

天体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

(Shigeo S. Kimura)



TI-FRIS



FRIS

目次

- 宇宙線と天体高エネルギーニュートリノ
- 宇宙ニュートリノ背景放射と起源天体候補
- まとめ

目次

- 宇宙線と天体高エネルギーニュートリノ
- 宇宙ニュートリノ背景放射と起源天体候補
- 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

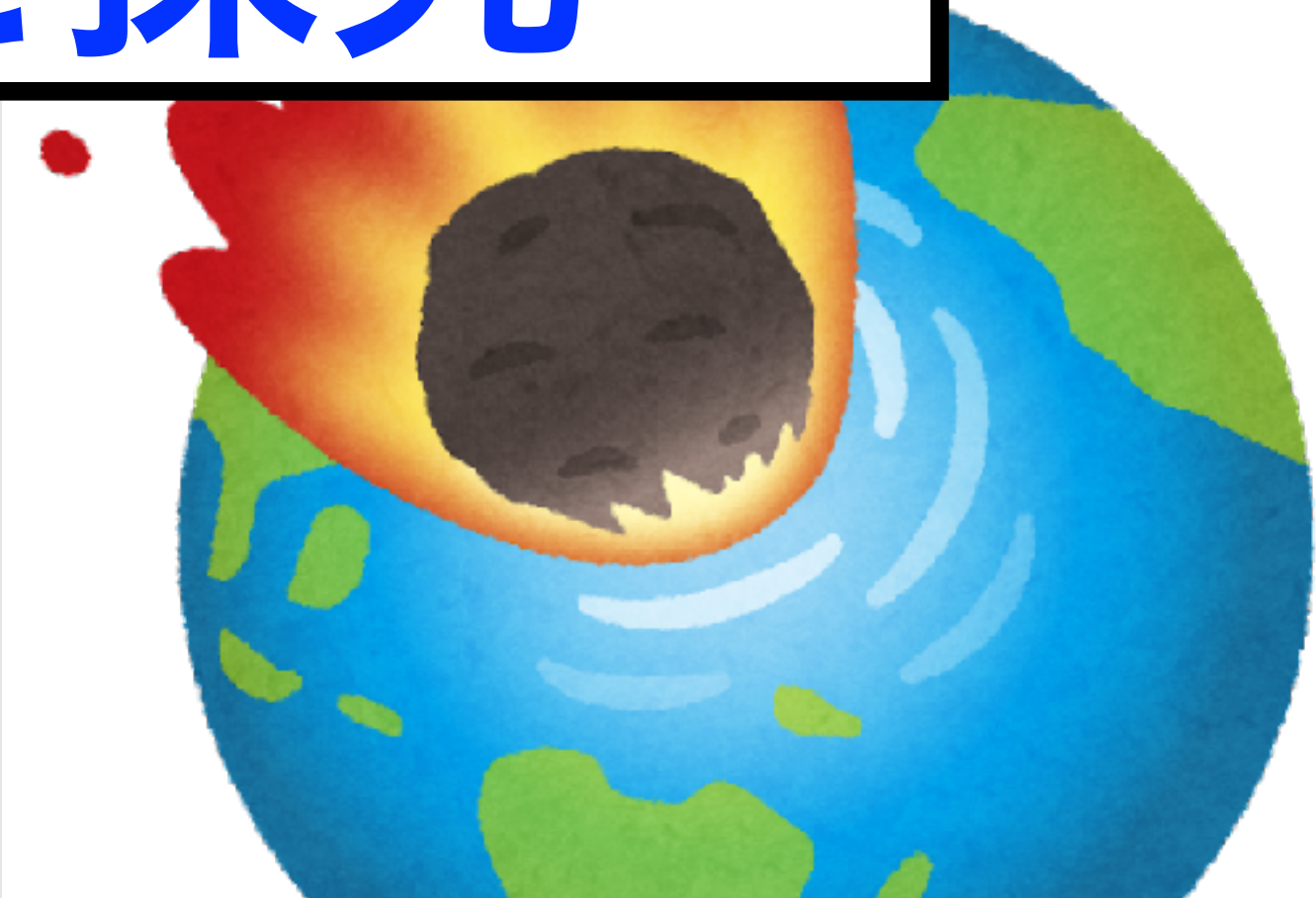
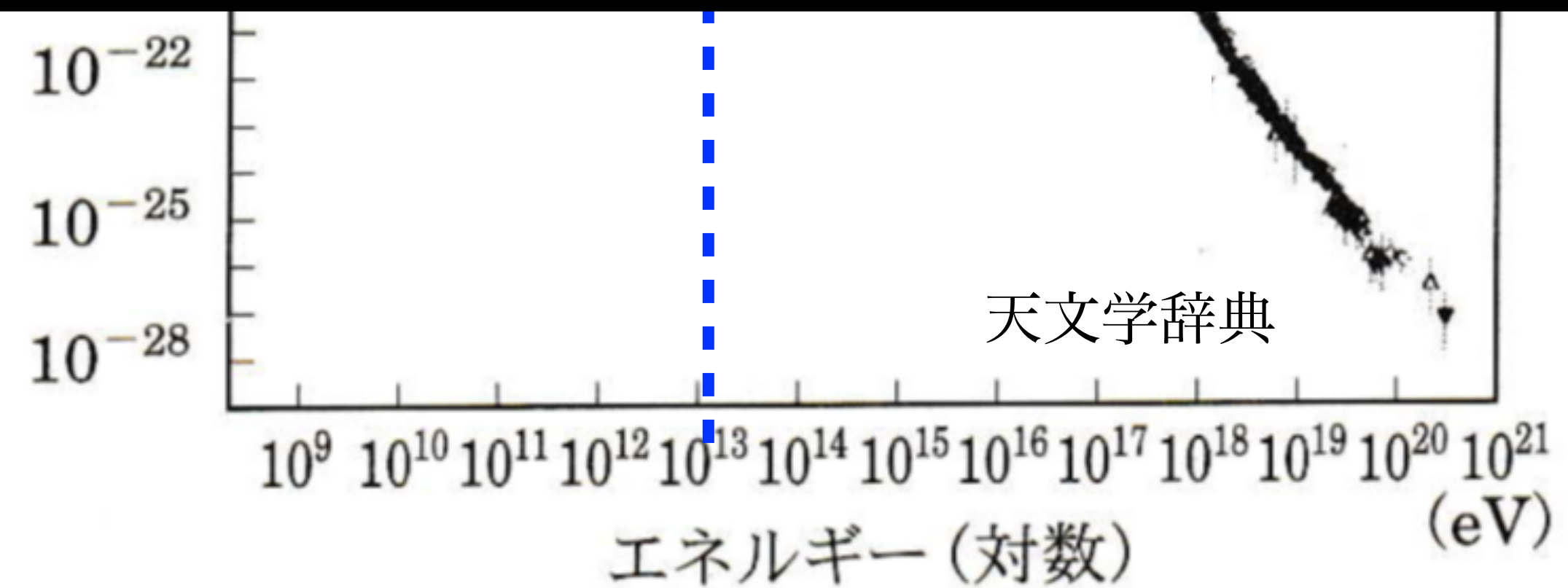


起源天体と生成機構は100年来の

大問題

極限環境での物理現象を探究

の
ム
絶滅！

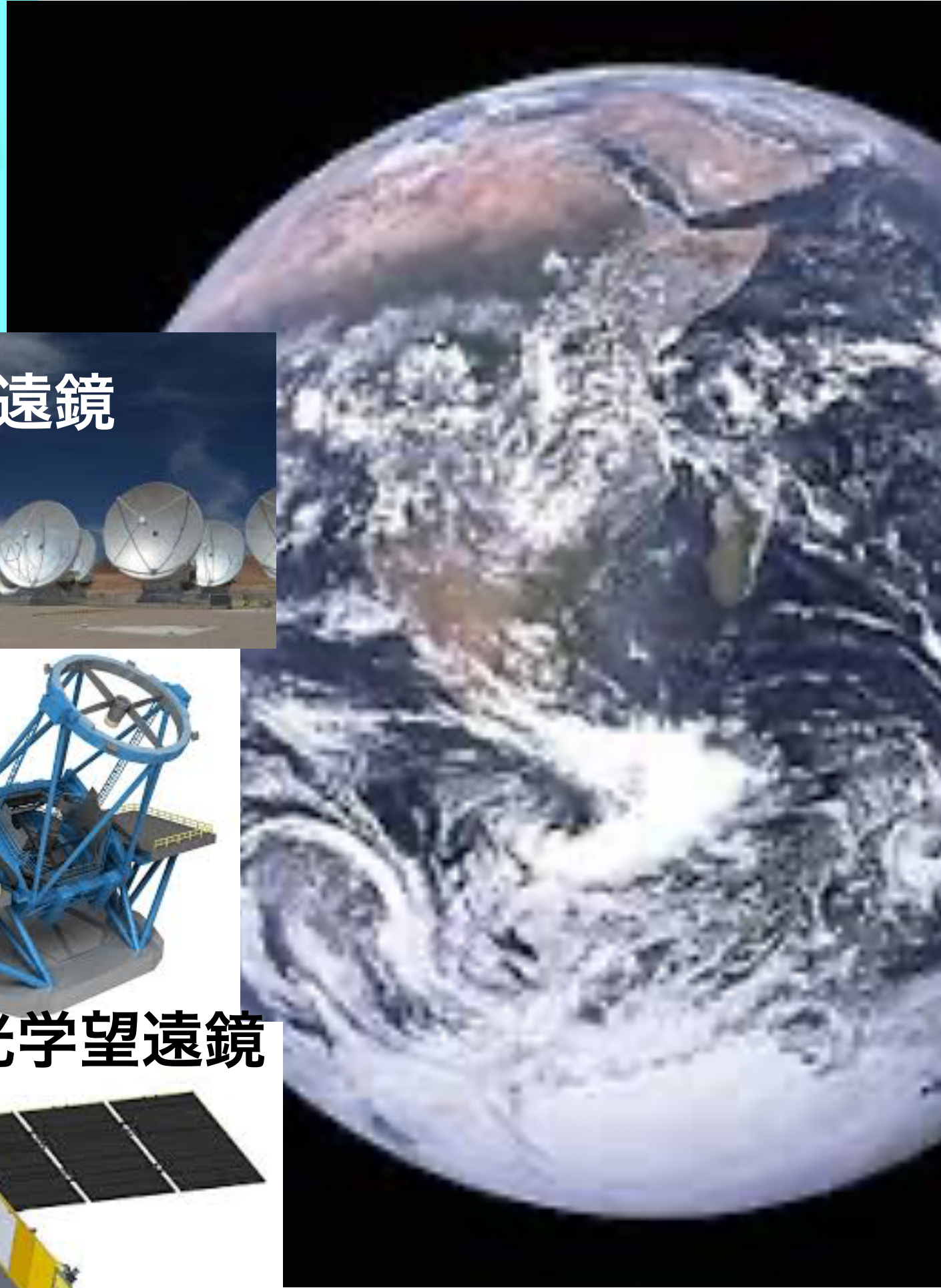
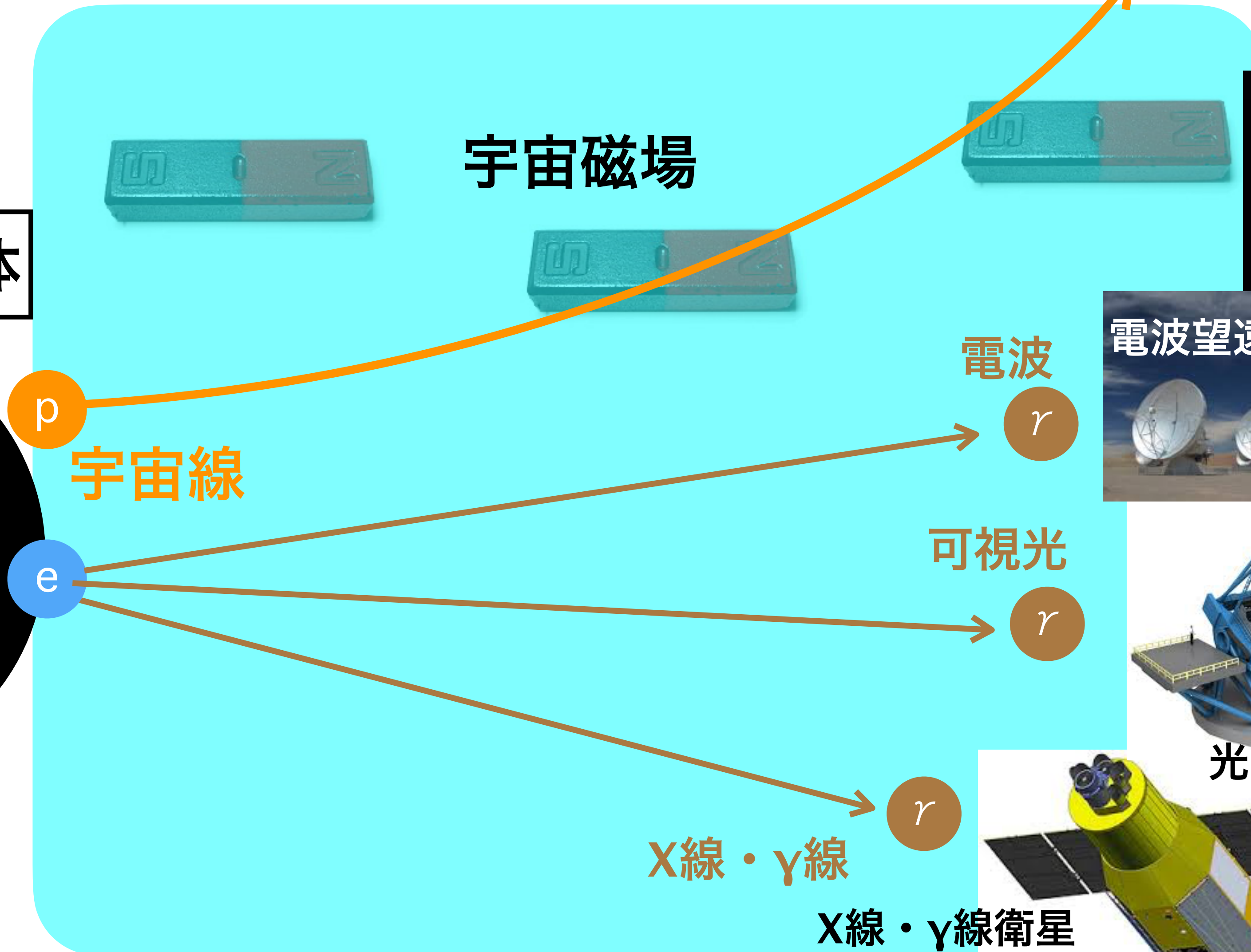
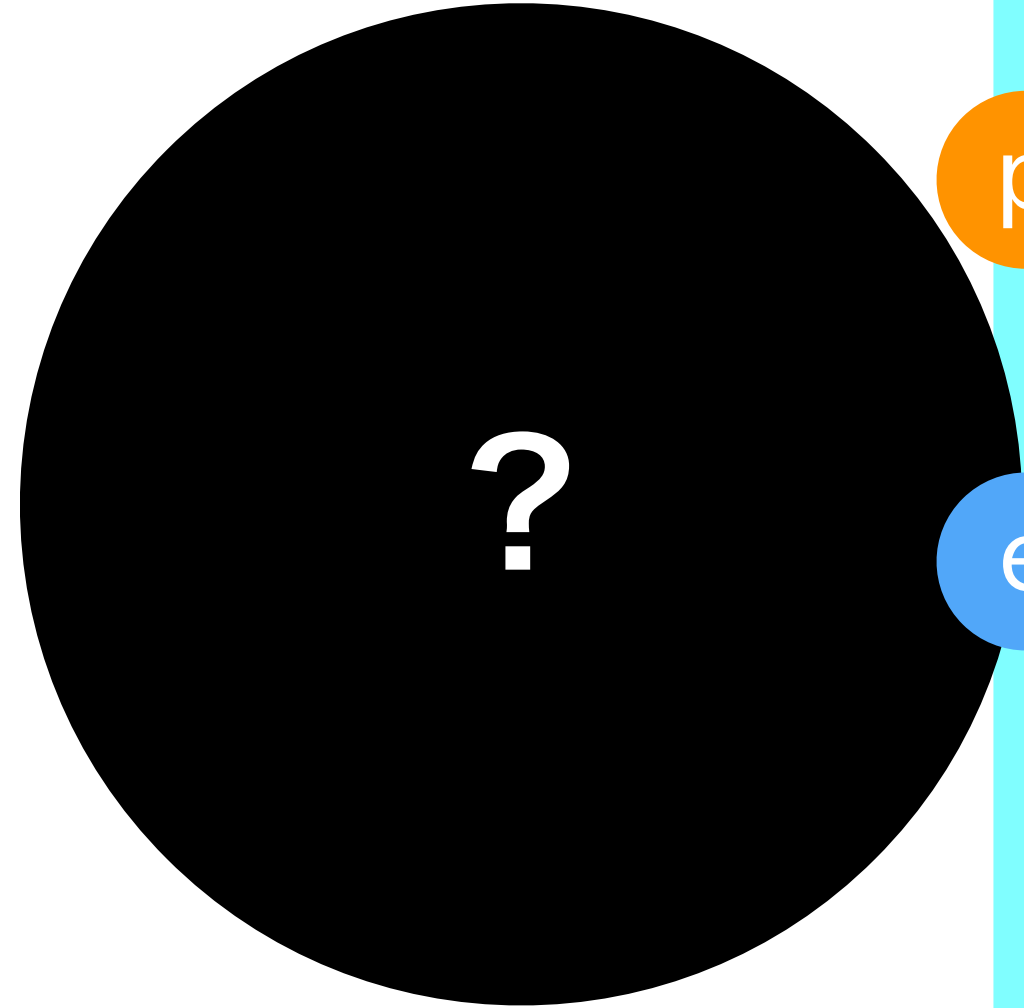


従来の研究

宇宙線の伝搬

地球での検出

宇宙線起源天体



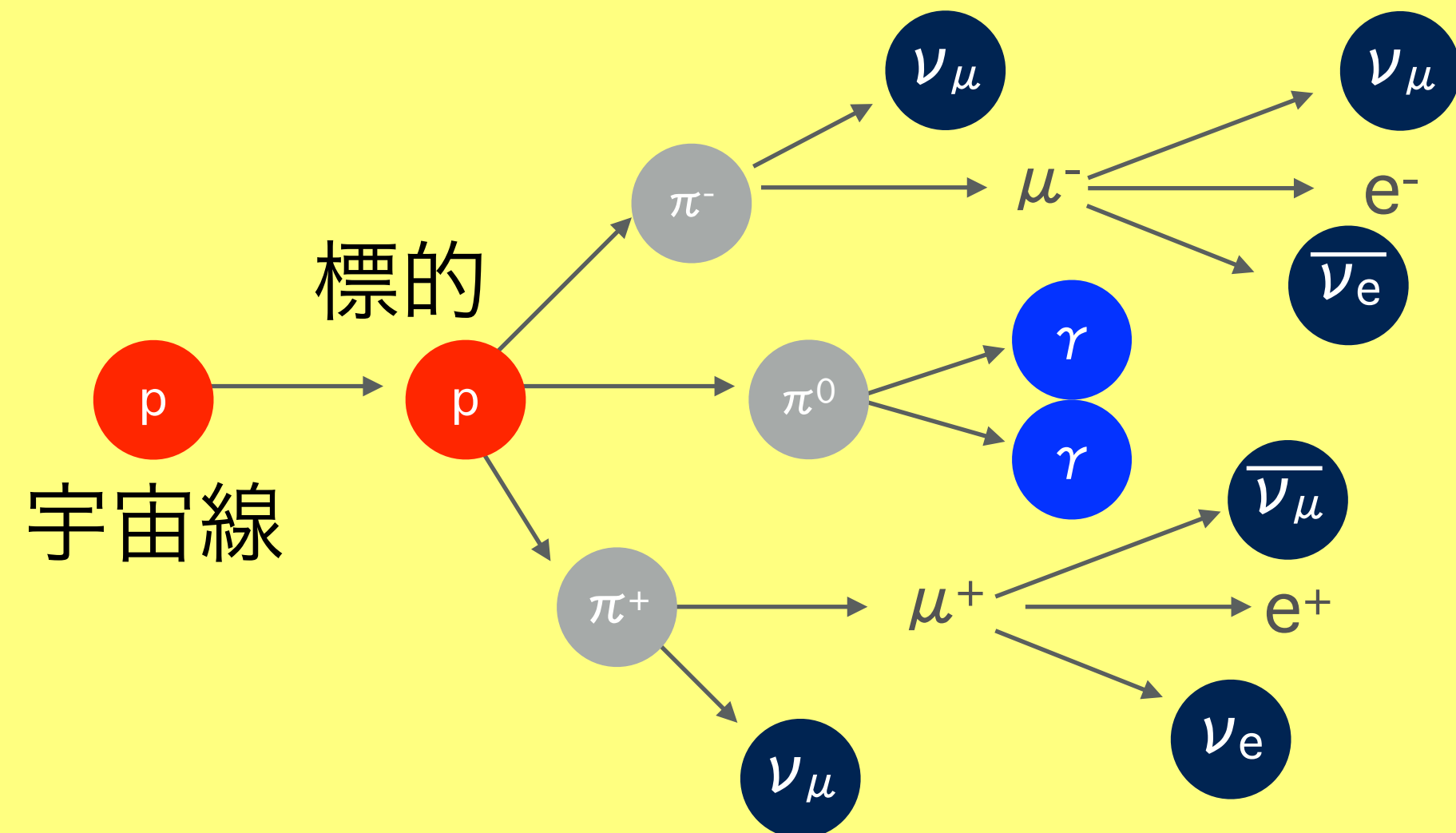
電波望遠鏡

光学望遠鏡

X線・γ線衛星

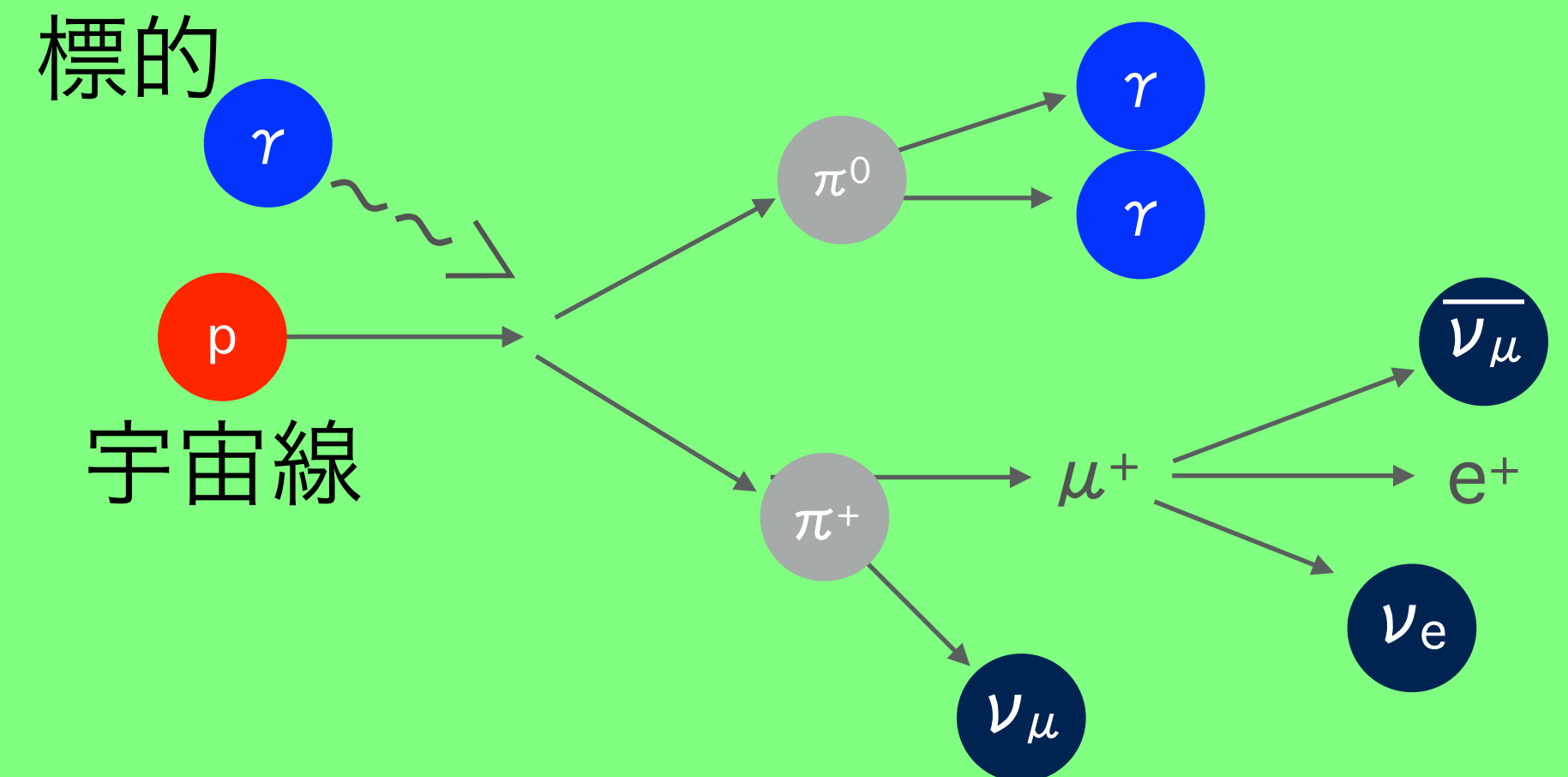
高エネルギーニュートリノ生成過程

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

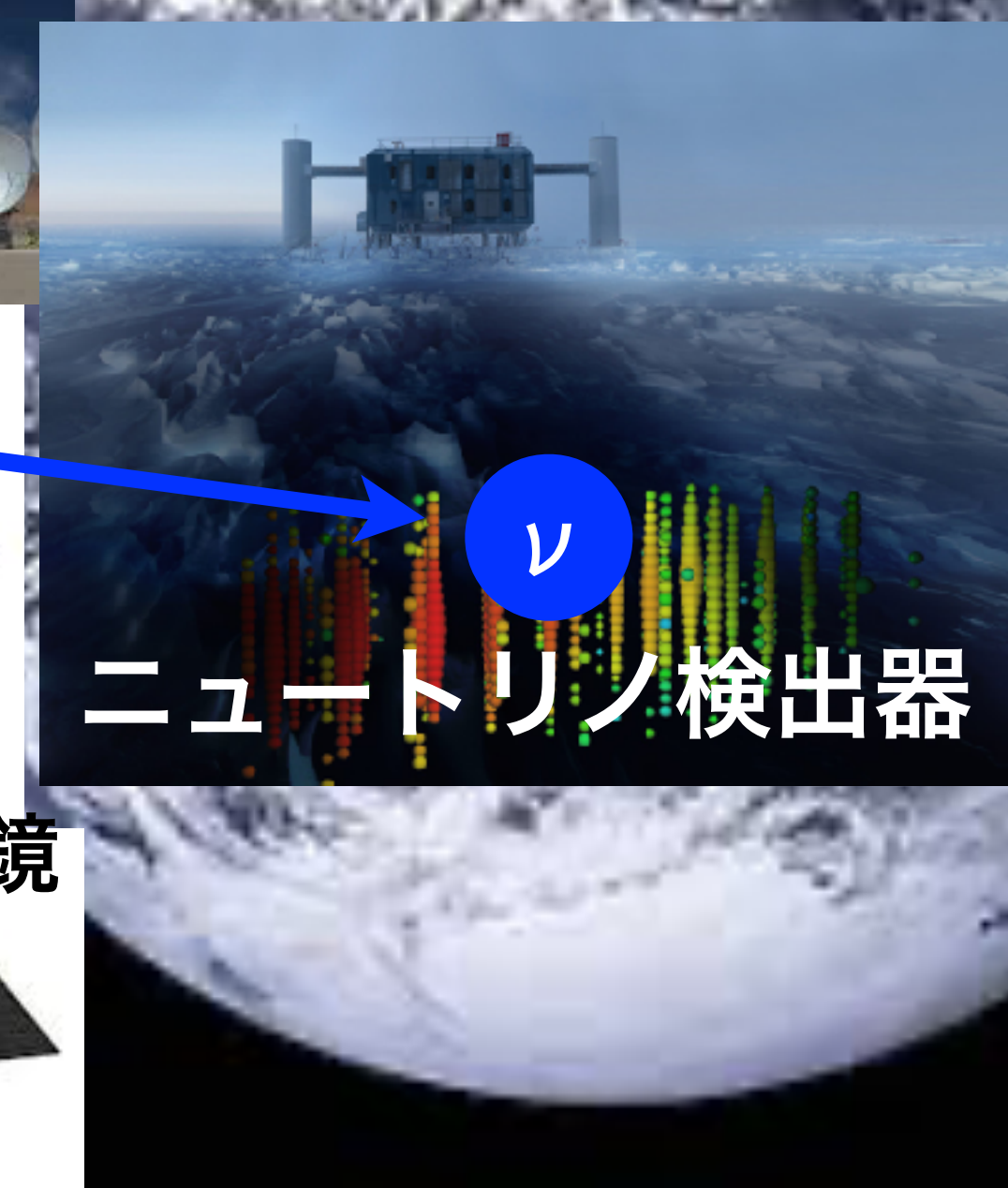
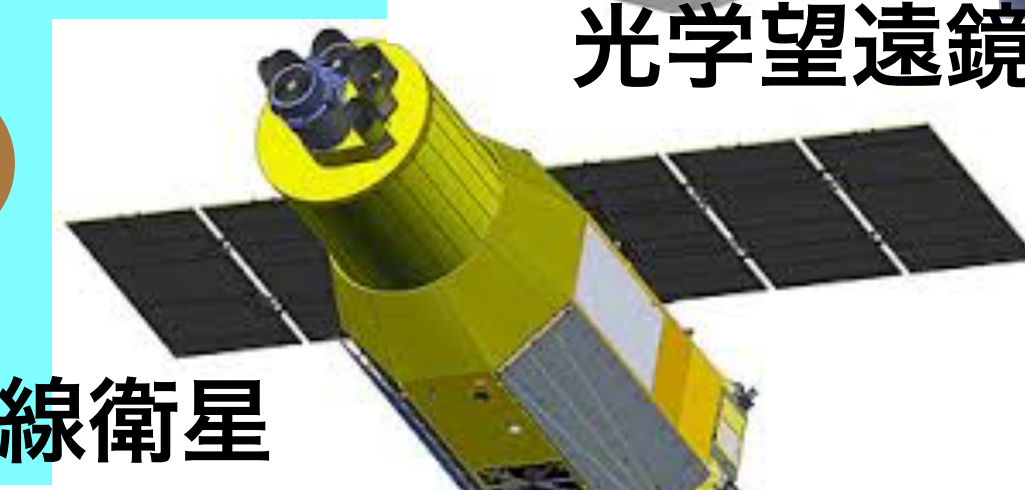
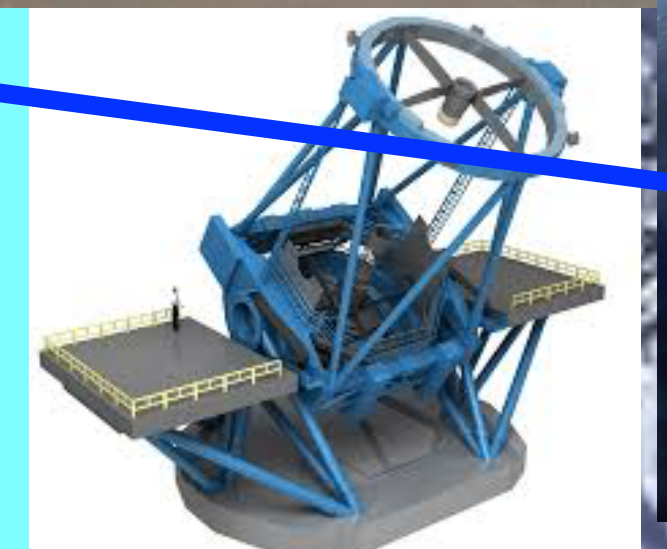
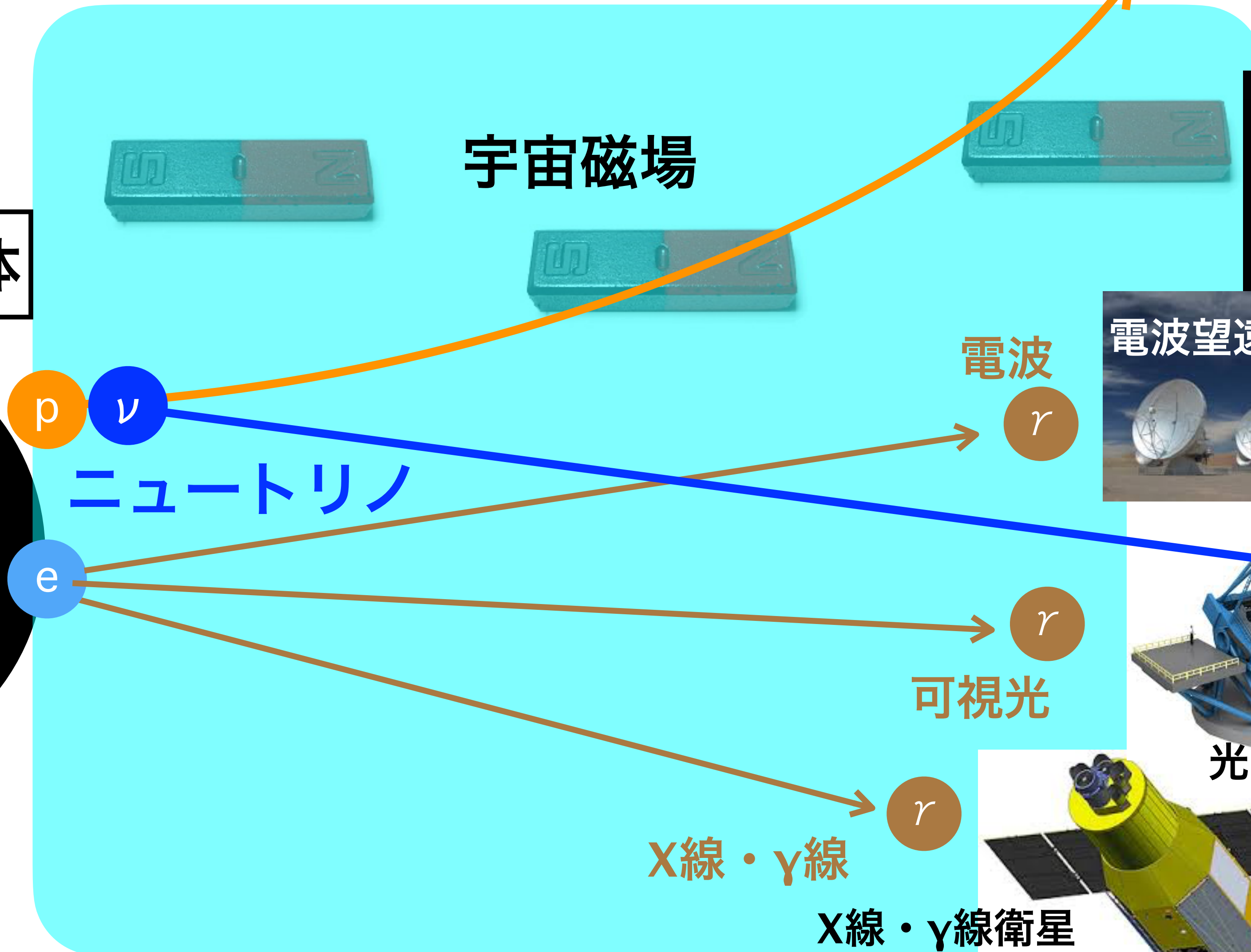
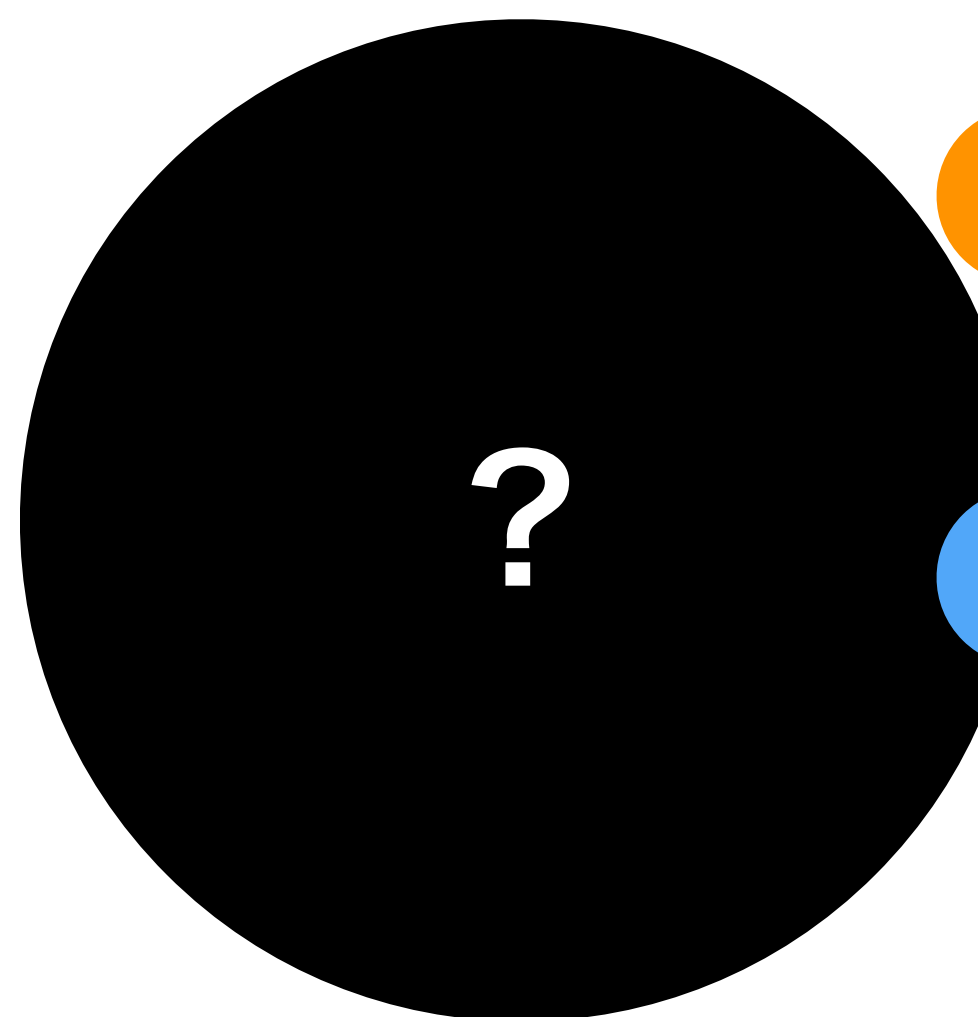
ニュートリノ観測

宇宙線の伝搬

宇宙線

地球での検出

宇宙線起源天体





50 m

Ice Top

86 strings of DOMs,
set 125 meters apart

Amundsen–Scott South
Pole Station, Antarctica
A National Science Foundation-
managed research facility

1450 m

60 DOMs
on each
stringDOMs
are 17
meters
apartIceCube
detector

DeepCore

2450 m

Antarctic bedrock

IceCube Laboratory

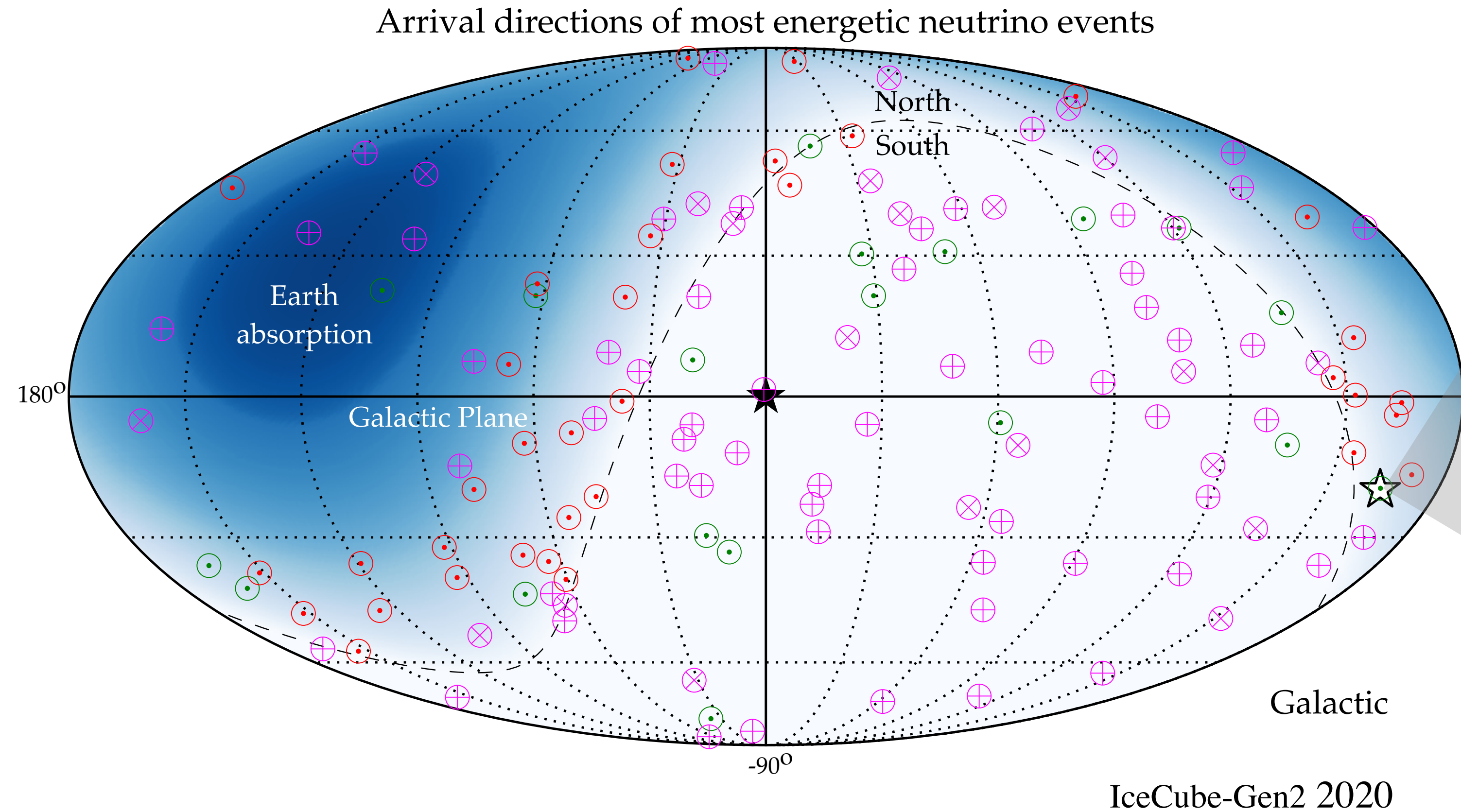
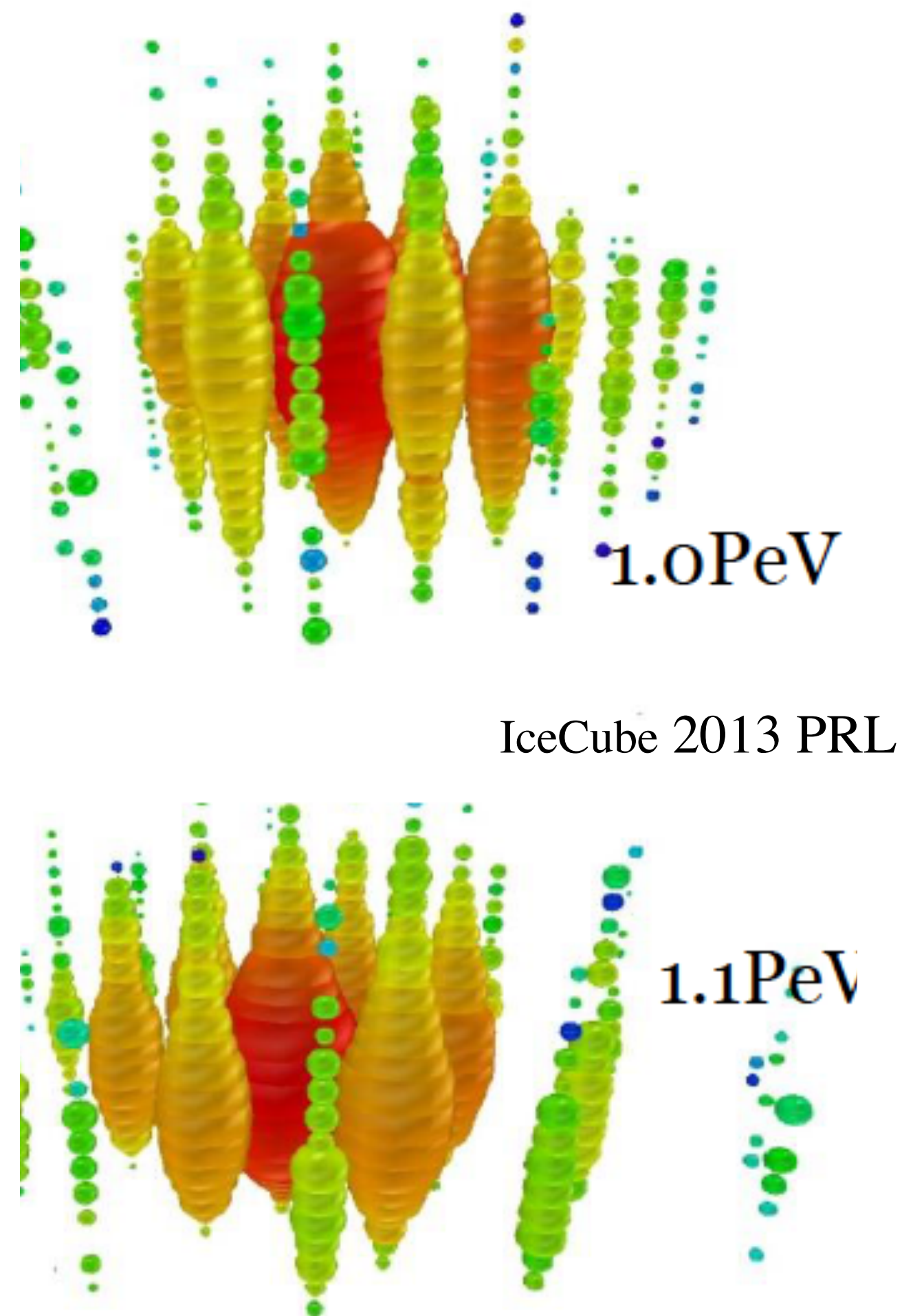
Data is collected here and
sent by satellite to the data
warehouse at UW–Madison

Digital Optical Module (DOM)

5,160 DOMs
deployed in the ice

- 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

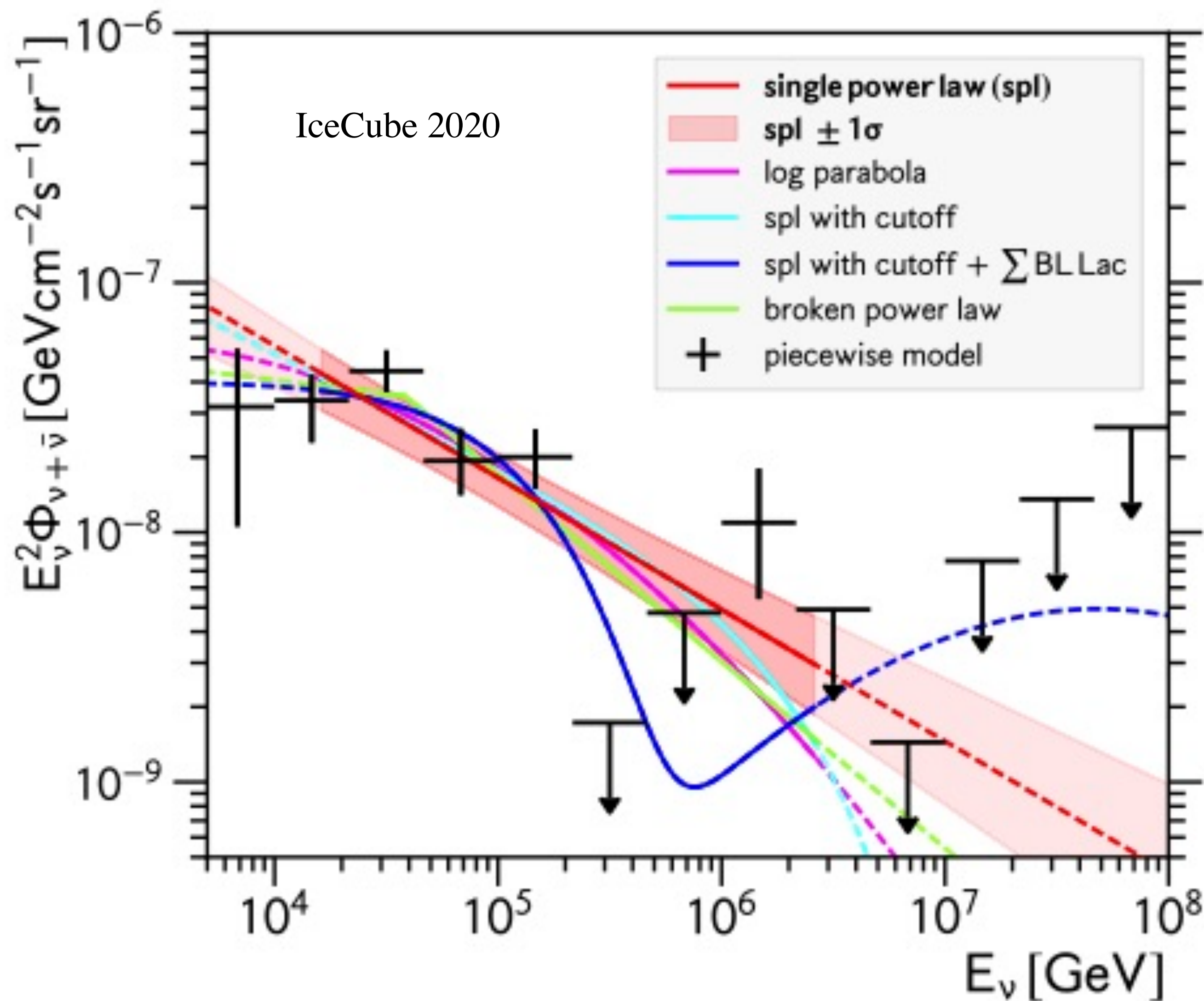
天体ニュートリノの検出



- 2013年：
天体ニュートリノ検出の報告

- 空の全ての方向から一様に到来
→ 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

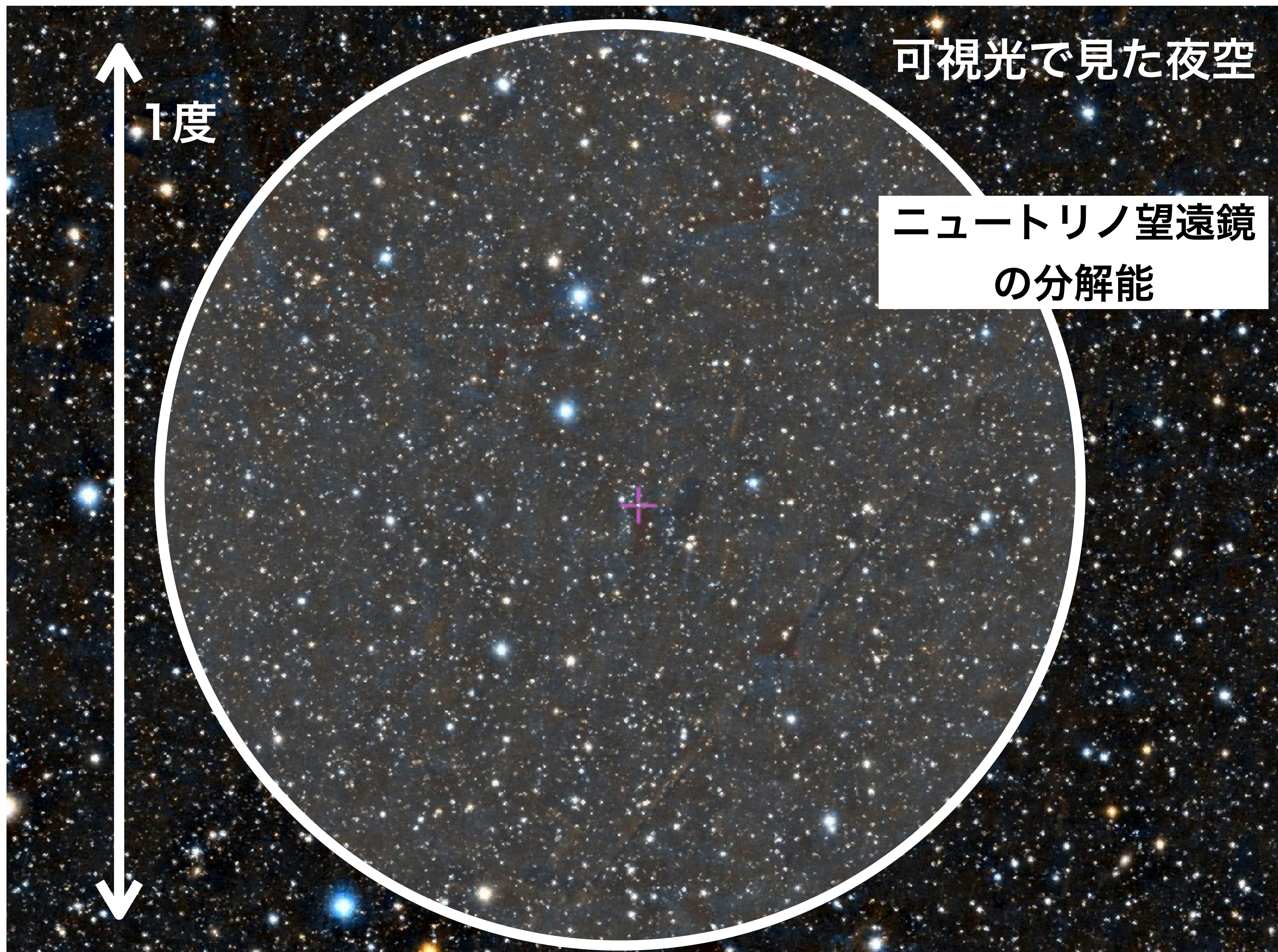


- 天体ニュートリノ事象のエネルギー & 検出数
→ スペクトルの構築
- 低いエネルギーのニュートリノが多く地球に届いている
- **起源天体は新たな大問題**

目次

- 宇宙線と天体高エネルギーニュートリノ
- 宇宙ニュートリノ背景放射と起源天体候補
- まとめ

ニュートリノ天体同定の困難

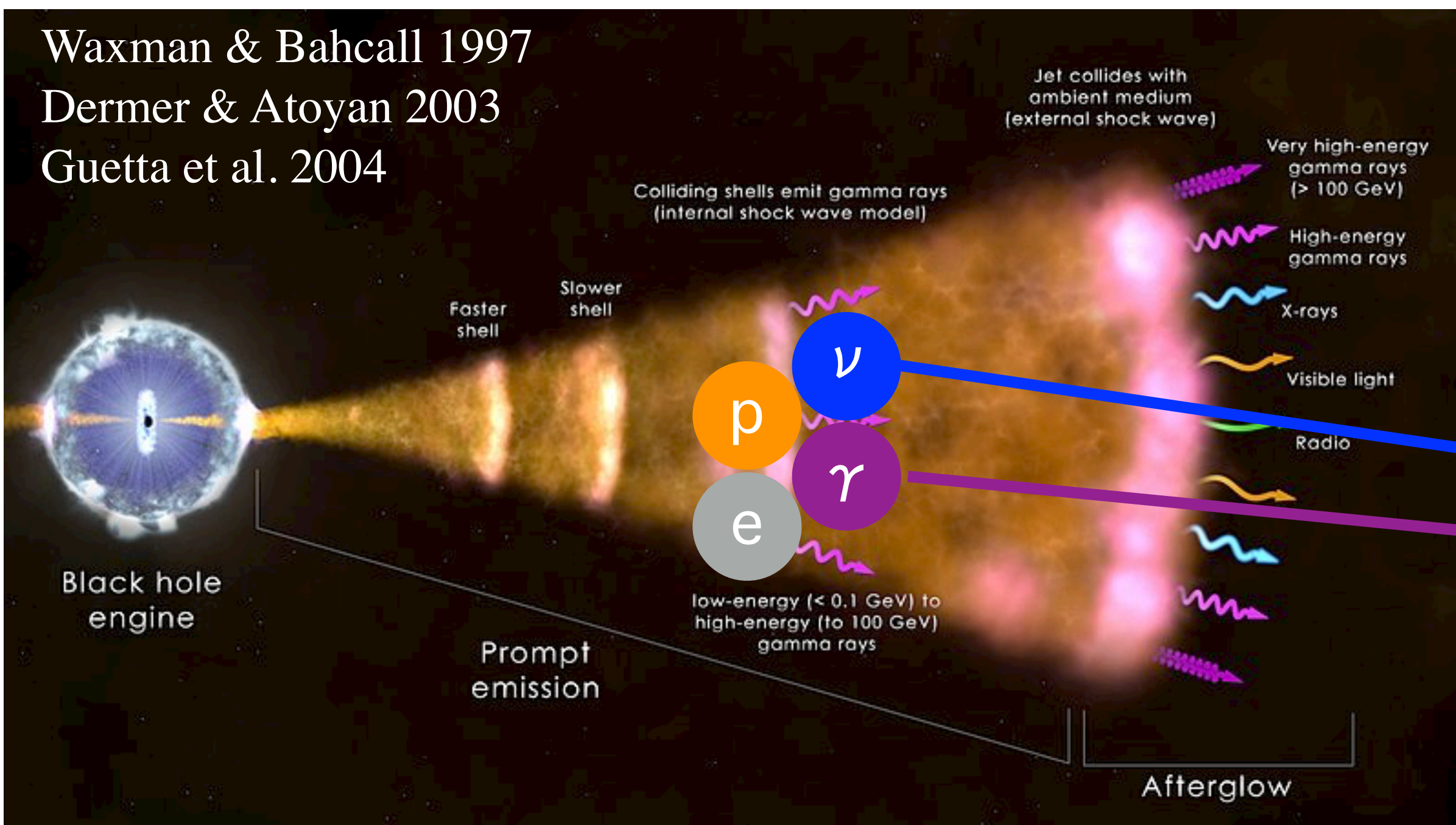


- 光学望遠鏡の視力
~ 300 (すばる望遠鏡)
- ニュートリノ望遠鏡の視力
~ 0.02 (強度近視)
- ニュートリノ事象の到来方向を可視光で見ると多数の天体

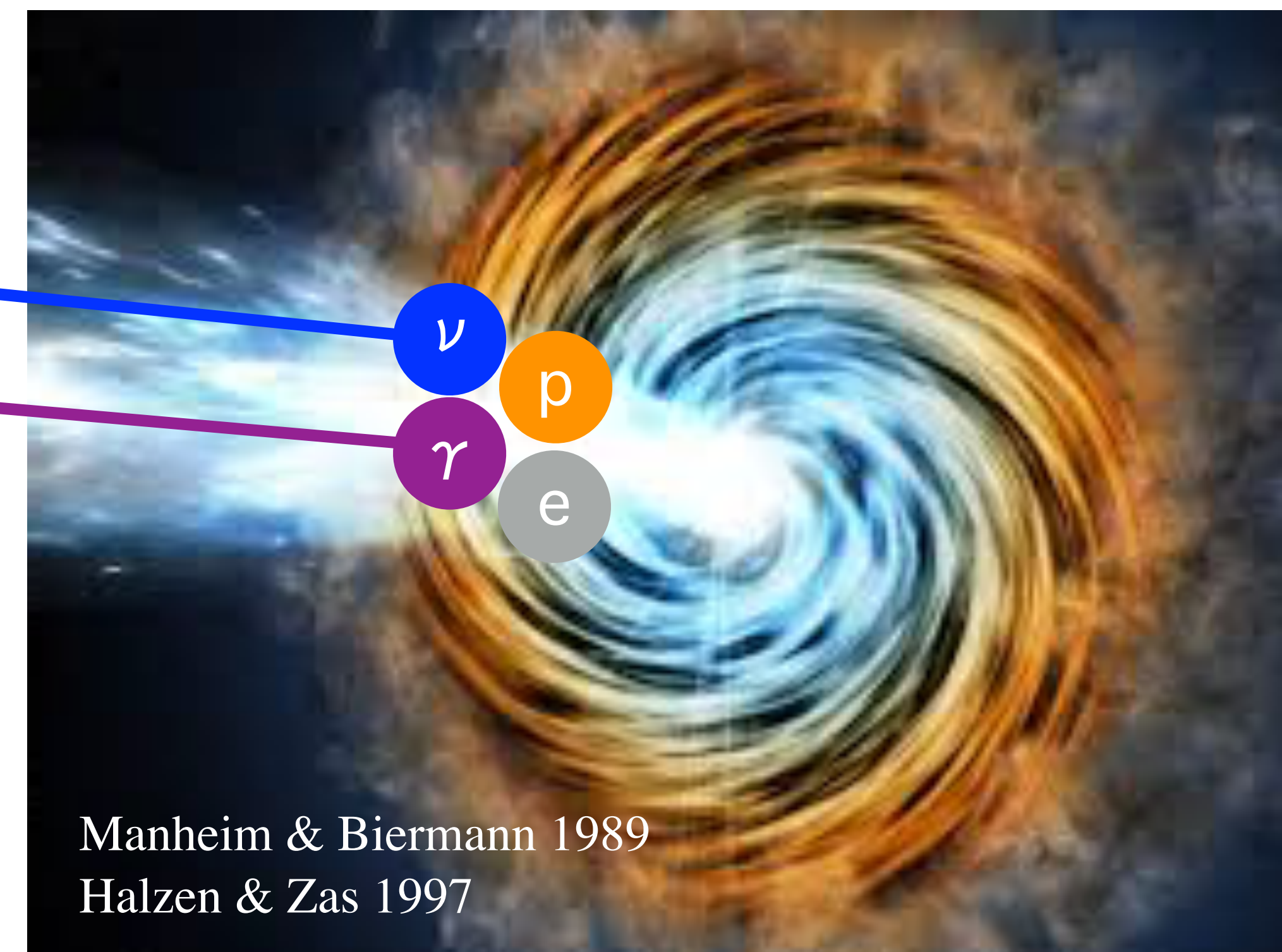
理論予言による
サポートが必須

IceCube以前の理論モデル

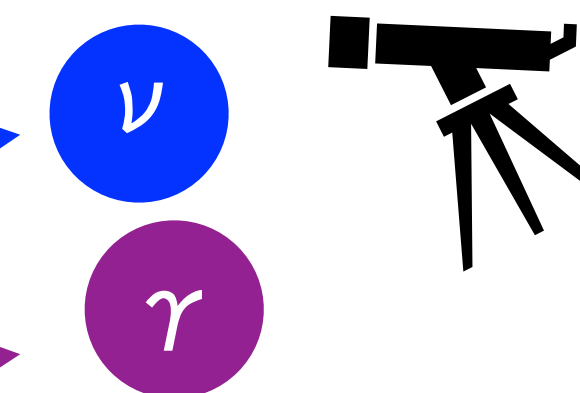
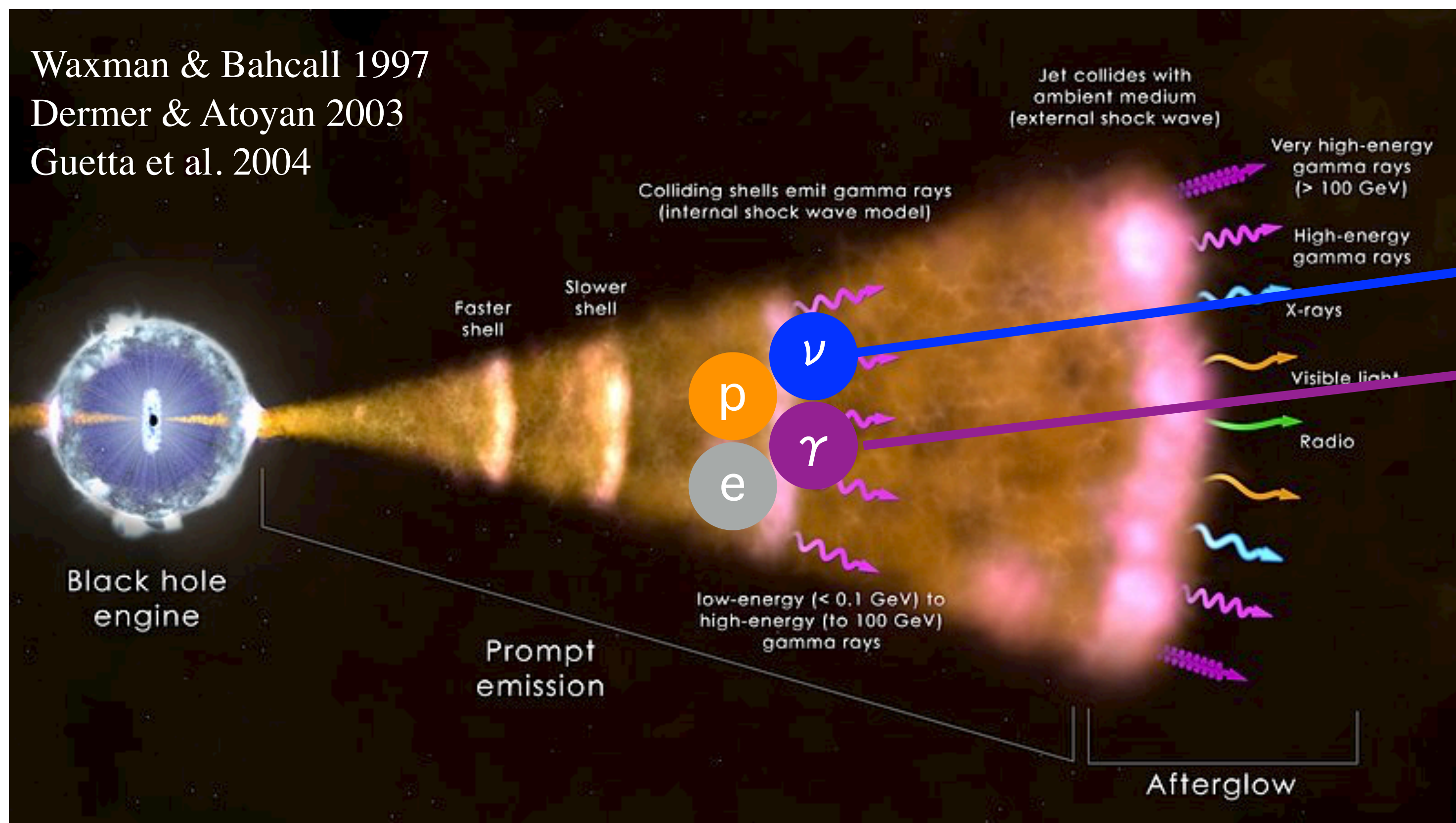
• ガンマ線バースト



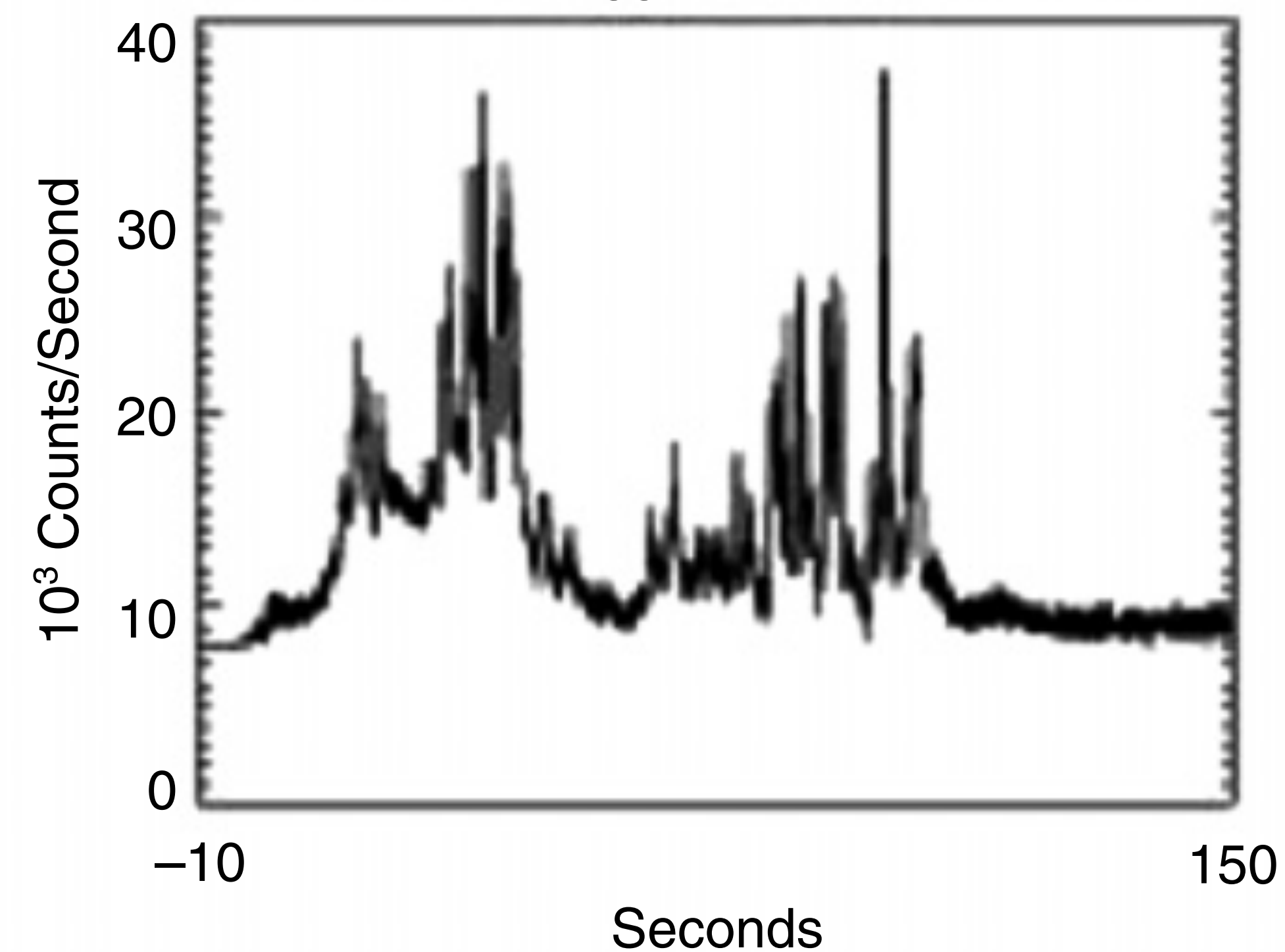
• ブレーザー



IceCube以前の理論モデル: ガンマ線バースト



Trigger 1606

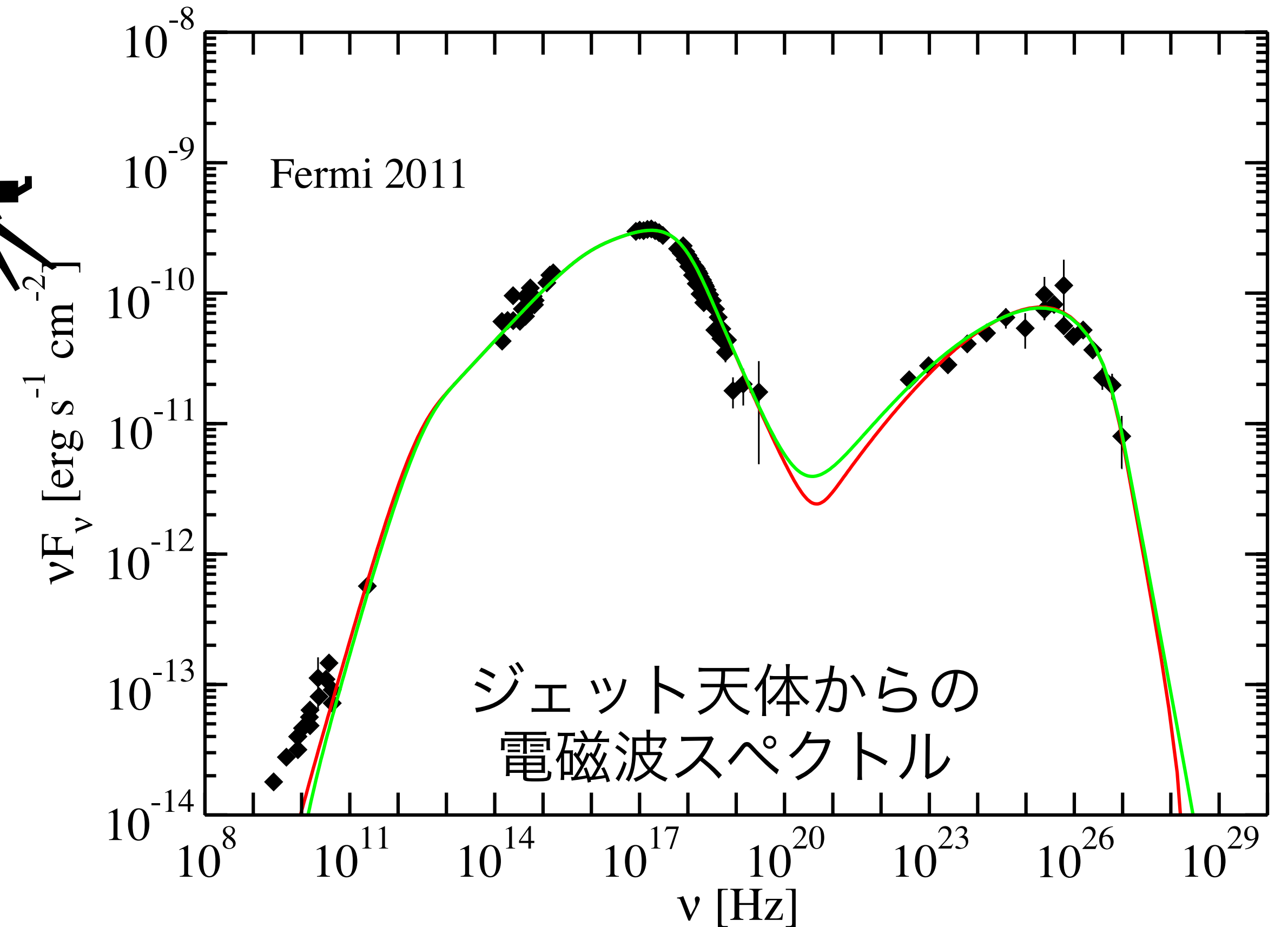
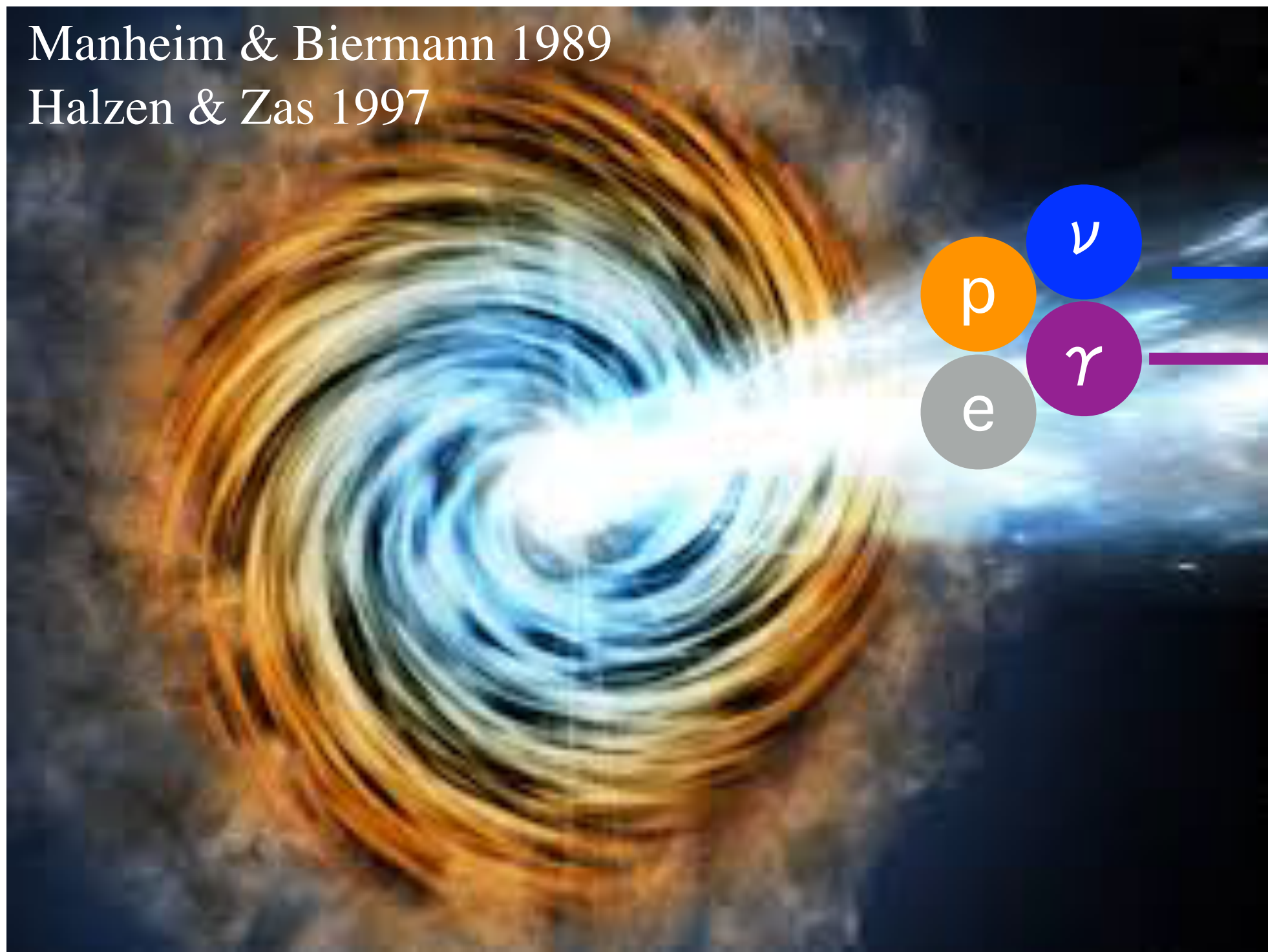


- 宇宙で最も明るい爆発現象
- 特異な重い星が最期にブラックホールを形成
→ 相対論的ジェット形成
- 相対論的ジェットで宇宙線加速

IceCube以前の理論モデル2: ブレーザー

Manheim & Biermann 1989

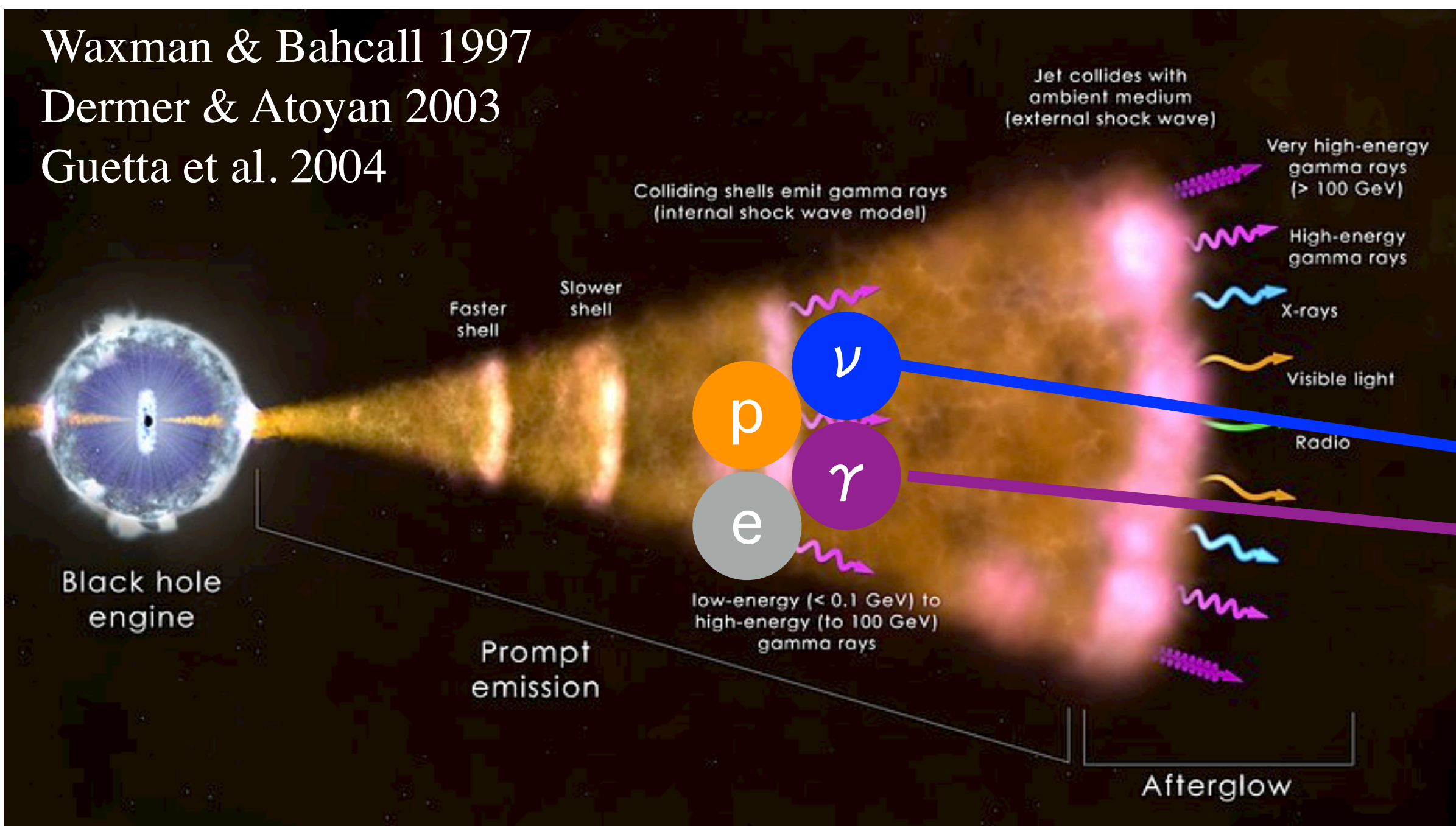
Halzen & Zas 1997



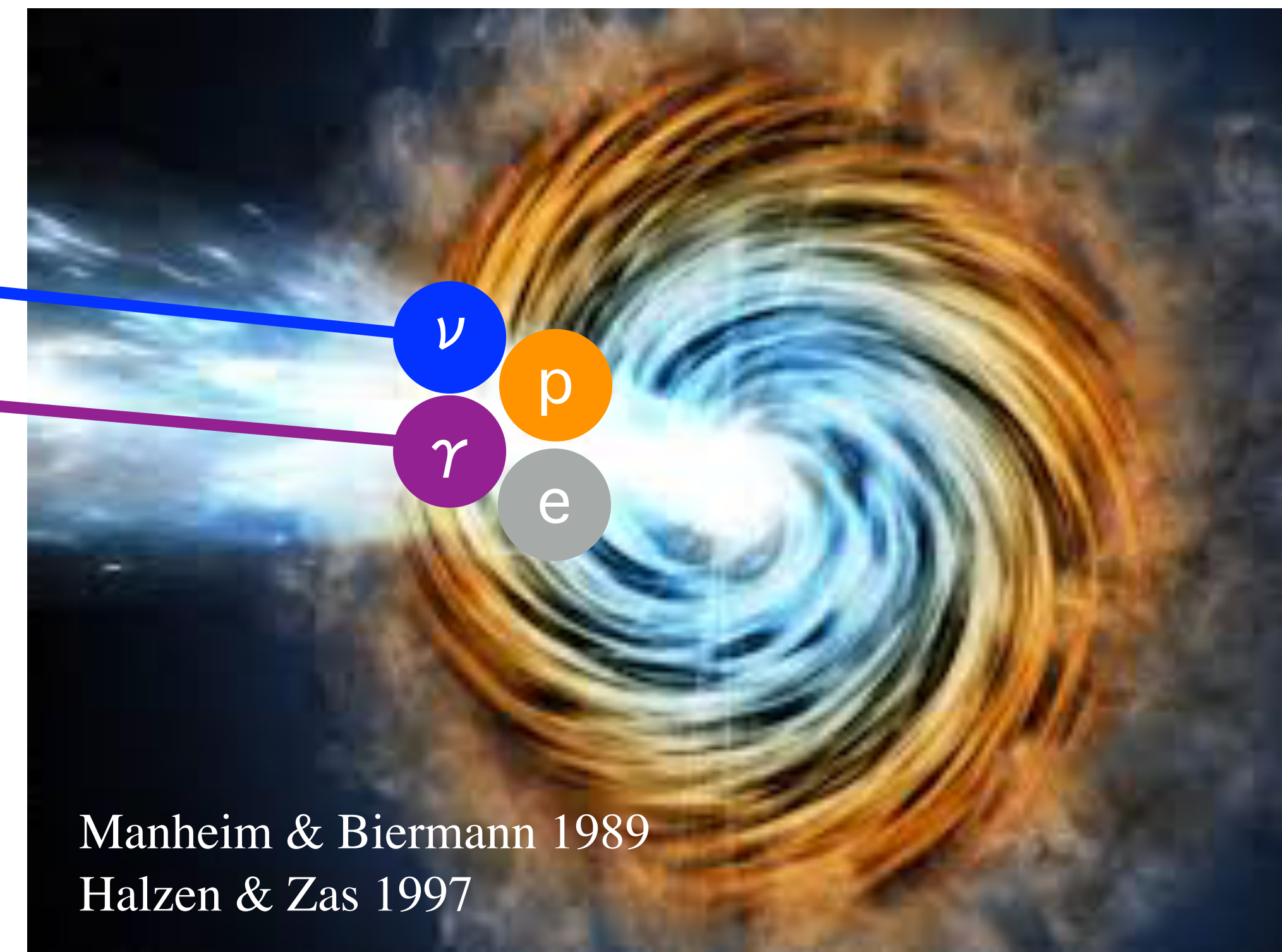
- 宇宙で最も明るい定常天体
- 超大質量ブラックホール（太陽の1億倍の質量）の重力エネルギーを変換
- 相対論的ジェットで宇宙線加速

IceCube以前の理論モデル

• ガンマ線バースト



• ブレーザー

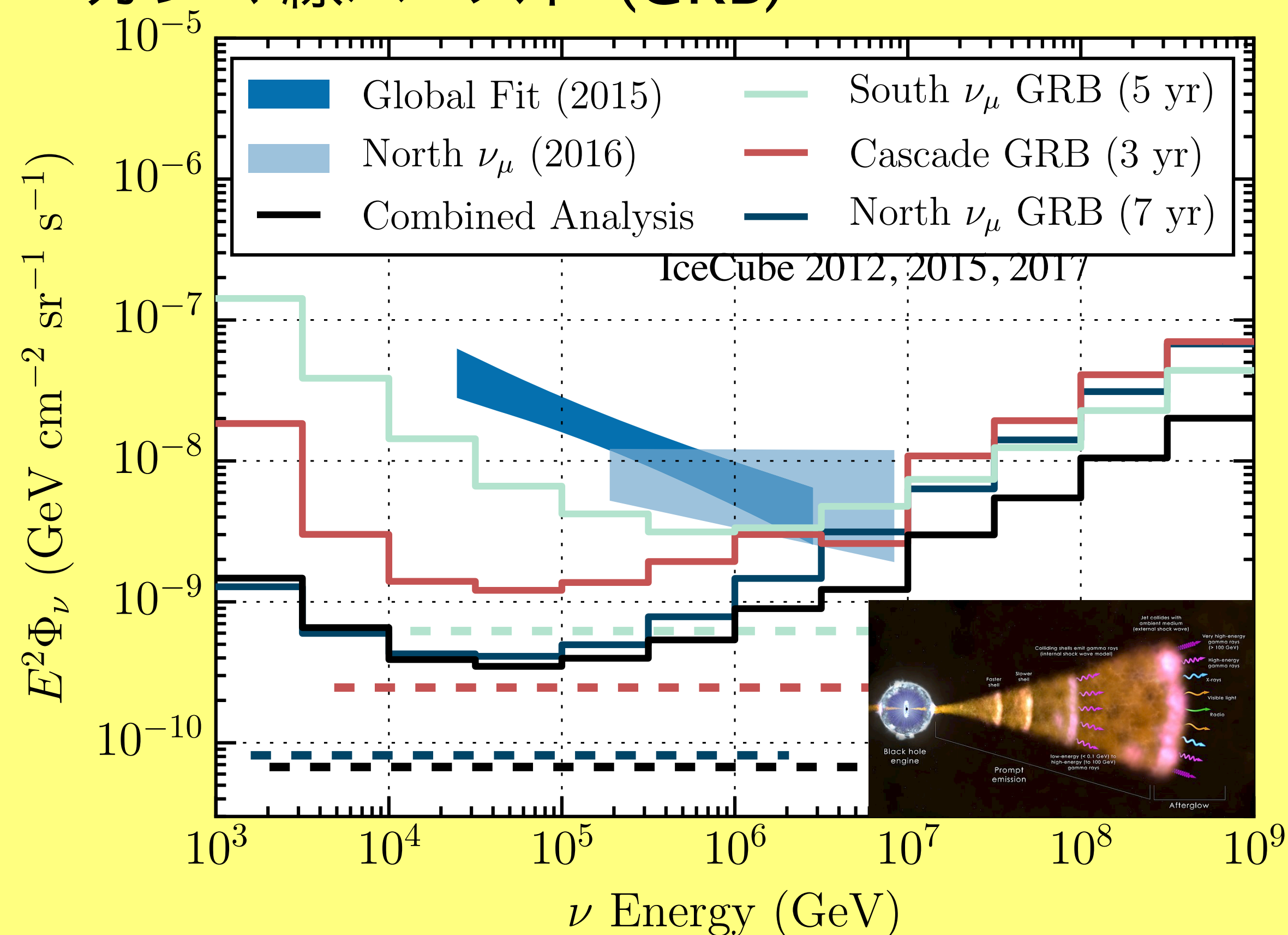


- 非常に明るいガンマ線放射 → 宇宙線電子の存在
- 陽子が同時に加速されていれば、 $p\gamma$ 反応でニュートリノ生成

スタッキング解析

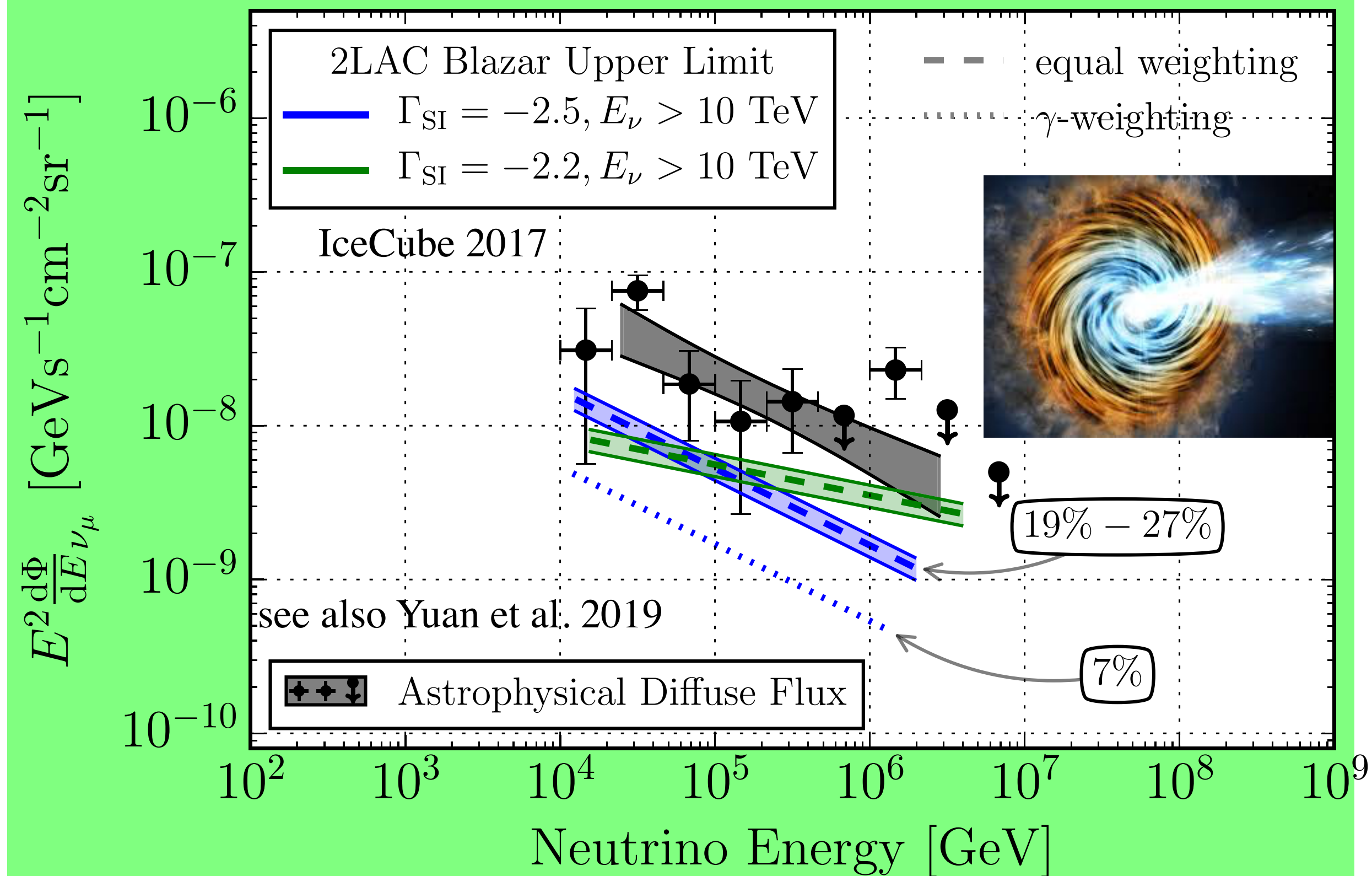
既知の天体の位置と時間の情報を使って信号を足し合わせる手法

ガンマ線バースト (GRB)



- 1000以上のGRBデータで解析
 - 大気雑音と整合的なデータ
 - **GRBの寄与は1%以下**

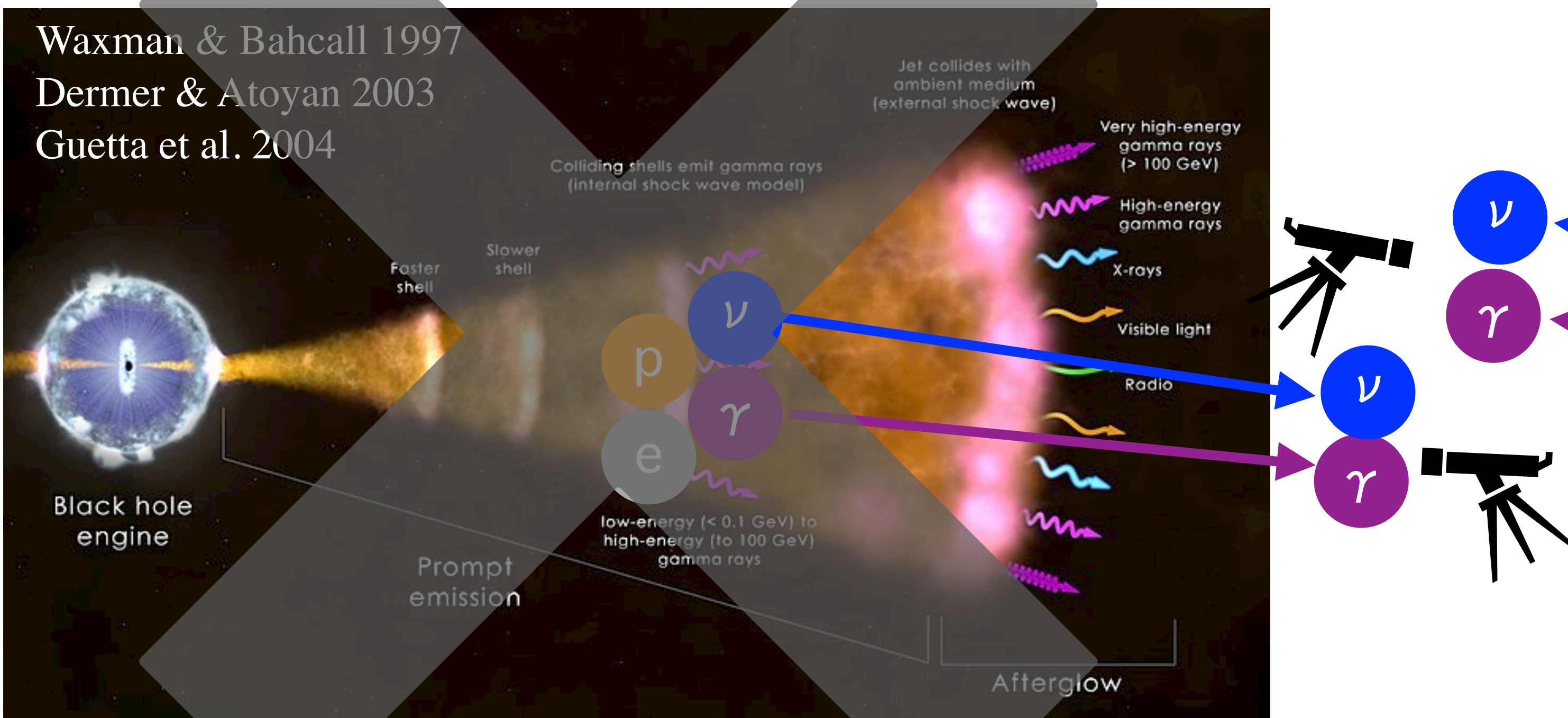
ブレーザー (活動銀河核)



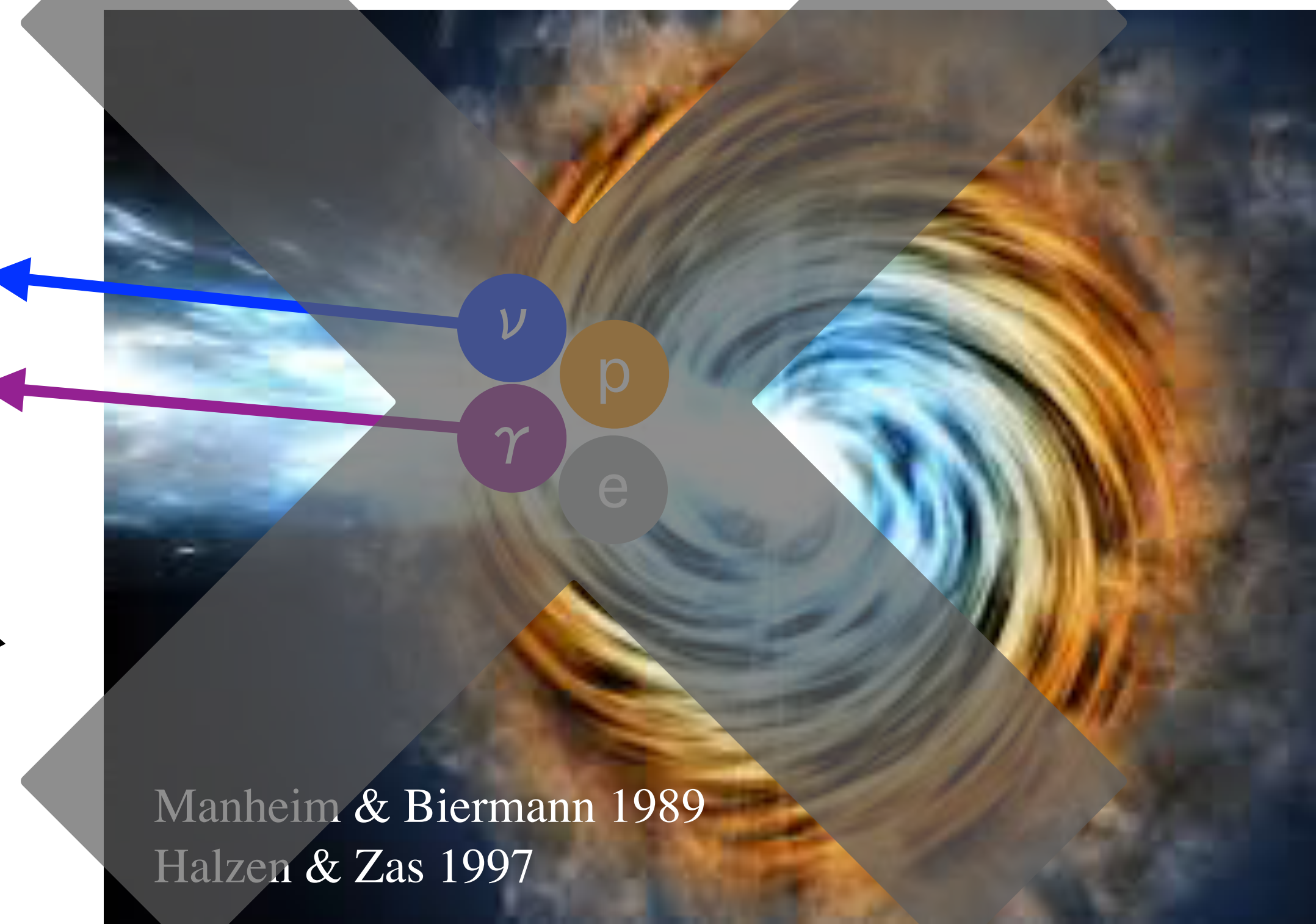
- ~1000のブレーザーデータで解析
 - 大気雑音と整合的なデータ
 - **ブレーザーの寄与は7%以下**

IceCubeの観測結果

• ガンマ線バースト



• ブレーザー

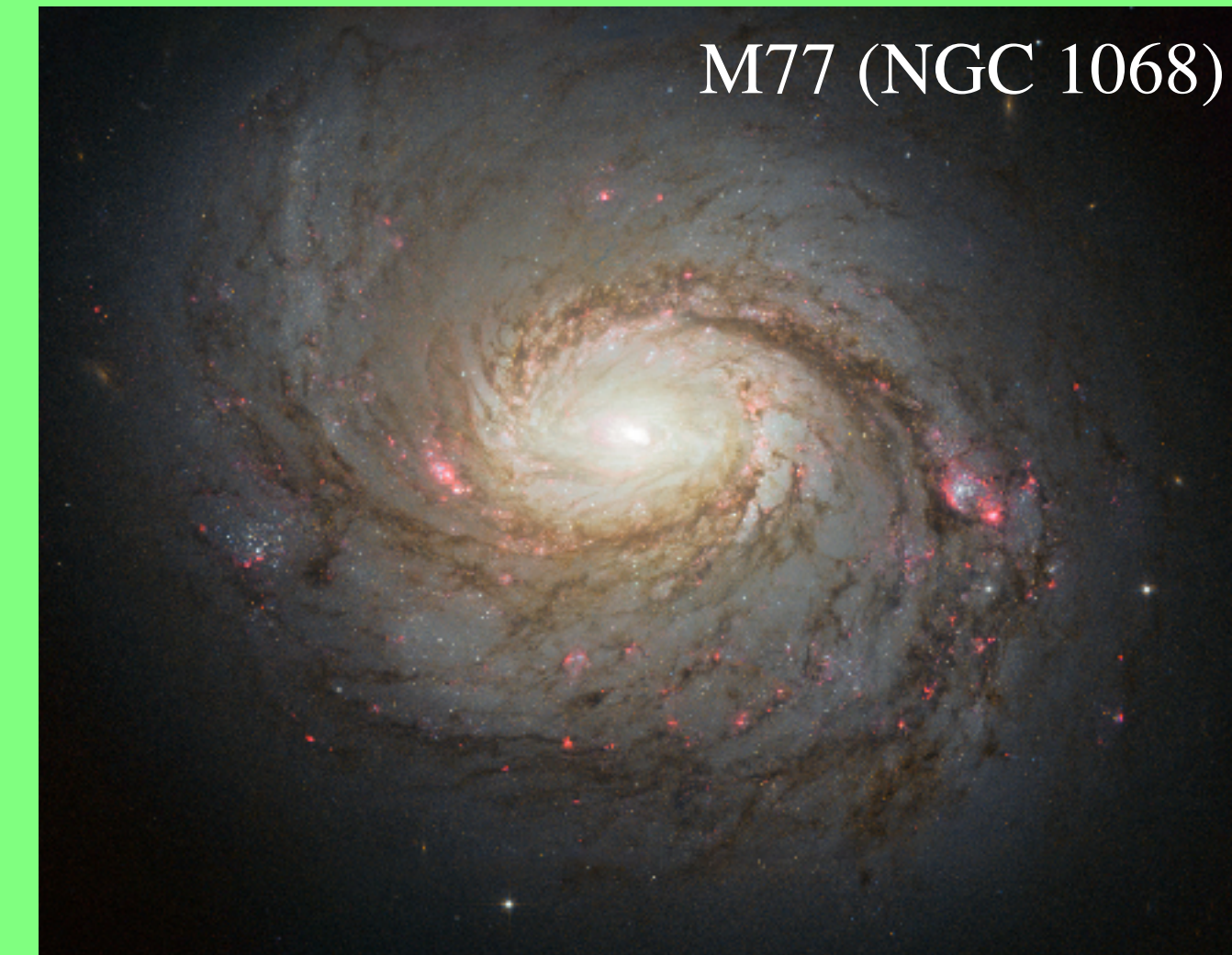
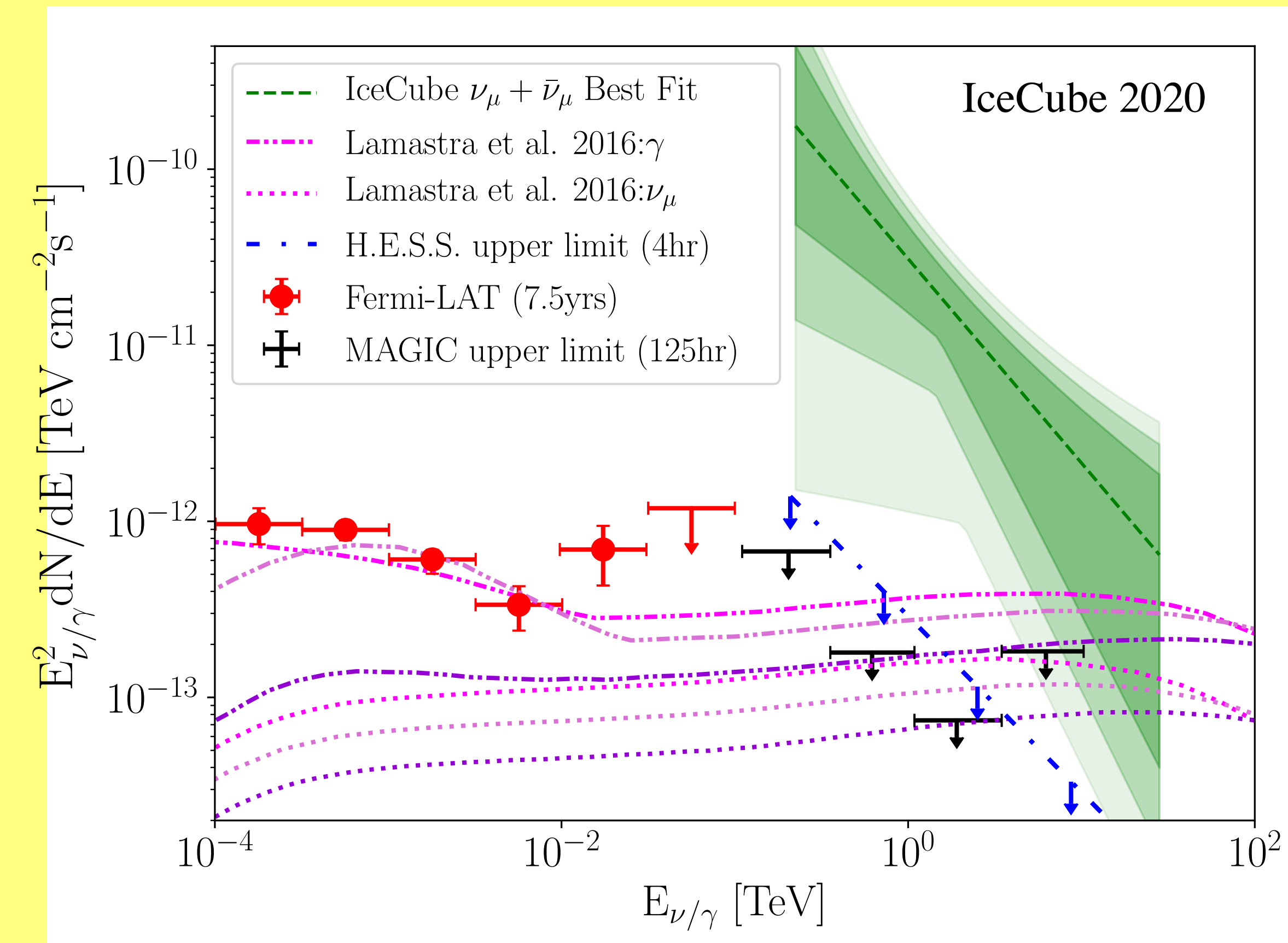


GRB発生した時間と方向から
天体ニュートリノが来ていない

ガンマ線で明るいブレーザーの
方向からニュートリノは来ていない

セイファート銀河がニュートリノ源？

- IceCube実験10年分のデータでの点源探索
- M77 (NGC 1068) から 2.9σ の信号



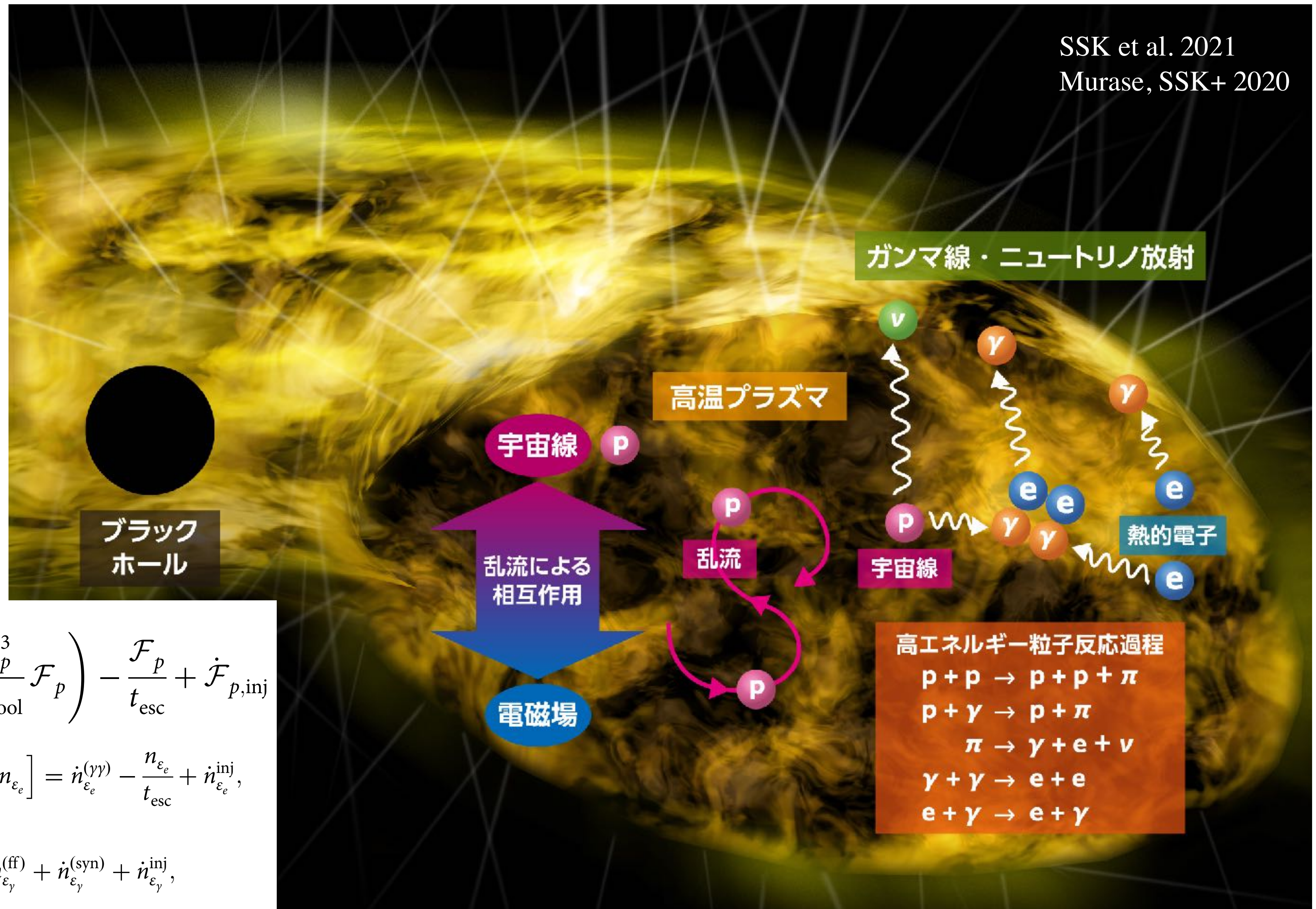
- セイファート銀河
 - 銀河の中心が明るく輝く天体 (活動銀河核)
 - 超大質量ブラックホールが物質を降着
 - 重力エネルギーの解放
 - 高温のプラズマ流 (降着流)を形成

降着流での高エネルギー現象

活動銀河核降着流からのニュートリノ放射

SSK et al. 2021
Murase, SSK+ 2020

乱流加速を考慮して
宇宙線の加速を解く
二次電子とガンマ線の
輸送を解く



ガンマ線・ニュートリノ放射

高温プラズマ

宇宙線 p

乱流

宇宙線

熱的電子 e

乱流による相互作用

電磁場

高エネルギー粒子反応過程

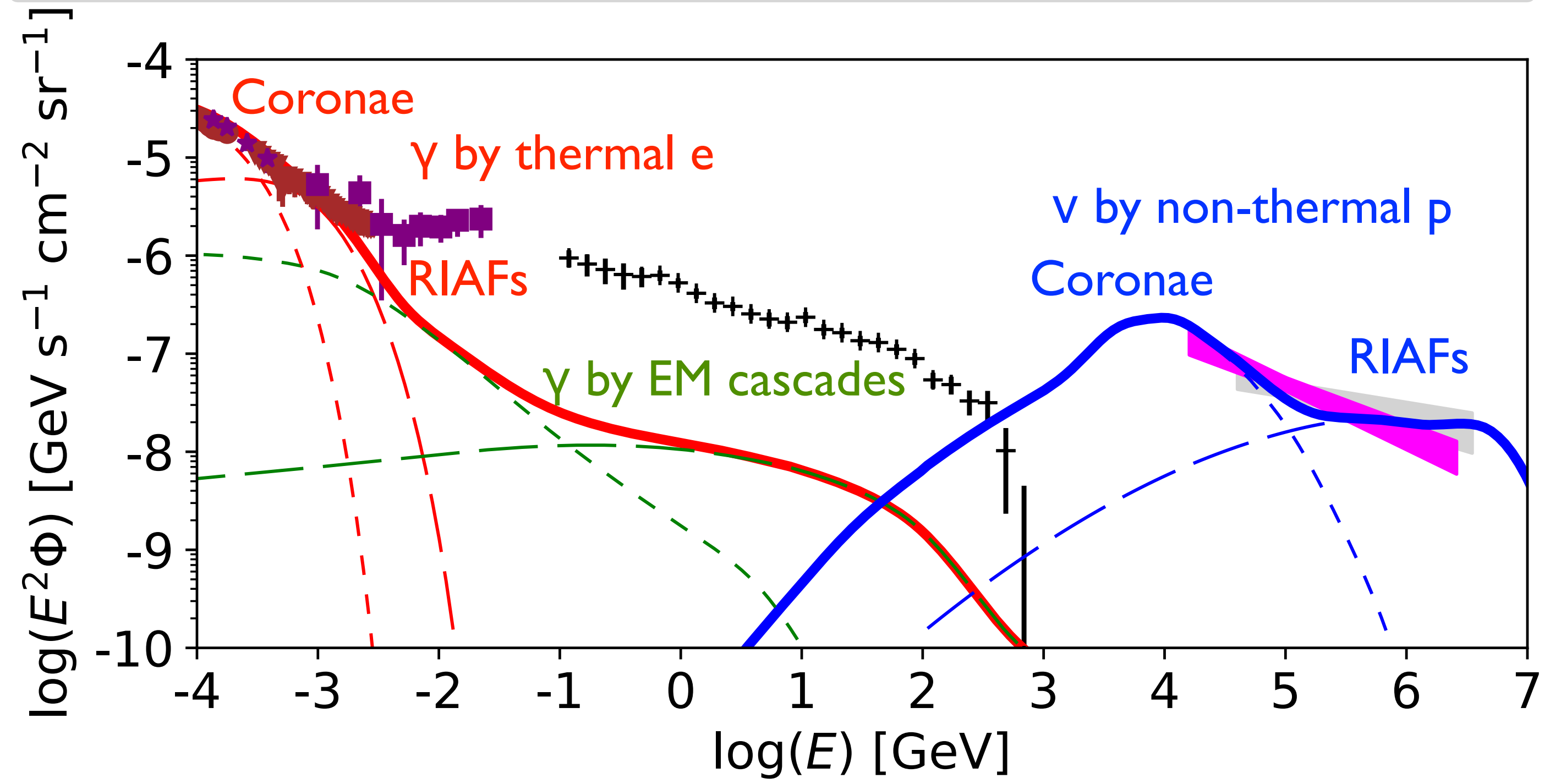
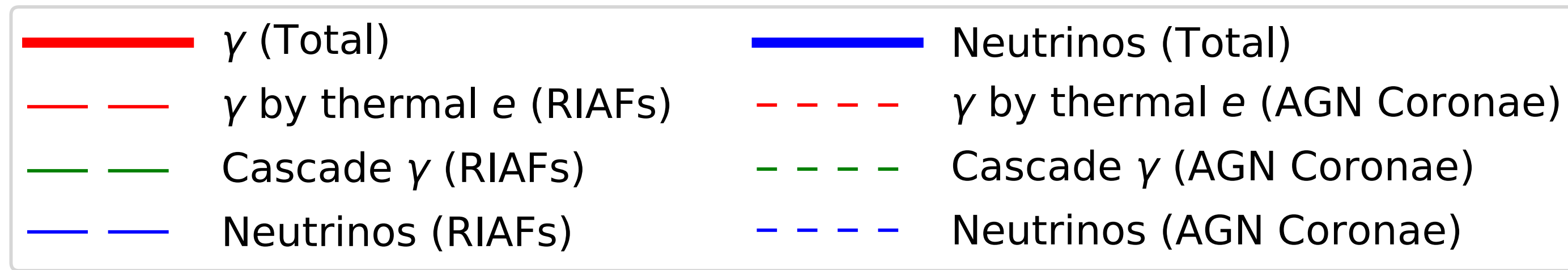
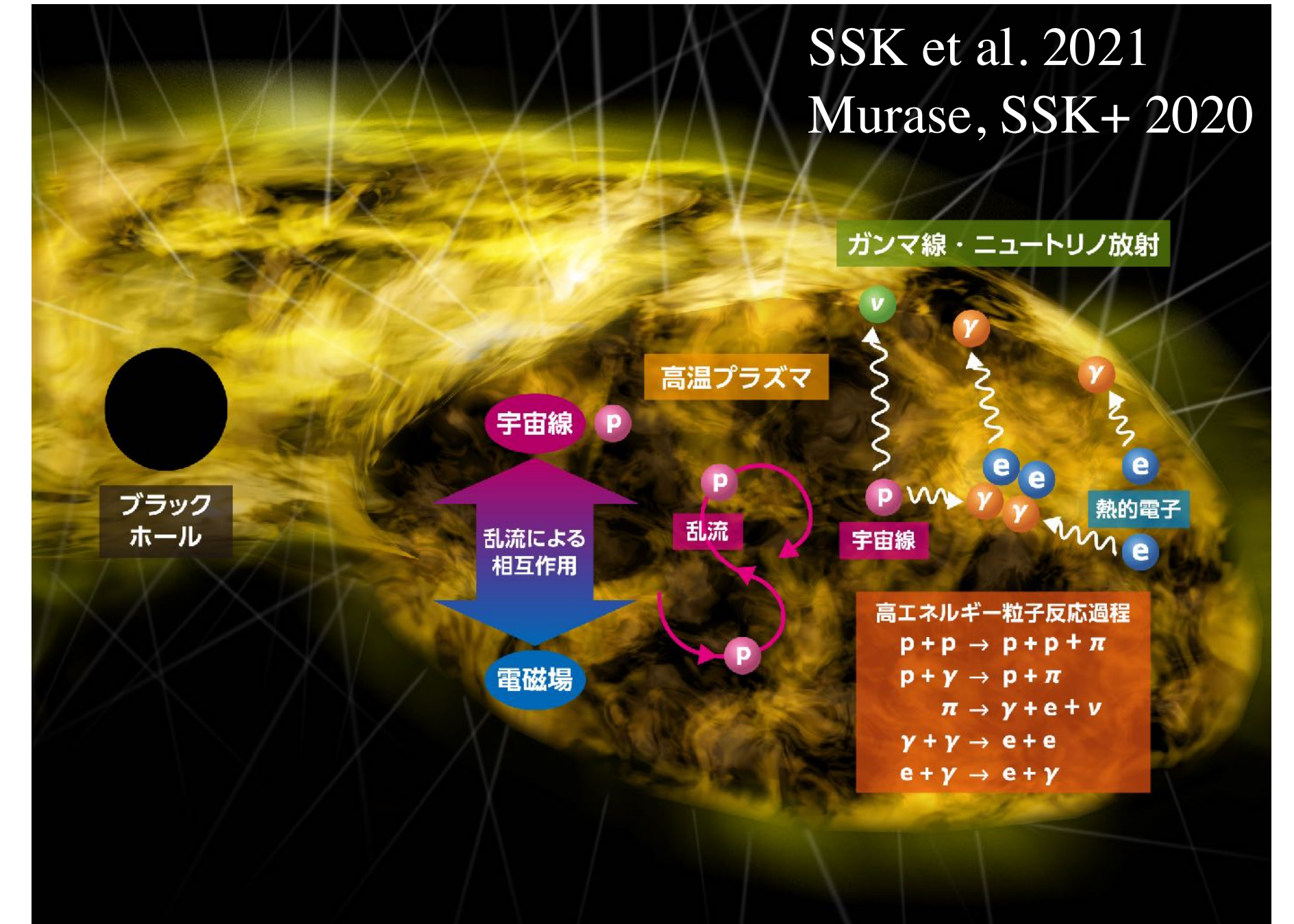
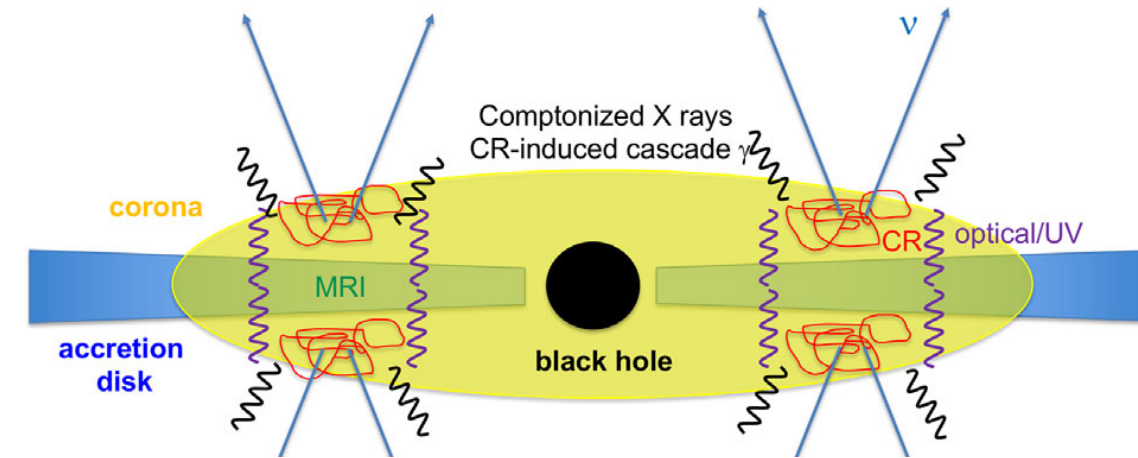
- $p + p \rightarrow p + p + \pi$
- $p + \gamma \rightarrow p + \pi$
- $\pi \rightarrow \gamma + e + \nu$
- $\gamma + \gamma \rightarrow e + e$
- $e + \gamma \rightarrow e + \gamma$

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

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

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

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較正
- **天体ニュートリノデータを説明可能**

目次

- 宇宙線と天体高エネルギーニュートリノ
- 宇宙ニュートリノ背景放射と起源天体候補
- まとめ

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
- ・ 過去に提案されていた理論モデルは観測と不整合
- ・ **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
- ・ 今後はIceCube実験の公開データを使って、自分でモデルの検証を行いたい

