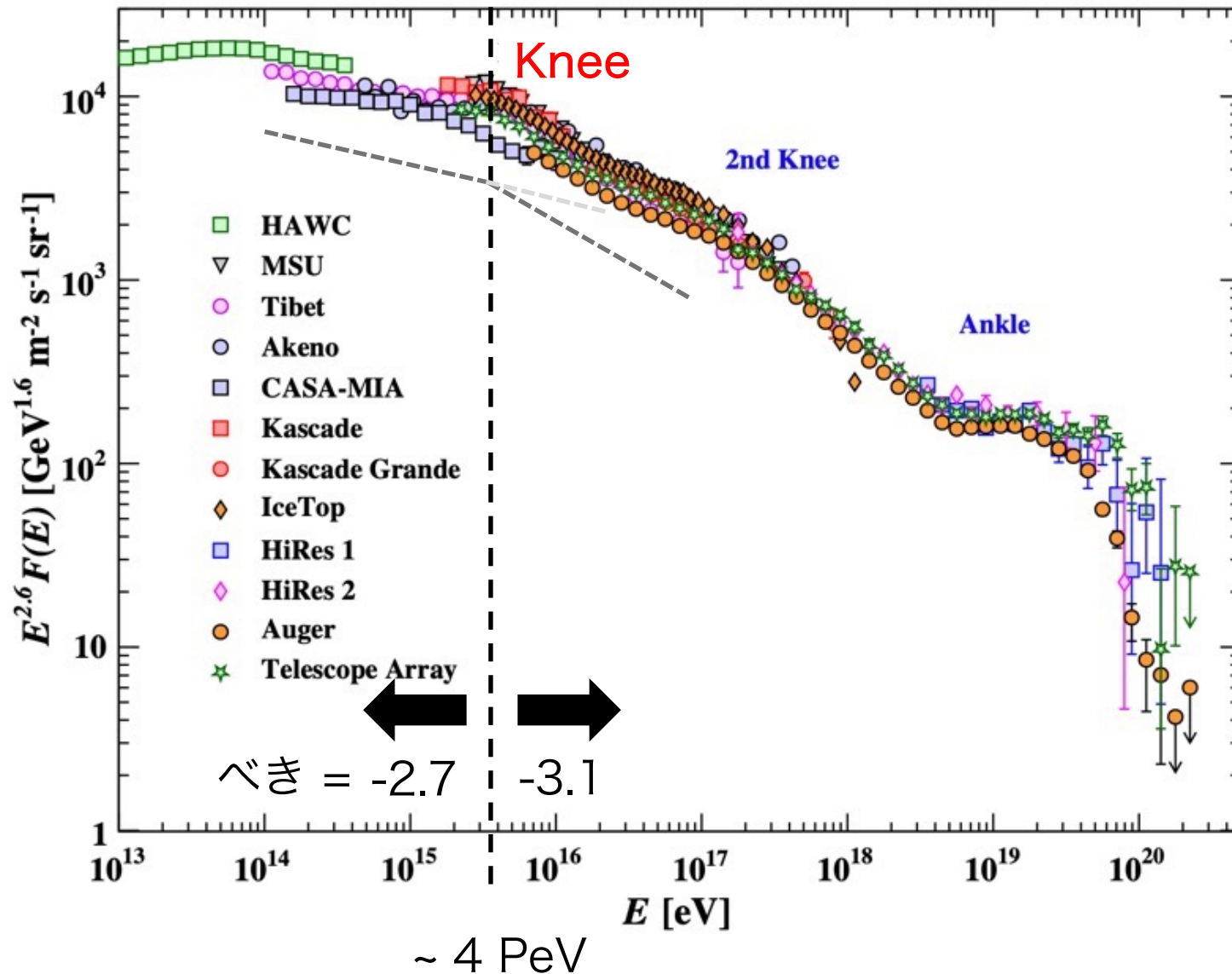


超高エネルギーガンマ線天文学のこれまでとこれから
地上にとどくPeV宇宙線の起源解明を目指して

加藤 勢 (東大 宇宙線研究所)

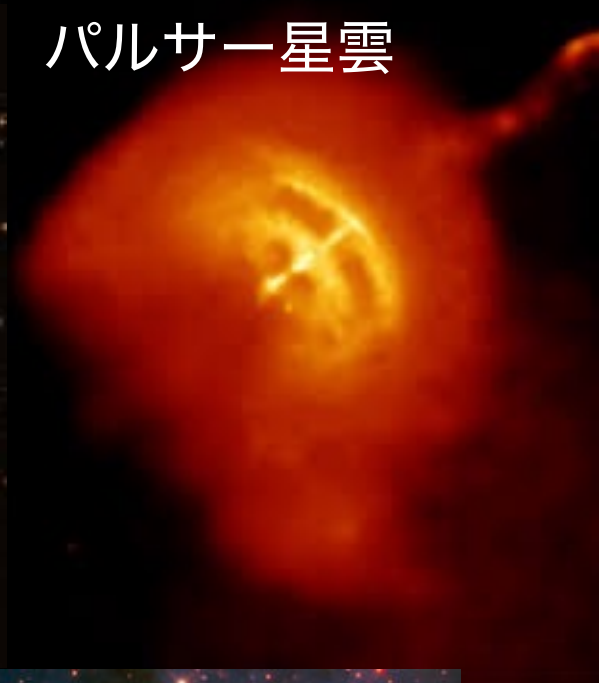
超高エネルギーガンマ線天文学の目的：Knee領域宇宙線(CR)の起源

地球で観測される宇宙線のエネルギースペクトル

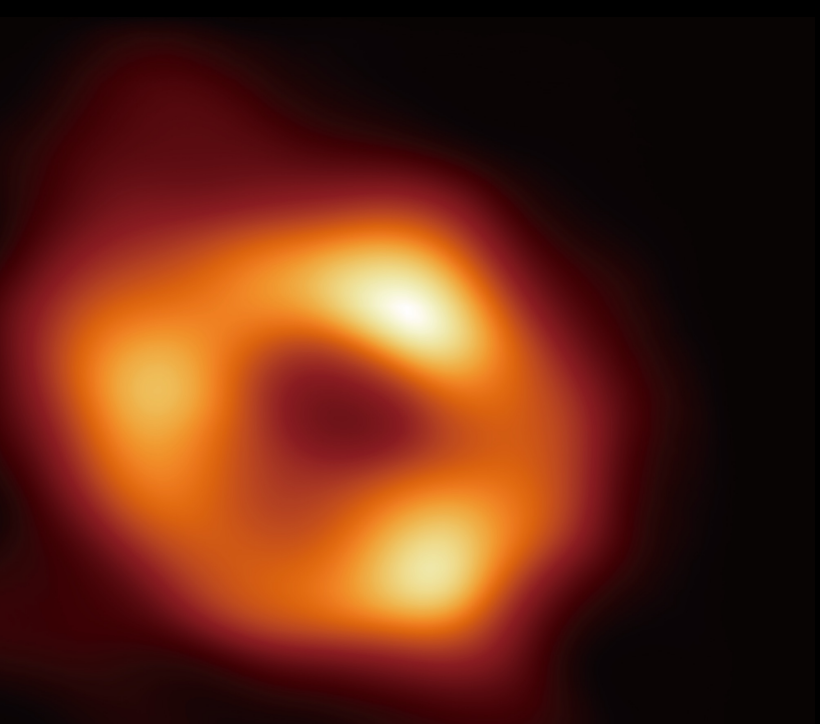


- ✓ 非熱的なスペクトルに見られる4 PeVの折れ曲がり：Knee
- ✓ Knee構造の起源は？
- ✓ 天の川銀河でのCR陽子の最大加速エネルギー？
- ✓ PeV CRの加速天体：PeVatronの探索

どんな天体がPeVatronか？

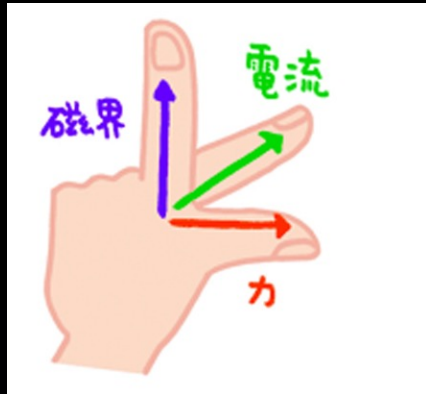


天の川中心のブラックホール



「これがPeVatron」というような天体種は明らかになっていない
具体的に有望なPeVatron候補天体はいくつか見つかっている (後で説明)

超高エネルギーガンマ線観測の意義



銀河磁場 ($\sim 3 \mu\text{G}$)

CRの描く軌道

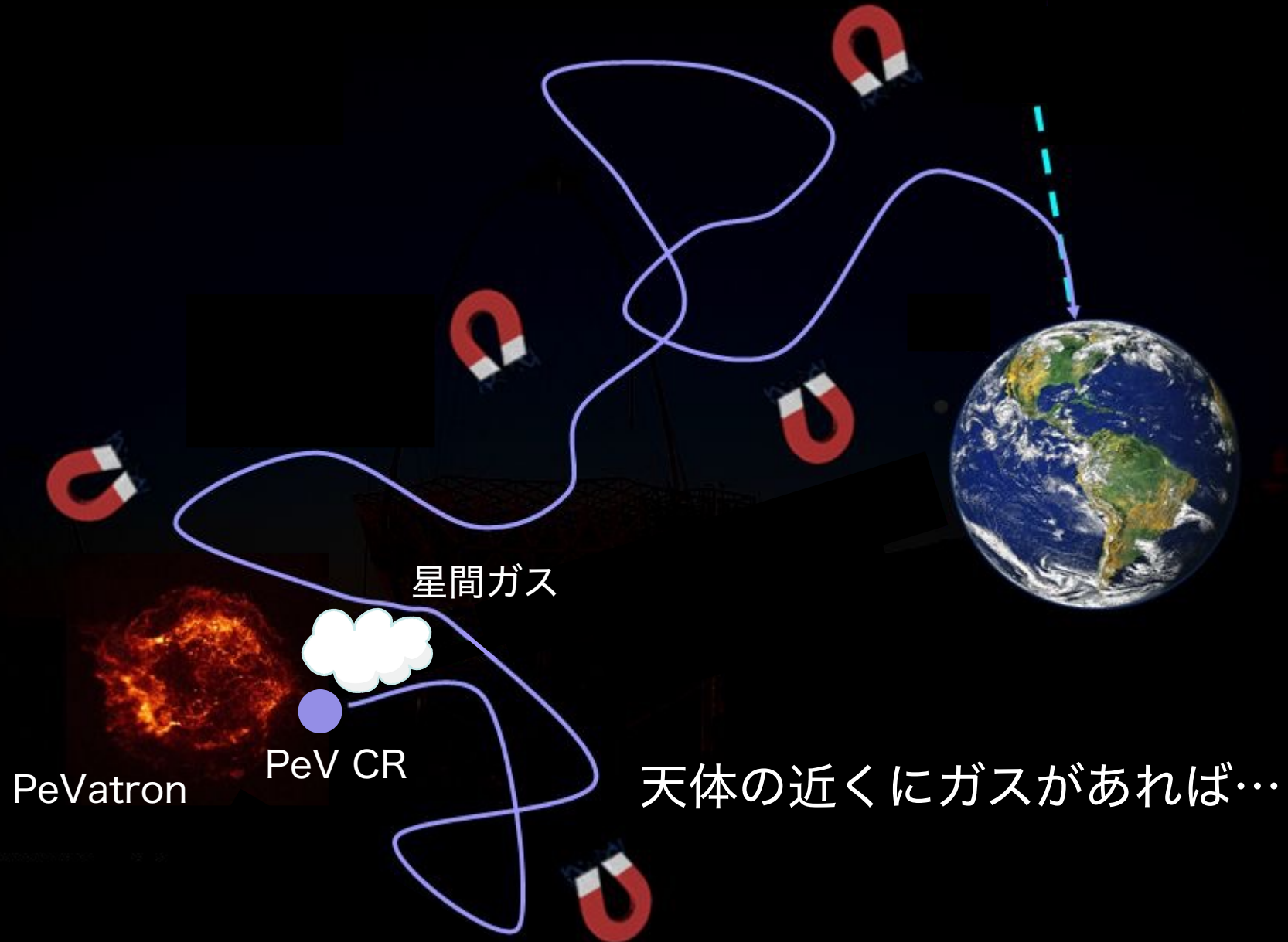
CRのみかけの
到来方向

PeVatron

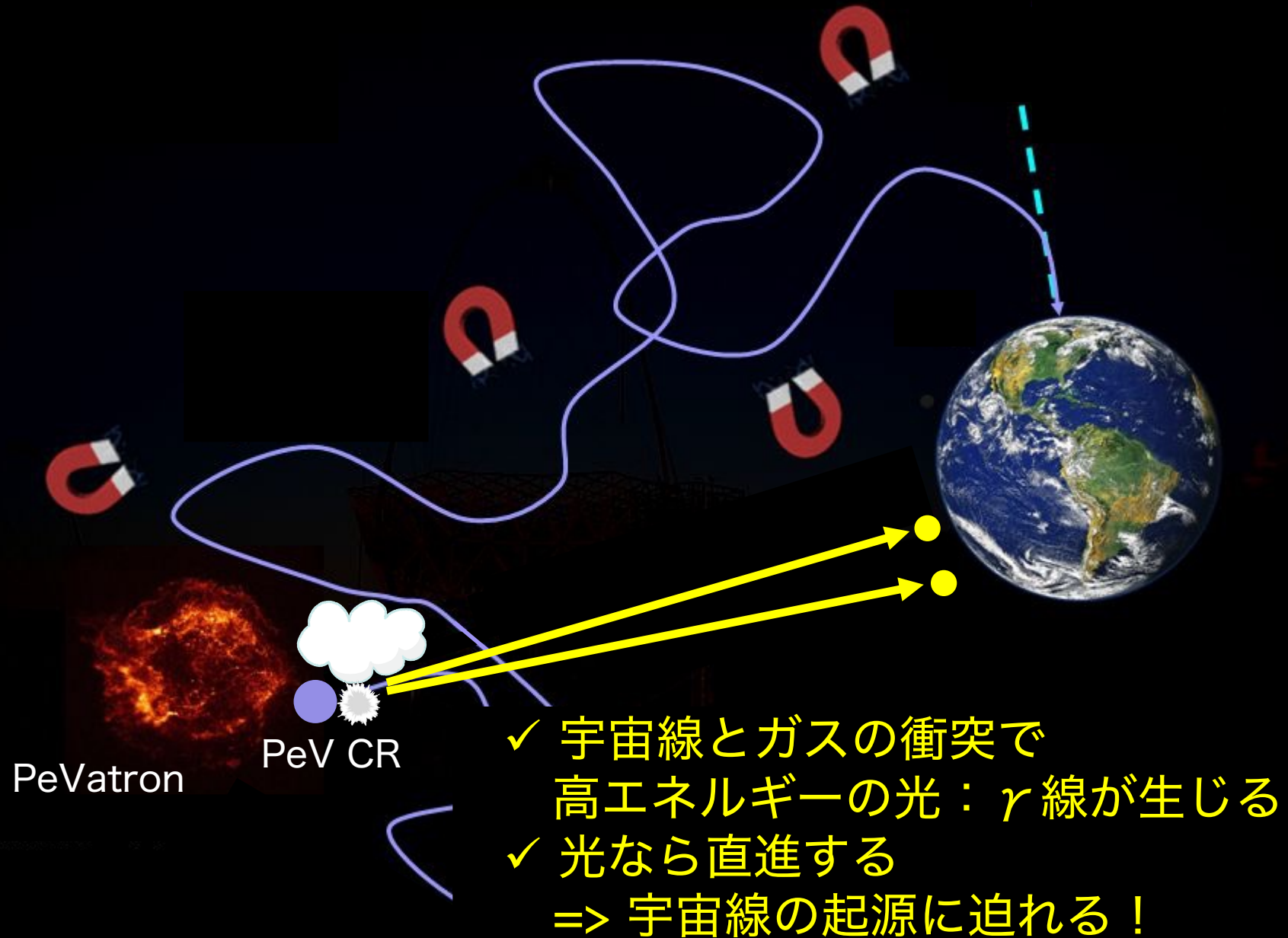
PeV CR

CRの到来方向を見ても
故郷の天体があるとは限らない

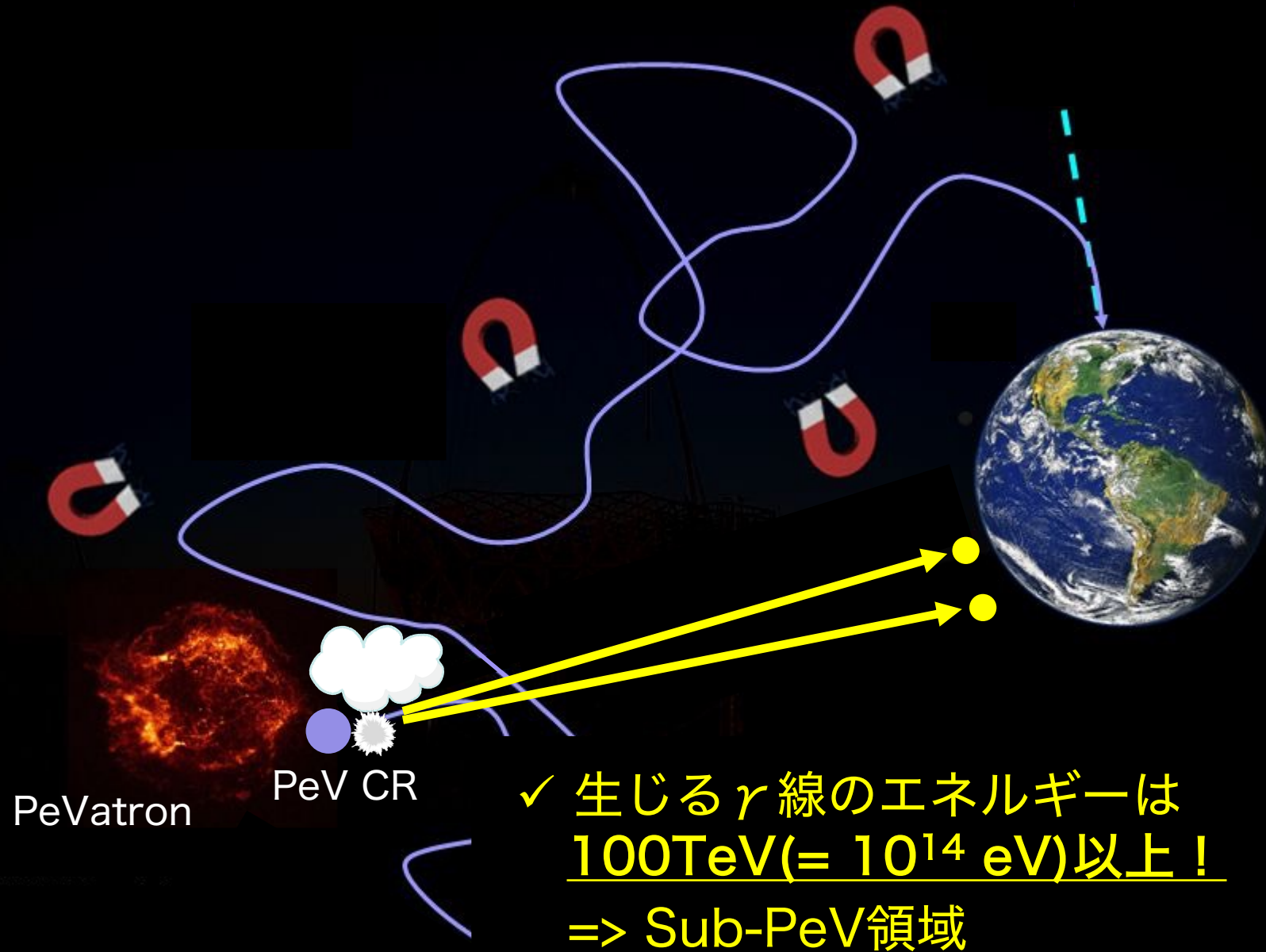
超高エネルギーガンマ線観測の意義



超高エネルギーガンマ線観測の意義

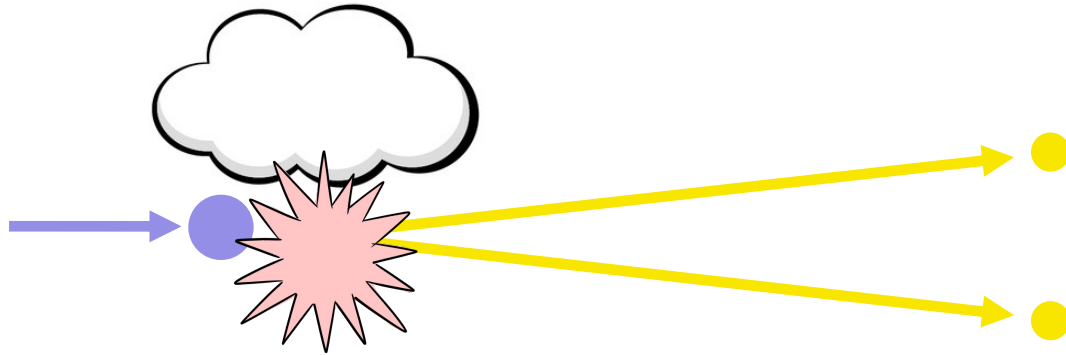


超高エネルギーガンマ線観測の意義



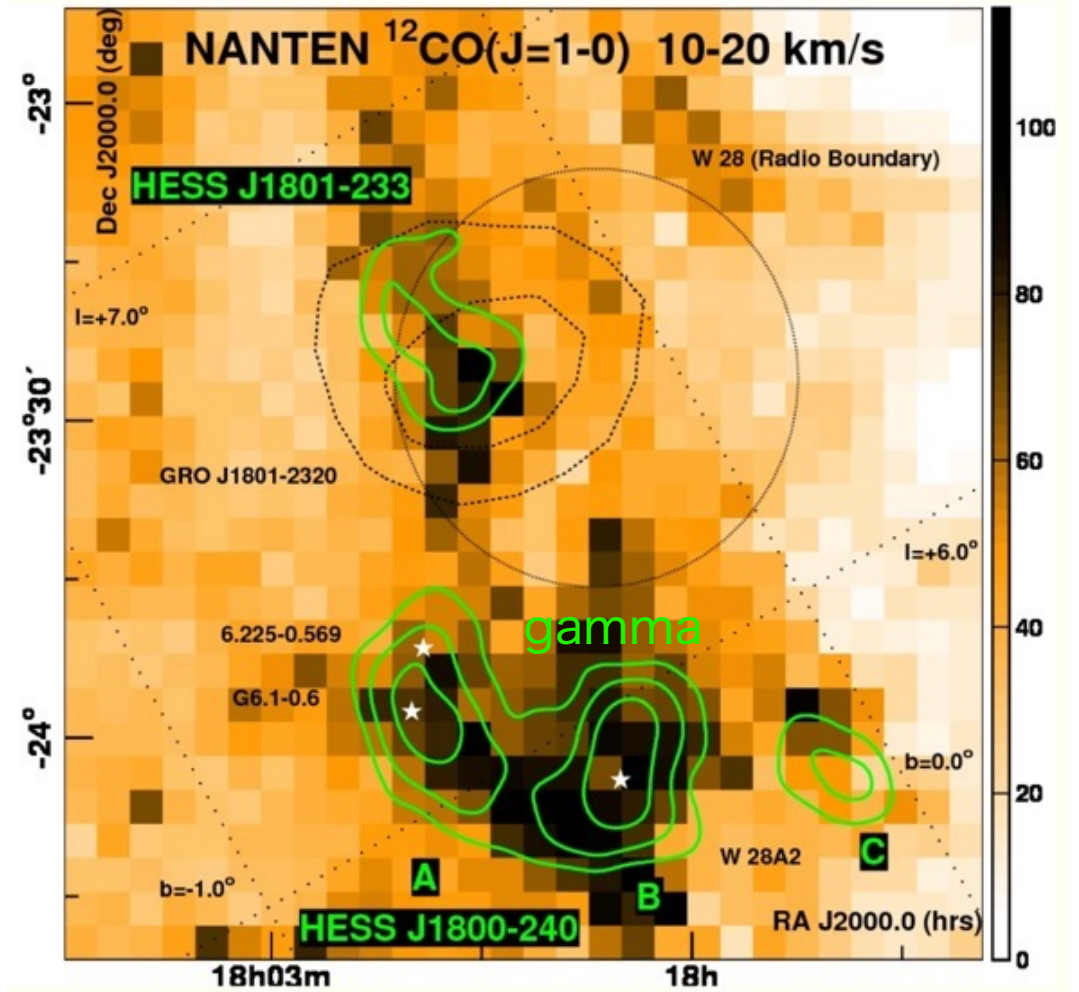
宇宙線が γ 線を作るプロセス

1. 宇宙線とガスの衝突



必要条件： γ 線の到来方向の先にガスがある
星間ガスと関連した γ 線放射分布が見られる

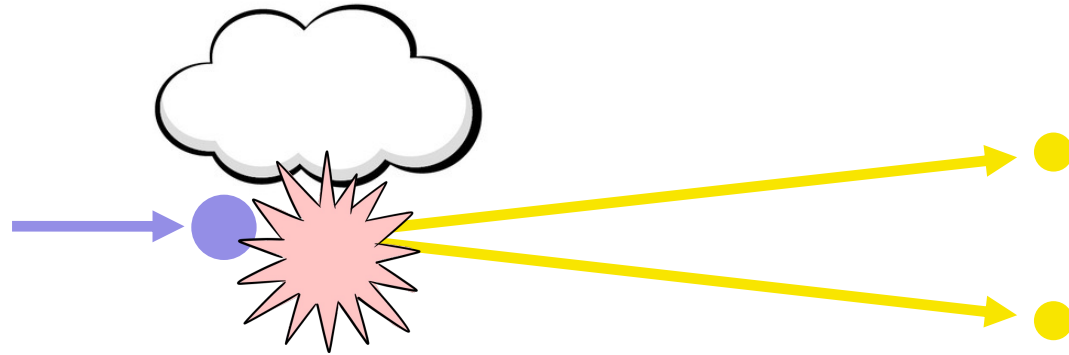
H.E.S.S.がみたW28 ($E > 300$ GeV)



Aharonian+, A&A 481, 401 (2008)

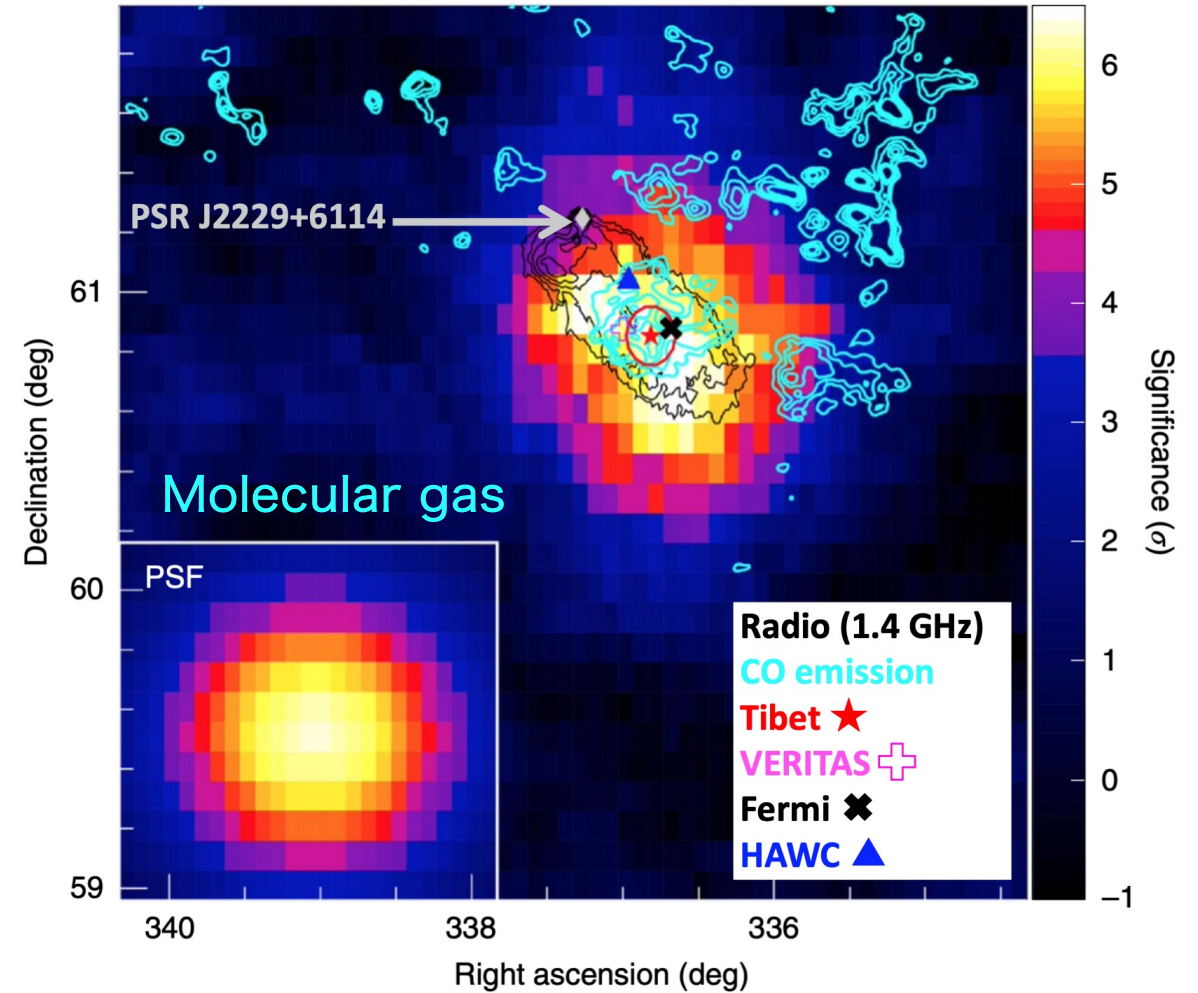
宇宙線が γ 線を作るプロセス

1. 宇宙線 ● と ガス の衝突



必要条件： γ 線の到来方向の先にガスがある
星間ガスと相関した γ 線放射分布が見られる

チベット実験がみたSNR G106.3+2.7 ($E > 10$ TeV)

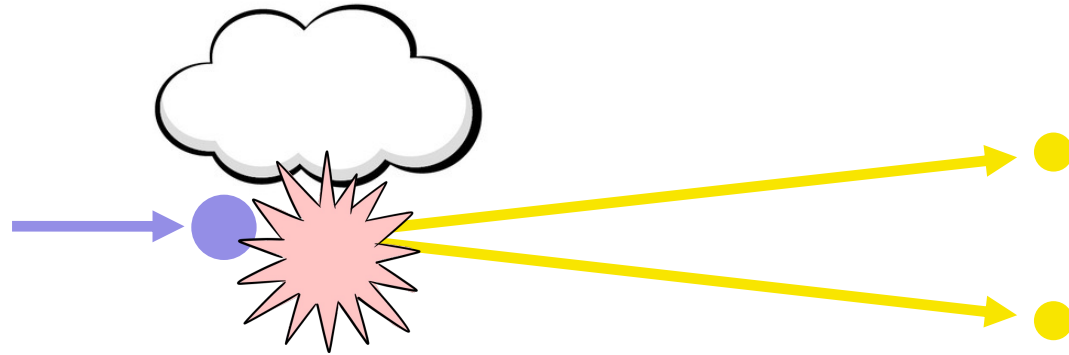


Amenomori+, Nat. Astron. Lett (2021)

宇宙線起源の γ 線と電子起源の γ 線

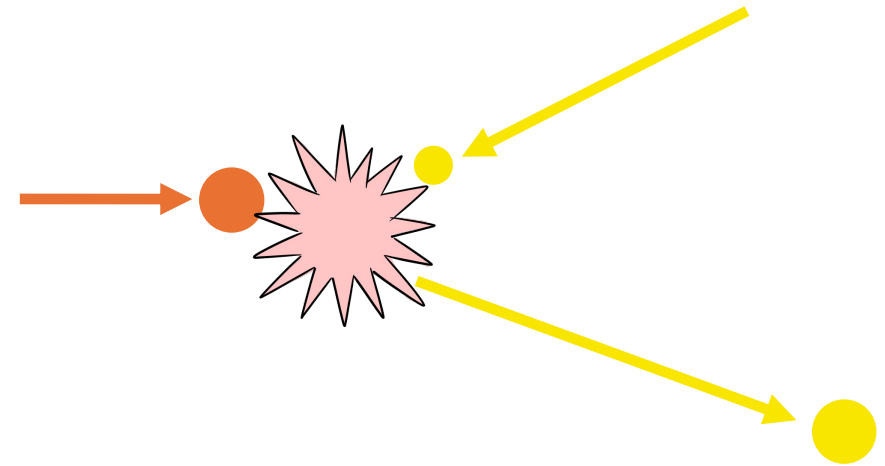
宇宙で高エネルギー γ 線を生み出すプロセス：

1. 宇宙線 ● と ガス の衝突



γ 線の到来方向の先に ガス がある

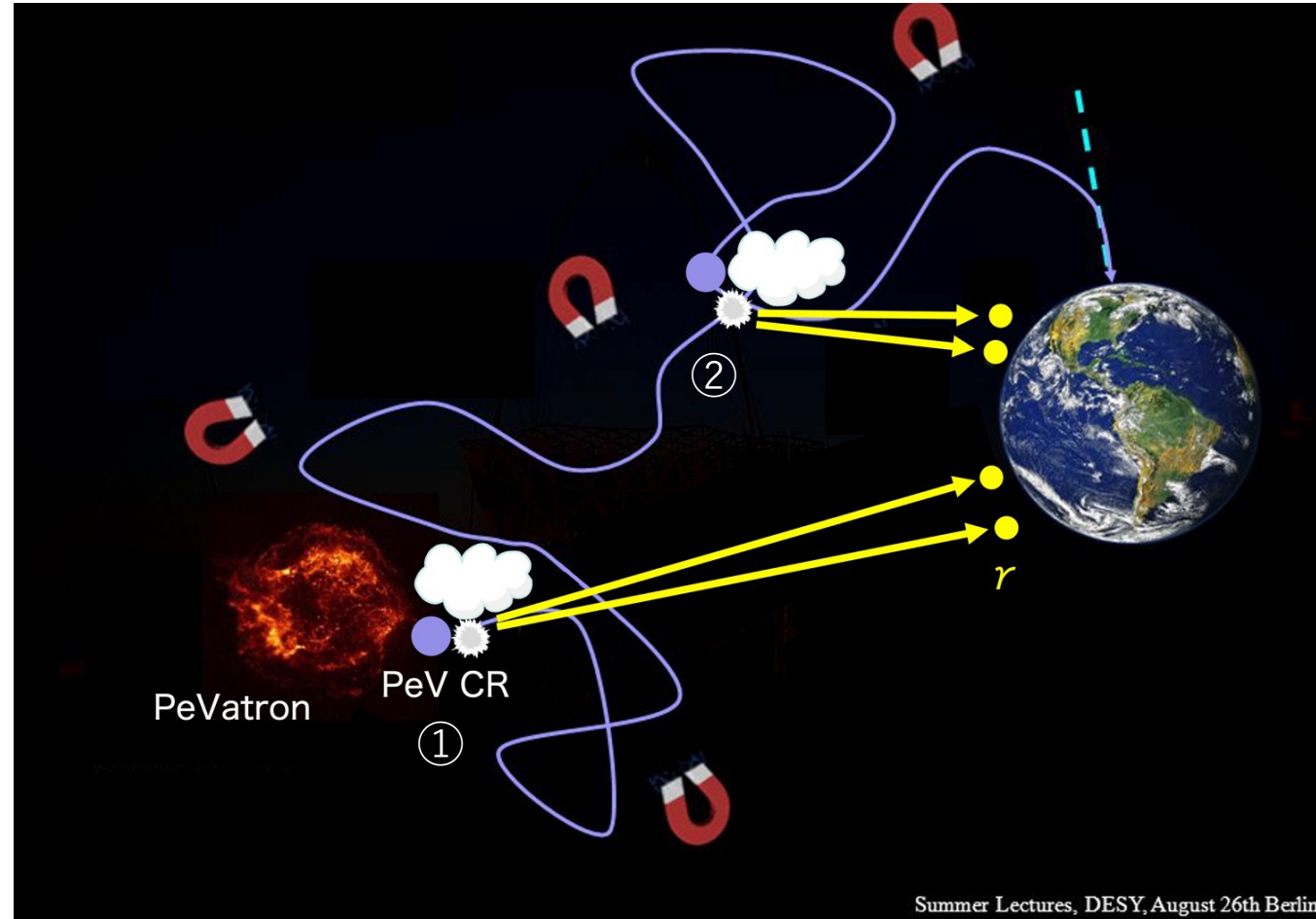
2. 電子 ● と 光 の衝突



γ 線の到来方向の先に 放射場 がある

✓ 宇宙線も電子も, Sub-PeV γ 線を生み出すことができる

Sub-PeVガンマ線天文学でわかること



① Sub-PeV γ 線天体の観測 => PeVatronの特定

Sub-PeV γ 線天体の高空間分解能観測 => HE粒子加速過程・逃走過程の解明

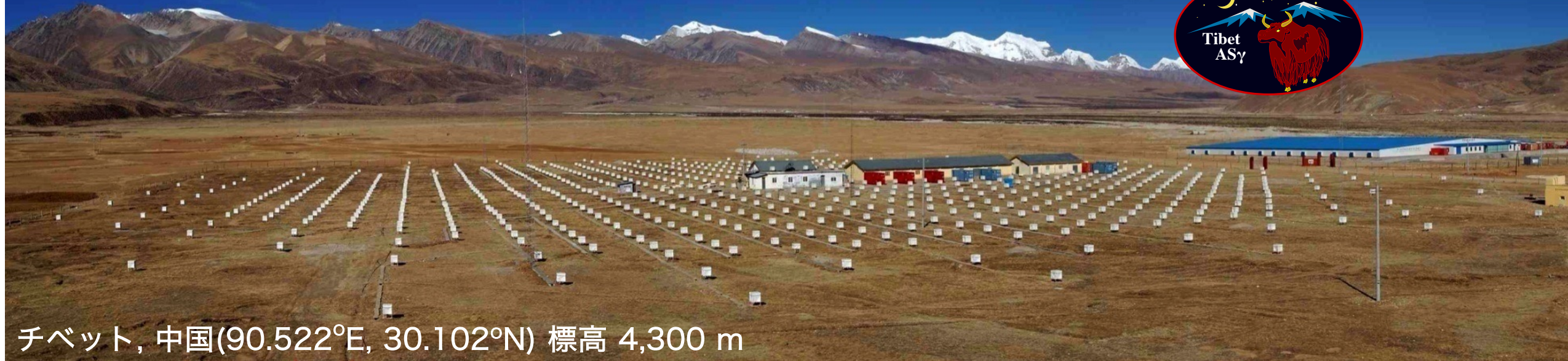
② 天の川銀河面に沿った広がったガンマ線の観測 => 天の川銀河内のPeV CRの伝播過程の解明

PeV CRの生まれから我々の地球に到達するまでの一部始終を明らかにすることが可能 11

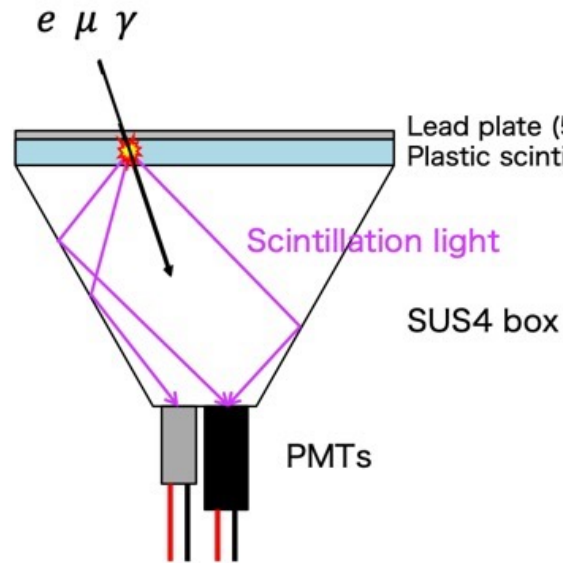
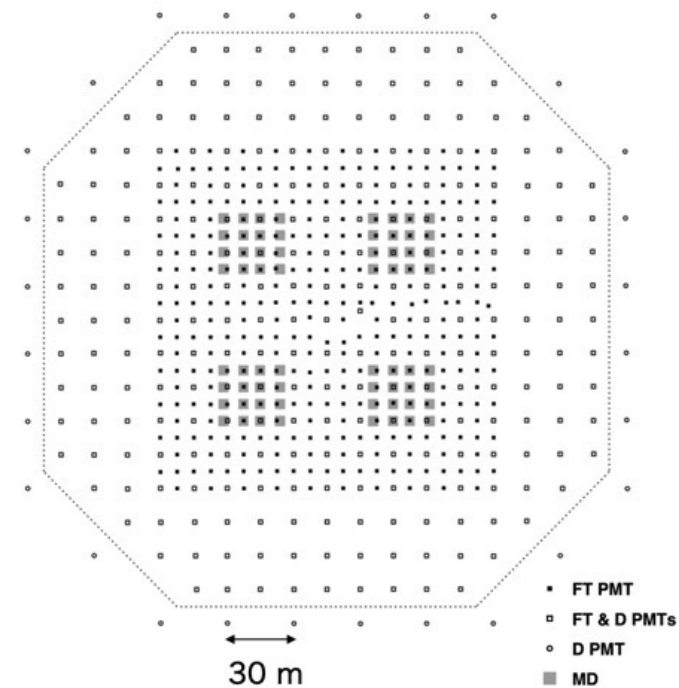
チベット実験

北半球でのSub-PeV γ 線観測実験

チベット空気シャワーアレイ

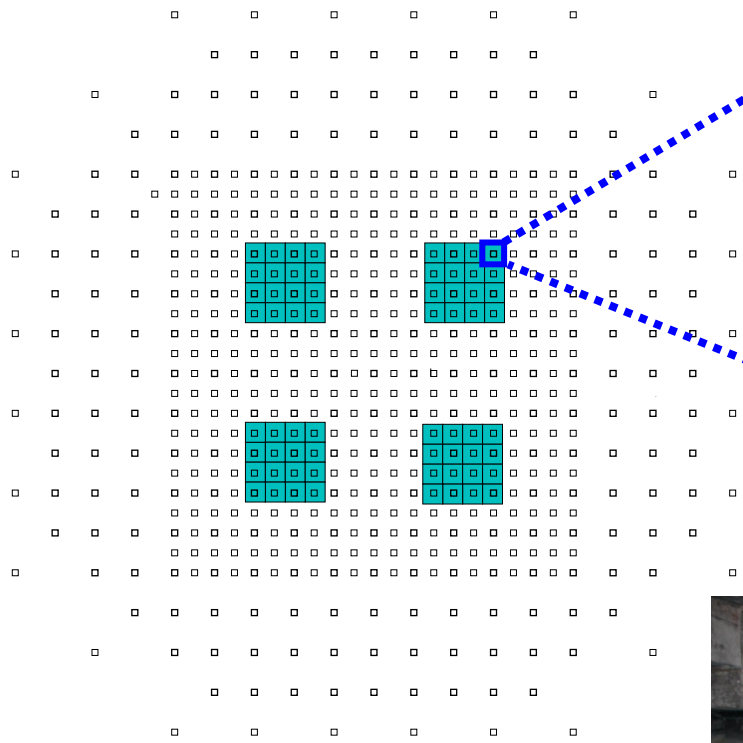


チベット, 中国(90.522°E, 30.102°N) 標高 4,300 m

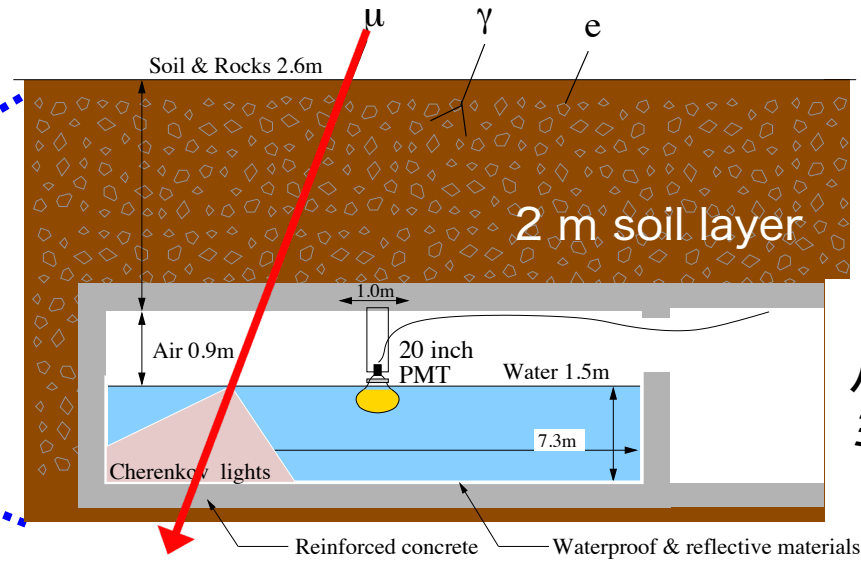


- ✓ 1990年から30年以上稼働
- ✓ 検出器を65,700m²に展開
- ✓ 空気シャワー観測でエネルギー・到来方向を決定
- ✓ 2 srの広い視野 & >90%の高い稼働率
- ✓ Sub-PeV γ 線に対する角度分解能：0.2°
- ✓ Sub-PeV γ 線に対するエネルギー分解能：20%

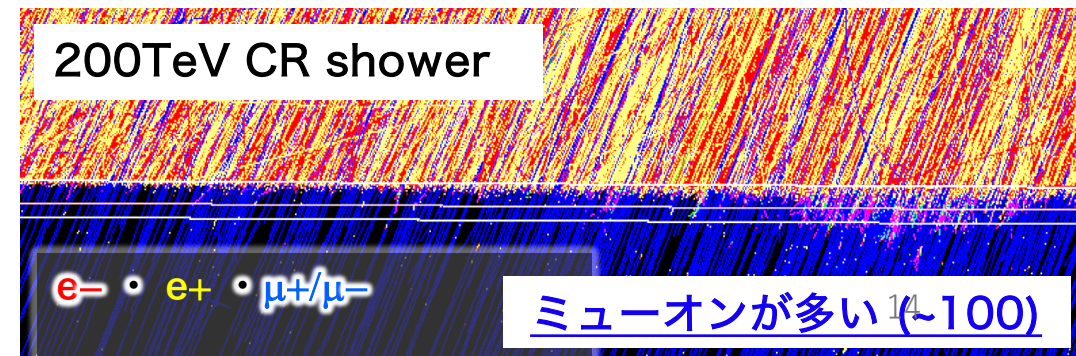
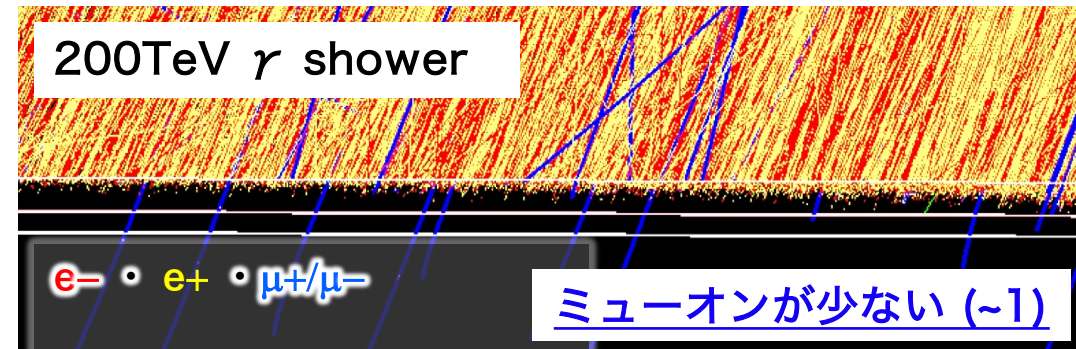
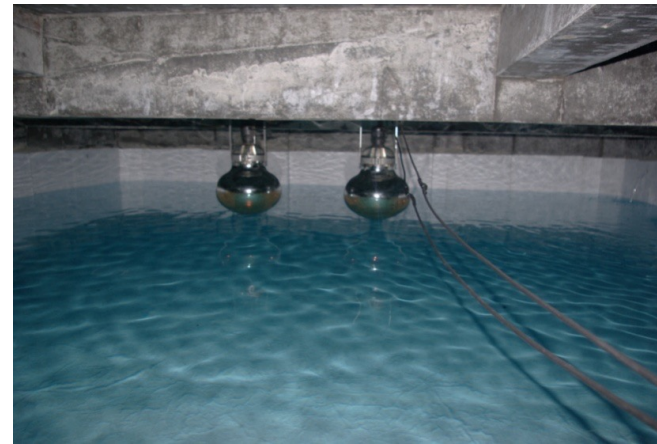
地下のミュオン検出器を用いたノイズ宇宙線の除去(2014~)



- : 地表検出器
- : 地下ミュオン検出器



ハドロン相互作用から生じる
ミュオンを観測



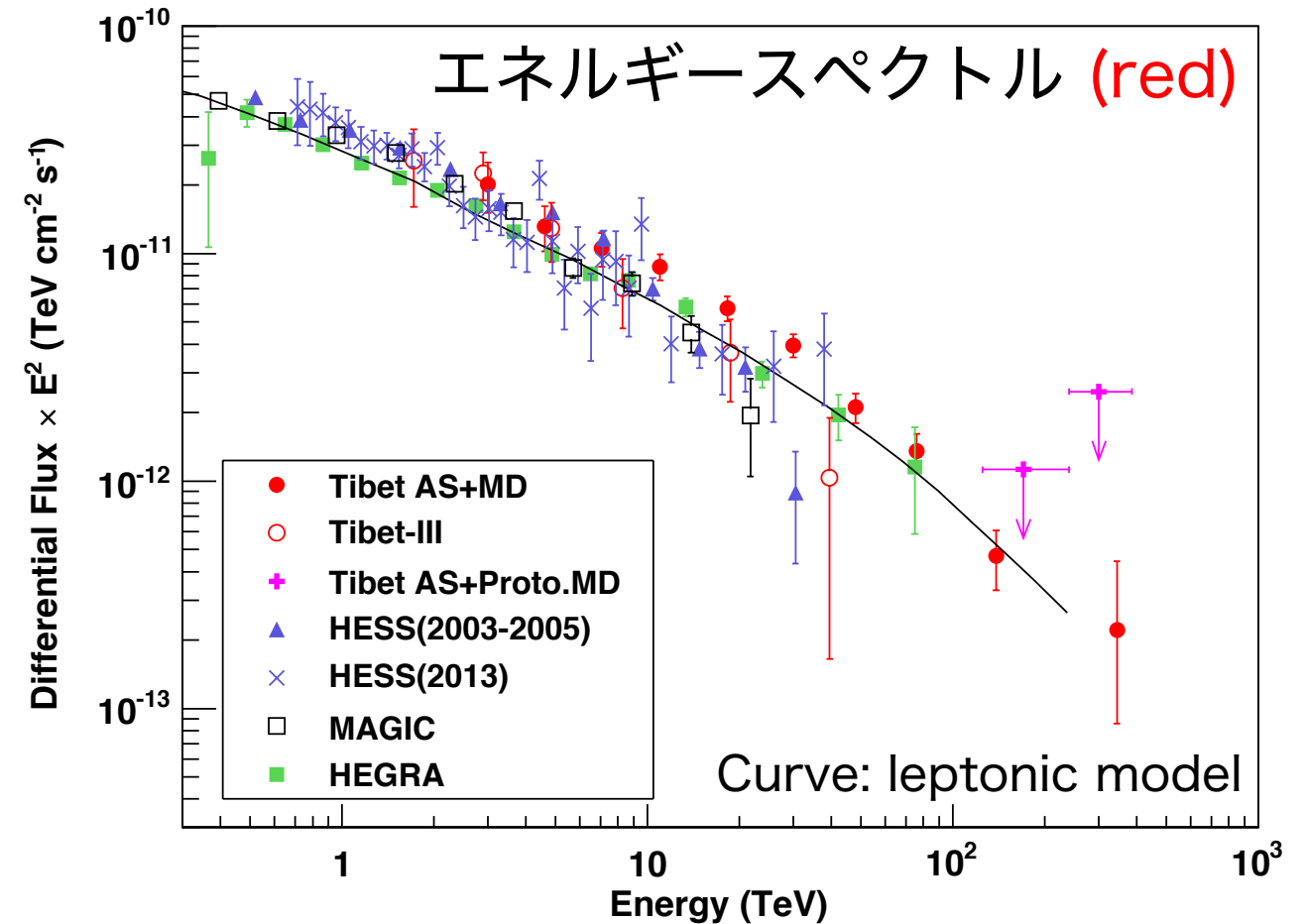
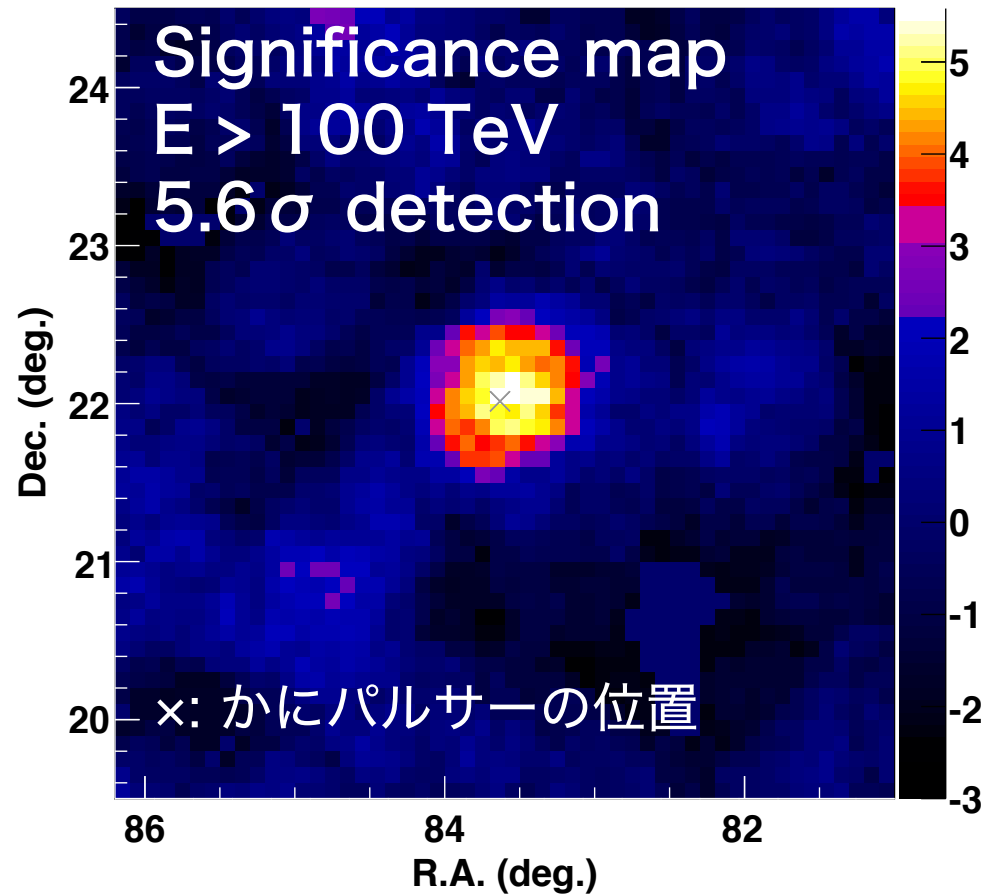
ノイズ宇宙線の数を0.1%以下に低減
 γ 線に対する感度を10倍以上向上

Sub-PeV γ 線天文学でこれまでにわかったこと

チベット実験の結果を中心に

Sub-PeV γ 線(天体)は確かに存在する！

かに星雲からのsub-PeV γ 線の初検出 (Amenomori et al., PRL 123, 051105, 2019)



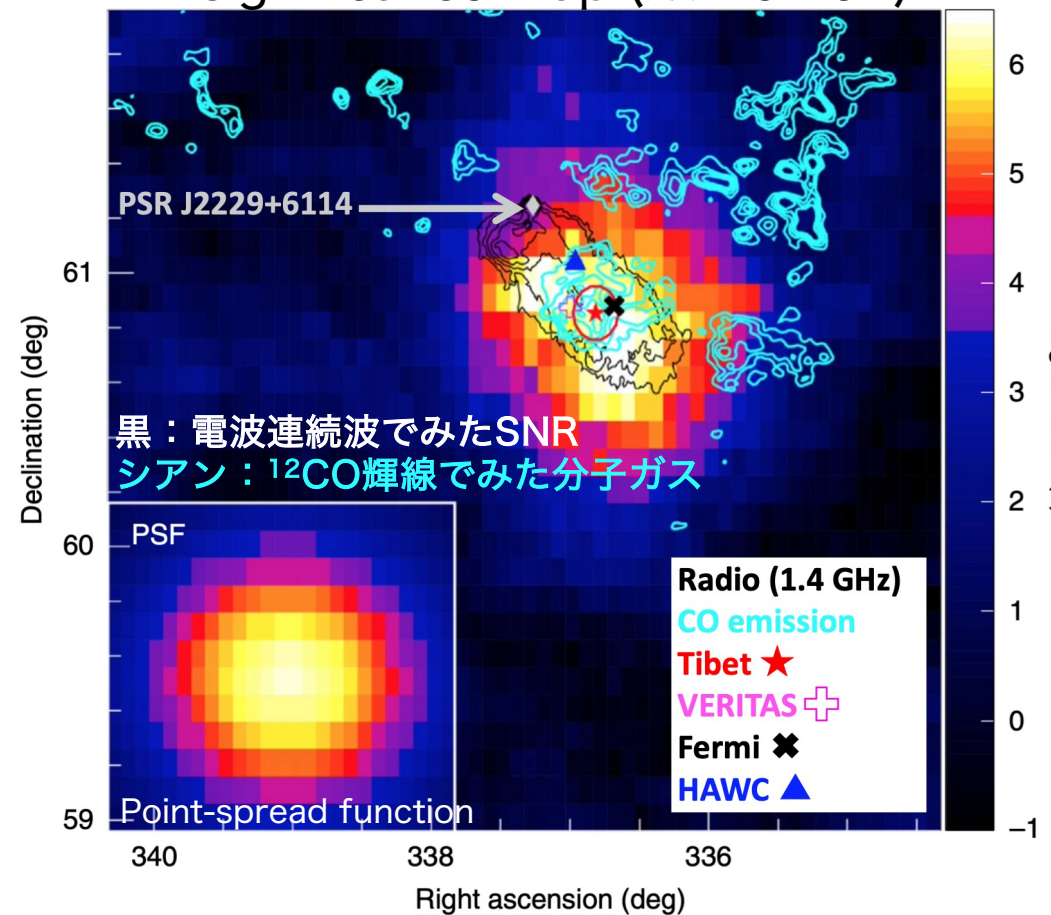
- ✓ γ 線の最高エネルギーは450TeVに到達※
- ✓ かに星雲で加速されたHE電子による, CMBの逆コンプトン散乱で説明可能

※現在はLHAASO実験により $E > 1$ PeVの γ 線が検出されている (Science 373, 425, 2021)

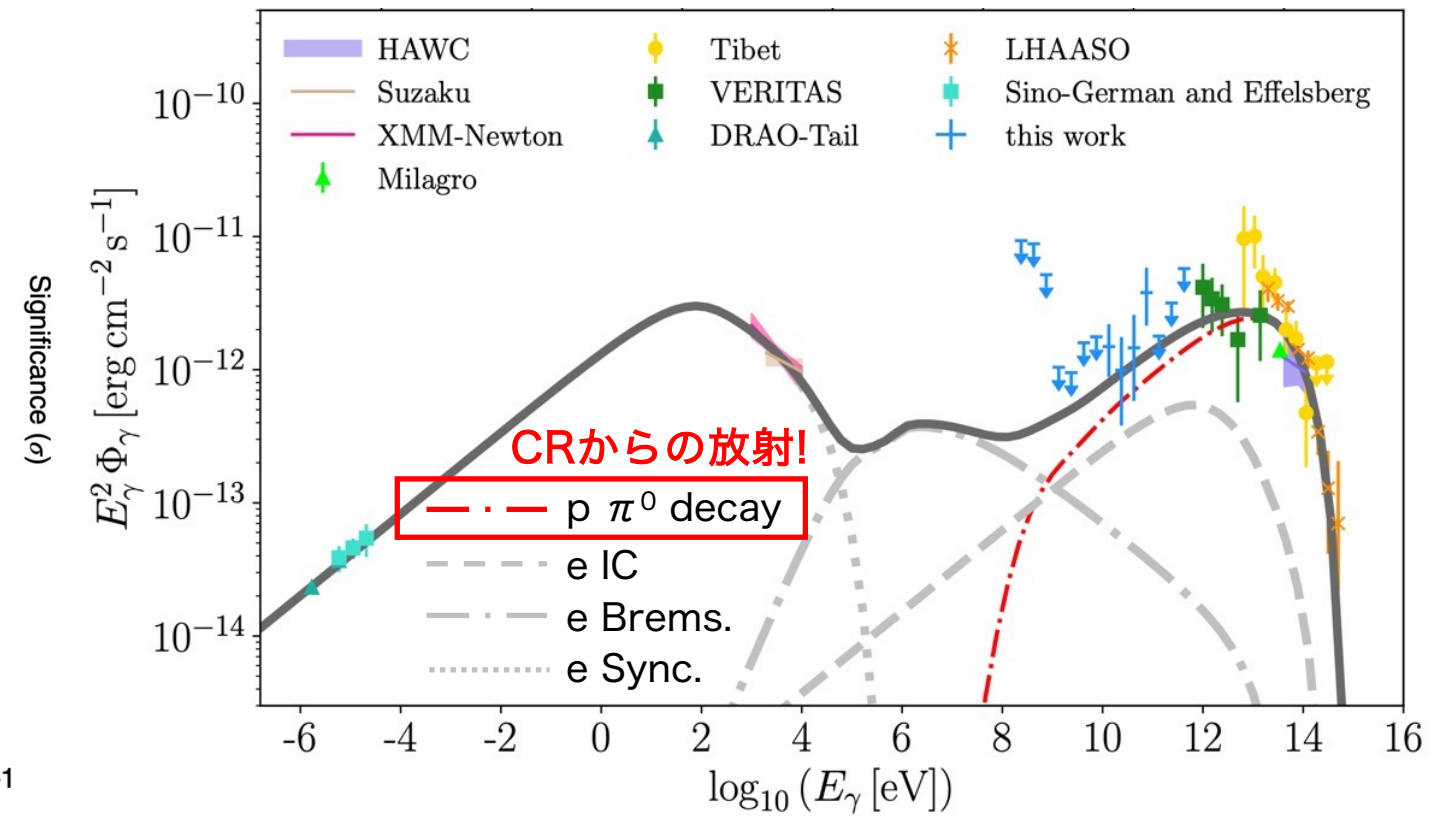
超新星残骸(SNR)G106.3+2.7が有望なPeVatron候補天体だとわかる

M. Amenomori et al., Nat. Astron. Lett, 5, 460 (2021)

SNR G106.3+2.7からの γ 線の
significance map ($E > 10$ TeV)



多波長スペクトルのモデル※



✓ 分子雲と空間的によく一致した γ 線放射

※Fang+, PRL 129, 071101 (2022)

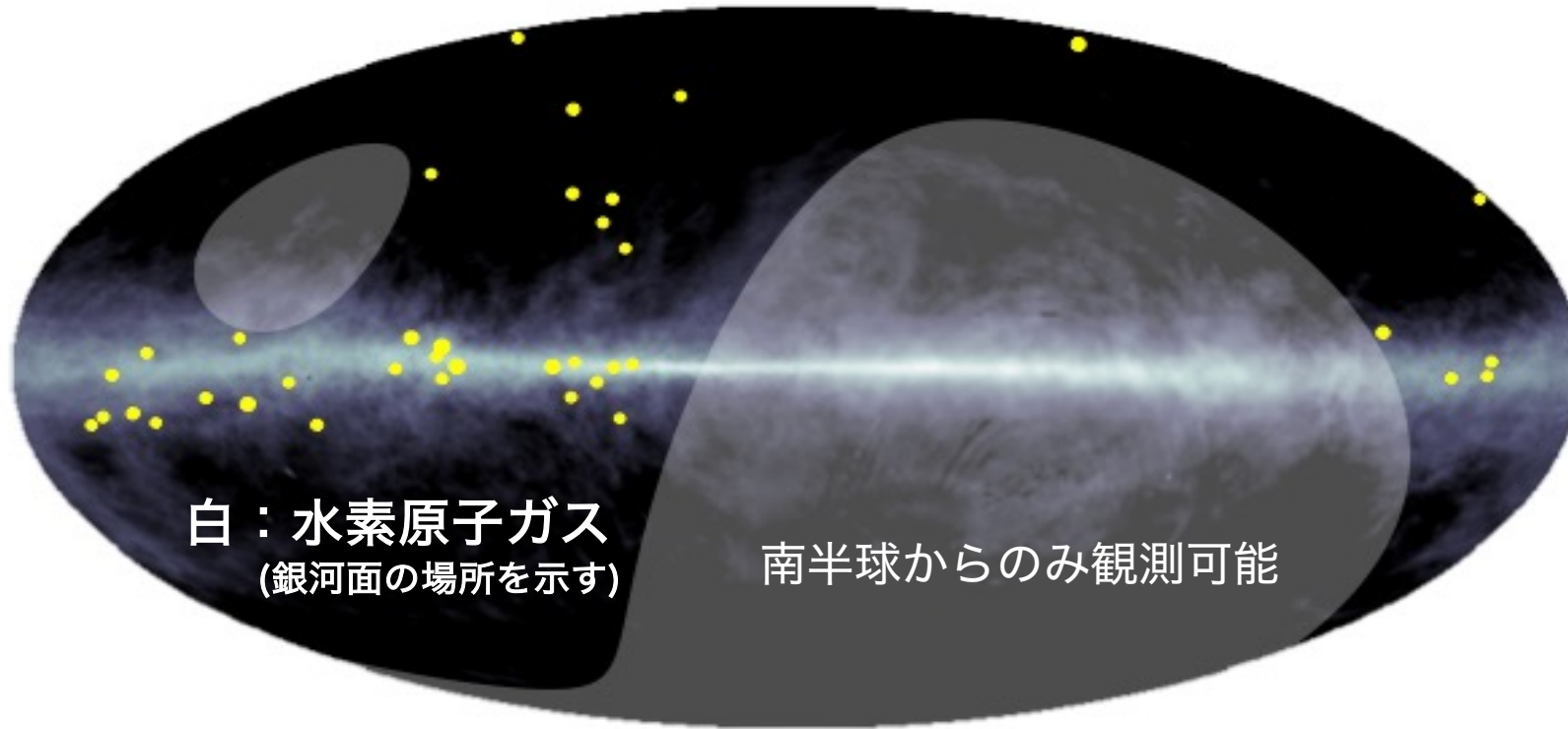
✓ CR陽子の最大加速エネルギーは約500 TeV. 後の研究は1 PeVと明らかにした※

最も有望なPeVatron候補天体のひとつ

天の川銀河内にPeVatronは存在する！

天の川銀河Sub-PeV拡散 γ 線の初検出 (Amenomori+., PRL 126, 141101, 2021)

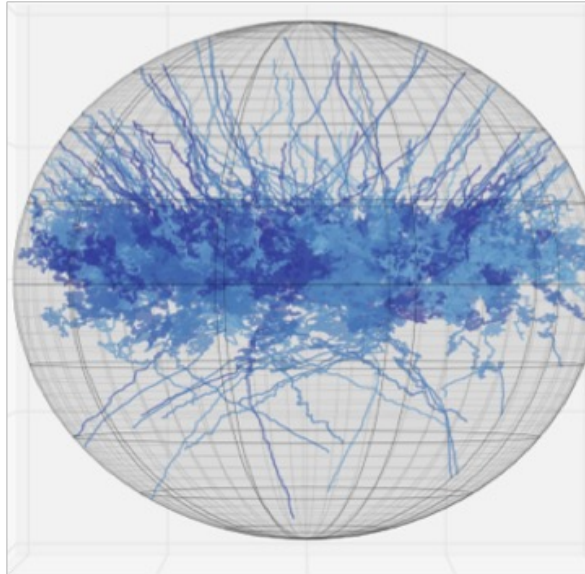
拡散 γ 線($E > 400$ TeV)の到来方向分布 (銀河座標)



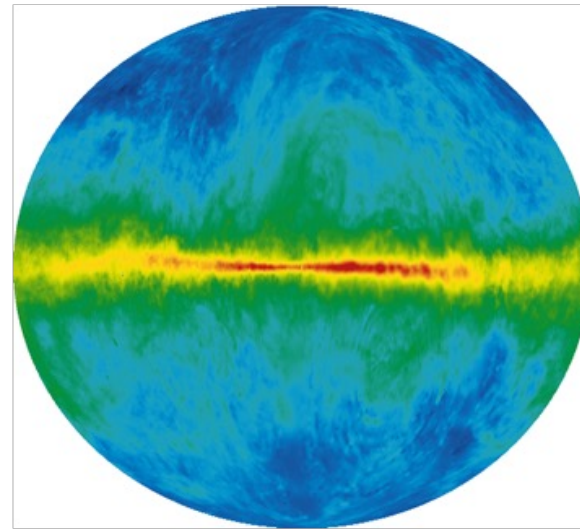
- ✓ 天の川銀河面に沿って分布 \Rightarrow 天の川銀河内の天体を起源にもつ
- ✓ 既知のTeV γ 線天体からきていない \Rightarrow CR由来の γ 線
(電子だとシンクロトロン冷却のため, 天体から離れたところで γ 線を放射するのは困難)
- ✓ γ 線の最大エネルギーは957 TeV

ほかに拡散 γ 線観測が明らかにできること

宇宙空間中のCRの伝播

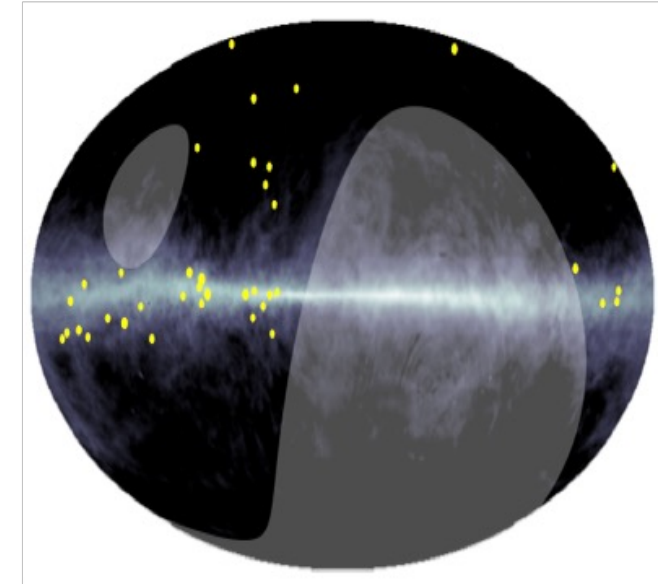


星間ガス



Radio (21cm) HI Map
Hartmann et al. (1997)
Dickey & Lockman (1990)

拡散ガンマ線

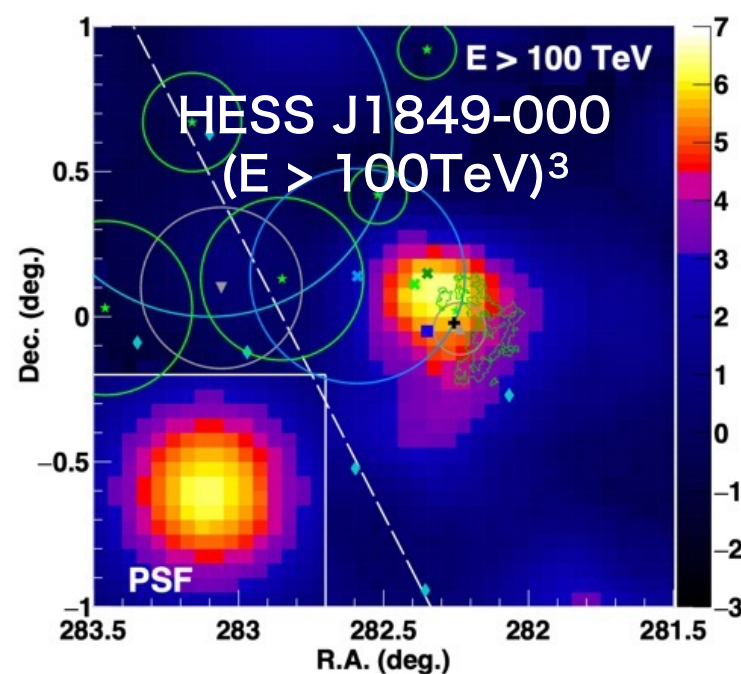
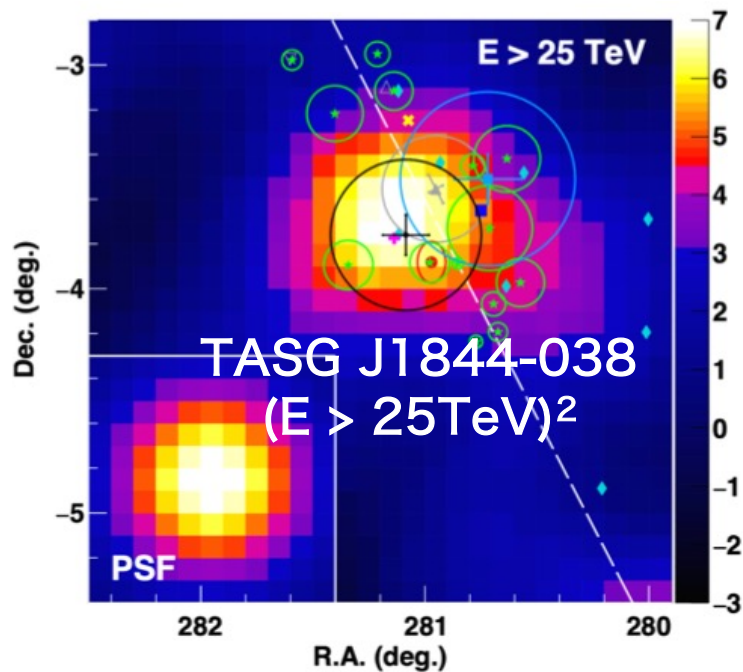
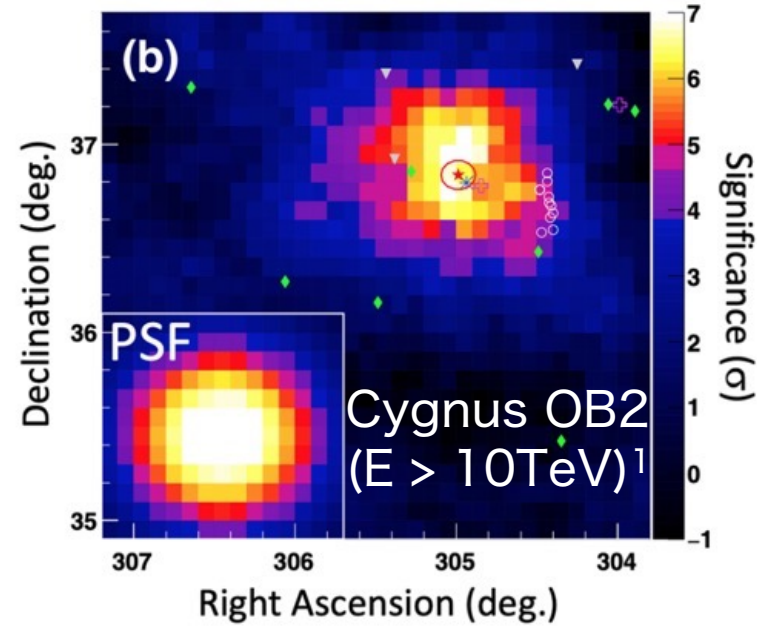
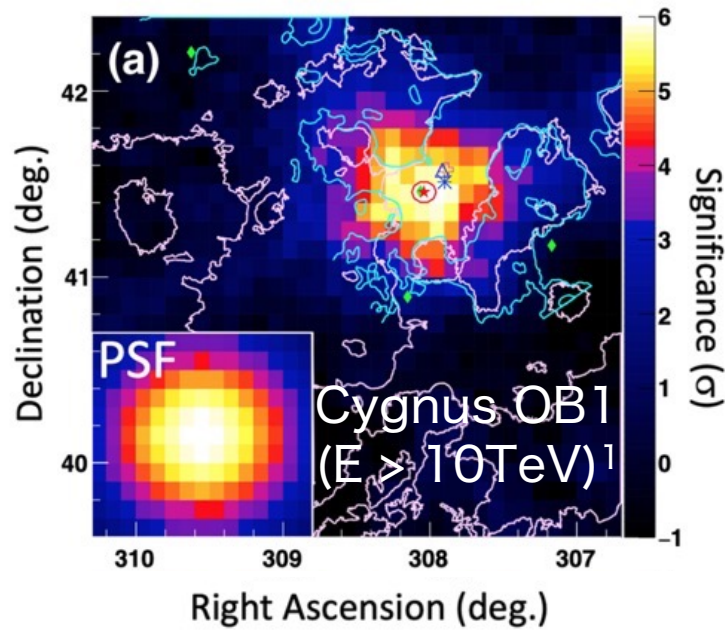


Amenomori+, PRL (2021)

Figure from slide presented by A. Kääpä (Bergische Universität Wuppertal) at CRA2019 workshop

- ✓ 拡散 γ 線観測はCRの伝播の物理を探る上で重要
- ✓ 宇宙線の伝播(拡散係数)が, 天の川銀河内で一様? 非一様?
チベット(北半球)の観測のみではわからない. **南半球の観測が必要**

他にもSub-PeV γ 線を放射する天体が存在する



TASG J1844-038, HESS J1849-000は
PeVatron候補天体^{2,3}

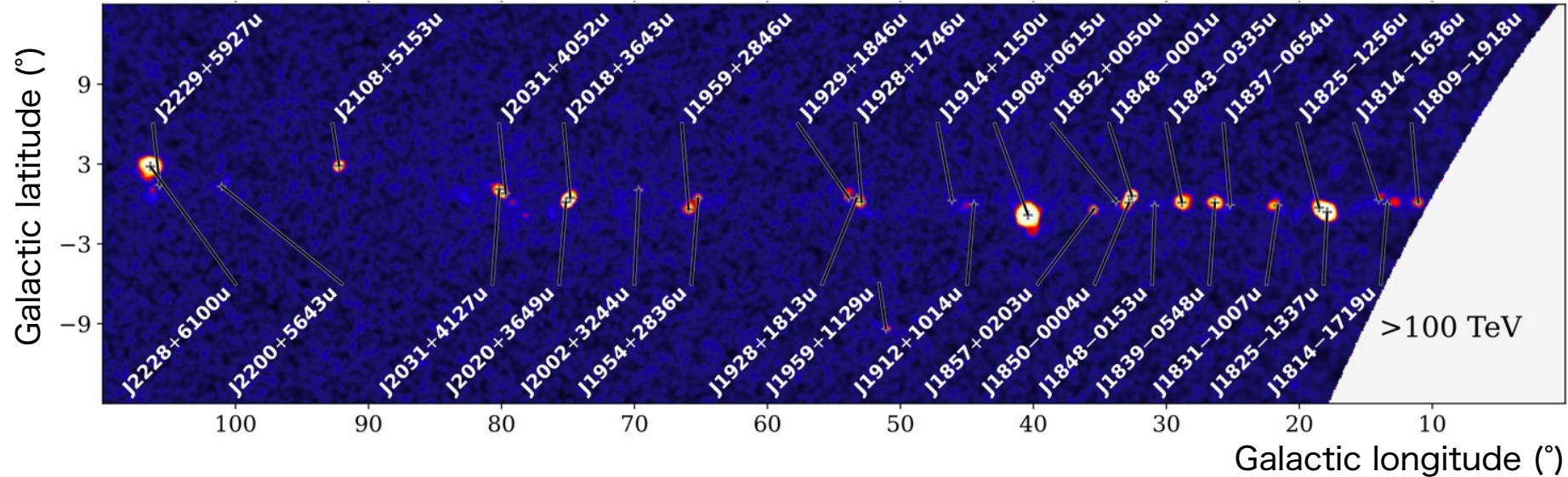
1. Amenomori et al., PRL 127, 031102 (2021)
2. Amenomori, ..., Kato et al., ApJ 932, 120 (2022)
3. Amenomori, ..., Kato et al., ApJ 954, 200 (2023)

これまでにわかったこと

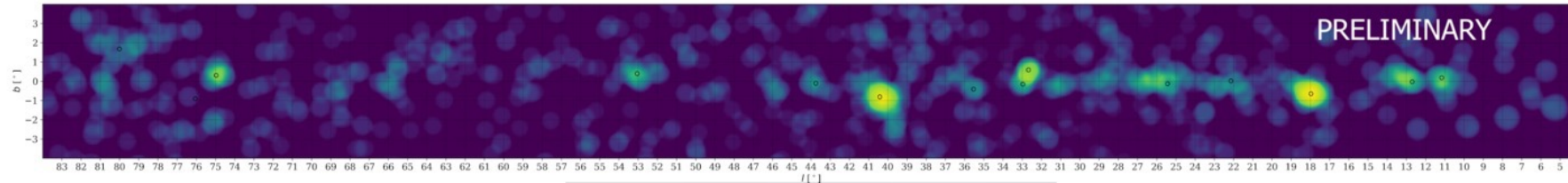
LHAASO・HAWC実験による結果を少し

Sub-PeV γ 線天体が続々とみつかると

LHAASO実験で見た天の川銀河面 ($E > 100$ TeV, 計43天体)¹



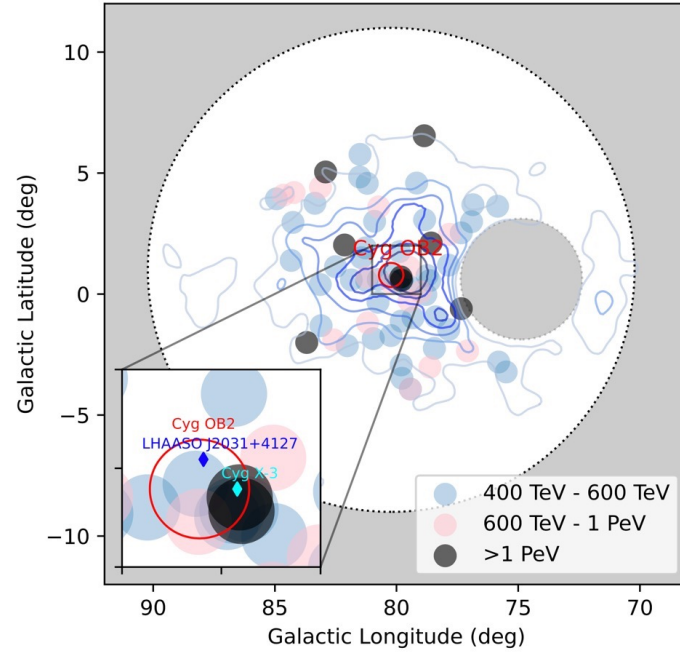
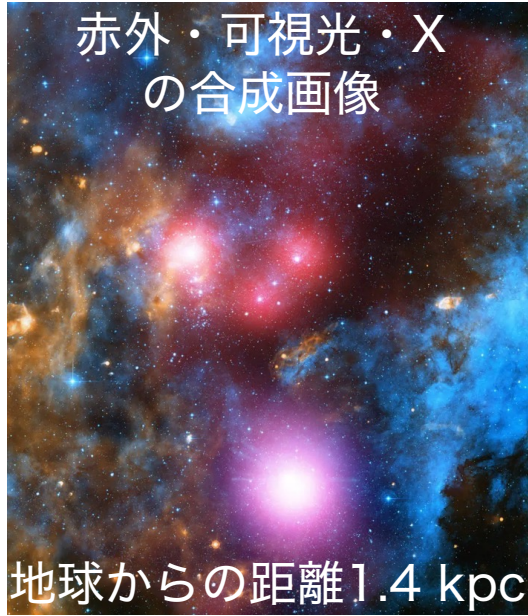
HAWCで見た天の川銀河面 ($E > 100$ TeV)²



- ✓ 現在までにsub-PeV領域で検出されたカタログ天体は40数天体
- ! そのうちどれがPeVatronかは、あまりわかっていない。個々の天体の詳細な研究が必要

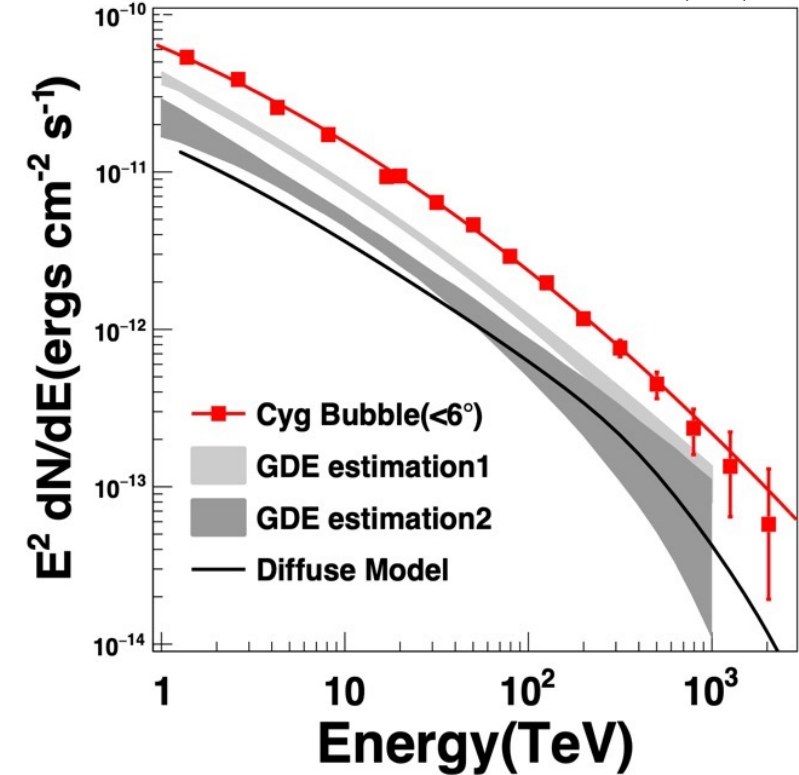
1. Cao et al, ApJS 271, 25 (2024)
2. Malone et al., ICRC2023, 698 (2023)

Cygnus OB2 (星形成領域) : 有望なPeVatron候補天体(by LHAASO)

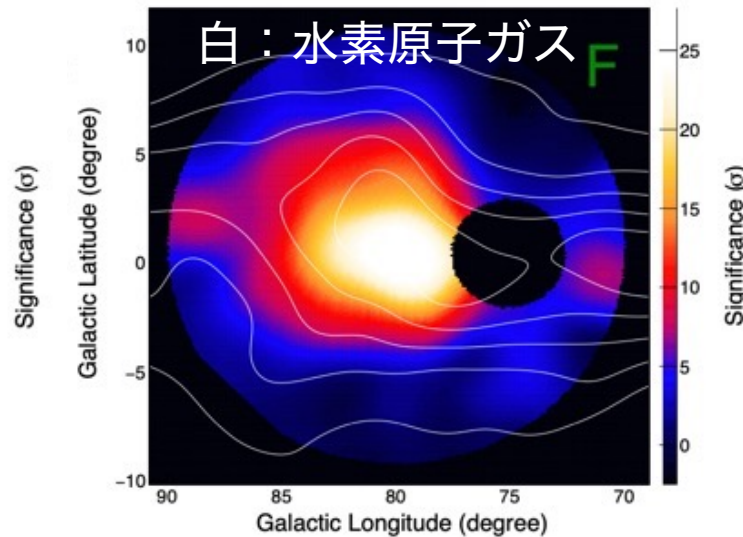
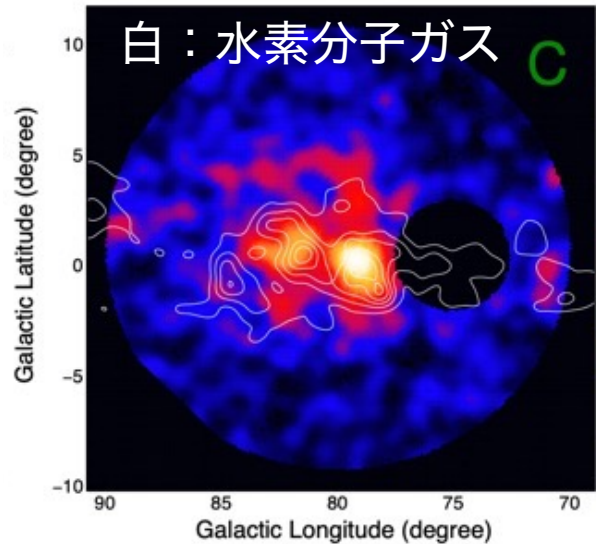


$E > 400 \text{ TeV}$ γ 線がCyg. OB2領域に集中)
 \Leftarrow Cyg. OB2がHE粒子の起源

エネルギースペクトル(赤)



Sub-PeV γ 線のsignificance mapと星間ガスの分布の比較



- ✓ Sub-PeV γ 線放射が星間ガス分布と良い相関
 \Rightarrow ハドロン相互作用起源を支持
- ✓ エネルギースペクトルを2PeVまで測定
 \Rightarrow CR陽子の最大加速エネルギーは~5 PeV

Sub-PeV γ 線天文学で、これまでにわかったこと

1. Sub-PeV γ 線天体が確かに存在する
2. 有力なPeVatron候補天体が発見される
SNR G106, 星形成領域 Cygnus OB2, ...
3. 天の川銀河内に, PeVatronが存在する

1. 天の川銀河における宇宙線の伝播過程は, 銀河全体で一様なのか?
2. PeVatronの空間分布は?
3. PeV宇宙線(PeV電子)の加速メカニズムは?
4. 地球に到来するPeV宇宙線の起源天体はどれか?

Sub-PeV γ 線天文学で、まだわかっていないこと

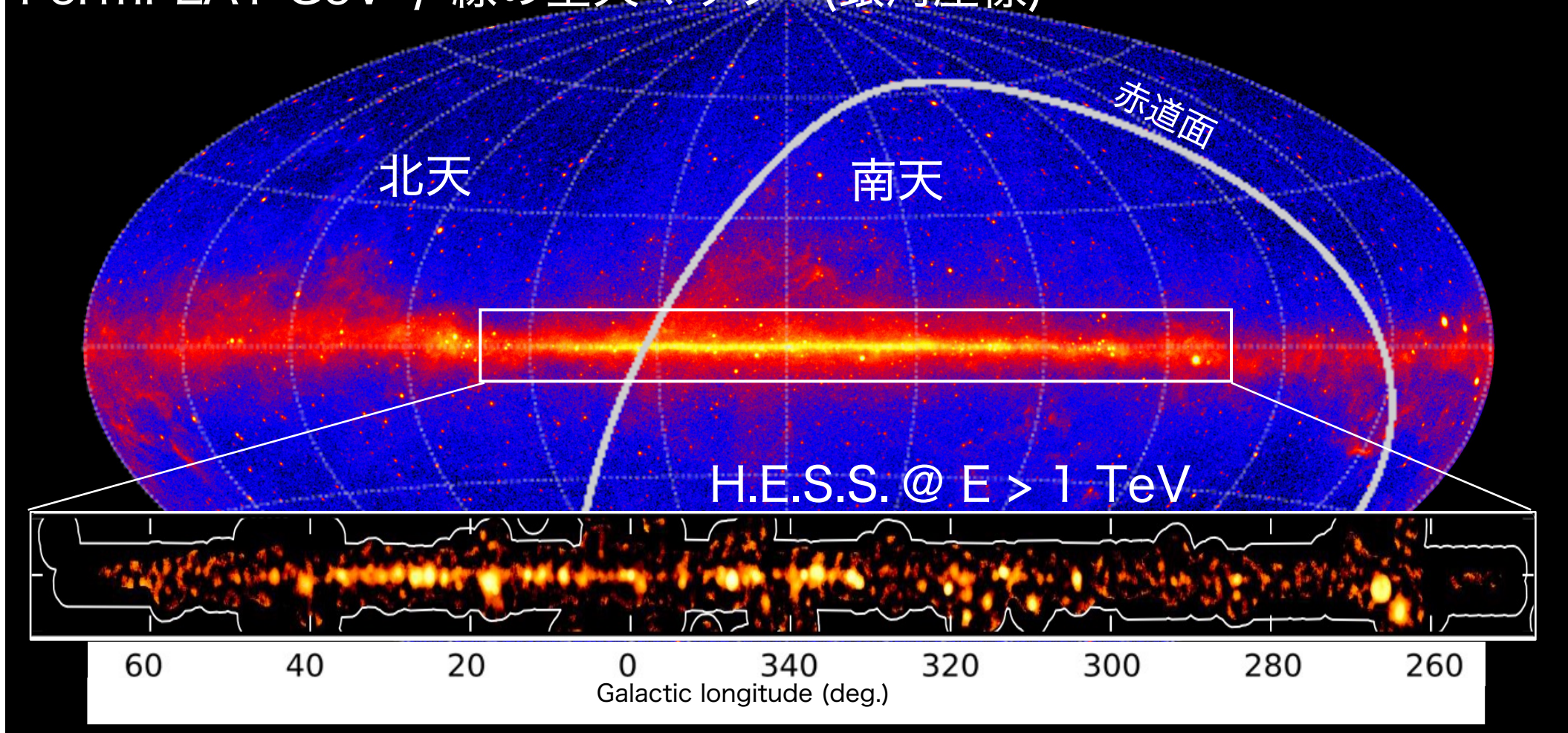
1. Sub-PeV γ 線天体が確かに存在する
2. 有力なPeVatron候補天体が発見される
SNR G106, Cygnus OB2, ...
3. 天の川銀河内に、PeVatronが存在する

1. 天の川銀河における宇宙線の伝播過程は、銀河全体で一様なのか？
2. PeVatronの空間分布は？
3. PeV宇宙線(PeV電子)の加速メカニズムは？
4. 地球に到来するPeV宇宙線の起源天体はどれか？

ALPACA実験

南半球でのSub-PeV γ 線観測実験

Fermi-LAT GeV γ 線の全天マップ¹ (銀河座標)

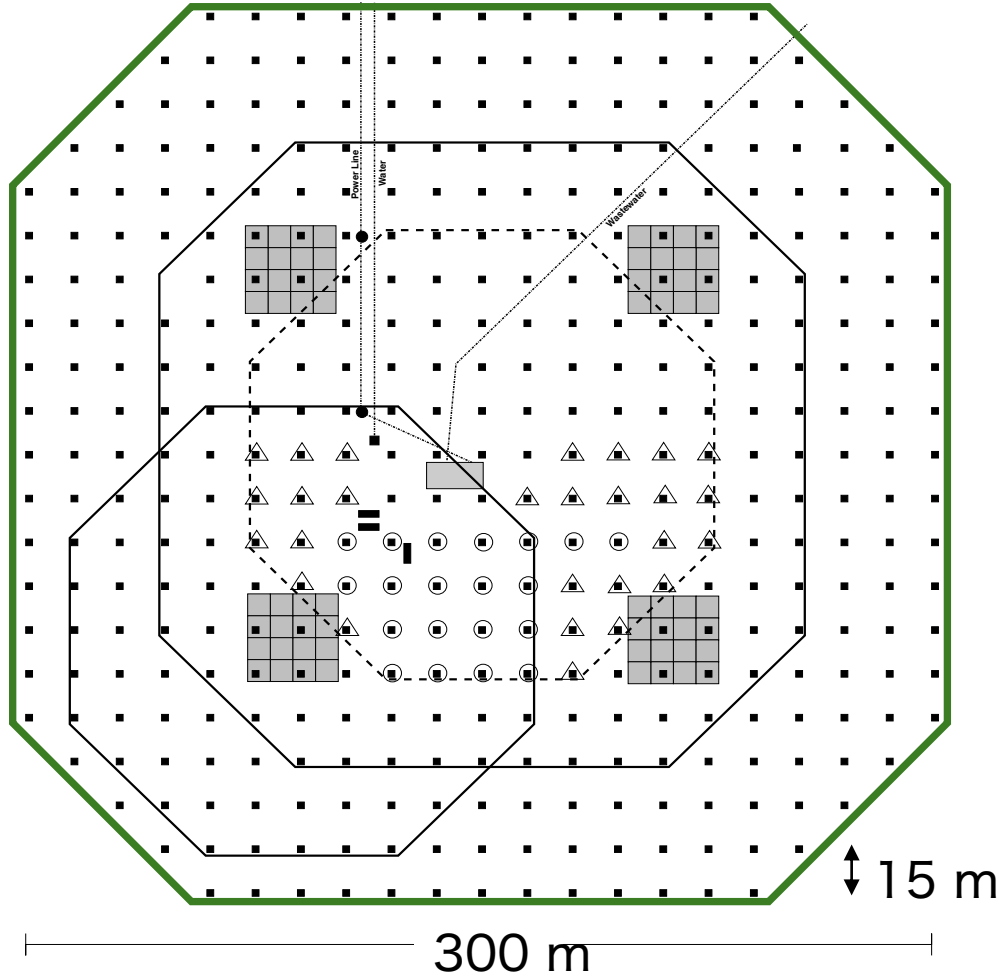


- ✓ 現状, Sub-PeV γ 線観測実験(Tibet, HAWC, LHAASO)は全て北半球に存在する
そのため, 南天にはアクセスできない
- ✓ 一方, 南天はHE天体の宝庫であることが知られている²

ALPACA実験 (2025~)



Andes Large area PArticle detector for Cosmic-ray physics and Astronomy



ボリビア・チャカルタヤ山中腹
(南緯16度, 標高4740 m)

2025年の実験開始に向け準備

83,000m²の空気シャワーアレイ

+

3,600m²のミュオン検出器で

南の天のSub-PeV γ 線観測を世界で初めて実現!

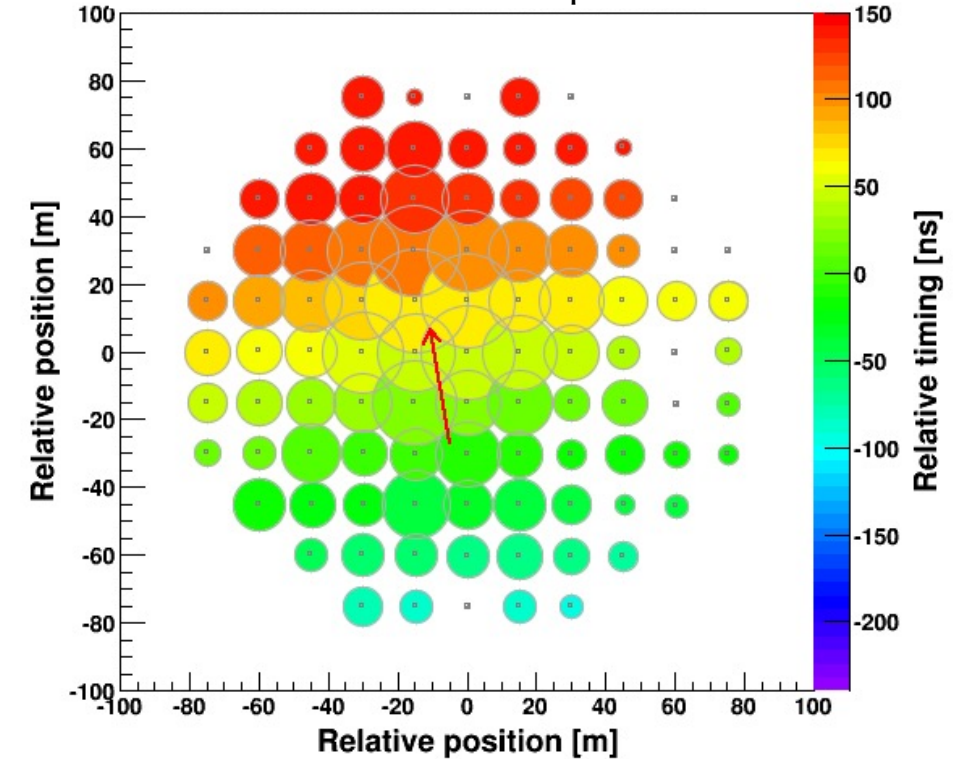
ALPAQUITA実験：南天のSub-PeV γ 線観測に一番乗り



空気シャワーをとらえた様子

カラー：relative timing

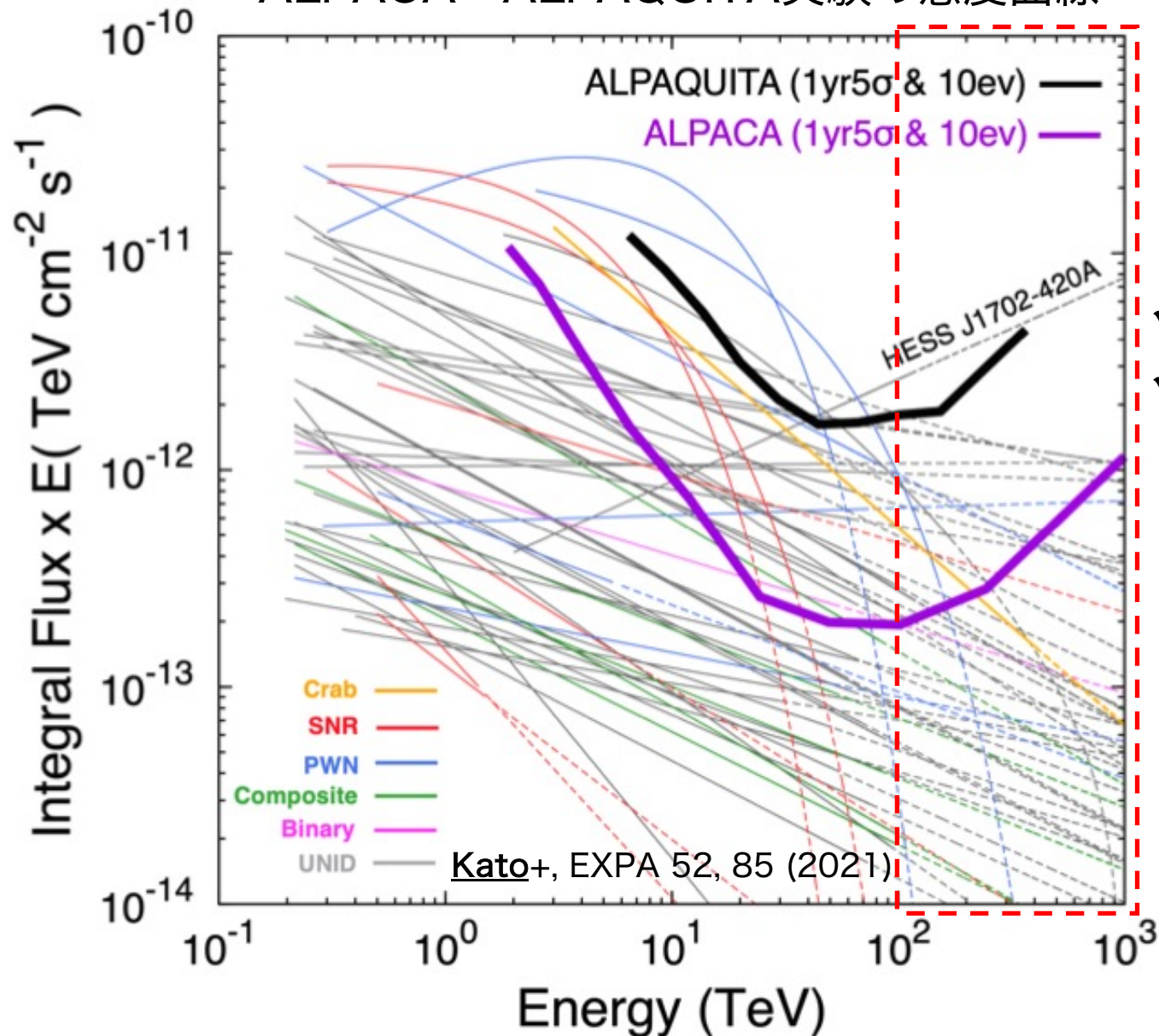
円の大きさ：# of ptcl.s



- ALPACA実験の1/4の大きさ(18,000m²)の空気シャワーアレイ
- 2022年9月に運転を開始
- 2024年には地下のMDを建設. ガンマ線天体が見え始めると期待

Sub-PeV γ 線天体の検出能力

ALPACA・ALPAQUITA実験の感度曲線



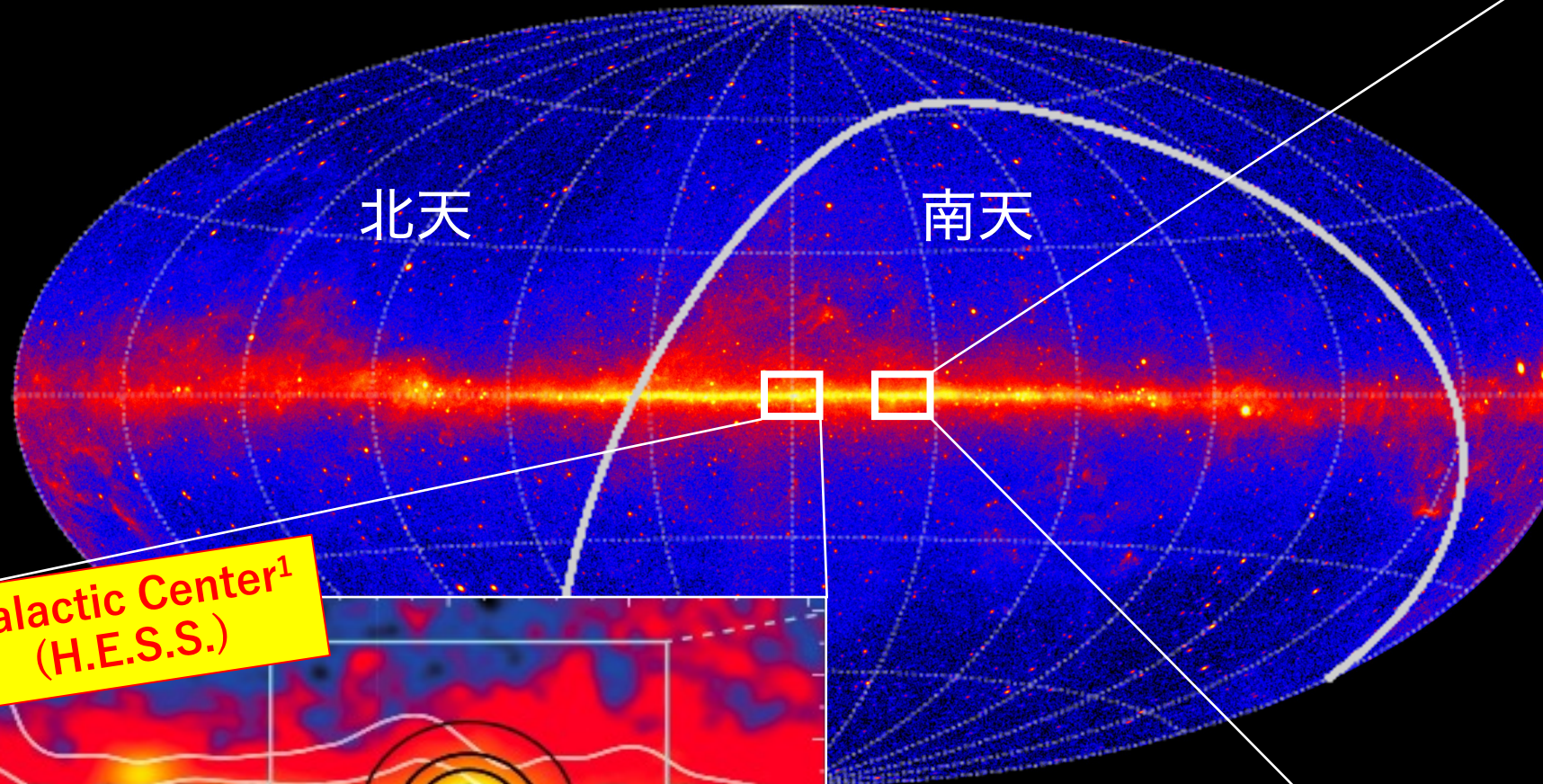
Sub-PeV領域

- ✓ ALPACA : > 20 Sub-PeV天体 / year
- ✓ ALPAQUITA : ~5天体 @ 2024

既知のTeV γ 線天体のエネルギースペクトル
(ALPACA実験の視野内の天体のみ表示.
点線は低エネルギー側からの外挿)

南天の有望なPeVatron候補天体

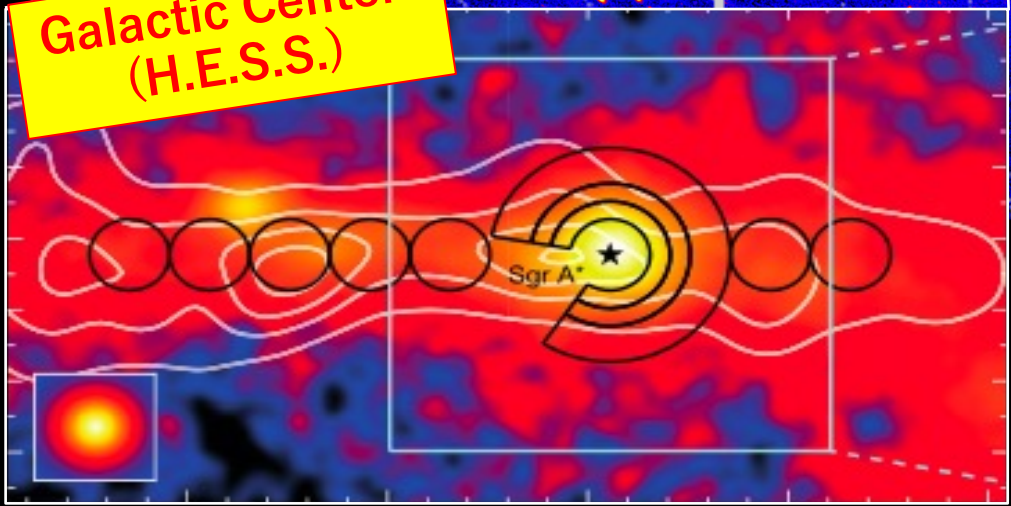
Fermi-LAT GeV γ 線の全天マップ (銀河座標)



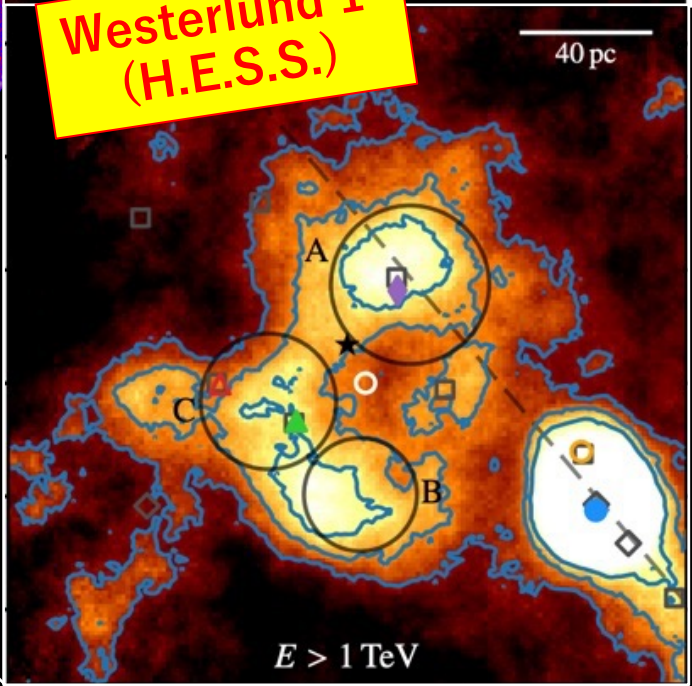
北天

南天

Galactic Center¹
(H.E.S.S.)



Westerlund 13³
(H.E.S.S.)

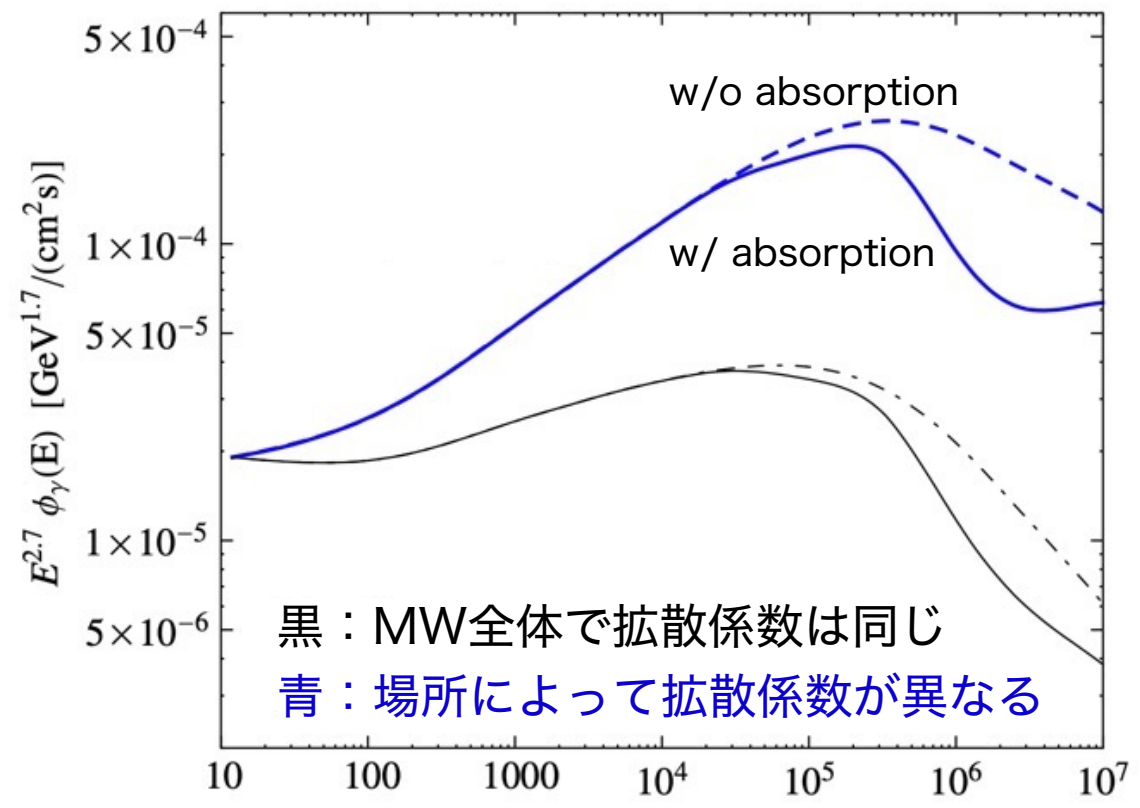


1. H.E.S.S. Collaboration, Nature 531, 476 (2016)
2. //, A&A 653, A152 (2021)
3. //, A&A 666, A124 (2022)

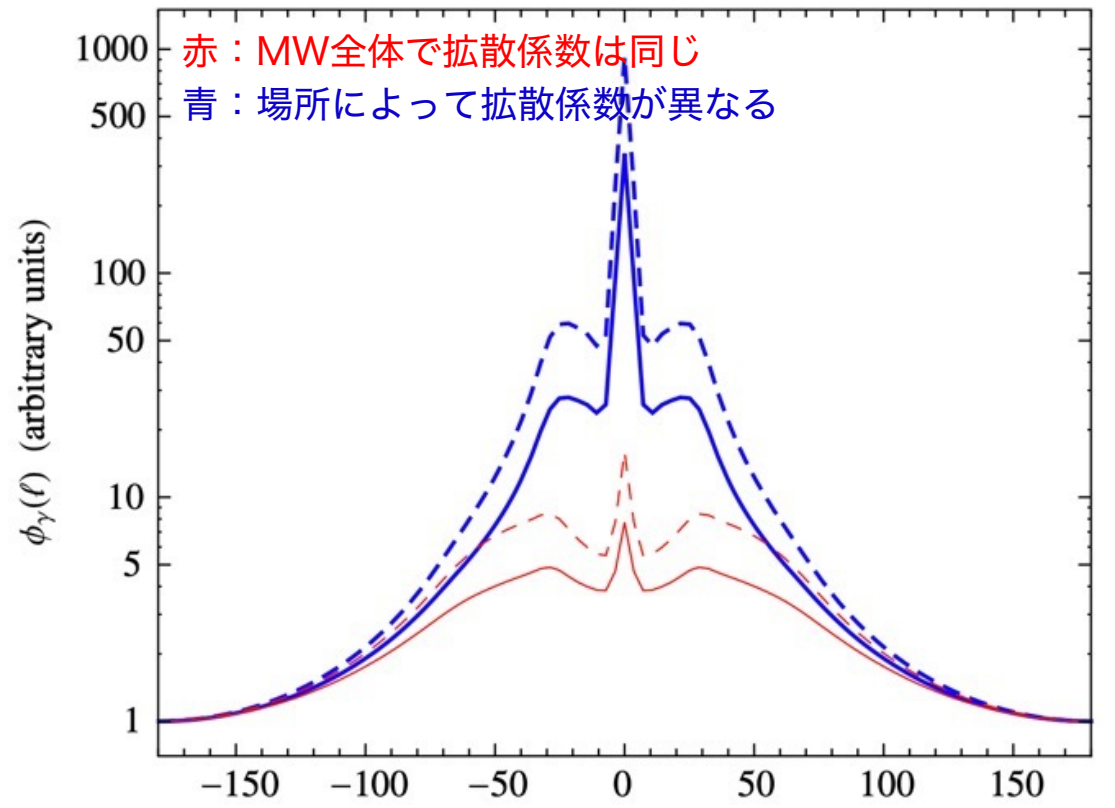
南天の拡散 γ 線観測からCRの伝播過程を解明

- ✓ PeV宇宙線の伝播(拡散)速度がMW全体で同じか, 場所によって異なるかは未解明
- ✓ 仮説の検証には, 南天のSub-PeV拡散 γ 線の観測が不可欠

エネルギースペクトルの理論予想
($|\text{銀経}| < 30^\circ$ & $|\text{銀緯}| < 5^\circ$)



拡散ガンマ線の銀経方向分布の理論予想
($E = 1.8$ PeV)



ALPACA実験で何が解決できるだろうか？

1. Sub-PeV γ 線天体が確かに存在する

2. 有力なPeVatron候補天体が発見される
SNR G106, Cygnus OB2, ...

3. 天の川銀河内に, PeVatronが存在する

1. 天の川銀河における宇宙線の伝播過程は, 銀河全体で一様なのか？

2. PeVatronの空間分布は？

3. PeV CR(& PeV電子)の加速メカニズムは？

4. 地球に到来するPeV CRの起源天体はどれか？

ALPACA実験で何が解決できるだろうか？

1. Sub-PeV γ 線天体が確かに存在する

2. 有力なPeVatron候補天体が発見される
SNR G106, Cygnus OB2, ...

3. 天の川銀河内に, PeVatronが存在する

1. 天の川銀河における宇宙線の伝播過程は, 銀河全体で一様なのか？

ひとまずケリはつくだろう

2. PeVatronの空間分布は？

PeVatron候補天体の分布はわかるだろう

3. PeV CR(& PeV電子)の加速メカニズムは？

< 0.1°の角度分解能が必要

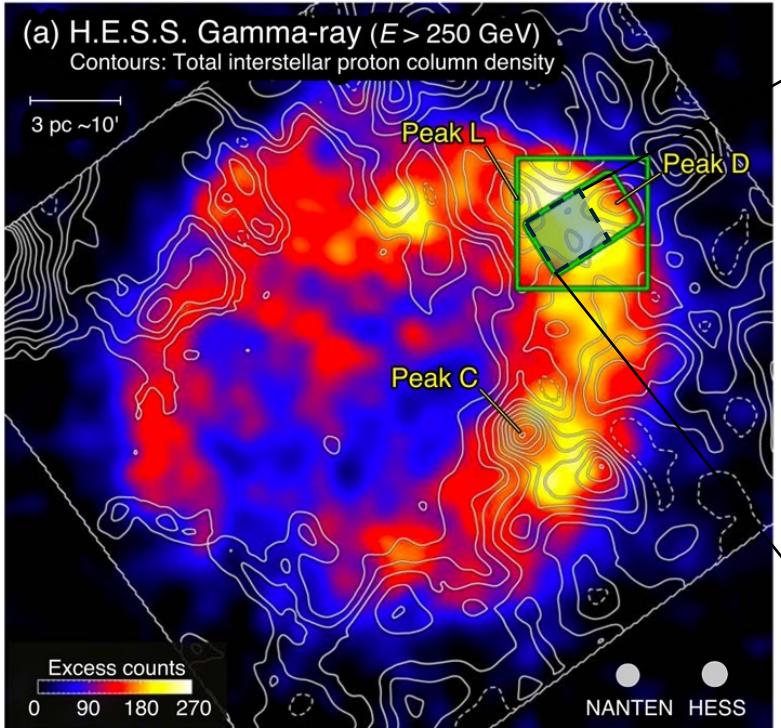
4. 地球に到来するPeV CRの起源天体はどれか？

高分解能観測による, 天体からのPeV CRの逃走の研究が必要

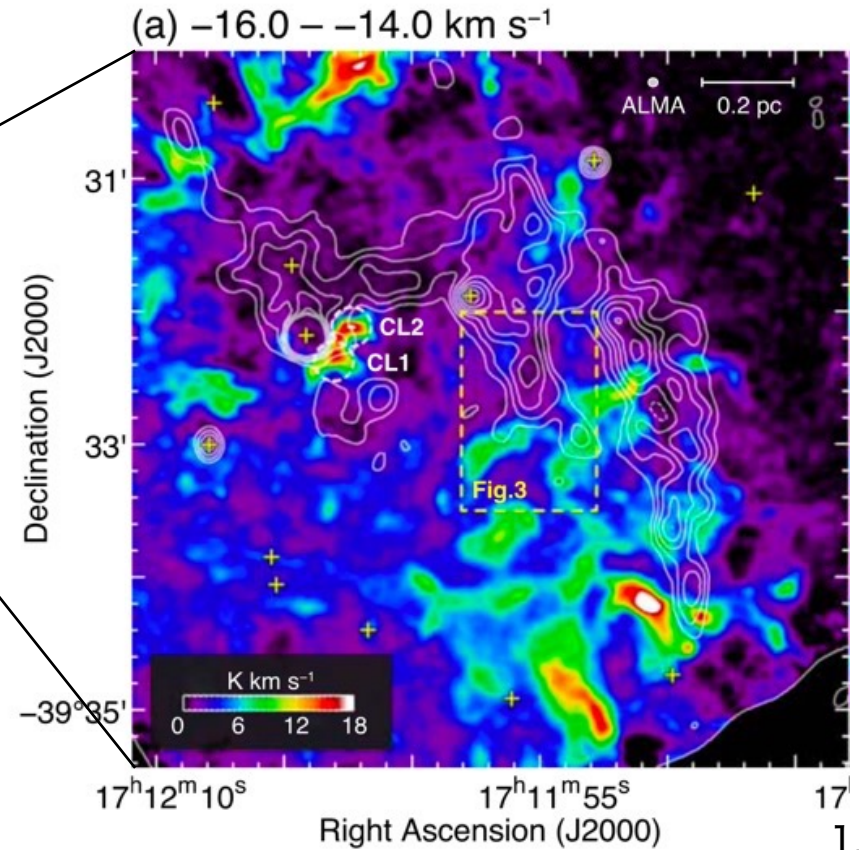
γ 線の高分解能観測によるCR起源の解明 1

- ✓ γ 線分布と星間ガス分布の相関から, γ 線天体への距離を決定 (Fukui et al., PASJ 55, L61, 2003)
- ✓ 星間ガス & X線観測から, 宇宙線電子の加速を考察 (Sano et al., 2010, 2013, 2020)
- ✓ 将来的には, 分子雲からのガンマ線スペクトルを空間分解することで, HECRの加速現場の特定を目指す

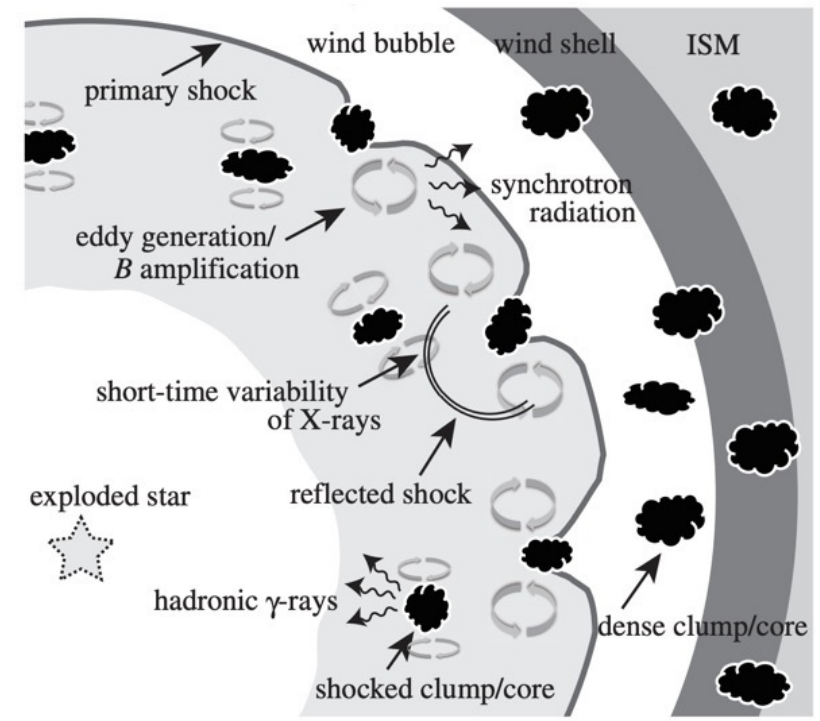
RX J1713.7-3946のガンマ線(カラー)と星間ガス(等高線)¹



水素分子ガス(カラー)とX線(等高線)¹
X線ピークがガスのピークを避けて存在



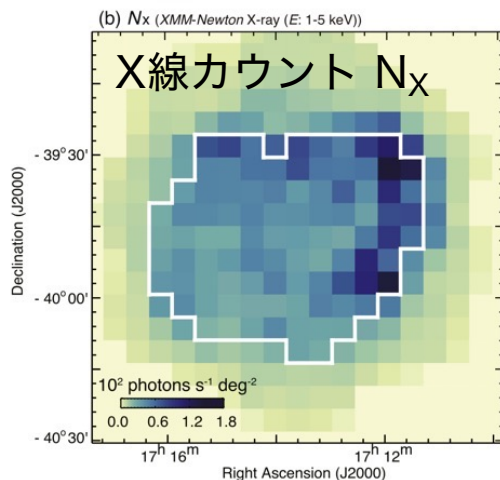
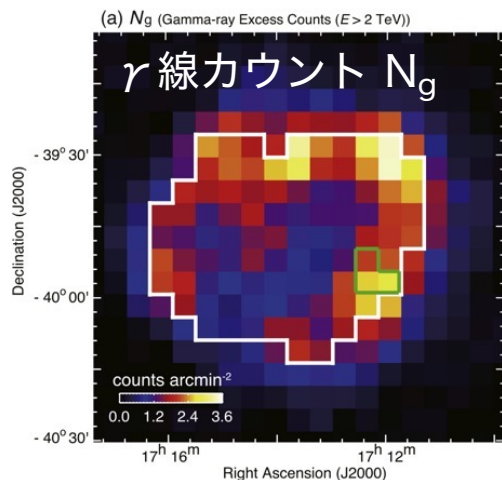
分子雲クランプ領域を衝撃波が通過した時の電子加速の描像²



1. Sano et al., ApJL 904, L24 (2020) 35
2. Inoue et al., ApJ 744, 71 (2012)

γ 線の高分解能観測によるCR起源の解明 2

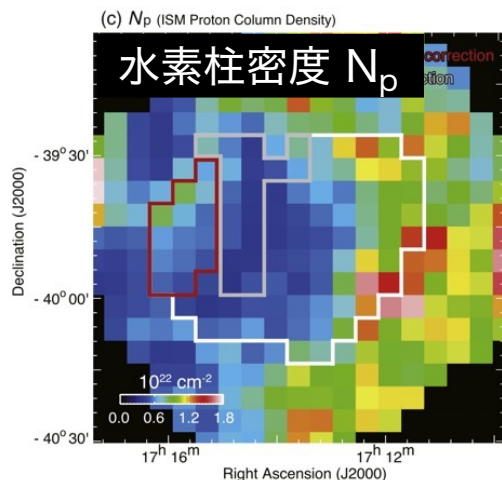
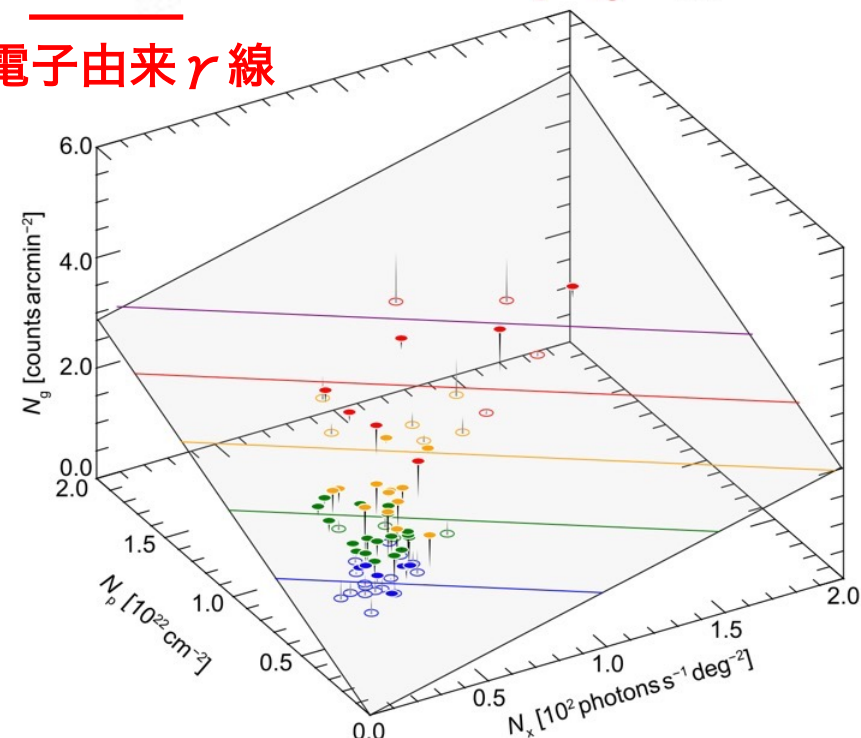
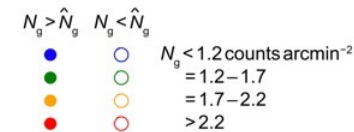
- ✓ 星間ガスが存在しても、即座に γ 線の起源を結論づけるのは難しい (電子起源で説明しようと思えばできてしまう)
- ✓ Fukui et al., 2021では, TeV γ 線の高分解能観測と星間ガス・X線観測からRX J1713.7-3946のTeV γ 線のCR起源・電子起源の定量化に成功
- ✓ 将来はSub-PeV γ 線のデータに高分解能観測(c.f., CTA)のデータを使用か



$$N_g = aN_p + bN_x$$

CR由来 γ 線

電子由来 γ 線



RX J1713の領域を

- γ 線
- X線
- 電波

でみた図

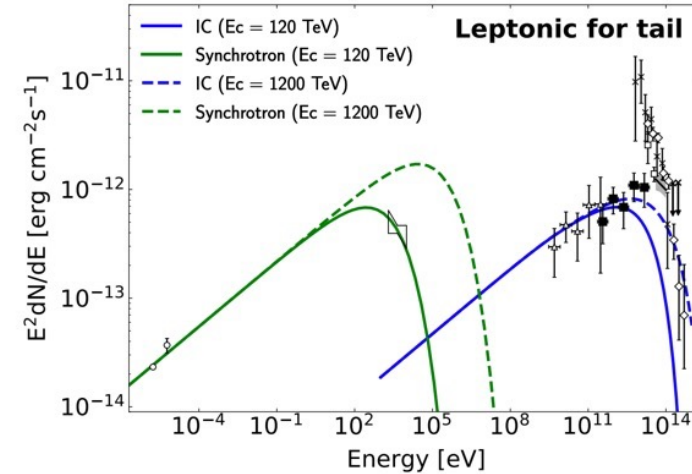
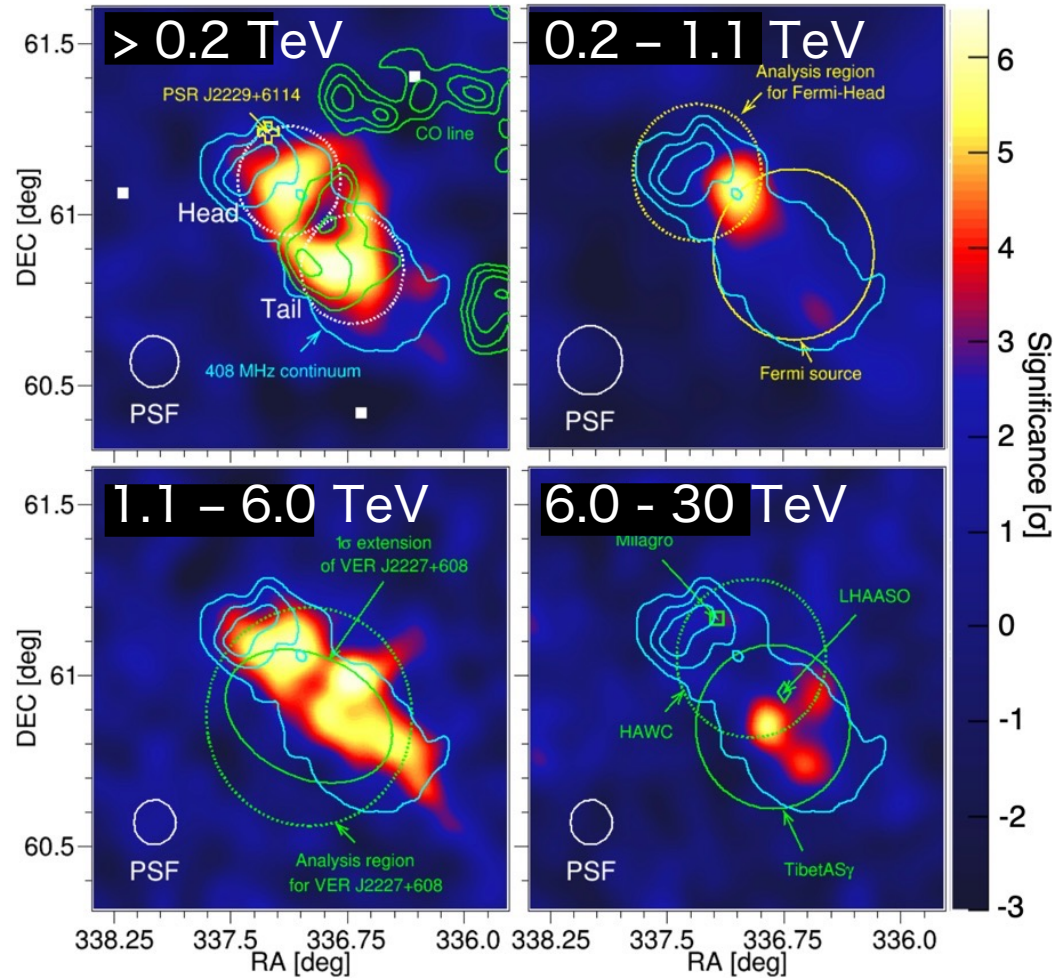
RX J1713の場合は $N_{g, CR} : N_{g, e} = 7 : 3$

CRの逃走過程：MAGIC望遠鏡によるSNR G106.3+2.7の観測

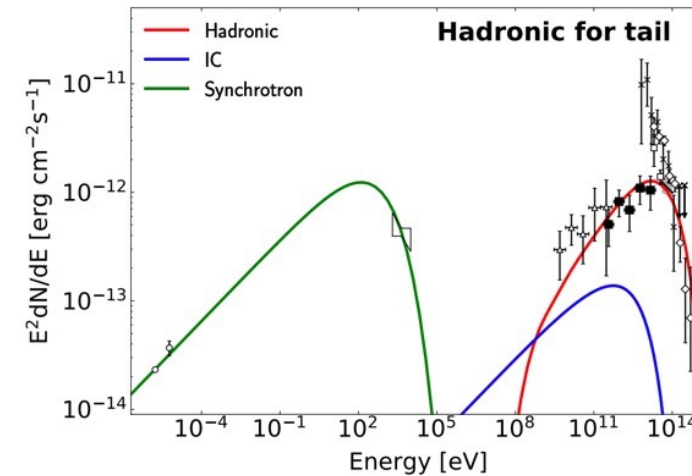
MAGIC Collaboration, A&A 671, A12 (2023)

MAGICがみたSNR G106.3+2.7の
ガンマ線放射のsignificance map

エネルギースペクトルのモデリング



レプトン放射モデル.
X線と γ 線を同時に
説明できない



ハドロン放射モデル.
 $E_{\text{max}, p} = 1 \text{ PeV}!!$

- ✓ エネルギーとともに、放射中心がHead領域からTail領域へ移動
- ✓ 過去にSNRで加速されたHECRが、SNRから逃走する途上にある星間ガスと衝突し、TeV-sub-PeV γ 線を放射か

過去にPeVatronだった天体の特定が可能！

ALPACA実験の意義

広い視野を利用した、南天のPeVatron候補天体のカタログ作成 数十TeV ~ Sub-PeV γ 線の放射中心の決定と、スペクトル測定

=> 高分解能の γ 線観測実験(c.f., CTA)による追観測を軸に

- ・天体と相互作用する分子ガスの特定・天体までの距離の決定 (Fukui et al., 2012)
- ・ γ ・X・電波の三本柱で、 γ 線のCR起源・電子起源を定量化 (Fukui et al., 2021)
- ・ γ 線放射中心のエネルギー依存性・スペクトルの場所依存性から
天体近傍のCRの拡散係数に制限をつける (MAGIC Collaboration, 2023)

=> 地球のPeV CRフラックスに寄与する天体を特定

1. 天の川銀河における宇宙線の伝播過程は、銀河全体で一様なのか？

ひとまずケリはつくだろう

2. PeVatronの空間分布は？

PeVatron候補天体の分布はわかるだろう。

3. PeV CR(& PeV電子)の加速メカニズムは？

< 0.1°の角度分解能が必要

4. 地球に到来するPeV CRの起源天体はどれか？

天体からのPeV CRの逃走の研究が必要

3 & 4の解決にも、先駆的な役割を果たせる

まとめ

現状, チベット実験をはじめとした北半球のSub-PeV γ 線観測実験から, 以下のことが明らかになった:

1. Sub-PeV γ 線天体が確かに存在する
2. 有力なPeVatron候補天体が発見される
SNR G106, Cygnus OB2, ...
3. 天の川銀河内に, PeVatronが存在する

2025年からは, ALPACA実験で世界初の南天のSub-PeV γ 線観測を開始,

- ・ 広い視野を利用した, 南天のPeVatron候補天体のカタログ作成
- ・ 数十TeV ~ Sub-PeV γ 線の放射中心の決定と, スペクトル測定

をおこない, 後の高分解能実験が

- ・ 個々の天体でのHECR加速の描像を明らかにする
- ・ 地球のPeV CRフラックスに寄与する天体を特定する

ための先駆的な役割を果たす.

Backup slides

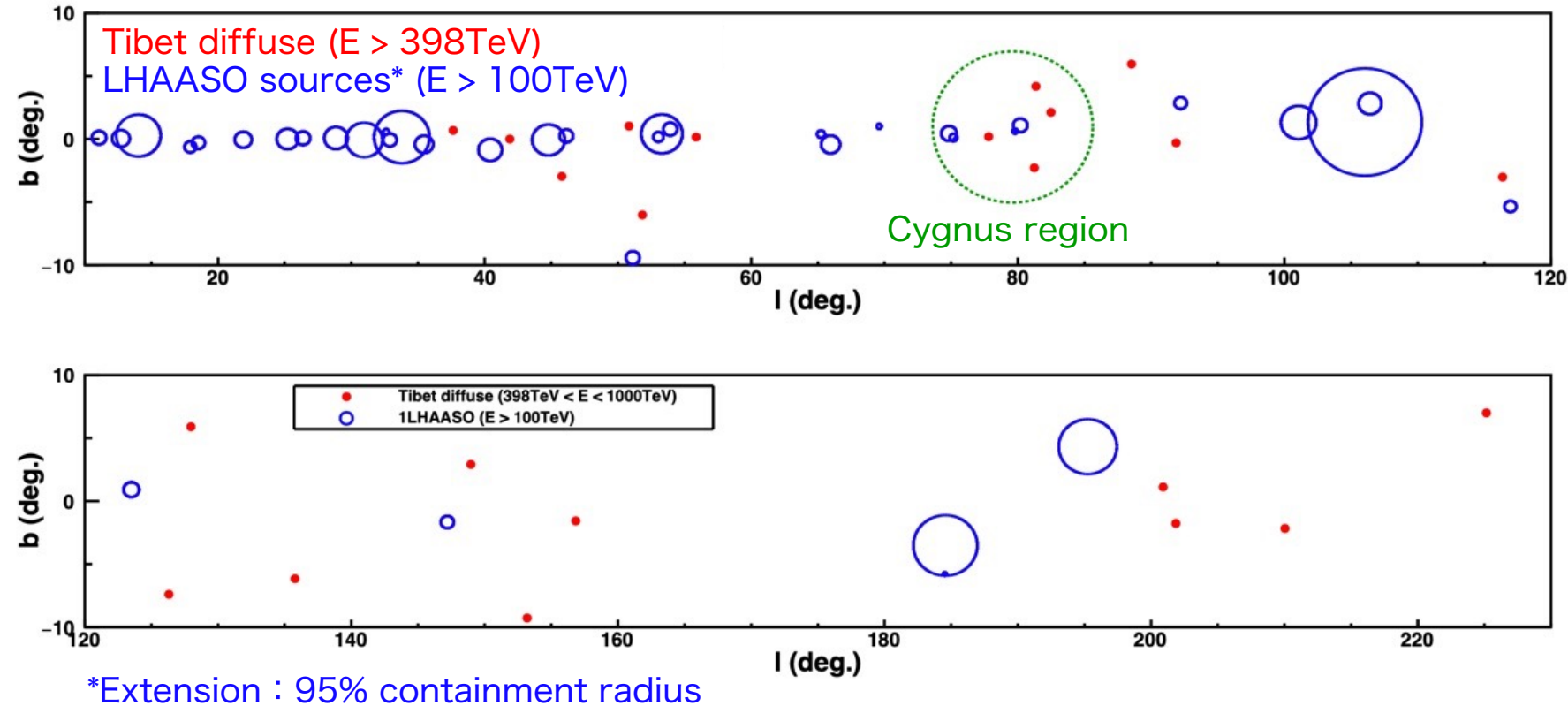
Gamma-ray emission from HE electrons

Introduction of Fang & Murase, ApJL 957, L6 (2023)

hadronic cosmic rays, a lower flux of cosmic-ray electrons may also up-scatter the interstellar radiation field and the cosmic microwave background (CMB) to γ -rays. Above 10 TeV, electrons have a cooling time of $t_e \sim 64(E_e/10 \text{ TeV})^{-1}$ kyr due to the inverse Compton radiation, and propagate for a distance $d \sim (D t_e)^{1/2} = 0.3(E_e/10 \text{ TeV})^{-0.33}$ kpc, where $D \approx 3 \times 10^{28}(R/3 \text{ GV})^{1/3} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ is the diffusion coefficient assuming Kolmogorov turbulence and $R \equiv E/Ze$ is the rigidity of a particle with energy E and charge number Z . Therefore, electrons above tens of TeV cannot travel too far away from the sources where they were produced.

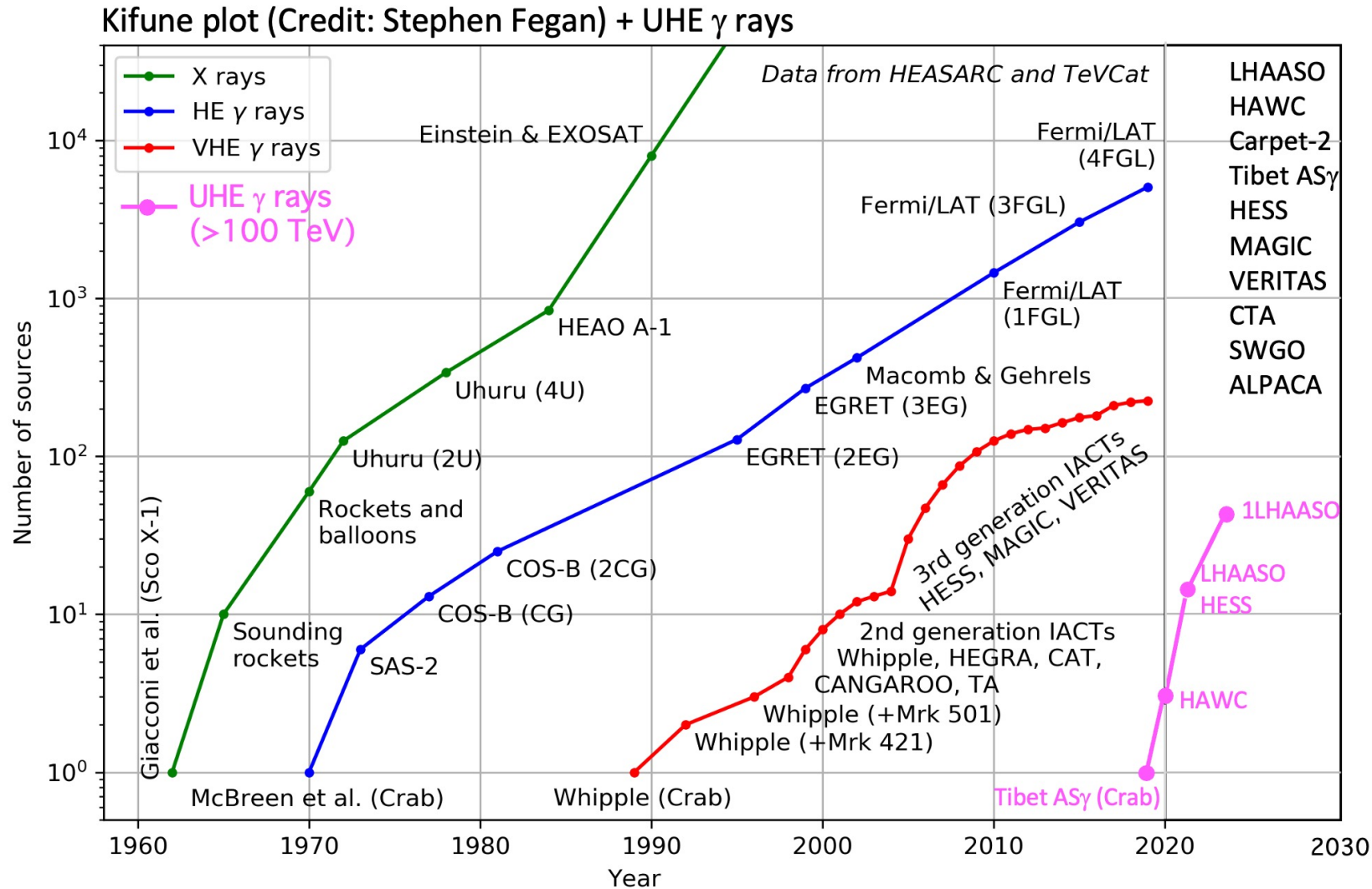
Nature of the Tibet Diffuse Events ($E > 398\text{TeV}$)

Kato+, ApJL 961, L13 (2024)



- ✓ A fraction of Tibet diffuse events are of source origin?? (e.g., Vecchiotti+, ApJ 928, 19, 2022)
- ! No overlap b/w the Tibet events @ $E > 398\text{TeV}$ & 1LHAASO catalog src.s @ $E > 100\text{TeV}$.
- Currently supporting the diffusive nature of the Tibet events @ $E > 398\text{TeV}$**

Detection of Sub-PeV Gamma-Ray Sources



Draw the "Kifune" plot - the integral number of high energy sources detected as a function of year - in the style of a plot developed by Tadashi Kifune (for example <http://adsabs.harvard.edu/abs/1996NCimC..19..953K>). The data for the number of X-ray and HE (GeV) gamma-ray sources come from a page on HEASARC maintained by Stephen A. Drake (retrieved 2017-09-28) : https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/headates/how_many_xray.html. The data for the number of VHE (TeV) gamma-ray sources is from TeVCat maintained by Deirdre Horan and Scott Wakely (retrieved 2017-09-28) : <http://tevcat.uchicago.edu/>