

IceCube 高エネルギーニュートリノ

可視光突発天体の探査

～ 中小口径望遠鏡による「多重事象」の追観測～

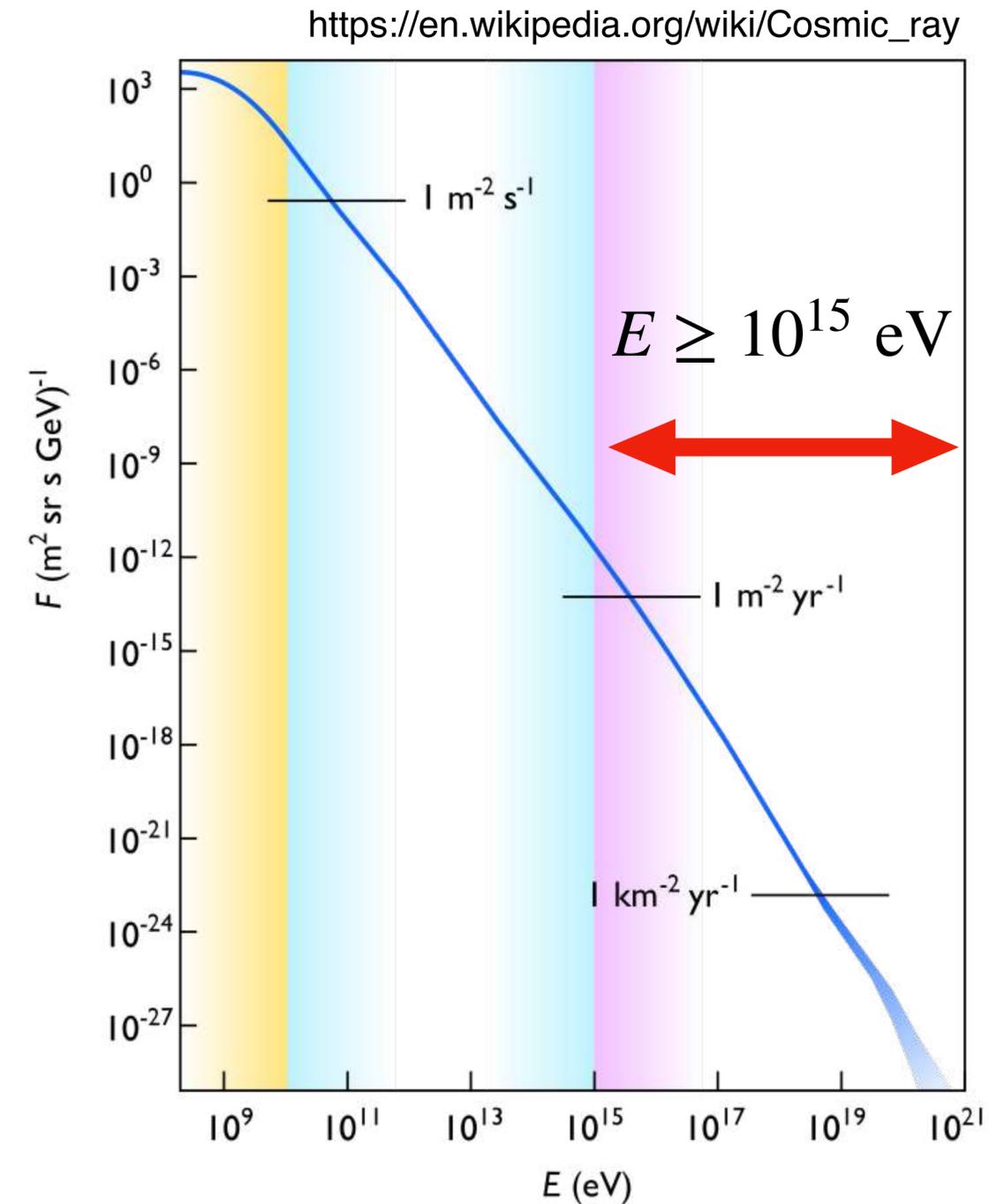
敏蔭星治 (東北大学)

# 大目標：高エネルギー粒子の起源

1912 Hess による宇宙線の（間接的な）発見



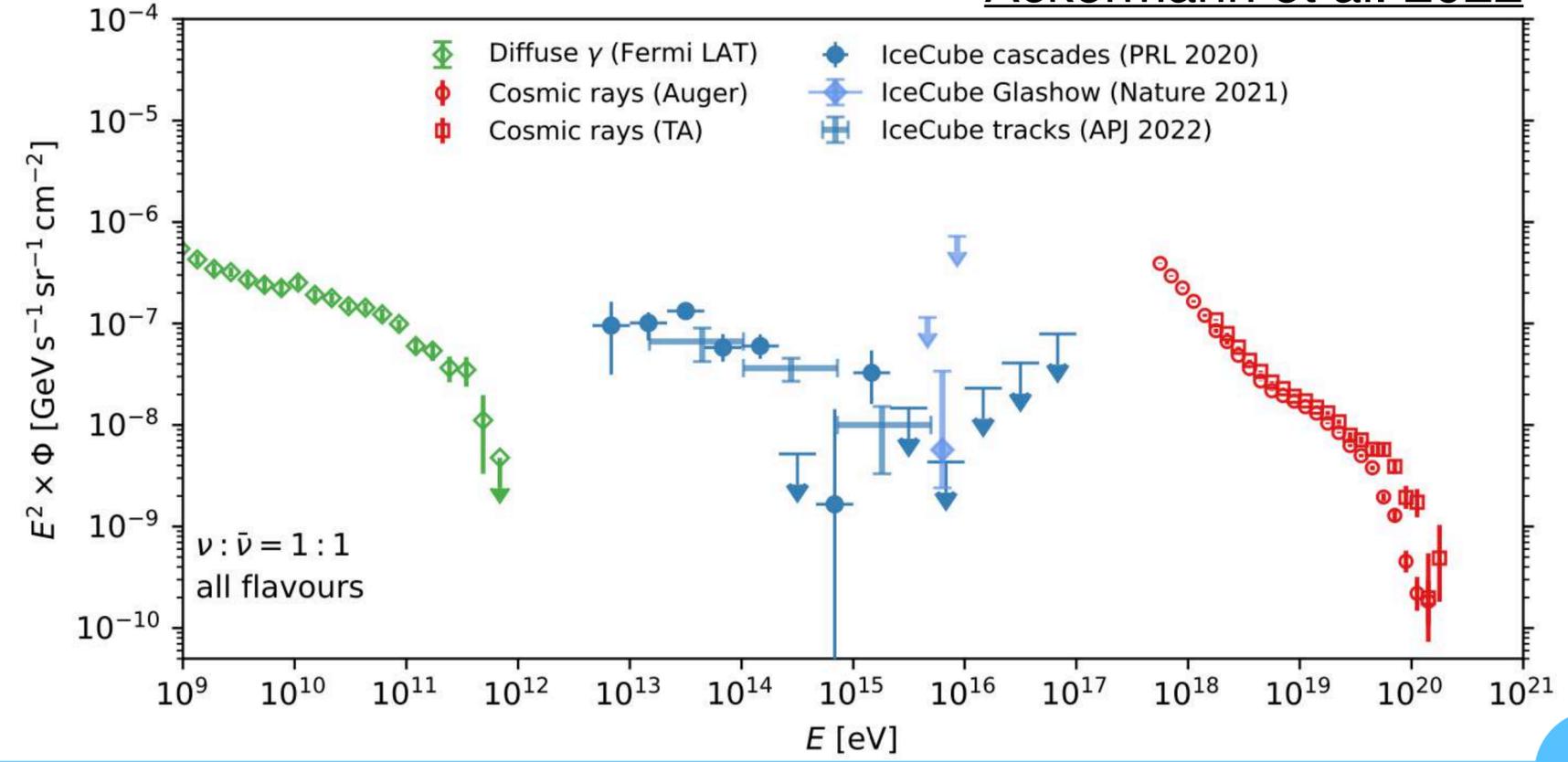
Credit: VF Hess Society, Echophysics, Schloss Pöllau/Austria



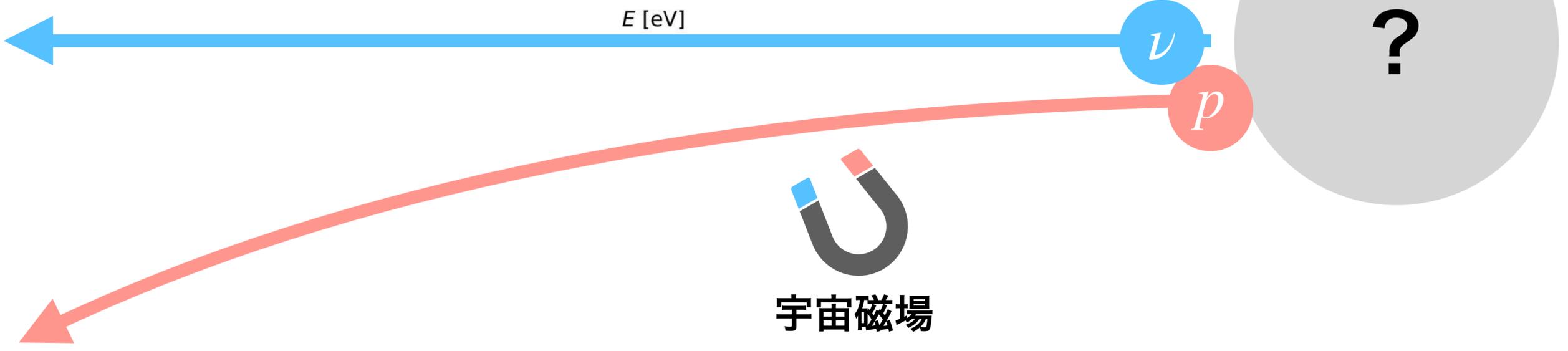
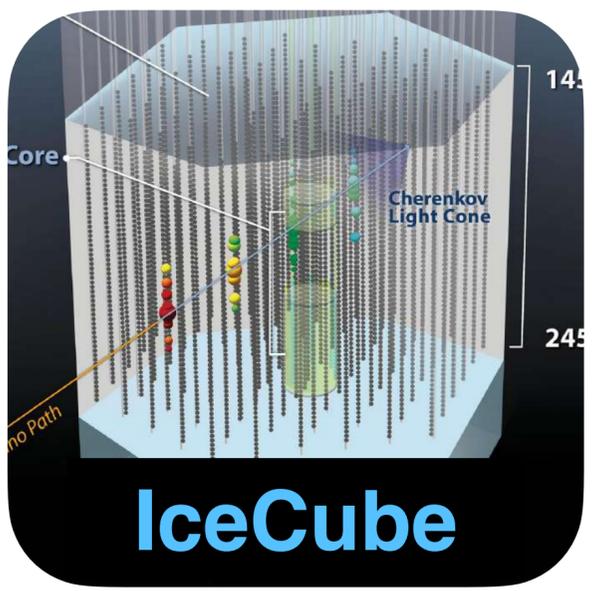
高エネルギー粒子は「どこで」「どのように」生成されているのか？

# 起源を探る鍵：高エネルギーニュートリノ

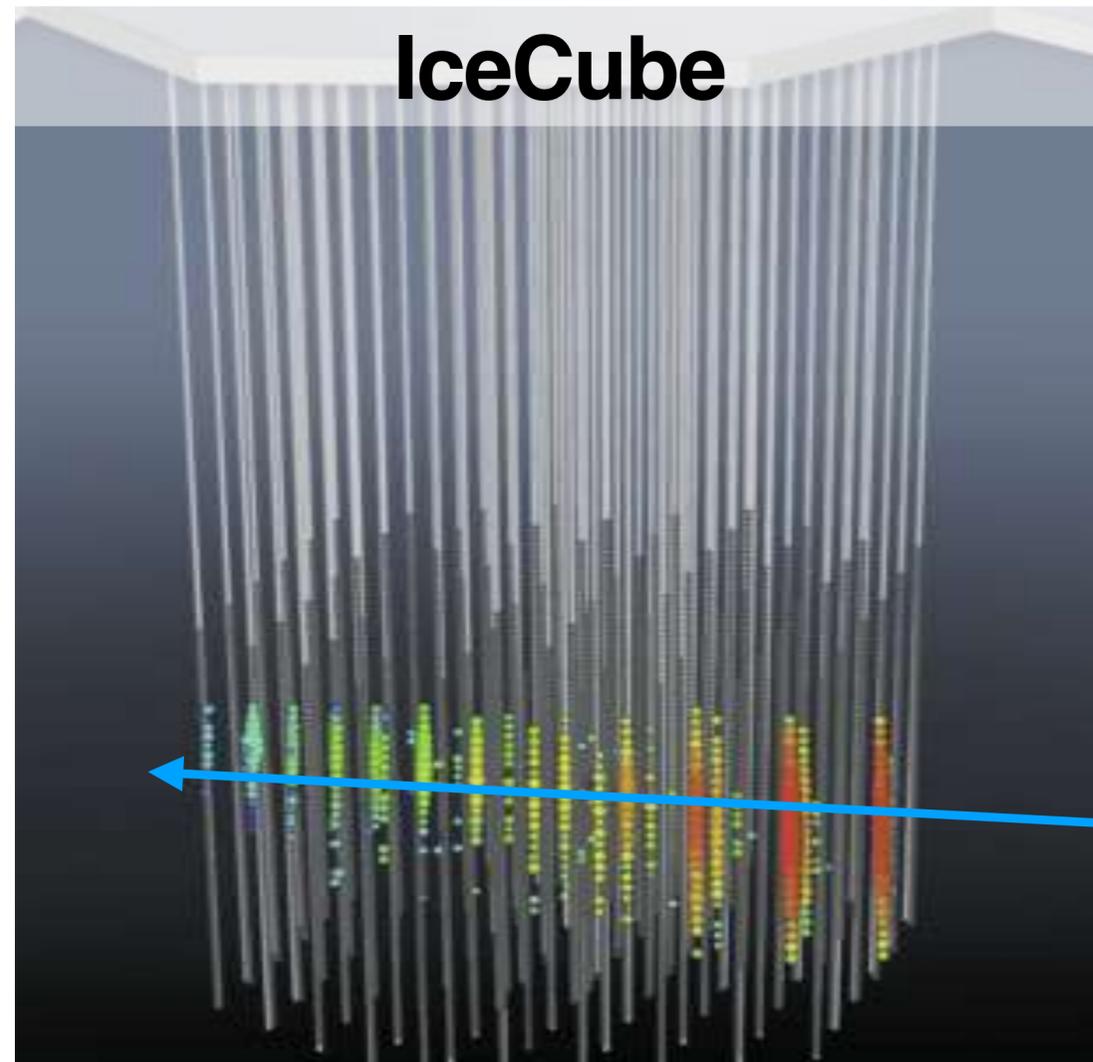
Ackermann et al. 2022



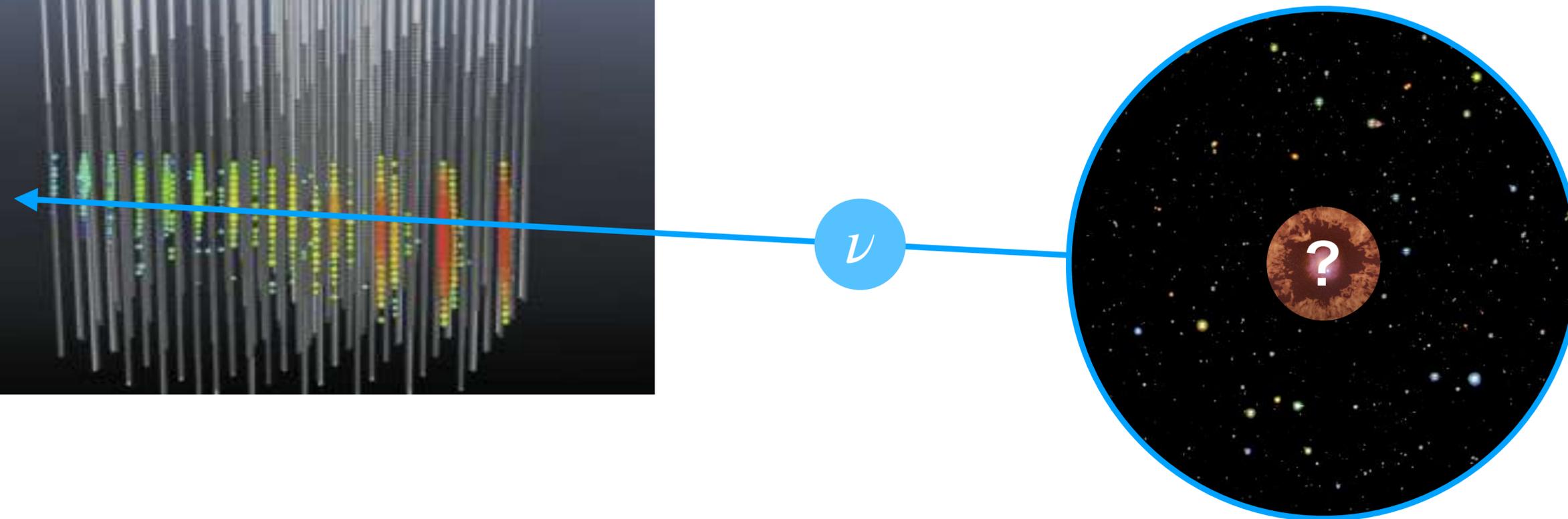
高エネルギー粒子の起源



第一歩：高エネルギー粒子が「どこで」生成されているか知りたい



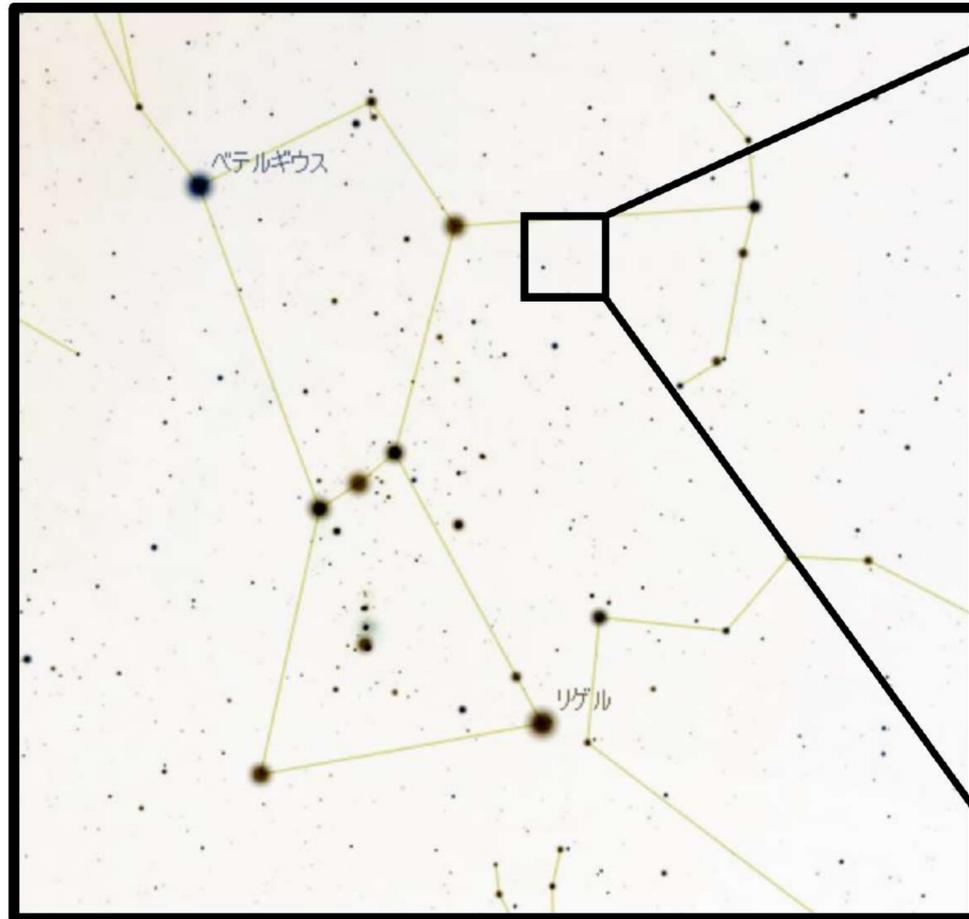
- 到来方向： $\Delta\Omega_{90} \geq 1$  平方度
- IceCube の感度： $z \sim 1 - 2$  まで



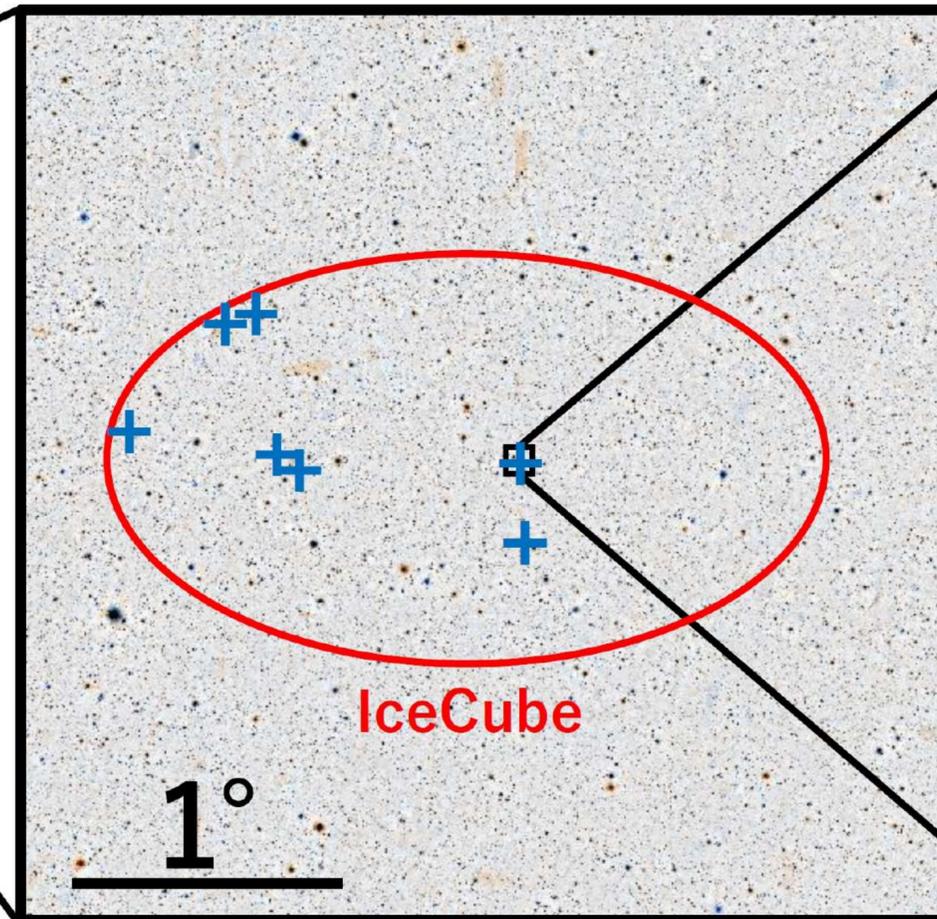
より分解能の高いメッセンジャーによる追観測が必要

# 可視光追観測による起源天体の同定：定常天体の例 5

TXS 0506+056 (Blazarと呼ばれる、ジェットを持つAGN)



Stellariumより作成



Pan-STARRS DR1 より作成

赤い楕円はIceCubeニュートリノ到来方向の誤差の大きさ  
青い+印は候補となったブレーザーの位置



広島大学かなた望遠鏡で取得された画像

高エネルギー宇宙ニュートリノの起源天体の特定に成功 より

[IceCube collaboration 2018, Science](#)

※一方で、Blazar 種族としての 高エネルギーニュートリノへの寄与 < 7% ([IceCube 2017](#))

高エネルギー宇宙ニュートリノの主要な起源は未だ見つかっていない

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. (2025, arXiv.2508.08355)  
Lu et al. (2025, arXiv:2508.19080)

潮汐破壊現象

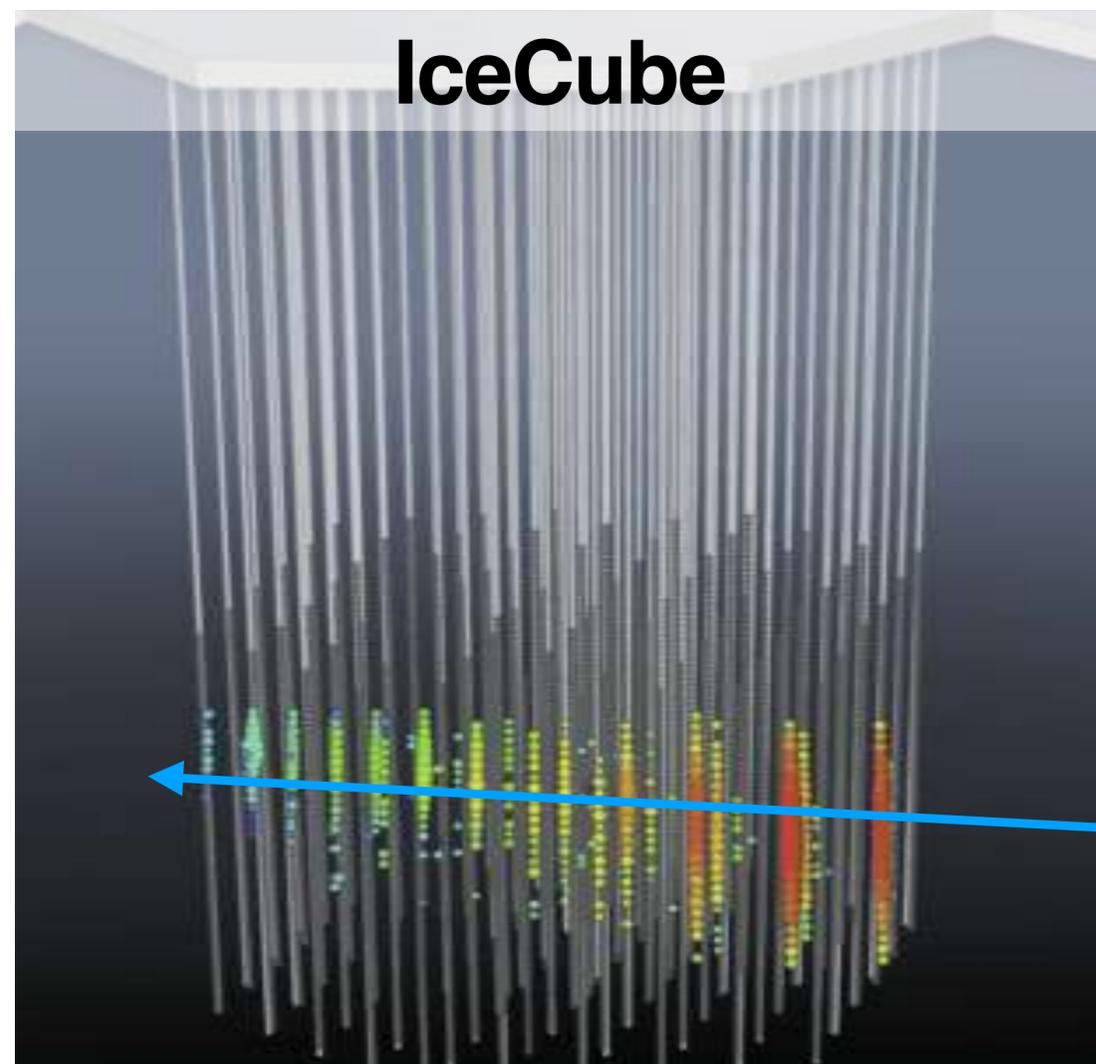


Credit: M. Garlick/SPL/Corbis

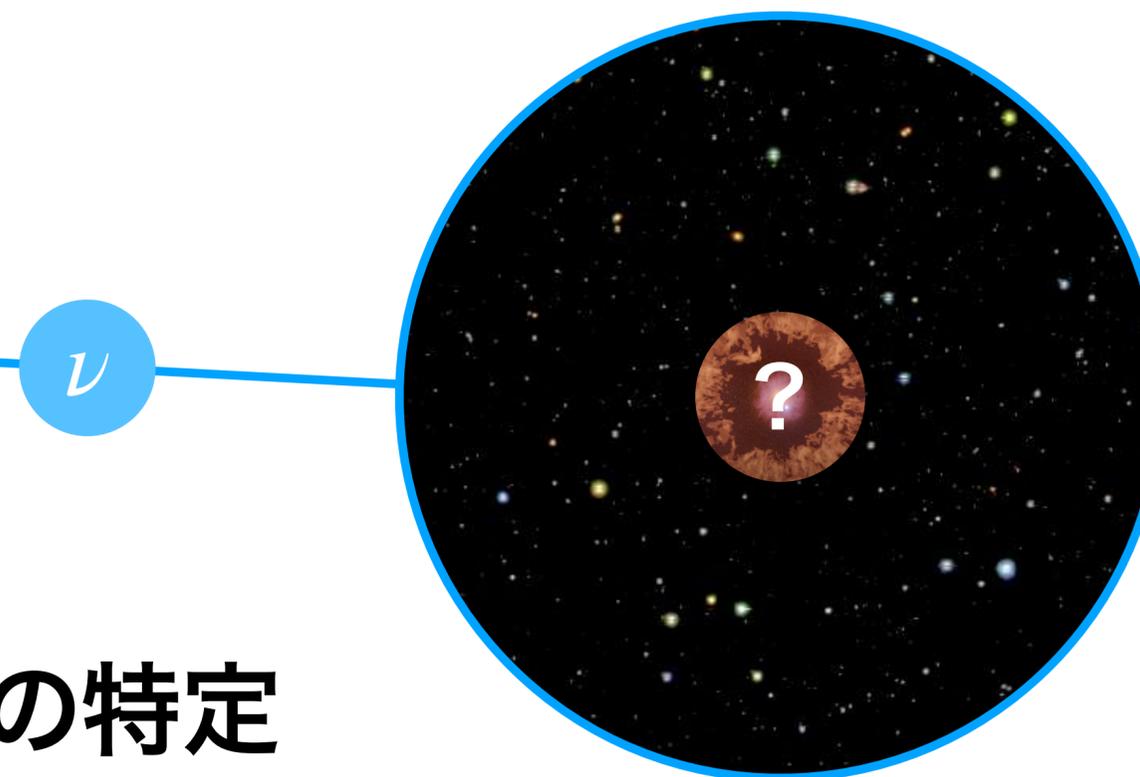
可視光ピークの数百日後に  $\nu$  検出

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？



- ・ 到来方向： $\Delta\Omega_{90} \geq 1$  平方度
- ・ IceCube の感度： $z \sim 1 - 2$  まで

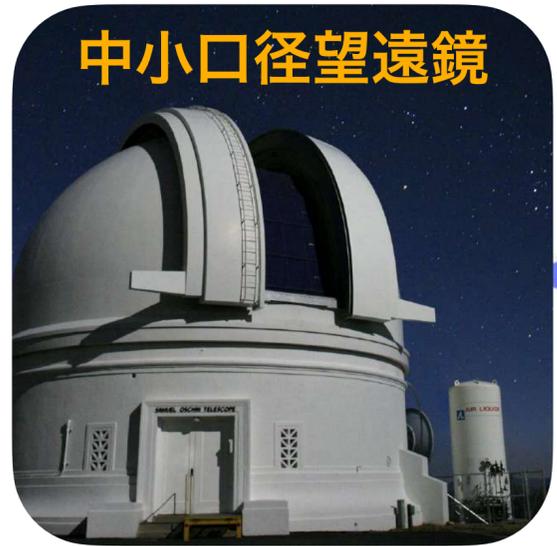


検出！ → ニュートリノ起源の特定  
非検出！ → ニュートリノ起源の種族・特徴（明るさなど）に制限  
実際は「無関係天体」と「検出可能性」という障壁

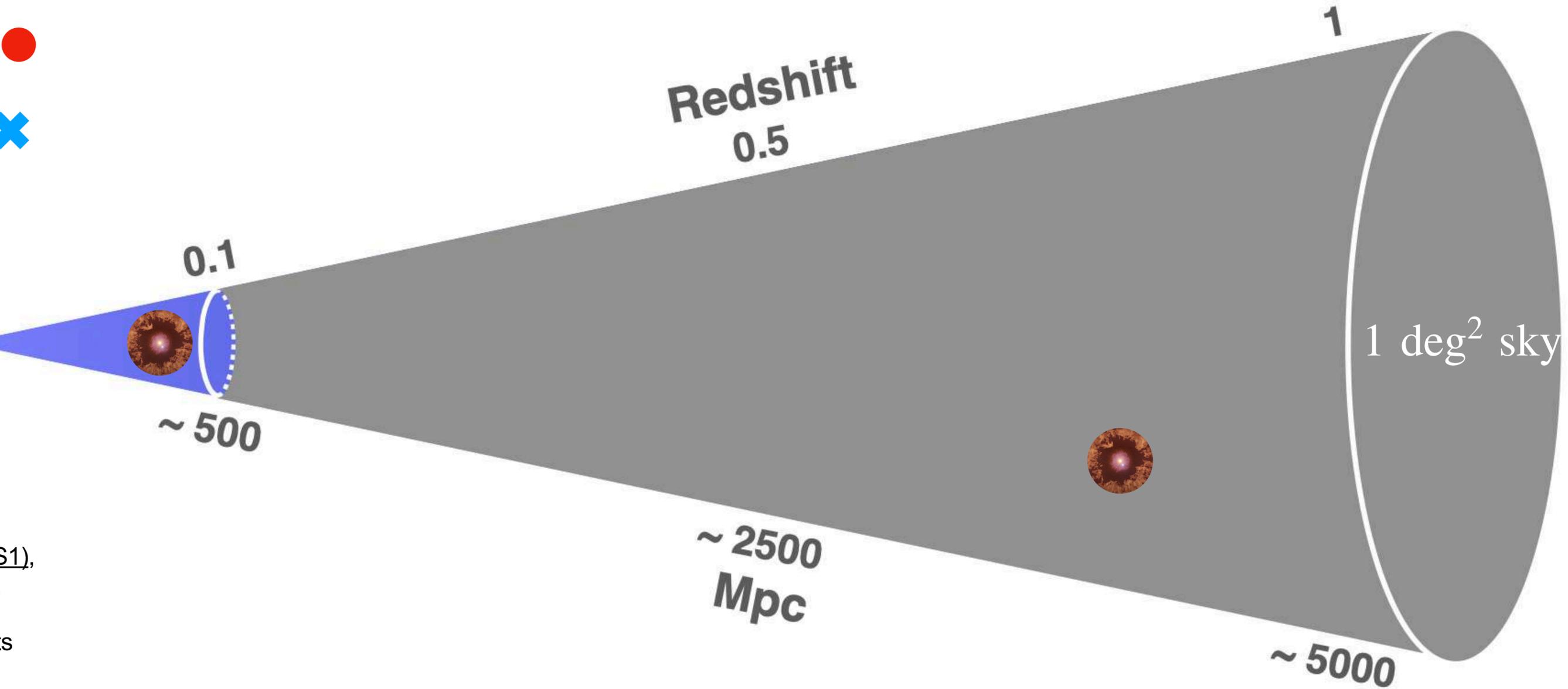
# これまでのニュートリノ追観測：検出可能性という壁 8

無関係天体：●

検出可能性：✕

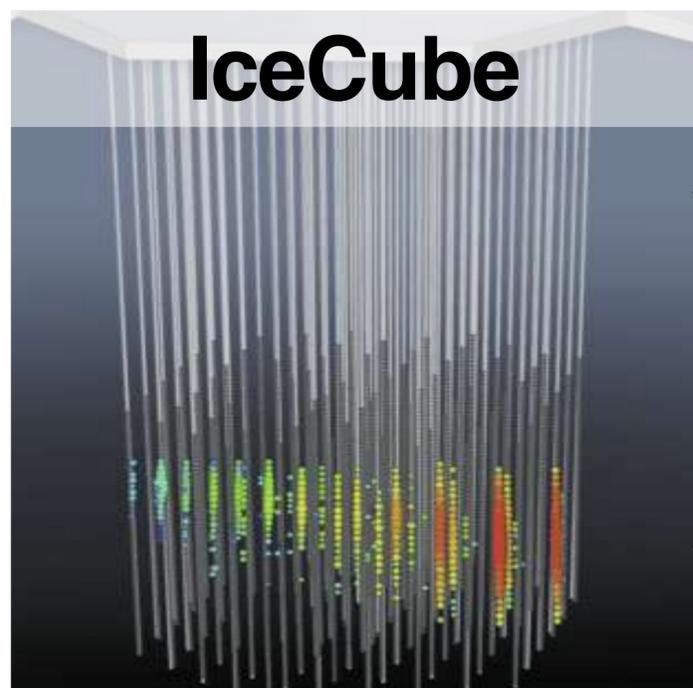


Aartsen et al. 2015 (PTF),  
Kankare et al. 2019 (Pan-STARRS1),  
Necker et al. 2022 (ASAS-SN),  
Stein et al. 2023 (ZTF),  
+ more papers on specific events



1. 候補天体**検出**！ → 統計的な見積もりに基づき、起源天体が**検証可能**
2. 候補天体**非検出** → 起源天体ではない？遠くにいただけ？**検証不可能**

# どのように現状を打開するか



IceCube

1. 単一事象

2. 多重事象



Subaru/HSC



Rubin/LSST

大型望遠鏡による探査

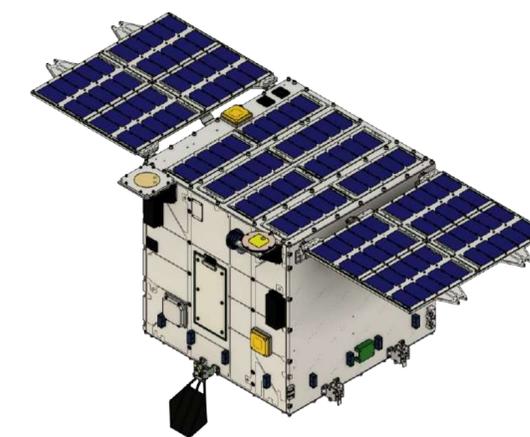
中小口径望遠鏡による探査



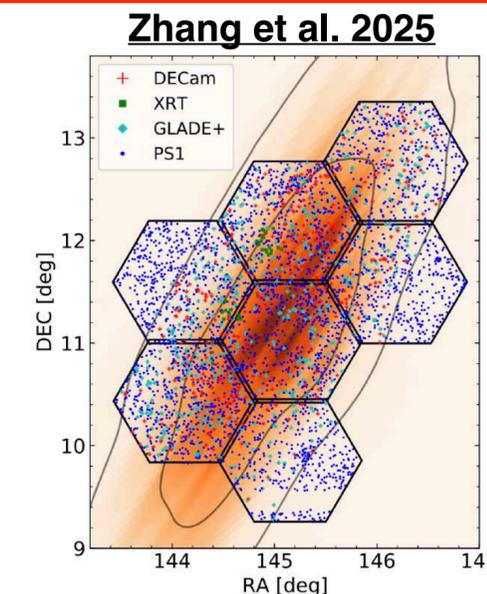
Kiso/Tomo-e



MITSuME



うみつばめ



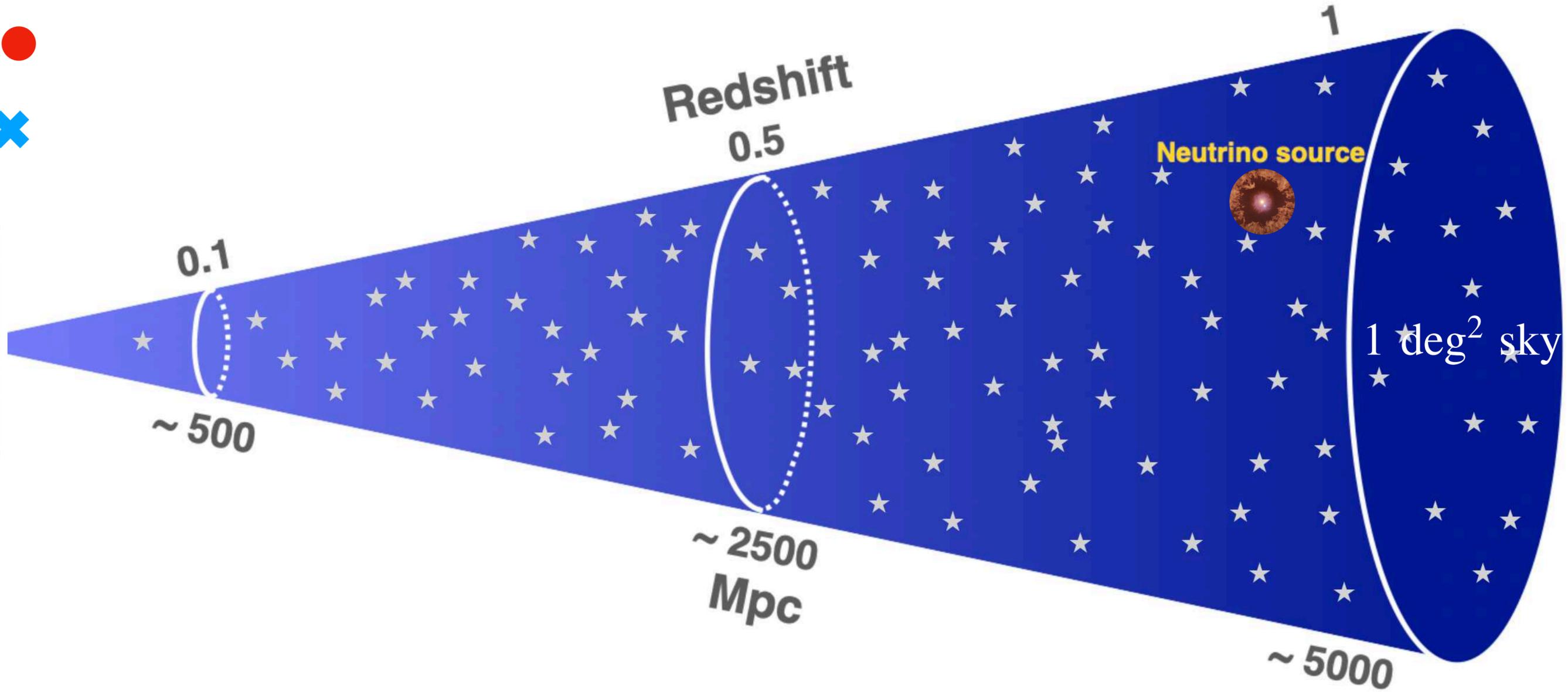
多天体分光

提供: 東京工業大学

# 打開策 1. 大きい望遠鏡を使う

検出可能性：●

無関係天体：✕



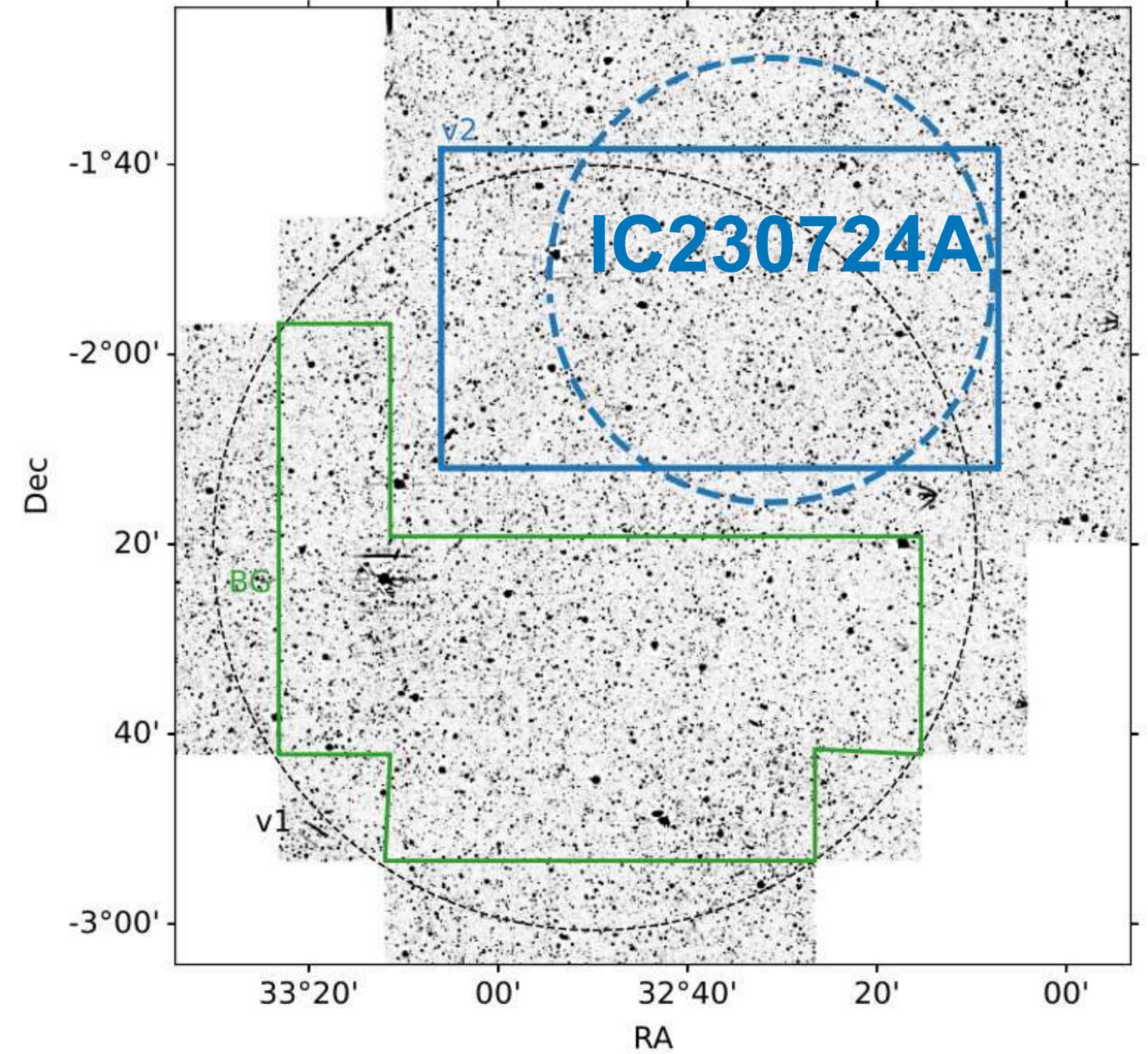
1. 候補天体**検出**！ → 無関係天体を除外する手法の開発が必要

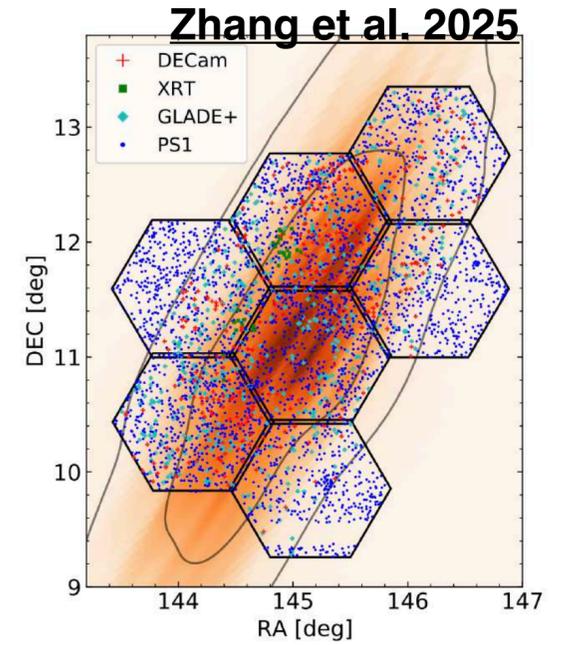
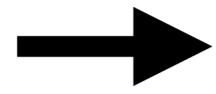
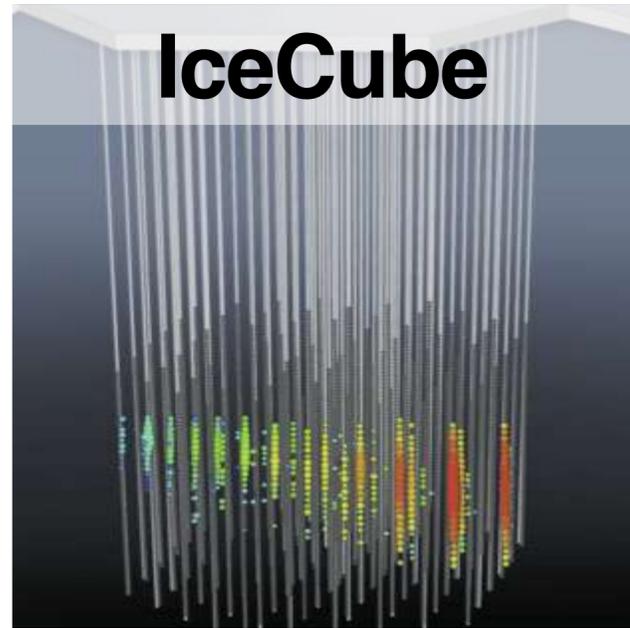
2. 候補天体**非検出** → 候補天体が起源天体になり得るか**強い制限**

## IC 230724A に対する Subaru/HSC follow-up

- 高い方向決定精度  $\Delta\Omega_{90} \sim 0.6 \text{ deg}^2$
- Subaru/HSC による追観測 (PI 木村成生さん)
  - ✓ 望遠鏡トラブルにより2 epoch のみ
- 測光データに基づく候補天体の探査
  - ✓ データ特性や検出される天体の理解
  - ✓ 光度曲線データを用いた分類手法の開発

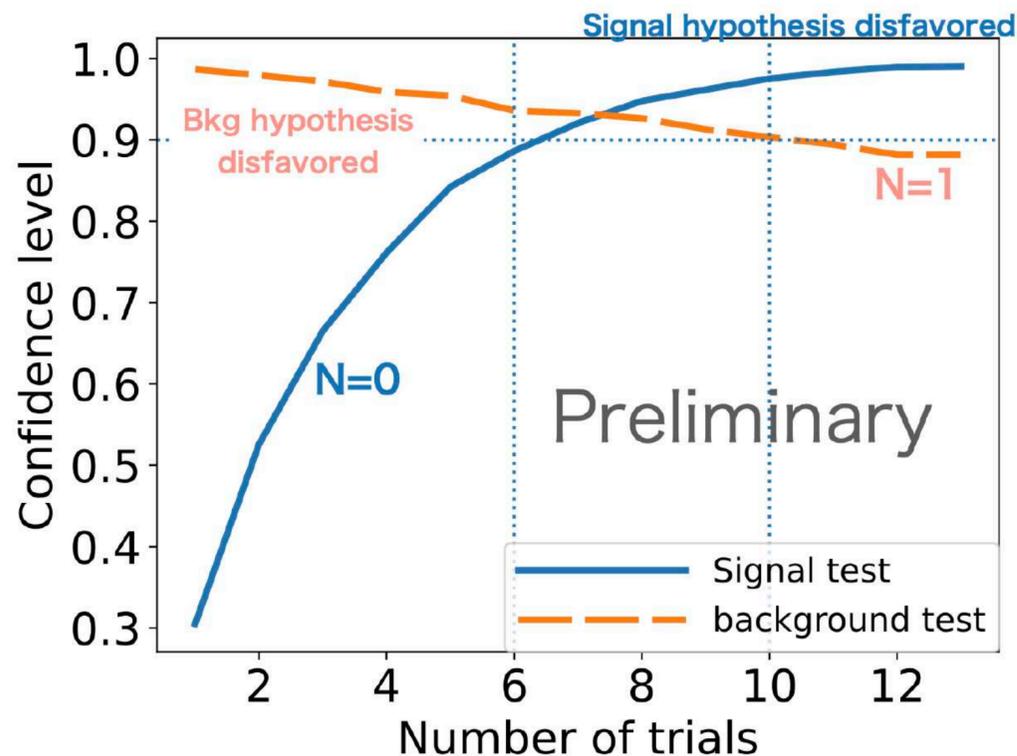
Kimura, Tanaka, ST, et al. in prep





大型望遠鏡による探査

多天体分光



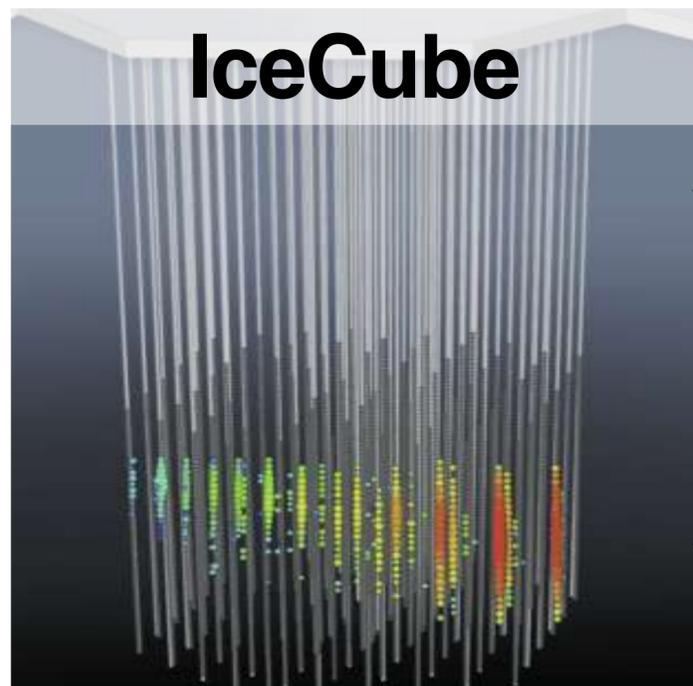
## Rubin/LSST サーベイデータの利用

- ~ 10 イベントの観測
- 潮汐破壊現象を検証可能

## 多天体分光による分光

- より高精度な分類
- 放射メカニズムの検証
- e.g., 星周物質との相互作用

# どのように現状を打開するか



IceCube

1. 単一事象

2. 多重事象



Subaru/HSC



Rubin/LSST

大型望遠鏡による探査

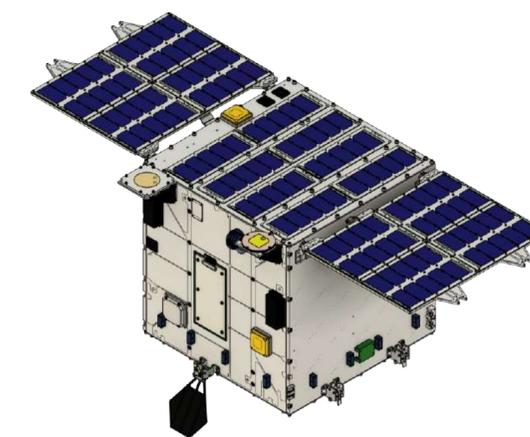
中小口径望遠鏡による探査



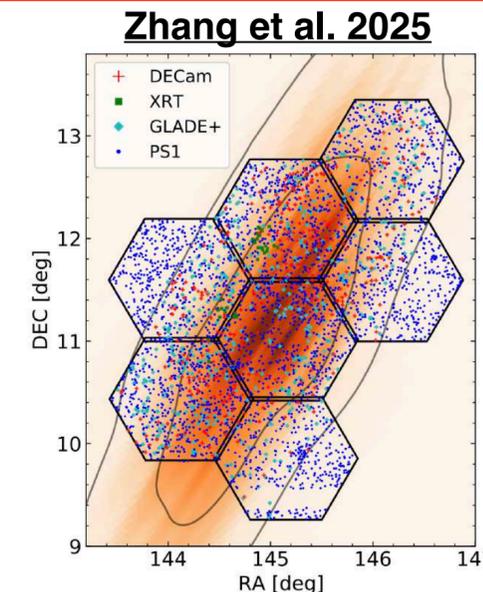
Kiso/Tomo-e



MITSuME



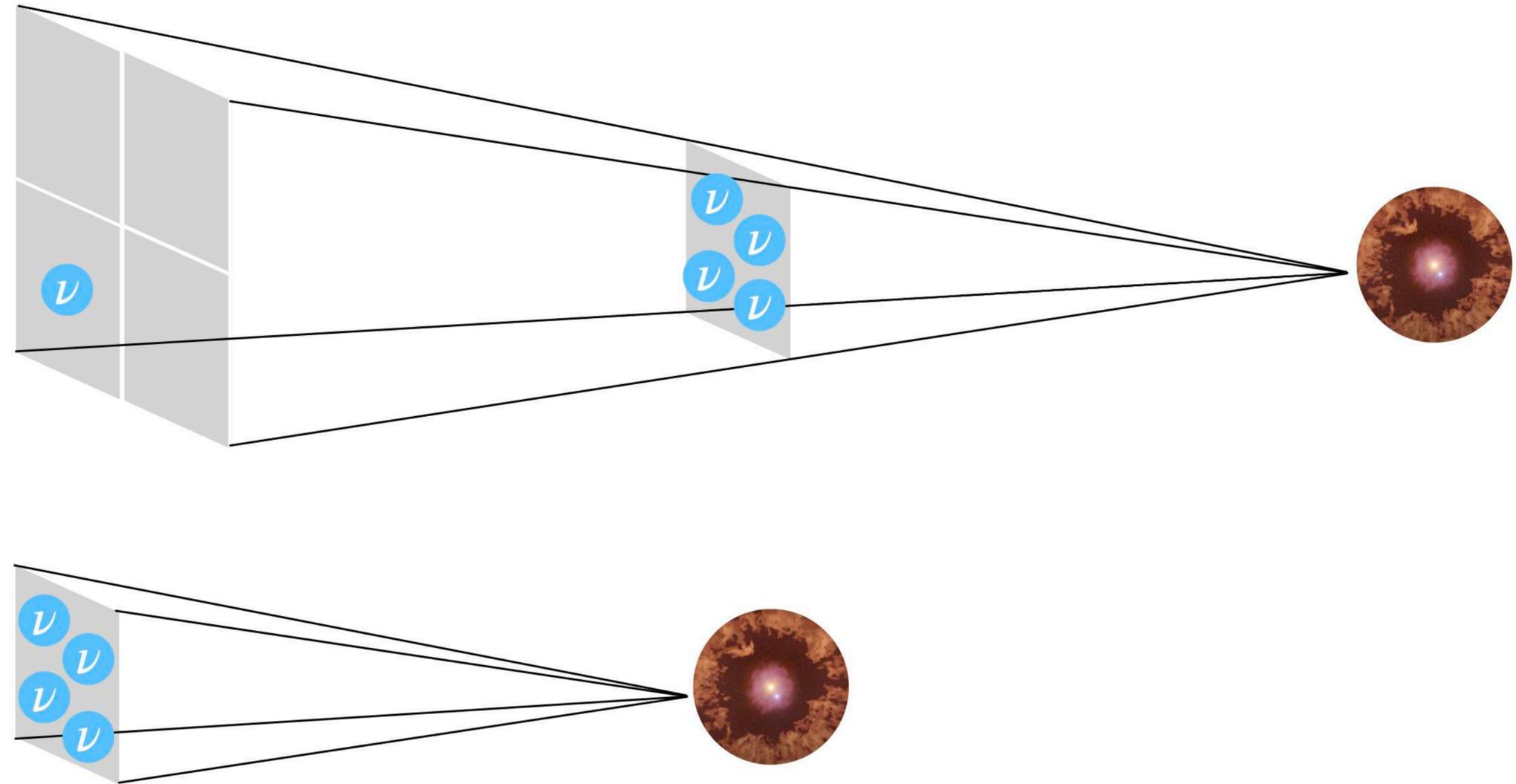
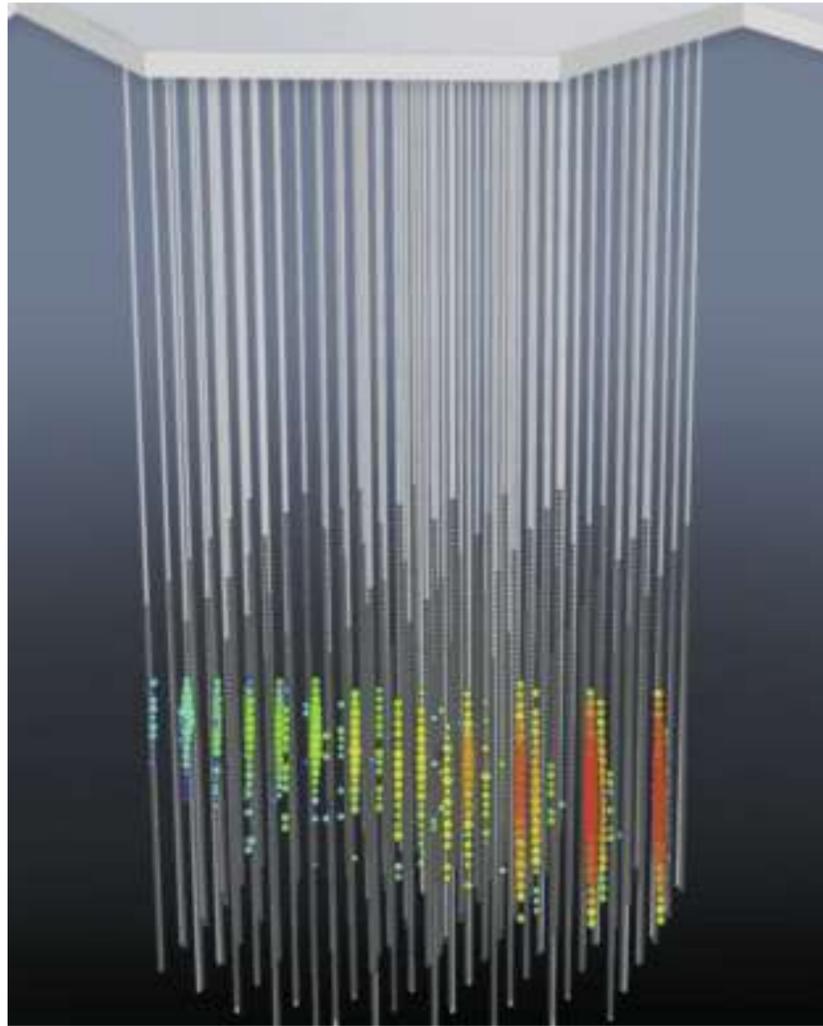
うみつばめ



多天体分光

提供: 東京工業大学

“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

## 超高輝度超新星の場合

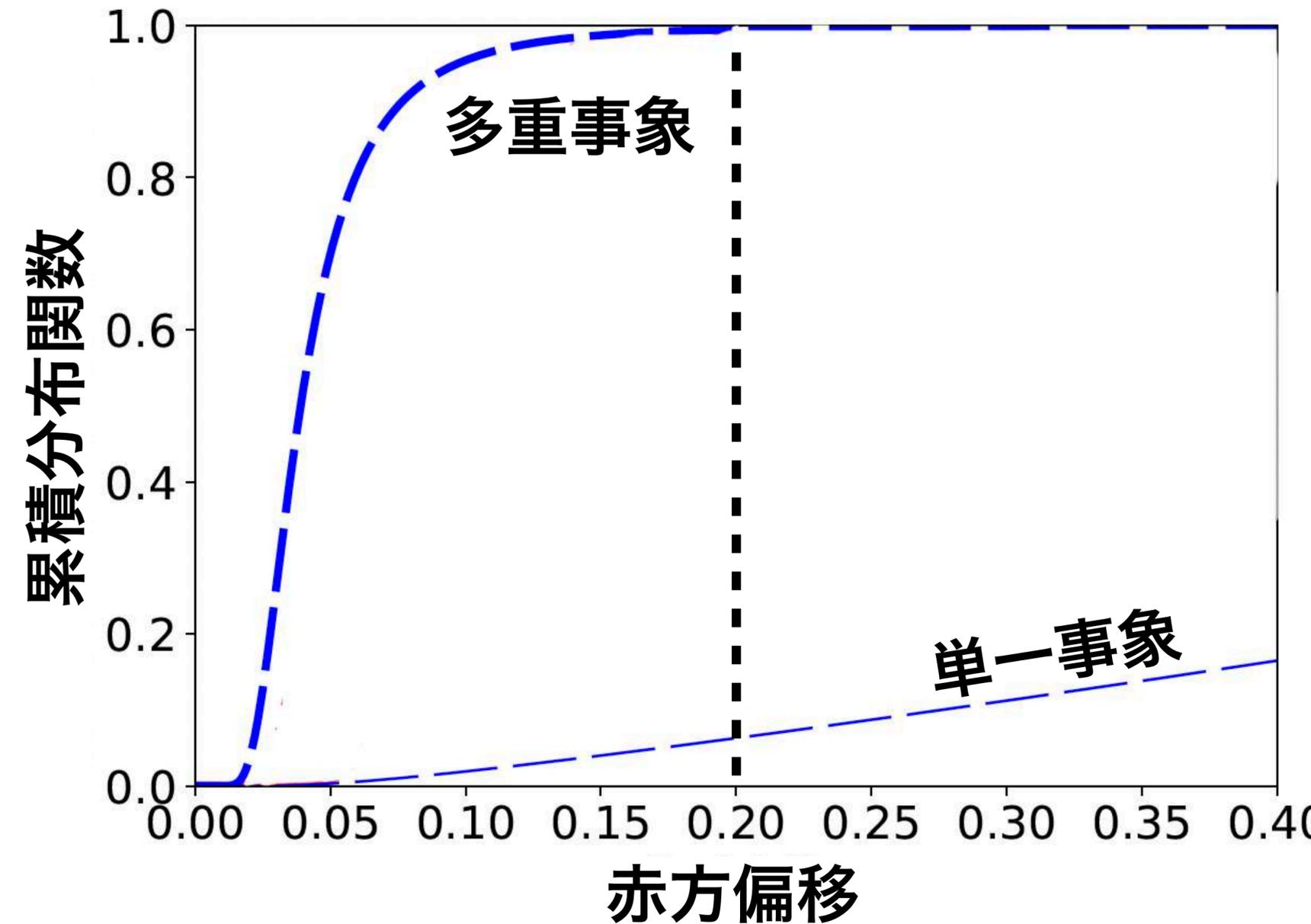
観測されている  
全ニュートリノフラックス

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！

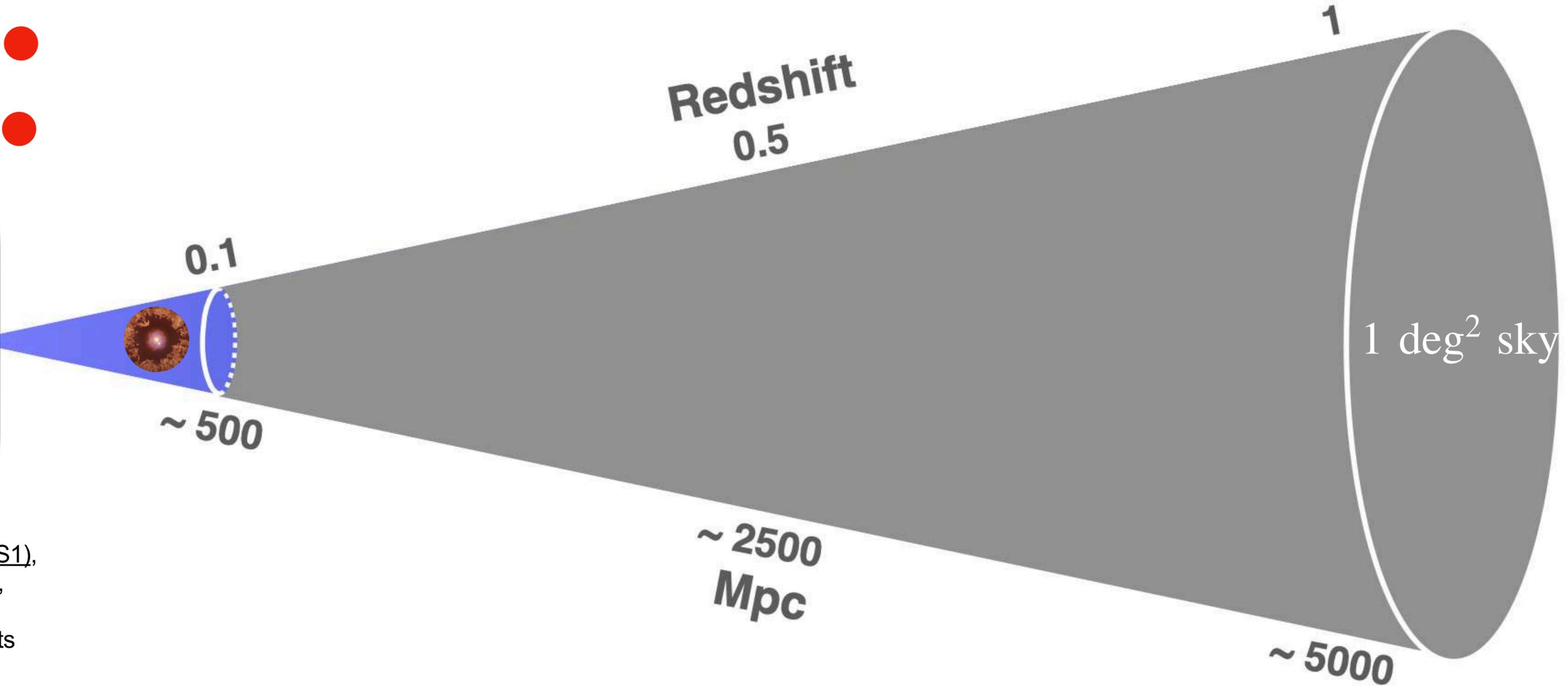
多重事象の追観測であれば  $z \lesssim 0.2$  までに注目することが可能

無関係天体：●

検出可能性：●



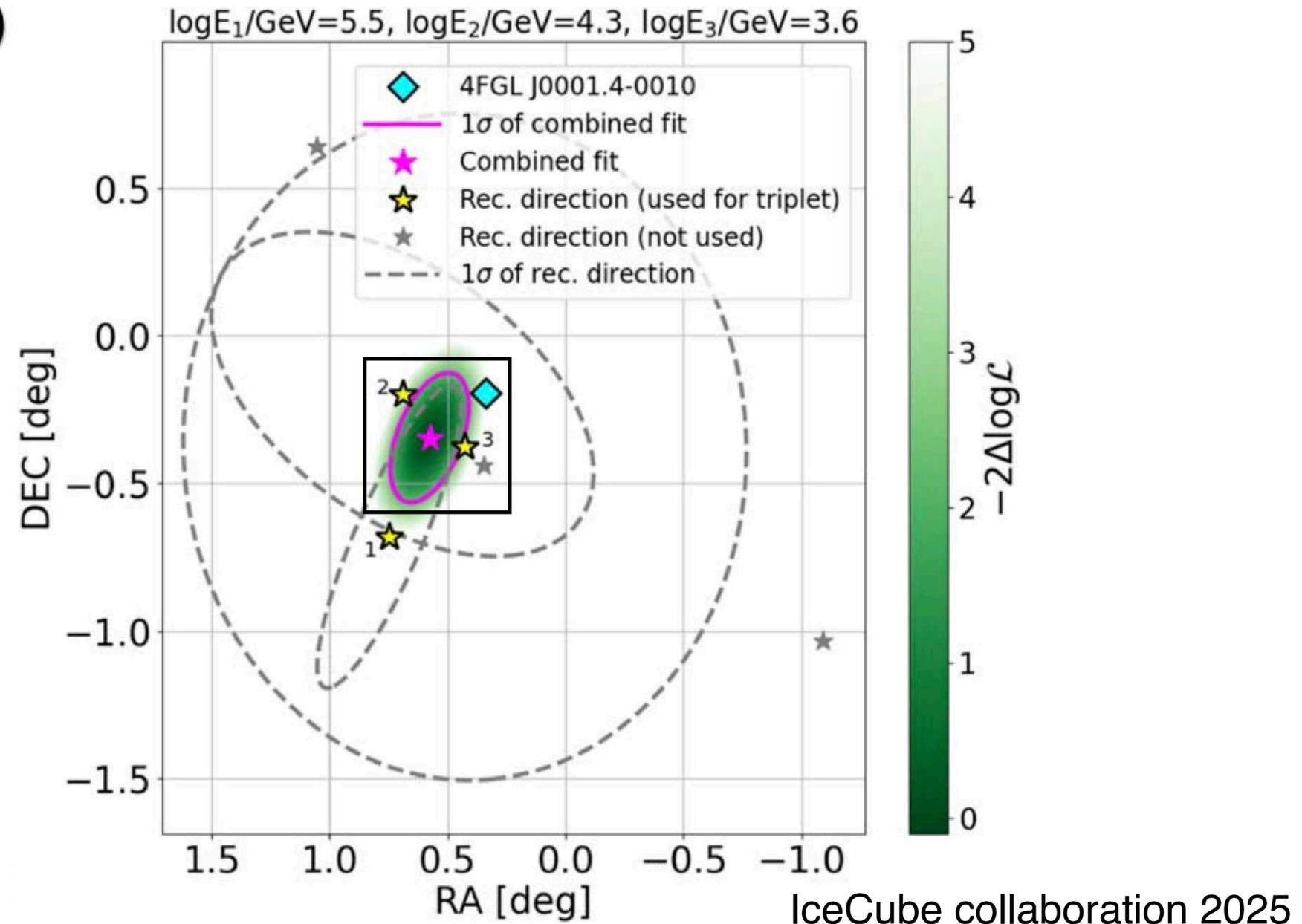
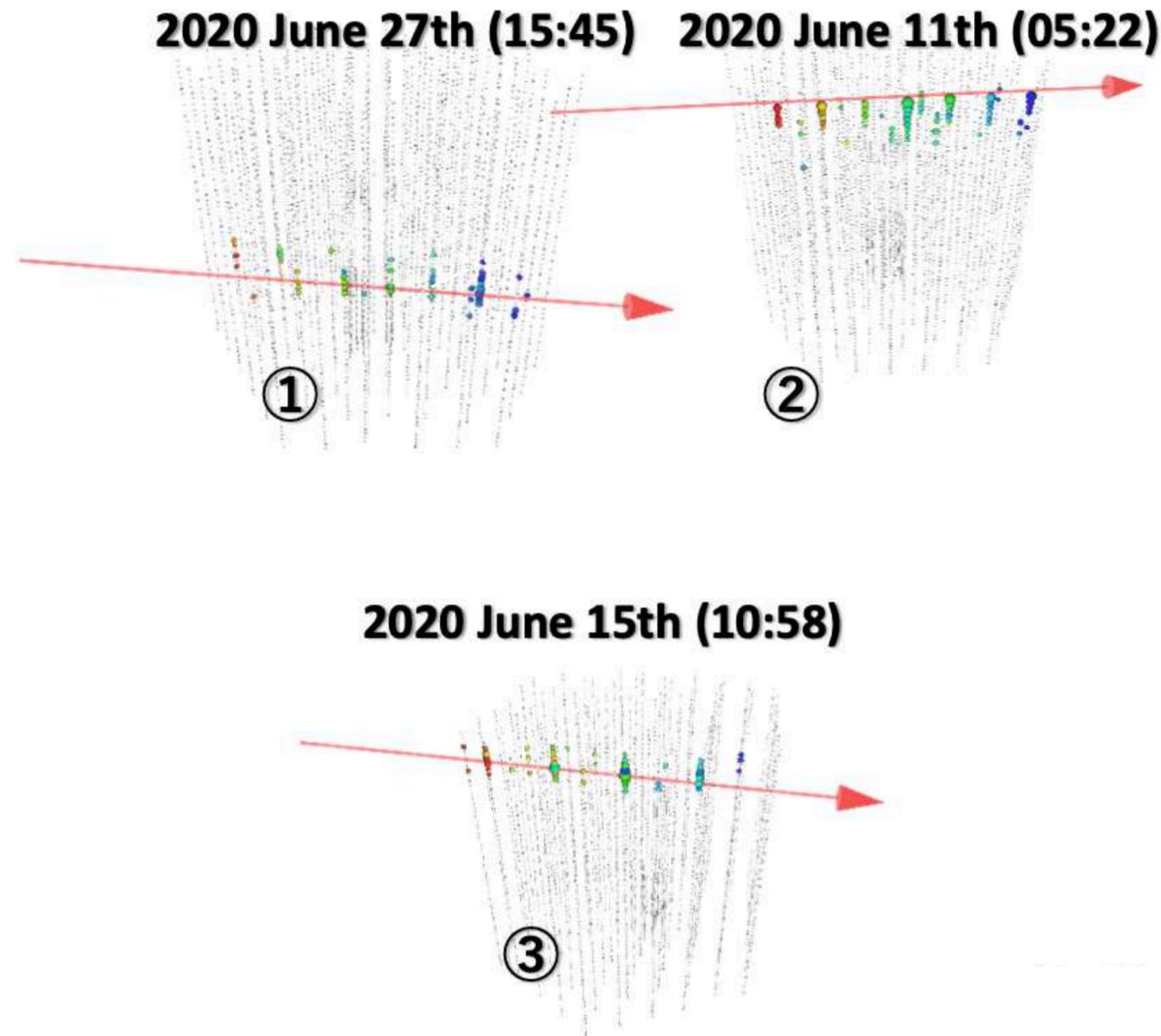
中小口径望遠鏡



Aartsen et al. 2015 (PTF),  
Kankare et al. 2019 (Pan-STARRS1),  
Necker et al. 2022 (ASAS-SN),  
Stein et al. 2023 (ZTF),  
+ more papers on specific events

1. 候補天体**検出**！ → 統計的な見積もりで起源天体といえるか**検証可能**
2. 候補天体**非検出** → 起源天体の観測的特徴に対して**強い制限**

2020年6月、同方向 ( $\leq 3$  deg) & 同時期 ( $\leq 30$  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！

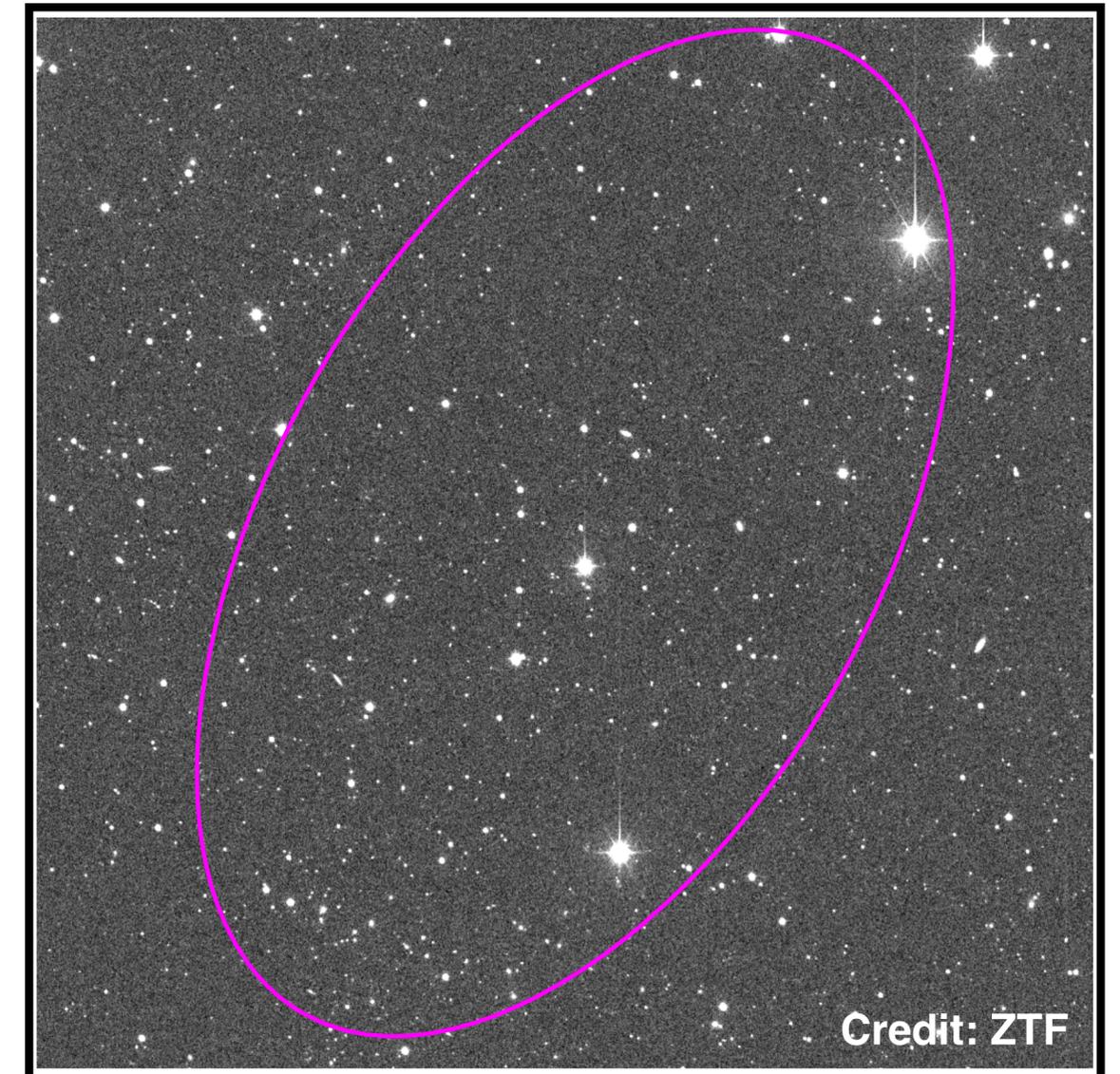
予想される**無関係天体の数が十分少ない**

→ 候補天体とニュートリノの相関！

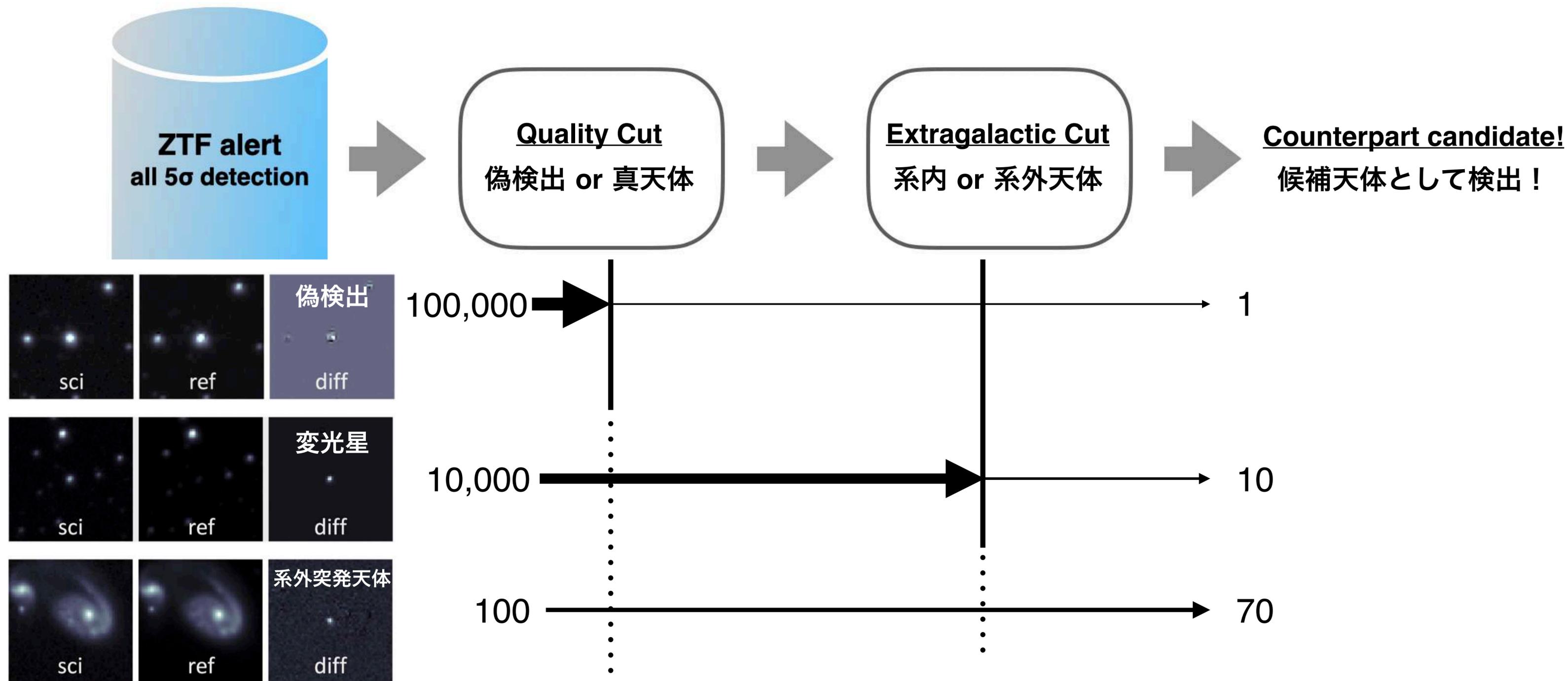
### Case 2：候補天体非検出！

**検出可能性が十分高い**（のに非検出）

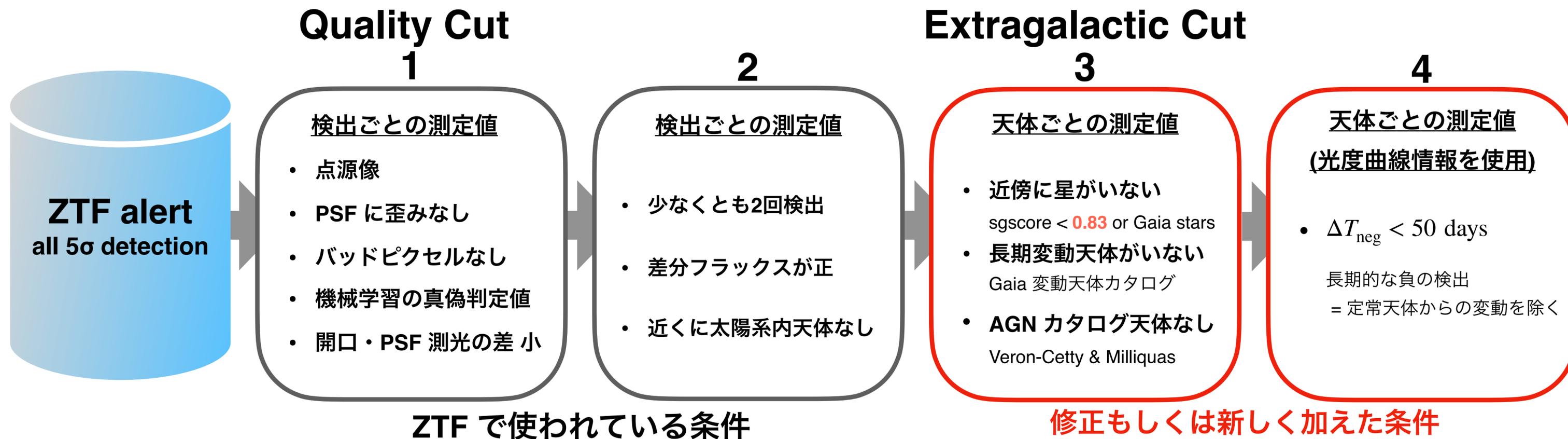
→ 起源天体の特徴（明るさ・時間スケール）に制限



無関係天体の数・検出可能性を事前に精査

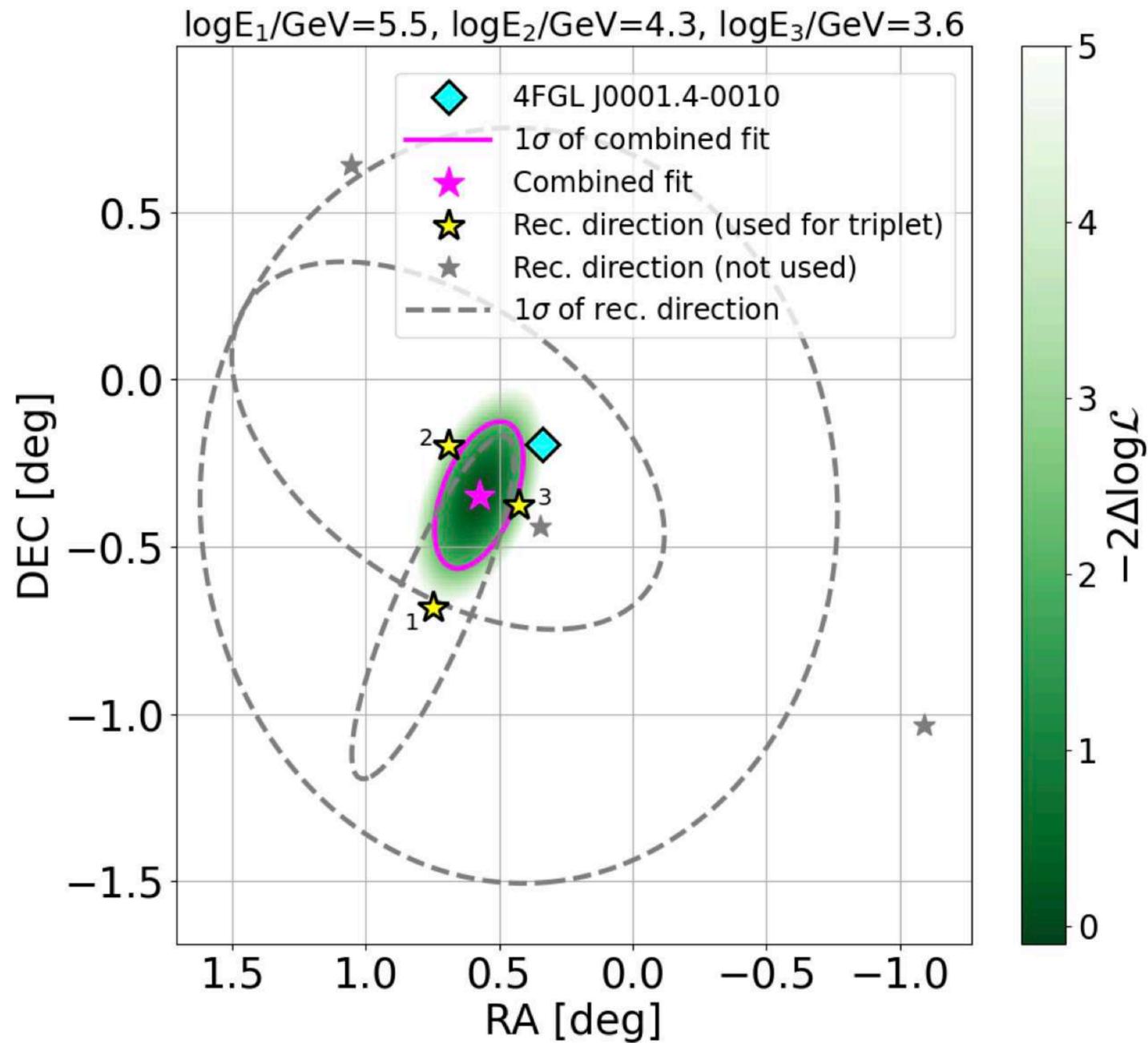


候補天体を逃すことなく、大量の無関係天体を除くシステムが必要

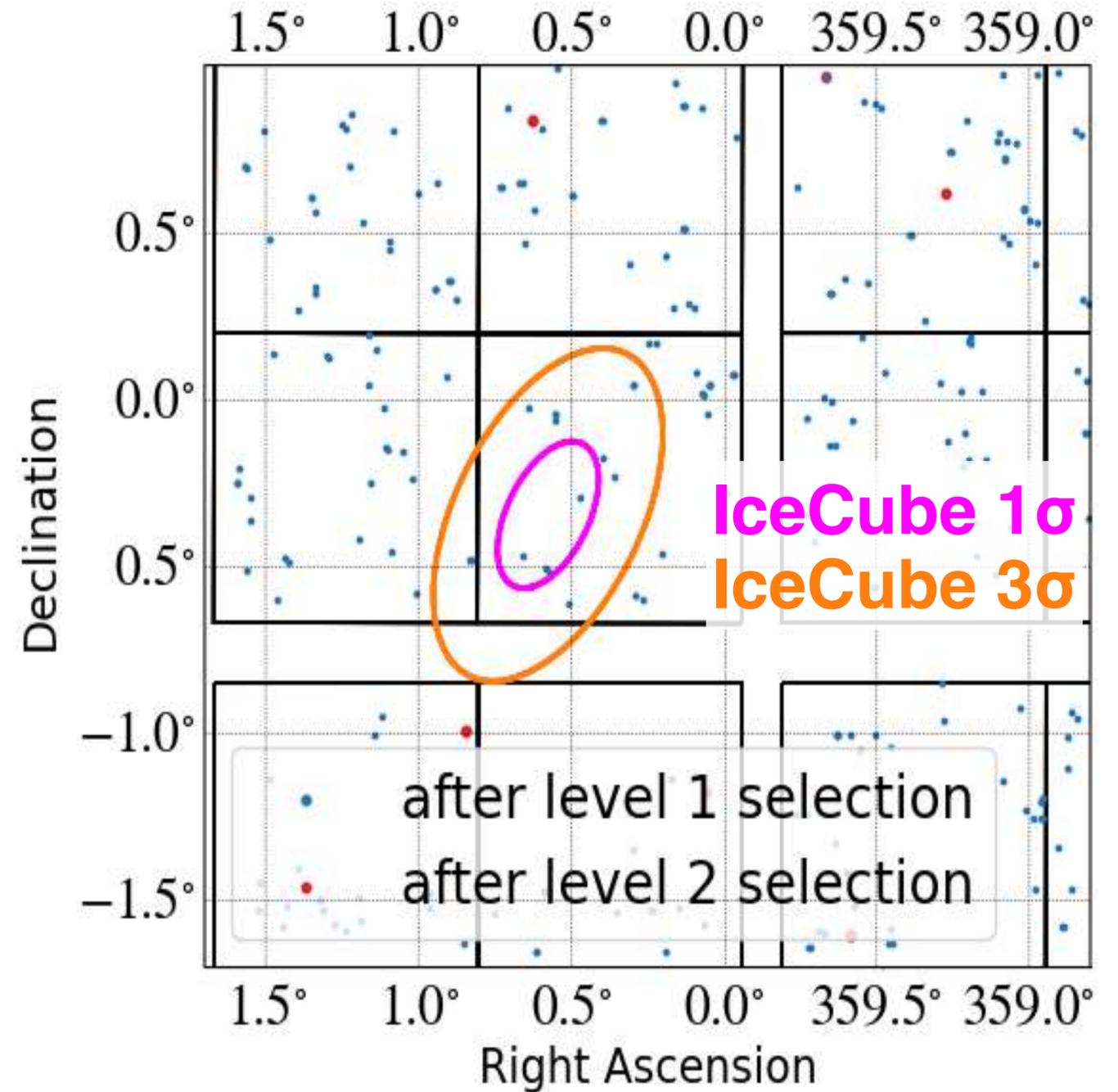


## システムに加えられた変更点

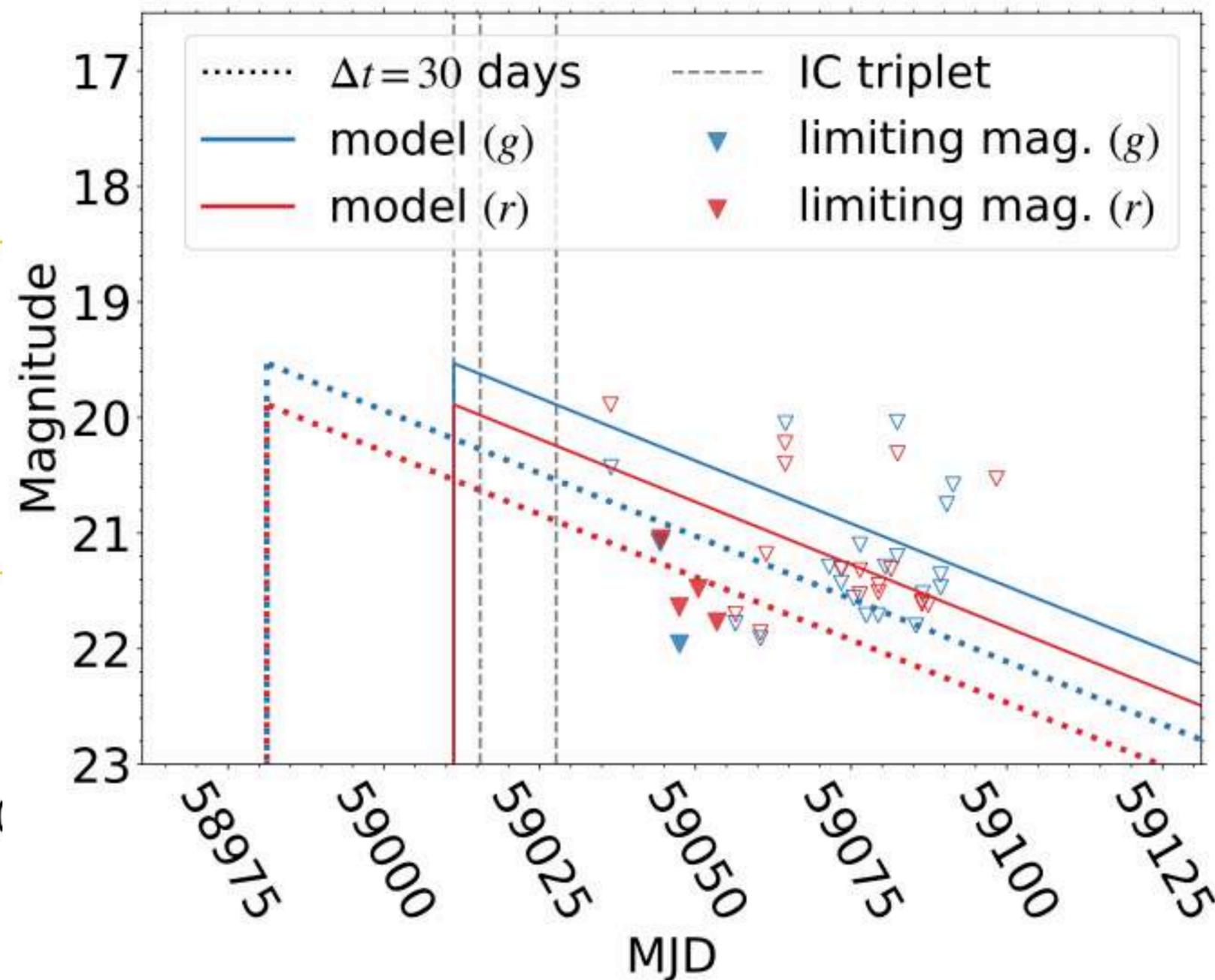
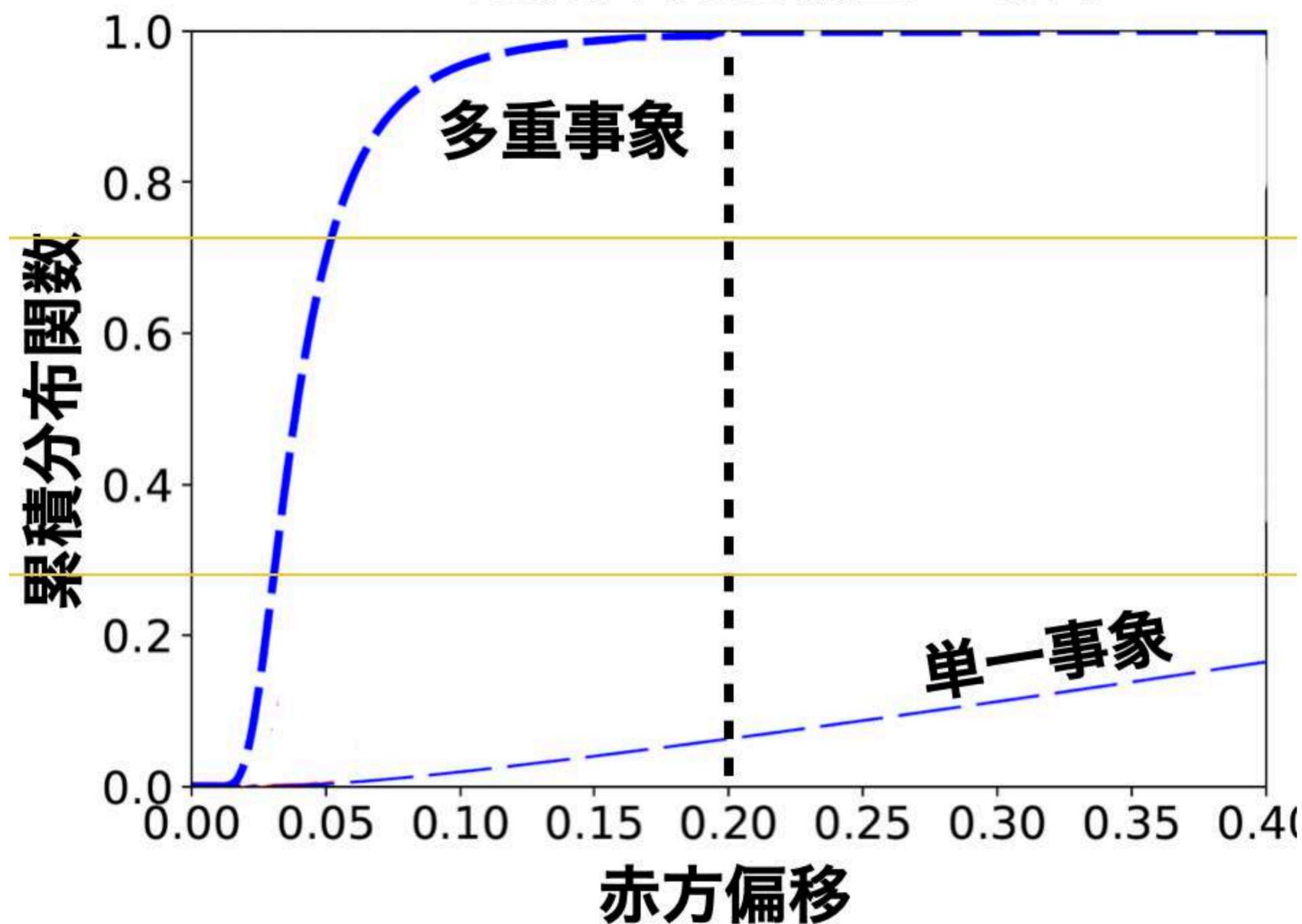
1. Star-galaxy separation score (sgscore) の閾値を変更 → 検出可能性を高める
2. AGN, 変光星をカットする条件を追加 → 無関係天体を減らす



## 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

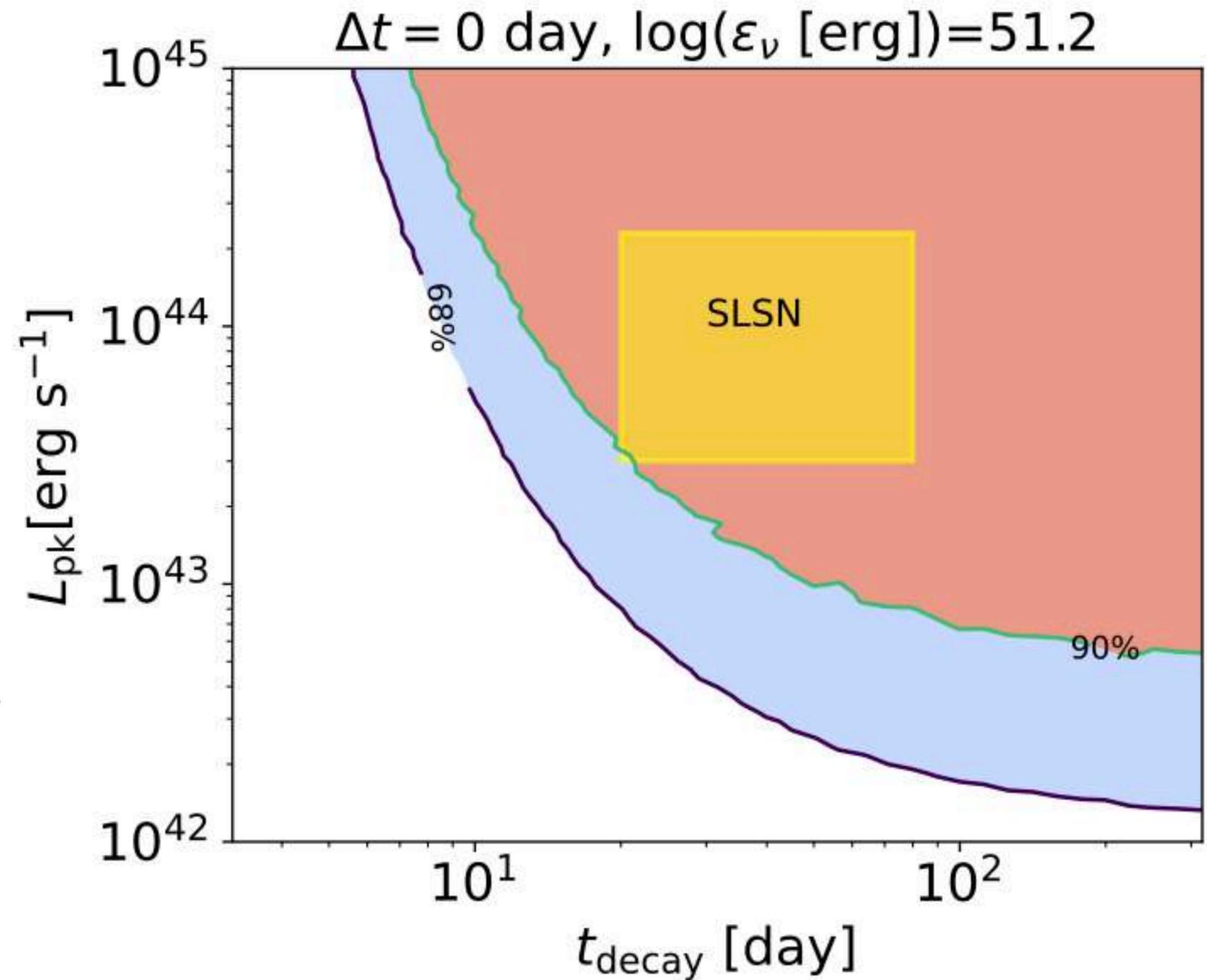
- ニュートリノ放射エネルギーの計算
- 距離分布の推定

## 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

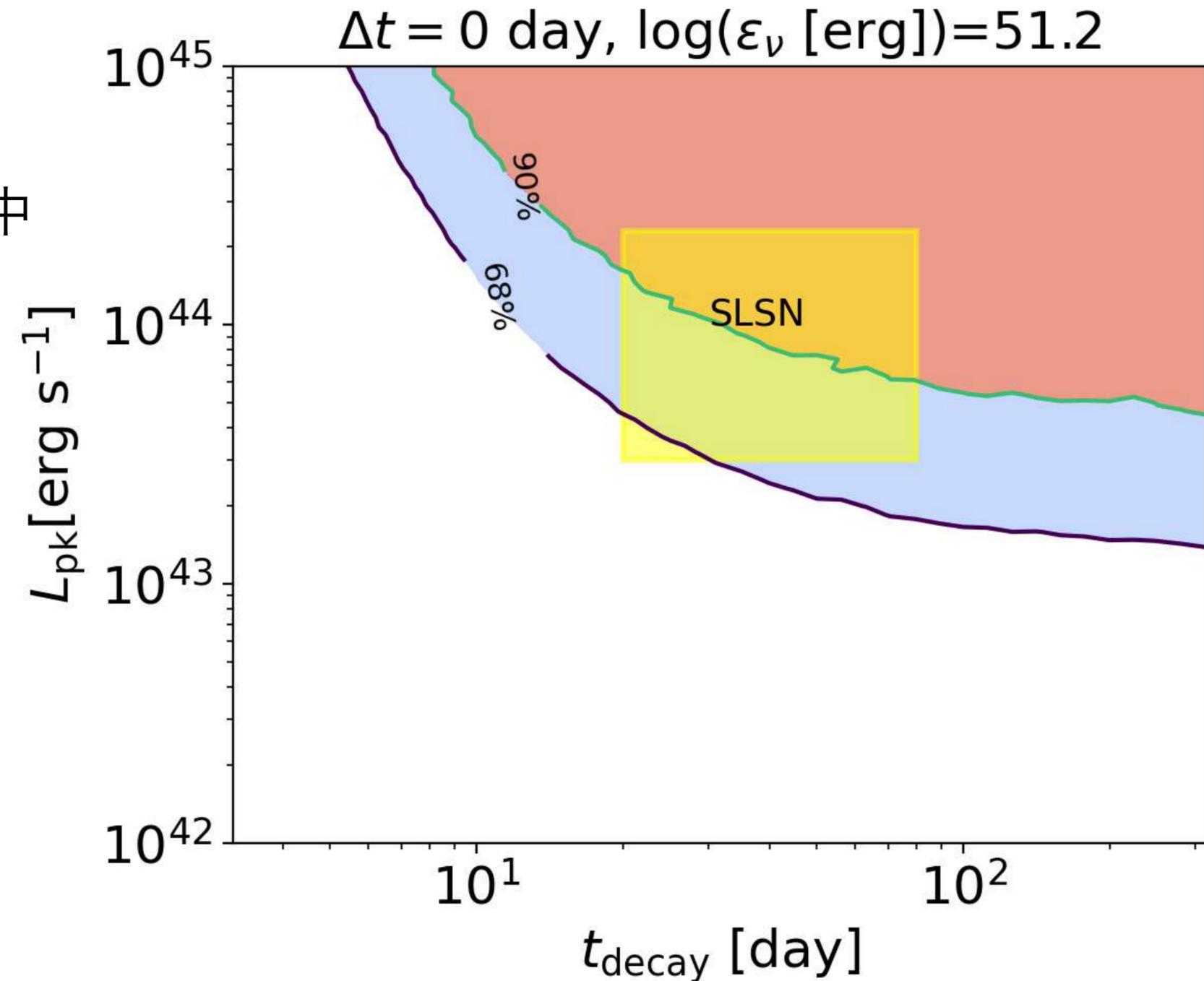
## IceCube チーム (清水さん@千葉大)

多重事象に対するリアルタイムアラート開発中  
~ 6 alerts / year

多重事象の直後に追観測したら？ (e.g., 木曾)

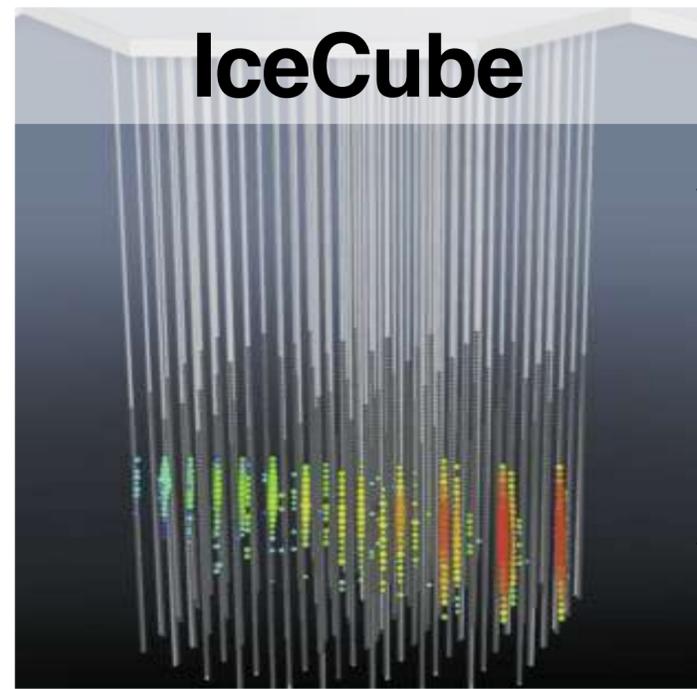
### 仮定した観測条件

- ・ 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



**IceCube 多重事象 × 中小口径望遠鏡の即時追観測が強力！**

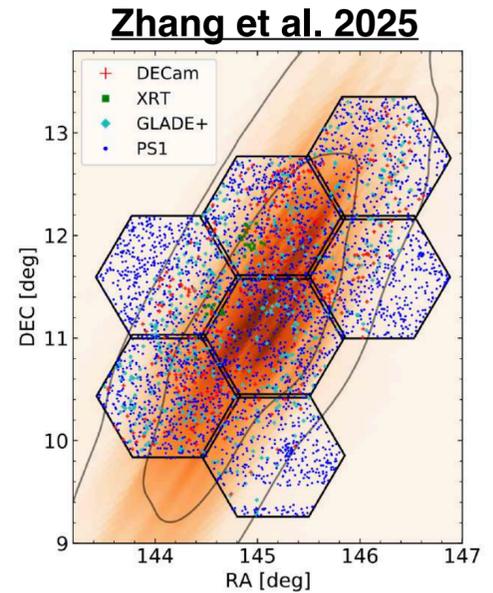
# まとめ：高エネルギーニュートリノ可視光突発天体探査27



単一事象



大型望遠鏡による探査



多天体分光

多重事象

中小口径望遠鏡による探査



IceCube 多重事象 × 小口径望遠鏡の即時追観測が強力！