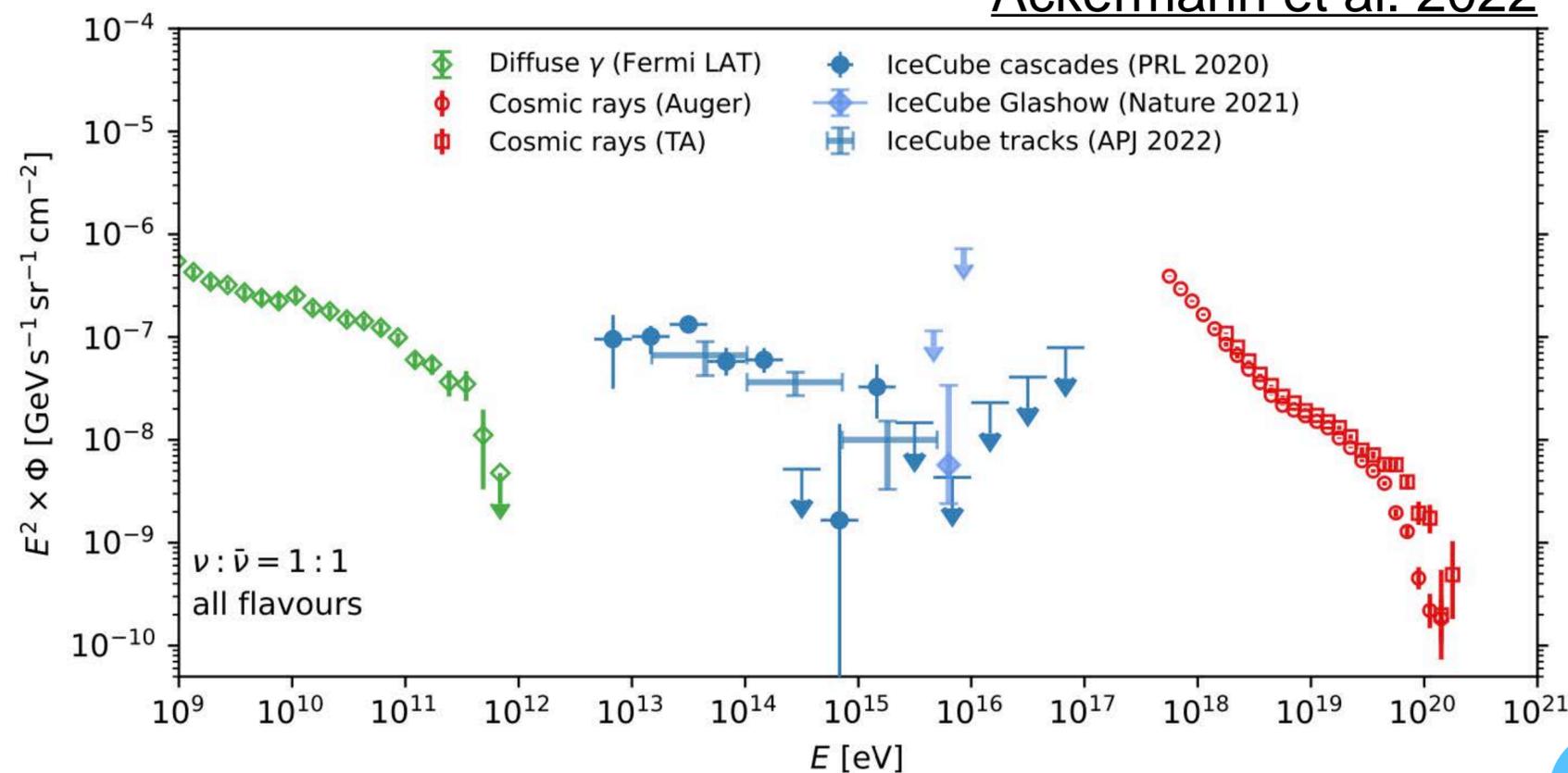


近傍の突発天体に特化した
IceCubeニュートリノ“多重事象”に対応する
可視光突発天体の探査

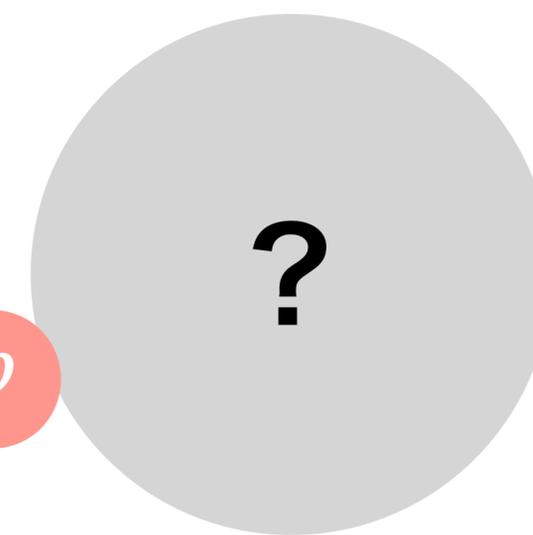
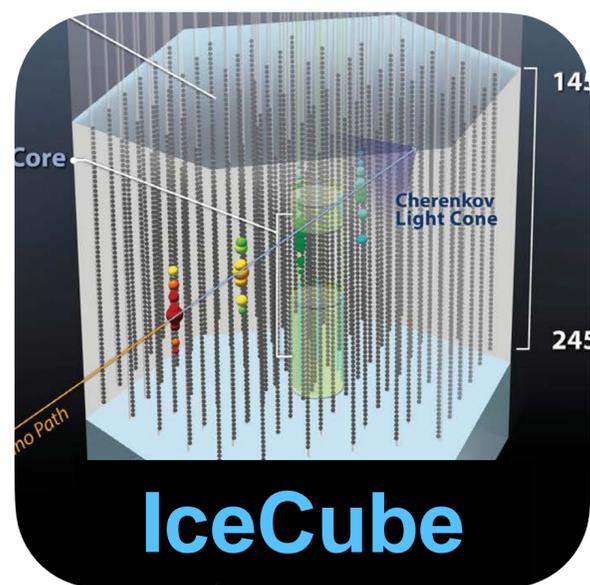
敏蔭星治

[arXiv:2504.04741](https://arxiv.org/abs/2504.04741)

Ackermann et al. 2022



高エネルギー粒子の起源



第一歩として、高エネルギーニュートリノの起源を特定したい

ガンマ線バースト



Credit: NASA, ESA and M. Kornmesser
ニュートリノとの相関なし

IceCube collaboration 2012, 2017, 2022

超新星



Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), K. Maeda et al.
星周物質との相互作用する超新星？

Stein et al. (2023b, GCN circular)

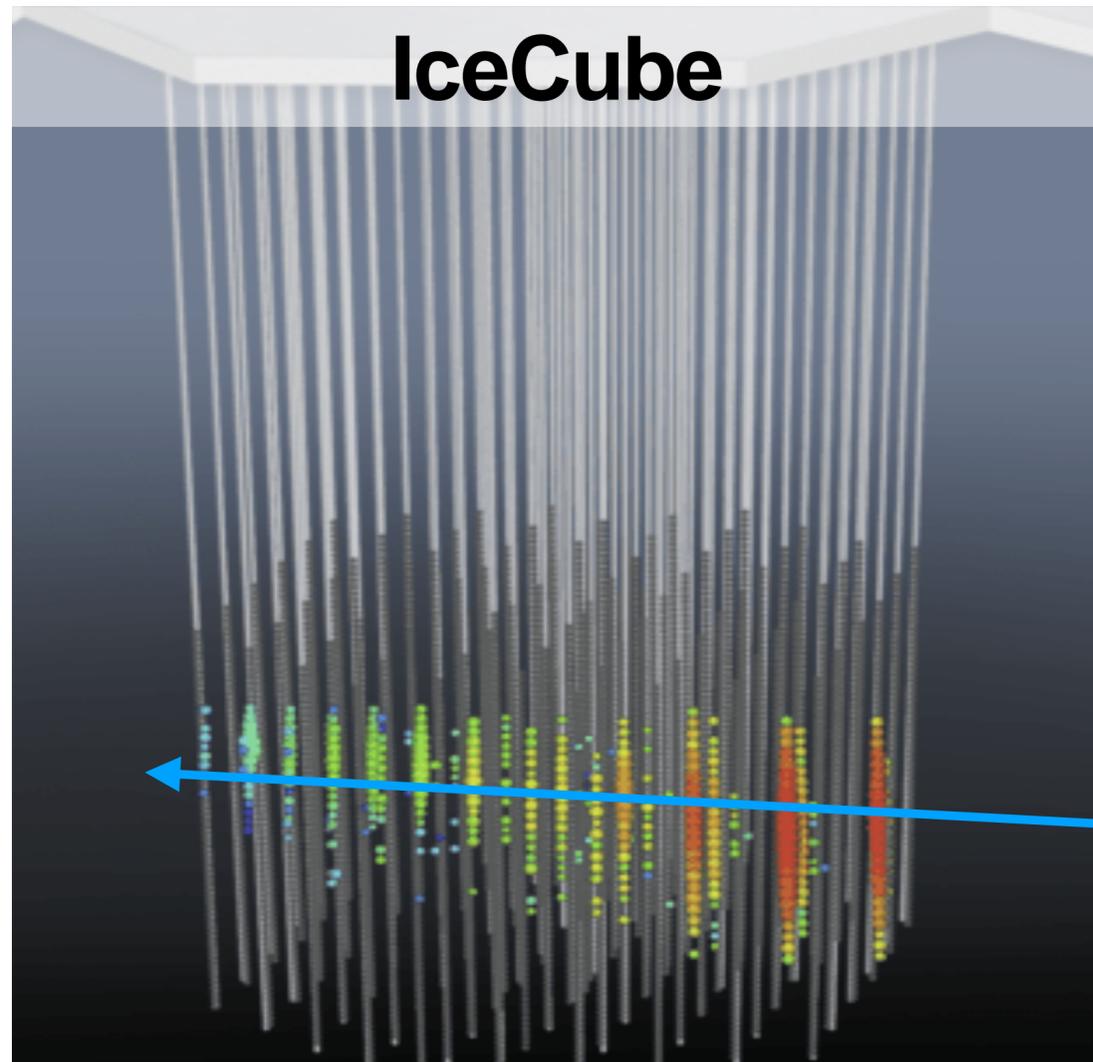
潮汐破壊現象



Credit: M. Garlick/SPL/Corbis
可視光ピークの数百日後に検出

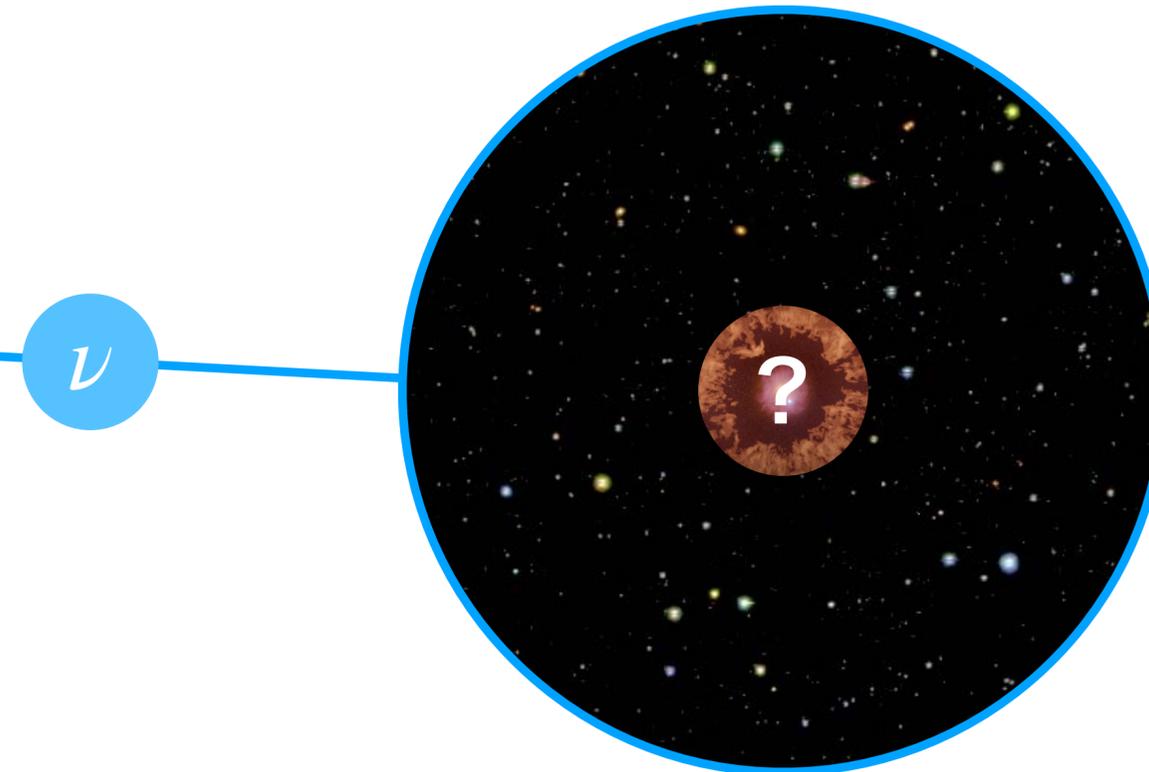
Stein et al. (2021), Reusch et al. (2022), Jiang et al. (2023)
van Velzen et al. (2024), Yuan et al. (2024), Li et al. (2024)

超新星・潮汐破壊現象はニュートリノの起源になり得るか？



ニュートリノ単一事象に対して

IceCubeの感度： $z \sim 1 - 2$ まで
分解能（決定精度）： ~ 1 平方度



検出！ → ニュートリノ起源の特定

非検出！ → ニュートリノ起源の種族・特徴（明るさなど）に制限

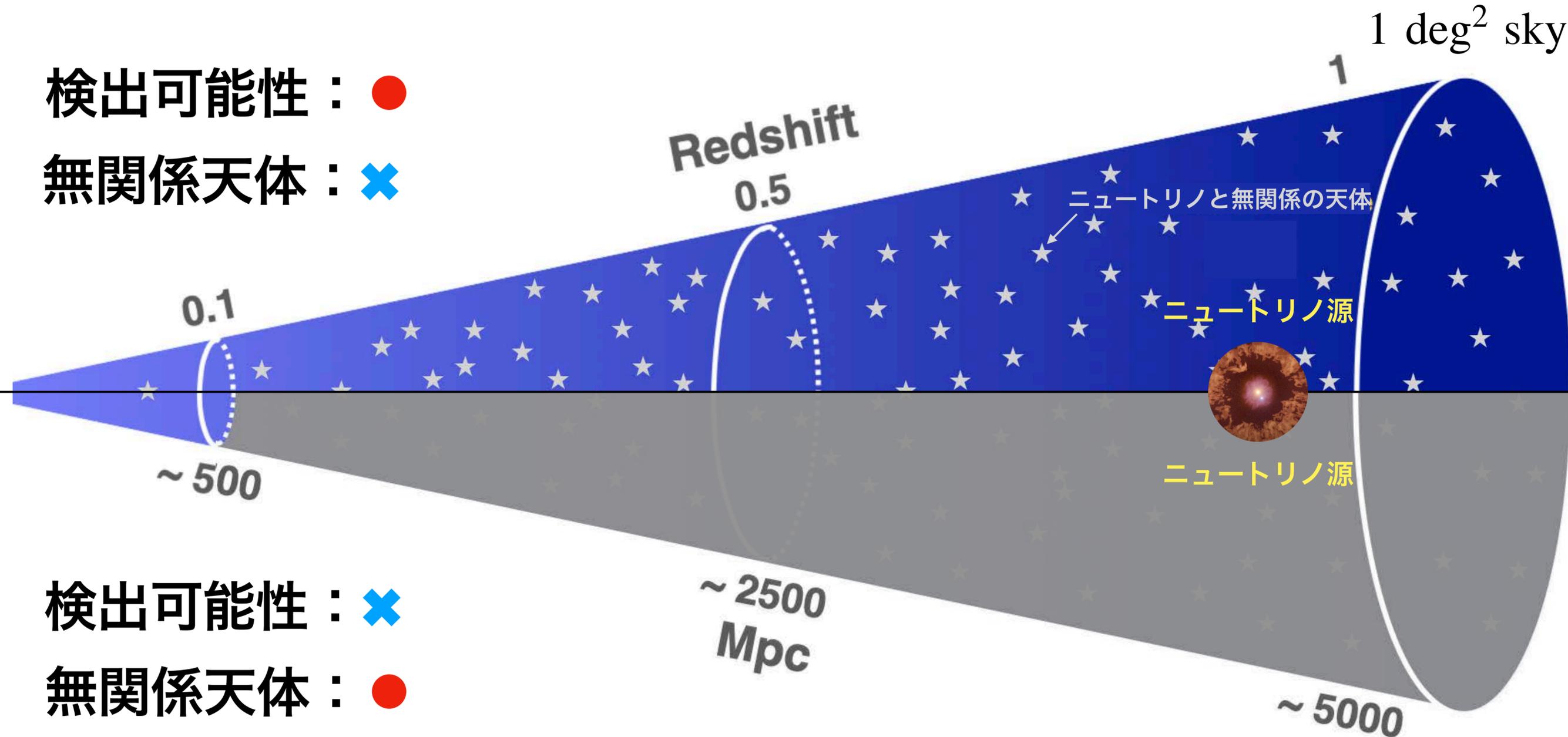
検出可能性と無関係天体という障壁



検出可能性 : ●
無関係天体 : ✕



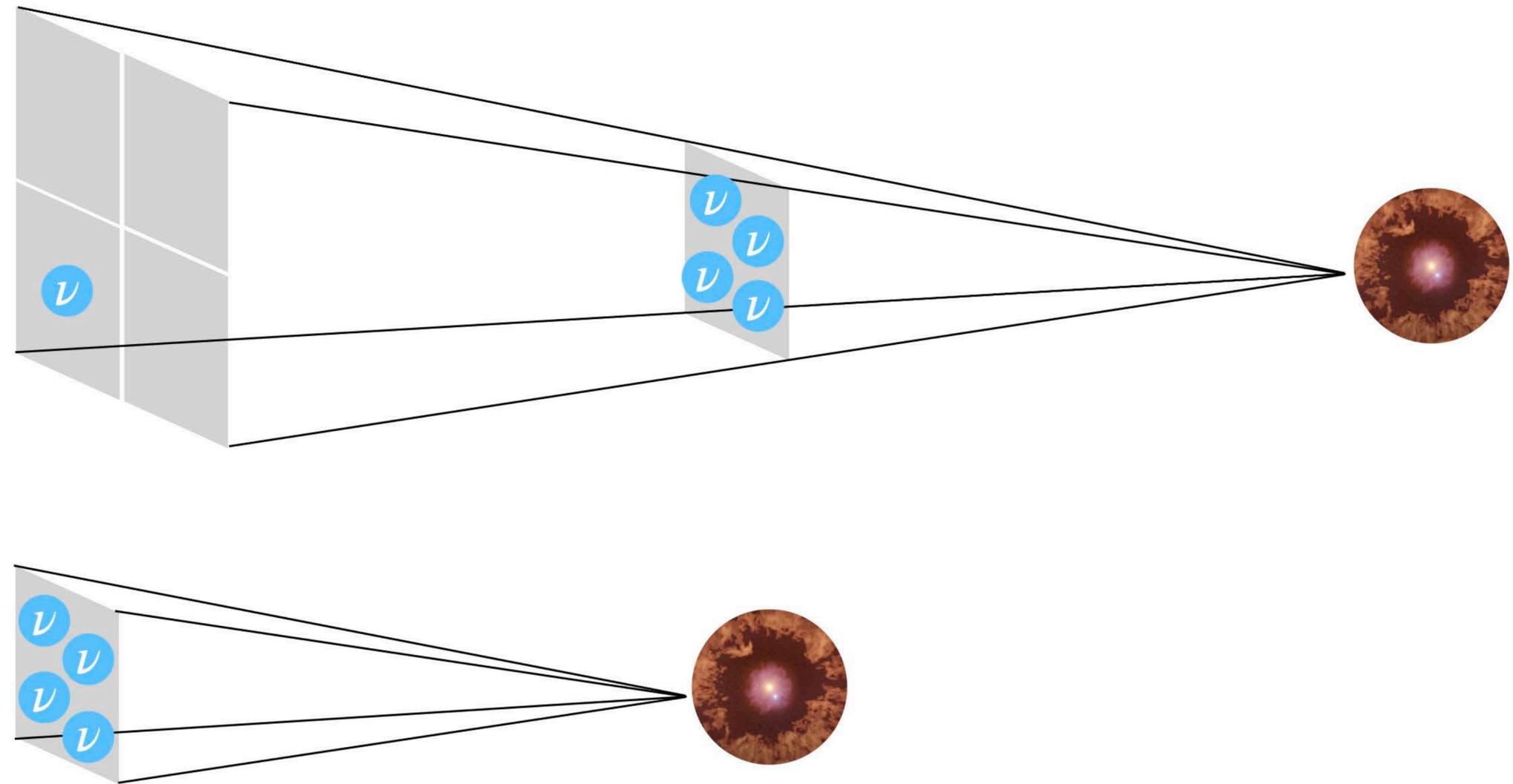
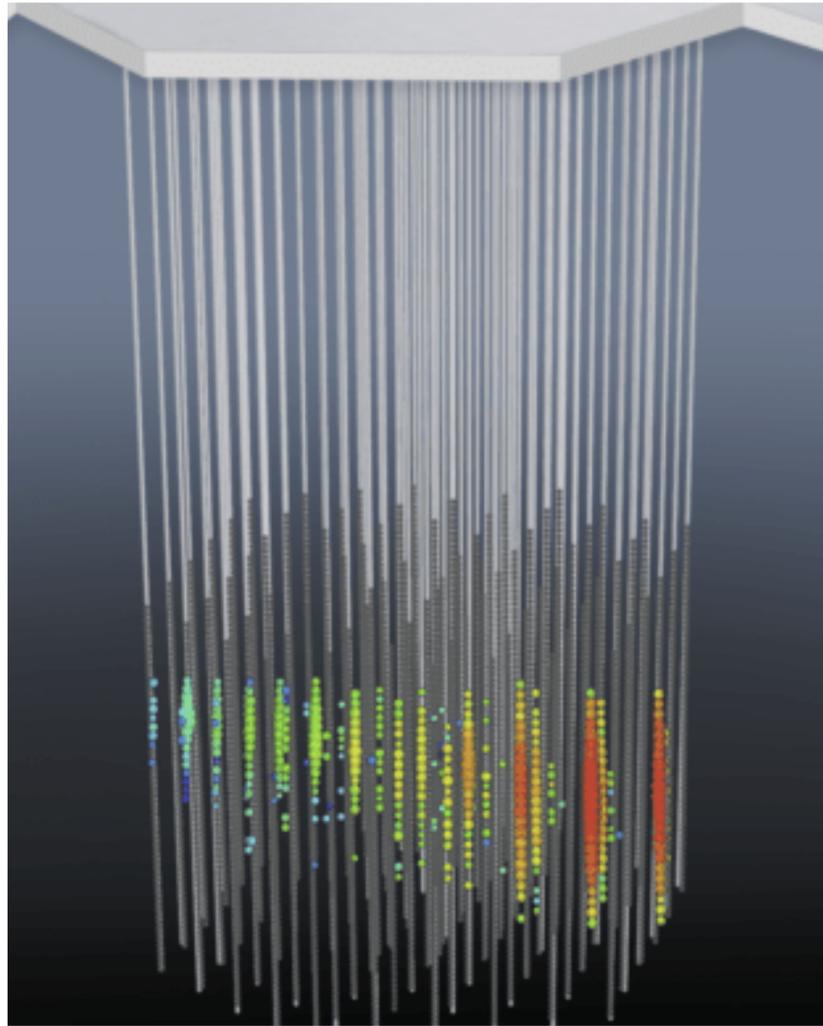
検出可能性 : ✕
無関係天体 : ●



単一事象の追観測では、検出可能性と無関係天体の両立が難しい

打開策：ニュートリノ“多重事象”

“多重事象”：一つの天体から複数のニュートリノが検出される事象



*実際は、大量のニュートリノが降り注ぎ、その極一部だけがIceCubeによって検出される

複数ニュートリノが検出される明るい天体→近傍のみに感度を持つ

観測されている
全ニュートリノフラックス

考えている天体種族の
発生率

$$\phi_\nu \propto \varepsilon_\nu \times R$$

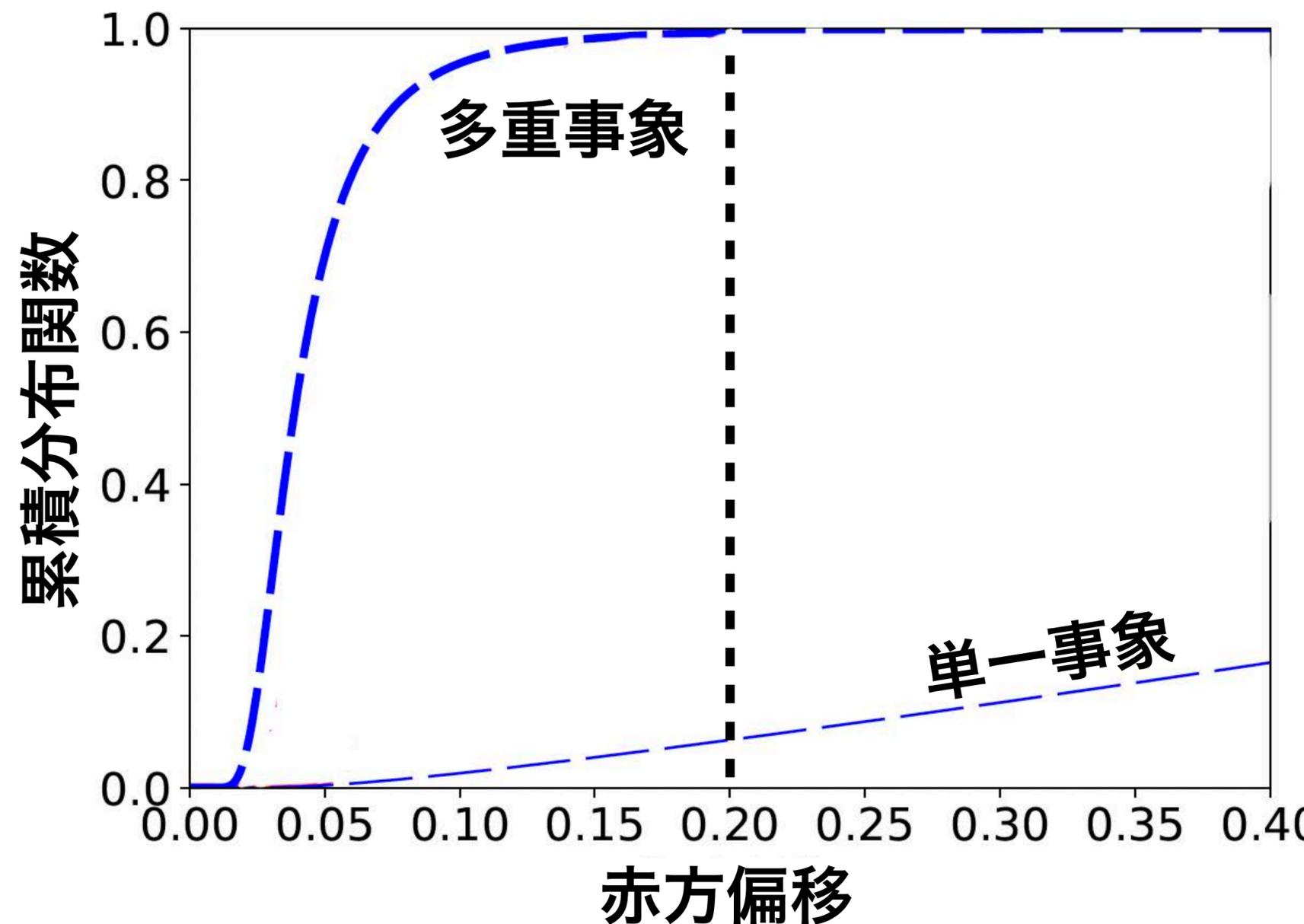
1天体ごとの
ニュートリノ放射エネルギー

*ある天体種 (e.g., 潮汐破壊現象) が支配的な起源だと仮定

各天体のニュートリノエネルギー+IceCube の感度

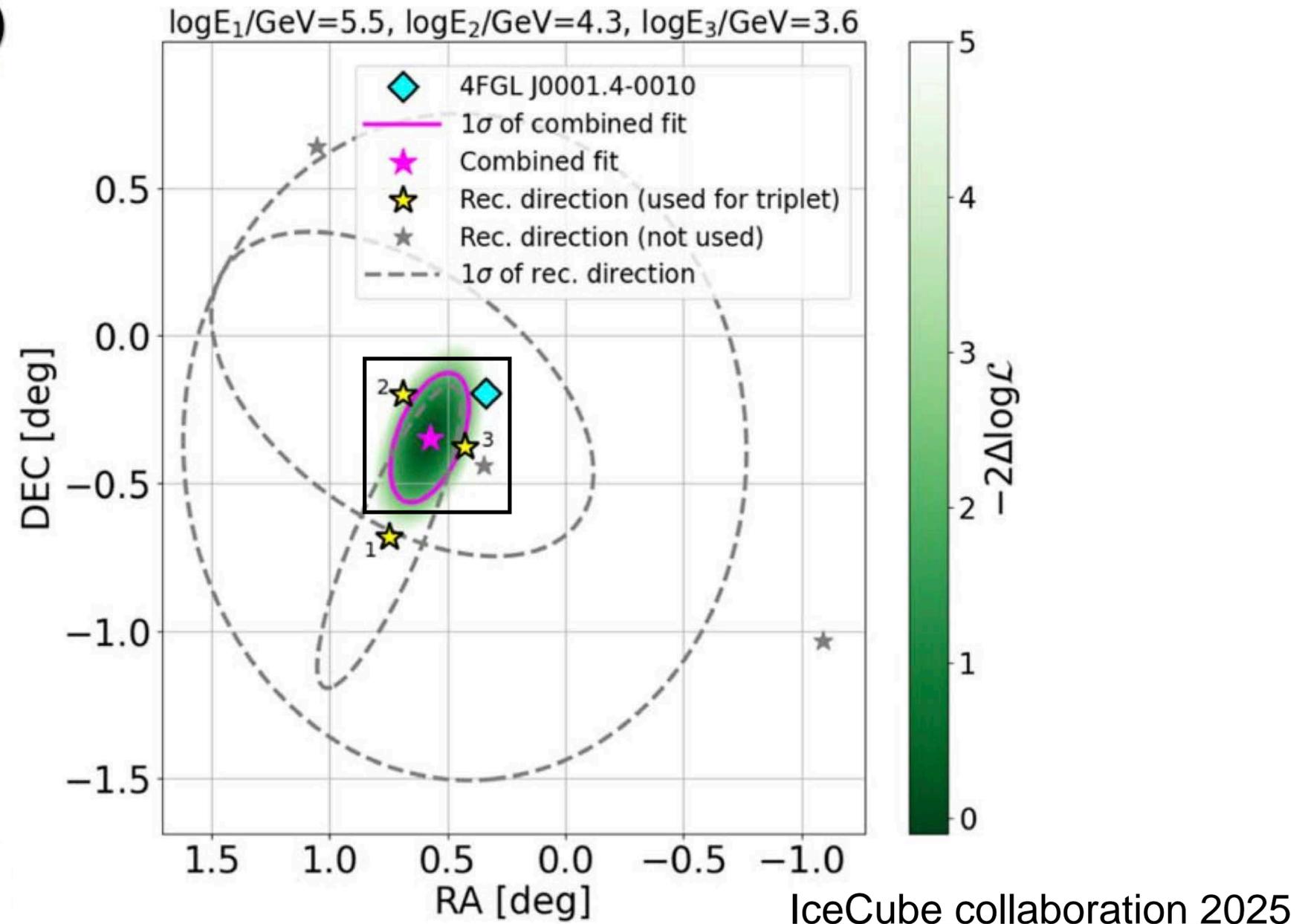
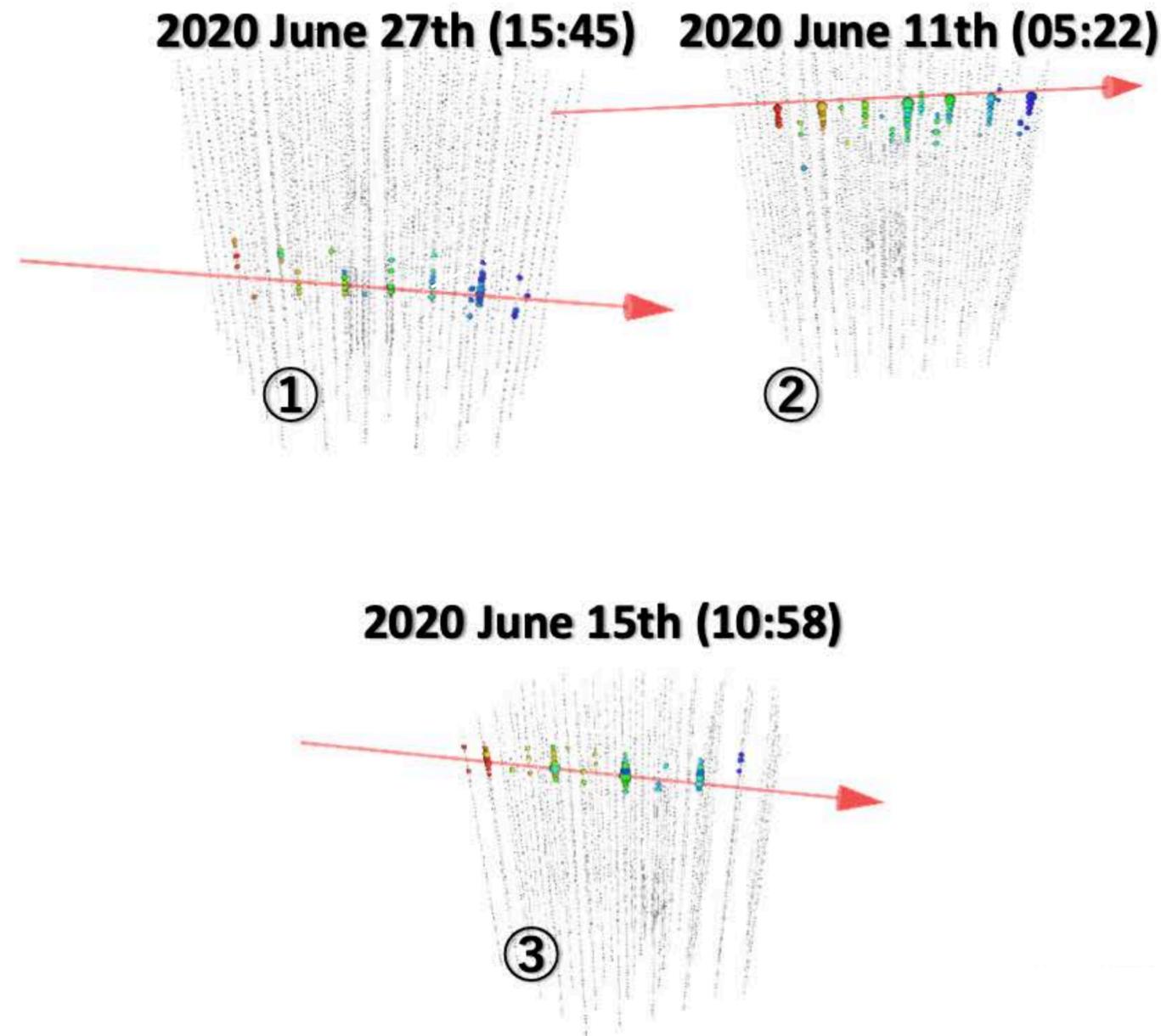
→ 多重事象の起源天体の距離分布！

超高輝度超新星の場合



多重事象の追観測であれば $z \leq 0.2$ までに注目することが可能

2020年6月、同方向 (≤ 3 deg) & 同時期 (≤ 30 days) に3つのニュートリノが検出！



幸運にも、Zwicky Transient Facility (ZTF) が同時期・同方向を観測

小型望遠鏡で見た場合

Case 1：候補天体検出！

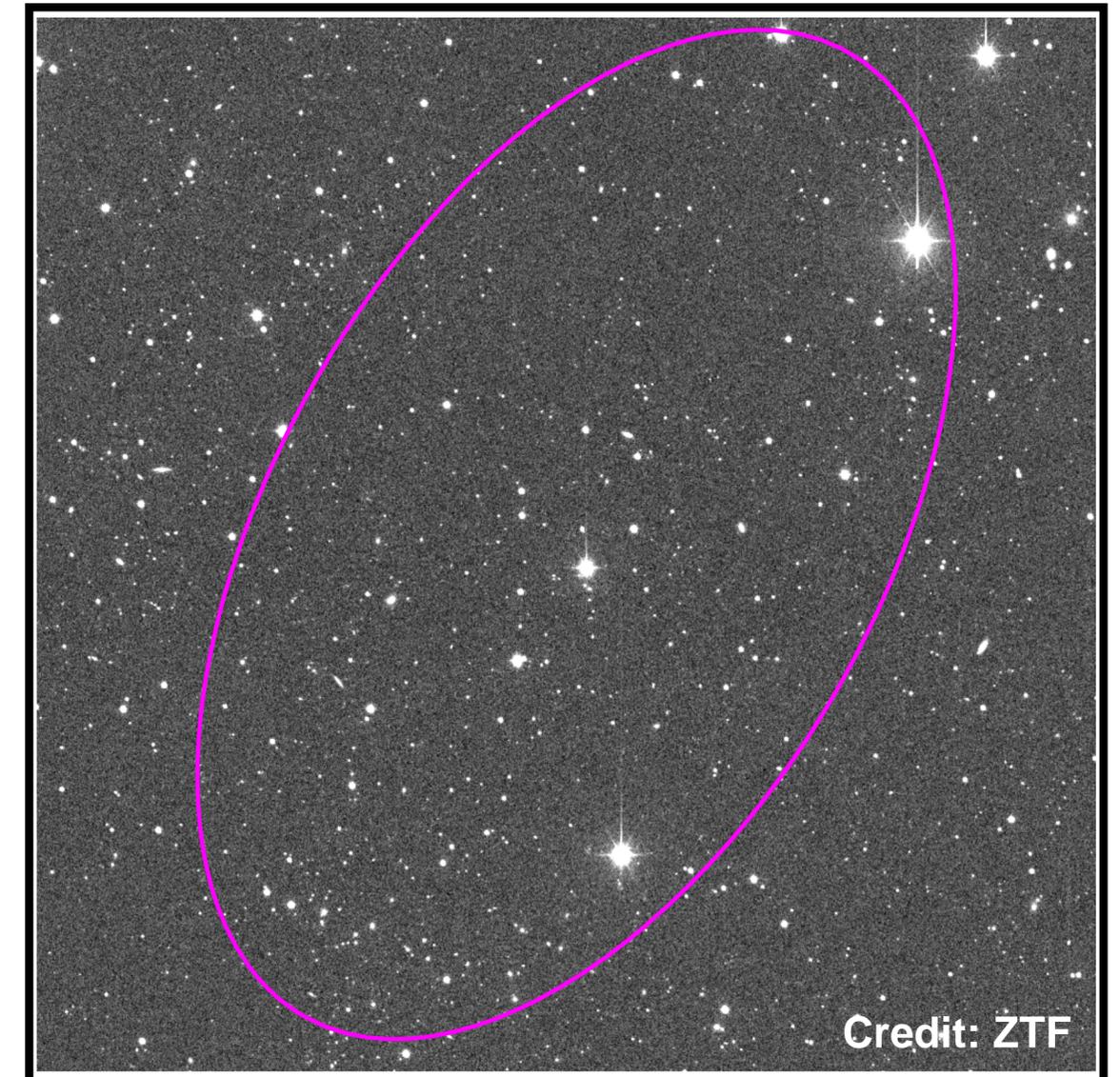
予想される**無関係天体の数が十分少ない**

→ 候補天体とニュートリノの相関！

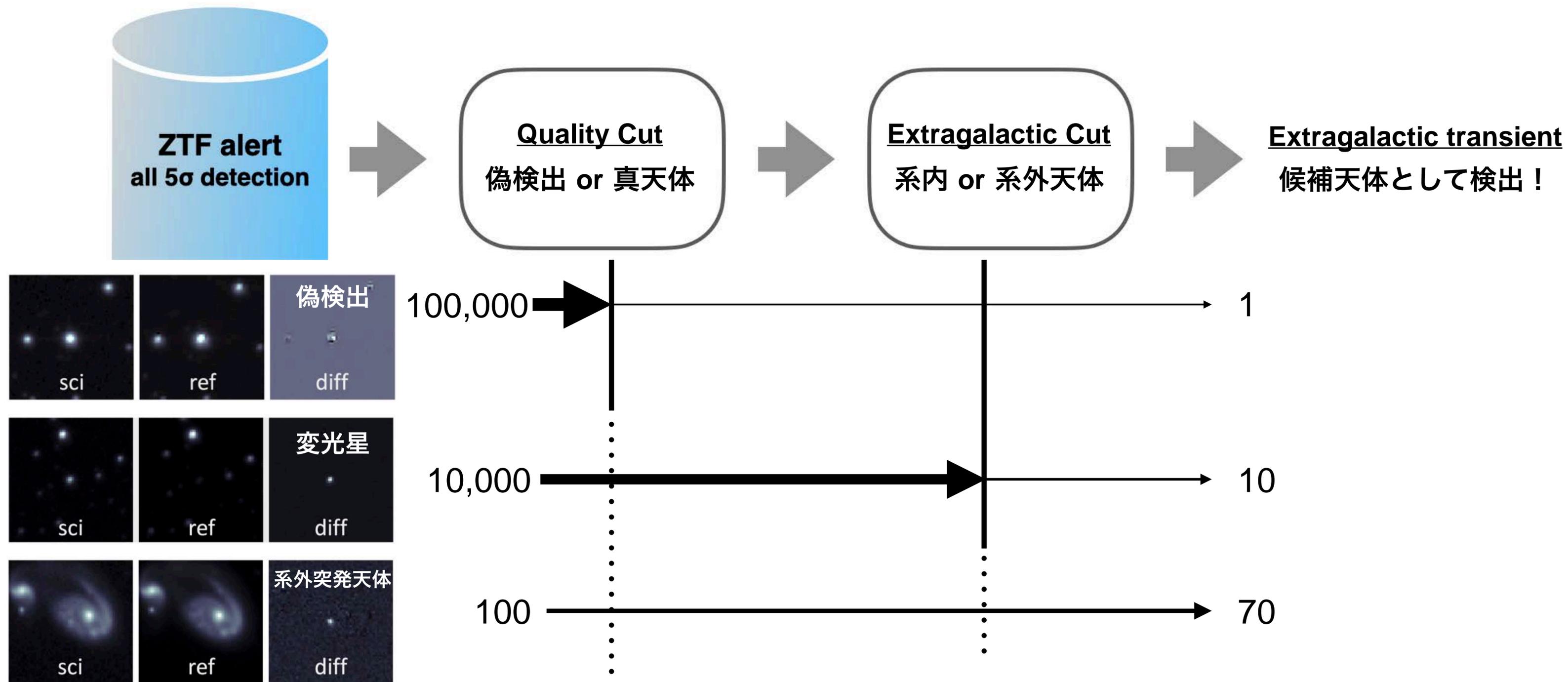
Case 2：候補天体非検出！

検出可能性が十分高い（のに非検出）

→ 起源天体の特徴（明るさ・時間スケール）に制限



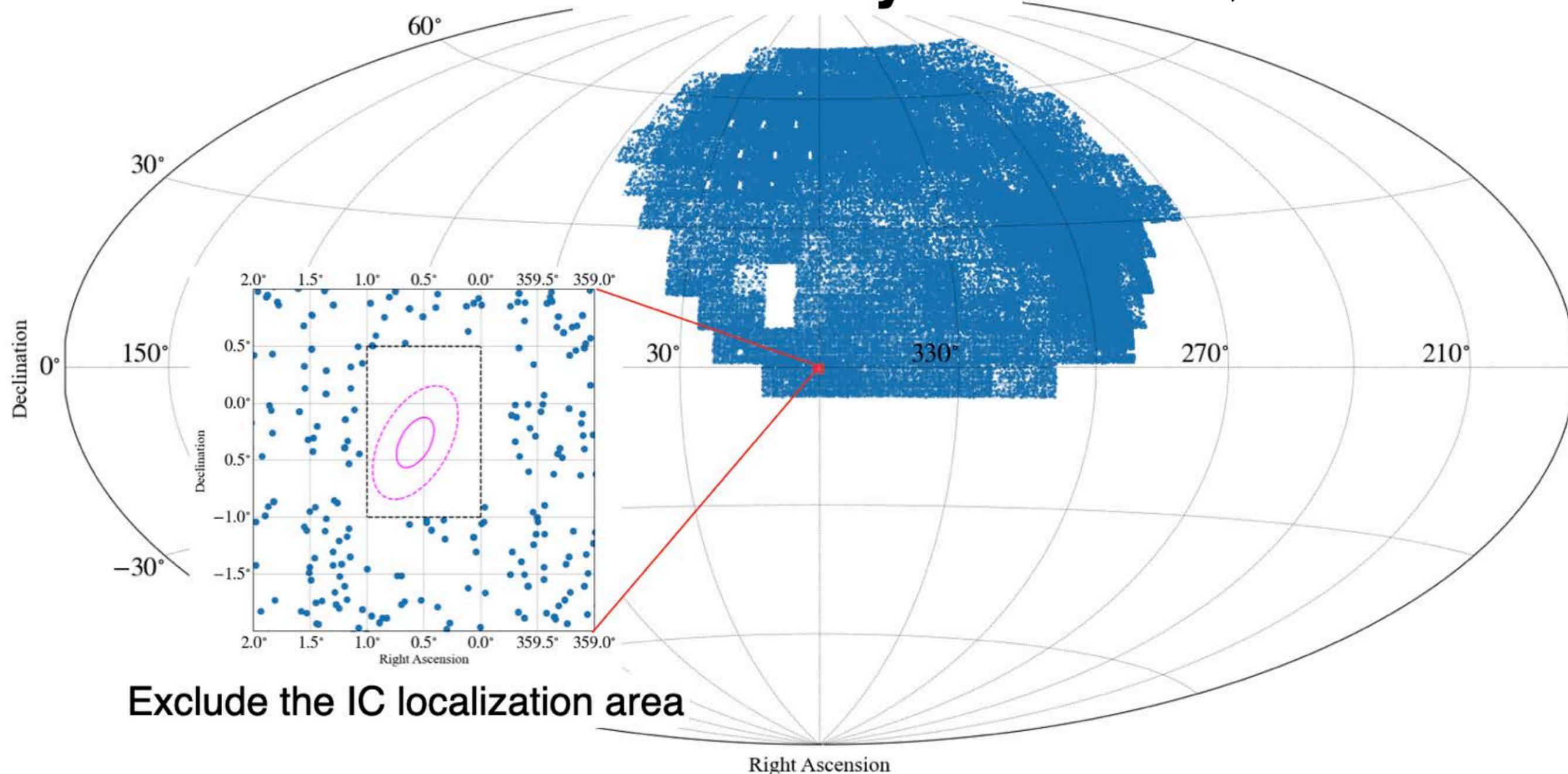
無関係天体の数・検出可能性を事前に精査



候補天体を逃すことなく、大量の無関係天体を除くシステムが必要

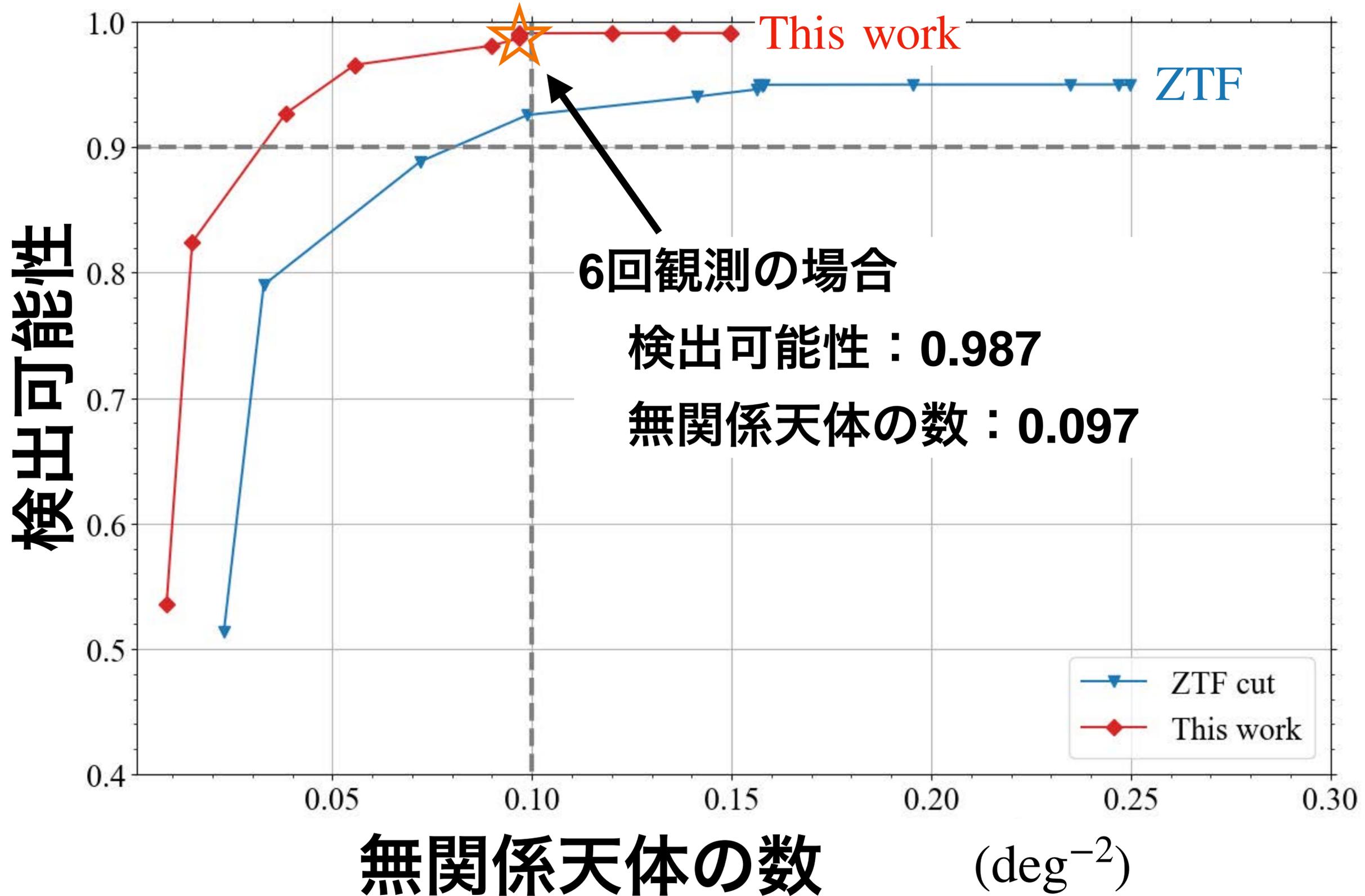
Blind analysis

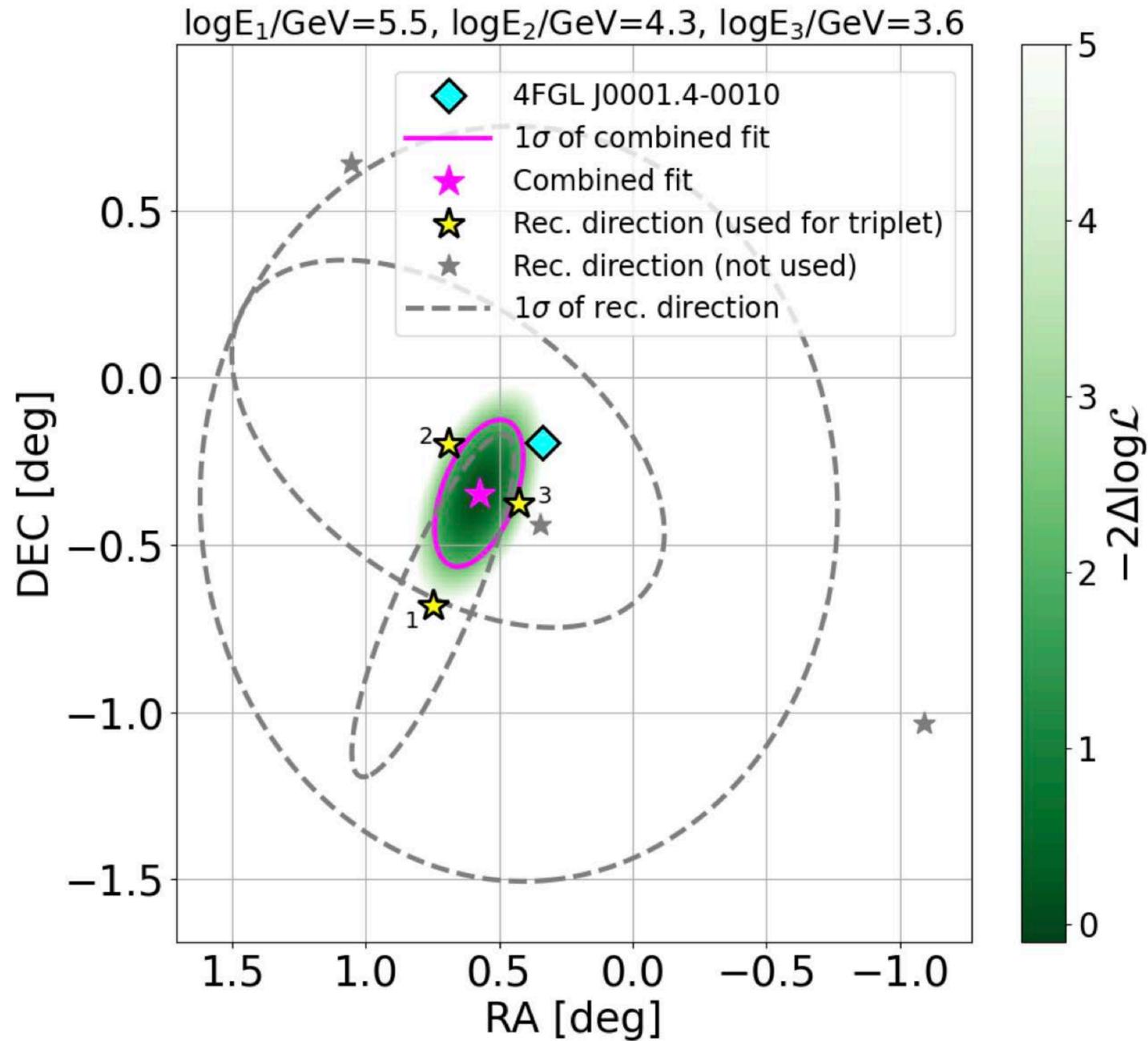
226,576 alerts in 8000 deg²



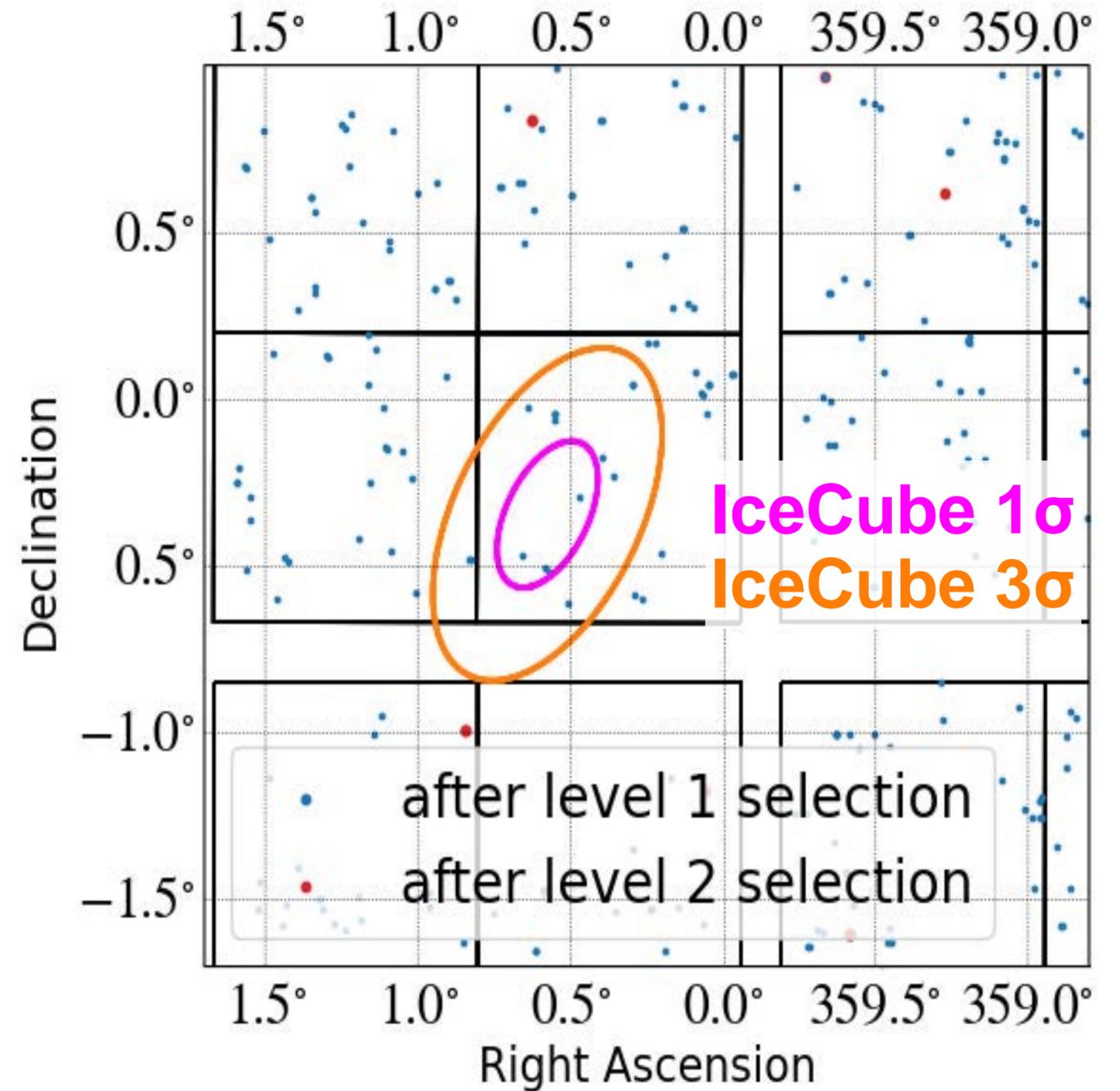
シス
1
2



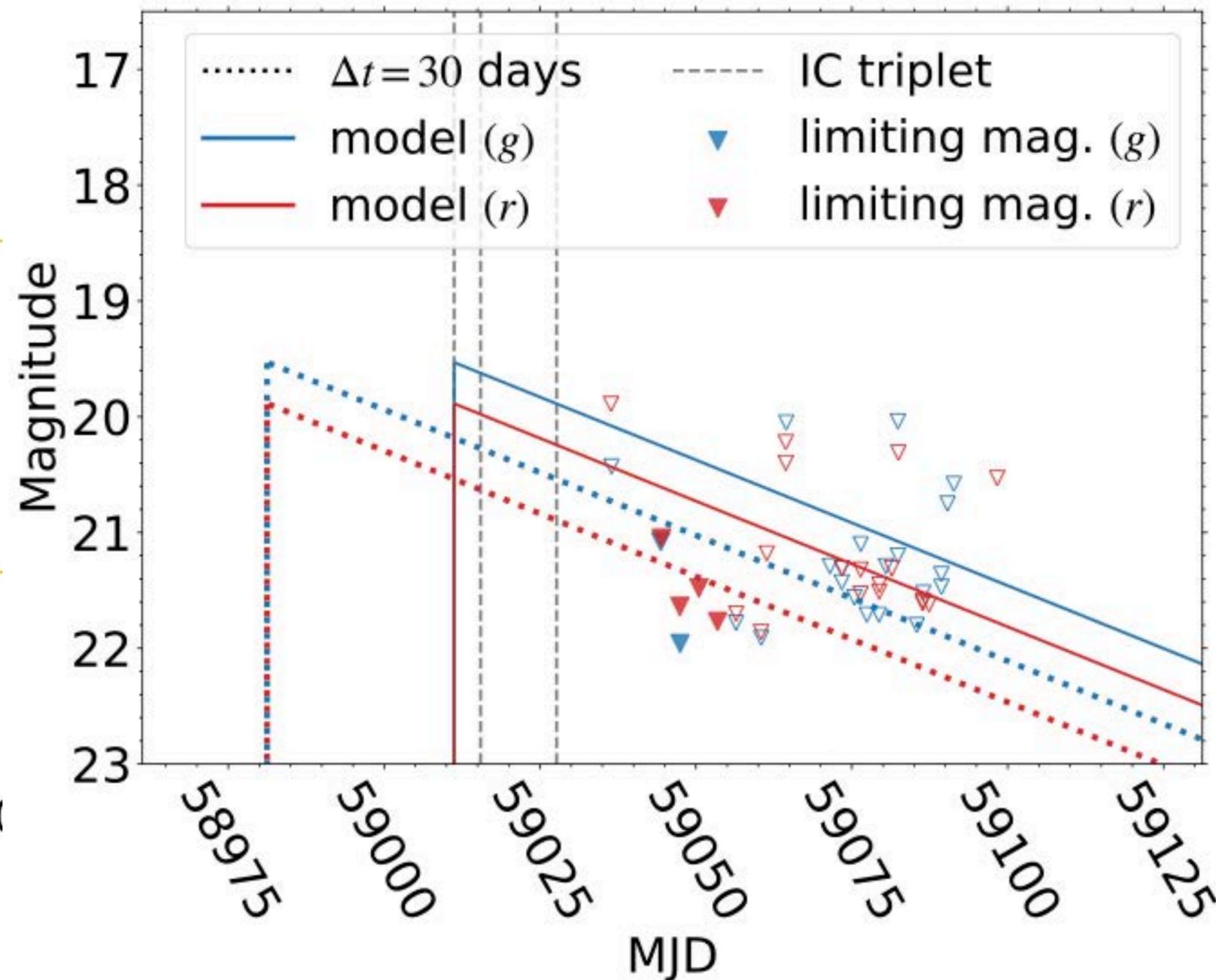
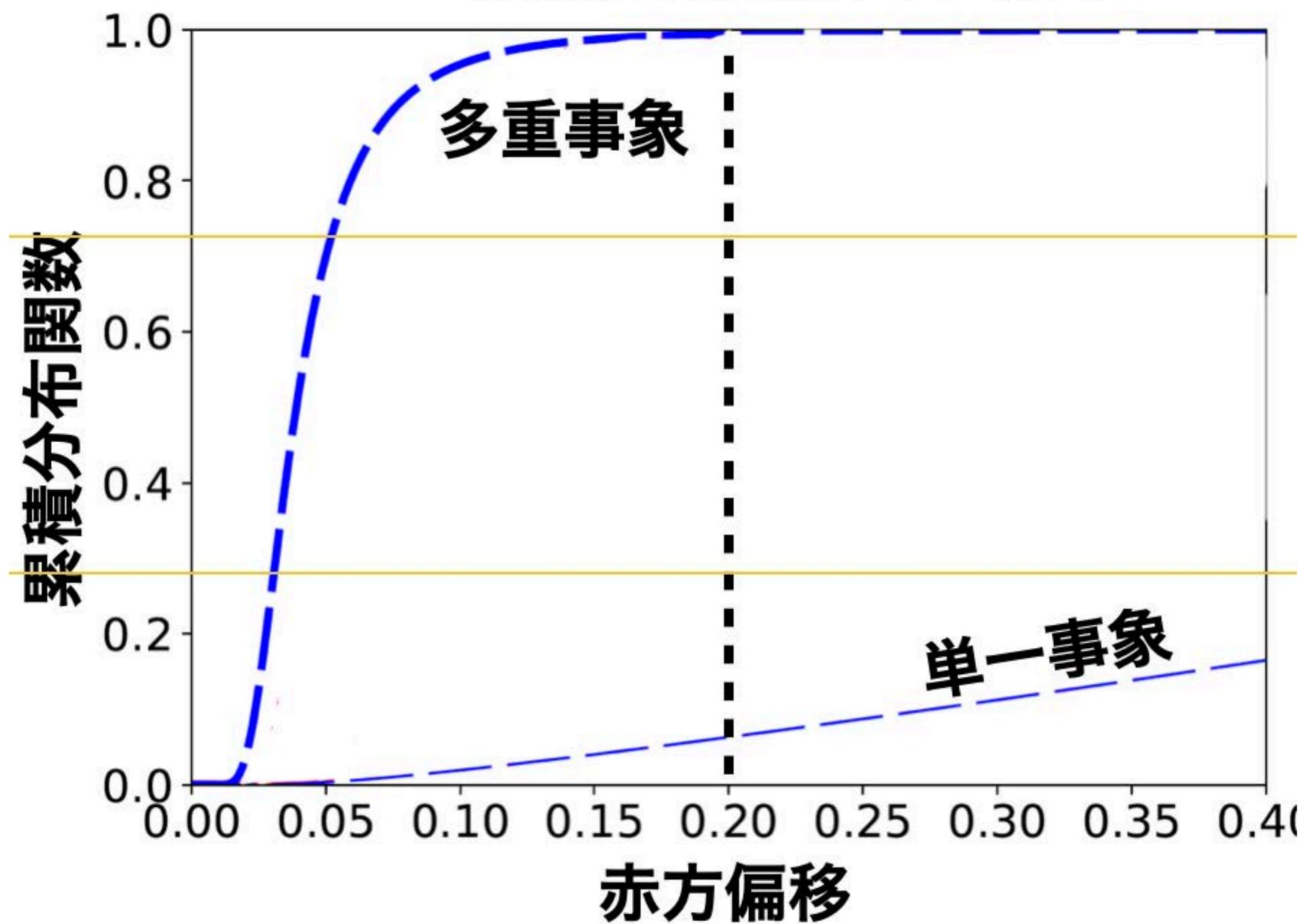




候補天体は検出されず!



超高輝度超新星の場合



実観測で非検出 → 計算された検出可能性 = 各パラメタへの制限

超高輝度超新星の発生率

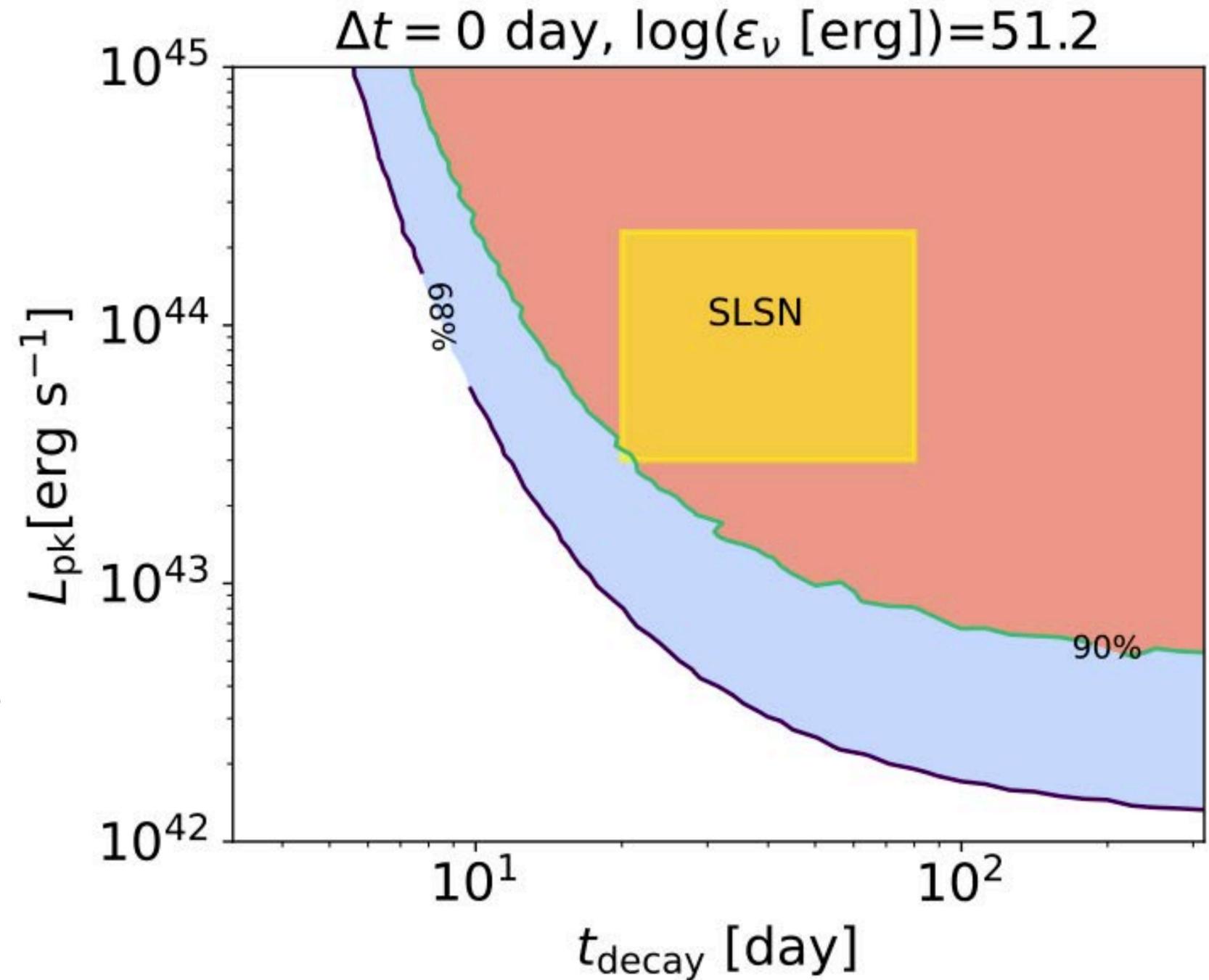
- ニュートリノ放射エネルギーの計算
- 距離分布の推定

距離分布から各パラメタで検出可能性を計算

- 検出可能性の高い領域へ制限

明るく・長く光る天体ほど強く制限される

*ただし、ニュートリノのシグナルネスは 50% 程度
(シグナルネス：ニュートリノが天体起源である確率)



典型的な明るさ・時間スケールに制限をかけることができる

IceCube チーム (清水さん@千葉大)

多重事象に対するリアルタイムアラート開発中

木曾で多重事象の直後に追観測したら？

仮定した観測条件

- ・ 多重事象翌日から観測開始
- ・ 3日間隔で6回追観測
- ・ 限界等級 19 mag

+ 同時に同じ条件の広い領域のデータが取得可能

→ 検出可能性・無関係天体数の推定に最適

IceCube 多重事象 × 木曾フォローアップが突発天体起源の検証において強力

