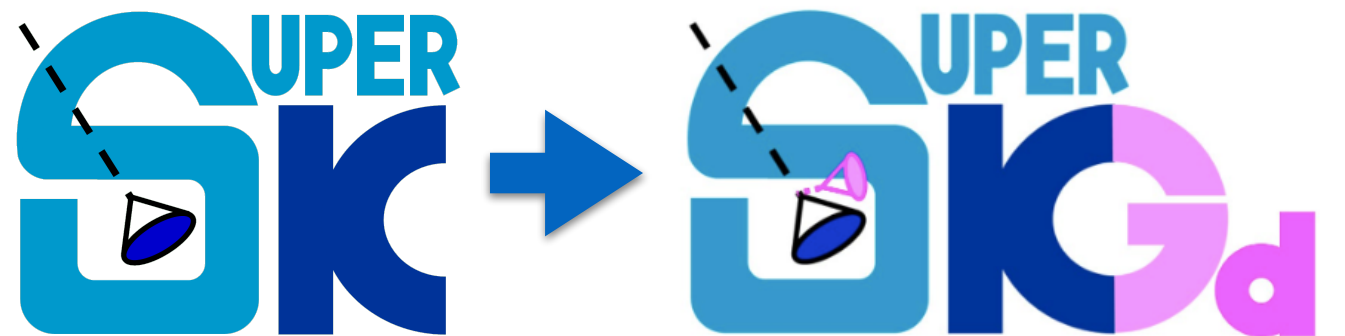


SK-Gd実験における中性子同定と 超新星背景ニュートリノ探索の現状

原田 将之 (岡山大学)

他Super-Kamiokande Collaboration

9月7日 @日本物理学会2022年秋季大会



超新星背景ニュートリノ

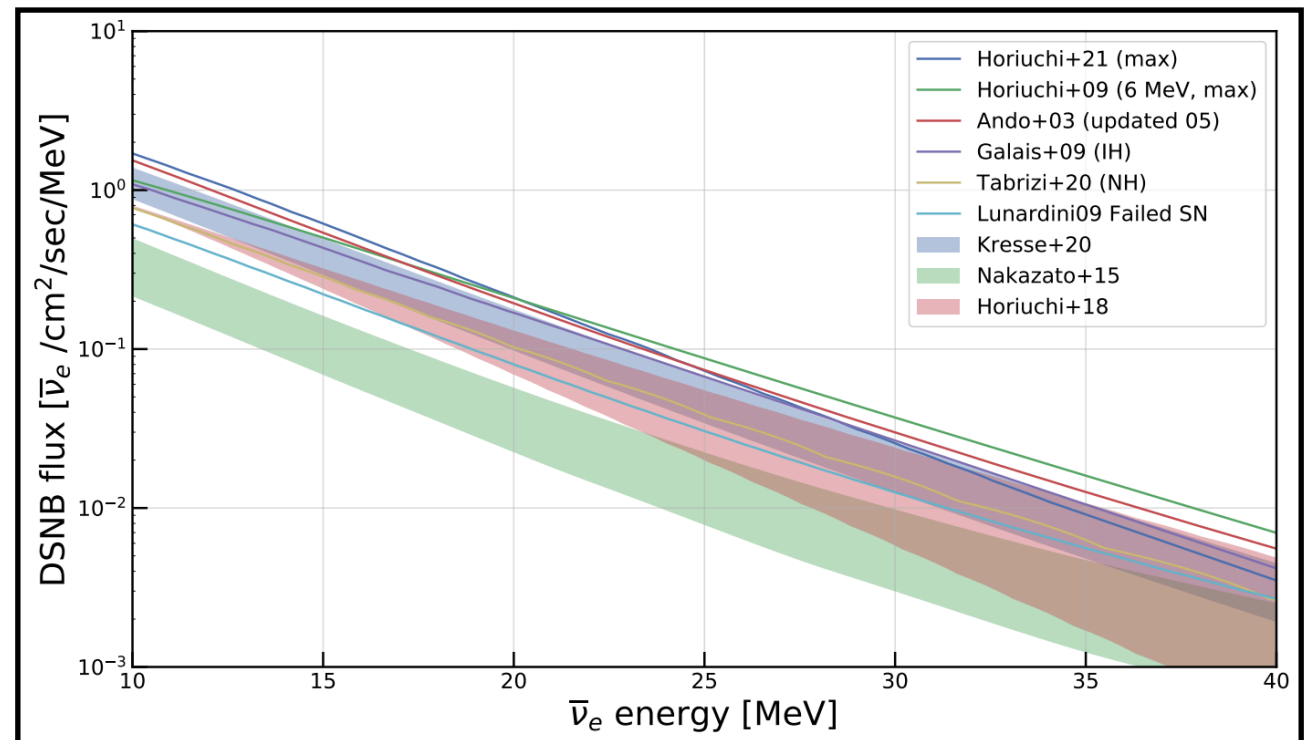
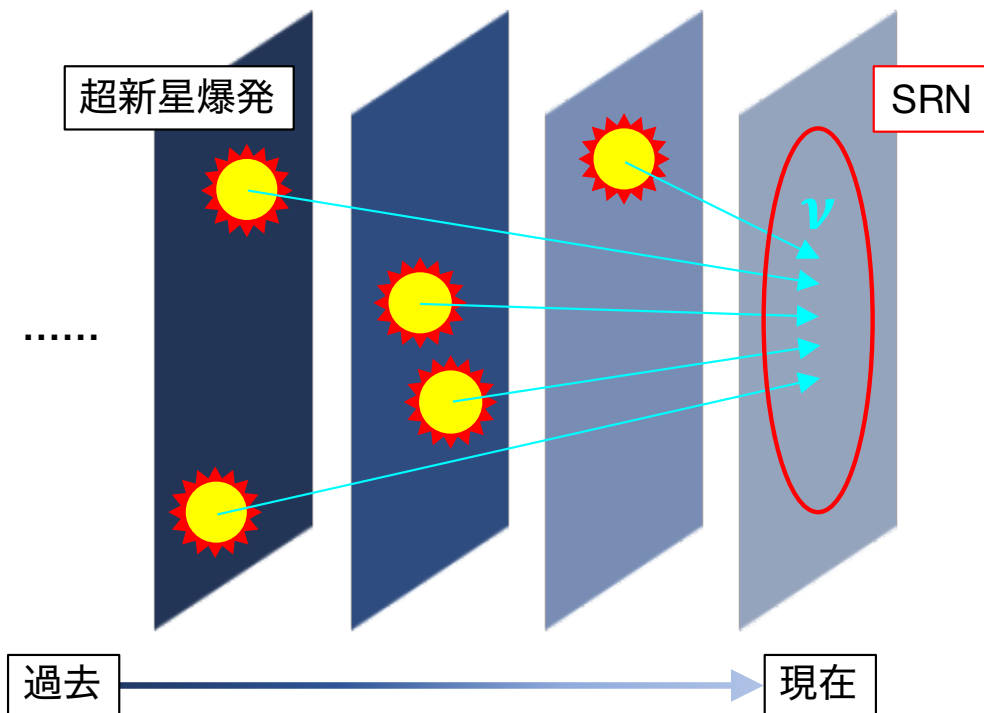
- 超新星ニュートリノ(Diffuse Supernova Neutrino Background: **DSNB**) :
過去に起こってきた超新星爆発で生成されたニュートリノの重ね合わせ

DSNBの観測



超新星爆発機構・星形成の歴史の理解

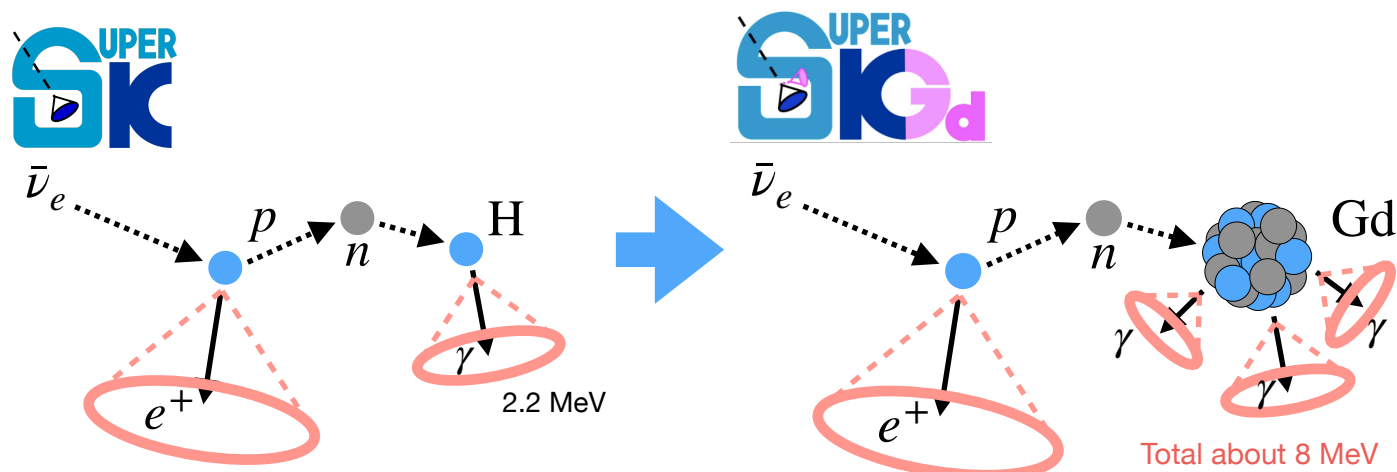
- スーパーカミオカンデ(SK)実験ではDSNBの観測を目指している
- DSNBの強度が低い($\sim < 10$ events/yr)ため、感度が足りておらず、
観測には至っていない→**SK-Gd実験**



SK-Gd実験

Super-Kamiokande検出器の超純水に硫酸Gdを導入し、
中性子信号を高効率で検出する

- 検出器：Super-Kamiokande(SK)
- Gdの熱中性子捕獲：SKで観測可能な合計~8 MeVのガンマ線信号
- 先発荷電粒子イベント + 遅延中性子捕獲イベントの同時遅延計測
↳ DSNB観測感度の向上
- 現在Gd濃度0.01%での観測が完了→0.03%での観測を開始
 - 池田さんのシンポジウム講演参照 (10pS2-6)



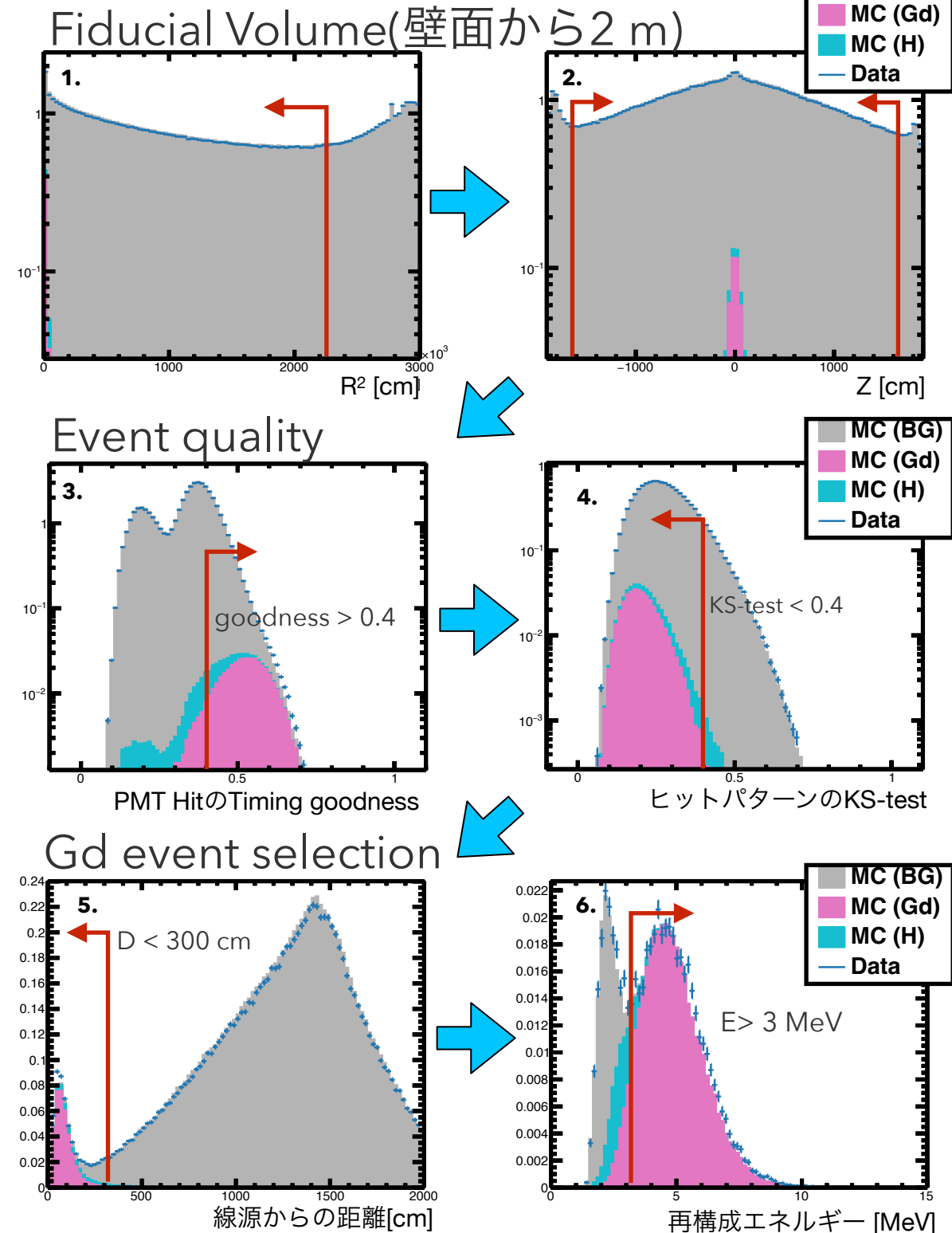
↑SKで観測を目指すDSNB信号 (逆β崩壊: IBD)

	測定期間	Gd濃度
SK-IV	2008~2018	0%(純水)
SK-VI	2020.07~2022.05	~0.01%
SK-VII	2022.06~	~0.03%

SK-Gd実験での中性子同定

- Am/Be線源を使った測定で
中性子同定効率が見積もられている
- Gd捕獲遅延信号は時定数 $\sim 115 \mu\text{s}$ で
検出される(Gd0.01%)
- 先発事象後 $500 \mu\text{s}$ で25hit/200 nsトリガー
↳再構成情報を利用した矩形波カット
- MCと比較して評価した同定効率：
 $40.5 \pm 0.1(\text{stat.}) + 1.0/-2.1(\text{sys.})\%$
(preliminary)
↳0.01%Gd濃度で純水時期の ~ 2 倍の
効率を確認

All figures are preliminary



SKにおける現在のDSNB解析

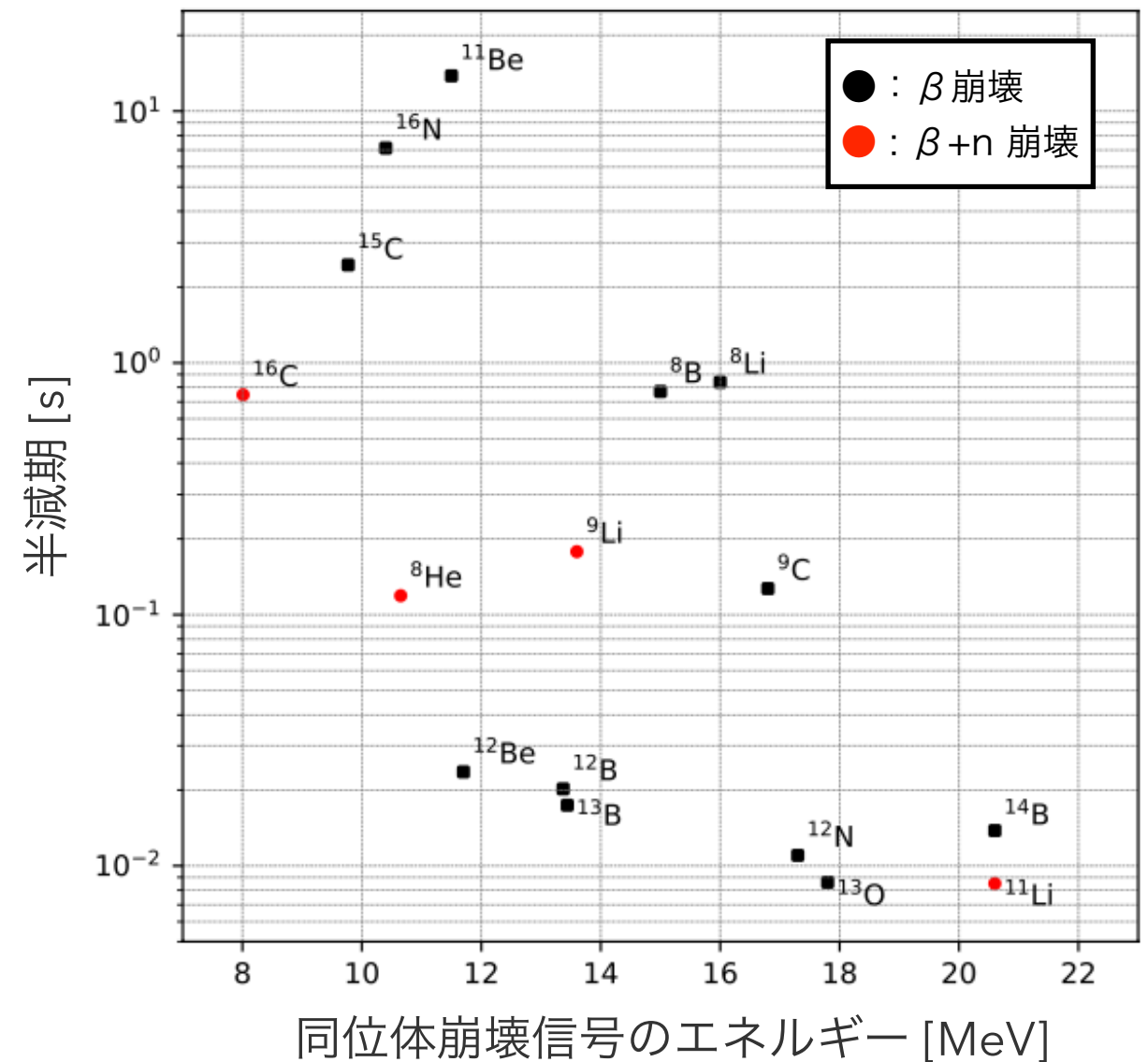
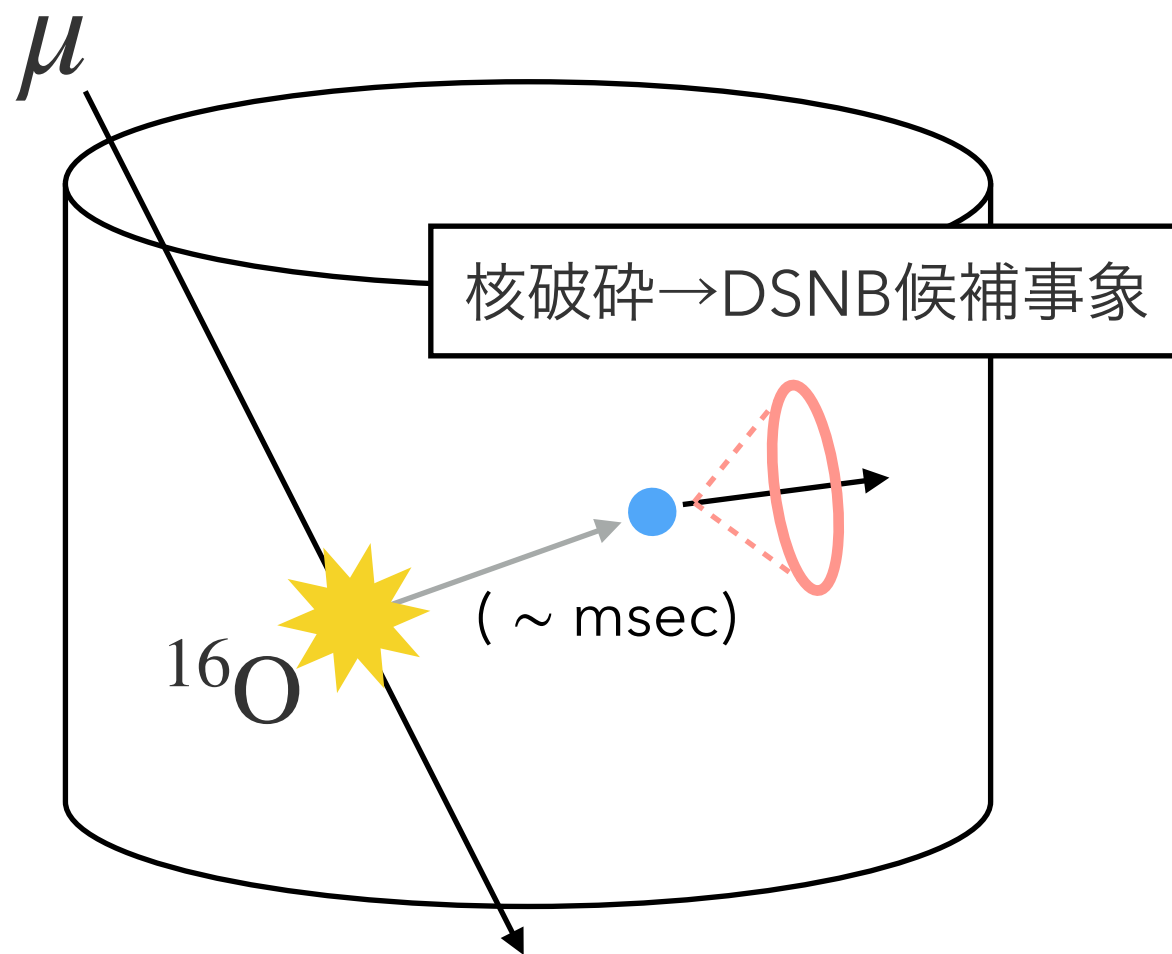
- 2022年6月よりGd濃度0.03%の新フェーズ(SK-VII)が始まった
↳2020年7月~2022年5月のGd濃度0.01%のデータ解析を開始
- 現在のDSNB探索は大きく分けて3つの選別過程
 - **ミューオン核破砕イベント除去**
 - **IBD陽電子信号選別**：リングパターン・開き角、電荷量で陽電子選択
 - **中性子信号同定(Neutron tagging)**：先発事象に付随する中性子数で選別

SKにおける現在のDSNB解析

- 2022年6月よりGd濃度0.03%の新フェーズ(SK-VII)が始まった
↳2020年7月~2022年5月のGd濃度0.01%のデータ解析を開始
- 現在のDSNB探索は大きく分けて3つの選別過程
 - **ミューオン核破碎イベント除去**
 - **IBD陽電子信号選別**：リングパターン・開き角、電荷量で陽電子選択
 - **中性子信号同定(Neutron tagging)**：先発事象に付随する中性子数で選別
- MC studyの現状については次の泉山さんの講演を参照

ミューオン核破砕イベント

- 宇宙線ミューオンがタンク内の酸素原子核を破砕
↳ 破砕同位体の崩壊(\sim msec)によるイベント



DSNB解析で <20 MeVでのバックグラウンド

↳ 時間・空間を用いた効率的な除去が必要

核破砕同位体イベント除去

- 核破砕イベント除去は3ステップで行われる
 - 多重核破砕イベントカット
 - 中性子クラウドイベントカット
 - ミューオンとの時間・空間相関、電荷を用いたLikelihoodカット
- 本講演では2021年1月の1ヶ月間(Live time 27.3 day)のデータを用いて
 - 多重核破砕イベントカット
 - 中性子クラウドイベントカット

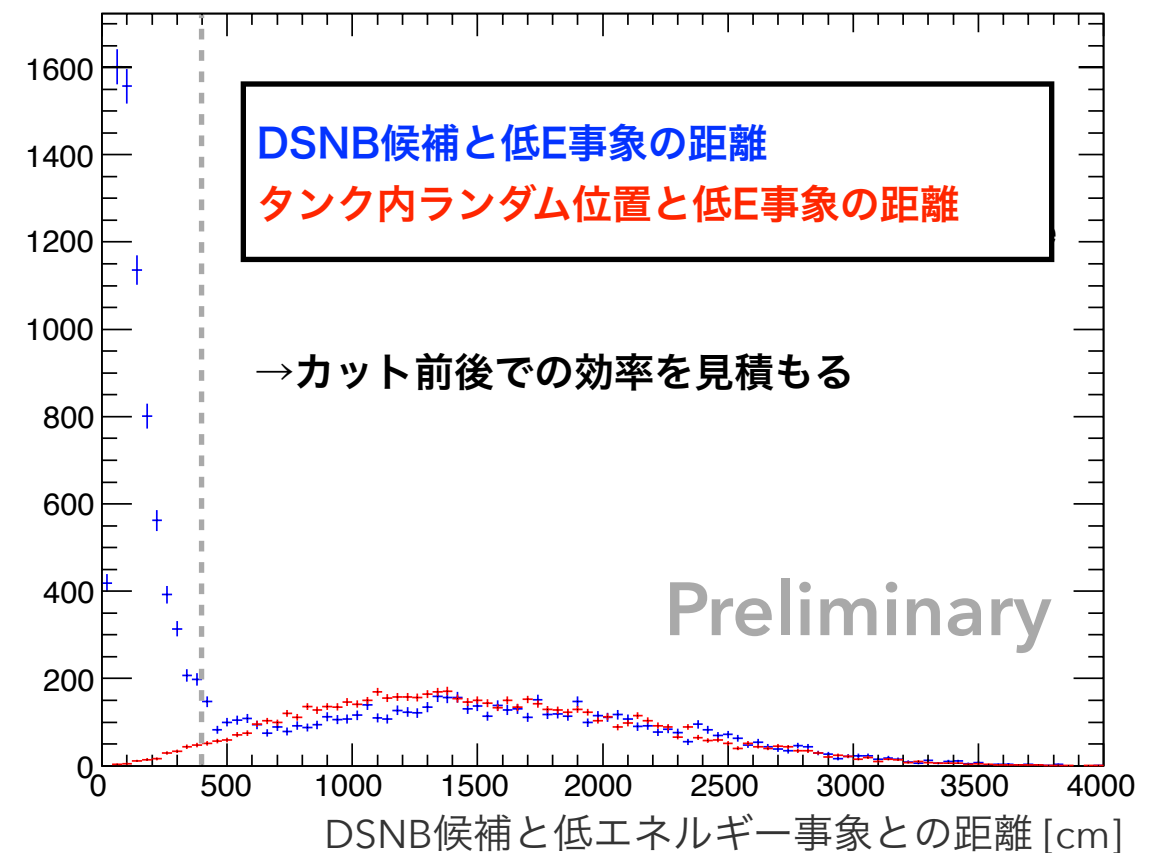
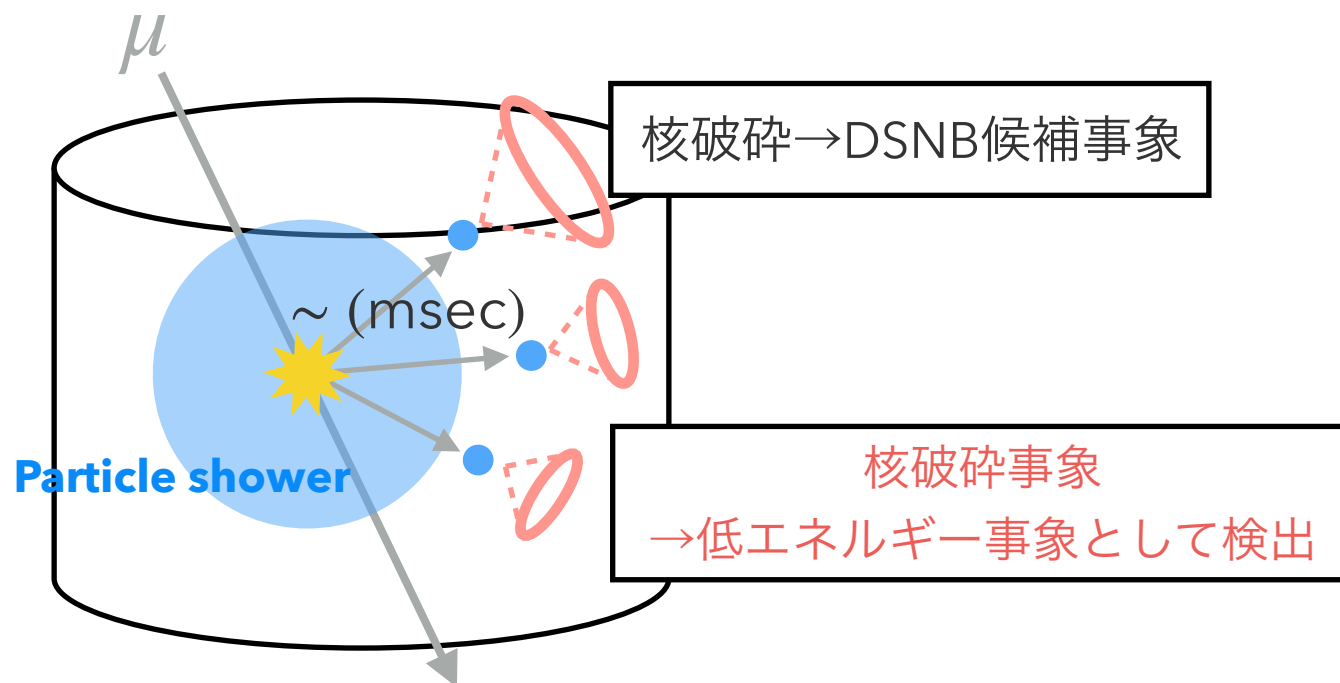
のカット性能について、

- カット後に残る核破砕イベント割合：spallation efficiency ϵ_{spall}
- カット後に残る核破砕イベント以外の割合：random efficiency ϵ_{random}

を評価した

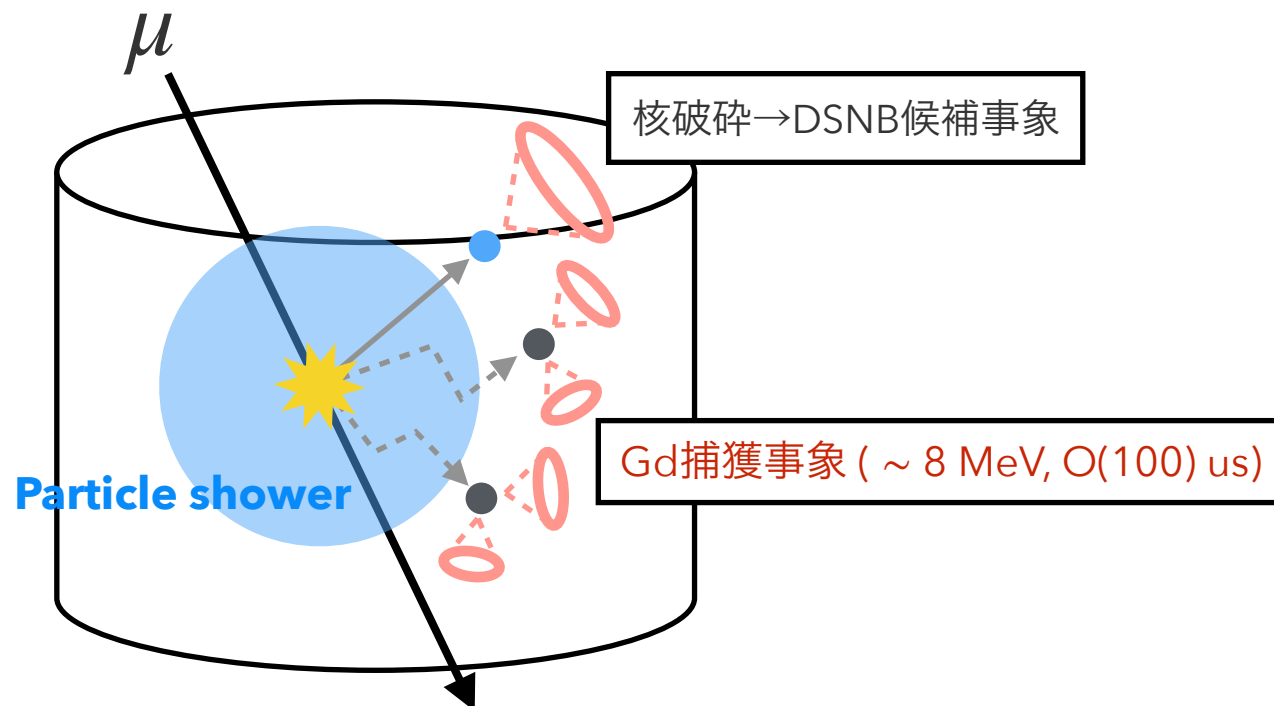
① 多重核破砕イベントカット

- 高エネルギーミューオンの核破砕で複数の同位体が生成
↳ ~msecの時間スケールで複数の低エネルギー事象として観測される
- DSNB候補事象と低エネルギー事象(>6 MeV)との相関をチェック
 - $|T_{\text{relic}} - T_{\text{Low-E}}| < 60 \text{ sec}$ かつ
 - $|\vec{r}_{\text{relic}} - \vec{r}_{\text{Low-E}}| < 400 \text{ cm}$ のイベントを除去

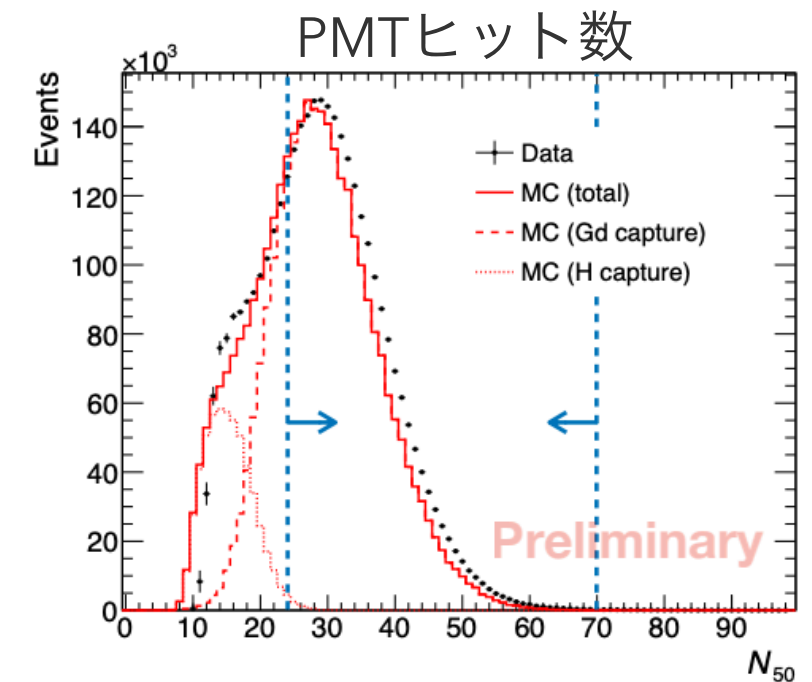


②中性子クラウドカット(1)

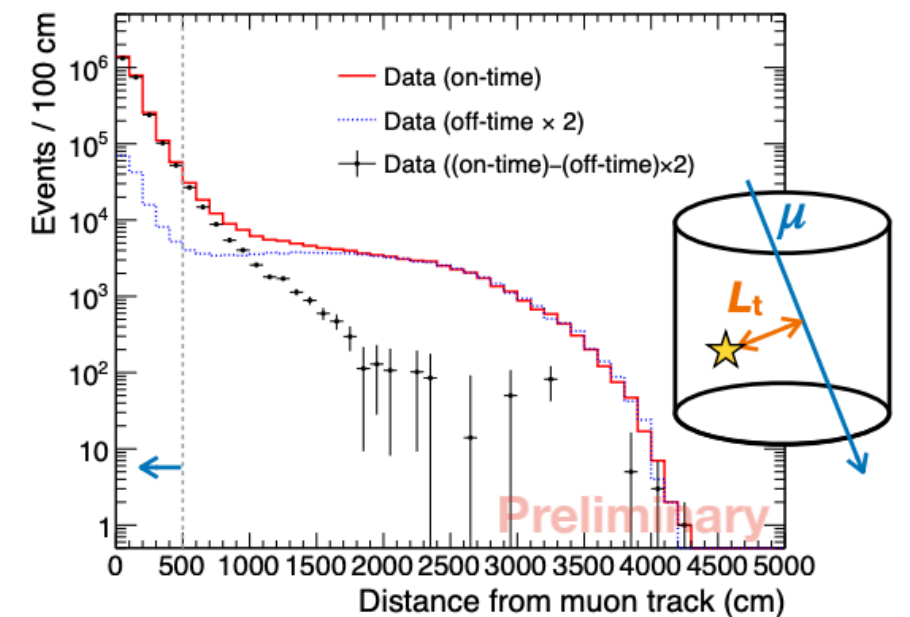
- 高エネルギーミュオンの核破砕で複数の中性子
 $\hookrightarrow \sim 100 \mu\text{s}$ でGd捕獲信号として観測される
- DSNB候補信号から $\pm 60 \text{ s}$ のミュオン事象の後
 $500 \mu\text{s}$ 内のGd捕獲事象を探索
 - PMTヒット数
 - ミュオントラックからの距離
- 検出した中性子事象数 $N_n [/ 1 \mu] \geq 2$: 中性子クラウド



篠木さんの発表(7aA125-3)より

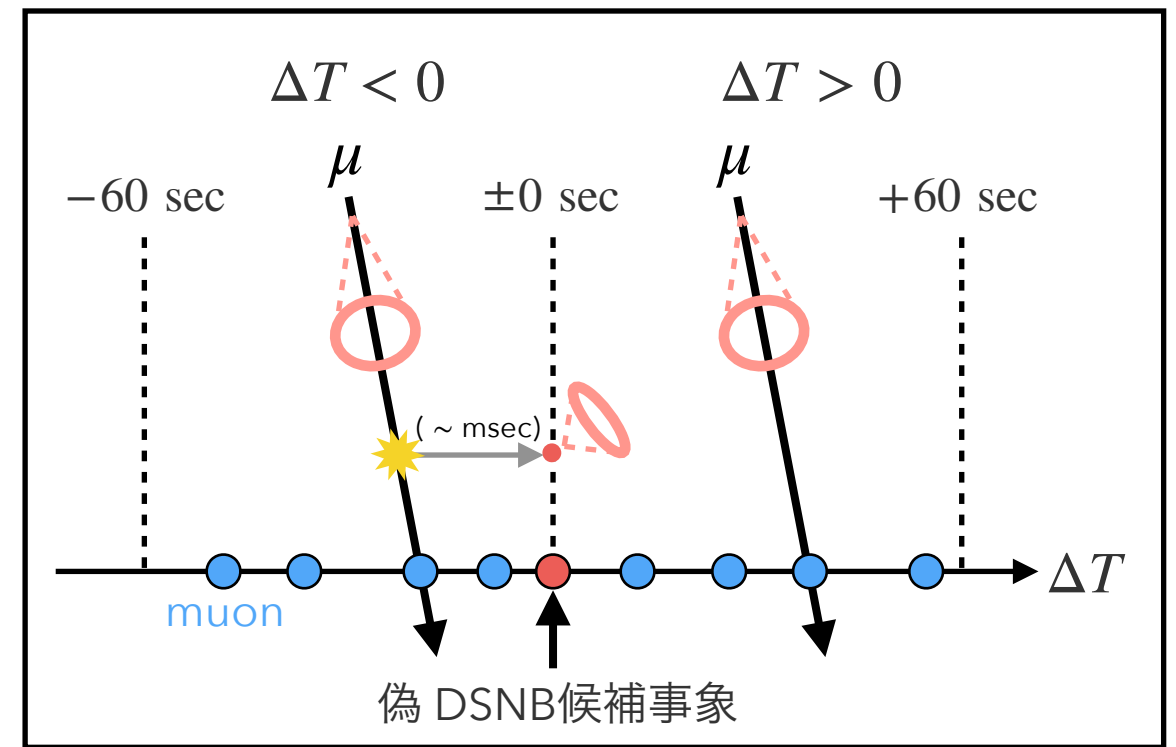


ミュオントラックと中性子の距離

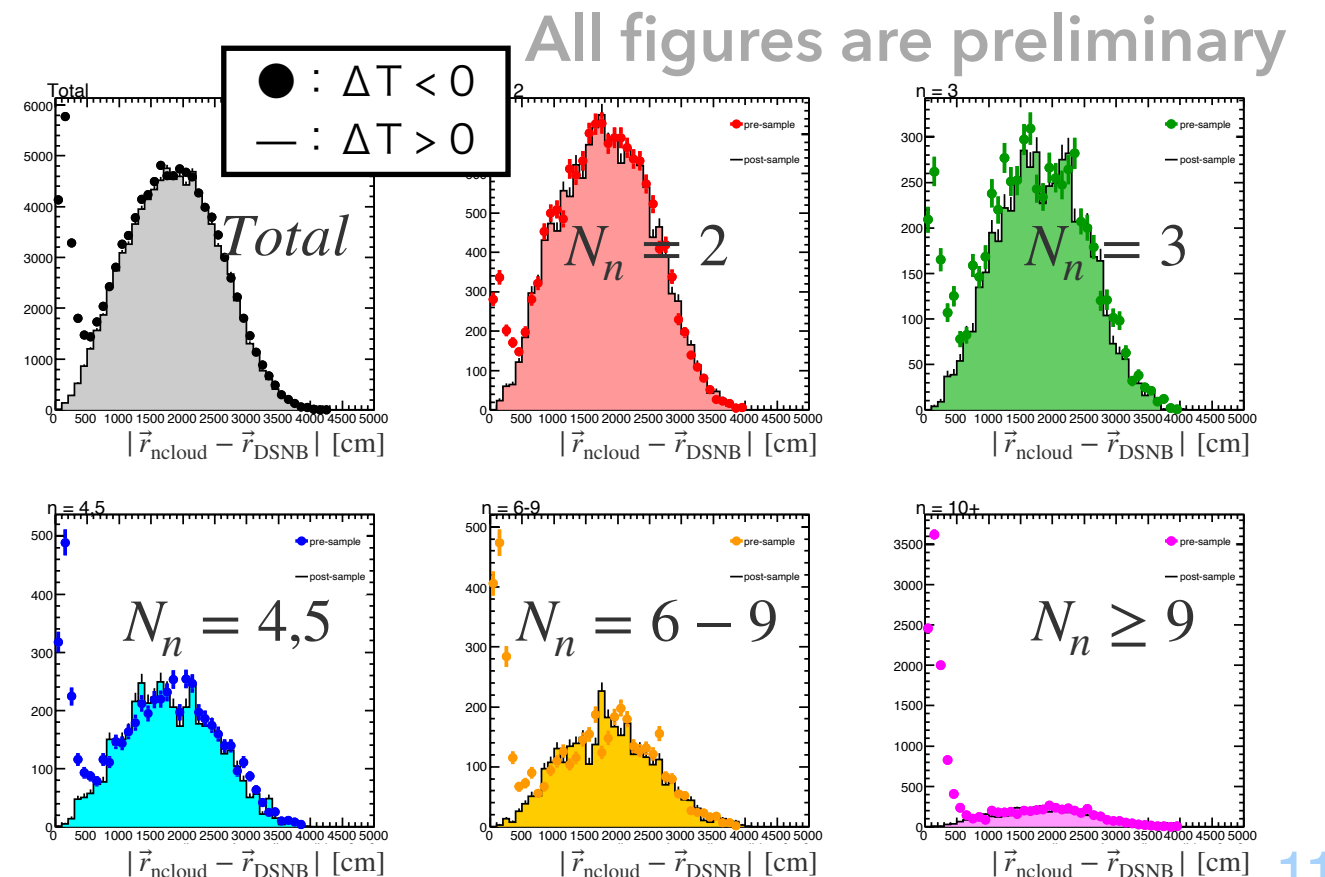
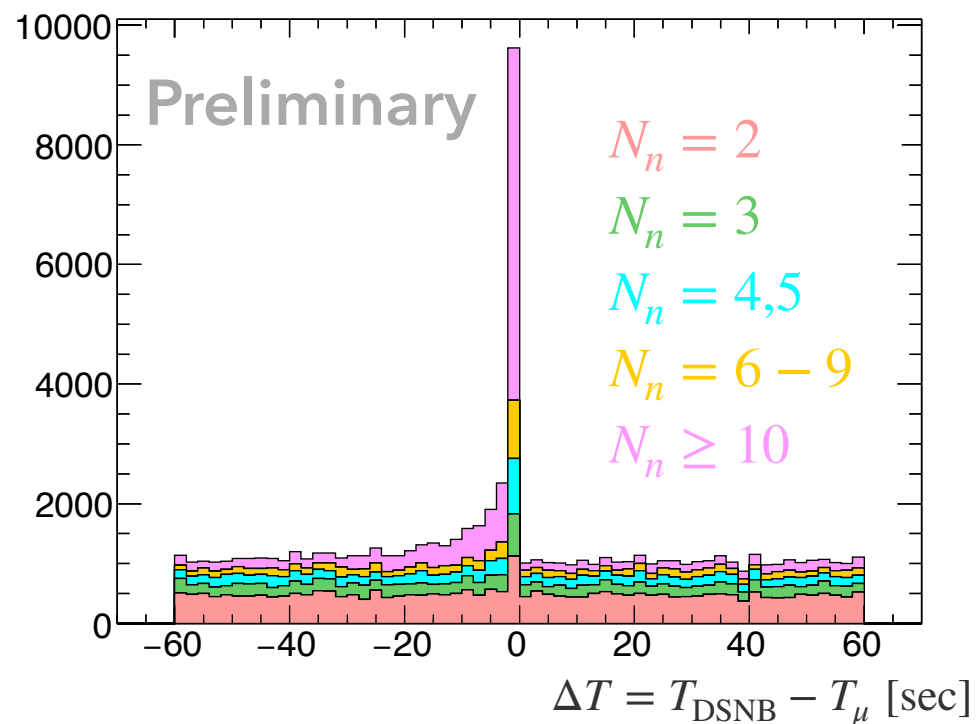


②中性子クラウドカット(2)

- $\Delta T : T_{\text{DSNB}} - T_{\mu}$
 - $\Delta T < 0$: (核破砕→DSNB候補)と
相関があるミュオンあり
 - $\Delta T > 0$: (核破砕→DSNB候補)と相関なし
↳ 2つの領域でカット効率の評価



- 中性子多重度により時間・空間相関が変化
↳ 多重度によってカット範囲を調整



カット効率の評価

- ϵ_{spall} と ϵ_{random} をそれぞれのカットについて評価

Preliminary	ϵ_{random}	核破碎事象除去効率 ($1 - \epsilon_{spall}$)
①多重核破碎カット	97.6% (純水期: 98%)	45.9% (純水期: ~45%)
②中性子クラウドカット	98.2% (純水期: >99%)	55.2% (純水期: ~40%)
①&②	95.8% (純水期: ~0.97%)	68.0% (純水期: ~55%)

- 中性子同定効率の向上により中性子クラウドカットで除去効率40%→55%に向上
↳ 2つのカットで純水期から13%の向上が見られた
- 今後：Likelihoodを使った選別でさらに核破碎イベントを除去し、核破碎バックグラウンドの総量を見積もる

まとめ

- 2020年にSK-Gd実験が始まり、2022年6月よりGd濃度0.03%での観測が始まった
→2020年7月~2022年5月(Gd濃度0.01%)のデータを用いたDSNB探索
- 現在、ミューオン核破砕による低エネルギー領域(<20 MeV)におけるバックグラウンドの除去に取り組んでいる
↳中性子同定が容易になり感度が向上した結果、除去効率が~13%向上
- 今後の予定・展望
 - さらなる事象選別の最適化
 - DSNB探索・理論モデルとの比較
 - イベントトリガーの改善によるエネルギー下限値の拡大→次の泉山さんの講演

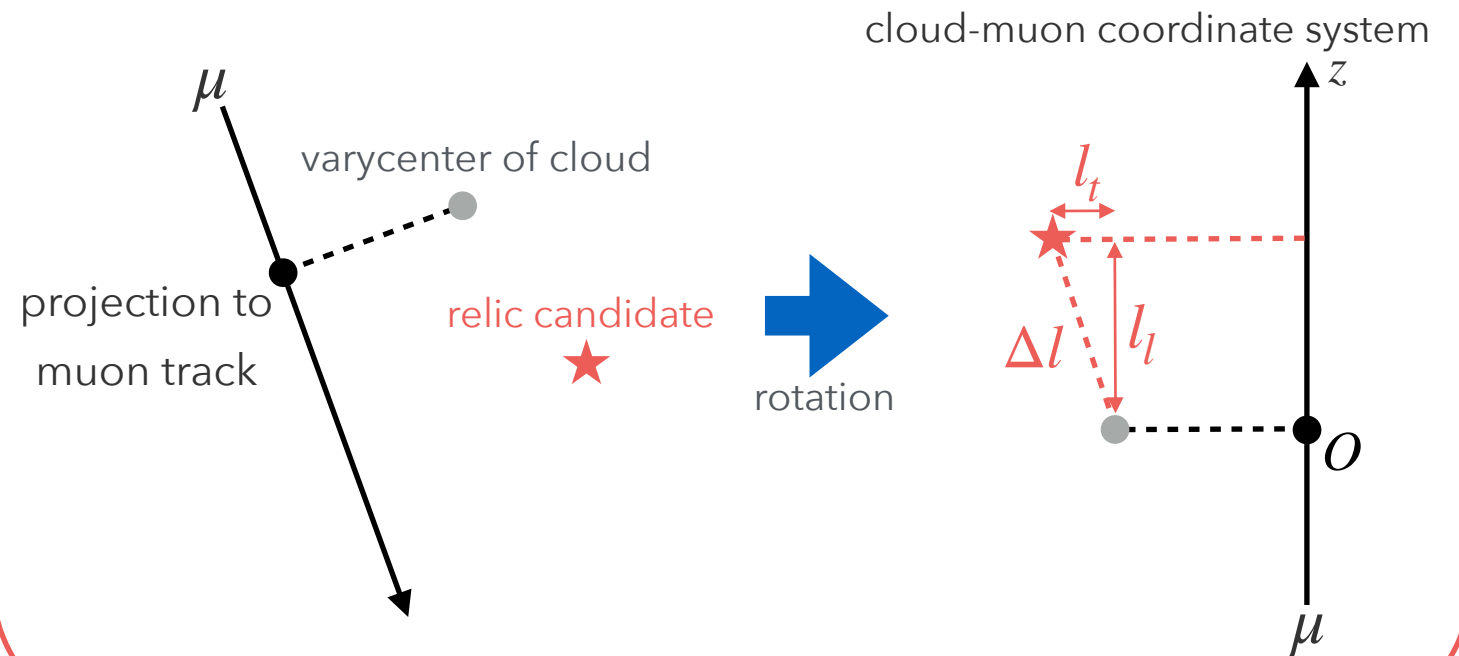
Back up

中性子クラウドカット

- Definition for cloud cut:
 - $\Delta(x, y, z) \equiv |(x, y, z)_{\text{cloud}} - (x, y, z)_{\text{relic}}|$
 - $\Delta x^2 + \Delta y^2 \equiv l_t^2$
 - $\Delta z \equiv l_l$
 - $\Delta T \equiv |T_\mu - T_{\text{relic}}|$
- SK-IV criteria for cloud:
 - $\Delta l < 1200$ and $\Delta T < 0.1$
 - $\Delta l < 800$ and $\Delta T < 1$
 - ellipse shape cut →

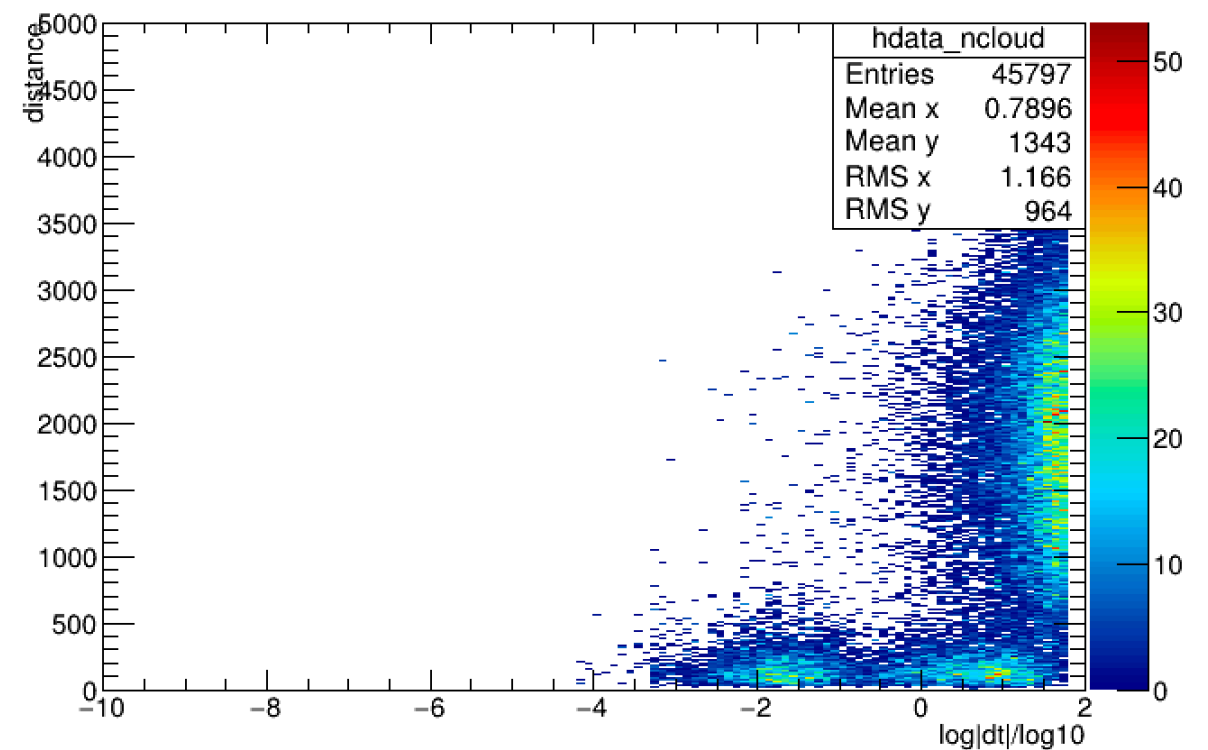
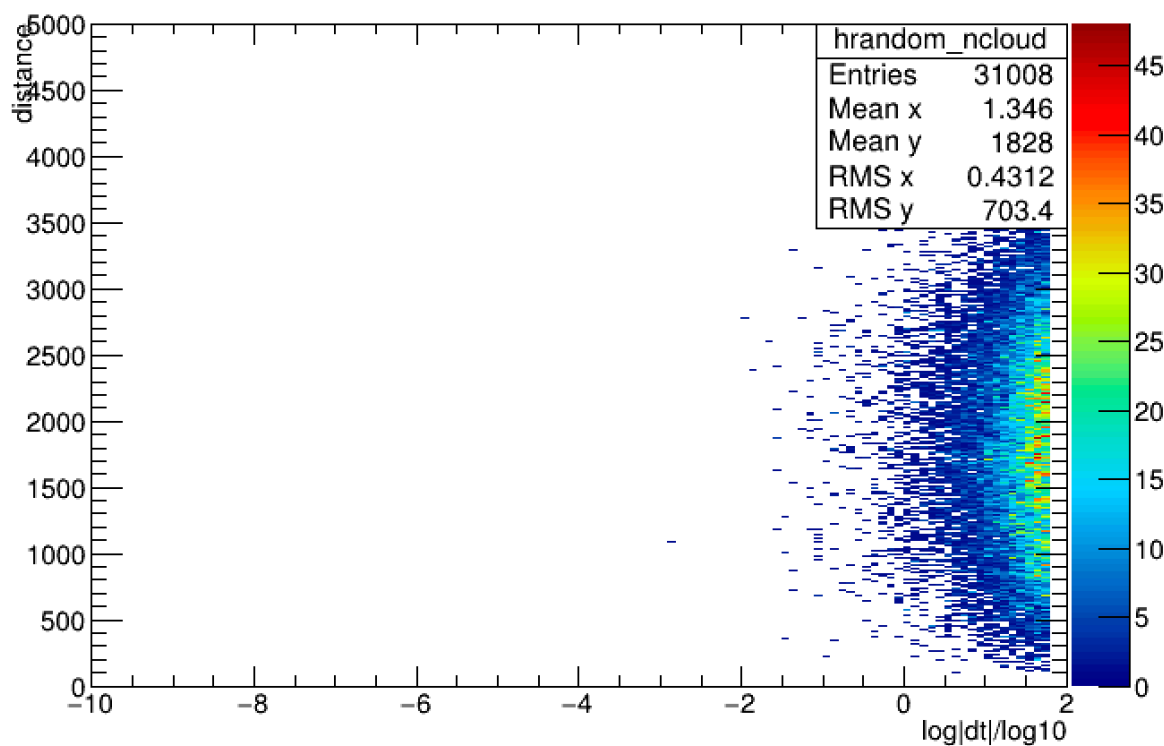
SK-IV paper

Multiplicity	2+	2+	2	3	4-5	6-9	10+
dt (sec)	0.1	1	30	60	60	60	60
ℓ_l (cm)	1200	800	383	548	603	712	766
ℓ_t (cm)	1200	800	219	268	379	490	548



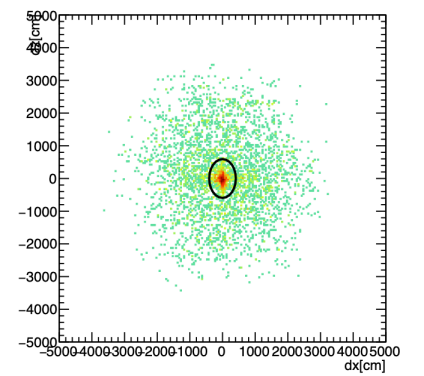
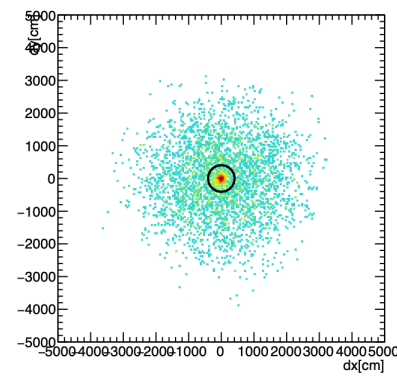
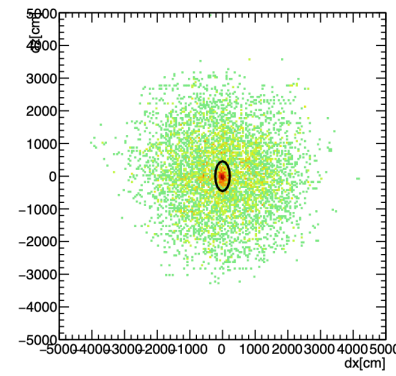
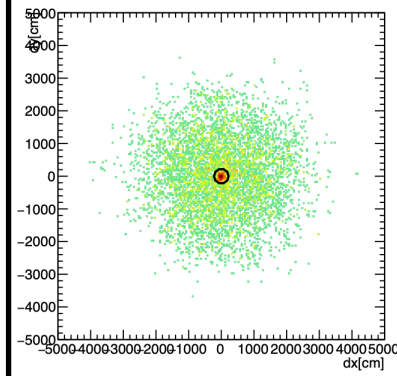
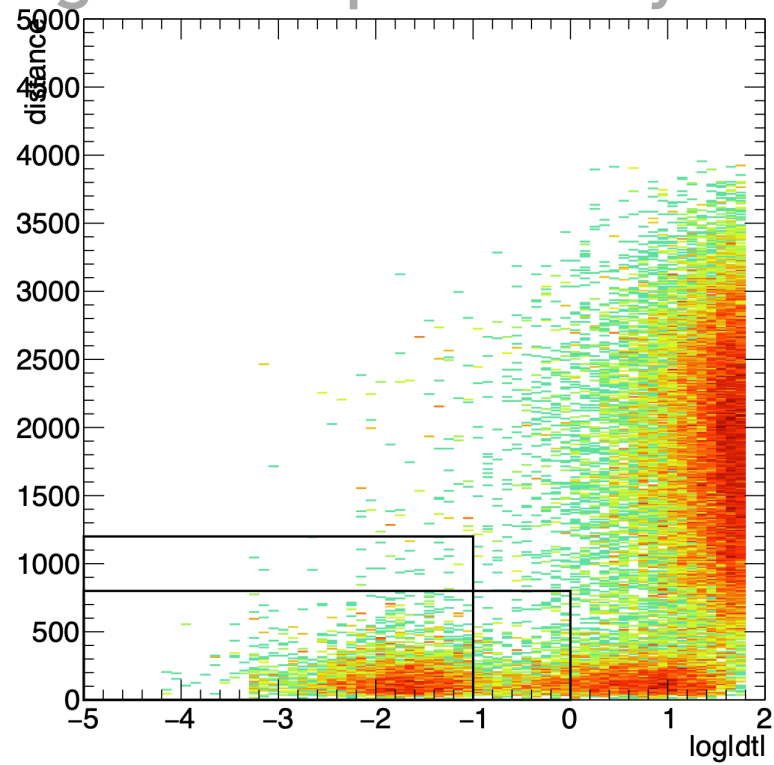
中性子クラウド

Number	pre-sample	Post-sample
n=2	15158	14062
n=3	6374	5149
n=4-5	5769	4480
n=6-9	3891	2651
n=10+	14605	4666



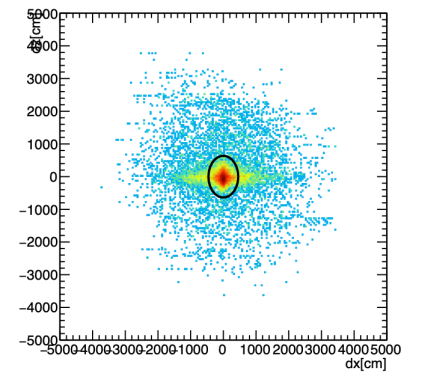
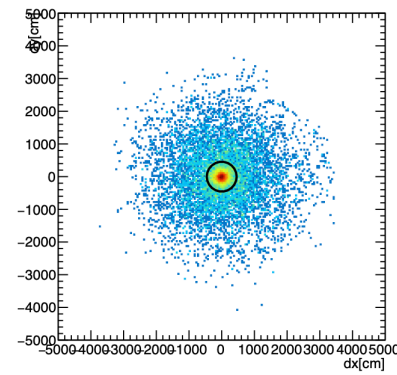
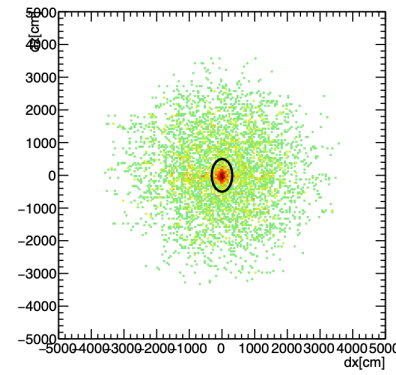
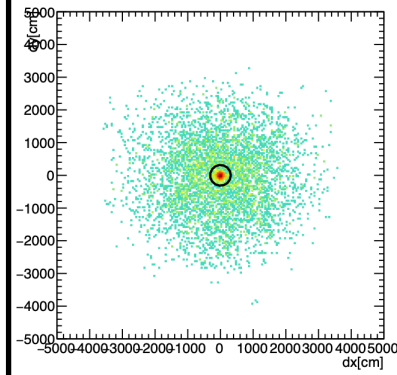
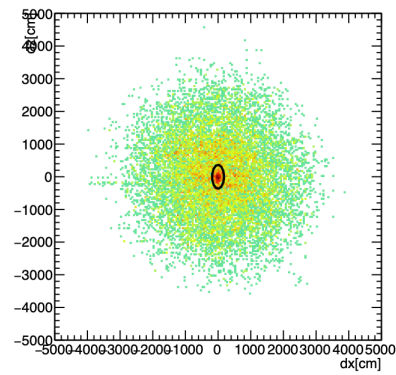
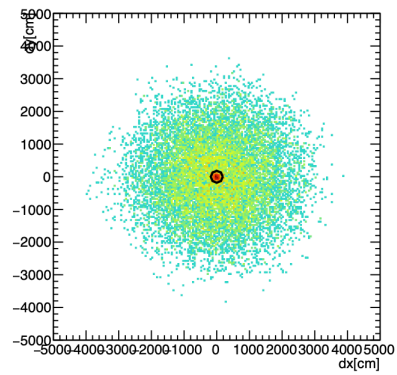
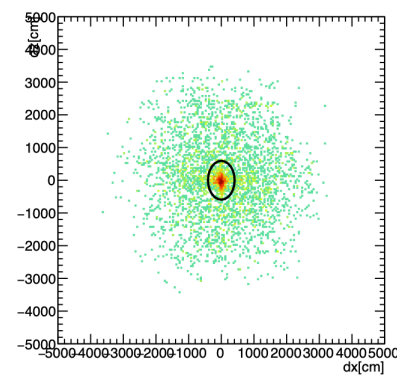
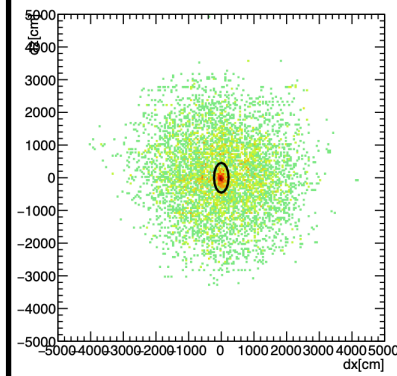
中性子クラウドカット領域

All figures are preliminary



n = 3

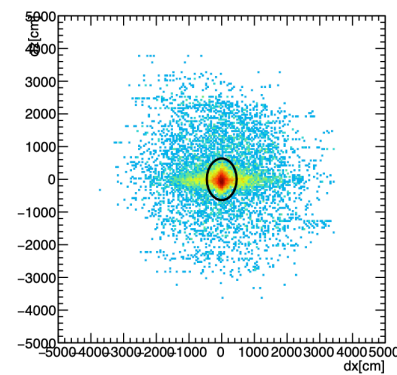
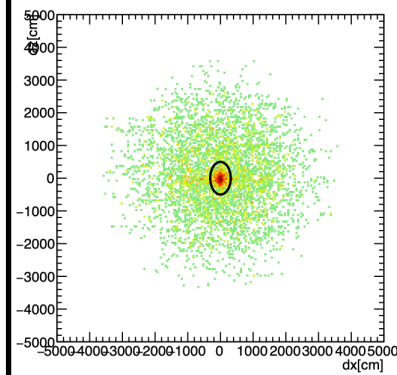
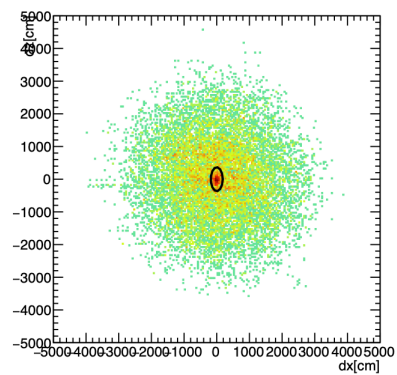
n = 6-9



n = 2

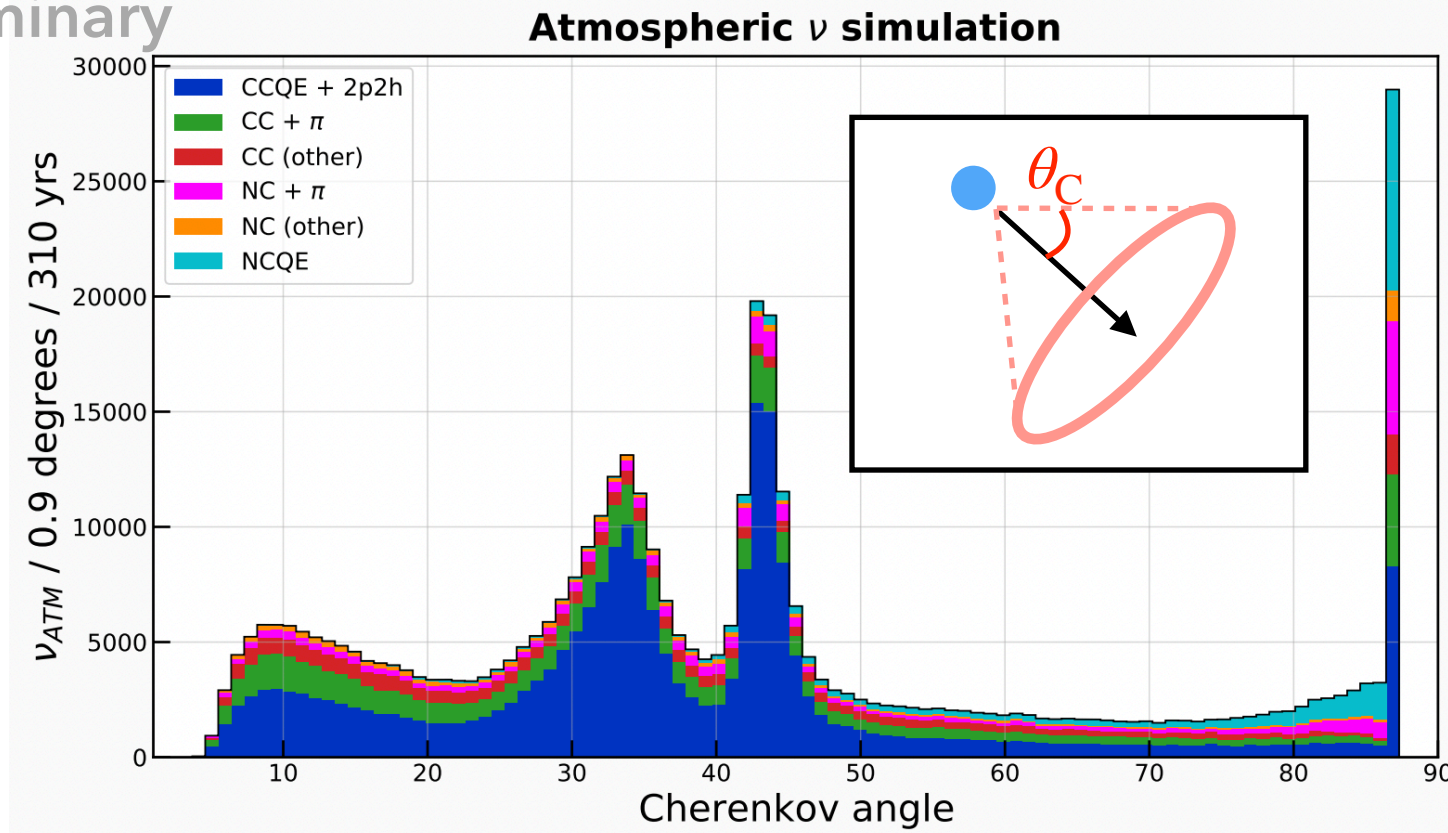
n = 4,5

n = 10+

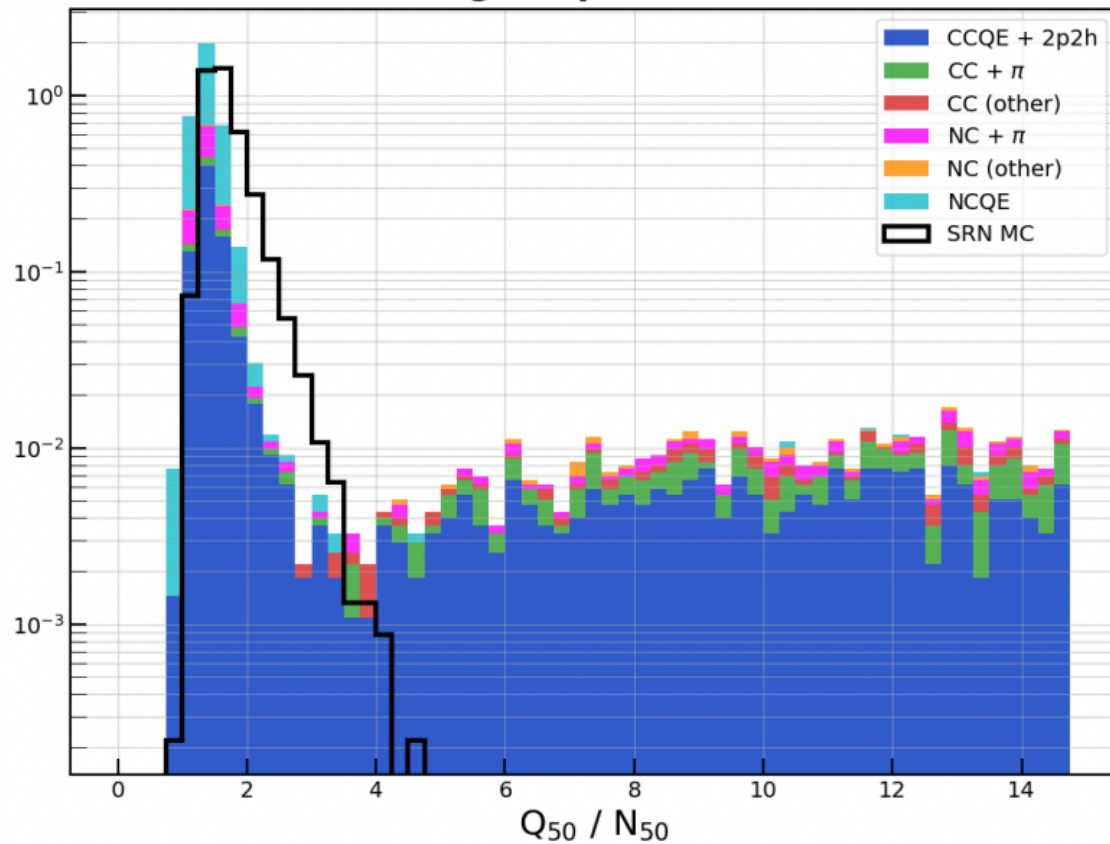


陽電子線別カット

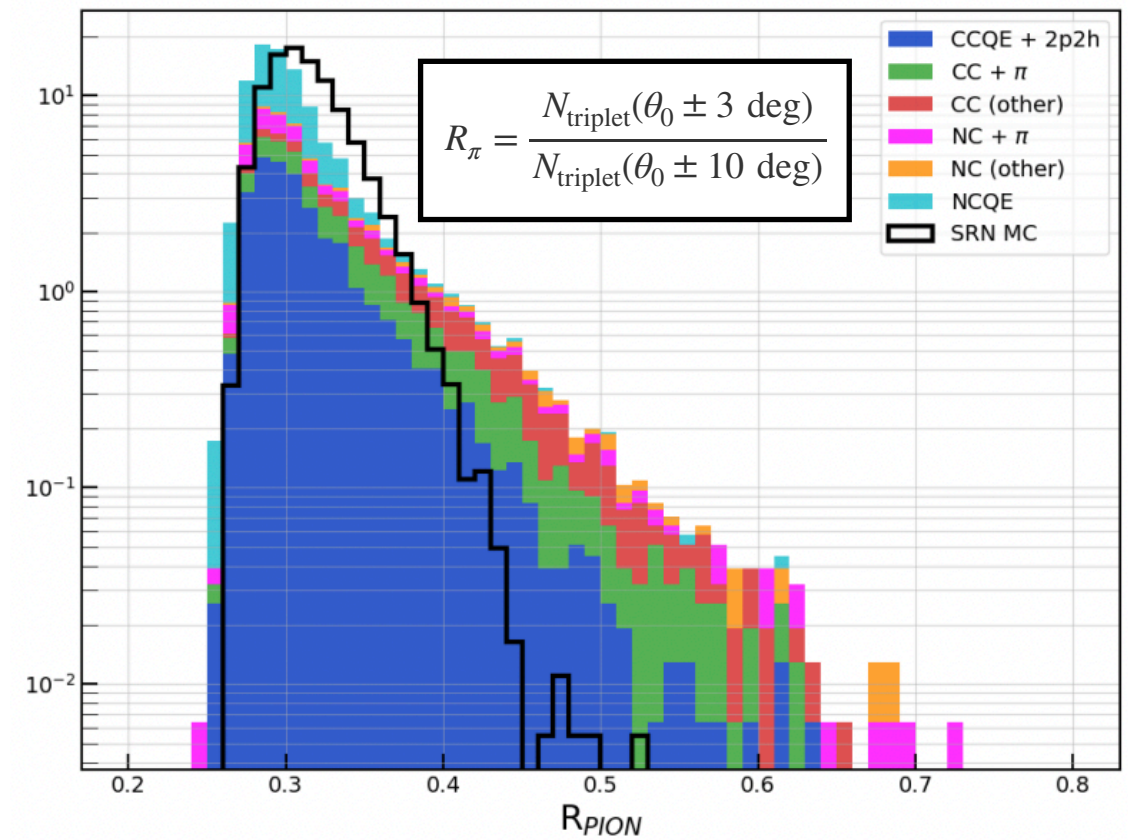
All figures are preliminary



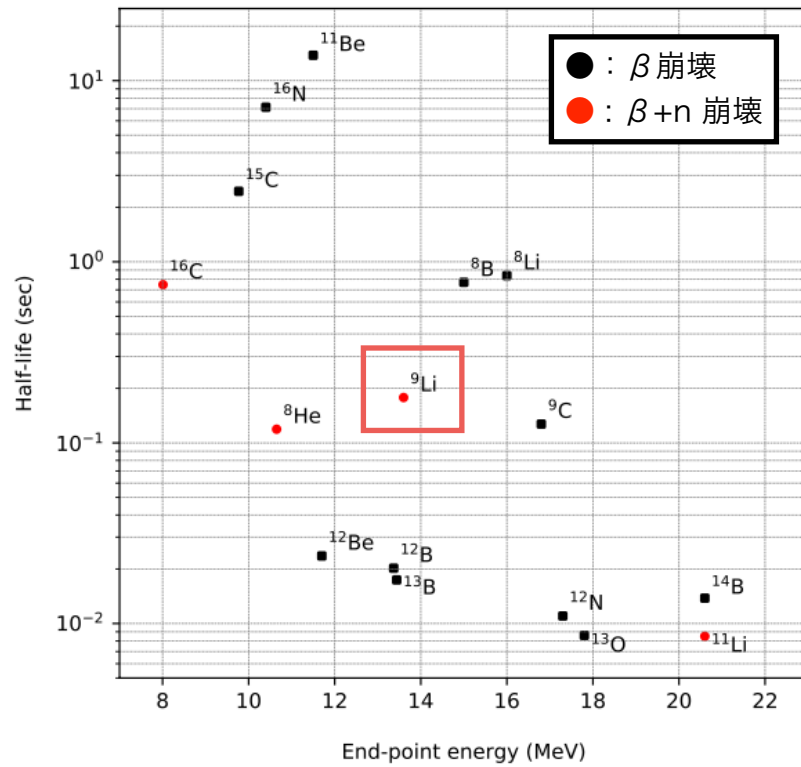
Charge deposition cut



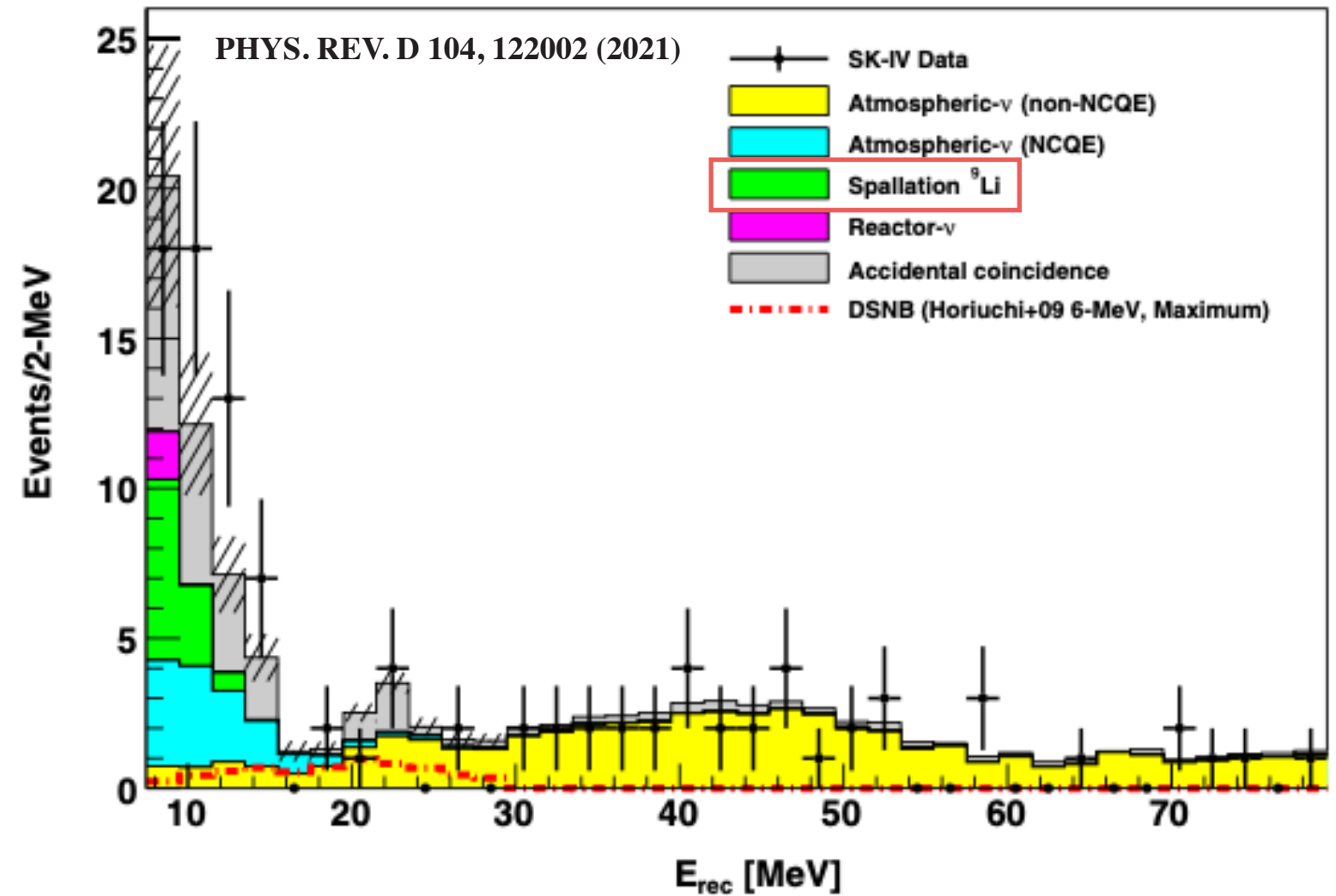
Pion cut



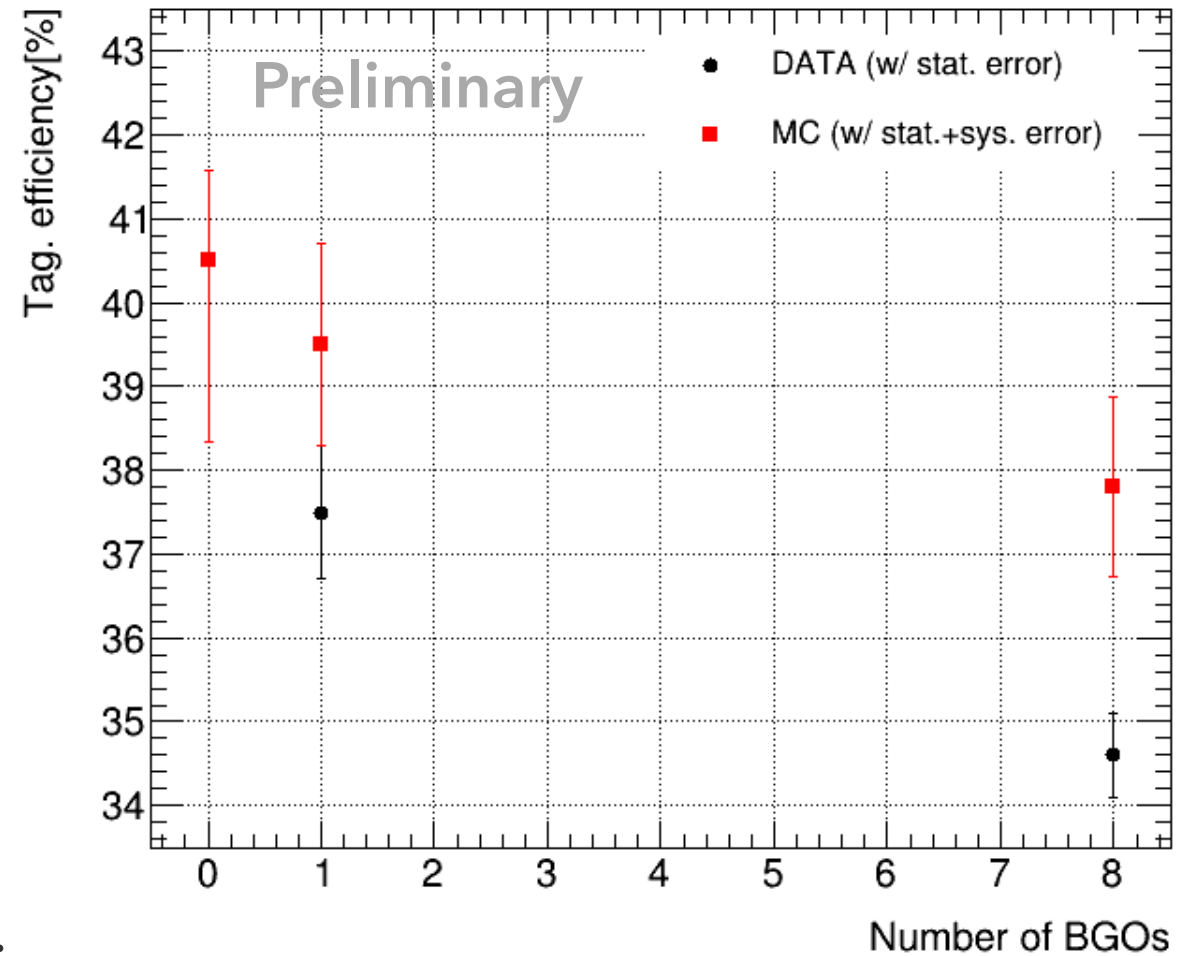
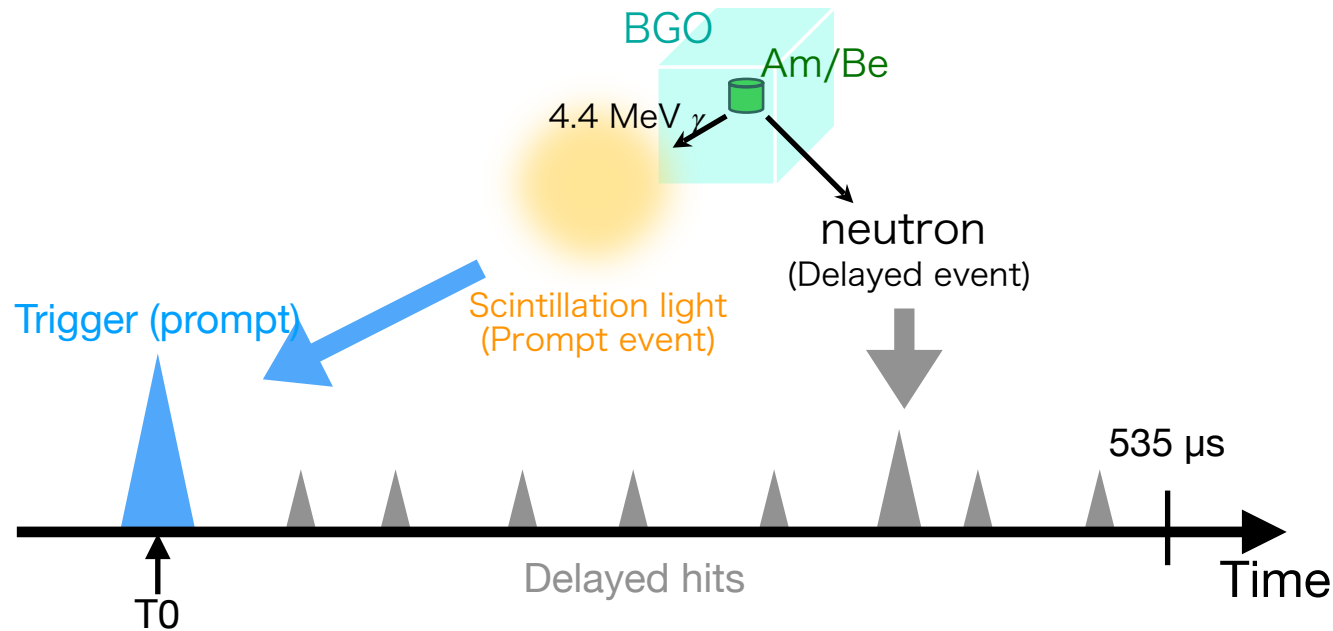
ミューオン核破砕イベント



Isotope	Decay mode	Yield [$\times 10^{-7} \mu\text{on}^{-1} \text{g}^{-1} \text{cm}^2$]
n		2030
^{18}N	β^-	0.02
^{17}N	β^-n	0.59
^{16}N	$\beta^- \gamma$ (66%), β^- (28%)	18
^{16}C	β^-n	0.02
^{15}C	$\beta^- \gamma$ (63%), β^- (37%)	0.82
^{14}B	$\beta^- \gamma$	0.02
^{13}O	β^+	0.26
^{13}B	β^-	1.9
^{12}N	β^+	1.3
^{12}B	β^-	12
^{12}Be	β^-	0.10
^{11}Be	β^- (55%), $\beta^- \gamma$ (31%)	0.81
^{11}Li	β^-n	0.01
^9C	β^+	0.89
^9Li	β^-n (51%), β^- (49%)	1.9
^8B	β^+	5.8
^8Li	β^-	13
^8He	$\beta^- \gamma$ (84%), β^-n (16%)	0.23



Am/Be線源測定結果

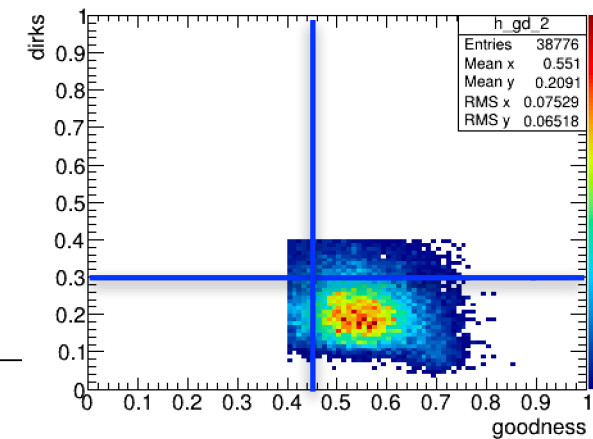


- Systematic uncertainty: **2.31%**
- Additional sys. error of 0BGO is assigned: difference of 1BGO T.E. between DATA/MC.

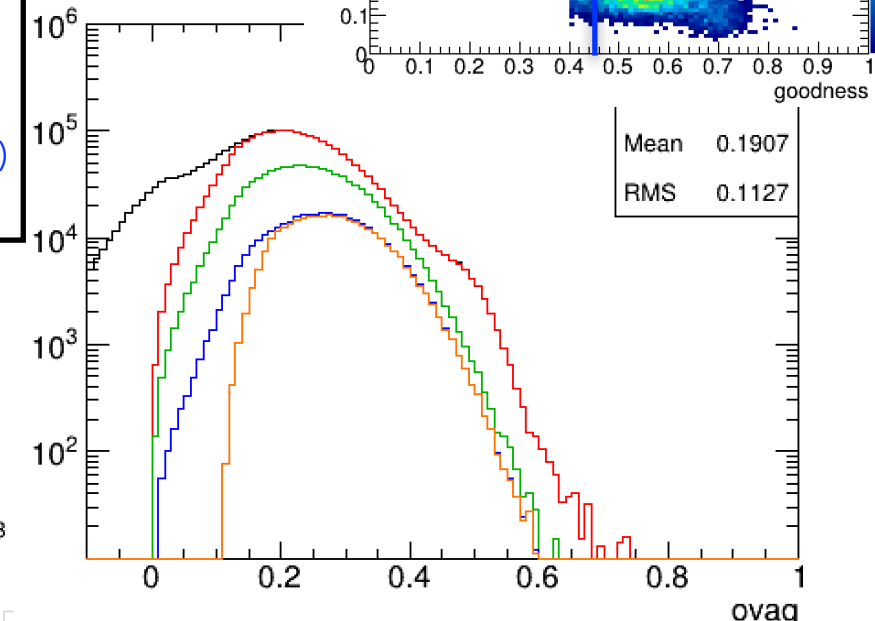
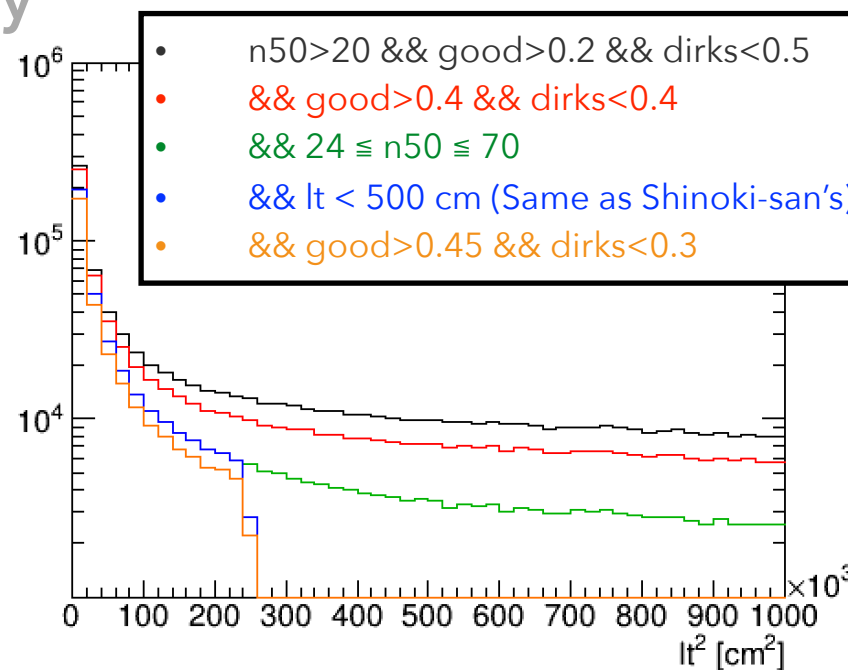
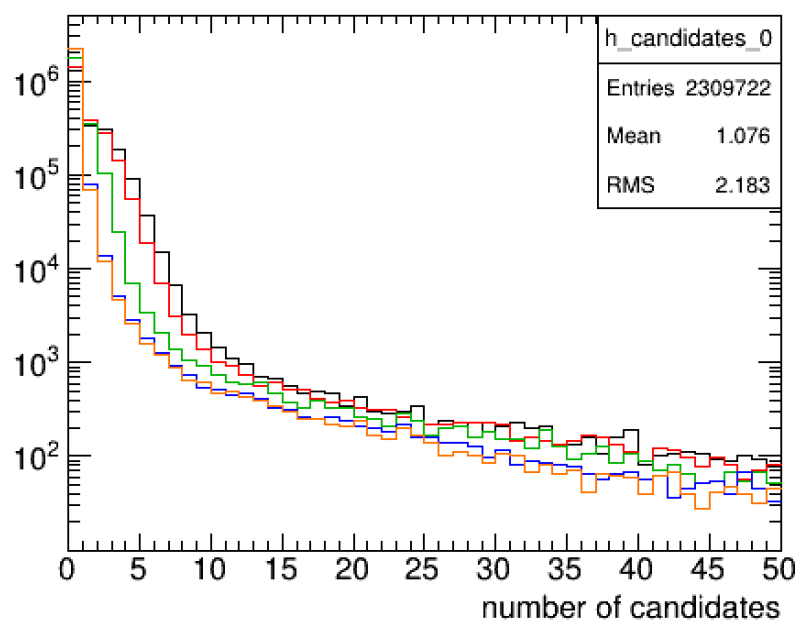
	DATA	MC	(MC -DATA)/MC
1BGO	37.5±0.8%	39.5 ± 0.3(stat.) ± 0.9(sys.)%	5.06±0.2%
T.E. 8BGO	34.6±0.5%	37.8 ± 0.2(stat.) ± 0.9(sys.)%	8.47±0.3%
0BGO	—	40.5 ± 0.1 (stat.) +1.0/-2.1 (sys.)%	

中性子クラウドカット(中性子選択)

- In SK-IV, WIT based neutron search is used.
→ From SK-VI, we can use muon+AFT sub-event for Gd-capture.
- By checking data, cut criteria for neutron selection is optimized.
- Blue line shows same condition as Shinoki-san's
 - Number of neutrons are not so much changed by more event quality cut
→ Use same cut as Shinoki-san's

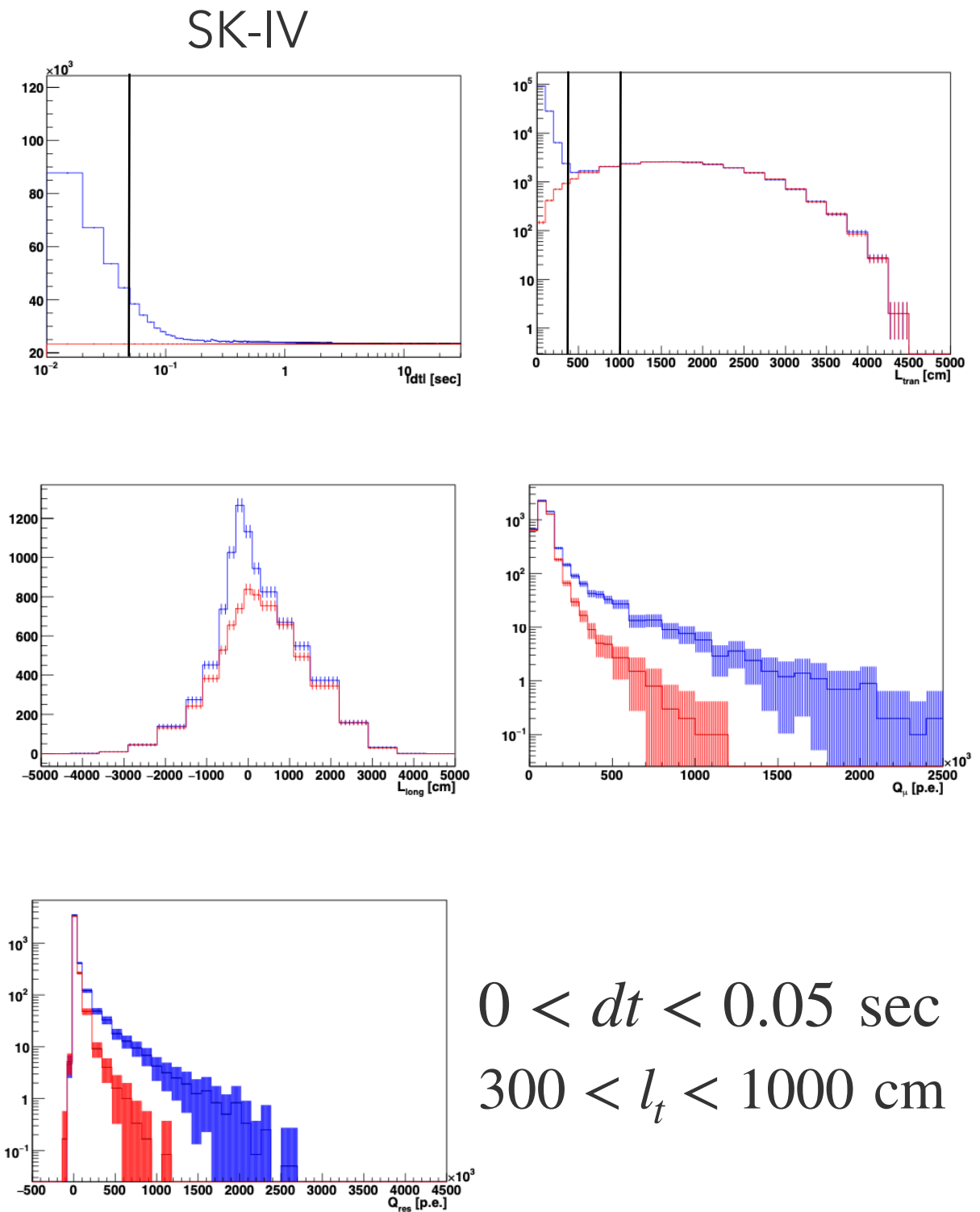
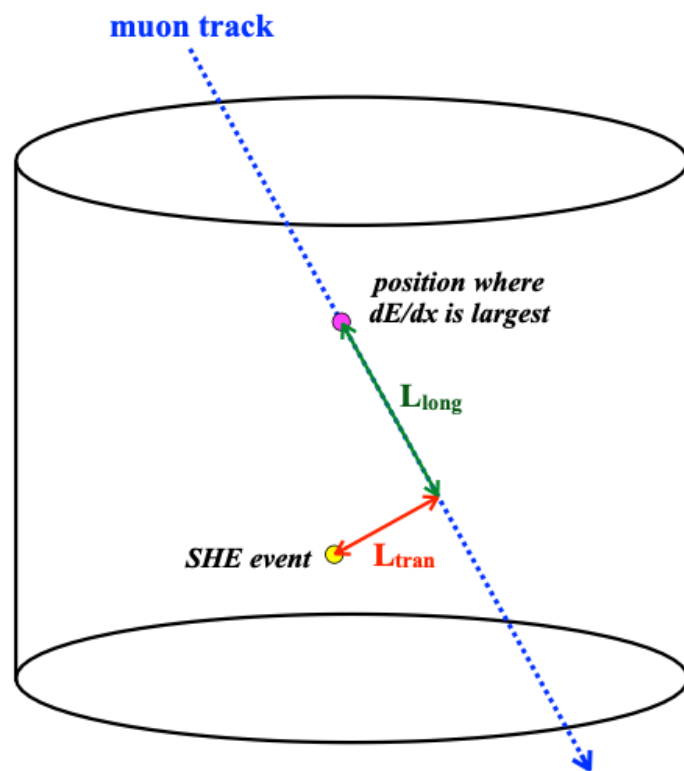


All figures are preliminary



Likelihood変数

- Likelihood計算に使う変数
 - dt : DSNB候補とミューオンの時間差
 - l_t : 横変位
 - l_l : μ trackで dE/dx が大きくなる距離
 - Q_μ : ミューオンの電荷
 - Q_{res} : $Q_{res} = Q_{MIP}[\text{pC/cm}] \times L_{\text{track}}$



$$0 < dt < 0.05 \text{ sec}$$

$$300 < l_t < 1000 \text{ cm}$$