

スーパーカミオカンデによる M31 Failed Supernova候補からのニュートリノ探索

中西史美^A

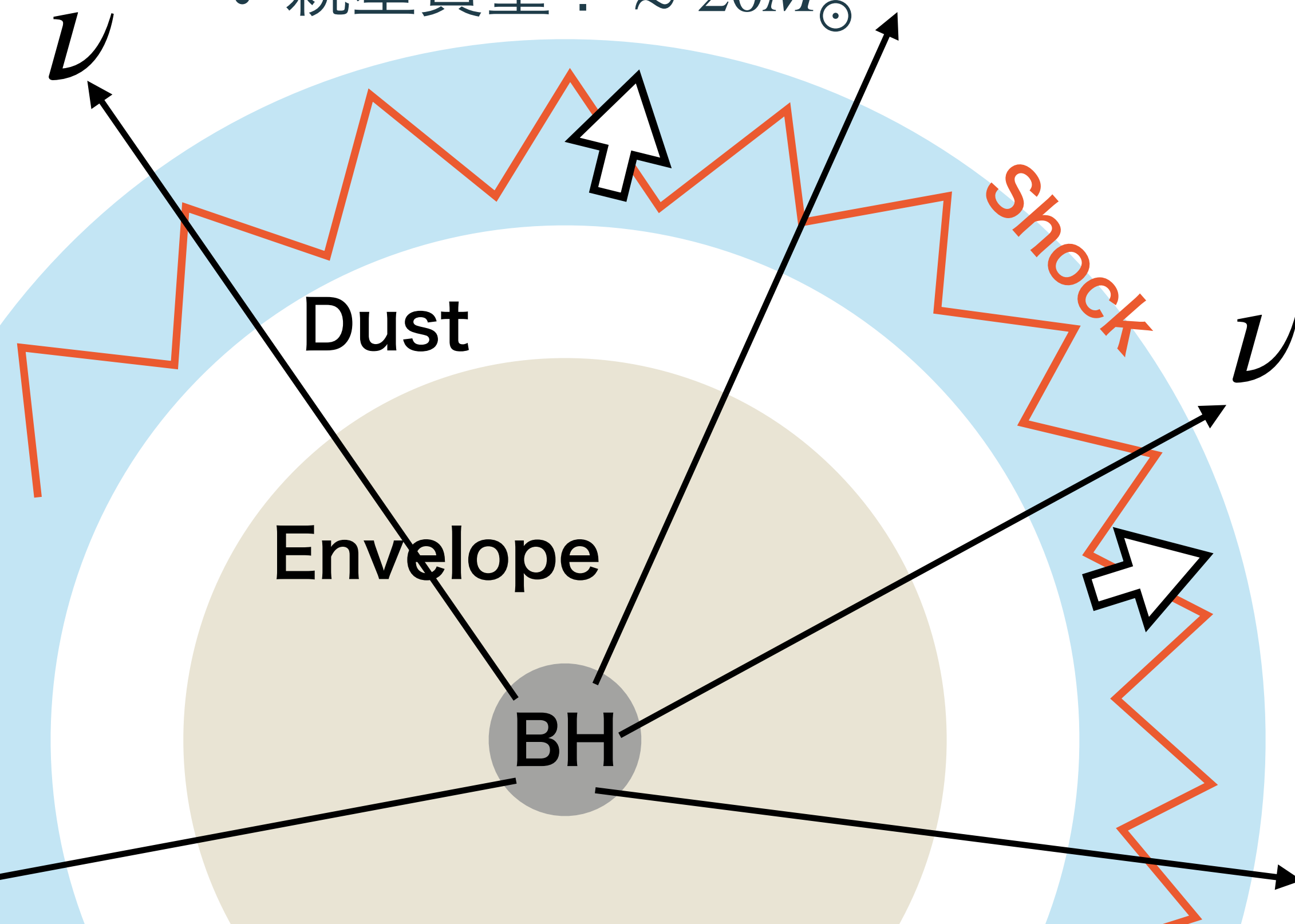
小汐由介^A、池田一得^B、安倍航^B、関谷洋之^B、Guillaume Pronost^B、中畑雅行^B、
他Super-Kamiokande Collaboration

岡山大自然^A、東大宇宙線研(ICRR)^B

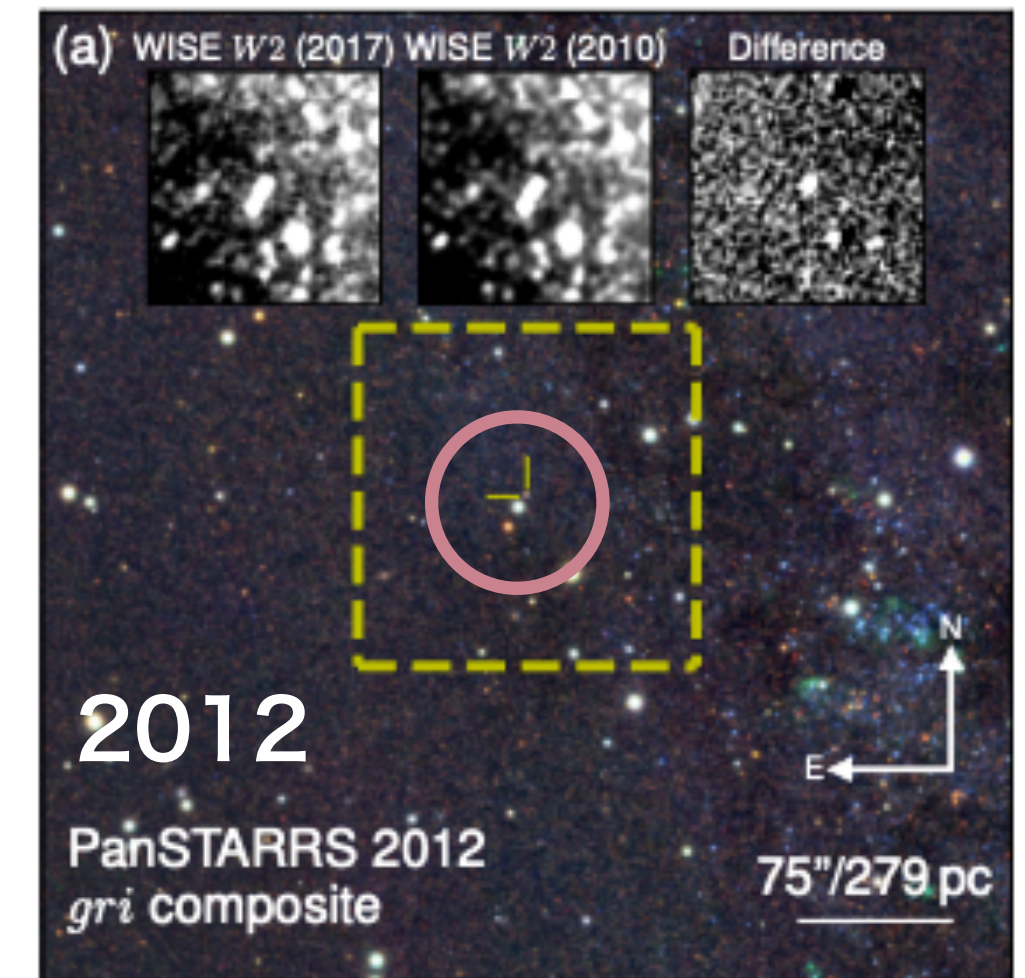
第16回OISTER workshop
2025年10月22日@鹿児島大学

M31-2014-DS1

- アンドロメダ銀河(M31)でFailed supernova (Failed SN)候補が発見
 - 重力崩壊後、爆発に失敗しブラックホールを形成
 - 距離: ~770 kpc
 - 親星質量: $\approx 20M_{\odot}$



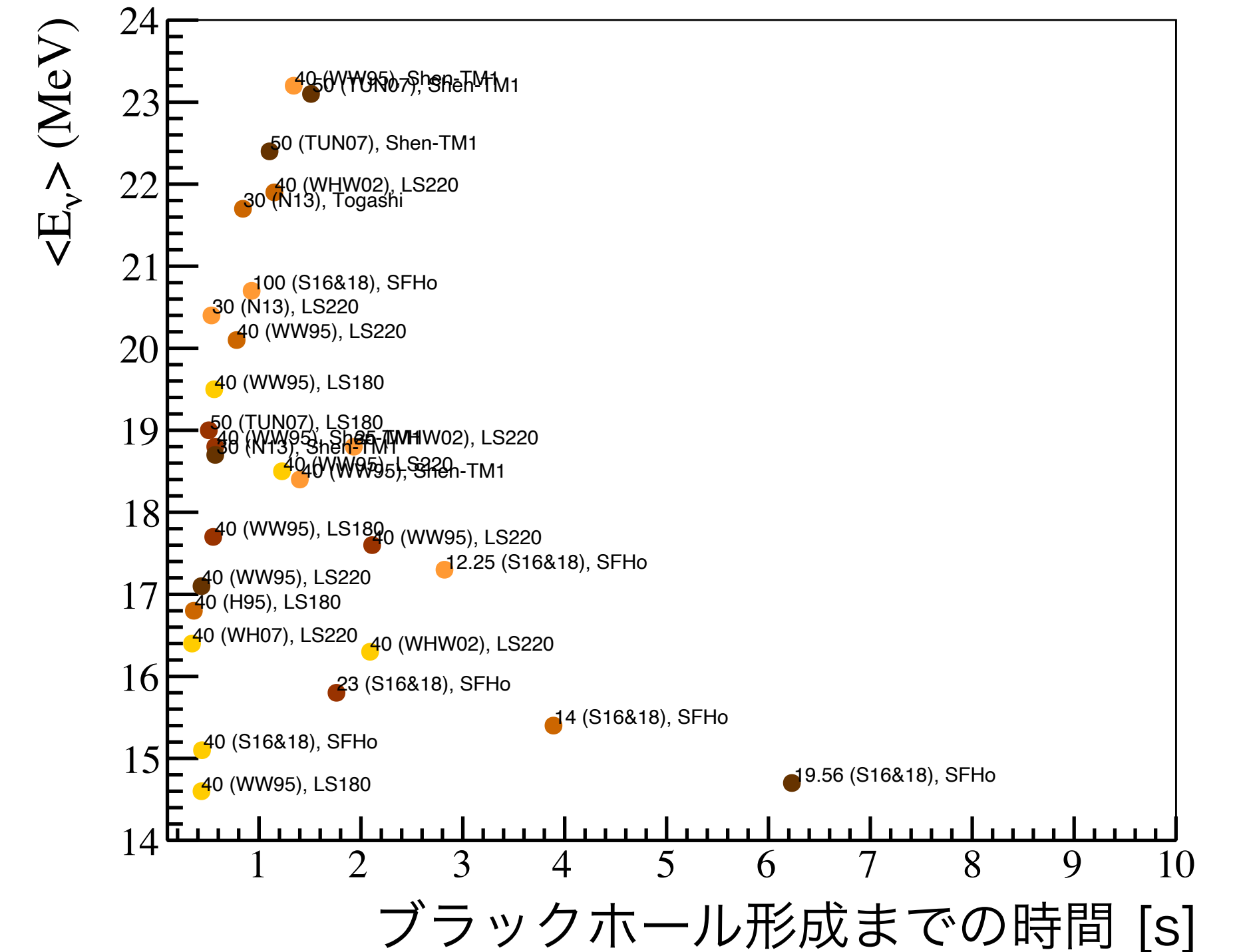
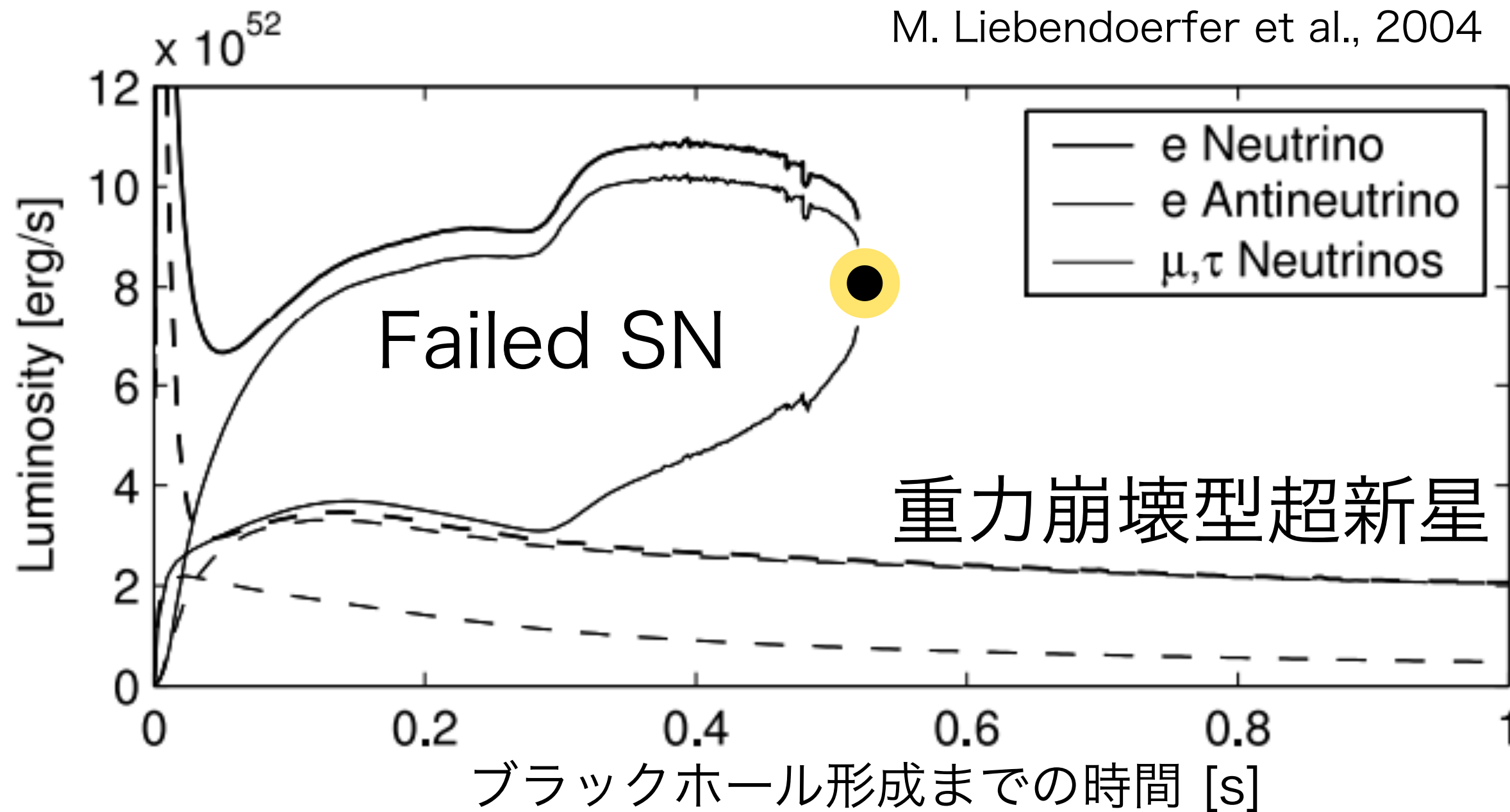
K. De et al. 2024



- 重力崩壊に伴い中心コアの周りの物質が温められる
→光学/赤外線望遠鏡などで観測
- 中心コアはニュートリノにより観測可能
→**ニュートリノの観測が期待される**

ニュートリノ放出の特徴

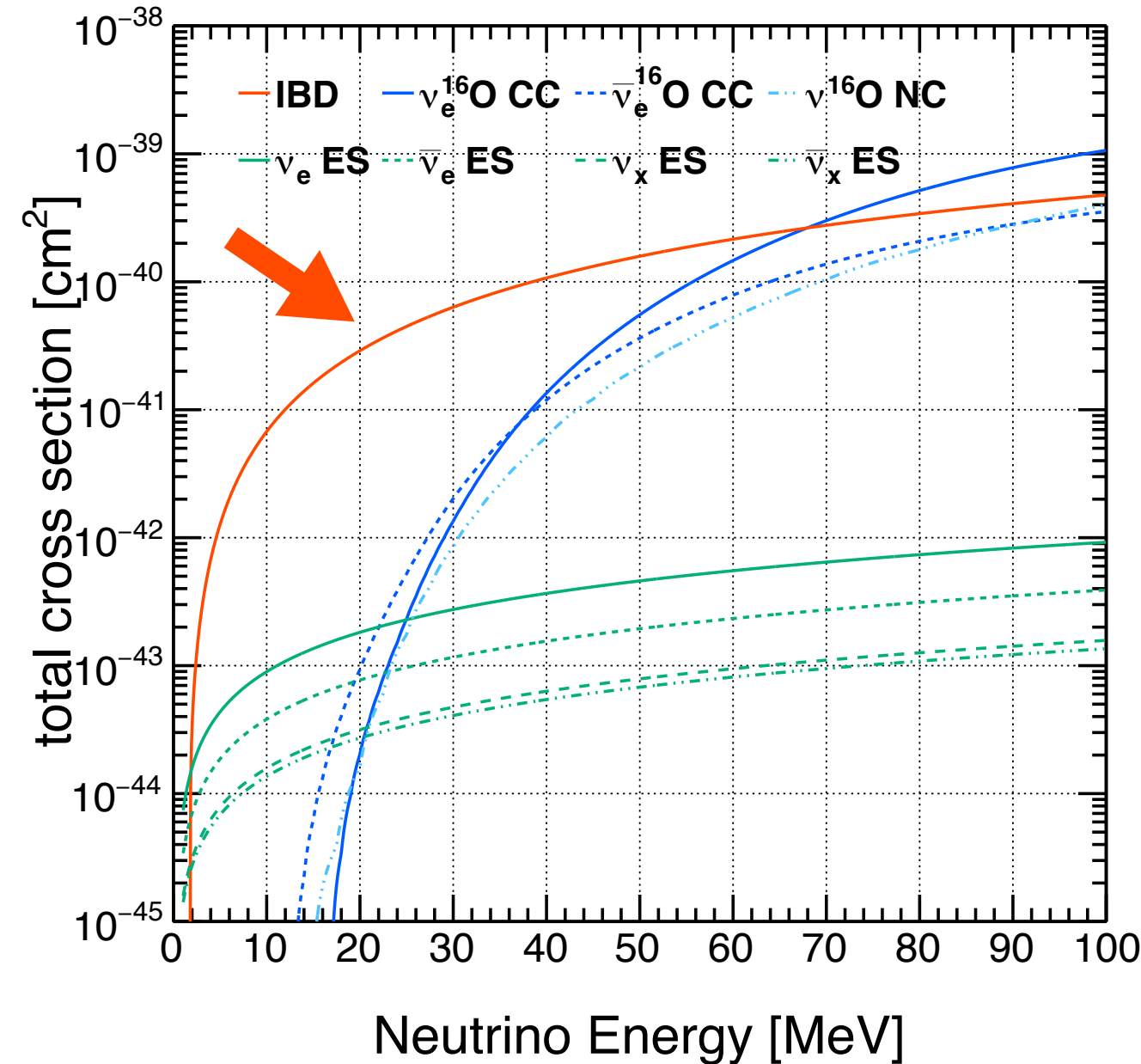
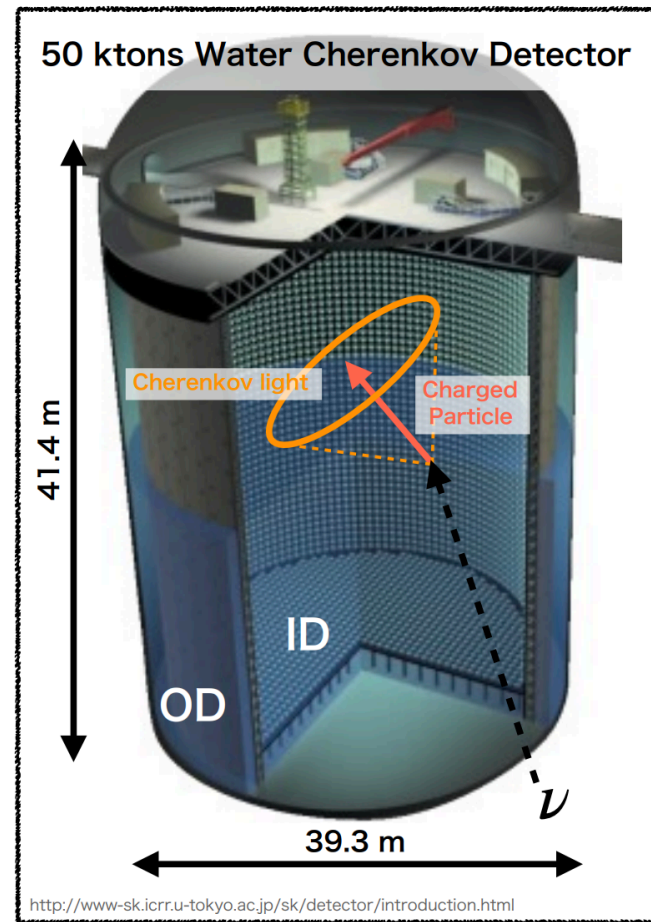
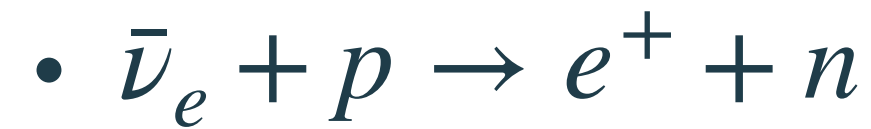
- 通常の重力崩壊型超新星に比べてよりニュートリノエネルギーが高い
- ニュートリノ放出時間はブラックホール形成までの時間に依存



スーパーカミオカンデ (SK)を用いたM31-2014-DS1由来のニュートリノ探索

SKにおけるニュートリノ探索

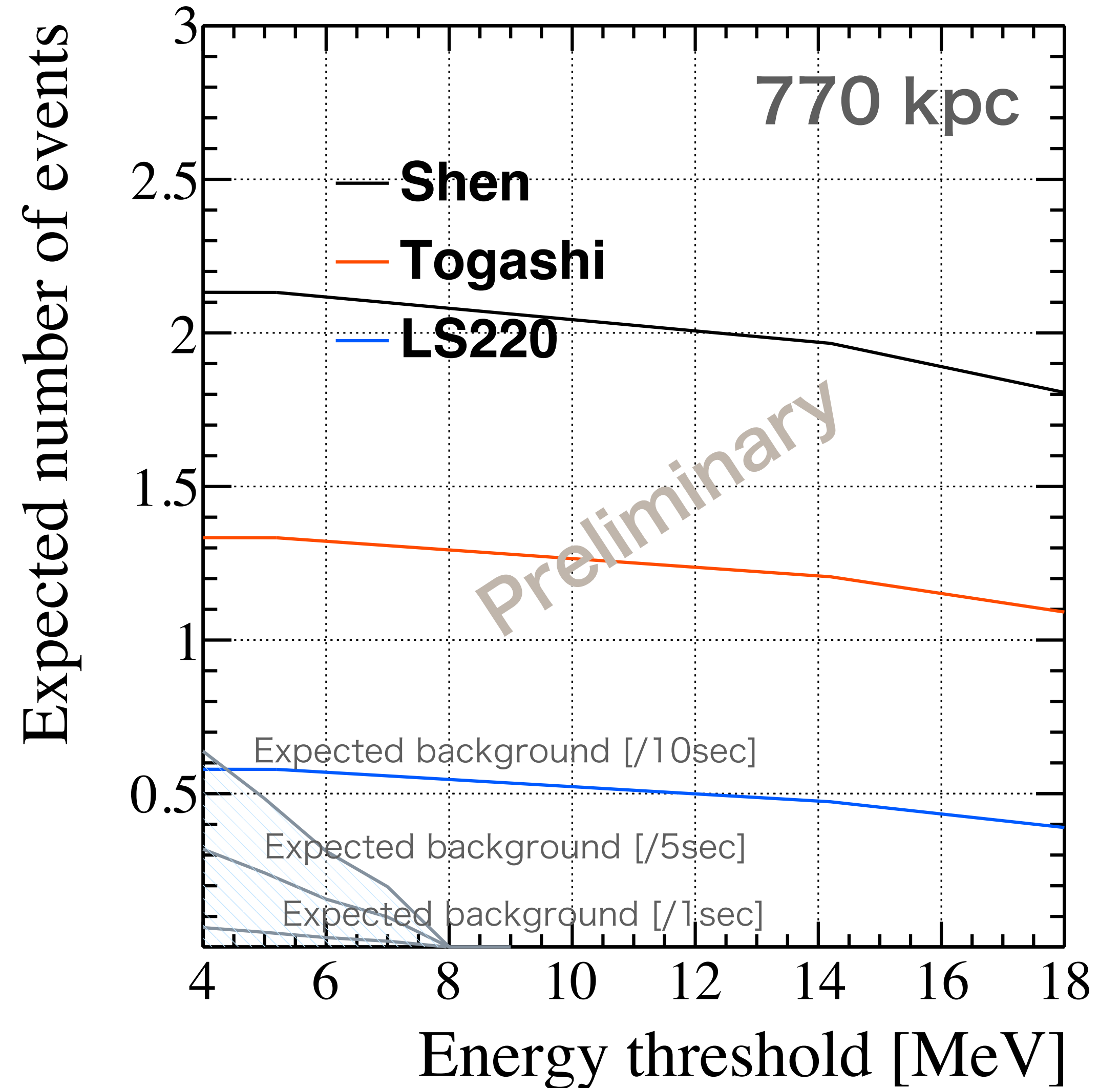
- 主な探索事象：逆ベータ崩壊 (IBD)



- SKにおける観測期待値 (at 770 kpc): $\mathcal{O}(1)$

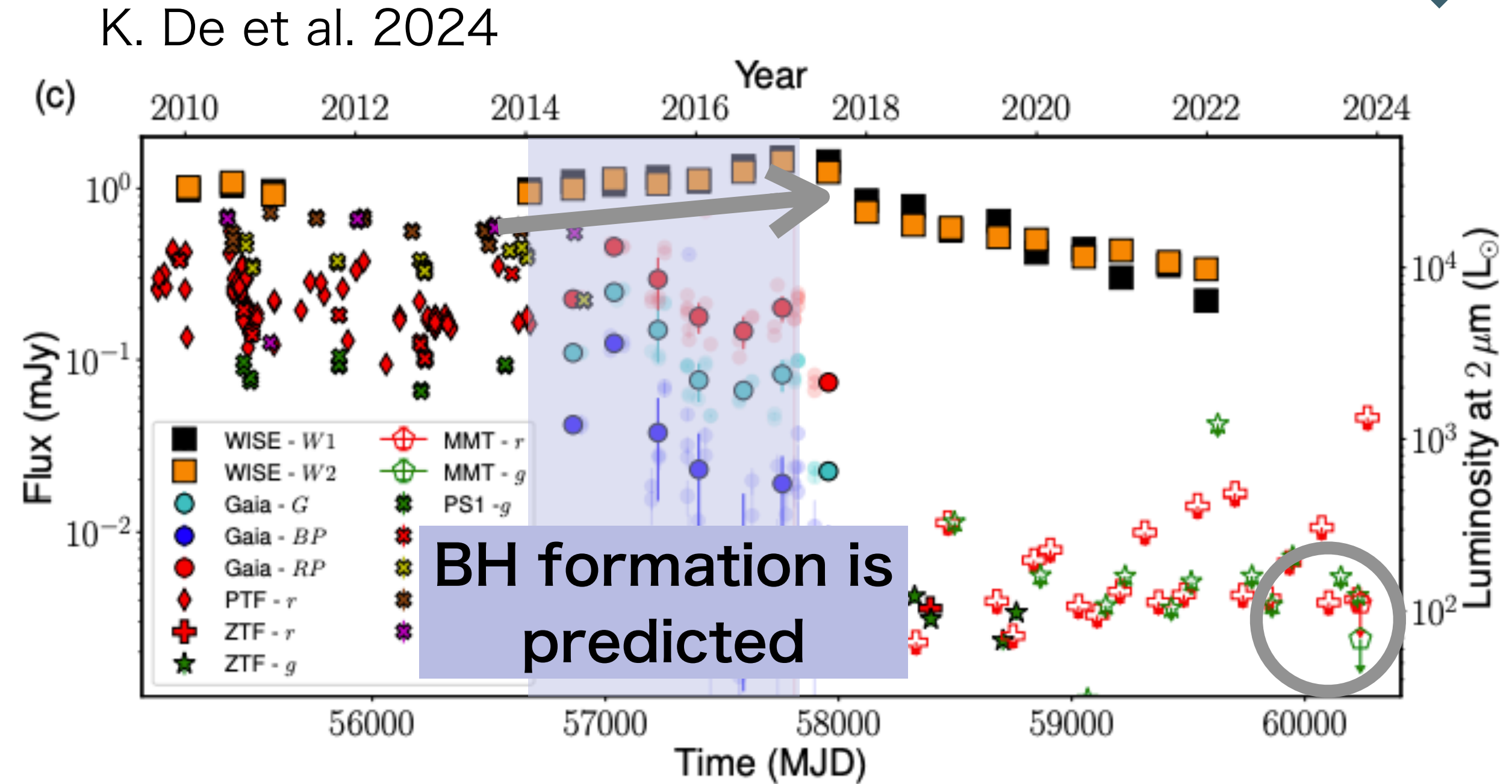
- 時間情報を用いたクラスター探索

- $\geq 2 / 10 \text{ sec}$



探索期間

- 中赤外線観測 (NEOWISE)
 - 2014年から2年間のフラックスの上昇
- 光学+近赤外線観測 (MMT)
 - 2023年には親星が観測されていない
- 探索期間
 - 2013年6月1日-2017年12月31日



近赤外線観測による親星フラックスの増光 親星半径の縮小

2013年6月1日

2014年1月

2017年5月

2017年12月31日

SK-I/II/III

SK-IV

SK-V

SK-VI

SK-VII

純水期間

純水期間

SK-Gd

1996

2008

2018

2020

2022

Now

- ノイズ低減

- 物理仮定に起因しないイベントや異常イベントを除去

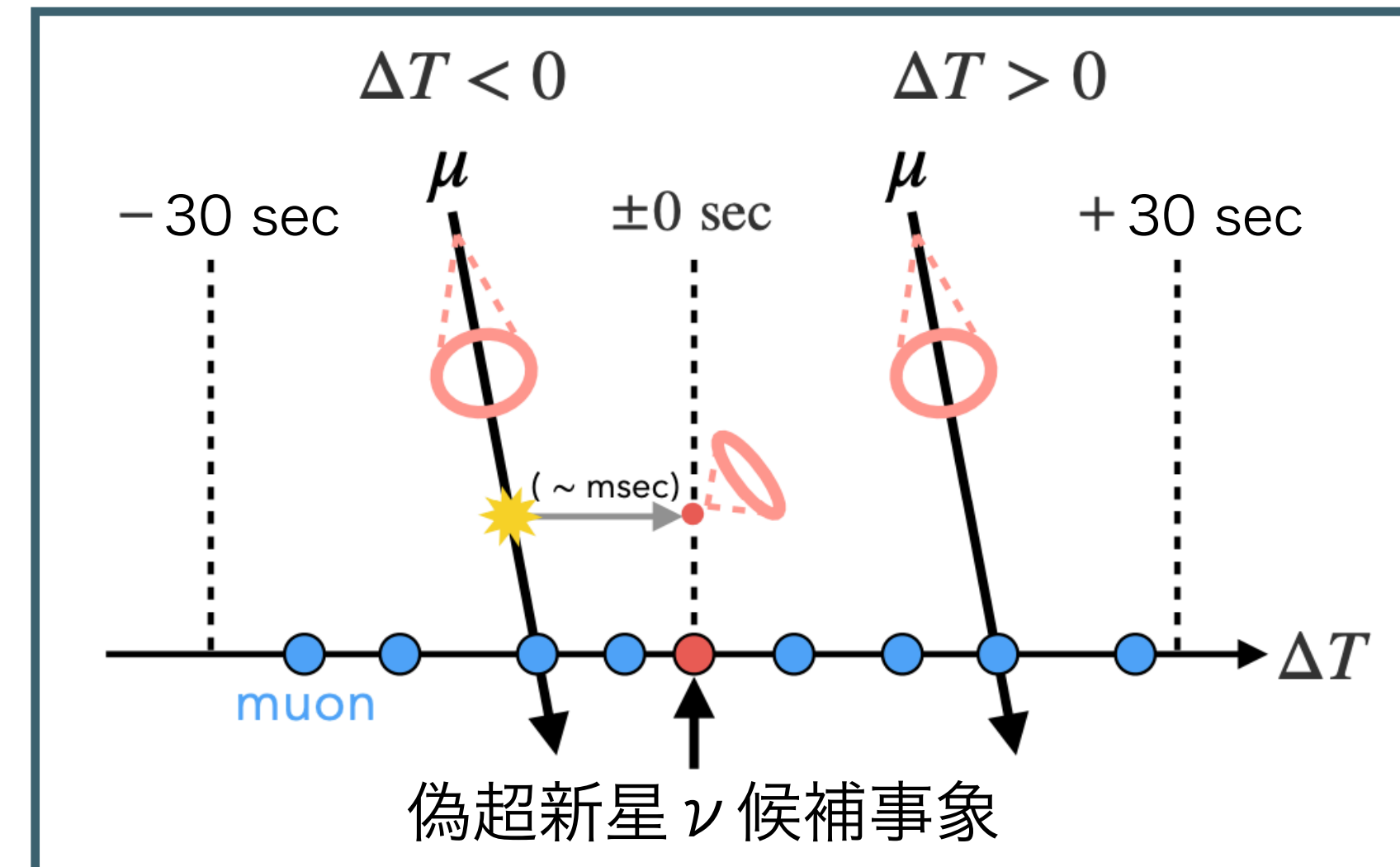
- IBD陽電子信号識別

- リングのパターン・開き角、電荷量で陽電子選択

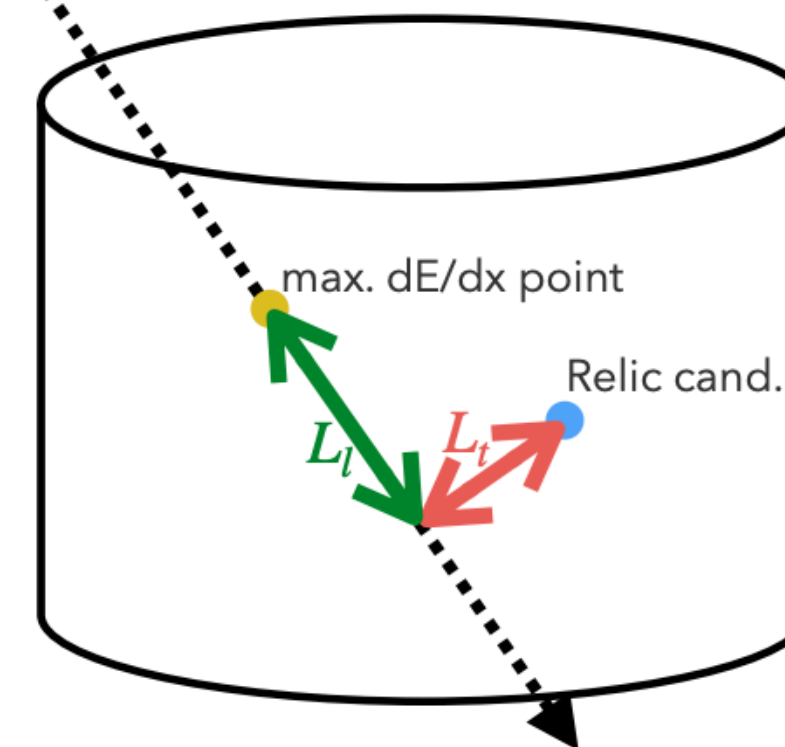
- スパレーションカット

- ミューオンと酸素原子核反応による核破砕事象を除去

時間・空間を用いた除去

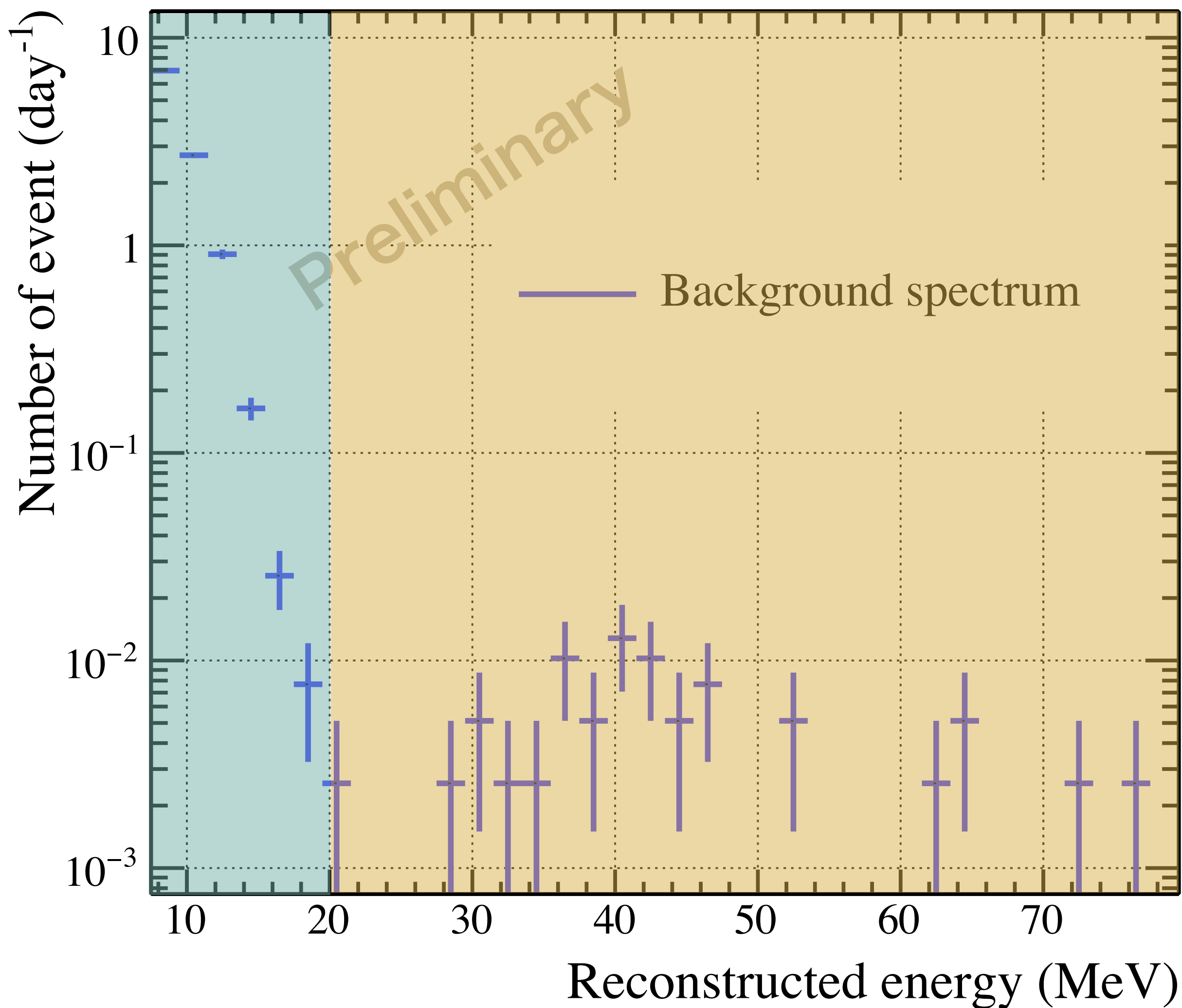


muon track



Likelihood計算

背景事象カット後のエネルギー分布



- 探索期間の前後のデータを背景事象の見積もりに使用 (約508日)

8-20 MeV領域

宇宙線ミュオンによる
核破砕イベント

20 MeV以上

ミュオンからの崩壊電子
大気ニュートリノからの荷電カレント反応

- 背景事象を排除してクラスター探索を実施
→ Toy MCを使用してクラスター探索におけるエネルギー閾値を最適化

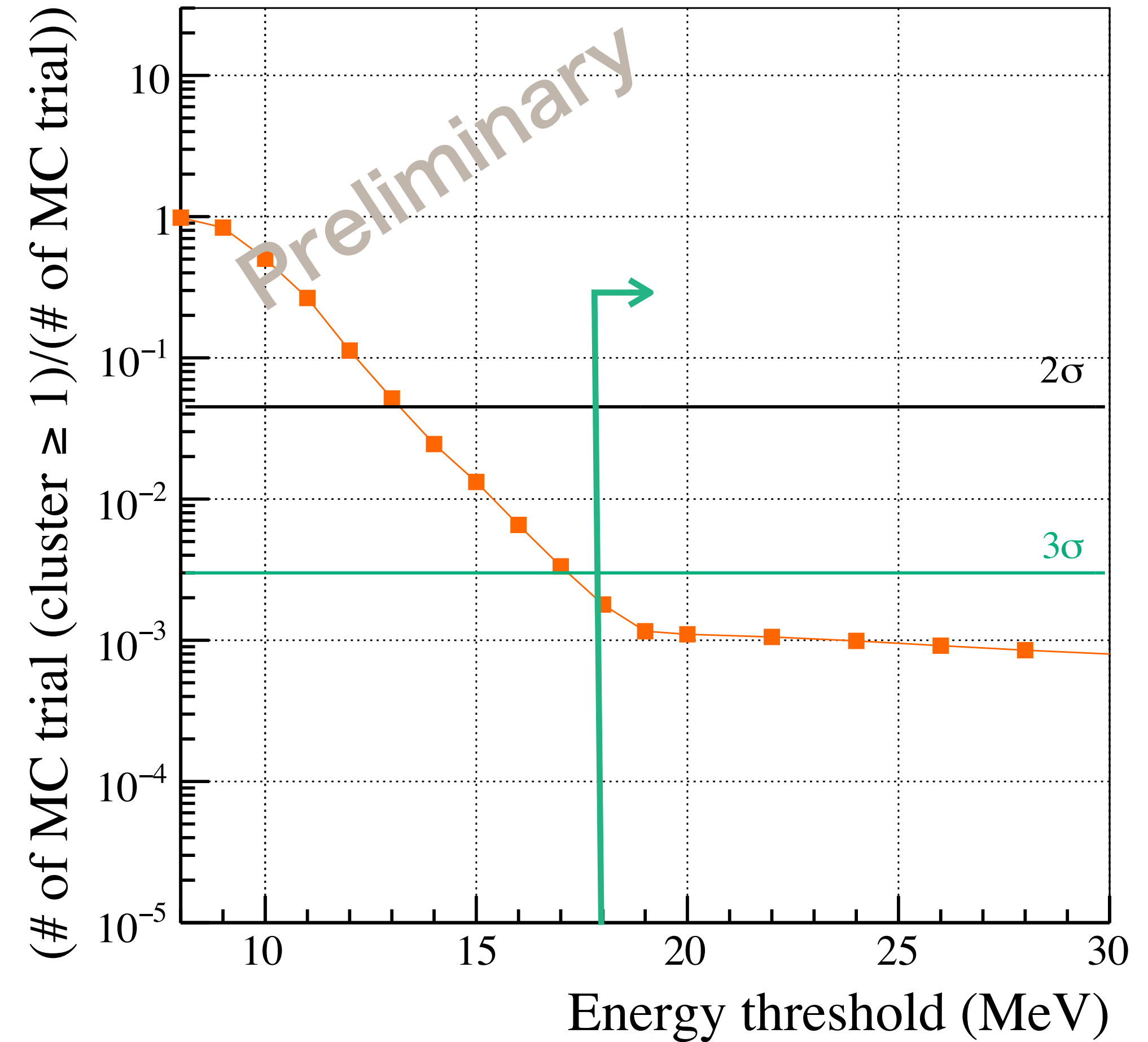
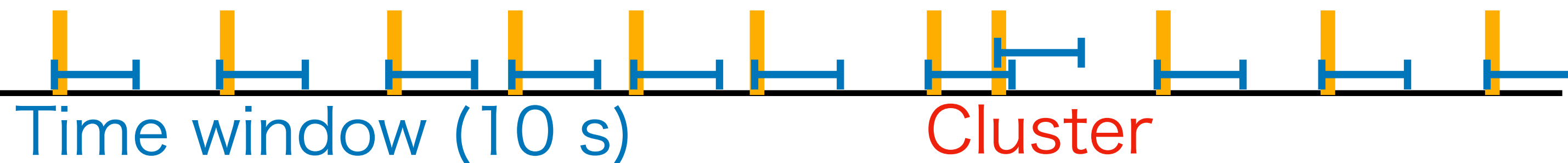
エネルギー閾値の評価

Toy MC×1000000回

1. エネルギー閾値を設定
2. バックグラウンドレートに従うランダム事象を生成
3. イベント発生ごとにwindowを開き、
クラスター数を計算 ($\geq 2 / 10$ sec)

- クラスターを持つtoy MC数 / 全toy MC数
- 条件：クラスター検出時に 3σ 以上で
シグナル由来と判定可能
→ **18 MeV** (positron total energy)

Background event



探索期間内のニュートリノイベント探索

Toy MC×1000000回

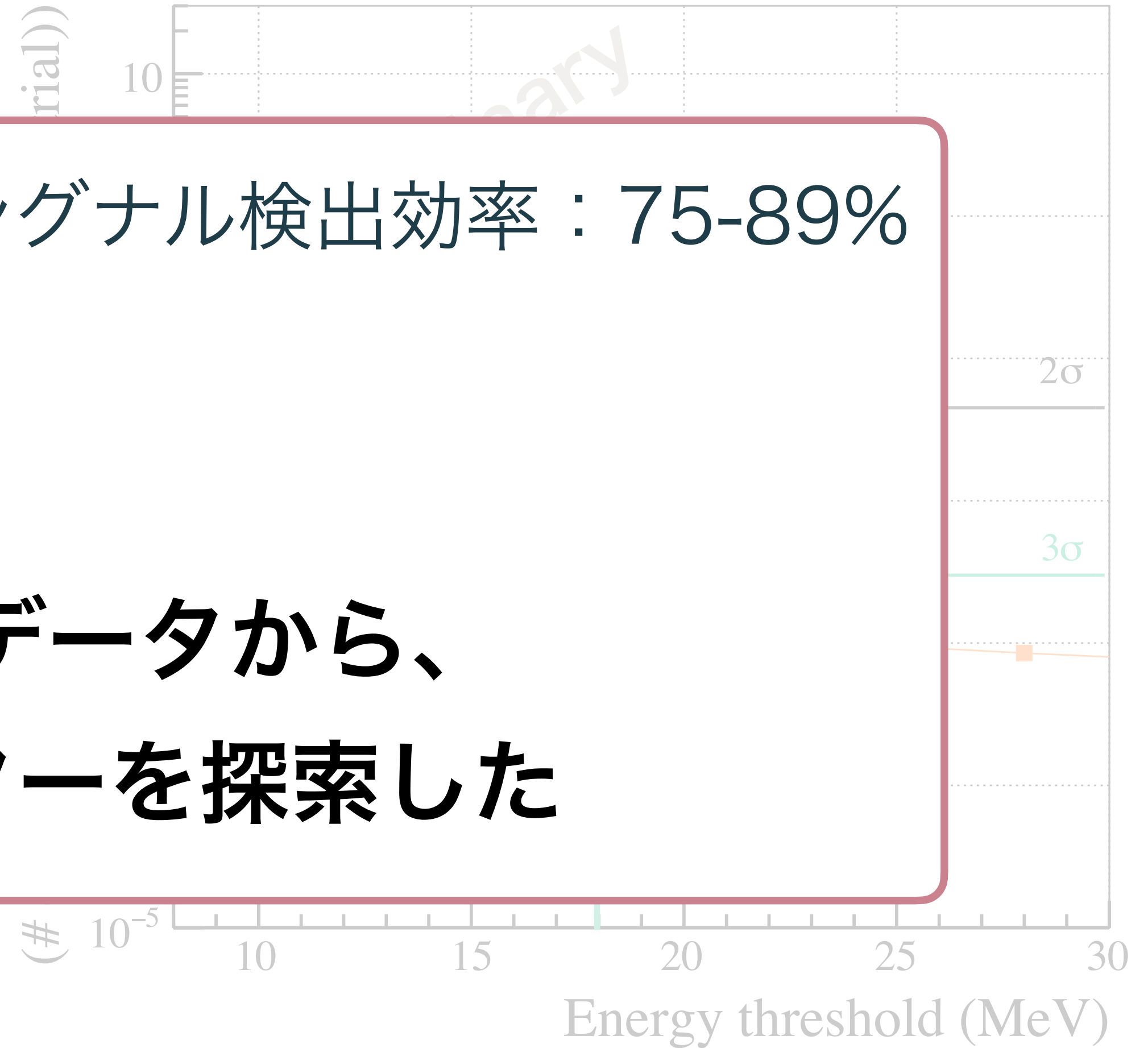
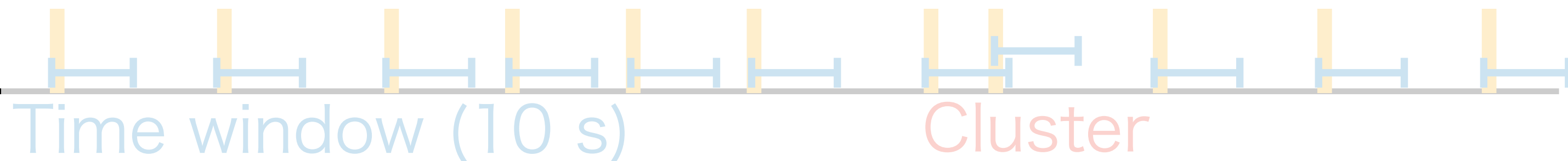
1. エネルギー閾値を設定
2. バックグラウンドレートに従うランダム事象を生成
3. イベントをクラスタリング

背景事象カットによる18 MeV以上でのシグナル検出効率：75-89%



探索期間1416日のSKデータから、
≥ 2 / 10 secのクラスターを探索した

Background event



探索結果

探索期間内にクラスターは発見できなかった

→反電子ニュートリノ全放出エネルギーに対する制限

- SKにおける観測期待値

検出器のターゲット数

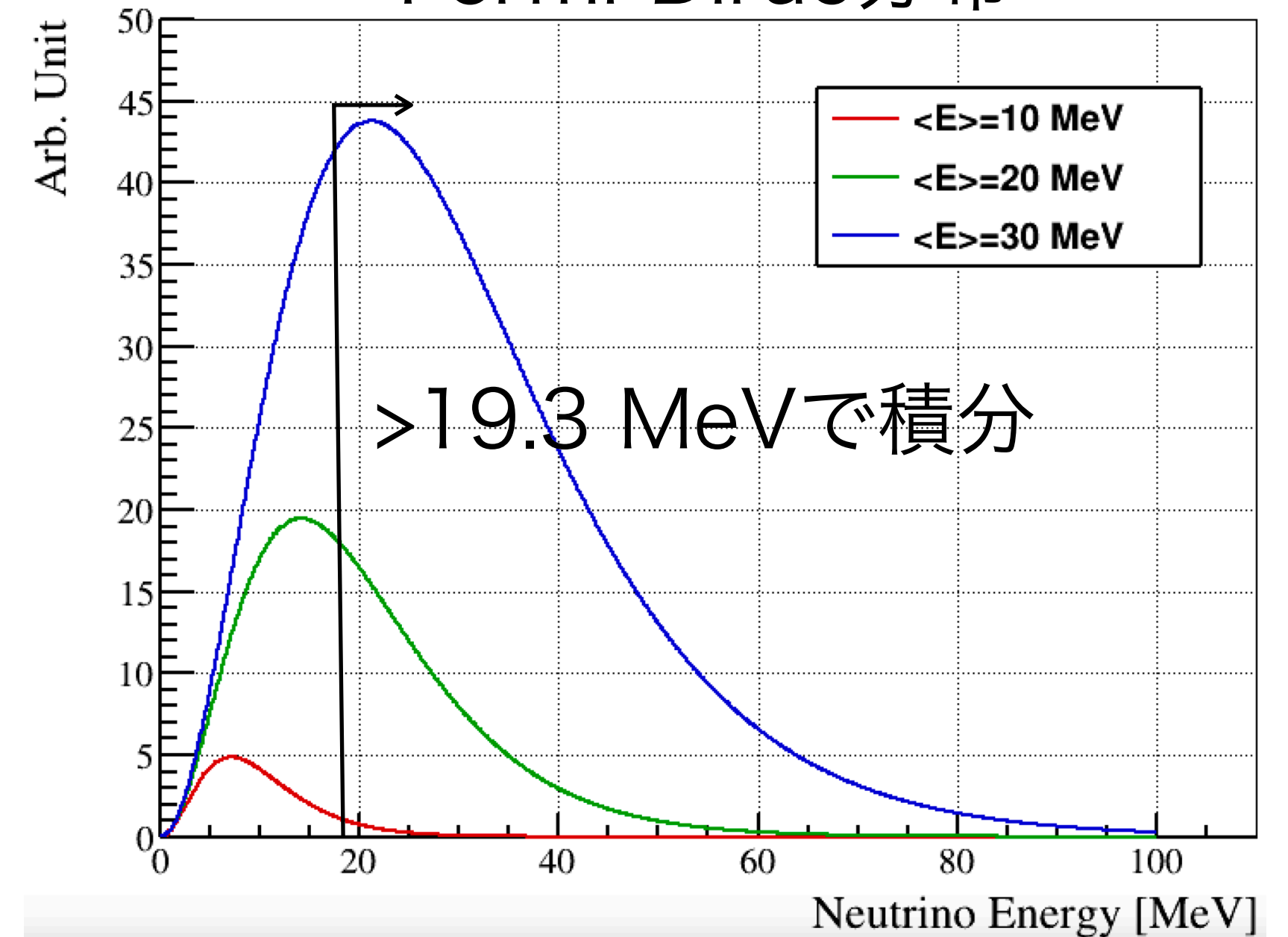
IBD反応断面積

$$N_{\text{event}} = \int_{E_{\text{th}}}^{\infty} N_T \cdot \phi(E_\nu) \cdot \sigma(E_\nu) \cdot \epsilon(E_\nu) \cdot dE_\nu$$

シグナル検出効率

地上のニュートリノフラックス

Fermi-Dirac分布



- 2イベント以上のクラスターは観測できなかった
→ポアソン統計を用いた反電子ニュートリノ放出エネルギー上限値の算出

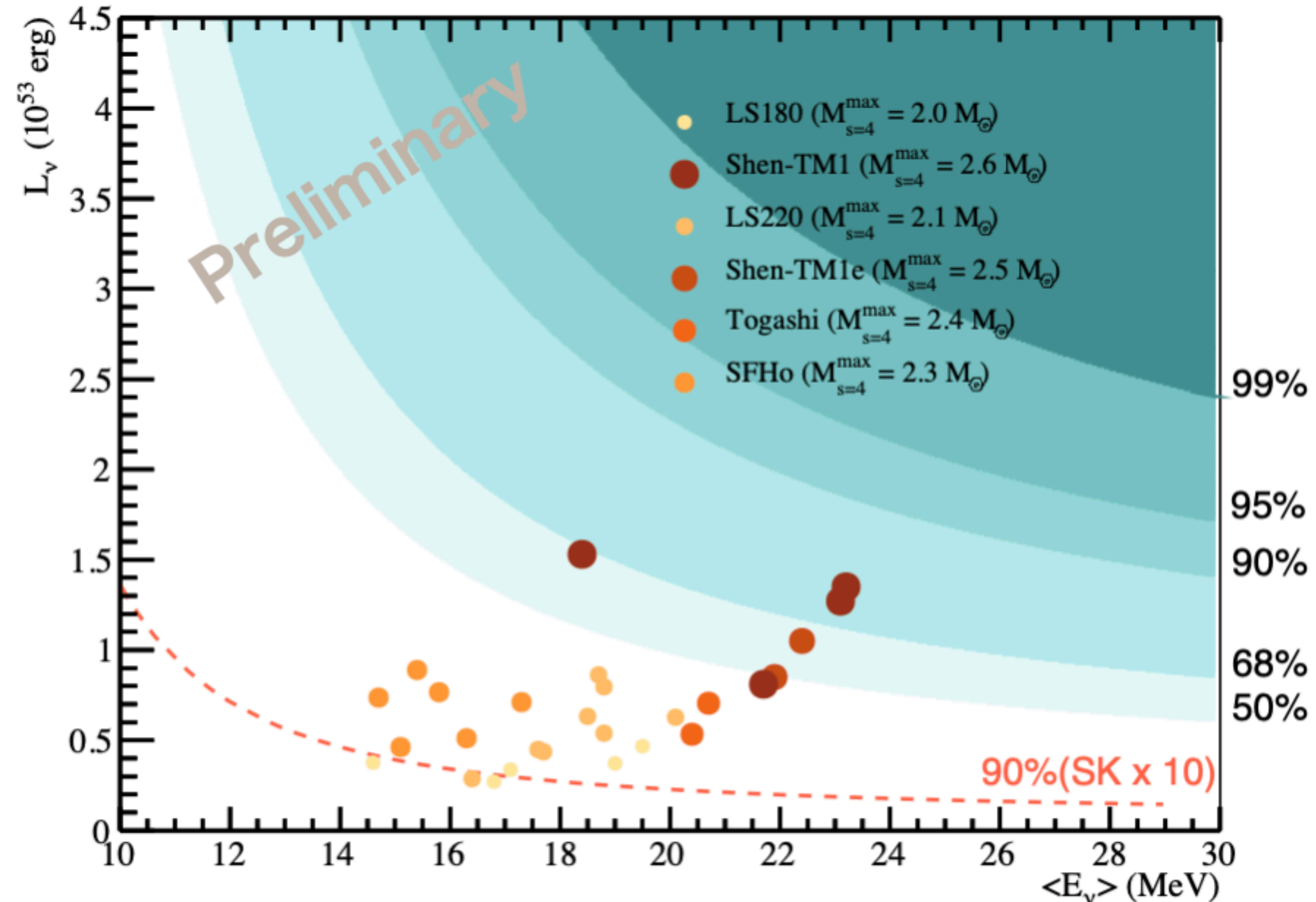
ニュートリノ全放出エネルギーに対する制限¹¹

2イベント以上検出する確率	期待値
50%	1.68
68%	2.35
90%	3.89
95%	4.74
99%	6.64

- 色付け領域を除外
- 高い平均エネルギーのモデルに対して制限：Shen-TM1：68%

今後の展望

- ハイパーカミオカンデ検出器を想定
 - SKの10倍の検出器で90%上限値を計算
- ニュートリノ事象の発見が期待される



- 2024年にM31銀河 (距離：770 kpc)においてFailed SN候補が報告
→**SKデータを用いたニュートリノ探索**
- 背景事象を排除してクラスター探索 ($\geq 2 / 10$ sec)を実施
 - Toy MCを用いたエネルギー閾値を最適化：18 MeV (positron total energy)
- クラスターは発見されなかったが、反電子ニュートリノの放出エネルギーに対して上限値を算出
 - 高い平均エネルギーのモデルに対して制限 (Shen-TM1 EOS：68%)
- **今後の展望**
 - 光学観測等の精度向上によりブラックホール形成時刻を絞り込める可能性
→探索領域を縮小し、クラスター探索のエネルギー閾値を低減
 - ハイパーカミオカンデ検出器で同様の事象を観測した場合
→ニュートリノ事象の発見が期待できる