

スーパーカミオカンデ 太陽ニュートリノとSK-Gd

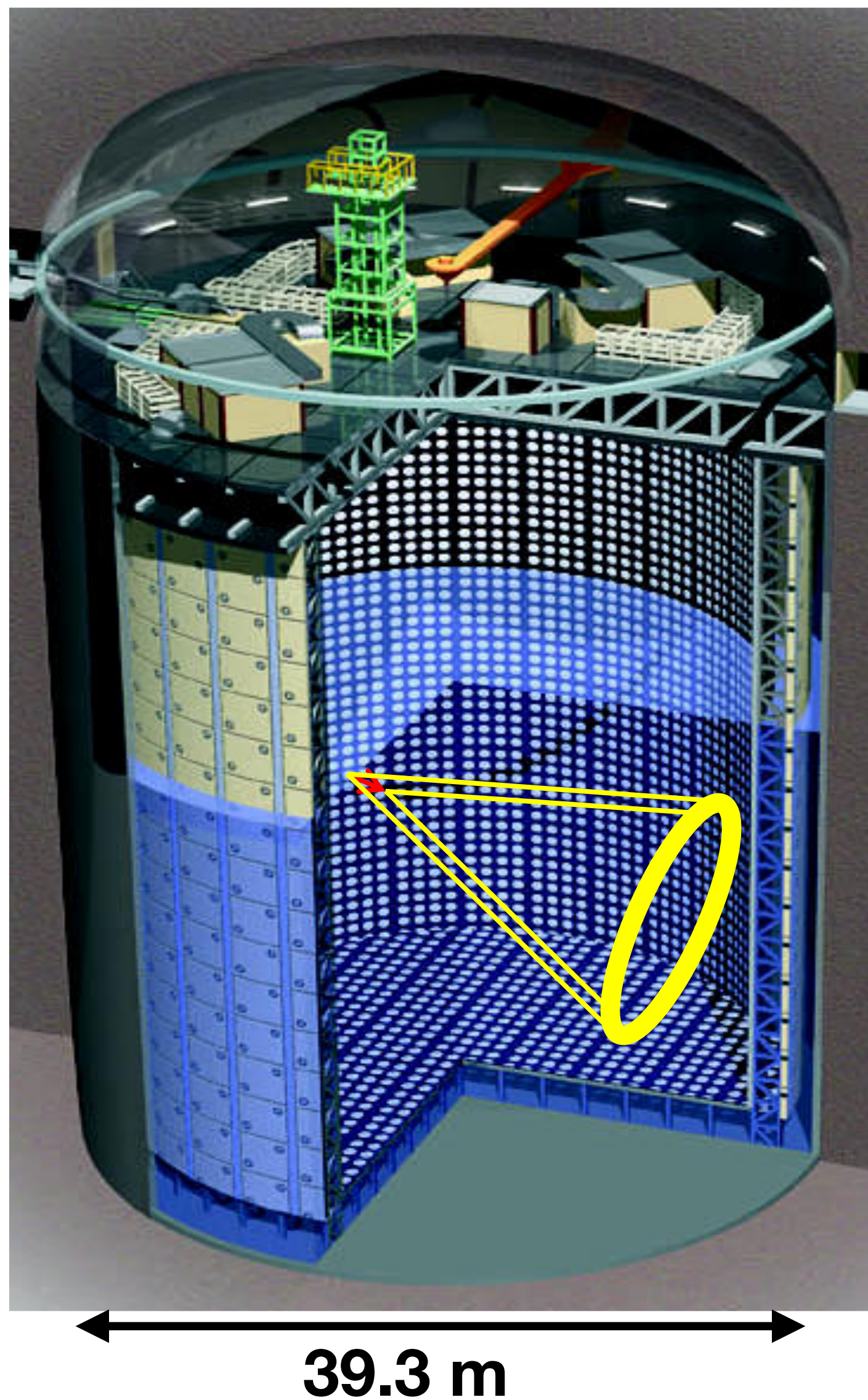
中島 康博 (東京大学大学院理学系研究科)

東京大学宇宙線研究所 令和4年度共同利用研究成果発表会

2023年2月21日



スーパーカミオカンデ



- 50 ktonの超大型水チェレンコフ測定器（深さ 2700 mwe）
- 約11,000本の50cm PMTでチェレンコフ光を観測
- 多様な観測対象
 - 太陽ニュートリノ
 - 超新星ニュートリノ
 - 加速器・大気ニュートリノ
 - 核子崩壊探索
- 2020年、Gdを加えて新たな観測を開始



The Super-Kamiokande Collaboration



Kamioka Observatory, ICRR, Univ. of Tokyo, Japan
RCCN, ICRR, Univ. of Tokyo, Japan
University Autonoma Madrid, Spain
BC Institute of Technology, Canada
Boston University, USA
University of California, Irvine, USA
California State University, USA
Chonnam National University, Korea
Duke University, USA
Fukuoka Institute of Technology, Japan
Gifu University, Japan
GIST, Korea
University of Hawaii, USA
IBS, Korea
IFIRSE, Vietnam
Imperial College London, UK
ILANCE, France

INFN Bari, Italy
INFN Napoli, Italy
INFN Padova, Italy
INFN Roma, Italy
Kavli IPMU, The Univ. of Tokyo, Japan
Keio University, Japan
KEK, Japan
King's College London, UK
Kobe University, Japan
Kyoto University, Japan
University of Liverpool, UK
LLR, Ecole polytechnique, France
Miyagi University of Education, Japan
ISEE, Nagoya University, Japan
NCBJ, Poland
Okayama University, Japan
University of Oxford, UK

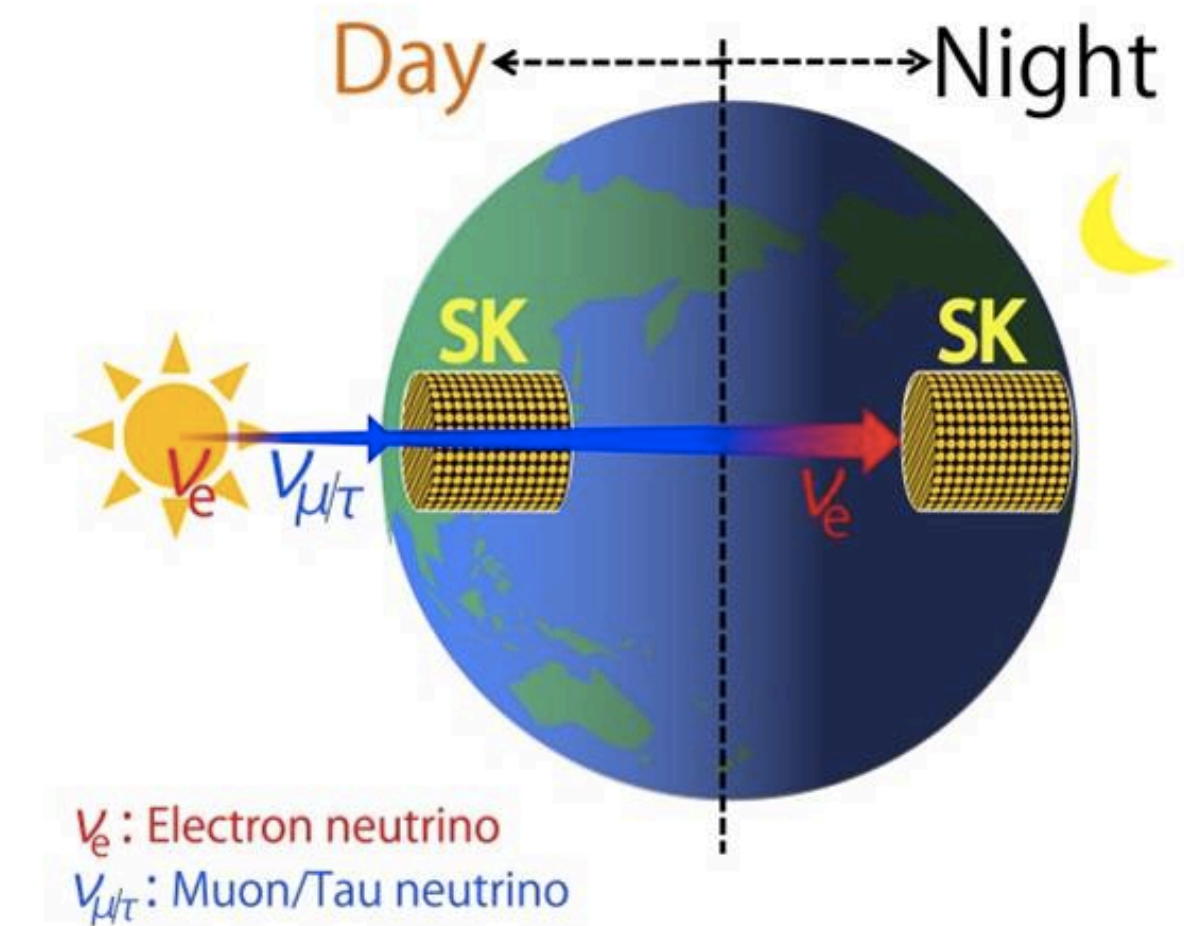
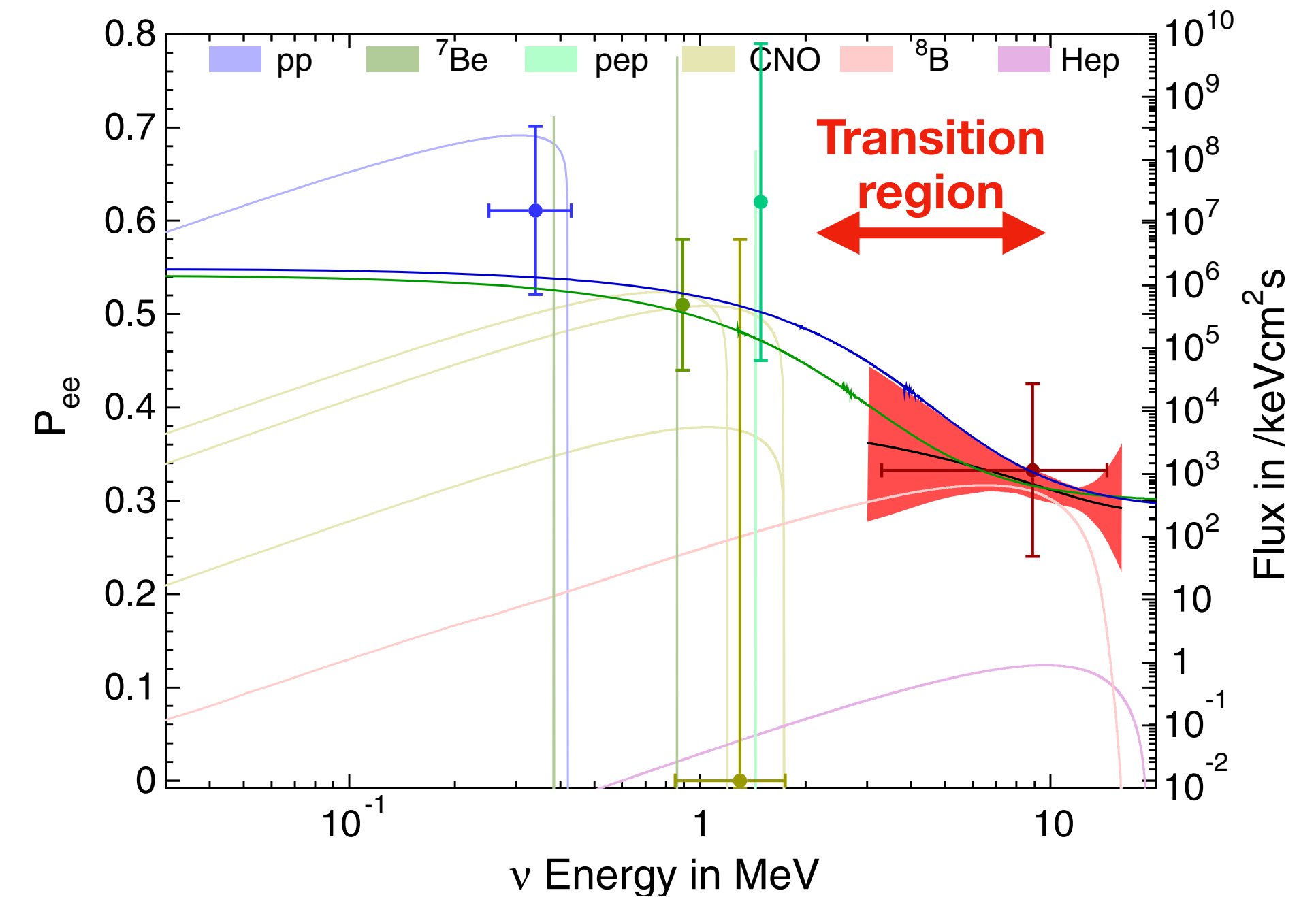
Rutherford Appleton Laboratory, UK
Seoul National University, Korea
University of Sheffield, UK
Shizuoka University of Welfare, Japan
Sungkyunkwan University, Korea
Stony Brook University, USA
Tohoku University, Japan
Tokai University, Japan
The University of Tokyo, Japan
Tokyo Institute of Technology, Japan
Tokyo University of Science, Japan
TRIUMF, Canada
Tsinghua University, China
University of Warsaw, Poland
Warwick University, UK
The University of Winnipeg, Canada
Yokohama National University, Japan

~230 collaborators
from 51 institutes
in 11 countries

太陽ニュートリノ

- 太陽内での核融合反応によるニュートリノ
 - スーパーカミオカンデでは ${}^8\text{B}$, Hepニュートリノに感度 ($E_{\text{kin}} > 3.5 \text{ MeV}$)
- 太陽内および地球での物質効果により、電子ニュートリノの生存確率が変化
 - 数MeV領域での生存確率の遷移 (スペクトルの歪み)
 - 昼夜非対称性

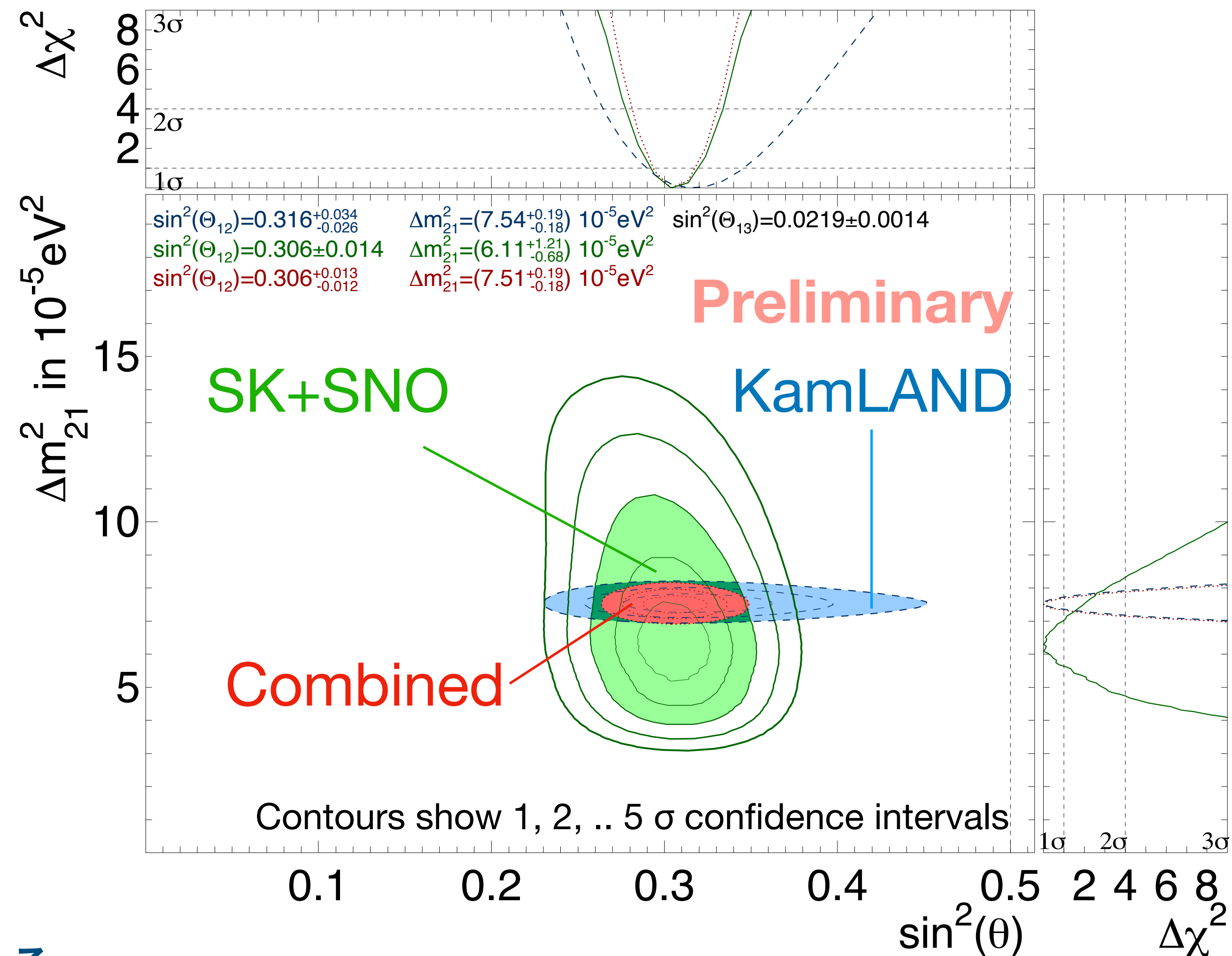
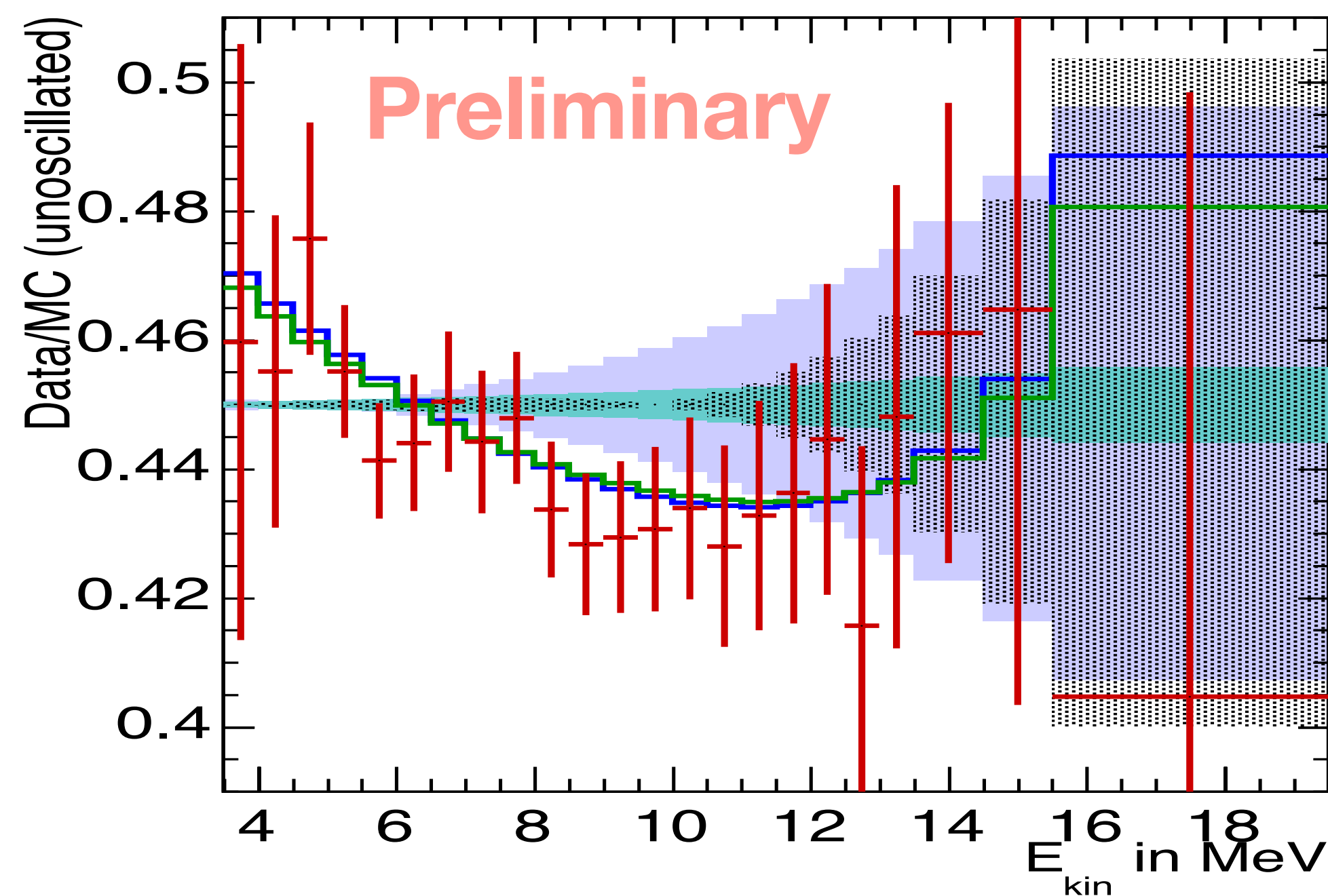
→ニュートリノ振動パラメーター θ_{12} , Δm_{21}^2 の測定
新物理の探索



純水フェーズでの太陽ニュートリノ測定結果

Neutrino 2020

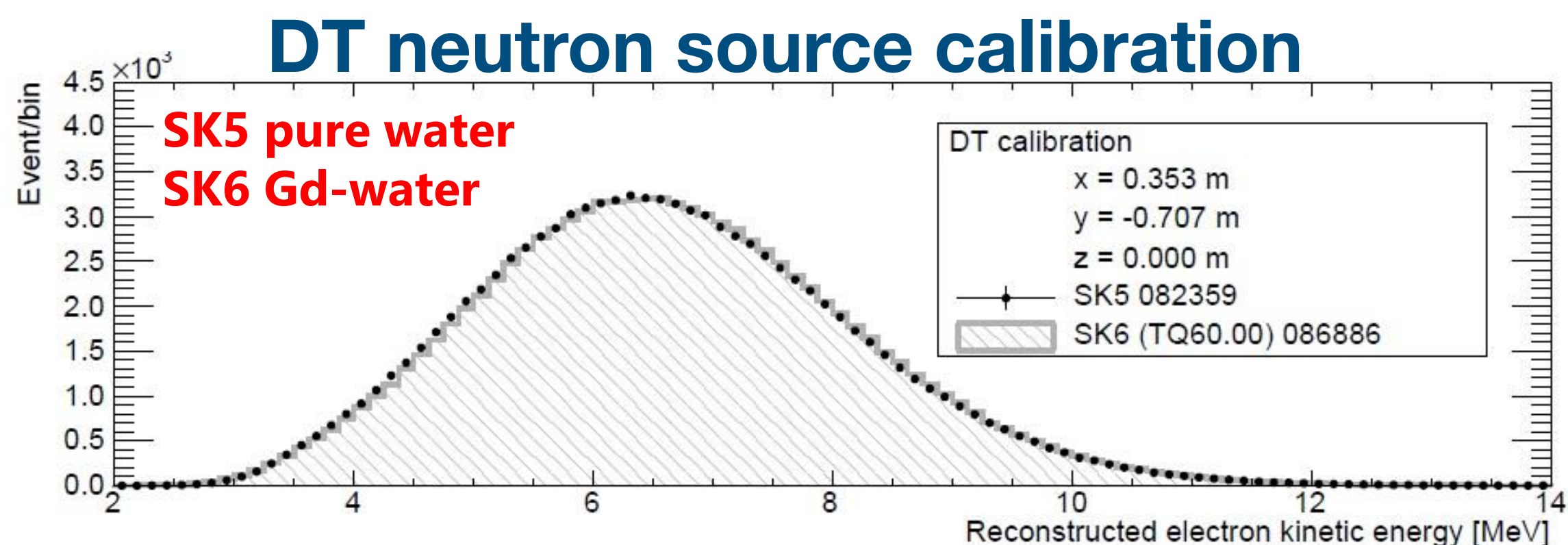
- 遷移確率の変異: 約 1σ でflat probabilityをdisfavor
- Δm_{21}^2 : KamLANDのBest fitと約 1.4σ のずれ



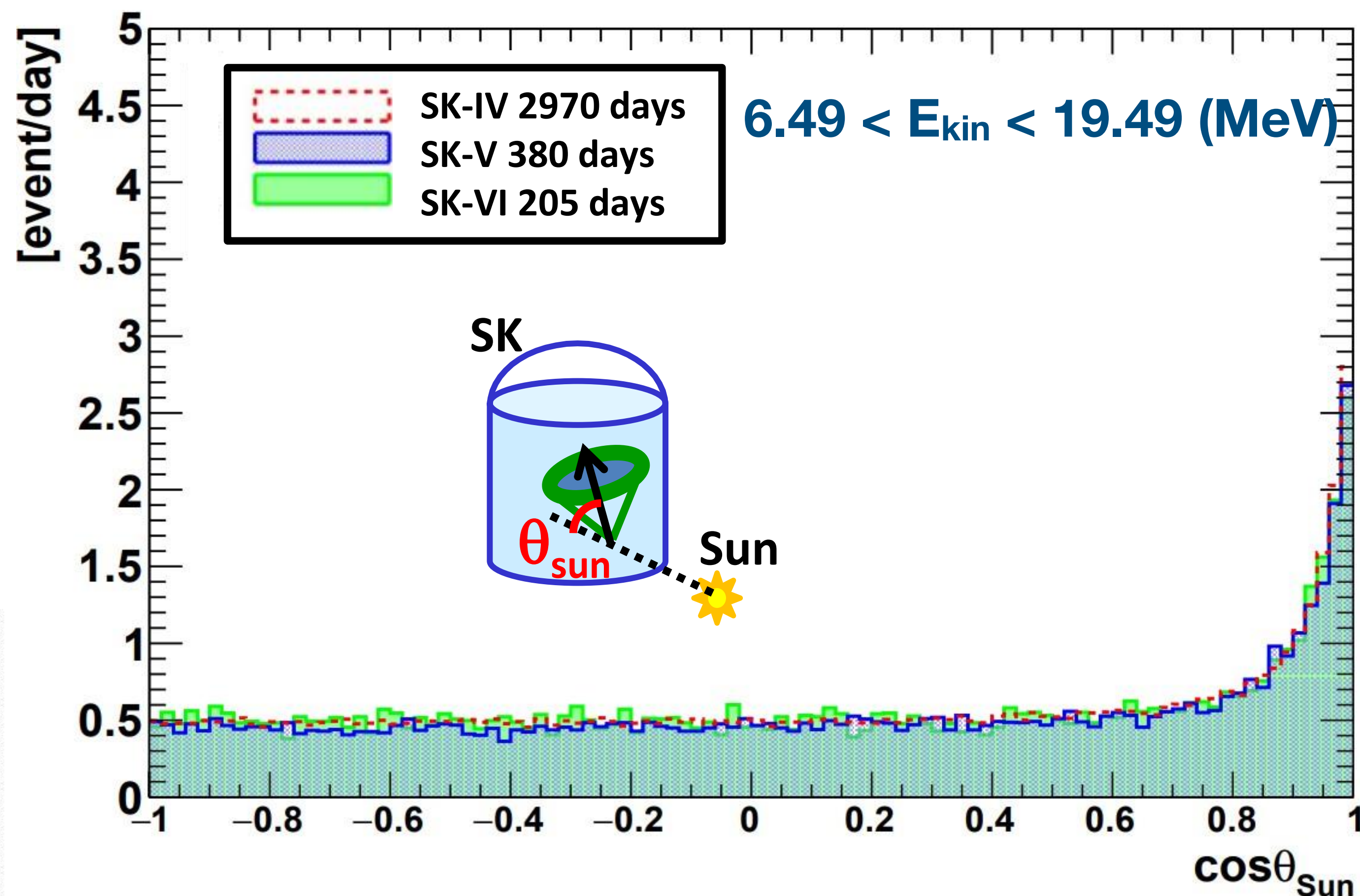
さらにデータを溜め、より高精度での測定を目指している

Solar neutrinos in SK-Gd

- DT neutron generator, LINAC等を用いたキャリブレーション測定を行った
- $E_{\text{kin}} > 6.5$ MeVの領域で、以前と同じクオリティで太陽ニュートリノが観測出来ている



Solar neutrino angular distribution



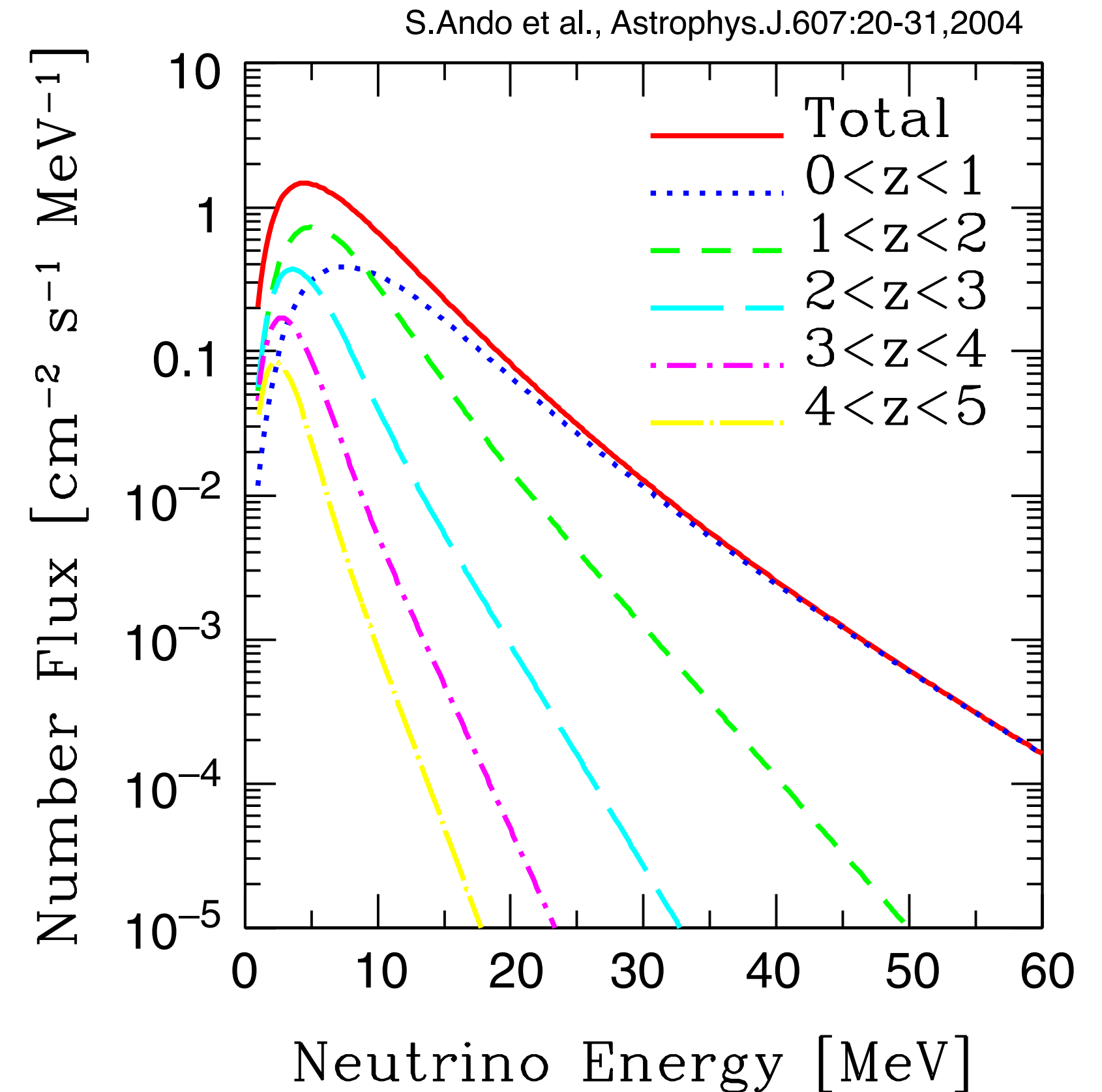
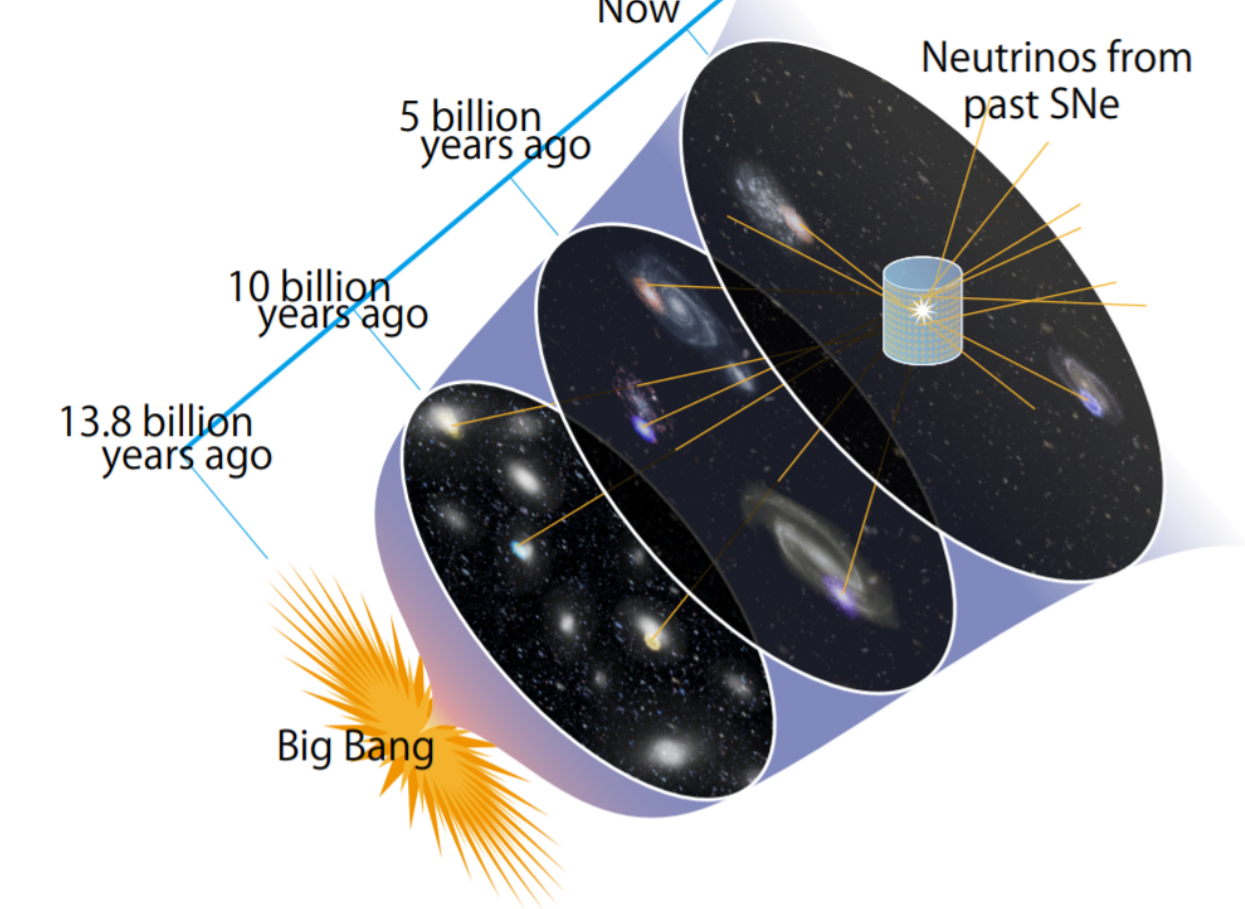
超新星背景ニュートリノ

Diffuse Supernova Neutrino Backgrounds (DSNB)

- 過去の超新星爆発で生成され、現在の宇宙に蓄積しているニュートリノ
- 宇宙のどの時期にどれだけ超新星爆発が起こったかの情報を持っている

$$\frac{dF_\nu}{dE_\nu} = c \int_0^{z_{\max}} R_{\text{SN}}(z) \frac{dN_\nu(E'_\nu)}{dE'_\nu} (1+z) \frac{dt}{dz} dz$$

- Star formation rate
- Supernova burst mechanism
- Neutrino oscillation effect in dense medium



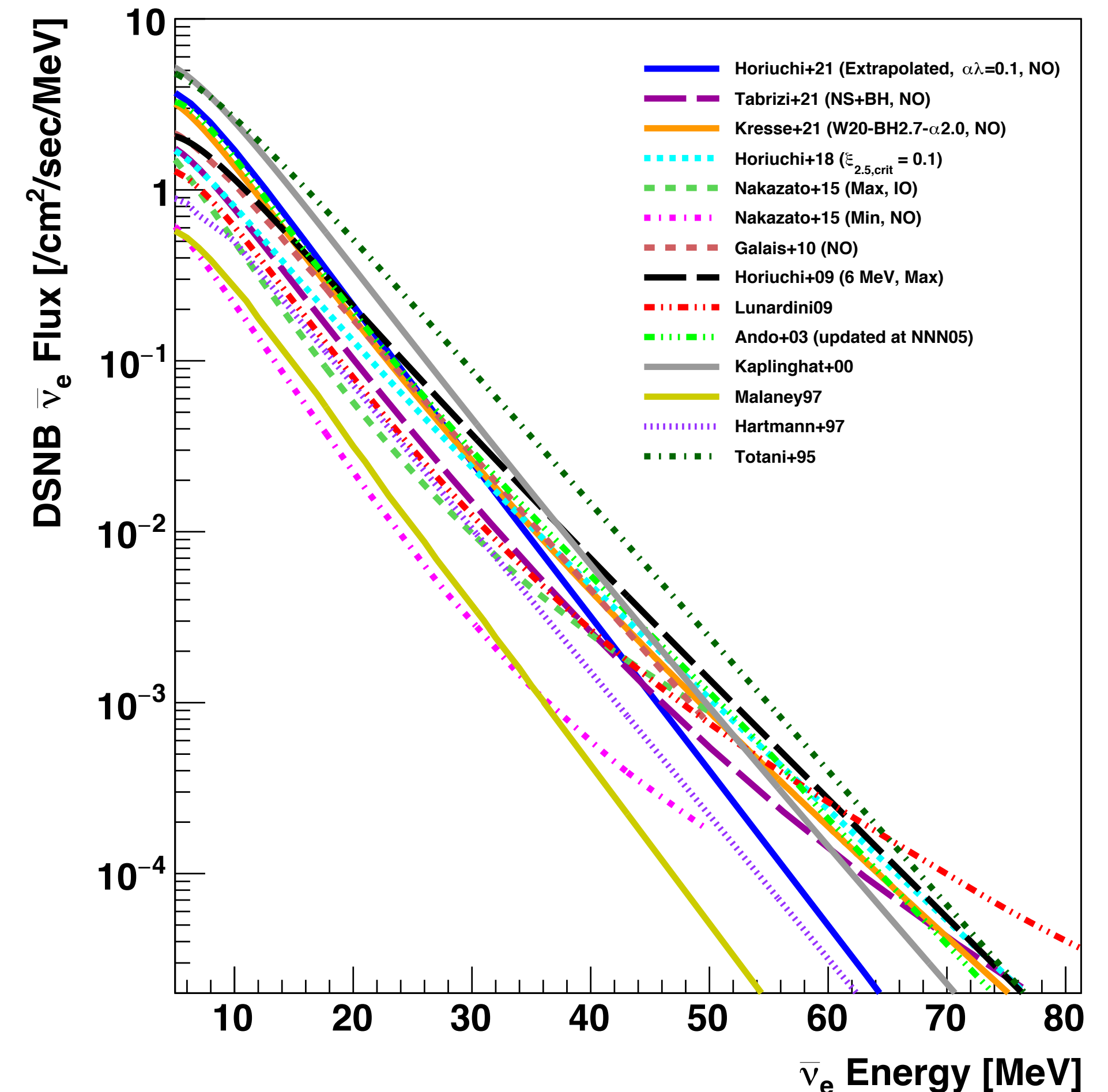
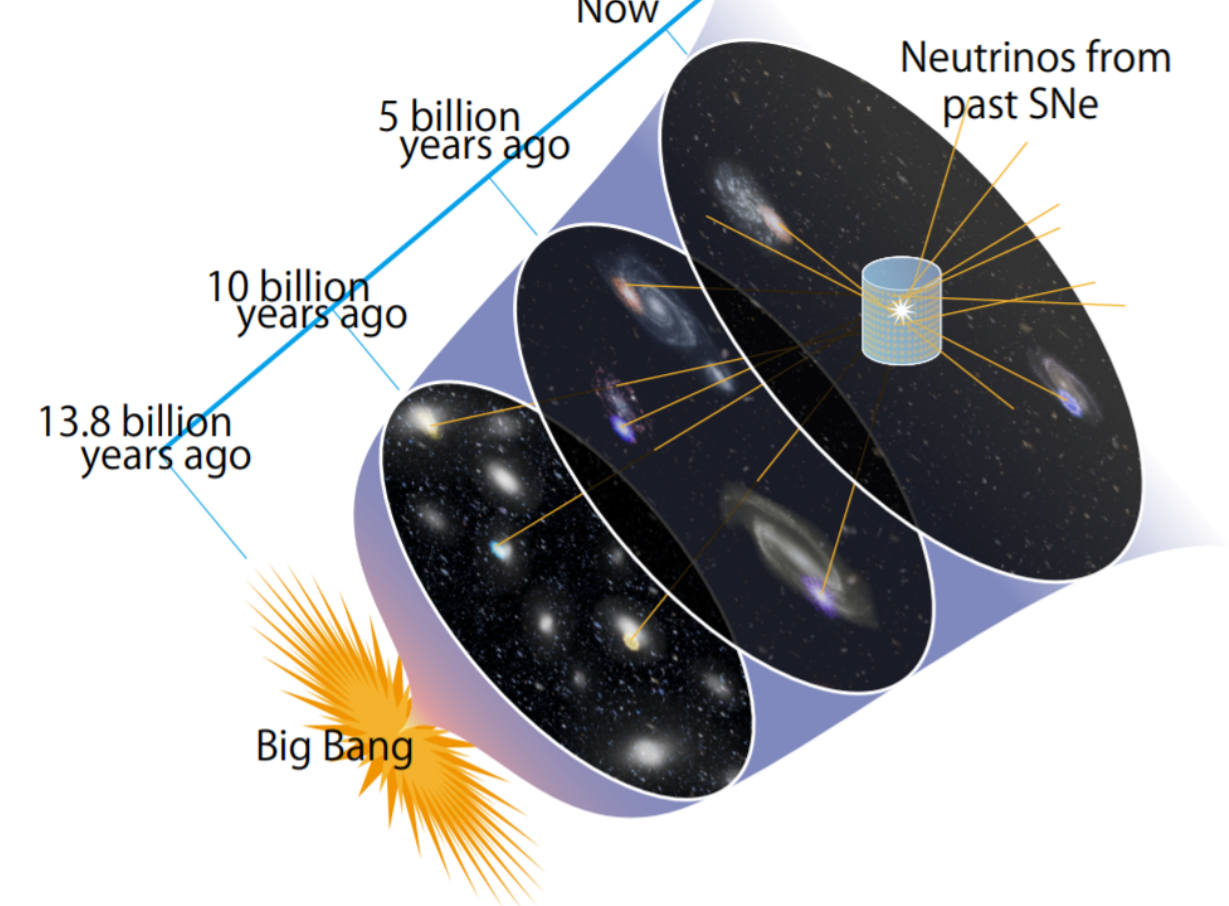
超新星背景ニュートリノ

Diffuse Supernova Neutrino Backgrounds (DSNB)

- 過去の超新星爆発で生成され、現在の宇宙に蓄積しているニュートリノ
- 宇宙のどの時期にどれだけ超新星爆発が起こったかの情報を持っている

$$\frac{dF_\nu}{dE_\nu} = c \int_0^{z_{\max}} R_{\text{SN}}(z) \frac{dN_\nu(E'_\nu)}{dE'_\nu} (1+z) \frac{dt}{dz} dz$$

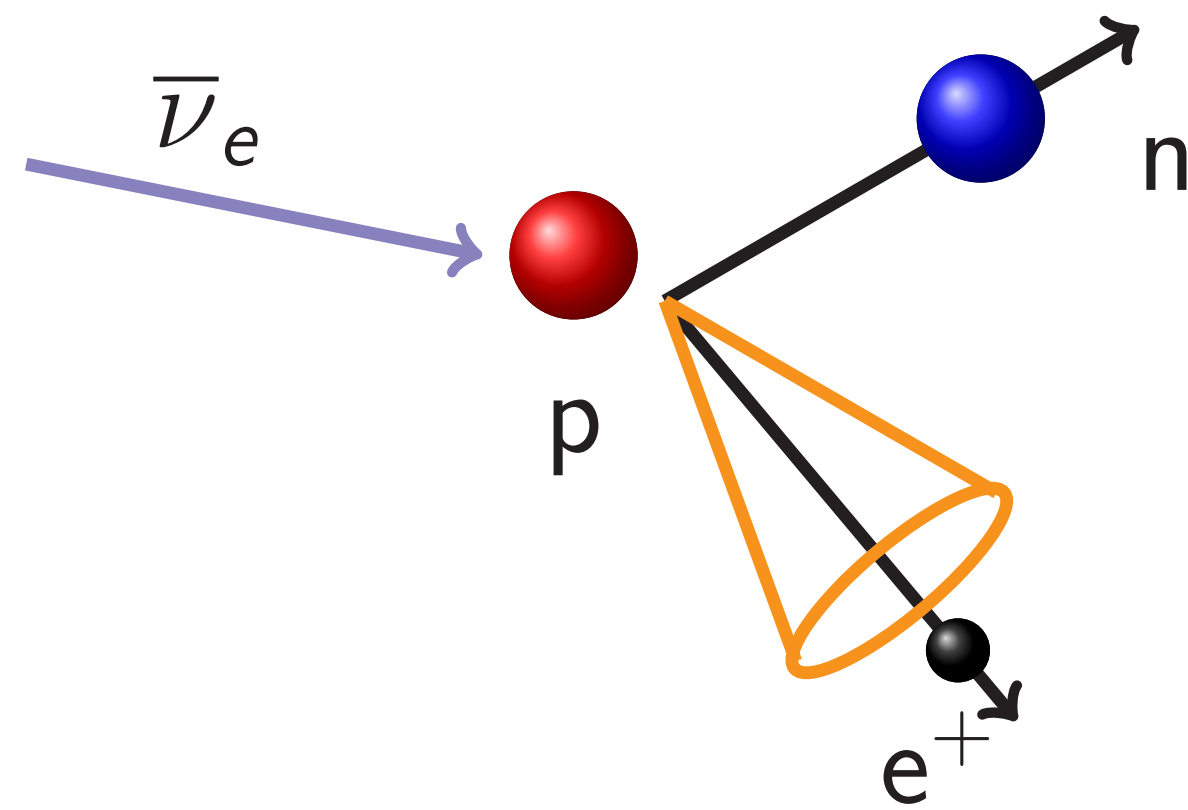
- Star formation rate
- Supernova burst mechanism
- Neutrino oscillation effect in dense medium



DSNB signal

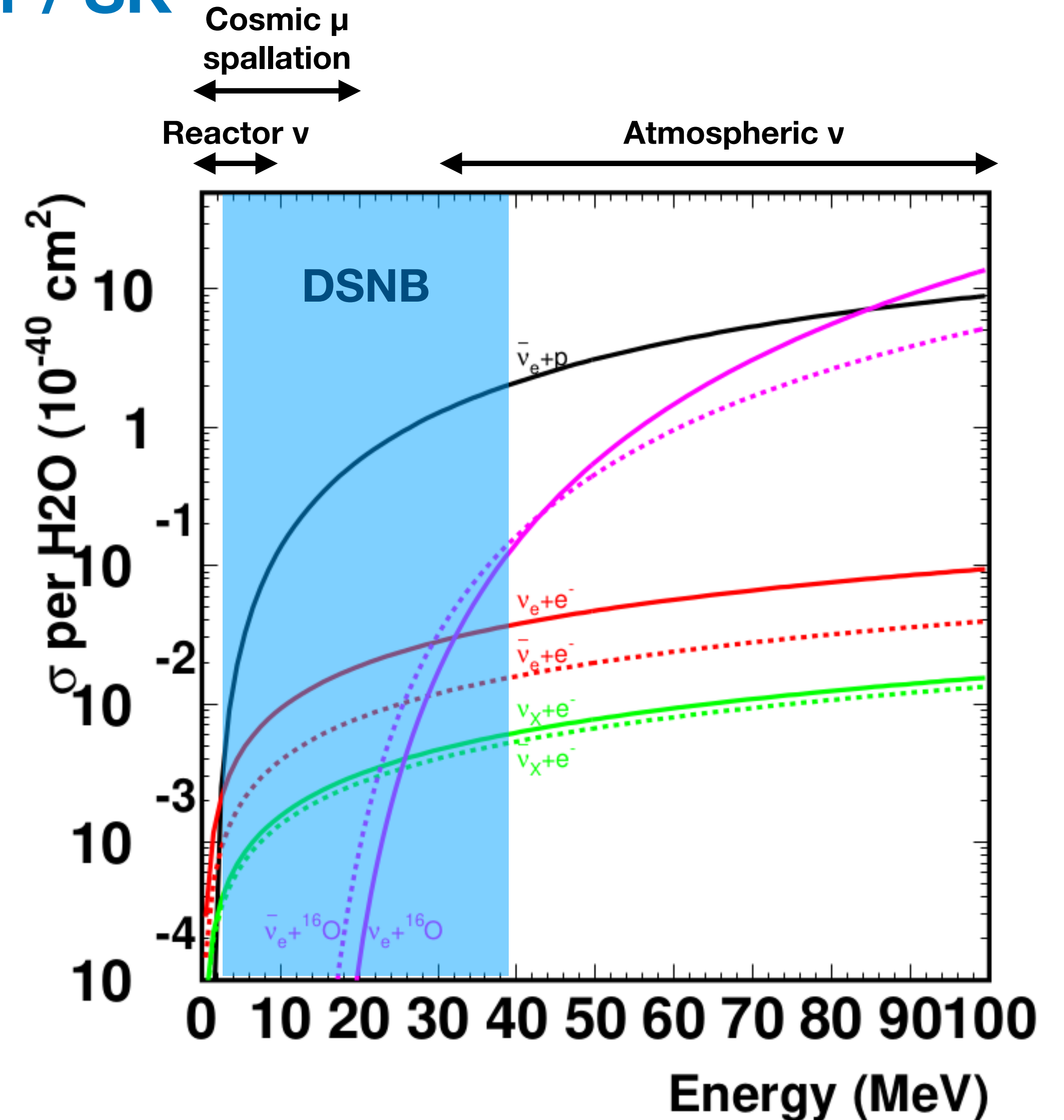
Rare event search: a few interactions / year / SK

- Primary signal: Inverse Beta Decay
($\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$)

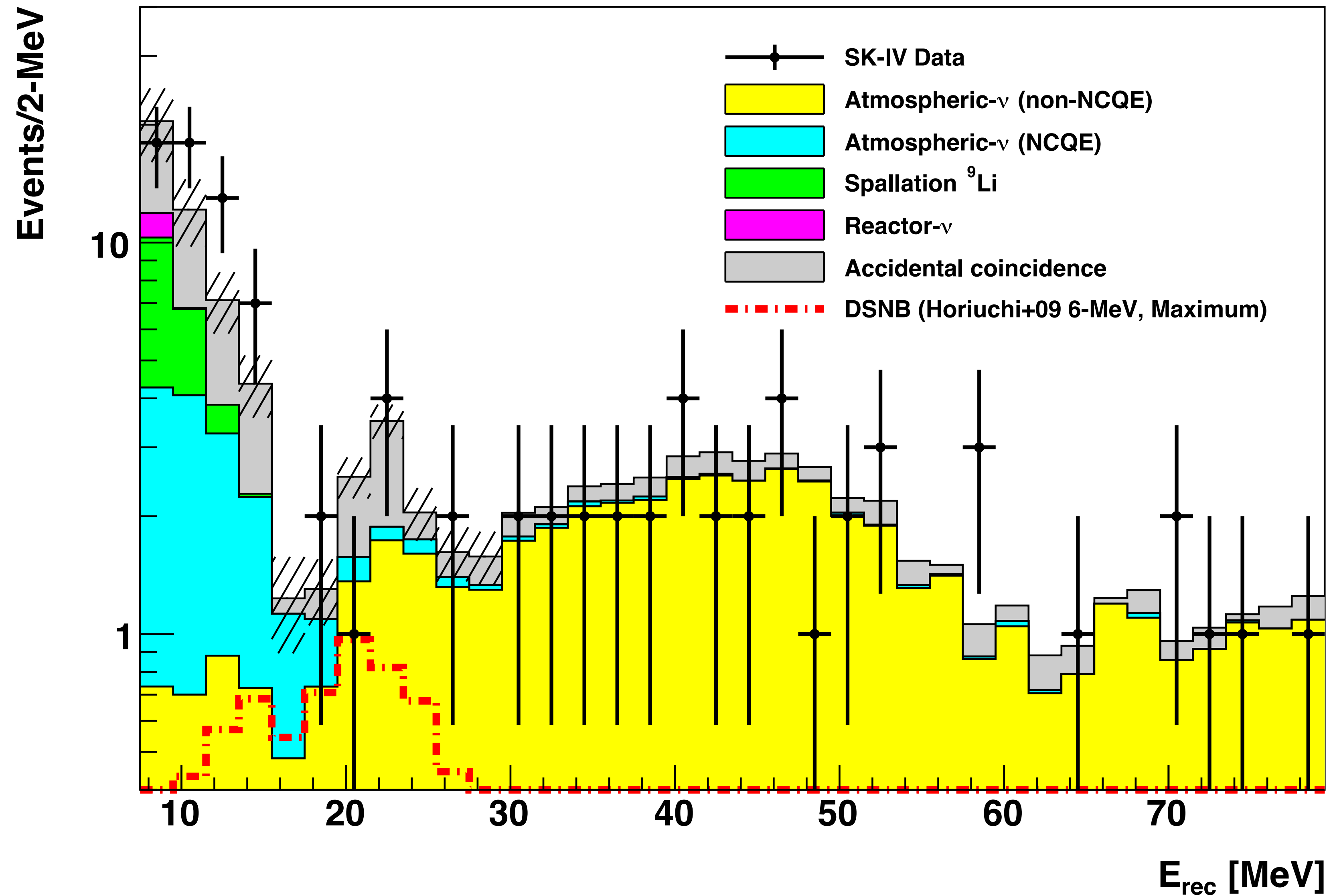


イベントセレクション

- Cosmic muon spallation event rejection
- Positron selection with hit pattern
- Neutron tag



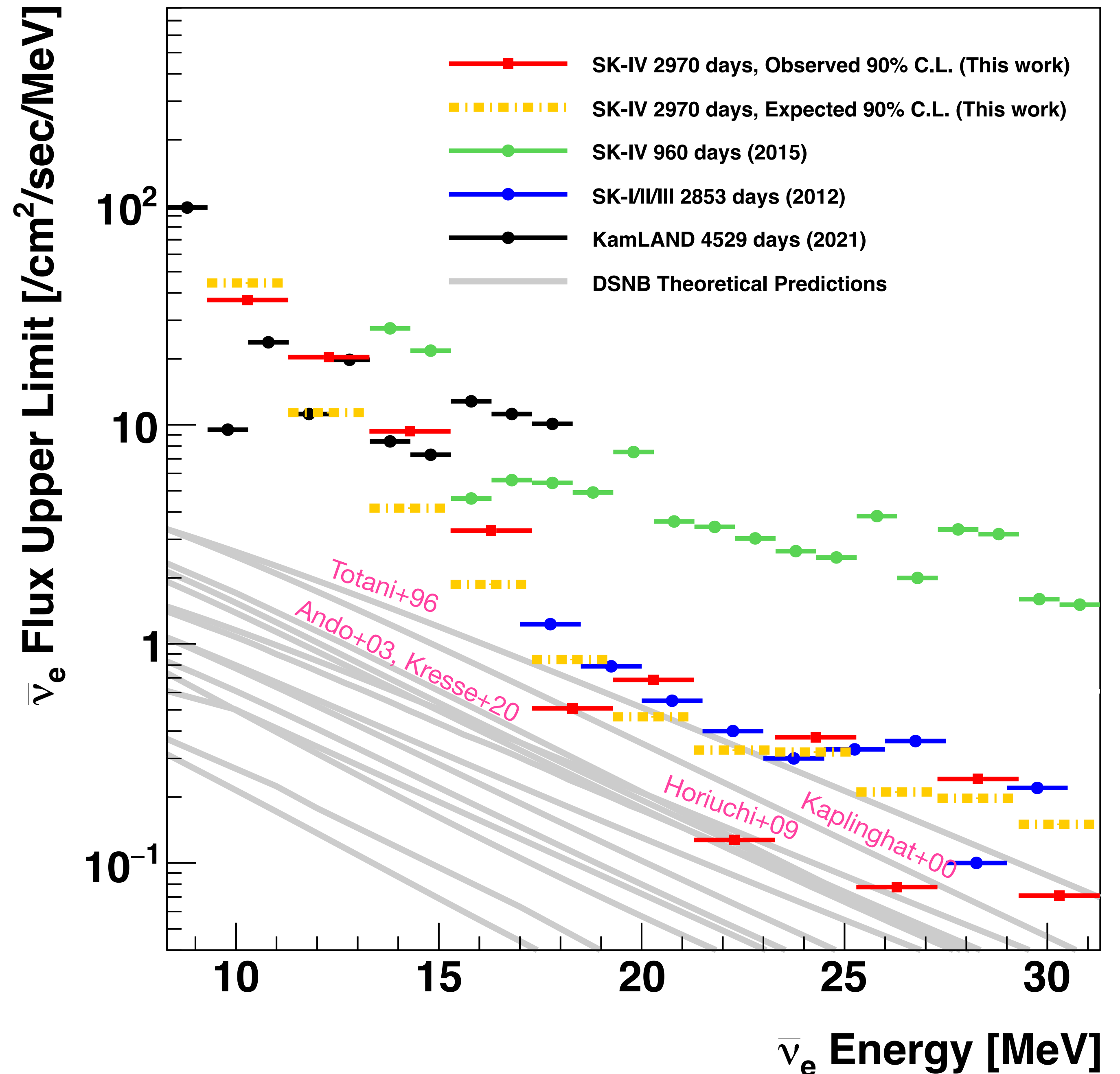
SK-IVでのDSNB探索の最終サンプル



Model-independent limit

- $E_\nu > 15\text{MeV}$ で最も厳しい制限
- いくつかのモデル予想に既に感度が到達

Result published in
Phys. Rev. D **104** (2021) 12, 122002



From SK to SK-Gd

- Gdを水中に溶解させることにより中性子の検出効率を飛躍的に向上

J. F. Beacom and M. R. Vagins, Phys. Rev. Lett. 93 (2004) 17110

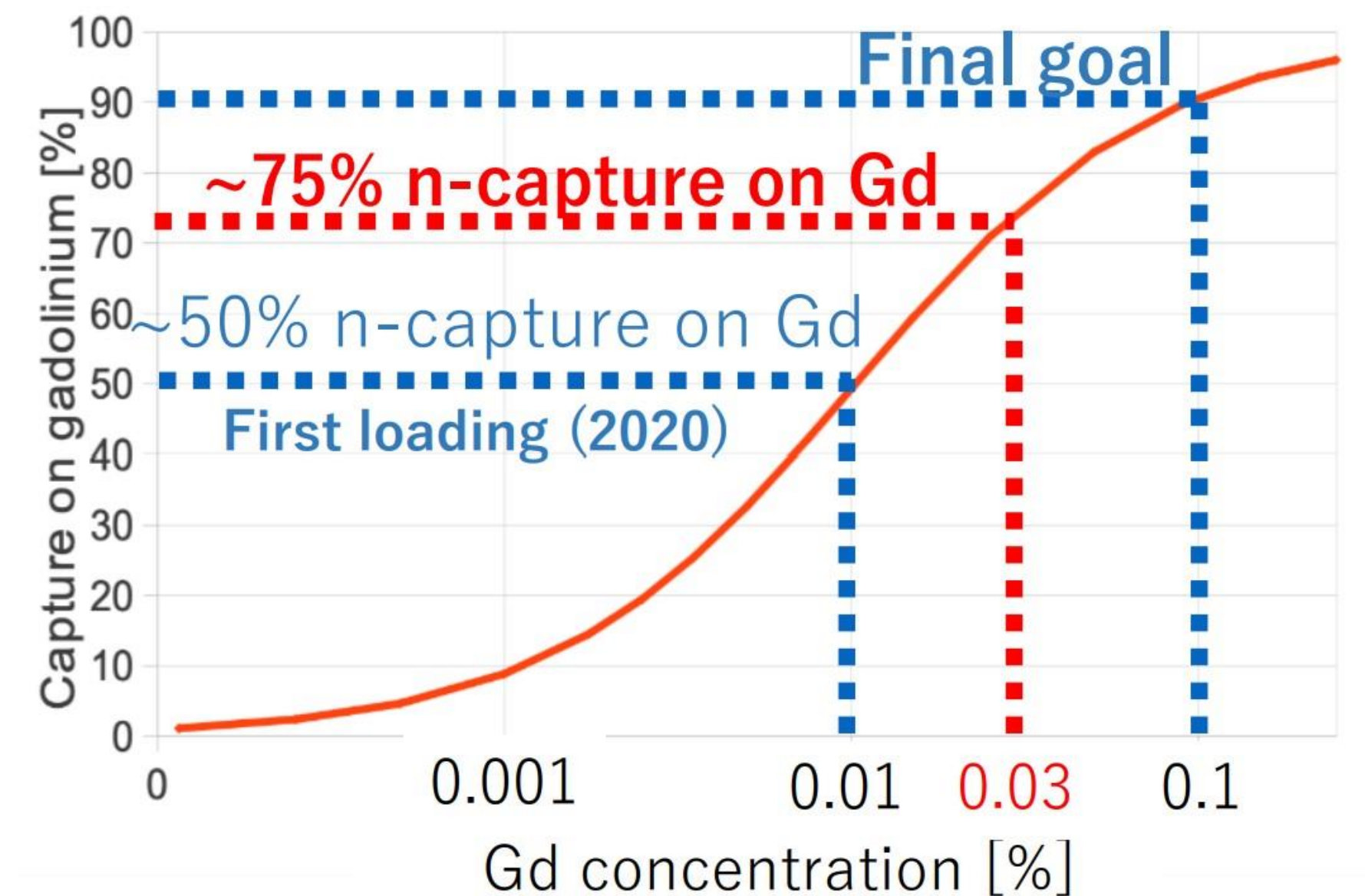
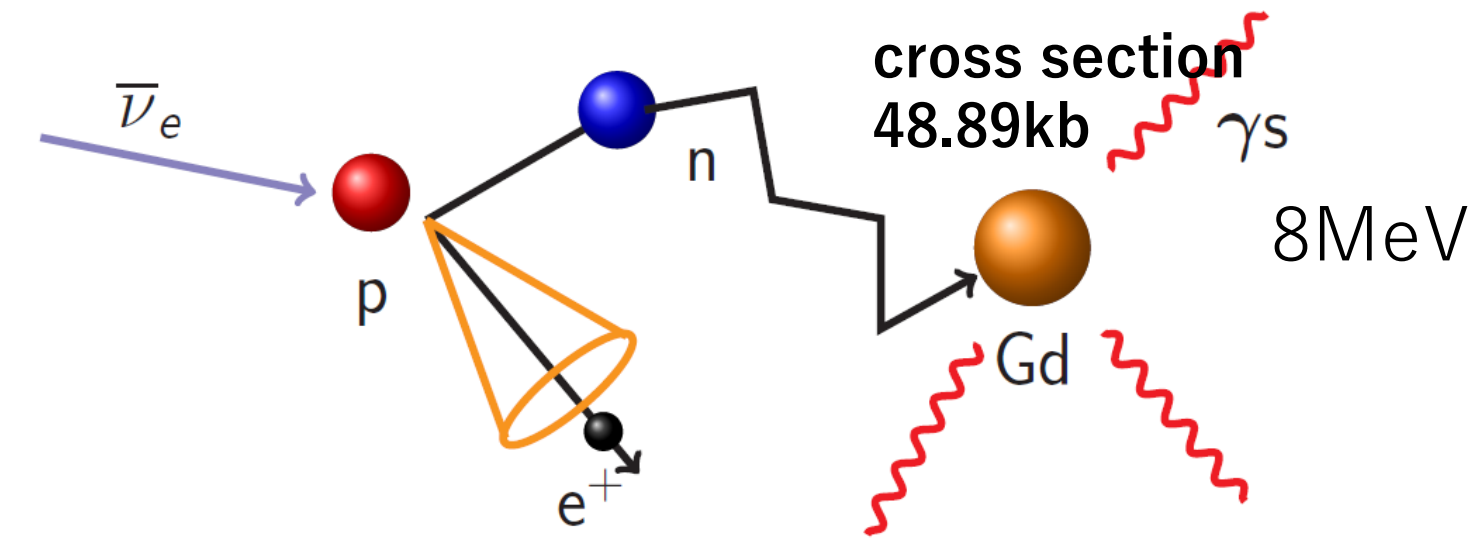
- **DSNBの世界初観測を目指す**

- その他の物理ターゲット

- 超新星ニュートリノ方向感度の向上
- 超新星爆発前兆ニュートリノの観測
- 大気・加速器ニュートリノ測定精度の向上
- などなど

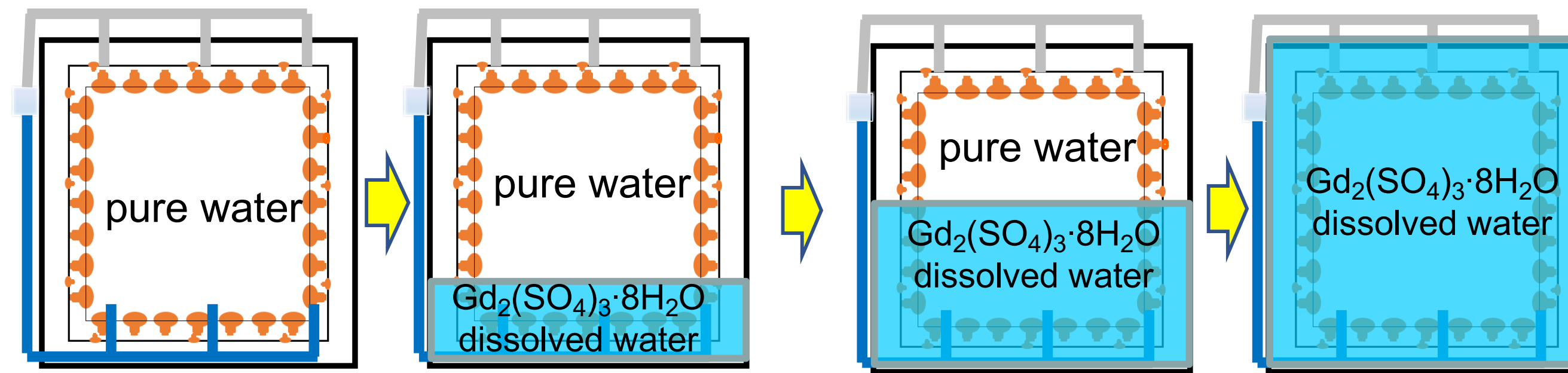
- **最初のGd導入: 0.01% Gd in 2020**

- **2回目のGd導入: 0.01 → 0.03% Gd in 2022**

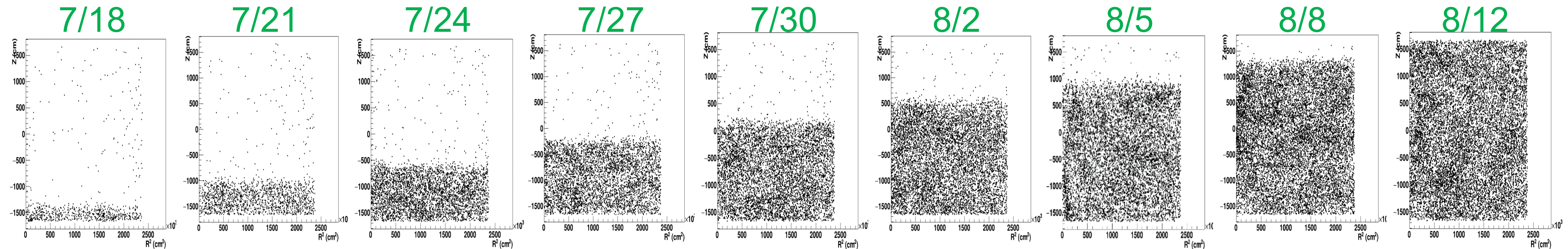
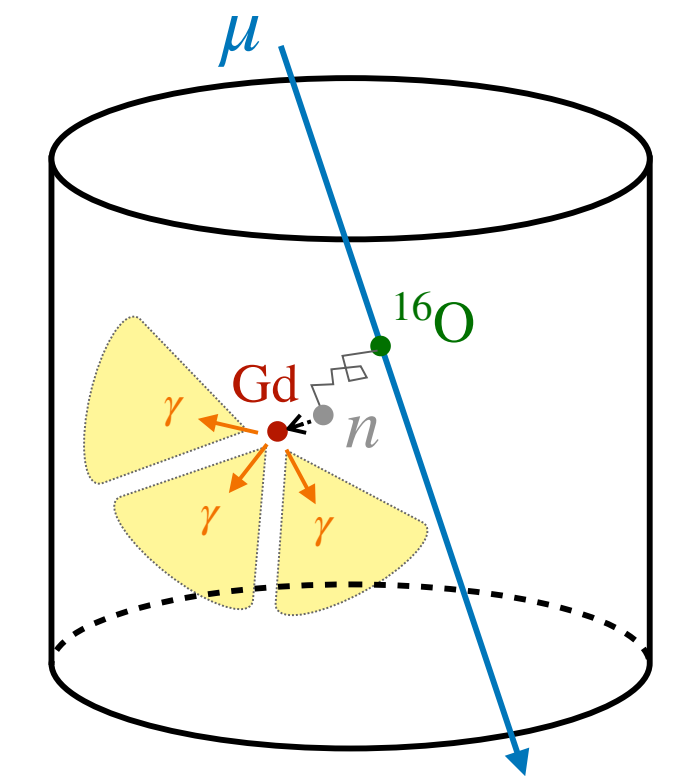


First Gd loading

- 2020年、13 tonの $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (5 tons of Gd) をスーパーカミオカンデに溶解
 - From July 14 through August 17, 2020
- 水槽底から、純水がGd水に置き換わってゆく様子を確認

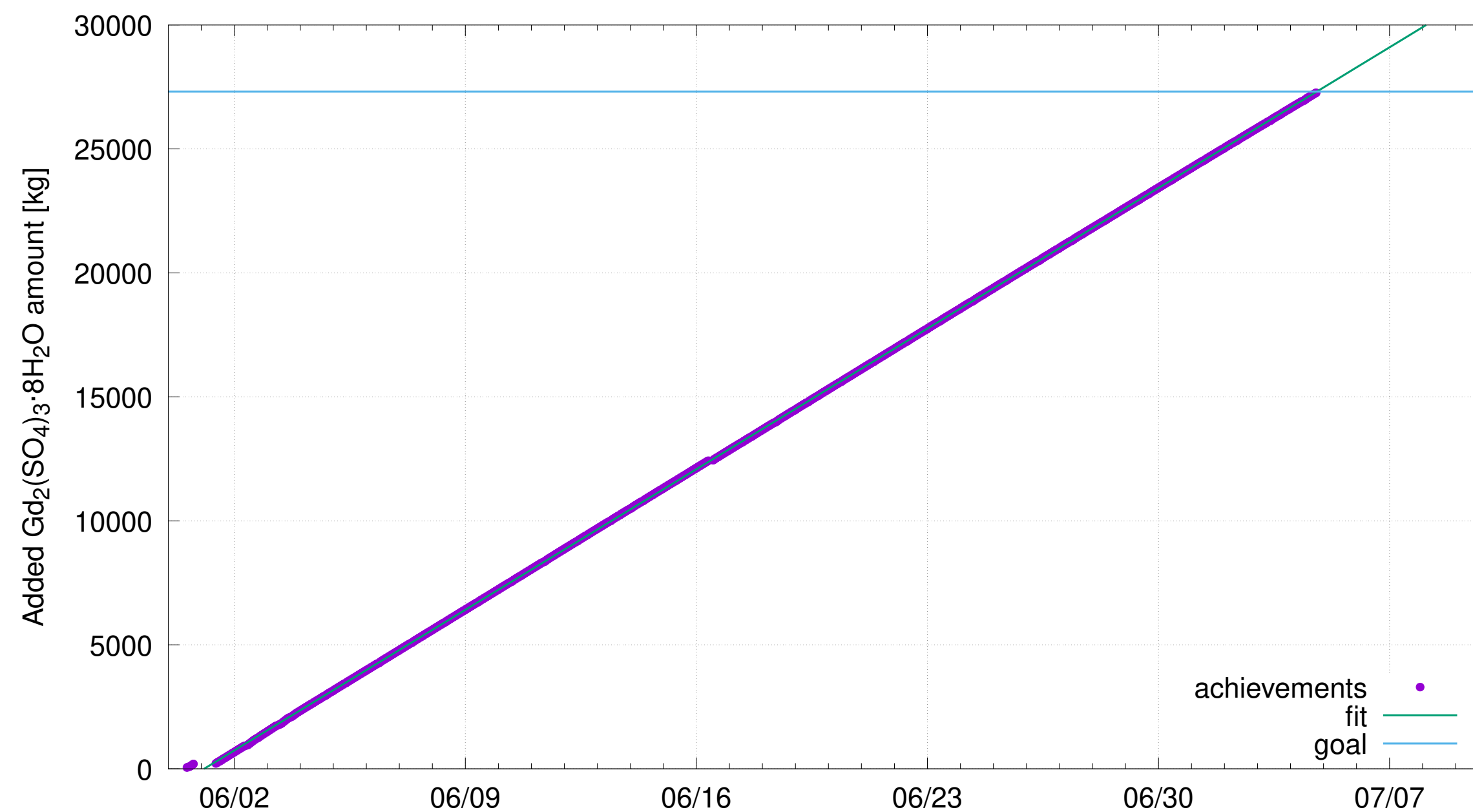
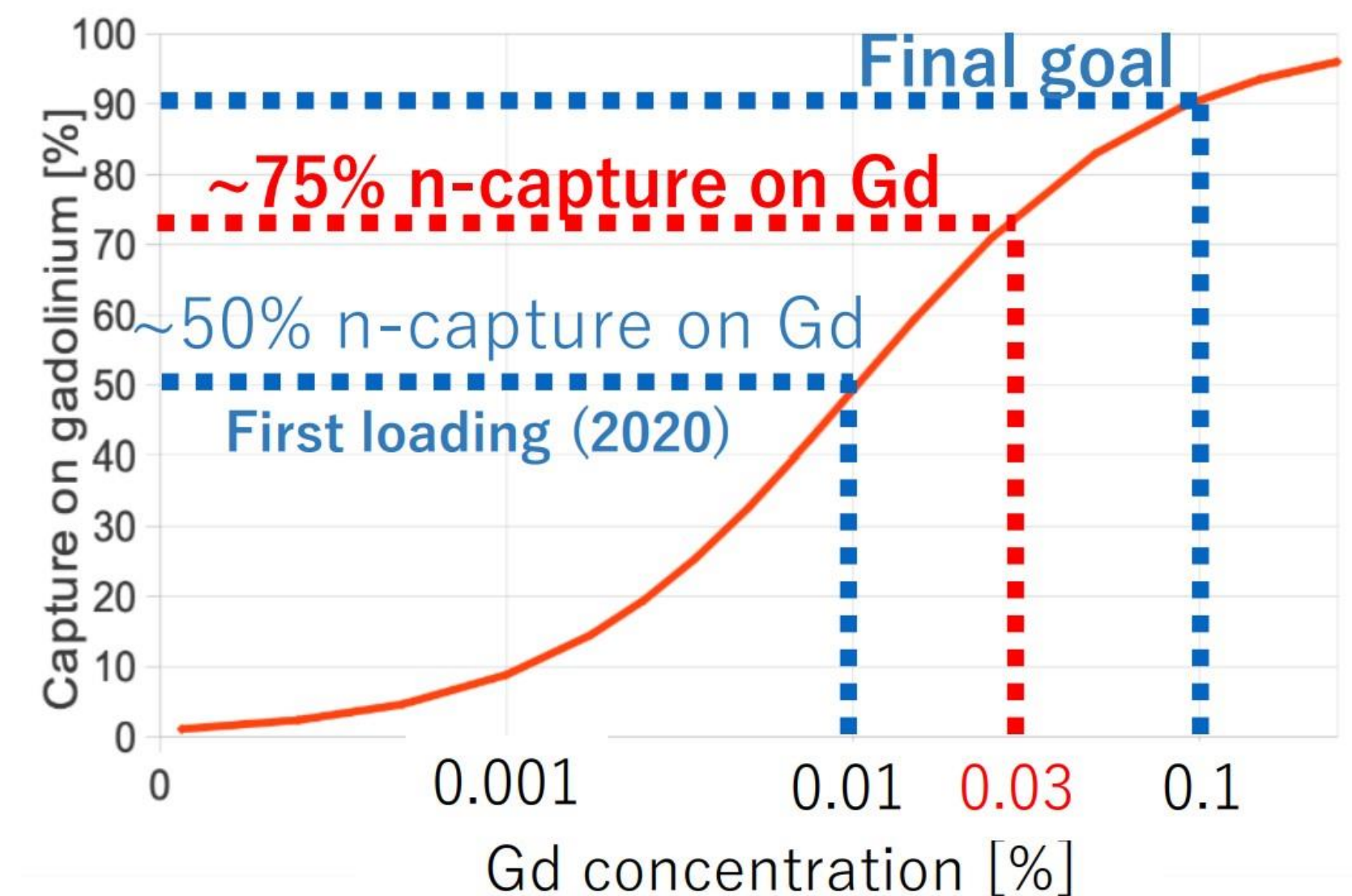


Vertex distribution of spallation neutron $\text{Gd}(n,\gamma)$ candidates



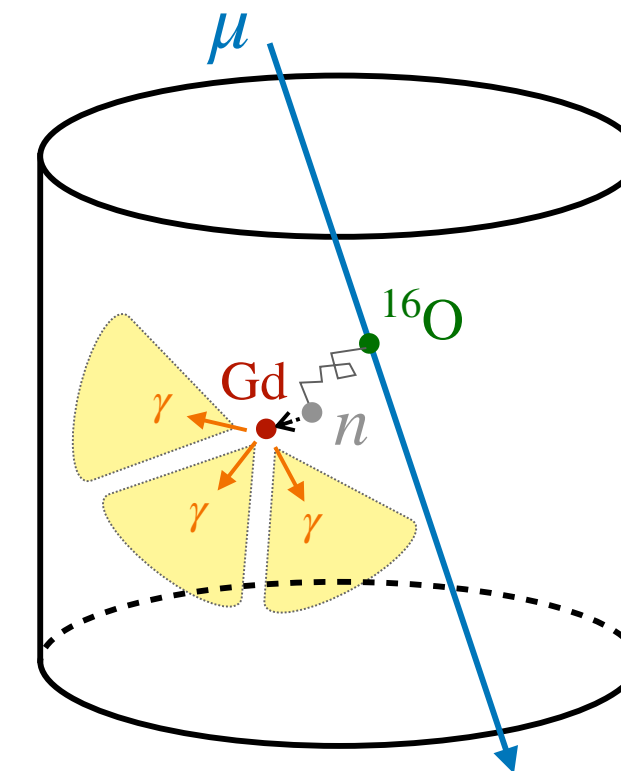
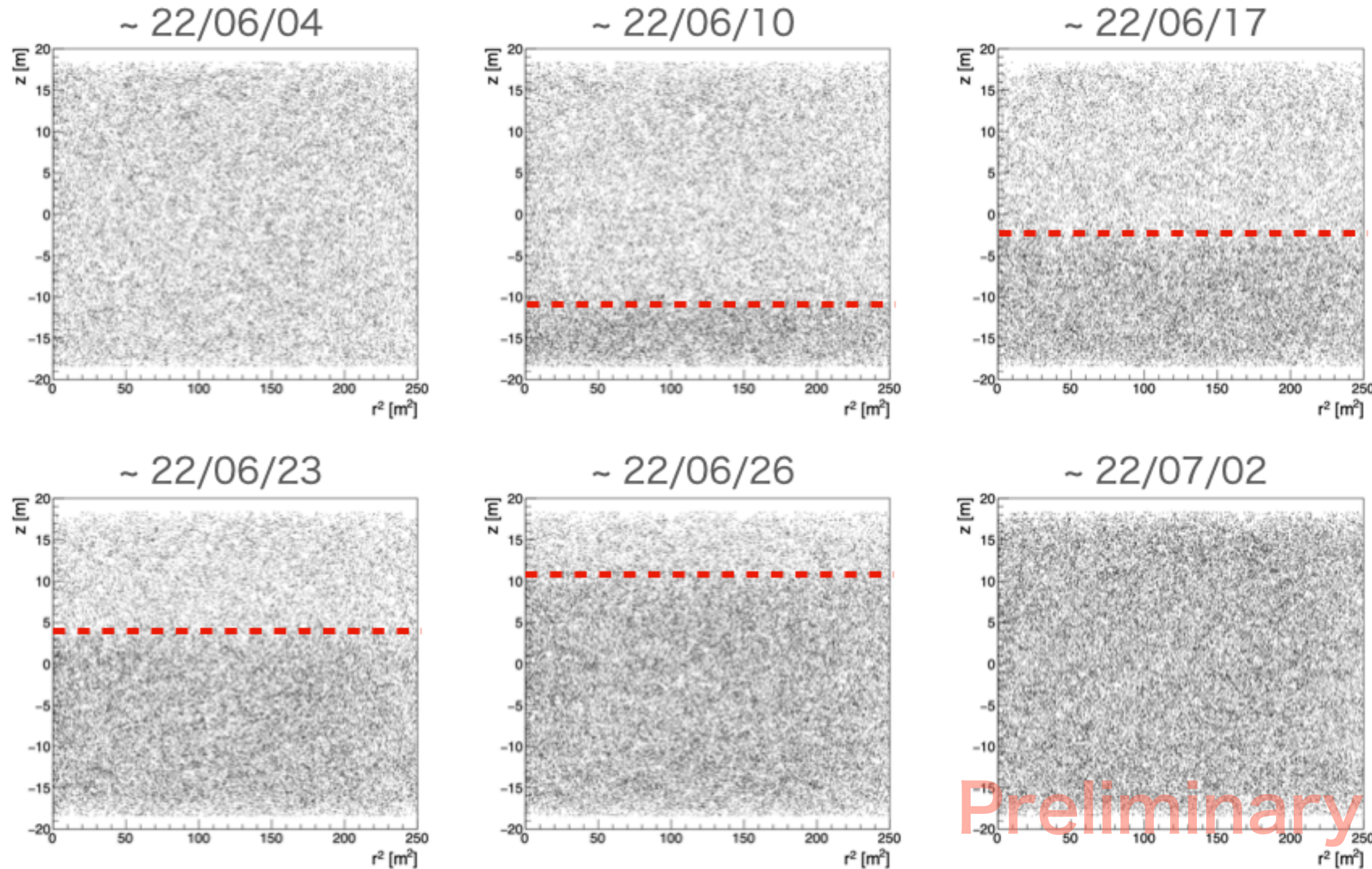
Second Gd loading

- 追加でGdを溶解し、濃度を 0.01% から 0.03%に増加
 - Neutron capture on Gd: 50% → 75% (x1.5 increase)
 - Capture time: ~115 μs → ~60 μs
- 改善したシステムで、2020年の約2倍のスピードで溶解
- ~26 tonの $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ を、2022年6月1日から7月4日にかけて35日間で溶解

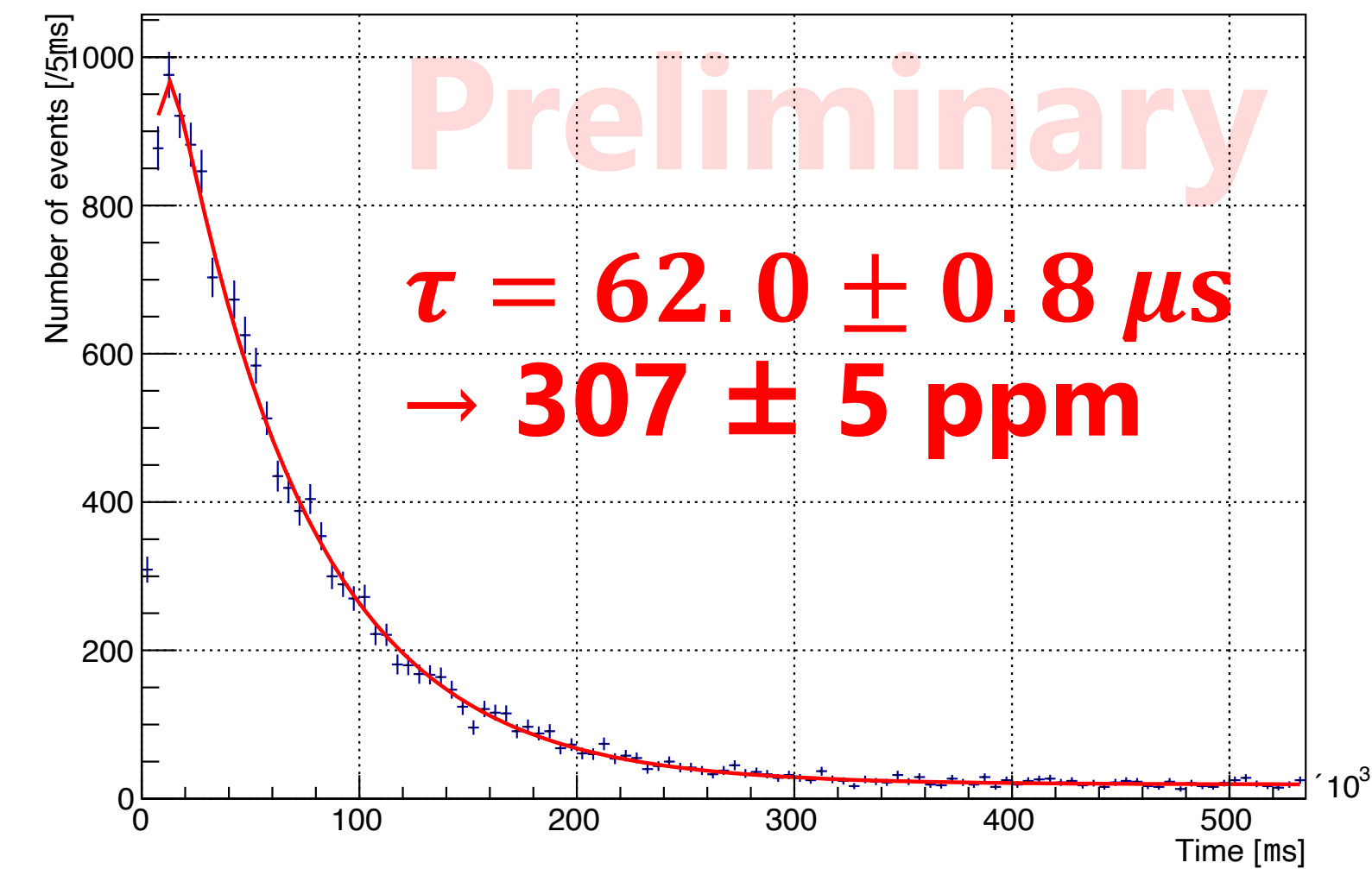


Additional Gd observed in the detector

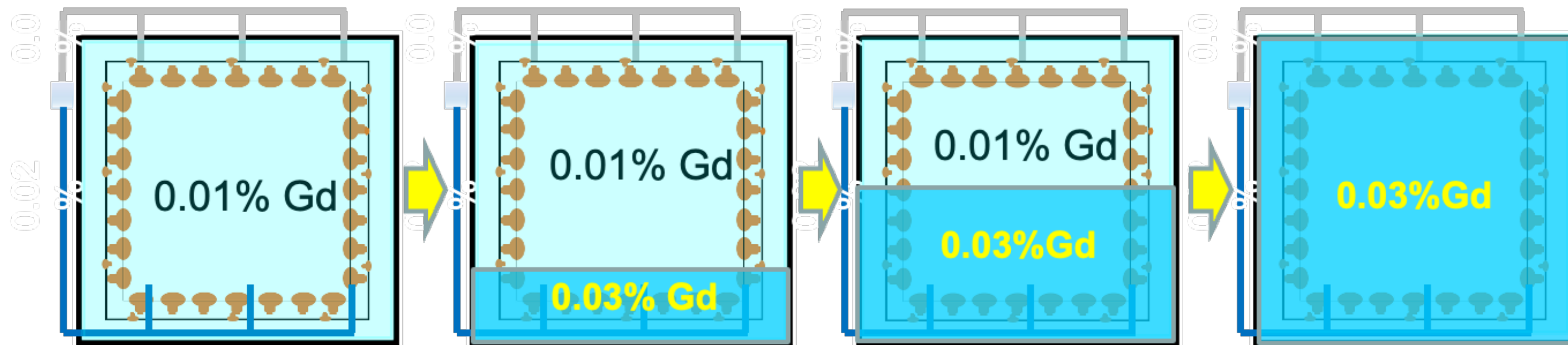
Vertex distribution of spallation neutron Gd(n, γ) candidates



Neutron capture time measured with Am/Be source

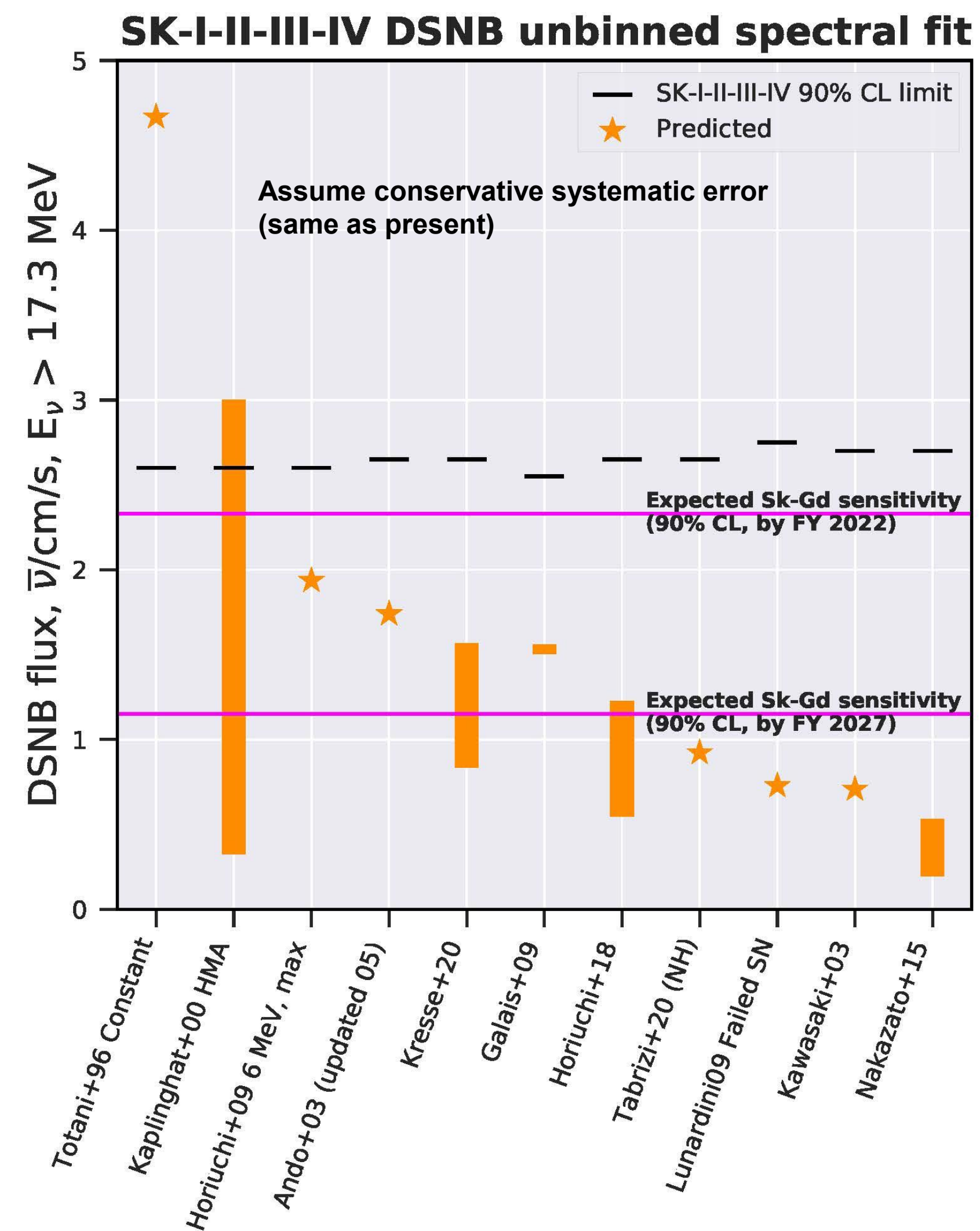
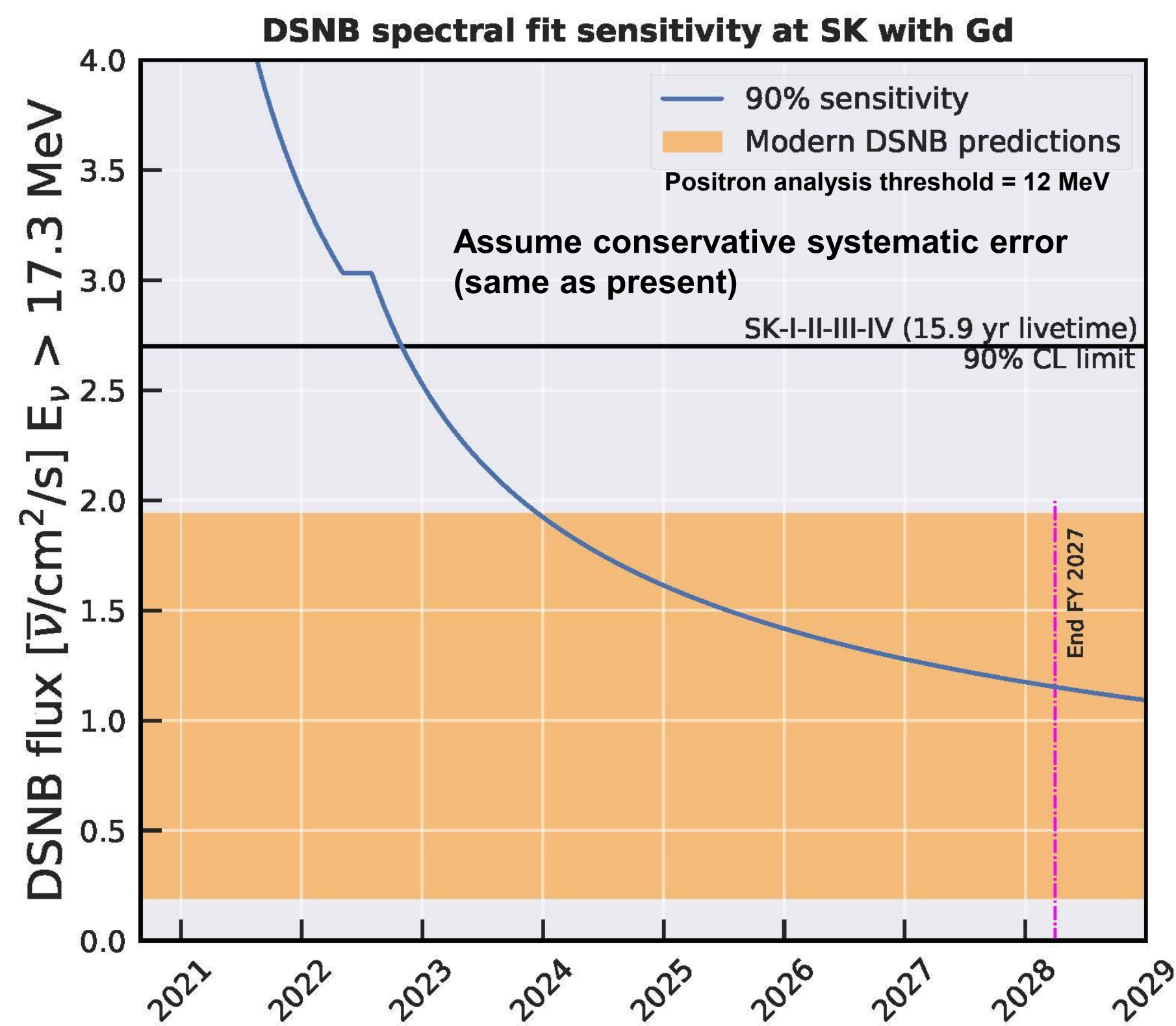


Capture time consistent with the expectation



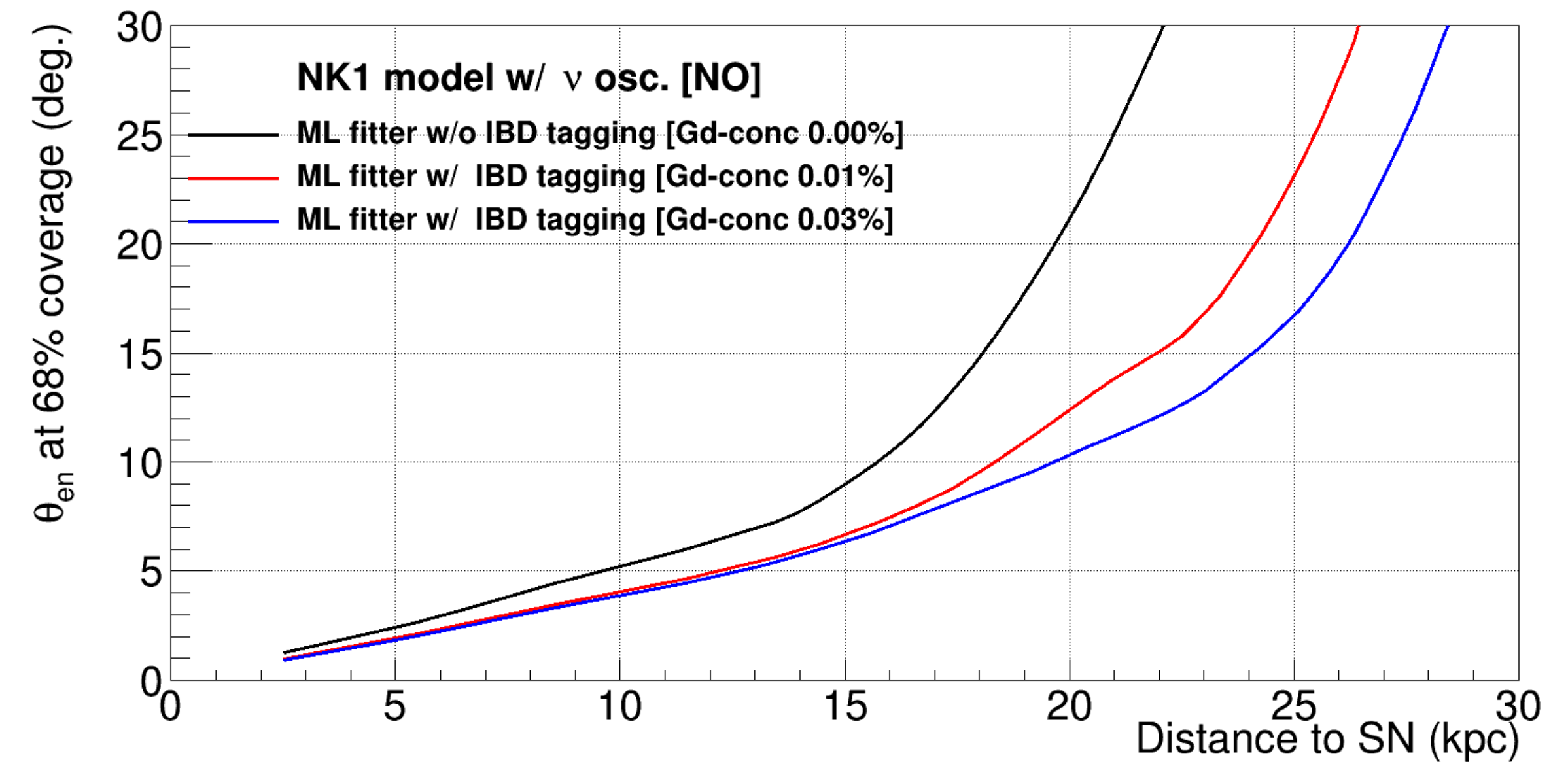
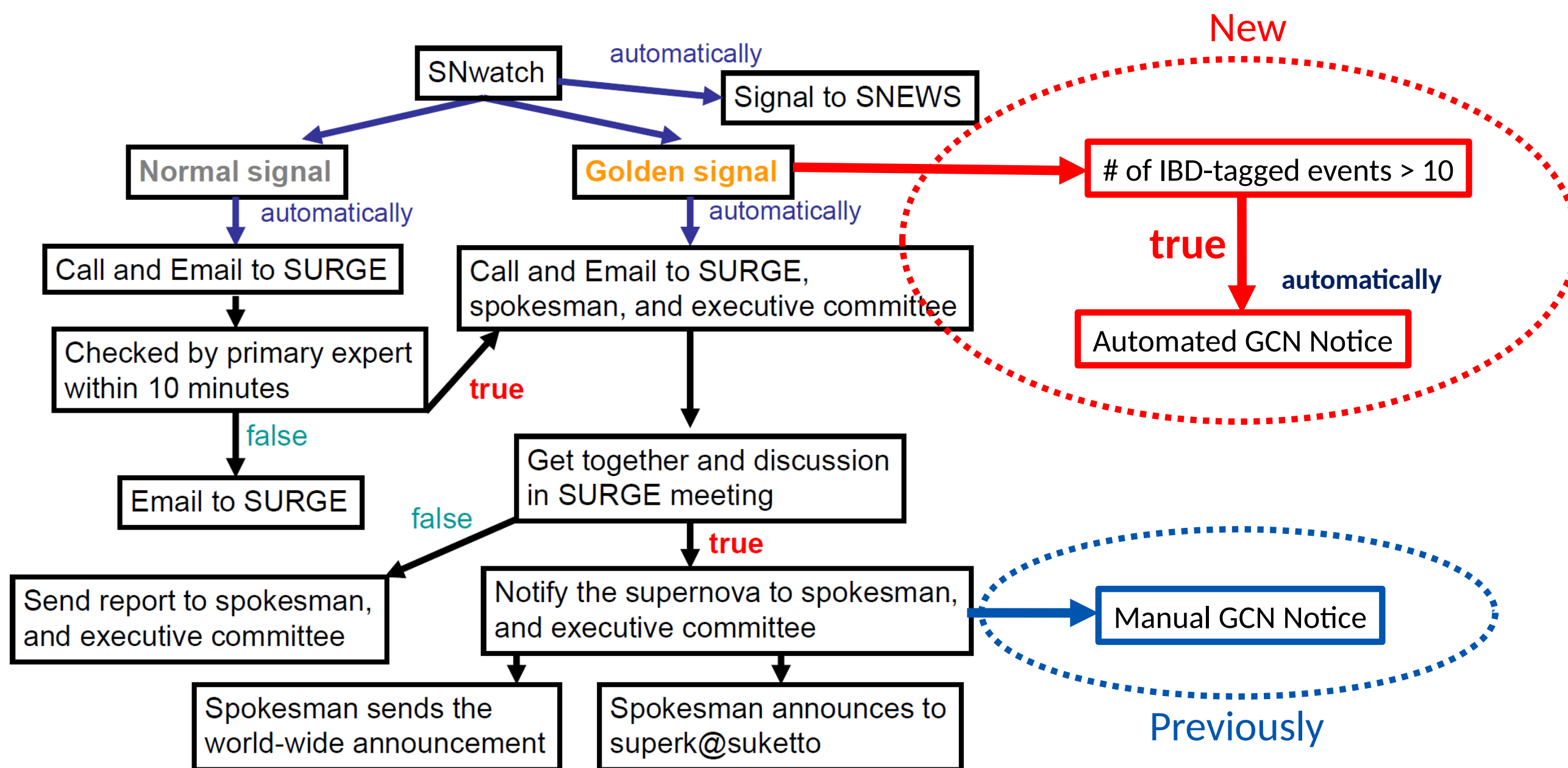
SK-GdにおけるDNSB探索

- 数年のデータでSKの純水データの感度に到達する見込み
- 2027までのデータで多くのモデルが予想する領域に
 - 系統誤差の削減により、さらなる感度向上を目指している
- **SK-VIのデータを使った探索結果をまもなく出します！**



超新星アラート

- 2021年12月より、自動化されたアラートをGCNに送っている
- Gdを用いた中性子タグにより、方向情報を持たないIBD反応を弁別することで方向精度も向上

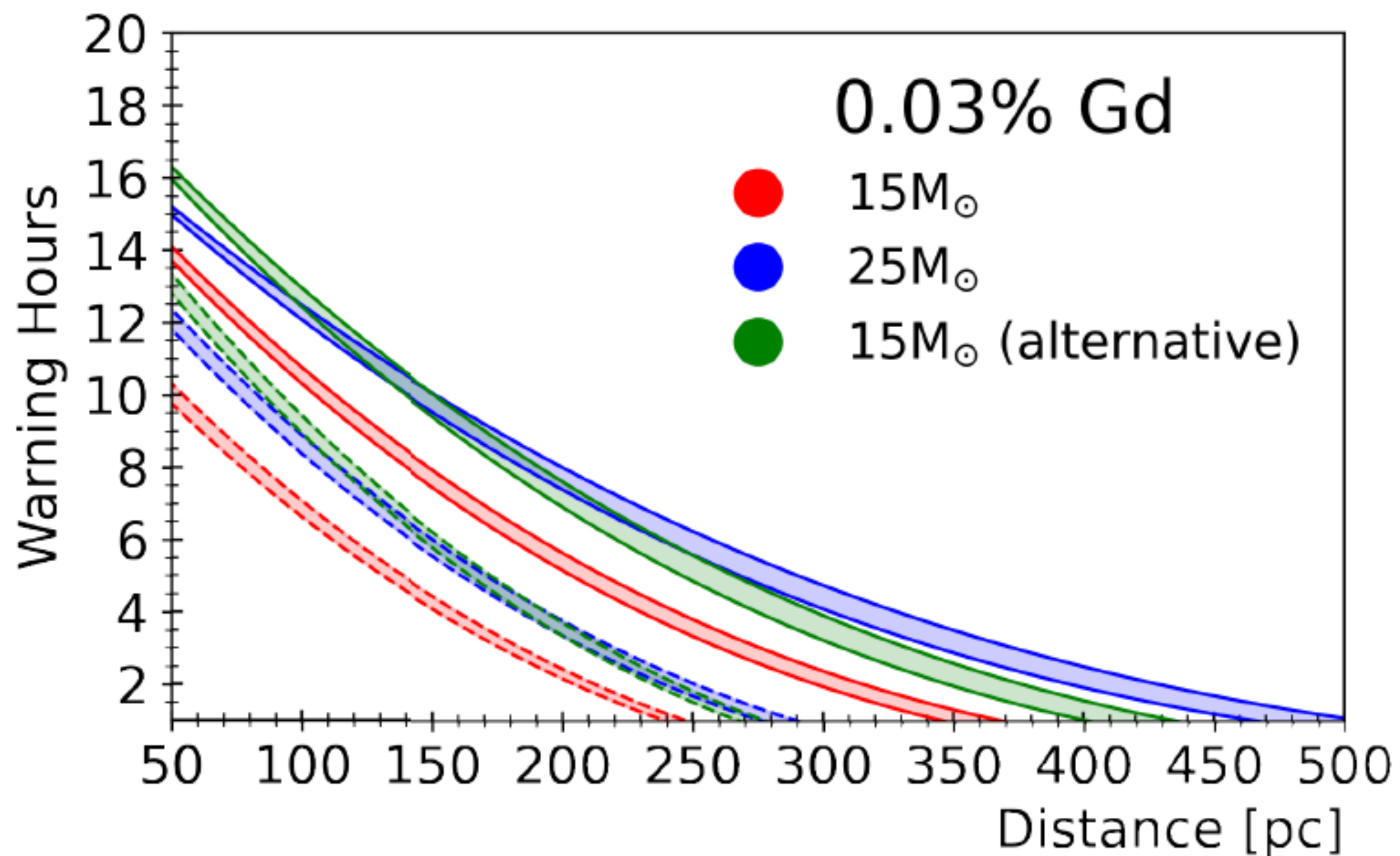


超新星爆発前兆ニュートリノ

- 爆発の前兆となるSi-burningによるニュートリノも、中性子タグで検出可能に

[Astrophys.J. 935 \(2022\) 1, 40](#)

- SK内部では既にアラームを運用中
- KamLANDとも連携する方向で準備を進めている



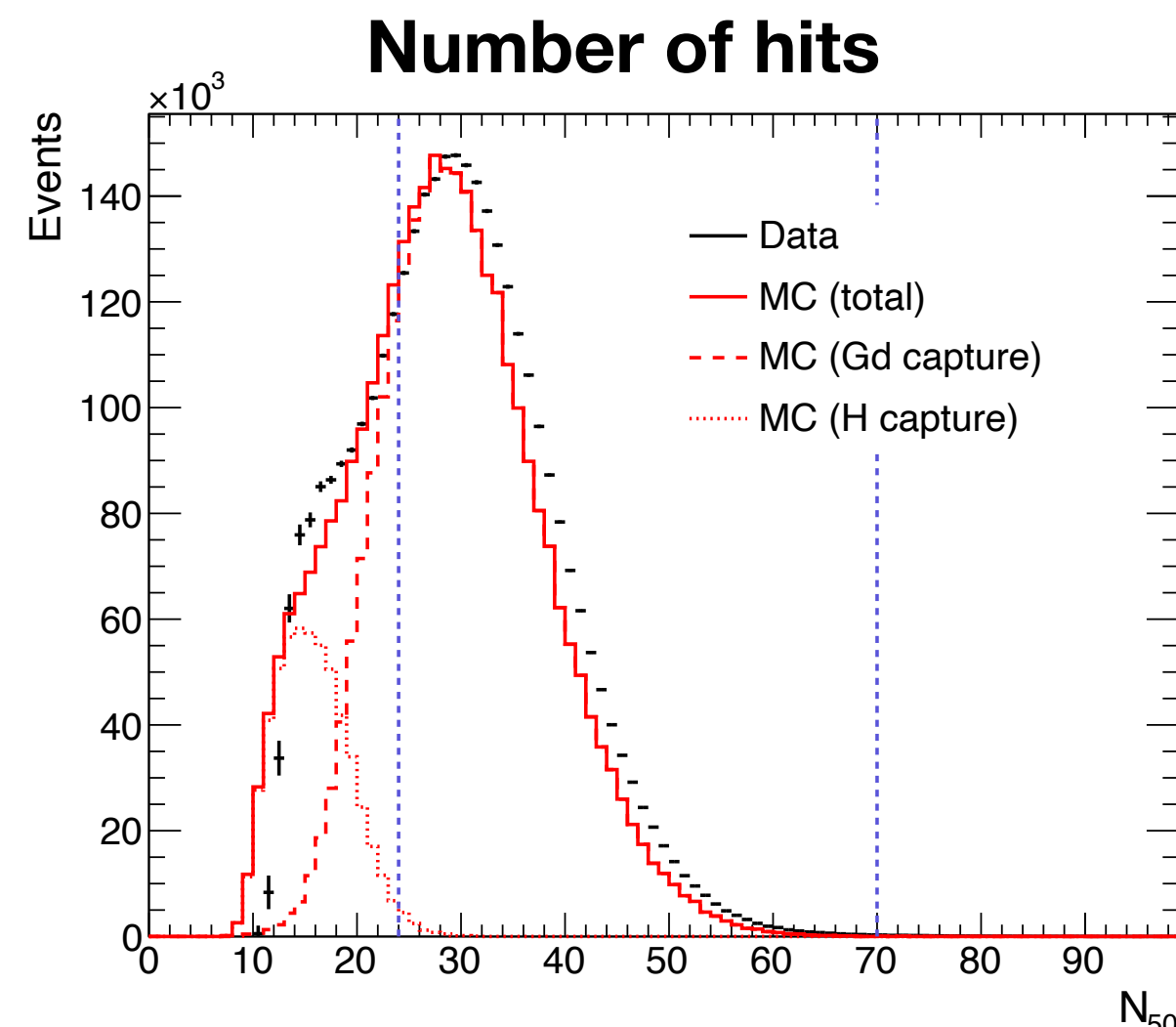
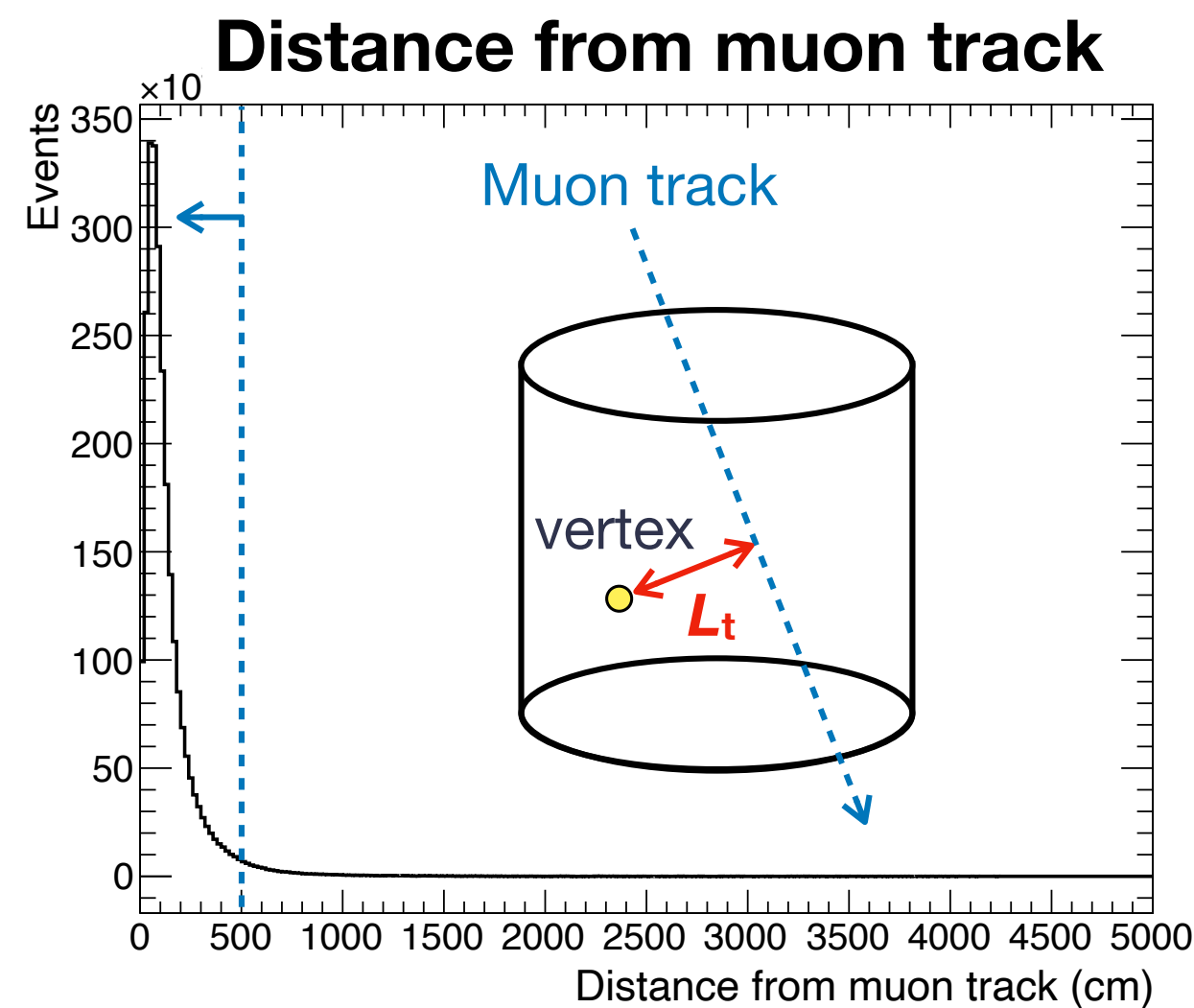
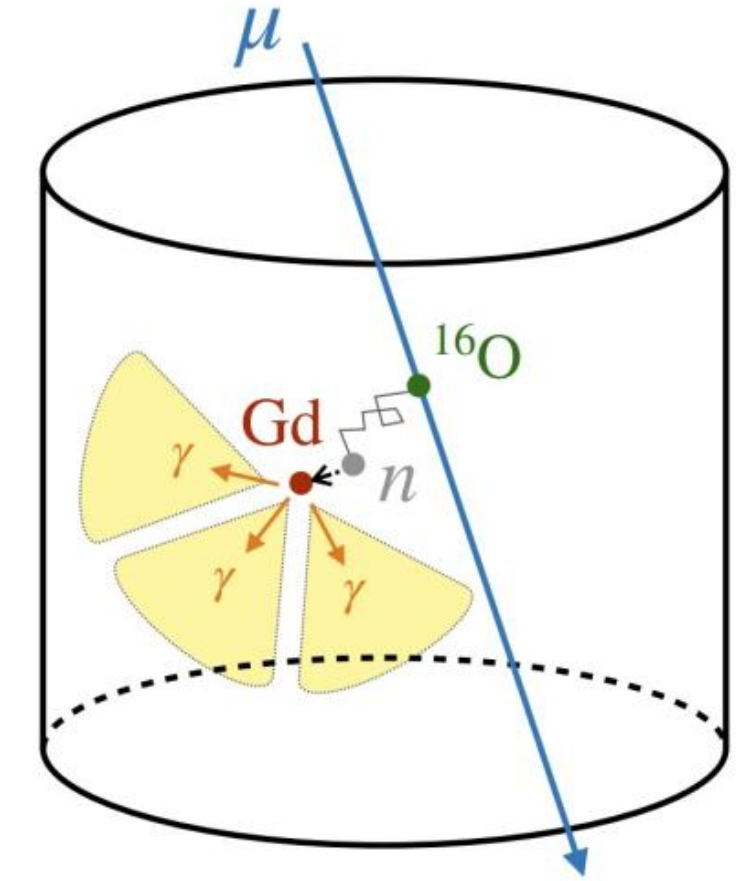
Solid lines = normal neutrino mass hierarchy
Dashed lines = inverted neutrino mass hierarchy.
Baseline model (15 M_⊙ and 25 M_⊙) = Odrzywolek & Heger 2010
Alternative model (15 M_⊙ only) = Patton et al. 2017
The bands reflect variations in Japanese nuclear power reactor activity.

Cosmogenic neutron yield

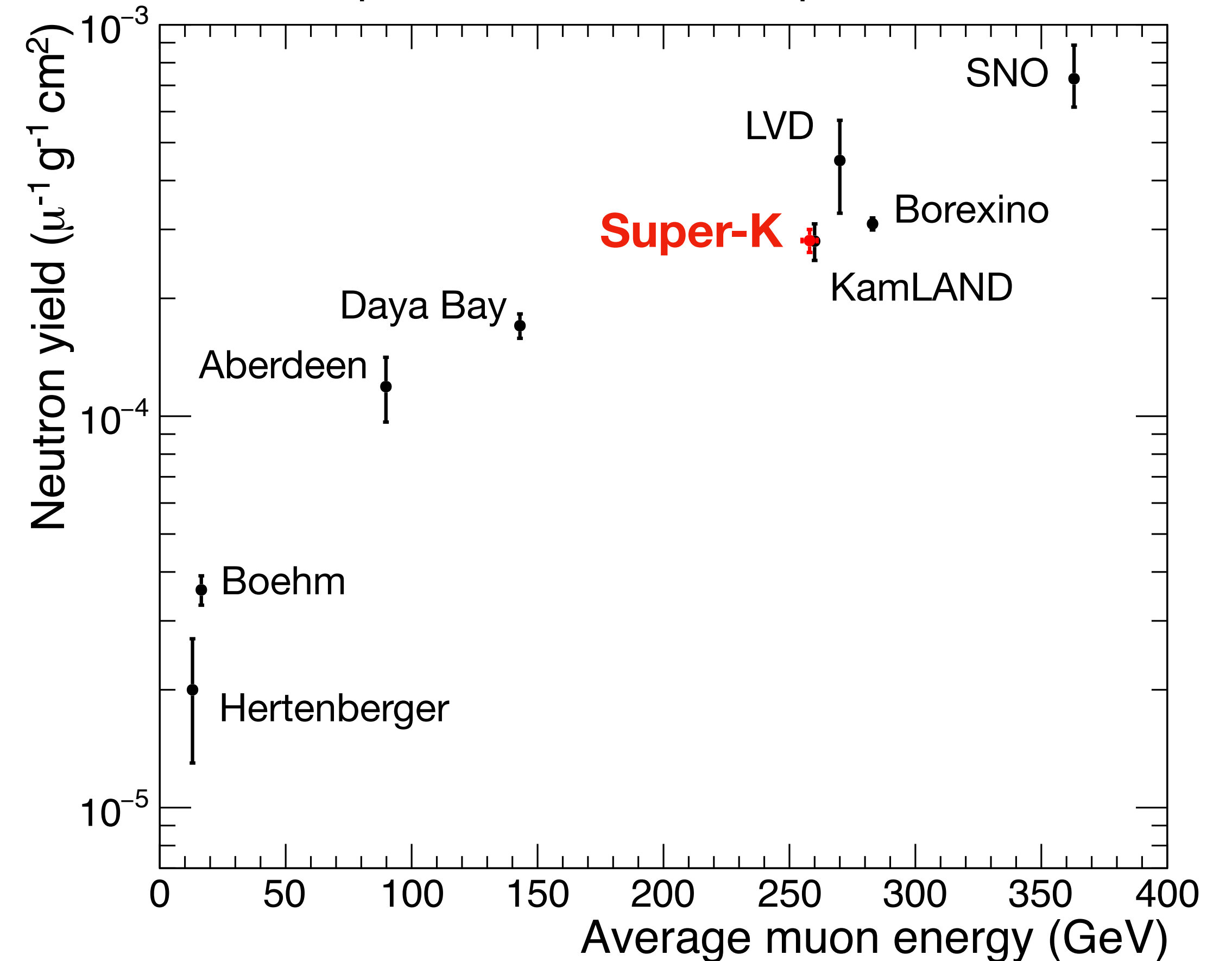
- Gdに捕獲された中性子を用いて、宇宙線の核破砕により生成された中性子数を測定

$$Y_n = (2.81 \pm 0.06 \text{ (stat.)} \pm 0.18 \text{ (syst.)}) \times 10^{-4} \mu^{-1} \text{g}^{-1} \text{cm}^2$$

- SK-Gdで最初の物理結果
- [arXiv: 2212.10801](https://arxiv.org/abs/2212.10801)



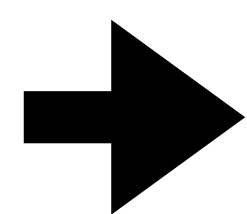
Comparison with other experiments



同期ニュートリノ探索：GRB 221009A

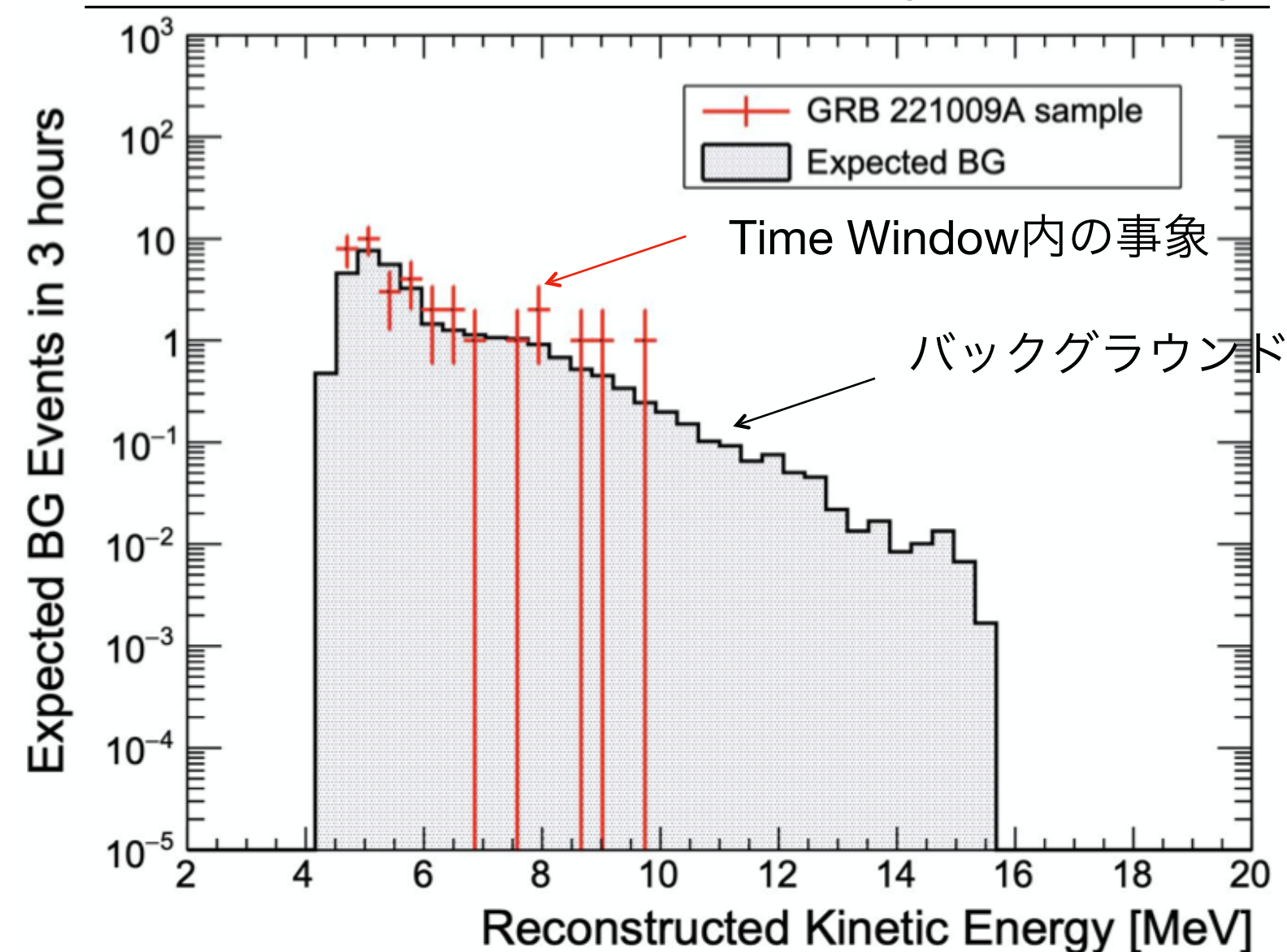
- ▶ GRB 221009A
 - 最も明るいガンマ線バースト
 - LHASSOによるTeVガンマ線検出の報告
- ▶ SKによる同期ニュートリノ事象探索
 - 3つの時間幅で探索

- $-500 \text{ s} < t < +500 \text{ s}$
- $-1 \text{ hours} < t < +2 \text{ hours}$
- $-1 \text{ day} < t < +1 \text{ day}$

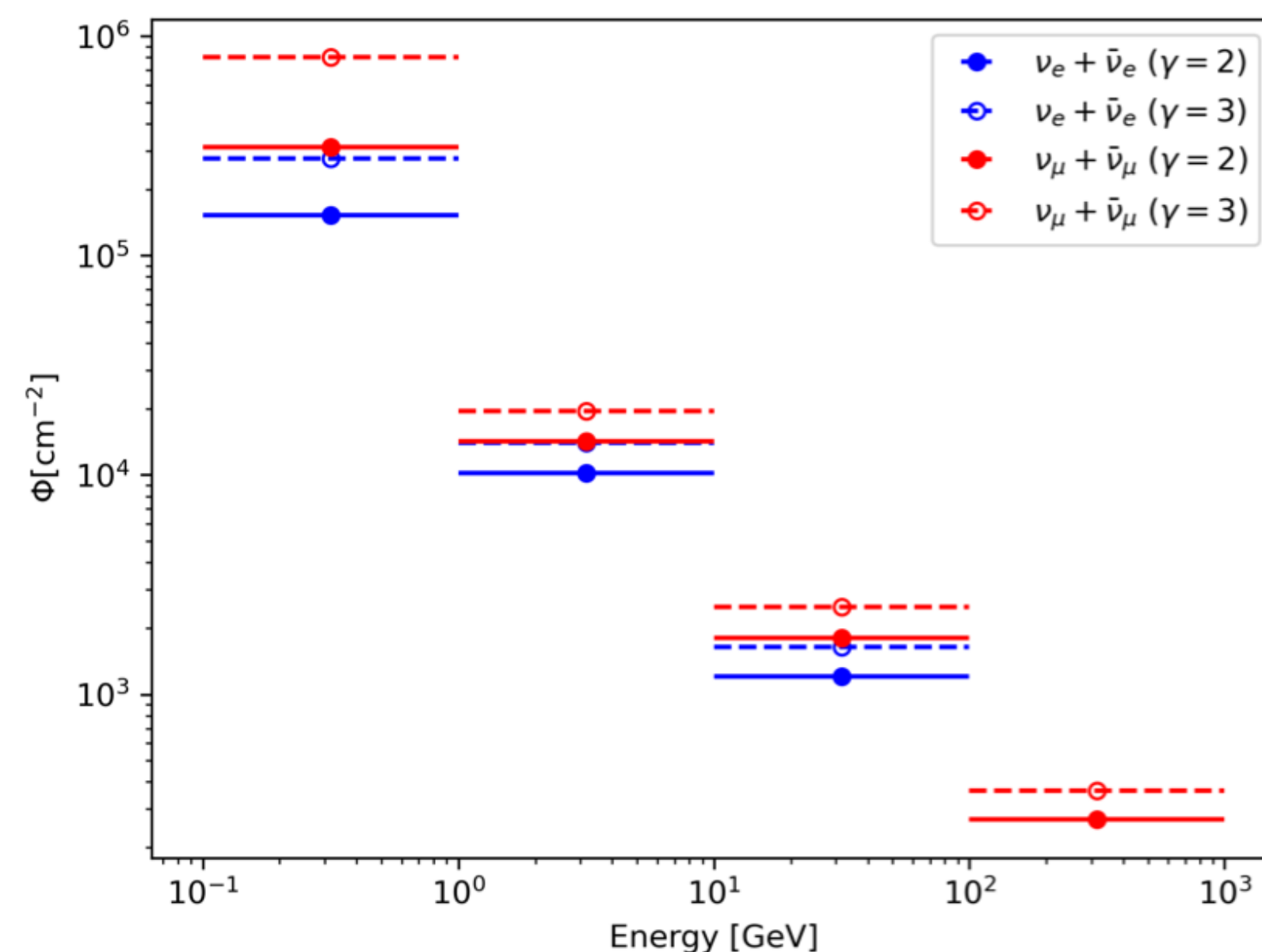


どの場合でもバックグラウンドに対して優位なシグナルは検出できなかった。

低エネルギーサンプルの探索結果 (-1h < t < +2h)



高エネルギーニュートリノフルエンス上限値 (-1h < t < +2h)



まとめ

- スーパーカミオカンデは、Gdを導入し新たな観測を開始
 - 2020年: 0.01%までGdを溶解 (~50% Gd capture efficiency)
 - 2022年: 0.03%までGdを溶解 (~75% Gd capture efficiency)
- DSNBの世界初観測を目指す
- 太陽ニュートリノ観測も継続中
- 今年度の物理結果:
 - 宇宙線による核破碎中性子数の測定 (arXiv:2212.10801)
 - GRB 221009Aの同期ニュートリノ探索
 - SK-VIのDSNB探索結果も間もなく発表します

