

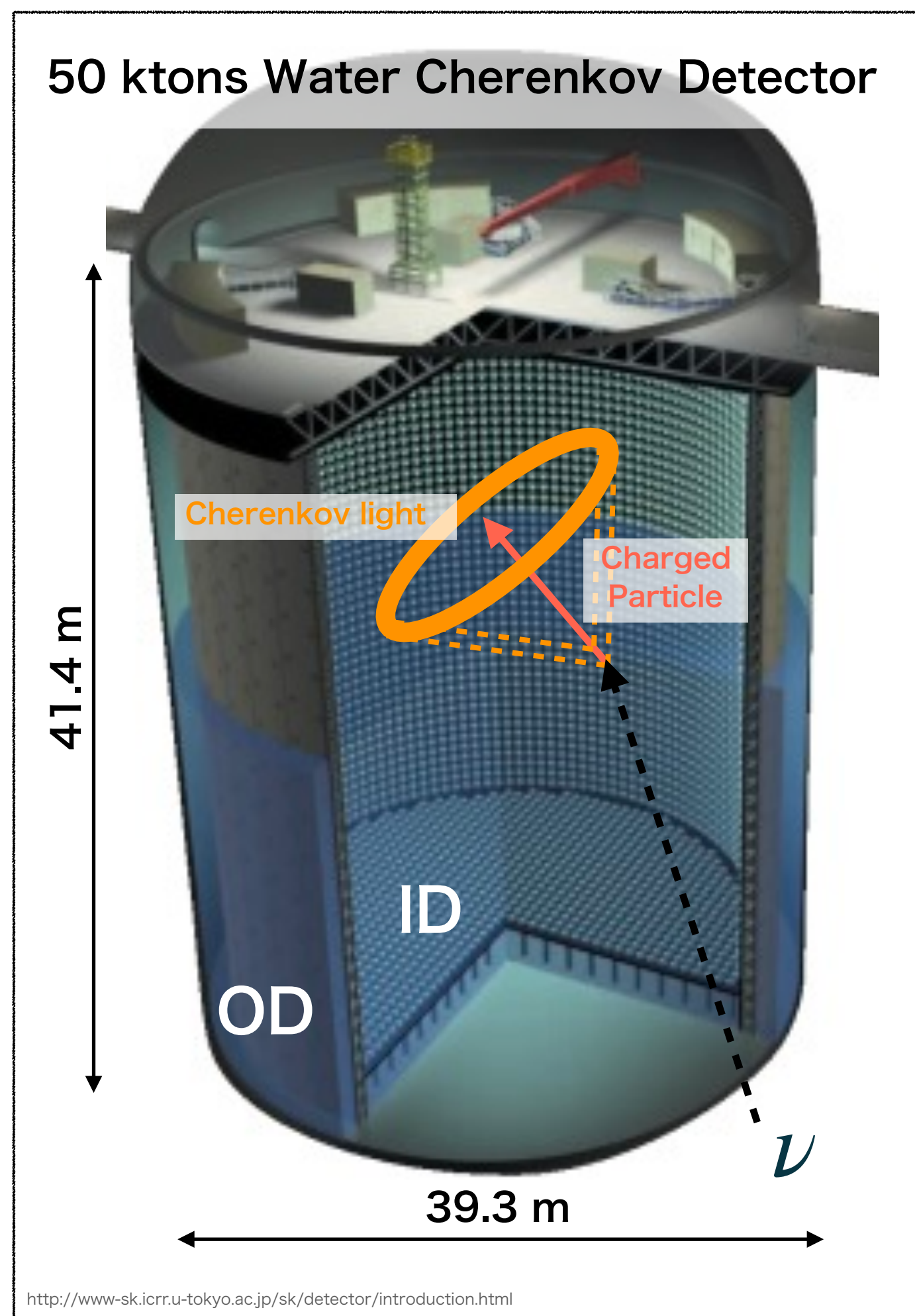
スーパーカミオカンデ

— SK-Gdによる超新星ニュートリノ探索、太陽ニュートリノ —

原田 将之 (岡山大学 大学院環境生命自然科学研究科)

東京大学宇宙線研究所 令和5年度共同利用研究成果発表会

スーパーカミオカンデ検出器



- 50 ktonの超純水ベースの水チェレンコフ型検出器
 - 岐阜県神岡鉱山地下1000 m (~2700 m.w.e.)
 - ~11,000本の50 cm PMT (ID) を使ってニュートリノ観測
 - ~2,000本の20 cm PMT (OD)でミュオンのVETO
- ~3.5MeV - 数TeV領域までのエネルギー感度
→ **様々な物理ターゲットを持つ多目的検出器**
 - 太陽ニュートリノ
 - 超新星ニュートリノ
 - 核子崩壊探索
 - 加速器・大気ニュートリノ

スーパーカミオカンデ



- 合計で7つの実験フェーズ
 - 2008年より中性子の遅延計測が可能に
 - 2020年よりGdを導入した観測を開始→中性子同定の高効率化
- 中性子を伴う物理の詳細観測のフェーズへ

1996



2002



2006



2008



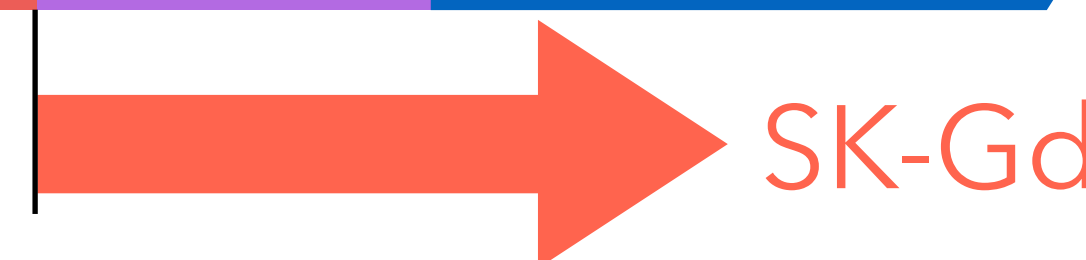
2019



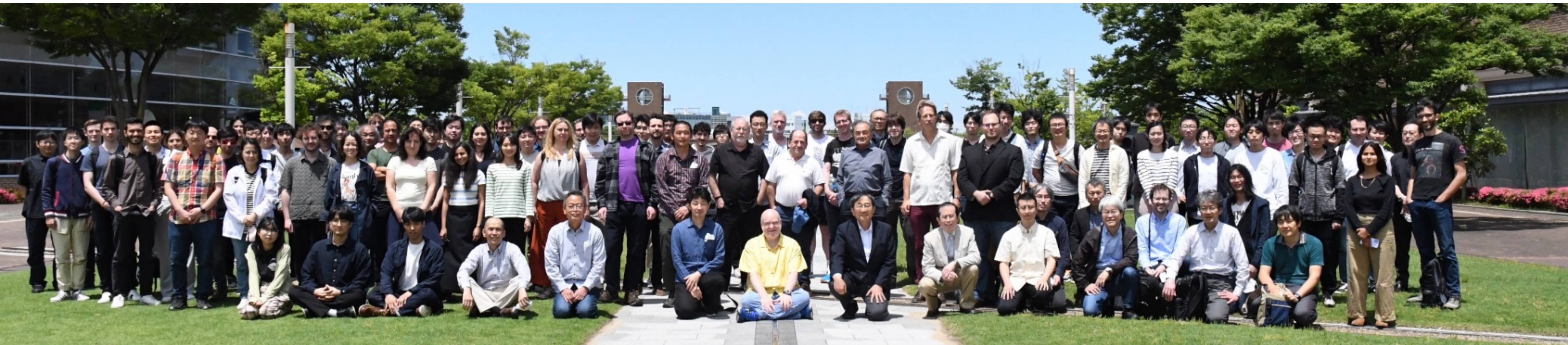
2020



2022



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

Gifu University, Japan
 GIST, Korea
 University of Glasgow, UK
 University of Hawaii, USA
 IBS, Korea
 IFIRSE, Vietnam
 Imperial College London, UK
 ILANCE, France/Japan
 INFN Bari, Italy

NFN 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
 University of Minnesota, USA
 Miyagi University of Education, Japan
 ISEE, Nagoya University, Japan
 NCBJ, Poland
 Nihon University, Japan
 Okayama University, Japan
 Osaka Electro-Communication Univ., Japan

University of Oxford, UK
 Rutherford Appleton Laboratory, UK
 Seoul National University, Korea
 University of Sheffield, UK
 Shizuoka University of Welfare, Japan
 University of Silesia in Katowice, Poland
 Sungkyunkwan University, Korea
 Stony Brook University, USA
 Tohoku University, Japan

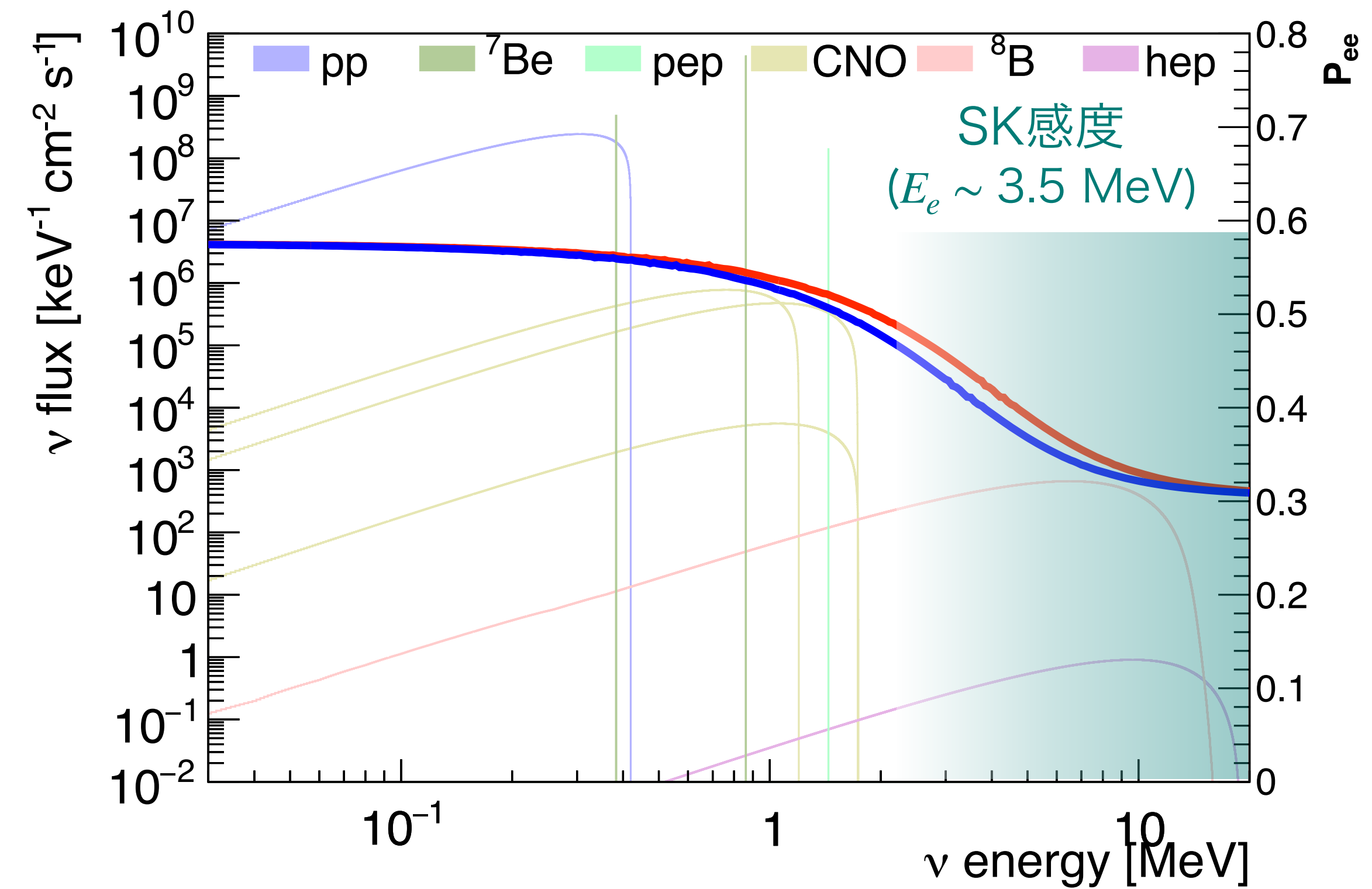
Tokai University, Japan
 The University of Tokyo, Japan
 Tokyo Institute of Technology, Japan
 Tokyo University of Science, Japan
 TRIUMF, Canada
 Tsinghua University, China
 University of Warsaw, Poland
 Warwick University, UK
 The University of Winnipeg, Canada
 Yokohama National University, Japan

~230 collaborators from 55 institutes in 11 countries

太陽ニュートリノ

- 太陽内核融合反応で生成されるニュートリノ
 - SKでは ${}^8\text{B}$, Hepニュートリノに感度
- 太陽・地球内での物質効果により電子ニュートリノの生存確率(P_{ee})が変化
 - 昼夜非対称性
 - 数MeV領域で生存確率の遷移

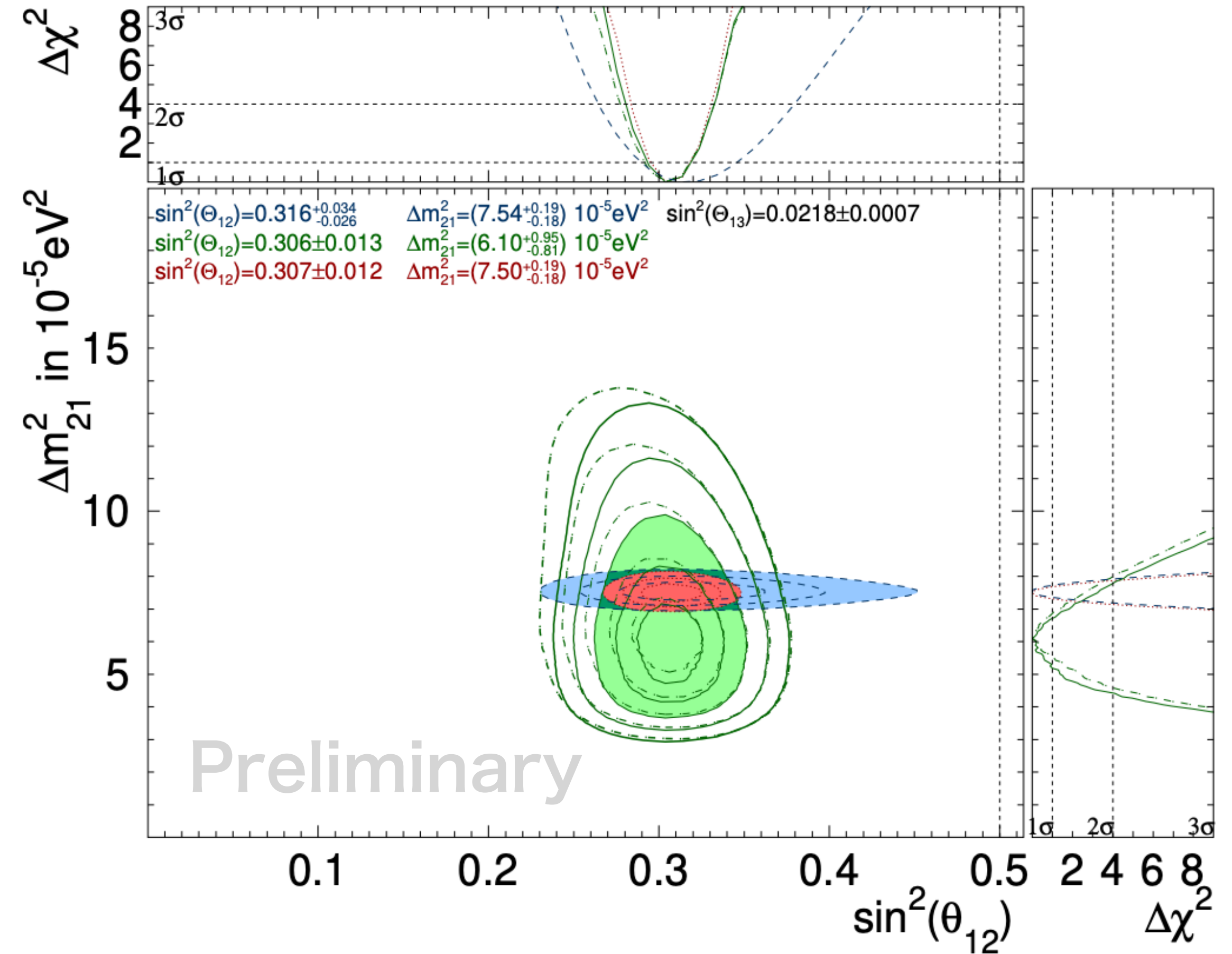
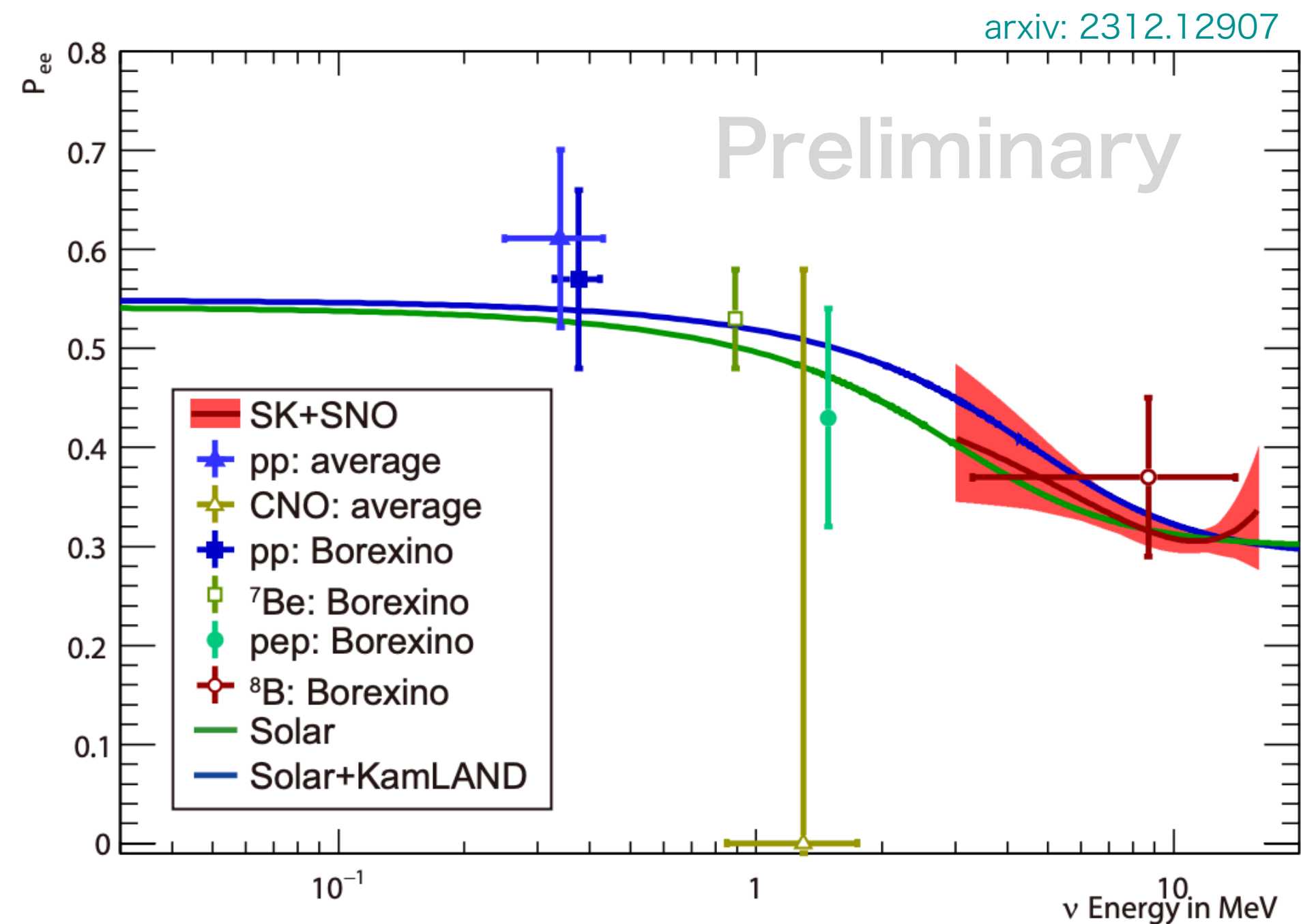
➡ ニュートリノ振動パラメータ θ_{12} , Δm_{12}^2 の測定
新物理探索



純水期の太陽ニュートリノ観測結果

- 2018年までの5805日の最新結果
 - スペクトルの遷移：1.2 σ でupturnの存在を支持
 - 昼夜非対称性：3.2 σ で非対称を支持
 - Δm_{21}^2 : KamLANDのBest fitと1.5 σ の差異

arxiv: 2312.12907



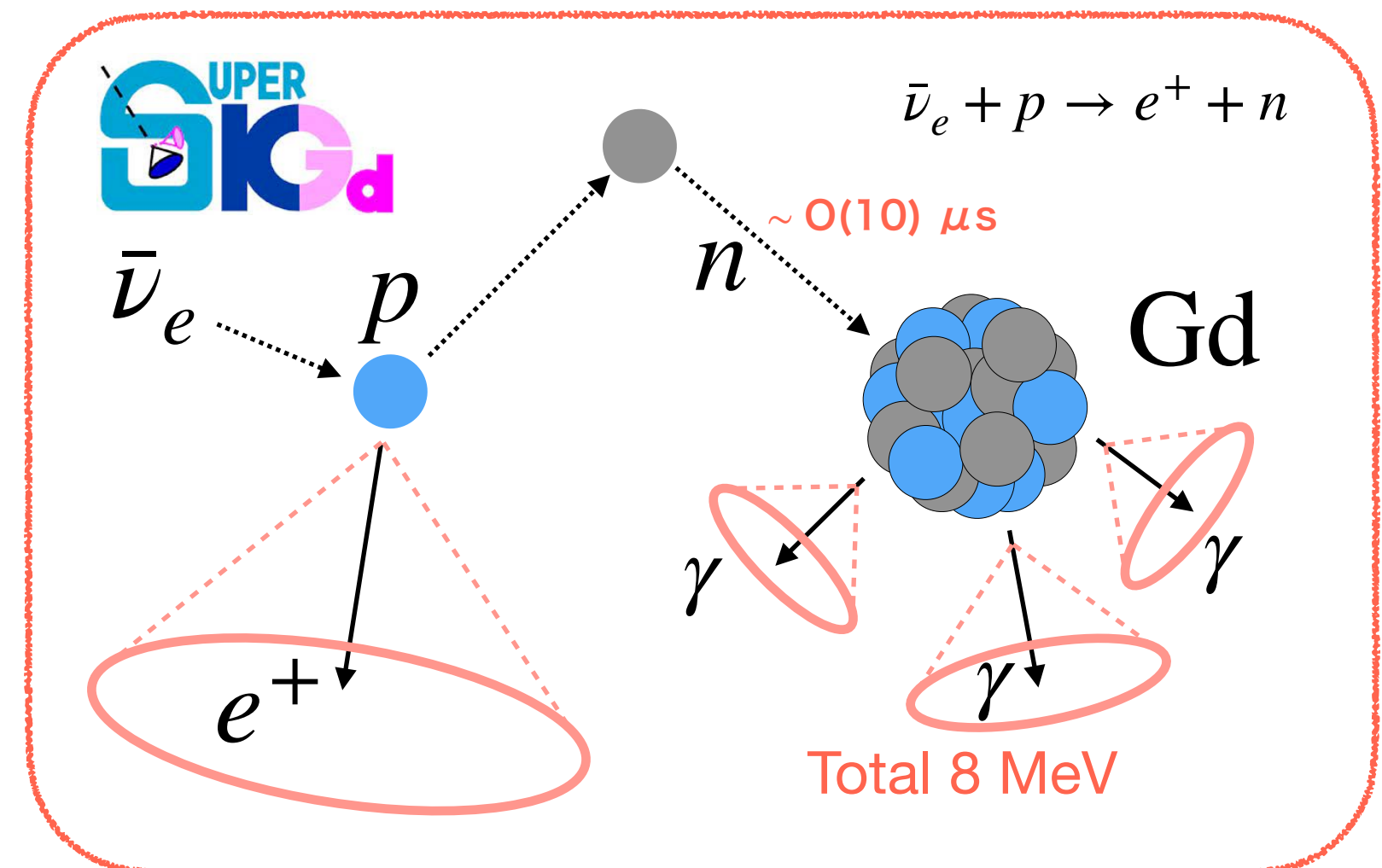
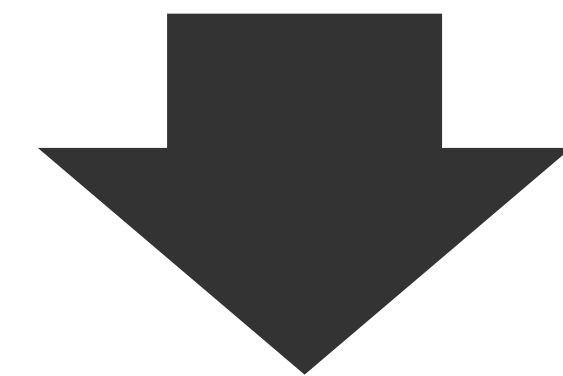
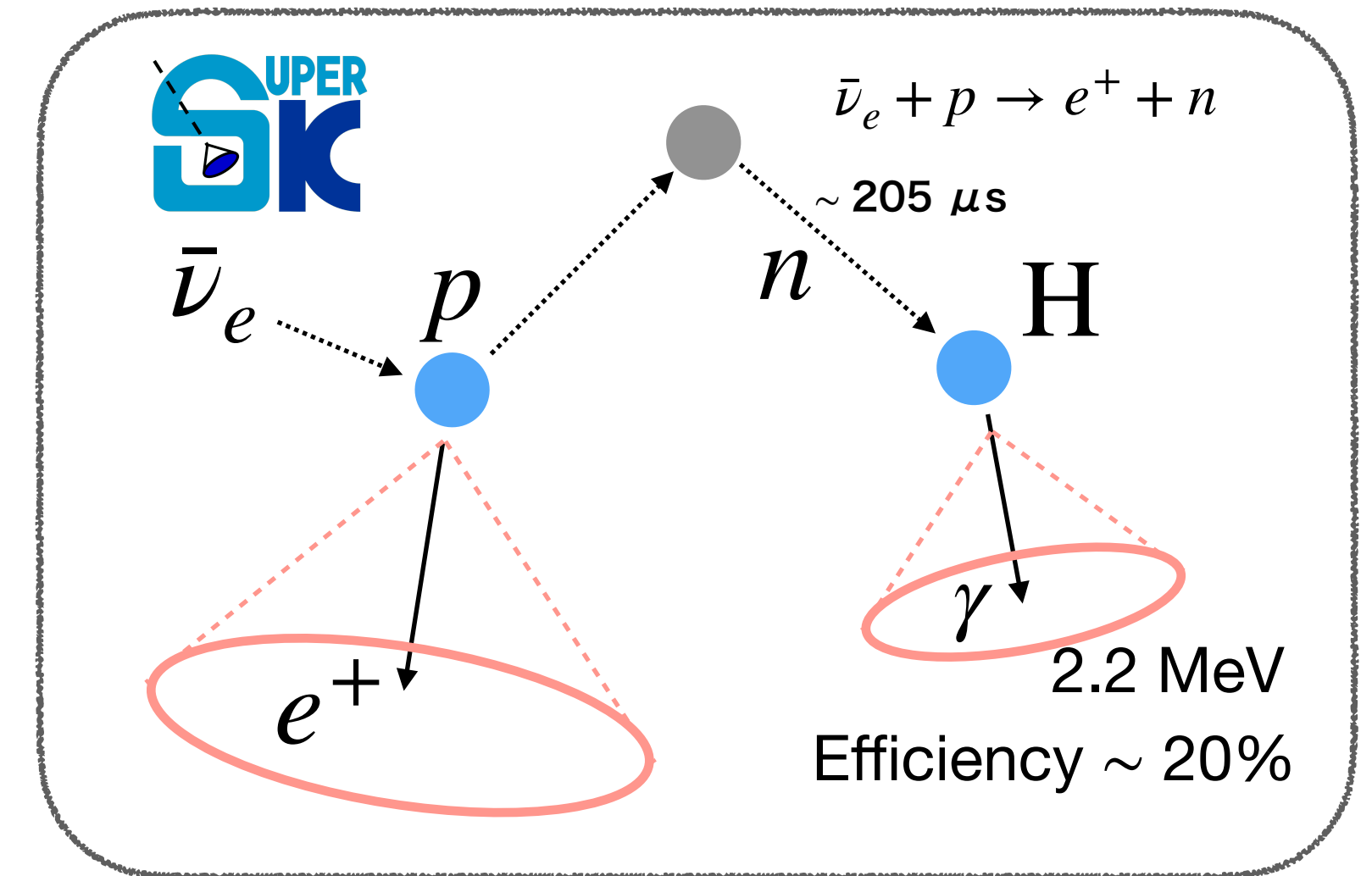
SK-Gd実験

SK-Gd実験：

Gdを超純水に導入することで中性子同定効率を飛躍的に向上

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

- 超新星背景ニュートリノ (SRN) の初観測を目指す
- 他にも多くの物理ターゲット
 - 超新星ニュートリノから爆発方向決定精度の向上
 - 超新星前兆ニュートリノ観測
 - 大気・加速器ニュートリノ相互作用の理解・精度向上など。



SK-Gd実験

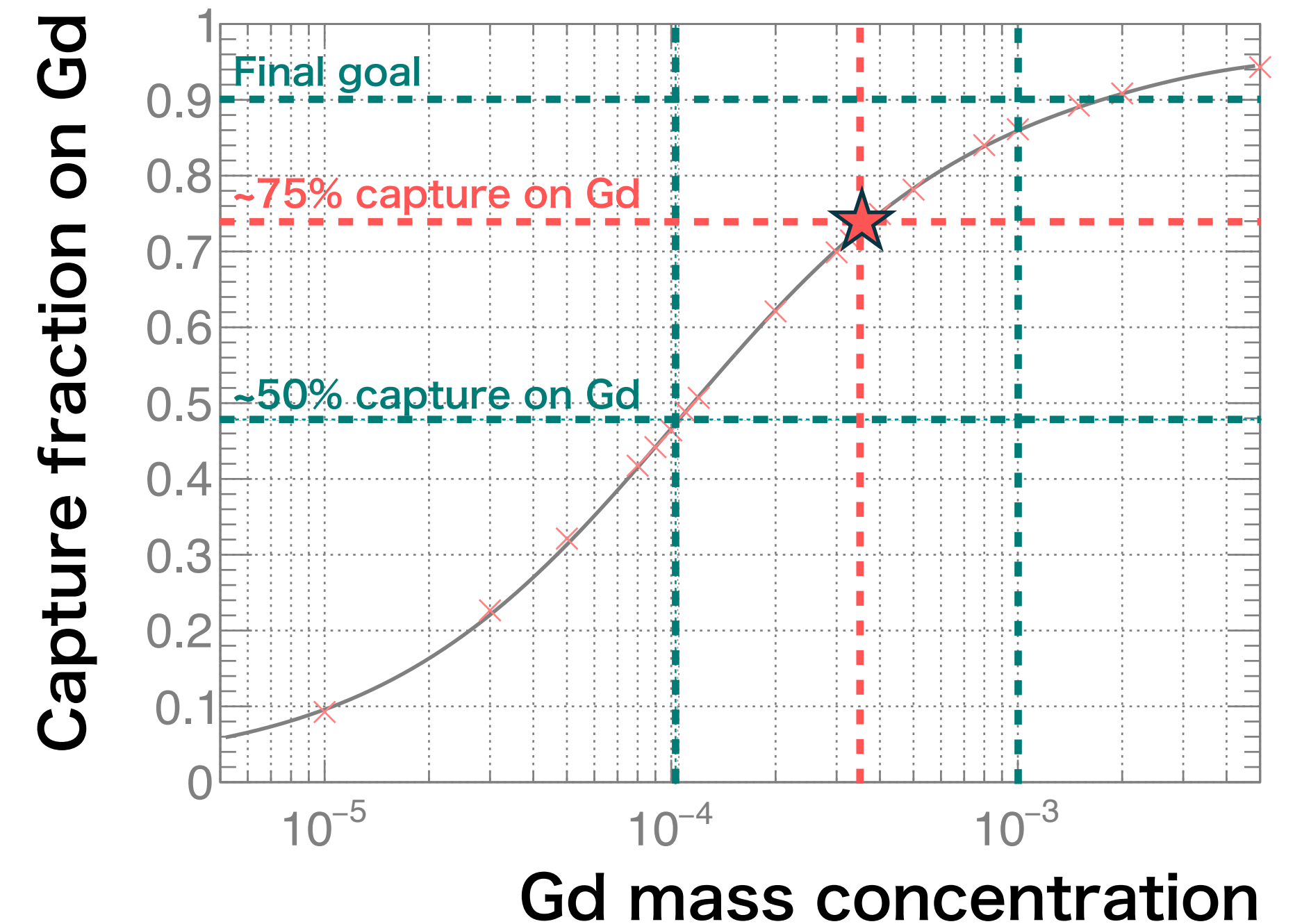
SK-Gd実験：

Gdを超純水に導入することで中性子同定効率を飛躍的向上

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

- 超新星背景ニュートリノ (SRN) の初観測を目指す
- 他にも多くの物理ターゲット
 - 超新星ニュートリノから爆発方向決定精度の向上
 - 超新星前兆ニュートリノ観測
 - 大気・加速器ニュートリノ相互作用の理解・精度向上など。

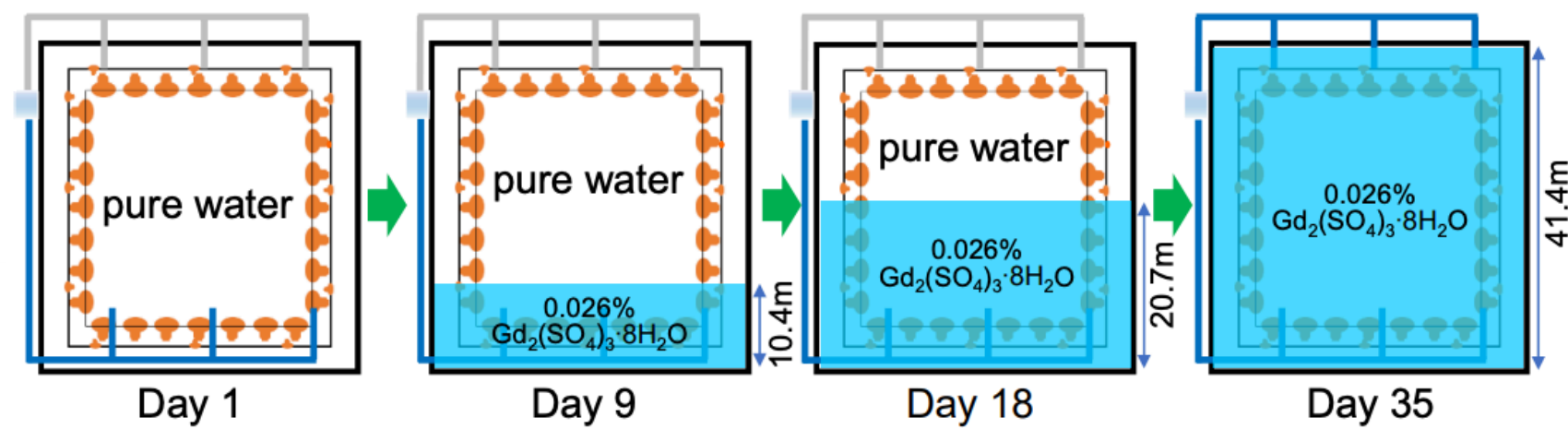
- 2020-2022年 (SK-VI) : Gd質量濃度0.01%観測→完了 ✓
- 2022年- (SK-VII) : Gd質量濃度0.03%観測→on-going



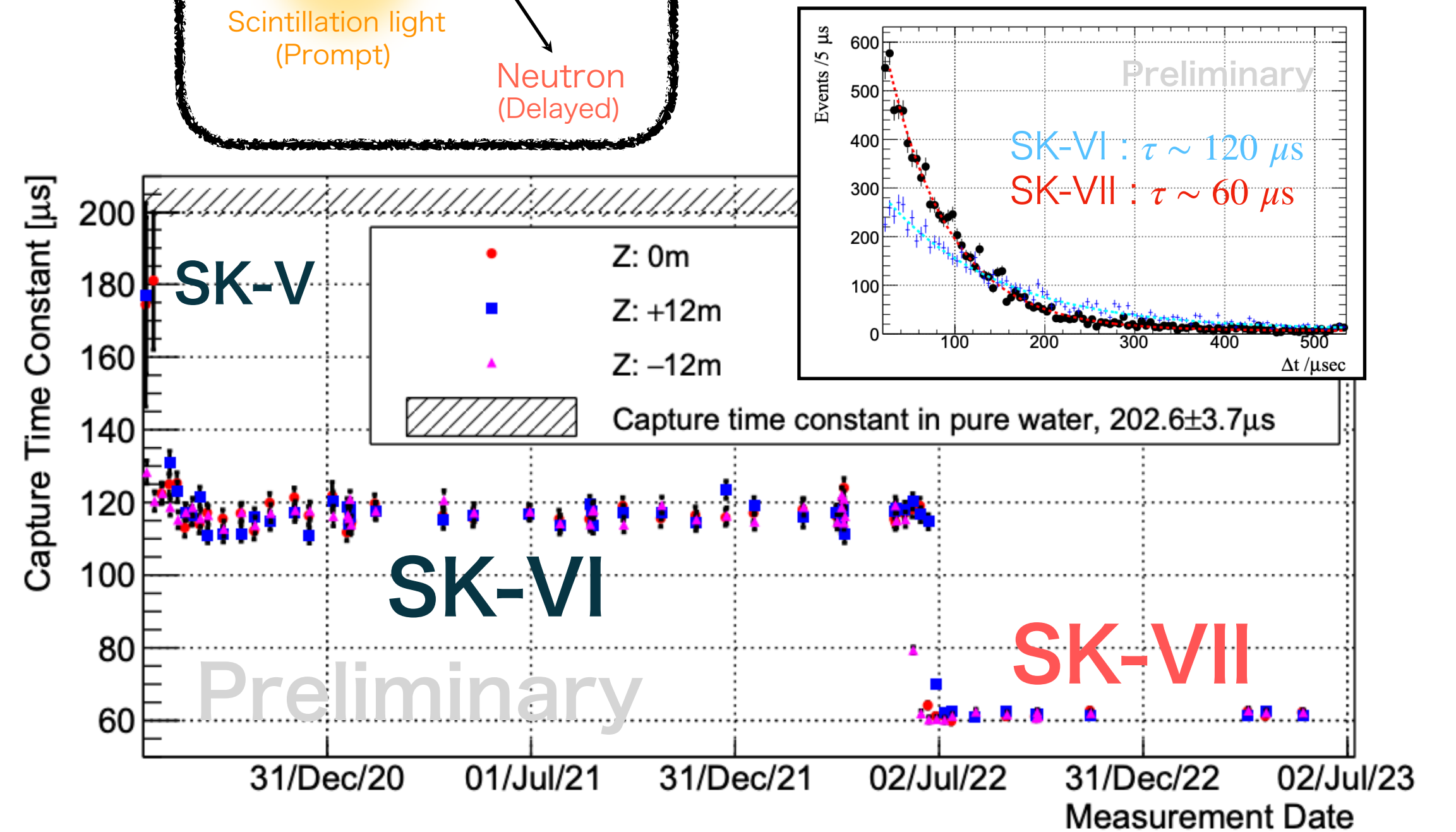
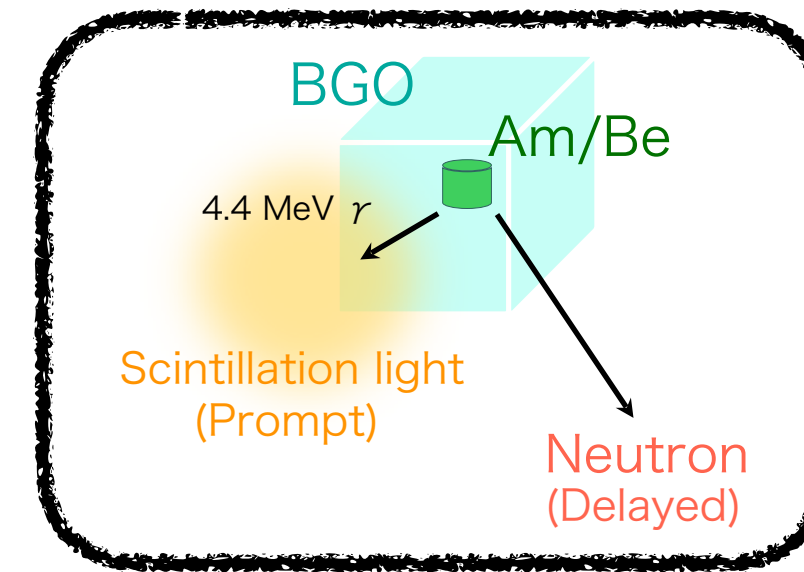
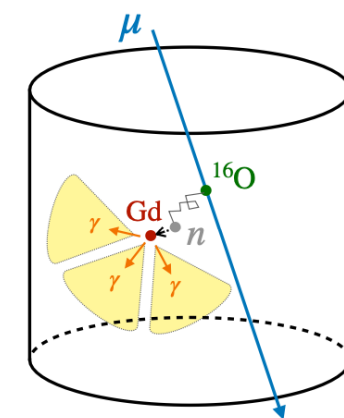
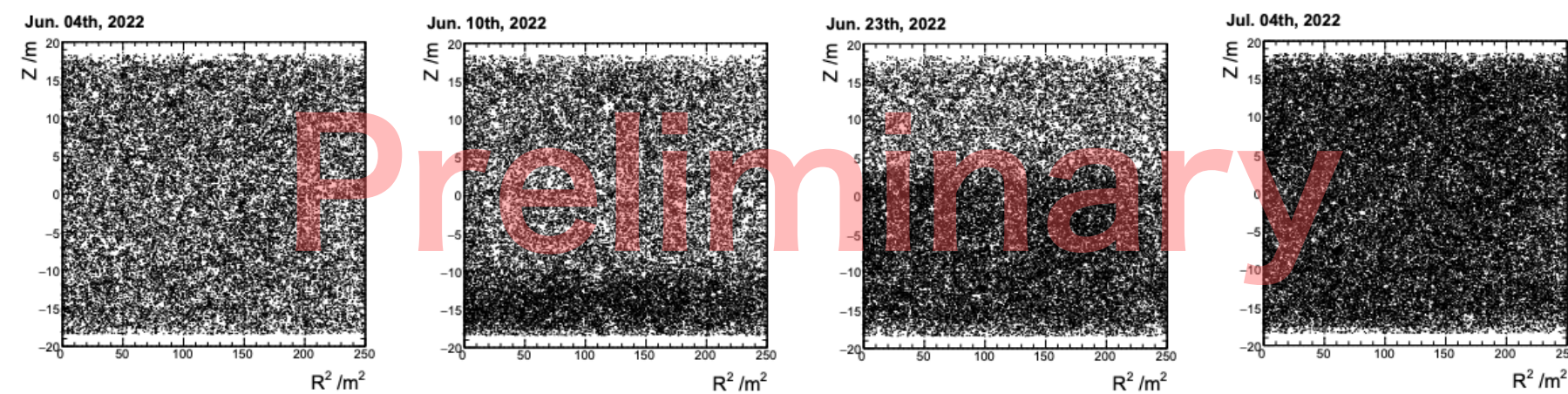
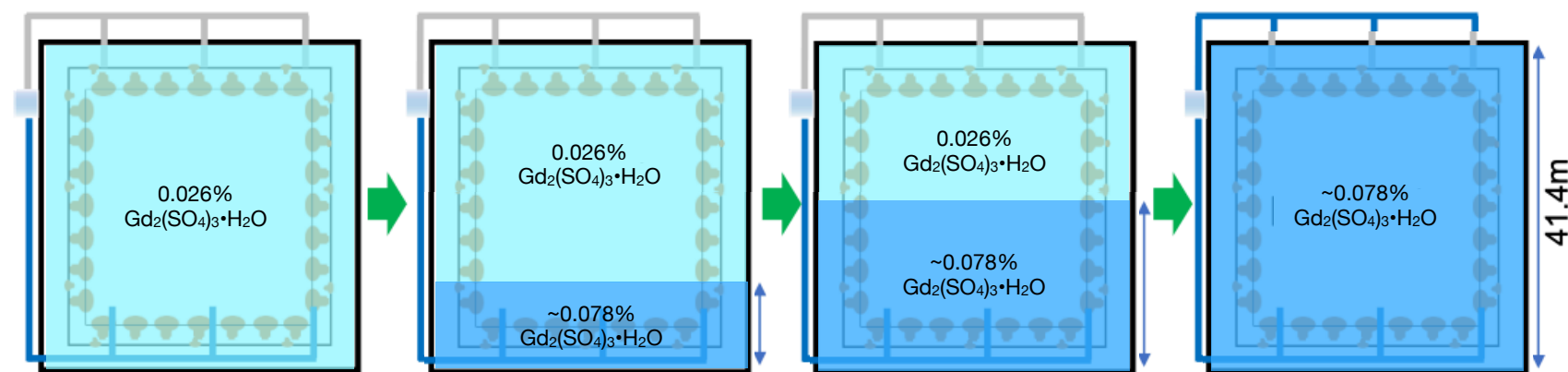
Gd loading

- 二度のGd導入

- 2020年 : First loading to 0.01%
Nucl. Inst. and Meth., A 1027 (2022) 166248



- 2022年 : Second loading to 0.03%
 - システム改善→同程度の期間で二倍のGd導入に成功



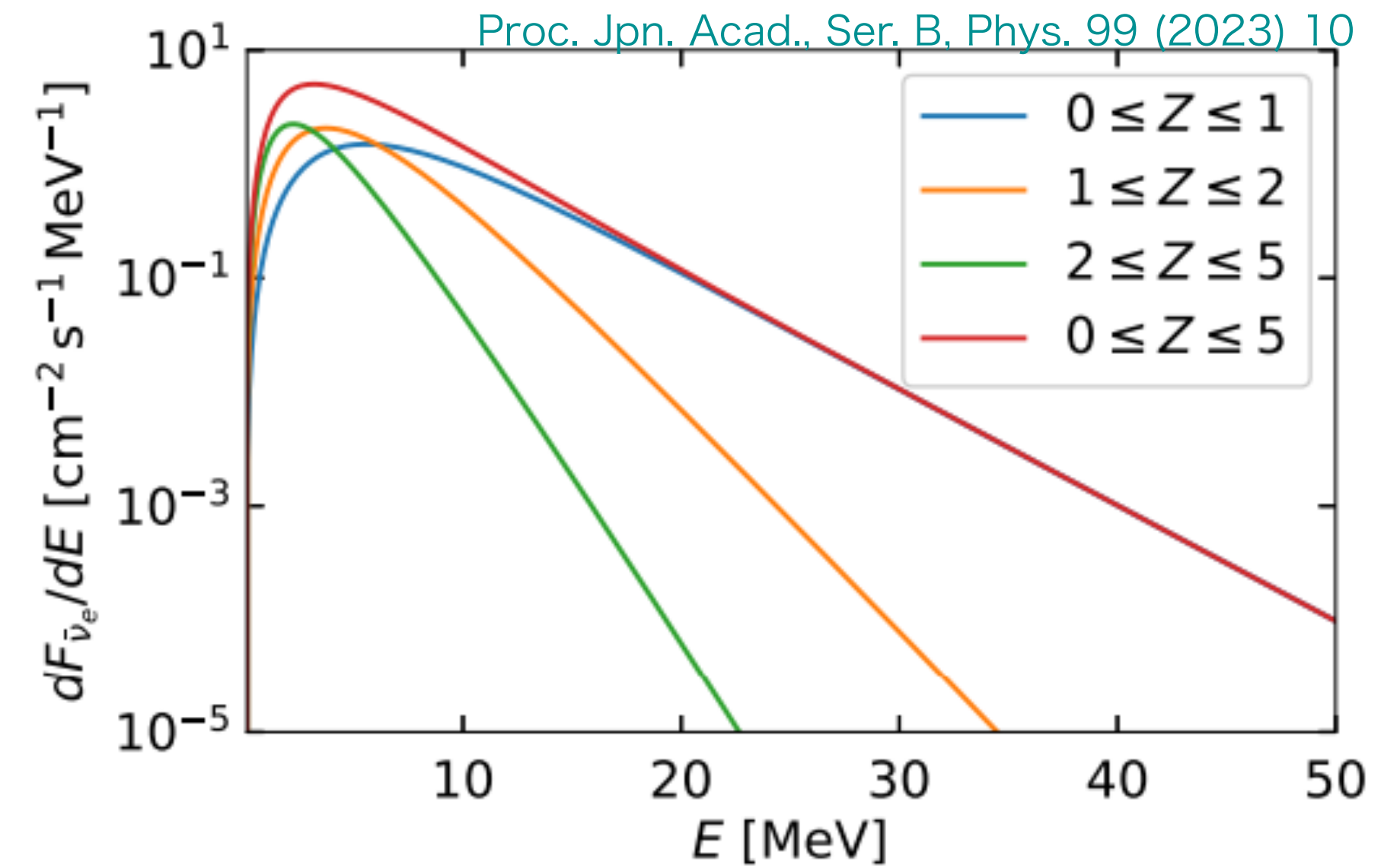
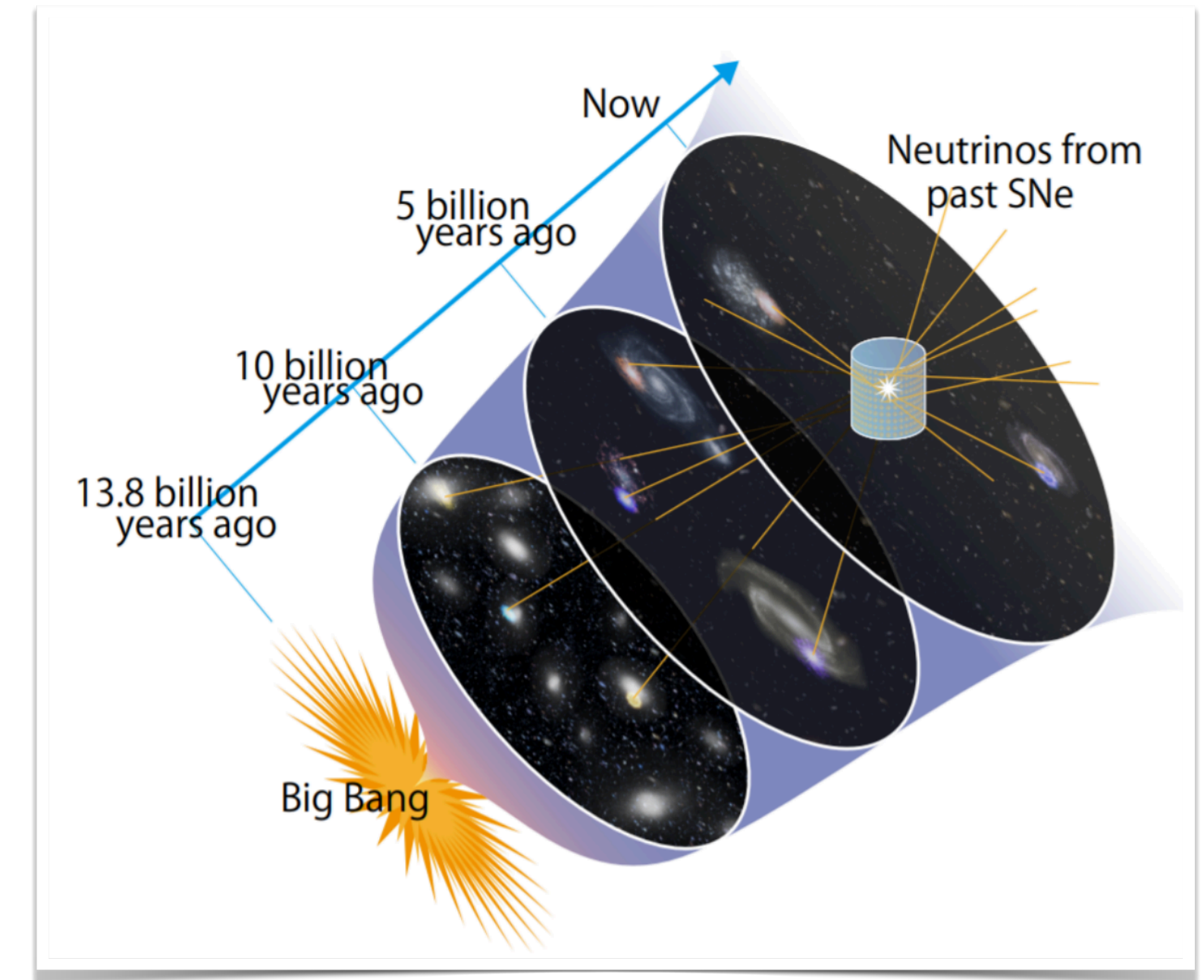
✓ イベントレート・時定数・中性子同定効率
でGd追加の効果測定！

超新星背景ニュートリノ (SRN)

- 過去の超新星爆発で生成され現在の宇宙を漂っている

$$\Phi_{\text{SRN}} \propto \int [\text{SNレート}] \otimes [\text{SN } \nu \text{フラックス}] \otimes [\text{赤方偏移}] dz$$

- 宇宙の星形成に関する情報をもつフラックス
 - 星形成率の時間変化
 - 超新星ニュートリノフラックス
 - ブラックホールになる超新星の割合
 - . . .



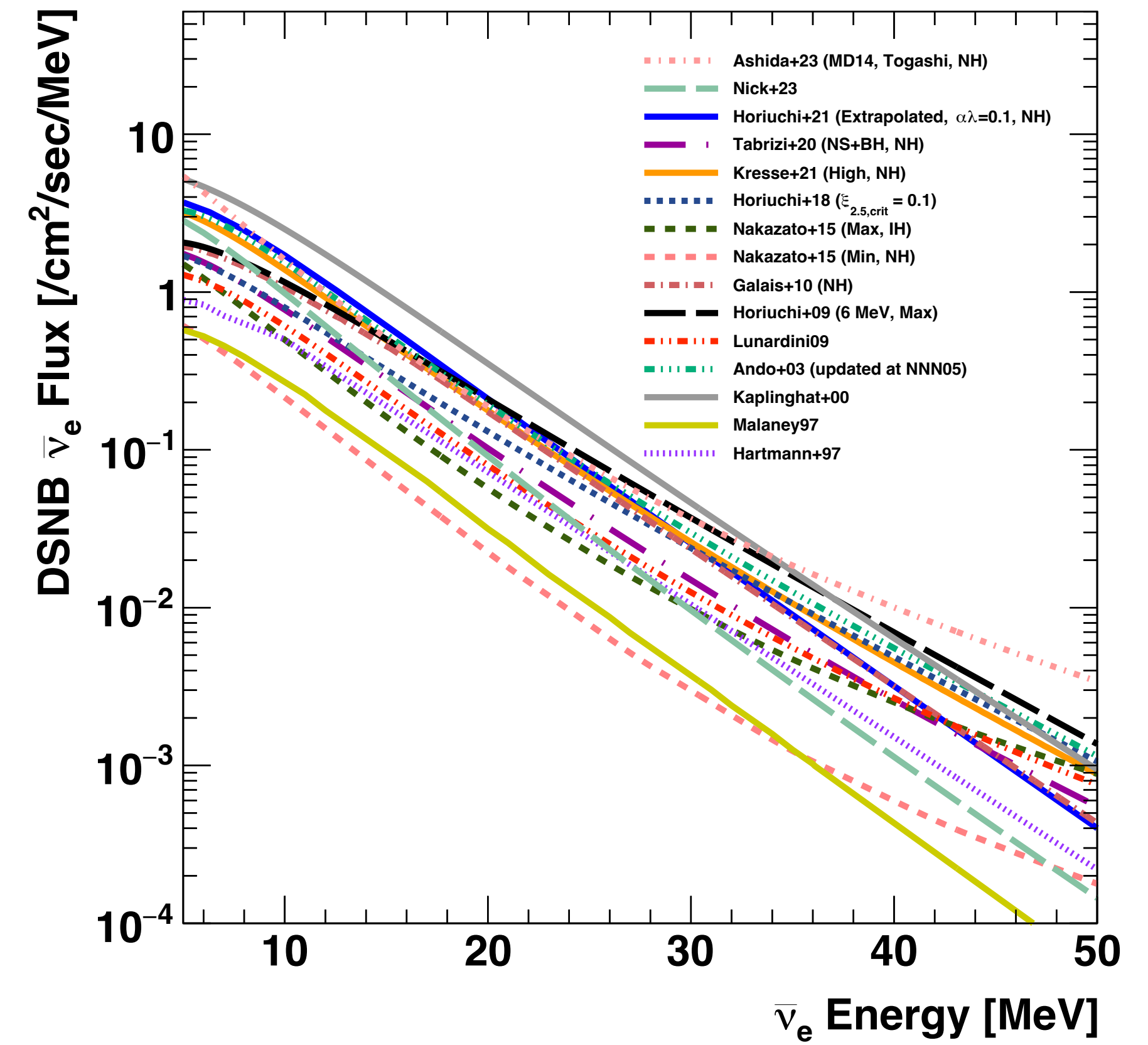
超新星背景ニュートリノ (SRN)

- 過去の超新星爆発で生成され現在の宇宙を漂っている

$$\Phi_{\text{SRN}} \propto \int [\text{SNレート}] \otimes [\text{SN } \nu \text{フラックス}] \otimes [\text{赤方偏移}] dz$$

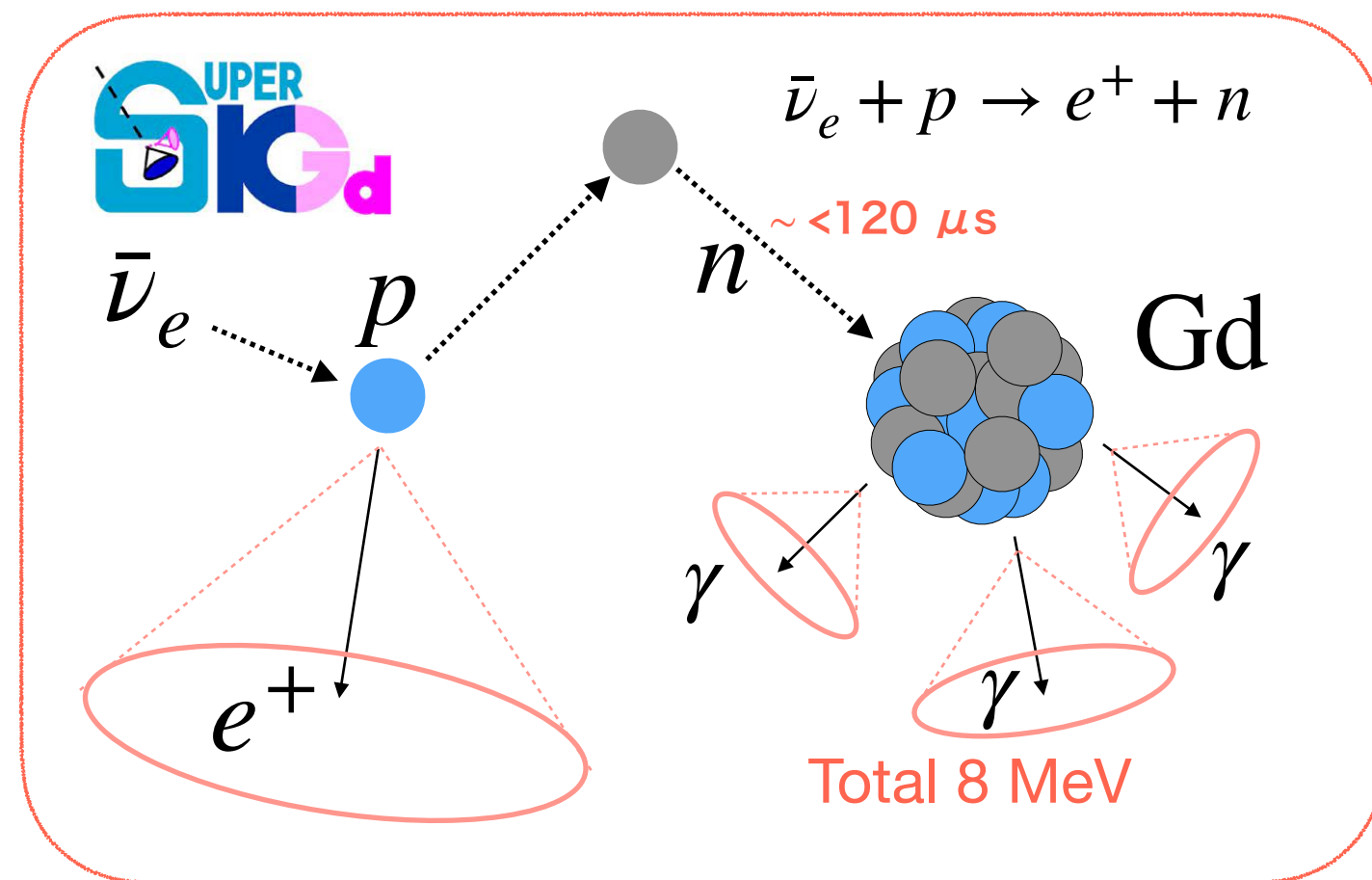
- 宇宙の星形成に関する情報をもつフラックス
 - 星形成率の時間変化
 - 超新星ニュートリノフラックス
 - ブラックホールになる超新星の割合
 - ○ ○ ○

➡ 観測・理論から成る多数のモデルがある

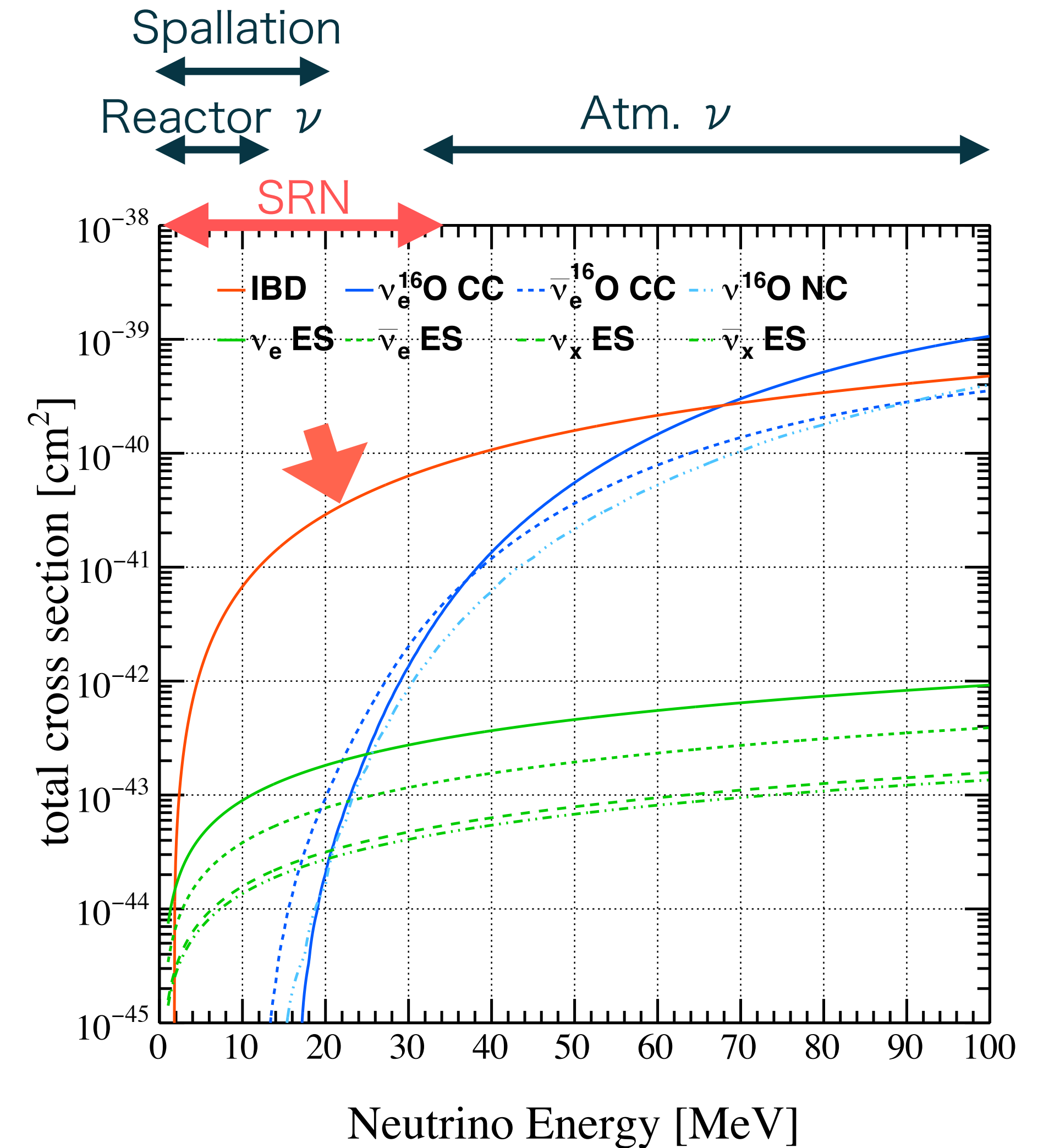


SK-Gd実験でのSRN信号

- SKでのSRN信号：Inverse-Beta decay
(IBD: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$)

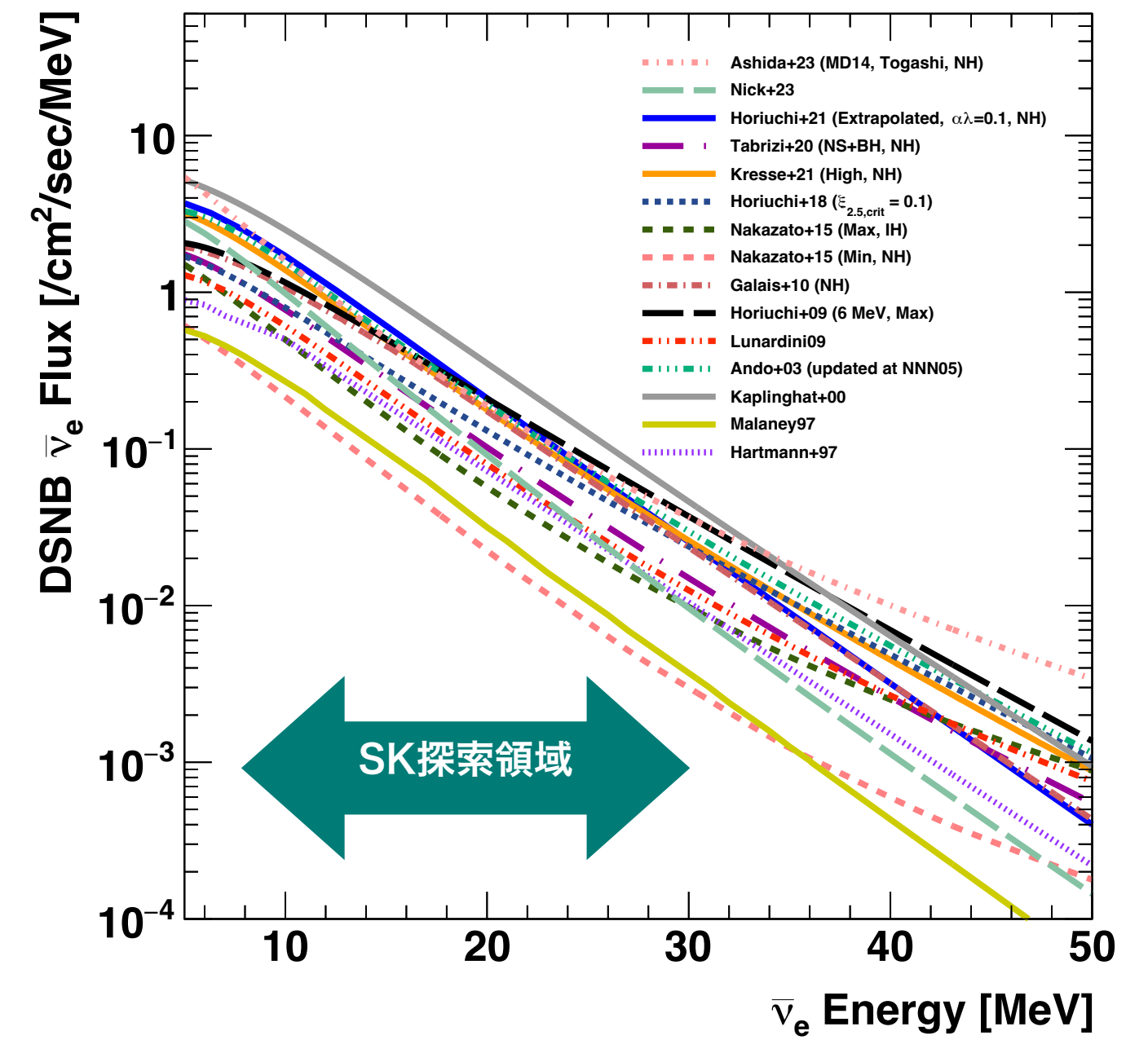


- バックグラウンド除去
 - 宇宙線ミュオンの原子核破砕
 - 大気ニュートリノ事象
 - 中性子タグを用いた遅延中性子数≠1事象



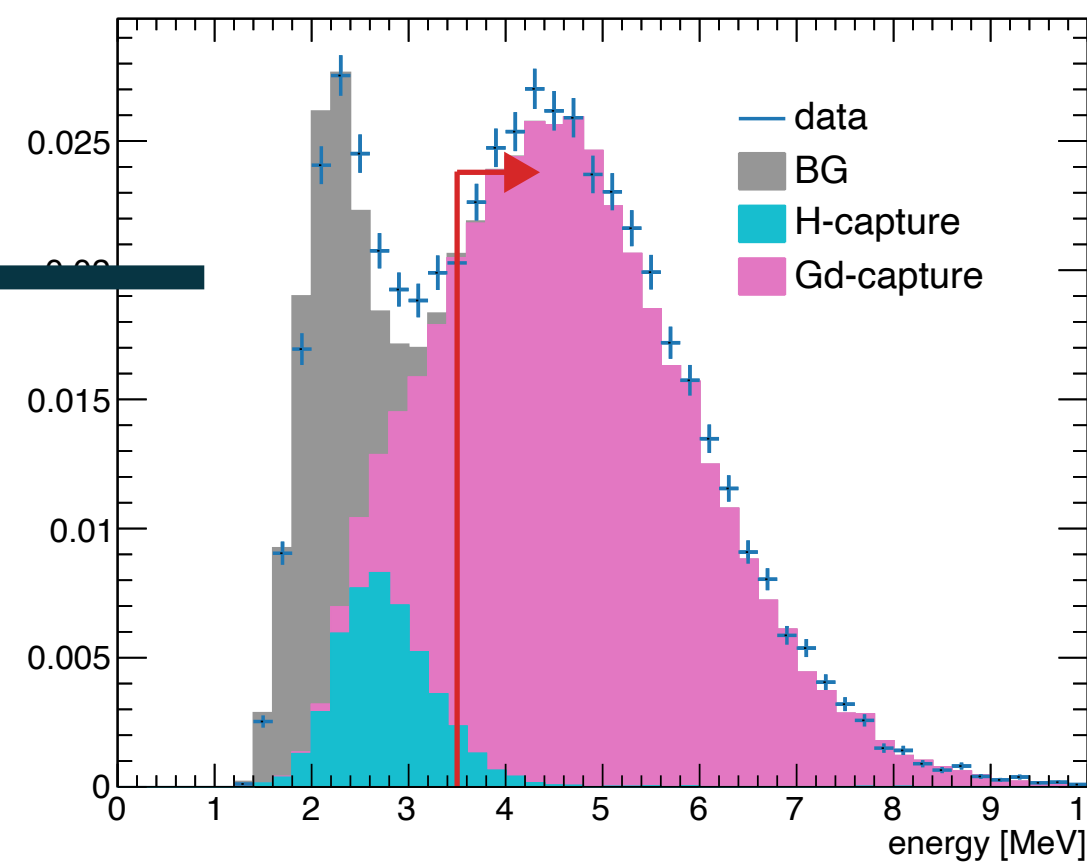
SK-Gd実験初期段階でのSRN探索

- Gd濃度0.011%での探索
 - 探索エネルギー： $7.5 < E_{\text{kin}}^{e^+} < 29.5$ MeV
 - Gd capture ratio 50%
 - Live time 552.2 day

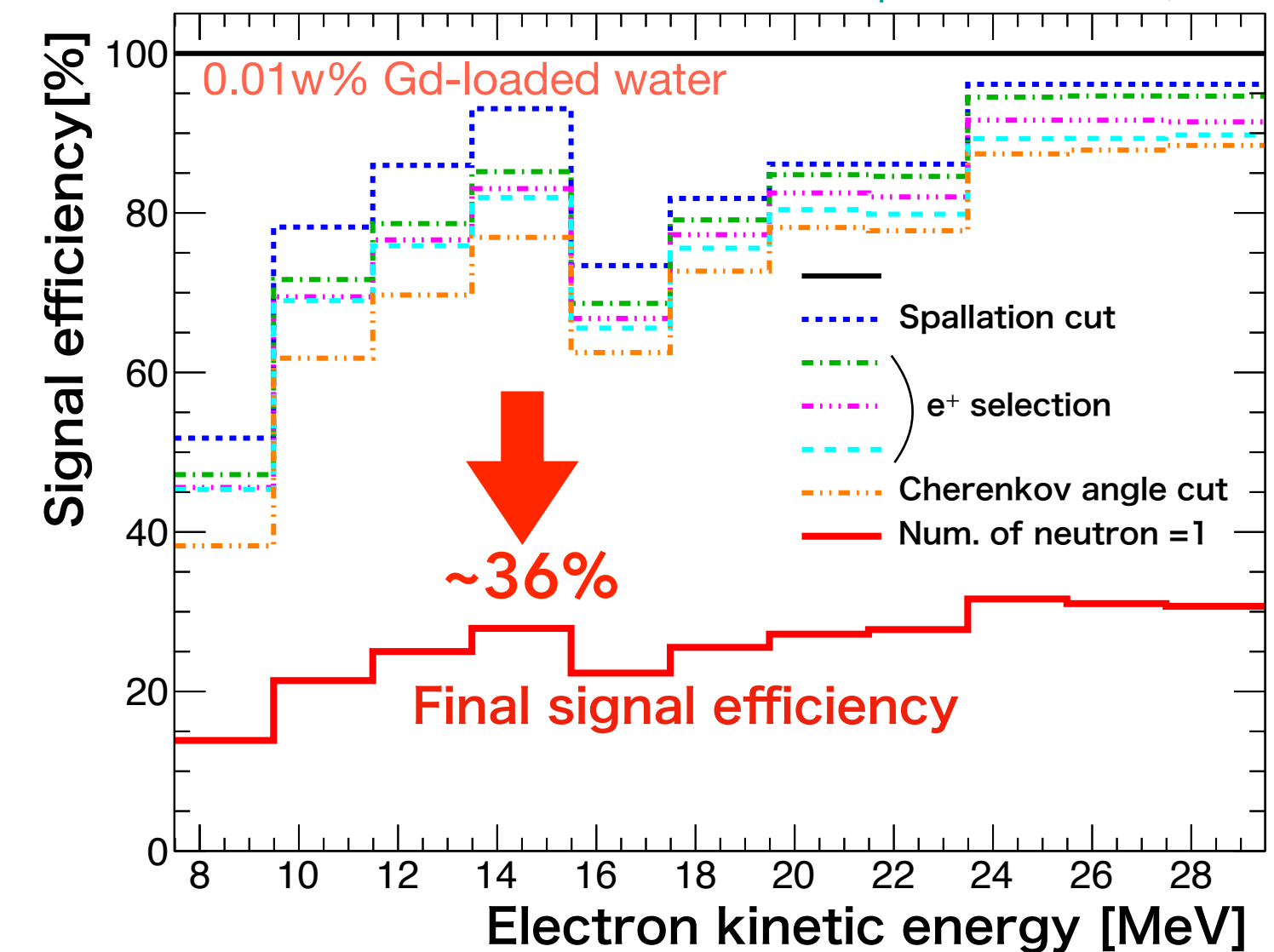


● Gd事象を使った中性子タグ

- [エネルギー] > 3.5 MeV
- [先発信号との距離] < 300 cm
- タグ効率 ~ 35.6%
- シグナル検出効率15-30%

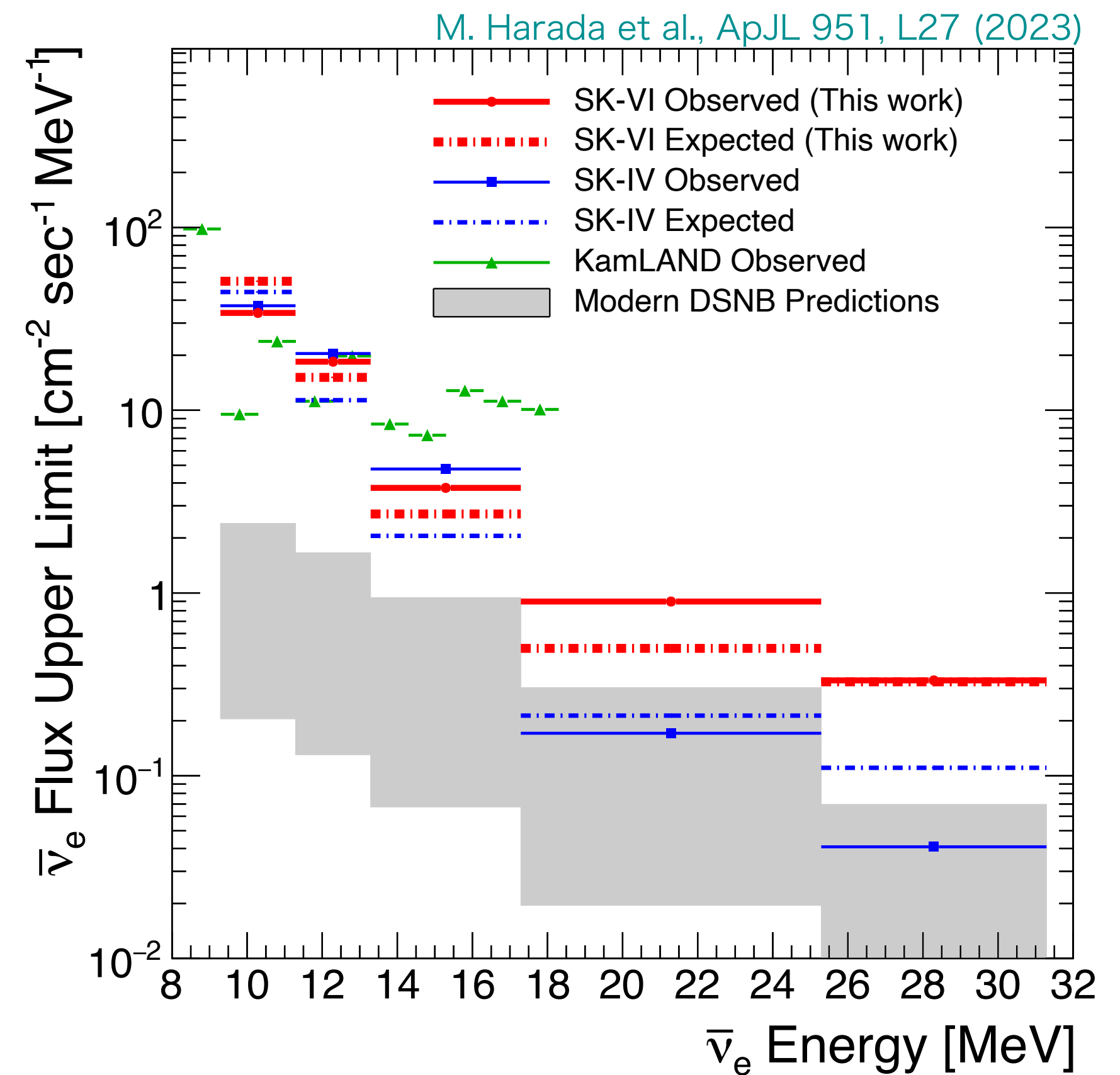
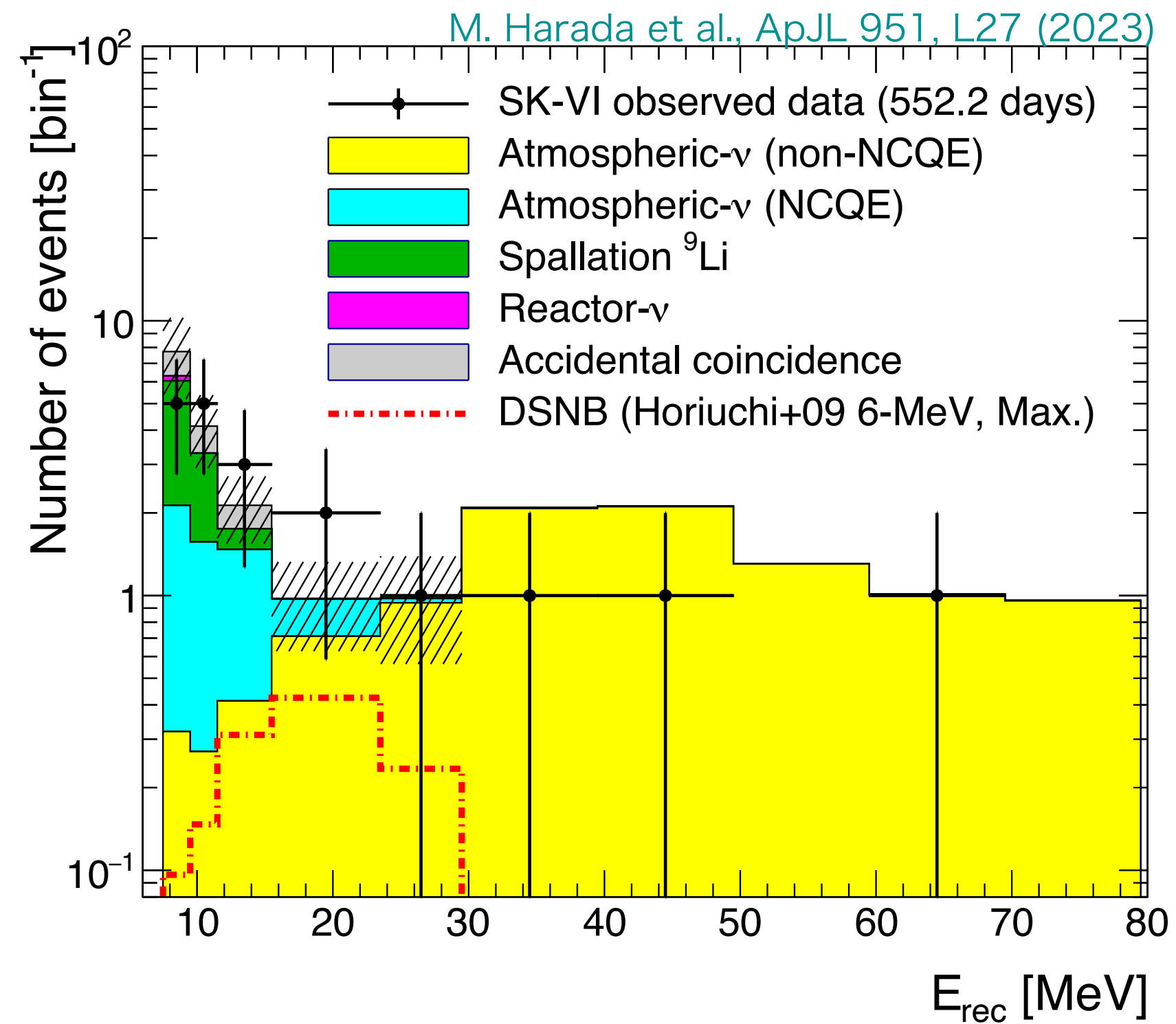


M. Harada et al., ApJL 951, L27 (2023)



SRN探索結果

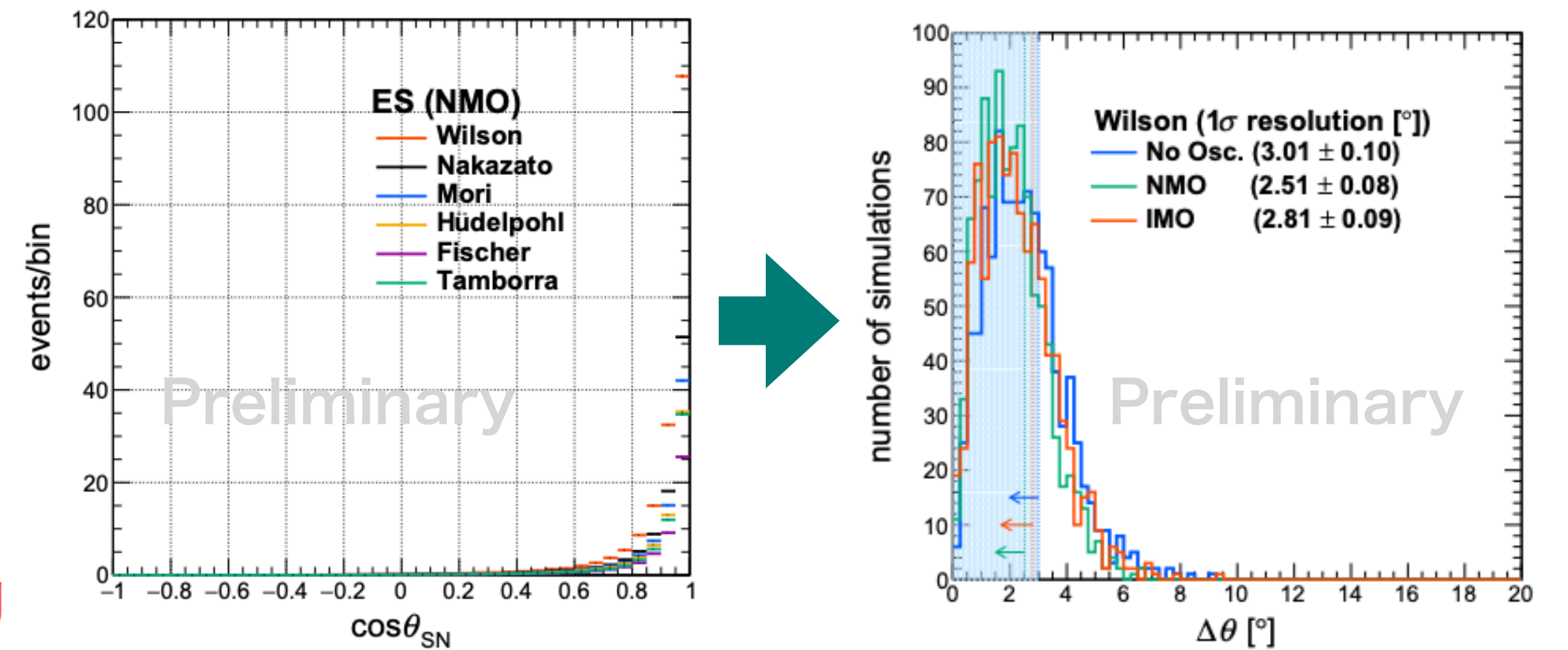
- 信号領域に16 事象観測→バックグラウンドと無矛盾



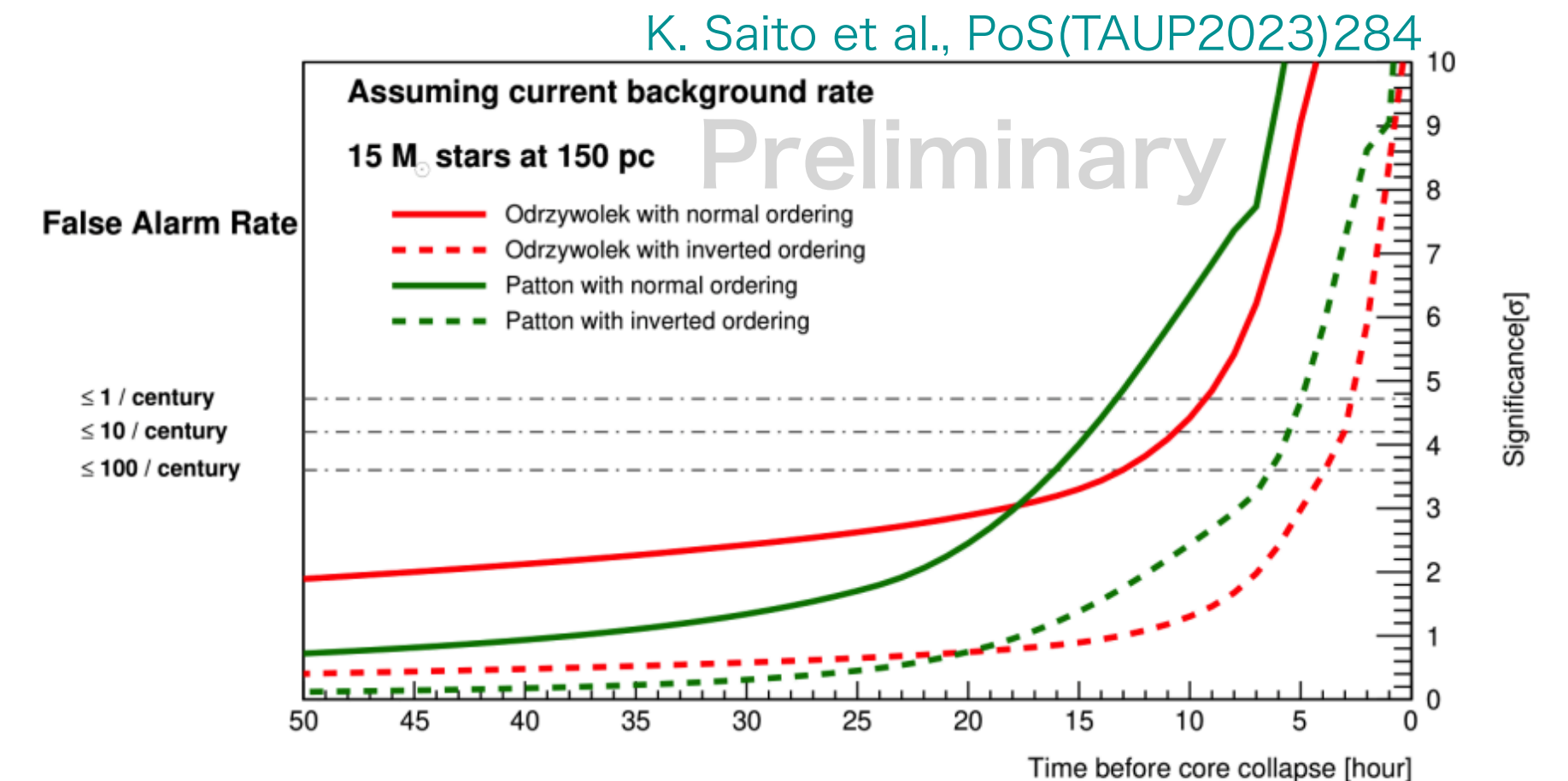
- Model-independentなフラックス上限を設定
→**~18%のLivetimeで純水期に匹敵する制限**

超新星ニュートリノ

- 超新星爆発ニュートリノ
 - O(1000) ニュートリノ事象@10 kpc
 - IBD(~90%), 電子散乱ES(~5%), 原子核散乱(O(1)%)
 - 方向感度のないIBDを中性子タグで除去
→電子散乱のイベント方向から超新星到来方向をPointing
 - ~50%のIBDを抽出→超新星方向を3-7度で同定



- 超新星前兆ニュートリノ
 - 中性子タグを使ってSi-burningからのニュートリノ観測
→光学観測前にアラートが可能
 - KamLANDと連携しての監視が2023年にスタート
(<https://www.lowbg.org/presnalarm/>)



天体同期ニュートリノ探索：超新星SN2023ixf

- SN2023ixf

- 2023年5月20日(JST)
- 典型的なII型超新星爆発
- 地球からの距離 ~6.4 Mpc ($z \sim 0.0008$)

- SKでの同期事象クラスタ探索

- 光学観測の2日前から
- 7-100 MeVでのクラスタ探索
- 117 events observed / 117.7 bkg expected
→有意な信号は得られず。フルエンス上限 $O(10^8)$ /cm²
- GCN, ATELにnotification

GCN

GCN Circular 33916

Subject Super-Kamiokande: Neutrino search for SN2023ixf
Date 2023-06-05T12:30:44Z (8 months ago)
From Yusuke Koshio at Super-Kamiokande <koshio@okayama-u.ac.jp>

M. Nakahata, Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, reports on behalf of the Super-Kamiokande collaboration:

Super-Kamiokande, a 50 ktons water Cherenkov imaging detector situated 1000 meters underground in the Kamioka mine, Gifu, Japan, has searched for neutrino signal correlated with SN2023ixf in a time window 2 days before the detection by Oak St. Observatory (2023-05-17 08:45:13 to 2023-05-19 08:45:13), during which Super-Kamiokande took data stably without dead time. In the electron total energy region between 7.0 MeV and 100 MeV within a fiducial volume of 22.5 ktons, no significant signal was observed.

ATel

[Previous | Next | ADS]

Neutrino search for SN2023ixf in Super-Kamiokande

ATel #16070; *M. Nakahata (University of Tokyo) on behalf of the Super-Kamiokande collaboration*

on 2 Jun 2023; 08:44 UT

Distributed as an Instant Email Notice Supernovae

Credential Certification: H. Ishino (snconveners@km.icrr.u-tokyo.ac.jp)

Subjects: Neutrinos, Supernovae

Referred to by ATel #: 16075

✕ Post

Super-Kamiokande, a 50 ktons water Cherenkov imaging detector situated 1000 meters underground in the Kamioka mine, Gifu, Japan, has searched for neutrino signal correlated with SN2023ixf in a time window 2 days before the detection by Oak St. Observatory (2023-05-17 08:45:13 to 2023-05-19 08:45:13), during which Super-Kamiokande took data stably without dead time. In the electron total energy region between 7.0 MeV and 100 MeV within a fiducial volume of 22.5 ktons, no significant signal was observed.

Related

- 16075 Fermi-LAT gamma-ray observations of SN 2023ixf
- 16073 Chandra X-ray detection of supernova SN 2023ixf in M101
- 16070 Neutrino search for SN2023ixf in Super-Kamiokande
- 16065 SN 2023ixf continues to rise in hard X-rays
- 16060 Search the XMM-Newton archival data for the progenitor of SN 2023ixf
- 16052 uGMRT radio upper limit on Supernova SN 2023ixf in M101
- 16051 X-ray emission of SN 2023ixf and its progenitor
- 16049 NuSTAR detection of SN 2023ixf in M101
- 16047 Multi-Band Photometric Follow-up of SN 2023ixf
- 16045 Optical observations of SN 2023ixf at Teide Observatory
- 16043 SN 2023ixf: Upper limits from a neutrino search with IceCube

まとめ

- スーパーカミオカンデ実験では2020年よりGdを導入した新段階SK-Gd実験を開始
 - 2020-2022年 (SK-VI) : Gd質量濃度0.01%→Gd捕獲50%の測定(完了)
 - 2022年- (SK-VII) : Gd質量濃度0.03%→Gd捕獲75%の測定(現在も稼働中)
- SRNの初観測・中性子を用いた物理の測定・観測を目指している
→**Gdを使った物理解析結果も発表されている**
- 純水期から続いている太陽ニュートリノ観測も継続
- 今年度の物理結果
 - 0.01%Gd濃度でのIBD事象探索(ApJL 951, L27 (2023))
 - 太陽ニュートリノ観測結果(arxiv: 2312.12907)
 - 超新星SN2023ixfとの同期ニュートリノ探索