

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

原田 将之(岡山大学)

8月20, 21日 第一回瀬戸内ニュートリノ研究会

(論文が出ました)

**Search for astrophysical electron antineutrinos in Super-Kamiokande
with 0.01wt% gadolinium-loaded water**

The Astrophysical Journal Letters (accepted)

この前論文が出ました

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 951:L27 (8pp), 2023 July 10

<https://doi.org/10.3847/2041-8213/acdc9e>

© 2023. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.

OPEN ACCESS



Search for Astrophysical Electron Antineutrinos in Super-Kamiokande with 0.01% Gadolinium-loaded Water

M. Harada¹, K. Abe^{2,3}, C. Bronner², Y. Hayato^{2,3}, K. Hiraide^{2,3}, K. Hosokawa², K. Ieki^{2,3}, M. Ikeda^{2,3}, J. Kameda^{2,3}, Y. Kanemura², R. Kaneshima², Y. Kashiwagi², Y. Kataoka^{2,3}, S. Miki², S. Mine^{2,4}, M. Miura^{2,3}, S. Moriyama^{2,3}, Y. Nakano², M. Nakahata^{2,3}, S. Nakayama^{2,3}, Y. Noguchi², K. Okamoto², K. Sato², H. Sekiya^{2,3}, H. Shiba², K. Shimizu², M. Shiozawa^{2,3}, Y. Sonoda², Y. Suzuki², A. Takeda^{2,3}, Y. Takemoto^{2,3}, A. Takenaka², H. Tanaka^{2,3}, S. Watanabe², T. Yano², S. Han⁵, T. Kajita^{3,5,6}, K. Okumura^{3,5}, T. Tashiro⁵, T. Tomiya⁵, X. Wang⁵, S. Yoshida⁵, G. D. Megias⁷, P. Fernandez⁸, L. Labarga⁸, N. Ospina⁸, B. Zaldivar⁸, B. W. Pointon^{9,10}, E. Kearns^{3,11}, J. L. Raaf¹¹, L. Wan¹¹, T. Wester¹¹, J. Bian⁴, N. J. Griskevich⁴, S. Locke⁴, M. B. Smy^{3,4}, H. W. Sobel^{3,4}, V. Takhistov^{4,12}, A. Yankelevich⁴, J. Hill¹³, S. H. Lee¹⁴, D. H. Moon¹⁴, R. G. Park¹⁴, B. Bodur¹⁵, K. Scholberg^{3,15}, C. W. Walter^{3,15}, A. Beauchêne¹⁶, O. Drapier¹⁶, A. Giampaolo¹⁶, Th. A. Mueller¹⁶, A. D. Santos¹⁶, P. Paganini¹⁶, B. Quilain¹⁶, T. Ishizuka¹⁷, T. Nakamura¹⁸, J. S. Jang¹⁹, J. G. Learned²⁰, K. Choi²¹, N. Iovine²¹, S. Cao²², L. H. V. Anthony²³, D. Martin²³, M. Scott²³, A. A. Sztuc²³, Y. Uchida²³, V. Berardi²⁴, M. G. Catanesi²⁴, E. Radicioni²⁴, N. F. Calabria²⁵, A. Langella²⁵, L. N. Machado²⁵, G. De Rosa²⁵, G. Collazuol²⁶, F. Iacob²⁶, M. Lamoureux²⁶, M. Mattiazzi²⁶, L. Ludovici²⁷, M. Gonin⁶, G. Pronost⁶, C. Fujisawa²⁸, Y. Maekawa²⁸, Y. Nishimura²⁸, R. Okazaki²⁸, R. Akutsu¹², M. Friend¹², T. Hasegawa¹², T. Ishida¹², T. Kobayashi¹², M. Jakkapu¹², T. Matsubara¹², T. Nakadaira¹², K. Nakamura^{3,12}, Y. Oyama¹², K. Sakashita¹², T. Sekiguchi¹², T. Tsukamoto¹², N. Bhuiyan²⁹, G. T. Burton²⁹, F. Di Lodovico²⁹, J. Gao²⁹, A. Goldsack²⁹, T. Katori²⁹, J. Migenda²⁹, Z. Xie²⁹, S. Zsoldos^{3,29}, Y. Kotsar³⁰, H. Ozaki³⁰, A. T. Suzuki³⁰, Y. Takagi³⁰, Y. Takeuchi^{3,30}, J. Feng³¹, L. Feng³¹, J. R. Hu³¹, Z. Hu³¹, T. Kikawa³¹, M. Mori³¹, T. Nakaya^{3,31}, R. A. Wendell^{3,31}, K. Yasutome³¹, S. J. Jenkins³², N. McCauley³², P. Mehta³², A. Tarrant³², Y. Fukuda³³, Y. Itow^{34,35}, H. Menjo³⁴, K. Ninomiya³⁴, J. Lagoda³⁶, S. M. Lakshmi³⁶, M. Mandal³⁶, P. Mijakowski³⁶, Y. S. Prabhu³⁶, J. Zalipska³⁶, M. Jia³⁷, J. Jiang³⁷, C. K. Jung³⁷, M. J. Wilking³⁷, C. Yanagisawa^{37,56}, Y. Hino¹, H. Ishino¹, H. Kitagawa¹, Y. Koshio^{1,3}, F. Nakanishi¹, S. Sakai¹, T. Tada¹, T. Tano¹, G. Barr³⁸, D. Barrow³⁸, L. Cook^{3,38}, S. Samani³⁸, D. Wark^{38,39}, A. Holin⁴⁰, F. Nova⁴¹, B. S. Yang⁴⁰, J. Y. Yang⁴⁰, J. Yoo⁴⁰, J. E. P. Fannon⁴², L. Kneale⁴², M. Malek⁴², J. M. McElwee⁴², M. D. Thiesse⁴², L. F. Thompson⁴², S. T. Wilson⁴², H. Okazawa⁴³, S. B. Kim⁴⁴, E. Kwon⁴⁴, J. W. Seo⁴⁴, I. Yu⁴⁴, A. K. Ichikawa⁴⁵, K. D. Nakamura⁴⁵, S. Tairafune⁴⁵, K. Nishijima⁴⁶, K. Nakagiri⁴⁷, Y. Nakajima^{3,47}, S. Shima⁴⁷, N. Taniuchi⁴⁷, E. Watanabe⁴⁷, M. Yokoyama^{3,47}, P. de Perio³, K. Martens³, K. M. Tsui³, M. R. Vagins^{3,4}, J. Xia³, M. Kuze⁴⁸, S. Izumiyama⁴⁸, R. Matsumoto⁴⁸, M. Ishitsuka⁴⁹, H. Ito⁴⁹, T. Kinoshita⁴⁹, R. Matsumoto⁴⁹, Y. Ommura⁴⁹, N. Shigeta⁴⁹, M. Shinoki⁴⁹, T. Suganuma⁴⁹, K. Yamauchi⁴⁹, J. F. Martin⁵⁰, H. A. Tanaka⁵⁰, T. Towstego⁵⁰, R. Gaur¹⁰, V. Gousy-Leblanc^{10,57}, M. Hartz¹⁰, A. Konaka¹⁰, X. Li¹⁰, N. W. Prouse^{10,51}, S. Chen⁵¹, B. D. Xu⁵¹, B. Zhang⁵¹, M. Posiadala-Zezula⁵², S. B. Boyd⁵³, R. Edwards⁵³, D. Hadley⁵³, M. Nicholson⁵³, M. O'Flaherty⁵³, B. Richards⁵³, A. Ali^{10,54}, B. Jamieson⁵⁴, Ll. Marti⁵⁵, A. Minamino⁵⁵, G. Pintaudi⁵⁵, S. Sano⁵⁵, S. Suzuki⁵⁵, K. Wada⁵⁵, and

The Super-Kamiokande Collaboration

目次

1. イントロダクション
2. これまでの研究
3. SK-Gd実験での中性子同定手法構築と評価
4. 超新星背景ニュートリノ探索
5. まとめ

イントロダクション

超新星爆発

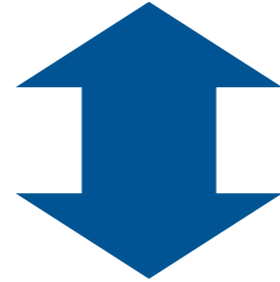
- 超新星爆発(SN)： $\sim 8M_{\odot}$ 以上の星が一生の最後に起こす爆発現象
 - ▶ 発生レート：1-3 /century/galaxy
 - ▶ 総放出エネルギー： $\sim 10^{53}$ erg
- 親星質量によって爆発過程が異なる
 - 核燃焼型
 - 重力崩壊型(Core-Collapse SN: CCSN)
→ニュートリノを生成



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

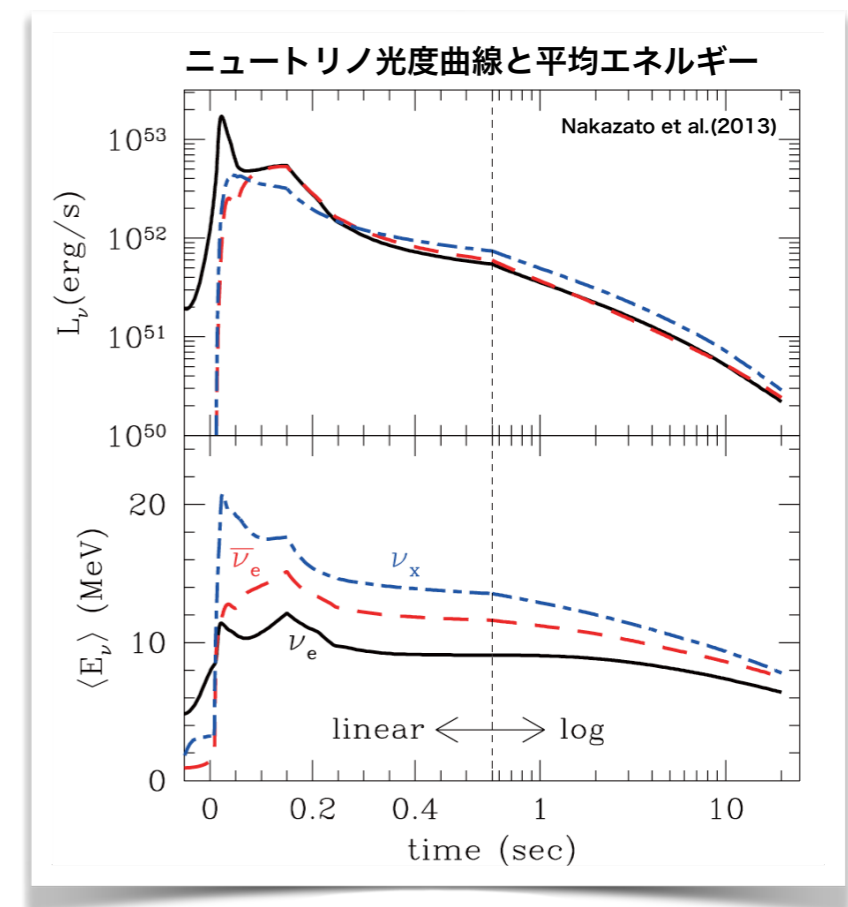
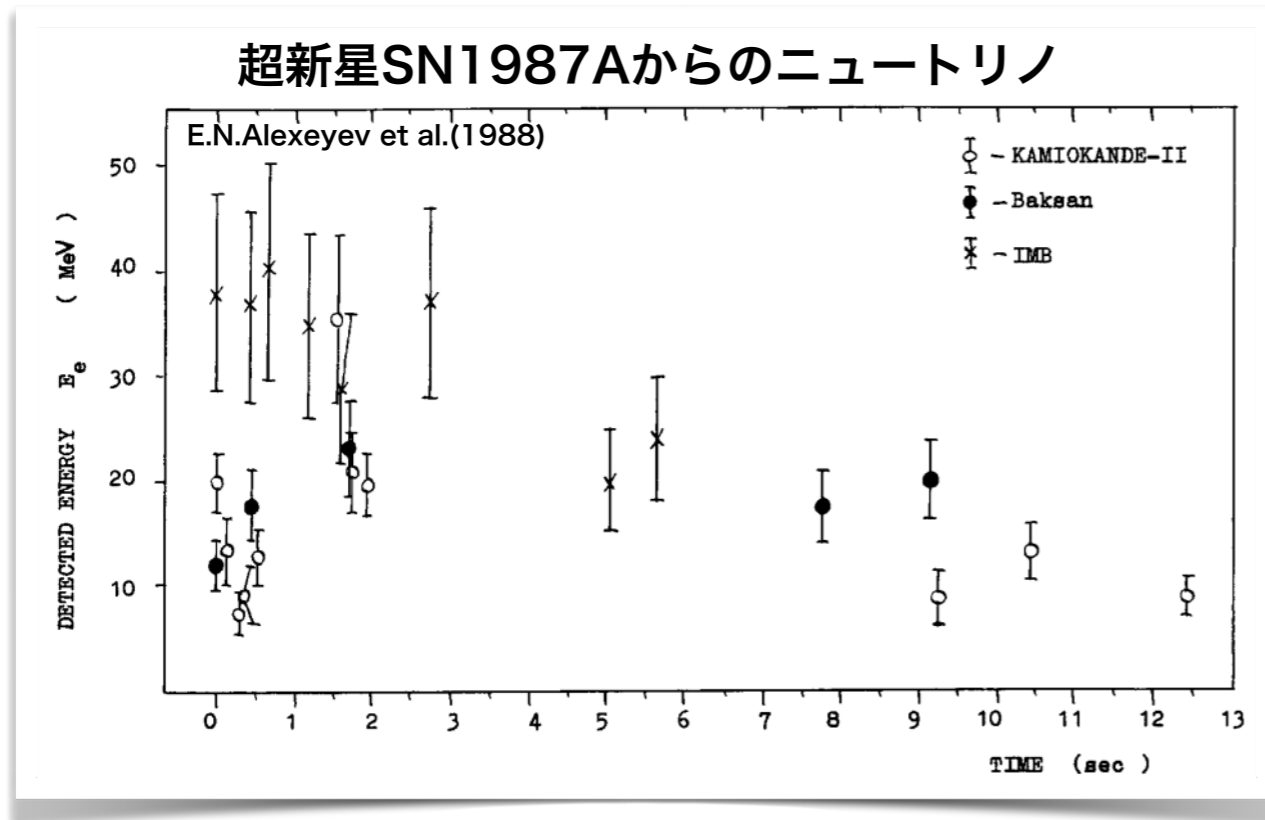
超新星爆発からのニュートリノ

数多くの数値シミュレーションによる理論予測



実際にニュートリノが観測されたのは1987年の一回のみ

→ **超新星起源のニュートリノ観測**が期待されている

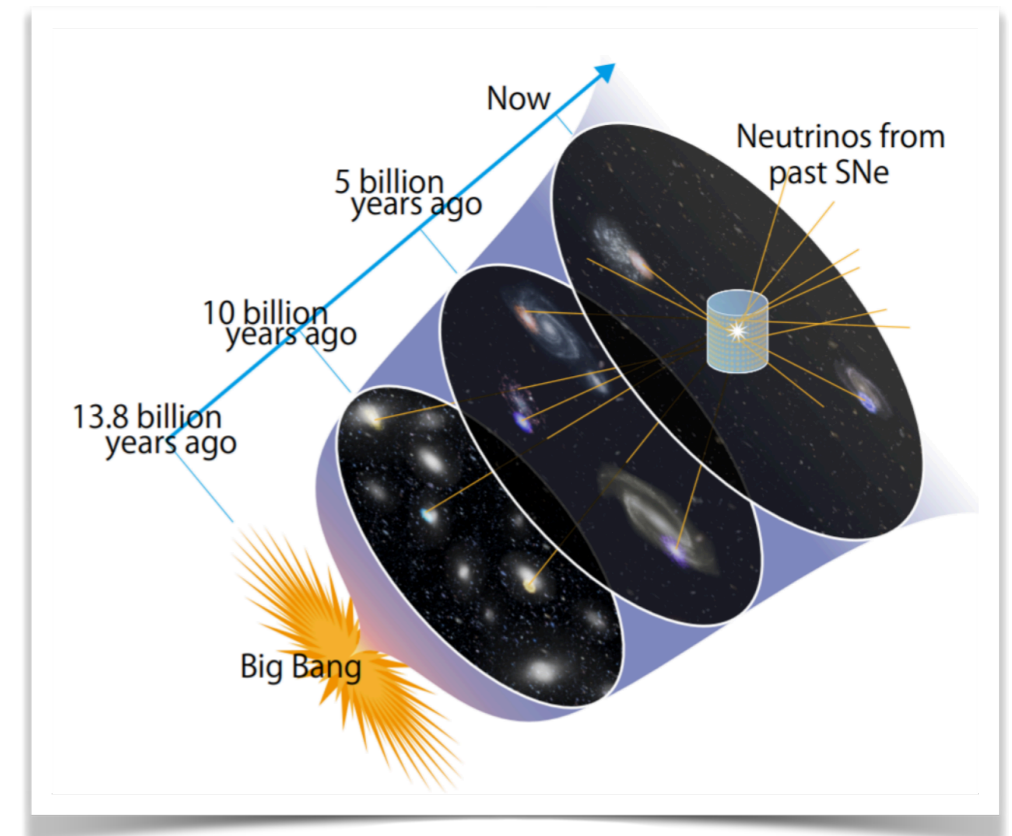


超新星背景ニュートリノ (SRN)

- **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



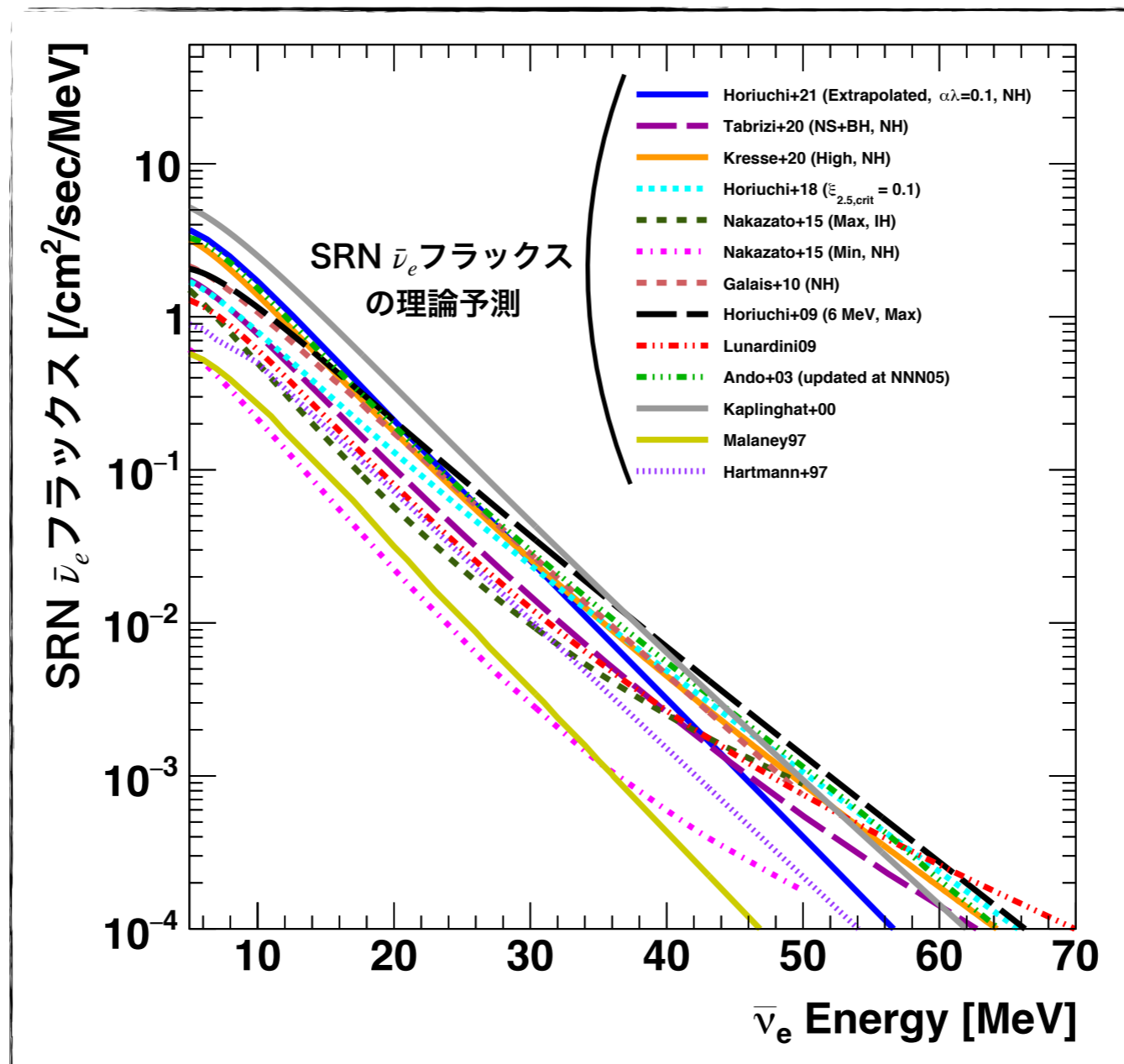
$$\frac{d\Phi(E_\nu)}{dE_\nu} = c \int_0^\infty \frac{dz}{H_0(1+z)\sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda}}$$

$$\times \left[\underbrace{R_{\text{CCSN}}(z)}_{\text{CCSNレート}} \int_0^{Z_{\text{max}}} \underbrace{\psi_{\text{ZF}}(z, Z)}_{\text{金属量分布}} \int_{M_{\text{min}}}^{M_{\text{max}}} \underbrace{\psi_{\text{IMF}}(M)}_{\text{星の初期質量分布}} \frac{dN(M, Z, E'_\nu)}{dE'_\nu} dM dZ \right]$$

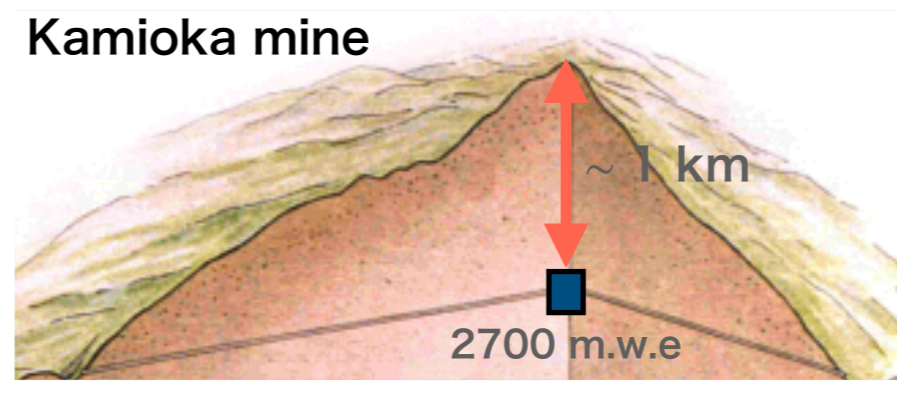
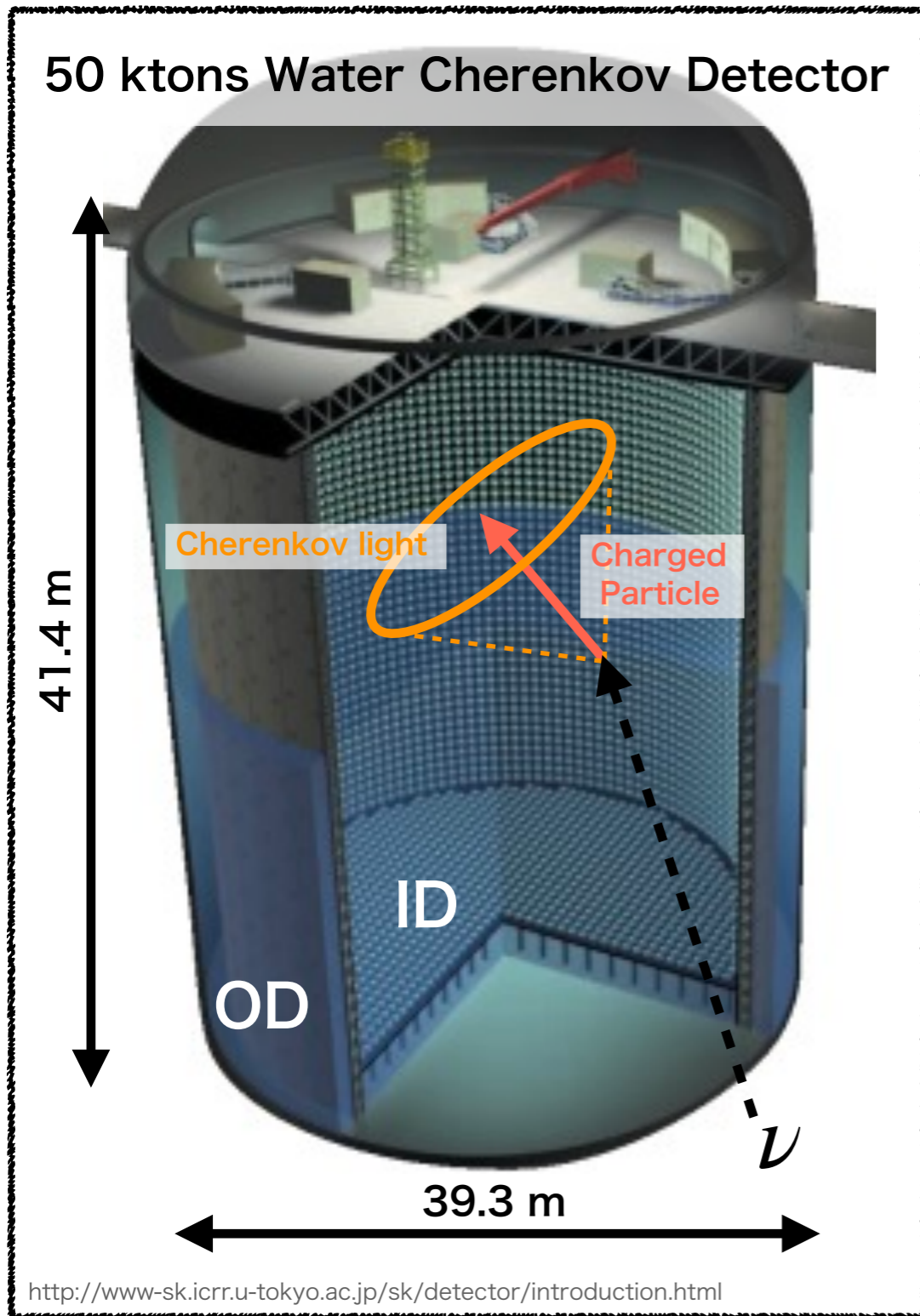
ニュートリノ数スペクトル

SRNフラックス

様々な予想からSRNフラックスの理論予測は1桁の幅をもつ
→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)

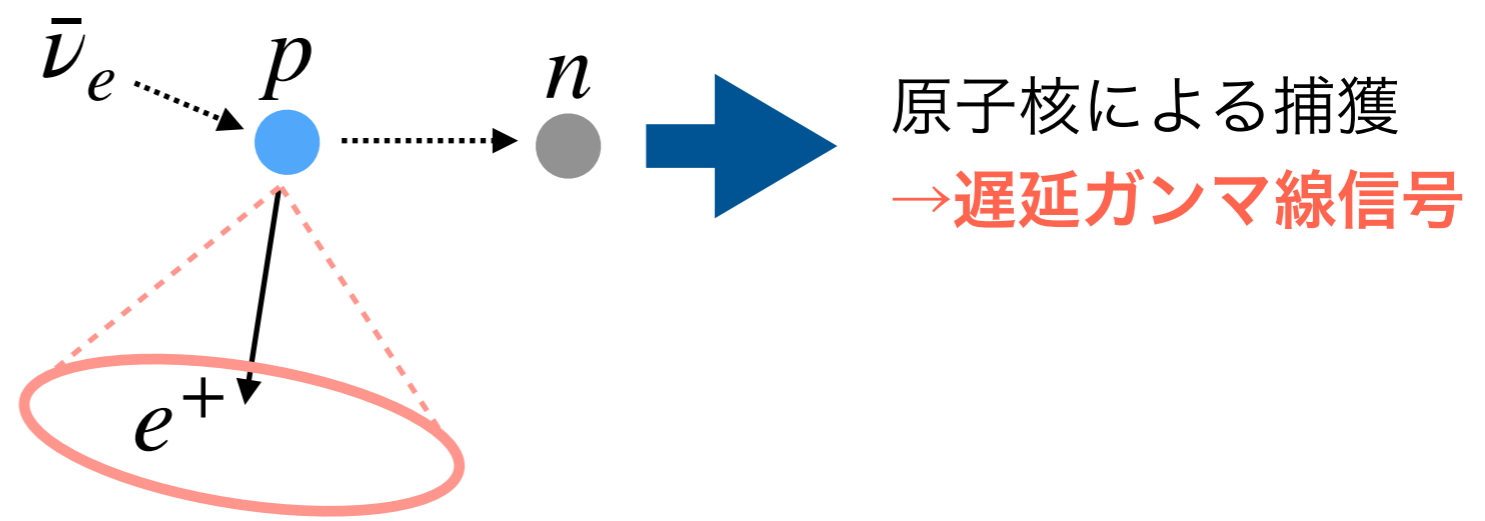
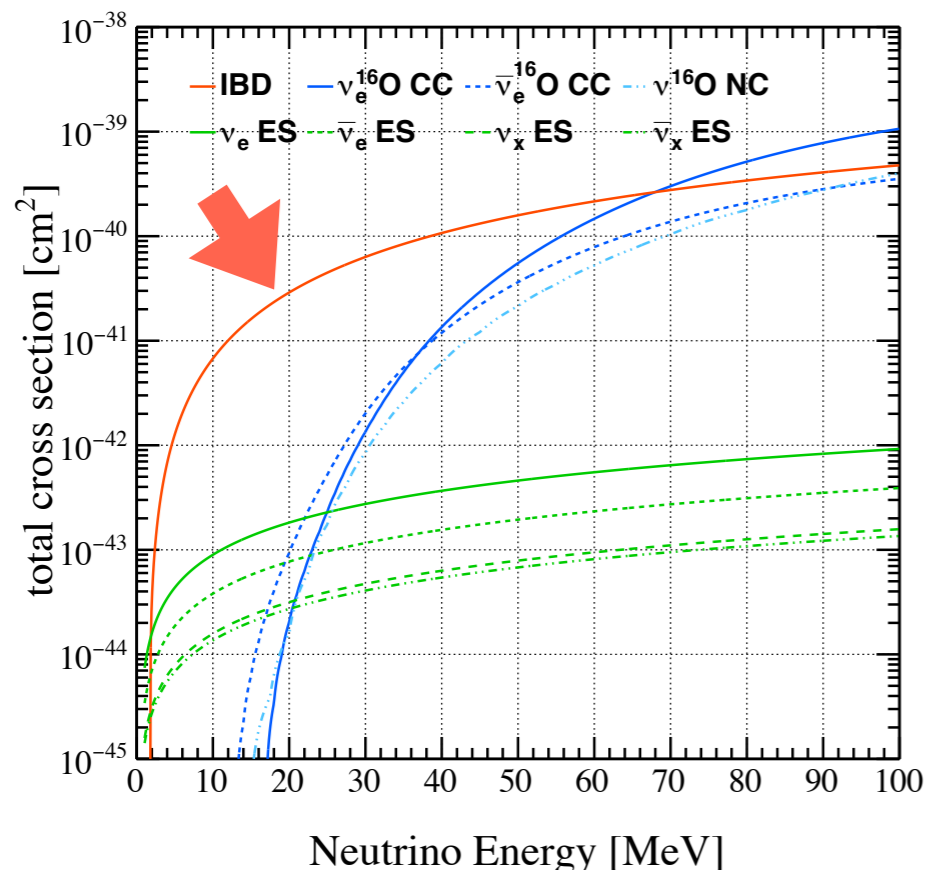


Phase	Detector	Period	Neutron search
SK-I/II/III		1996-2008	×
SK-IV	Pure-water	2008-2018	✓
SK-V		2019-2020	✓
SK-VI	Gd 0.01%	2020-2022	✓
SK-VII	Gd 0.03%	2022-	✓

SK-Gd

SK実験でのSRN探索

- ▶ 反電子ニュートリノの逆ベータ崩壊(IBD)の探索
 - ▶ 30 MeVまでで他の反応より1-2桁大きい断面積
- ▶ 探索信号： $\bar{\nu}_e + p \longrightarrow e^+ + n$
 - ▶ 先発信号(e^+)に付随する中性子の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



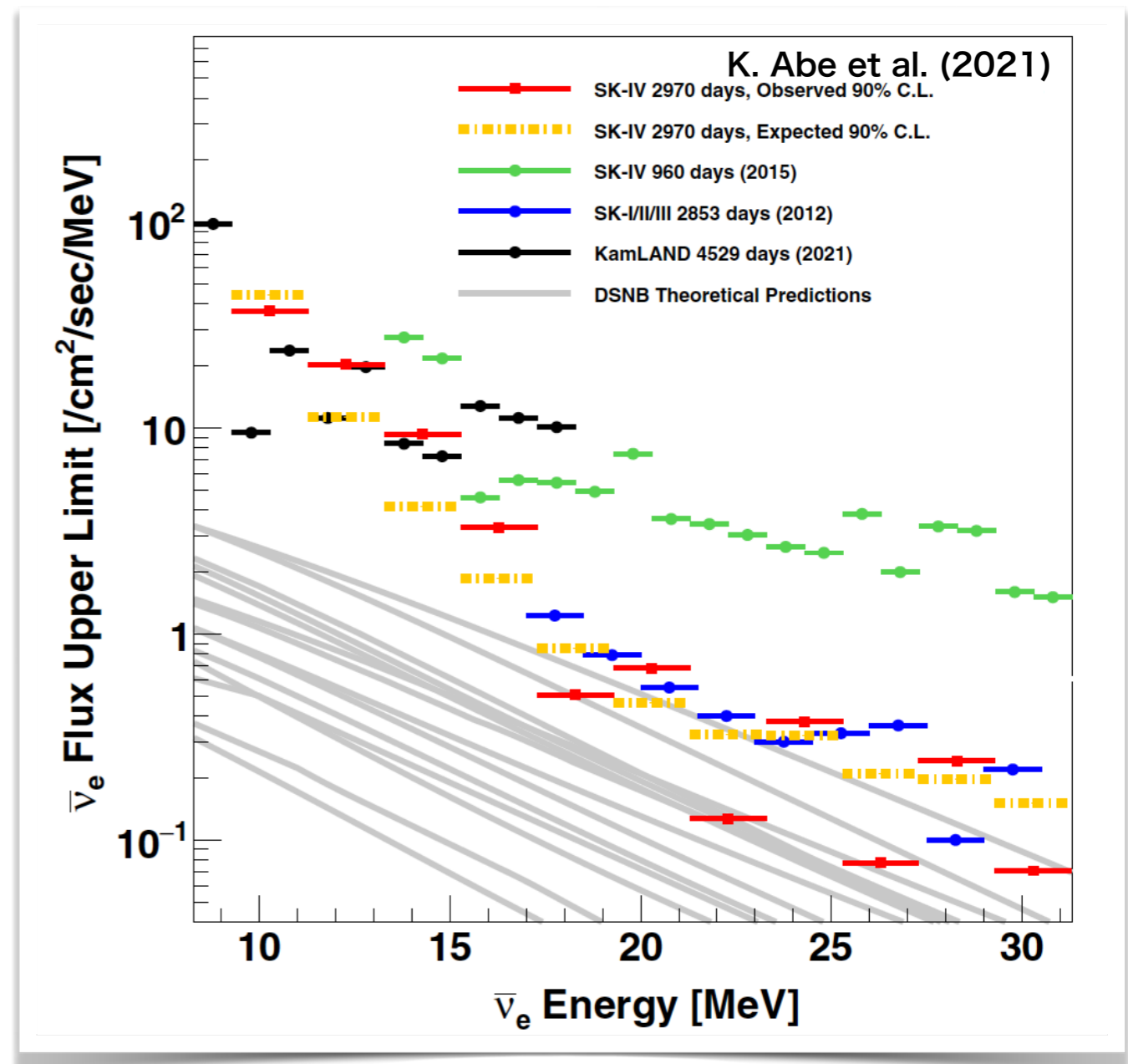
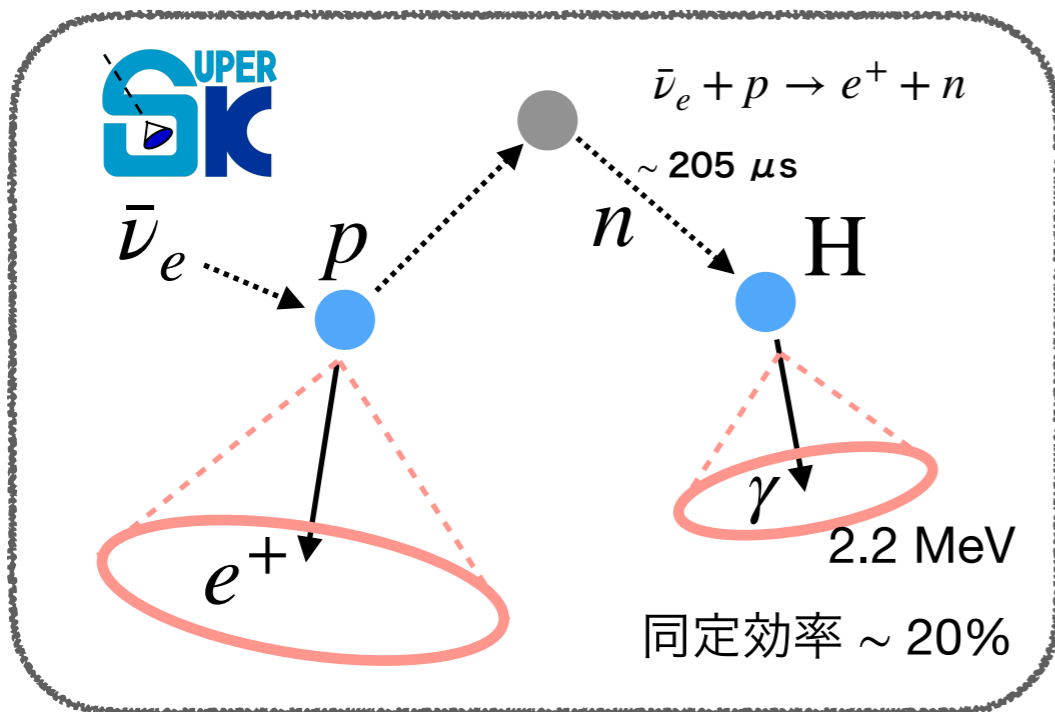
これまでのSRN探索

SK-IVの2970日のデータを使った探索が行われた
→世界で最も厳しい上限値を設定

遅延中性子信号

水素による2.2 MeVガンマ線

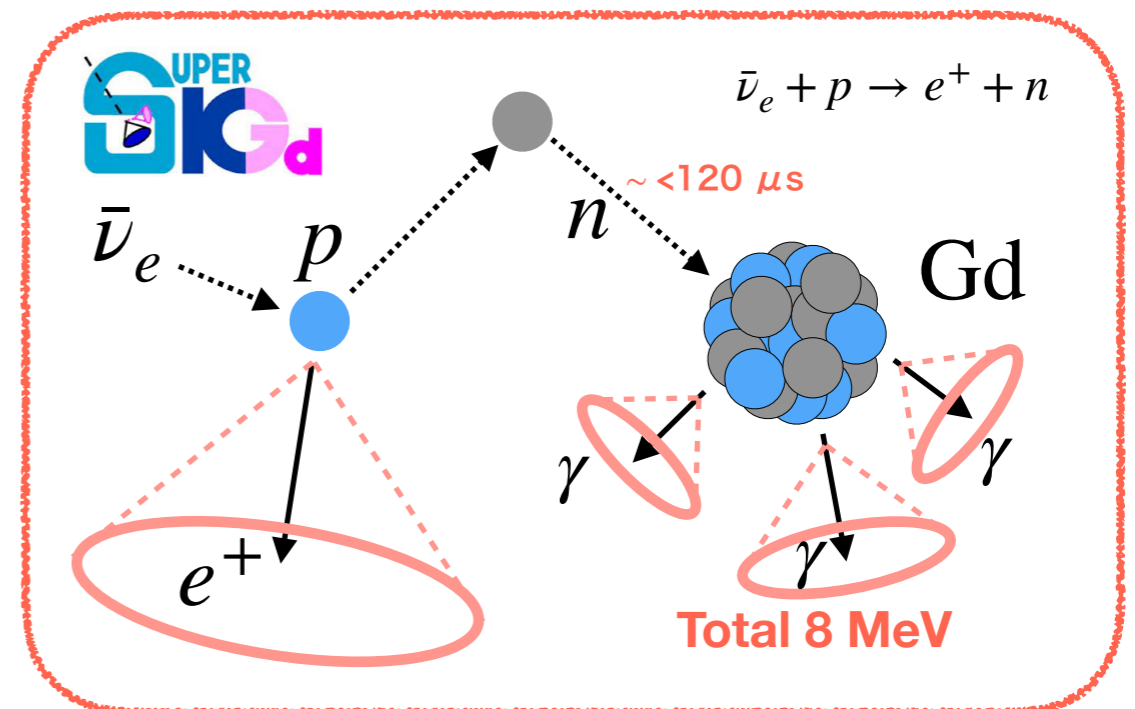
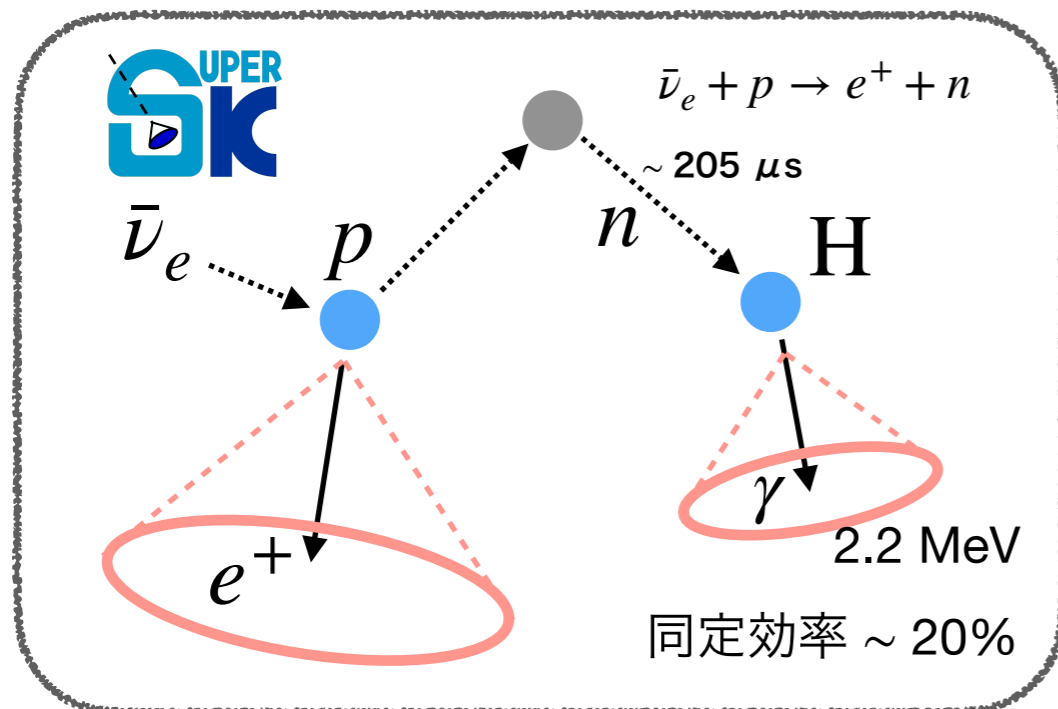
約20%の低効率



SK-Gd実験

SK-Gd実験：Super-Kamiokande検出器に
ガドリニウムを導入して中性子同定効率の向上

- ▶ ガドリニウム (Gd)
 - ▶ 天然元素中で最大の熱中性子捕獲断面積
→ 低濃度で十分な捕獲割合
 - ▶ 捕獲時にSKで十分検出可能な合計8 MeVの γ 線
→ **中性子同定効率の向上**



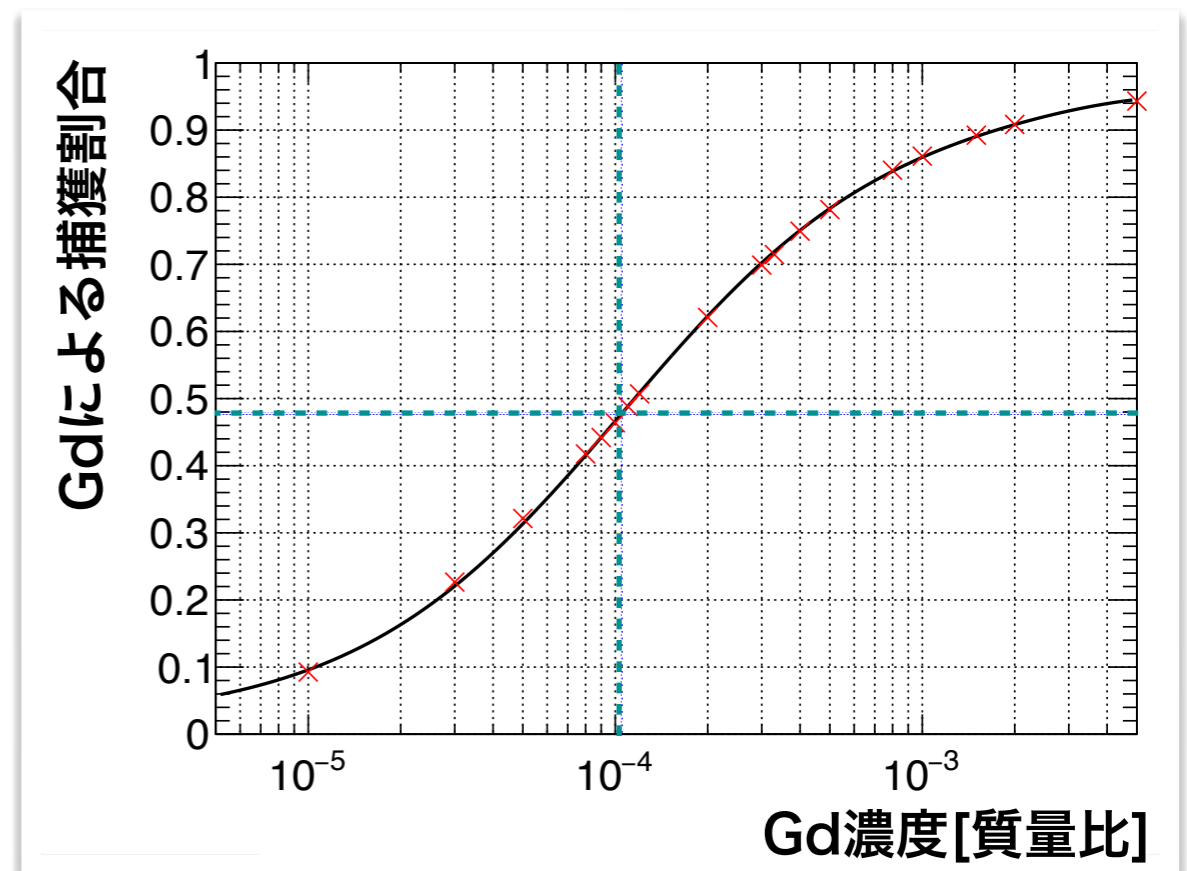
SK-Gd実験

SK-Gd実験：Super-Kamiokande検出器に
ガドリニウムを導入して中性子同定効率の向上

- ▶ ガドリニウム (Gd)
 - ▶ 天然元素中で最大の熱中性子捕獲断面積
→ 低濃度で十分な捕獲割合 + 中性子捕獲時定数の短縮
 - ▶ 捕獲時にSKで十分検出可能な合計8 MeVの γ 線
→ **中性子同定効率の向上**

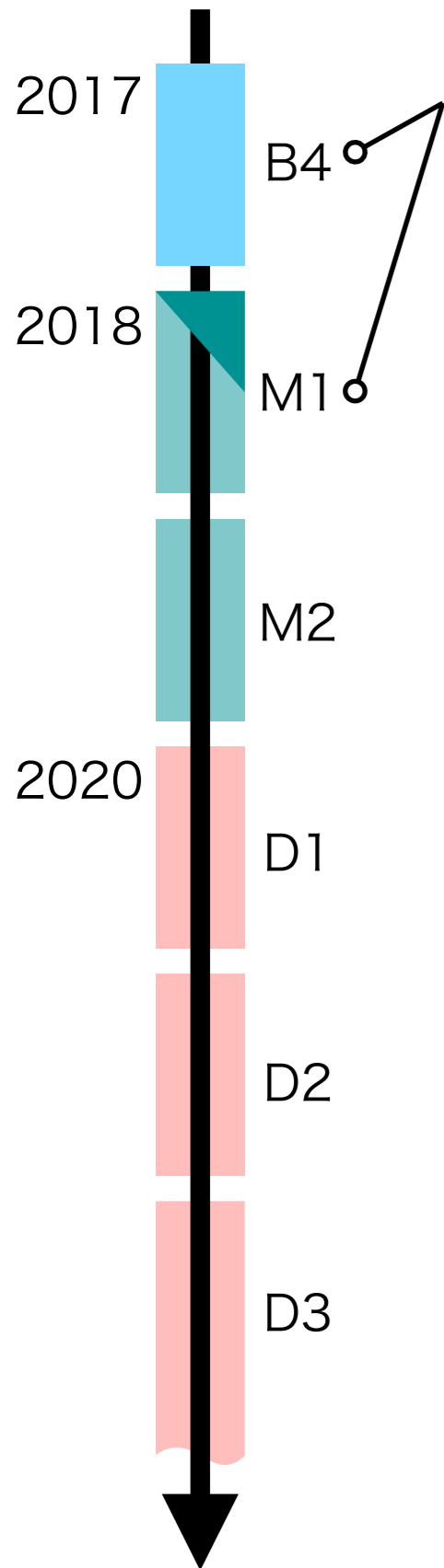
SK-VI: Gd 濃度0.01%

- ▶ 時定数 $115 \mu s$
- ▶ **Gd捕獲割合47.8%**

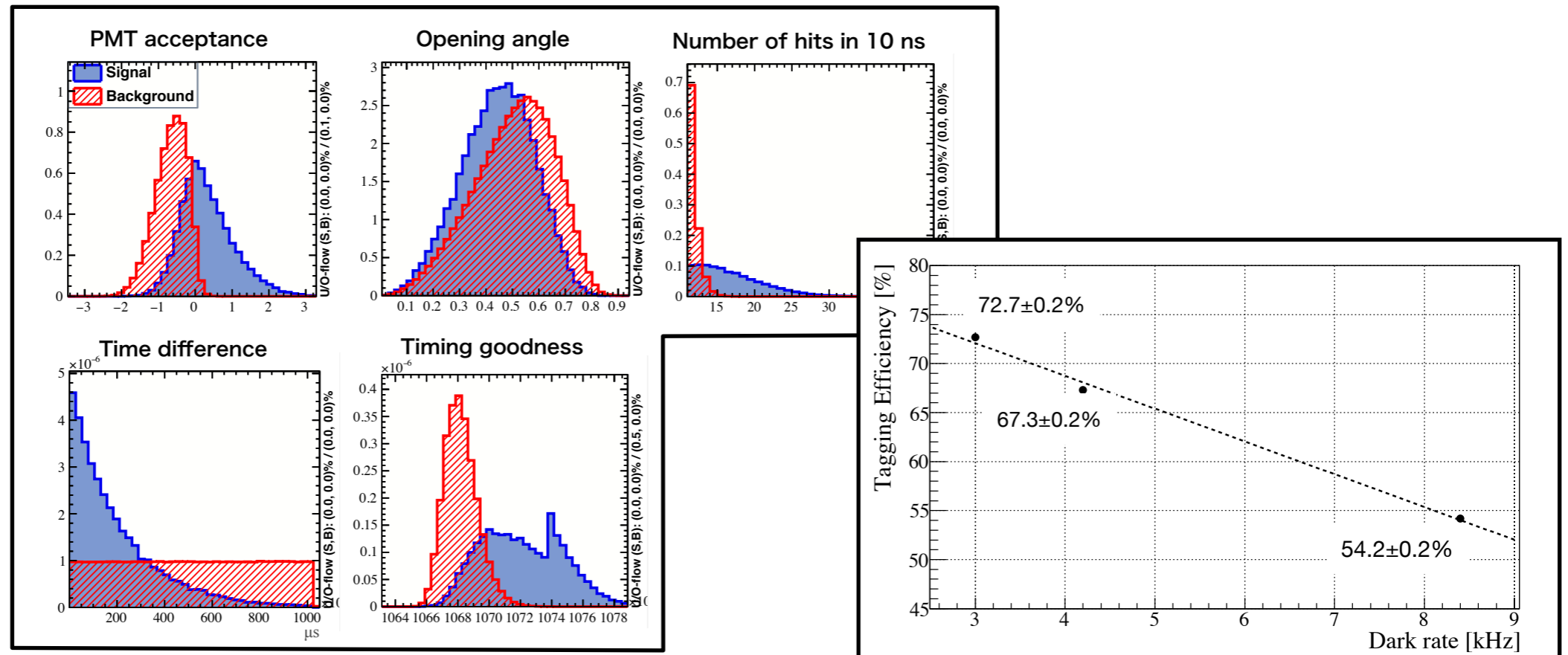


これまでの研究

これまでの研究



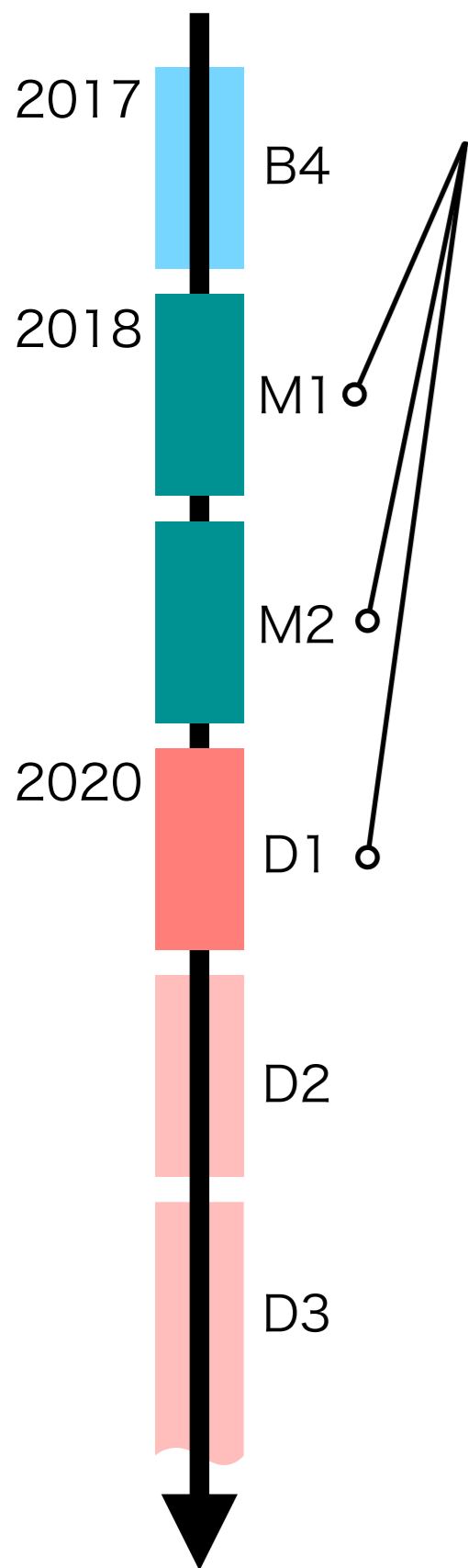
Hyper-Kamiokande(HK)実験における中性子同定効率の評価



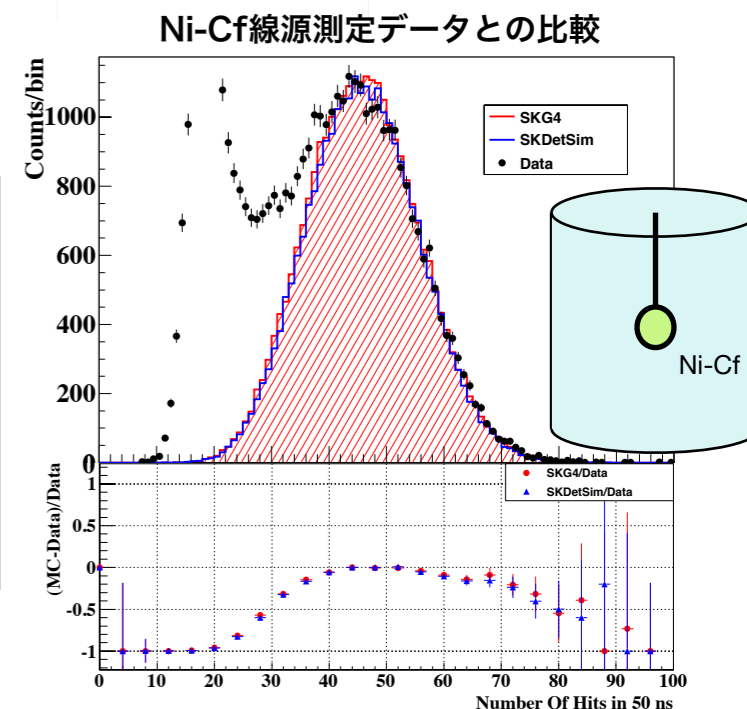
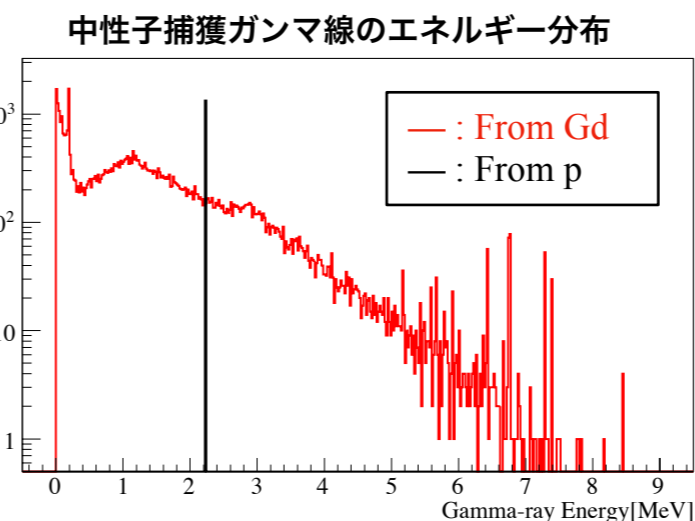
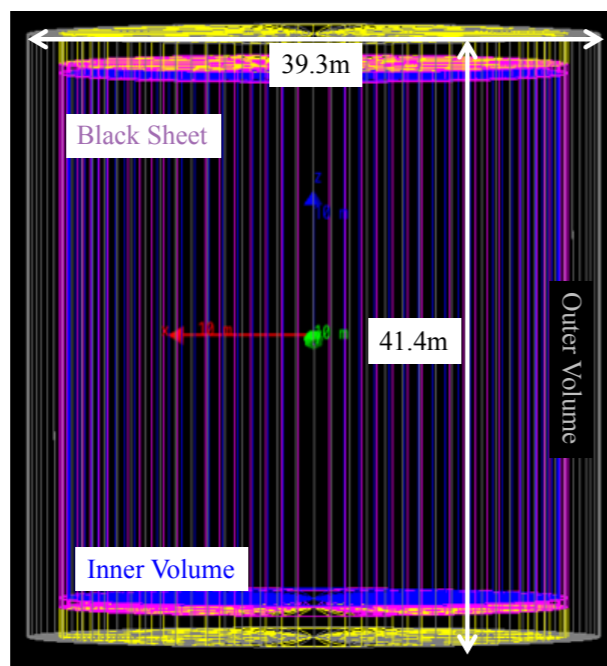
HK実験における中性子同定手法について、機械学習を用いた手法を考案し、中性子同定効率の向上を図った。見積もった同定効率はHK実験のDesign reportで採用されている(arXiv:1805.04163)。

- 論文 : 1本 (Neutrino telescope proceedings*) ^{*Zenodo online}
- 国際 (国内) 会議 : 2(2)回

これまでの研究



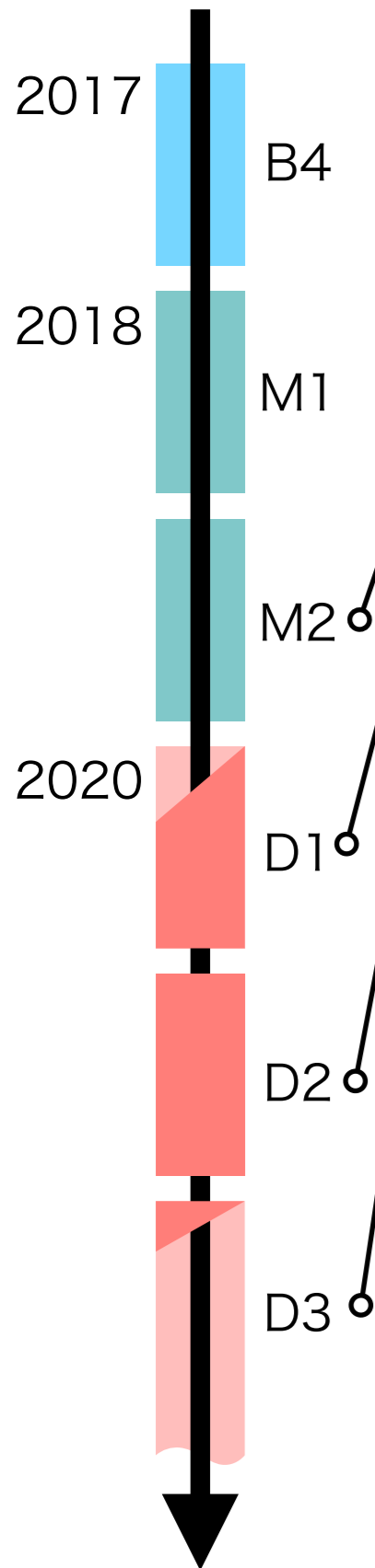
Super-Kamiokande(SK)検出器における Geant4ベースのシミュレーション開発



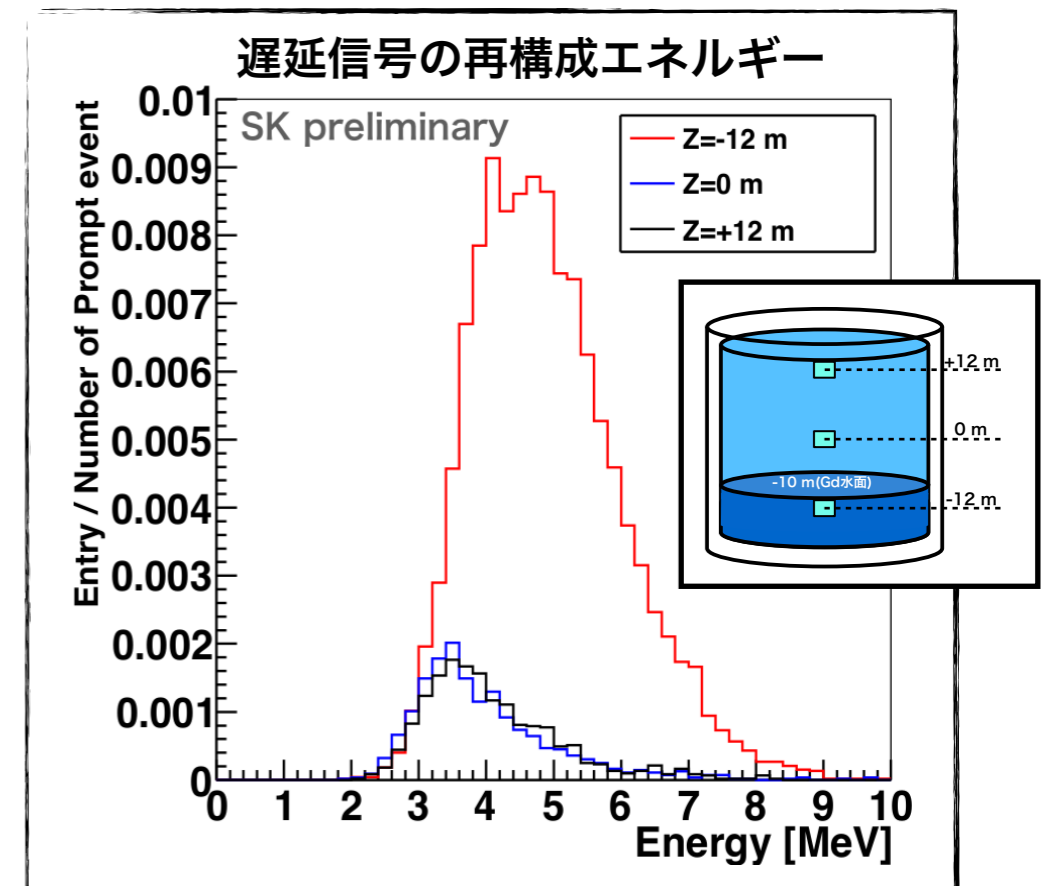
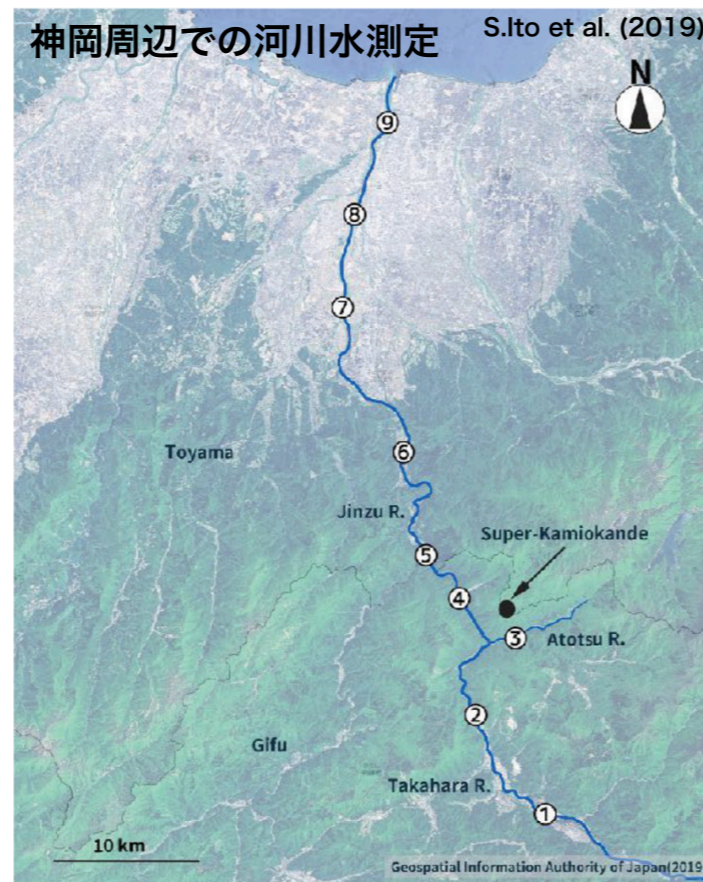
SK-Gd実験に向け、GEANT3ベースの現行MCをGeant4ベースで作り直し、最新の物理モデルを導入した。原子核反応から水中の光子伝搬、PMT応答までの全てを精査し、現在SKグループに広く使用されている。

- 論文 : 3本 (KMI proc., ICRC proc., TAUP proc.)
- 国際 (国内) 会議 : 3(2)回

これまでの研究



SK-Gd実験の準備・中性子データ解析

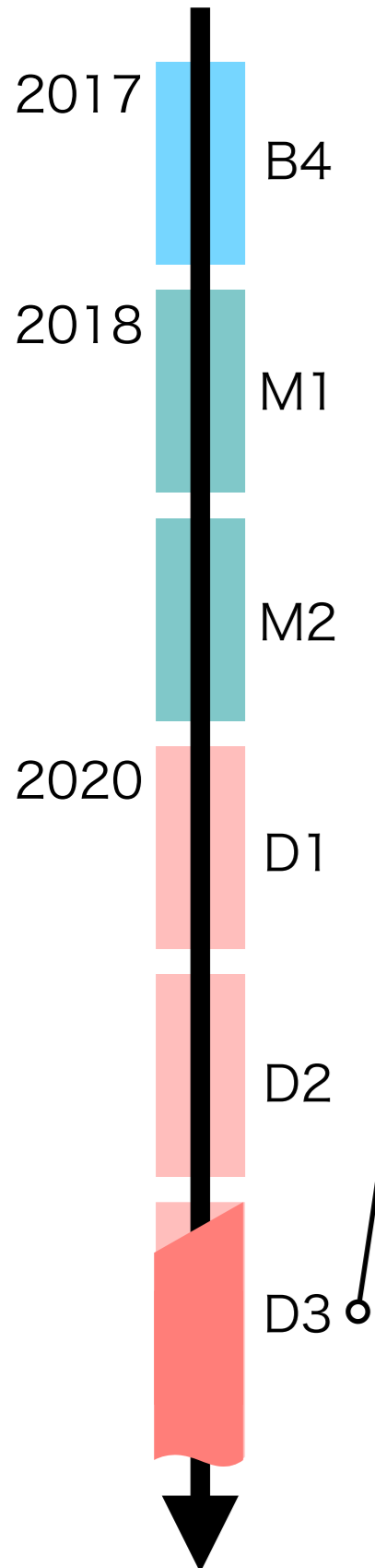


SK-Gdの最初のGd導入に向けて河川水測定・不純物測定などの準備を行い、実際の導入時には神岡に滞在し導入前のテストを行なった。Gd導入後の初期データ解析・中性子線源を用いた中性子測定を行い、中性子同定手法を開発した。SRN探索におけるSK-Gd実験での中性子同定における誤差を見積もった。

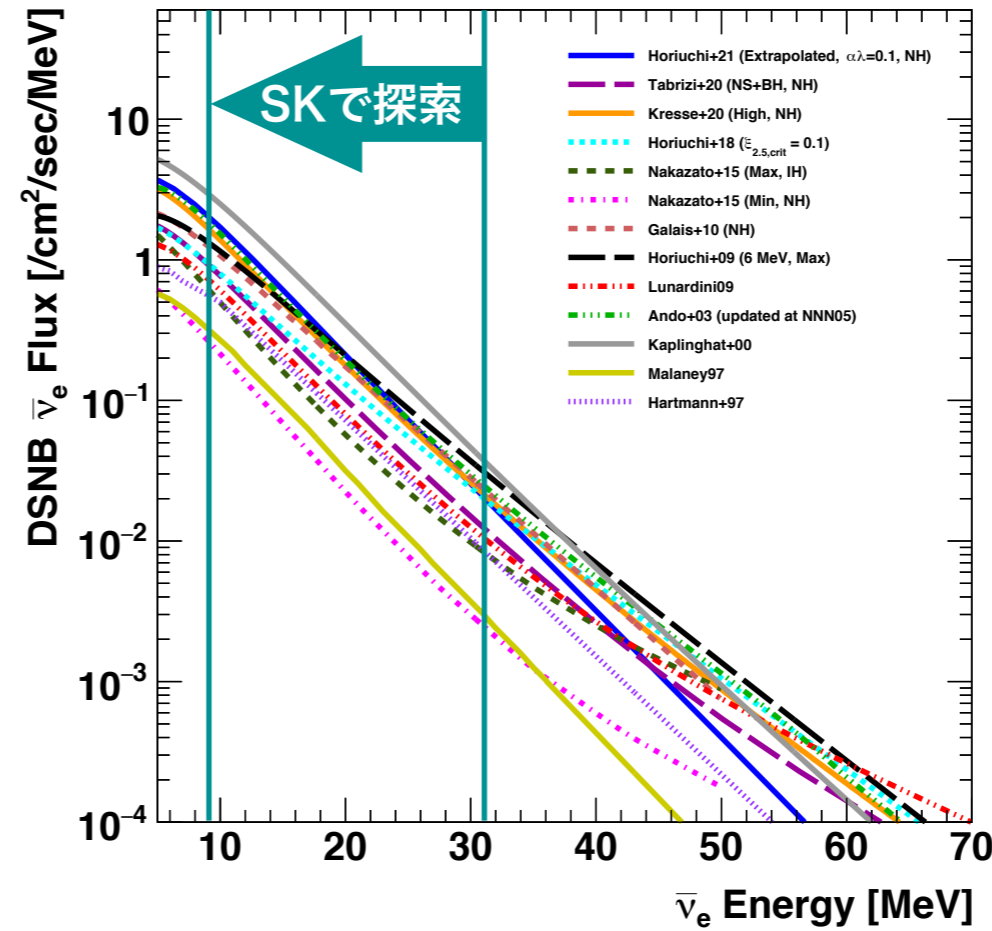
- 論文 : 1本 (ICHEP proc., PTEPx3*)
- 国際 (国内) 会議 : 1 (6)回

*Co-author

これまでの研究



SK-Gd実験の初期データを用いた 超新星背景ニュートリノ探索



SRN探索に対して世界で最も高い感度を持つSK-Gd実験において、552日の最初のデータを用いた探索を行なった。SRNの発見・フラックス測定は、超新星爆発機構や宇宙での星形成史の理解に対して重要な情報となる。

- ・ 国際（国内）会議：2*(3)回
- ・ 外国でのセミナー：1回(Virginia Tech.)

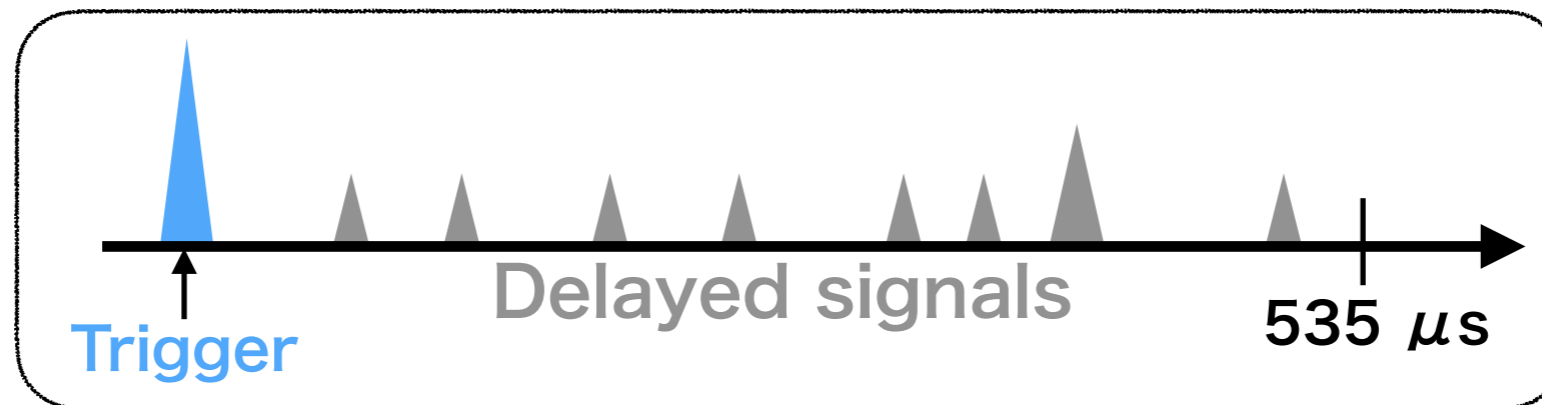
*Scheduled

SK-Gdでの中性子同定と Am/Be線源測定

中性子同定手法

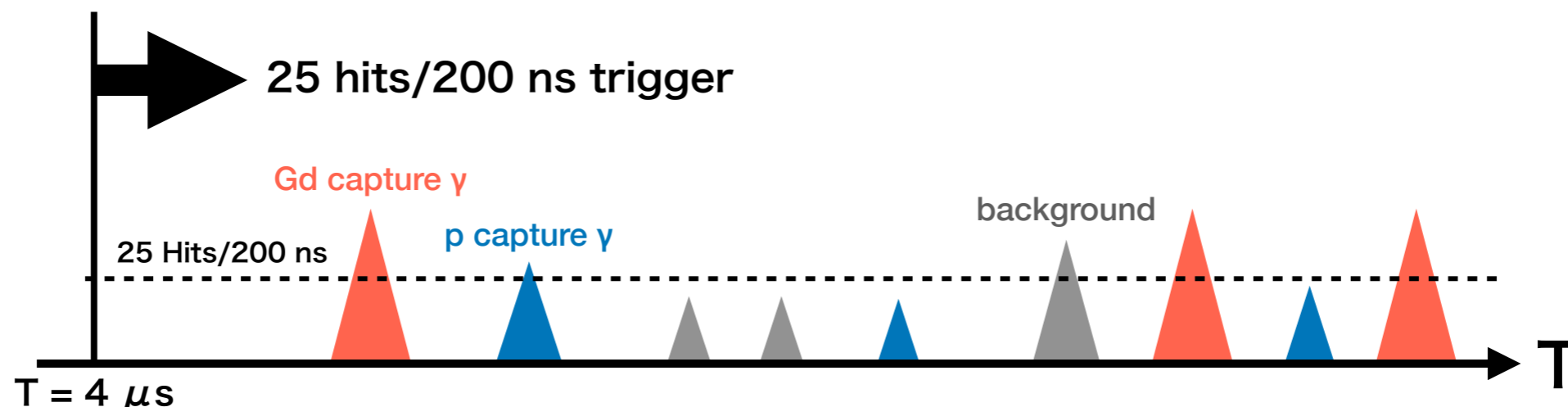
SKのトリガーシステム

- 60 PMT hits/200 nsでイベントトリガー（先発事象）のあと、
[-5, 535] μs のヒットを保存する
→中性子のヒットクラスタを探索可能



中性子候補事象選択

- [4, 535] μs の範囲で25 PMT hits/200 nsのクラスタ探索



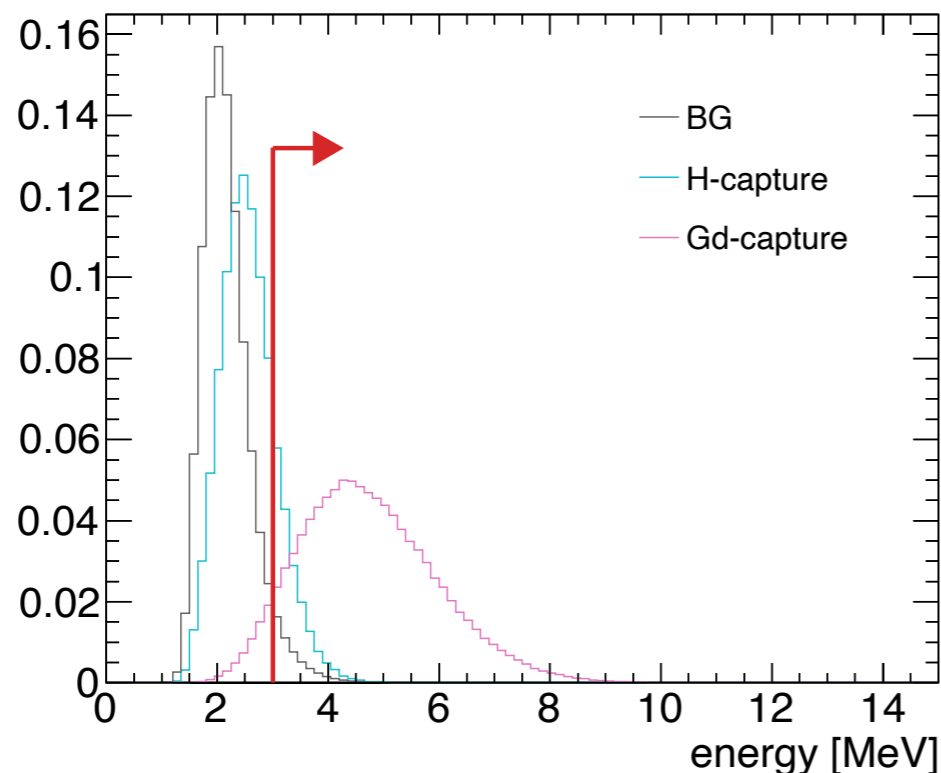
中性子同定手法

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

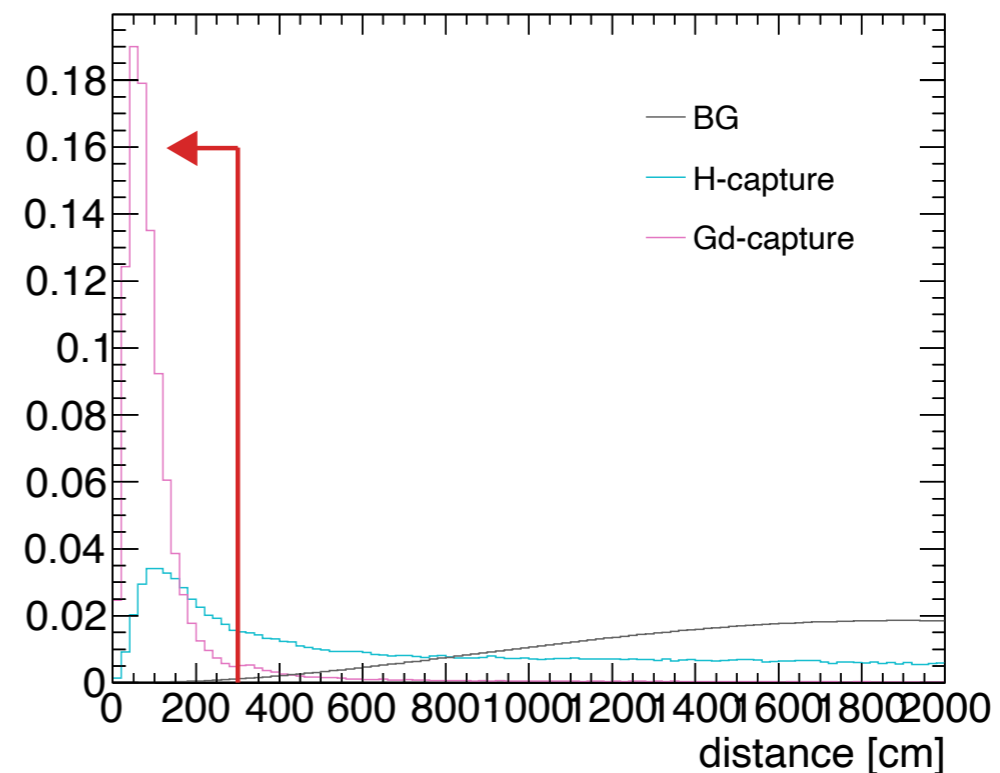
使用したカット

- 有効体積内
- 再構成エネルギー
- 再構成クオリティ
- 先発事象からの距離

再構成エネルギー

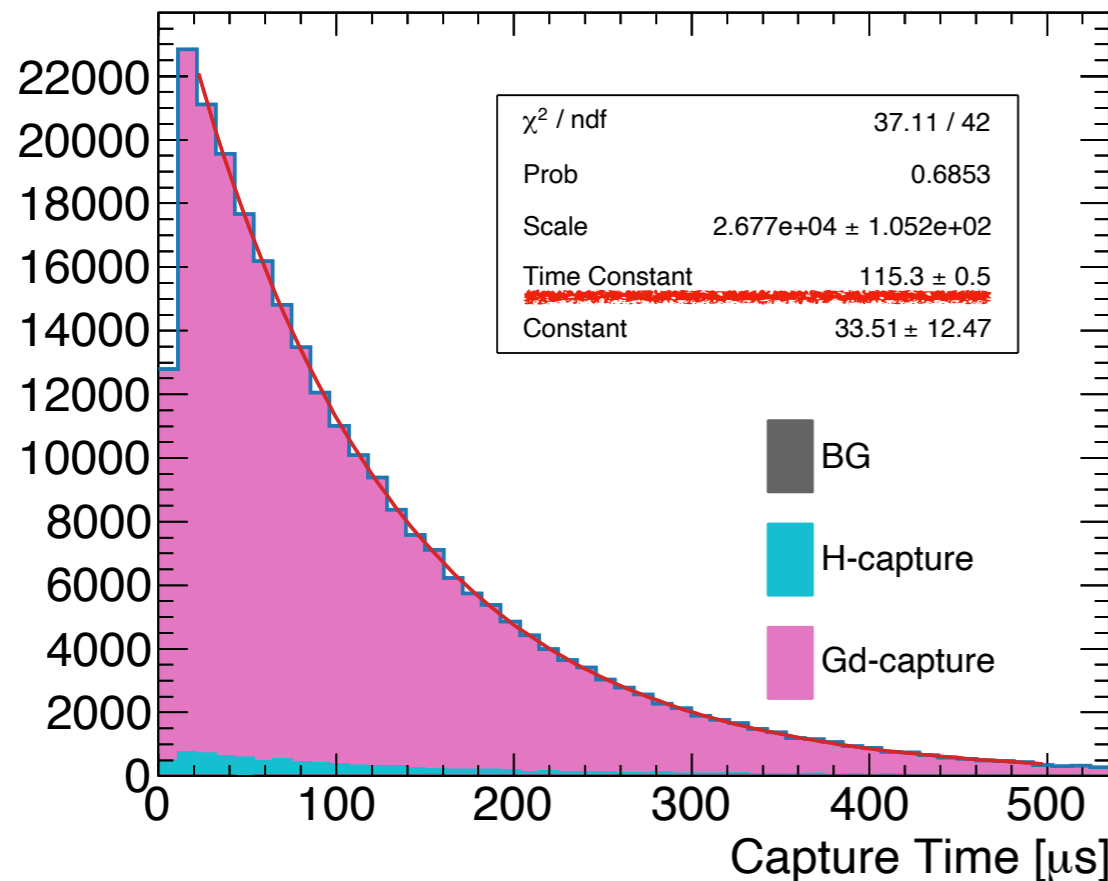


先発事象からの距離



MCを使った中性子同定効率見積り

中性子シミュレーションを用いて
時定数と同定効率を見積もる



$$\epsilon_n^{\text{true}} = \frac{\text{選別後に残った中性子数}}{\text{生成中性子数}}$$

	Noise	p-capture	Gd-capture
真の中性子 捕獲数	—	1.0	1.0
25ヒット トリガー	1	0.412	0.950
残存事象	0.00002	0.024	0.786

79%のGd-captureを同定可能

Gd捕獲47.8%

中性子全体の**39.5±0.1%**を同定可能になった

Am/Be線源を用いた中性子測定

SK-Gd実験が開始され、
中性子同定効率が格段に向上
→MCでは39.5%



- 実際の測定でどれくらいになるのか？
- 同定効率における系統誤差は？

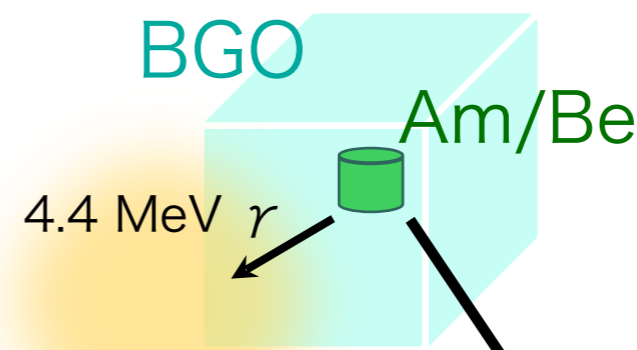
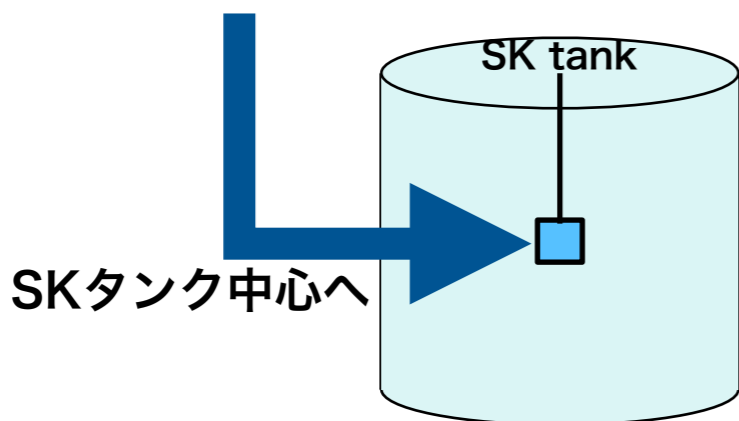
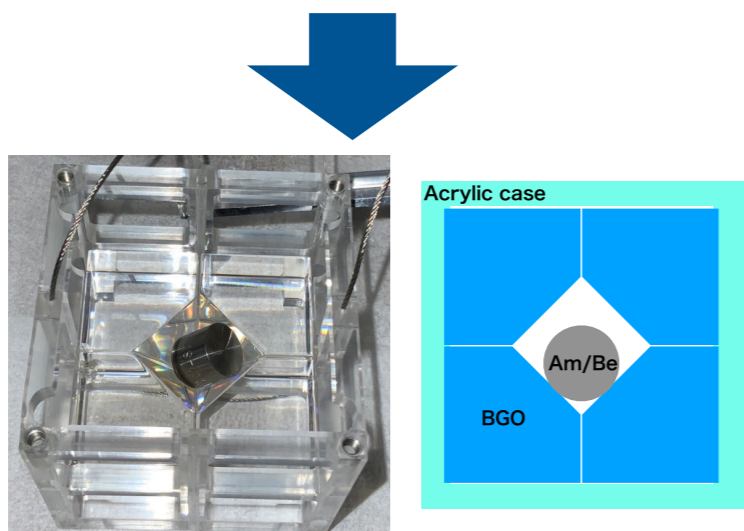
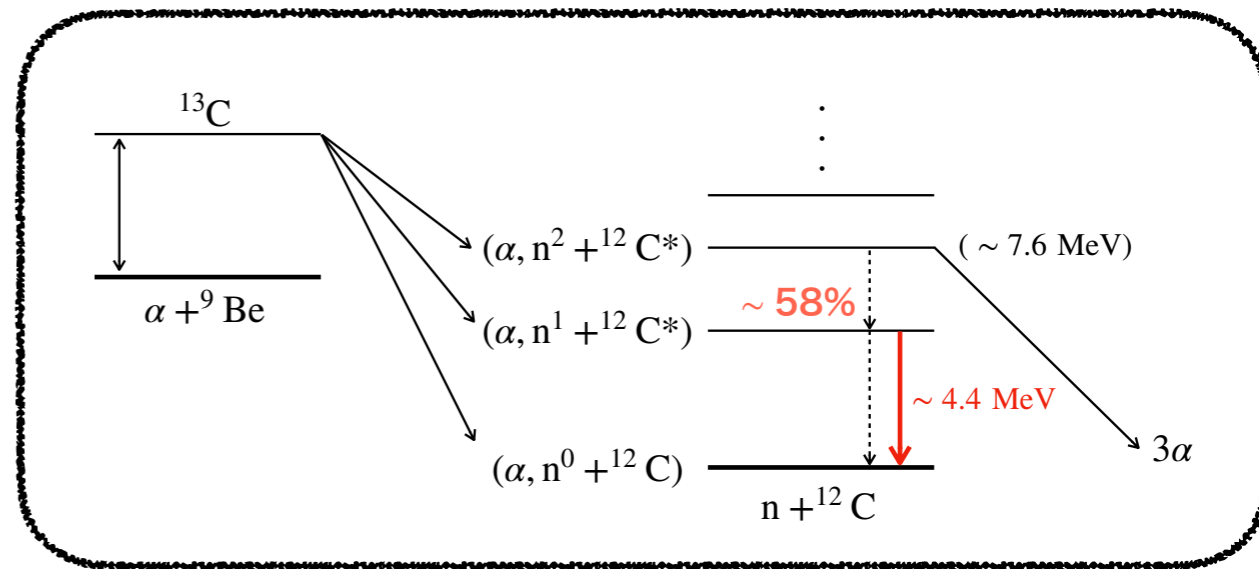
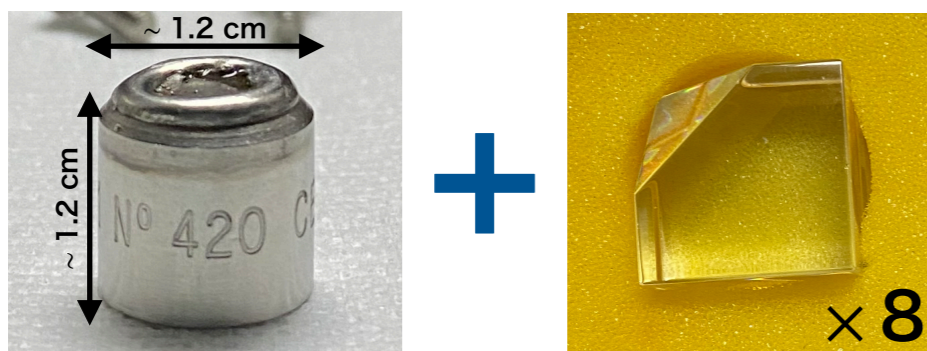


中性子線源を用いた測定が必要
→**Am/Be線源測定**

Am/Be線源

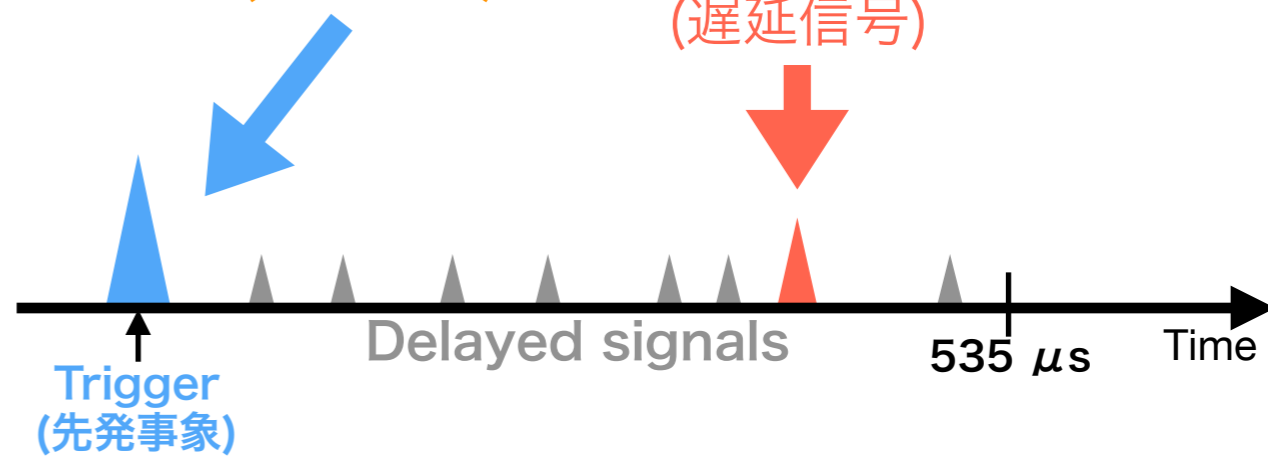
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2007.04.007>

- Am/Be線源



シンチレーション光
(先発事象)

中性子
(遅延信号)



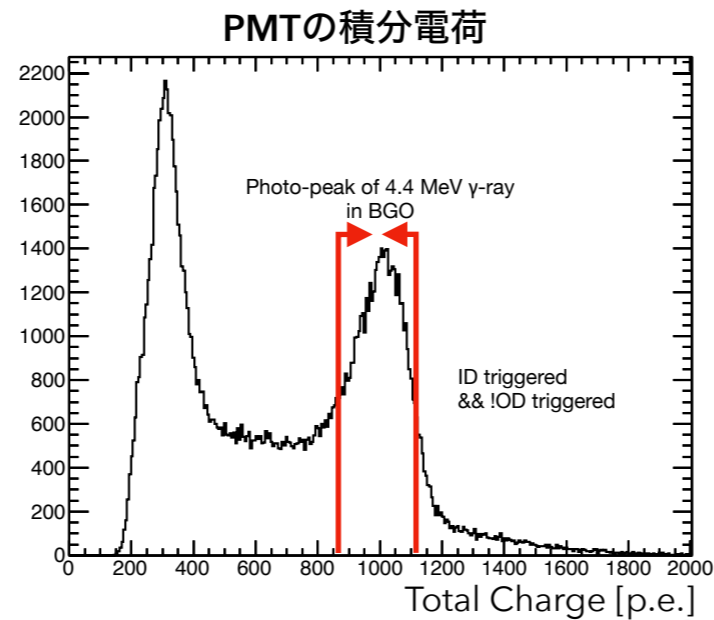
データ選別

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

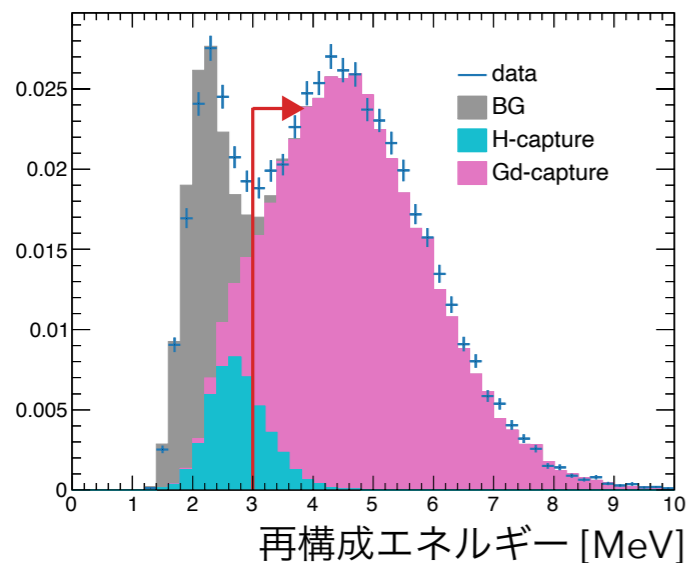
使用したカット

- イベント間の時間
- OD PMT信号少
- イベントの積分電荷

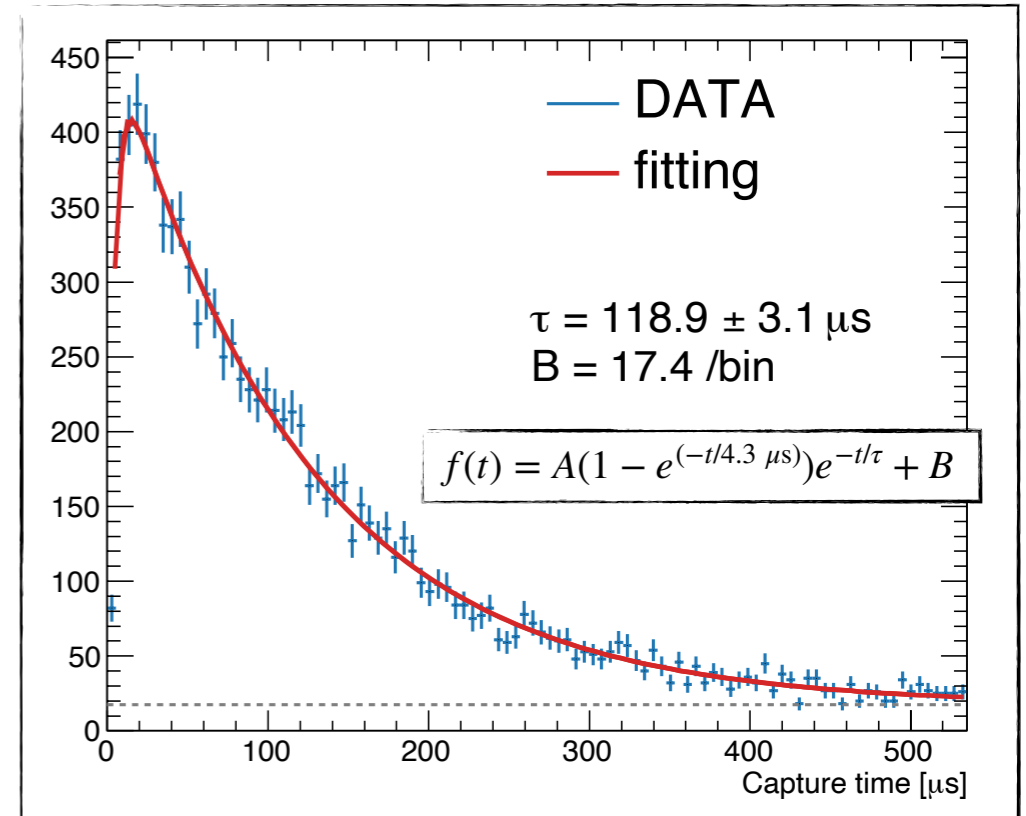
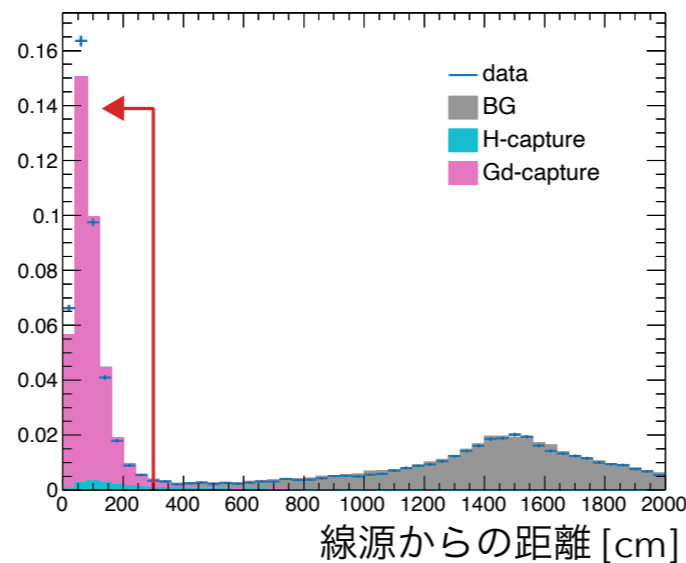


遅延信号

再構成エネルギー



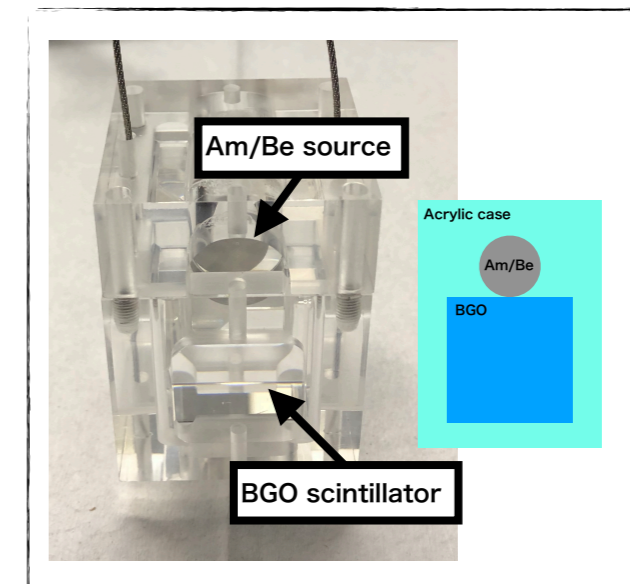
先発事象からの距離



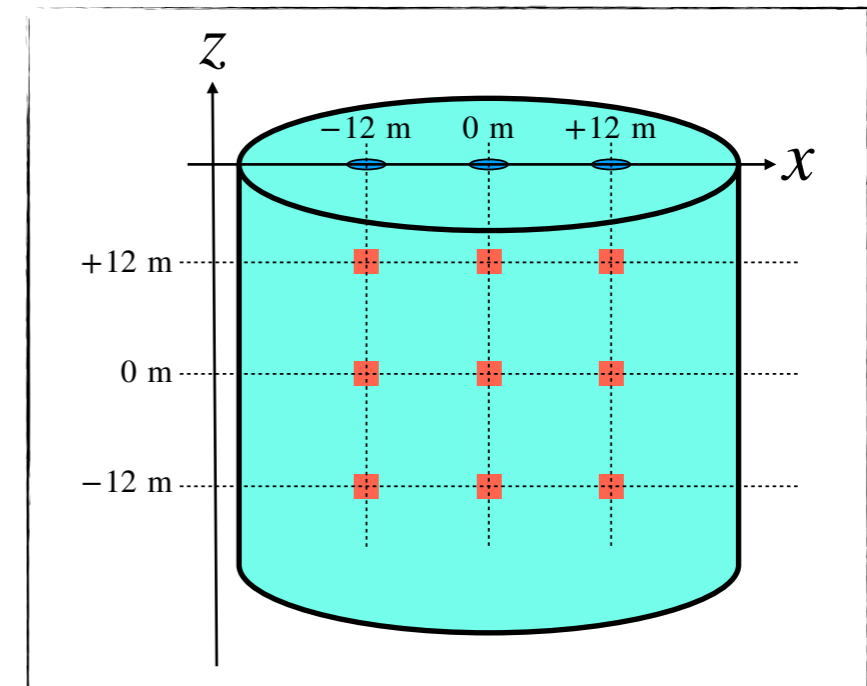
データ取得

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の影響の調査：
BGO被覆率の違う(立体角1/4)
線源系で測定

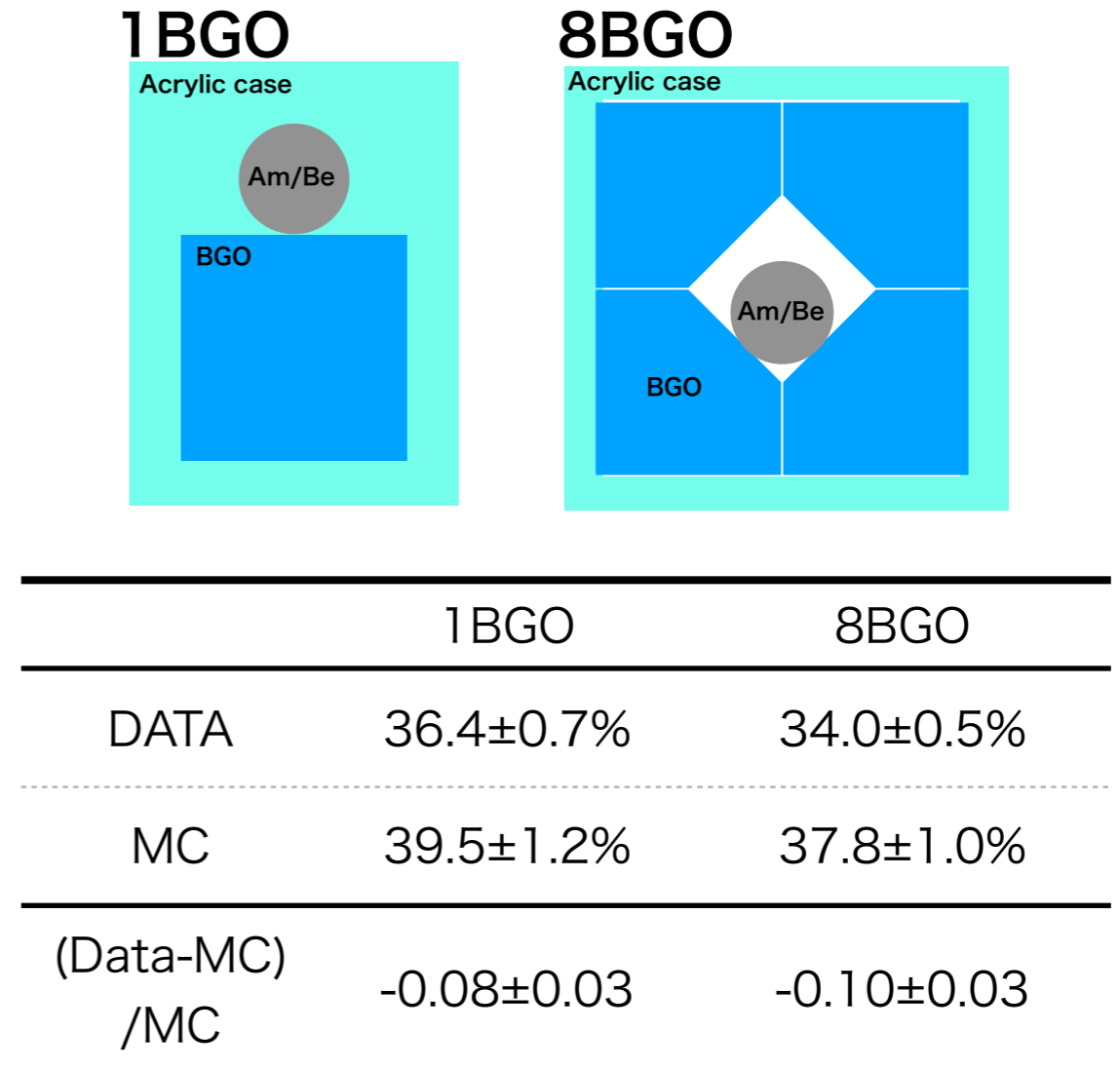
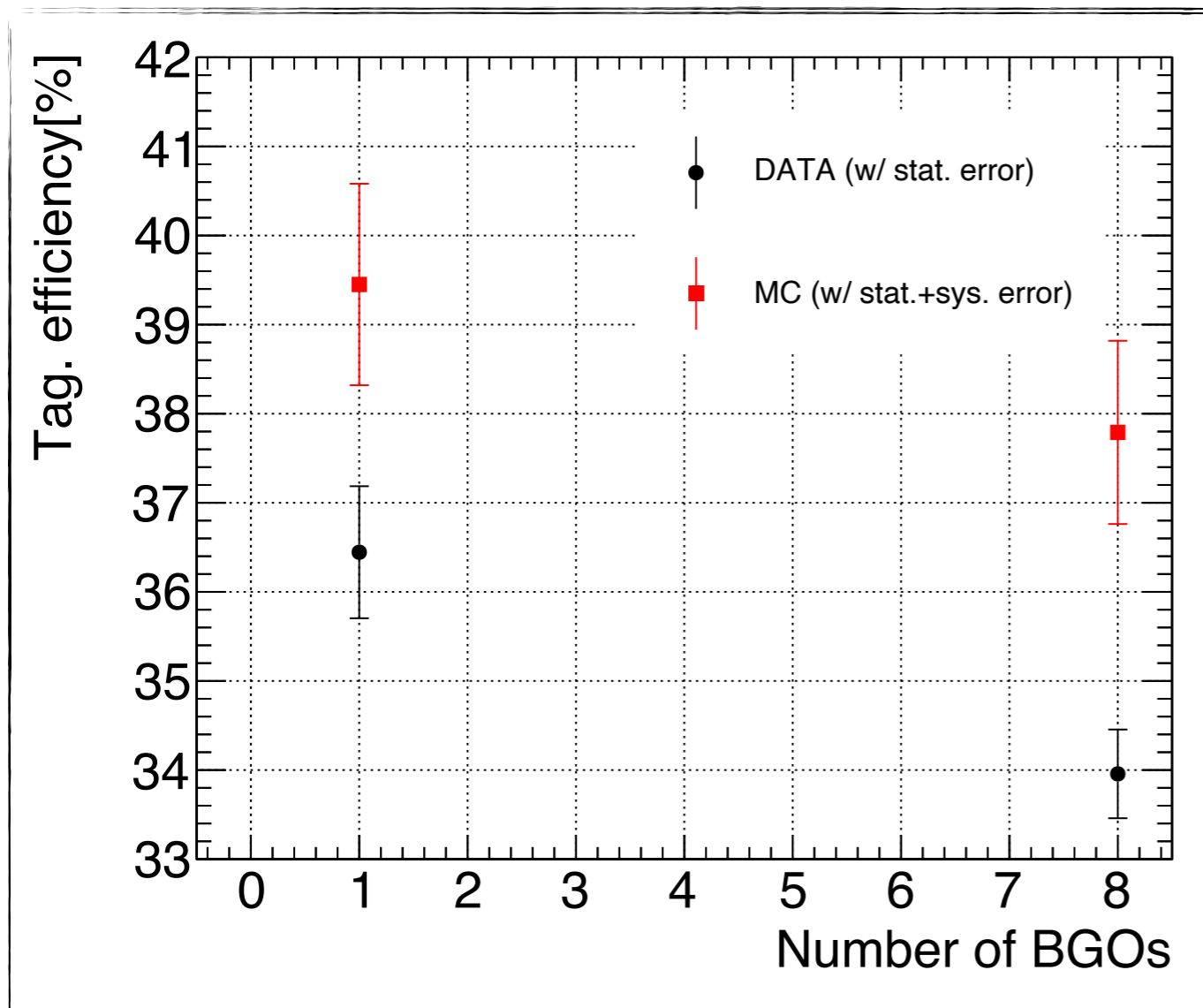


- 同定効率の位置依存性：
タンク内の異なる9点で測定
→系統誤差に含める



中性子同定効率測定結果

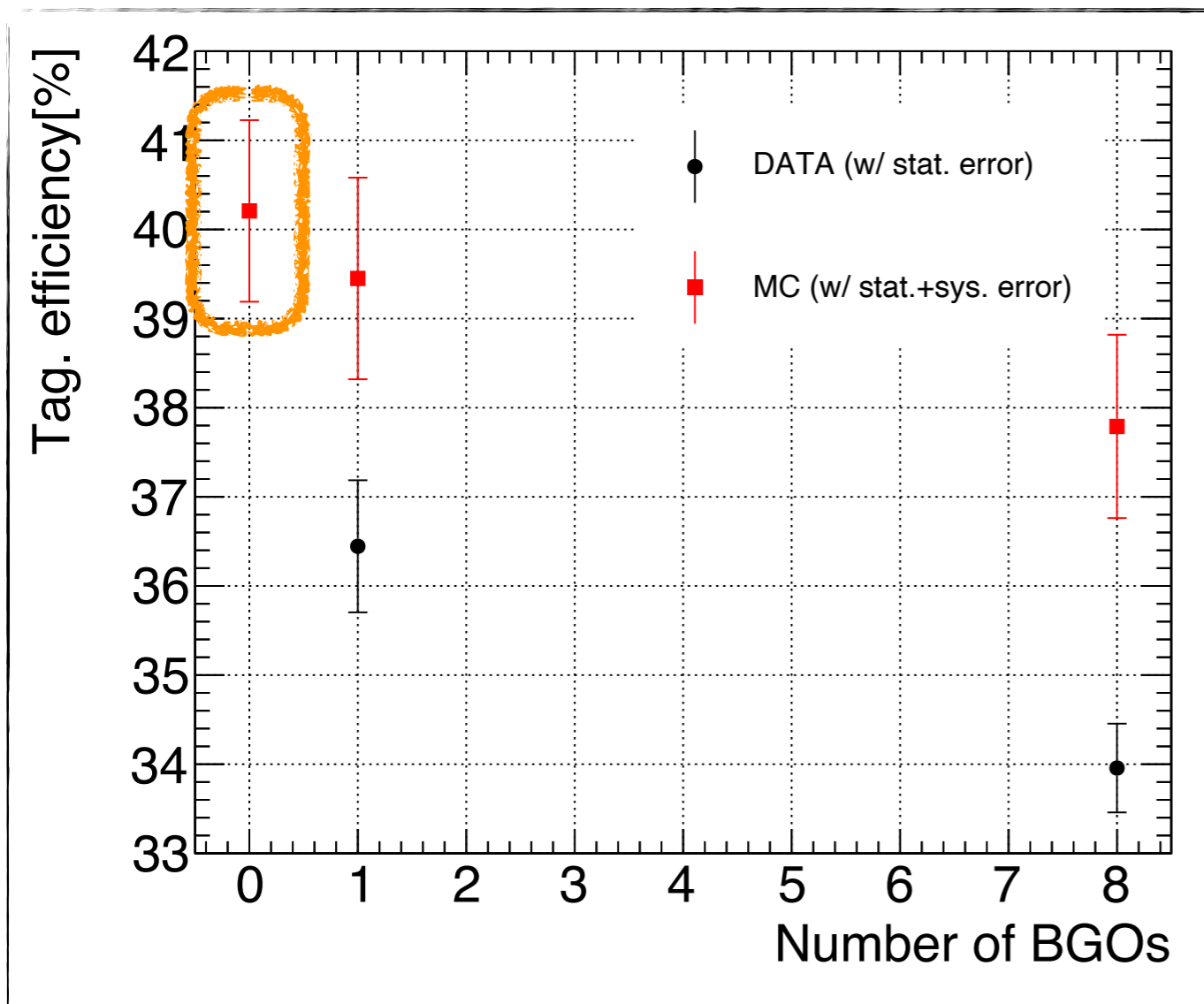
データとMCの中性子同定効率をBGOの数ごとに比較



- ▶ DATAとMCが10%以内で一致することを確認
- ▶ 同定効率・DATA/MCともにBGOの数に依存

中性子同定効率測定結果

データとMCの中性子同定効率をBGOの数ごとに比較



BGOなし(0BGO)の同定効率

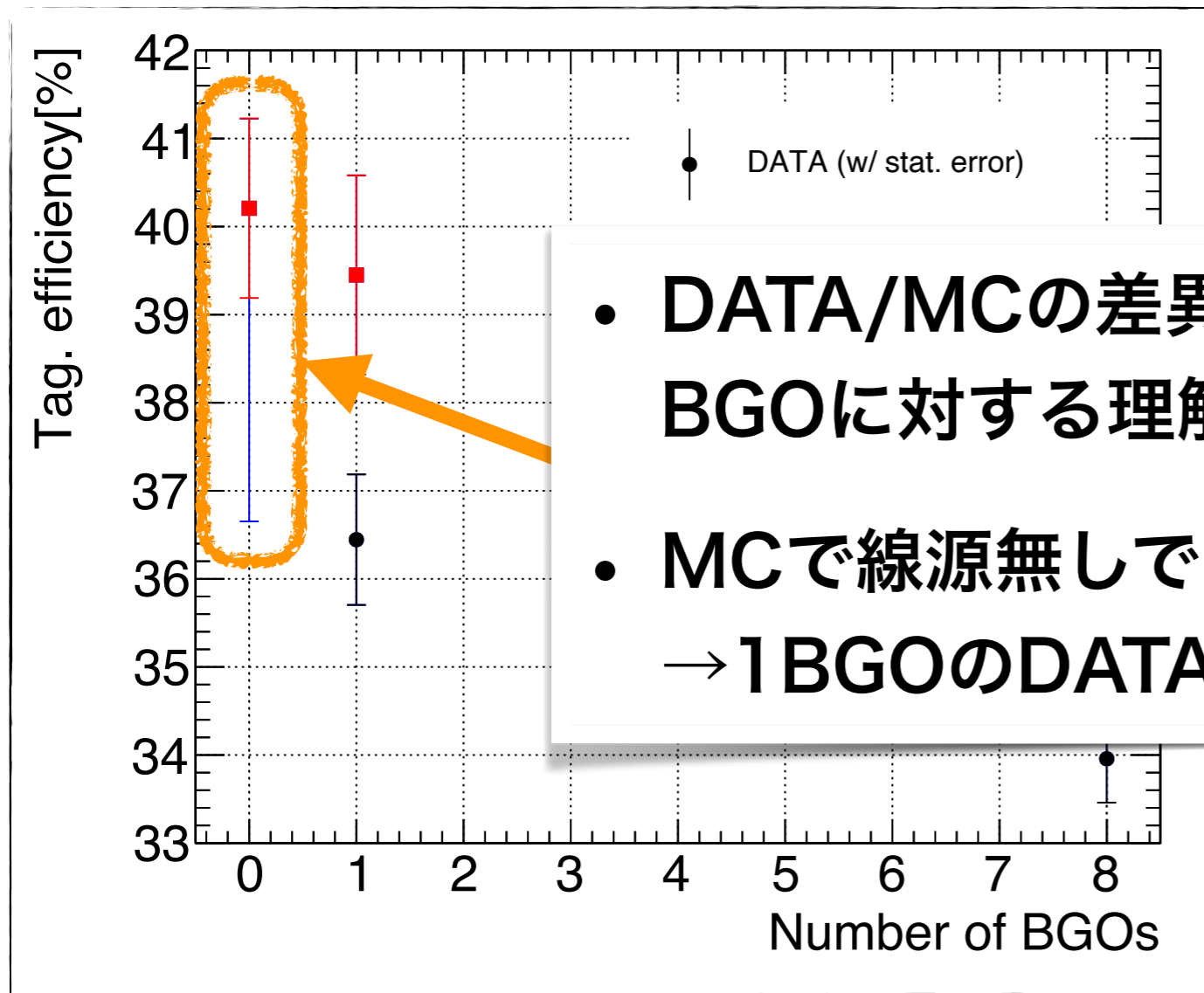
トリガー条件を満たさないため
実データで測定できない
→MCで見積もった

	1BGO	8BGO
DATA	36.4±0.7%	34.0±0.5%
MC	39.5±1.2%	37.8±1.0%
(Data-MC) /MC	-0.08±0.03	-0.10±0.03

- ▶ 0BGOで同定効率40.2±0.1%と見積もった
→BGOにより同定効率が低下していたことがわかった

中性子同定効率測定結果

データとMCの中性子同定効率をBGOの数ごとに比較



BGOなし(0BGO)の同定効率

トリガー条件を満たさないため

- DATA/MCの差異：
BGOに対する理解ができていないことが一因
- MCで線源無しでの同定効率の評価
→ 1 BGOのDATA/MCを系統誤差に加える

MC	39.5±1.2%	37.8±1.0%
(Data-MC) /MC	-0.08±0.03	-0.10±0.03

SK-Gdでの中性子同定効率： 40.2 ± 0.1 (stat.) $^{+0.9}_{-3.4}$ (syst.)%

(相対誤差8.8%)

中性子測定まとめ

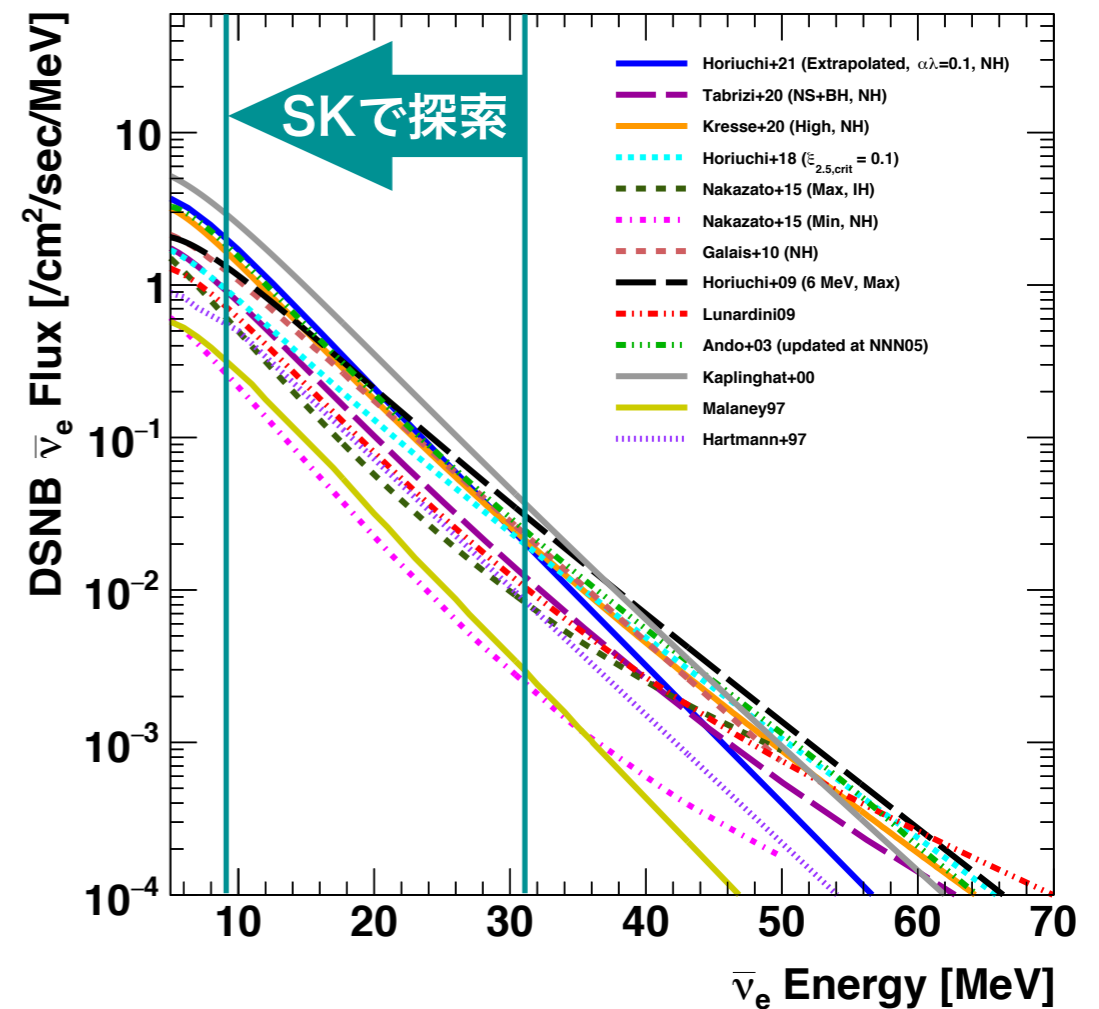
- SK-Gd実験での中性子同定手法を確立した
→自身で構築した検出器MCを使ってGdによる中性子捕獲効率を見積もった
- SKにGdを導入後初の中性子線源測定を実施
→中性子の捕獲時定数や同定効率について実データを用いて評価した
- データとMCを比較することで、解析における系統誤差を8.8%と見積もった
→データ解析に用いることができる

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を使って SRN探索を行なった

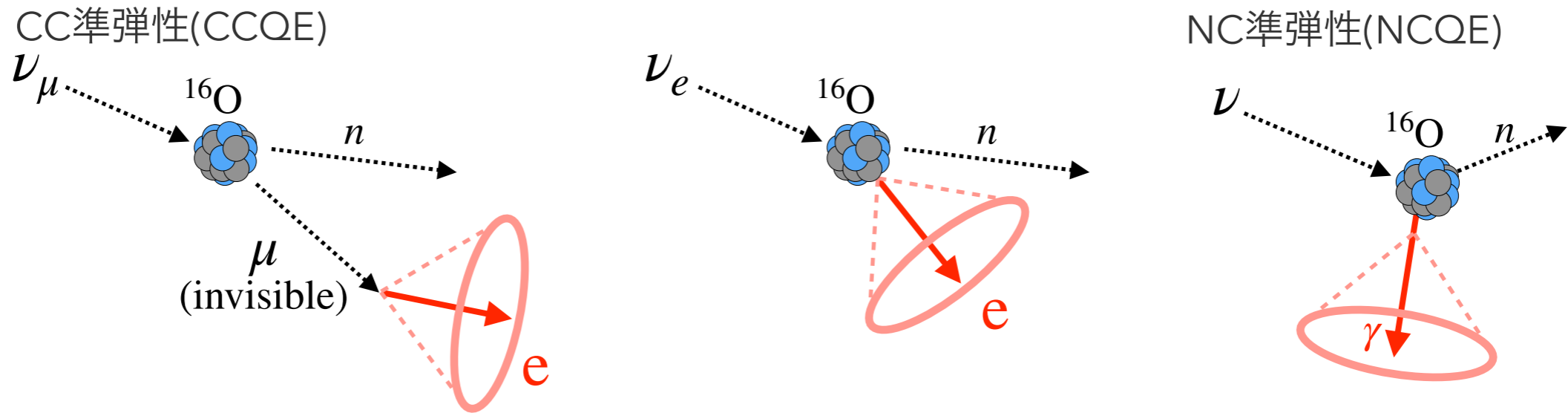
- ▶ データセット：SK-VI (Live time: 552.2 days)
 - ▶ Gd濃度：0.01%
 - ▶ 探索ニュートリノエネルギー：
9.3 ~ 31.3 MeV
(陽電子エネルギー：8~30 MeV)



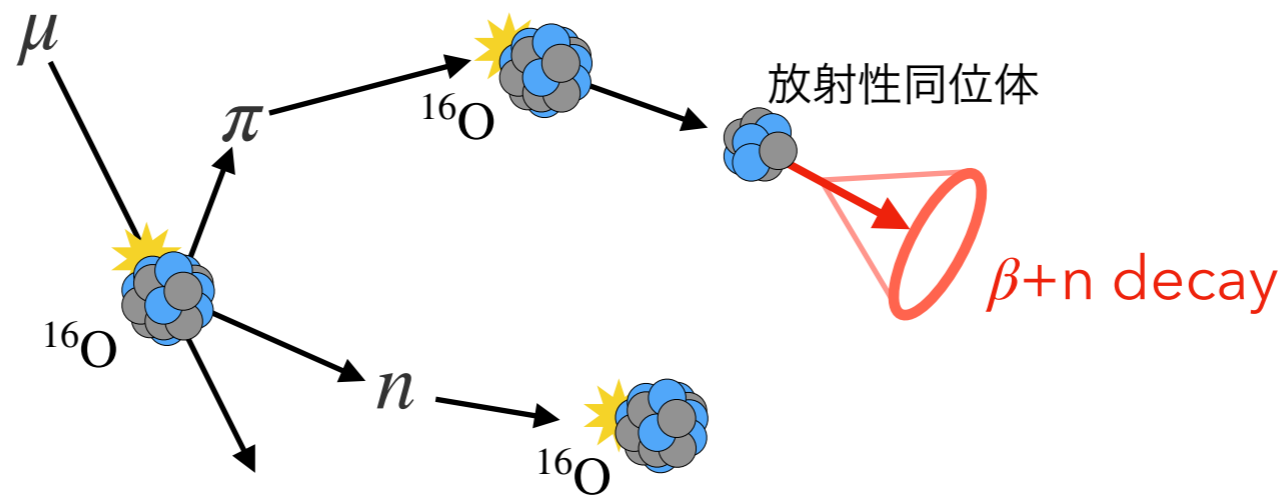
バックグラウンド事象

- 中性子を伴う可能性のあるバックグラウンド

- ▶ 大気ニュートリノ起源事象



- ▶ ミューオンの原子核破碎で生成される放射性同位体の崩壊



バックグラウンド事象

- 中性子を伴う可能性があるバックグラウンド
 - ▶ アクシデンタル事象
 - ▶ 電子事象 + 中性子信号のペアが偶然できる
 - ▶ 多くは中性子のない核破砕事象(SRNの $O(10^6)$ 倍) + 中性子誤識別事象
 - ▶ 原子炉ニュートリノ
 - ▶ 信号はSRNと同じIBD
→エネルギーが低くほとんど影響しない

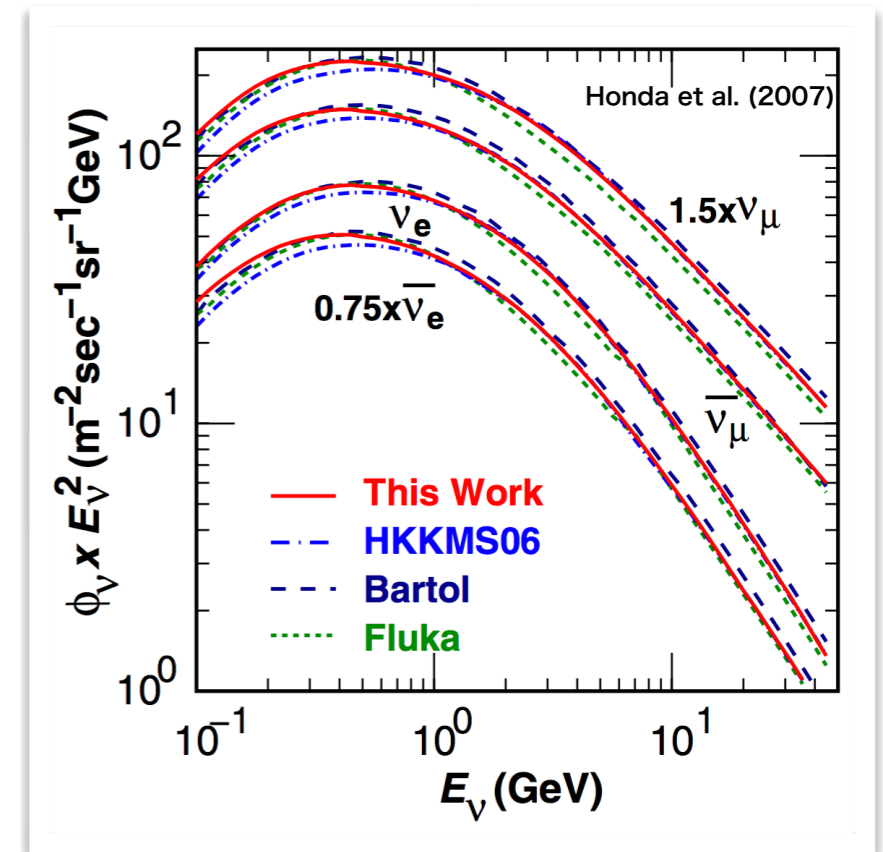
**それぞれのバックグラウンドについて
除去手法の確立が必要**

大気ニュートリノ

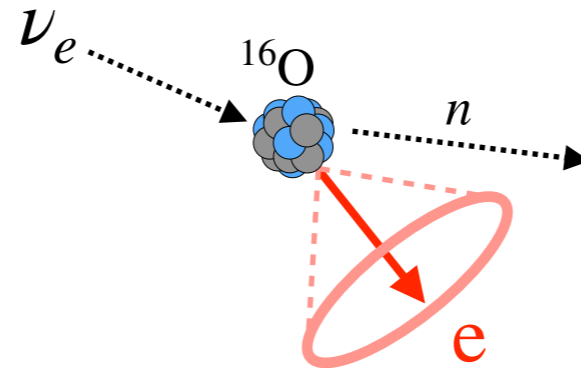
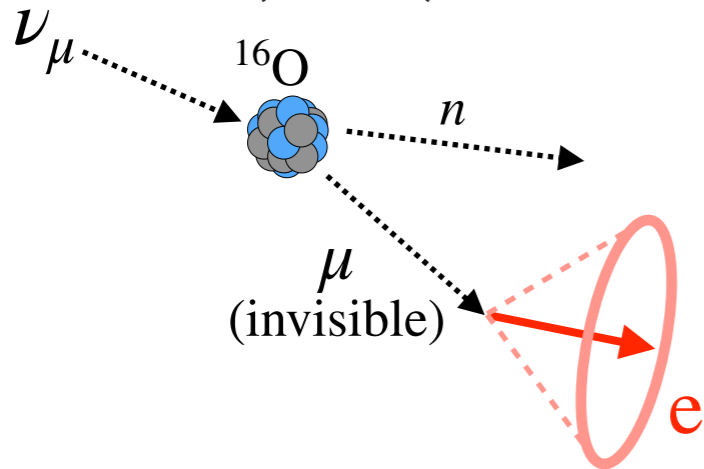
宇宙線が地球の大気で反応

→ $E > 100 \text{ MeV}$ ニュートリノ生成

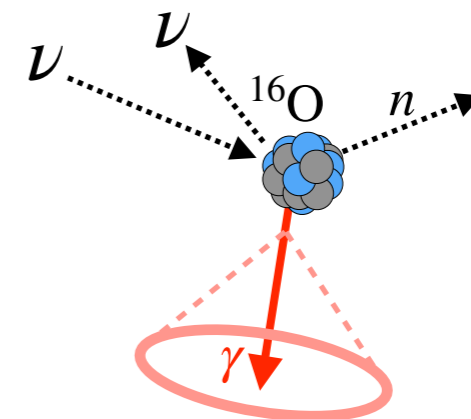
- SKは高エネルギー μ 、 π をe信号と区別可能
 - ▶ 低エネルギー μ 、 π
 - ▶ 原子核反応からの γ 線を区別し、除去する必要がある



CC準弾性(CCQE)



NC準弾性(NCQE)

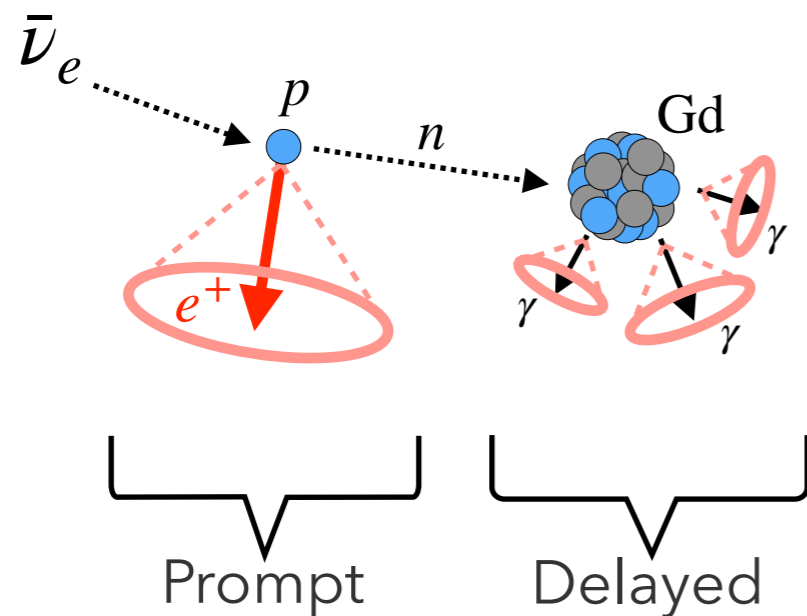


...

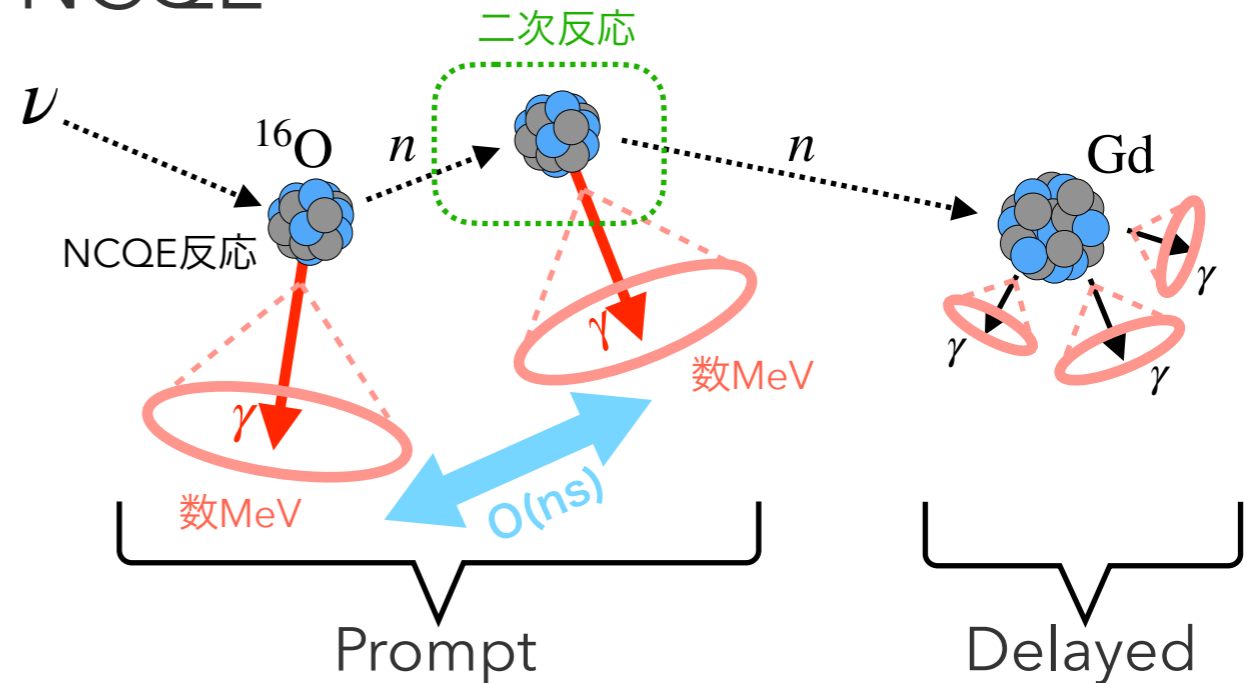
大気ニュートリノ事象除去

- μ 、 π と e の性質の違いを使ったカット
 - 崩壊事象の有無、PMT電荷量、ヒットパターンetc..
- NCQE事象
 - 2次原子核反応との区別ができない→同一のイベントとして観測
 - イベントは原子核の脱励起→SRNのエネルギー領域に被る

IBD

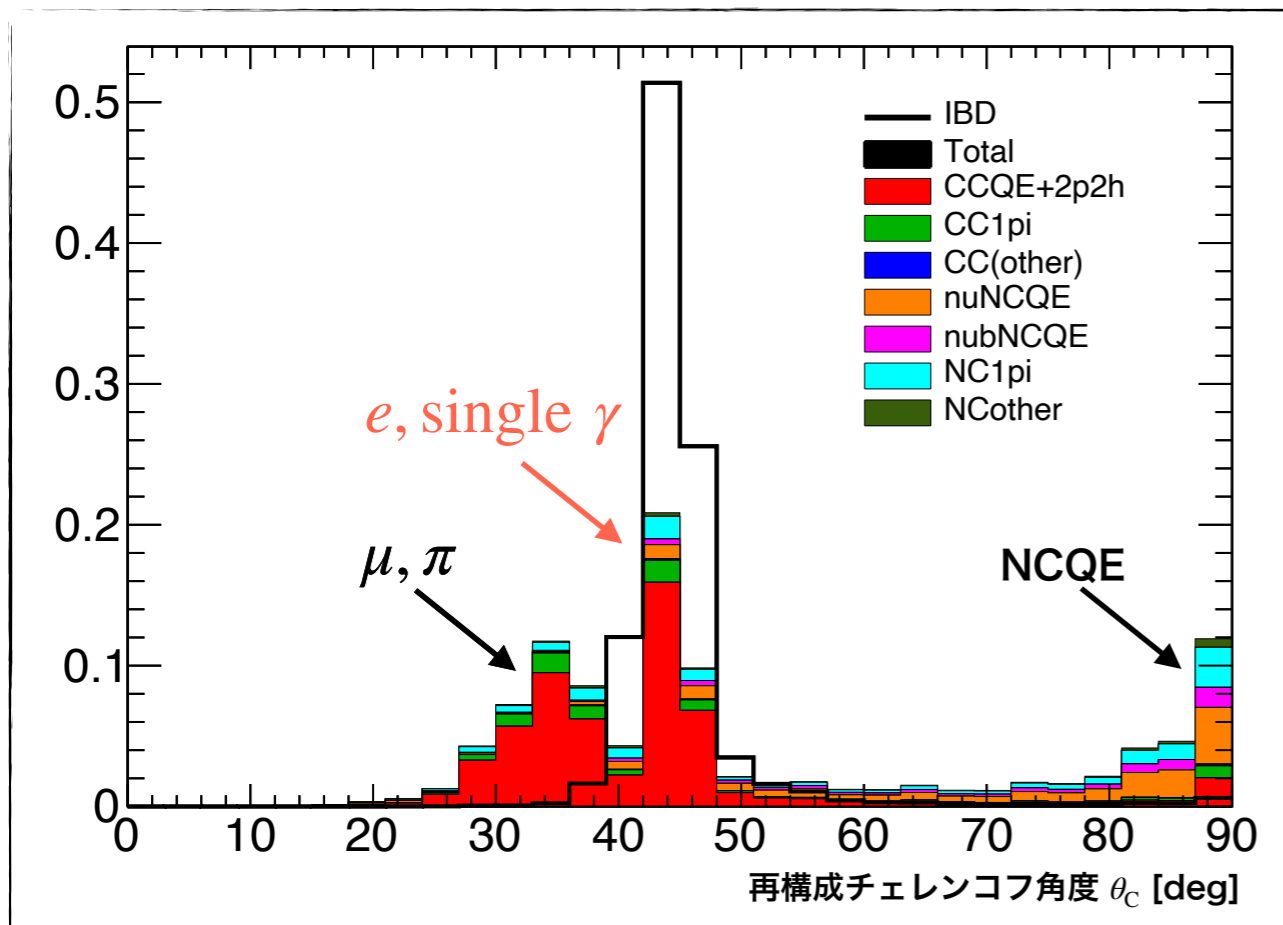
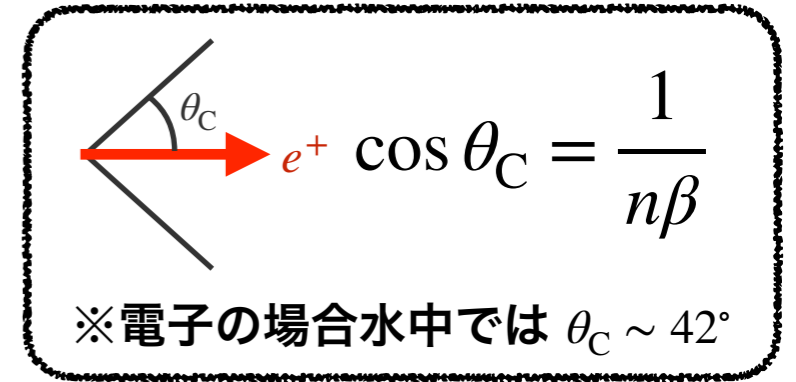


NCQE

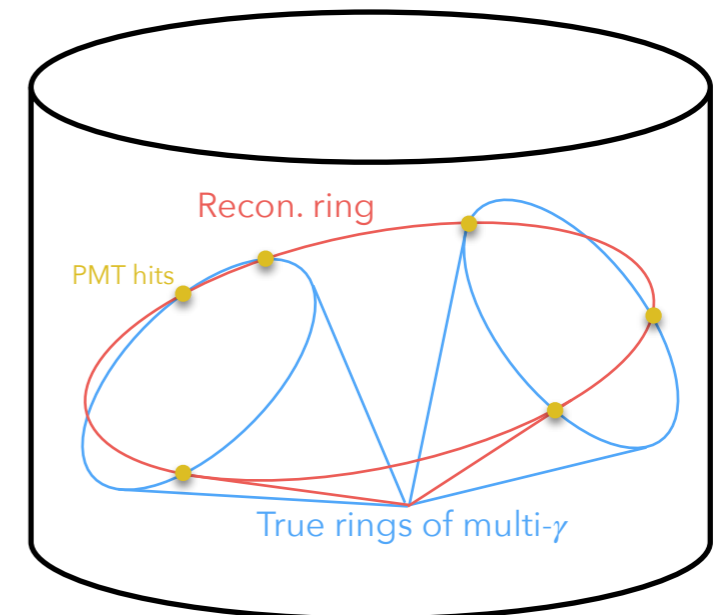


チェレンコフ角度を用いた除去

粒子の違いがチェレンコフ角度に反映される
→チェレンコフ角度を用いた除去

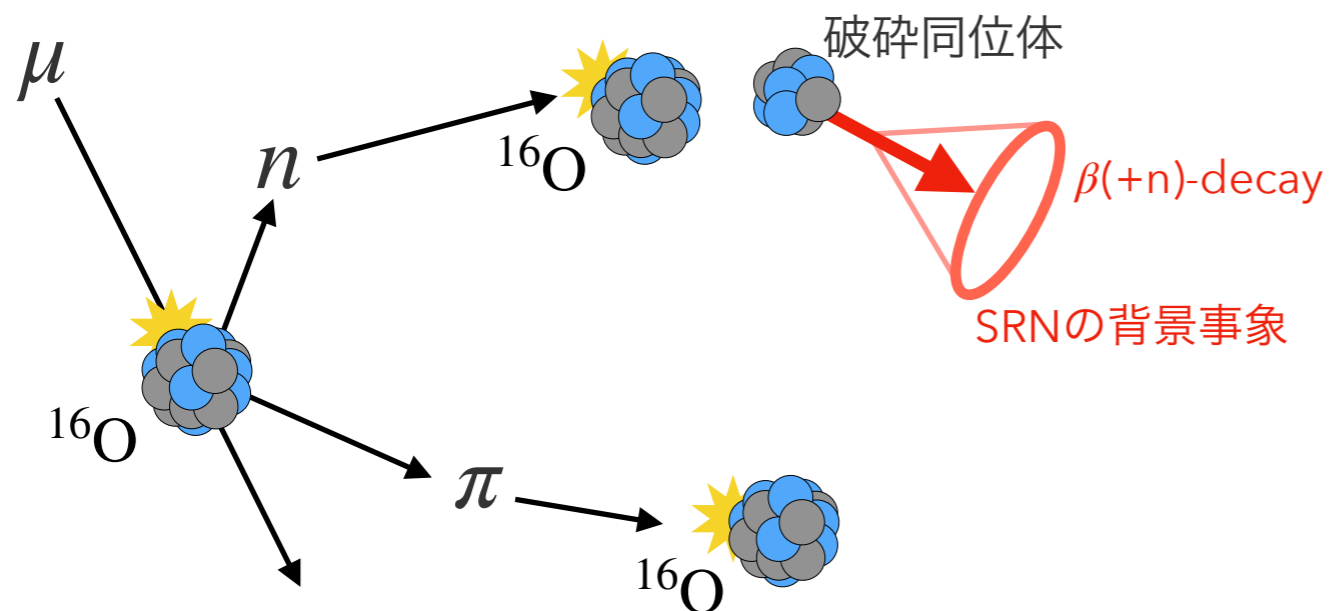


- ▶ μ, π : 質量が大きい $\rightarrow \theta_C$ が小さくなる
- ▶ NCQE: 複数のガンマ線が一つのイベント $\rightarrow \theta_C \sim 90^\circ$ で再構成



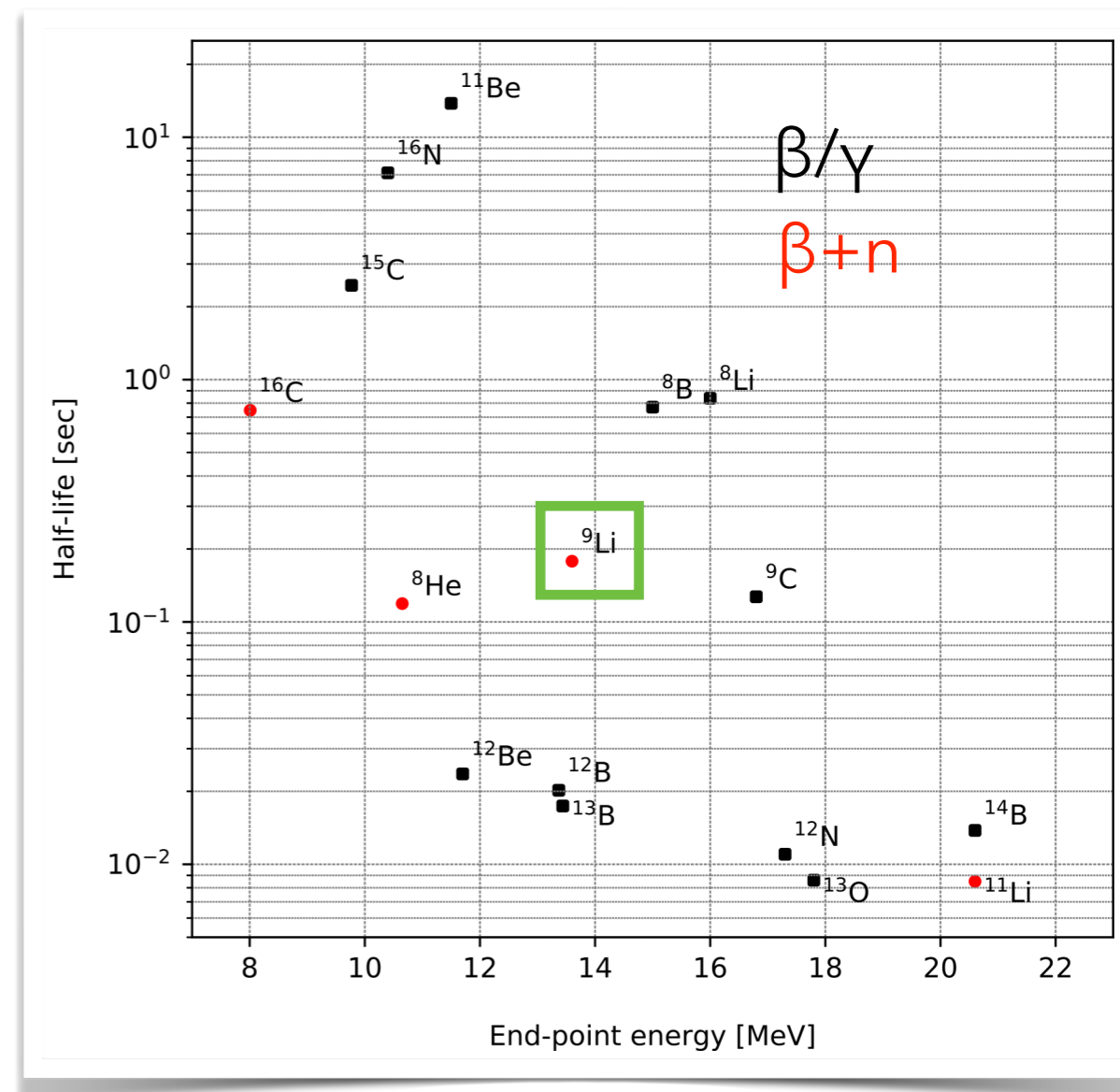
ミューオンの原子核破砕

- SKには2 Hzで宇宙線ミューオンが飛来
 - ミューオンが原子核を破砕→同位体の崩壊 (msecスケール)



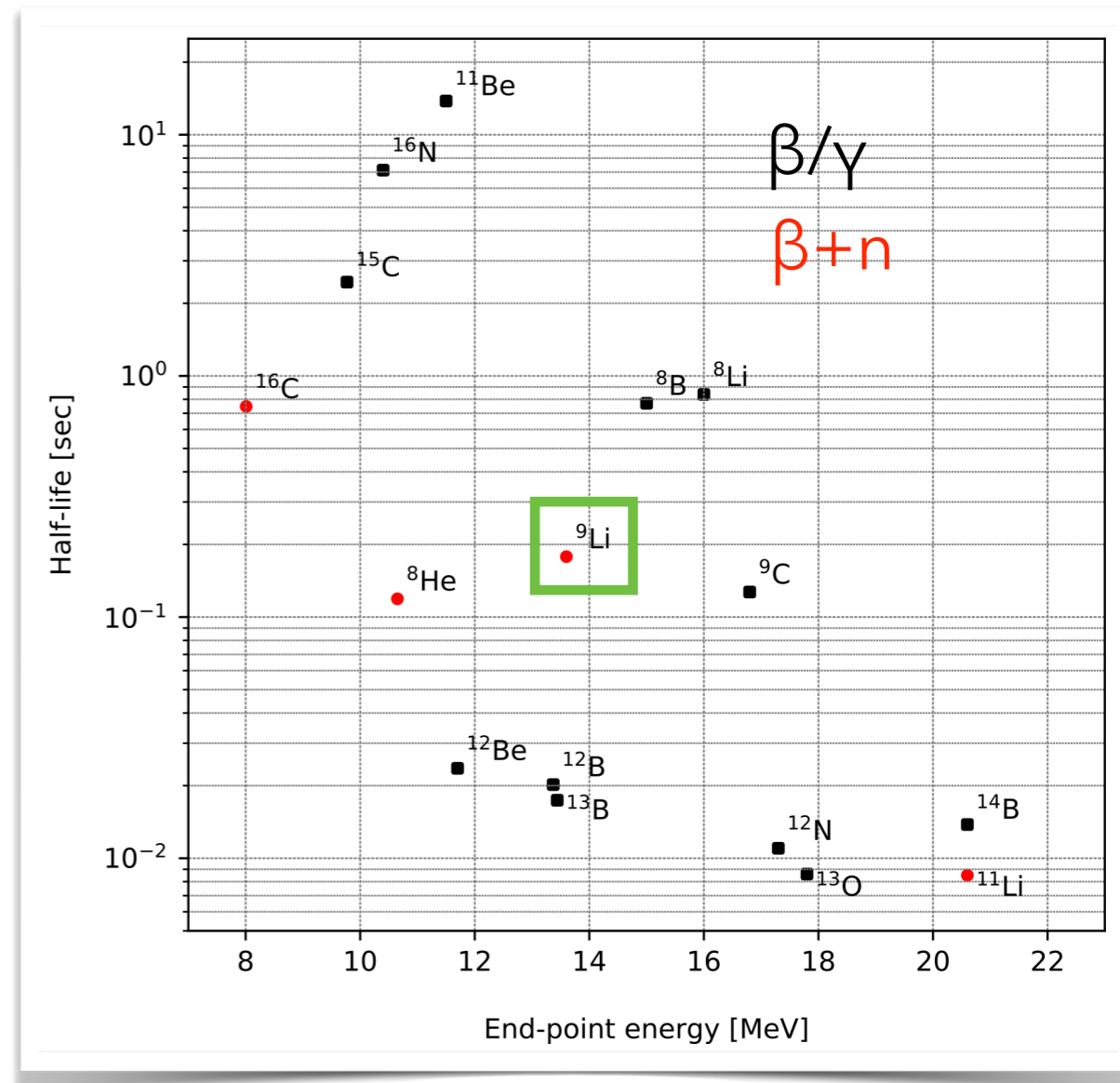
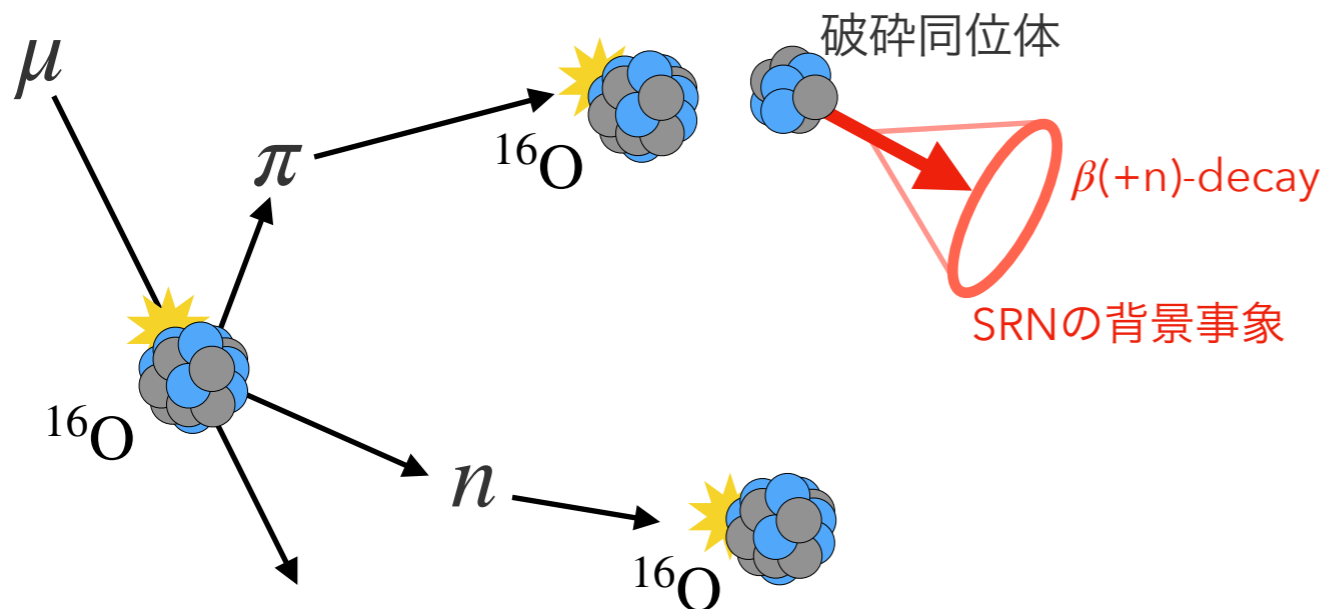
リチウム9 (^9Li)

- $\beta + n$ 崩壊のモード
 - 高いレート、長い半減期
- バックグラウンドとして残る



ミューオンの原子核破砕

- SKには2 Hzで宇宙線ミューオンが飛来
 - ミューオンが原子核を破砕→同位体の崩壊 (msecスケール)

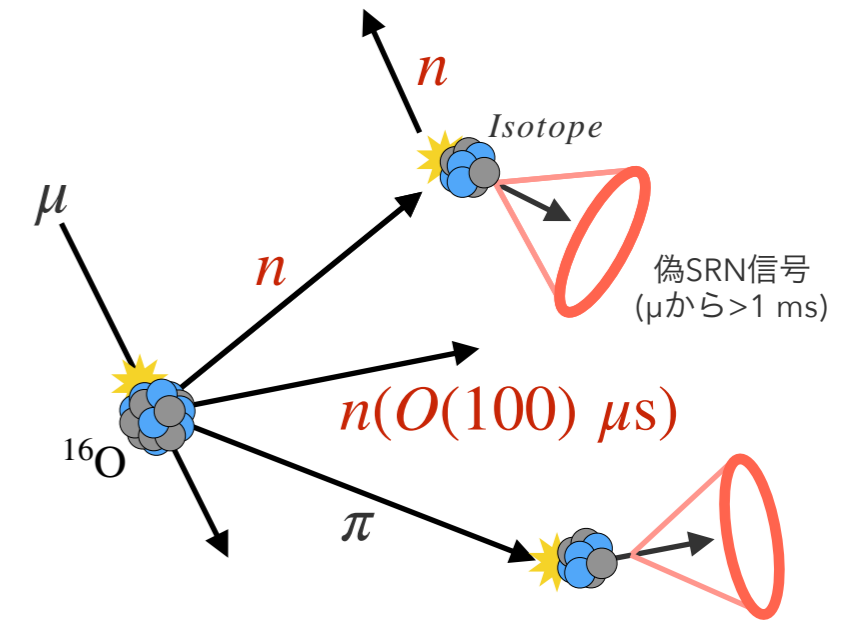


さらに。。

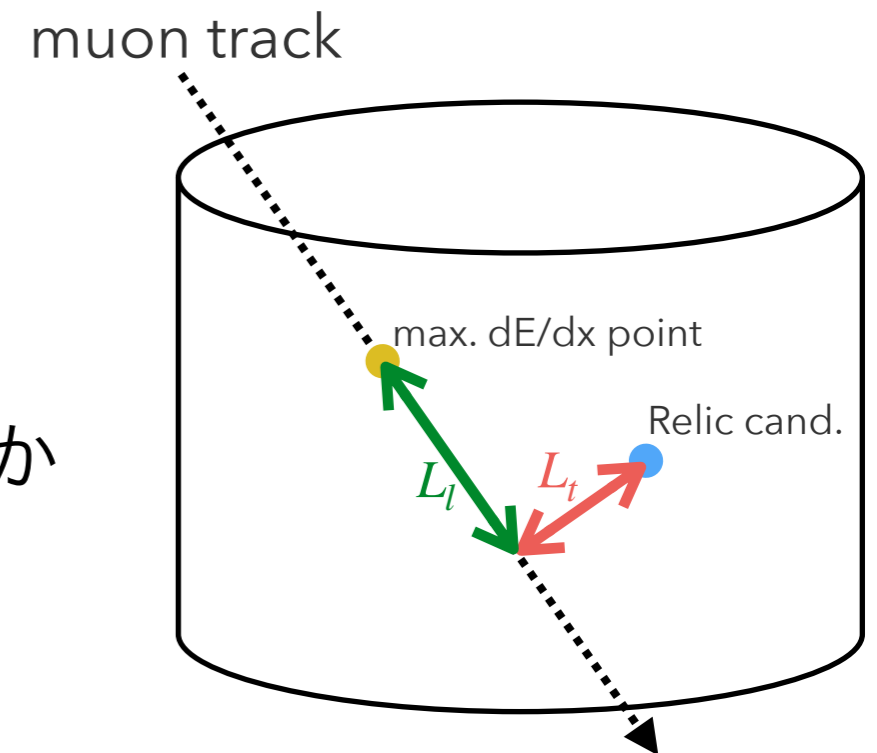
- 核破砕事象はSRNの $\sim 10^6$ 倍
→Accidental事象の削減には
中性子同定と合わせて **$O(10^{-6})$** の
削減が必要

核破碎事象除去

- 核破碎によってハドロンシャワーが発生
 - ▶ μ 事象後に中性子クラスター ($100 \mu\text{s}$)
 - ▶ 時間(sec)・空間(m)相関を持った低エネルギー事象クラスター



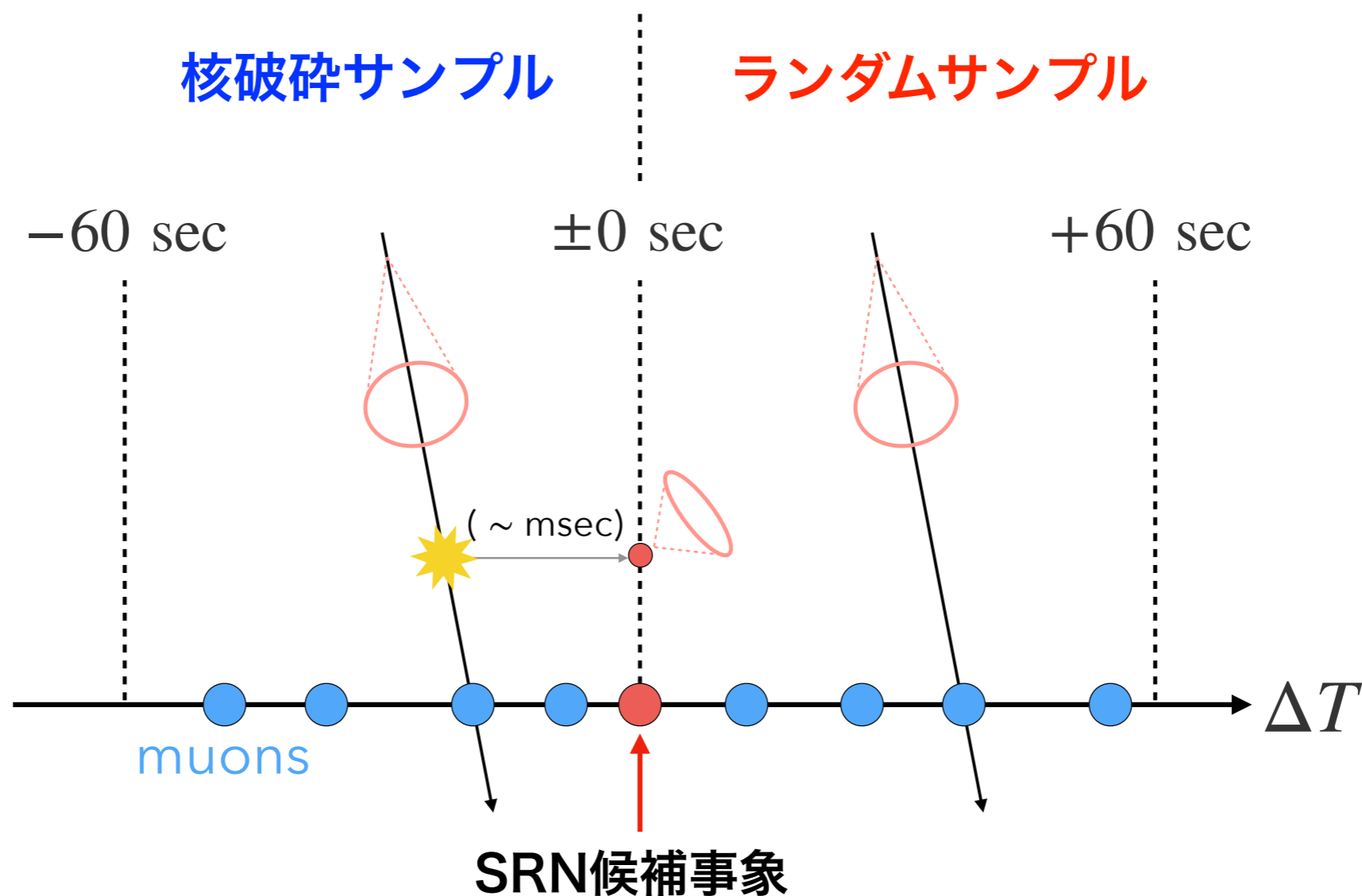
- 同位体崩壊はミュオン事象の近くで起こる
 - ▶ ミュオンとの時間差
 - ▶ ミュオントラックとの距離
 - ▶ ミュオンがどこでエネルギーを落としたか
→ 尤度計算



原子核破碎の精度良いモデルがない
→ データを使って除去性能を見積もる

ミュオンオンサンプリング

データから核破砕ミュオンとそうでないミュオンを比較するために、
SRN候補事象の時間前後のミュオンをサンプル



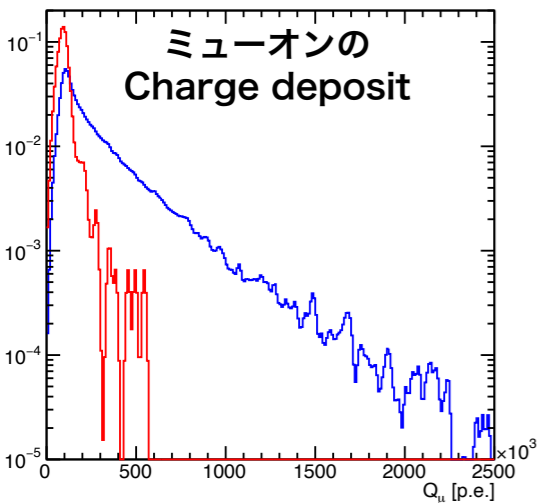
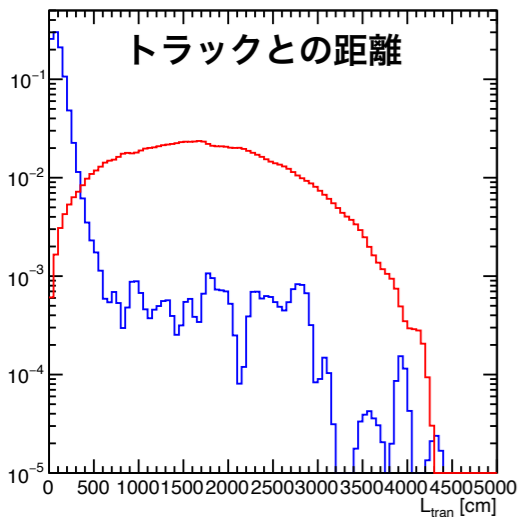
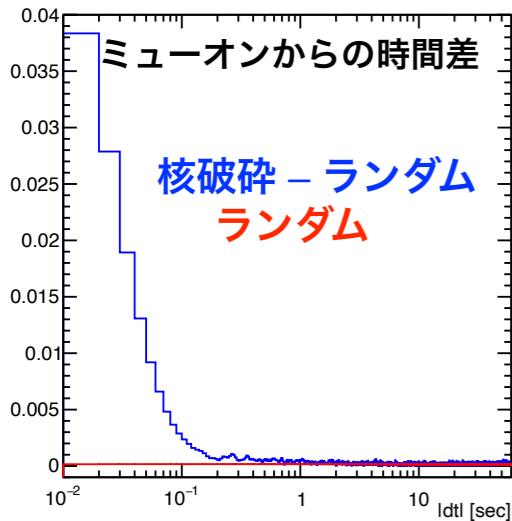
(核破砕サンプル - ランダムサンプル)から、核破砕の特徴量を抽出

尤度関数を使った核破砕除去

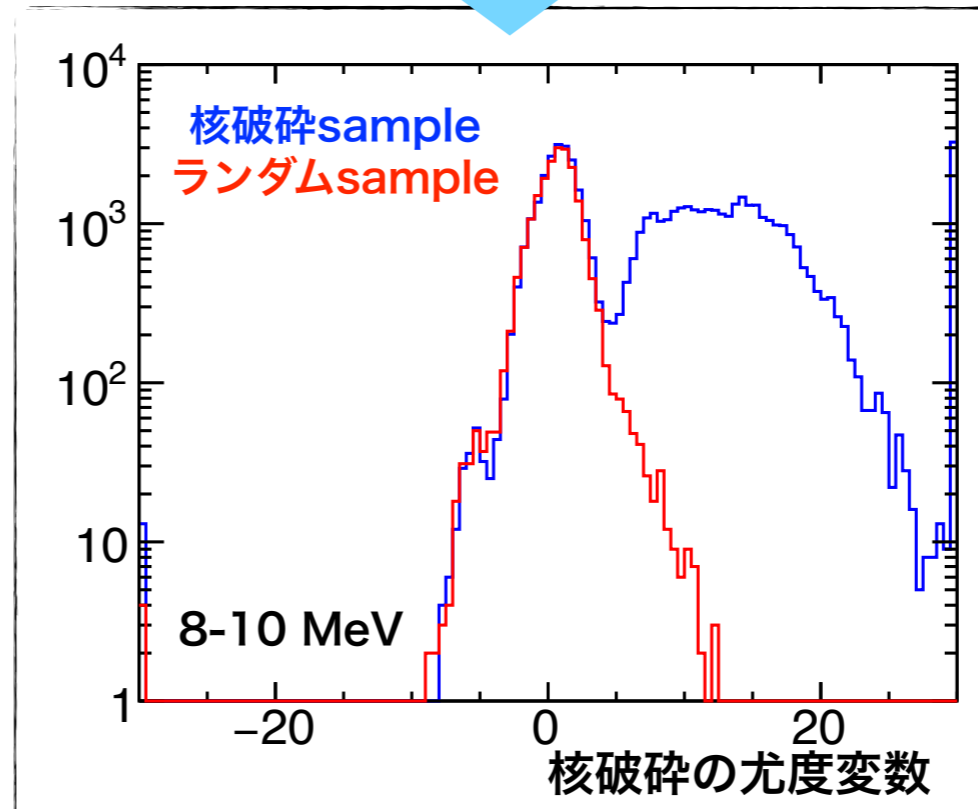
核破砕の特徴量5つから

核破砕サンプルとランダムサンプルの違いで尤度計算

- ▶ 時間差：核破砕サンプルは指数構造を持っている
- ▶ 距離：核破砕サンプルは距離が近い側にピークを持つ
- ▶ 総電荷量：核破砕サンプルはエネルギーをより落とす



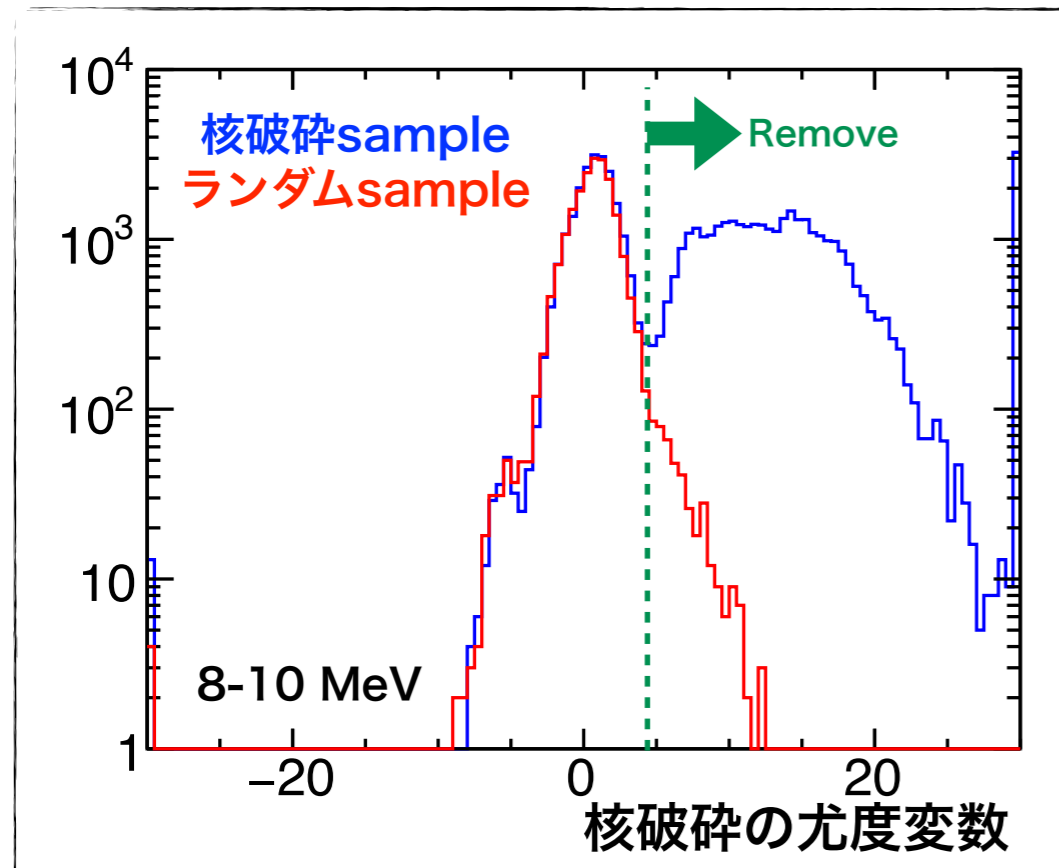
5変数で尤度関数計算*



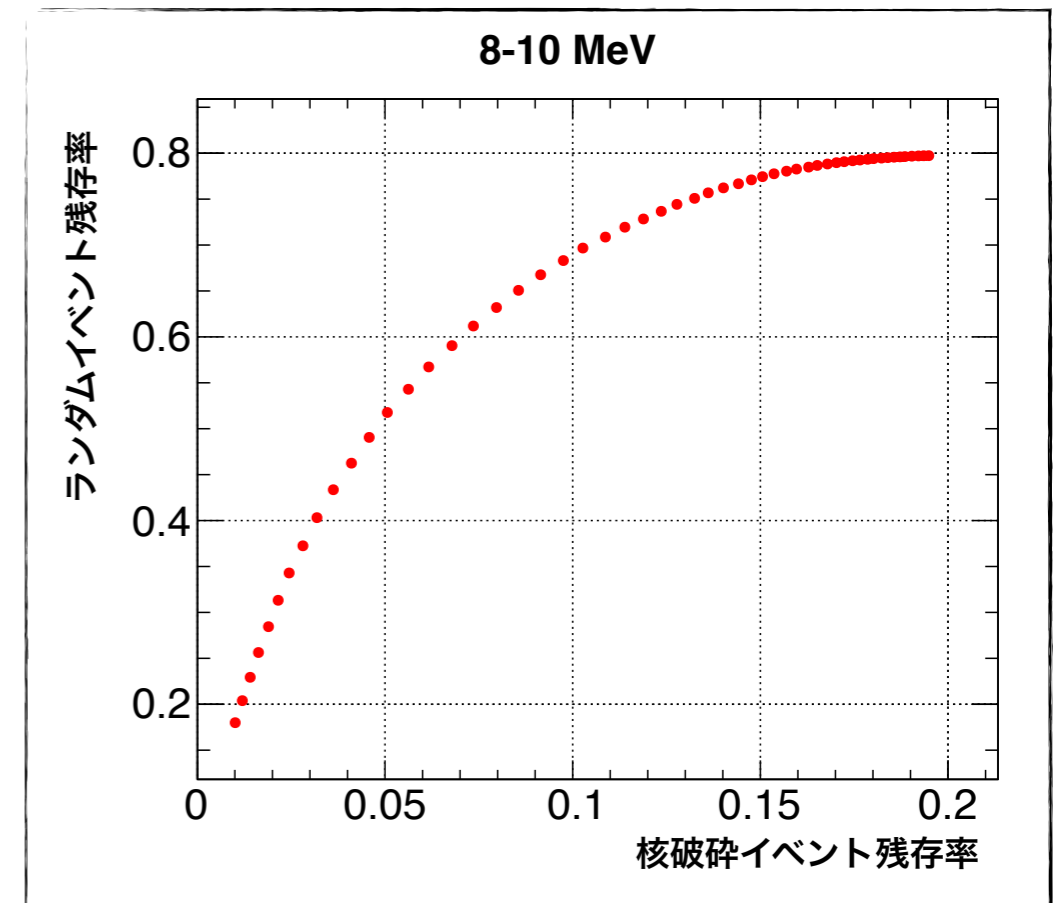
*尤度関数はイベント種類ごとに作成

核破砕除去の性能評価

核破砕バックグラウンドの種類はエネルギーごとに異なる
→2 MeVごとに除去性能評価



閾値を変えて*評価



*尤度関数の閾値はイベント種類ごとに变化させる

ランダムイベントを>50%残しながら
核破砕のイベントを0(1)%まで削減することが可能

中性子数を使った事象選択

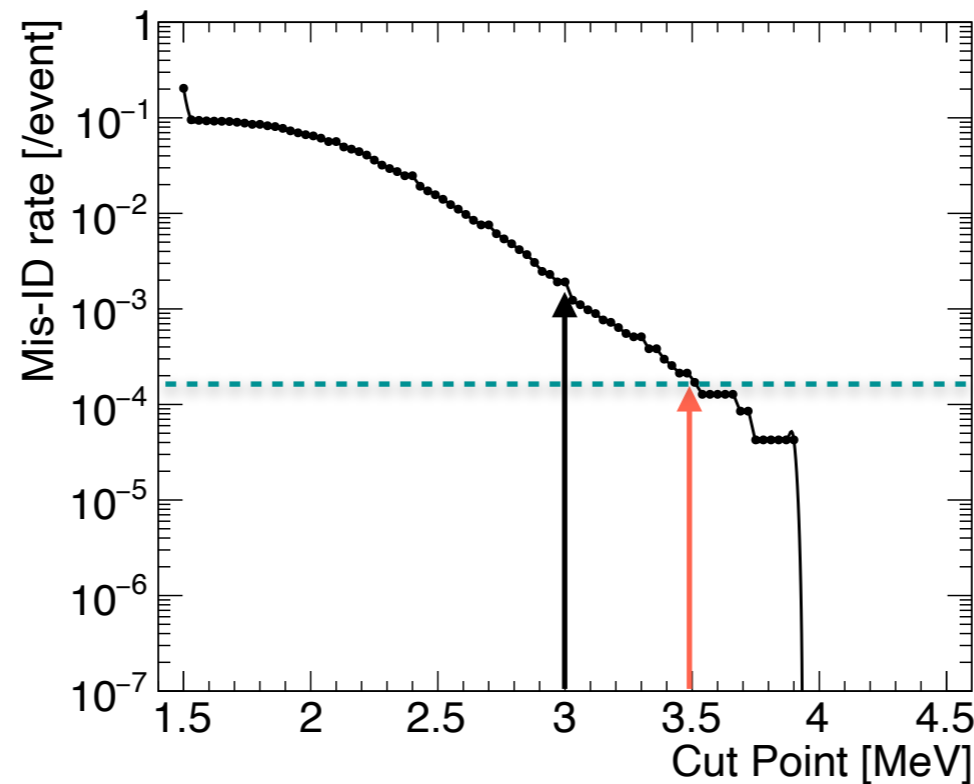
遅延中性子数=1を要求

核破砕除去カットで核破砕をO(1)%に削減

→アクシデンタル事象を低減するために

中性子誤認識率をO(10⁻⁴)/[event]に削減する必要

中性子選択のエネルギーカットを3→3.5 MeVまで引き上げた



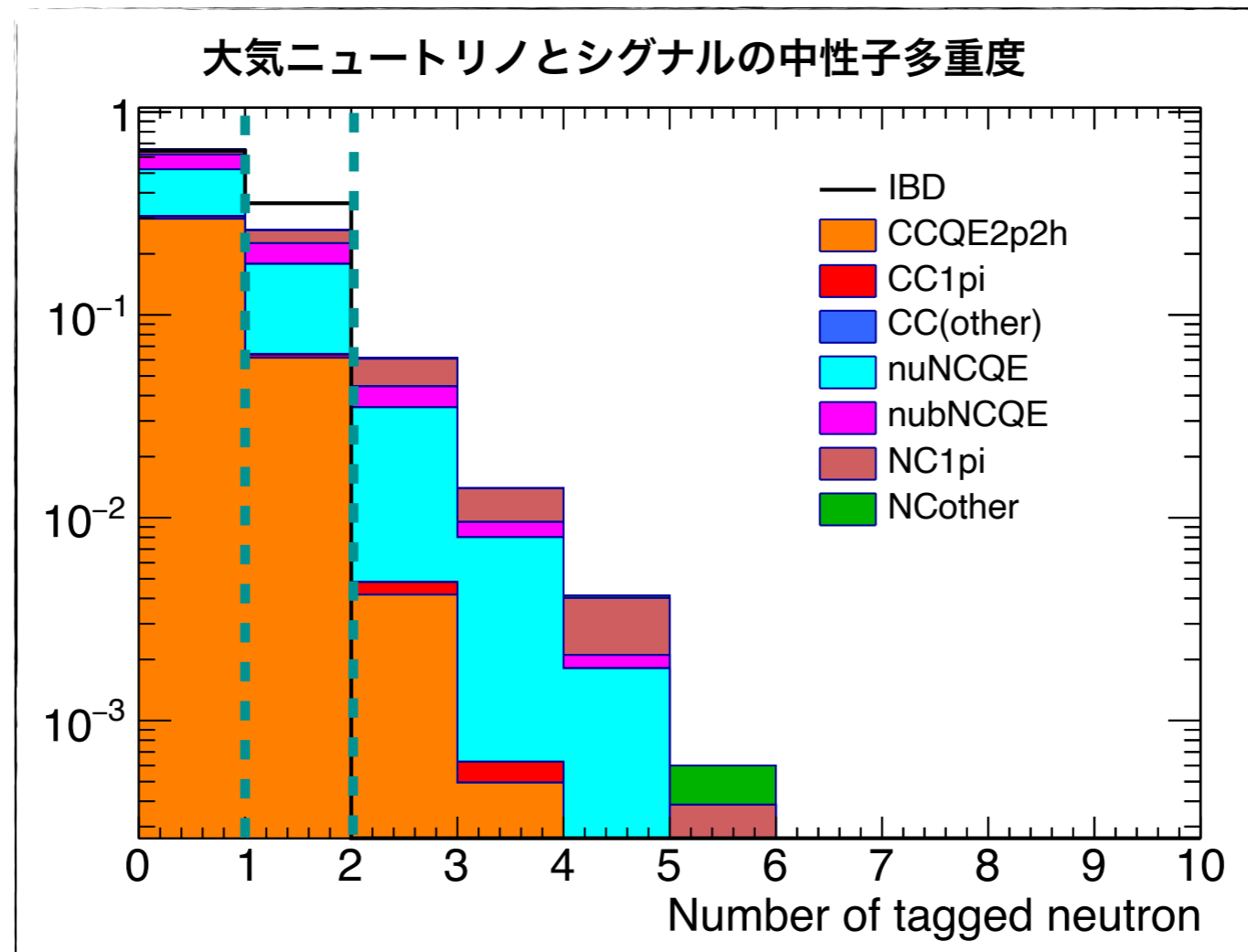
中性子同定効率：**35.6±3.1%**

中性子誤認識率：**(2.8±0.2)×10⁻⁴[/event]**

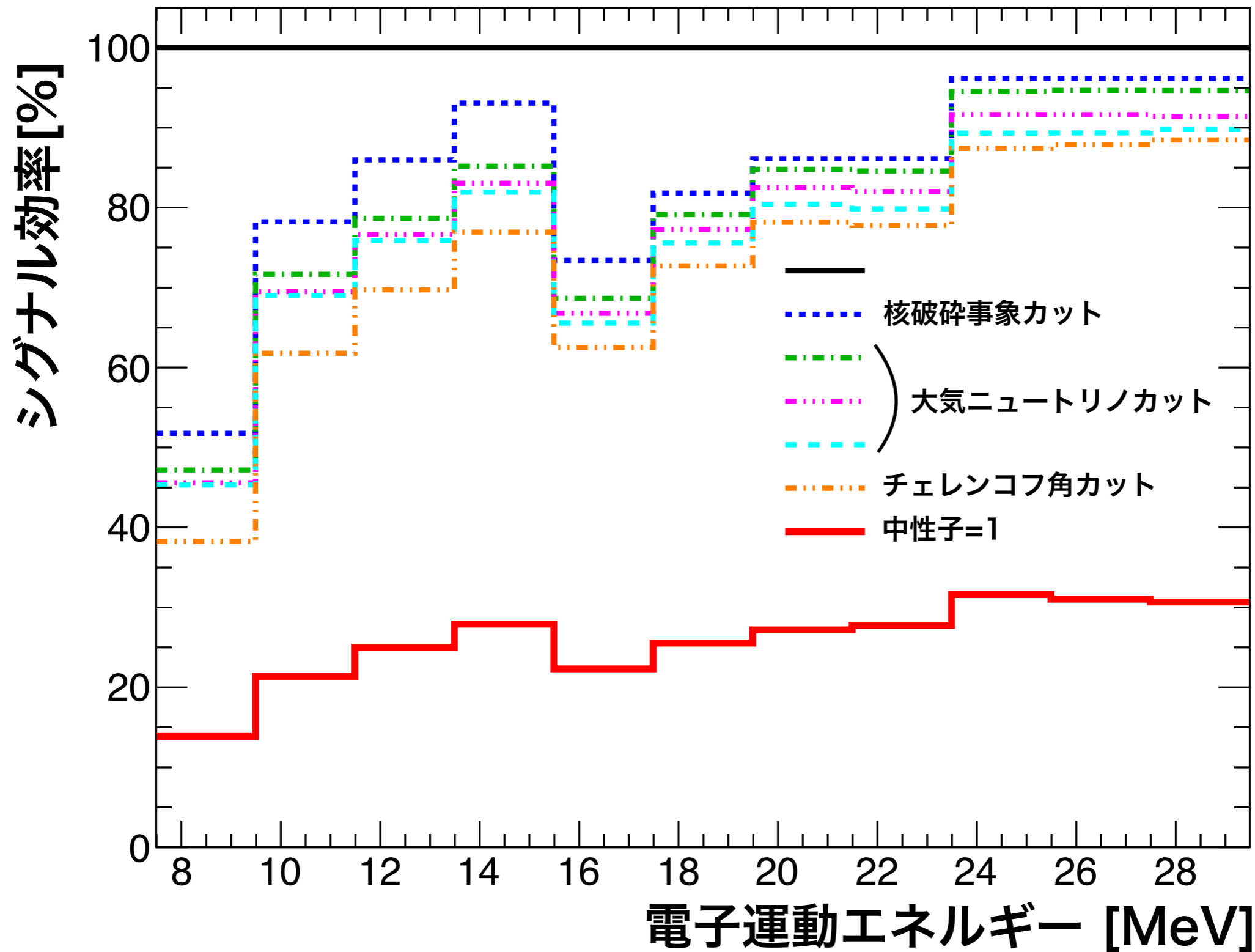
中性子数を使った事象選択

遅延中性子数=1を要求

- ▶ 中性子が付随しない事象（大半の核破砕事象、太陽 ν ）
- ▶ 中性子が複数随伴する事象（大気ニュートリノ）
→を除去してIBDを選択



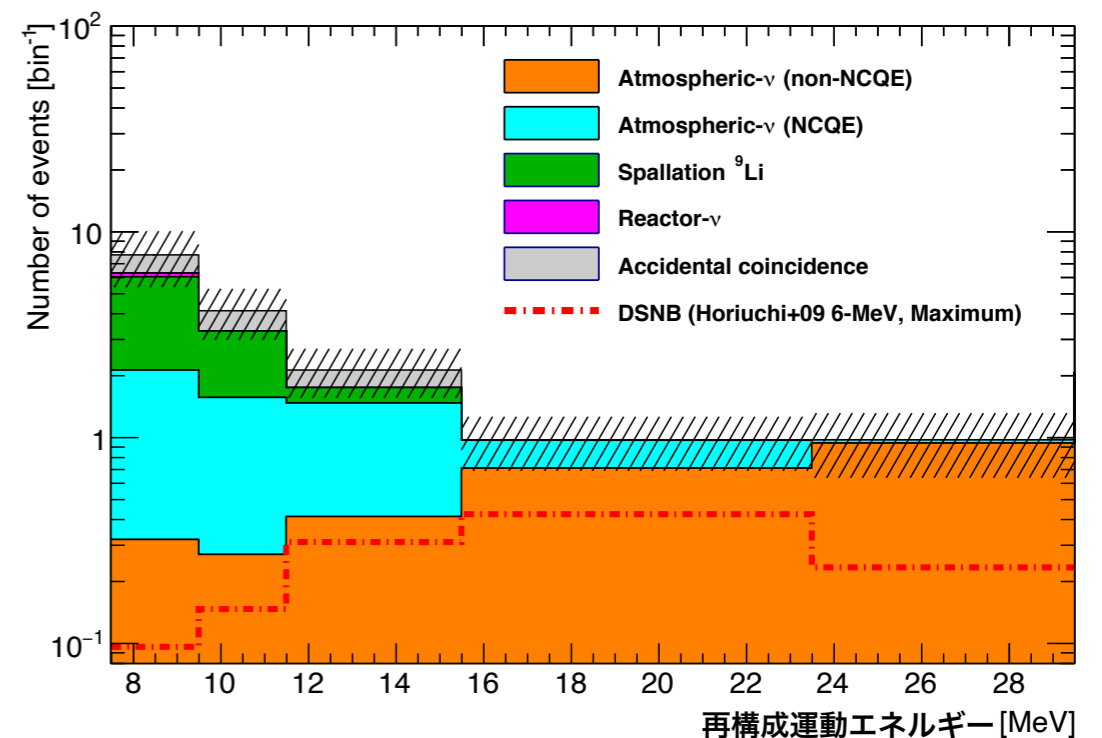
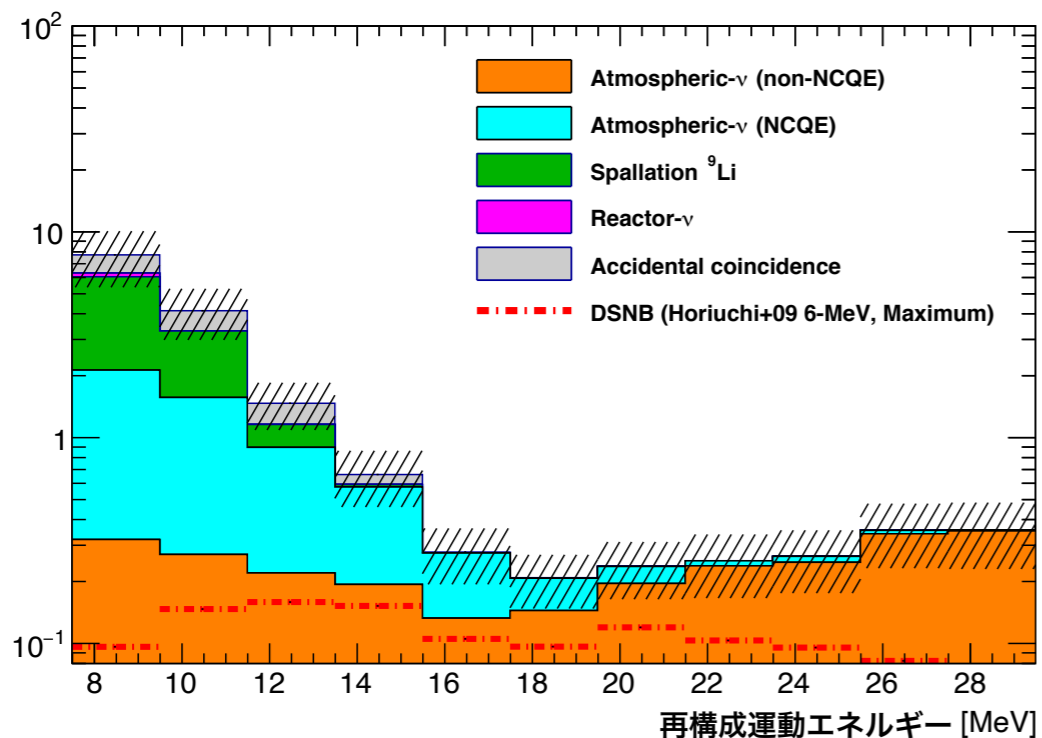
シグナル効率



イベント選別結果

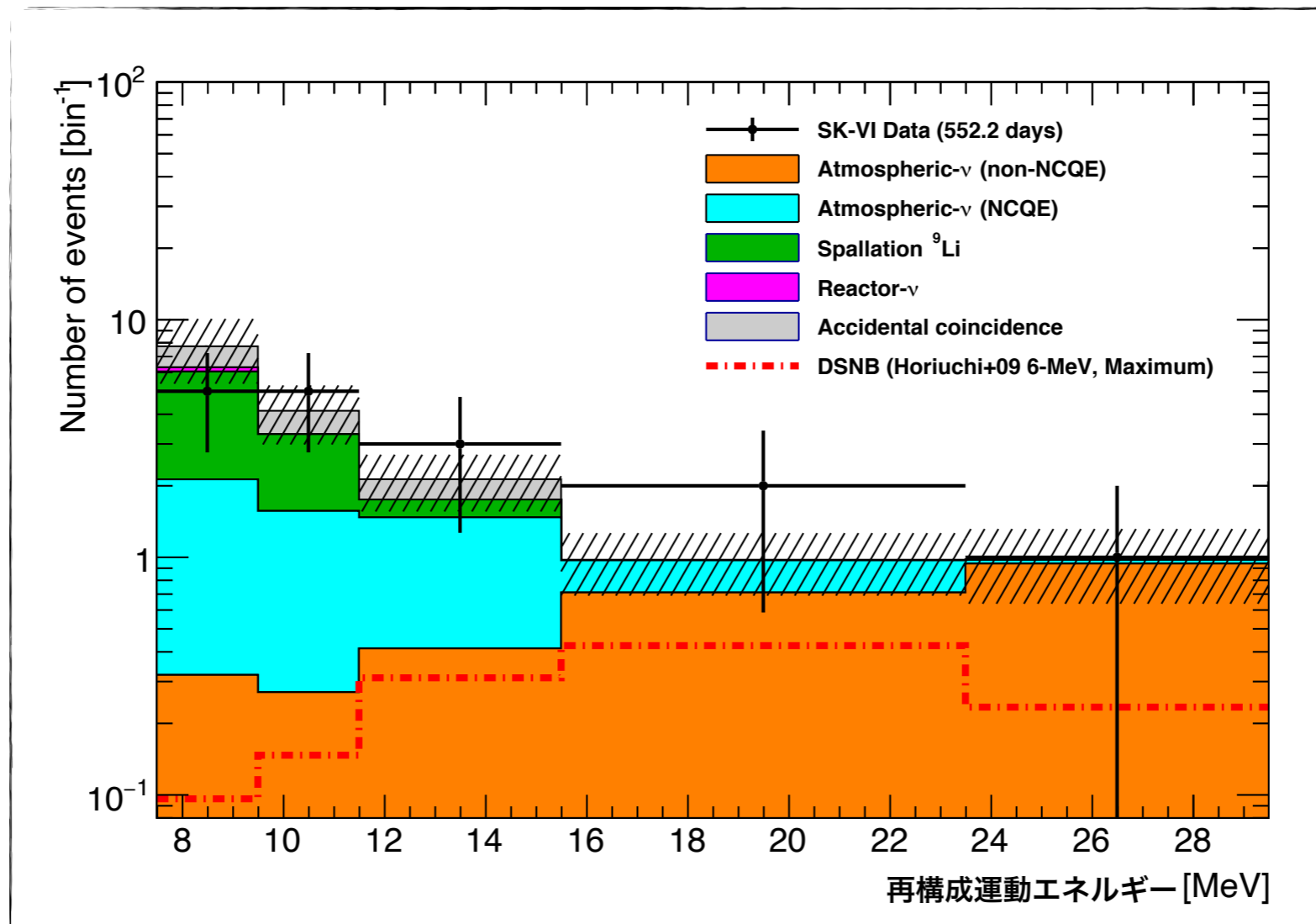
バックグラウンドMCのイベント選別結果
 →バックグラウンドの種類からbin幅を決定

Energy range [MeV]	Contained Background
7.5 - 9.5	non-NCQE, NCQE, Li9, Reactor, Accidental
9.5 - 11.5	non-NCQE, NCQE, Li9, Accidental
11.5 - 15.5	non-NCQE, NCQE, Li9, Accidental
15.5 - 23.5	non-NCQE, NCQE
23.5 - 29.5	non-NCQE, (NCQE)



探索結果

イベント選別結果

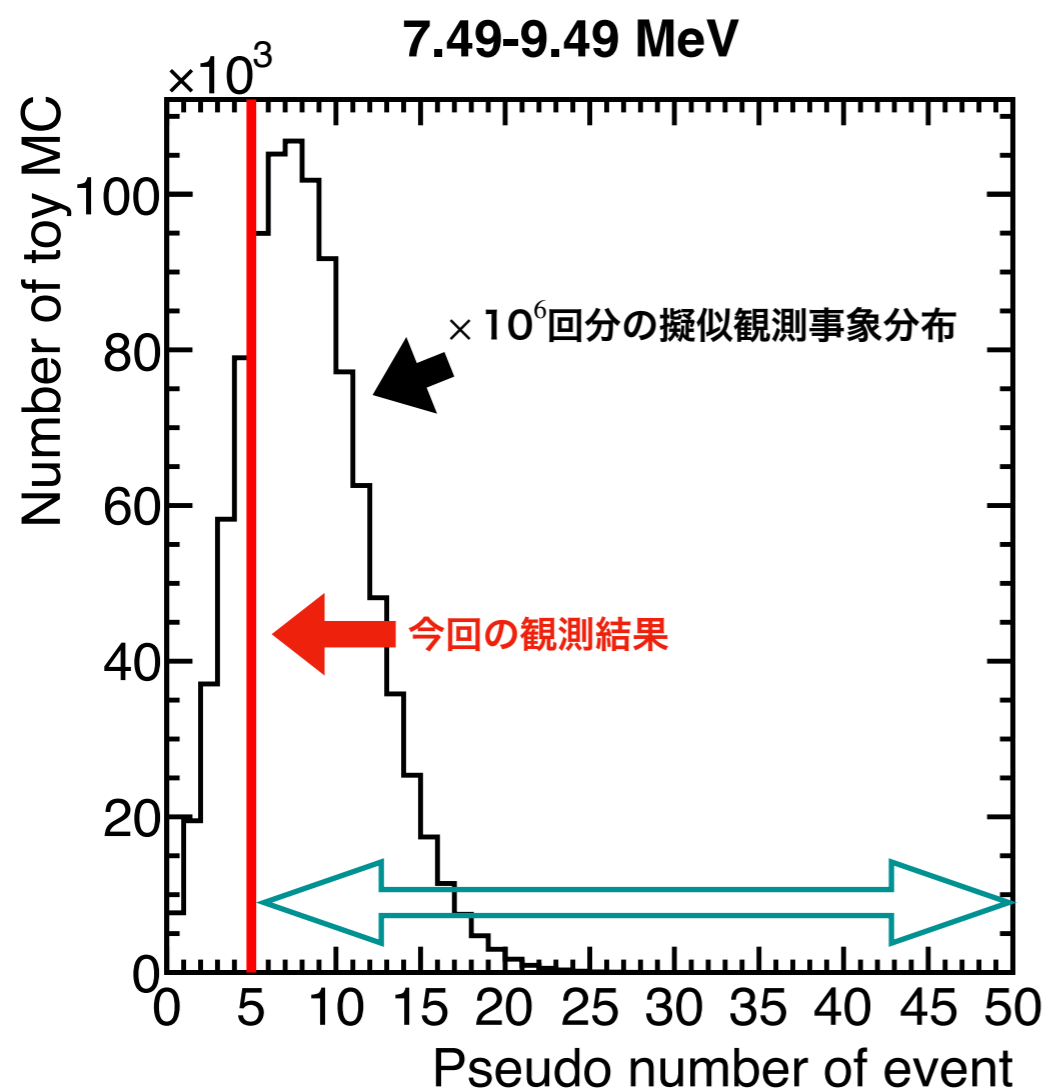


Energy range	Observed event	Expected background
7.5 - 9.5	5	7.73±2.35
9.5 - 11.5	5	4.14±1.15
11.5 - 15.5	3	2.13±0.57
15.5 - 23.5	2	0.98±0.29
23.5 - 29.5	1	0.98±0.34

P-value test

バックグラウンド期待値からPoisson分布に従って
各エネルギービンで擬似観測事象を作成

→観測事象がバックグラウンドで説明できる確率(p-value)を求めた



$$\text{p-value} = \frac{\text{実際の観測数以上の結果の数}}{\text{試行回数}}$$

Energy range [MeV]	p-value
7.5 - 9.5	0.807
9.5 - 11.5	0.398
11.5 - 15.5	0.358
15.5 - 23.5	0.256
23.5 - 29.5	0.602

全てのビンで有意な事象*を観測できなかった

* $p < 0.05$ のときを有意とする

上限値計算

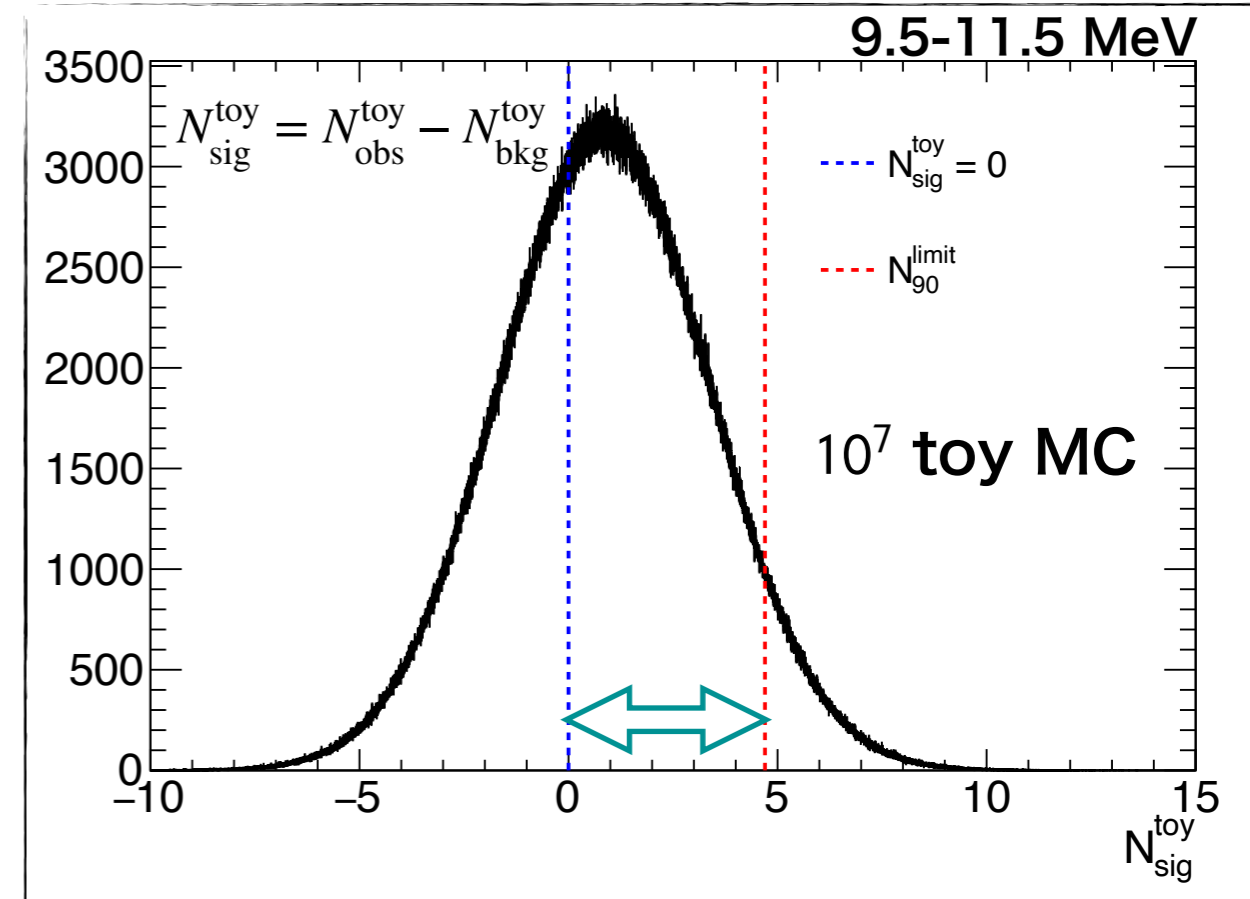
「本研究でSRNを観測できなかった」ことから

Toy MCを用いてSRNに対する90%信頼度上限(N_{90}^{limit})を設定

1. 各エネルギービンの観測数 ($N_{\text{obs}}^{\text{toy}}$) とバックグラウンド数 ($N_{\text{bkg}}^{\text{toy}}$) をそれぞれの誤差に従って生成(Gauss分布)

2. 残差 ($N_{\text{sig}}^{\text{toy}}$) をプロット \longrightarrow

3. N_{90}^{limit} を計算



$$\frac{0 < N_{\text{sig}}^{\text{toy}} < N_{90}^{\text{limit}} \text{ のtoy MC数}}{N_{\text{sig}}^{\text{toy}} > 0 \text{ のtoy MC数}} = 0.9$$

フラックス上限値

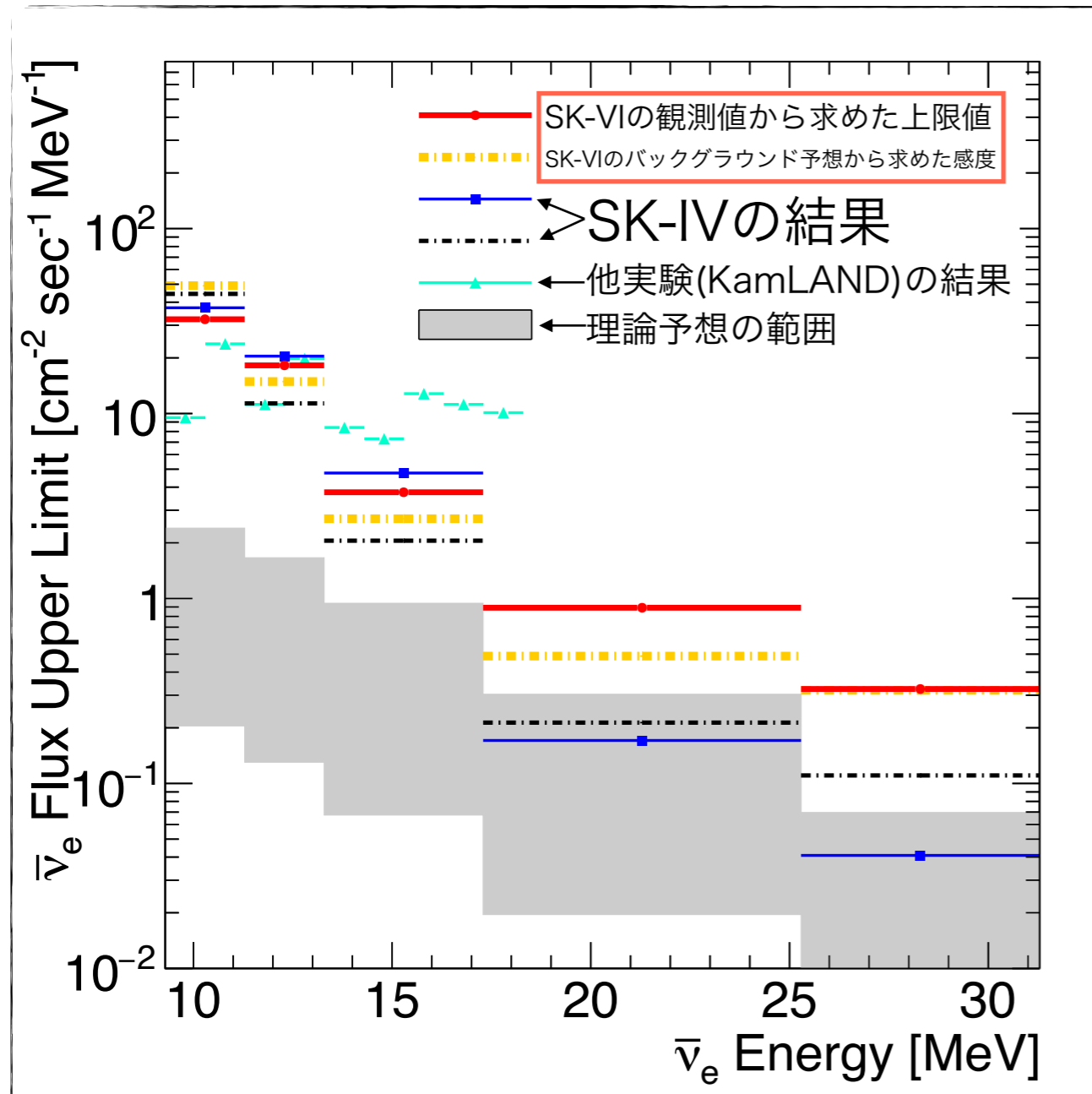
552.2日の観測からSKに飛来するSRNフラックスについて
上限値を決定した

$$\phi_{90}^{\text{limit}} [\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1} \text{MeV}^{-1}] = \frac{N_{90}^{\text{limit}}}{N_p \cdot T \cdot \bar{\sigma}_{\text{IBD}} \cdot \varepsilon_{\text{sig}} \cdot dE}$$

- ▶ N_p : ターゲット陽子数(1.5×10^{33} 個)
- ▶ T : 観測ライブタイム
- ▶ $\bar{\sigma}_{\text{IBD}}$: IBD反応断面積
- ▶ ε_{sig} : シグナル効率
- ▶ dE : エネルギービン幅

フラックス上限値

552.2日の観測からSKに飛来するSRNフラックスについて
上限値を決定した



約20%の測定期間で
純水期の2970日の上限値
と同レベルの結果

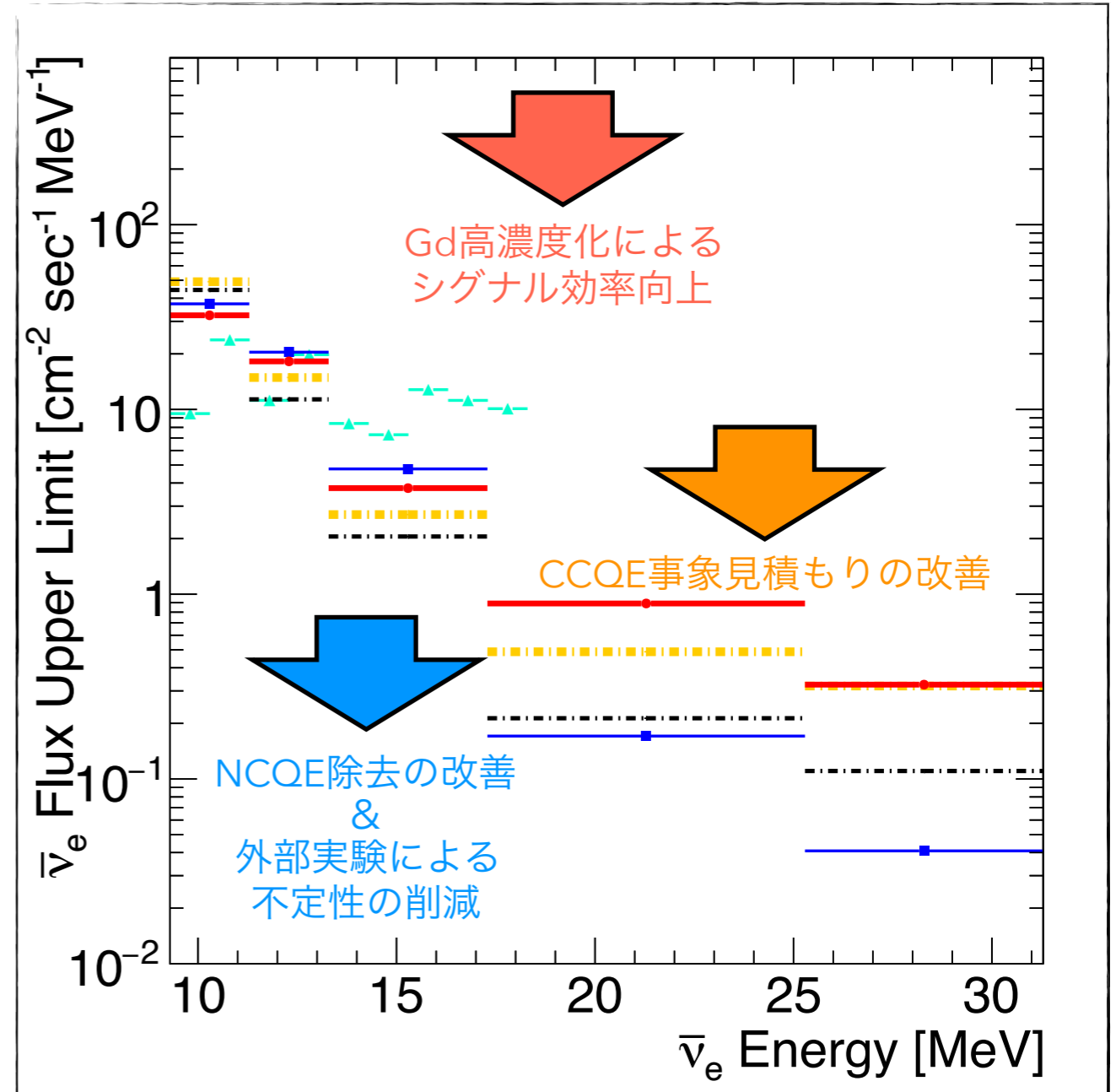
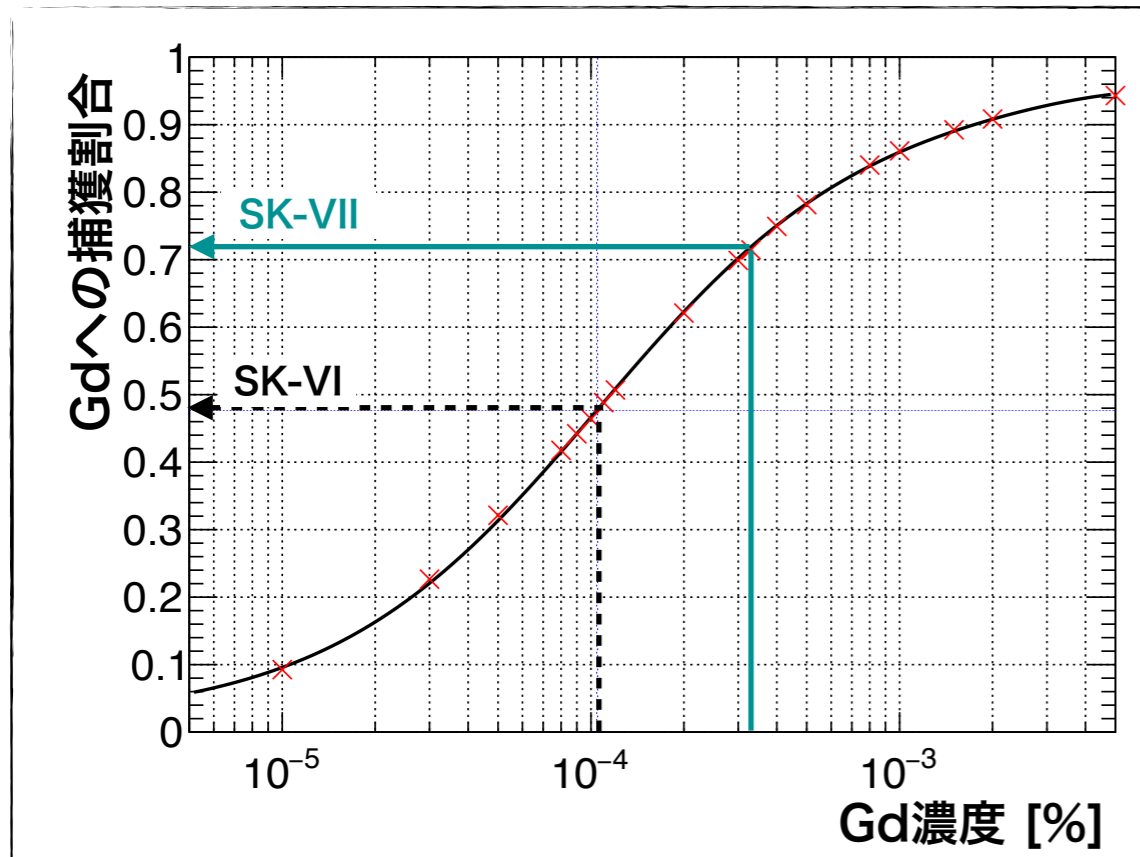
→SK-Gd実験はSRNに
対して世界一の感度

将来への展望

将来への展望

SK-Gd実験での今後の解析

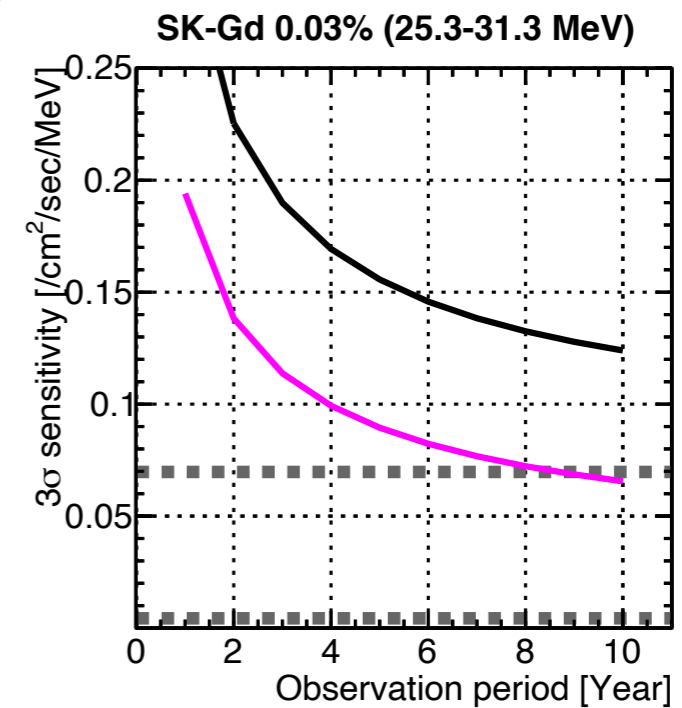
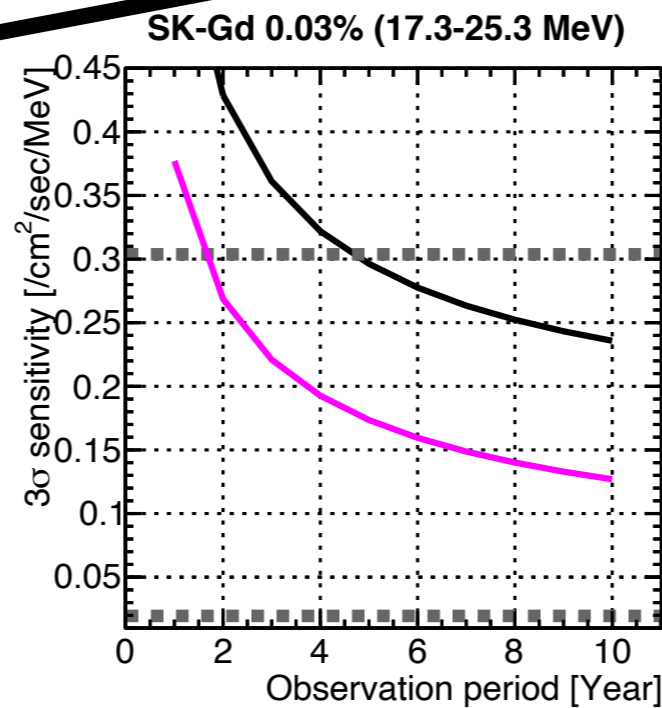
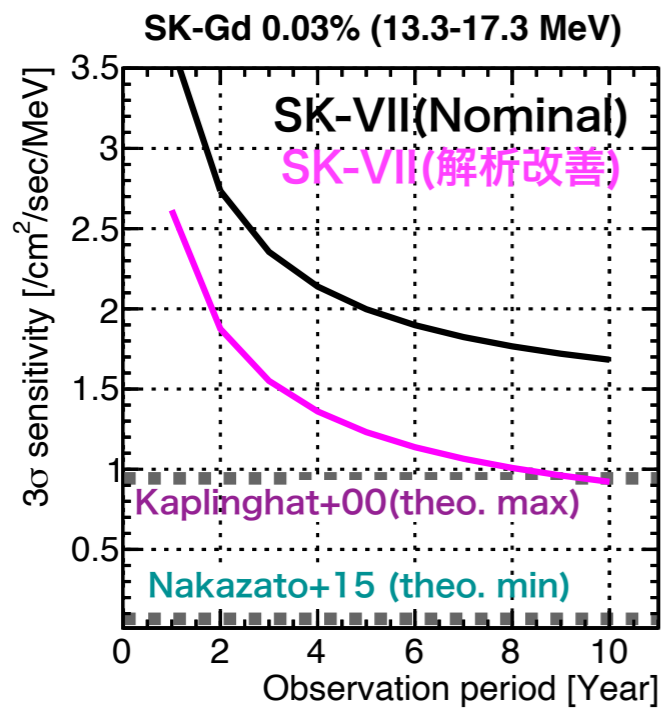
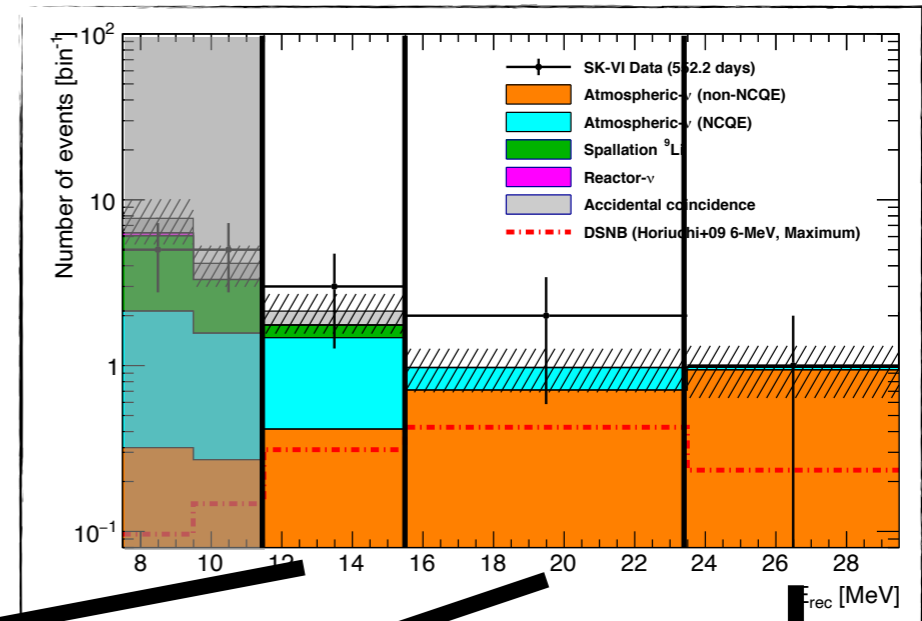
- ✓ **Gd濃度0.03%**の観測(SK-VII)
- ✓ 各バックグラウンドの削減



フラックス感度の将来予測

今回の結果からSK-VIIでの感度を予測

- ▶ 中性子同定1.5倍(Gd濃度)
- ▶ 中性子同定1.8倍(解析改善)
- ▶ NCQE事象数0.7倍(解析改善)
- ▶ NCQE不定性0.5倍(外部実験)
- ▶ Li9不定性0.5倍(MC改善)
- ▶ CCQE事象数&不定性0.6倍(MC改善+統計向上)



13.3 MeV以上でフラックスが大きいモデルを検証可能

ブラックホールと重い中性子星形成への制限

Ashida, Nakazato (2022)では超新星爆発後に残る天体によるニュートリノスペクトルへの影響がSRNフラックスに考慮された

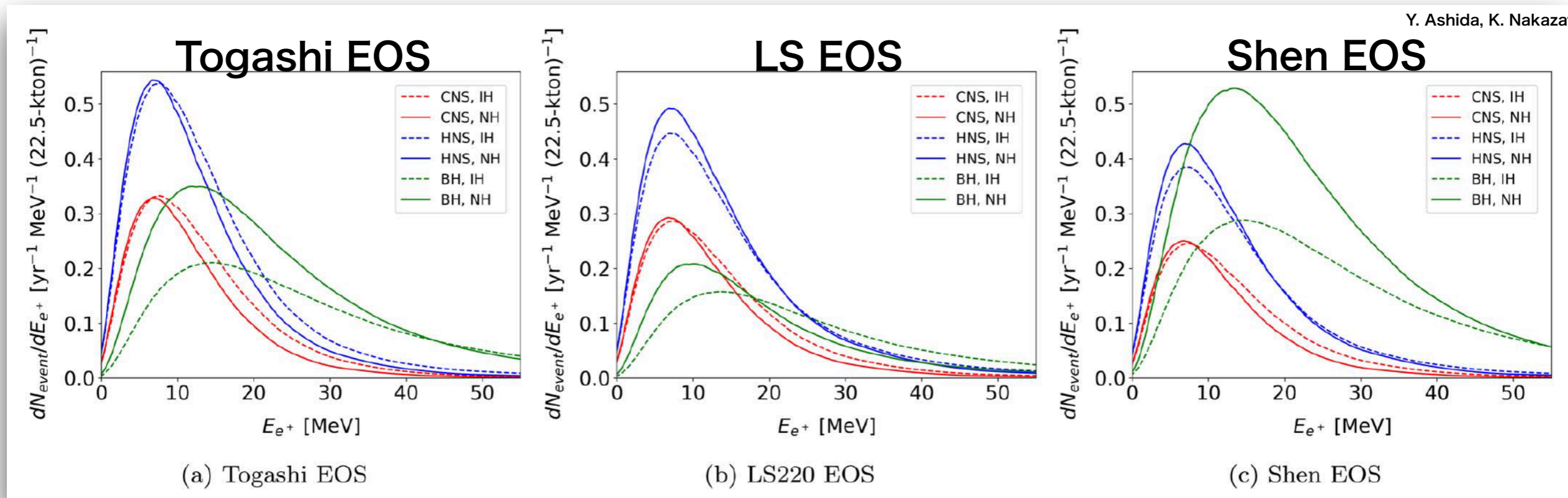
3つの状態方程式(EOS)*について

軽い中性子星 (CNS, $< 1.6M_{\odot}$)、重い中性子星 (HNS, $> 1.6M_{\odot}$)、

ブラックホール (BH) を作るような超新星でのニュートリノフラックス計算

*EOS: 高密度天体の圧力と密度の関係式

Y. Ashida, K. Nakazato (2022)



ブラックホールと重い中性子星形成への制限

Ashida, Nakazato (2022)では超新星爆発後に残る天体によるニュートリノスペクトルへの影響がSRNフラックスに考慮された

Ashida, Nakazato(2022)

HNS、BHの効果を考慮したSRNのニュートリノ数密度の定式

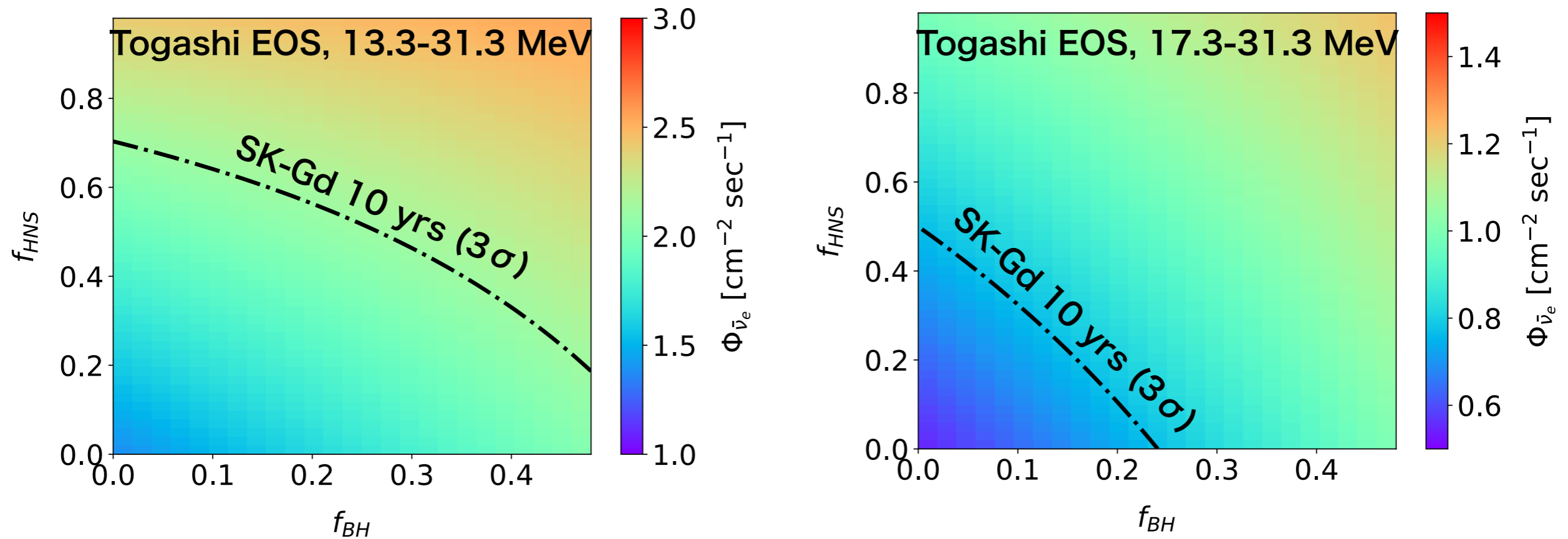
$$\left\langle \frac{dN(E'_\nu)}{dE'_\nu} \right\rangle = f_{\text{BH}} \frac{dN_{\text{BH}}(E'_\nu)}{dE'_\nu} + (1 - f_{\text{BH}}) \left[f_{\text{HNS}} \frac{dN_{\text{HNS}}(E'_\nu)}{dE'_\nu} + (1 - f_{\text{HNS}}) \frac{dN_{\text{CNS}}(E'_\nu)}{dE'_\nu} \right]$$

Diagram annotations:
- A red dashed box highlights f_{BH} with a red arrow pointing to the text "BH(Failed SN)の割合".
- A blue dashed box highlights f_{HNS} with a blue arrow pointing to the text "HNSの割合".

3種類のフラックスを混合するパラメータ f_{BH} , f_{HNS} のパラメータ空間をSK-Gdの感度予想から制限できる

理論モデルとの比較

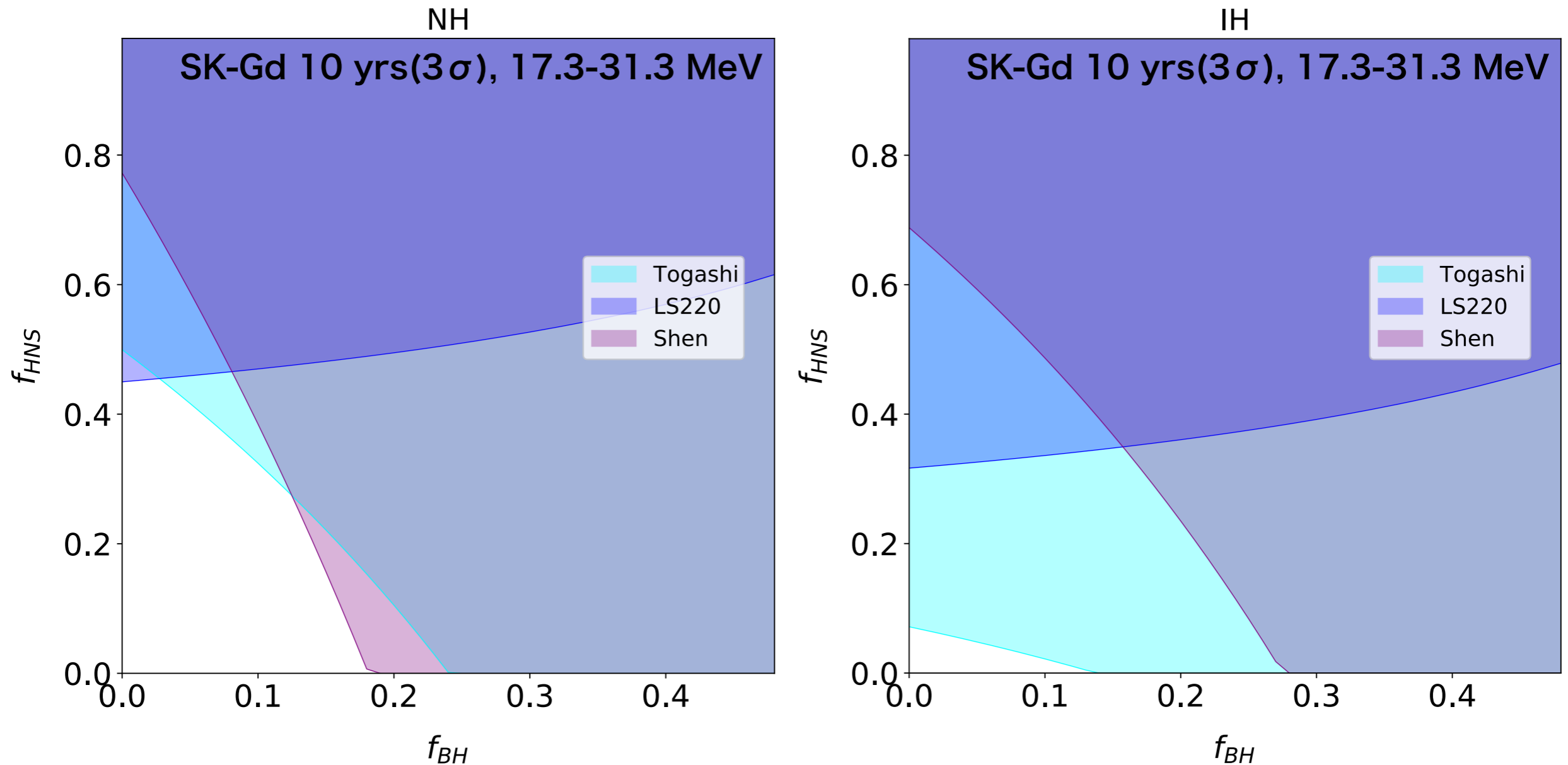
BHを作る超新星は平均エネルギーが大きくなる
→エネルギー積分範囲を13.3, 17.3 MeVで変えて比較



SK-Gd10年の観測から、ブラックホールや重い中性子星を作る超新星の割合に言及できる

理論モデルとの比較

3つのEOSモデルでの比較



質量階層性やEOSによらず、パラメータ空間の一部を
3 σ の精度で検証可能であることを示した

まとめ

- SK-Gd実験の552日の初期データを用いた初のSRN探索を行った。
- 自身で構築したMCと中性子同定手法を用いてバックグラウンドやシグナル効率の見積もりを行った。
- SRN初観測には至らなかったが、SK-Gd実験がSRNに対して世界で最も高い感度を有することを示した。
- 将来感度を見積もり、フラックスの大きいモデルについて検証可能であることを示した。
- SK-Gd10年のSRN探索から爆発後に残る天体についての知見が得られることを示した。

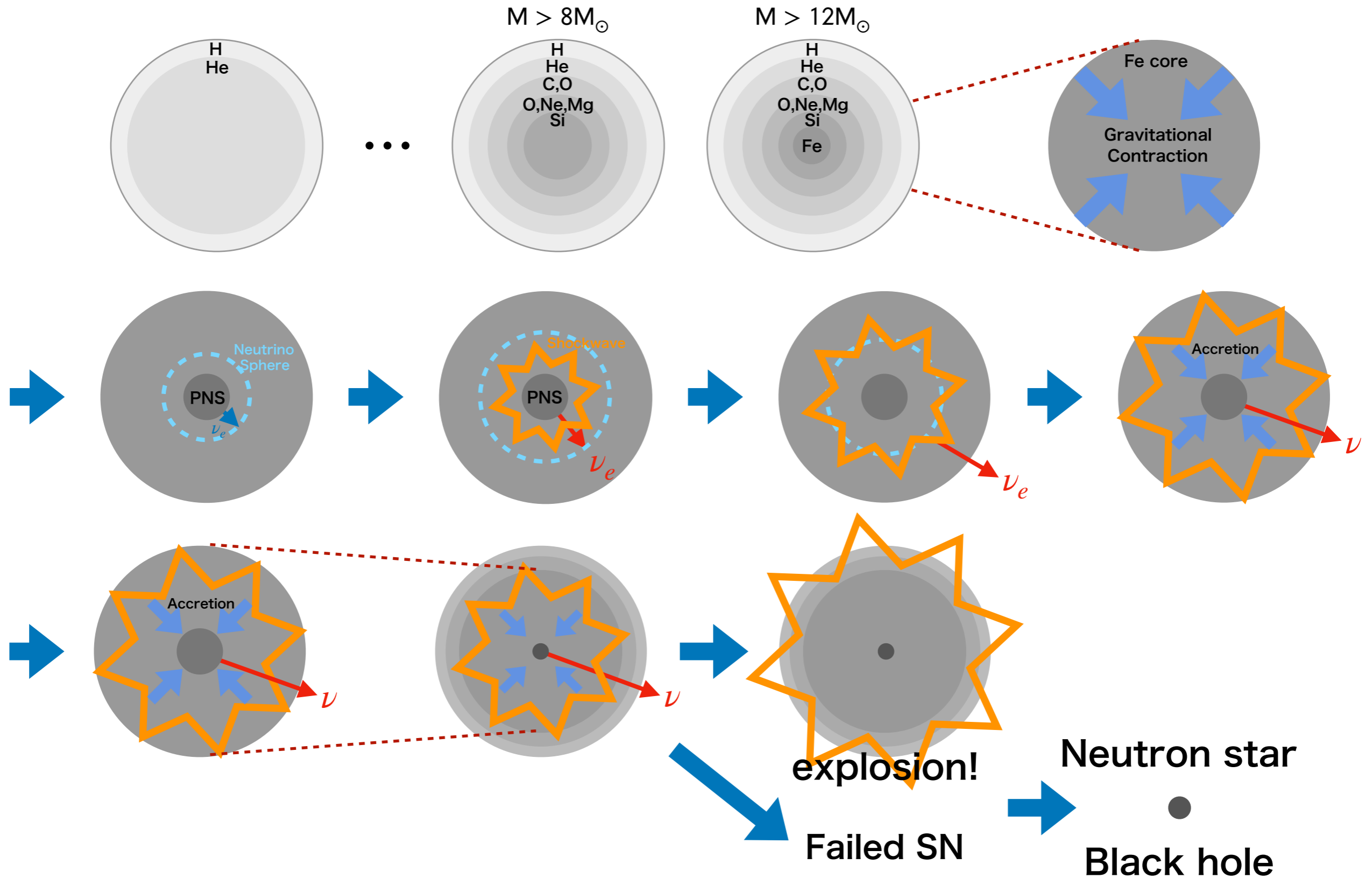
バックアップ

かに星雲

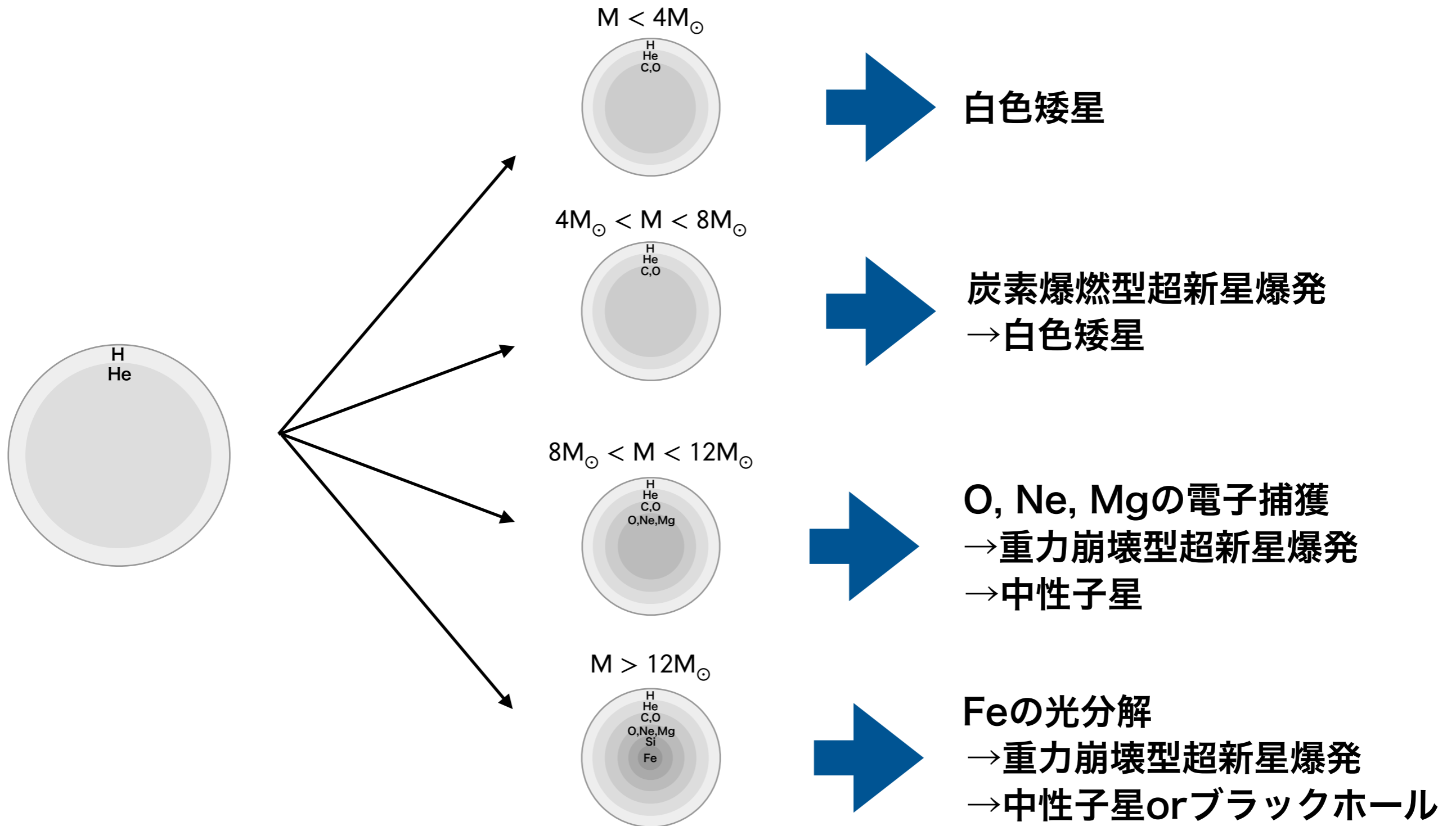
- 代表的な超新星爆発残骸
 - 中心には中性子星
- 地球から2kpc
- 1054年
 - 中国「宋史」
 - 「明月記」
で言及されている



超新星爆発からのニュートリノ



超新星爆発



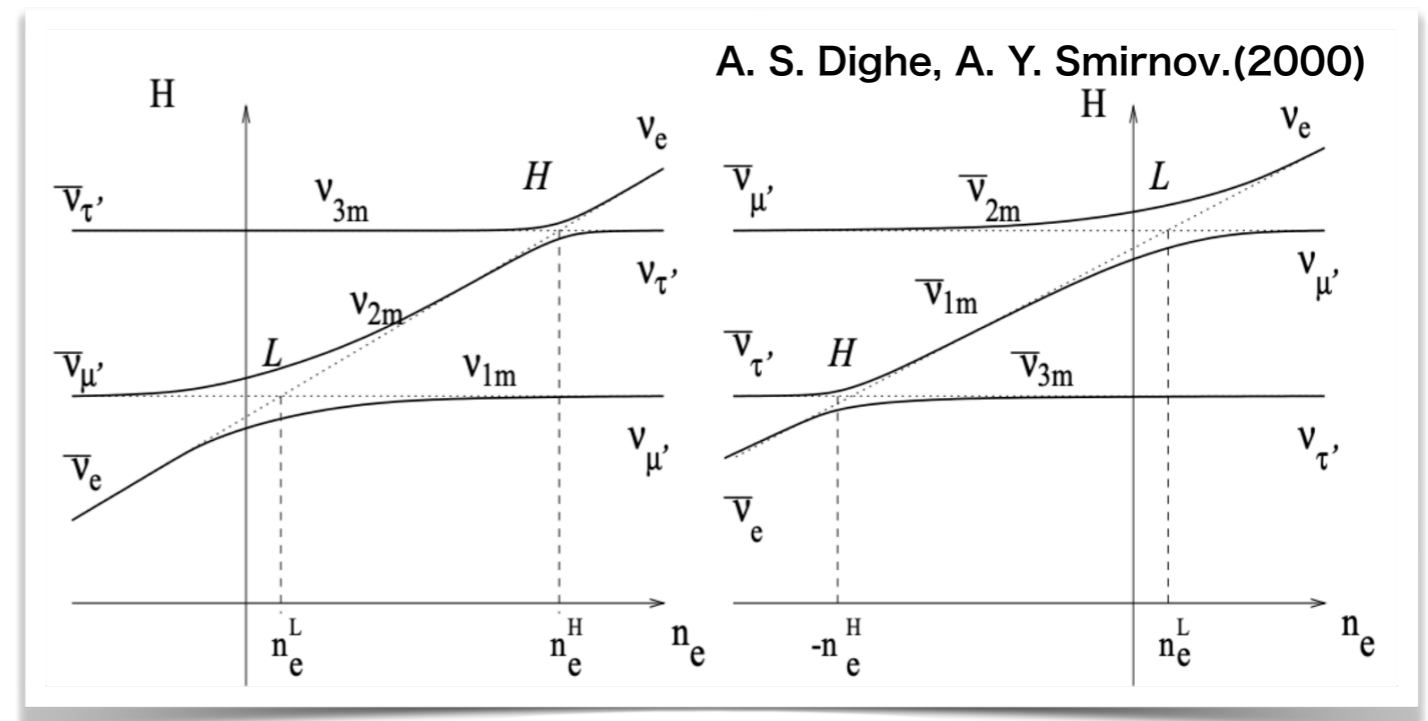
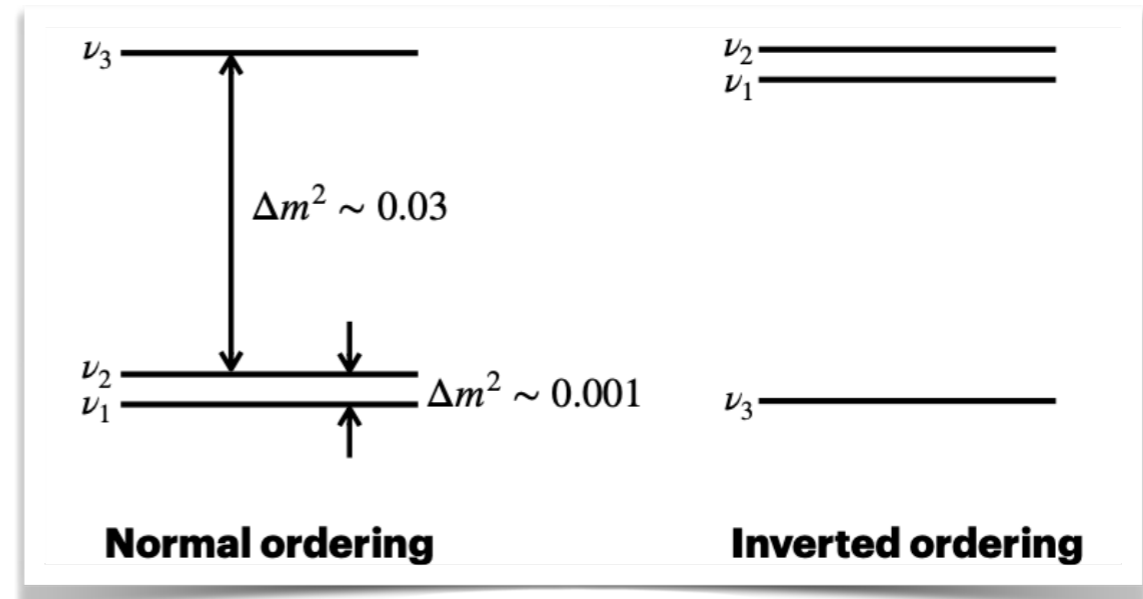
SRN理論モデル

- Kaplinghat+20: 超新星レートとその進化を metallicity enrichment rate (MER)で見積もった
→それ以外のパラメータはconservative
- Horiuchi+09: CCSNレートの進化を宇宙の星形成史の観測データから見積もった
- Nakazato+15: 銀河の金属量分布の進化を導入し、ブラックホールからの寄与をより現実的にした
(古い星ほど金属量が低く、質量放出が少ない=BHになりやすい)

ニュートリノ振動

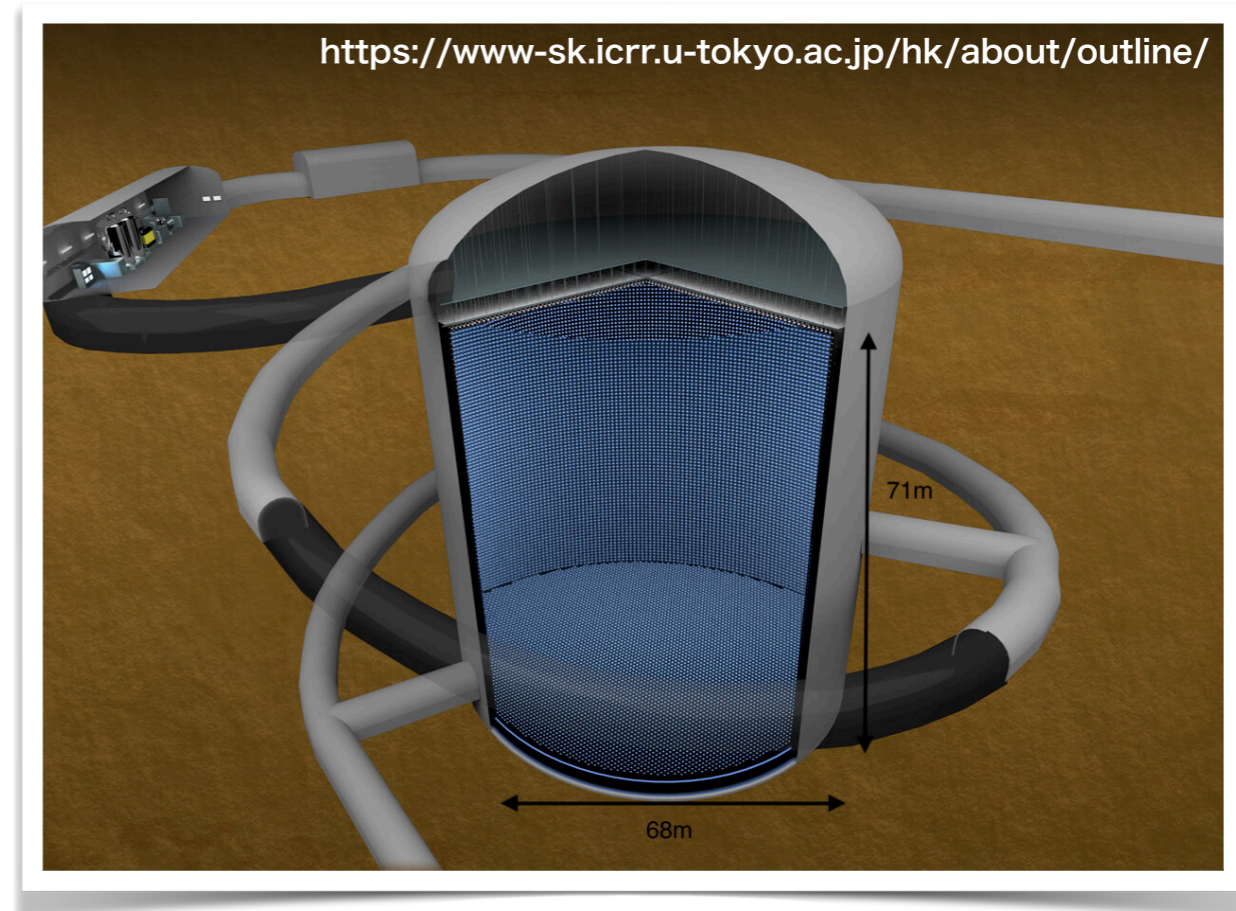
$$\text{NH: } \frac{dN_{\bar{\nu}_e}}{dE_\nu} \sim 0.68 \frac{dN_{\bar{\nu}_e}^0}{dE_\nu} + 0.32 \frac{dN_{\bar{\nu}_x}^0}{dE_\nu}$$

$$\text{IH: } \frac{dN_{\bar{\nu}_e}}{dE_\nu} \sim \frac{dN_{\bar{\nu}_x}^0}{dE_\nu}$$



Hyper-Kamiokande

- ▶ 直径68 m x 高さ71 m
→SKの8倍の有効質量
- ▶ 神岡地下600 mに建設中
- ▶ SKと同等の光子検出効率
- ▶ 2027年内にデータ取得開始予定



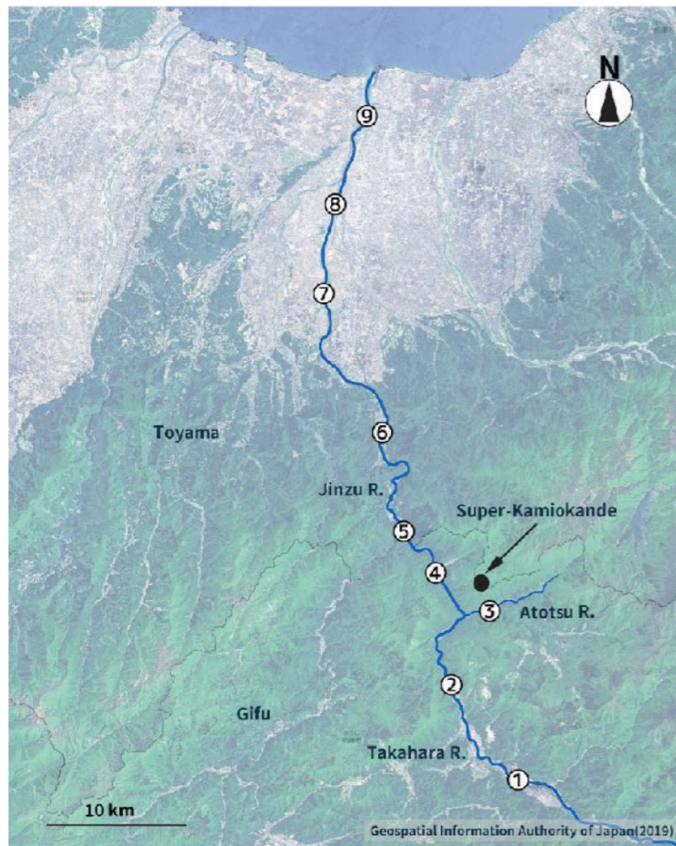
SKの検出器シミュレーション

Phase	SKDETSIM	SKG4
Language	FORTRAN	C++
Toolkit	GEANT3	GEANT4
Physics models	Old (update was stopped in 1994)	Latest

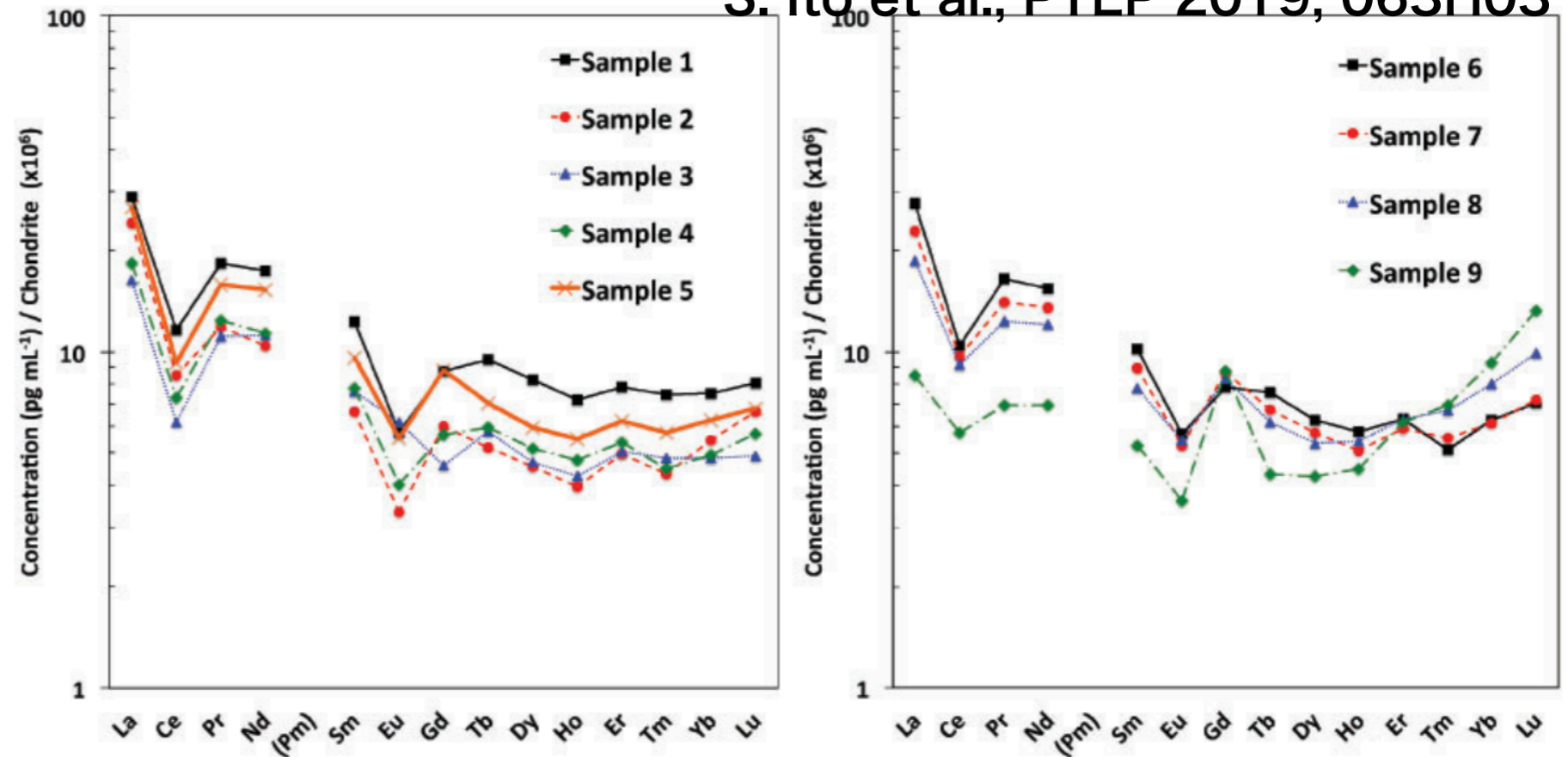
- ▶ GEANT (GEometry ANd Tracking)
 - ▶ 粒子生成、設定した物理モデル相互作用、トラッキングを構築したジオメトリ内でモンテカルロ計算するツール
- ▶ SK-Gd実験で重要なGd中性子捕獲からのガンマ線生成モデル等、外部モデルの導入・管理の観点からGEANT4の導入

河川水測定

- ▶ SK-Gd検出器でGd水が河川に漏出した場合Gd濃度が大きくなる
→実験が始まる前にSK上流～下流の河川水を採取&Gd濃度測定



S. Ito et al., PTEP 2019, 063H03

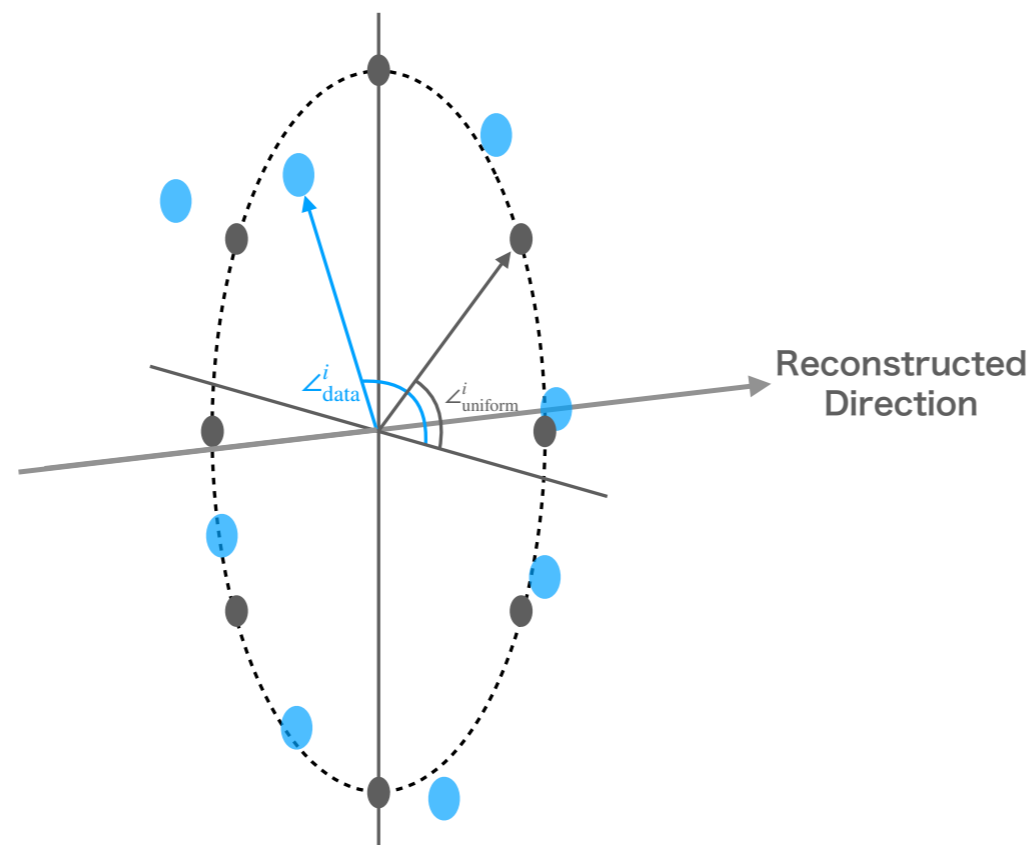


- ▶ 化学分離&濃縮をした河川水をICP-MSで測定
→Gd濃度を0.1 pg/mLで測定可能であることを示した
- ▶ 1 g/dayのGd漏出を測定可能

再構成クオリティ

$$g_{\text{vtx}} = \frac{1}{\sum^{N_{\text{hits}}} 1/w^2(t_{\text{res},i})} \times \sum_i^{N_{\text{hits}}} \frac{1}{w^2(t_{\text{res},i})} \exp \left[-\frac{t_{\text{res},i}^2}{2\sigma^2(t_{\text{res},i})} \right]$$

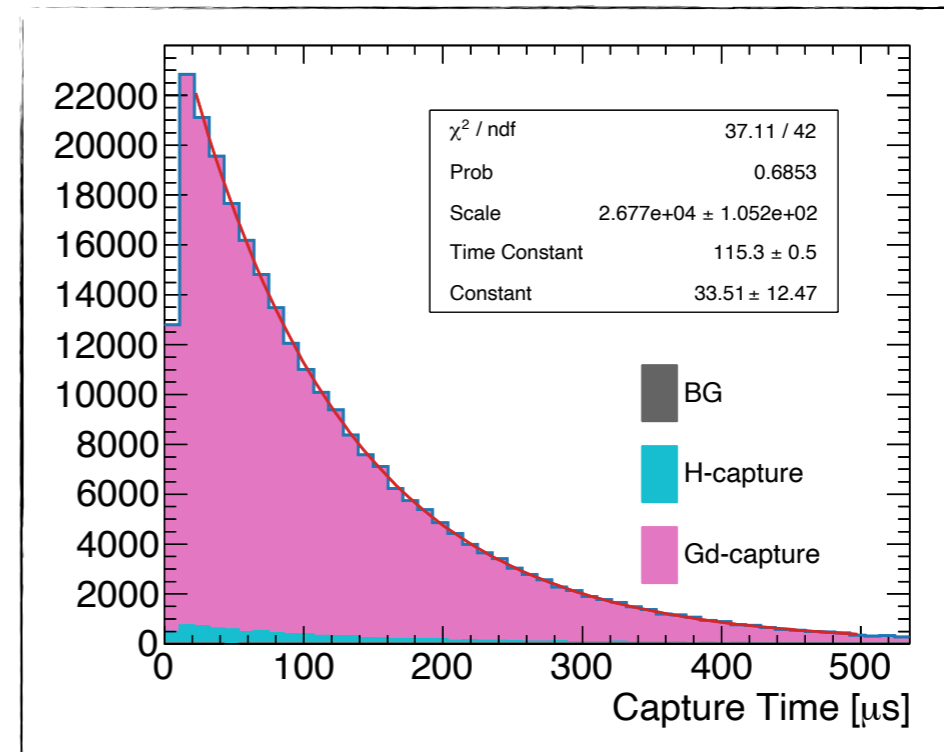
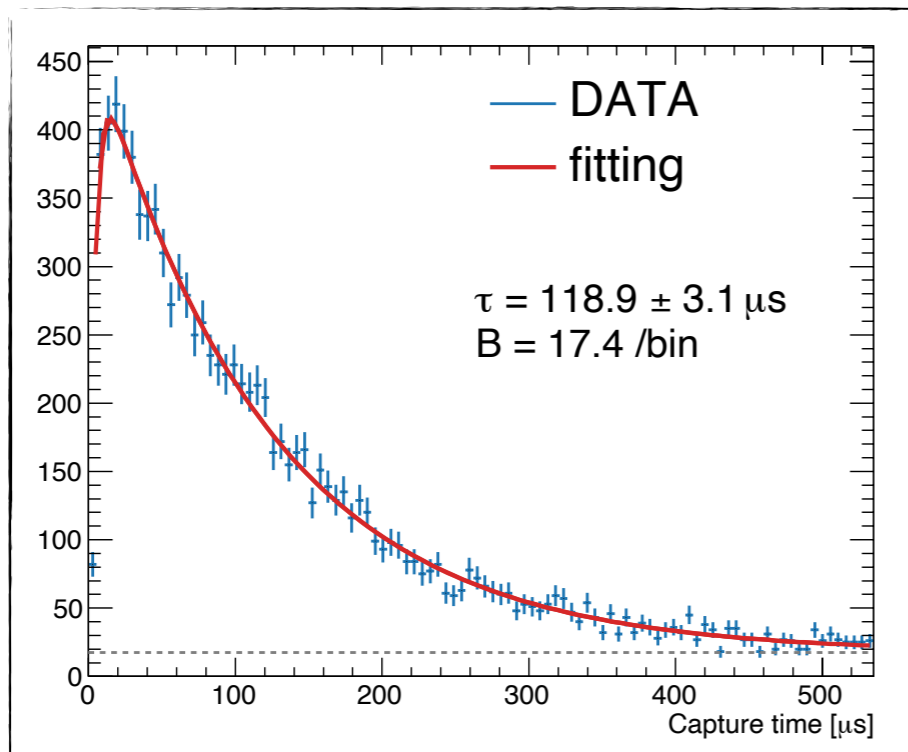
$$g_{\text{dir}} = \frac{\max [\angle_{\text{uniform}}^i - \angle_{\text{data}}^i] - \min [\angle_{\text{uniform}}^i - \angle_{\text{data}}^i]}{2\pi}$$



中性子同定効率

$$\epsilon_n^{\text{DATA}} = \frac{\text{選択中性子数} - \text{非時間依存成分}}{\text{先発事象数}}$$

$$\epsilon_n^{\text{MC}} = \frac{\text{選別中性子数}}{\text{先発事象数}}$$

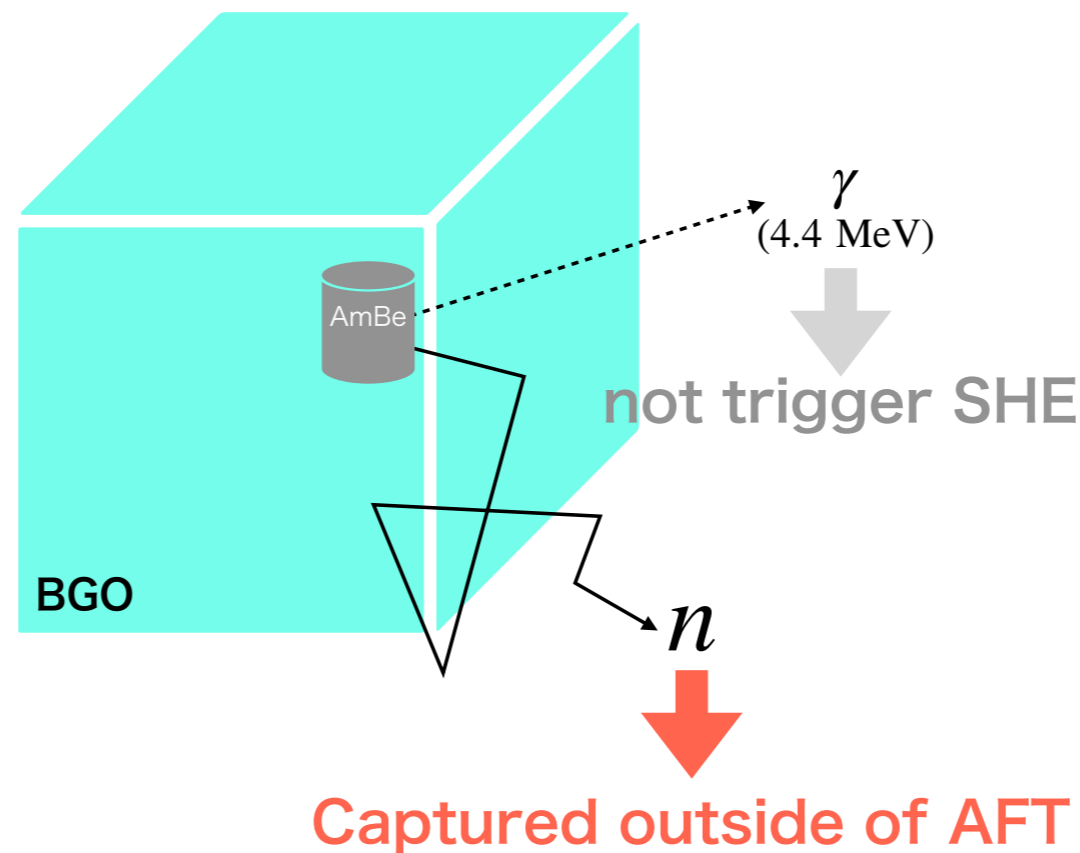


中性子同定効率の系統誤差

Content	Systematic uncertainty	
Prompt event selection	0.47%	0.47%
Timing goodness g_{vtx}	0.94%	
Direction goodness g_{dir}	0.03%	1.06%
Reconstructed energy	0.23%	
Vertex resolution	0.44%	
Gd concentration	0.17%	
Gd(n, γ)Gd model	1.70%	1.83%
Neutron excitation state	0.39%	
Neutron energy spectrum	0.53%	
Position dependence	0.47%	0.47%
Total		2.22%

Dummy prompt

- (Dummy prompt event) = 測定時間 [s])
- × (ランダム中性子 [Hz])
 - × (中性子捕獲ガンマ線が先発事象になる確率)
 - × (SHEトリガー効率*)
 - × (AFTトリガー効率**)



*SHEトリガー：60 hits/200 ns

**AFTトリガー：SHEイベントの後500 μ s。21 msに一回。

DATA/MCの理解に対する試み

- Wada et al. (arXiv:2304.12153)
 - 神岡で使われているAm/Be線源の詳細理解
 - 産総研(AIST)で全中性子数測定(236.8 ± 5.0 Hz)
 - HPGeで4.4 MeVガンマ線レート測定(110.1 ± 15.5 Hz)
 - NaIとLqSを使った n/γ 測定 ($n_0/n_1 \sim 0.68 \pm 0.06$)
- SKのデータを使ったレート見積もり
 -

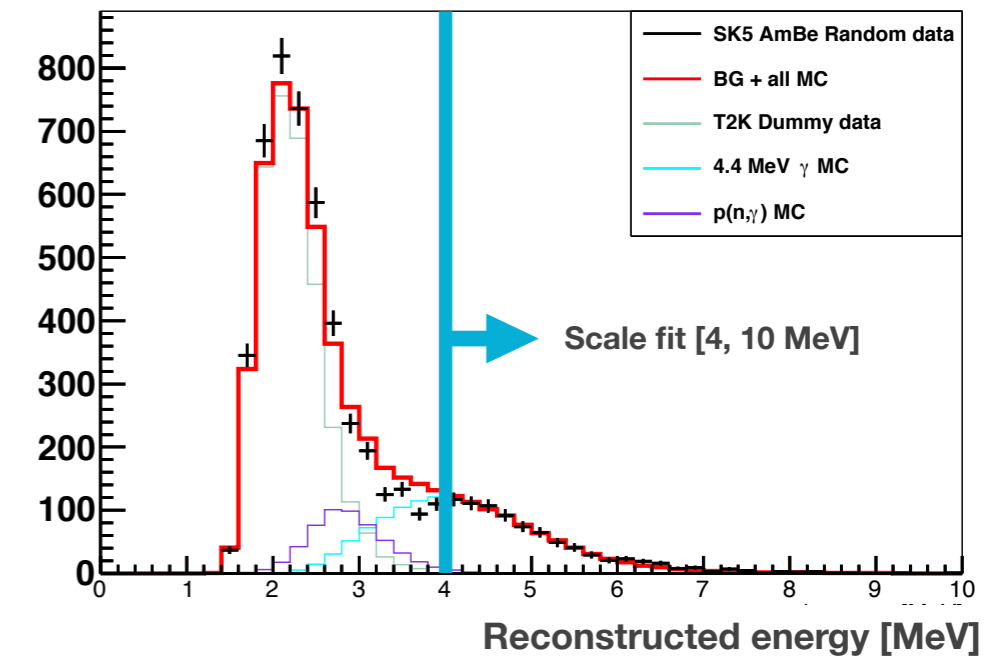
*SHEトリガー：60 hits/200 ns

**AFTトリガー：SHEイベントの後500 μ s。21 msに一回。

DATA/MCの理解に対する試み

- SK純水期のデータを使った4.4 MeVガンマレート解析

- ガンマ線レート: 132.8 ± 7.8 Hz
→ Wada et al. と consistent

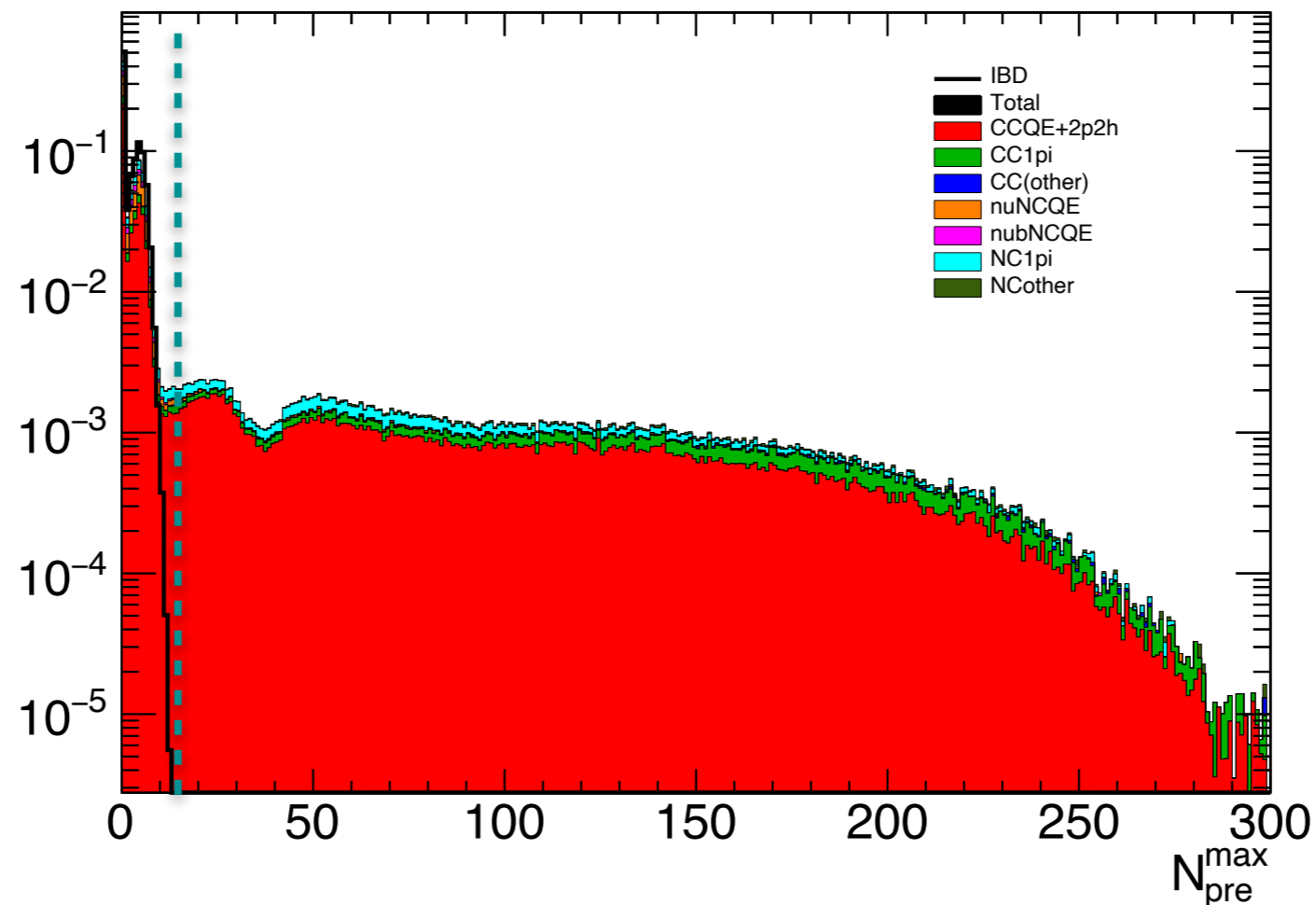


- SK-Gdで中性子レート解析

	SK-V 8BGO	SK-VI 8BGO	SK-VI 1BGO	SK-VI 0BGO
Shape of geometry				
neutron rate	—	150.1 ± 7.8 Hz (χ^2/ndf 57.3/30)	133.6 ± 10.7 Hz (χ^2/ndf 41.6/30)	133.6 ± 7.6 Hz (χ^2/ndf 71.2/30)
Gamma rate	132.8 ± 7.8 Hz (chi2 16.8/30)	—	—	—

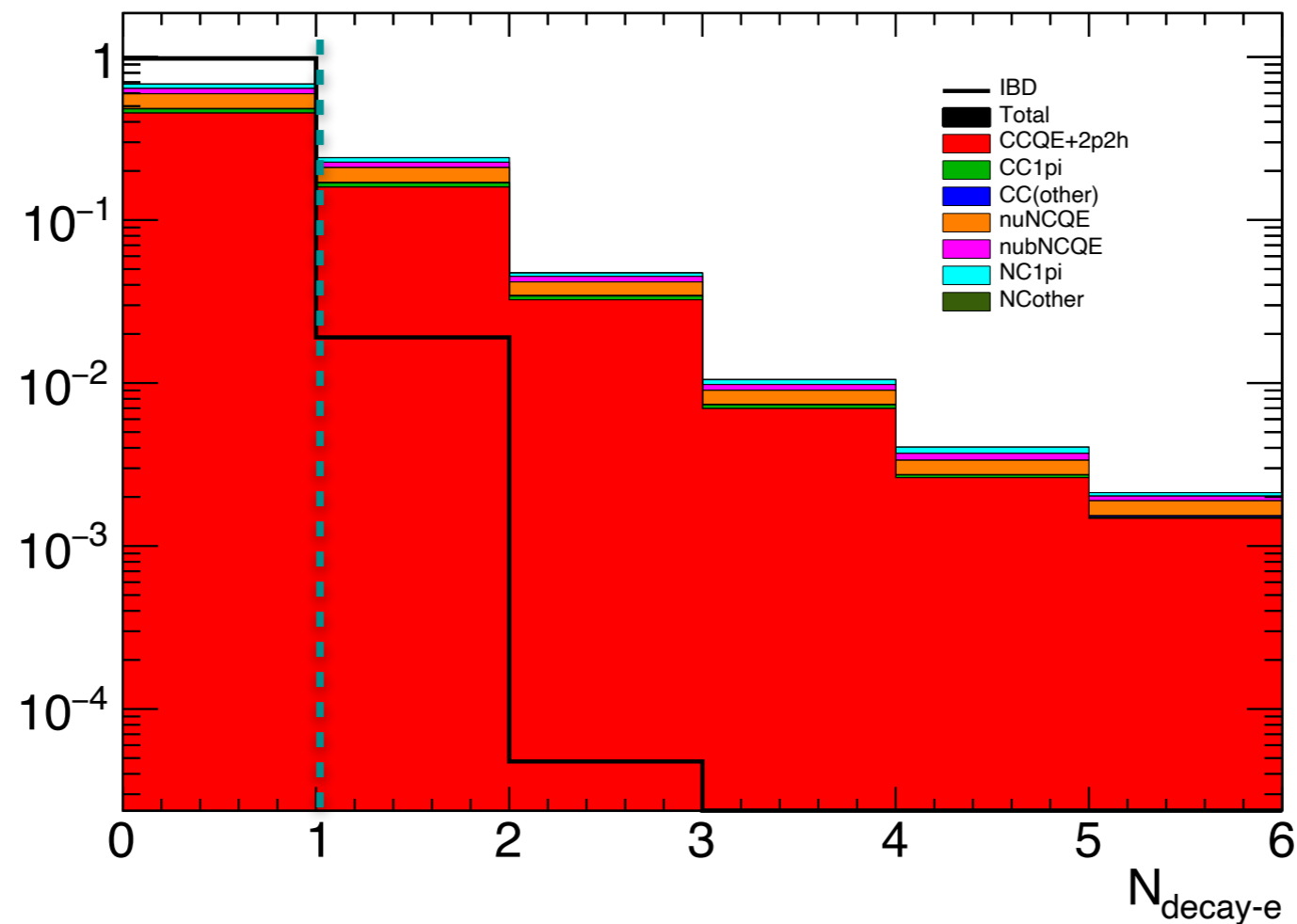
Pre-Activity cut

- IBD事象は陽電子信号より前にPMTヒットクラスタを作らない
↔大気 ν 事象は複数粒子の信号が前後にクラスタを作る可能性
- Pre-activity cut: $[-5e3, -12 \text{ ns}]$ の間にあるヒットクラスタを
T-TOF分布から15 ns で探索



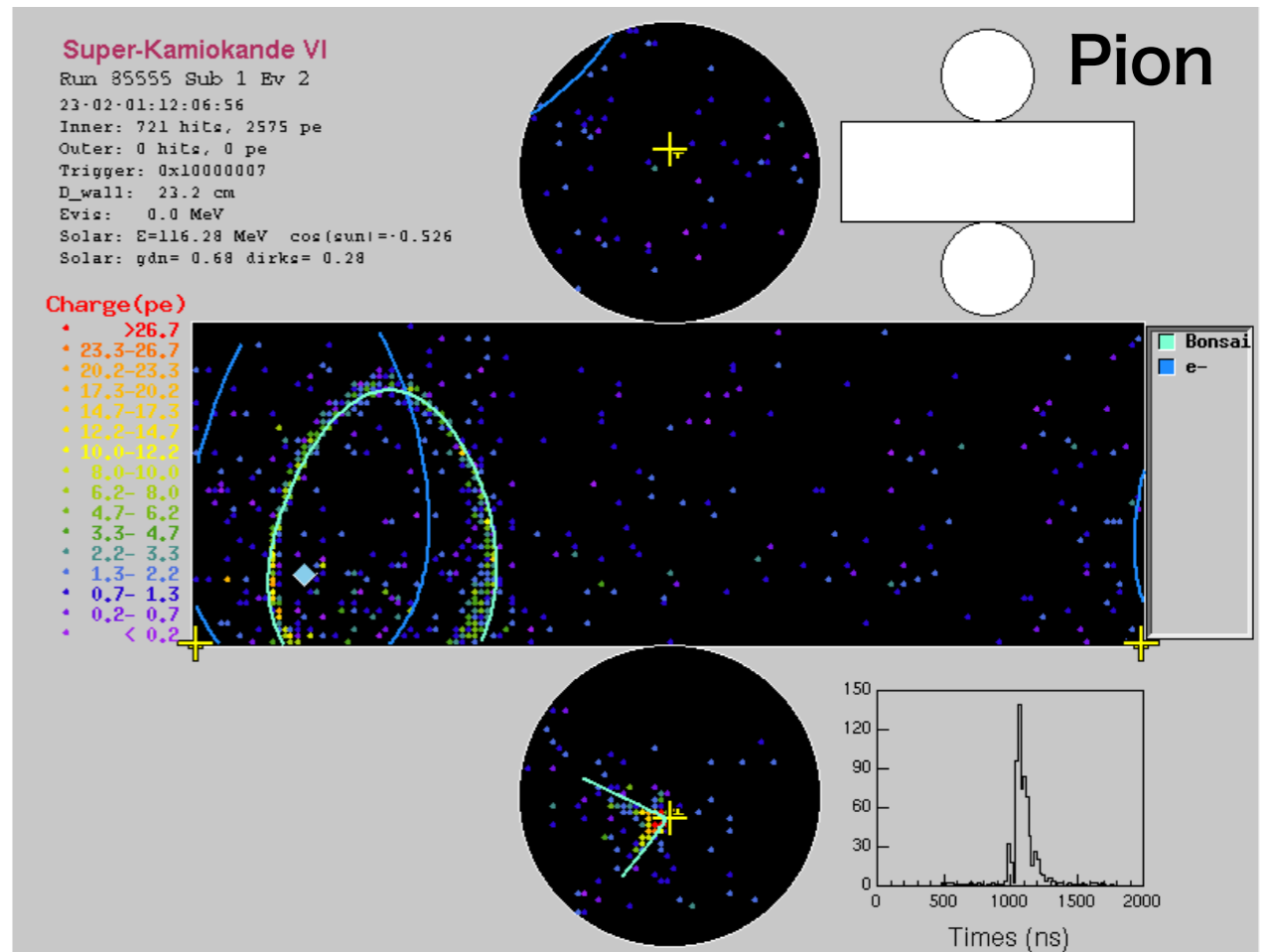
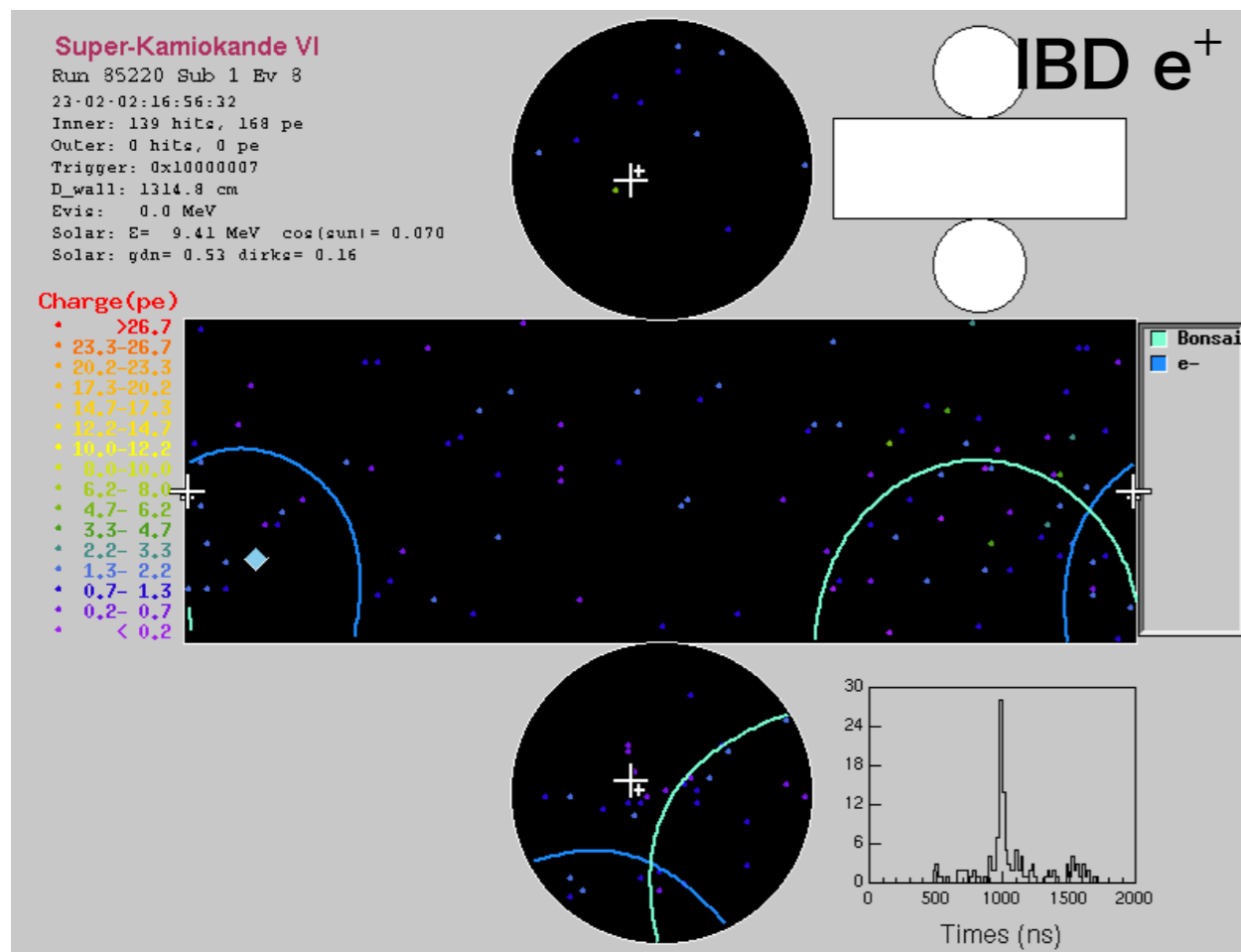
Post-Activity cut

- IBD事象は陽電子信号より前にPMTヒットクラスタを作らない
↔大気 ν 事象は複数粒子の信号が前後にクラスタを作る可能性
- Post-activity cut: $[1, 35 \mu\text{s}]$ でミュオン崩壊電子探索



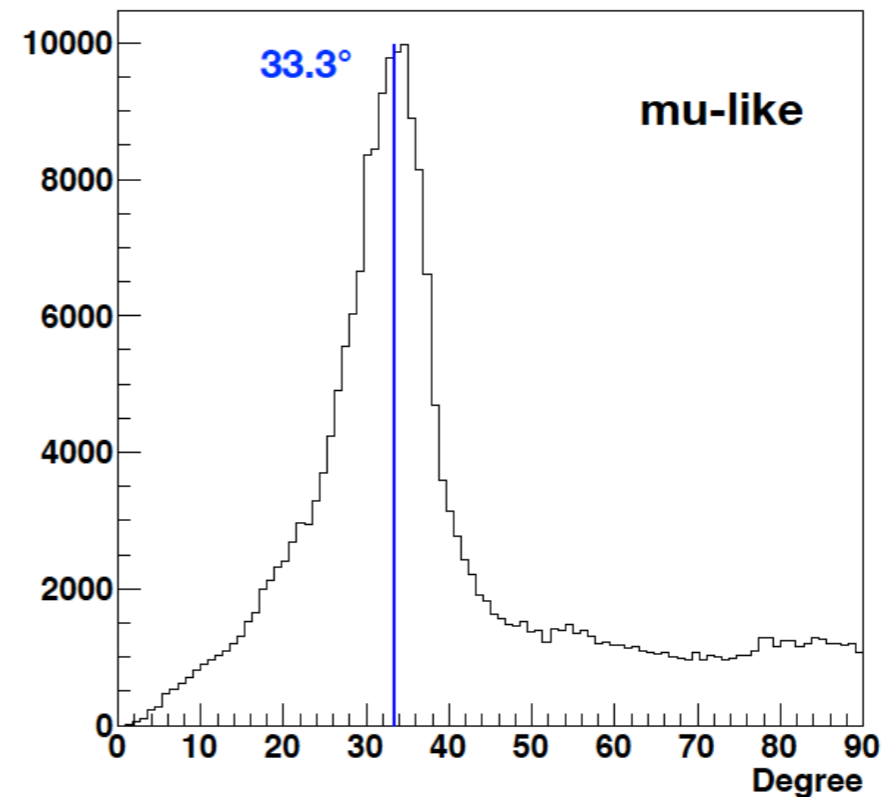
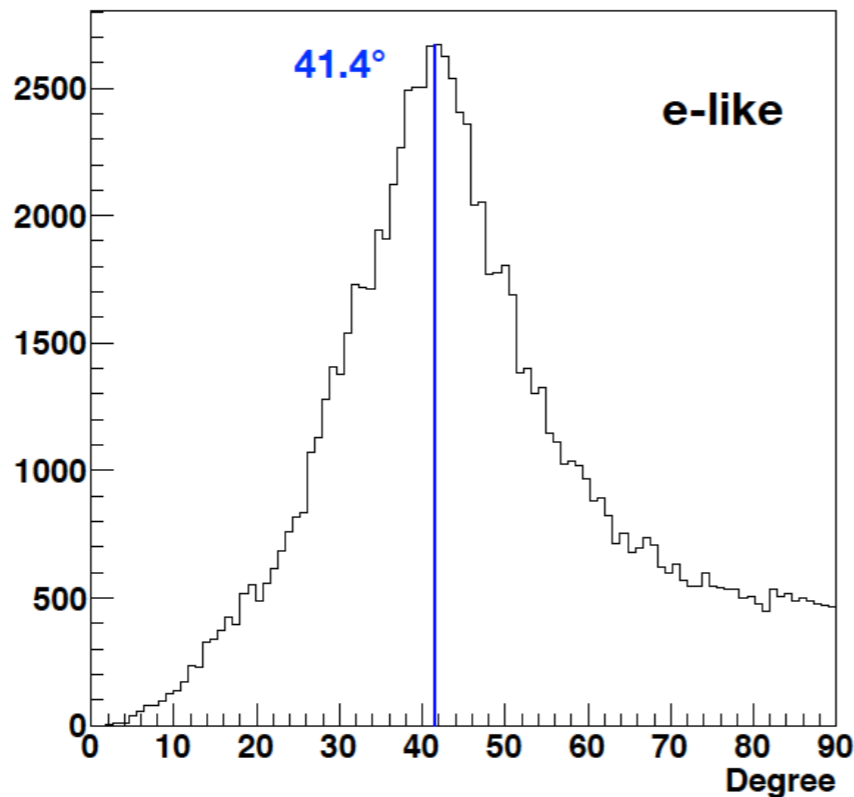
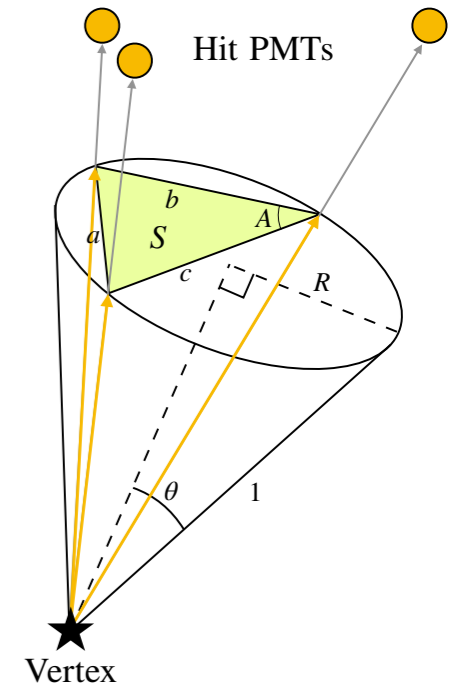
Pion likeness

- 電子：電磁シャワーでチェレンコフ光がまばらになる
- パイオン：クリアな綺麗なリングをつくる



Pion likeness

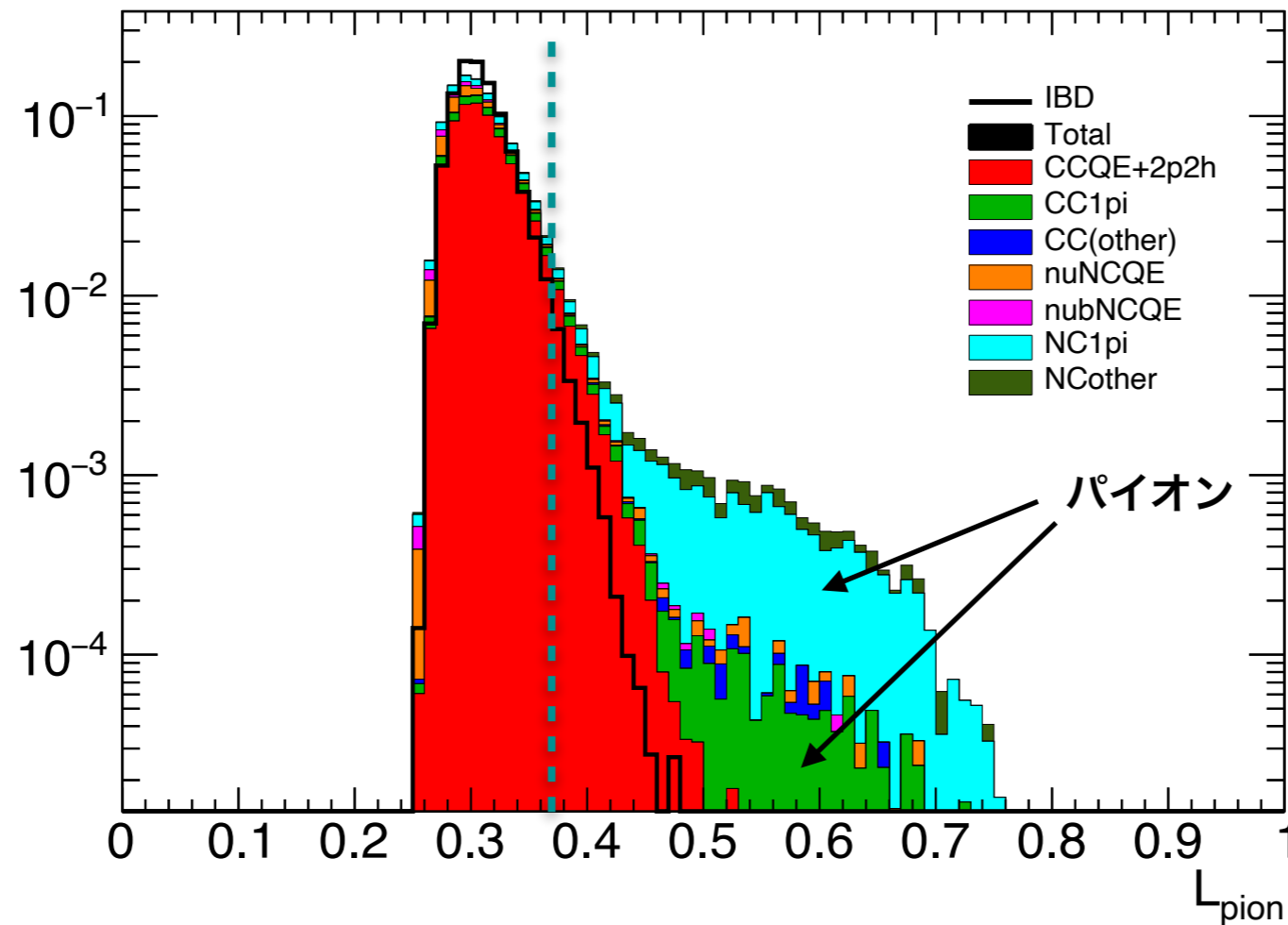
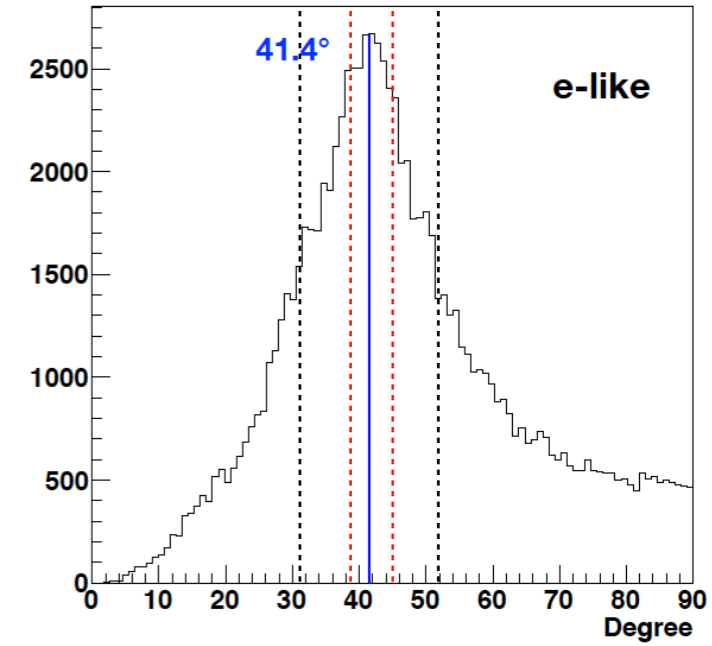
- 3hitでOpening angleを計算
- ピークをCherenkov angleとする
→電子に比べて、ミューオン、パイオンは鋭いピークになる



Pion likeness

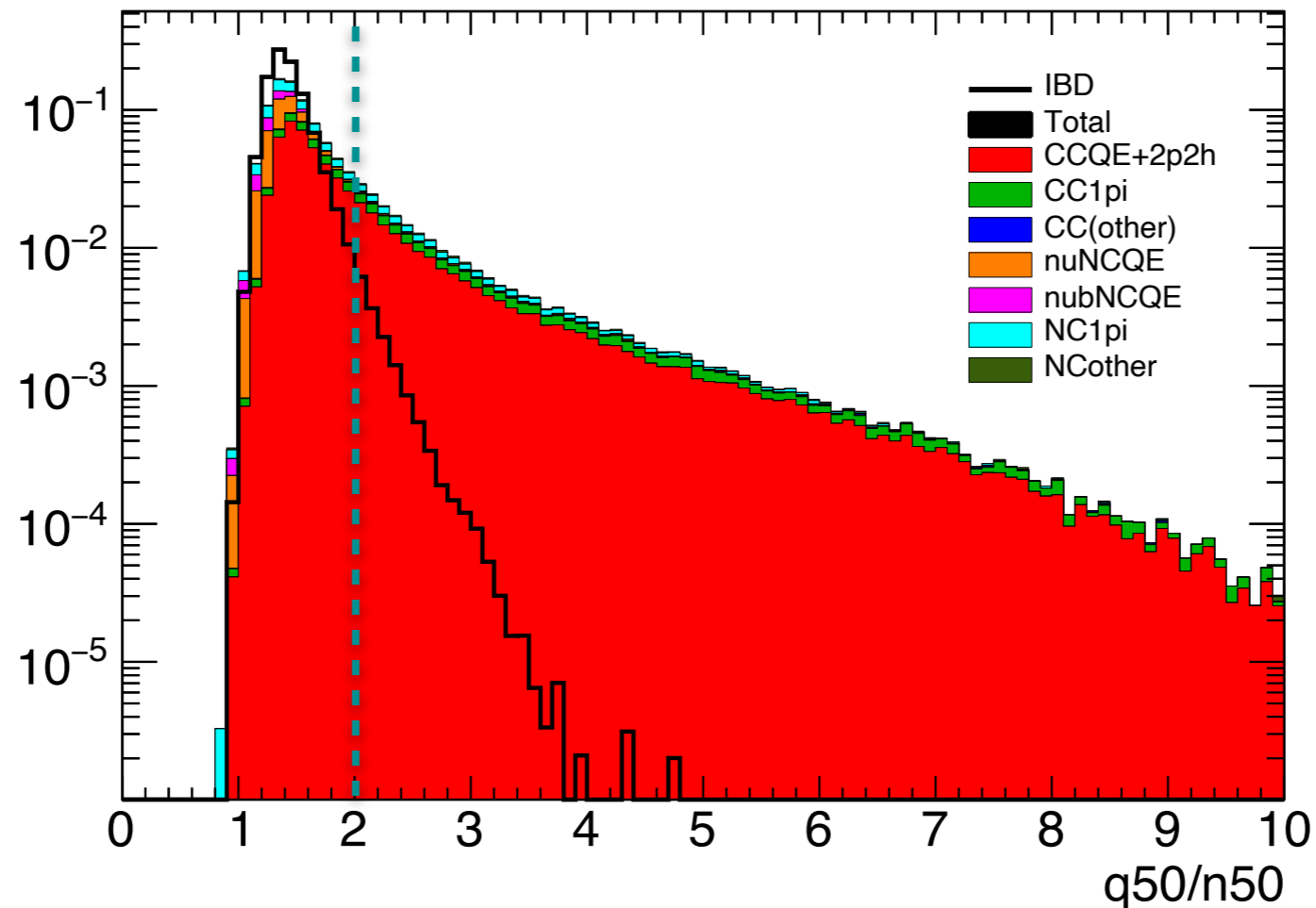
- 分布の広がりを表す変数：Pion likeness

$$\text{Pion likeness} = \frac{\text{ピーク} \pm 3^\circ \text{のエントリー数}}{\text{ピーク} \pm 10^\circ \text{のエントリー数}}$$



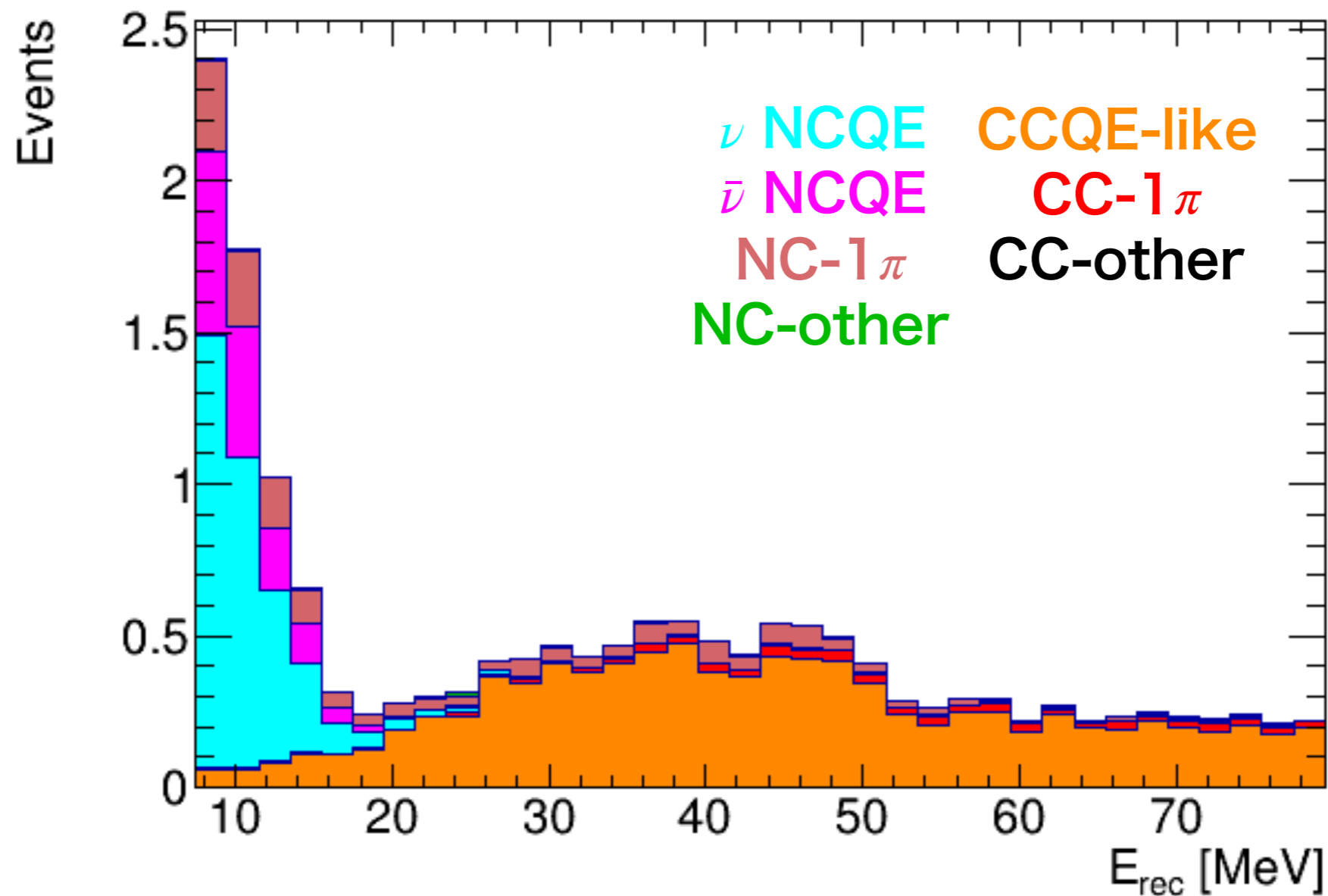
Q50/N50 cut

- 1つのPMTは400 ns間の積分電荷を持つ
- ミューオンは電子より複数ヒットが多い
→積分電荷が1光電子より大きい



残存大気ニュートリノイベント

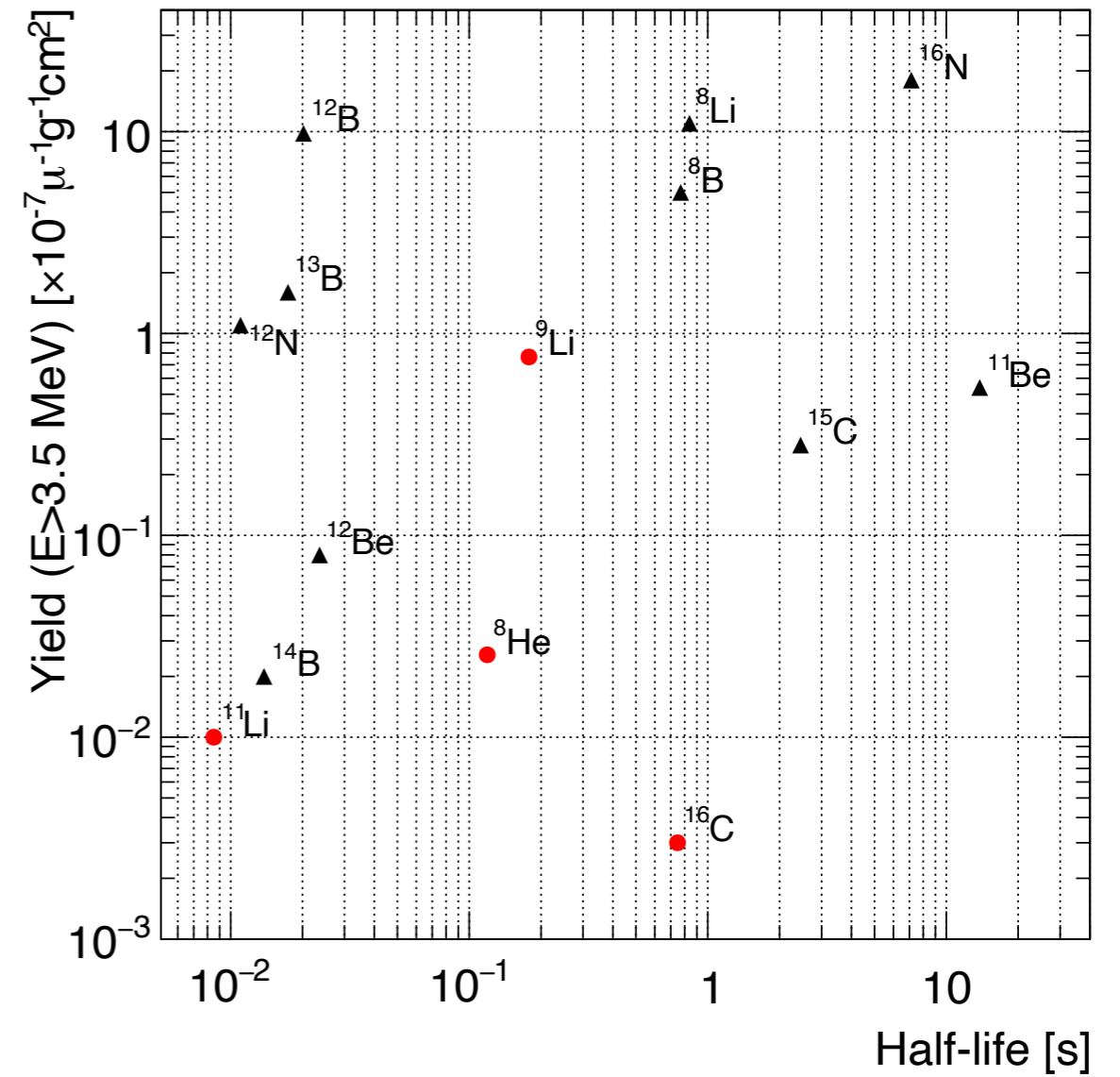
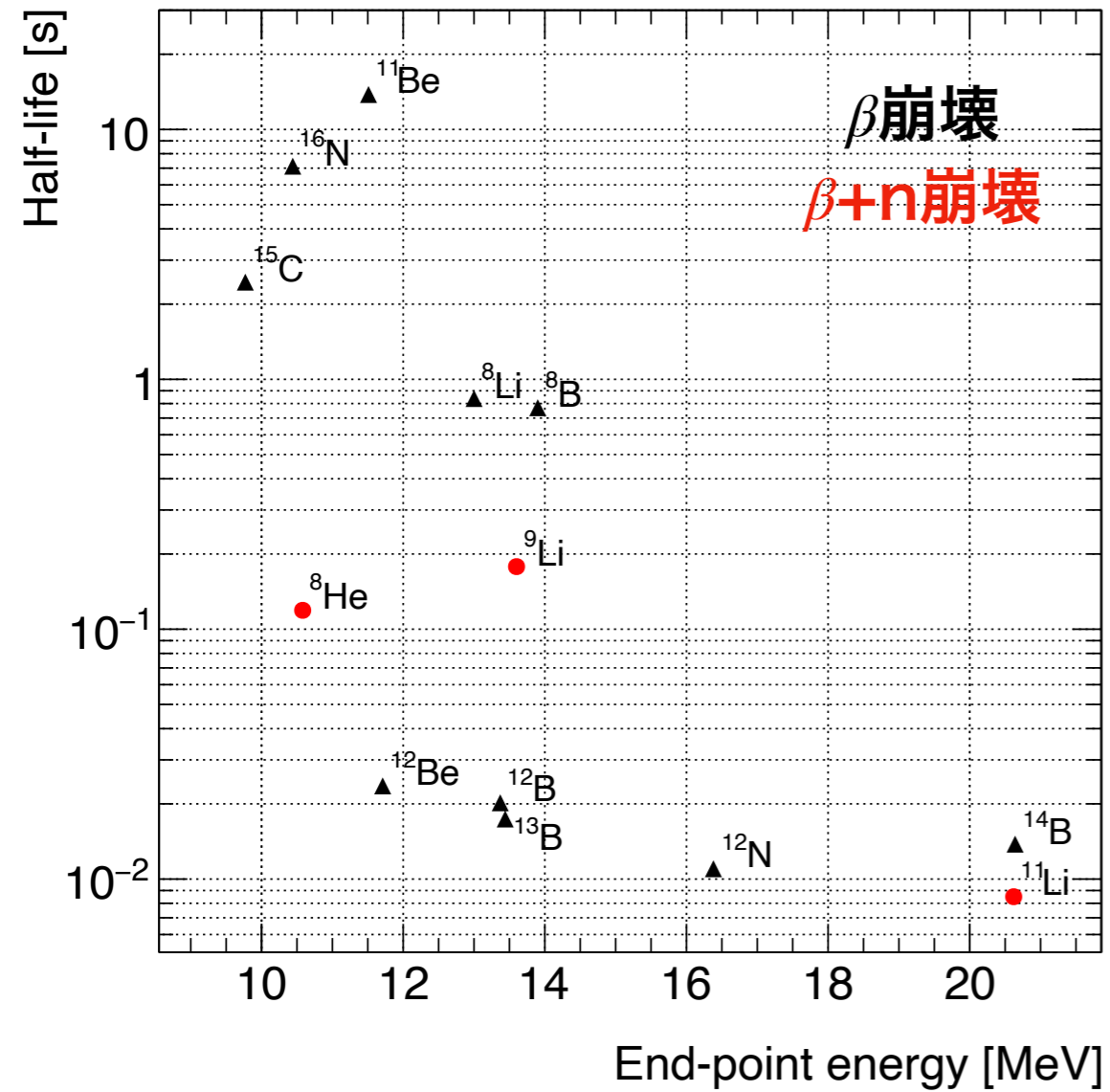
- CCイベント： μ 崩壊からの電子
- NCイベント：脱励起からのガンマ線



NCQE systematics

T2K cross-section	44%
Atmospheric neutrino flux	15%
Flux difference	7%
Reductions	2%
Neutron tagging efficiency	9%
Neutron multiplicity	30%
Spectral shape	37%
Total	68%

放射性同位体崩壊の種類



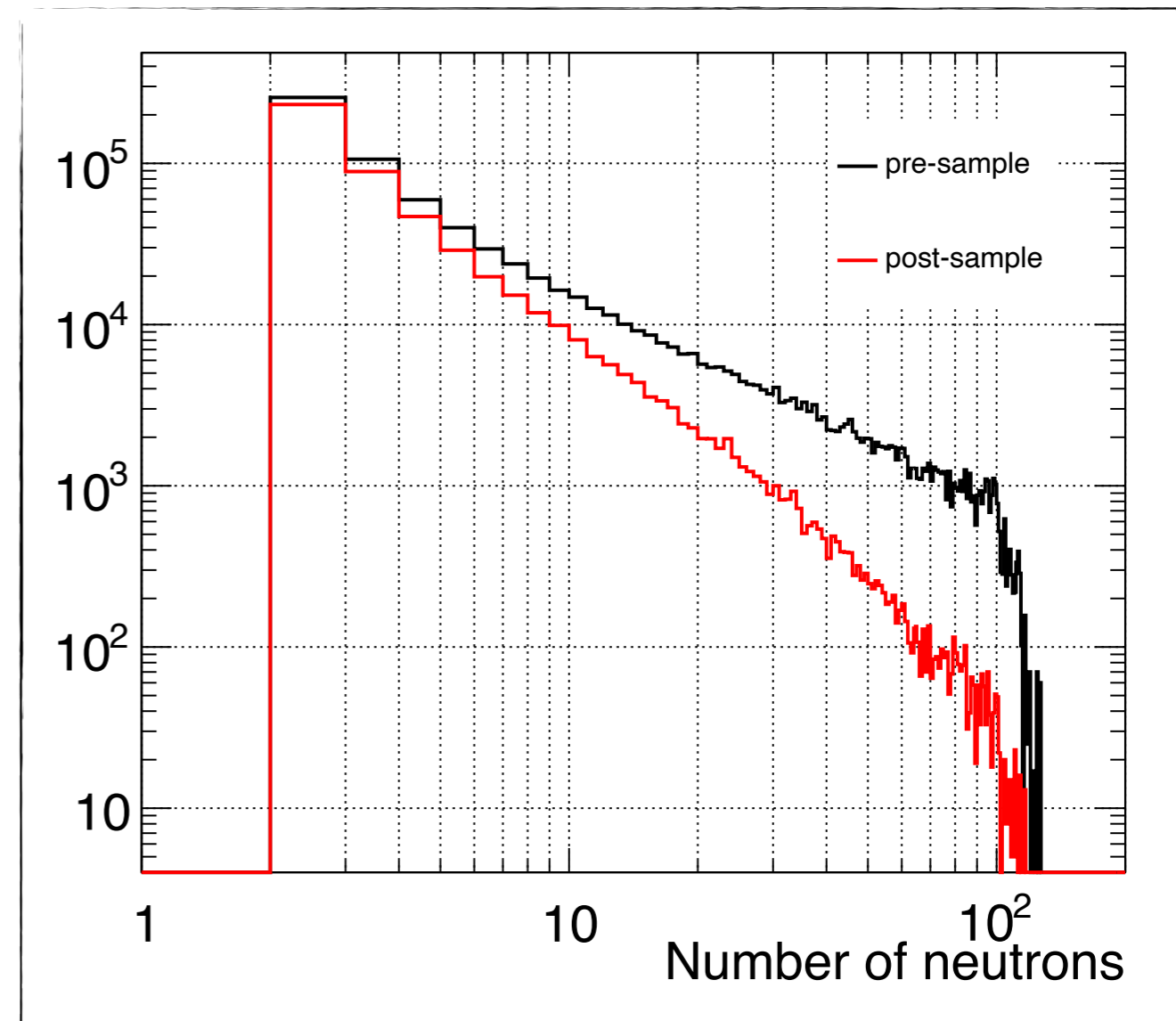
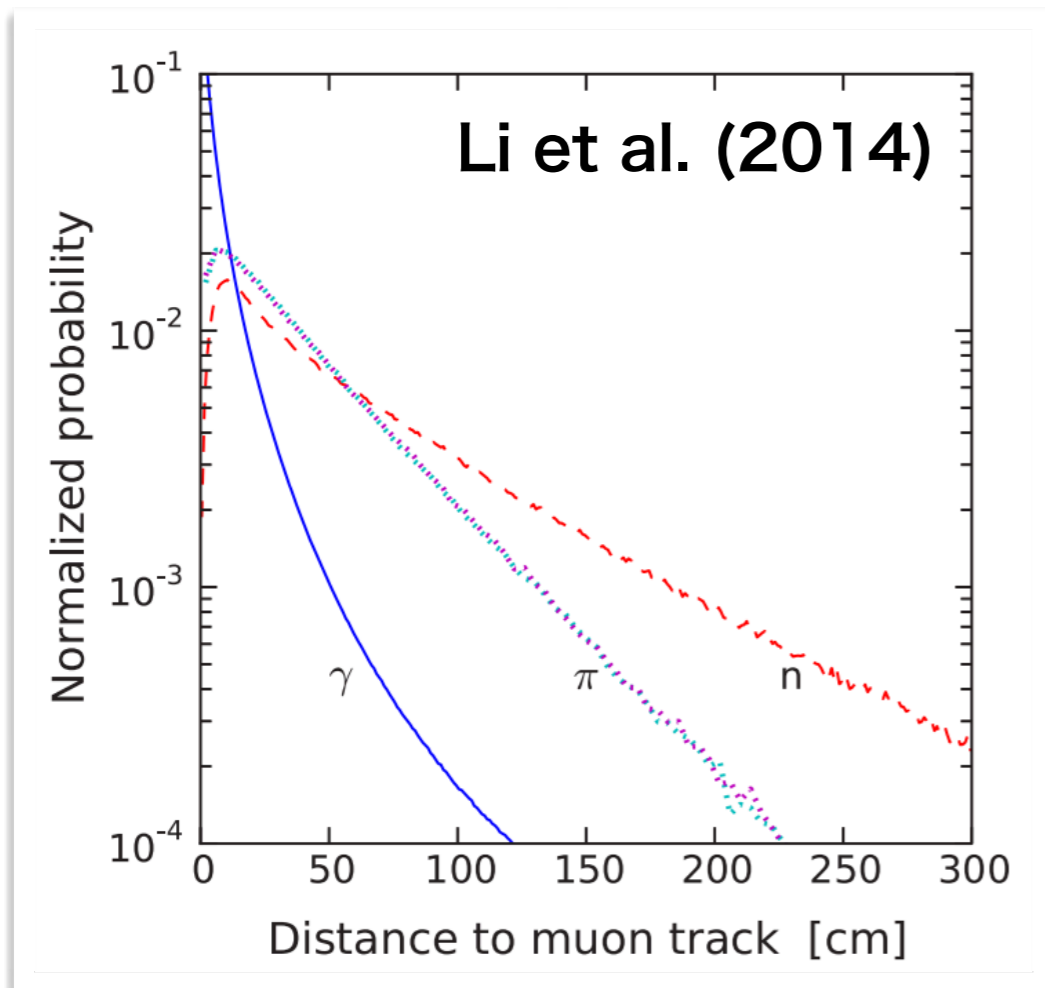
放射性同位体崩壊の種類

- ミューオン：11%
(7%: ^{16}N , 4% others)
- 二次粒子：89%

Isotope	Half-life [s]	Decay mode	Yield [$\times 10^{-7} \mu^{-1} g^{-1} \text{cm}^2$]	Primary process
n			2030	
^{18}N	0.624	β^-	0.02	$^{18}\text{O}(n, p)$
^{17}N	4.173	$\beta^- + n$	0.59	$^{18}\text{O}(n, n + p)$
^{16}N	7.13	$\beta^- + \gamma(66\%), \beta^- (28\%)$	18	(n, p)
^{16}C	0.747	$\beta^- + n$	0.02	$(\pi^-, n + p)$
^{15}C	2.449	$\beta^- + \gamma(63\%), \beta^- (37\%)$	0.82	$(n, 2p)$
^{14}B	0.0138	$\beta^- + \gamma$	0.02	$(n, 3p)$
^{13}O	0.0086	β^+	0.26	$(\mu^-, p + 2n + \mu^- + \pi^-)$
^{13}B	0.0174	β^-	1.9	$(\pi^-, 2p + n)$
^{12}N	0.0110	β^-	1.3	$(\pi^+, 2p + 2n)$
^{12}B	0.0202	β^+	0.02	$(n, \alpha + p)$
^{12}Be	0.0236	β^-	12	$(n, \alpha + p + n)$
^{11}Be	13.8	$\beta^- (55\%), \beta^- (31\%)$	0.10	$(n, \alpha + 2p)$
^{11}Li	0.0085	$\beta^- + n$	0.01	$(\pi^+, 5p + \pi^+ + \pi^0)$
^9C	0.127	β^+	0.89	$(n, \alpha + 4n)$
^9Li	0.178	$\beta^- + n(51\%), \beta^- (49\%)$	1.9	$(\pi^-, \alpha + 2p + n)$
^8B	0.77	β^+	5.8	$(\pi^-, \alpha + 2p + 2n)$
^8Li	0.838	β^-	13	$(\pi^-, \alpha + ^2\text{H} + p + n)$
^8He	0.119	$\beta^- + \gamma(84\%), \beta^- + n(16\%)$	0.23	$(\pi^-, ^3\text{H} + 4p + n)$
^{15}O			351	$(\gamma + n)$
^{15}N			773	$(\gamma + p)$
^{14}O			13	$(n, 3n)$
^{14}N			295	$(\gamma, n + p)$
^{14}C			64	$(n, n + 2p)$
^{13}N			19	$(\gamma, ^3\text{H})$
^{13}C			225	$(n, ^2\text{H} + p + n)$
^{12}C			792	(γ, α)
^{11}C			105	$(n, \alpha + 2n)$
^{11}B			174	$(n, \alpha + p + n)$
^{10}C			7.6	$(n, \alpha + 3n)$
^{10}B			77	$(n, \alpha + p + 2n)$
^9Be			24	$(n, \alpha + 2p + n)$
^9Be			38	$(n, 2\alpha)$
sum			3015	

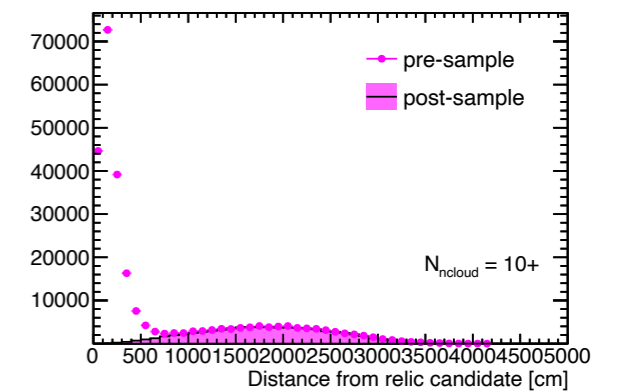
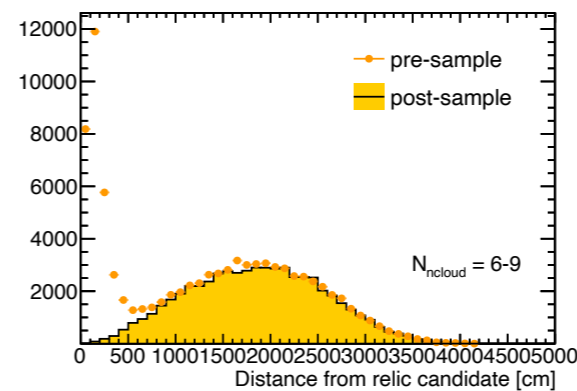
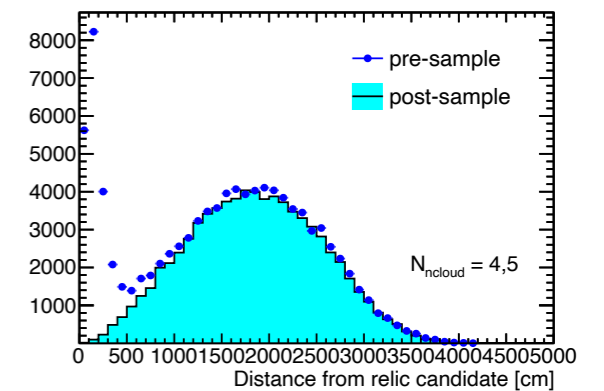
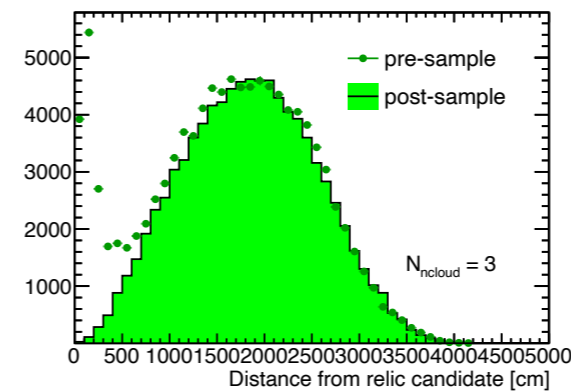
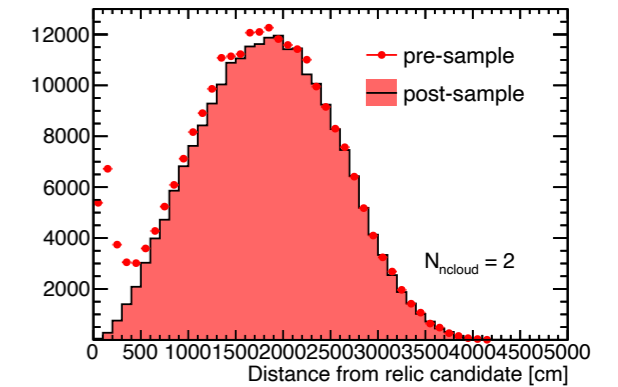
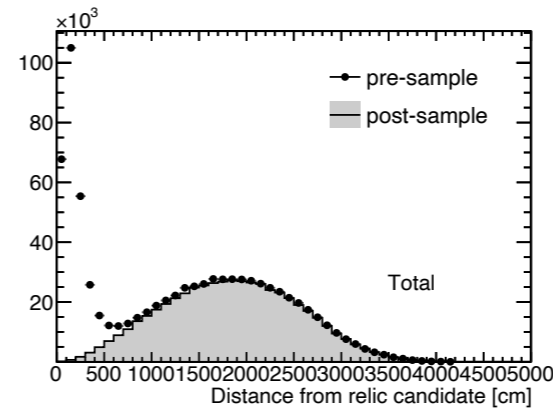
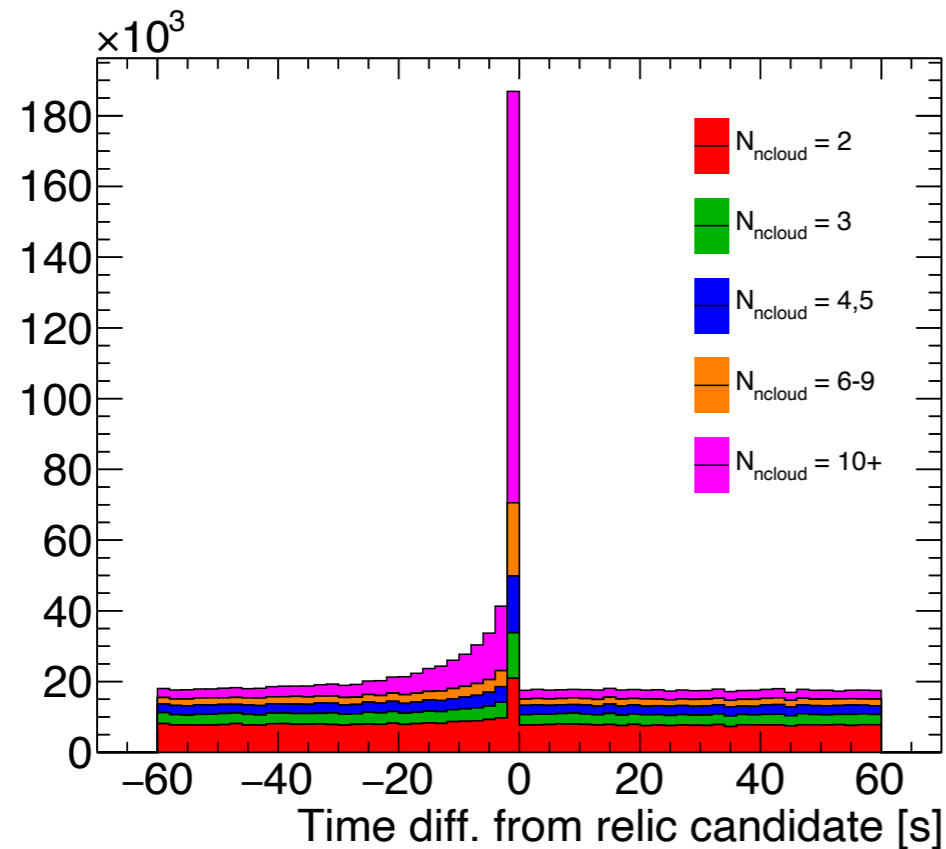
Neutron cloud cut

- 25 hits/200 ns
- [35,535] us from the muon
- $g_{\text{vtx}} > 0.4$ and $g_{\text{dir}} > 0.4$
- Distance from muon track < 5 m



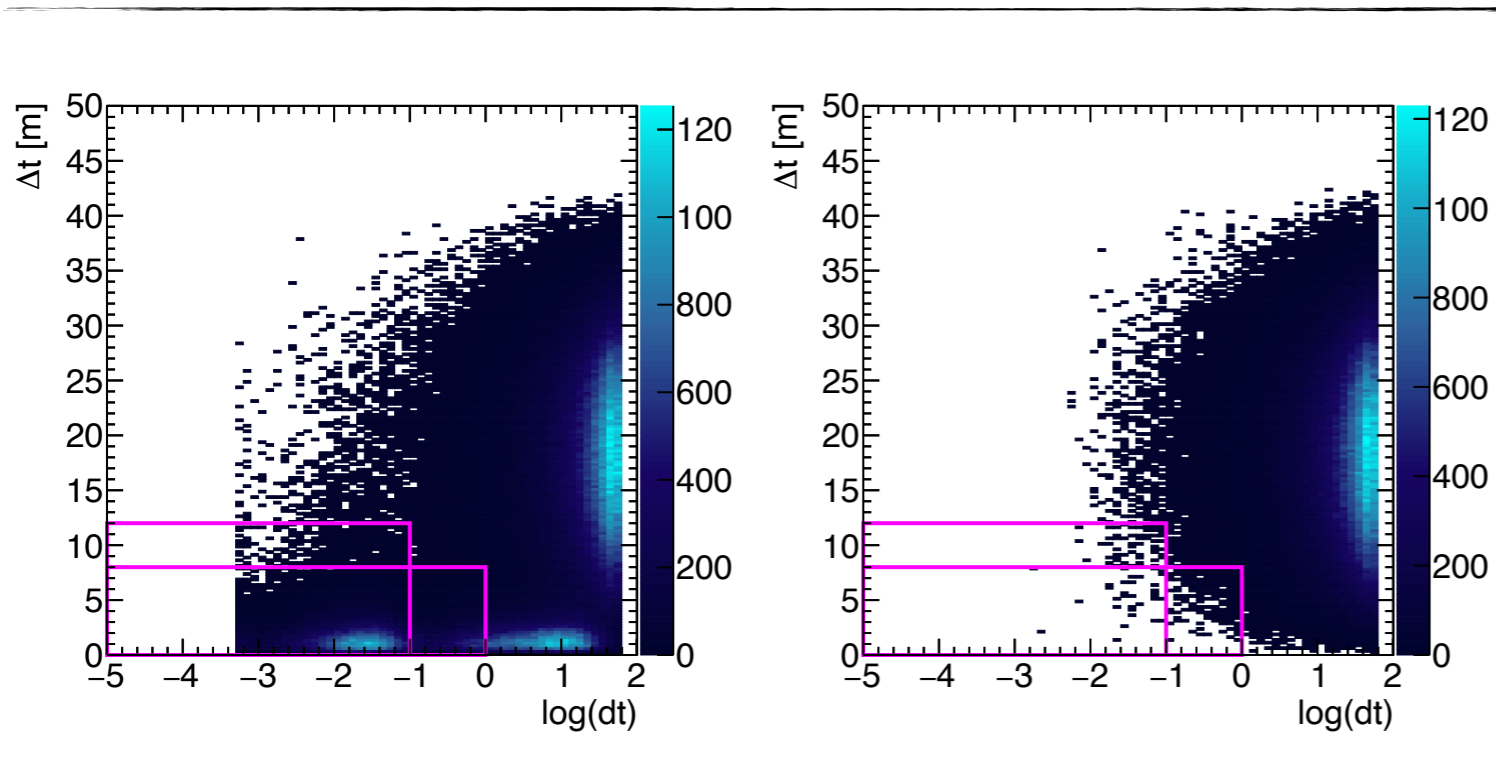
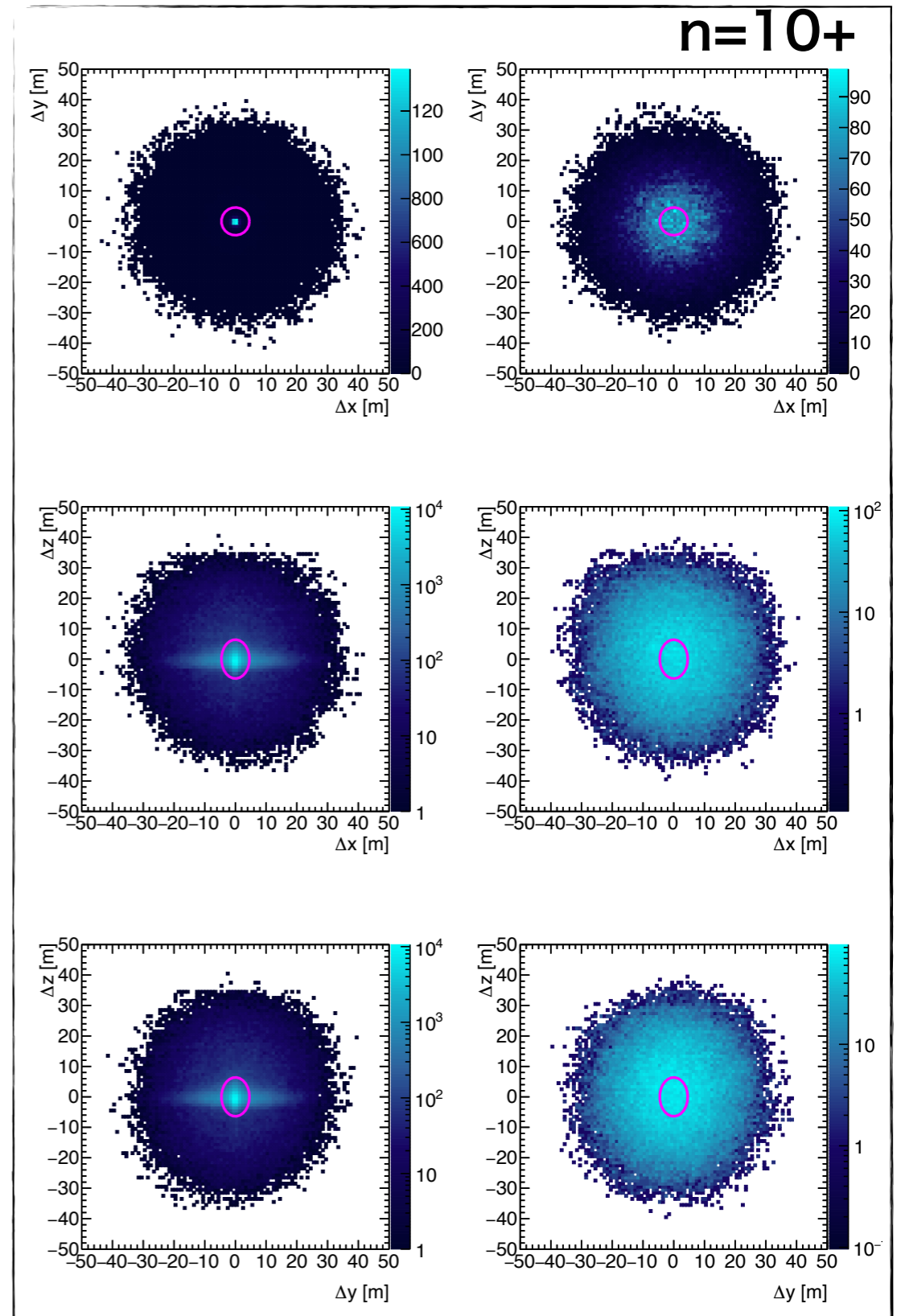
Neutron cloud cut

- 時間・空間的な依存は中性子数に依存
→ Cutも中性子数で変える

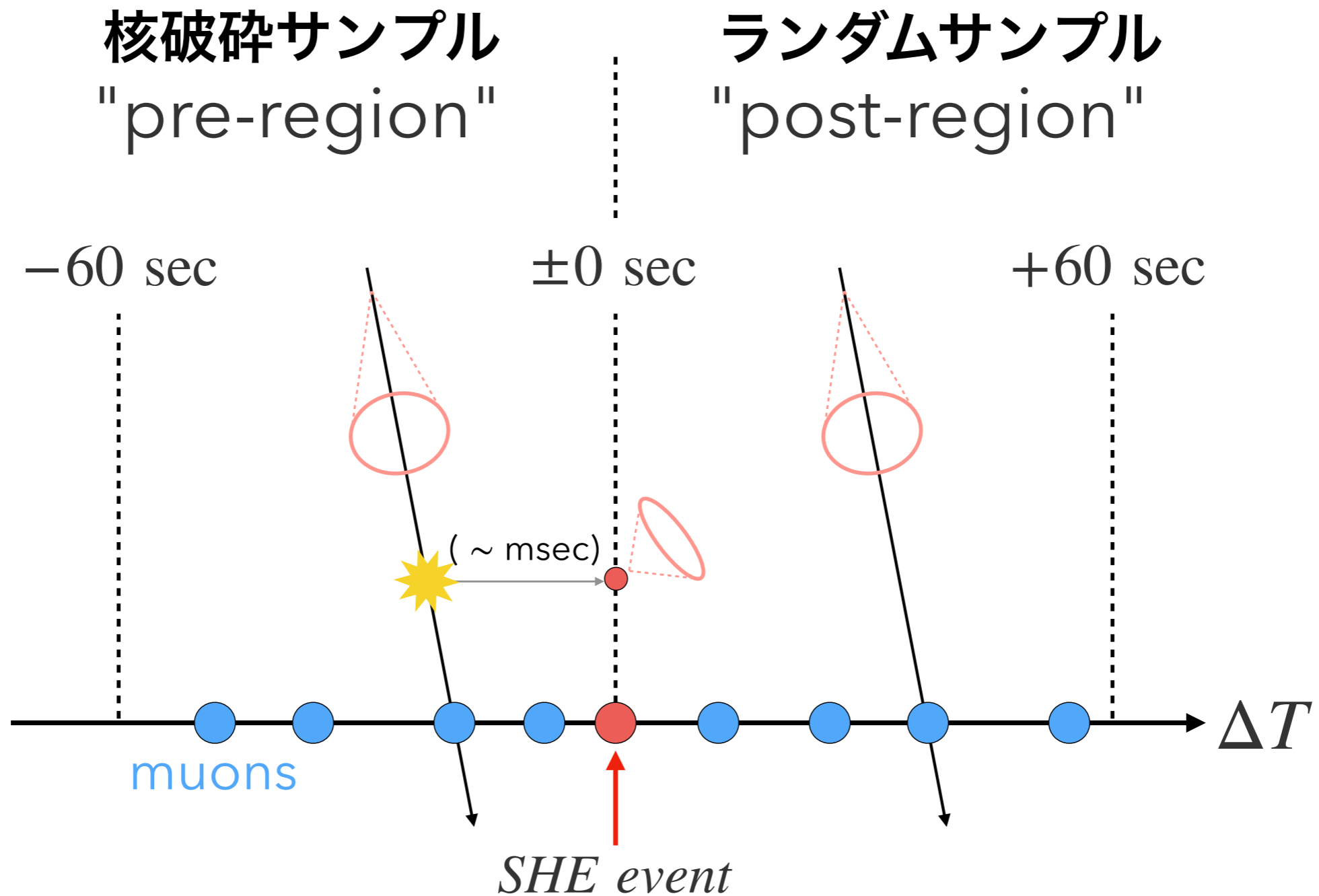


Neutron cloud cut

N_{ncloud}	Time [sec]	Spatial [cm]
2+	$\Delta T < 0.1$	$\Delta l < 1200$
2+	$\Delta T < 1$	$\Delta l < 800$
2	$\Delta T < 30$	$(\Delta_x^2 + \Delta_y^2)/200^2 + \Delta_z^2/400^2 > 1.2$
3	$\Delta T < 60$	$(\Delta_x^2 + \Delta_y^2)/(6 \times 10^4) + \Delta_z^2/500^2 > 1.2$
4, 5	$\Delta T < 60$	$(\Delta_x^2 + \Delta_y^2)/(1.2 \times 10^5) + \Delta_z^2/550^2 > 1.2$
6-9	$\Delta T < 60$	$(\Delta_x^2 + \Delta_y^2)/(2 \times 10^5) + \Delta_z^2/650^2 > 1.2$
10+	$\Delta T < 60$	$(\Delta_x^2 + \Delta_y^2)/500^2 + \Delta_z^2/700^2 > 1.2$



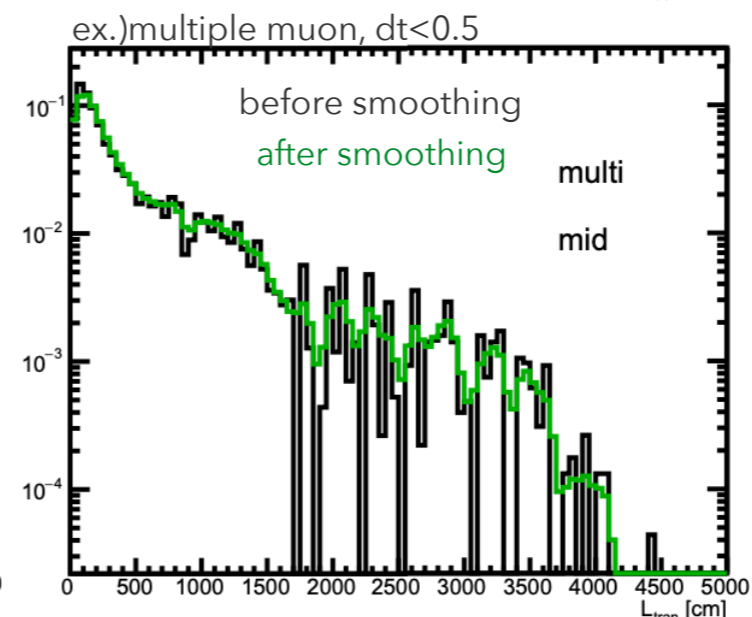
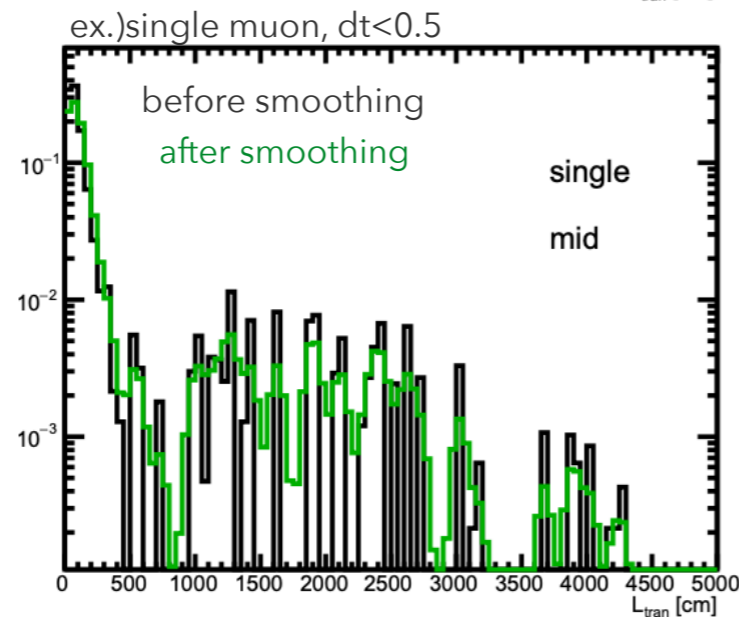
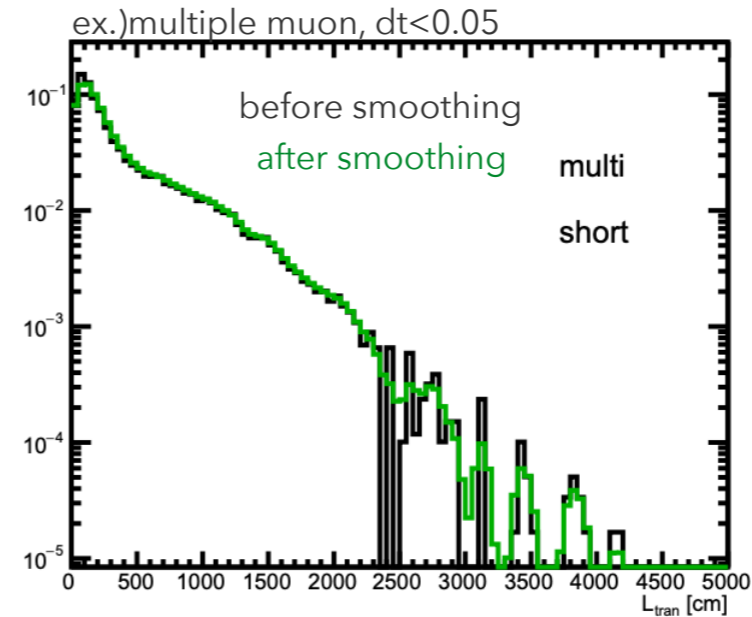
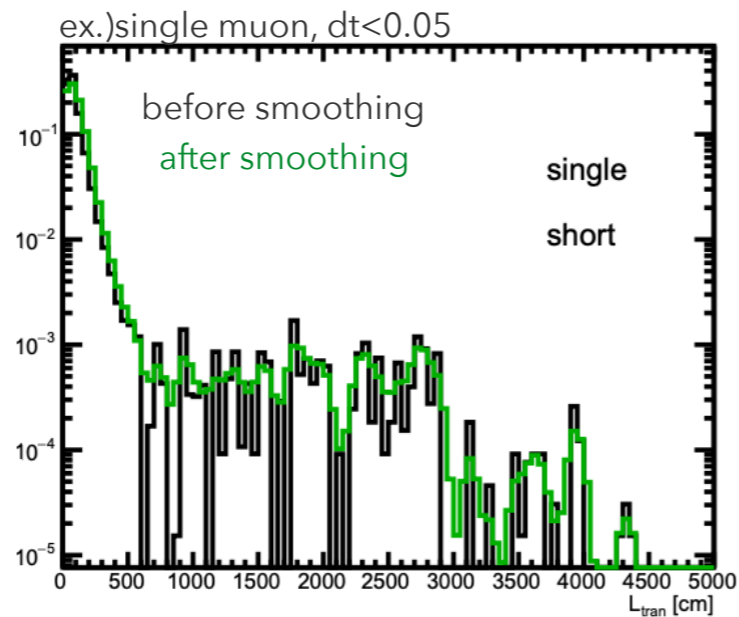
尤度関数を使った核破砕除去



Spallation PDF

- PDFを作るときの統計を kernel-density-estimation(KDE)で補償

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x - X_i}{h}\right)$$



Spallation PDF

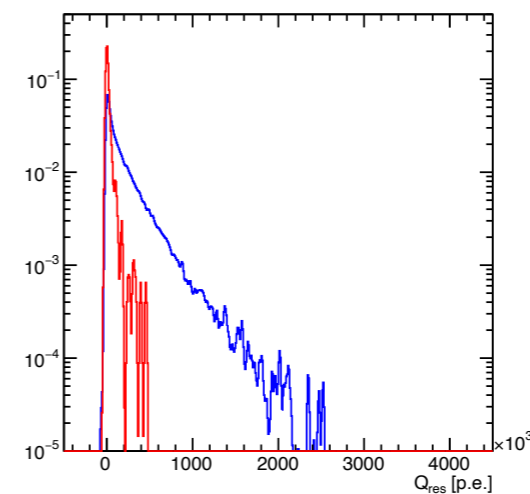
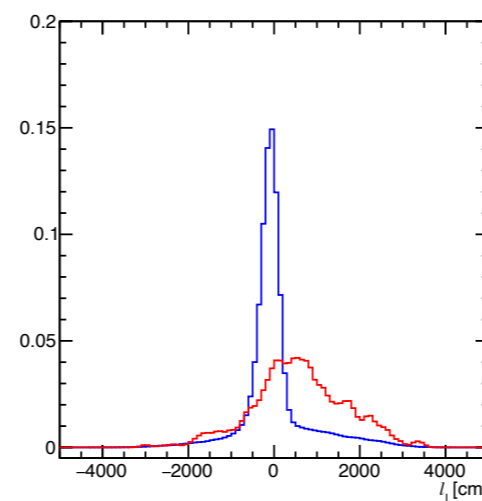
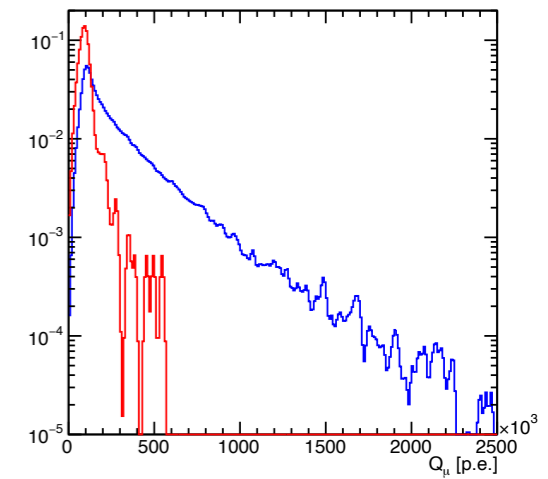
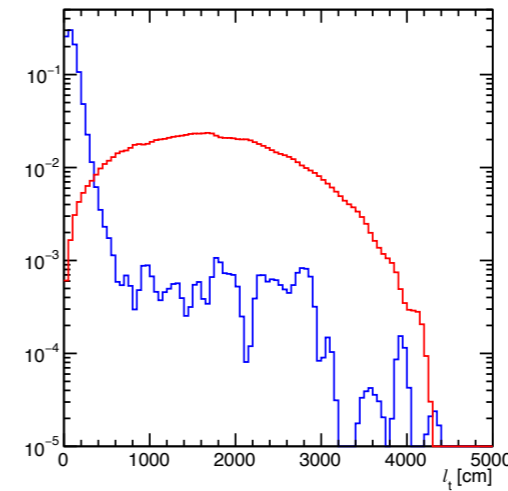
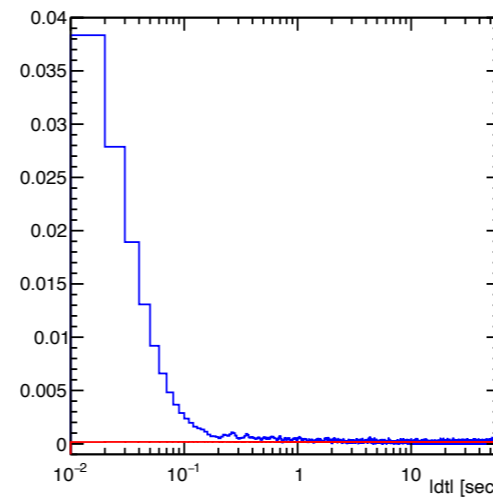
- dt

- l_t

- l_L

- $Q_{res}: Q_{mu}-Q_{MIP}$

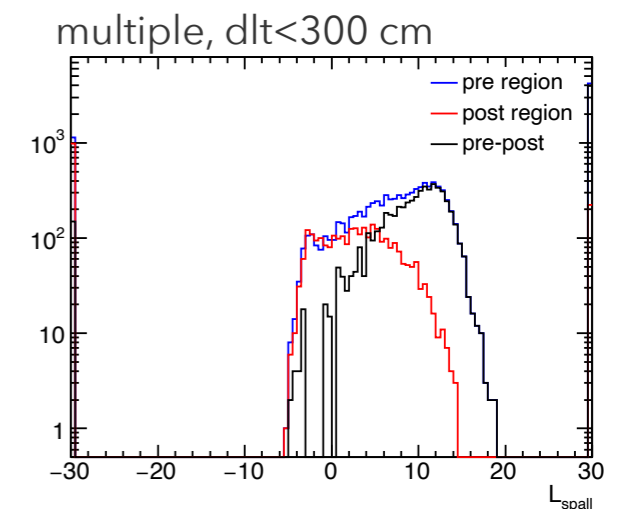
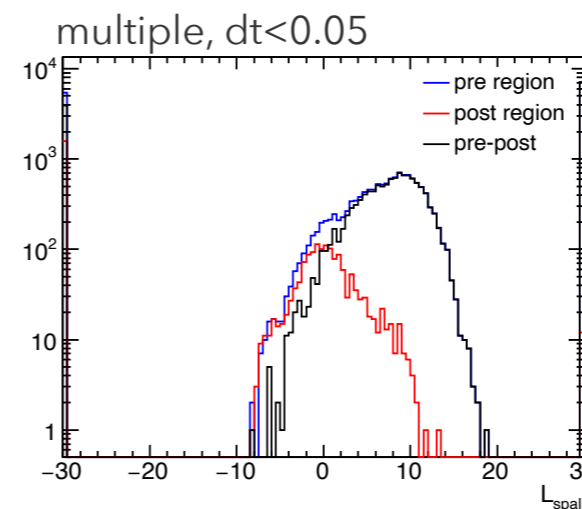
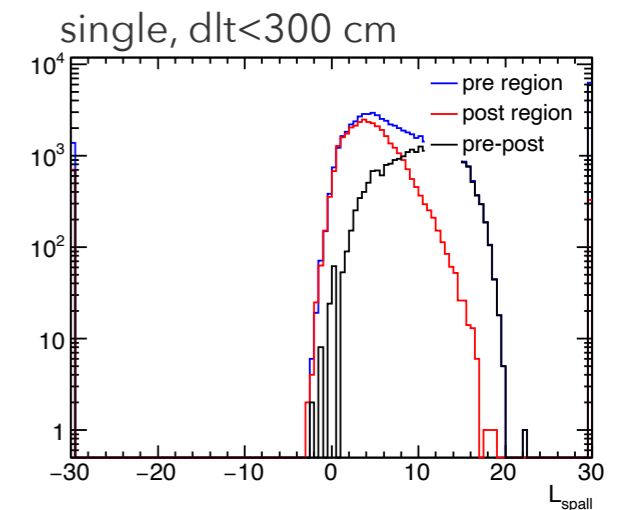
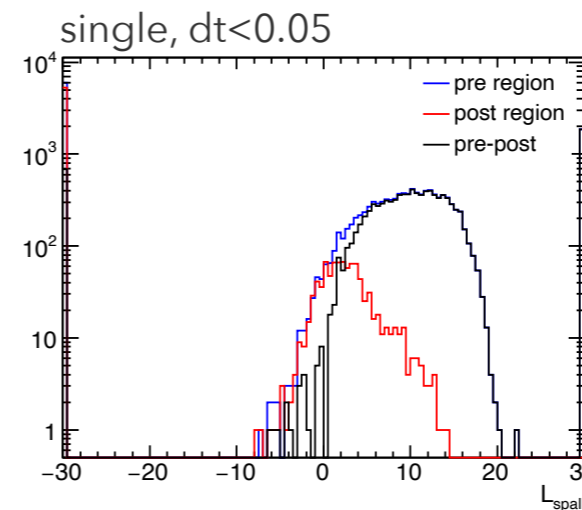
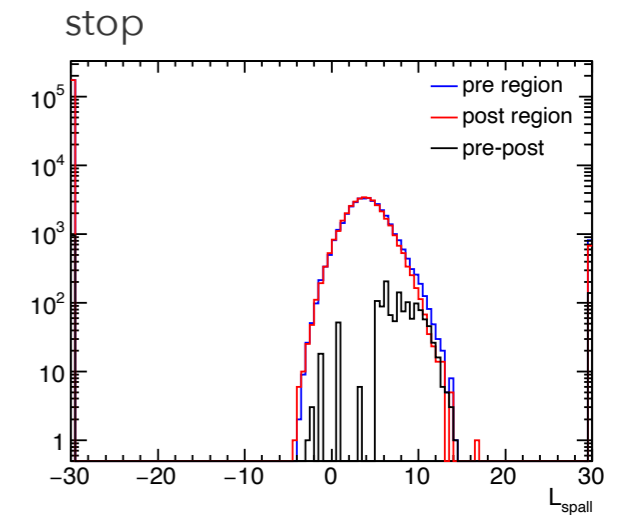
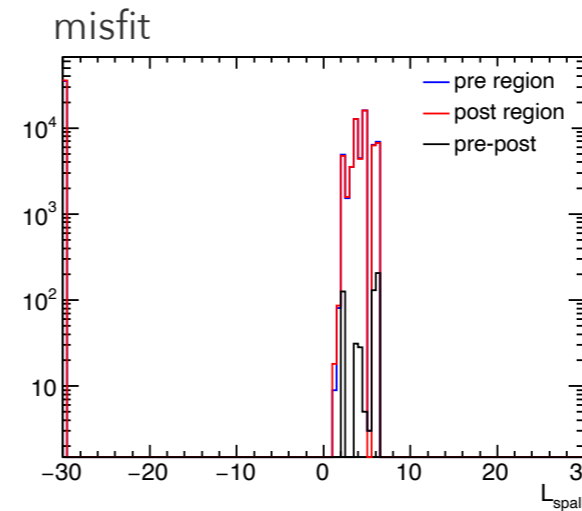
- Q_{mu}



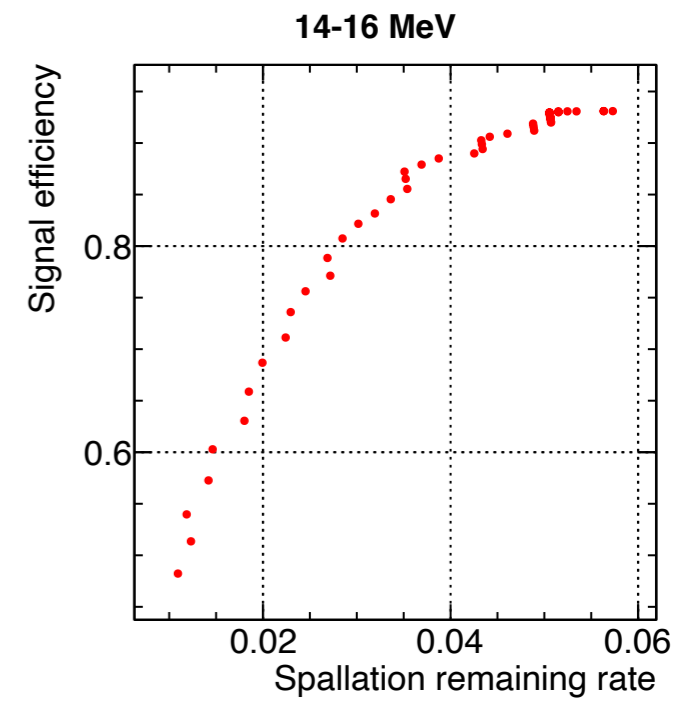
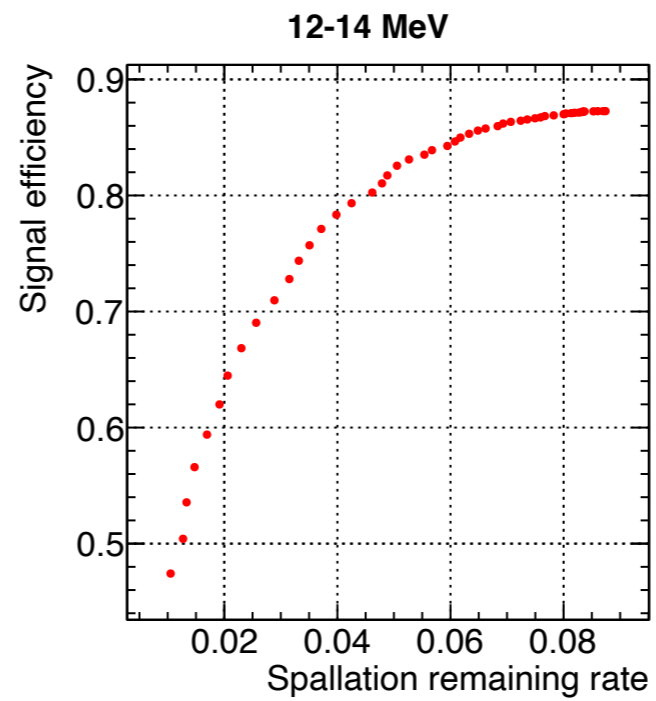
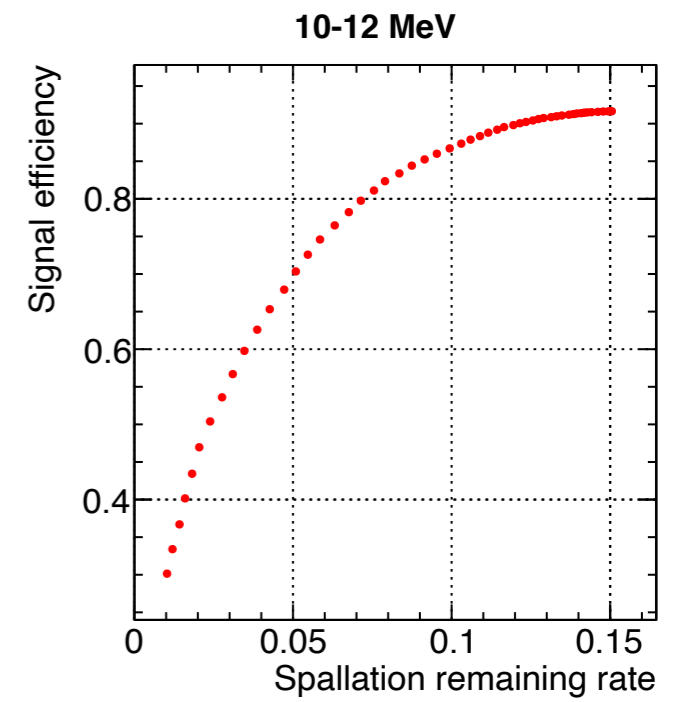
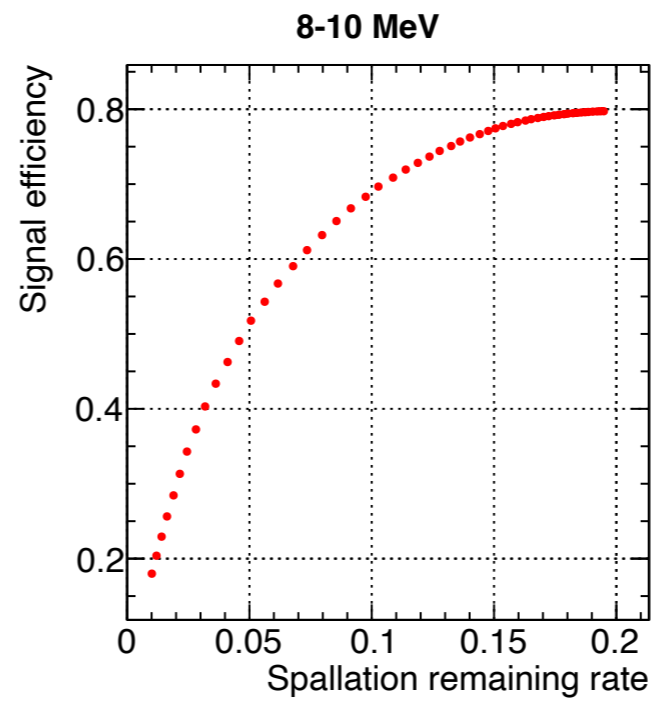
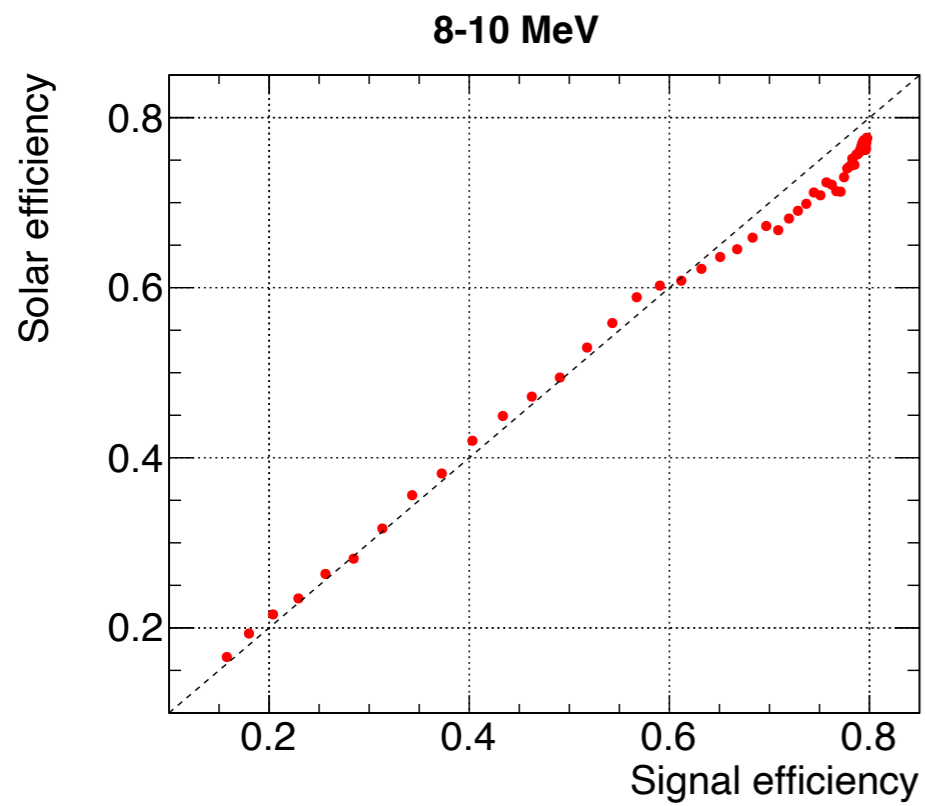
Likelihood distribution

- Likelihood分布

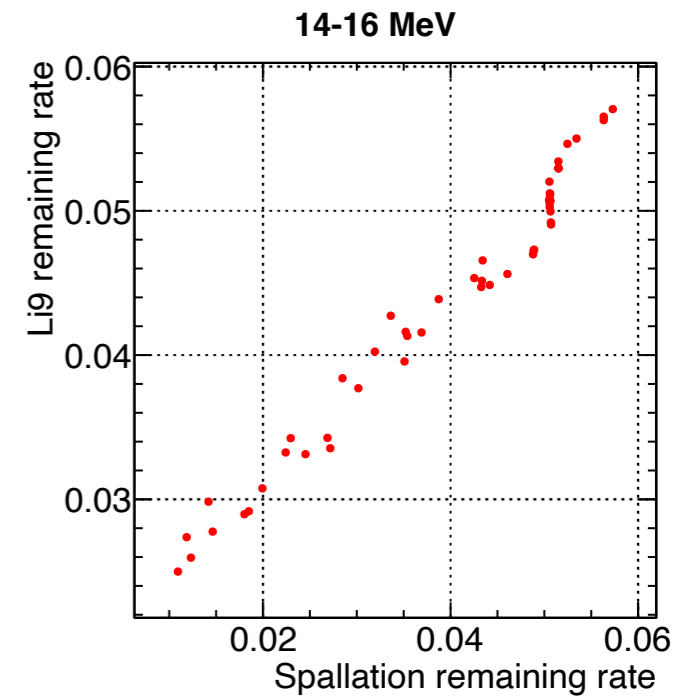
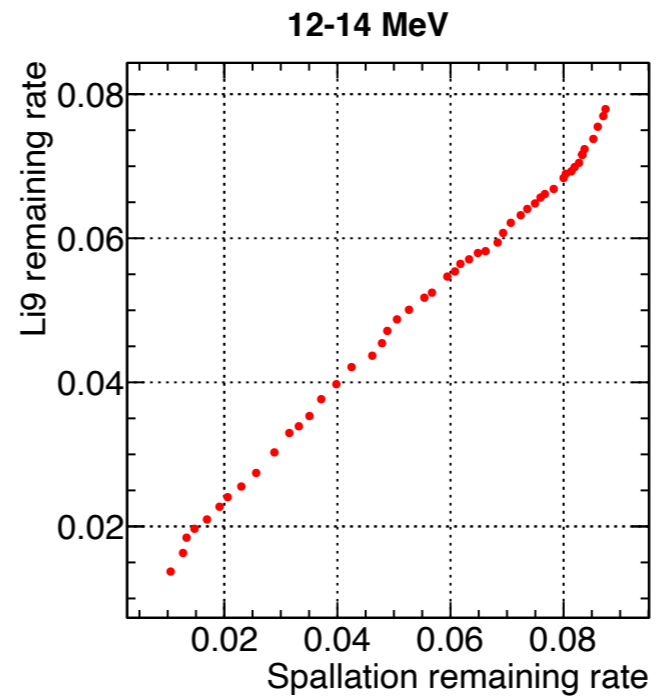
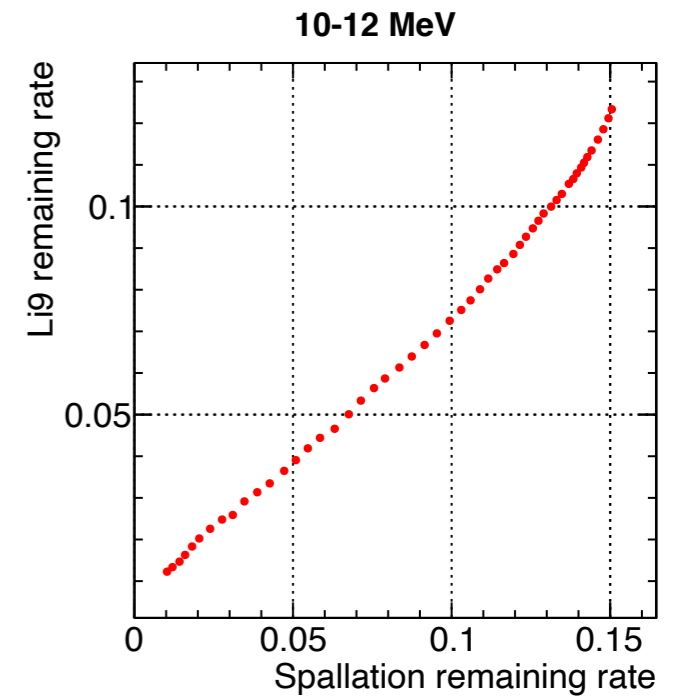
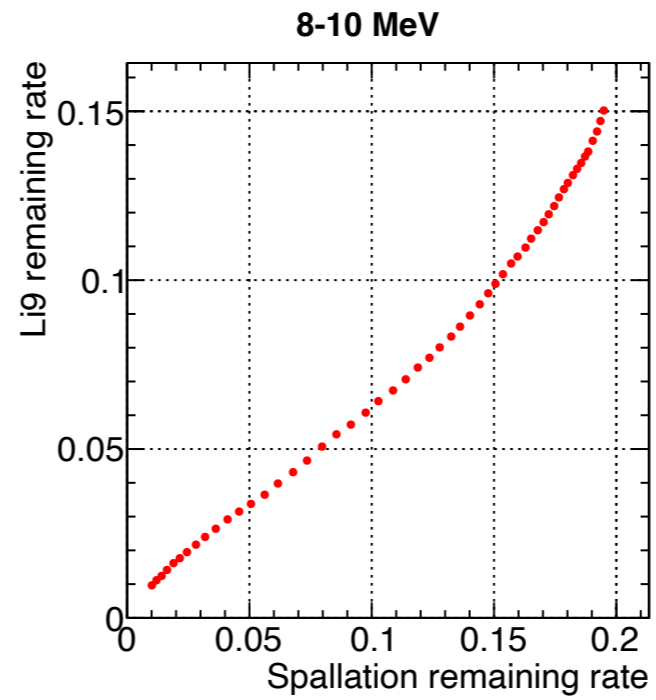
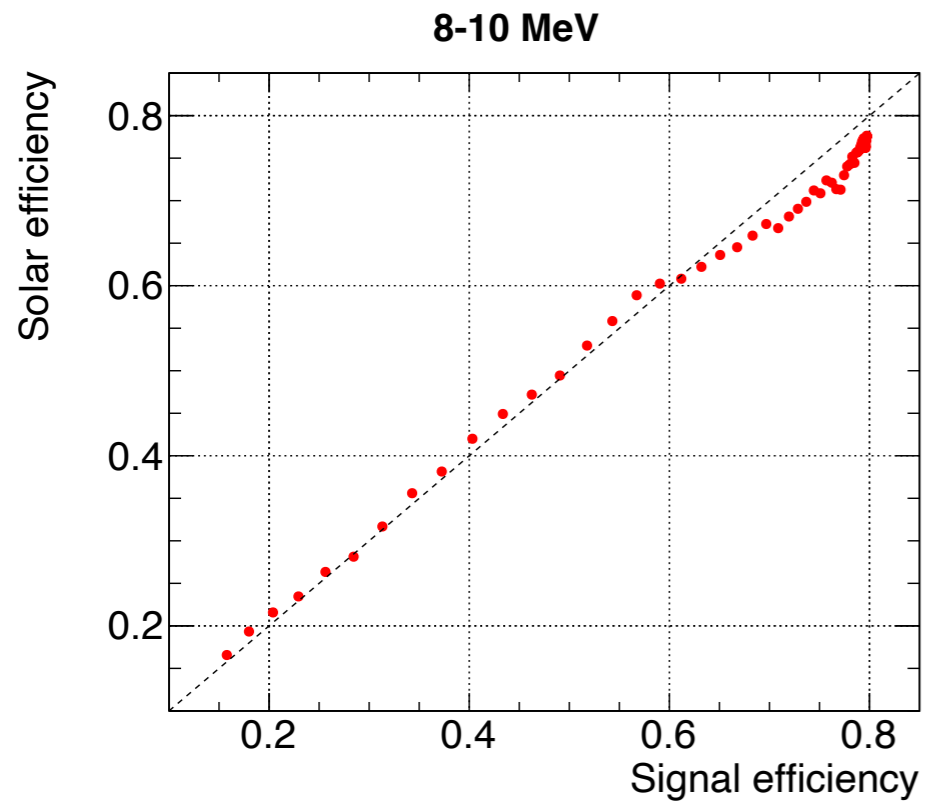
$$L_{\text{spall}} = \log \prod_{\text{ivar}} \frac{PDF_{\text{spall}}^{\text{ivar}}(x)}{PDF_{\text{random}}^{\text{ivar}}(x)}$$



ROC curve

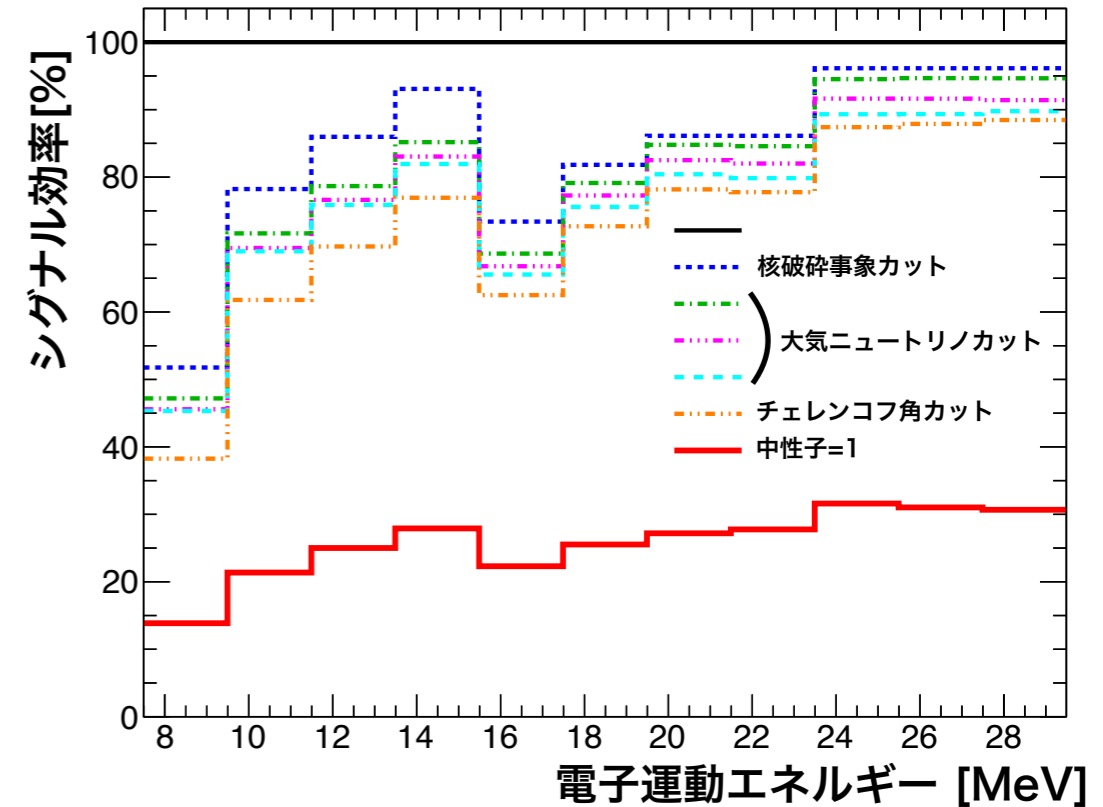
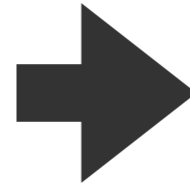
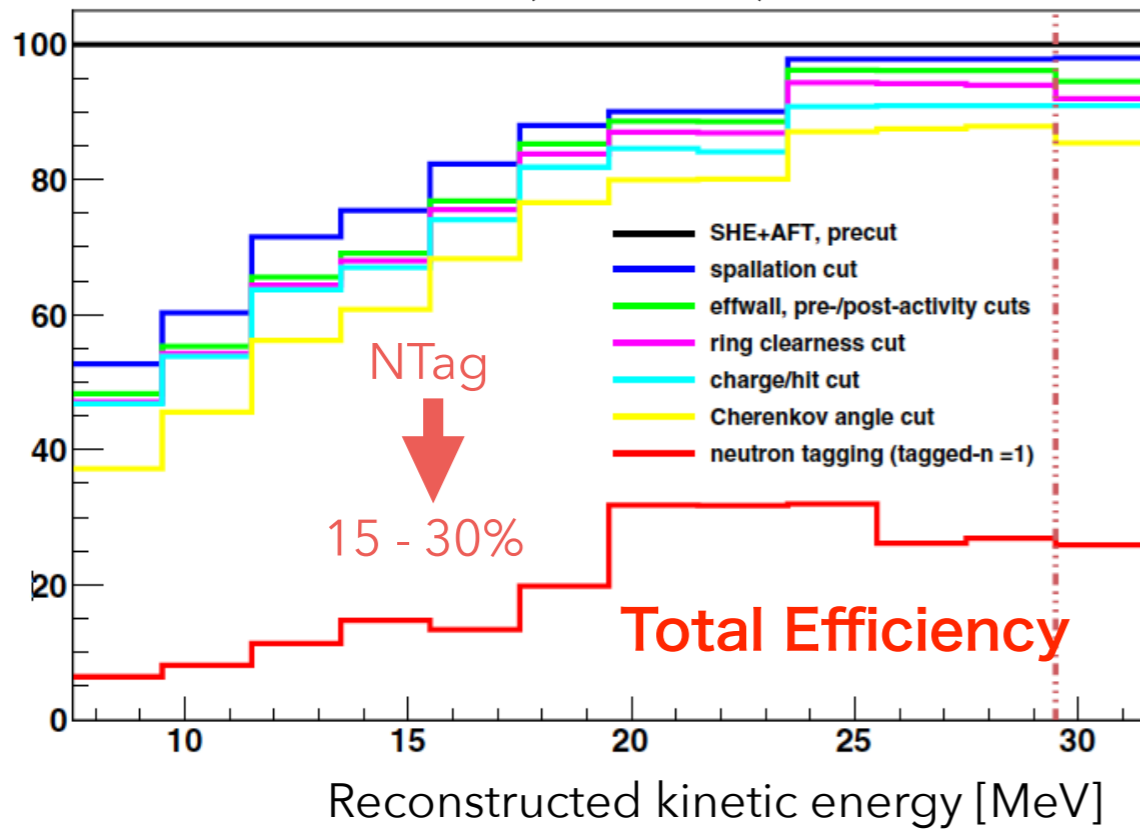


ROC curve



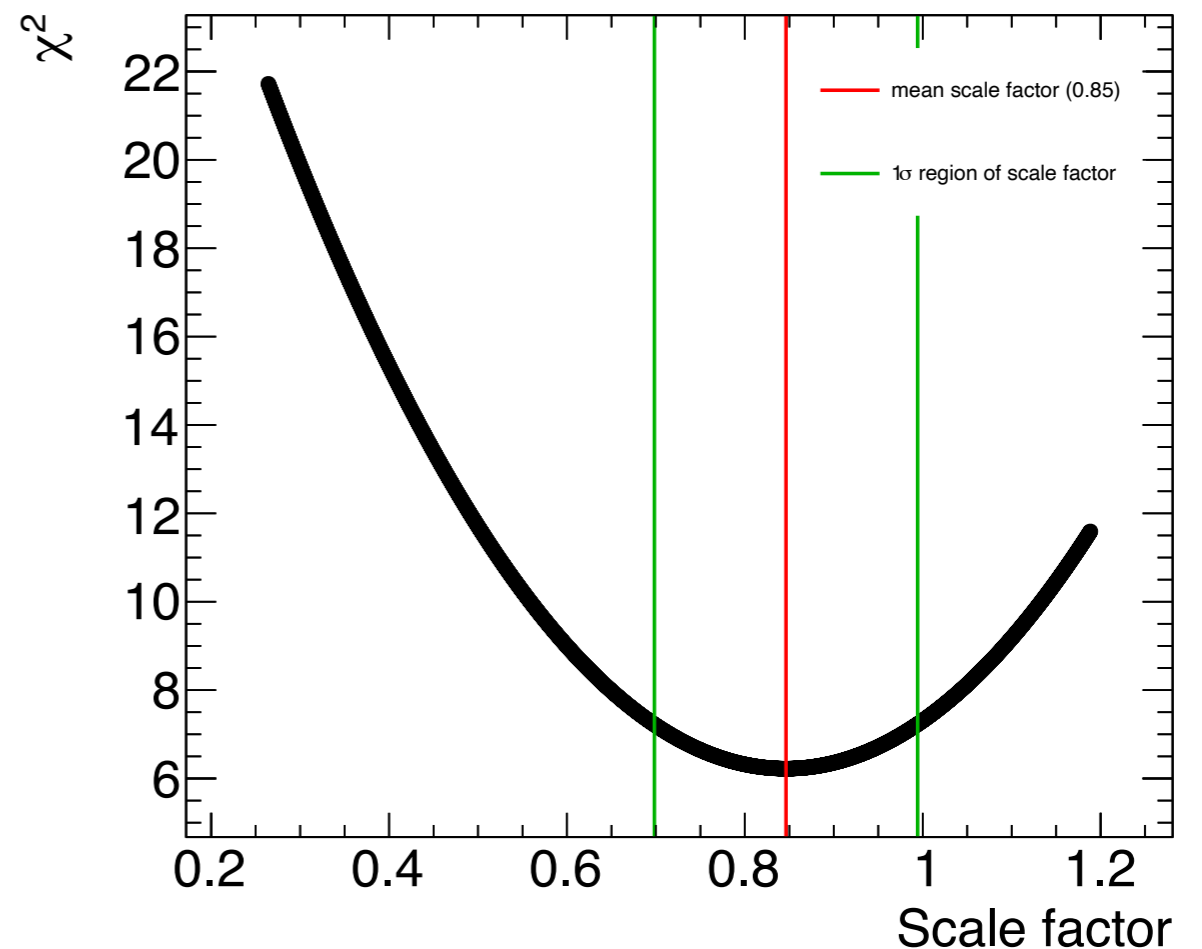
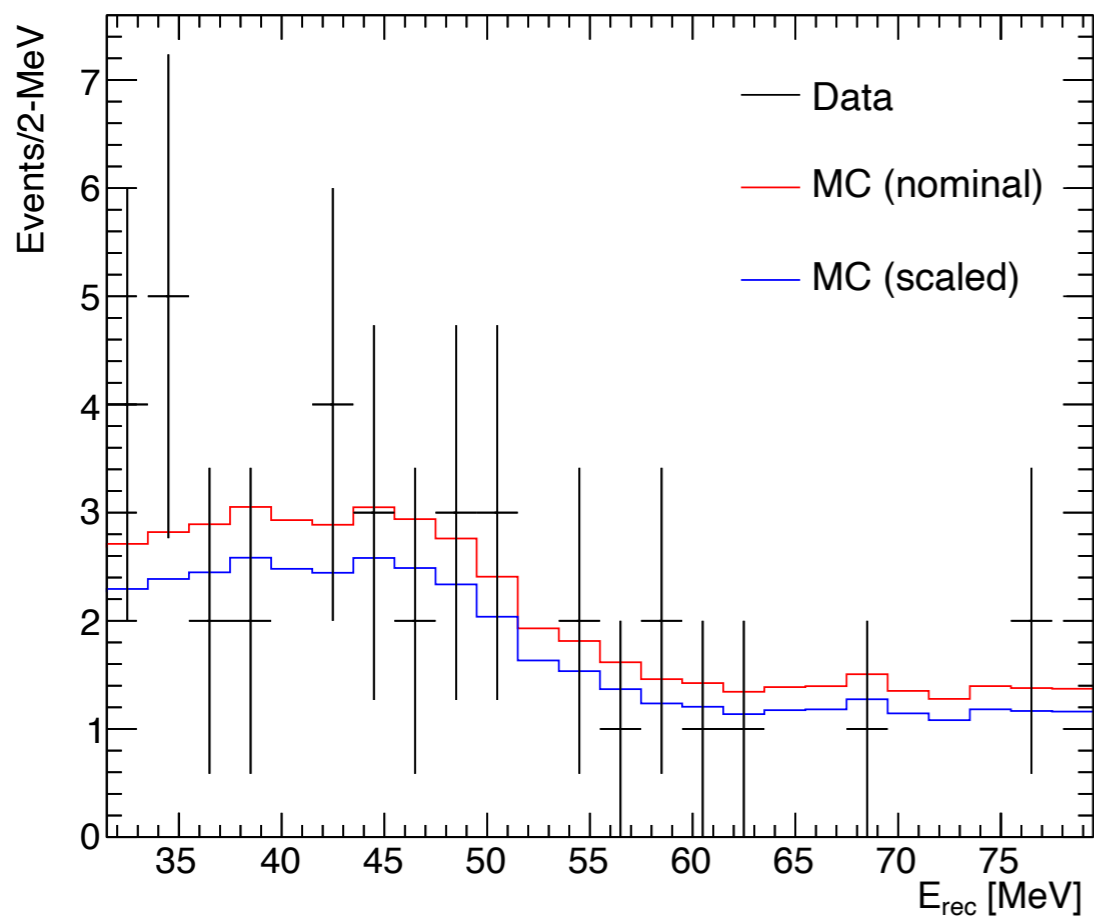
Signal Efficiency

SK-IV DSNB search (Abe2021)



Side-band bin

- side-band region
 - ▶ 大気 ν 由来のinvisible muonの崩壊
 - ▶ 大気 ν_e 反応
- 崩壊電子のMichel-SpectrumでMCをscaling

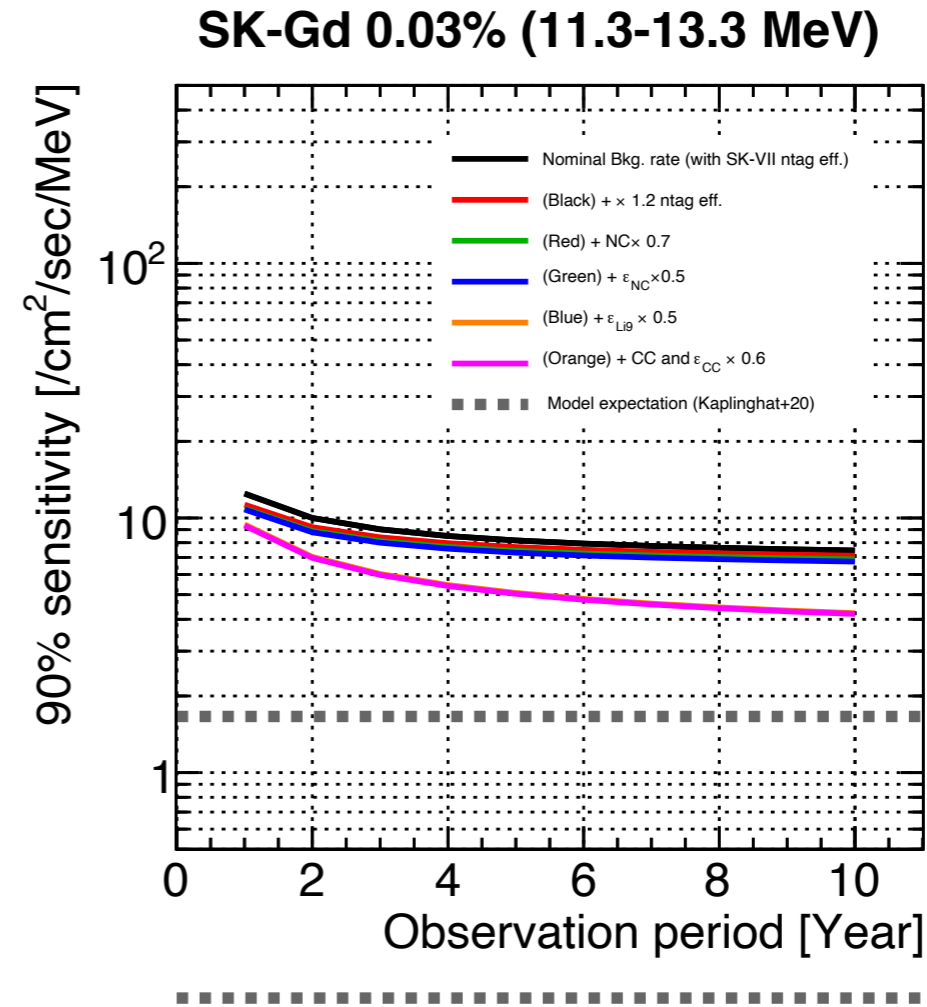
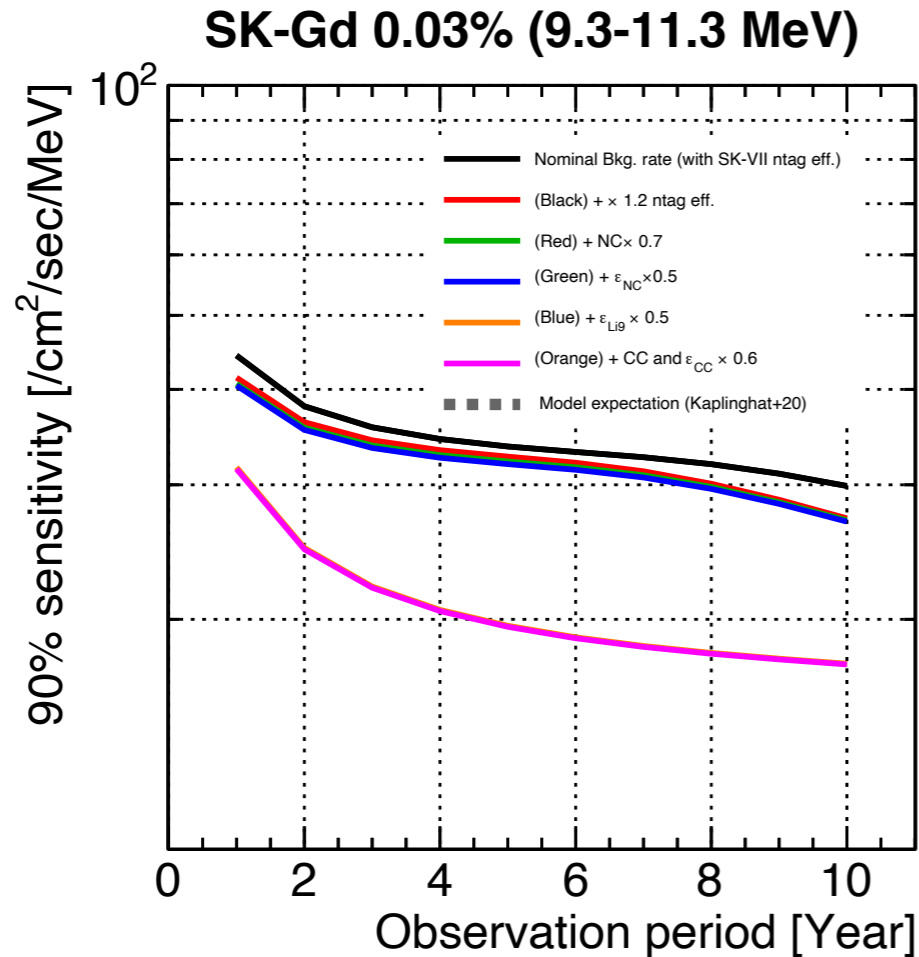


フラックス上限値

Neutrino energy [MeV]	9.29–11.29	11.29–13.29	13.29–17.29	17.29–25.29	25.29–31.29
Live time T	552.2 days				
Number of Target N_p	1.5×10^{33} protons				
N_{90}^{limit}	3.94	4.70	3.59	3.09	1.75
N_{90}^{exp}	5.99	3.85	2.58	1.69	1.72
ϕ_{90}^{limit} [/cm ² /sec /MeV]	32.32	18.21	3.75	0.89	0.32
ϕ_{90}^{exp} [/cm ² /sec /MeV]	49.16	14.89	2.70	0.49	0.32

フラックス感度の将来予測

今回の結果からSK-VIIでの感度を予測

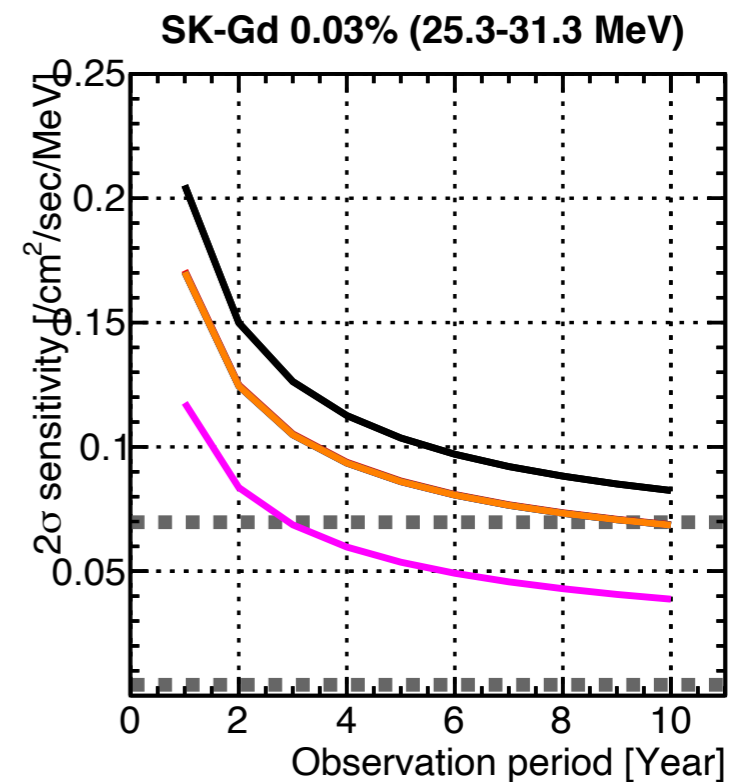
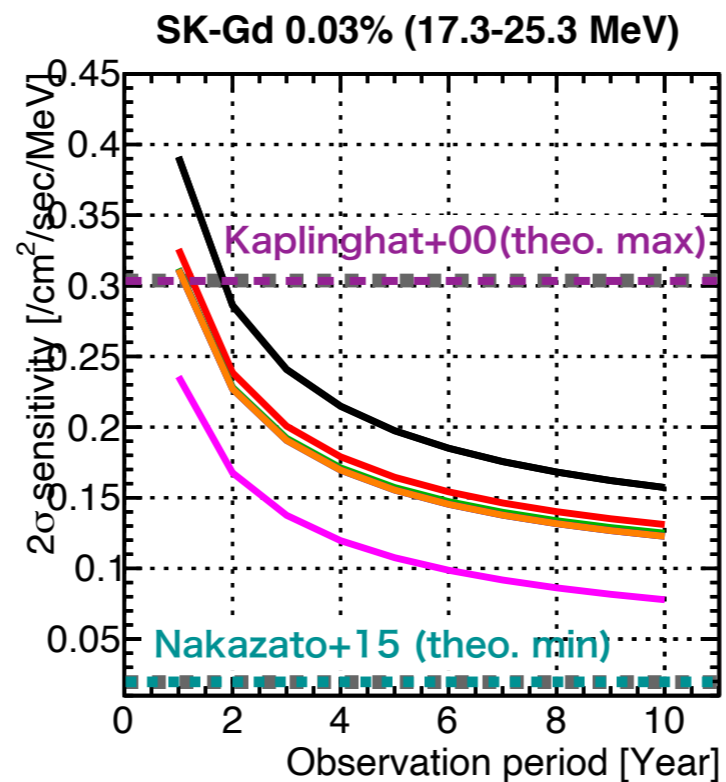
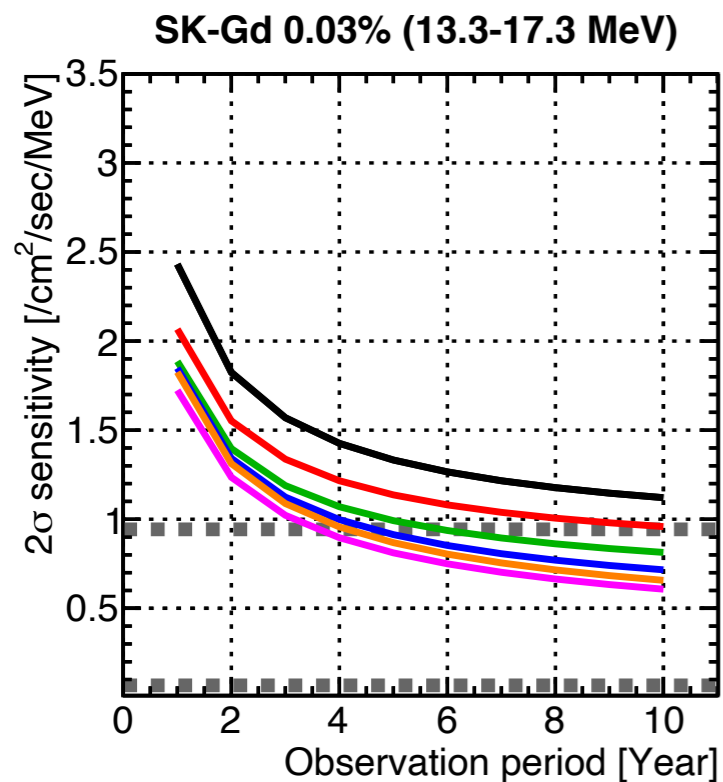


バックグラウンドに埋もれて現状の想定では観測できない

フラックス感度の将来予測

今回の結果からSK-VIIでの感度を予測

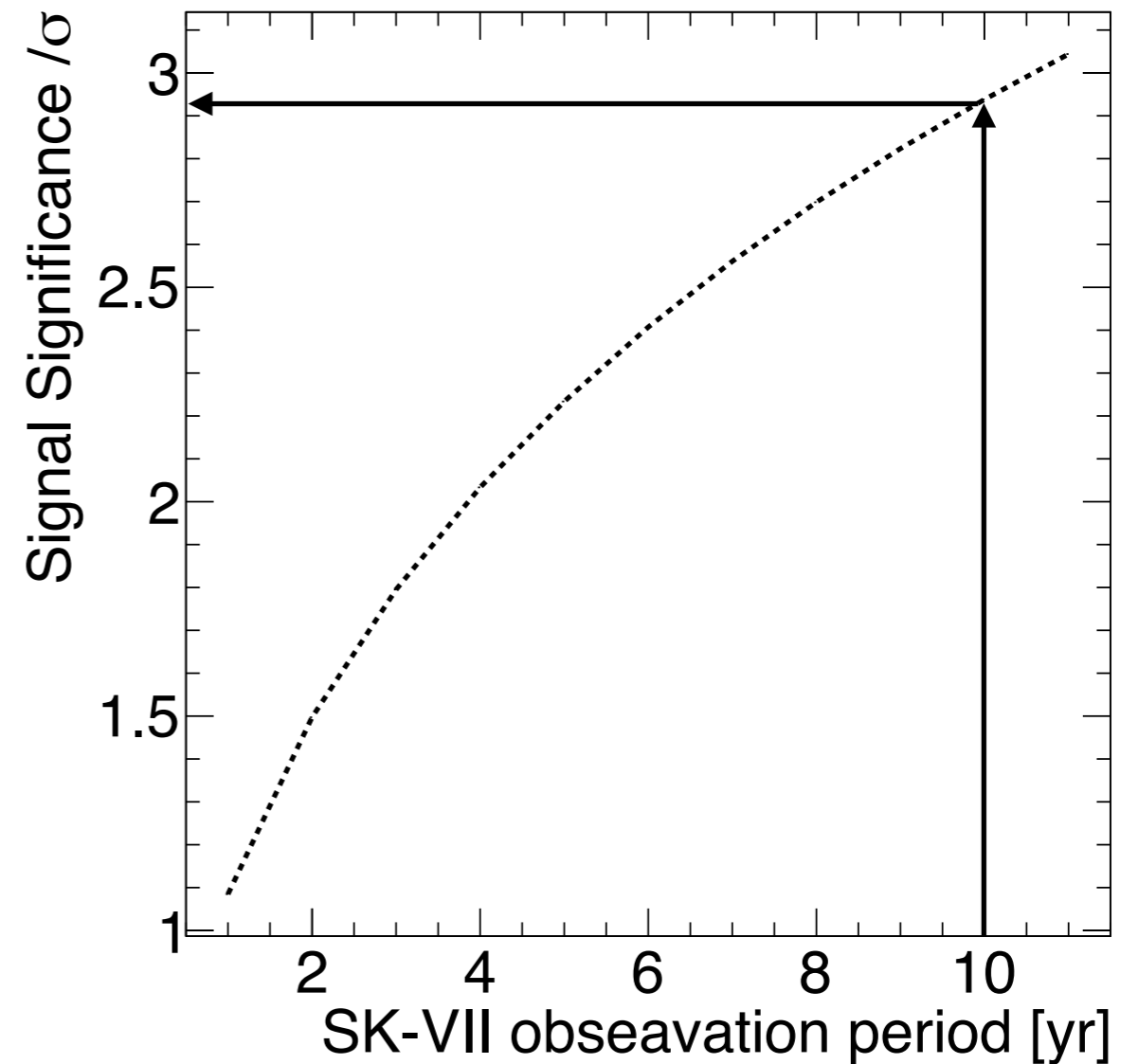
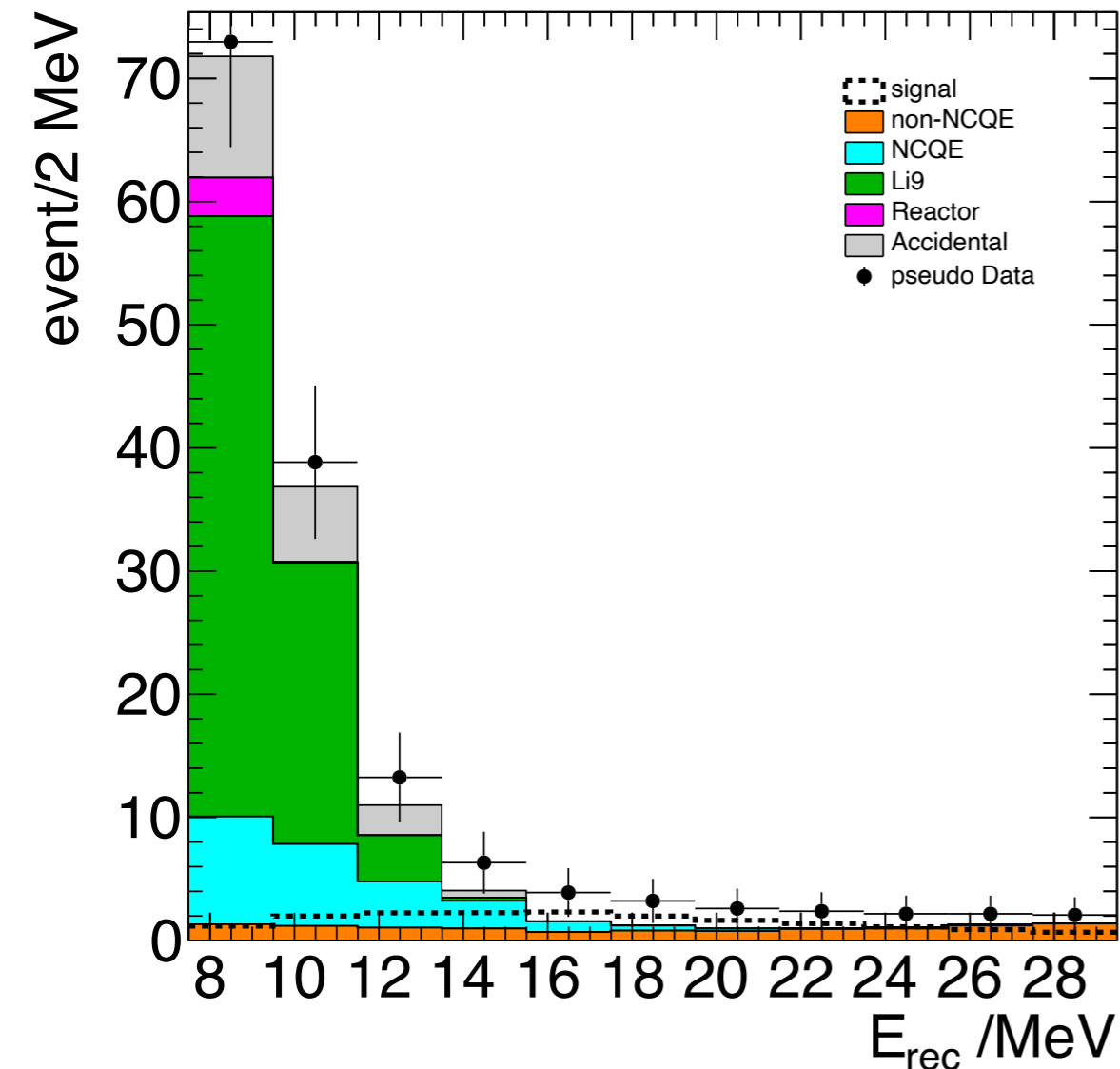
- ▶ 中性子タグ効率1.5倍→1.8倍(解析改善)
- ▶ →NCQE事象数0.7倍(解析改善)→NCQE不定性0.5倍(外部実験)
- ▶ →Li9不定性0.5倍(MC改善)
- ▶ →CCQE事象数&不定性0.6倍(MC改善+統計向上)



13.3 MeV以上でフラックスが大きいモデルを検証可能

SK-VII signal significance

- 10年で 3σ
→Li9の削減、NCQE 系統誤差のさらなる削減で 3σ



状態方程式

- Cold NSの半径： Togashi < LS < Shen
- BHのとき： LS < Togashi < Shen
→密度が大きい順にBHになる

