

宇宙ニュートリノを用いた

宇宙線起源天体の探索



TOHOKU
UNIVERSITY

東北大学

学際科学フロンティア研究所
天文学専攻

木村成生



TI-FRIS



日本物理学会第78回年次大会

2023年9月16日～19日

目次

- 高エネルギーニュートリノ天体物理への導入
- セイファート銀河の降着流でのニュートリノ放射
- 潮汐破壊現象におけるニュートリノ放射
- まとめ

宇宙線：宇宙を満たす高エネルギー荷電粒子



1912年

ヘスの気球実験

1936年

ノーベル物理学賞



宇宙線のエネルギーと到来個数

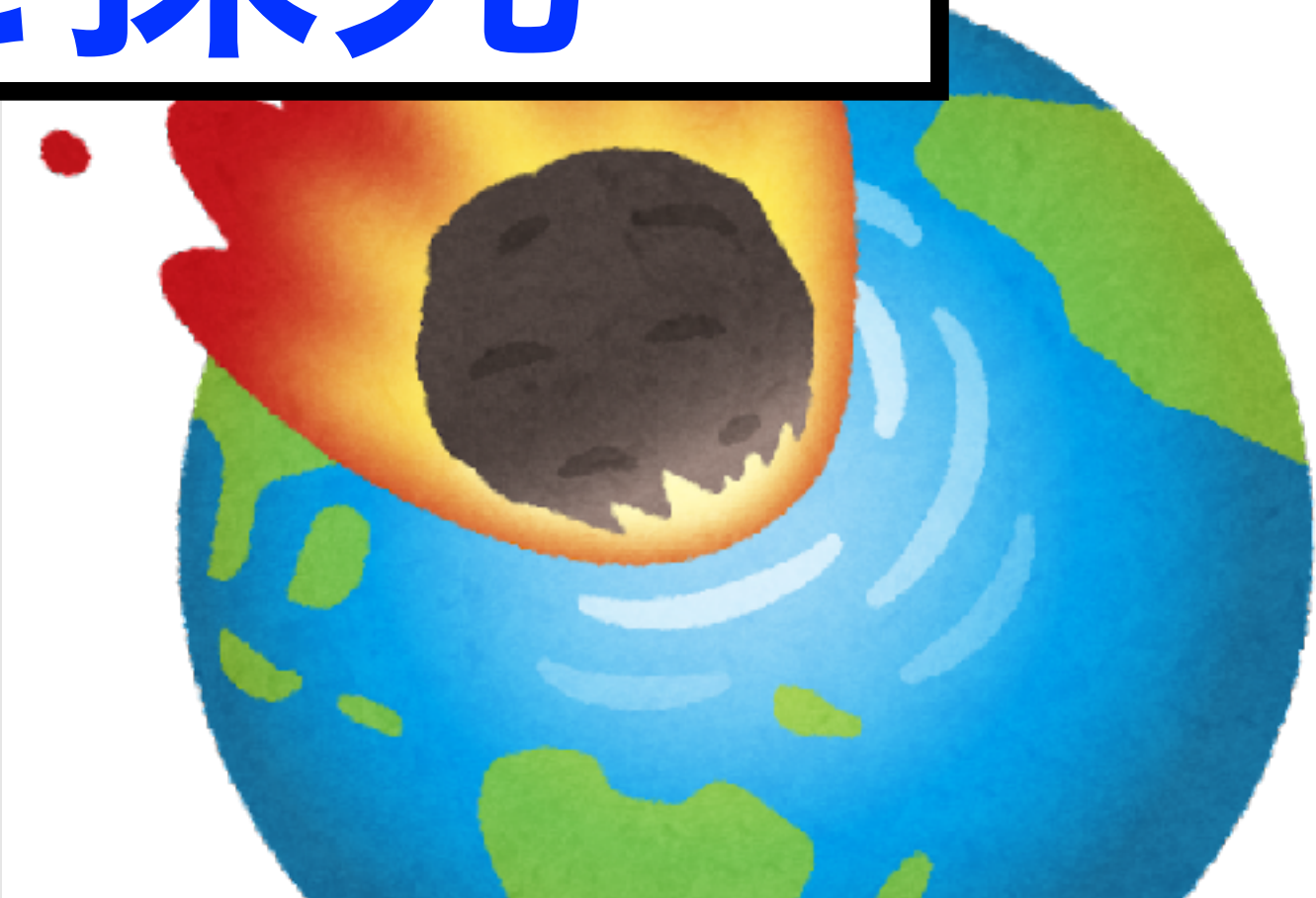
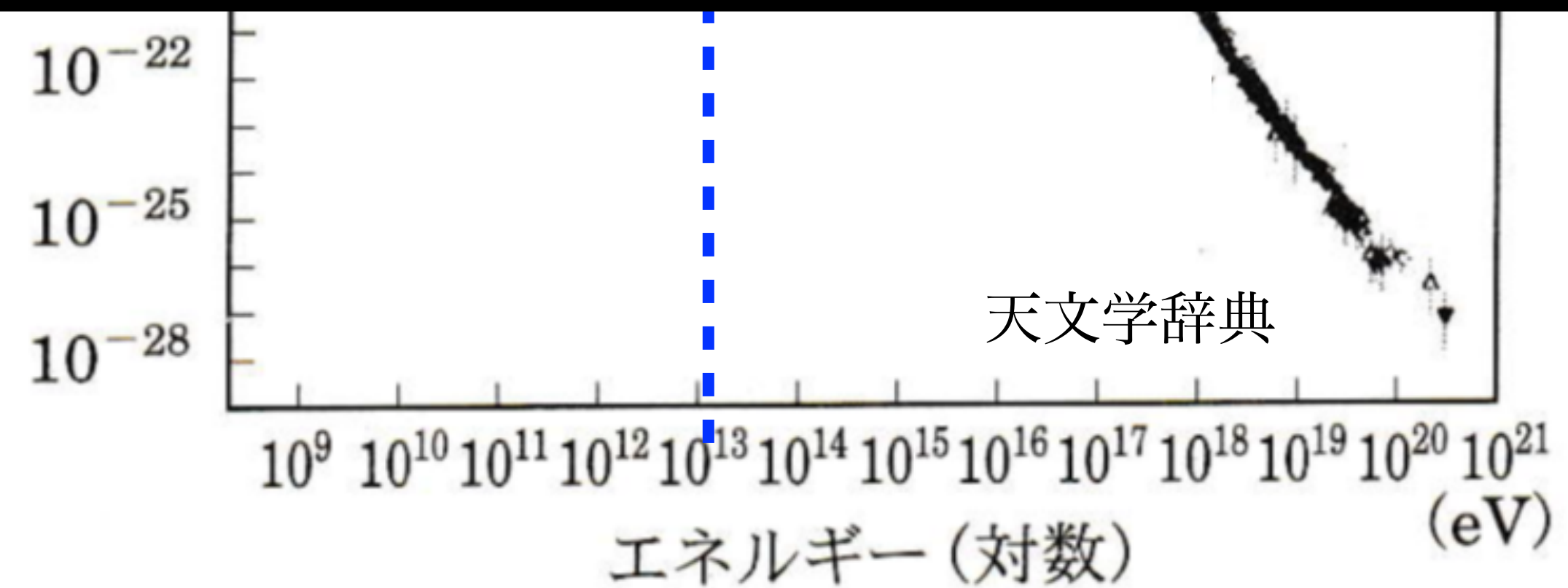


起源天体と生成機構は100年来の

大問題

極限環境での物理現象を探究

の
ム
絶滅！



従来の研究

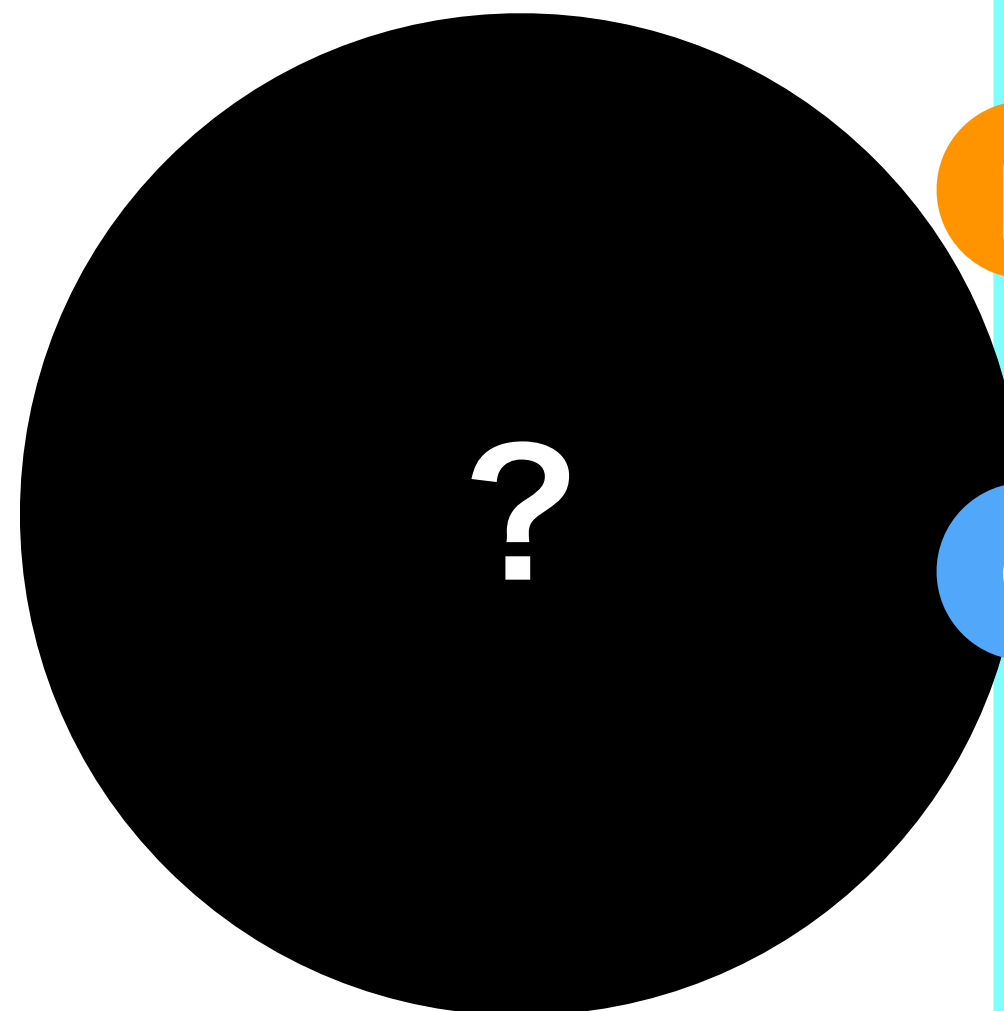
宇宙線の伝搬

地球での検出

宇宙磁場



宇宙線起源天体



p

宇宙線

e

p

電波

γ

電波望遠鏡



可視光

γ

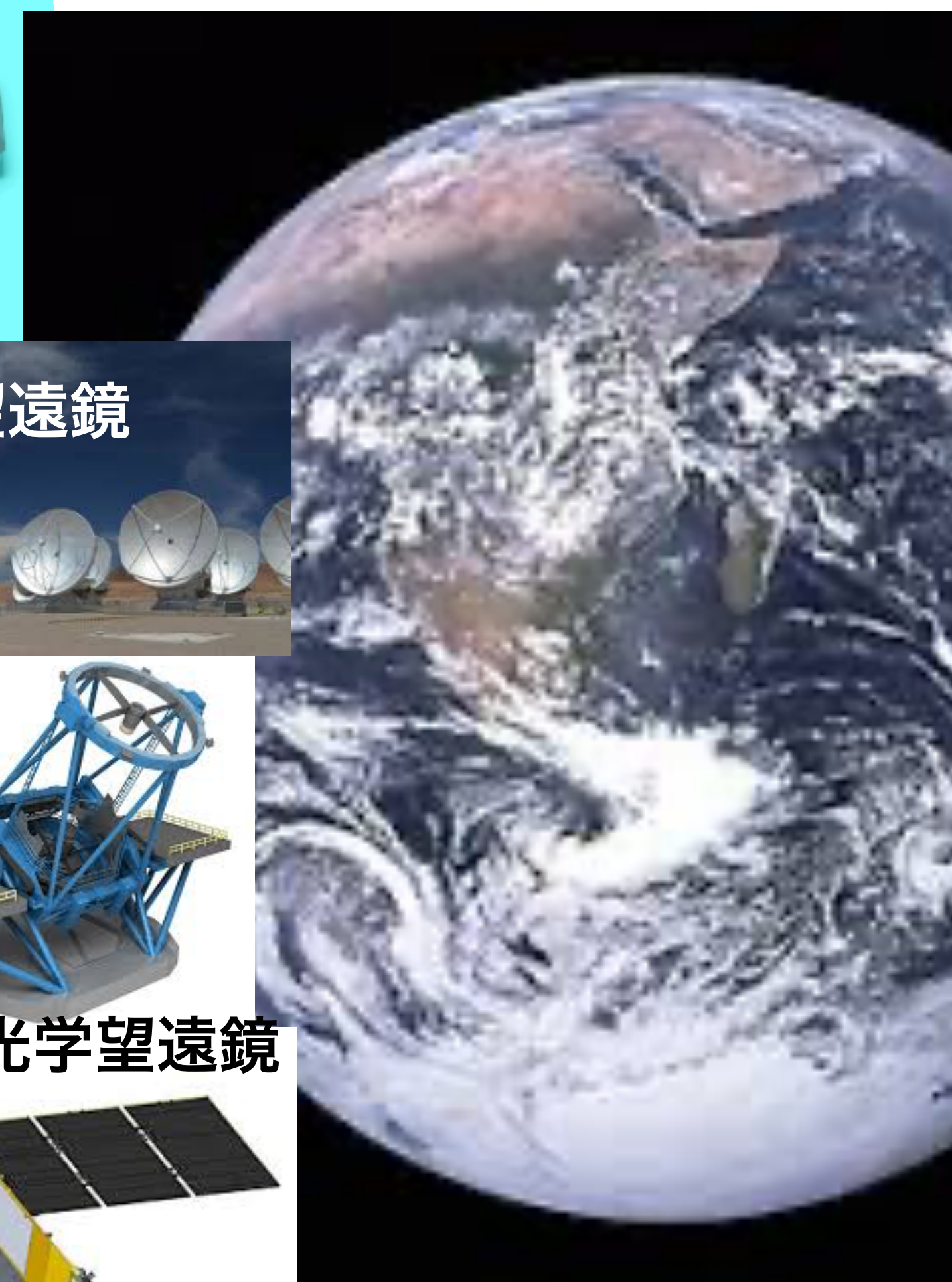


光学望遠鏡

X線・ γ 線

γ

X線・ γ 線衛星



ニュートリノ観測

宇宙線の伝搬

宇宙線

地球での検出

宇宙線起源天体

宇宙磁場

赤外線

CMB

γ 線

ニュートリノ

γ 線

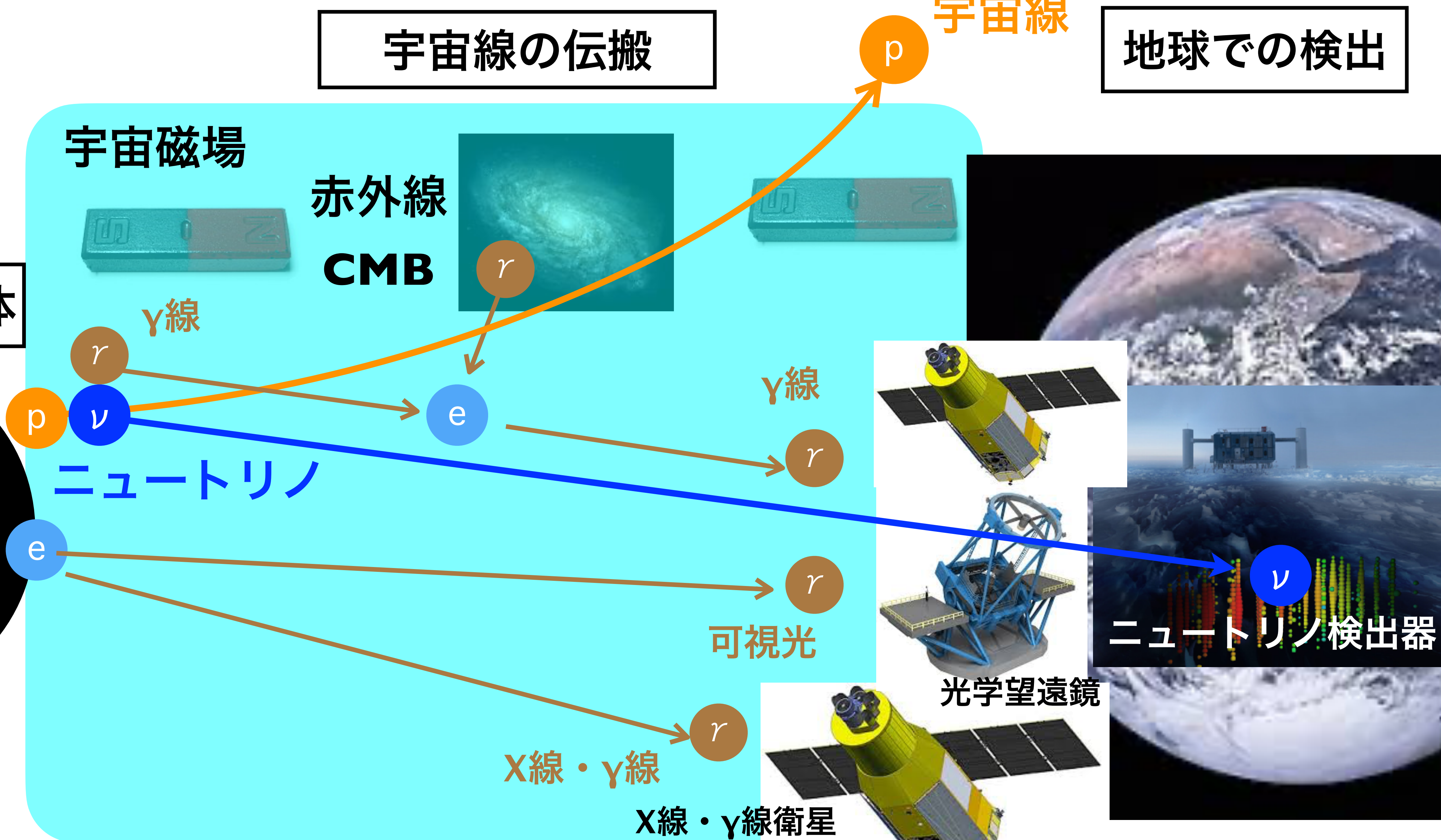
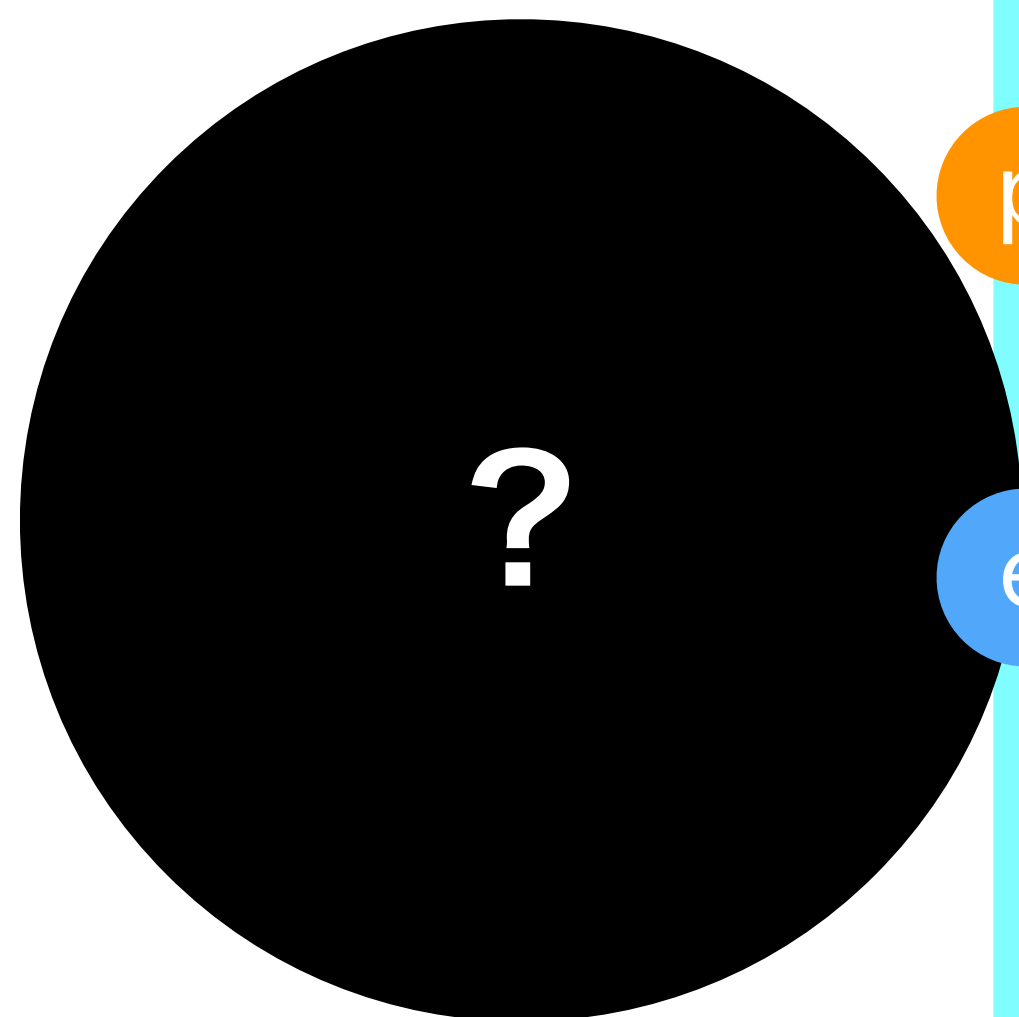
可視光

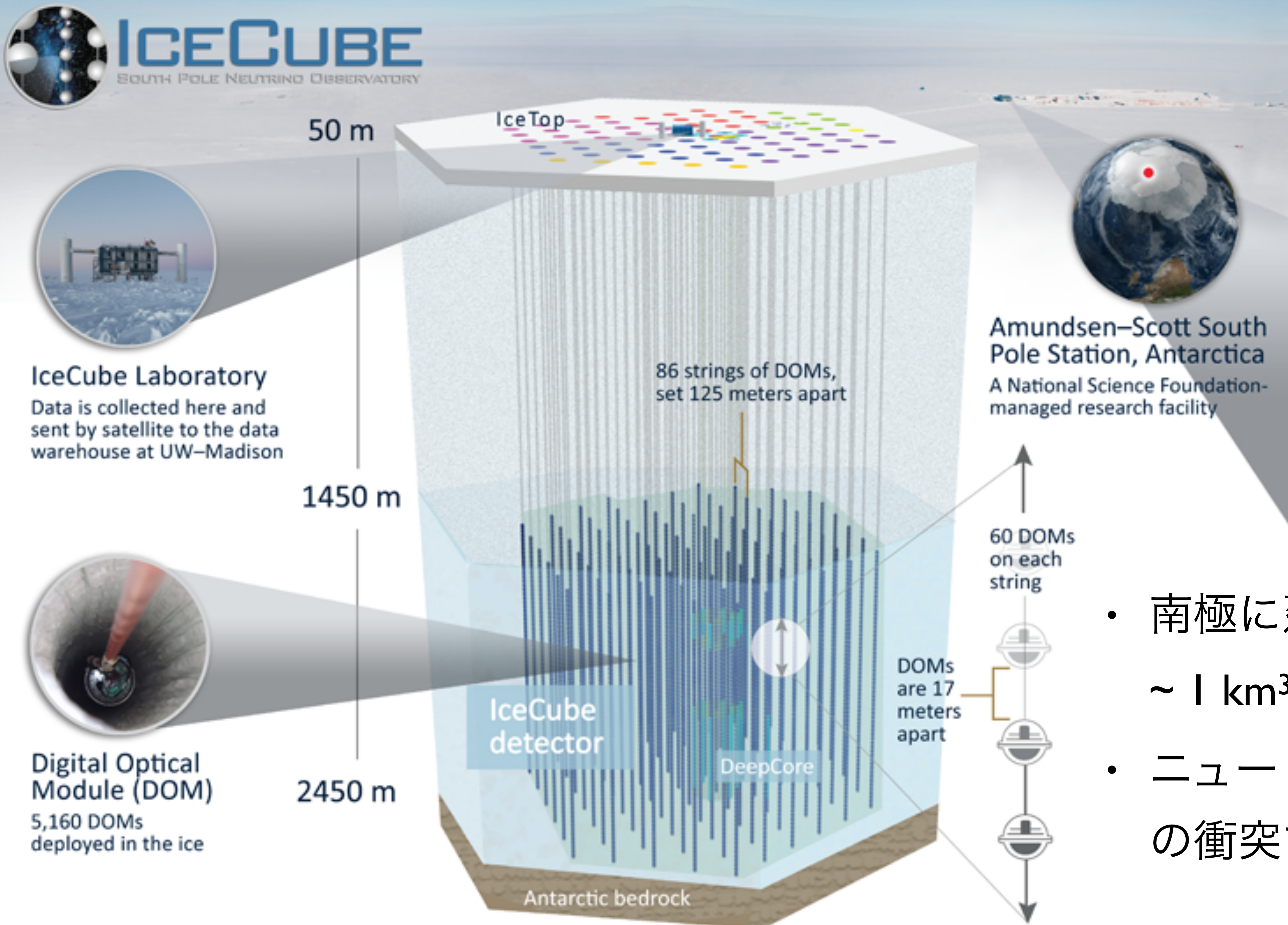
X線・ γ 線

X線・ γ 線衛星

光学望遠鏡

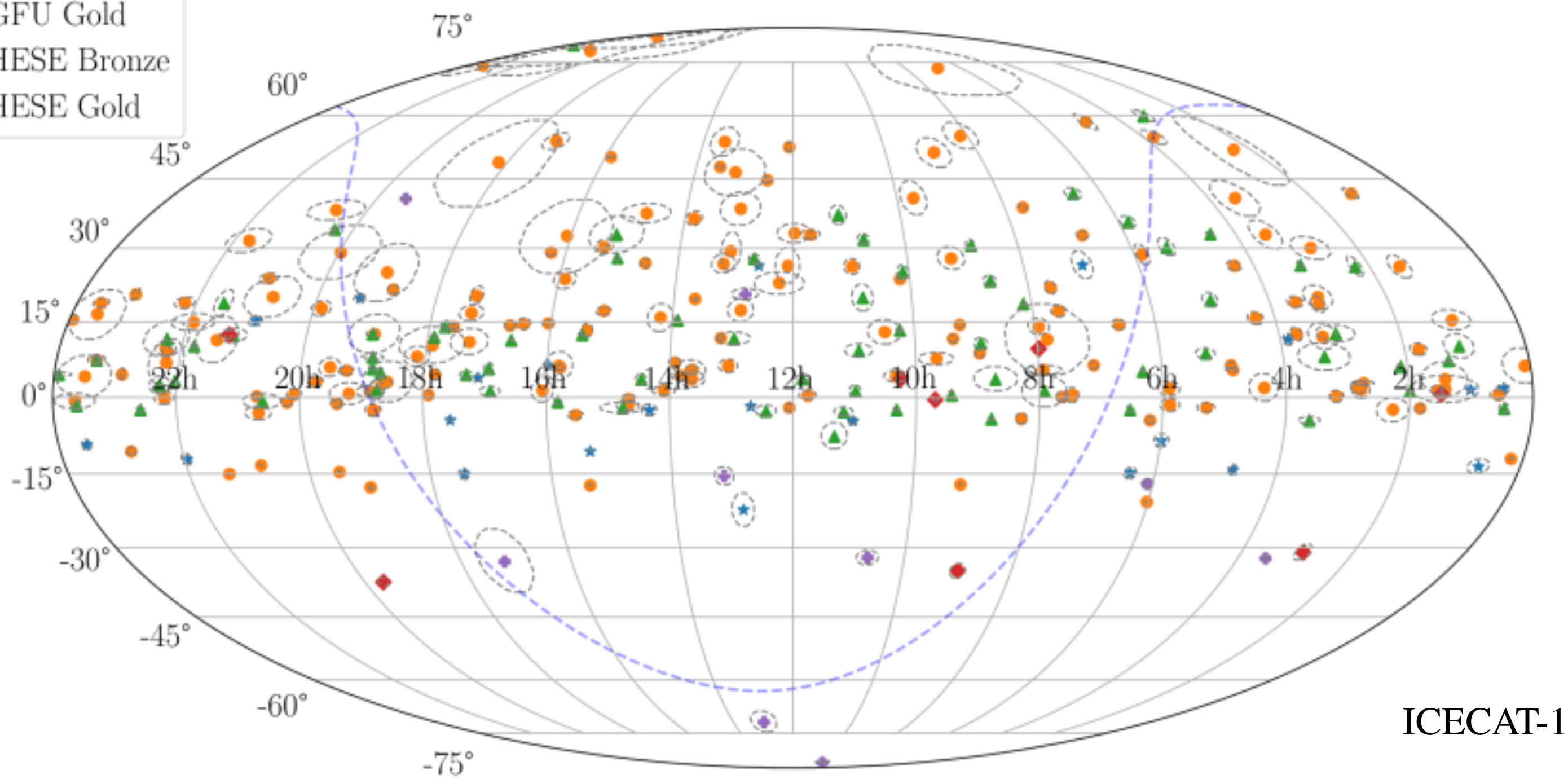
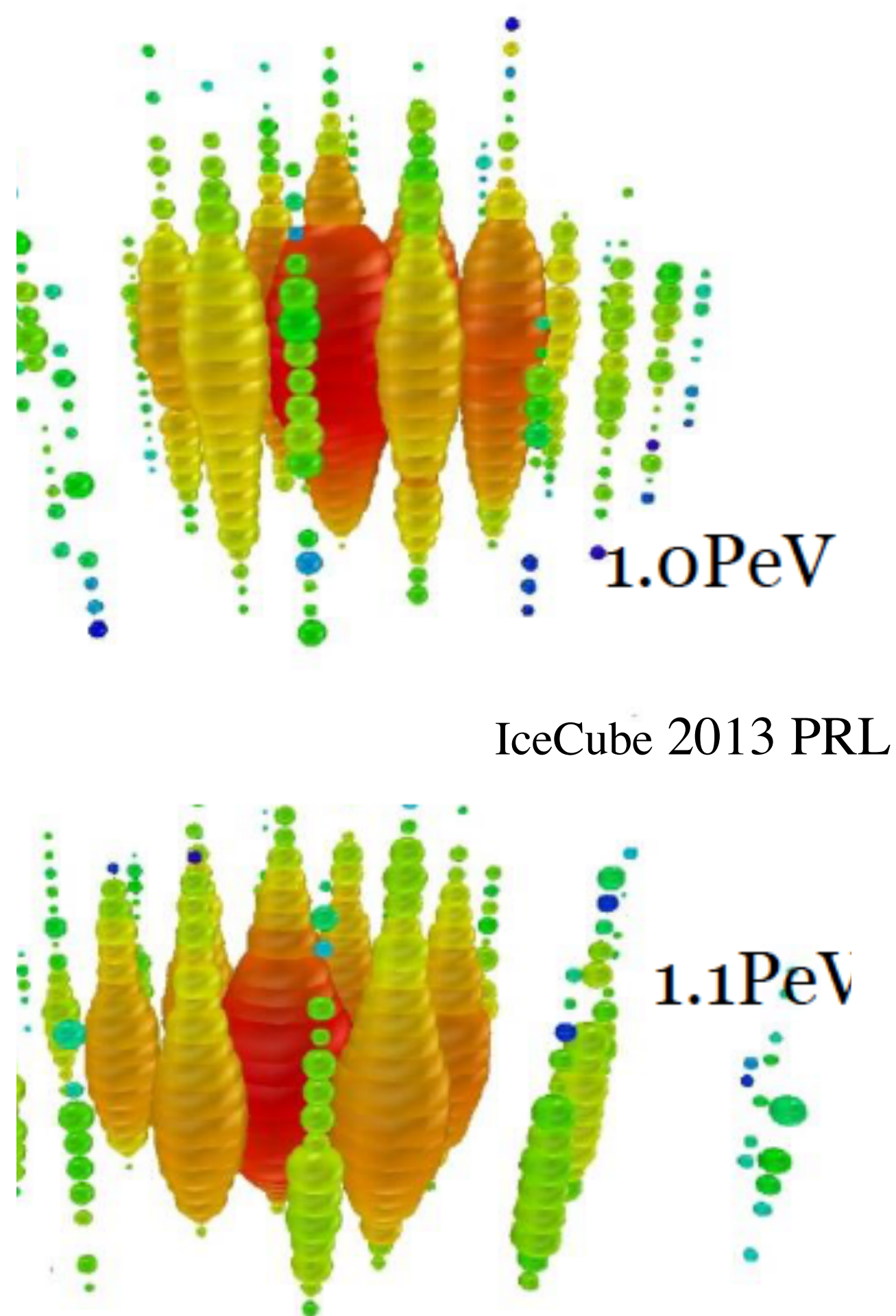
ニュートリノ検出器





- 南極に建造された
~ 1 km³ の巨大検出器
- ニュートリノと氷原子核
の衝突で生じる光を検出

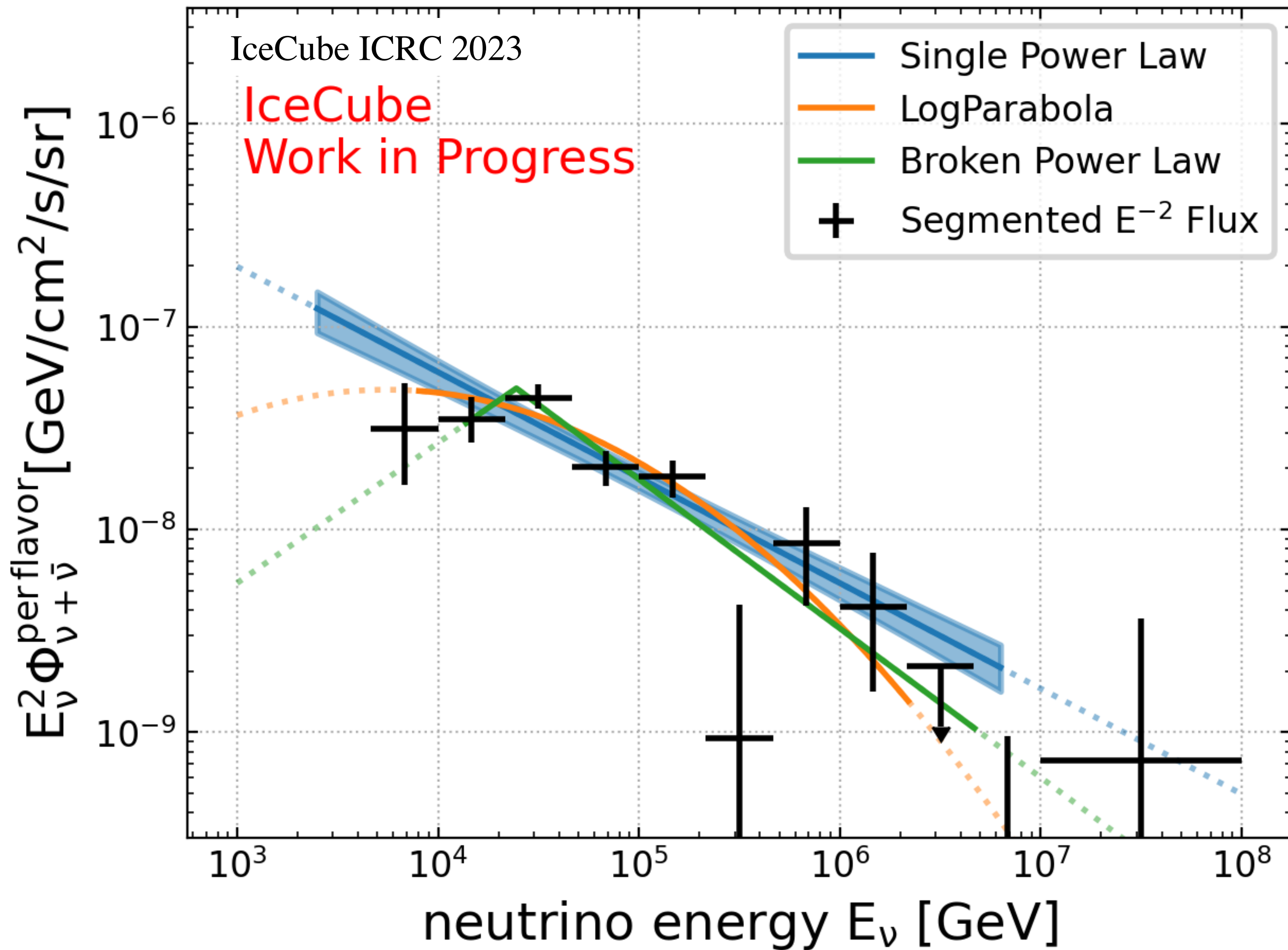
天体ニュートリノの検出



- 2013年：
天体ニュートリノ検出の報告

- 空の全ての方向から到来
→ 宇宙ニュートリノ背景放射

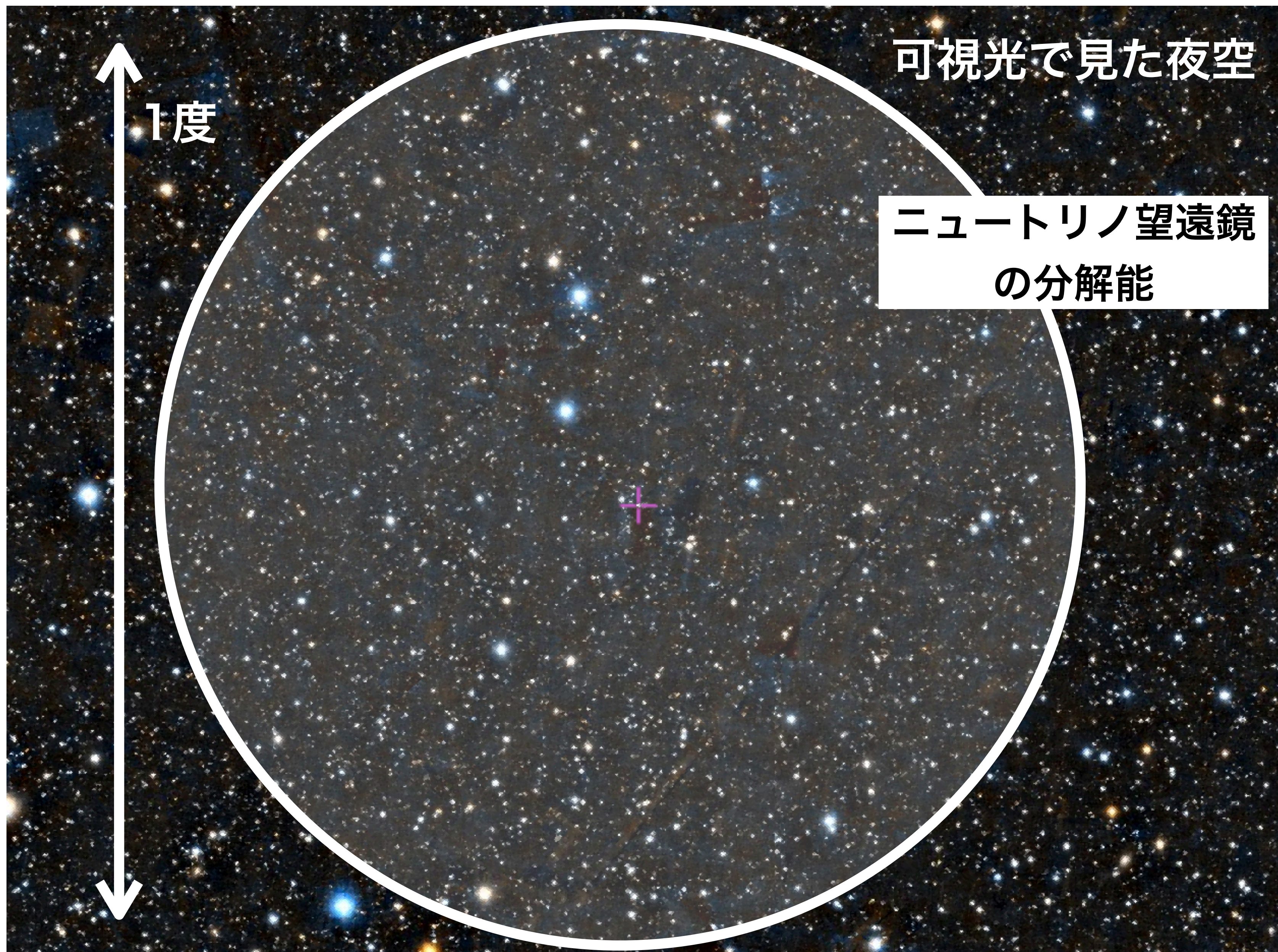
宇宙ニュートリノ背景放射スペクトル



- TeV–PeVのニュートリノを検出
- Single power-law と整合的
- 低いエネルギーのニュートリノが多く地球に届いている

**宇宙ニュートリノの起源は
宇宙物理の新たな大問題**

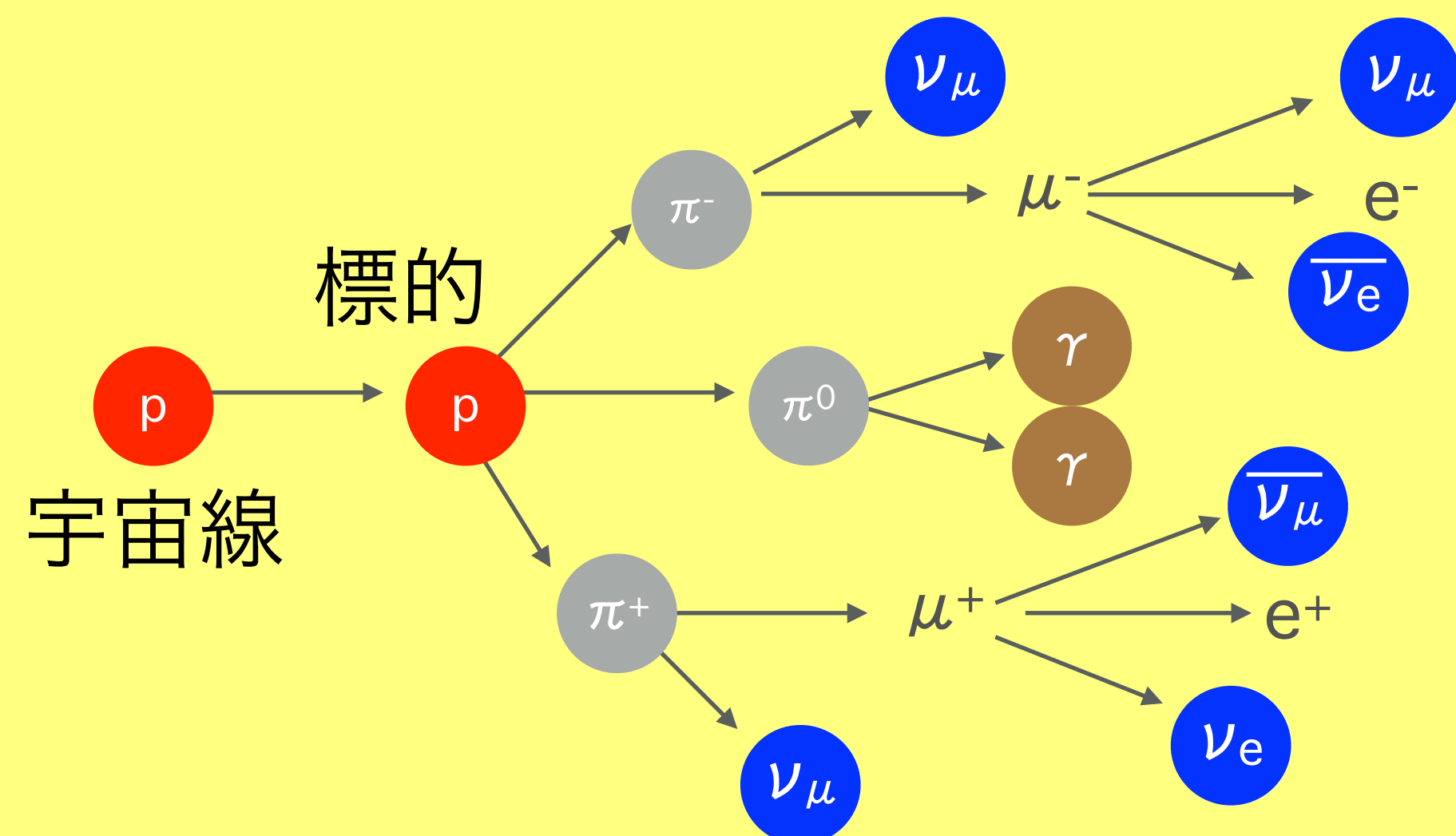
ニュートリノ天体同定の困難



- 光学望遠鏡の視力
~ 300 (すばる望遠鏡)
- ニュートリノ望遠鏡の視力
~ 0.02 (強度近視)
- ニュートリノ事象の到来方向を可視光で見ると多数の天体

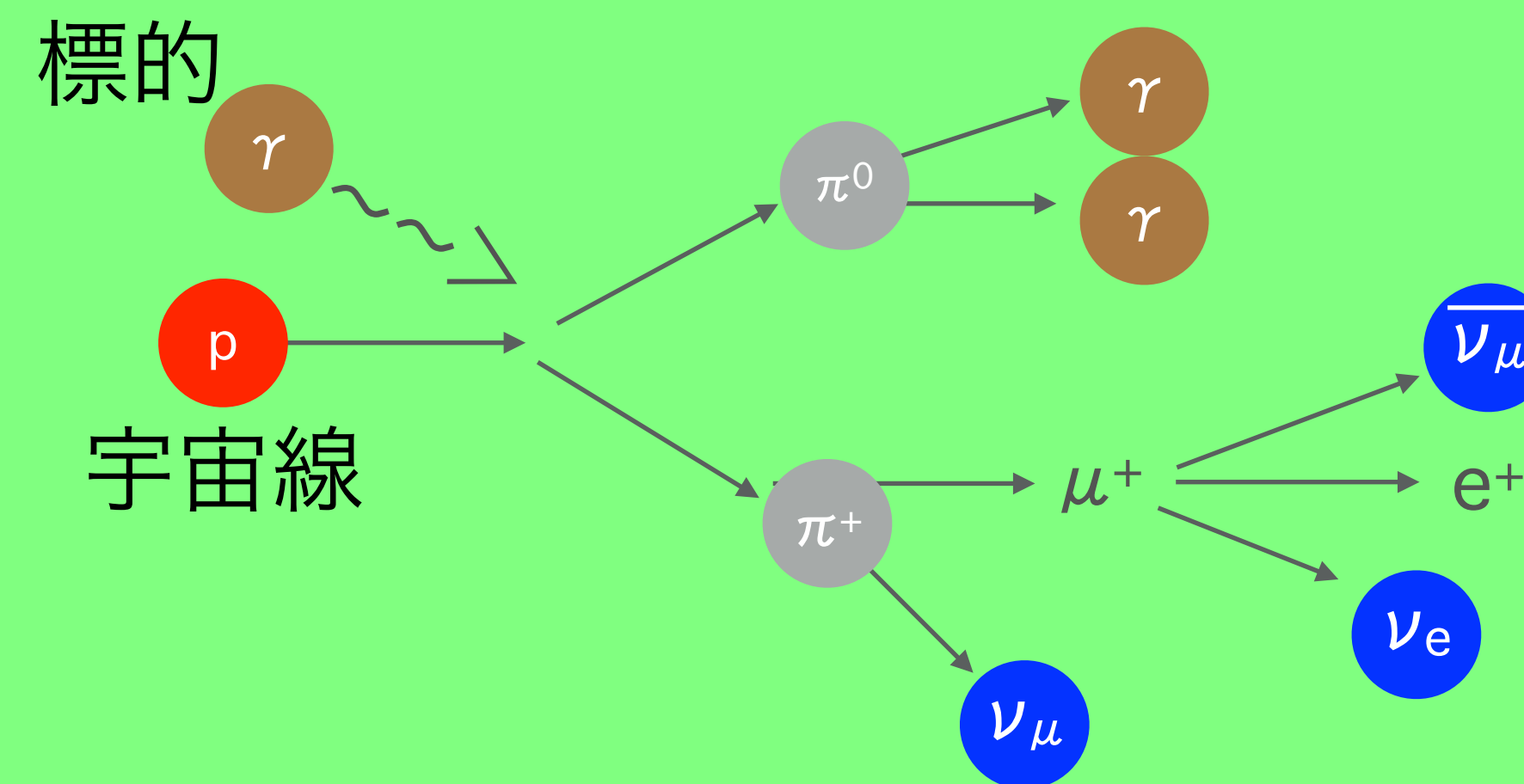
高エネルギーニュートリノ生成過程

• pp 非弾性散乱



- $p+p \rightarrow p+p+\pi$
- $\pi^\pm \rightarrow 3\nu+e$
- $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$

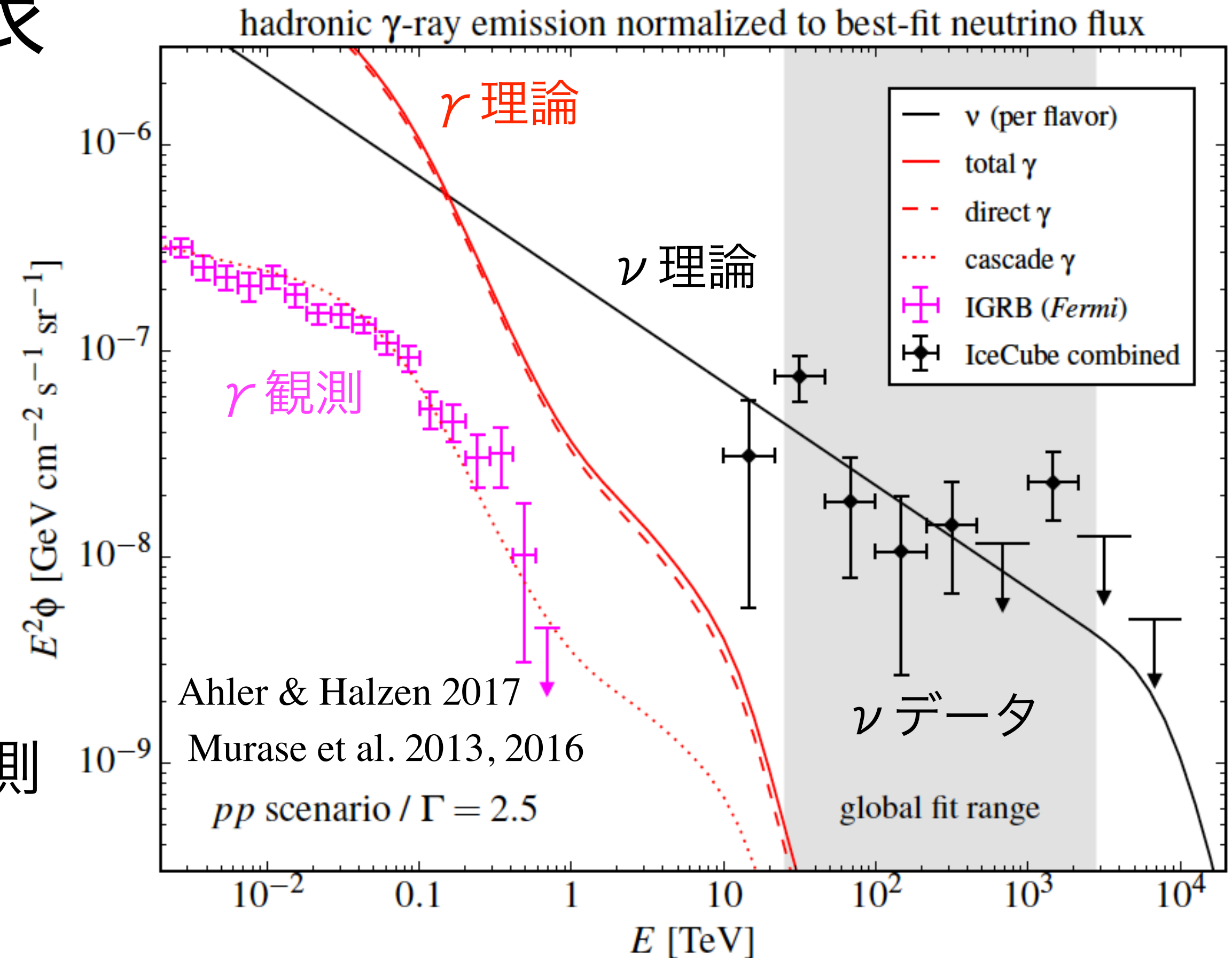
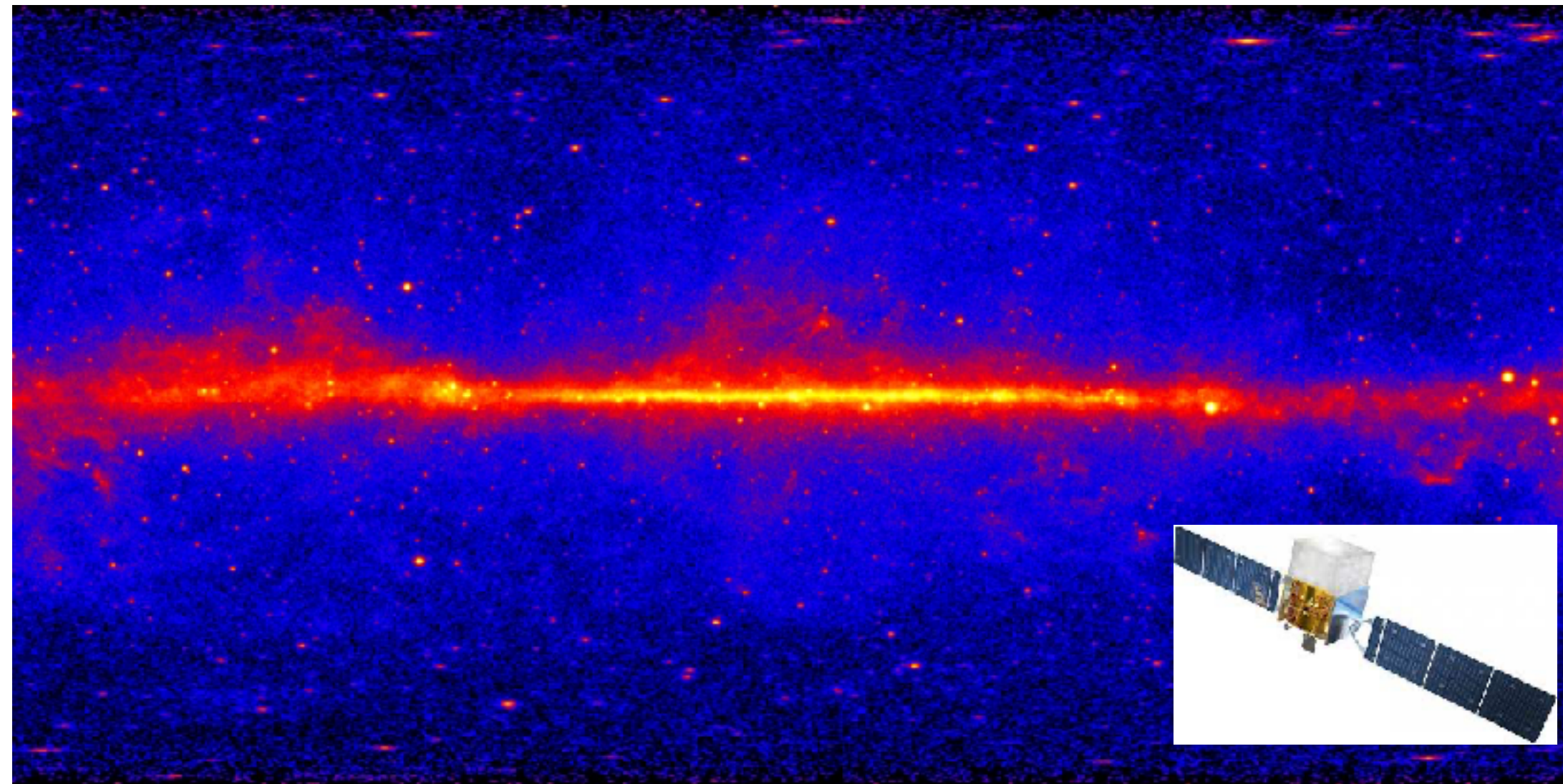
• 光中間子反応 (p γ)



- $p+\gamma \rightarrow p+\pi$
- $\pi \rightarrow 3\nu+e$
- $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$

原子核、または光子と相互作用してニュートリノ生成
ニュートリノと同時に同量のガンマ線が生成される

11 ガンマ線データによる制限

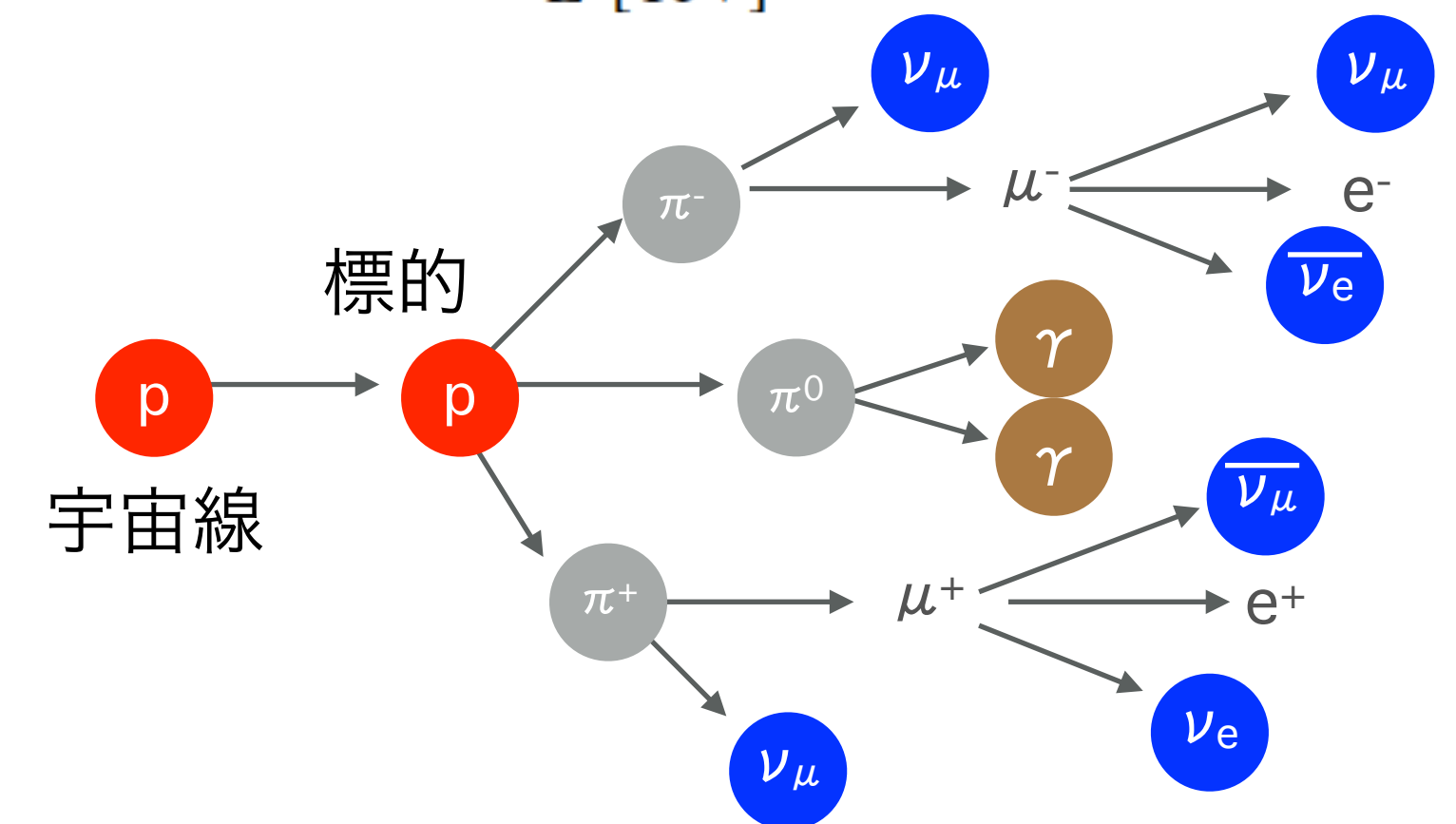


- フェルミ衛星による宇宙ガンマ線背景放射の観測
- 天体ではニュートリノと同時にガンマ線も生成
- ν 強度@10 TeV > γ 線強度@100 GeV

→ ガンマ線強度の理論予測 > フェルミデータ

→ **ニュートリノ源はTeV γ 線に対して不透明である必要**

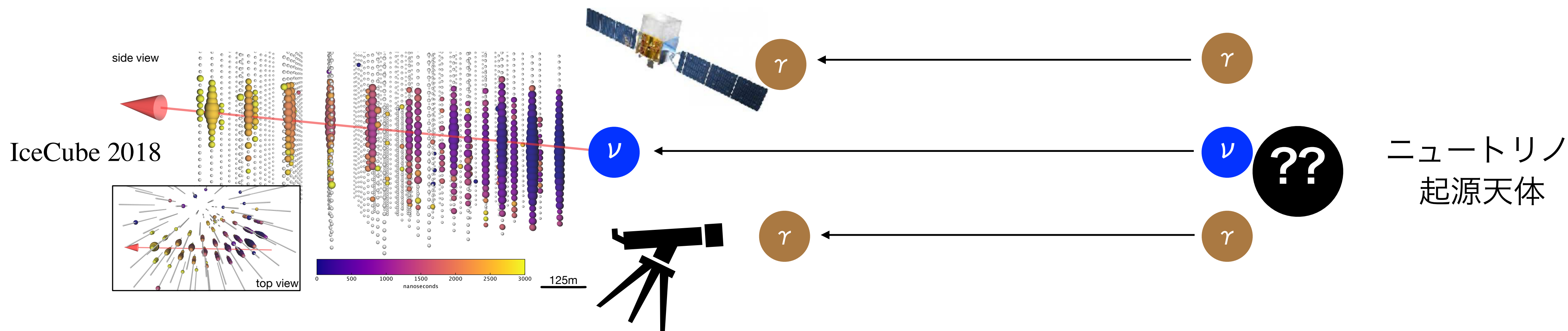
(隠されたニュートリノ源: e.g., $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$)



ニュートリノ天体の探し方

- カタログとの相関解析 ($\gamma \rightarrow \nu$)
- 積分したニュートリノデータ
+ 電磁波天体のカタログ
→ ニュートリノ放射天体同定

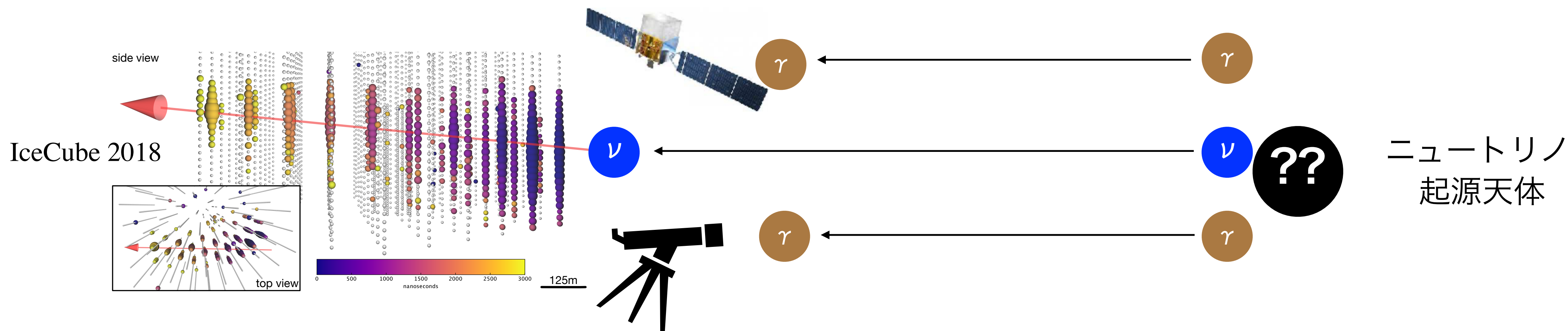
- ニュートリノ事象の追観測 ($\nu \rightarrow \gamma$)
 - ニュートリノアラート
+ 即時追観測
→ ニュートリノ放射天体の同定



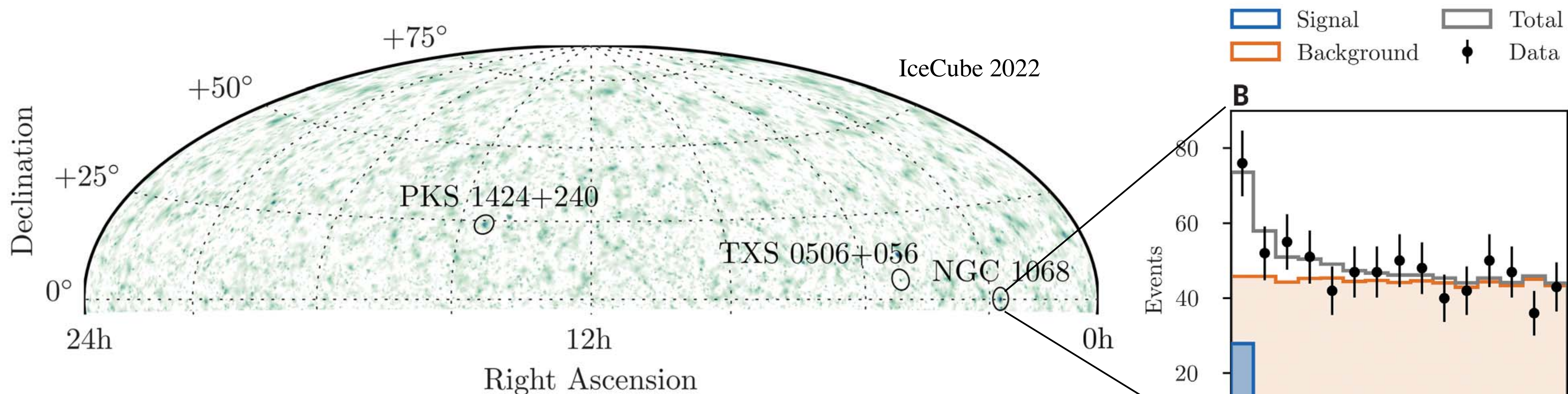
ニュートリノ天体の探し方

- カタログとの相関解析 ($\gamma \rightarrow \nu$)
 - 積分したニュートリノデータ
+ 電磁波天体のカタログ
→ ニュートリノ放射天体同定
 - 定常天体にも感度がある
 - リアルタイムの解析は困難

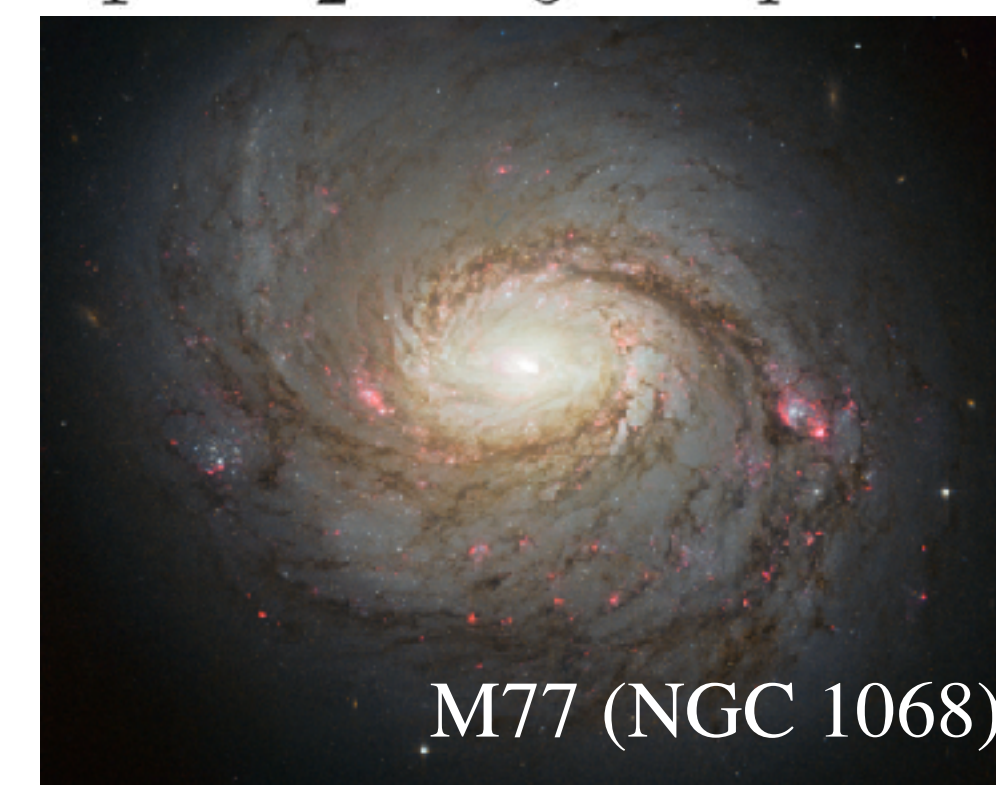
- ニュートリノ事象の追観測 ($\nu \rightarrow \gamma$)
 - ニュートリノアラート
+ 即時追観測
→ ニュートリノ放射天体の同定



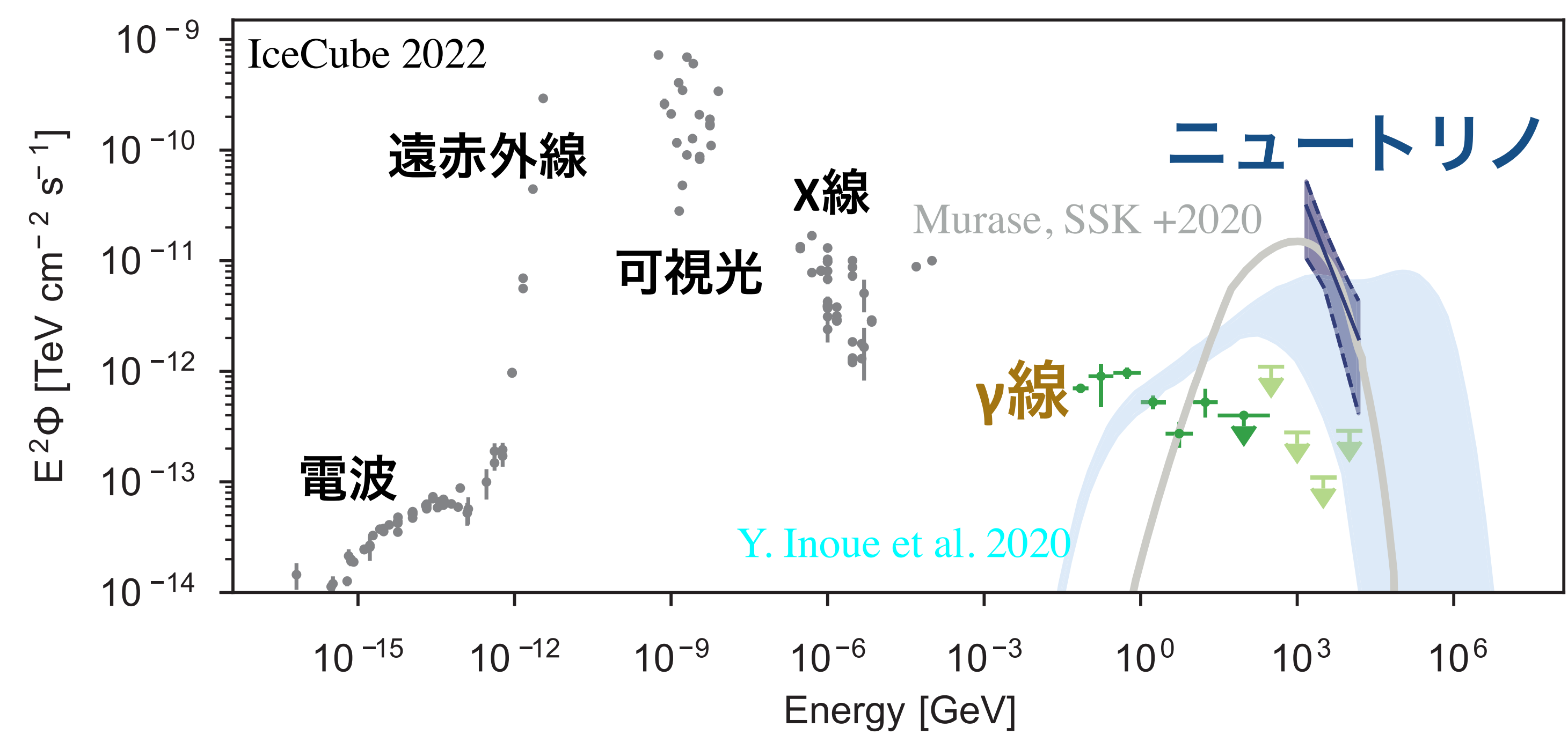
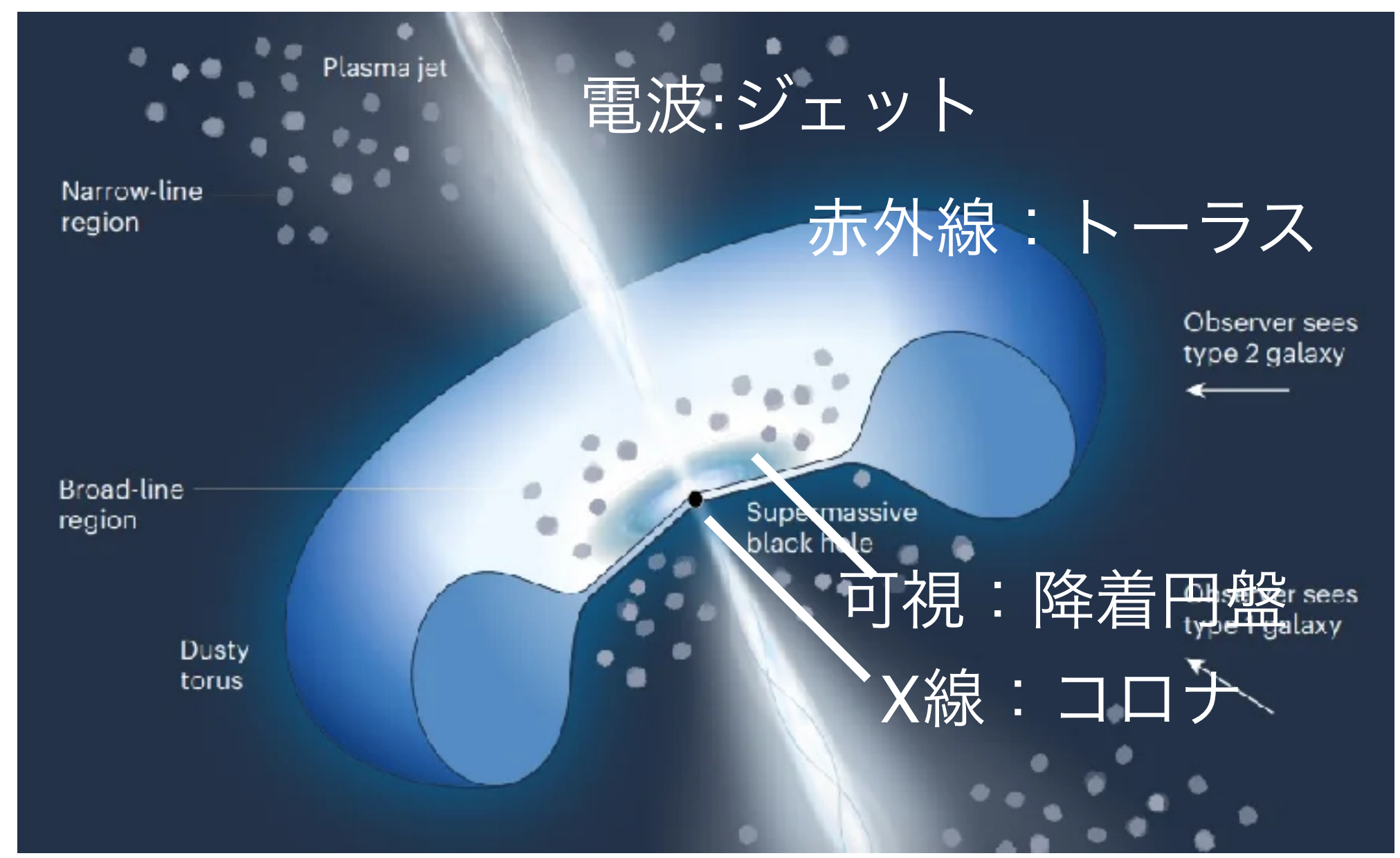
IceCubeのニュートリノ点源探索解析 ¹⁴



- 北天にあるニュートリノ点源を探索
- 近傍のセイファート銀河NGC1068 (M77) の方向から
80事象の高エネルギーニュートリノが到来
→4.2 σ の統計的有意度でニュートリノ源の証拠



セイファート銀河からのニュートリノ



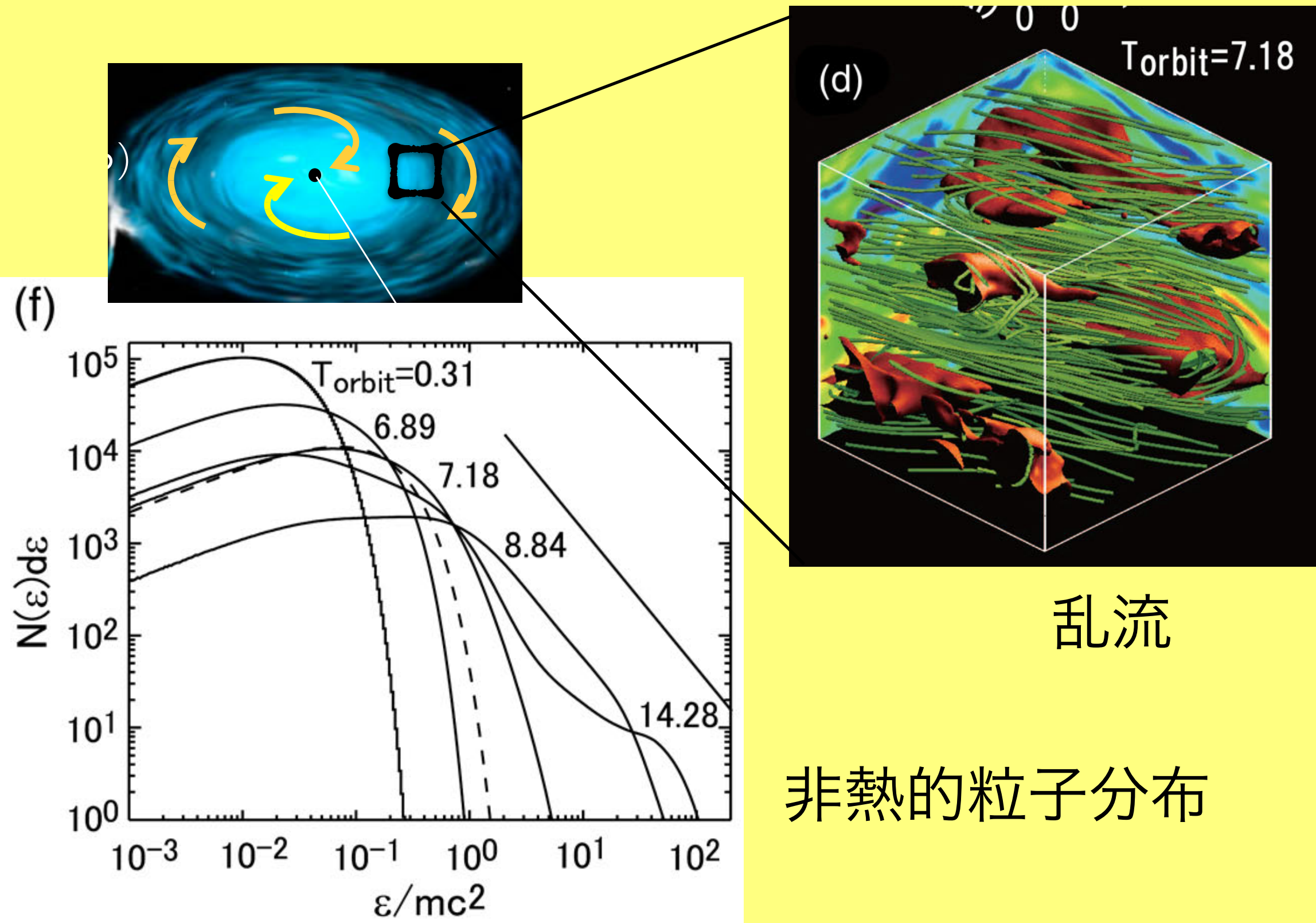
- セイファート銀河
 - 銀河の中心が明るく輝く天体 (活動銀河核)
 - 超大質量ブラックホールが物質を降着
 - 重力エネルギーの解放
 - 高温のプラズマ流 (降着流)を形成

- どこで宇宙線が加速されているのか？
- X線放射領域 (高温コロナ) は高温で希薄
 - クーロン衝突が非効率 (無衝突プラズマ)
 - 宇宙線を加速することができる！

高温コロナでの宇宙線加速

Particle-In-Cell (PIC) シミュレーション

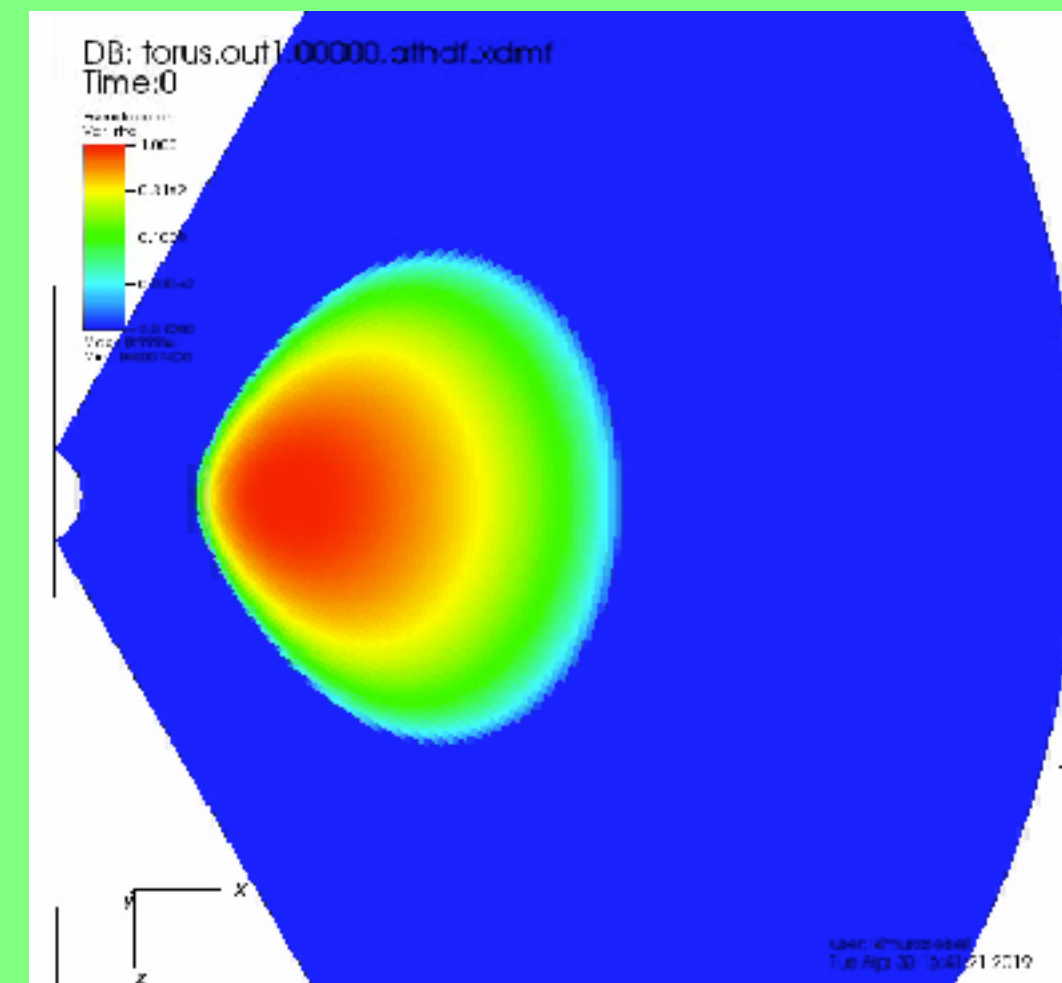
Hoshino 2013, 2015; Riquelme et al. 2012; Kuntz et al. 2016



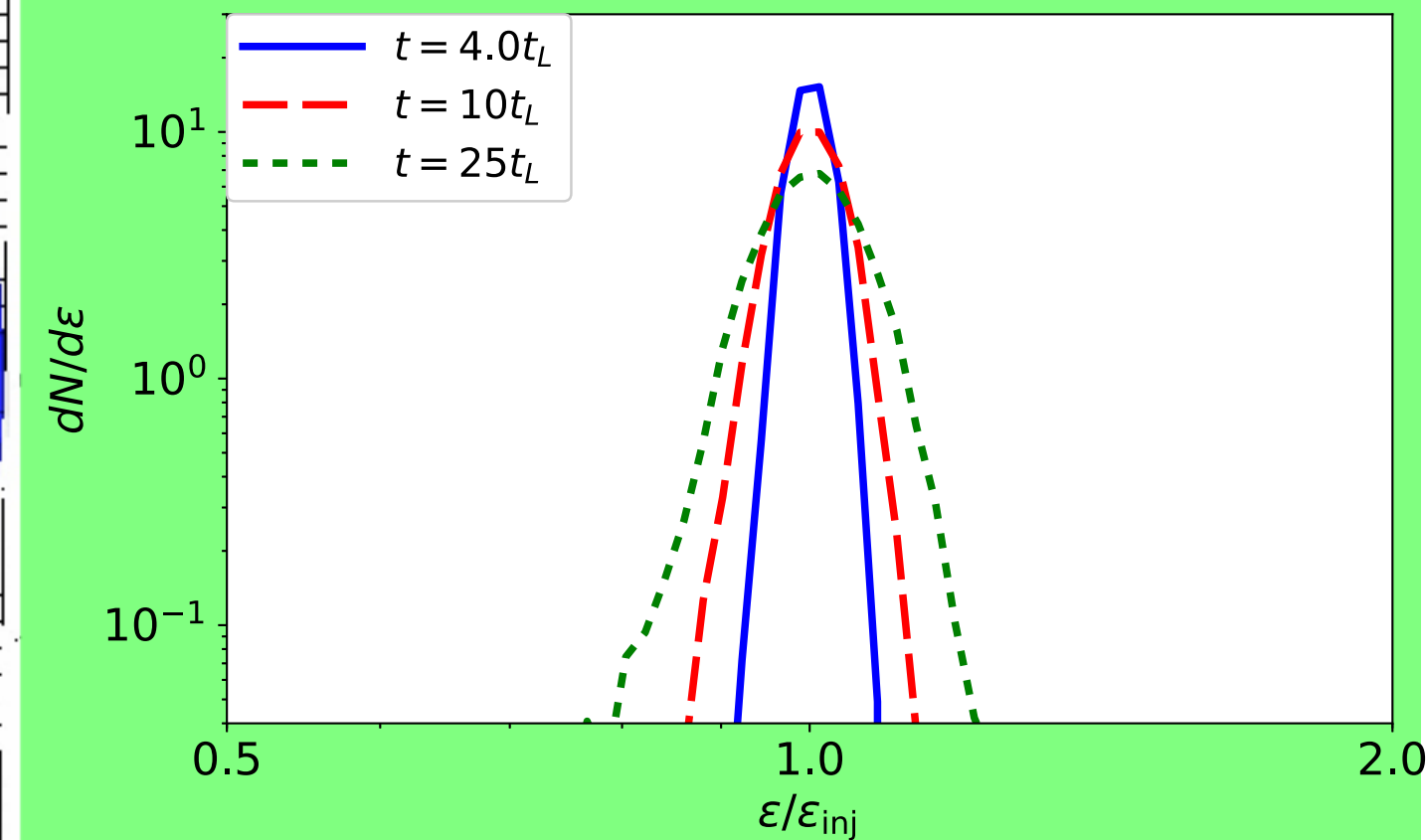
磁気流体 (MHD)+テスト粒子軌道計算

SSK+ 2016 ApJ, 2019 MNRAS; Sun & Bai 2021

磁気流体乱流の生成



分布関数の進化



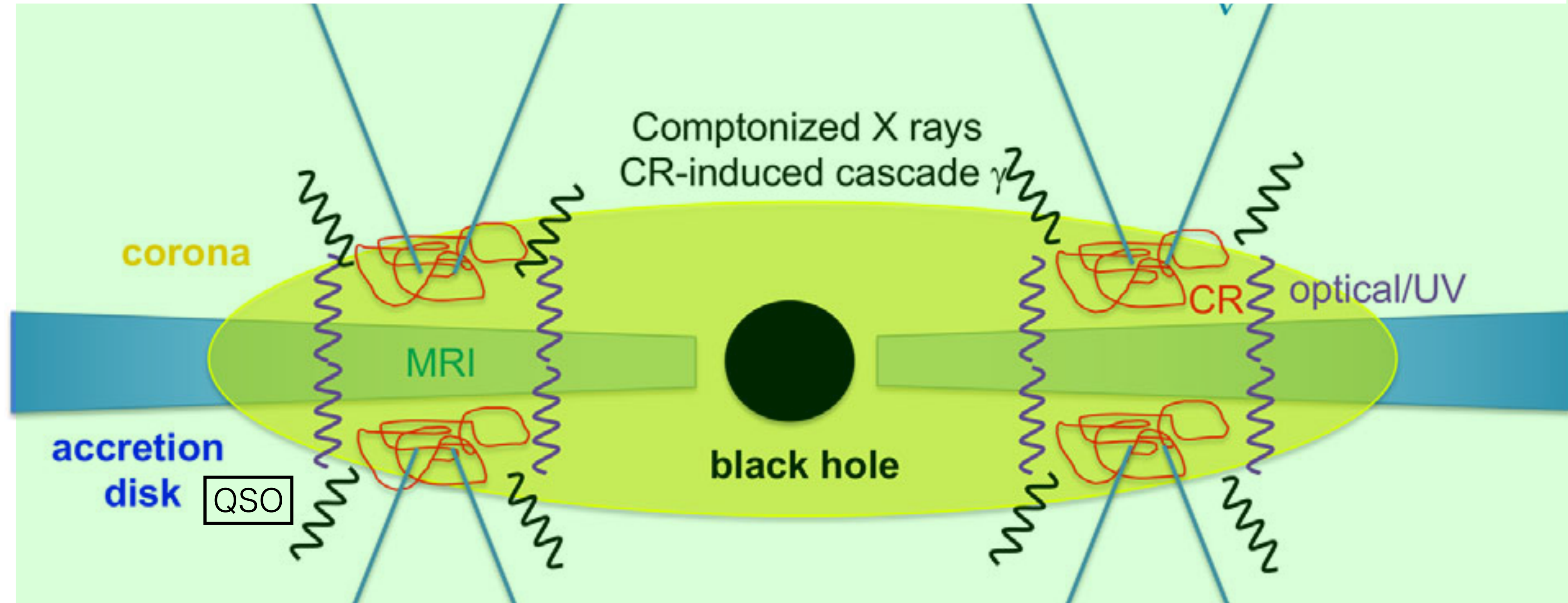
分布関数の進化は
エネルギー空間での拡散

磁気リコネクション → 相対論的粒子の生成
大スケールの乱流場と相互作用 → さらなる宇宙線加速

AGN コロナモデル

Murase, SSK, Meszaros 2020

See also SSK+ 2019; SSK+ 2021; Kheirandish, Murase, SSK 2021



• 宇宙線陽子の輸送方程式

$$\frac{\partial F_p}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_p^2} \frac{\partial}{\partial \varepsilon_p} \left(\varepsilon_p^2 D_{\varepsilon_p} \frac{\partial F_p}{\partial \varepsilon_p} + \frac{\varepsilon_p^3}{t_{p\text{-cool}}} F_p \right) - \frac{F_p}{t_{\text{esc}}} + \dot{F}_{p,\text{inj}}$$

$$D_{\varepsilon_p} \approx \frac{\zeta c}{H} \left(\frac{V_A}{c} \right)^2 \left(\frac{r_L}{H} \right)^{q-2} \varepsilon_p^2,$$

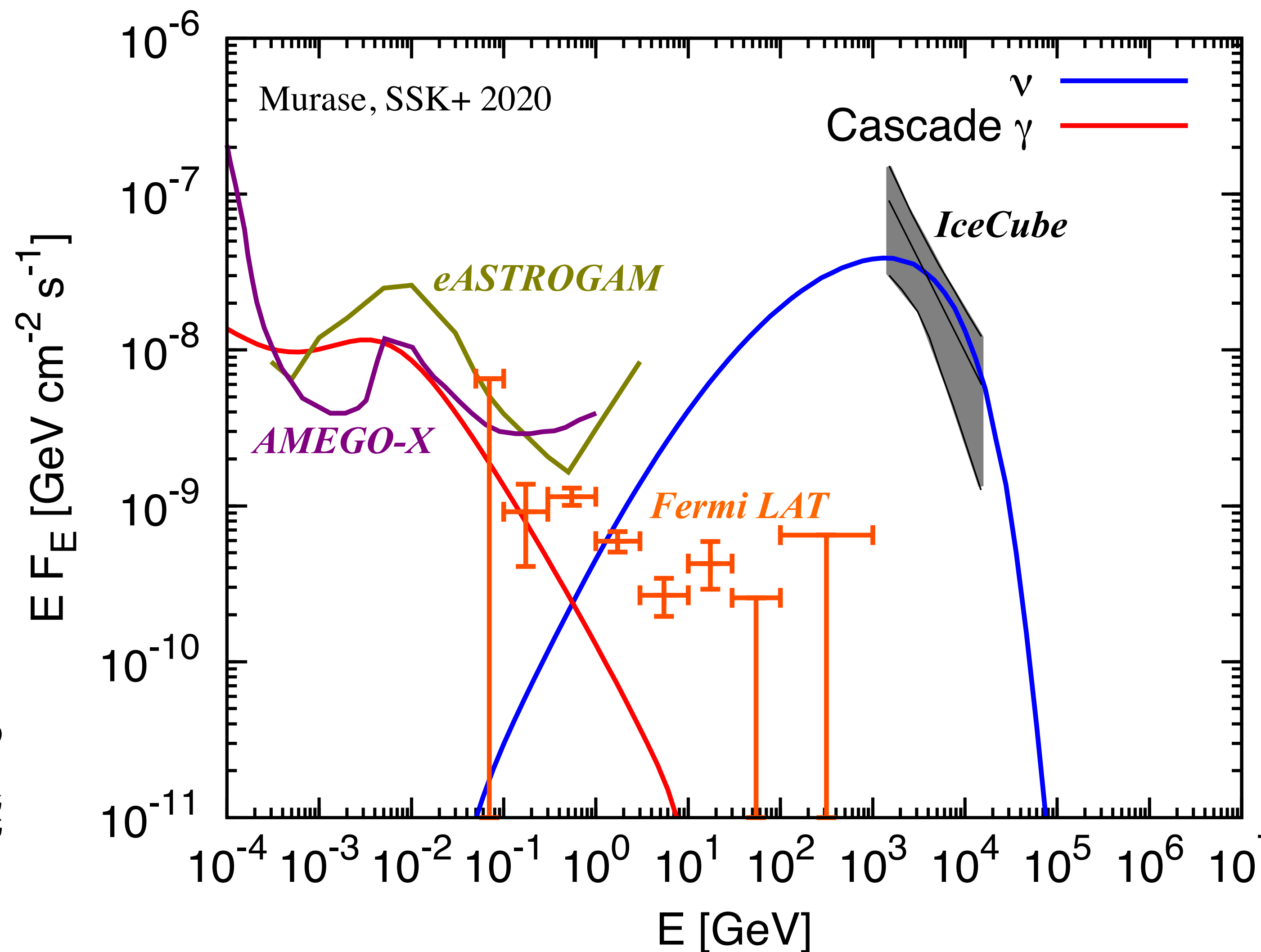
• 電磁カスケードに関する輸送方程式

$$\frac{\partial n_{\varepsilon_\gamma}^\gamma}{\partial t} = -\frac{n_{\varepsilon_\gamma}^\gamma}{t_{\gamma\gamma}} - \frac{n_{\varepsilon_\gamma}^\gamma}{t_{\text{esc}}} + \dot{n}_{\varepsilon_\gamma}^{(\text{IC})} + \dot{n}_{\varepsilon_\gamma}^{(\text{ff})} + \dot{n}_{\varepsilon_\gamma}^{(\text{syn})} + \dot{n}_{\varepsilon_\gamma}^{\text{inj}},$$

$$\frac{\partial n_{\varepsilon_e}^e}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \varepsilon_e} [(P_{\text{IC}} + P_{\text{syn}} + P_{\text{ff}} + P_{\text{Cou}}) n_{\varepsilon_e}^e] = \dot{n}_{\varepsilon_e}^{(\gamma\gamma)} - \frac{n_{\varepsilon_e}^e}{t_{\text{esc}}} + \dot{n}_{\varepsilon_e}^{\text{inj}},$$

NGC 1068からのガンマ線・ニュートリノ放射

- コロナモデルはガンマ線データと矛盾することなくニュートリノデータを説明可能
- 拡散的逃走と Bethe-Heitler process ($p+\gamma \rightarrow p+e^++e^-$) が加速を止める
- pp と $p\gamma$ (with X-rays) の両方がニュートリノ放射に寄与
- **カスケード放射は10 MeV付近に現れる**
→ 将来のMeVガンマ線観測で検証可能



近傍セイファート銀河からのニュートリノ

- コロナモデルの予言： $L_\nu \propto L_X$
→ 明るい近傍天体をリストアップ
- NuSTARデータとIceCubeの有効面積
→ **NGC1068 が最初に見つかるべき**

Source

Cen A

Circinus Galaxy

ESO 138-1

NGC 7582

NGC 1068

NGC 4945

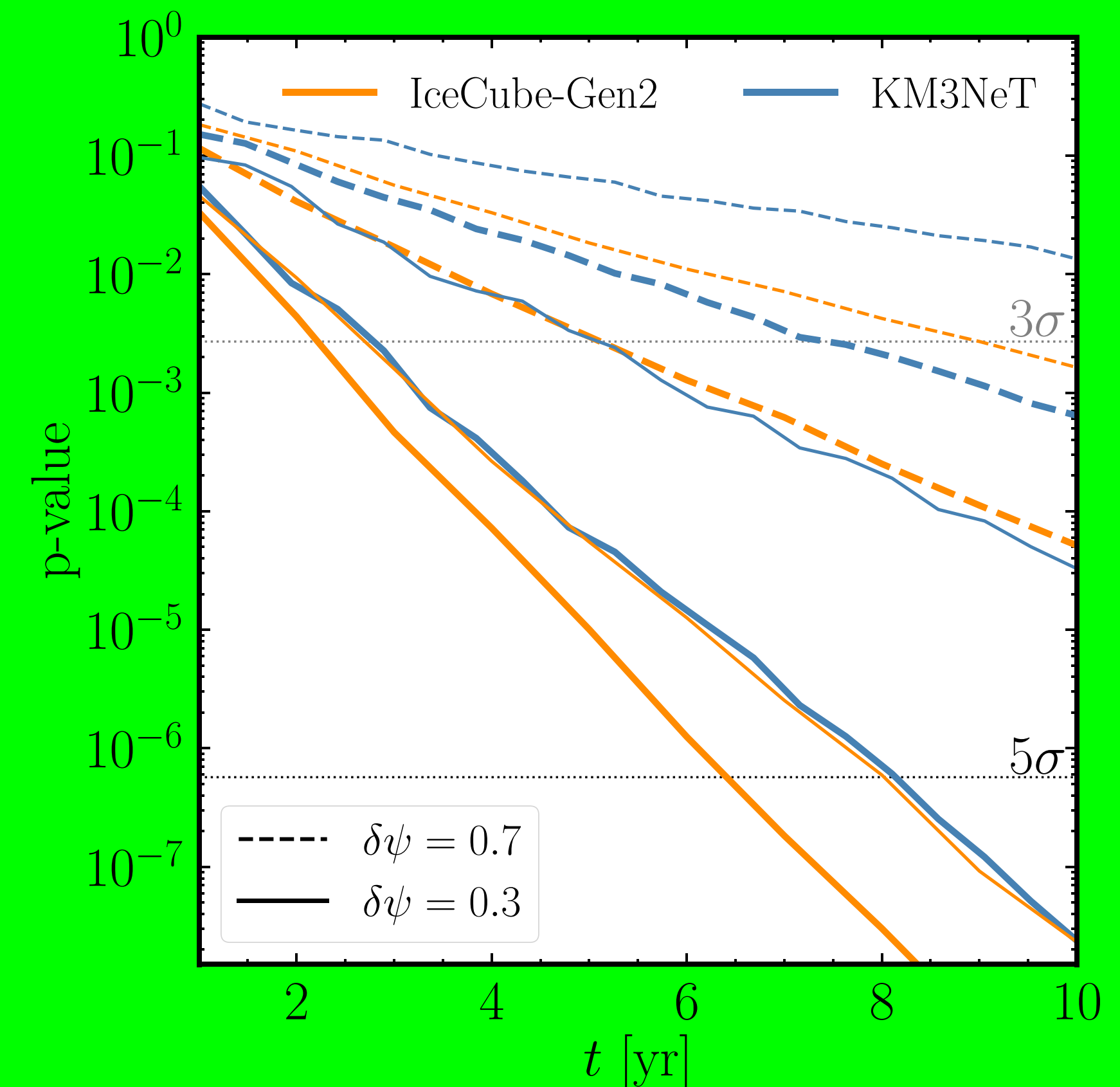
NGC 424

UGC 11910

CGCG 164-019

NGC 1275

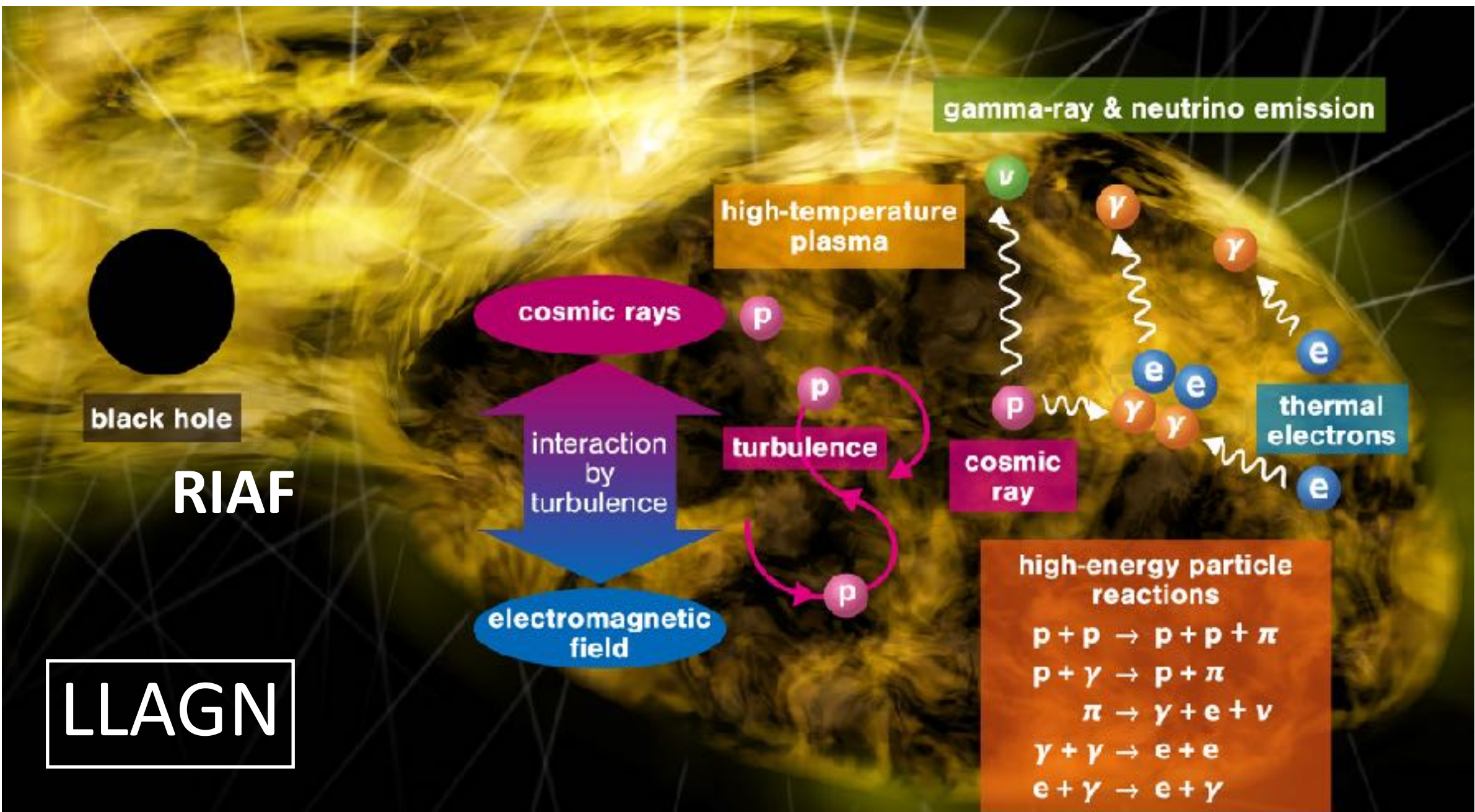
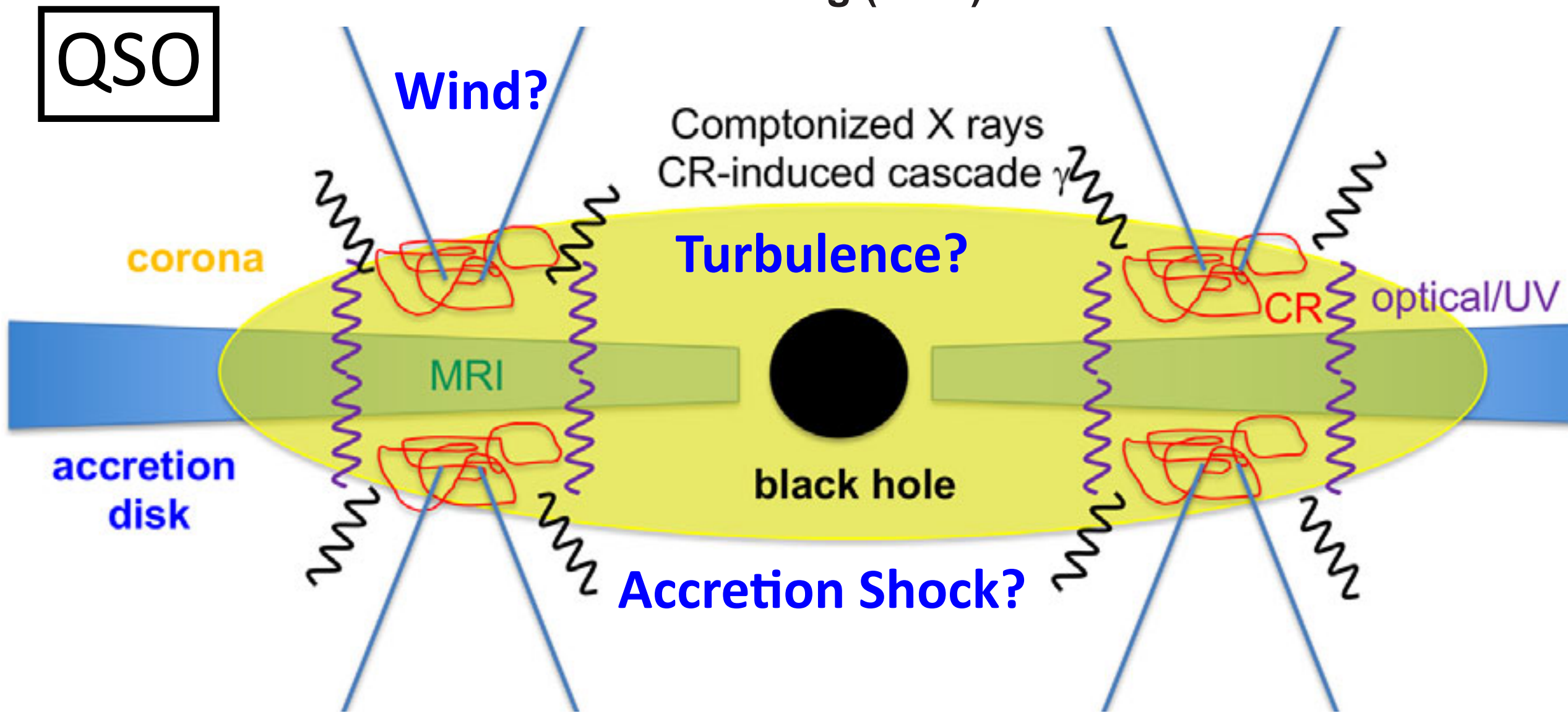
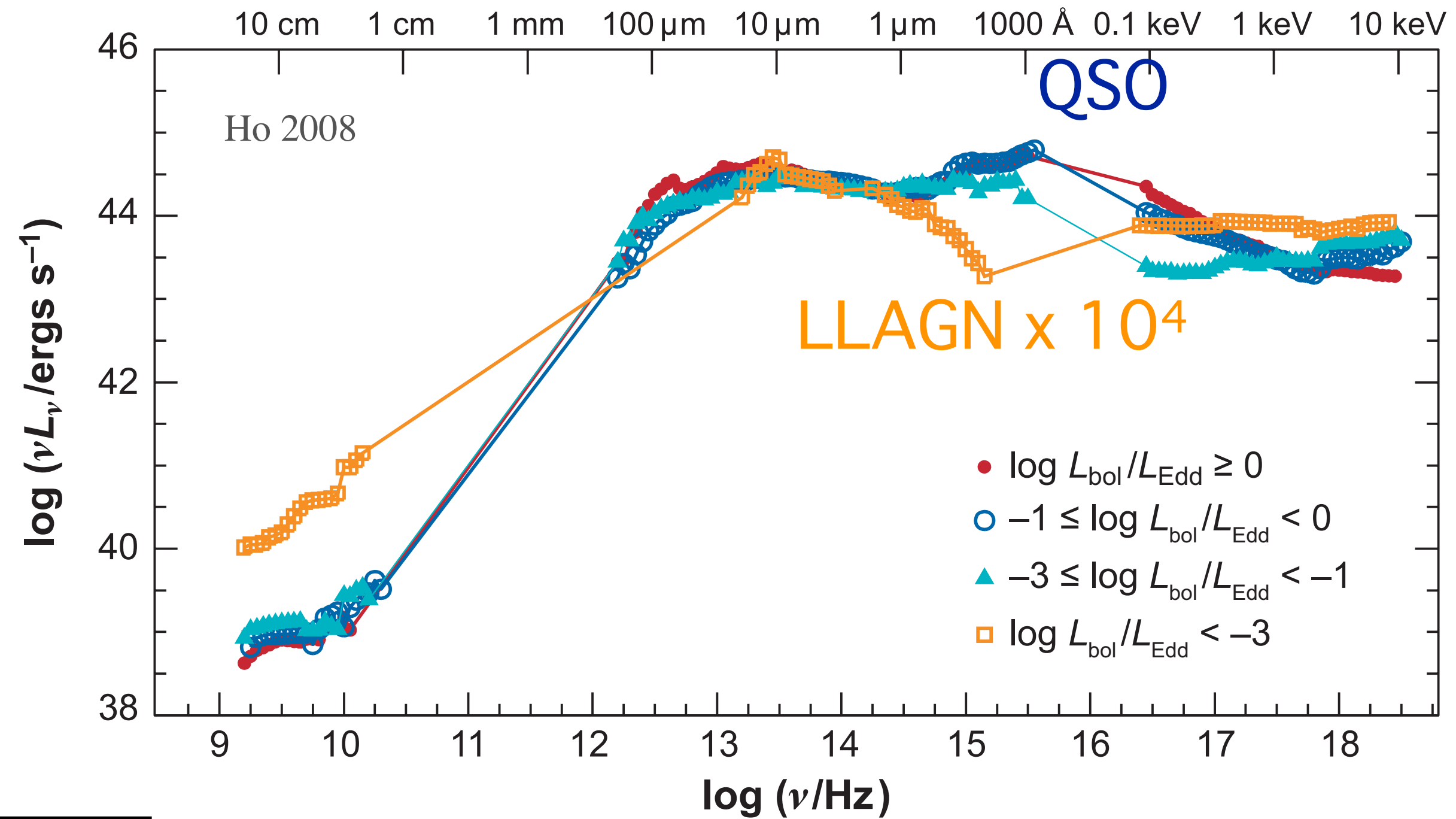
- スタッキング解析の予言 (10天体)



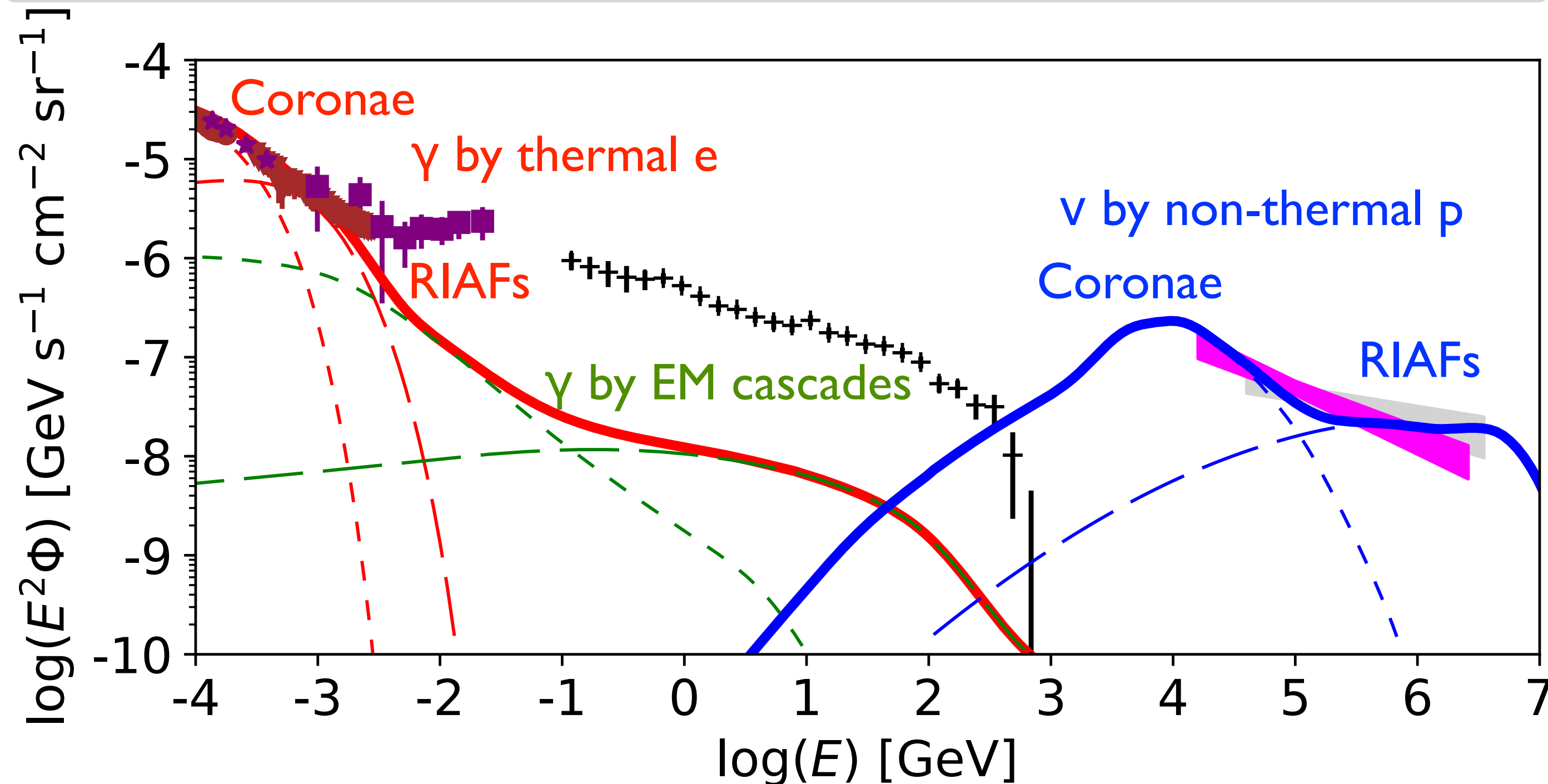
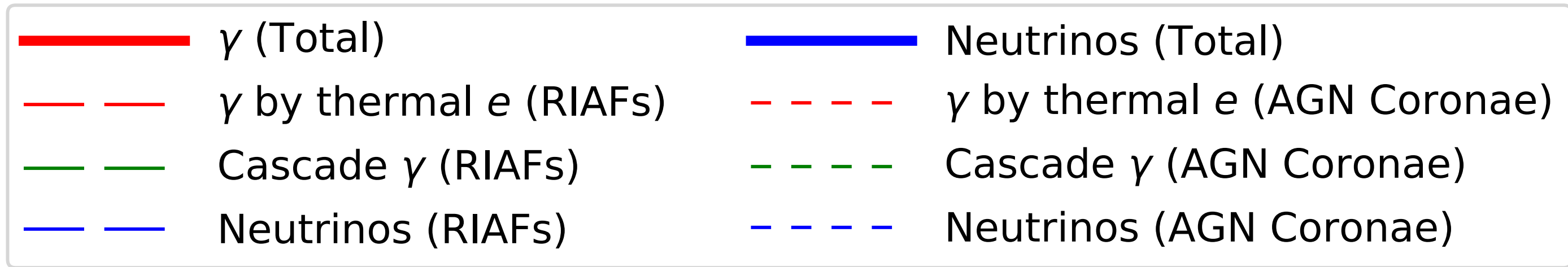
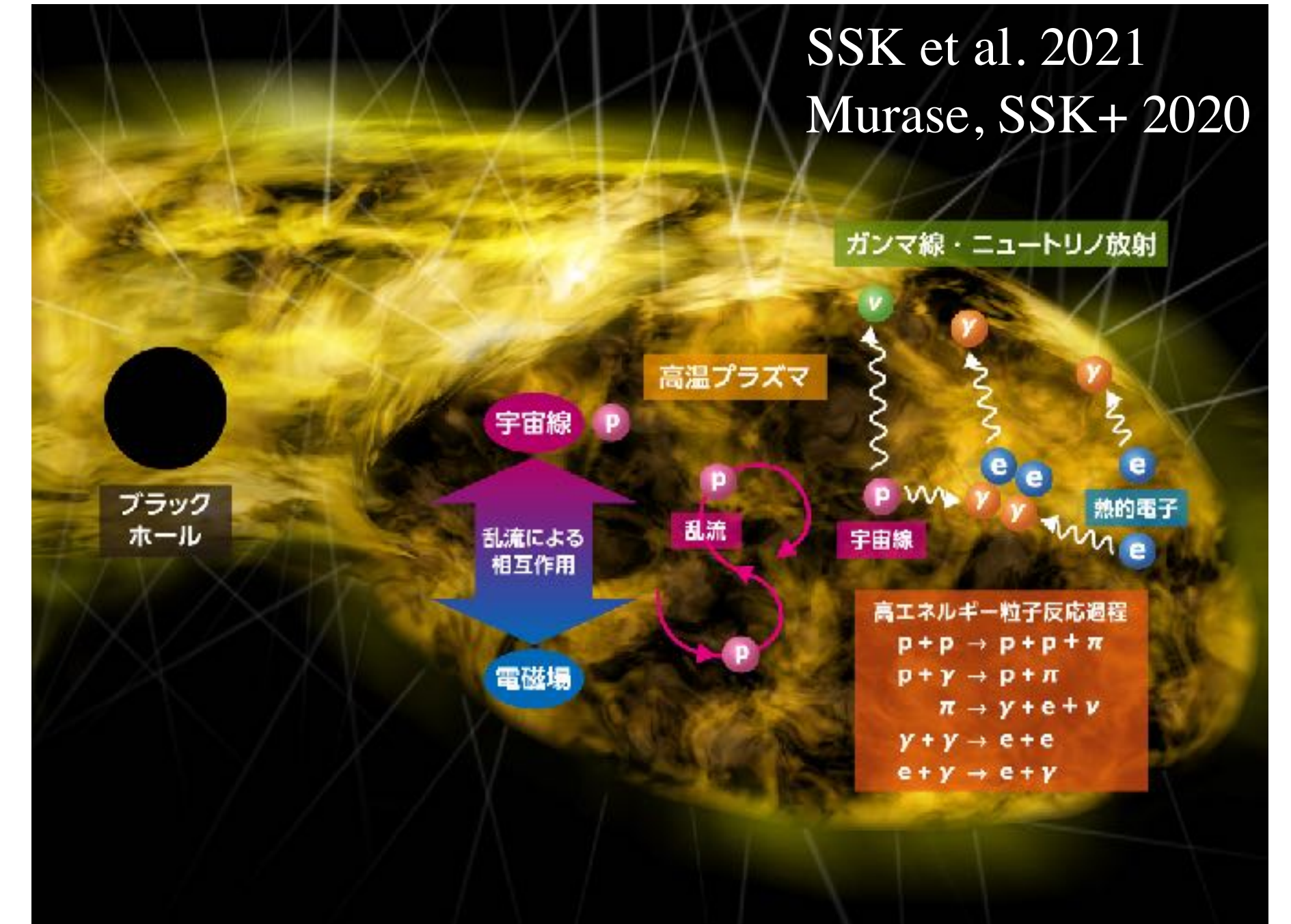
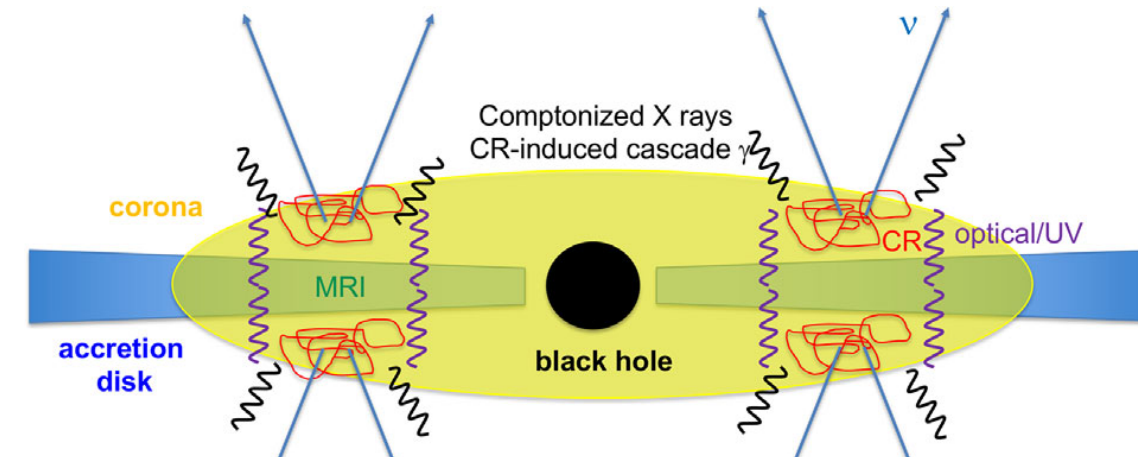
- KM3NeTとIceCube-Gen2は5 σ で
セイファート銀河からの信号を検出可能

低光度活動銀河核

- クエーサー (QSO): 明るい活動銀河核
 - 光学的に厚い円盤 + 高温コロナ
- 低光度活動銀河核 (LLAGN): 暗い活動銀河核
 - 光学的に薄い高温降着流
 - 降着流全体が無衝突プラズマ



活動銀河核降着流からのニュートリノ放射

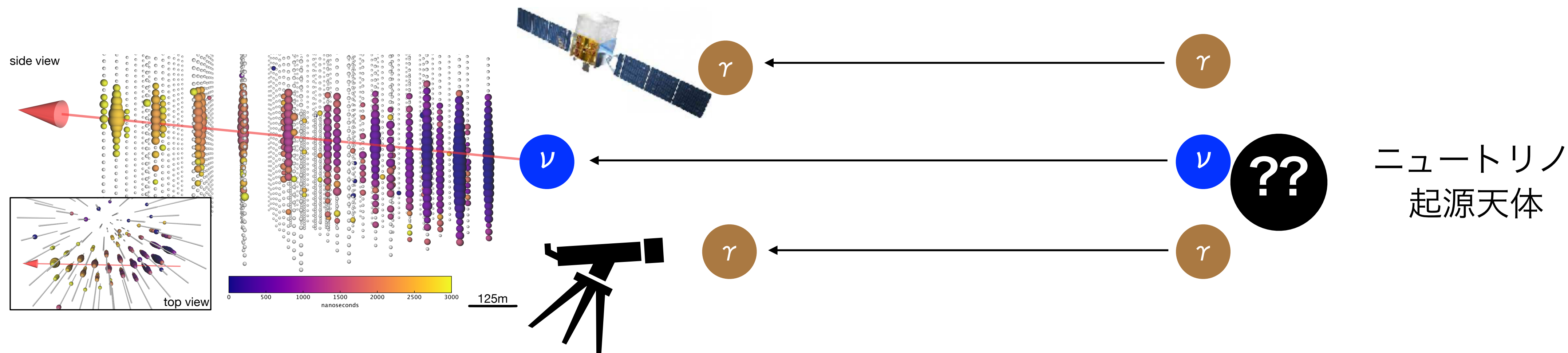


- 明るい活動銀河核と暗い活動銀河核で別々に理論モデル化
- 多波長観測データを用いて物理パラメータを校正
- **天体ニュートリノデータを説明可能**

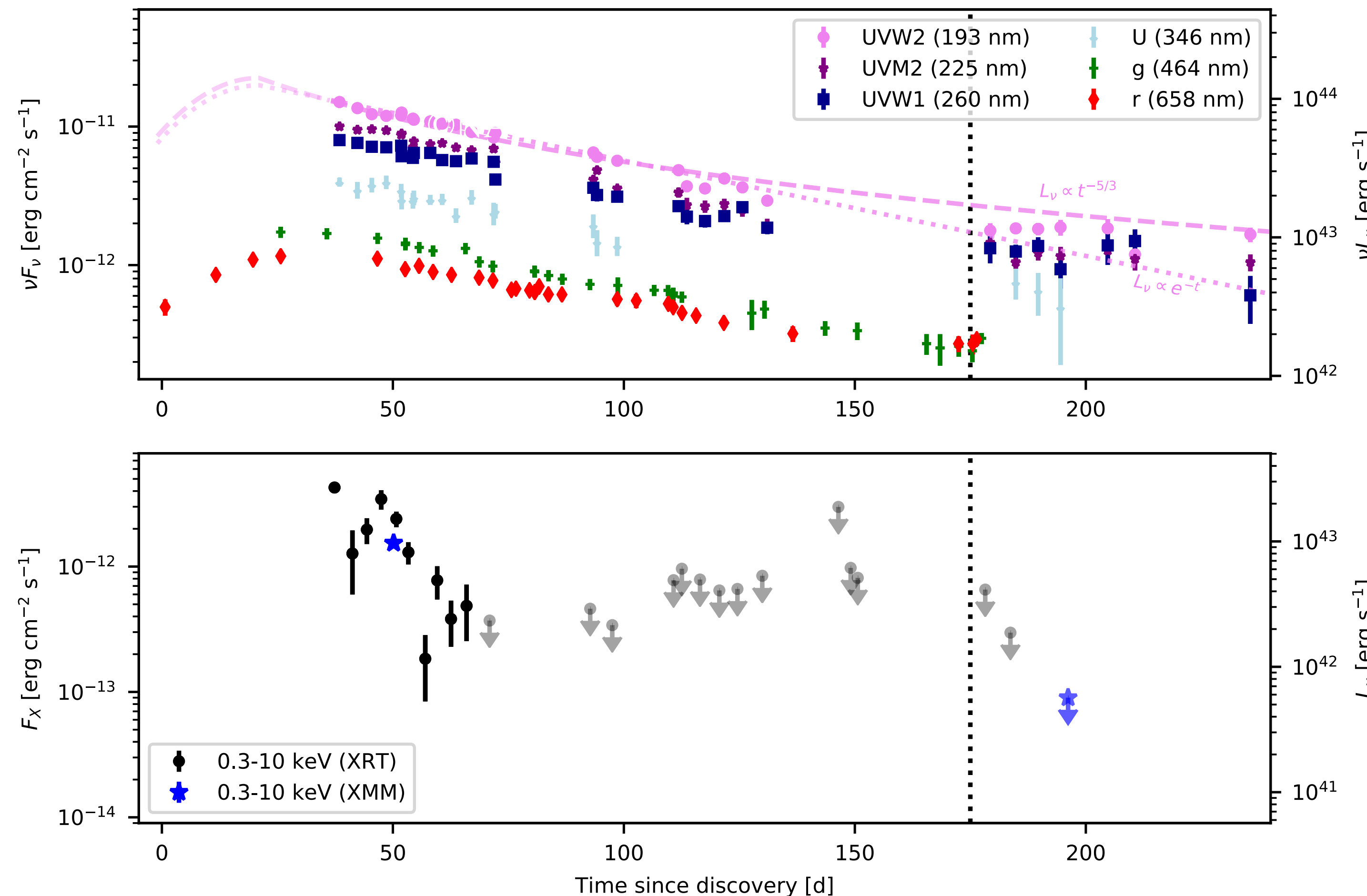
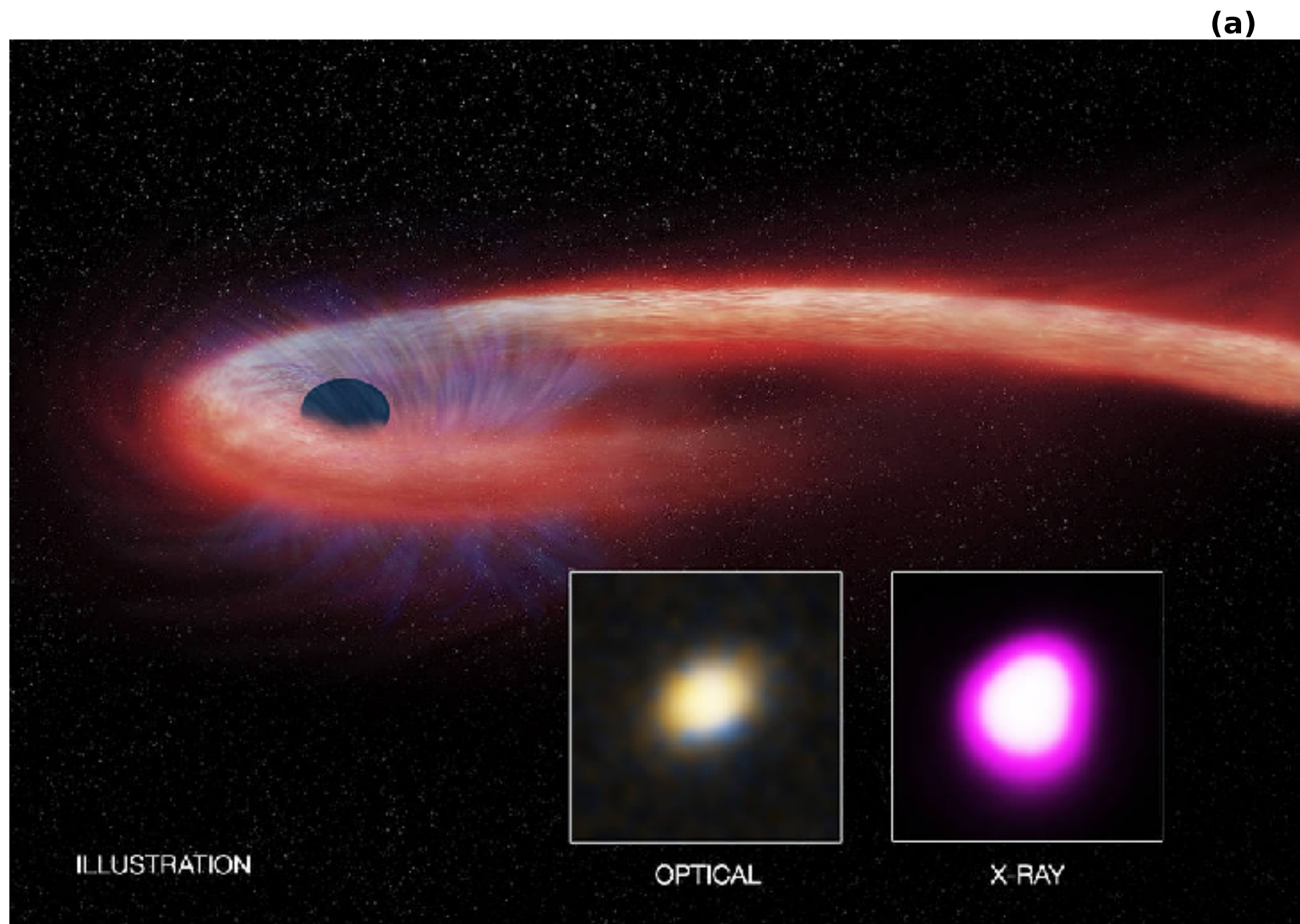
ニュートリノ天体の探し方

- カタログとの相関解析 ($\gamma \rightarrow \nu$)
- 積分したニュートリノデータ
+ 電磁波天体のカタログ
→ ニュートリノ放射天体同定
- 定常天体にも感度がある
- リアルタイムの解析は困難

- ニュートリノ事象の追観測 ($\nu \rightarrow \gamma$)
 - ニュートリノアラート
+ 即時追観測
→ ニュートリノ放射天体の同定
 - 追観測によりカタログにはないデータの取得可能
 - 突発天体にのみ感度がある

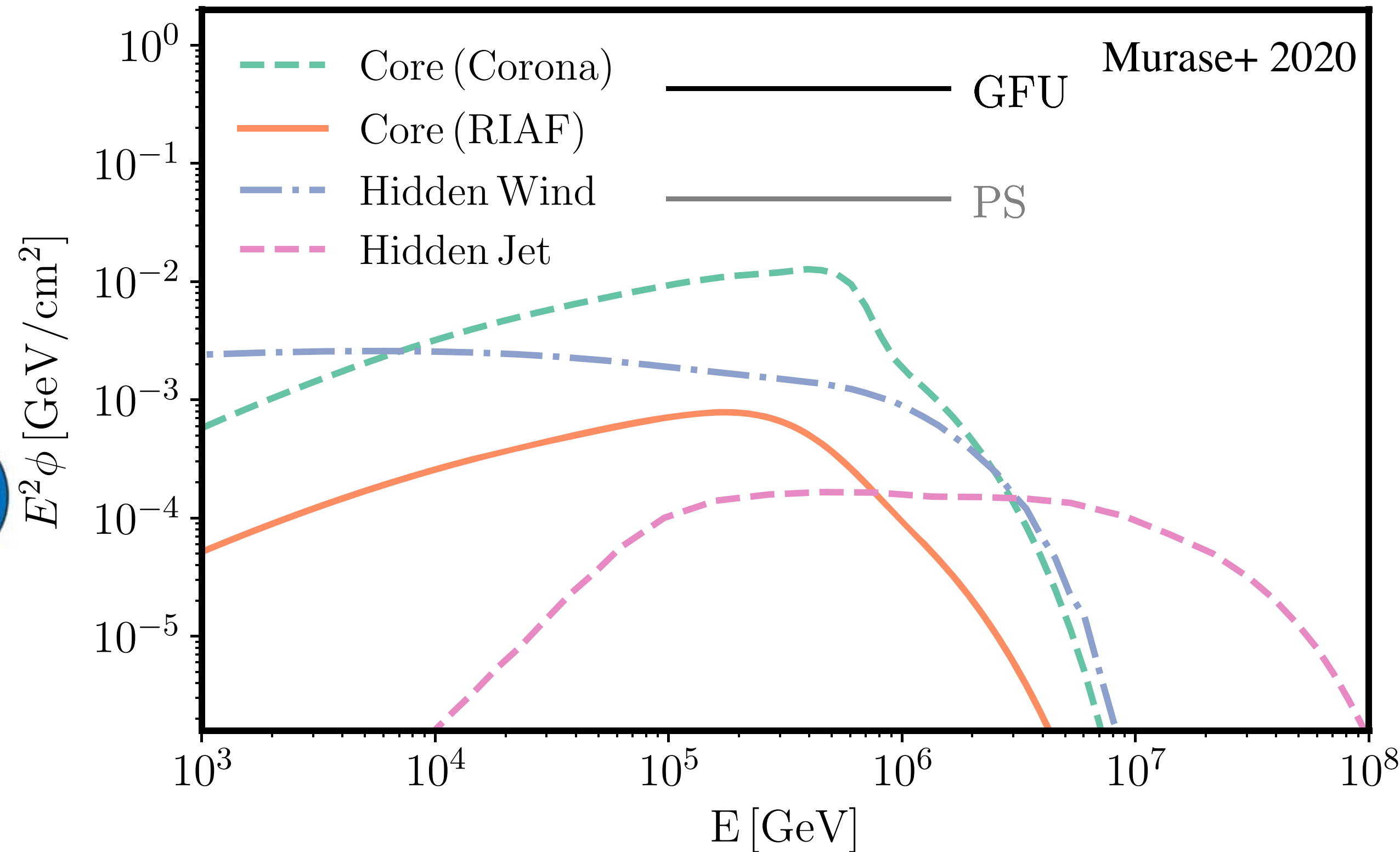
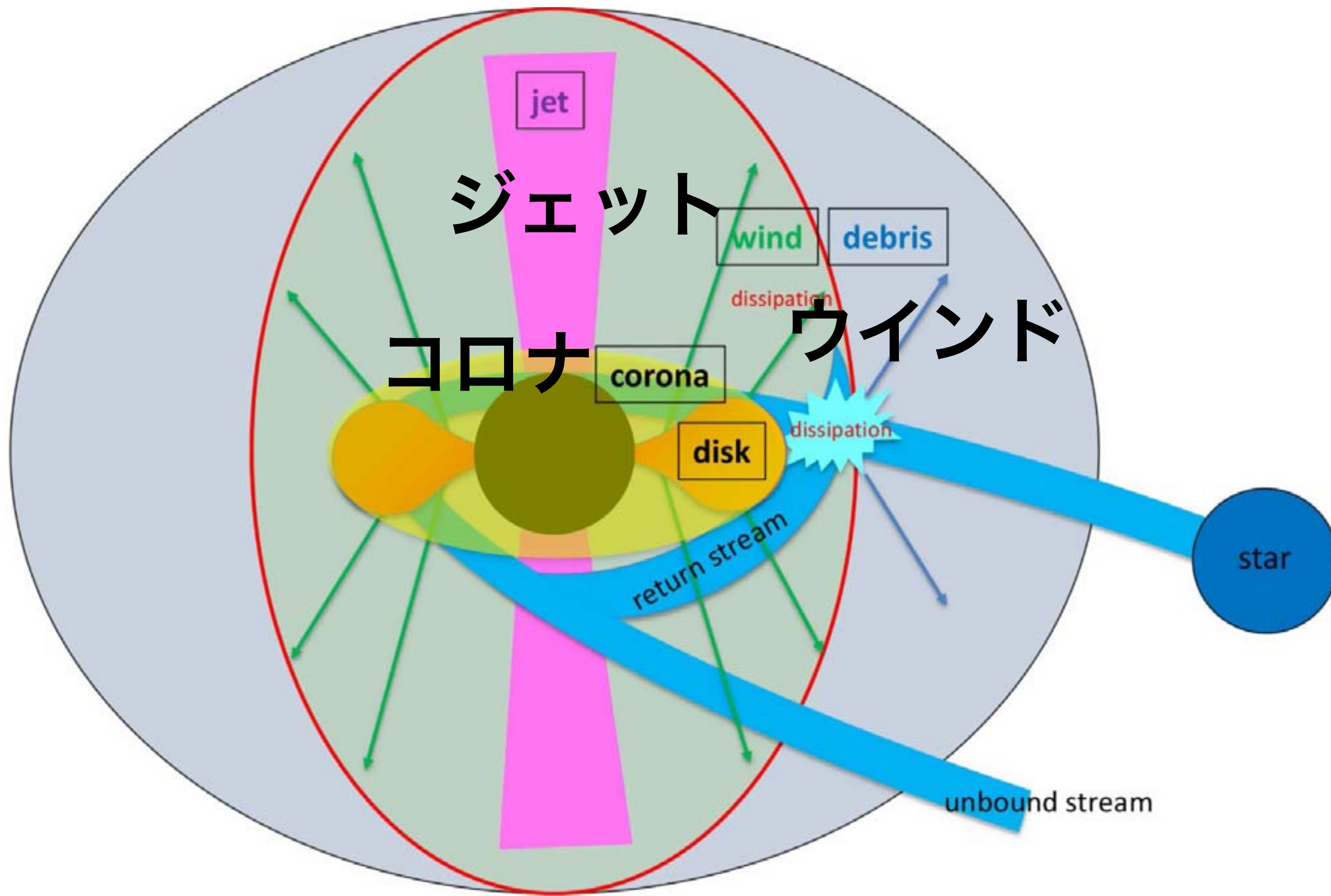


潮汐破壊現象 (TDE) とニュートリノ



- 潮汐破壊現象：
恒星が超巨大ブラックホールに
引き裂かれて明るく輝く現象だが**詳細は未解明**
- 2例のIceCube事象が明るいTDEと相関。有意度 3.5σ ? IC191001 \Leftrightarrow AT2019dsg ; IC200530 \Leftrightarrow AT2019fdr
- TDEの光度曲線のピークから 100 - 400 日後にニュートリノ検出

TDEからのニュートリノ放射モデル

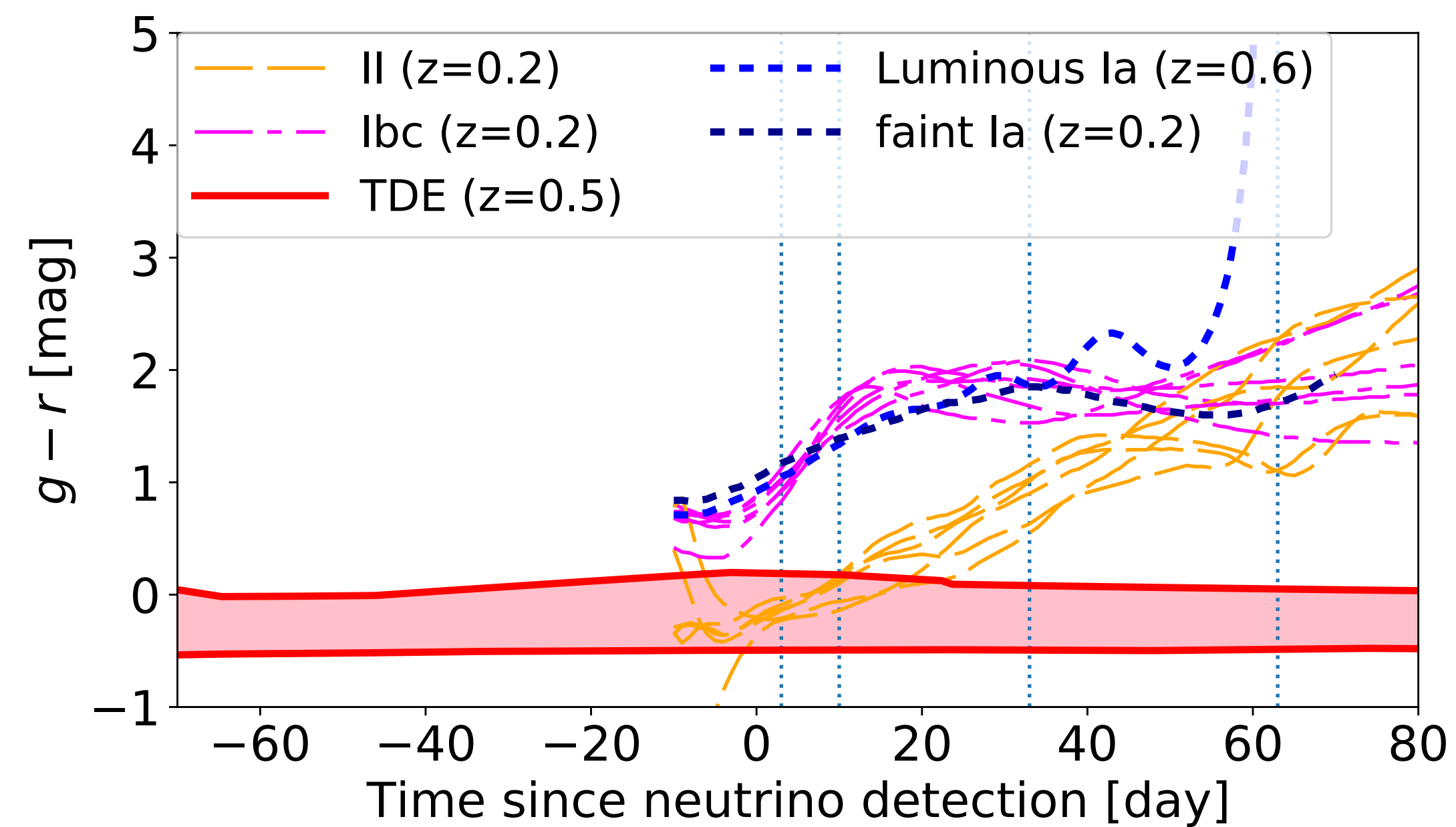
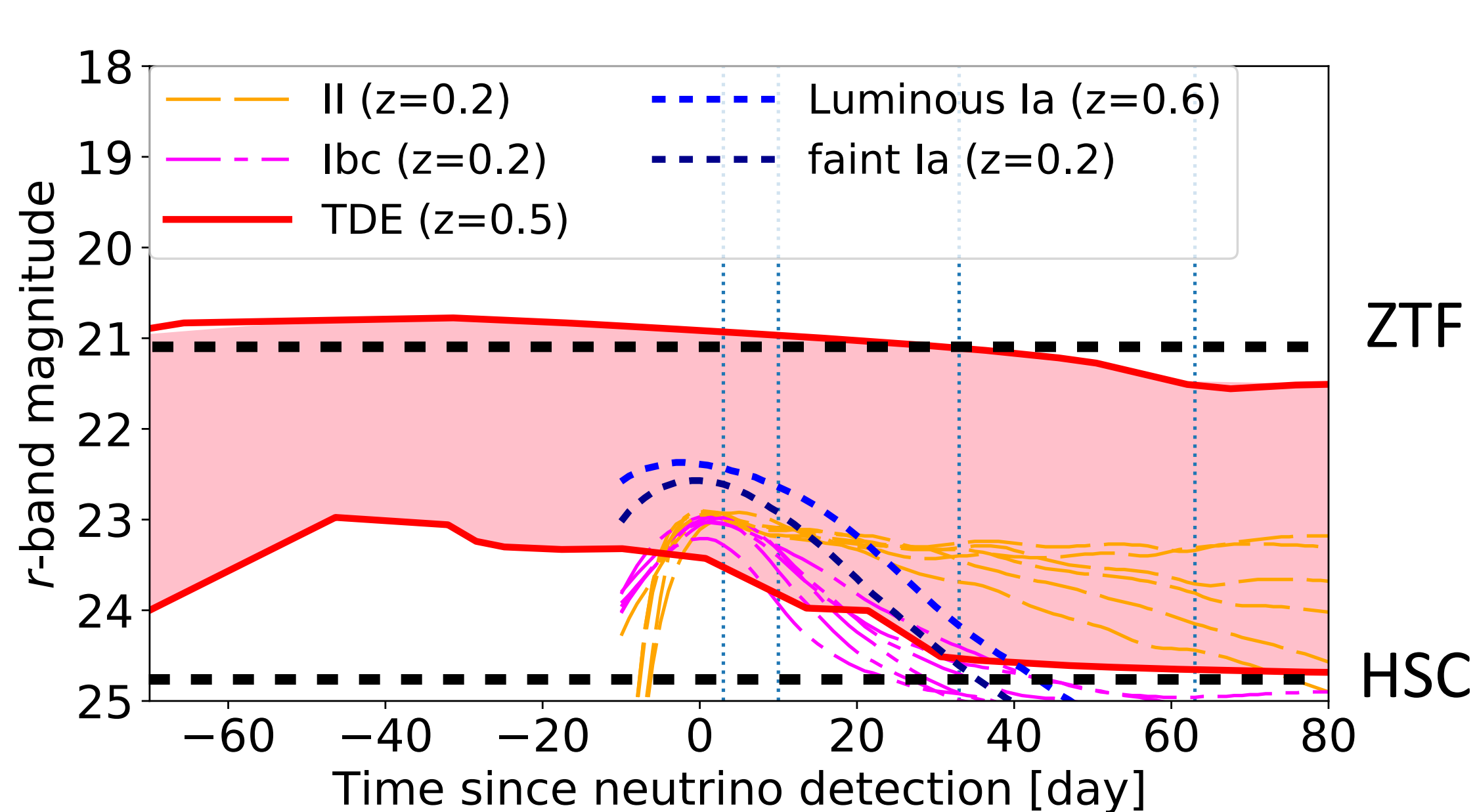


Murase, SSK + 2020 ApJ

- コロナモデル : possible (ニュートリノ強度: 高い、遅延時間: 説明可能)
- ウインドモデル : challenging (ニュートリノ強度: 中、遅延時間: 自然に説明可能)
- ジェットモデル : unlikely (ニュートリノ強度: 低い、遅延時間: 説明可能)

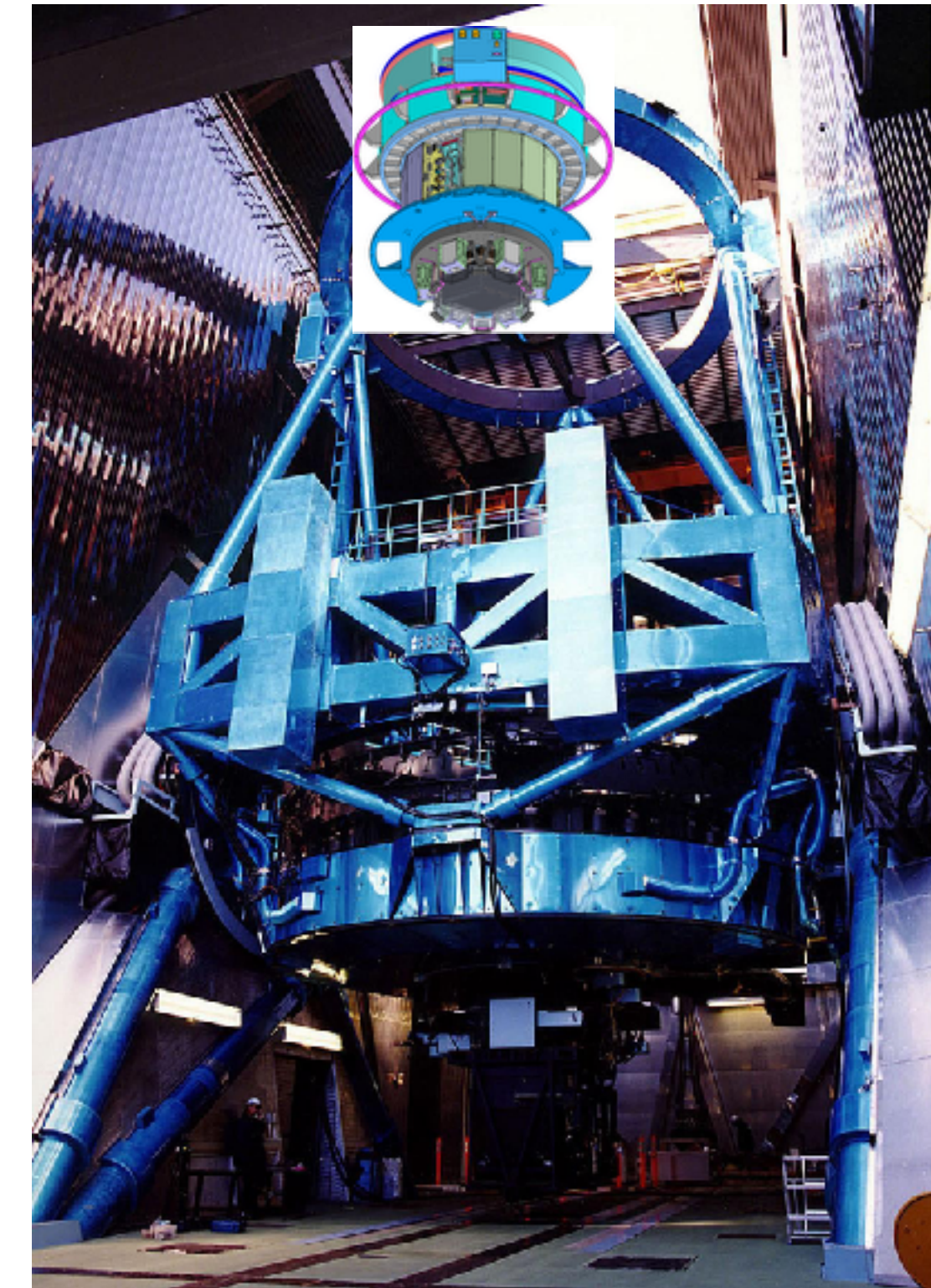
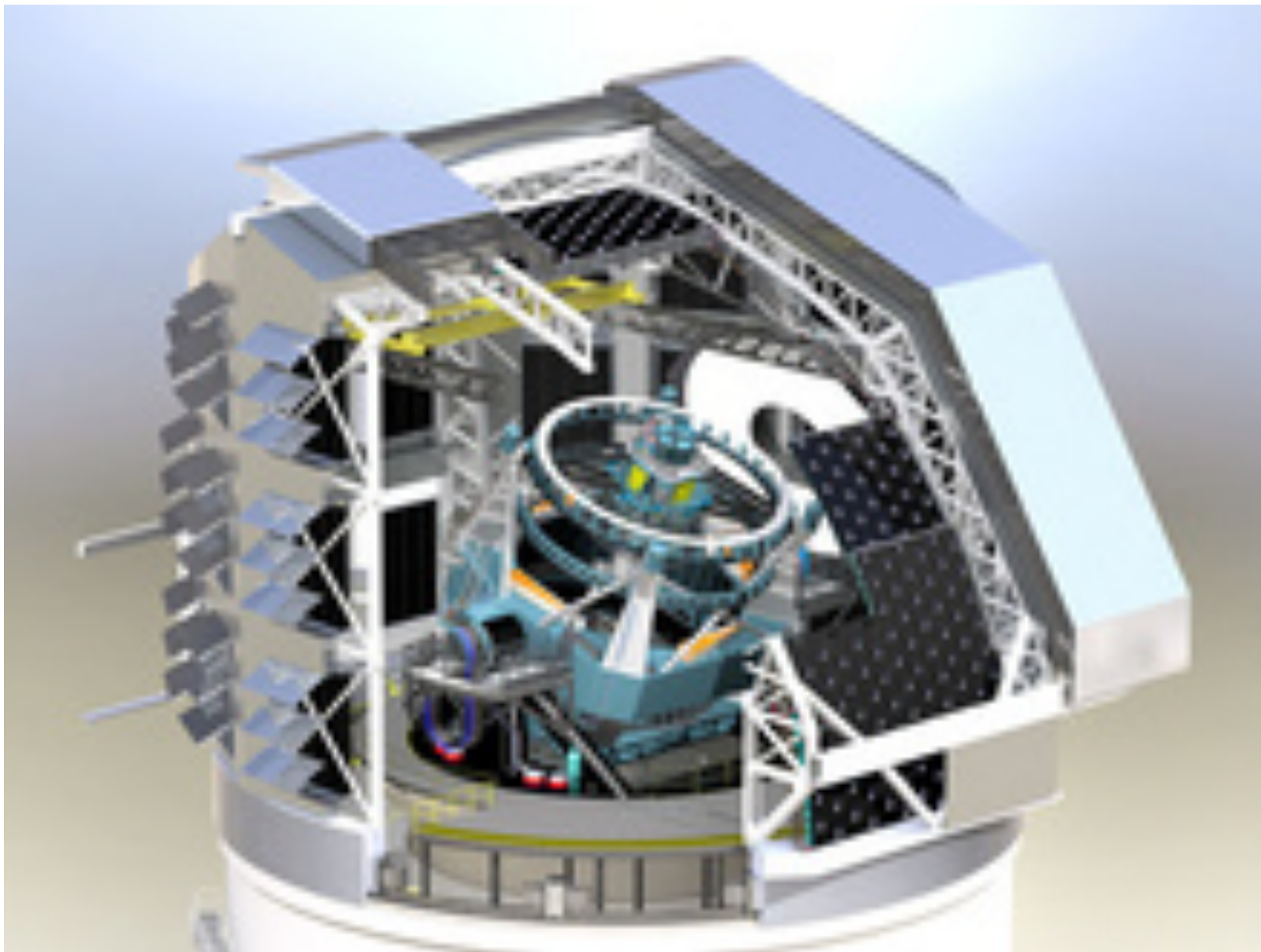
TDE-neutrino paradigm の検証

- 宇宙ニュートリノ起源までの平均距離: $z \sim 0.5 - 1$
 → **深い観測が必要** (TDE@ $z=0.5$: 21-24 mag)
- ニュートリノ事象の平均角度誤差: 1 deg^2
 → **視野の広いサーベイが必要** (typical FoV: 0.03 deg^2)
- 現在の望遠鏡群では **Subaru/ HSC** のみが可能なサーベイ
- **Subaru/HSCで青くて遅い突発天体を探せ!** (2023年 前期・後期 観測提案採択済)



将来のニュートリノ追観測

- Vera Rubin Observatory (LSST):
 - 広くて深い突発天体探査
 - 限界等級 < 23 mag
- Subaru PFS:
 - ファイバーを使った多天体分光
 - 誤差円内の全突発天体を分光可能



2つを合わせればTDEをニュートリノ源と同定可能

まとめ

- 高エネルギー宇宙線と天体ニュートリノの起源は未解明の大問題
- ブラックホール降着流からのニュートリノ放射理論モデルを構築**
→天体ニュートリノデータを説明することが可能
- 潮汐破壊現象がニュートリノ源の有力候補。将来の可視光追観測による検証が鍵。

