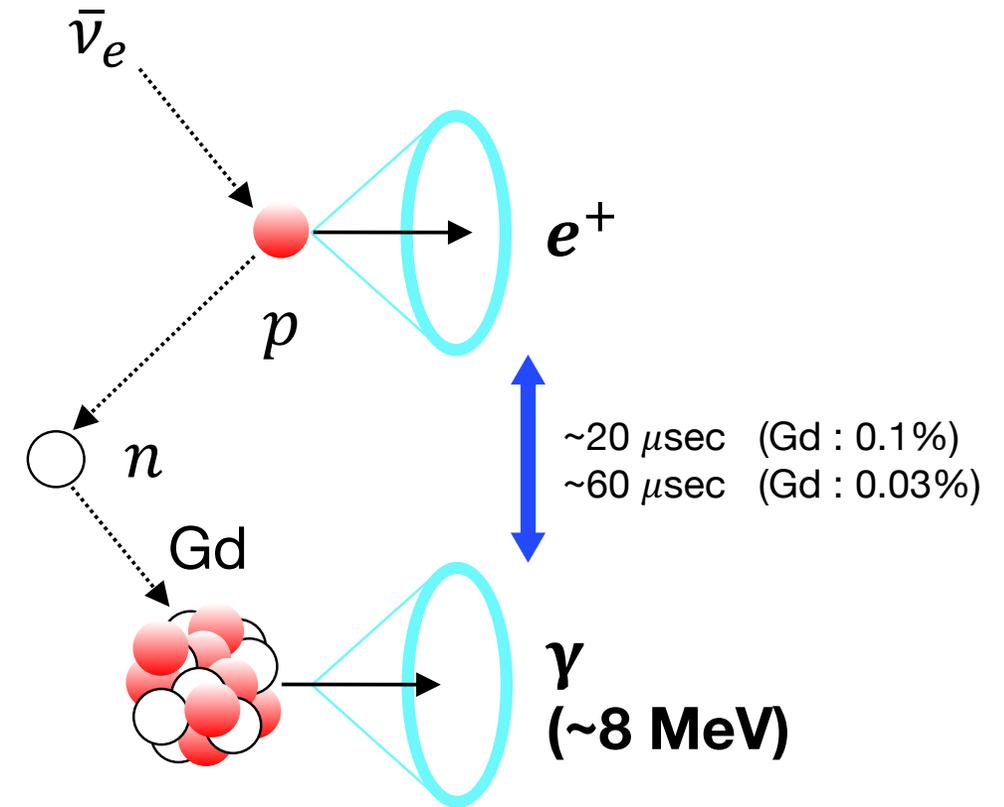
- Gdが熱中性子を捕獲すると合計~8 MeVのガンマ線を放出

→ 中性子を~90% (現在は~70%) の確率で同定

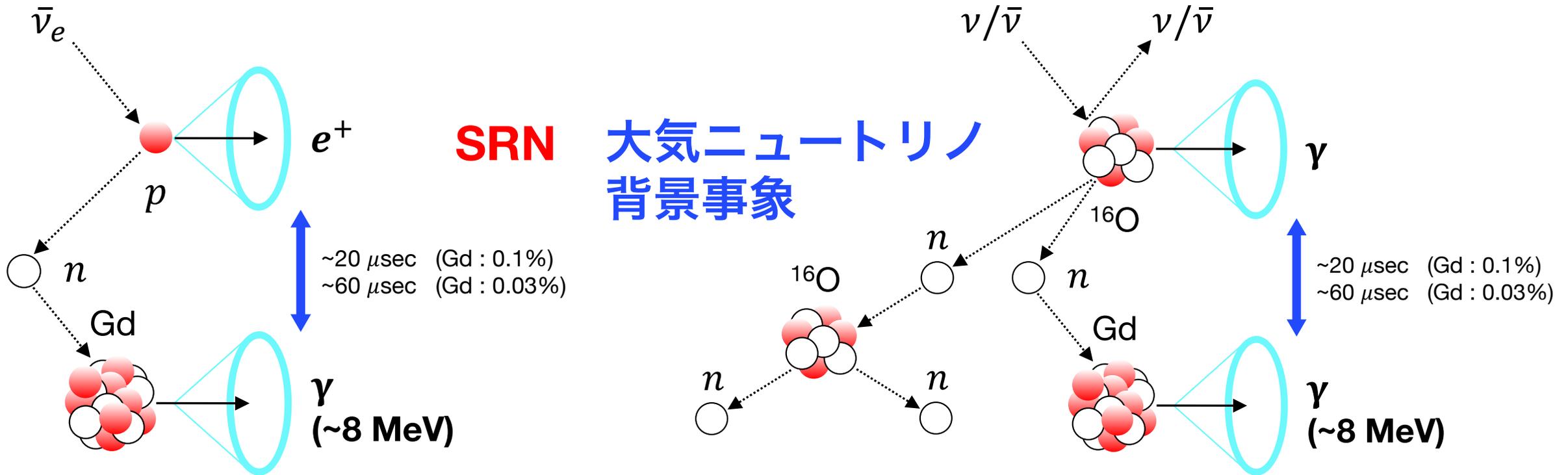
→ SRN探索での背景事象を削減

- しかし...

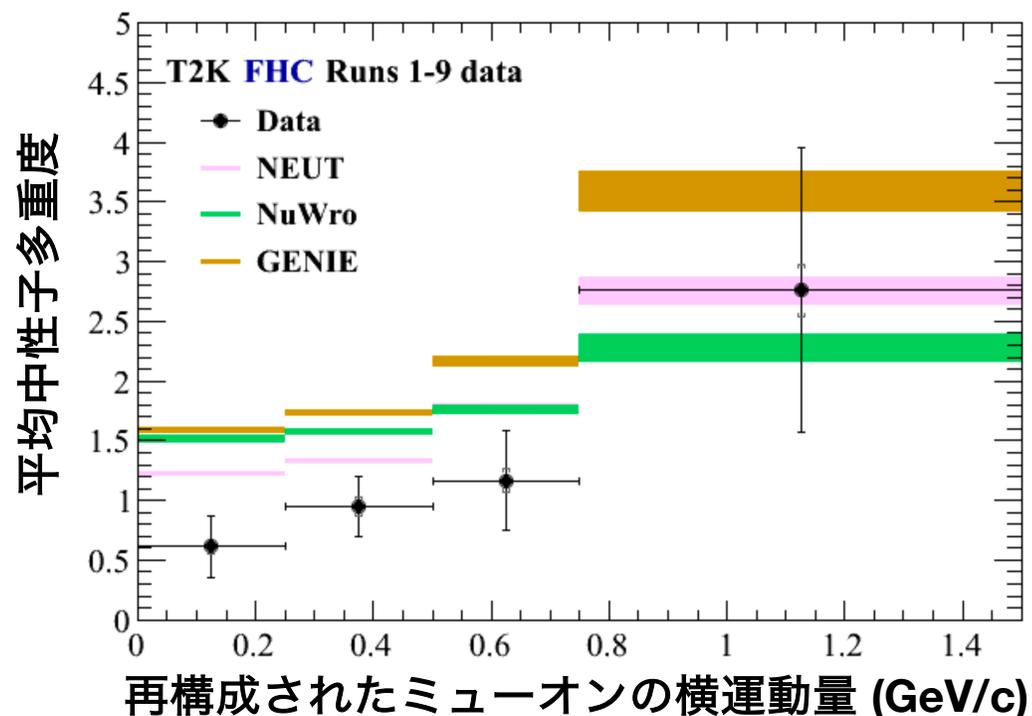
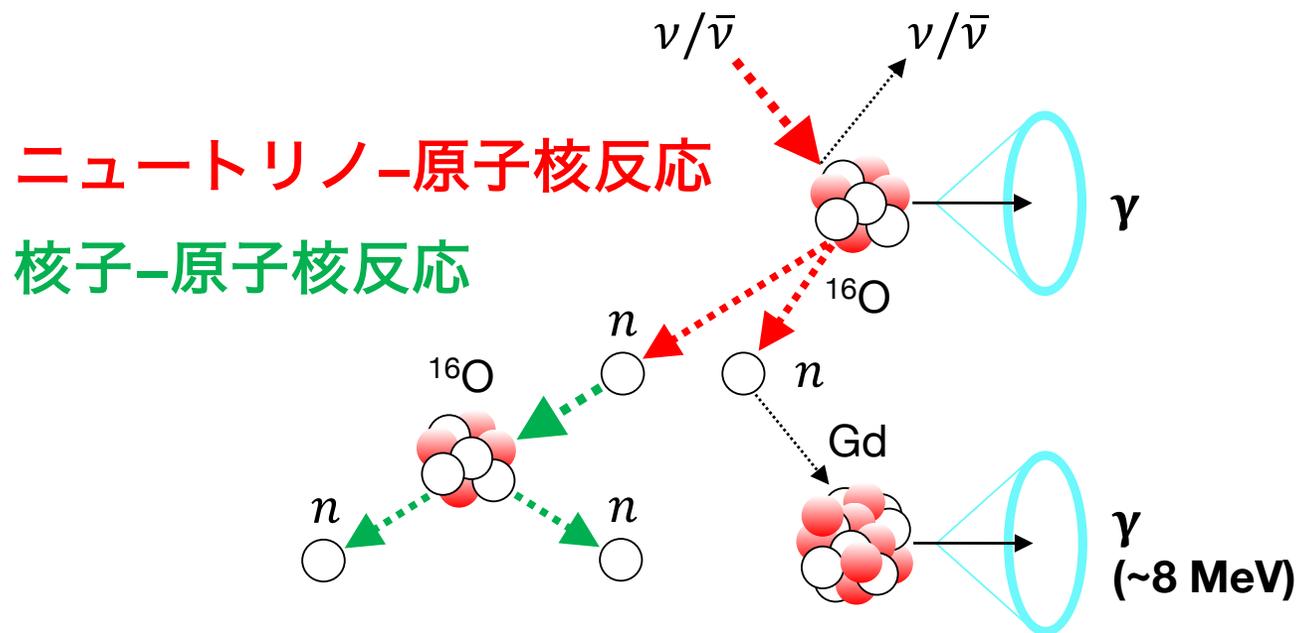
**SK-Gd実験でも識別できない背景事象が存在**



- SRN事象の信号と酷似 → 事象数の正確な見積もりが必要
- 中性子多重度 (1回の反応で放出される中性子の数) が異なる
- 中性子多重度を理解 → 背景事象の削減、より正確な見積もりが可能



- シミュレーションから予想される中性子多重度が観測データよりも多い (7pA125-1 (by Han Seungho) を参照)
- T2K実験 (先行研究) でも同様の傾向 → **ニュートリノ-原子核反応**? **核子-原子核反応**?



- **核子-原子核反応**モデルの違いによる中性子多重度の変化を調査

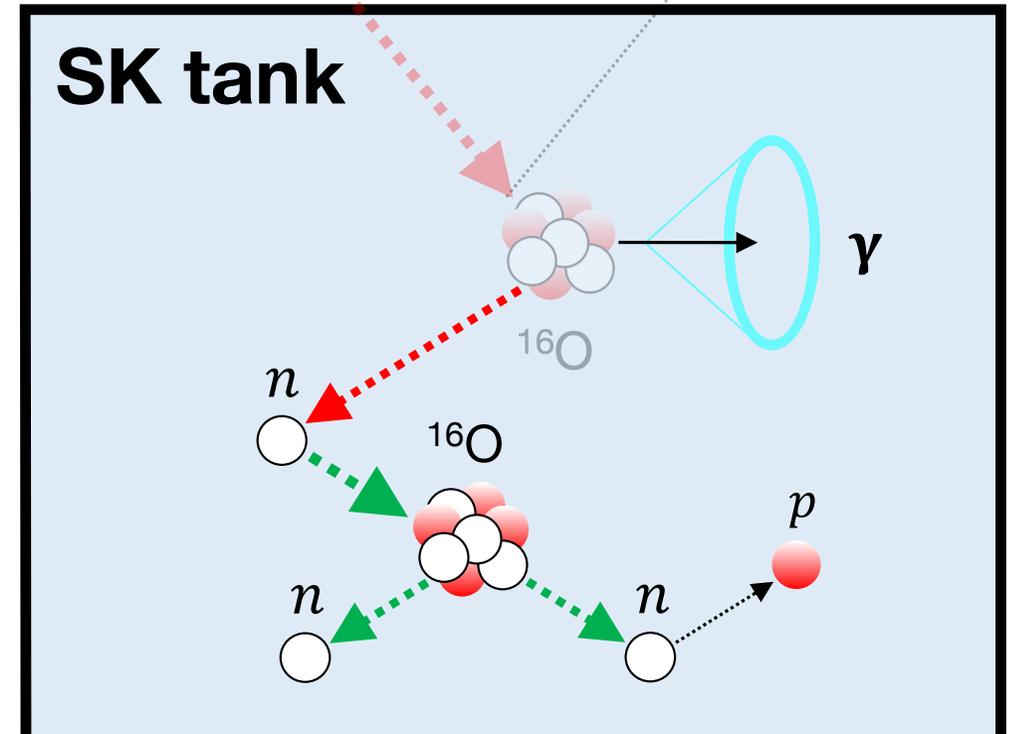
- ニュートリノ反応シミュレーション (NEUT) を用いて  
500年分の大気ニュートリノ事象 (0 - 2 GeV) を生成  
→ Geant4ベースの検出器モンテカルロシミュレーションを  
用いて核子-原子核反応による中性子多重度を確認

- 比較した核子-原子核反応モデル

**BERT** (Bertini cascade model)

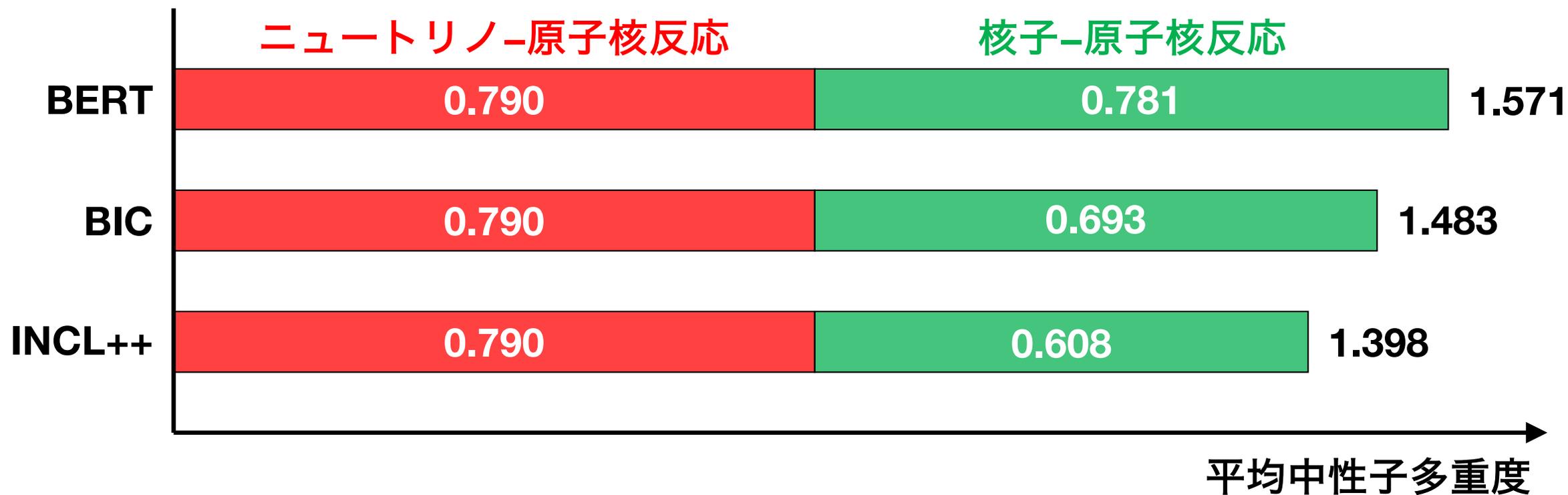
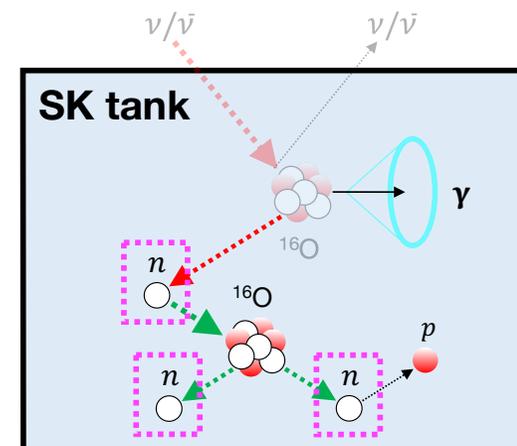
**BIC** (Binary cascade model)

**INCL++** (Liege cascade model)

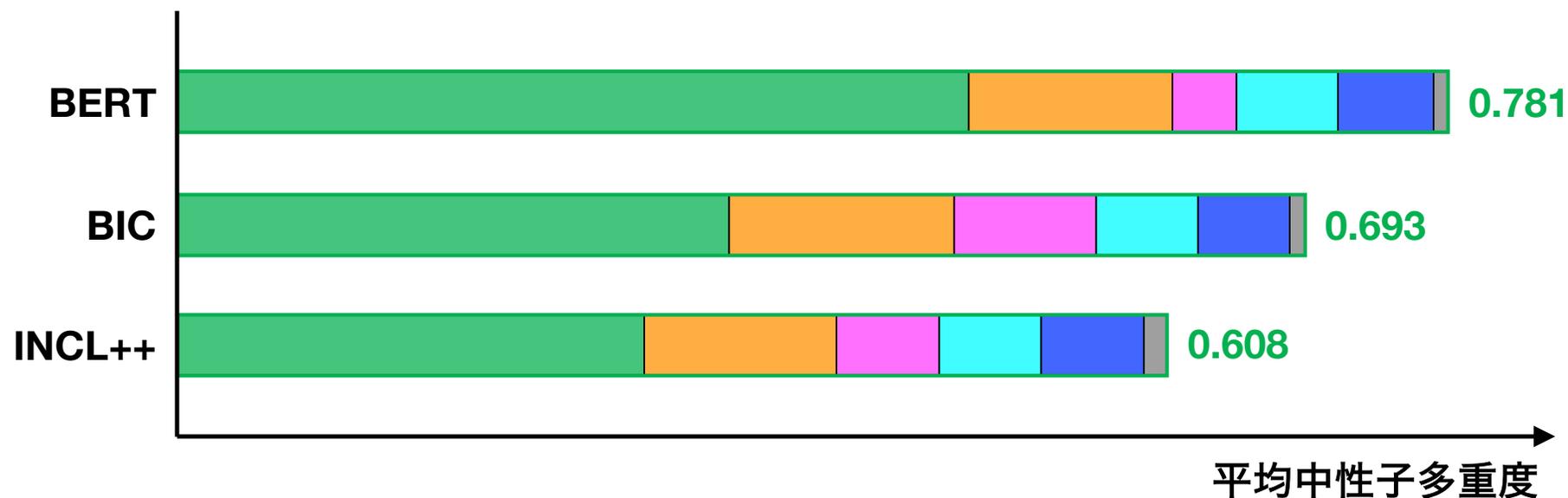


# 平均中性子多重度

- 500年分、0 - 2 GeVの大気ニュートリノ事象 (3,857,094事象) で発生した中性子の数を 1事象あたりに換算



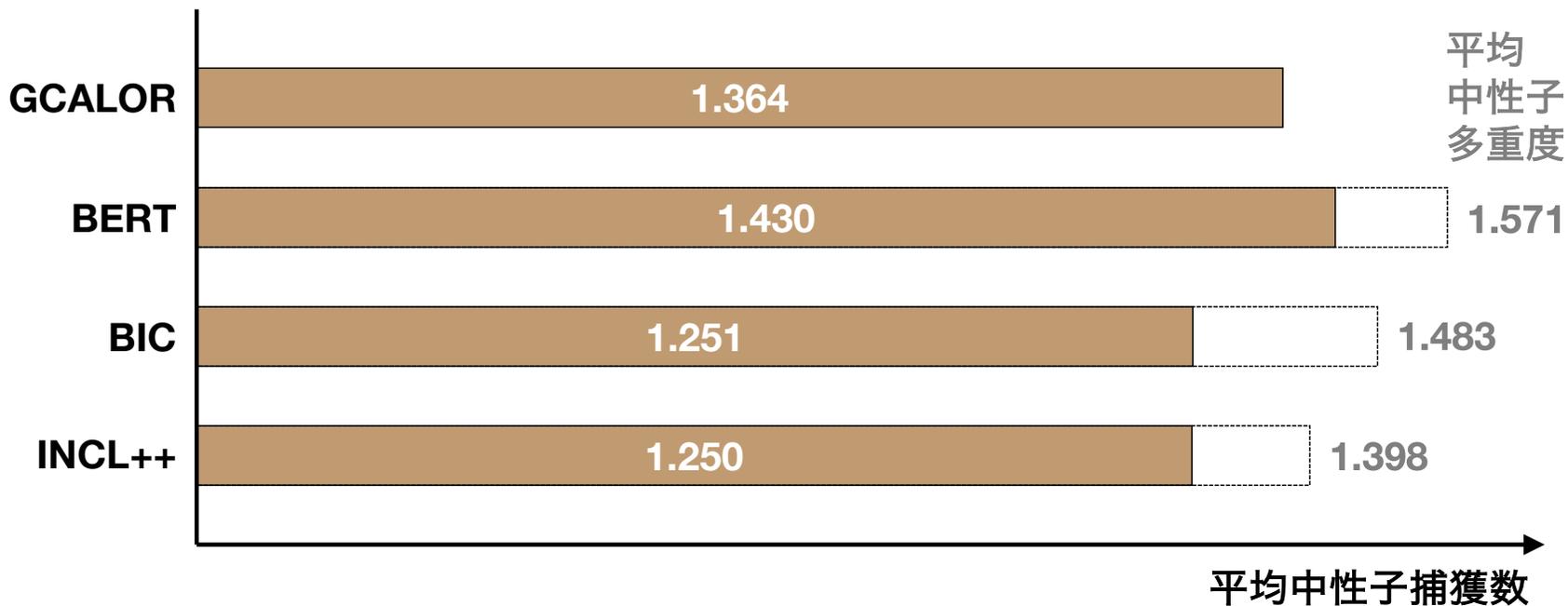
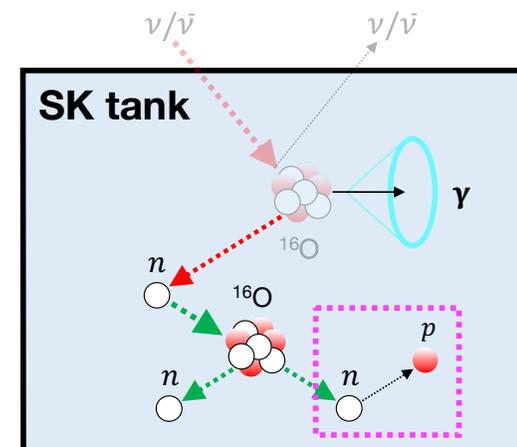
- 中性子非弾性散乱に大きな違い
  - 中性子非弾性散乱の反応断面積は各モデルで同じ
- **BERT**では中性子非弾性散乱によって中性子が発生しやすい



中性子非弾性散乱  
陽子非弾性散乱  
 $\pi^+/\pi^-$ 非弾性散乱  
 $\mu^-$ 捕獲  
 $\pi^-$ 捕獲  
その他

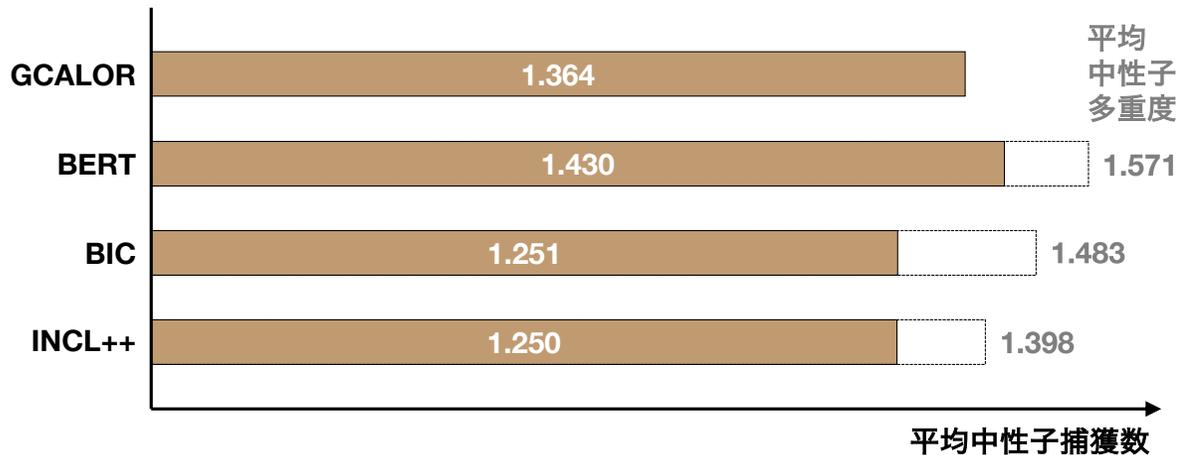
# 平均中性子捕獲数

- **GCALOR**: GEANT3ベースの検出器モンテカルロシミュレーションにおける物理モデル (BERTに近い)
- 平均中性子多重度に比べて平均中性子捕獲数が少ない
  - 検出器の外に出た中性子を消滅
  - 中性子非弾性散乱によって中性子が消滅 (e.g.)  $n + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{13}\text{C} + \alpha$

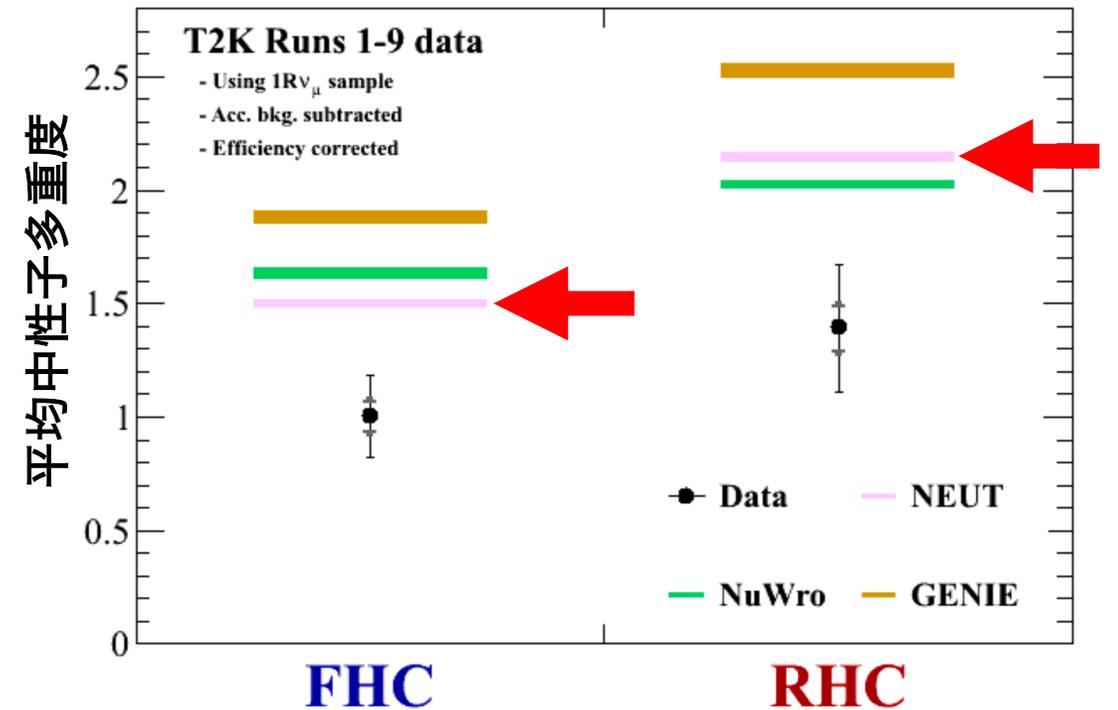


# 平均中性子捕獲数

- T2K実験 (先行研究) より、  
シミュレーション (**NEUT & GCALOR**) の  
平均中性子多重度は観測データより~51%大きい  
→ NEUT & BIC、NEUT & INCL++でも  
観測データより~39%大きくなると推測  
→ ニュートリノ-原子核反応も見直す必要あり



FHC	RHC
$1.50 \pm 0.02(\text{Stat.})$	$2.14 \pm 0.02(\text{Stat.})$
$1.00 \pm 0.17(\text{Stat.})^{+0.07}_{-0.08}(\text{Sys.})$	$1.40 \pm 0.26(\text{Stat.})^{+0.10}_{-0.11}(\text{Sys.})$



- 大気ニュートリノ事象のシミュレーションから予想される中性子多重度が観測データよりも多い
  - ニュートリノ-原子核反応、核子-原子核反応のどちらが原因か分かっていない
  - 核子-原子核反応モデルの違いによる中性子多重度の変化を調査
- 中性子非弾性散乱によって中性子多重度が大きく変化
- ニュートリノ-原子核反応も見直す必要がある

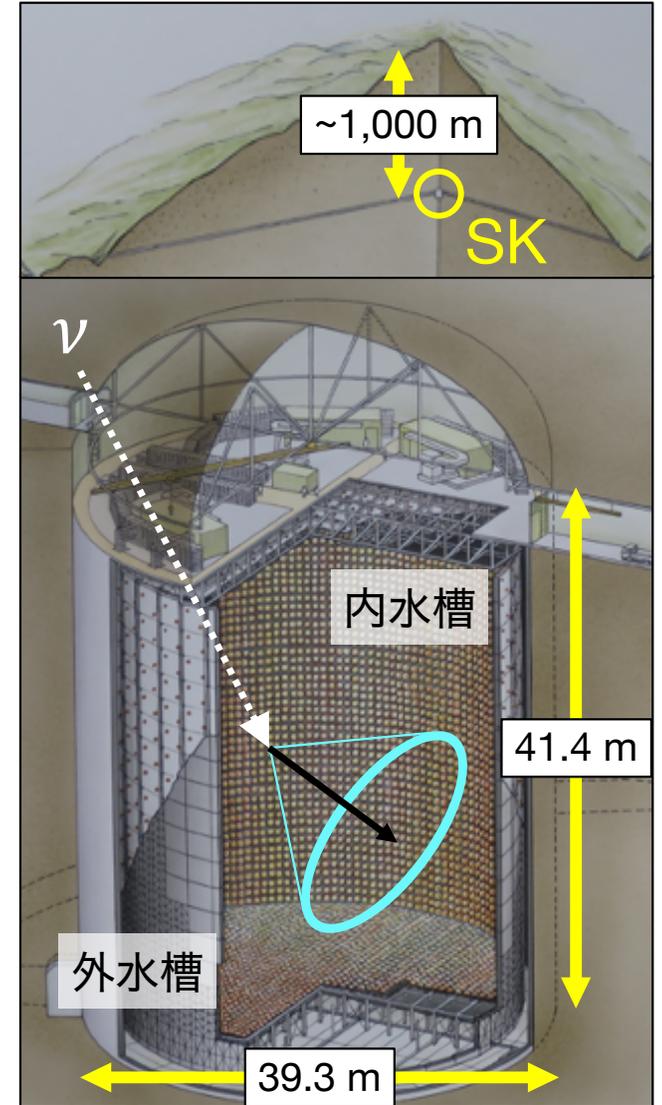
## 今後の予定

- より高エネルギーの大気ニュートリノ事象で中性子多重度を確認
- シミュレーションを用いてSRN事象と大気ニュートリノ背景事象での基本的な分布を比較
- SRN探索における大気ニュートリノ背景事象の見積もりを行う

**Backup**

# スーパーカミオカンデ (SK)

- 岐阜県飛騨市の地下1,000 mにある大型水チェレンコフ検出器
- 5万トンの超純水で満たされた水タンクと光電子増倍管 (PMT) から構成
- 内水槽 (直径50cmのPMT : 11,129本)  
荷電粒子から放出されたチェレンコフ光をPMTで検出  
→ 荷電粒子の情報を再構成
- 外水槽 (直径20cmのPMT : 1,885本)  
→ 宇宙線ミュオンなどの事象識別



- 超新星背景ニュートリノ (SRN, Supernova Relic Neutrino)

→ 過去の超新星爆発ニュートリノの重ね合わせ

- SRNフラックス

$$\frac{d\Phi(E_\nu)}{dE_\nu} = c \int_0^\infty \frac{dz}{H_0 \sqrt{\Omega_m (1+z)^3 + \Omega_\Lambda}} \left[ R_{\text{CCSN}}(z) \int_0^{Z_{\text{max}}} \Psi_{\text{ZF}}(z, Z) \left\{ \int_{M_{\text{min}}}^{M_{\text{max}}} \Psi_{\text{IMF}}(M) \frac{dN(M, Z, E'_\nu)}{dE'_\nu} dM \right\} dZ \right]$$

ハッブル定数

物質密度パラメータ

宇宙定数

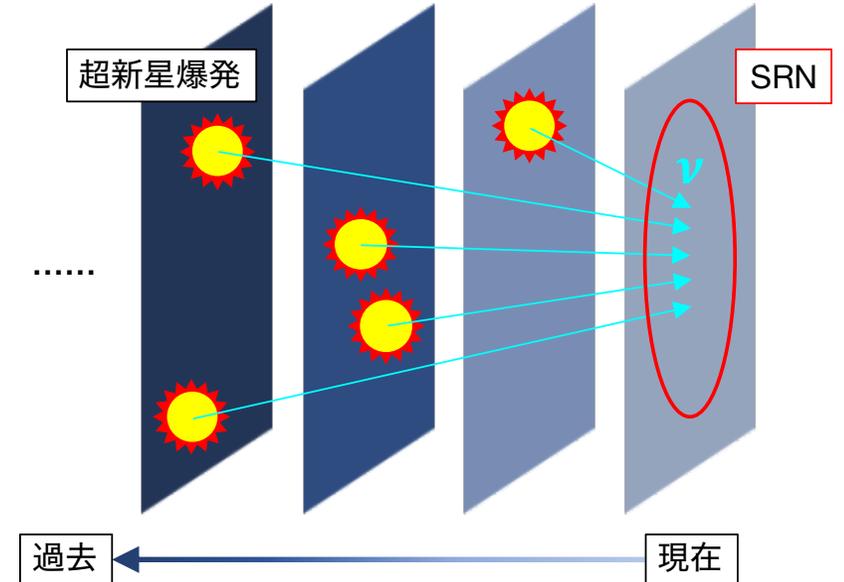
重力崩壊型超新星発生率

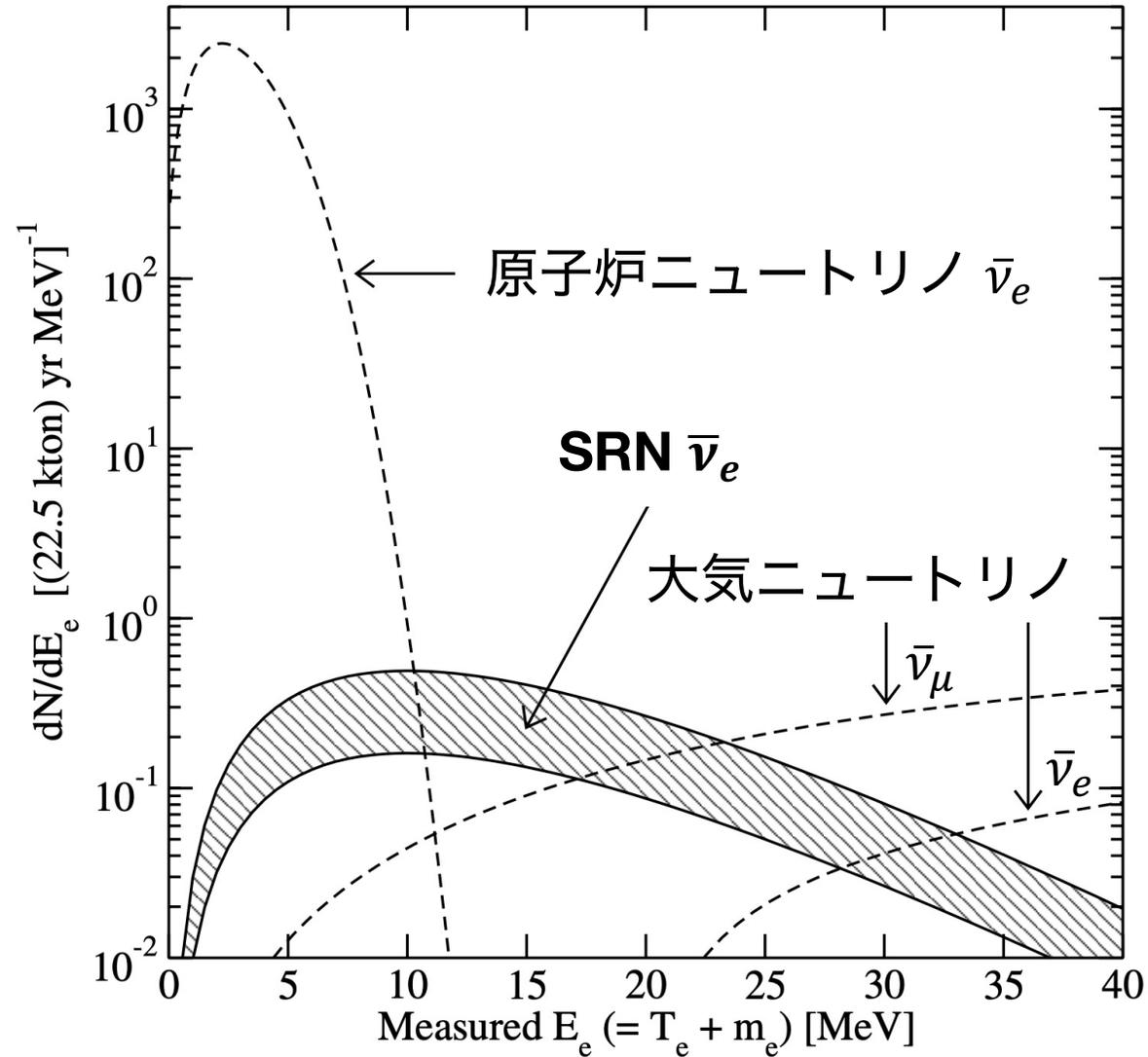
親星のメタリシティ分布関数

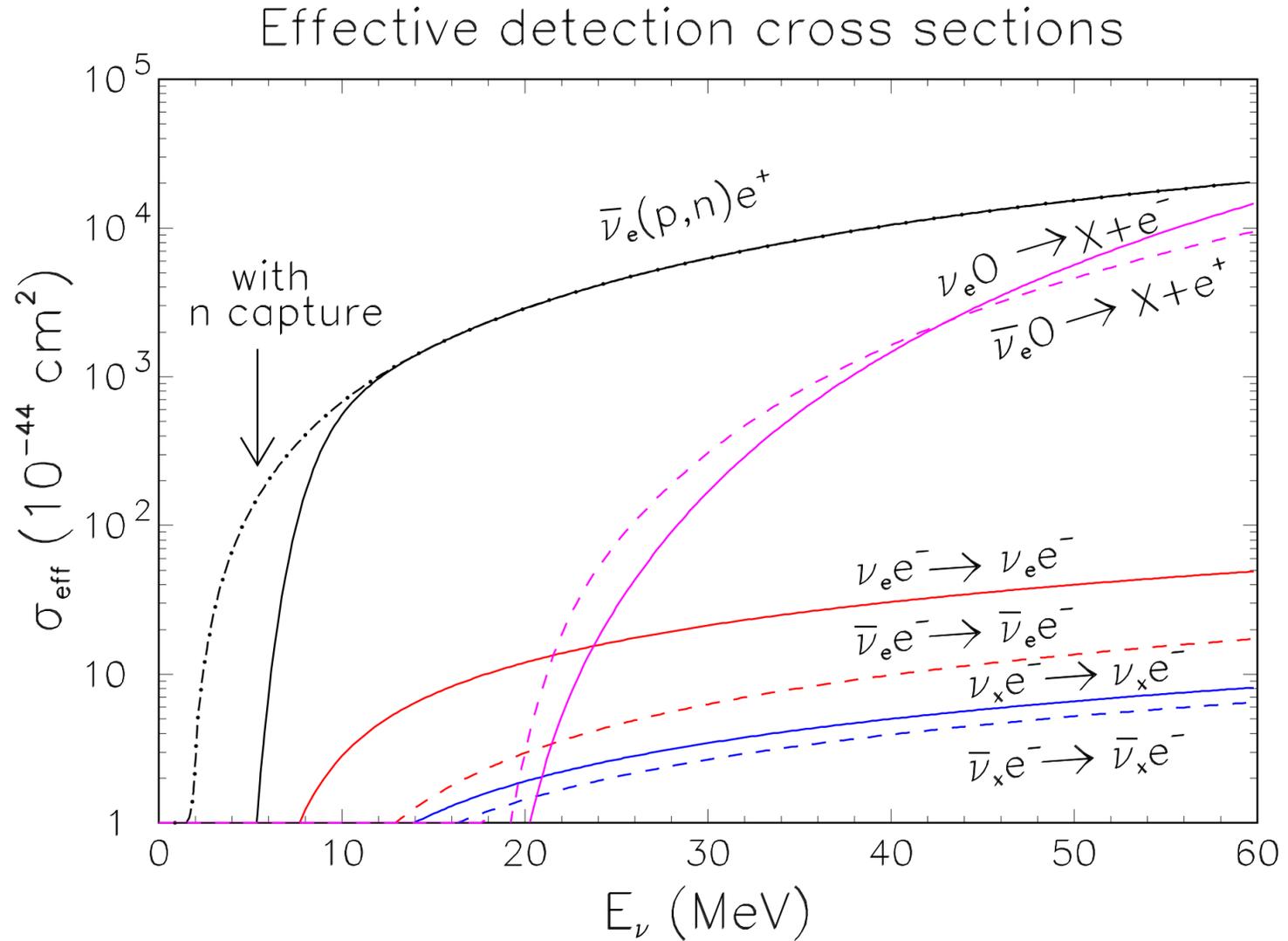
親星の初期質量関数 (どのような質量の星がどのような頻度で生まれるかを表す関数)

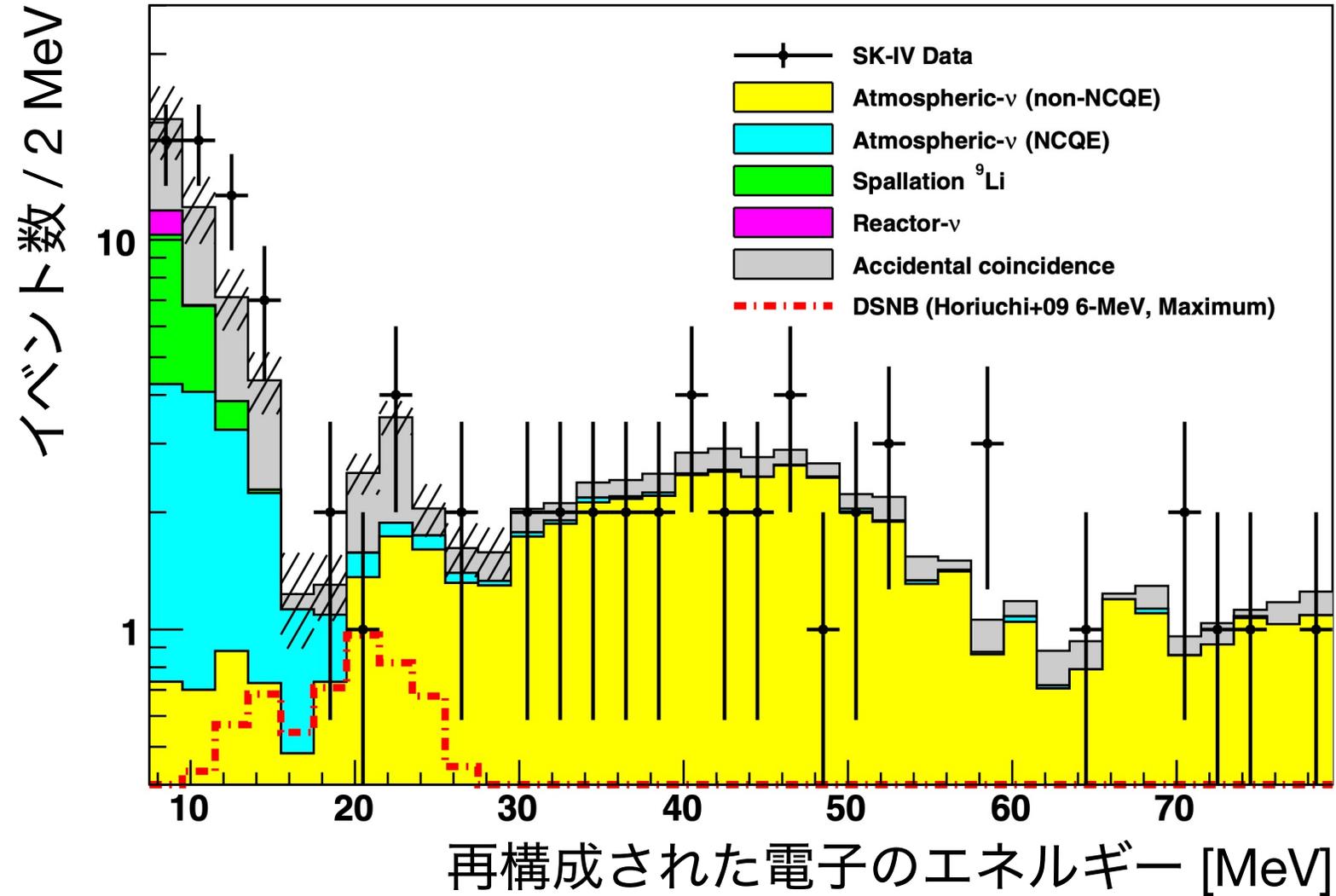
各重力崩壊型超新星からのニュートリノ数スペクトル

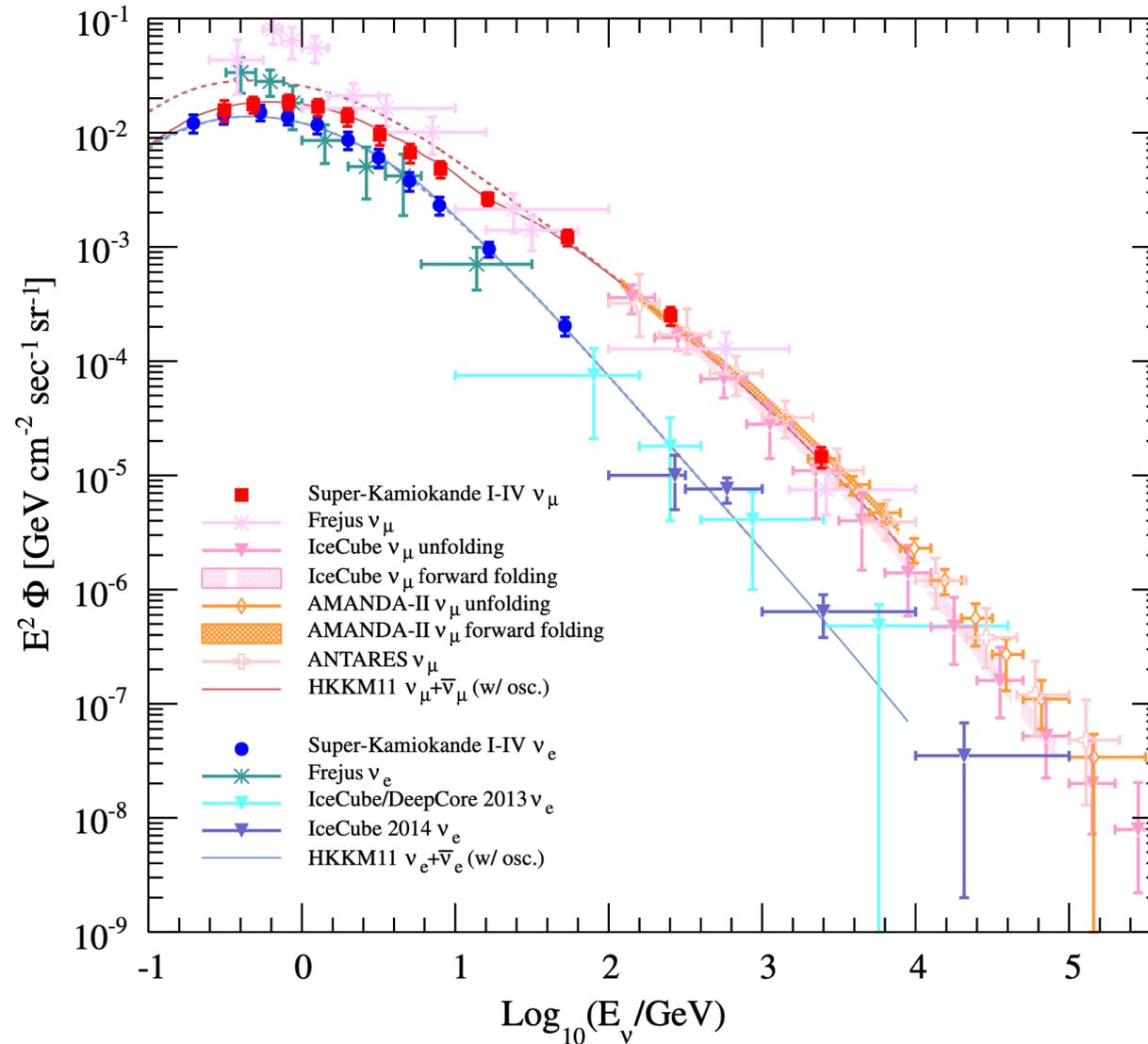
※ ニュートリノ放出時間での物理量には'をつけている

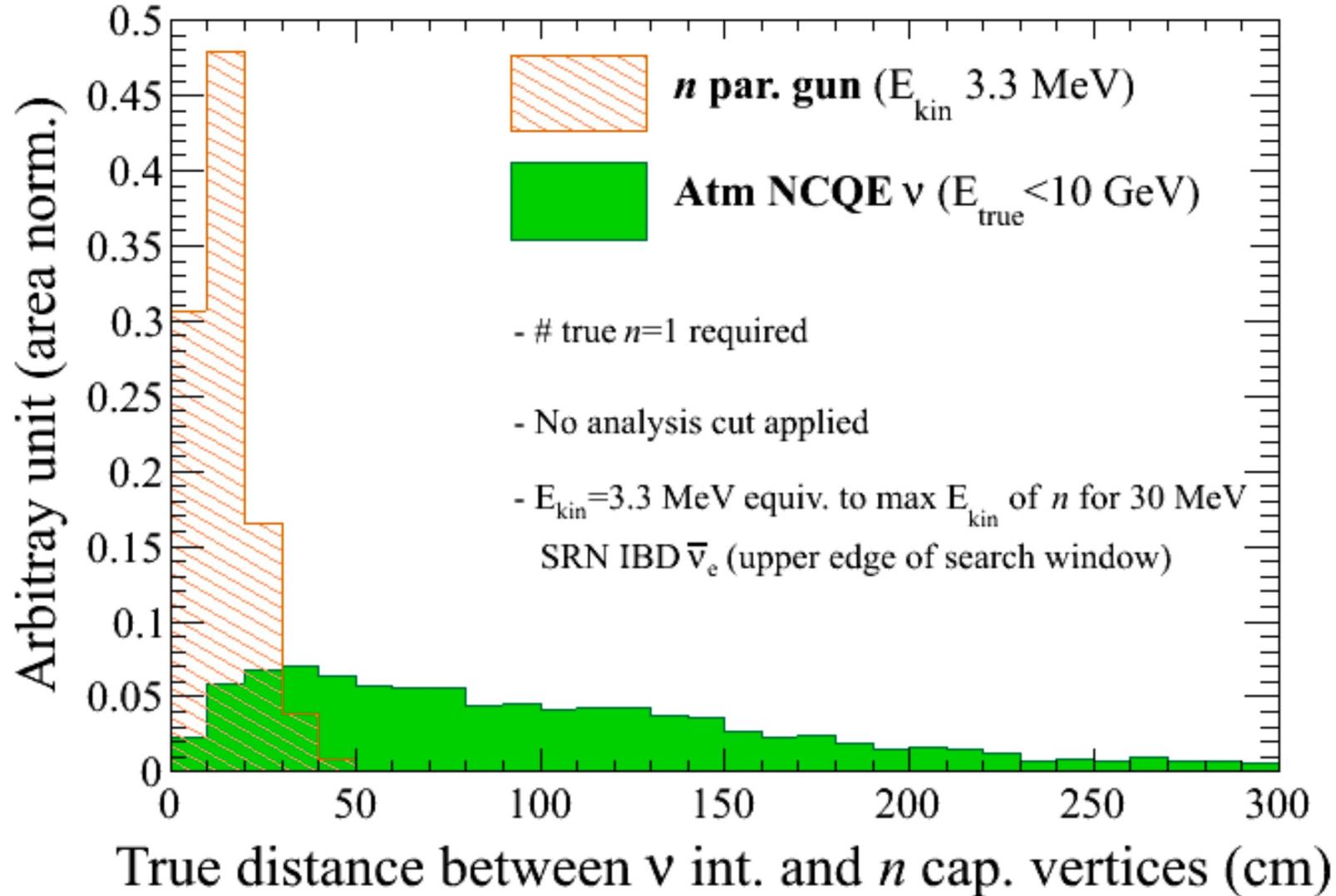












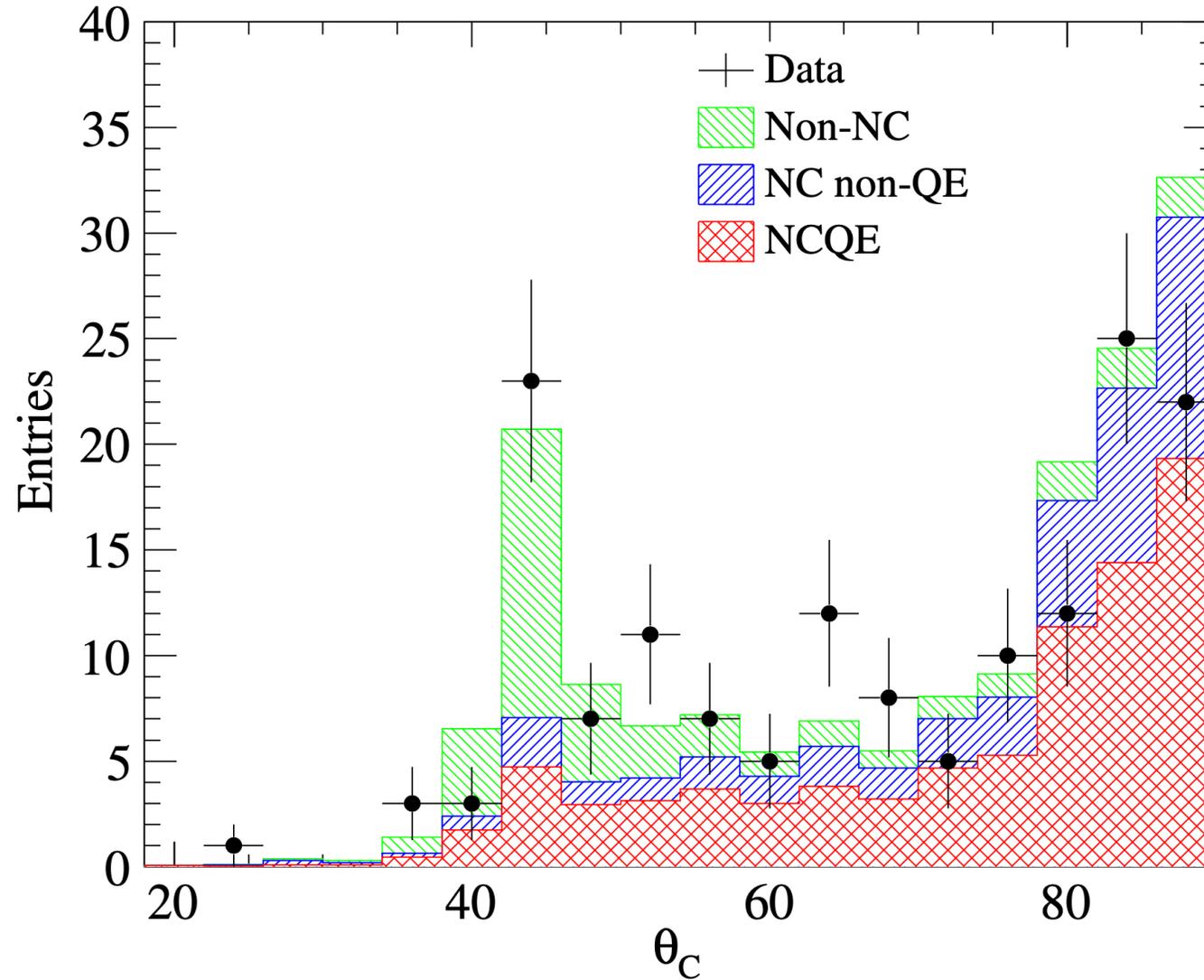
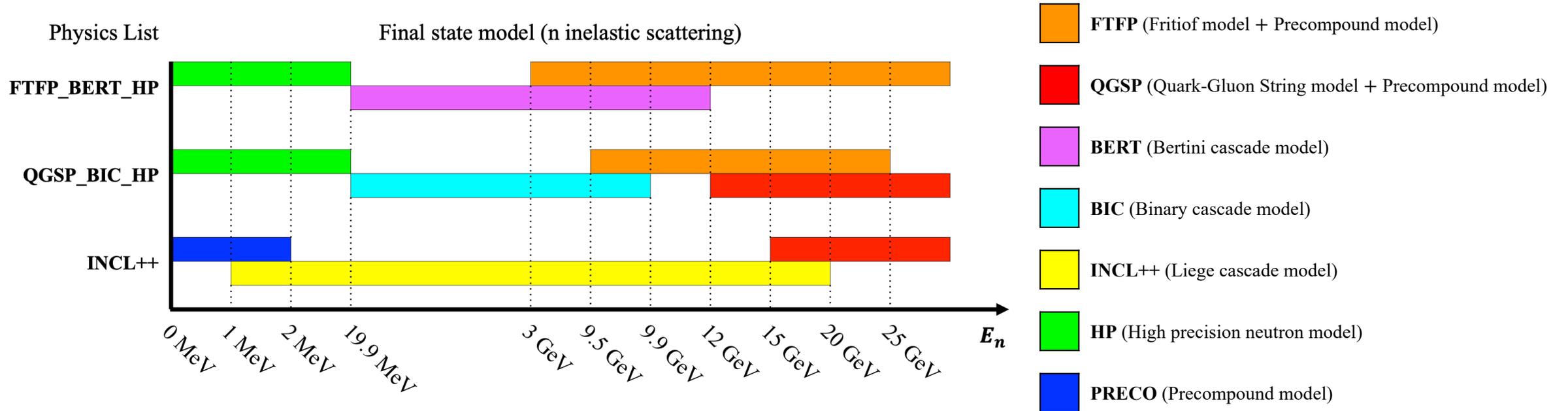


TABLE IV. Uncertainties in NCQE measurement.

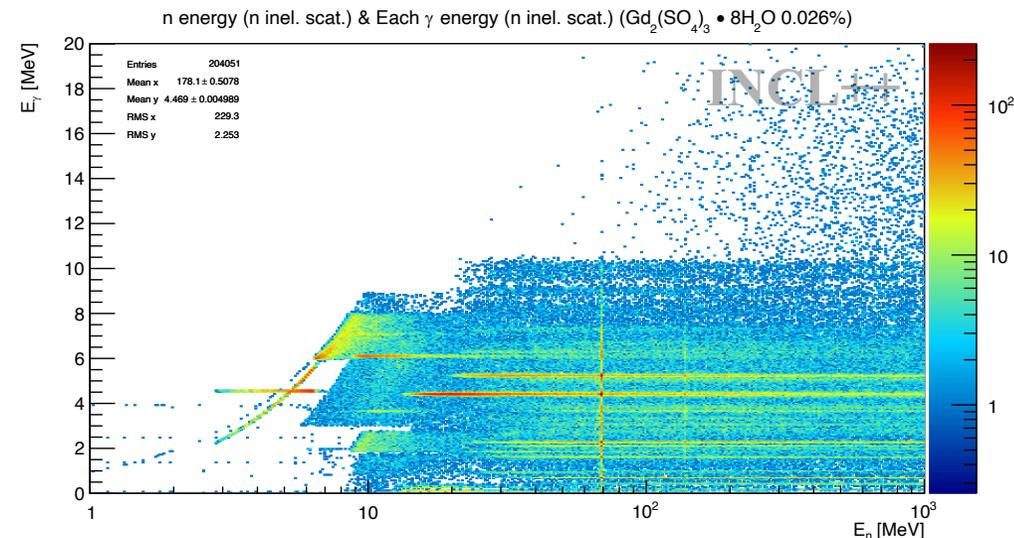
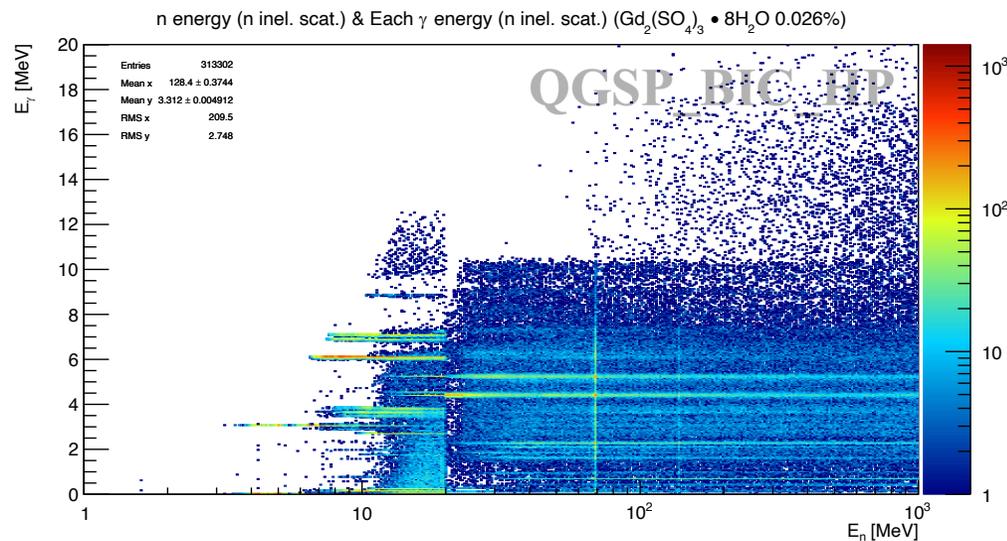
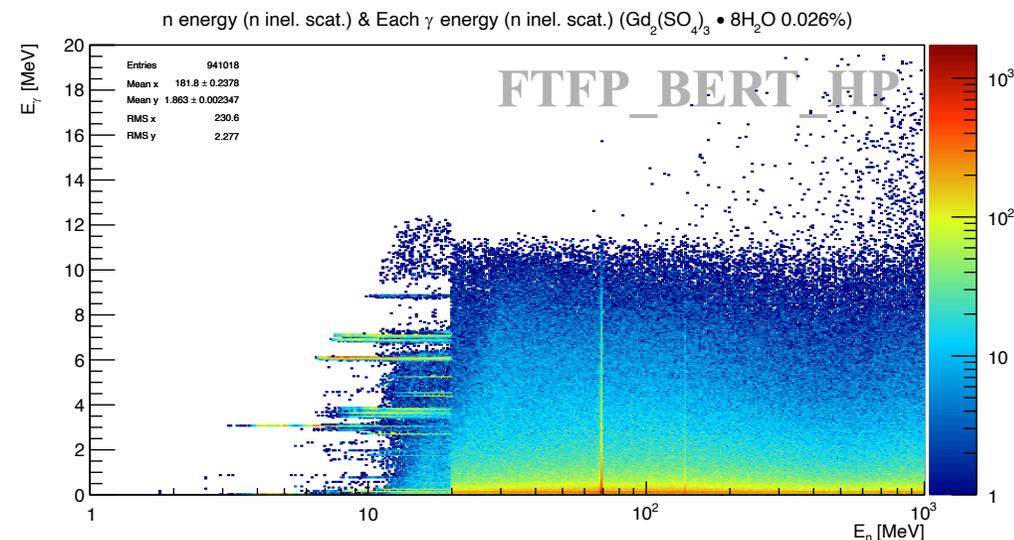
	NCQE	NC non-QE
$\nu_{\text{atm}}$ flux		18%
$\nu/\bar{\nu}$ ratio		5%
Cross-section		18%
Primary $\gamma$ 's	15%	3%
Secondary $\gamma$ 's	13%	13%
Neutron multiplicity	21%	16%
Neutron energy	18%	14%
Neutron transportation	+7%	+4%
Data reduction		3%
Neutron tagging		10%
Others		0.7%

モデル	BERT		BIC		INCL++	
1事象あたりの中性子多重度	<b>0.781</b>		<b>0.693</b>		<b>0.608</b>	
中性子非弾性散乱	1,874,645	62.26%	1,307,306	48.94%	1,106,647	47.20%
陽子非弾性散乱	482,229	16.02%	533,767	19.98%	455,211	19.42%
$\pi^+/\pi^-$ 非弾性散乱	151,877	5.05%	336,647	12.60%	243,446	10.38%
$\mu^-$ 捕獲	240,354	7.98%	241,151	9.03%	241,329	10.29%
$\pi^-$ 捕獲	226,287	7.51%	218,310	8.17%	242,773	10.35%
その他	35,481	1.18%	34,288	1.28%	55,173	2.36%

- Cross section : G4NeutronInelasticXS (& NeutronHP)



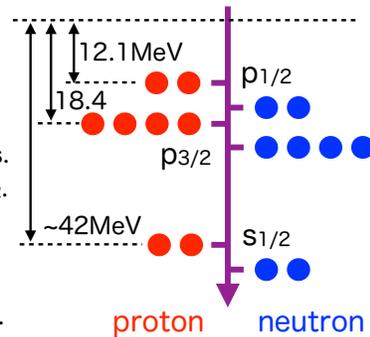
Particle	neutron
Kinetic energy	1 MeV - 1 GeV
Position	Center of SK tank ((0, 0, 0) m)
Direction	random
# of events	100,000



## ‘Others’ treatment

2

- In the simple shell model, the probability of nucleon knock-out is from the number of nucleons in each state;
  - $s_{1/2}$  : 25%,  $p_{3/2}$  : 50%,  $p_{1/2}$  : 25%
- In the recent calculation, the spectral function based on the measurement is used (Ankowski et.al., PRL 108, 052505 (2012)) :
  - $s_{1/2}$  : 10.55%,  $p_{3/2}$  : 35.15%,  $p_{1/2}$  : 15.8%, others : 38.5%
- No particles are emitted when the  $p_{1/2}$  nucleon is knocked-out, (g.s. of  $^{15}\text{N}$  or  $^{15}\text{O}$ ) while several particles are emitted in the case of  $s_{1/2}$ .
- Ueno-san and Huang-san treated ‘others’ as  $p_{1/2}$ .
- No one knows how to treat ‘others’, but most likely the nuclear state should go high. So we decided that ‘others’ is treated as  $s_{1/2}$ . This is installed from neut\_5.4.0.



(The energy level of neutrons is ~3.54MeV deeper than protons.)

	$s_{1/2}$	$p_{3/2}$	$p_{1/2}$
Shell model	25%	50%	25%
- neut 5.3.6	10.55%	35.15%	54.3% (=15.8+38.5)
neut 5.4.0 -	49.05% (=10.55+38.5)	35.15%	15.8%

Spectroscopy factor	$s_{1/2}$	$p_{3/2}$	others
Neut 5.3.6	0.1055	0.3515	0.5430
Neut 5.4.0	0.5430	0.3515	0.1055
Neut 5.4.X	0.4905	0.3515	0.158

### Neutron case $s_{1/2}$

- 1 gamma (energy from 3 to 7 MeV)
  - no nucleon emission (~17.5%)
  - $^{15}\text{O} \rightarrow ^{14}\text{N} + p$  (~25.5%)
  - $^{15}\text{O} \rightarrow ^{14}\text{O} + n$  (~ 7.3%)
  - $^{15}\text{O} \rightarrow X + Y + p$  (~31.9%)
  - $^{15}\text{O} \rightarrow X + Y + n$  (~17.8%)

### $p_{3/2}$

- 1 gamma
  - 6.17MeV  $\gamma$  (~86.9%)
  - p from 9.61MeV state (~ 4.9%)
  - p from 10.48MeV state (~ 8.2%)

### Others

no emission at all

### Proton case $s_{1/2}$

- 1 gamma (energy from 3 to 7 MeV)
  - no nucleon emission (~17.5%)
  - $^{15}\text{N} \rightarrow ^{14}\text{N} + n$  (~25.5%)
  - $^{15}\text{N} \rightarrow ^{14}\text{C} + p$  (~ 7.3%)
  - $^{15}\text{N} \rightarrow X + Y + p$  (~31.9%)
  - $^{15}\text{N} \rightarrow X + Y + n$  (~17.8%)

### $p_{3/2}$

- 1 gamma
  - 6.32MeV (~86.9%)
  - 9.93MeV (~ 3.8%)
  - 2  $\gamma$ s (~ 1.1%)
  - p from 10.48MeV state (~ 8.2%)

### Others

no emission at all

Y. Koshio, “NEUT for NC elastic” (Sep. 3rd, 2021)

Y. Hayato, “# of neutrons Difference between Apr 16 and May 19” (Oct. 21st, 2019)

- [1](#) R. Akutsu, Ph.D. Thesis, The University of Tokyo (2019)
- [2](#) Y. Ashida, Ph.D. Thesis, Kyoto University (2020)
- [3](#) J. F. Beacom and M. R. Vagins, Phys. Rev. Lett. **93**, 171101 (2004)
- [4](#) G. L. Fogli *et al.*, JCAP, April 2005 (2005)
- [5](#) K. Abe *et al.*, Phys. Rev. D **104**, 122002 (2021)
- [6](#) E. Richard *et al.*, Phys. Rev. D **94**, 052001 (2016)
- [7](#) M. Honda *et al.*, Phys. Rev. D **83**, 123001 (2011)
- [8](#) L. Wan *et al.*, Phys. Rev. D **99**, 032005 (2019)
- [9](#) Y. Koshio, “NEUT for NC elastic” (Sep. 3rd, 2021)
- [10](#) Y. Hayato, “# of neutrons Difference between Apr 16 and May 19” (Oct. 21st, 2019)