

Development of Neutron Tagging Algorithm and Search for Supernova Relic Neutrino in SK-Gd Experiment

SK-Gd実験における中性子同定手法の開発と
超新星背景ニュートリノ探索

東大宇宙線研 原田 将之

3月10, 11日 2024年第一回CRCタウンミーティング

目次

研究目的

SK-Gd実験で超新星背景ニュートリノを探索し
世界初観測を目指す

1. 超新星背景ニュートリノとSK-Gd実験
2. SK-Gd実験での中性子同定手法構築と評価
3. 超新星背景ニュートリノ探索
4. 将来への展望
5. まとめ

超新星背景ニュートリノ (SRN)

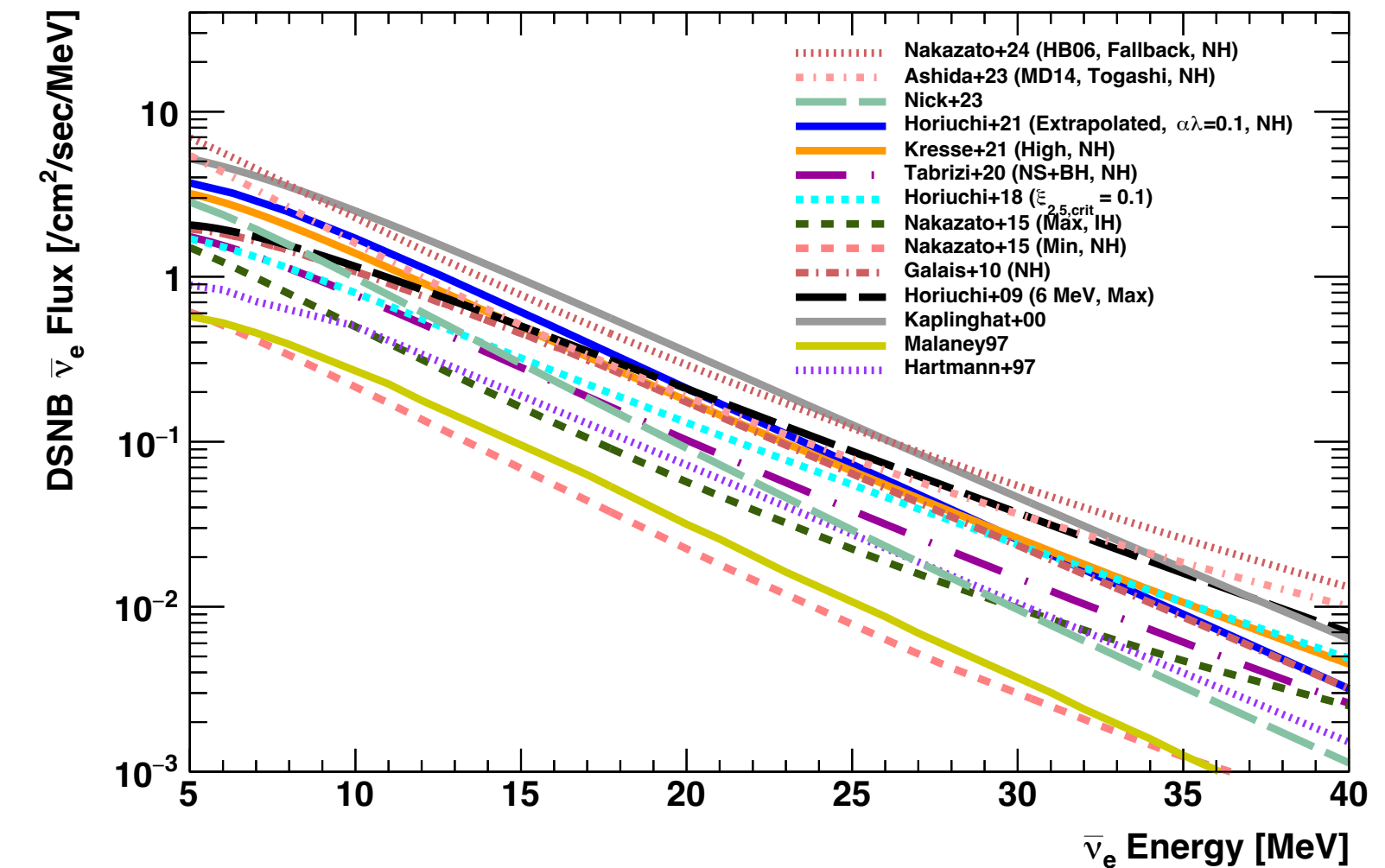
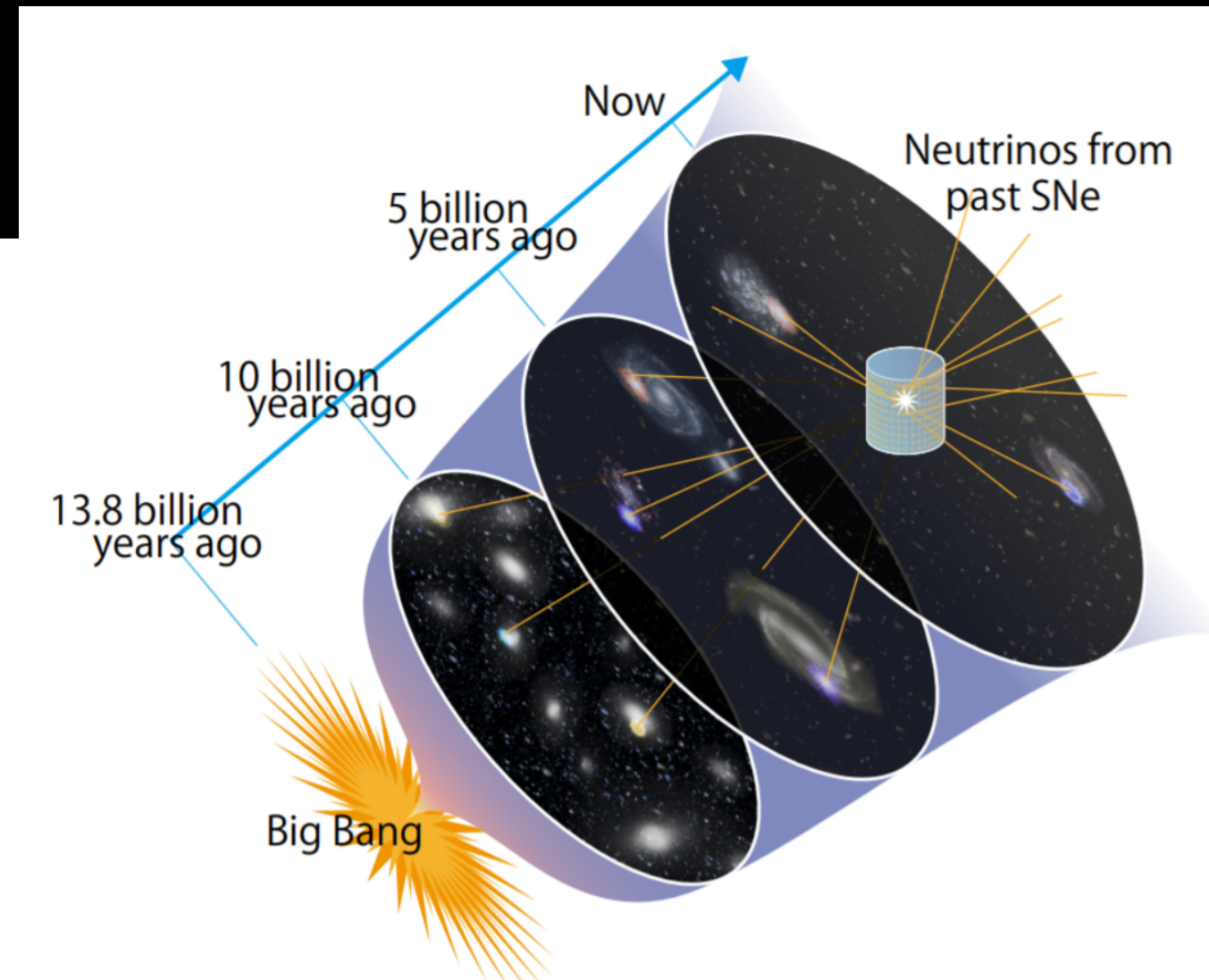
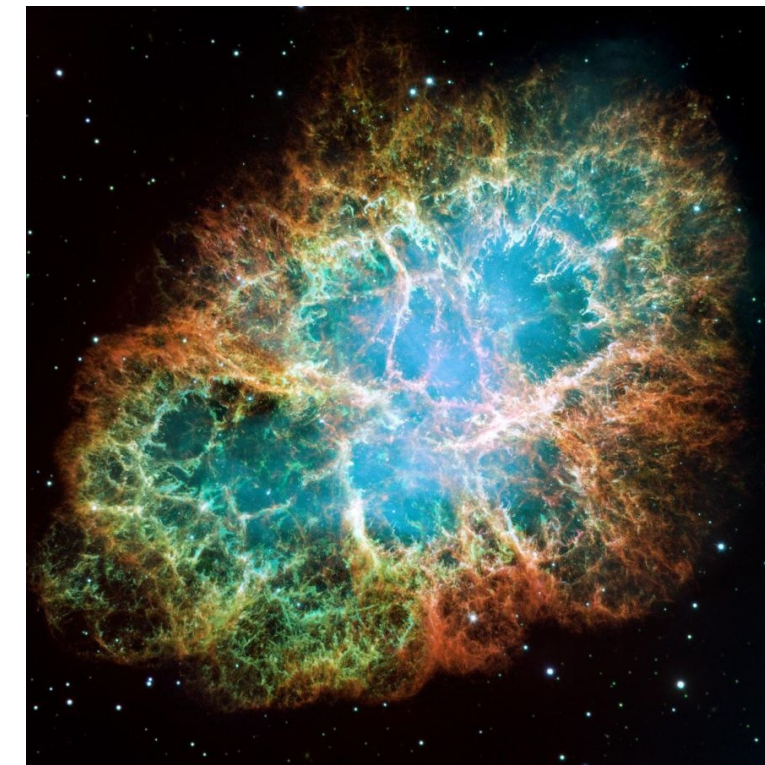
- 超新星爆発(SN)

- エネルギーの99%がニュートリノによって放出
→超新星爆発の理解に**ニュートリノの観測**が重要

- 超新星背景ニュートリノ

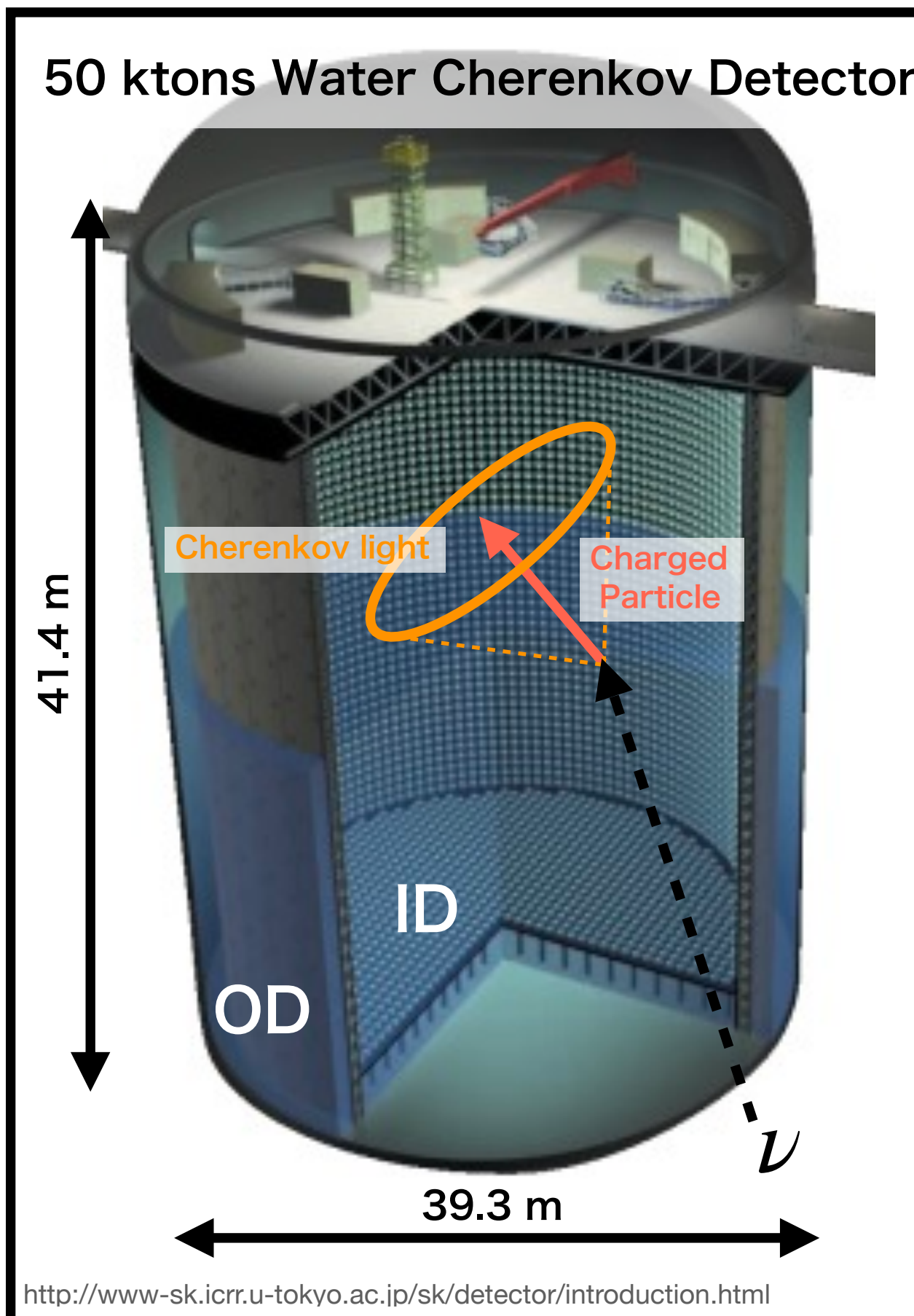
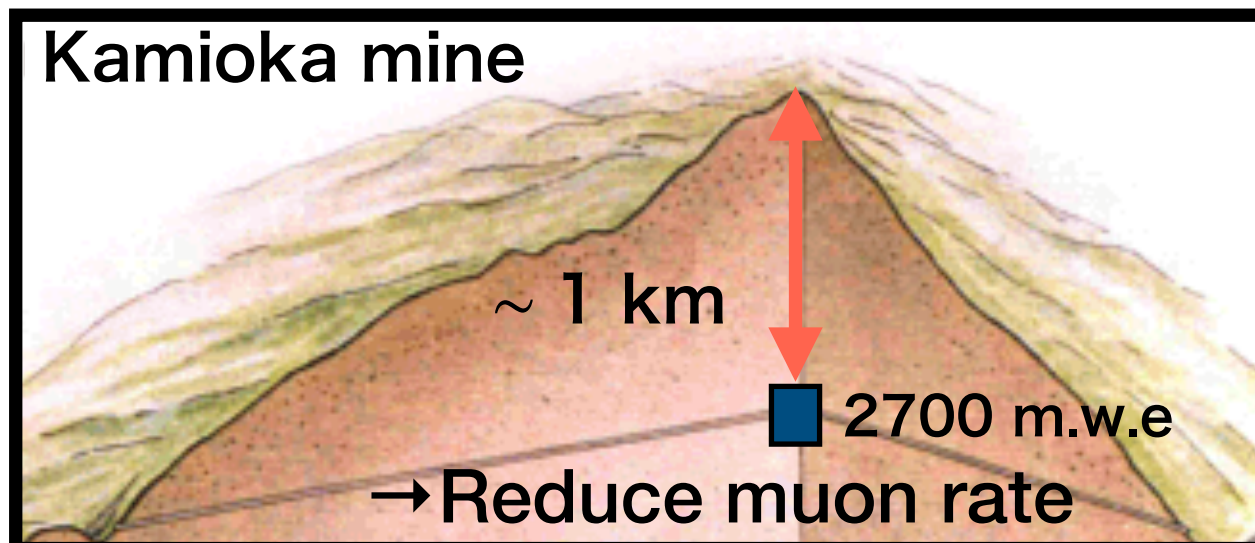
(SRN: Supernova Relic Neutrino)

- 過去のCCSNeで生成されたニュートリノの重ね合わせ
- SRNフラックス計算
 - ▶ 超新星ニュートリノスペクトル
 - ▶ 超新星爆発レート
 - ▶ 星の初期質量、星形成率等の銀河の進化
- 様々な仮定から1桁に渡る幅をもつ



**SRN観測により爆発機構や
宇宙の星形成に新たな知見が得られる**

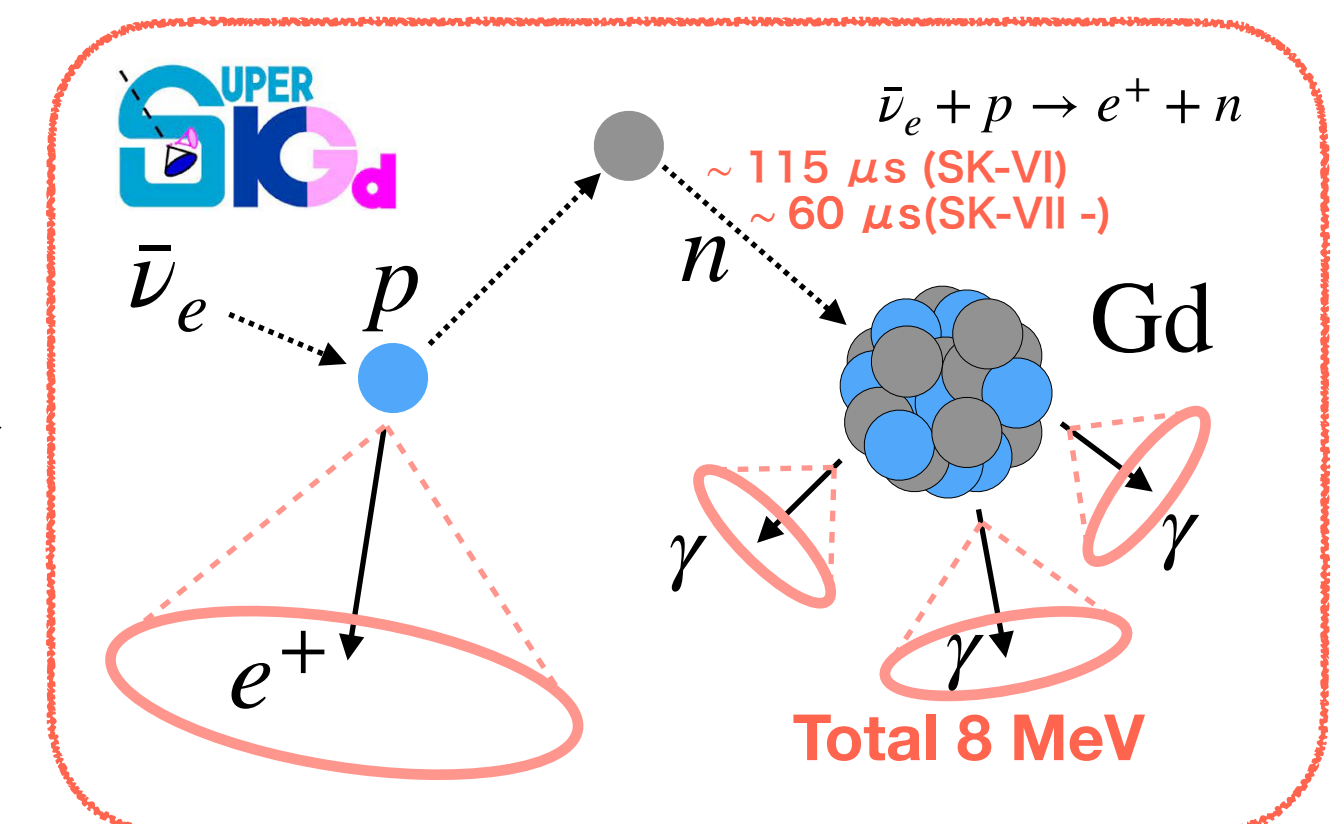
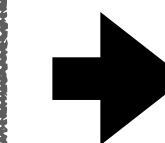
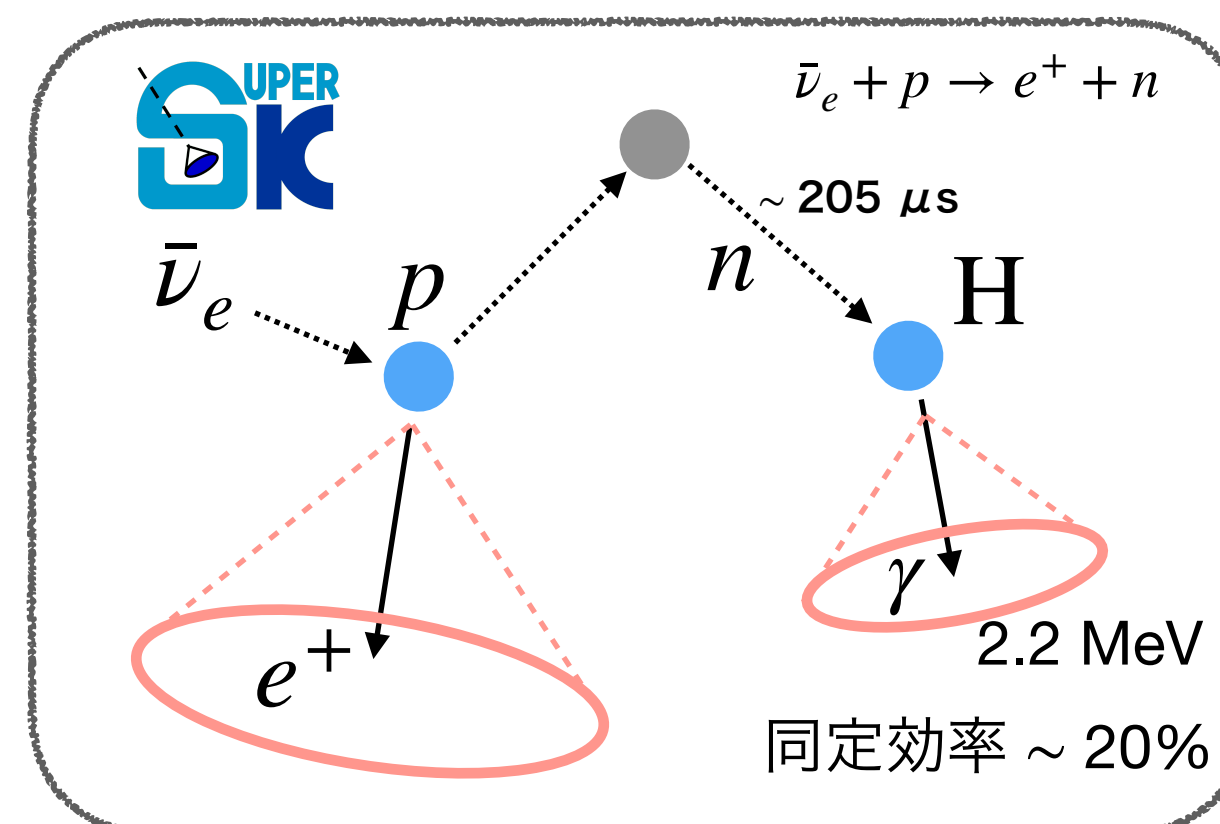
スーパーカミオカンデ(SK)



SKでのSRN探索

- 逆ベータ崩壊(IBD)の探索
 - $\bar{\nu}_e + p \longrightarrow e^+ + n$
 - 先発信号(e^+)に付随する中性子遅延信号とのペアを探索
 - 中性子の伴わない背景事象の削減
- **SK-Gd実験**

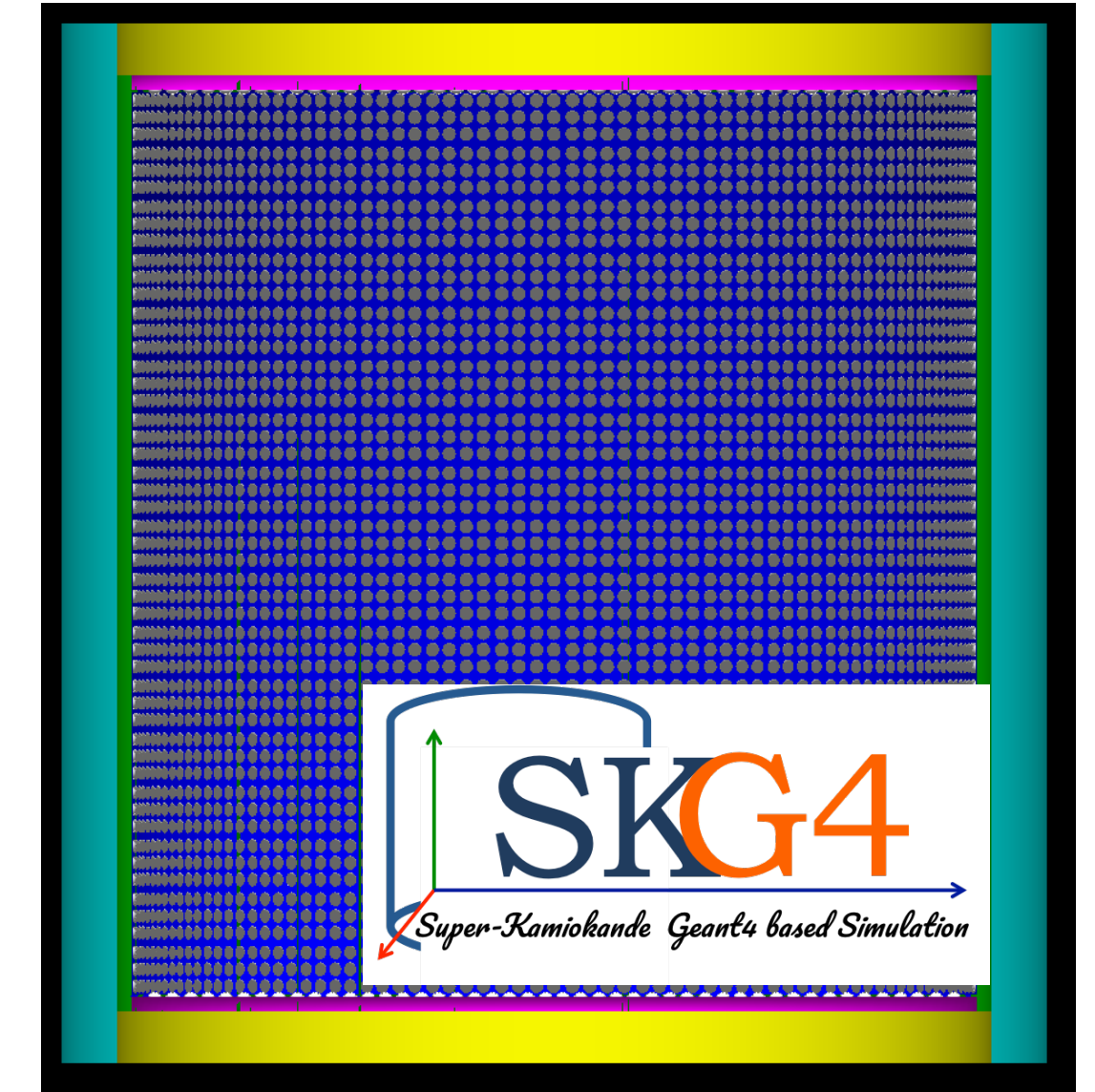
Phase	Detector	Period	Neutron search
SK-I/II/III	Pure-water	1996-2008	×
SK-IV		2008-2018	✓
SK-V		2019-2020	✓
SK-VI	Gd 0.01%	2020-2022	✓
SK-VII	Gd 0.03%	2022-2023	✓
SK-VIII	Gd 0.03%	2024-	✓



博士論文に向けた研究と成果

SK-Gd実験でのSRN初観測に向けた研究

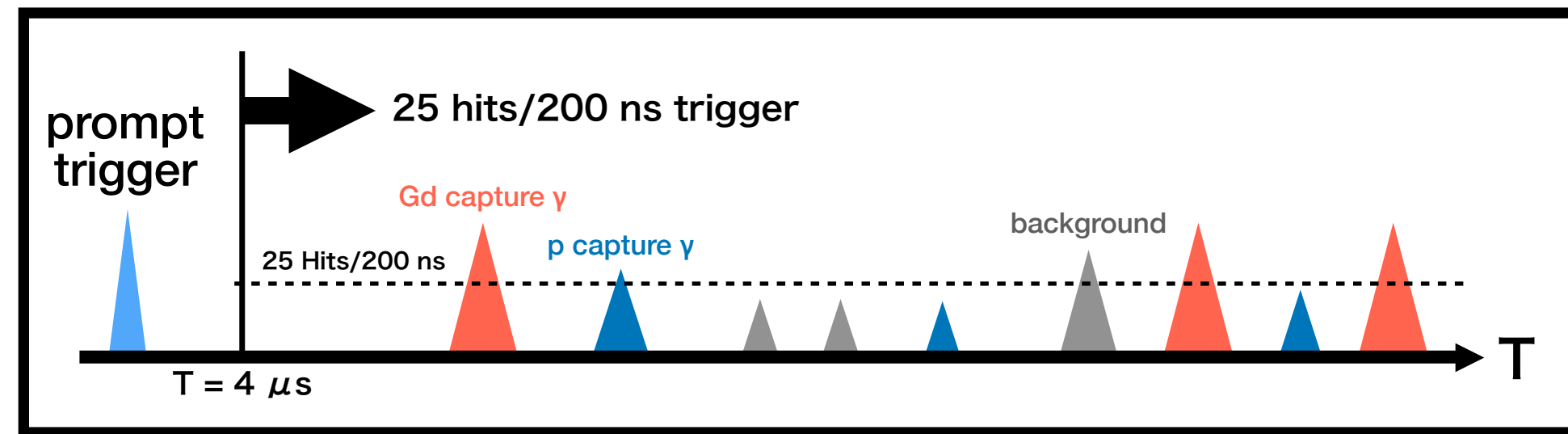
- Geant4ベースの検出器シミュレーション”SKG4”の開発
 - n-Gd捕獲ガンマ線モデル、複数の原子核反応モデルの導入
→SK-Gd実験におけるバックグラウンド理解に不可欠
 - SKで行われるキャリブレーション測定の実現・チューニング
→SK-Gd実験で使用可能に
- SKへのGd導入準備・中性子同定手法開発・同定効率測定
- SK-Gd実験でのSRN探索



SK-Gd実験での中性子同定と Am/Be線源測定

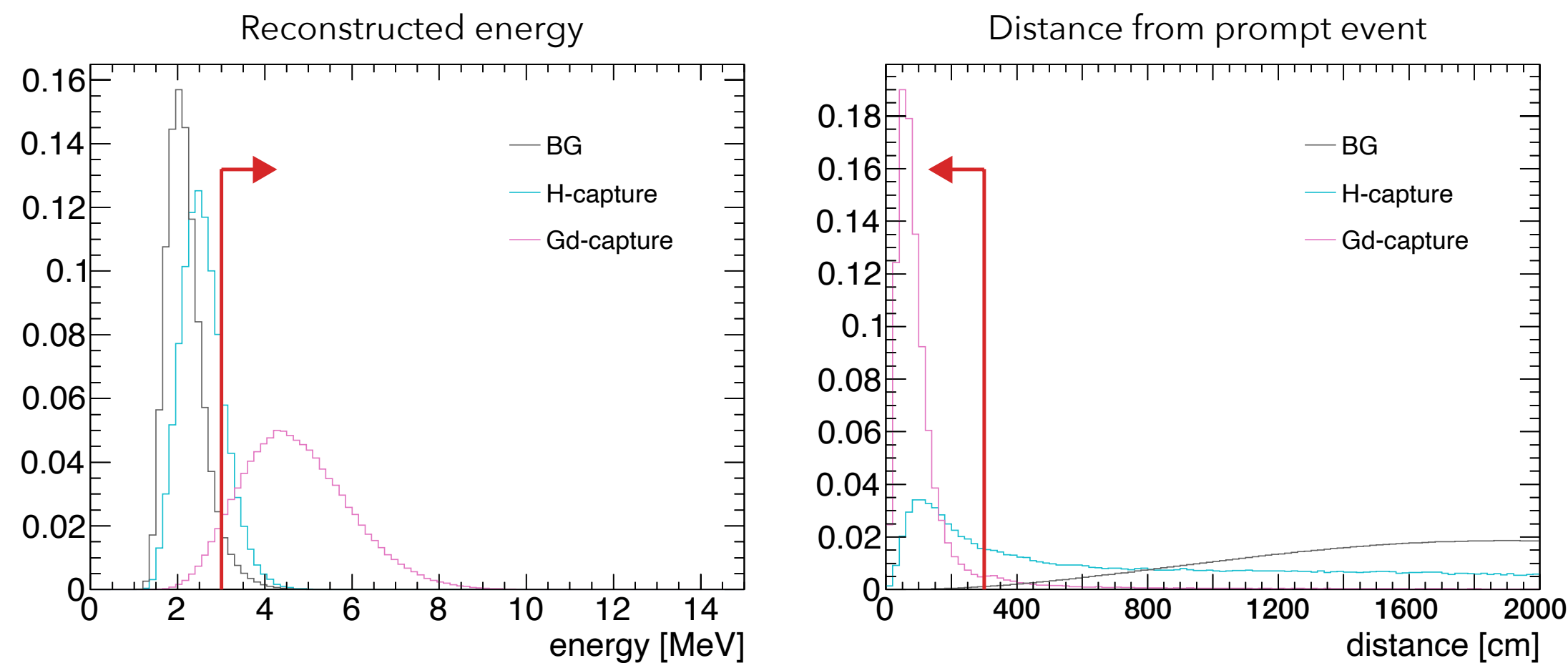
中性子同定手法開発

[4, 535] μs windowで 25 PMT hits/200 ns cluster search



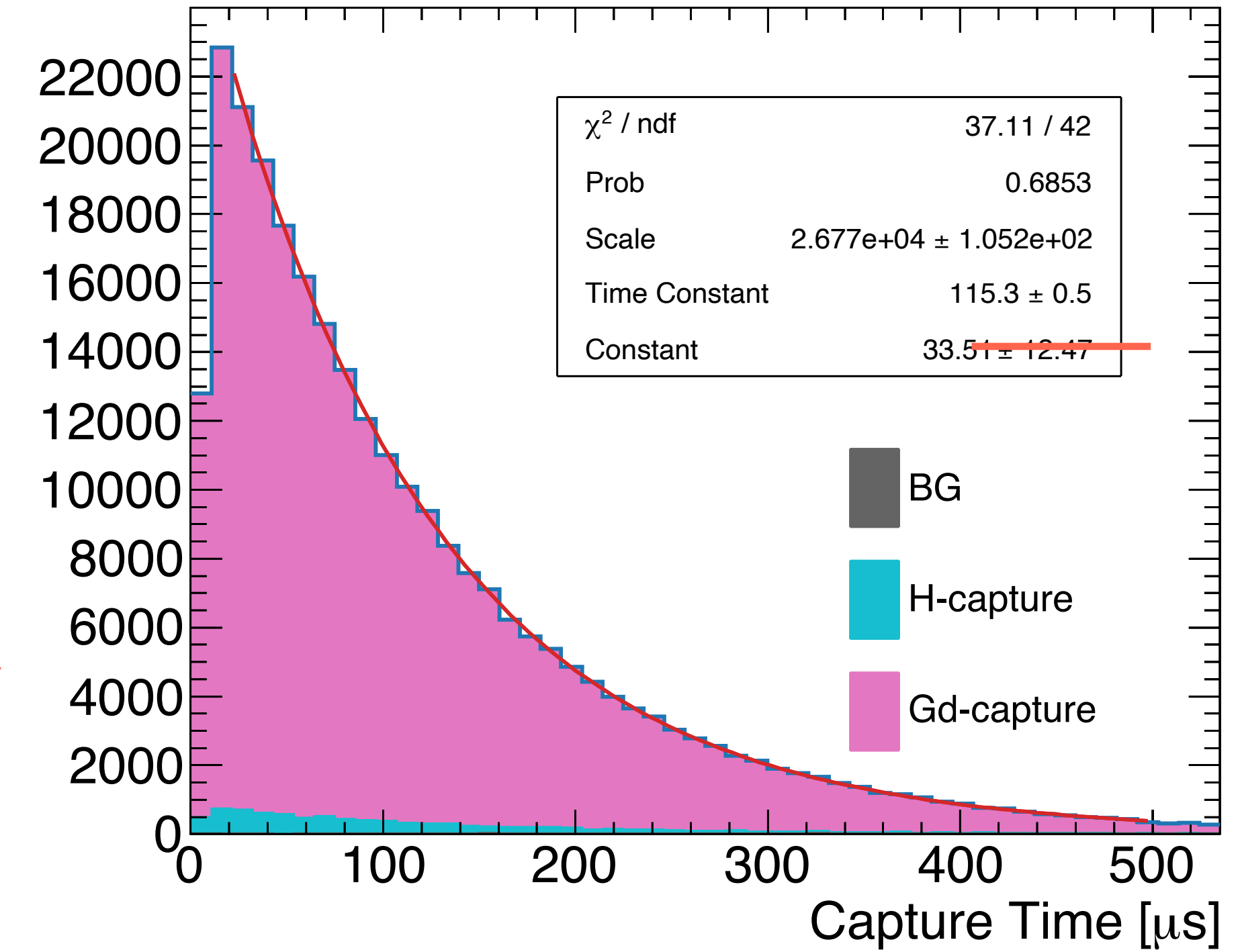
全ての中性子候補を事象再構成をして

Gd中性子捕獲由来の遅延信号を選択



MCを使って事象選択範囲を決定

→**79%のGd信号**を選択可能



MC studyの結果:

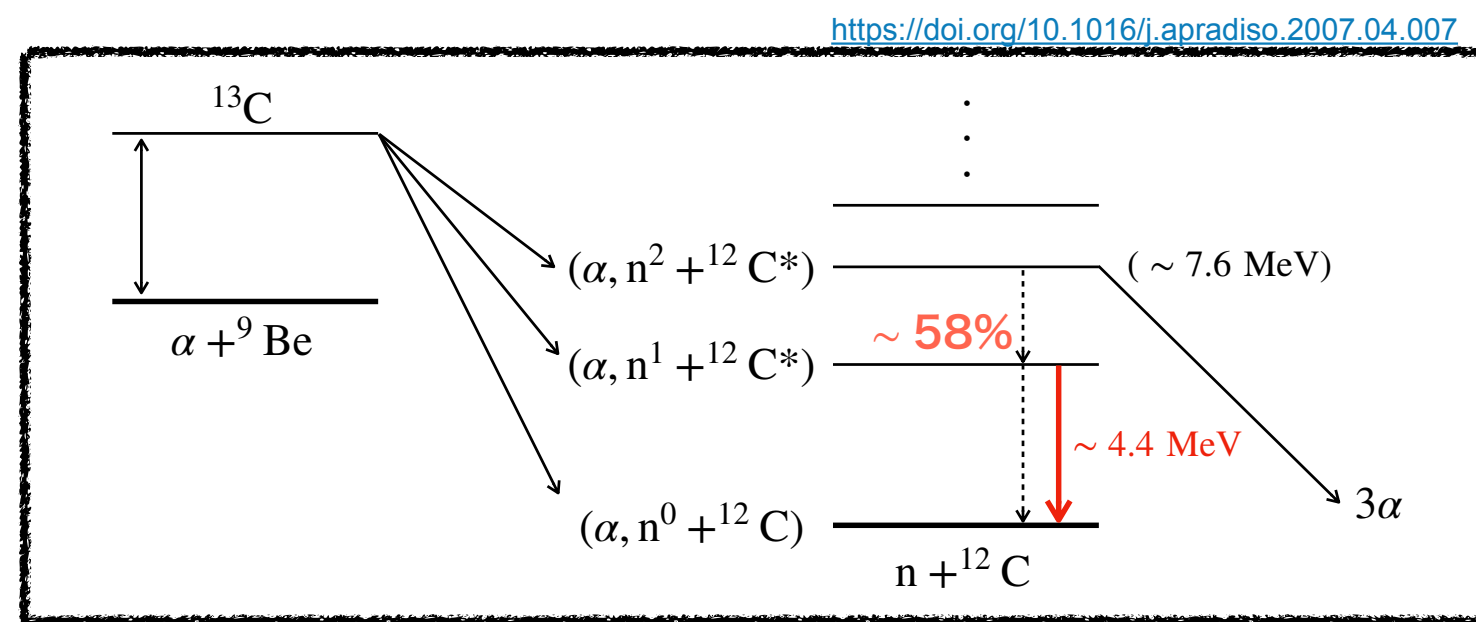
中性子全体の**39.5 $\pm$ 0.1%**を同定可能になった

実データでは？

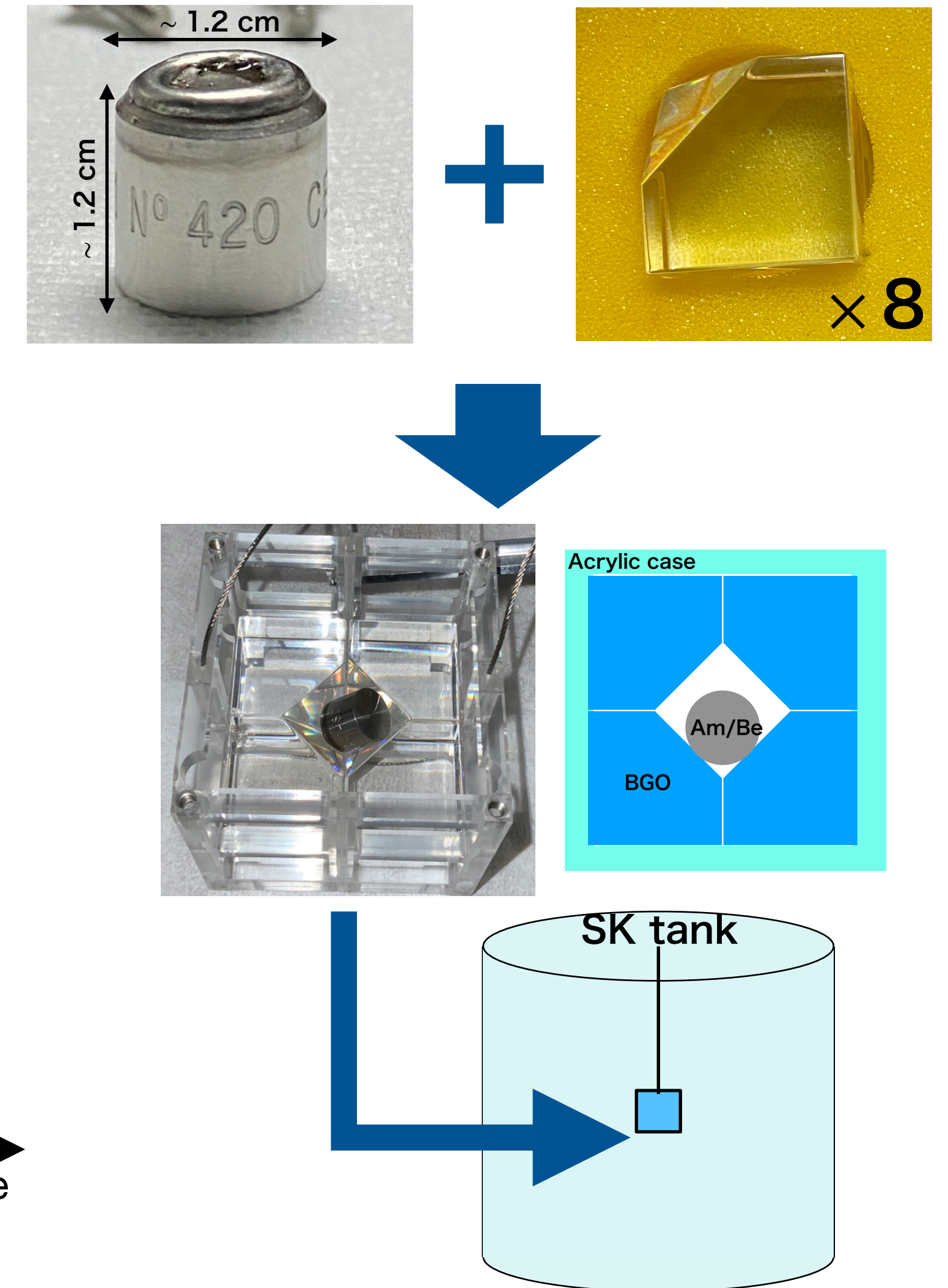
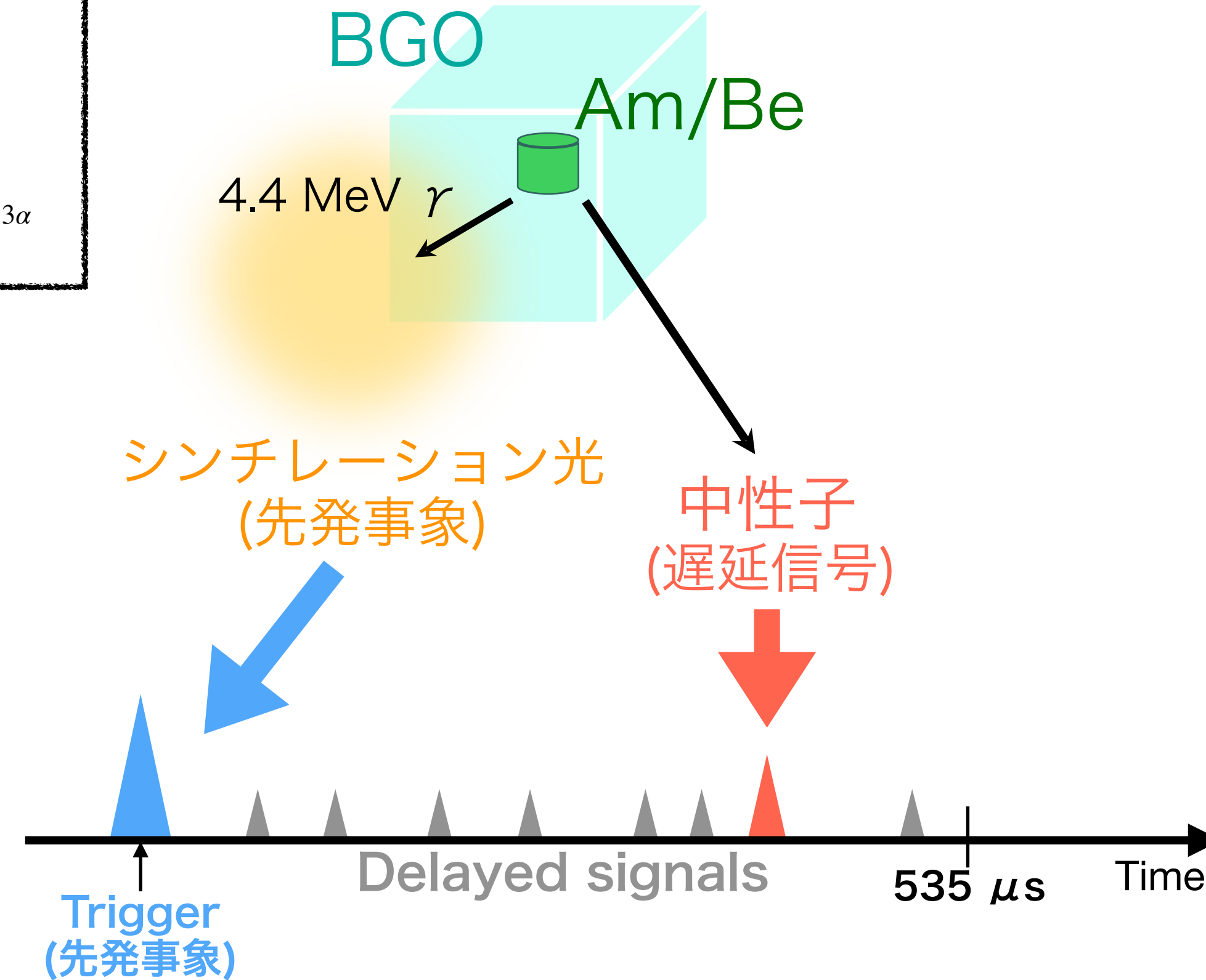
➡ Am/Be線源測定

Am/Be線源測定

Am/Be線源



BGOシンチレータ発光で
Prompt eventをトリガー



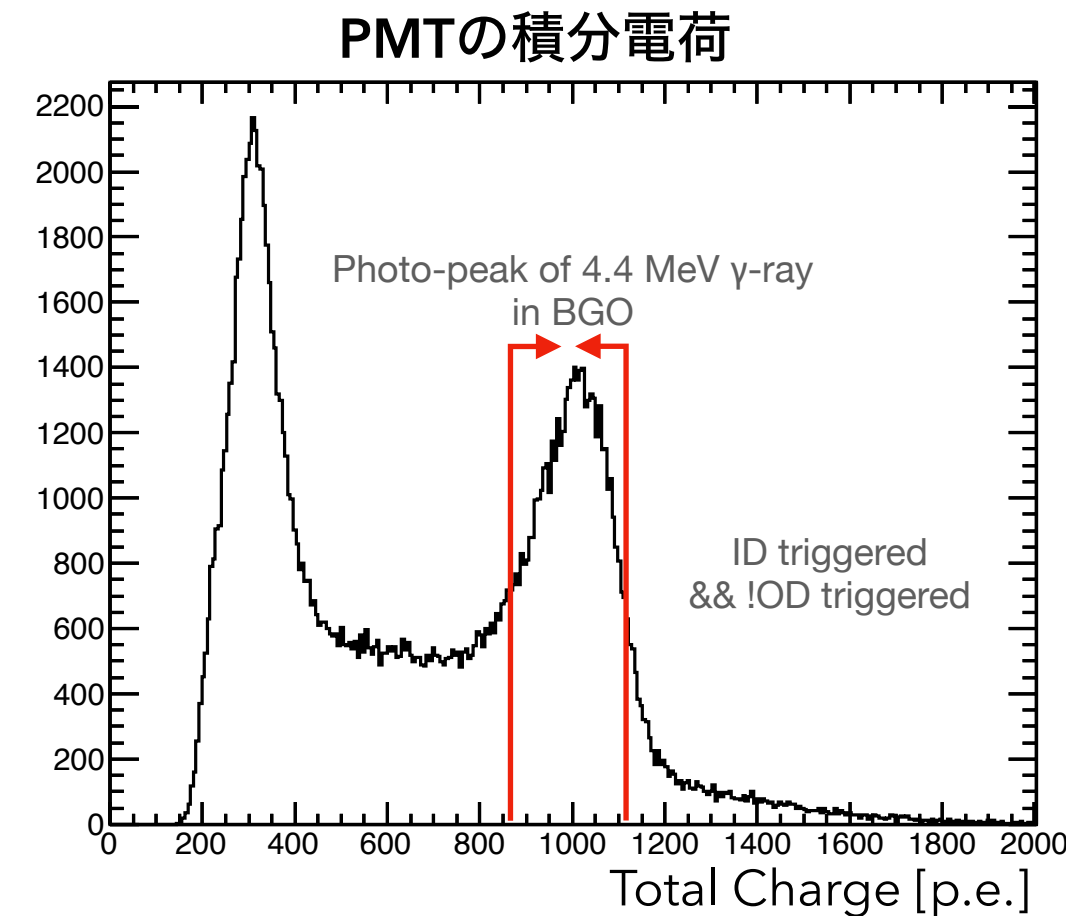
データ選別

BGOのシンチレーションの先発事象と、付随するGd-capture信号を選択

先発事象

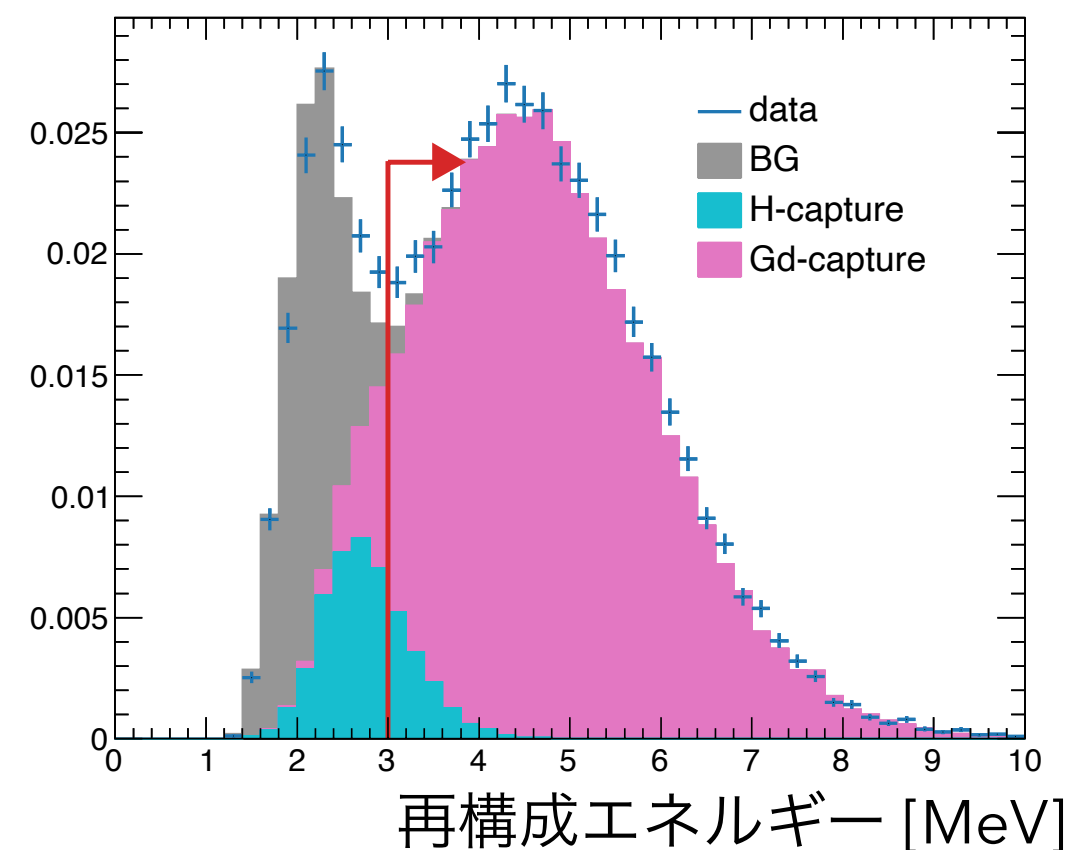
使用したカット

- Small OD activity
- 4.4 MeV photo-peak

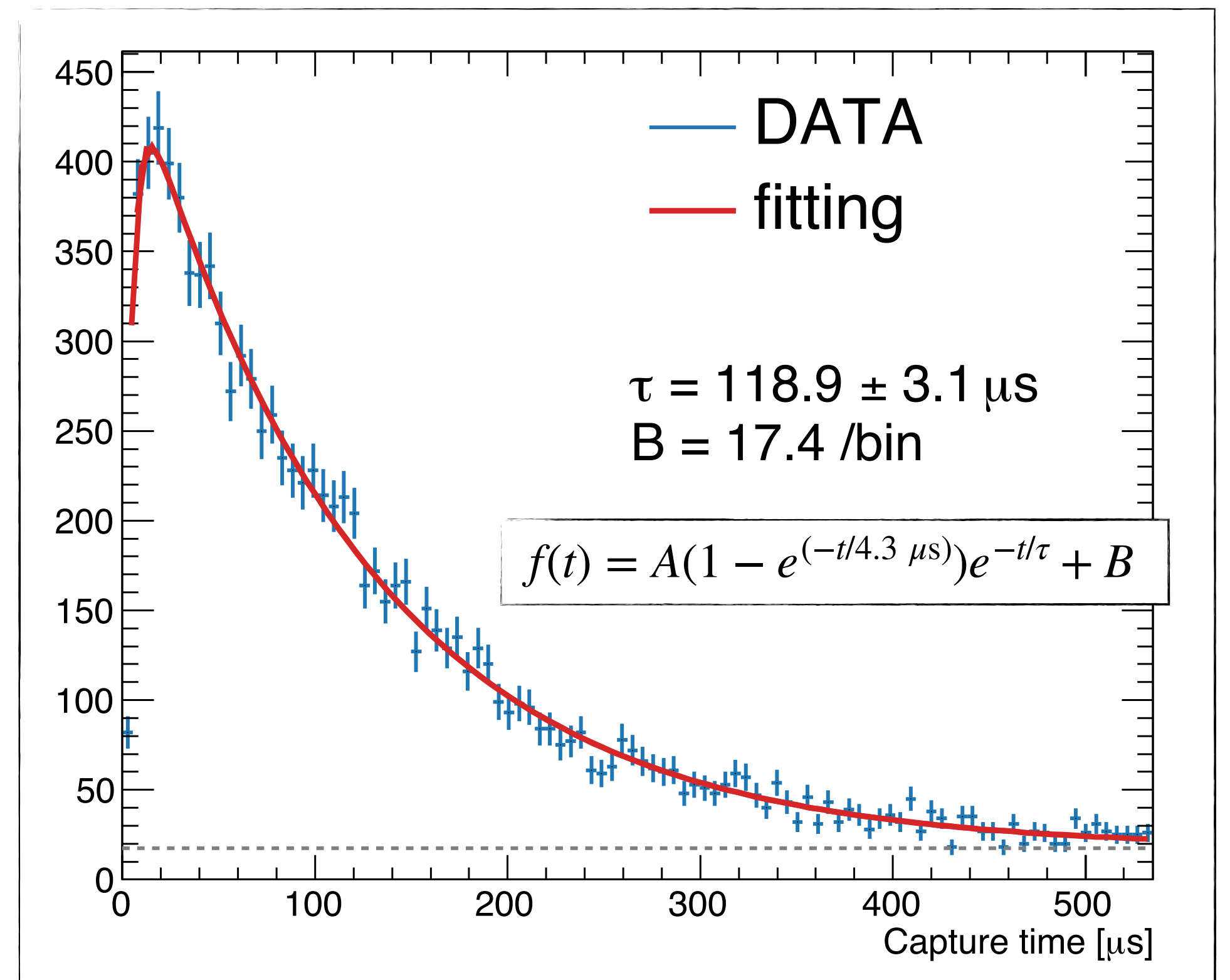
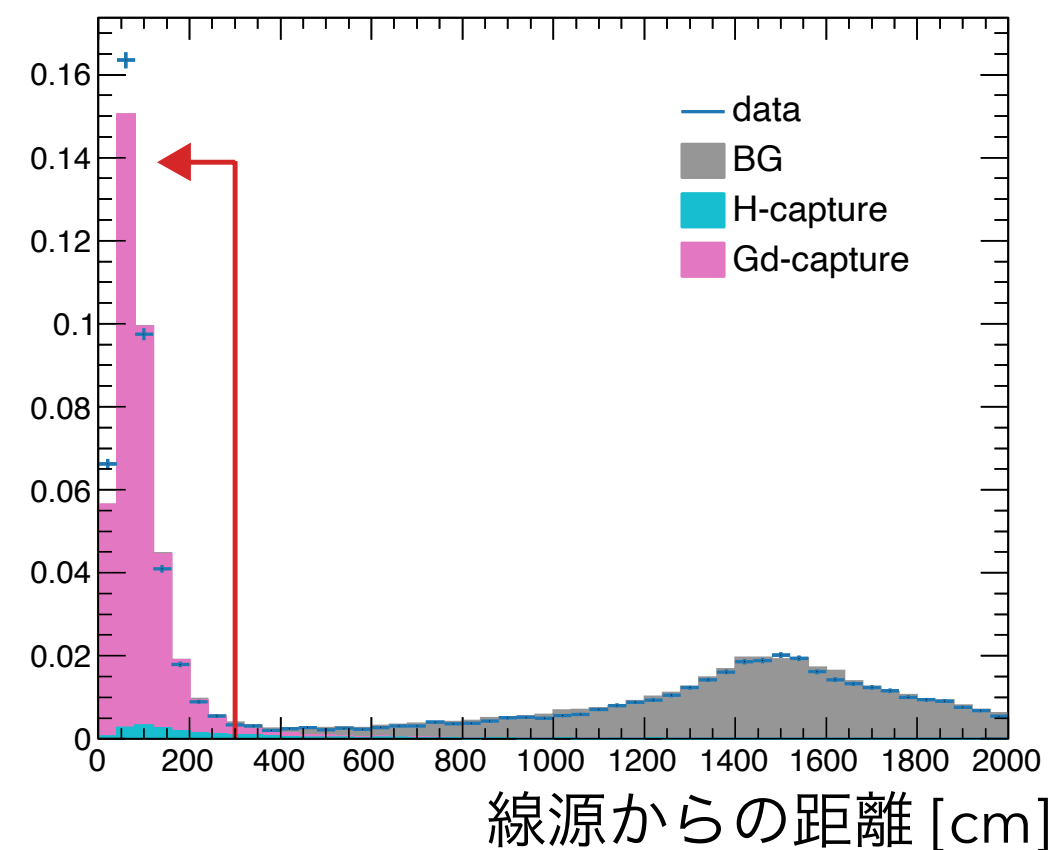


遅延信号

再構成エネルギー



先発事象からの距離



MCが分布を再現し、うまく中性子を選択できていることを確認

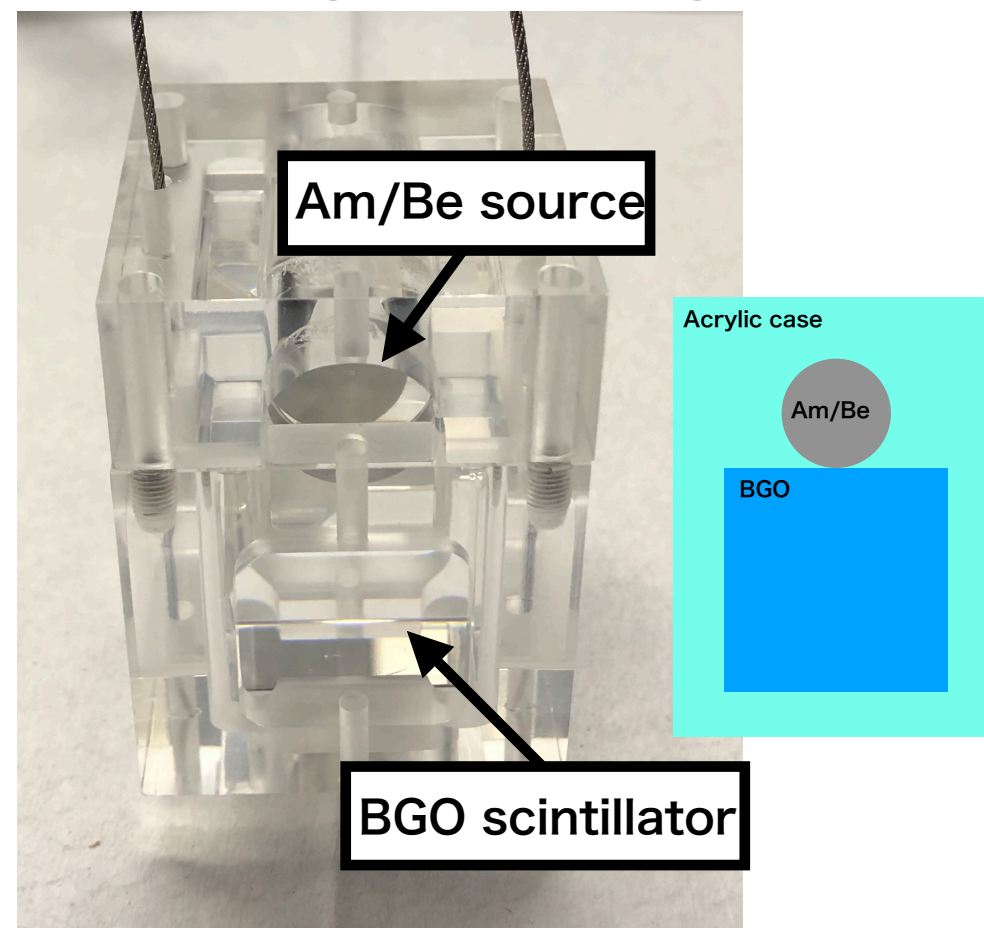
データ取得

検出器性能理解のために複数のセットアップでのデータを取得

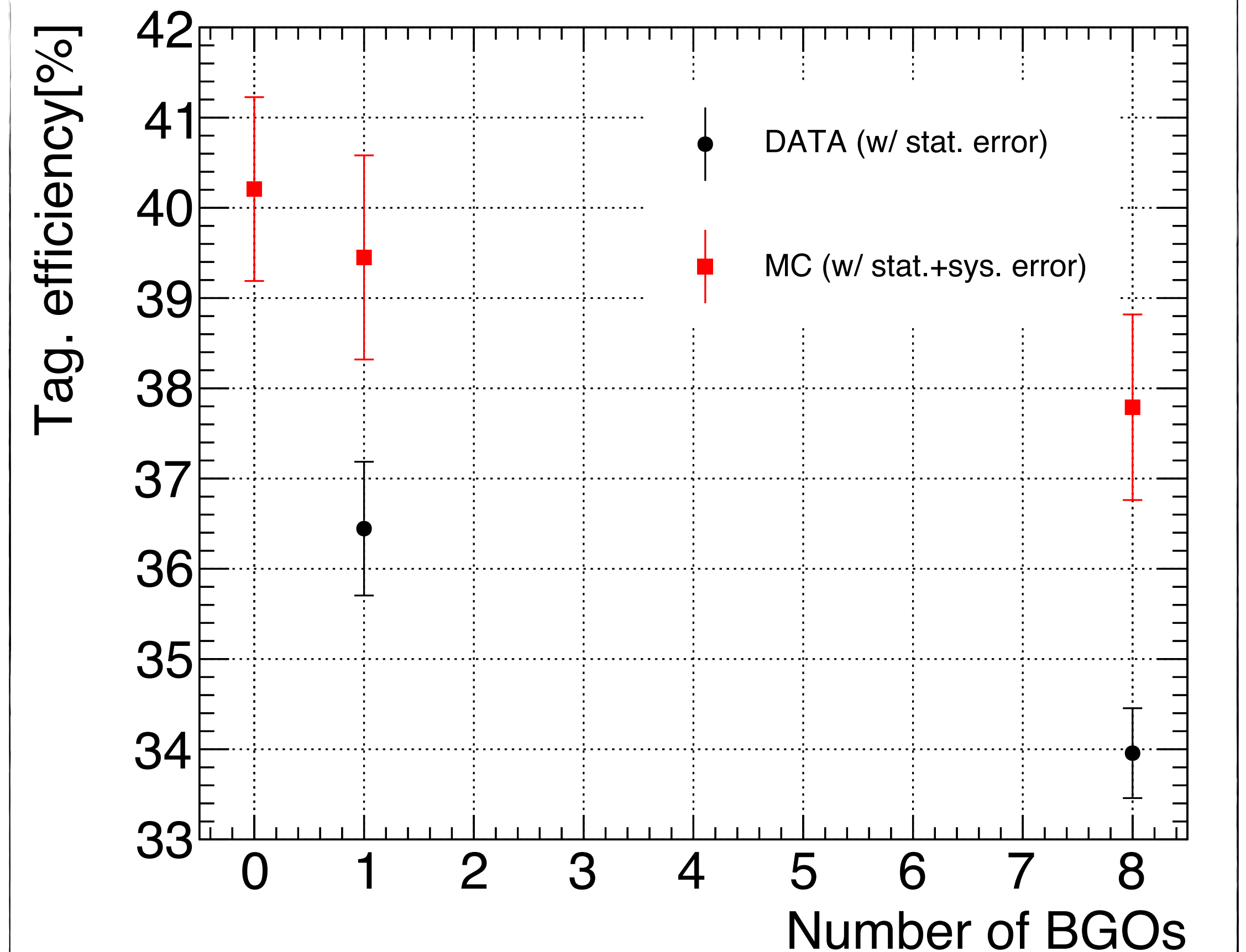
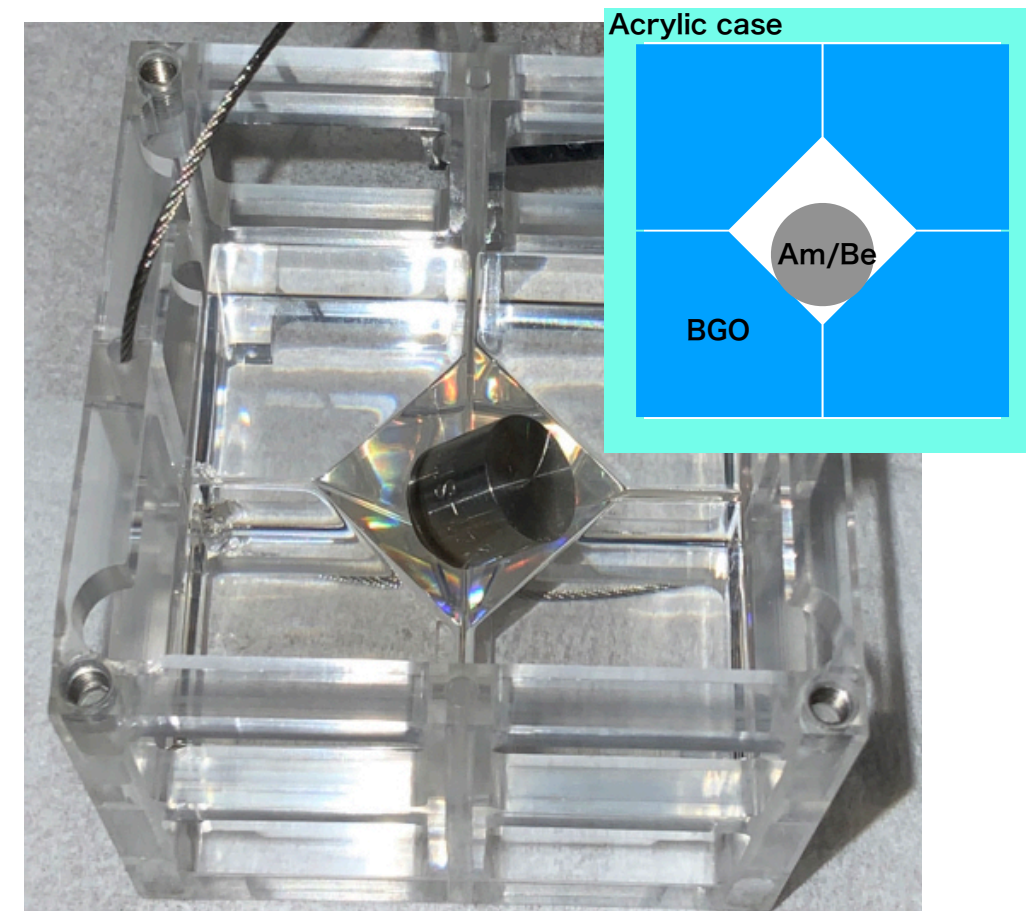
• BGO数依存調査

- SKG4を使ってBGOの影響調査が可能に
- BGO数を変えながら測定
 - ▶ (MCのみ) 0 BGO測定も行った

1BGO geometry



8BGO geometry

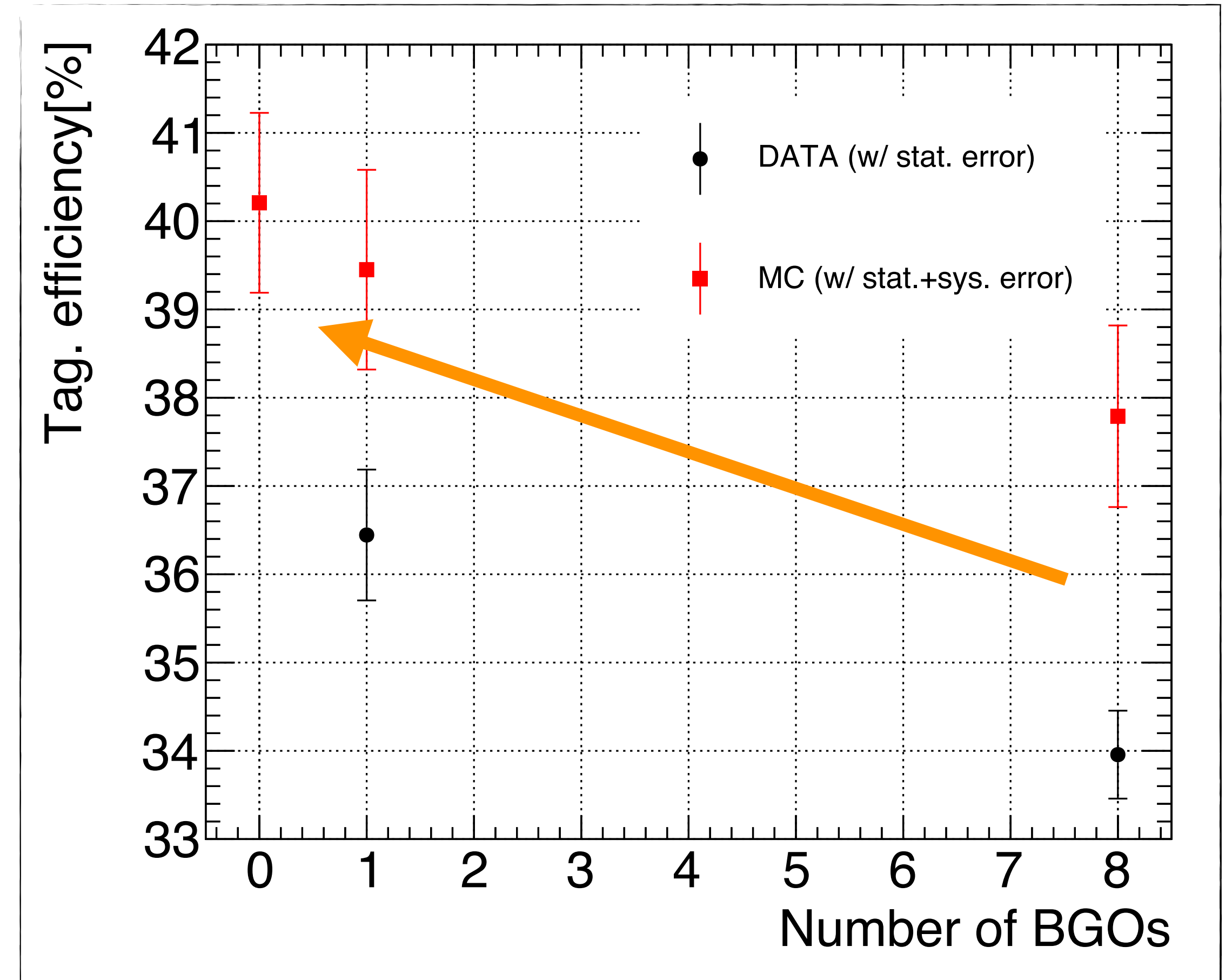
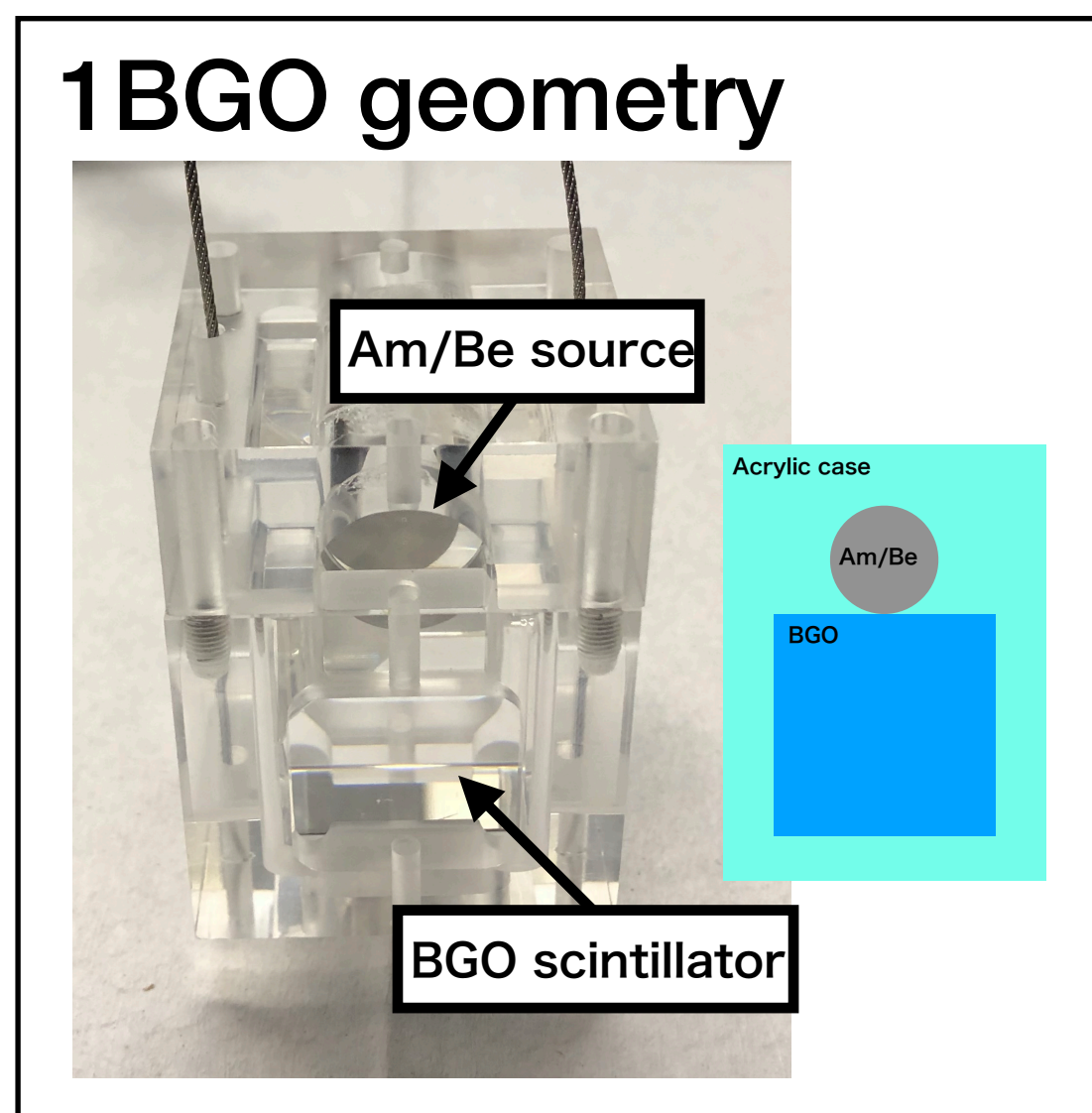


データ取得

検出器性能理解のために複数のセットアップでのデータを取得

- **BGO数依存調査**

- SKG4を使ってBGOの影響調査が可能に
- BGO数を変えながら測定
 - ▶ (MCのみ) 0 BGO測定も行った

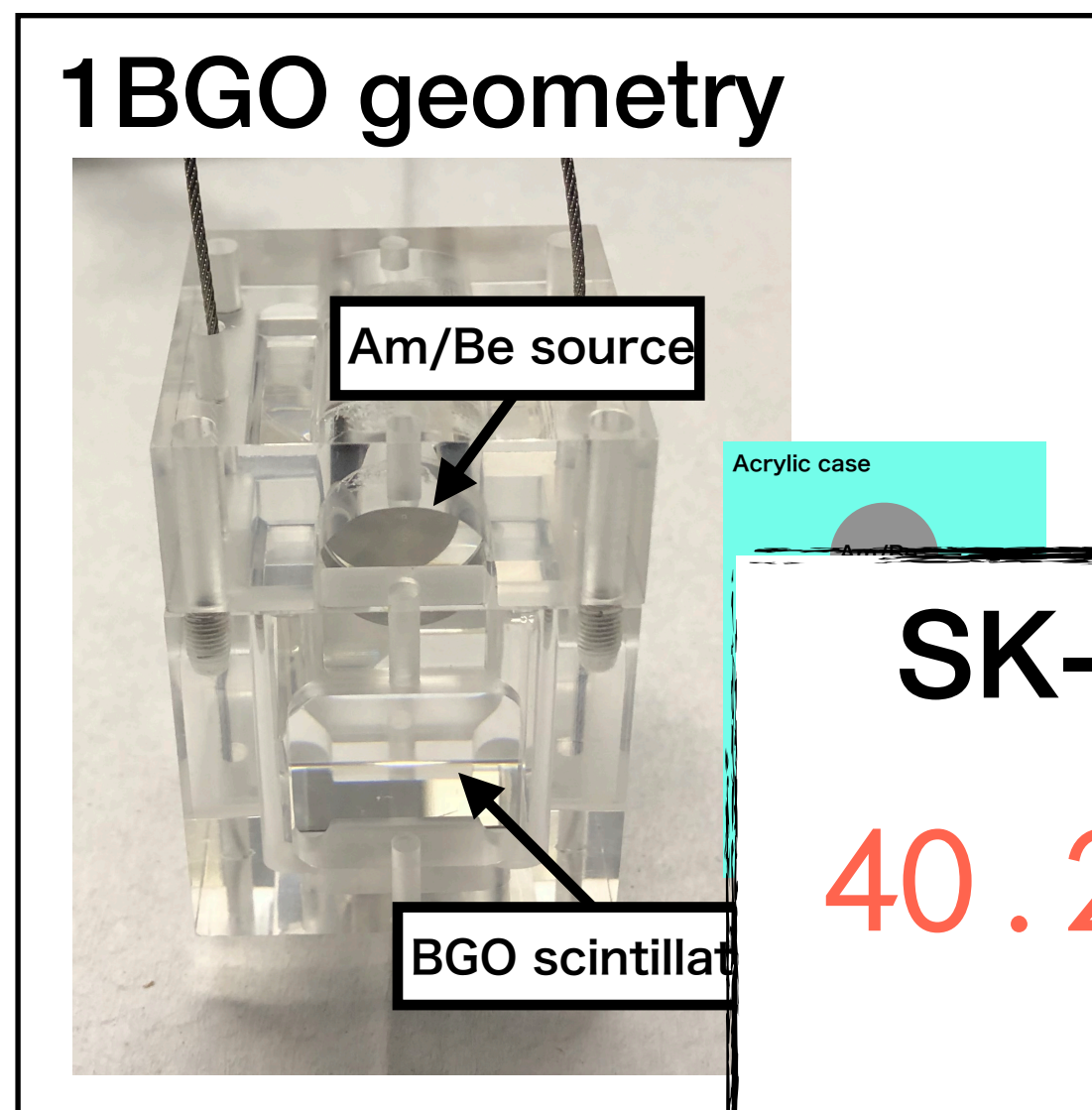


データ取得

検出器性能理解のために複数のセットアップでのデータを取得

• BGO数依存調査

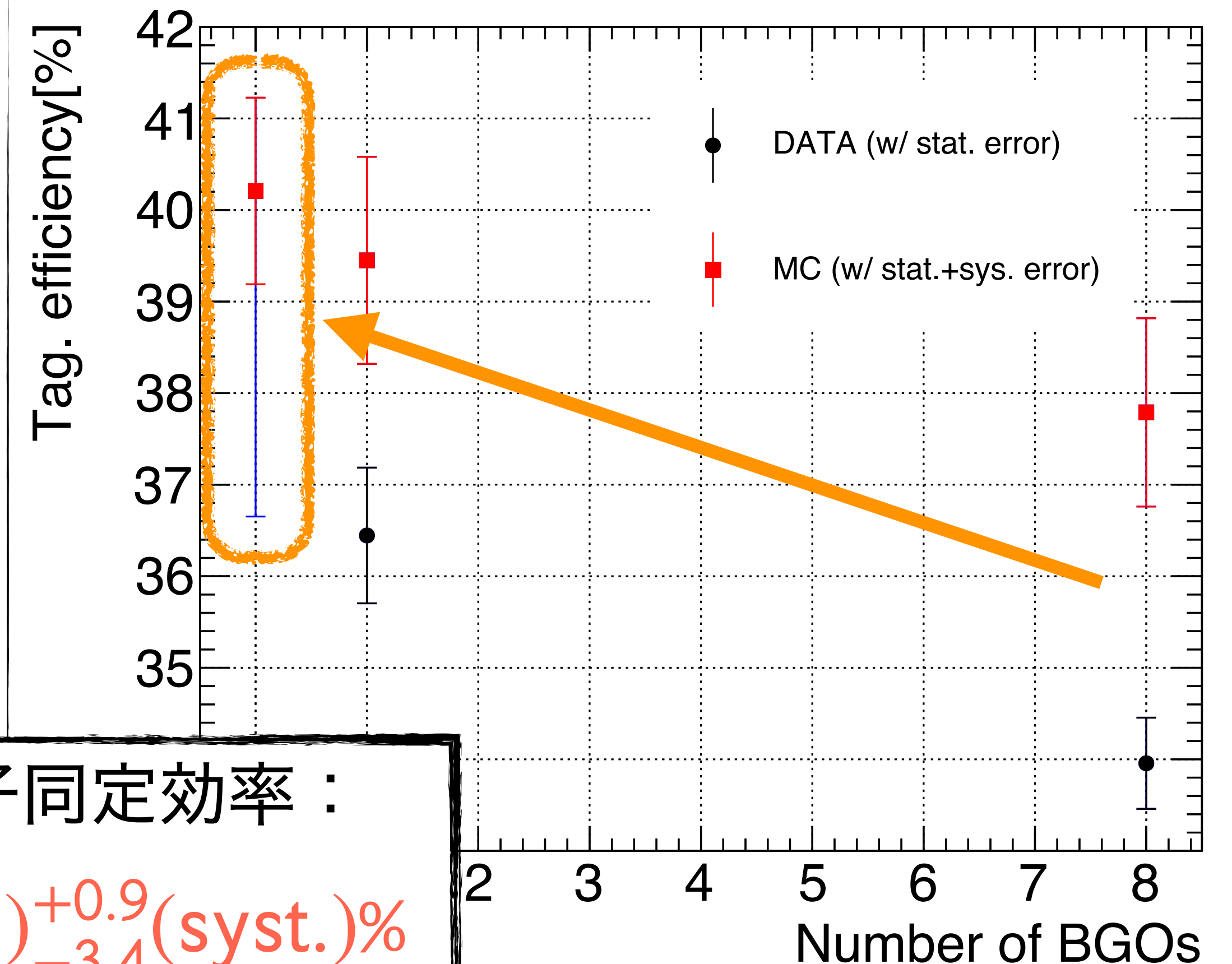
- SKG4を使ってBGOの影響調査が可能に
- BGO数を変えながら測定
 - ▶ (MCのみ) 0 BGO測定も行った



SK-Gdでの中性子同定効率：

$$40.2 \pm 0.1(\text{stat.})_{-3.4}^{+0.9}(\text{syst.})\%$$

(rel. error: 8.8%)



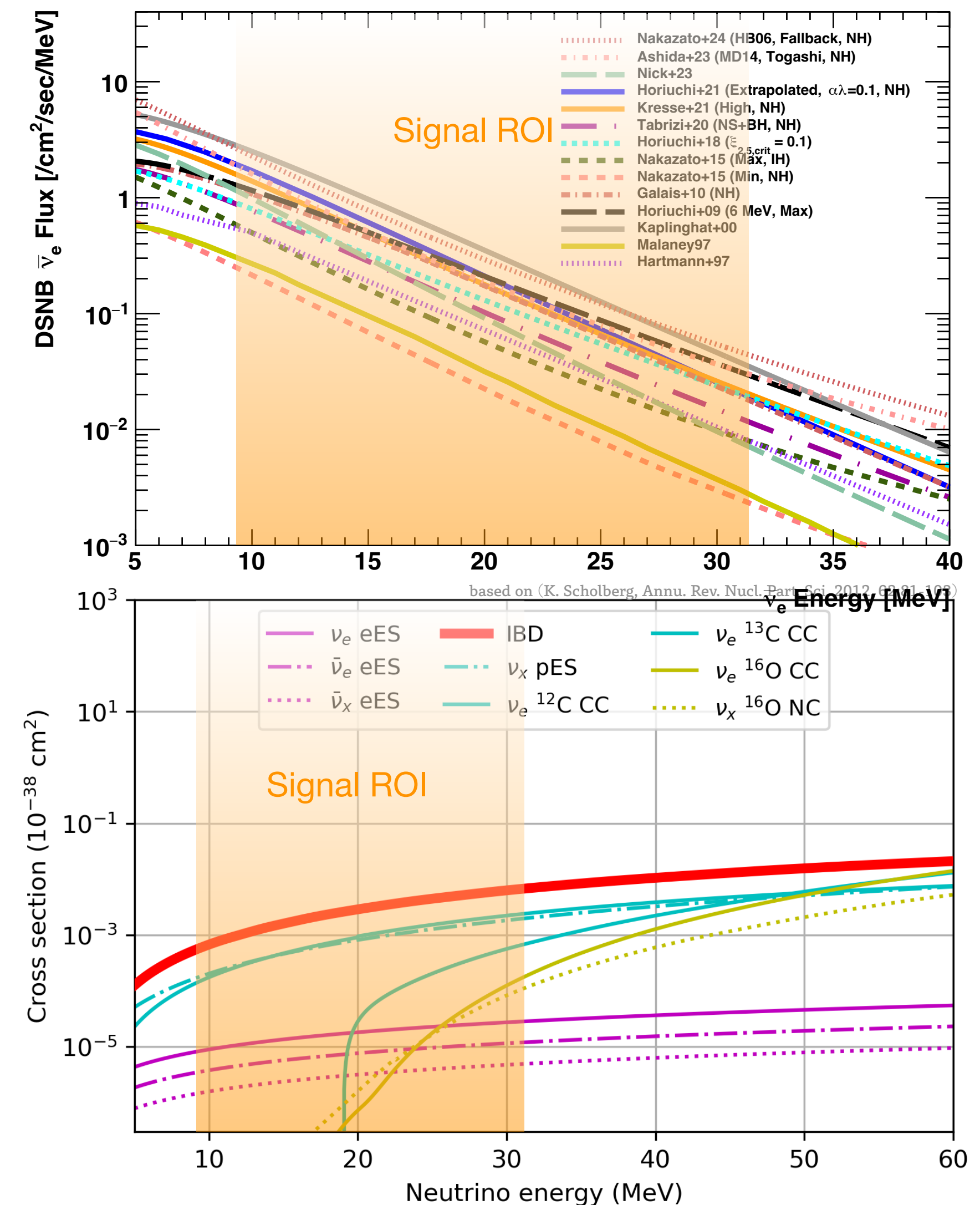
SK-Gd実験での 超新星背景ニュートリノ探索

SK-Gd実験で最初のSRN探索

SK-Gd実験の初期観測データ(SK-VI)を使ったSRN探索

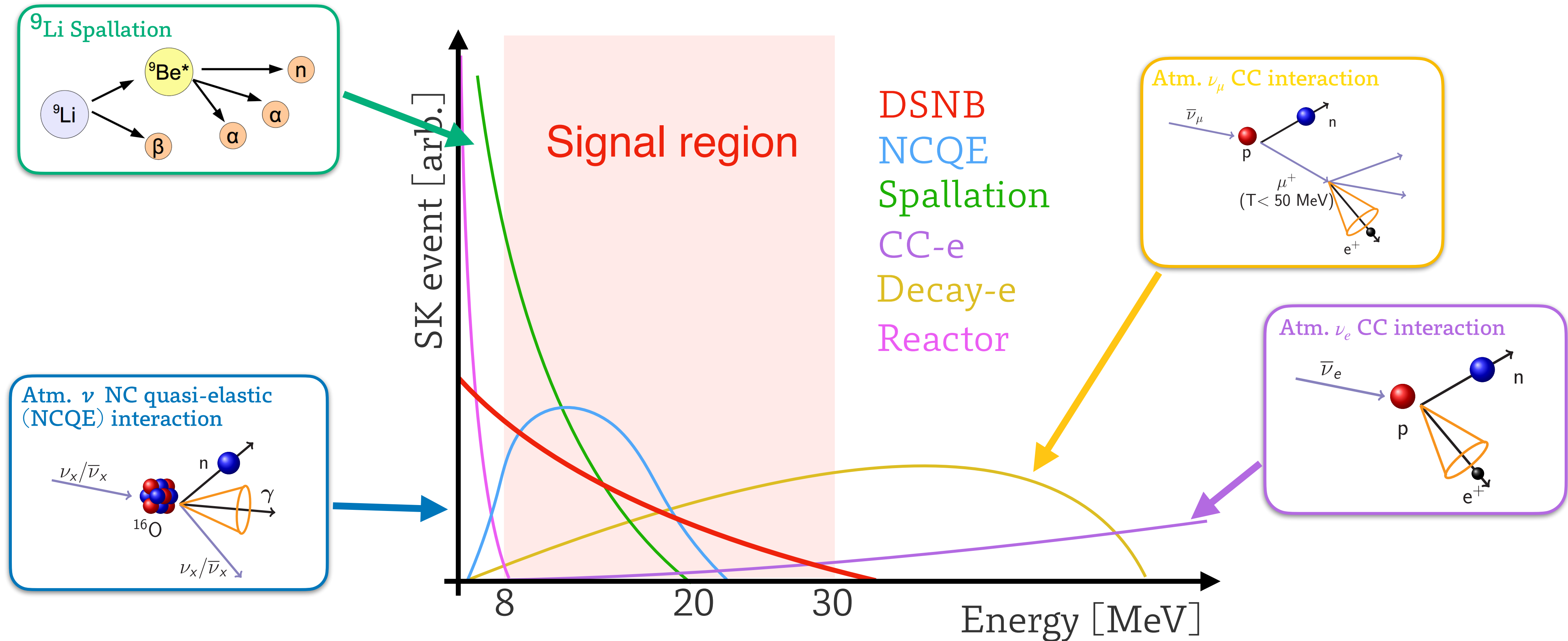
- **Analysis:**

- データセット : SK-VI (Live time: 552.2 days)
 - Gd濃度 : 0.01%
 - 探索ニュートリノエネルギー :
 - ▶ 9.3 ~ 31.3 MeV
(陽電子エネルギー : 8~30 MeV)



バックグラウンド事象

- 中性子数=1を要求→中性子を伴うバックグラウンド



➡ それぞれについてバックグラウンド除去方法の検討

除去効率・系統誤差の評価

大気ニュートリノ事象除去

• チェレンコフ角度分布

- 大気ニュートリノバックグラウンド除去
 - μ 、 π : 質量が大きい $\rightarrow \theta_C$ が小さくなる
 - NCQE: 複数ガンマ線イベント
 $\rightarrow \theta_C \sim 90^\circ$ で再構成

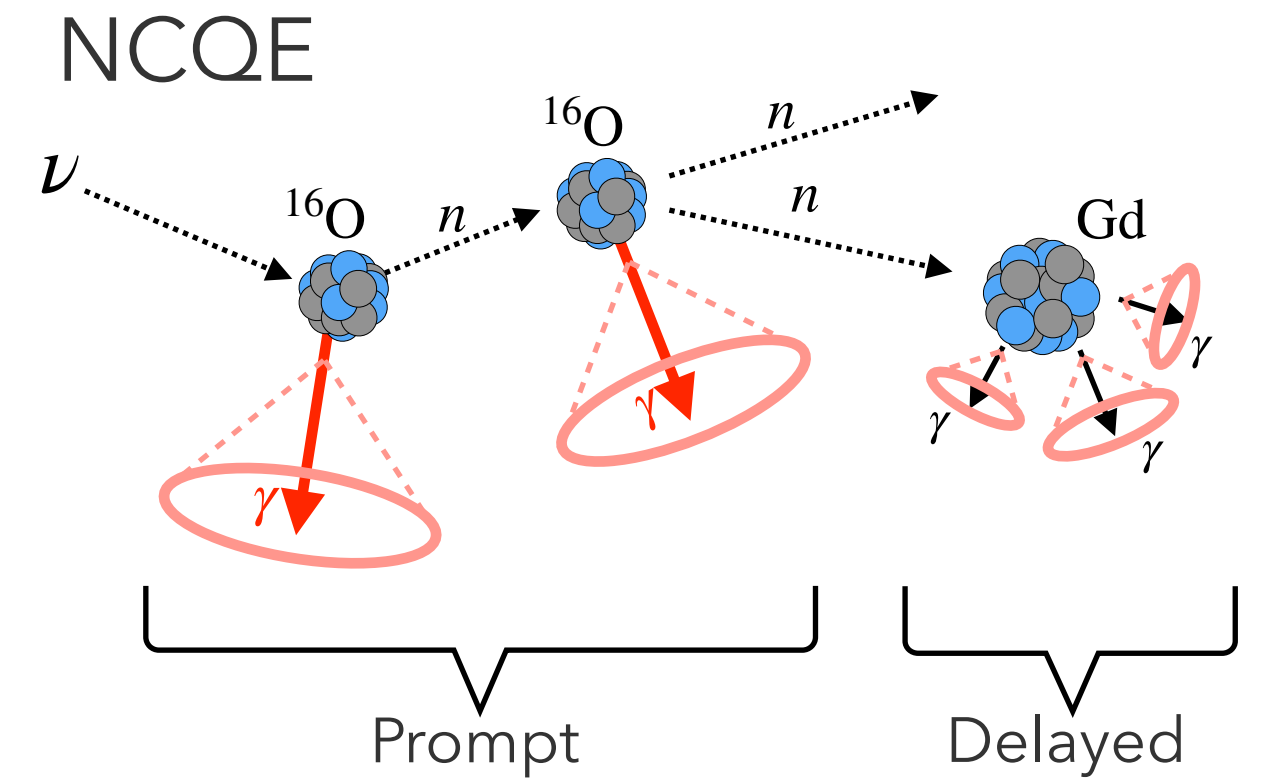
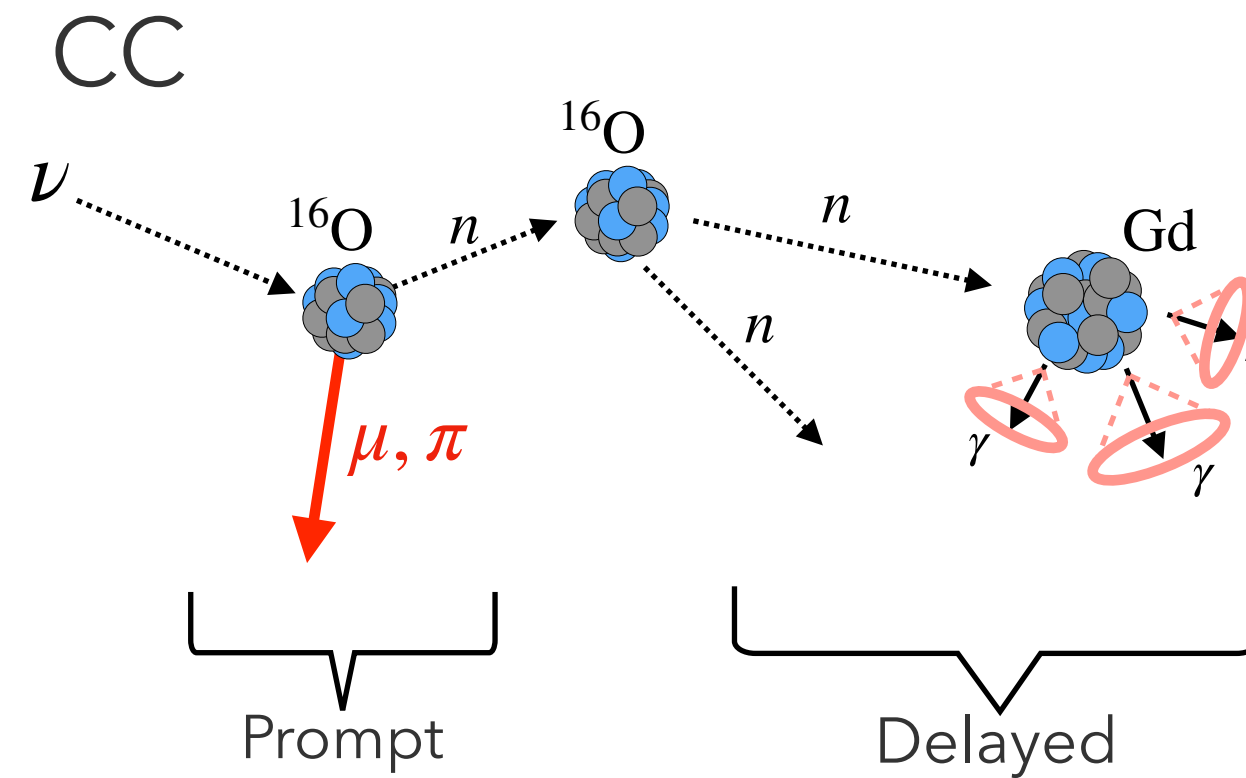
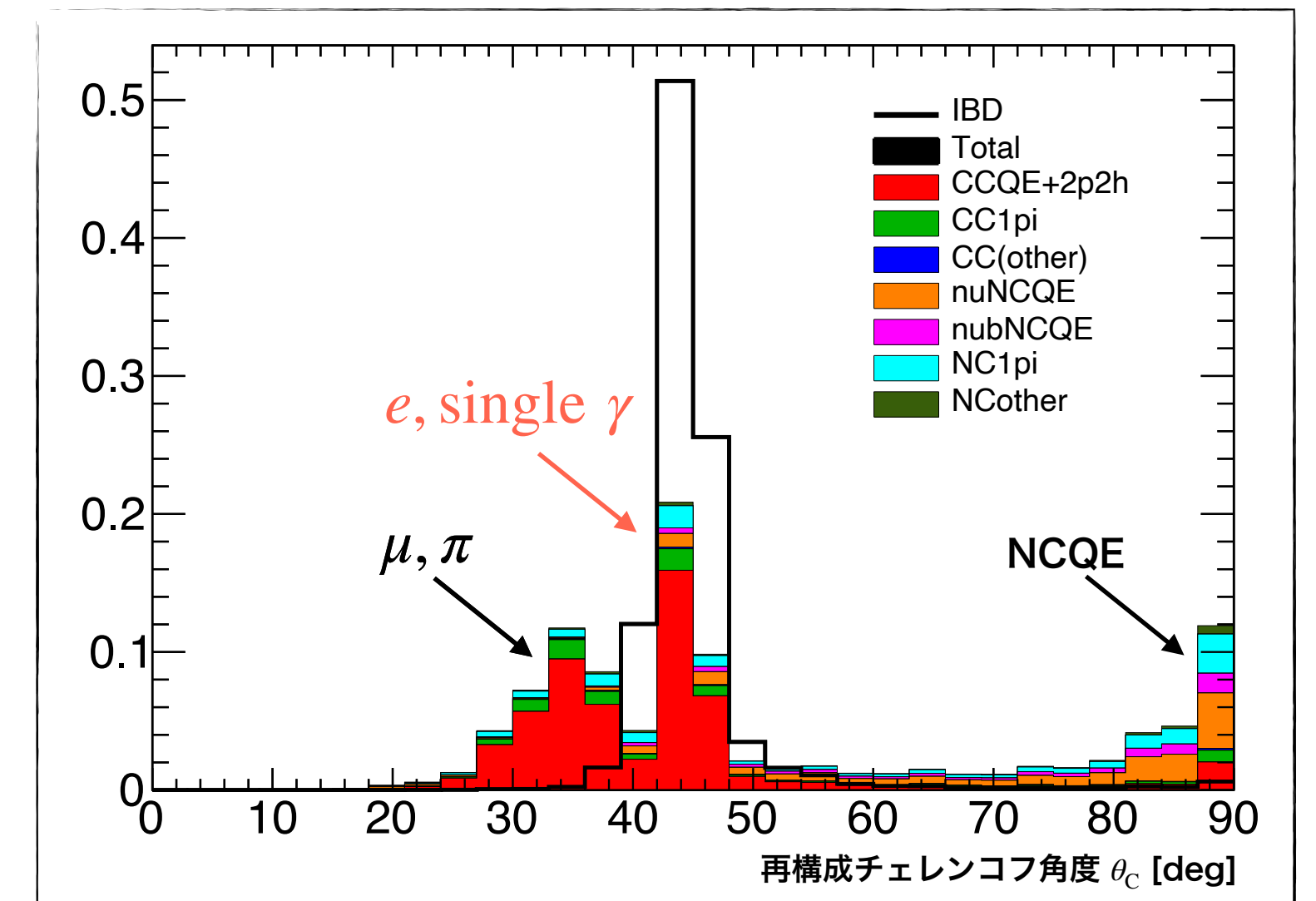
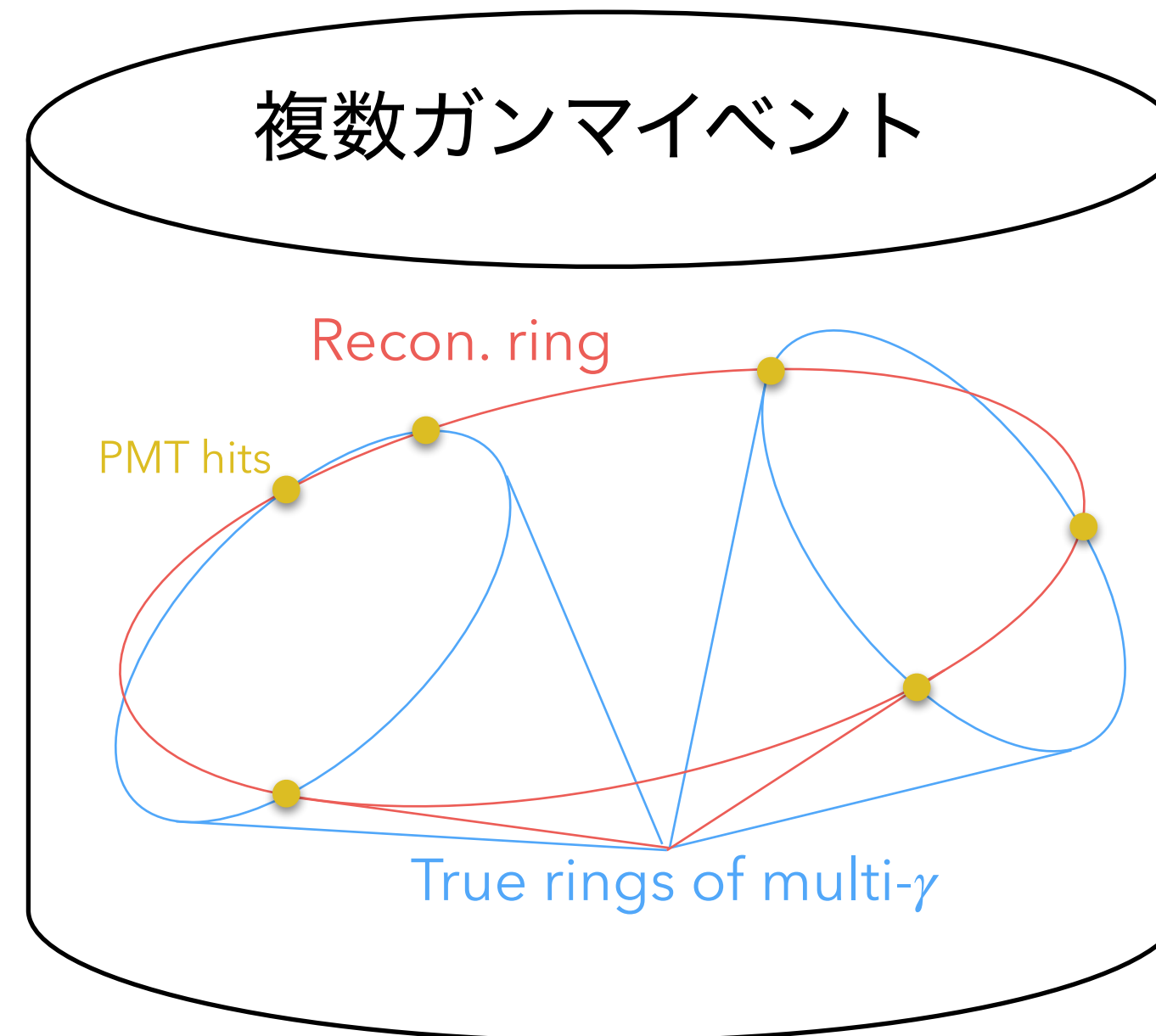


Diagram showing the Cherenkov angle θ_C for a particle moving through a medium. The particle is labeled e^+ .

$$\cos \theta_C = \frac{1}{n\beta}$$

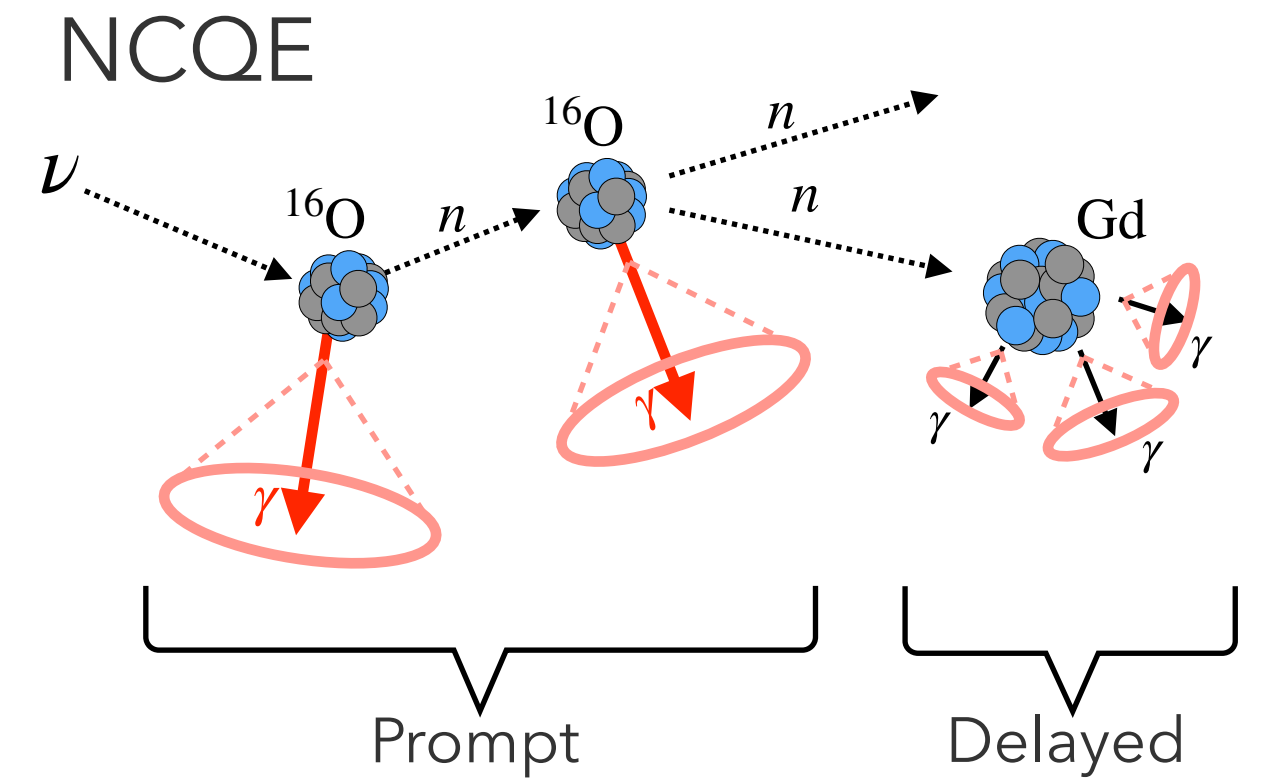
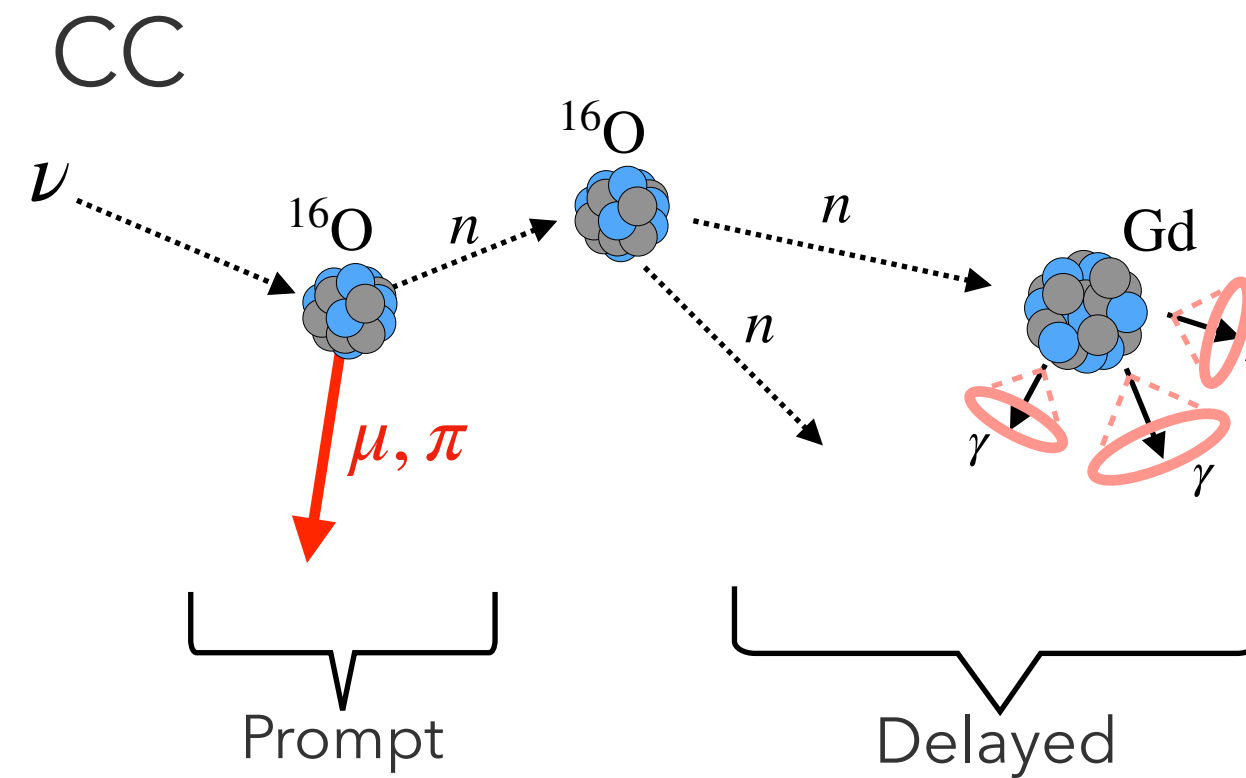
※電子の場合水中では $\theta_C \sim 42^\circ$



大気ニュートリノ事象除去

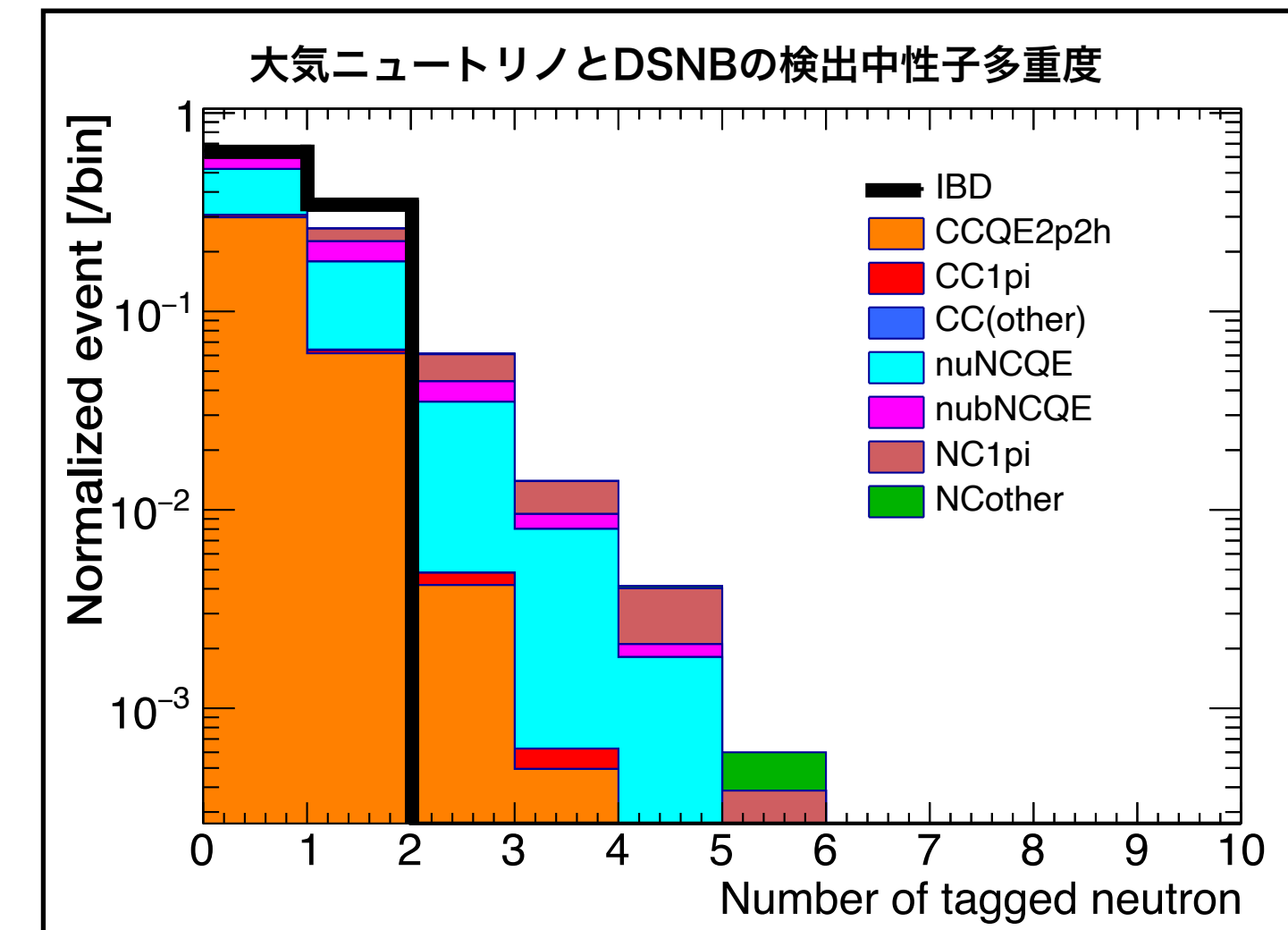
• チェレンコフ角度分布

- 大気ニュートリノバックグラウンド除去
 - μ 、 π : 質量が大きい $\rightarrow \theta_C$ が小さくなる
 - NCQE: 複数ガンマ線イベント
 $\rightarrow \theta_C \sim 90^\circ$ で再構成



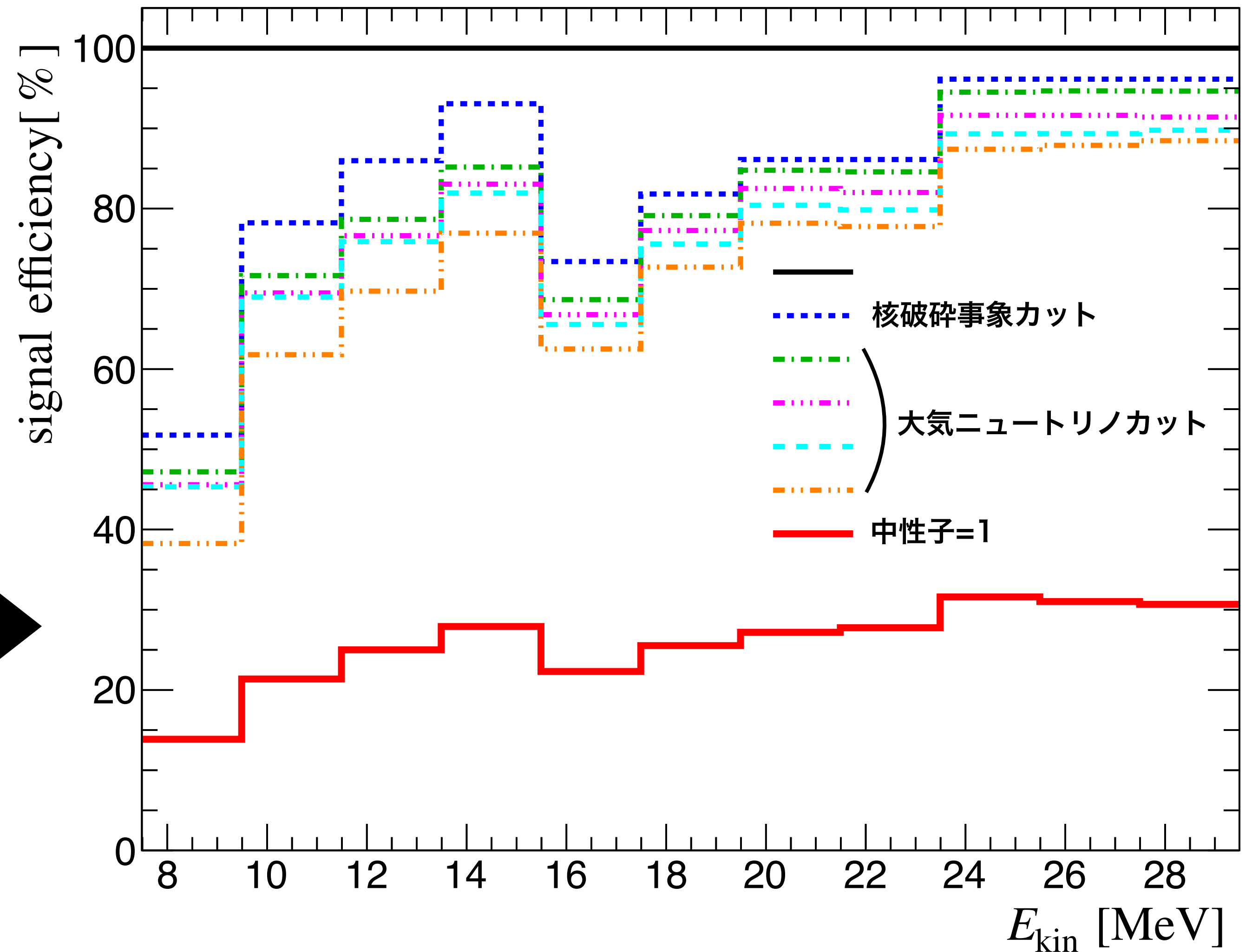
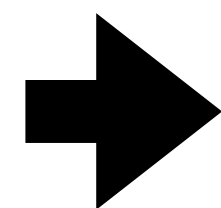
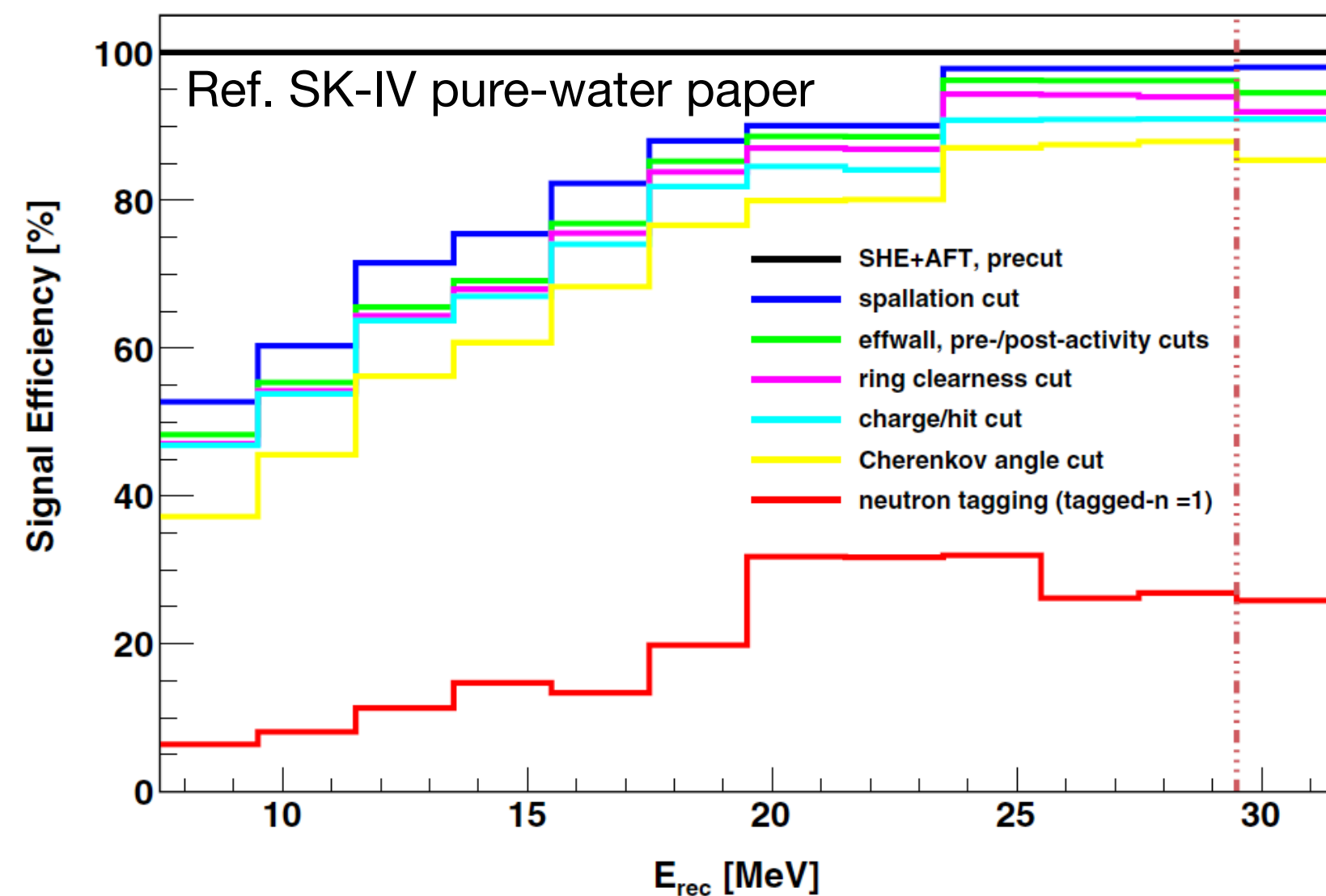
• 中性子多重度

- 大気ニュートリノの原子核反応で複数
- 多くの中性子を伴わないバックグラウンド
(主にmuon spallation)も大きく削減



Signal efficiency

- 主に核破碎バックグラウンドを削減するために低エネルギー側で低い
 - 核破碎カット+中性子タグで核破碎イベントを $\mathcal{O}(10^{-6})$ に削減
- Gdの恩恵でシンプルなカットでもSK-IV以上の信号効率を獲得

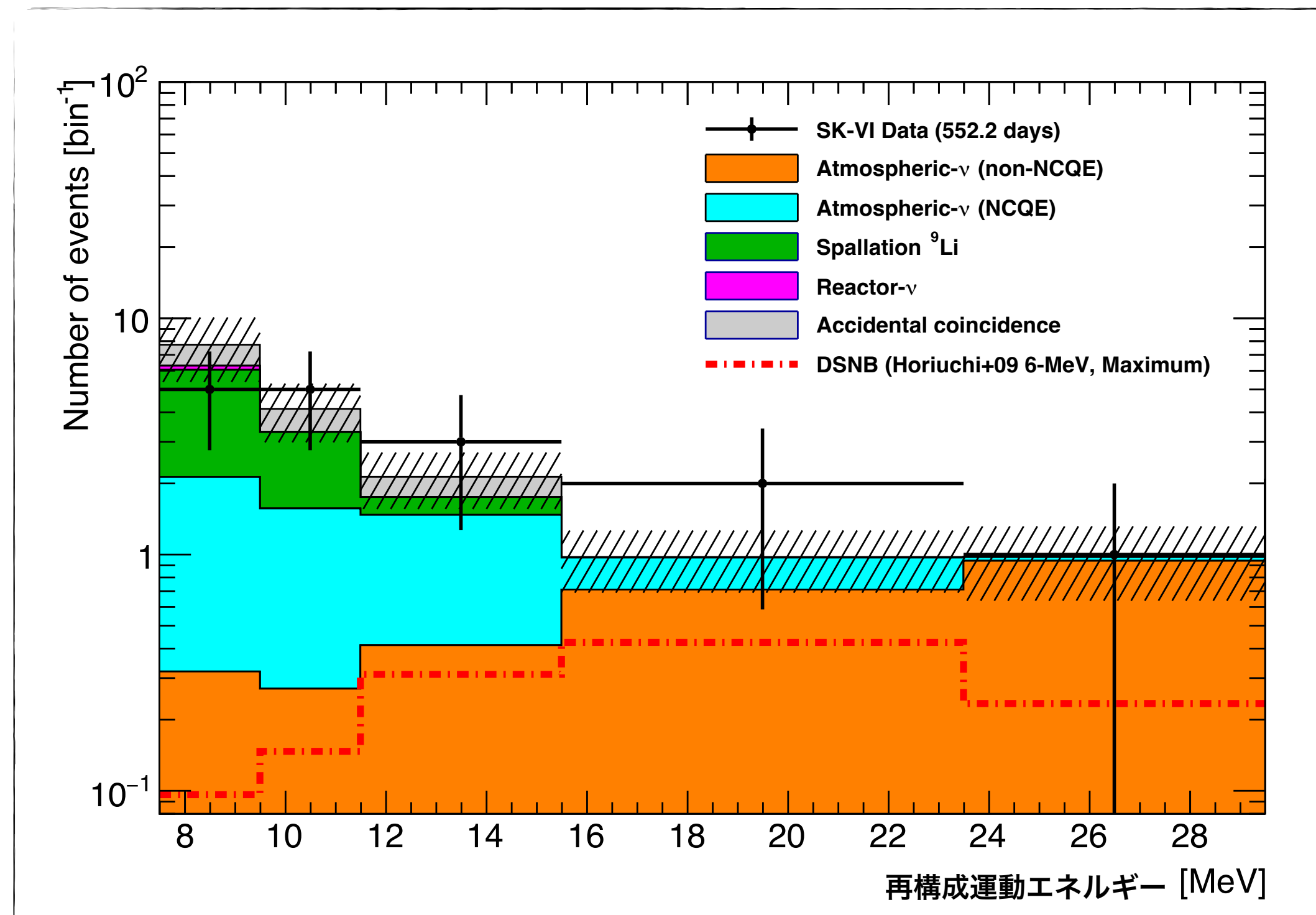


探索結果

探索結果

- **Compare data/background for bins divided based on background**

- 12-16 MeV: Final bin including Li9
- 16-24 MeV: Final bin including NCQE
- 24-30 MeV: Almost all are non-NCQE



Energy range [MeV]	Observed event	Expected background	p-value
7.5 - 9.5	5	7.73 ± 2.35	0.807
9.5 - 11.5	5	4.14 ± 1.15	0.398
11.5 - 15.5	3	2.13 ± 0.57	0.358
15.5 - 23.5	2	0.98 ± 0.29	0.256
23.5 - 29.5	1	0.98 ± 0.34	0.602

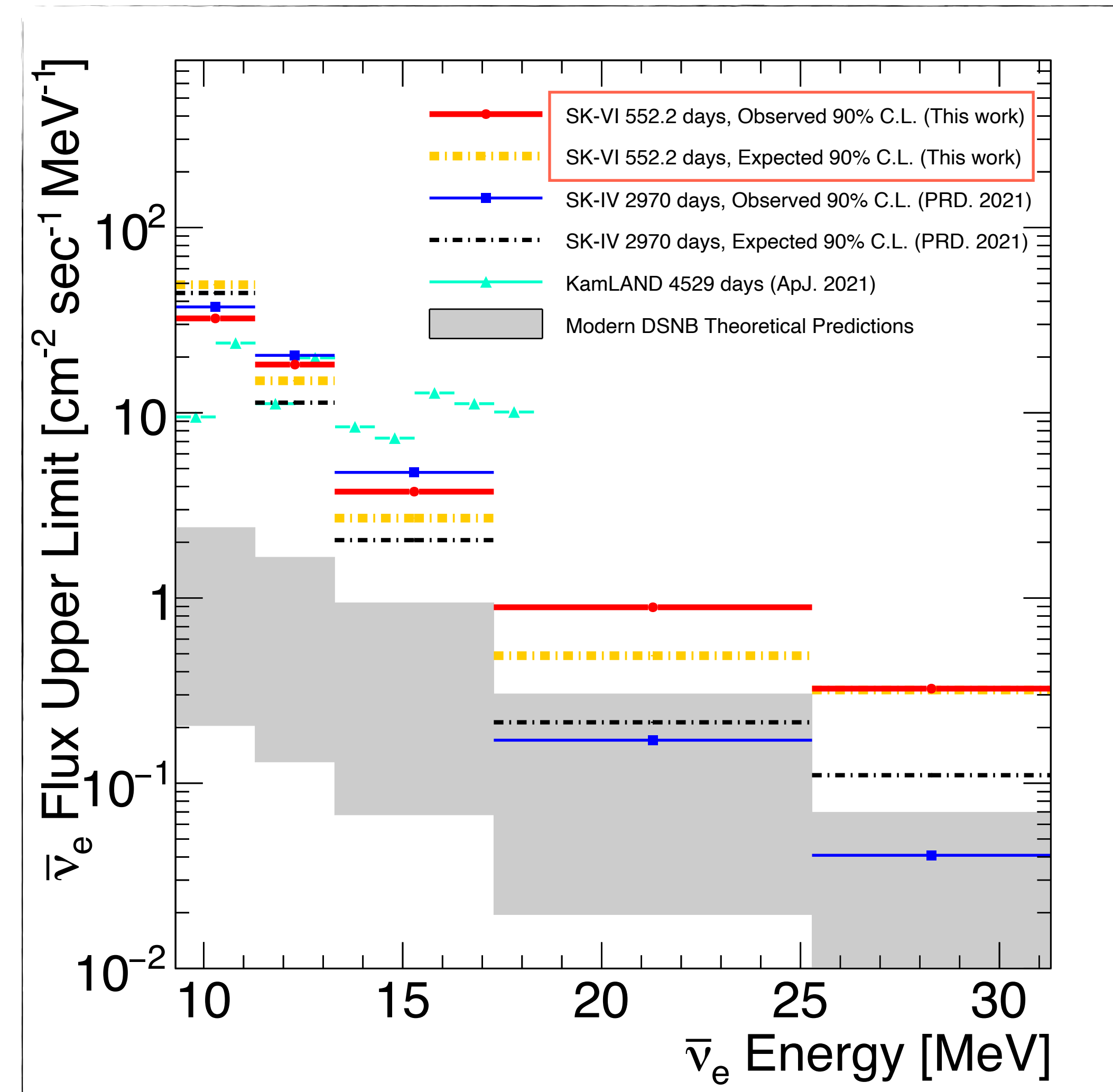
➡ No significant excess is observed

フラックス上限値

Model-independent $\bar{\nu}_e$ flux upper limitを評価

- 約20%の測定期間で純水期の2970日の感度に匹敵する結果
→SK-Gd実験がSRNに対して**世界一の感度**を持つことを示した
- 結果はAPJ Letterに投稿、published

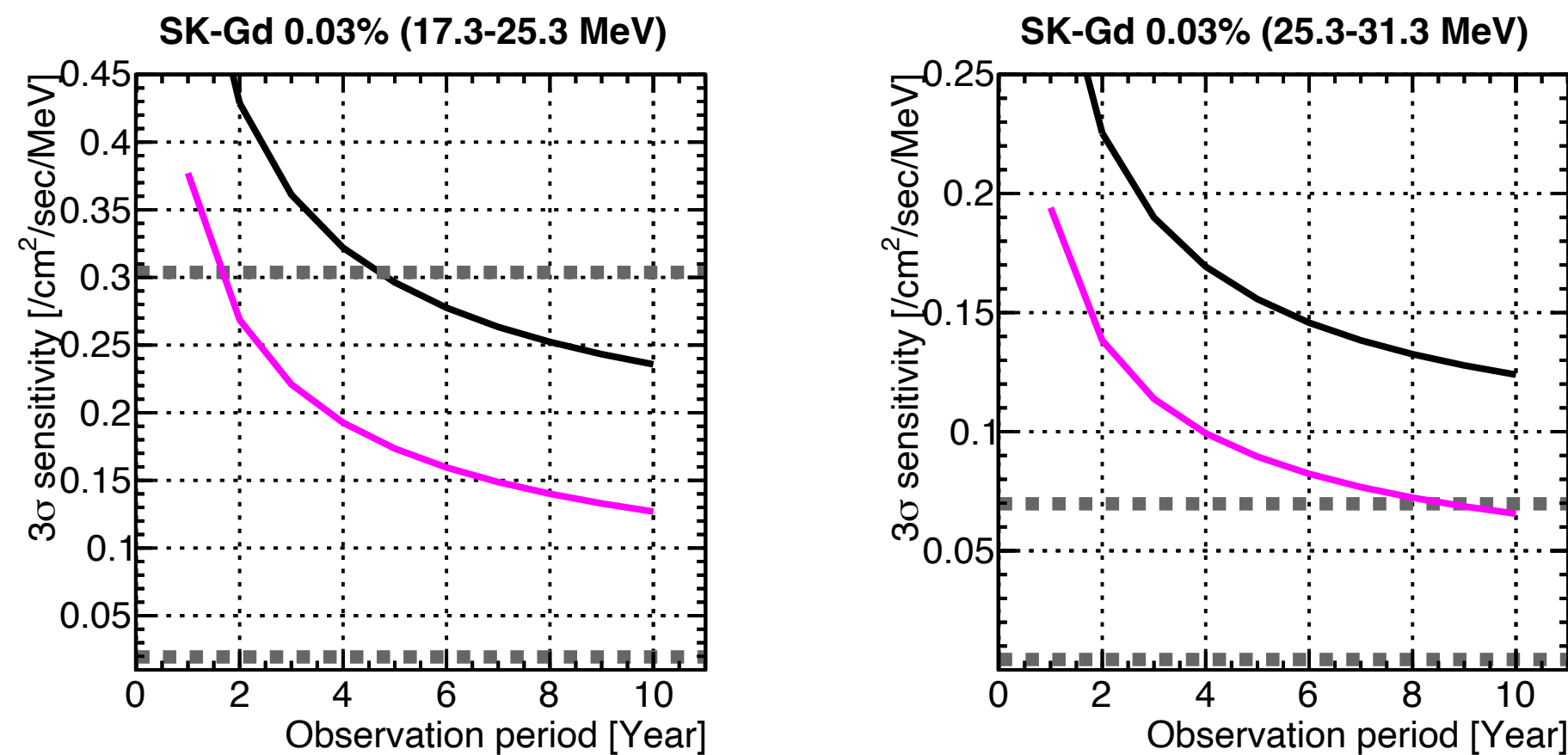
M. Harada et al. (The Super-Kamiokande Collaboration)
“Search for astrophysical electron antineutrinos in Super-Kamiokande with 0.01wt% gadolinium-loaded water”
M. Harada et al., (2023) ApJL 951 L27



感度計算

- 予想される解析改善
 - Gd濃度0.03%への向上
&機械学習を使ったneutron-ID
 - 大気νバックグラウンドの理解

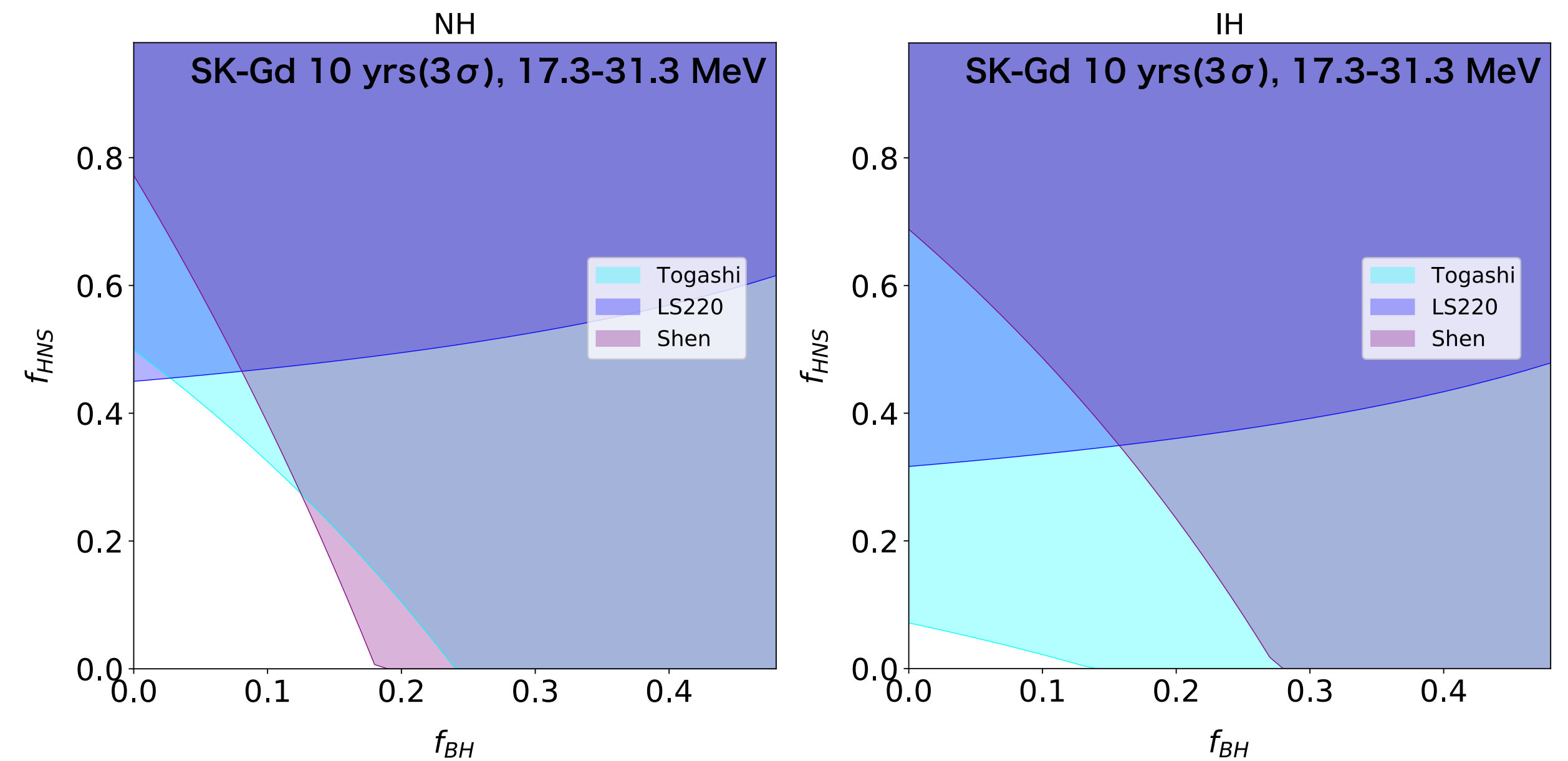
Future 3σ sensitivity (17.3-31.3 MeV)



重い中性子星(HNS)、ブラックホール(BH)の効果を考慮したSRNのニュートリノ数密度の定式
Ashida, Nakazato(2022)

$$\left\langle \frac{dN(E'_\nu)}{dE'_\nu} \right\rangle = f_{\text{BH}} \frac{dN_{\text{BH}}(E'_\nu)}{dE'_\nu} + (1 - f_{\text{BH}}) \left[f_{\text{HNS}} \frac{dN_{\text{HNS}}(E'_\nu)}{dE'_\nu} + (1 - f_{\text{HNS}}) \frac{dN_{\text{CNS}}(E'_\nu)}{dE'_\nu} \right]$$

Diagram illustrating the formula for the average neutrino number density $\left\langle \frac{dN(E'_\nu)}{dE'_\nu} \right\rangle$ considering the effects of Heavy Neutron Stars (HNS) and Black Holes (BH). The formula is: $\left\langle \frac{dN(E'_\nu)}{dE'_\nu} \right\rangle = f_{\text{BH}} \frac{dN_{\text{BH}}(E'_\nu)}{dE'_\nu} + (1 - f_{\text{BH}}) \left[f_{\text{HNS}} \frac{dN_{\text{HNS}}(E'_\nu)}{dE'_\nu} + (1 - f_{\text{HNS}}) \frac{dN_{\text{CNS}}(E'_\nu)}{dE'_\nu} \right]$. Annotations indicate: f_{BH} is the fraction of BH (Failed SN), f_{HNS} is the fraction of HNS, and the term in brackets represents the fraction of HNS.

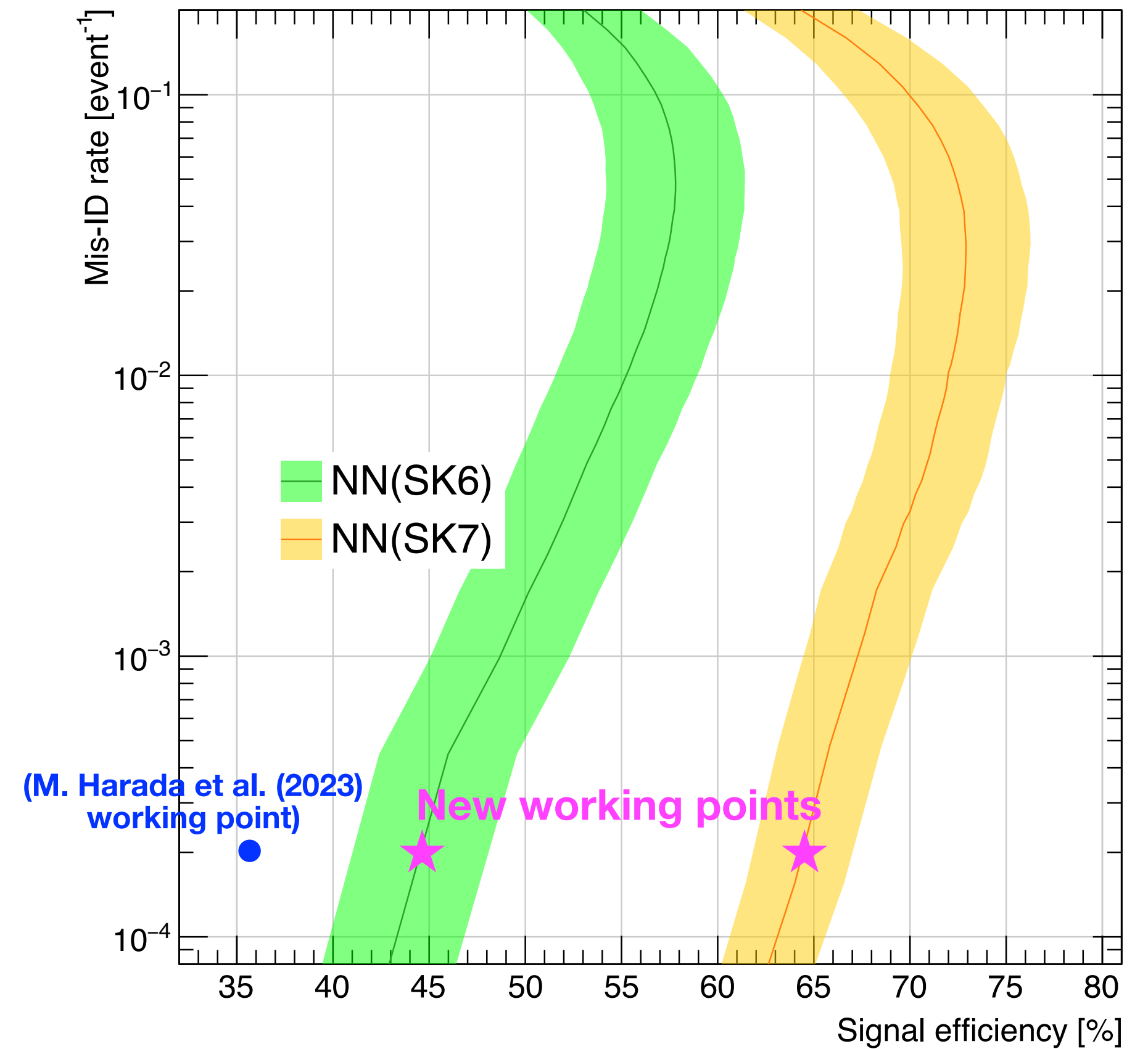
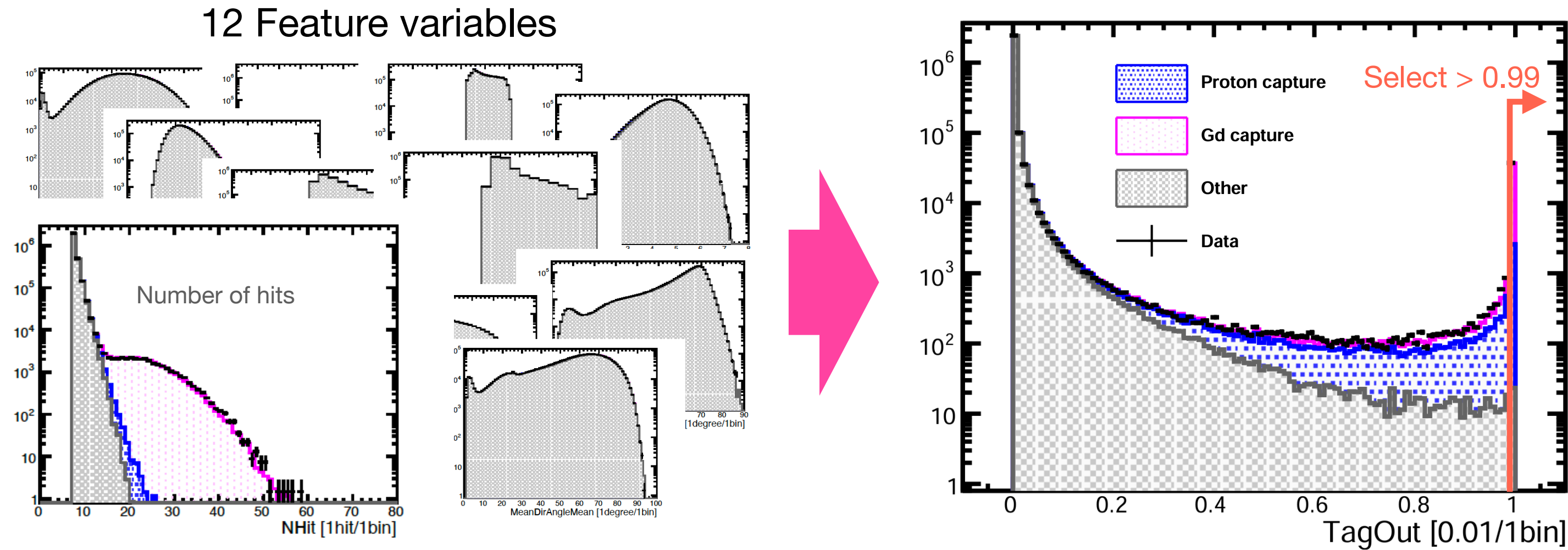


質量階層性やEOSによらず、パラメータ空間の一部を

3σの精度で検証可能であることを示した

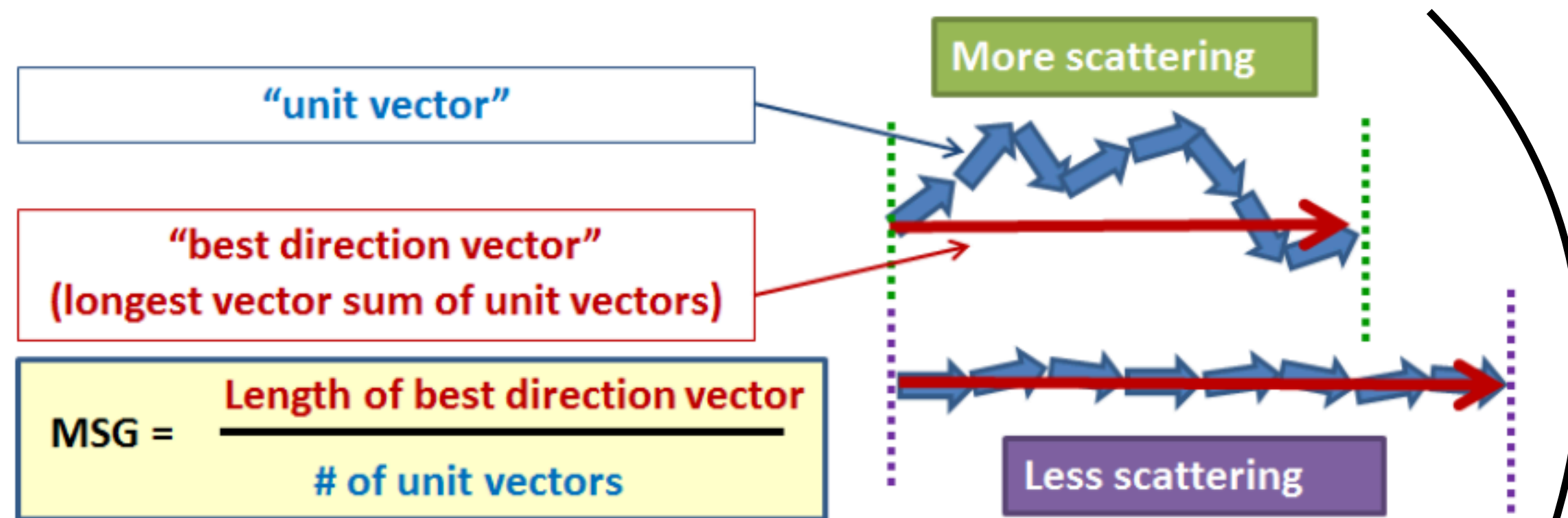
今後のSRN探索への展望

- これまでにSK-Gd実験が達成した改善
 - Gd濃度0.03%への向上&機械学習を使ったneutron-ID
→Published paper(2023)から1.8倍向上

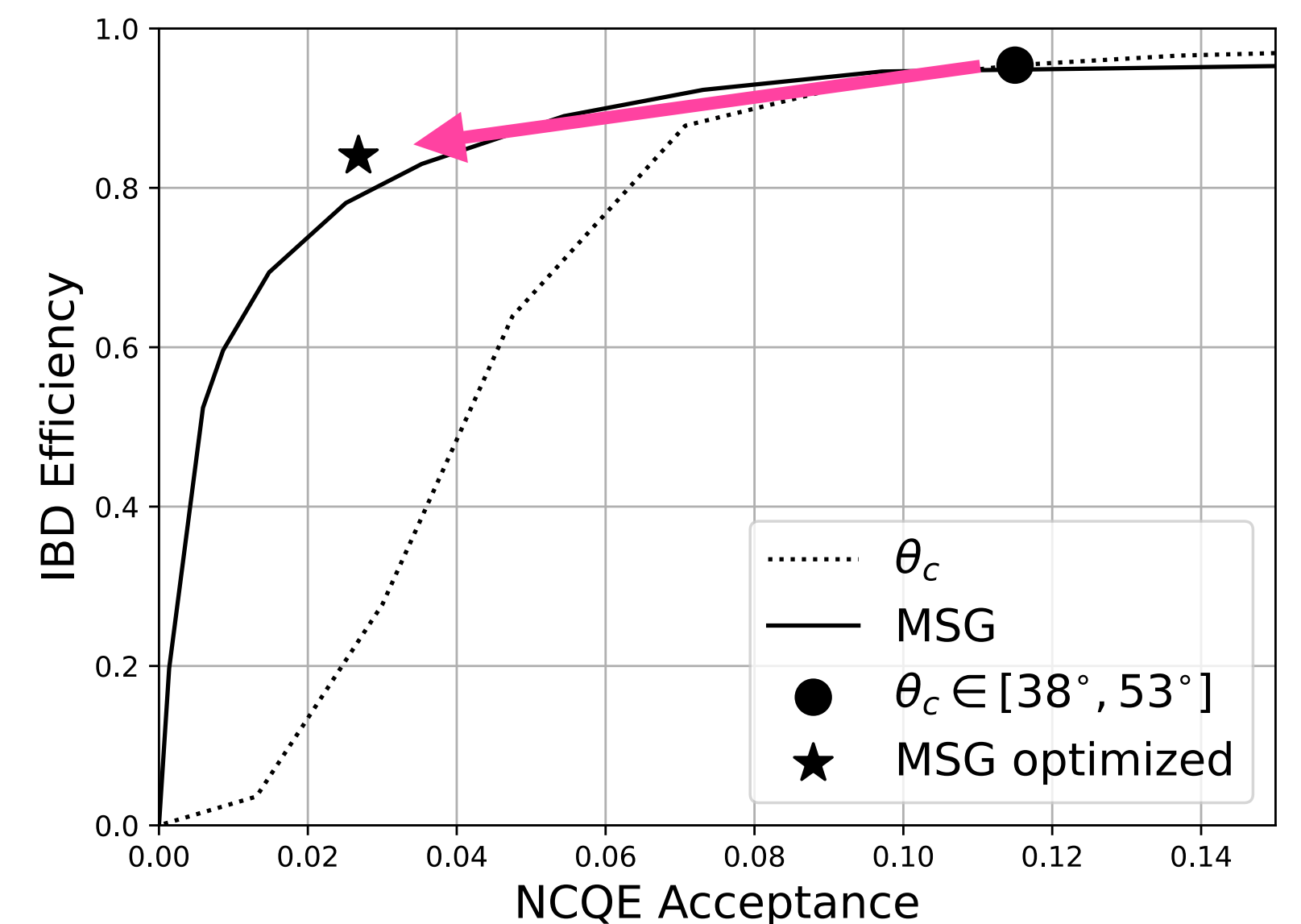
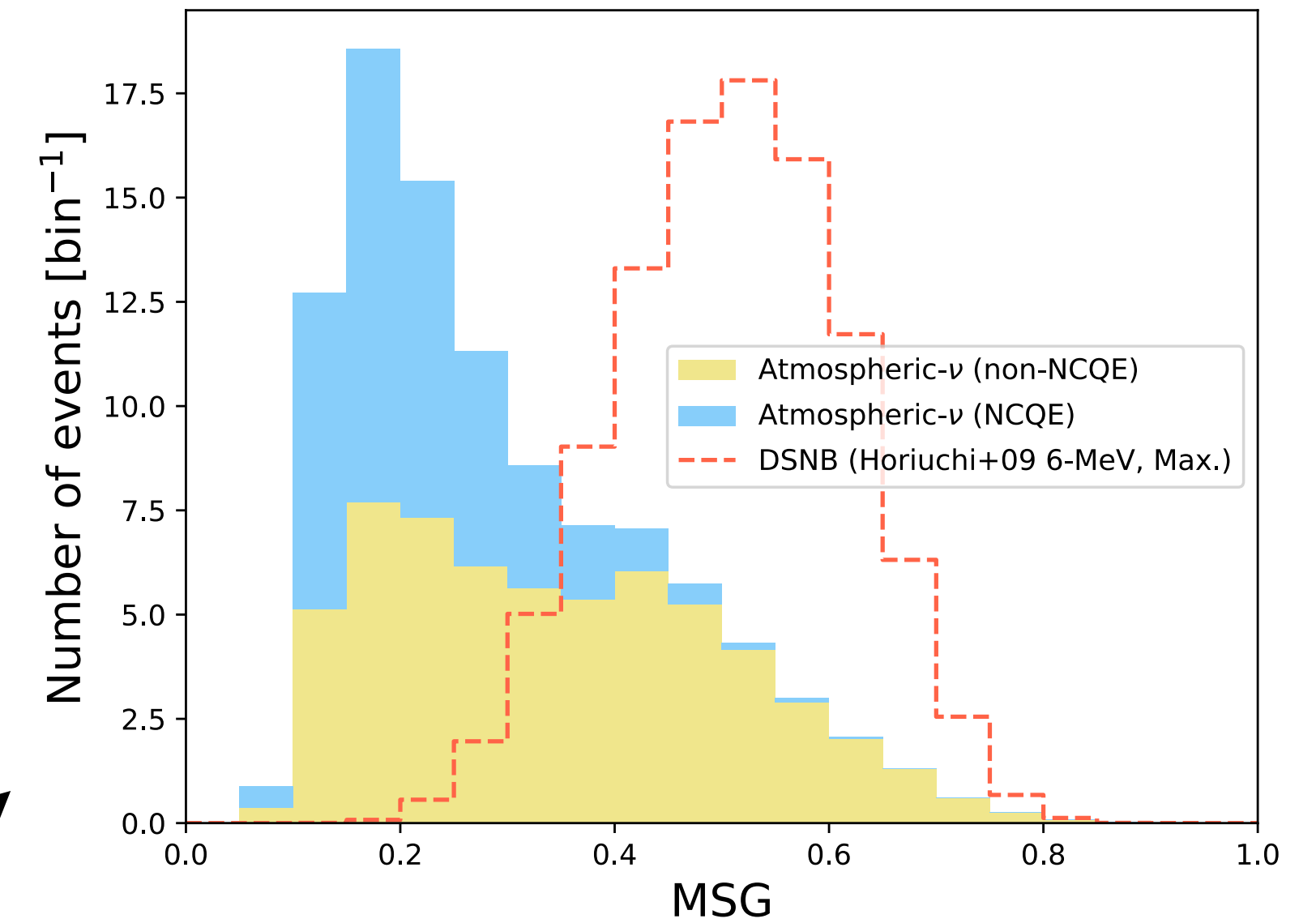


今後のSRN探索への展望

- これまでにSK-Gd実験が達成した改善
 - Gd濃度0.03%への向上&機械学習を使ったneutron-ID
→Published paper(2023)から1.8倍向上
 - 大気 ν バックグラウンドの理解
 - より適切なモデルの選定
 - NCQEイベント除去手法の確立
→80%削減

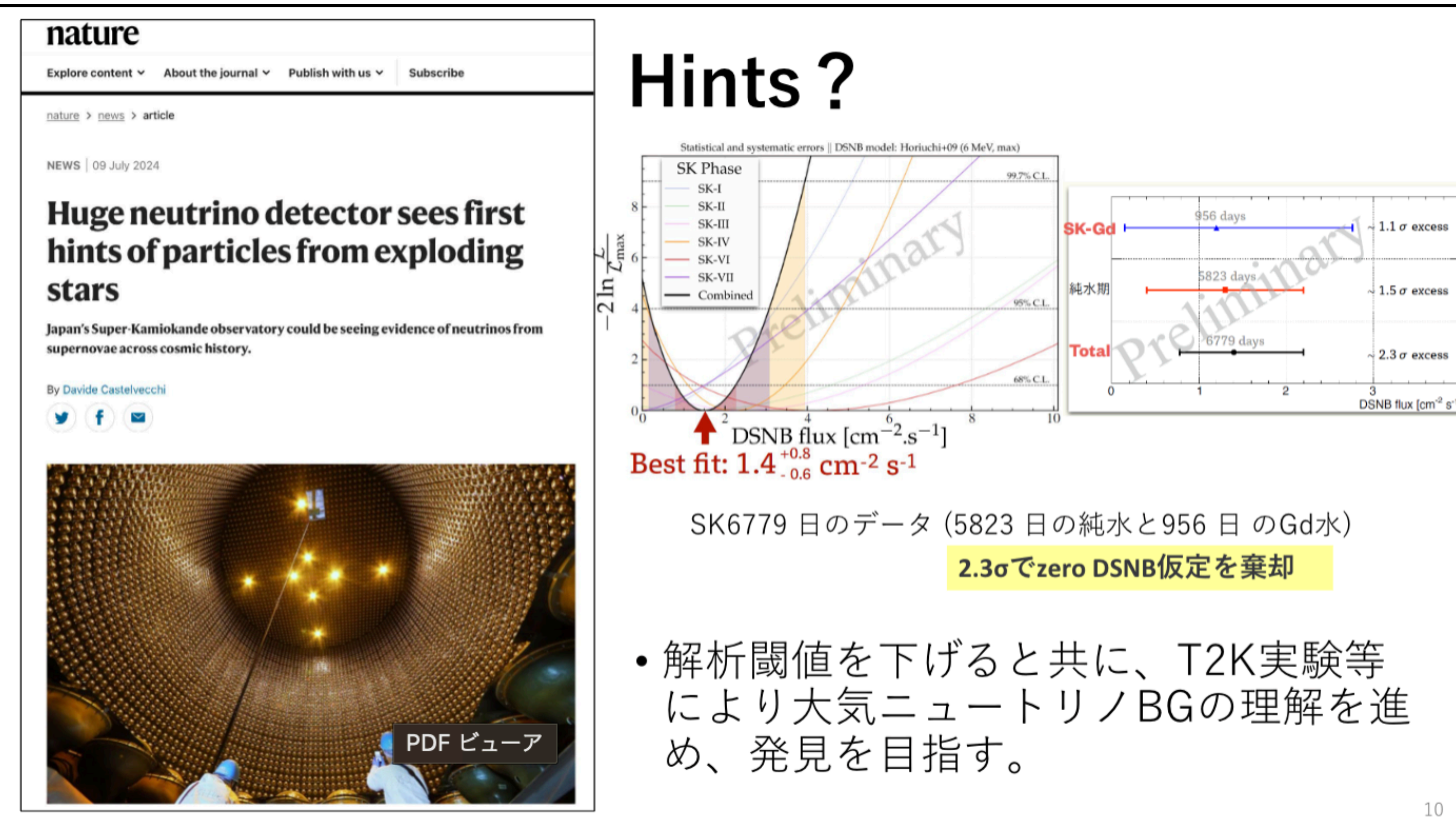


e.g.) $E=[12,24]$ MeV



今後のDSNB探索への展望

昨日の関谷さんのスライドより

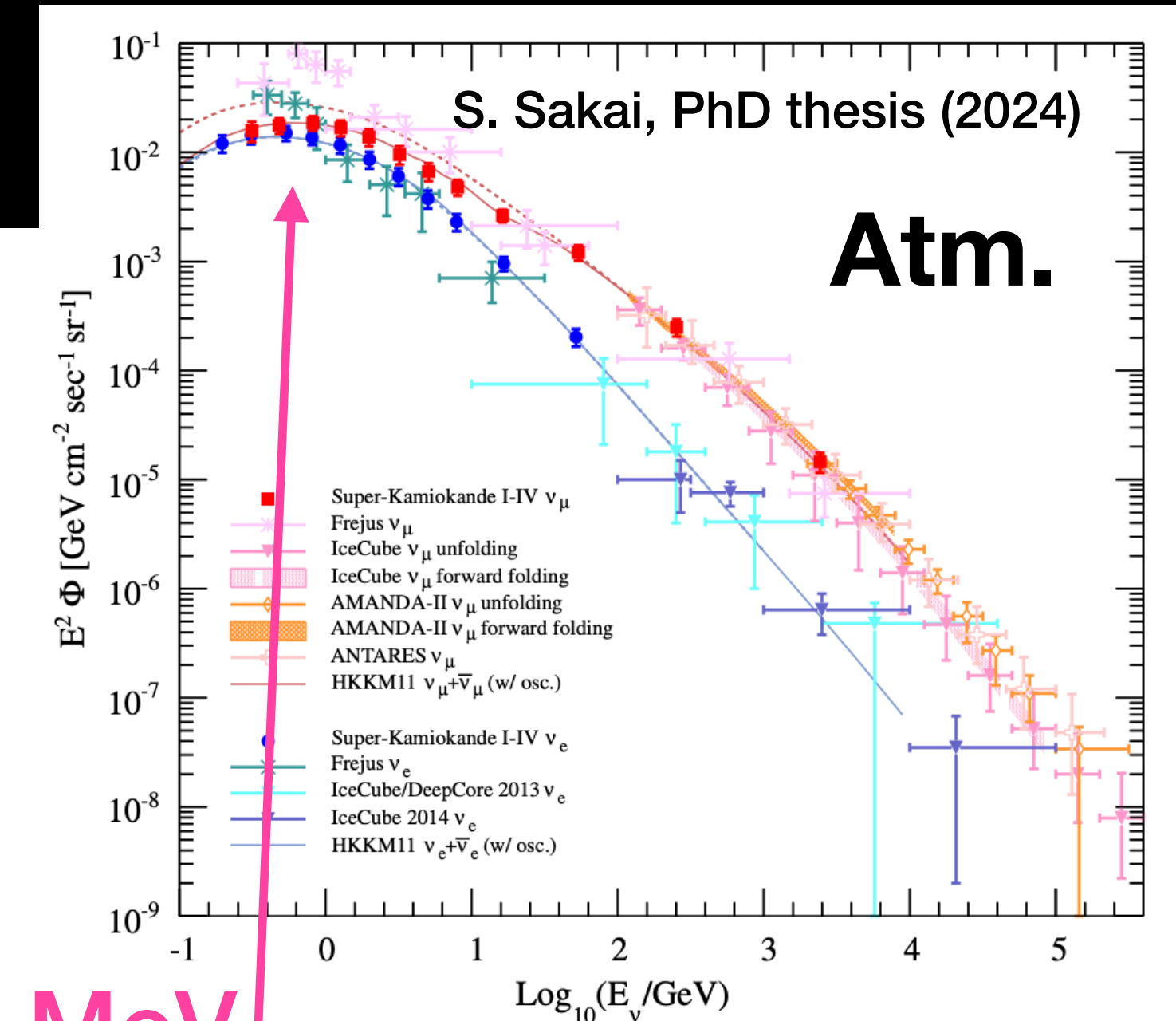


最新のDSNB探索結果

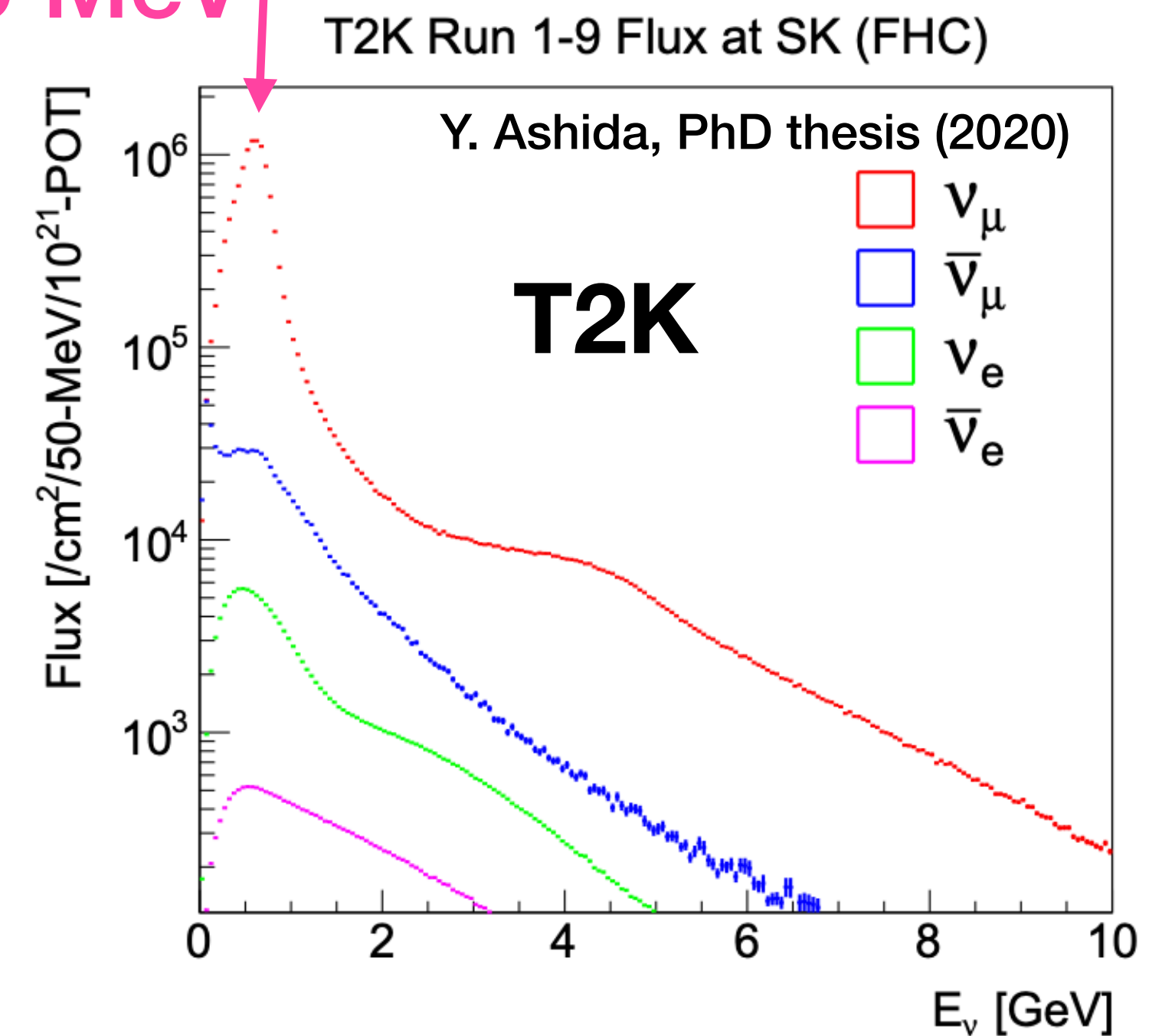
- NEUTRINO国際会議での発表
- すでに純水期~3000 (~6000) dayを更新(と同等)の感度を得ている
- 純水期とmergeすることで2.3 σ でzero DSNB hypothesisを棄却
- 神岡でDSNB発見に注目が集まっている、と信じて、初観測を目指し研究している

今後のSRN探索への展望

- T2K実験からのフィードバックが重要
 - H₂Oターゲットを用いたAtm- ν と似たエネルギーピークを持つ”control sample”
 - 解析手法によるアプローチ
 - バックグラウンド理解に対するアプローチ
にvalidation, model comparisonが必要
- 特に中性子多重度とNCQEのvisible energyの不定性が
>16 MeVで大半になっている
- T2K with SK-Gdでの中性子多重度の系統的測定が
発見の鍵を握っている



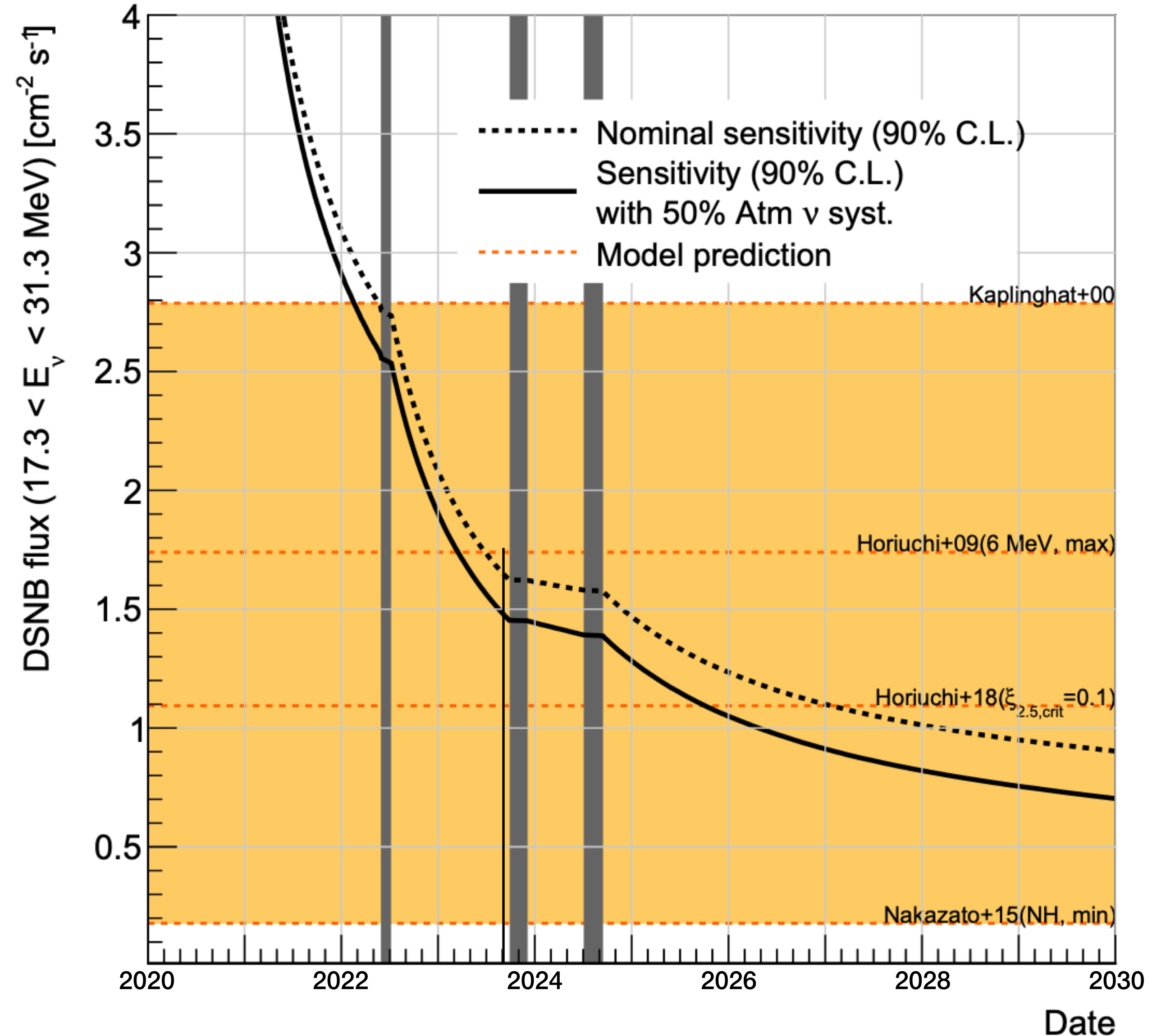
~ 600 MeV



今後のSRN探索への展望

- **Future rejection sensitivity**

- 期待される系統誤差削減見込
- 近年発表されている大半のモデルについて、パラメータ含め検証可能
- 今後SK-Gdでモチベーションがある validationはHyper-Kでも恩恵あり
 - 神岡でSRN初観測を！



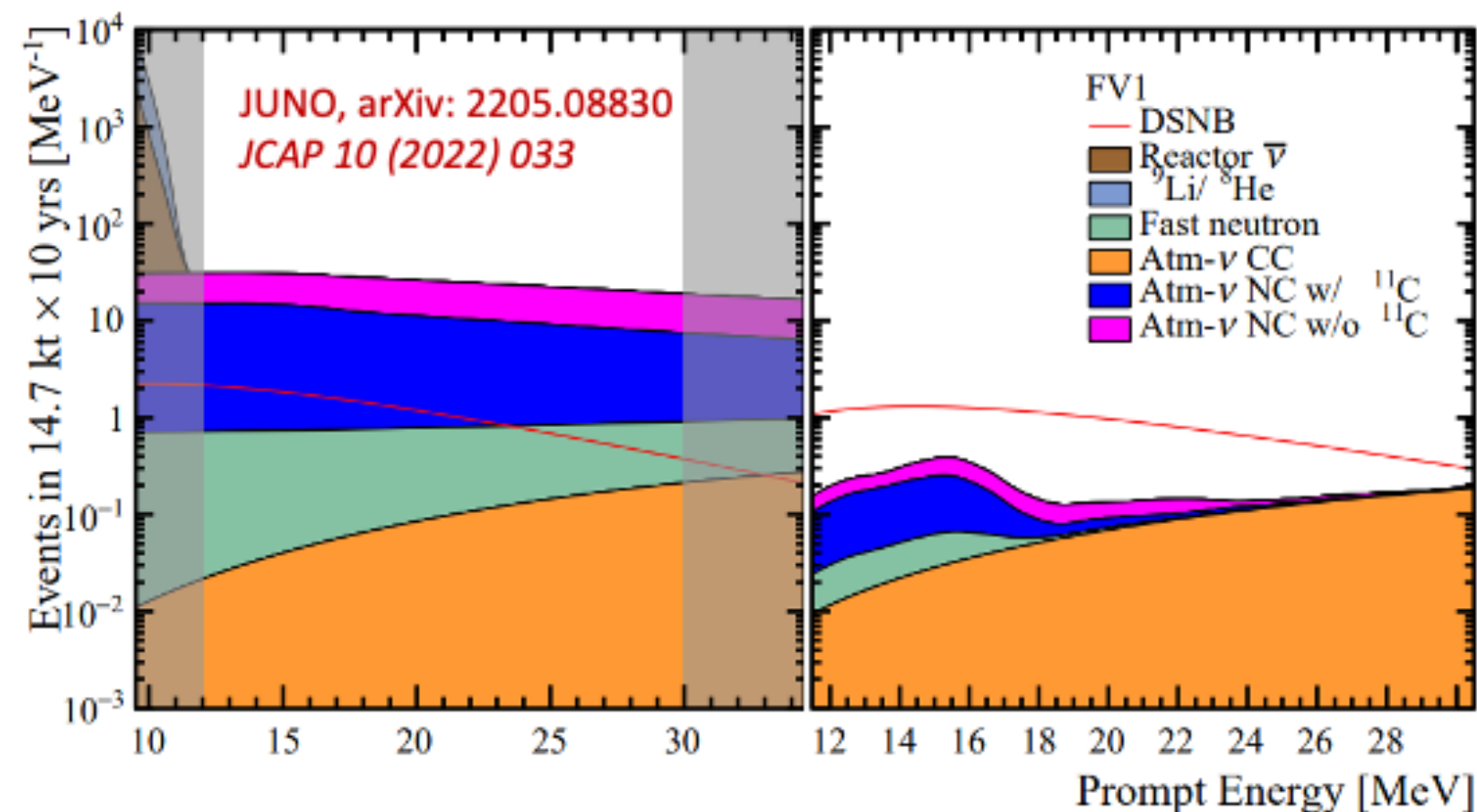
Backups

Future experiments

• JUNO



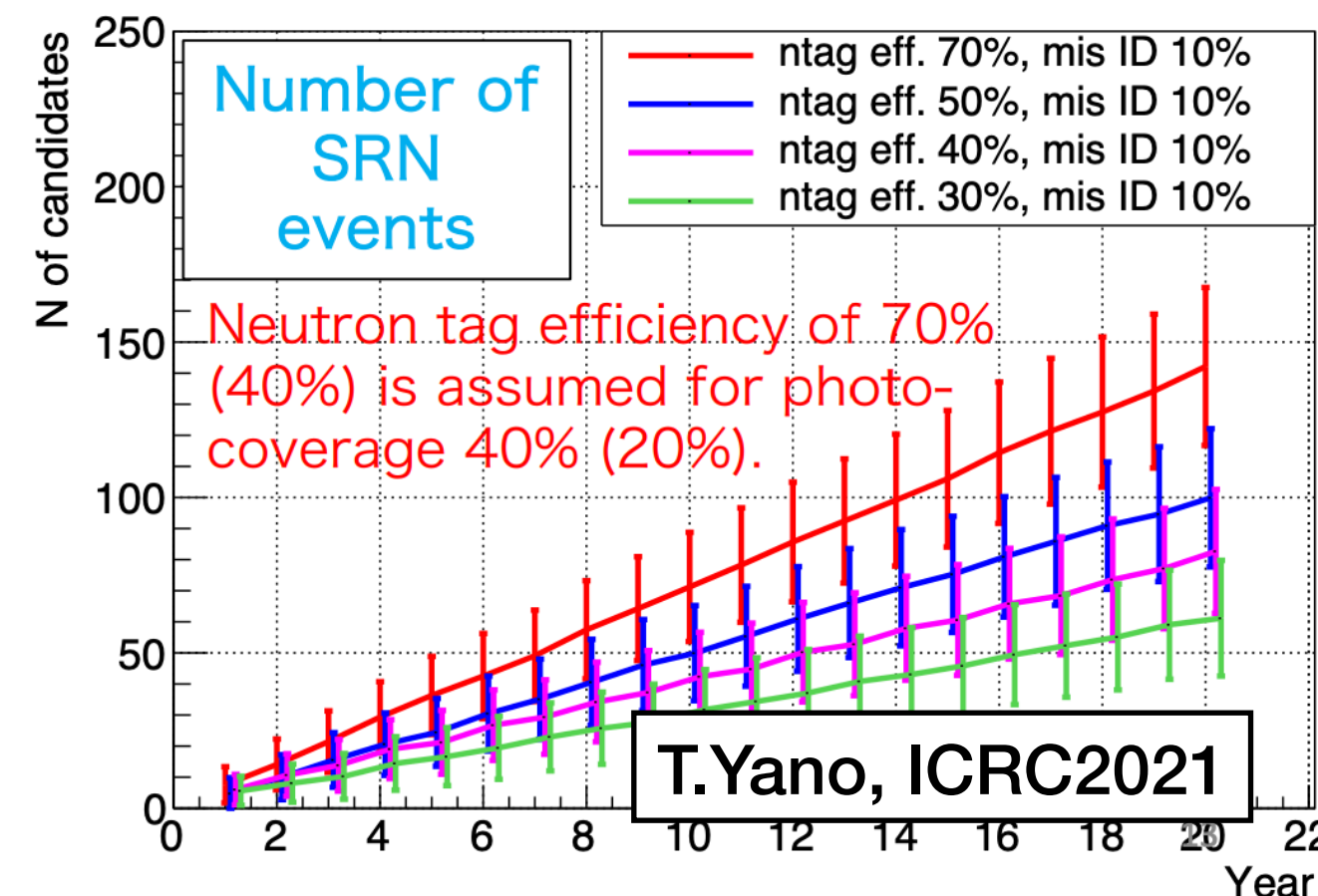
- 2 ktons LS@Jianmen
- Start from 2025
- 80% of signal efficiency
→ S/B ~ 3.5
- 6σ with 10yr for optimistic pred. (?)



• Hyper-Kamiokande



- 258 ktons WC
- Start from 2027
- expected to $>4\sigma$ in 10 yr due to its largest volume and upgraded photosensor



• SNO+



- 780 tons LS @SNOLAB
- Start from
- 7000 m.w.e. underground
→ Quite small cosmic-muon background
- Investigate lowest energy of DSNB, while existence of reactor neutrino background.

JUNO

20 kton LS detector@Jianmen

Start from 2024

80% of signal efficiency

→ S/B ~ 3.5

6σ with 10 yr for optimistic prediction

今後のSRN探索への展望

