

Multimessenger astronomy driven by high-energy neutrinos and gravitational waves

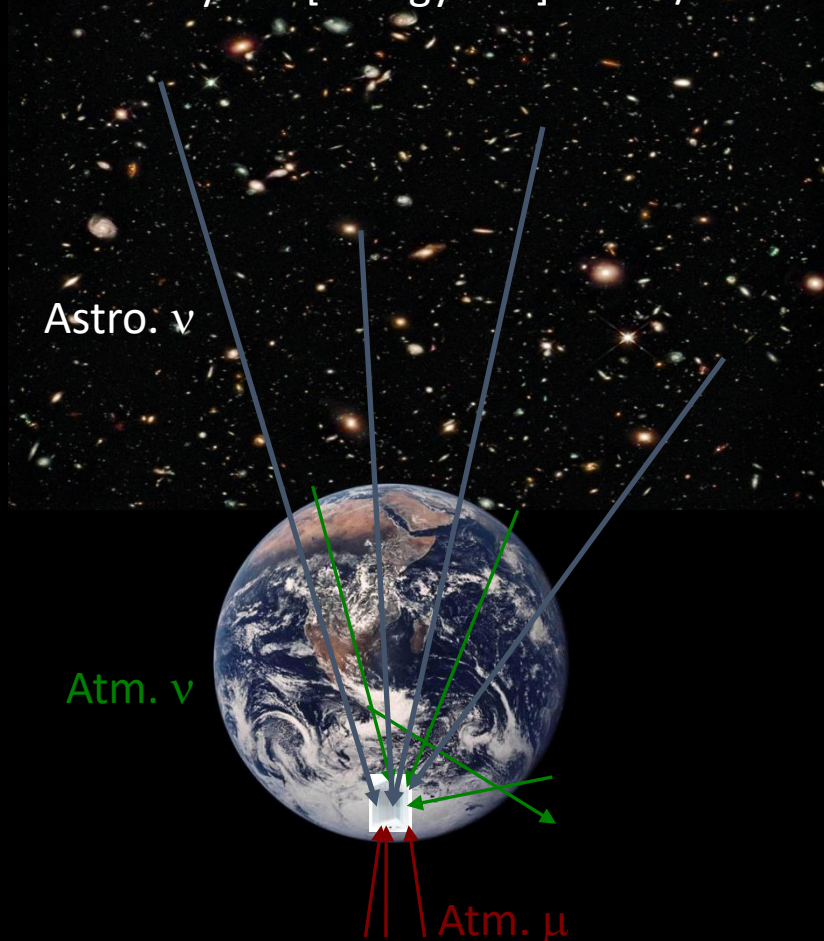
Shigeru Yoshida
International Center for Hadron Astrophysics
Chiba University

Concepts of the Cosmic fluxes

cosmic background flux

= sum from all (**likely unresolved**)
extraterrestrial sources from all-sky
[flux] = /cm² s str

“luminosity” or [energy flux] = GeV/cm² s str



Point-source Flux = flux from a (resolved)
astronomical object (including an *extended source*)

[flux] = /cm² s

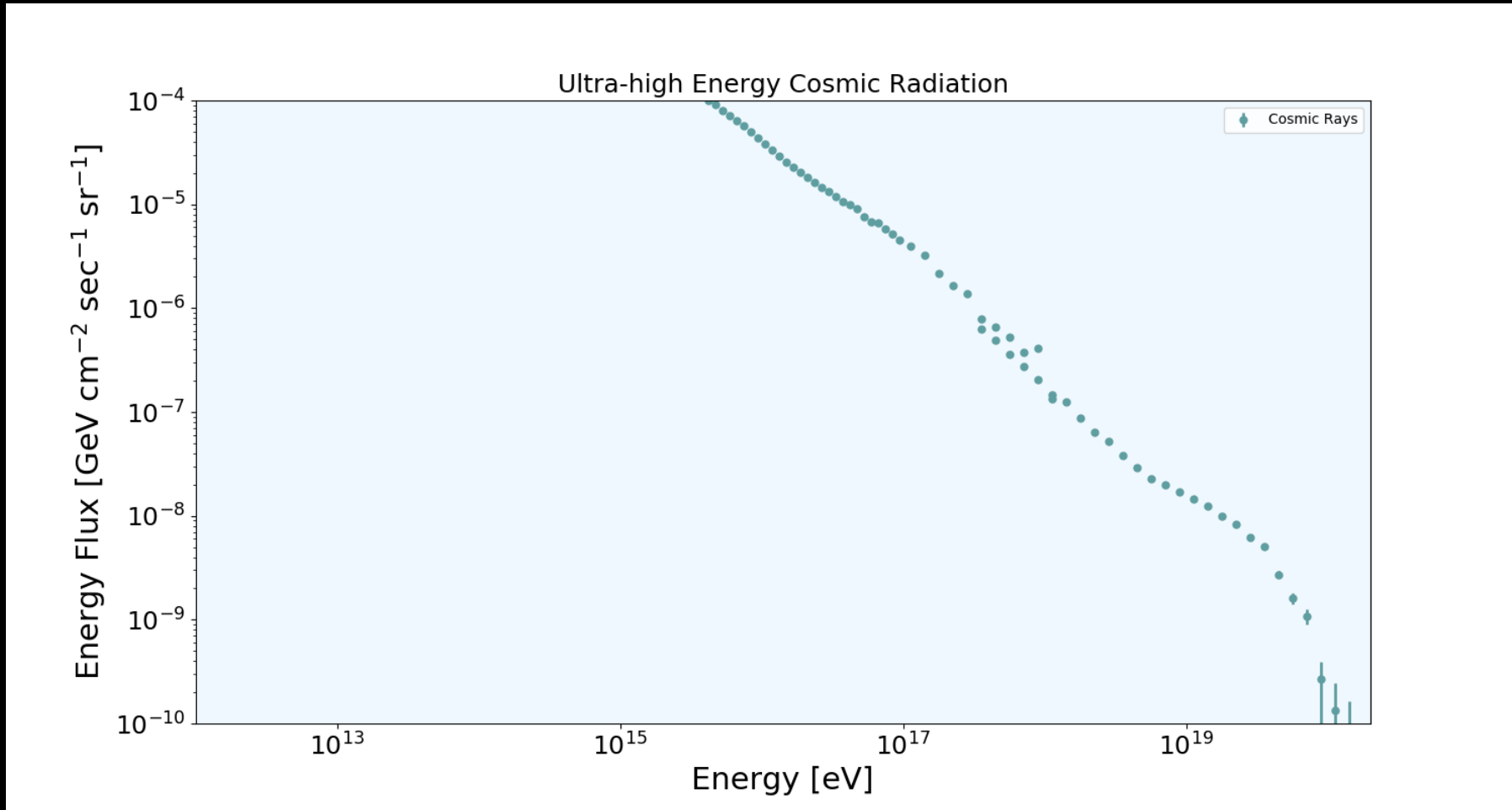
“energy flux” or [sed] = erg (or TeV) /cm² s



The UHE Cosmic Background Radiations

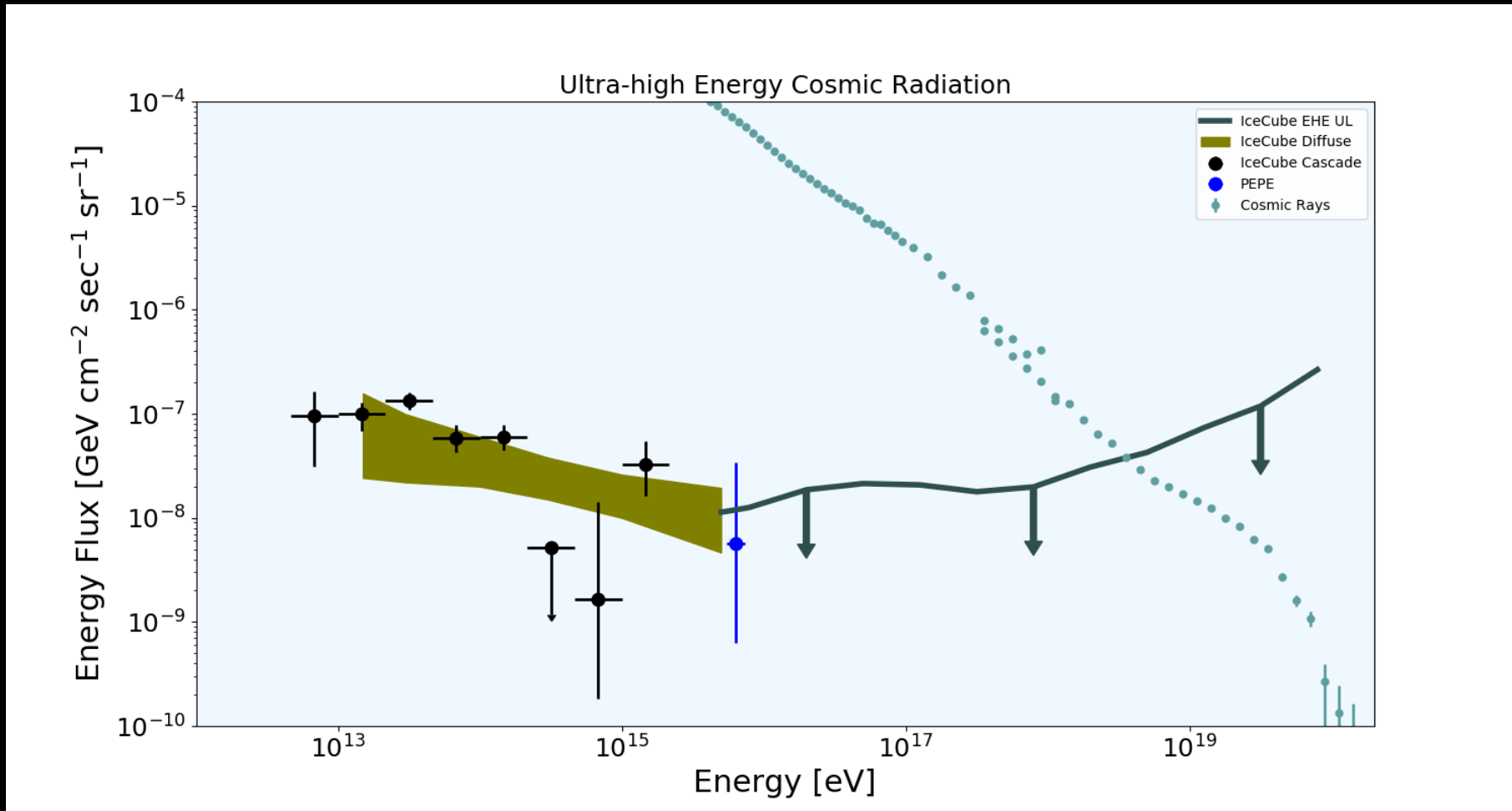
The UHE Cosmic Ray **Energy** Flux

[energy]/[area][time][solid angle]



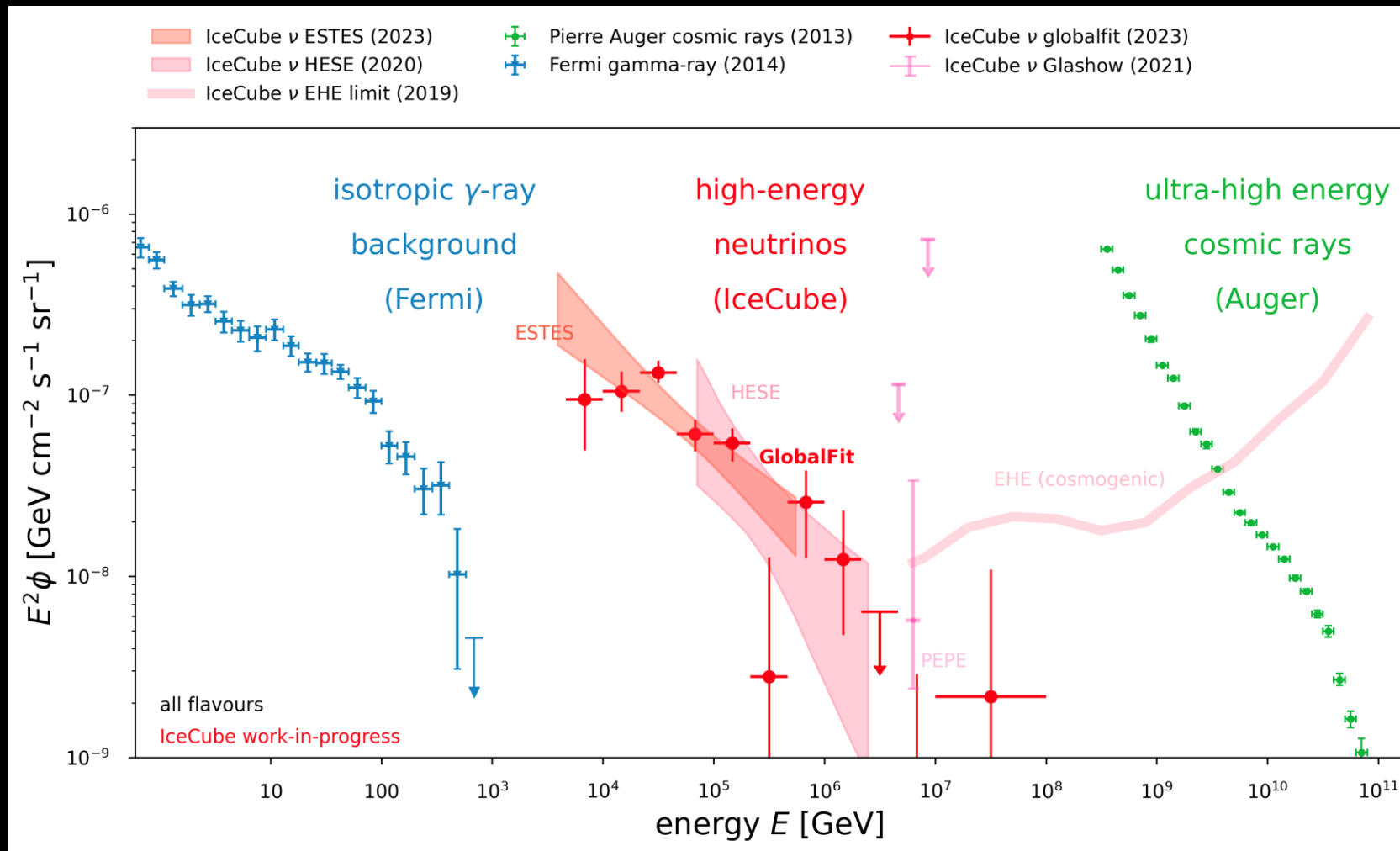
The UHE Cosmic Background Radiations

The UHE Cosmic Ray + Neutrino Energy Fluxes

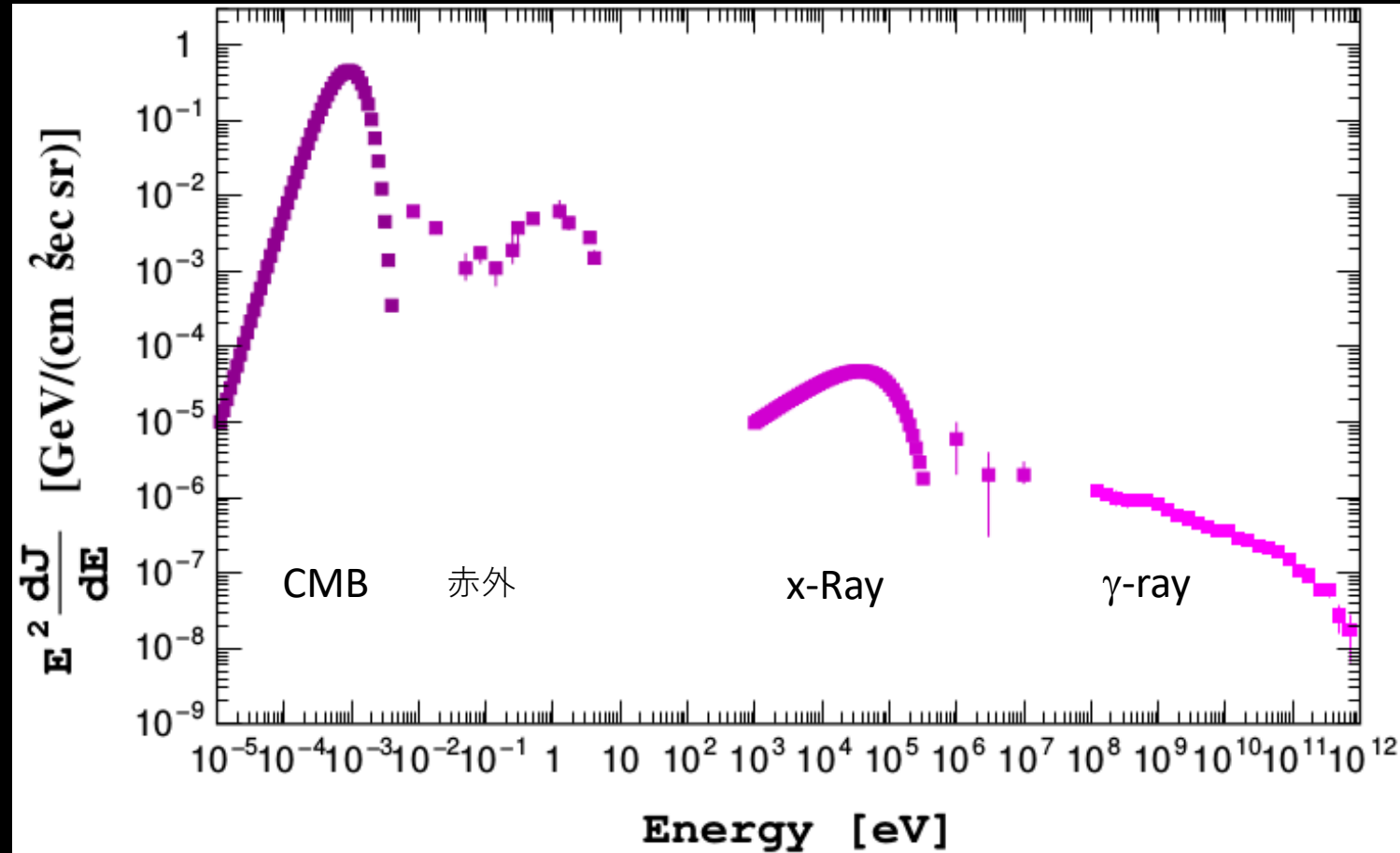


The HE Cosmic Background Radiations

The UHE Cosmic Ray + Neutrino + γ -ray Energy Fluxes



The Cosmic Photon Background Radiations



宇宙からのすべての手紙を読み解く

マルチメッセンジャー宇宙物理学

ニュートリノ

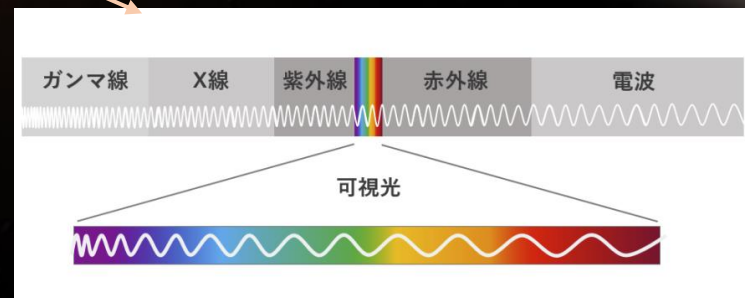
超高エネルギーに加速された物質の衝突で生成される、透過力に優れた素粒子。

重力波

時空間の歪みが波として伝わる。
強大な重力エネルギーが生み出すダイナミクスを直接伝える。



光(電磁波)



Big Questions

- 宇宙はどうやって、陽子・原子核を超高エネルギーに加速して放射できるのか?

宇宙線の起源 \leftrightarrow プラズマ物理・重力エネルギーの変換機構

宇宙はなぜこれほど多様なのか?

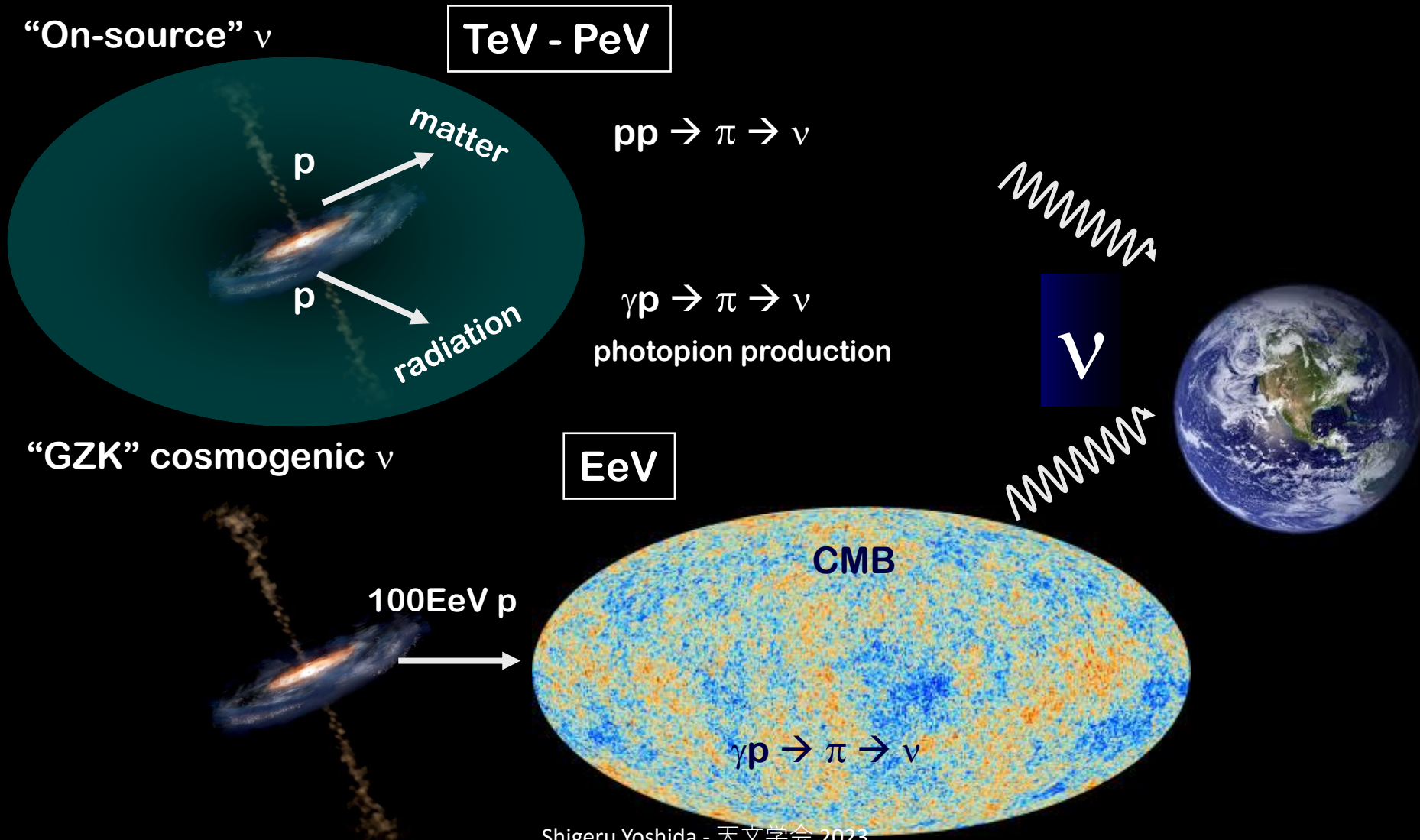
- ブラックホールの誕生と成長

ニュートリノ、重力波(あるいは宇宙線)放射天体候補の多くは、ブラックホール(または中性子星)の誕生または成長によって駆動されている。

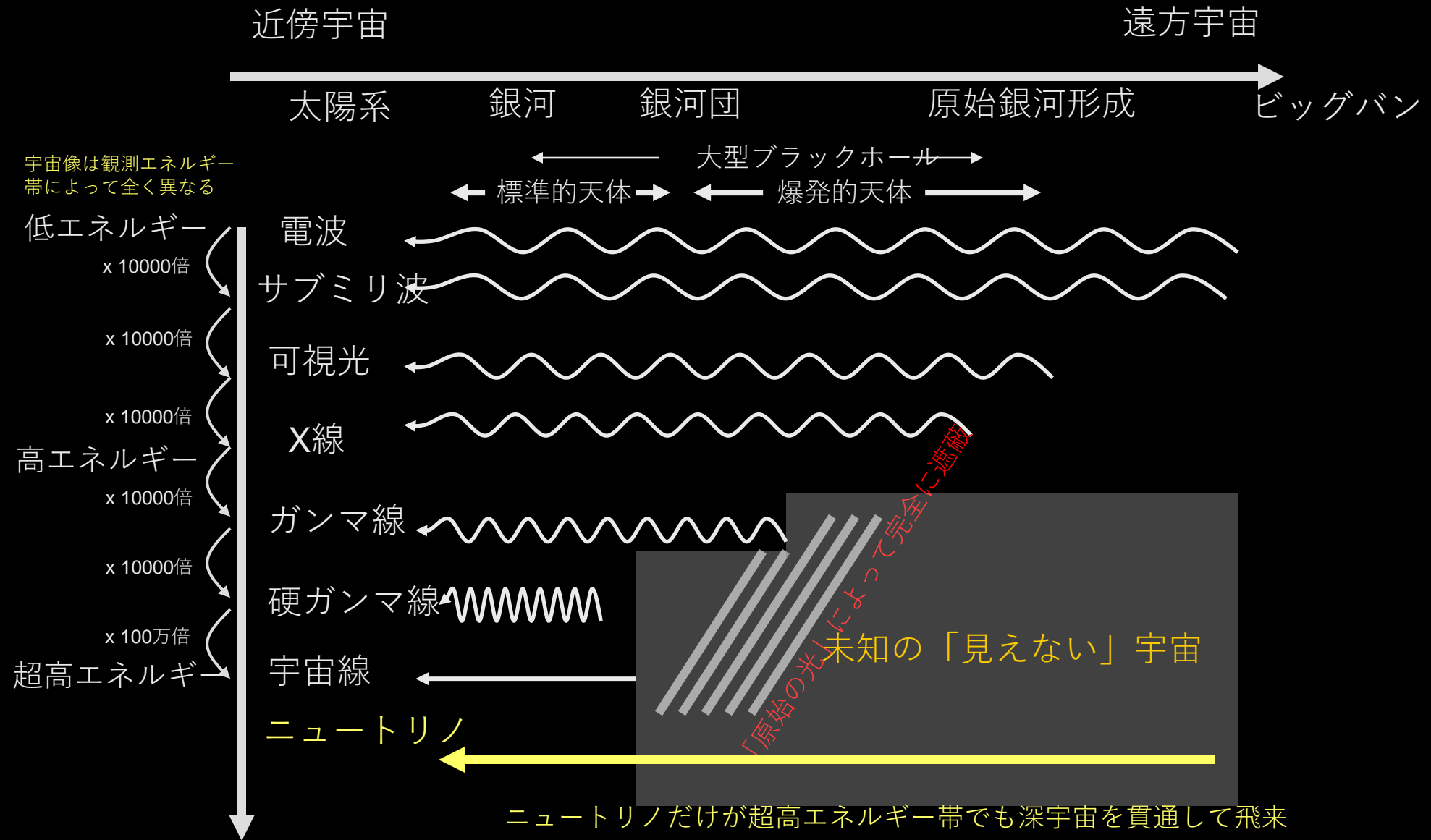
光学的に極めて厚い環境 \rightarrow **ニュートリノと重力波**のみが爆発(またはフレア)の第一報を届けられる

新しい天体現象の発見 (新しい手段で宇宙を視れば、かならず発見がある)

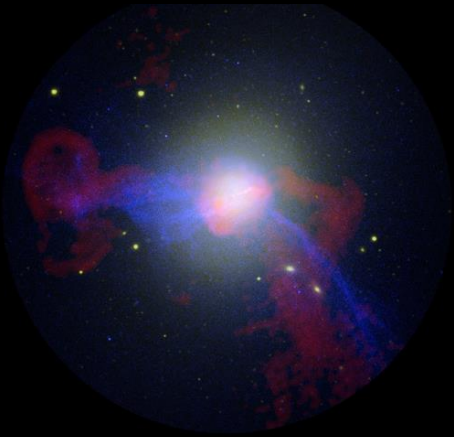
Production Mechanisms of the Cosmic Neutrinos



超高エネルギーの光は遠くから届かない



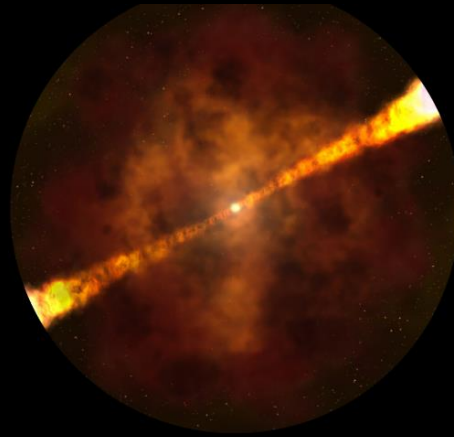
どんな天体が考えられるのか？



Active galaxies



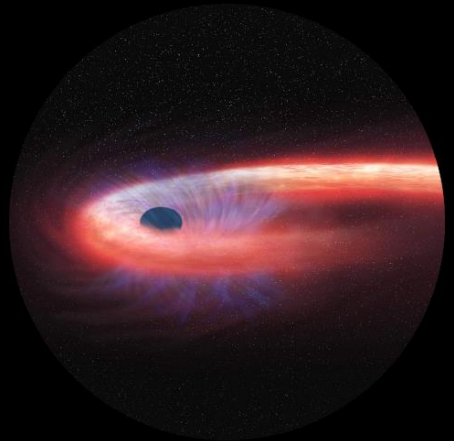
Compact object mergers



Gamma-ray bursts



Core-collapse supernovae



Tidal disruption events

- Transient and highly-variable astrophysical sources display high-energy non-thermal emission of potential hadronic origin.
- Most of them is driven by **huge gravitational energy** created by (massive) BH
- Under high-dense plasma/gas environment. Possibly optically **really thick**

マルチメッセンジャー宇宙物理学

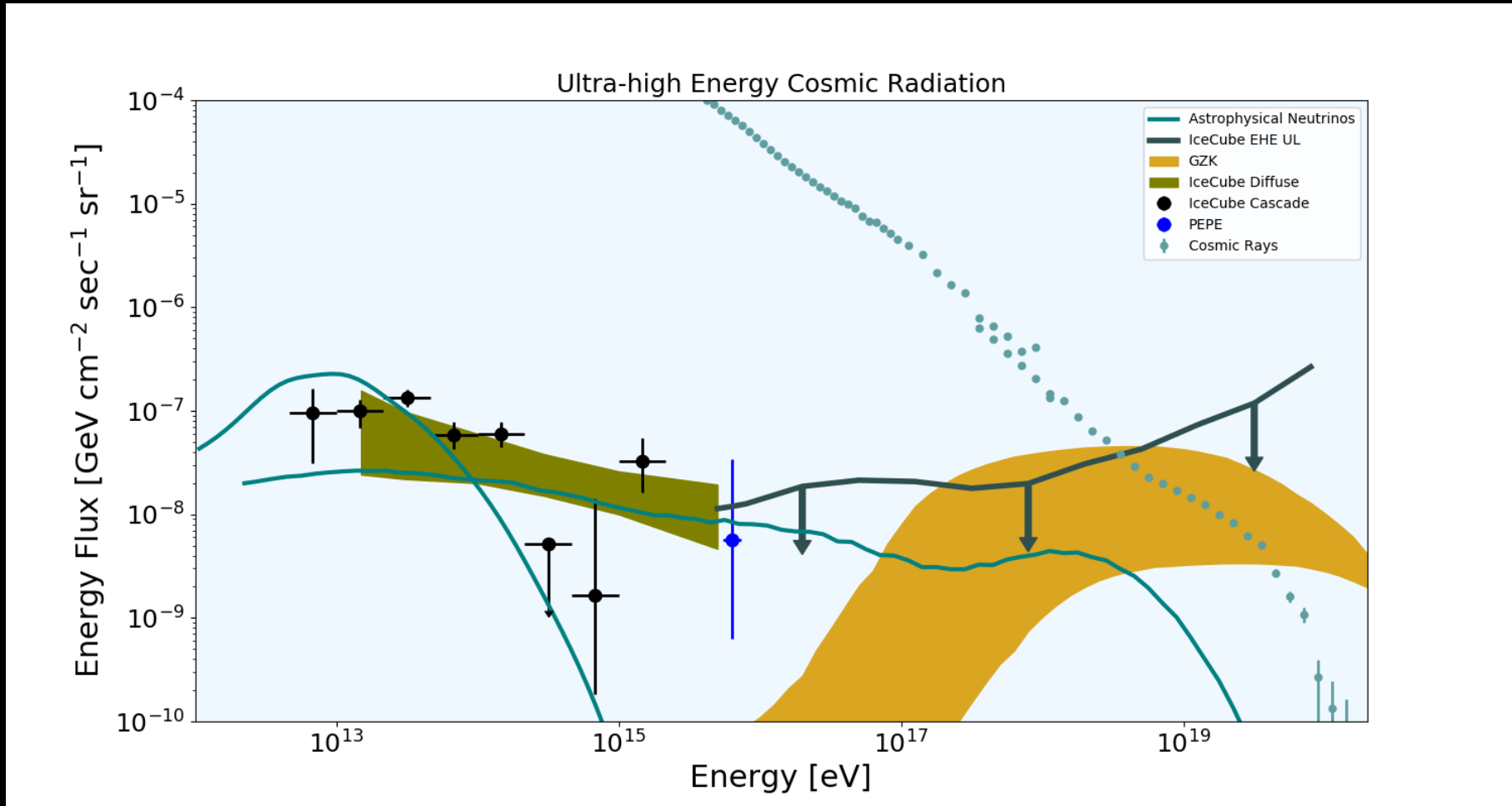
その1

すでに存在し公表されている観測データを照合して、説明する。主とし理論研究

The UHE Cosmic Background Radiations

The UHE Cosmic Ray + **Neutrino** Energy Fluxes

+ (Examples of) the Model Predictions



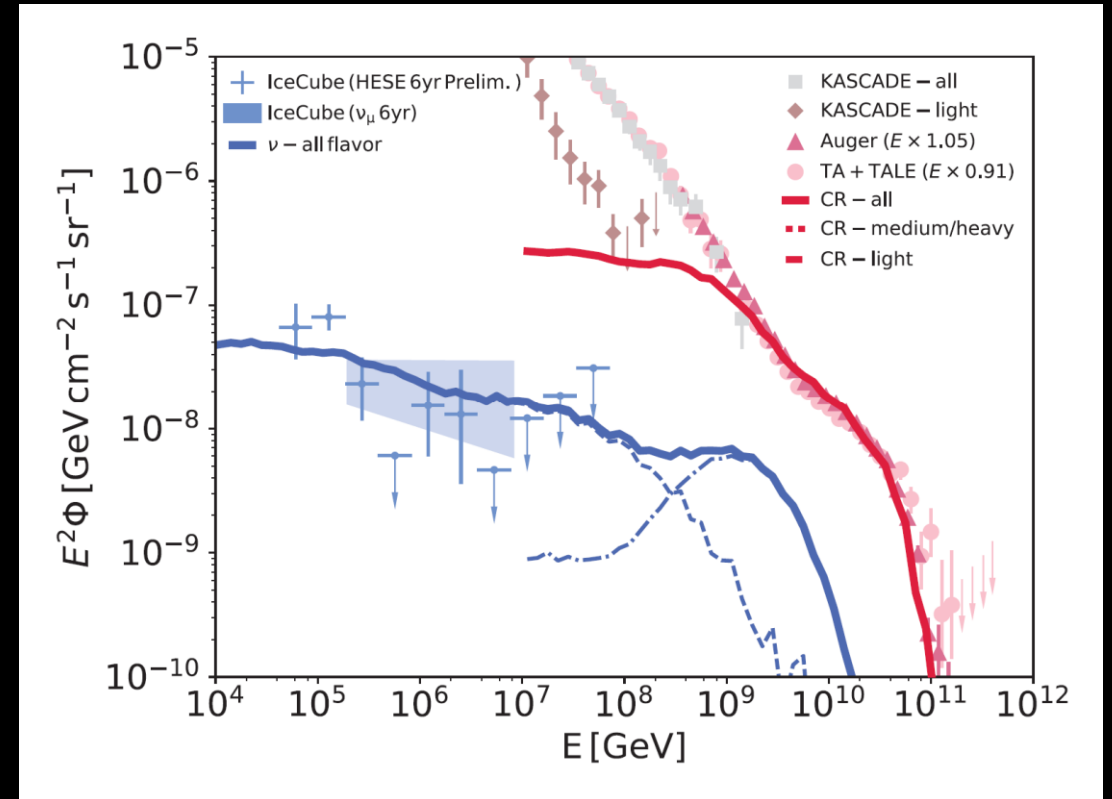
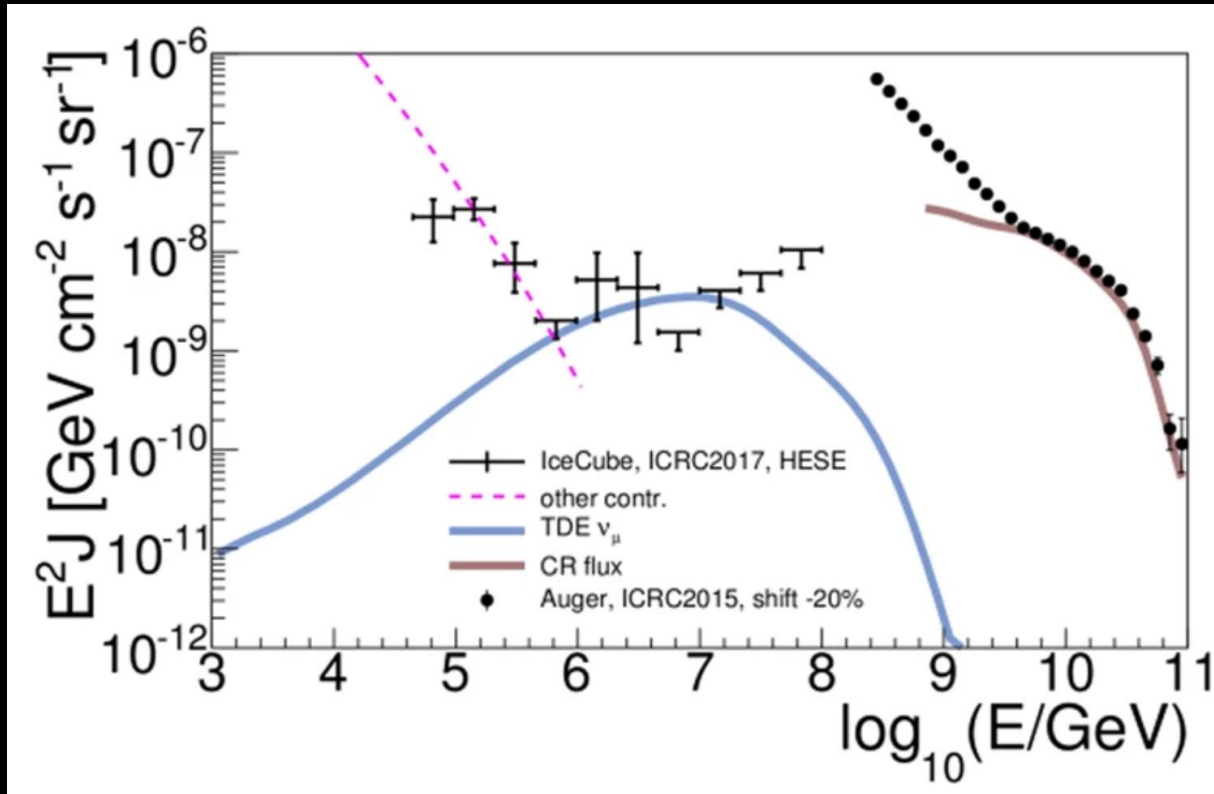
宇宙線とニュートリノ背景放射を 統一的に説明する試み

(low luminosity) TDE $p\gamma$

Biel, Boncioli, Lunaridini & Winter
[Sci. Rep 8, 10828 \(2018\)](#)

High Energy (10TeV-PeV) pp in clusters of galaxies

Fang & Murase
[Nature Physics 14 196-198 \(2018\)](#)

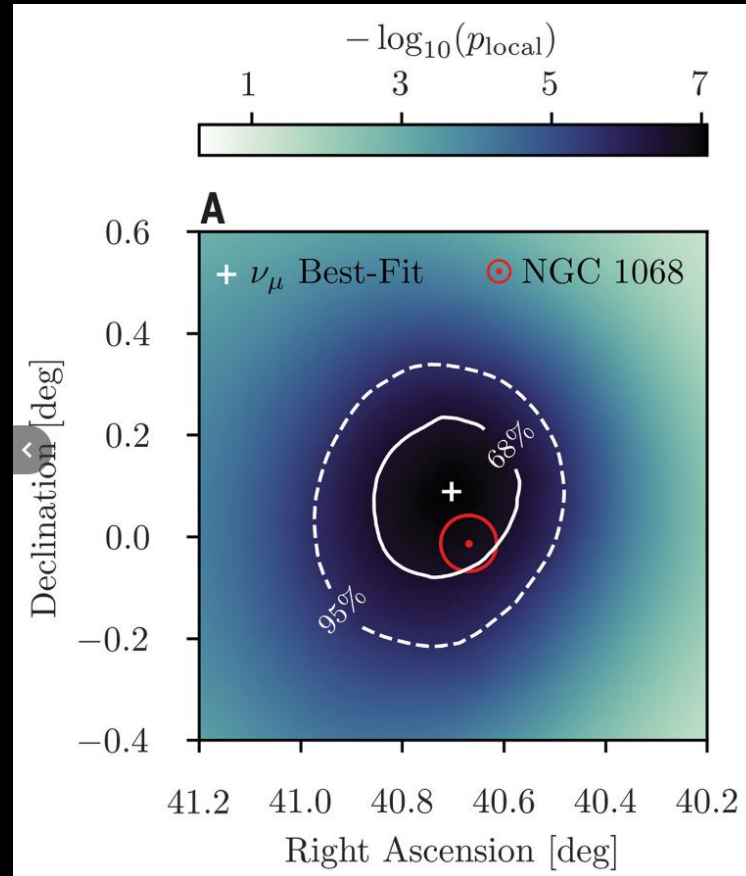


The Point-source ν emission

4.2 σ (post-trial) excess in TeV range with 9 years of data

TeV ν sky

Seyfert II
Galaxy NGC
1068



IceCube Collaboration
[Science 378 538 \(2022\)](#)

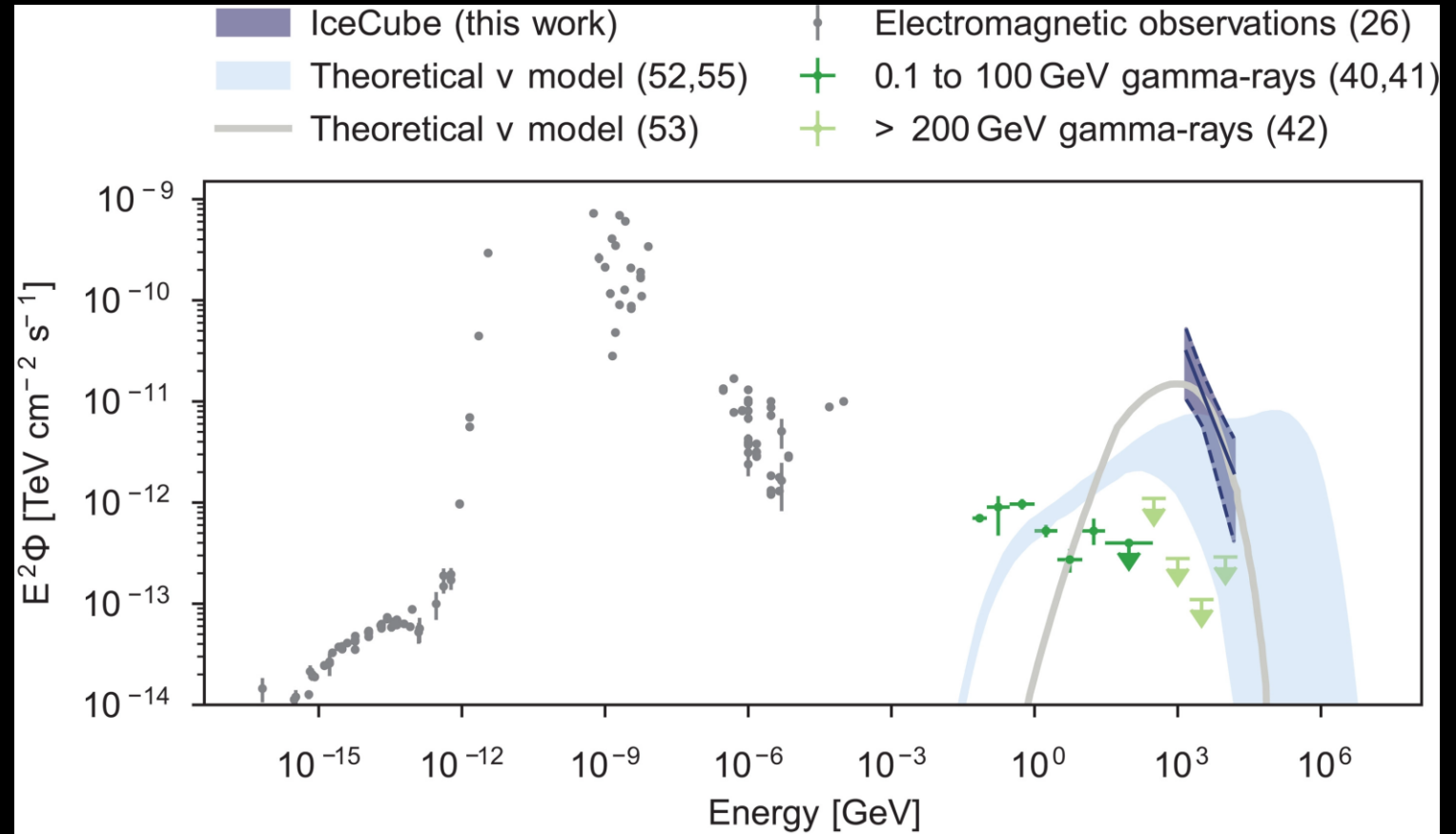
Shigeru Yoshida - 天文学会 2023

The Energy fluxes of multimessengers

過去にpublishされているデータでゲームをする



Seyfert II
Galaxy NGC
1068



IceCube Collaboration
[Science 378 538 \(2022\)](#)

Shigeru Yoshida - 天文学会 2023

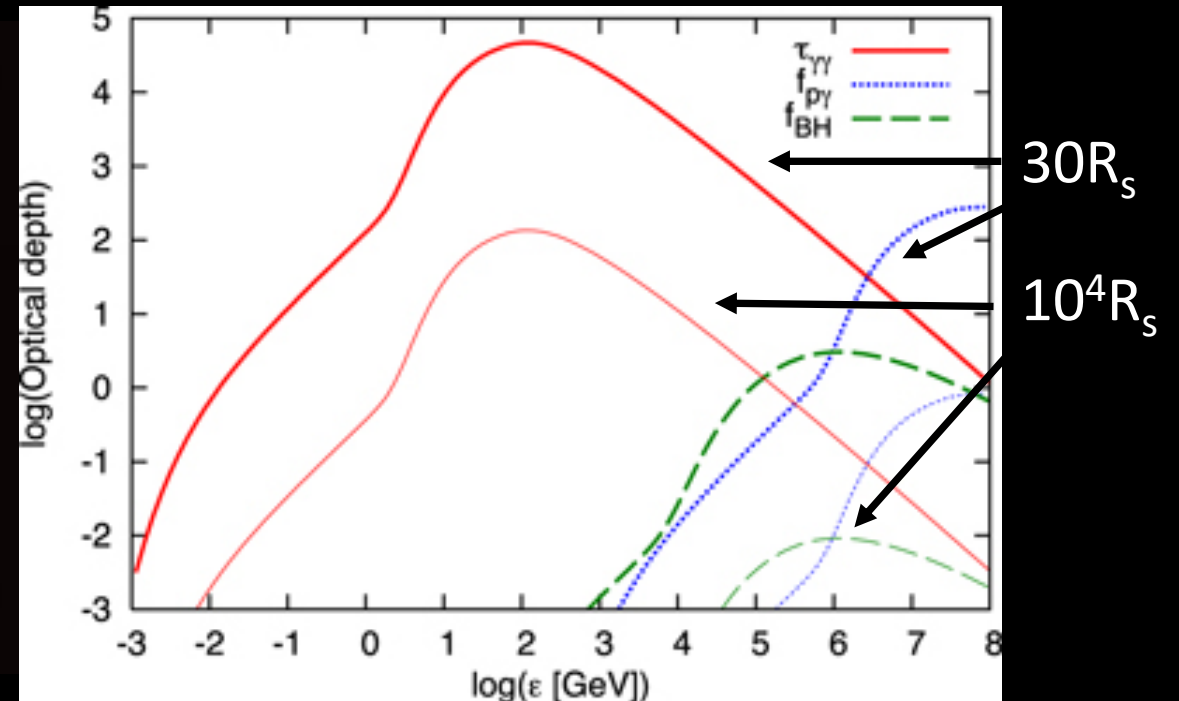
Probing the obscured vicinity of supermassive black holes

過去にpublishされているデータでゲームをする

Seyfert II
Galaxy NGC
1068



Imaging by Event Horizon Telescope



Murase ApJ 2022

マルチメッセンジャー宇宙物理学

その2

ニュートリノ・重力波の検出情報を
元に追尾観測(ToO)する(またはその逆)。
主に観測的・実験的研究

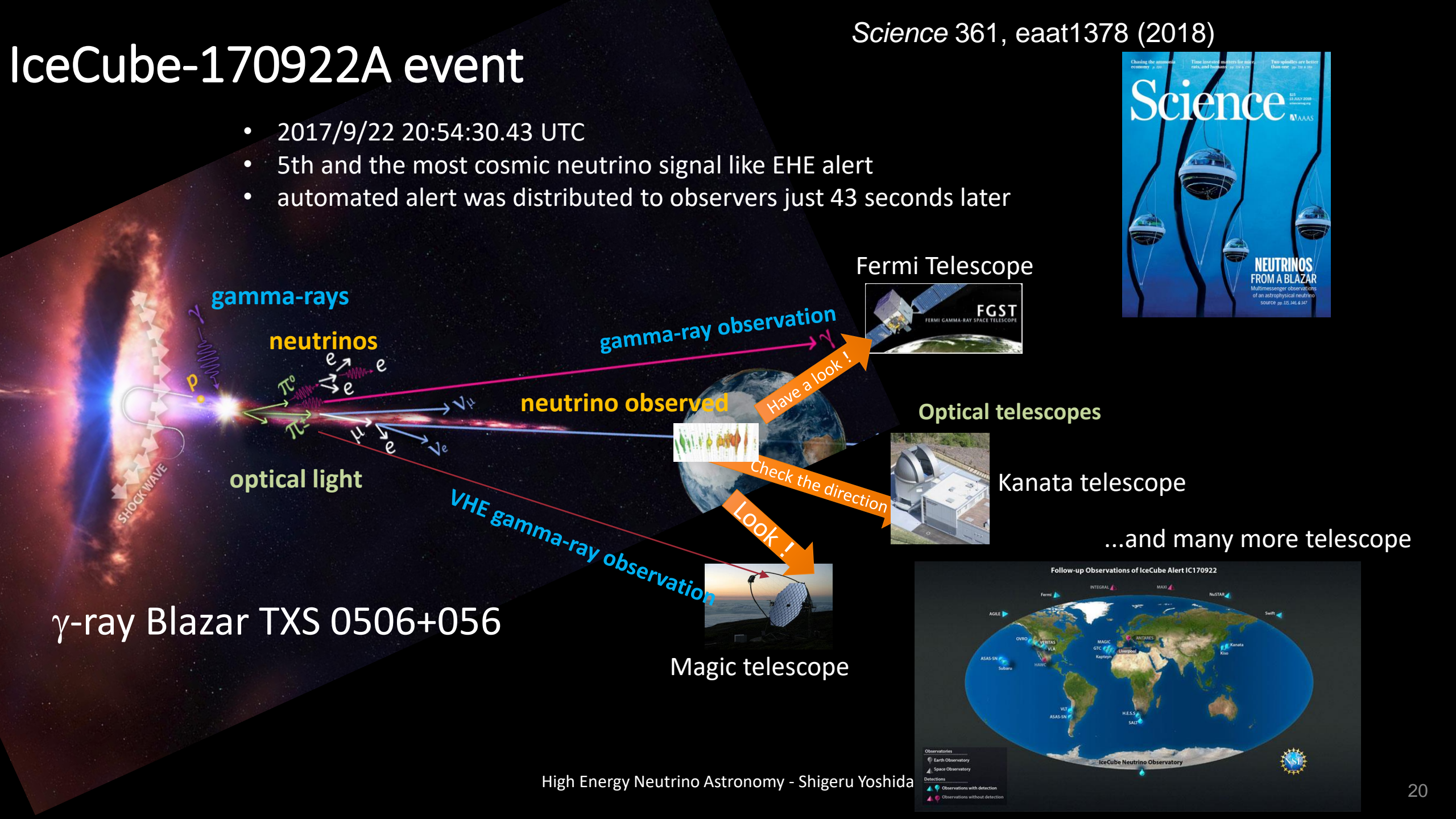
今日の企画セッションの講演の多くはこちら



IceCube-170922A event

- 2017/9/22 20:54:30.43 UTC
- 5th and the most cosmic neutrino signal like EHE alert
- automated alert was distributed to observers just 43 seconds later

γ -ray Blazar TXS 0506+056



Fermi Telescope



Optical telescopes

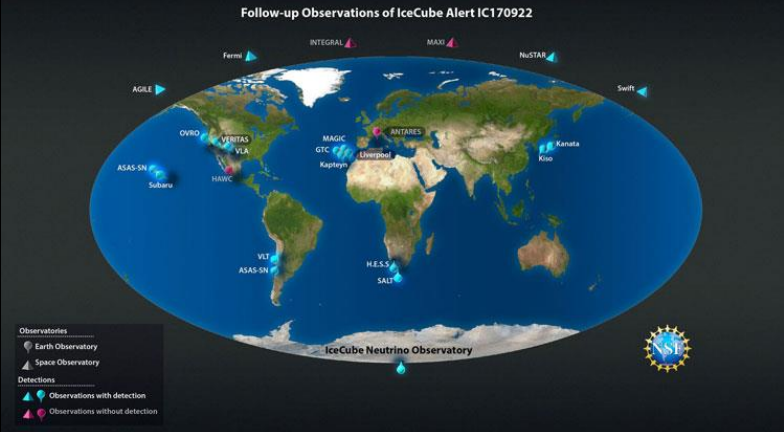


Kanata telescope

...and many more telescope



Magic telescope

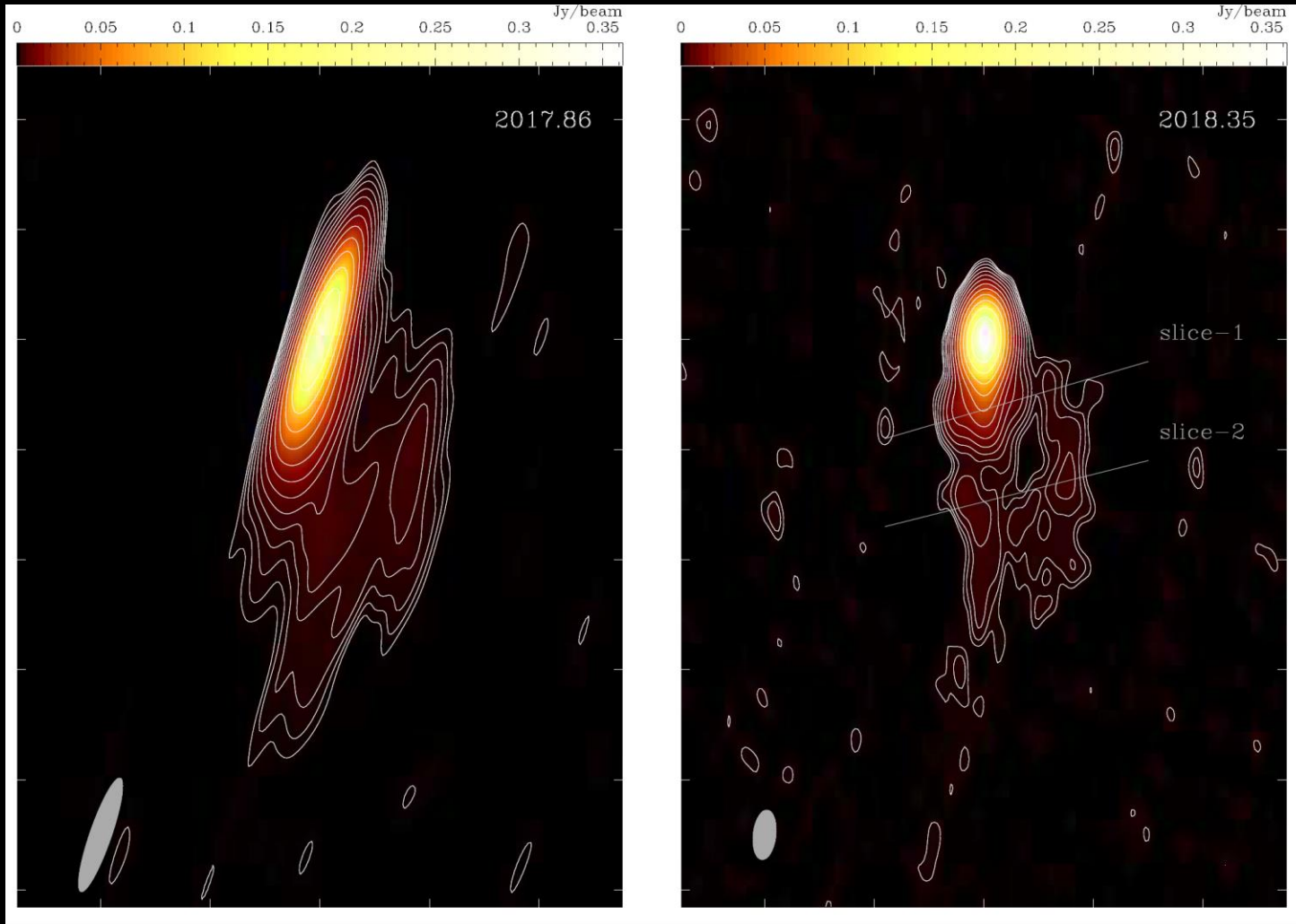


VLBI observations

43 GHz by VLBA

November 11, 2017

May 4, 2018



70-140 pc from the VLBI core

Interesting inner jet structures

Indications of either

- deceleration
- spine-sheath structure

→ a source seed photons
for $p\gamma$ interactions

↓
Neutrinos!

E.Ros+ A&A (2020)

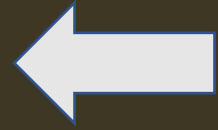
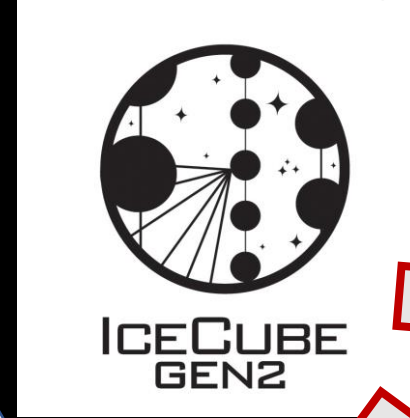
マルチメッセンジャー観測網の構築

(ニュートリノ観測から見た場合)

IceCube-Gen2時代のネットワーク発展

すばるPFS

XRISM



Fermi-LAT



FGST
FERMI GAMMA-RAY SPACE TELESCOPE

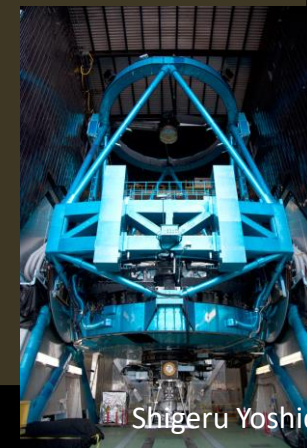
MAGIC



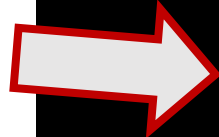
かなた



すばる



LIGO



CTA



KAGRA



▼ 天体ブレーザー
TXS0506+056 同定
に貢献した観測施設



IceCube Realtime Alerts

version 2 now online!

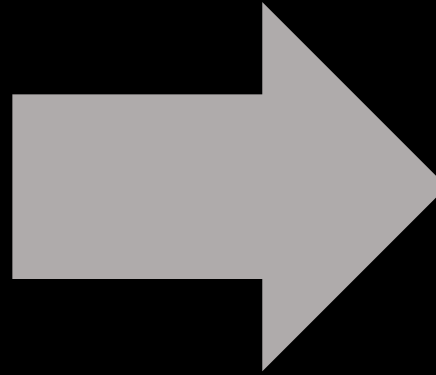
inheritance from the version 1

veto-based
HESE

EHE (Ultra-High Energies)

new addition!

GFU (Gamma-ray Follow Ups)



purity of cosmic neutrinos

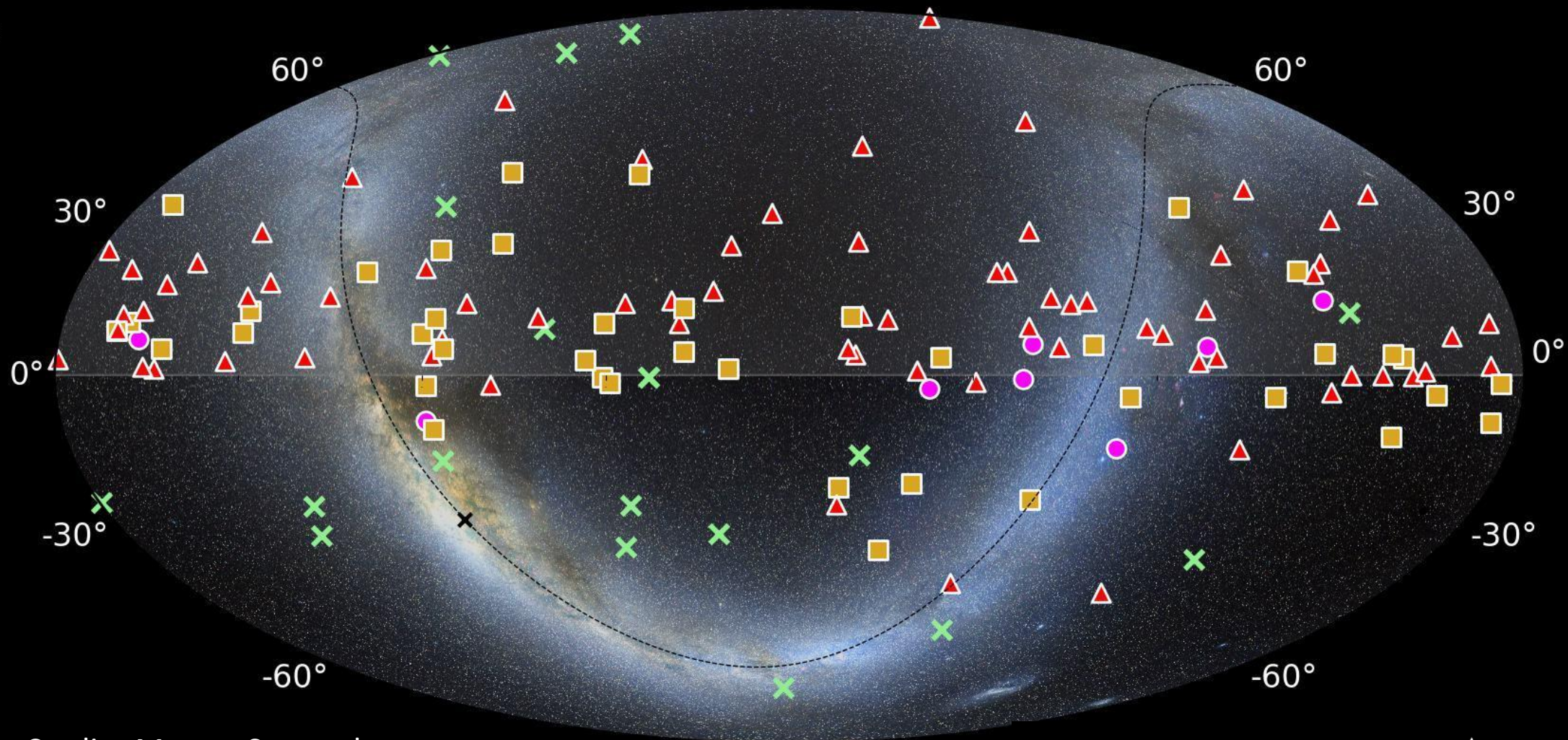
>50%







>30%



The Present Neutrino Alerts Directions



Credit : Marcos Santander

-  Extremely-high energy (EHE)
-  High-energy starting event (HESE)
-  Bronze
-  Gold

とくに今日言いたいことはここから

本当はこんな風に話したいのですが



そもそも天体が見つかるかどうかすら分からない

重力波

(LVK時代はほぼ) BH か NS の連星系

対応天体が同定できるかどうかの勝負

ニュートリノ

どんな天体かすら事前に分からない

AGN? かもね。GRB? かもね。TDE? もしかしたら。

考えもしなかった天体かも。Dark Matter かも。

まさにパイオニア・スピリットの塊

すでに知られている天体細かく見てどこに物理があるんですか、と考える人向き

いや、でも何にも見えなかったら天文じゃないよ

伝統的にはそうでしょう。しかし、あなたは間違っています。

そこからが腕の見せ所なんです。

Swift XRT によるフォローアップのATel

Swift XRT observations of WISEA J145820.77+412101.9 /
IceCube 220624A

ATel #15482; *P. A. Evans (U. Leicester) and J. A. Kennea (PSU)*
on 29 Jun 2022; 07:33 UT
Credential Certification: Phil Evans (pae9@star.le.ac.uk)

Subjects: X-ray, Neutrinos, AGN, Blazar

Referred to by ATel #: 15493

Tweet

Swift-XRT observed the blazar WISEA J145820.77+412101.9 for 4.9 ks, starting at 15:07 UT on 2022 June 28. This blazar was posited by the Fermi team (GCN Circ. 32285, ATel #15478) to be the potential counterpart to a new gamma-ray source, Fermi J1458.0+4119, itself a possible counterpart to the high energy neutrino IceCube 220624A (GCN Circ. 32260).

The Swift observations show an approximately constant count-rate of $9 \pm 2 \times 10^{-3}$ ct/sec. A spectrum created from the 26 photons detected can be fitted with a power-law with a photon index of 3.0 (+1.8, -1.1) absorbed by a column $N_H = 1.0 (+2.8, -1.0) \times 10^{21}$ cm^{-2} ; the large uncertainties arising due to the low number of counts. This corresponds to a 0.3-10 keV flux of $1.72 (+1.14, -0.60) \times 10^{-13}$ $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

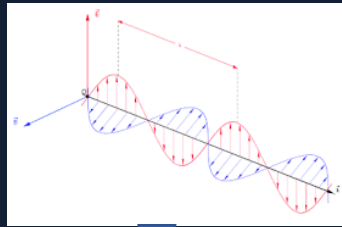
0.3-10 keV flux of $1.72 (+1.14, -0.60) \times 10^{-13}$ $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

flux の上限値をだしている。

でもこれだけなら物理にならない

(典型的な)天文観測との違い

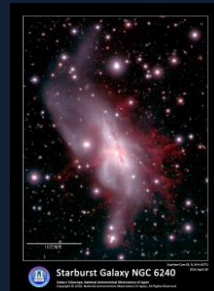
ニュートリノという素粒子をメッセンジャーにする場合



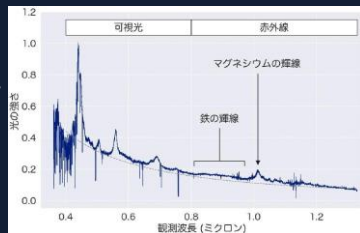
- 測定対象は「波」
連続的



撮像

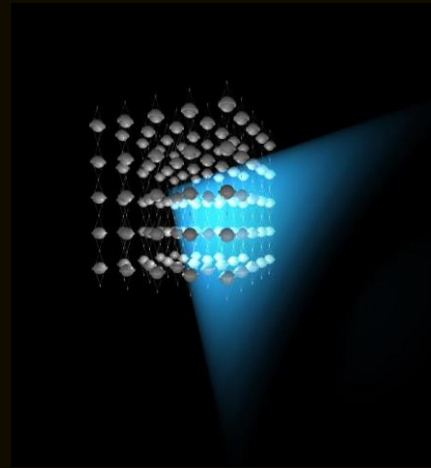


分光

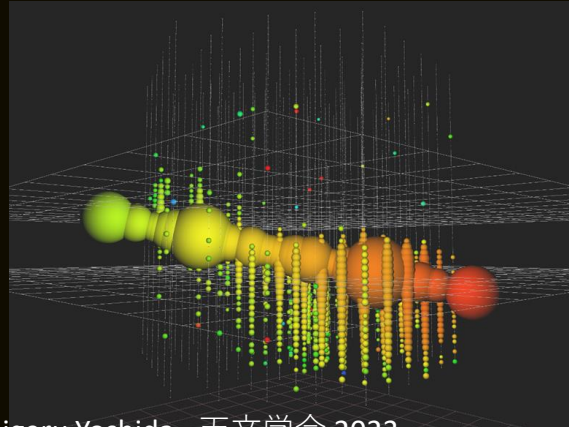


- 宇宙由来じゃない雑音は無い
か少ない

宇宙からの信号取得は当たり前



ニュートリノ1個が氷河と衝突してチェレンコフ光を放射する様子
の模式図



Shigeru Yoshida - 天文学会 2023
実際に測定されるニュートリノ「事象」

V

- 測定対象は「粒子」
一個、一個を検出する。離散的
それぞれに、「エネルギー」「方向」を
推定する。検出面積・時間で割れば flux
- 信号の大半はバックグラウンド
大気で作られる大気ニュートリノ
目指す宇宙ニュートリノは10億個
の検出粒子のなかの僅か1個
宝さがしの腕前=観測データ解析能力

- 宇宙からの背景放射も
放射元天体の分解も両方行う

実質的な「視野」は 2π (オムニ)

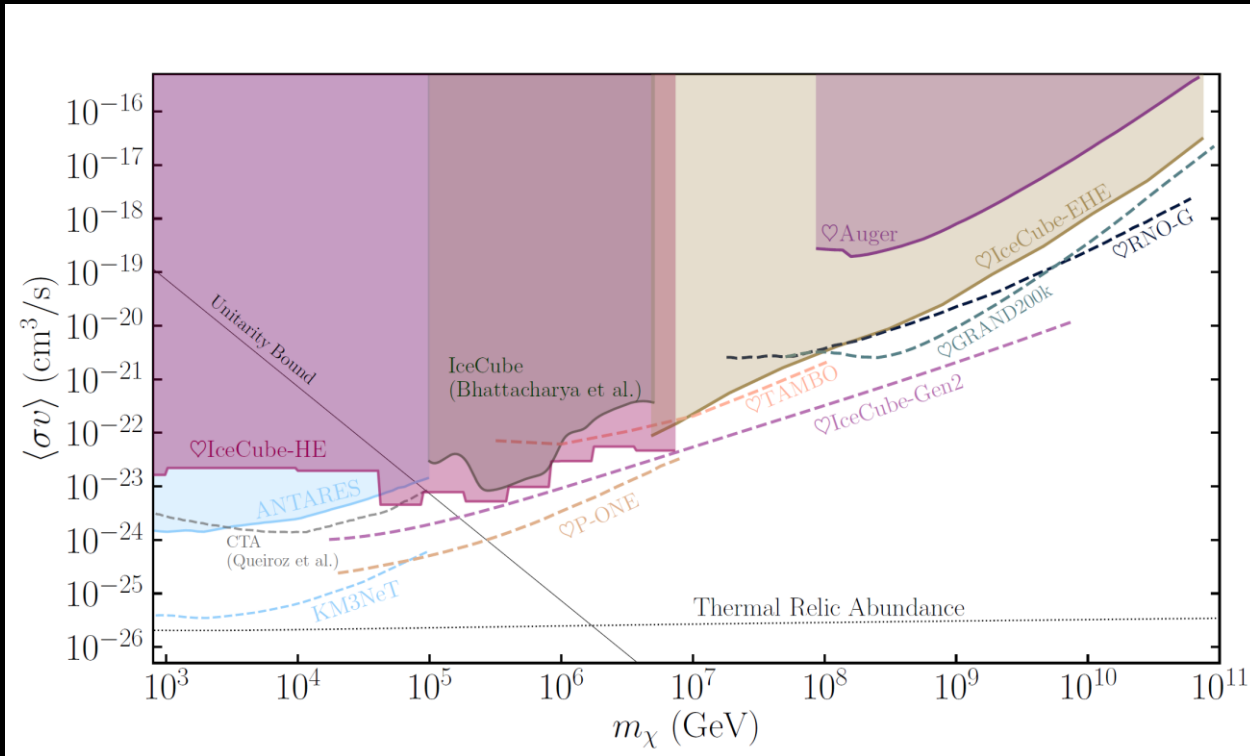
- 宇宙からの信号が無くても
重要なサイエンスはある

上限値から物理の制限(「素粒子物理的」)

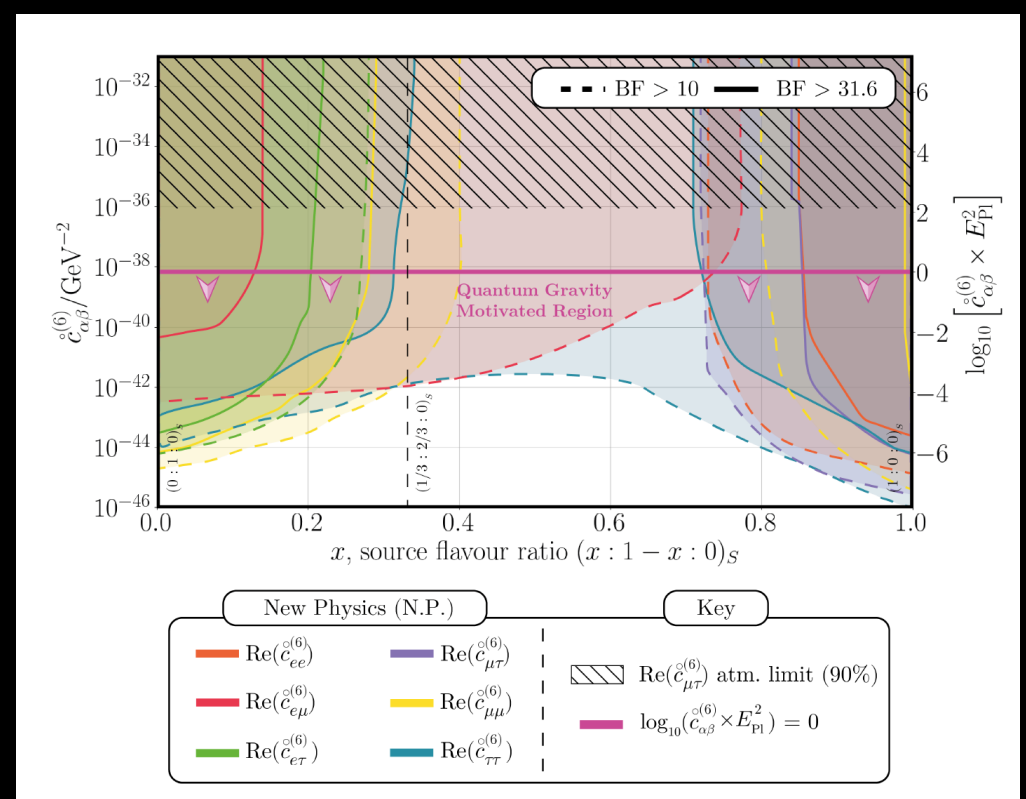
素粒子物理的なセンスとの融合はどうでしょう？

たとえ見つからなくても物理はでる。パラメータスペースをスキャン

ニュートリノを使った暗黒物質探索
High Energy Neutrinos [Snowmass Paper \(2022\)](#)



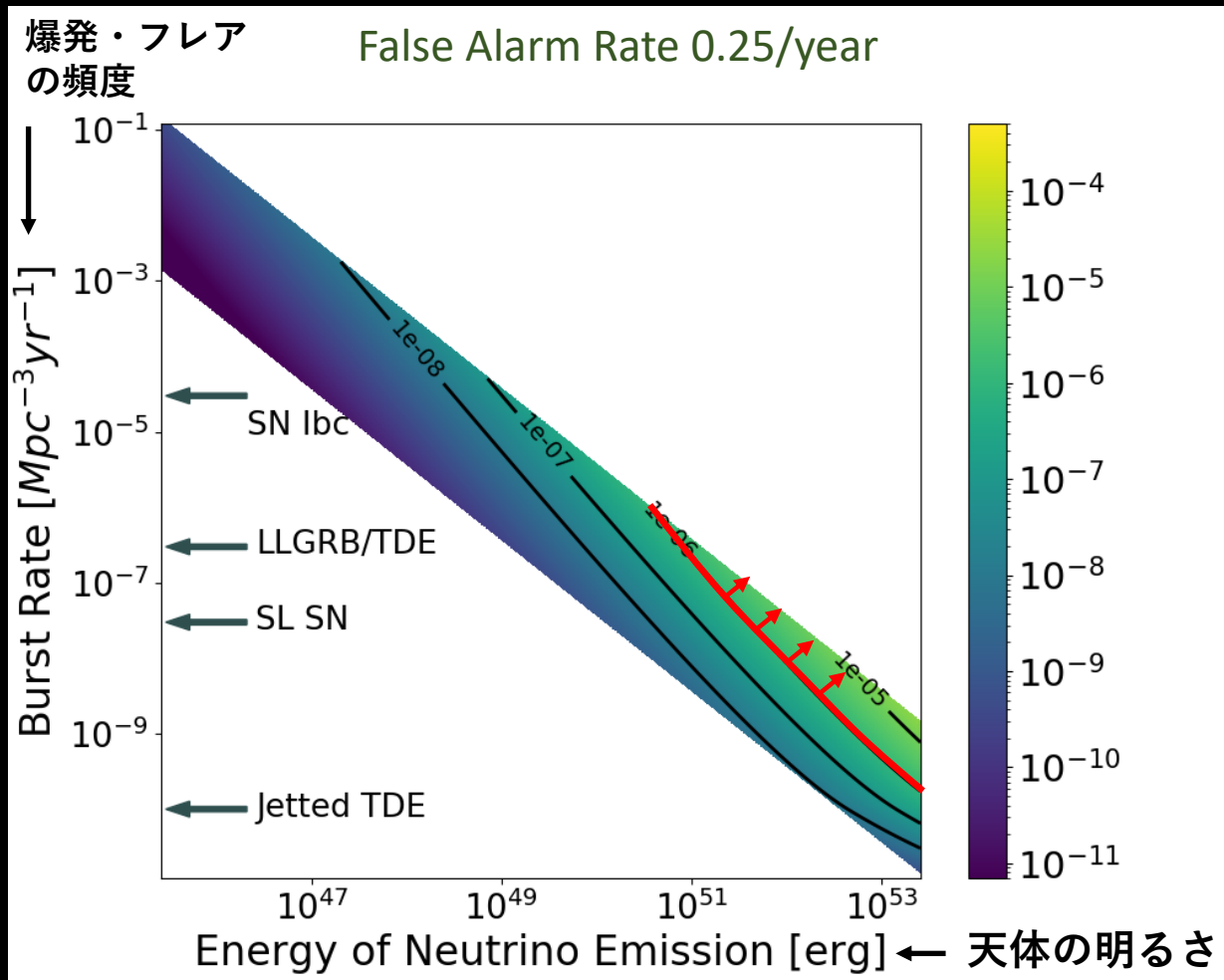
ニュートリノを使った量子重力効果の探索
IceCube Collaboration [Nature Physics \(2022\)](#)



ニュートリノ放射天体のパラメータスキャン

同じ方角から複数個のニュートリノ信号が**見つかっていない**ことを使う

どんな未知の天体にも適用できる → 見つからなければ**物理に制限**



5-year sensitivity $N_{PS}^M > 10^{-6}$
for a given sky patch of 1 deg² with 30 days

If we found no doublet by ~ 5 year observations

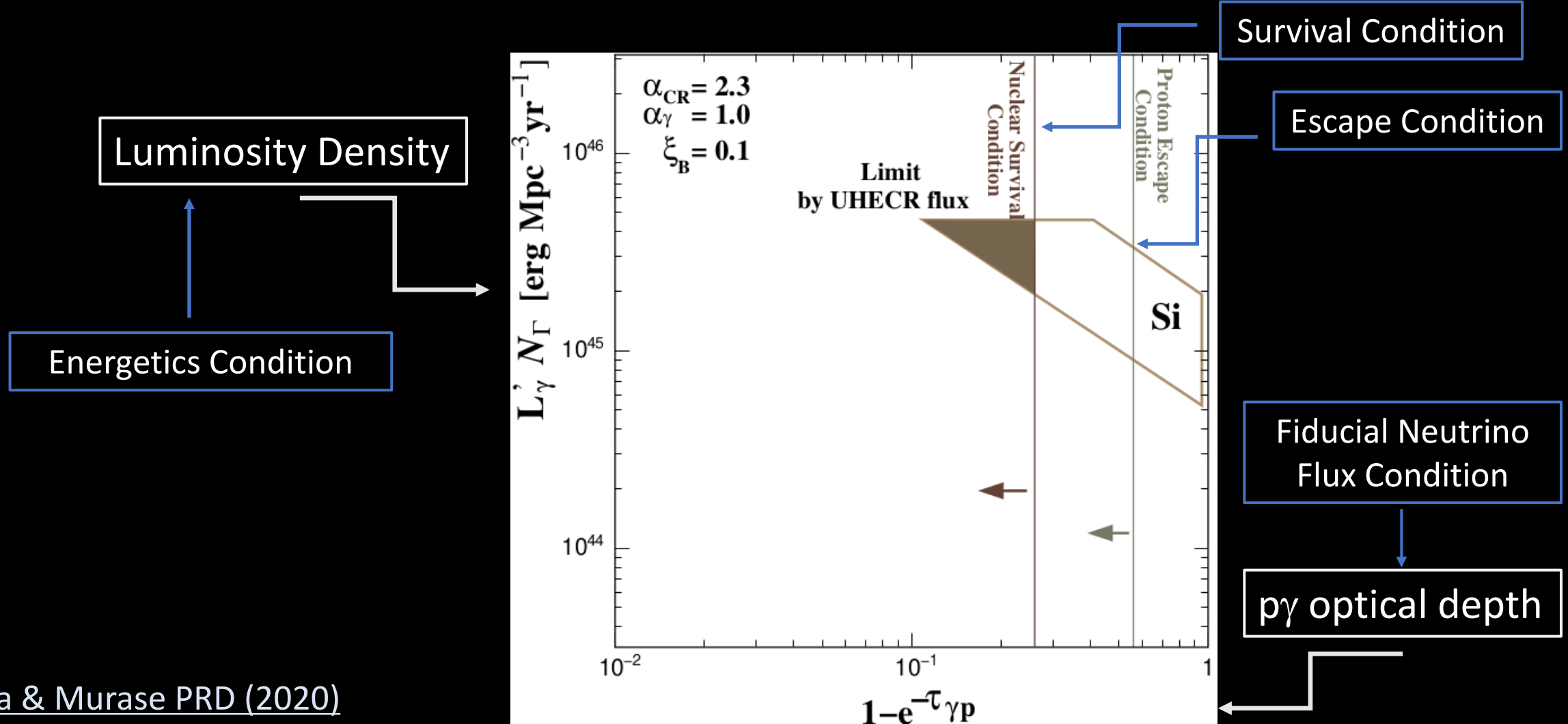
source classes with

$E_\nu > 5 \times 10^{51}$ erg, $\rho_\nu < 2 \times 10^{-8}$ $\text{Mpc}^{-3} \text{yr}^{-1}$
are rejected

Super Luminous SNe and jetted TDEs are
not the major sources

Yoshida, Murase, Tanaka, Shimizu, Ishihara, ApJ(2022)

超高エネルギー宇宙線とニュートリノを 両方出せる天体の条件をパラメータスキャン どんな未知の天体にも適用できる → 見つからなければ**物理に制限**



Yoshida & Murase PRD (2020)

X線(MAXI, NICER)とだっとうまくやれば...



相対論的ジェット内では、**宇宙線陽子の衝突相手はX線**
 (photo-hadron 衝突断面積のデータと相対論からの必然的帰結)
 この衝突からニュートリノ生成

ニュートリノの明るさ

$$\propto \xi_{CR} \times L_X \times (\sqrt{L_X}, 1) \times \underbrace{B \times f(\Gamma)}_{\text{磁場} \quad \text{プラズマの Lorentz 因子}}$$

↑
 プラズマ中の
 宇宙線陽子の量



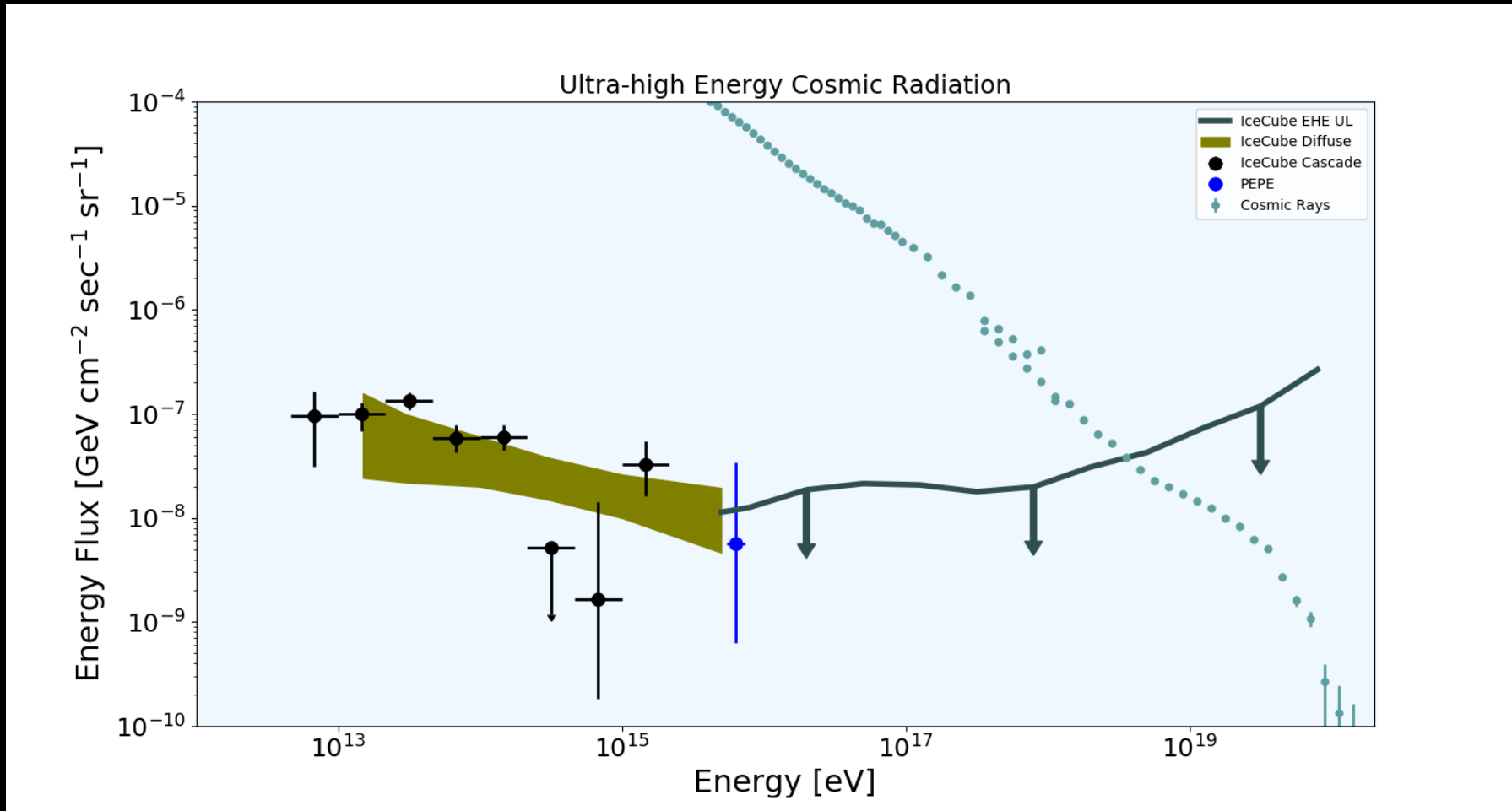
この天体はPeVatron
 なのか? 宇宙線起源

極限天体環境のプローブ
 重力エネルギー解放と宇宙の多様性の理解

Big Questions

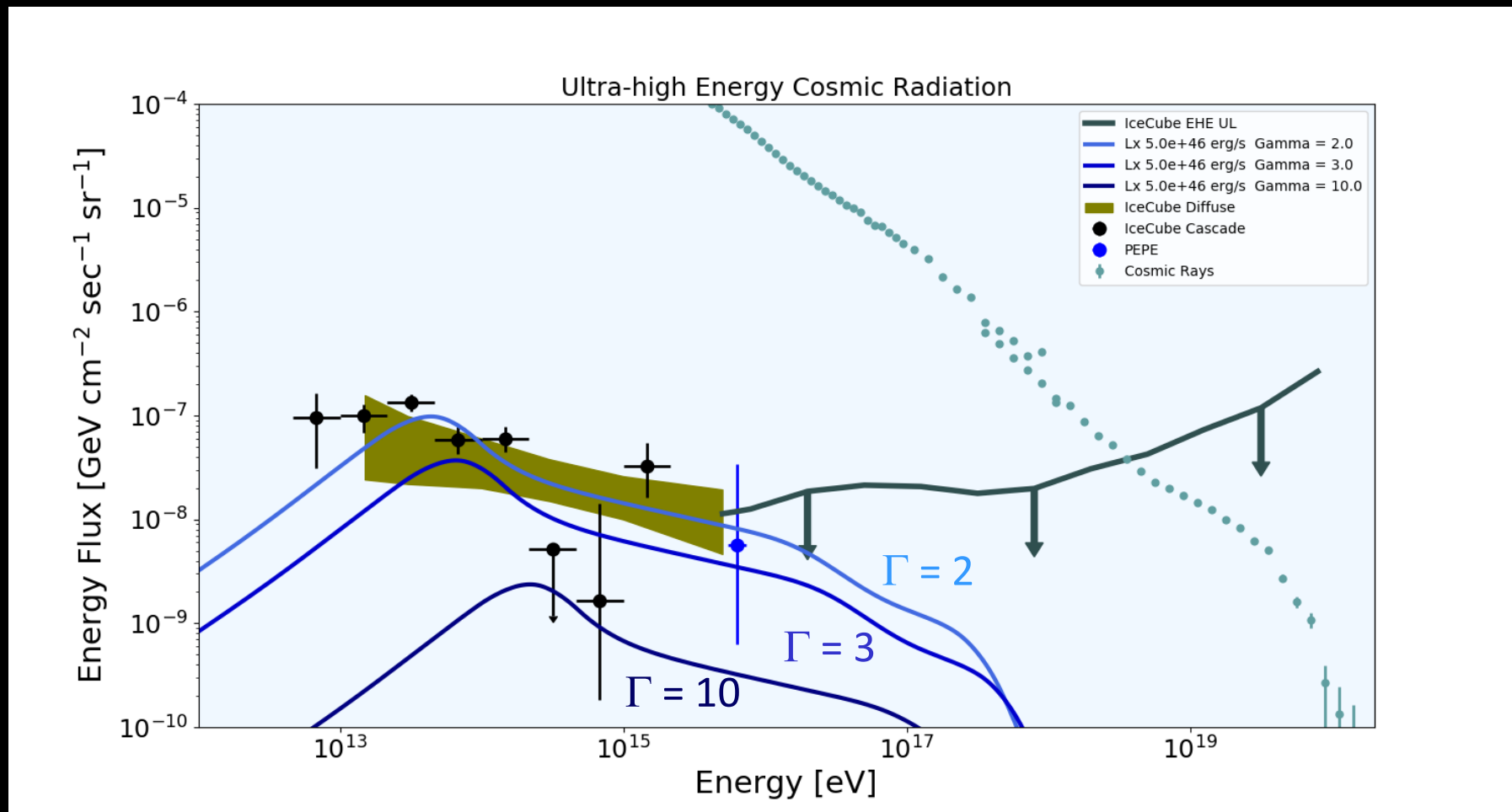
The UHE Cosmic Background Radiations

The UHE Cosmic Ray + Neutrino Energy Fluxes



The UHE Cosmic Background Radiations

L_x (2-10 keV) 5×10^{46} erg/s (low luminosity GRB-like な場合)
からの **Neutrino background radiations**



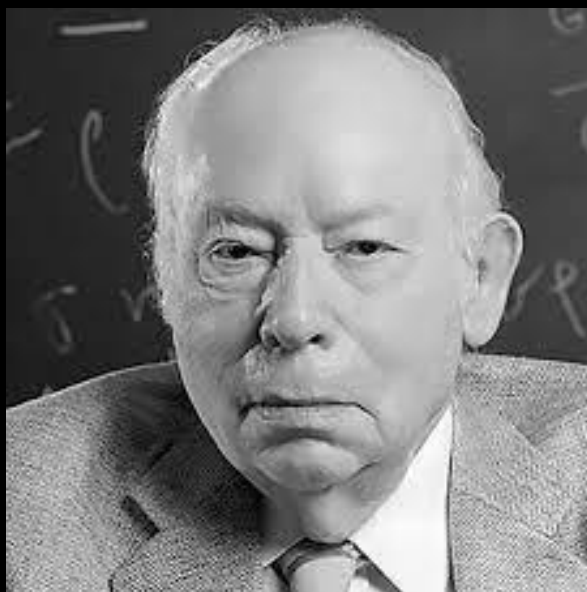
とりあえずのまとめ

天体の有無によらず、重要な物理は出せる

そのつもりで準備しておけば、天体同定したときには時代を画する成果となる

異文化の異種格闘技戦を楽しんで、世界的な競争に参加しましょう！

Steven Weinberg



ぶ、ぶ、物理



Arthur Eddington

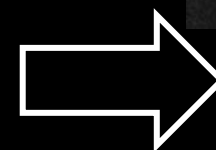


融合

(変なこともしたけど)

Shigeru Yoshida - 天文学会 2023

Harlow Shapley



て、て、天文