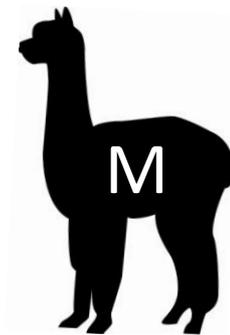


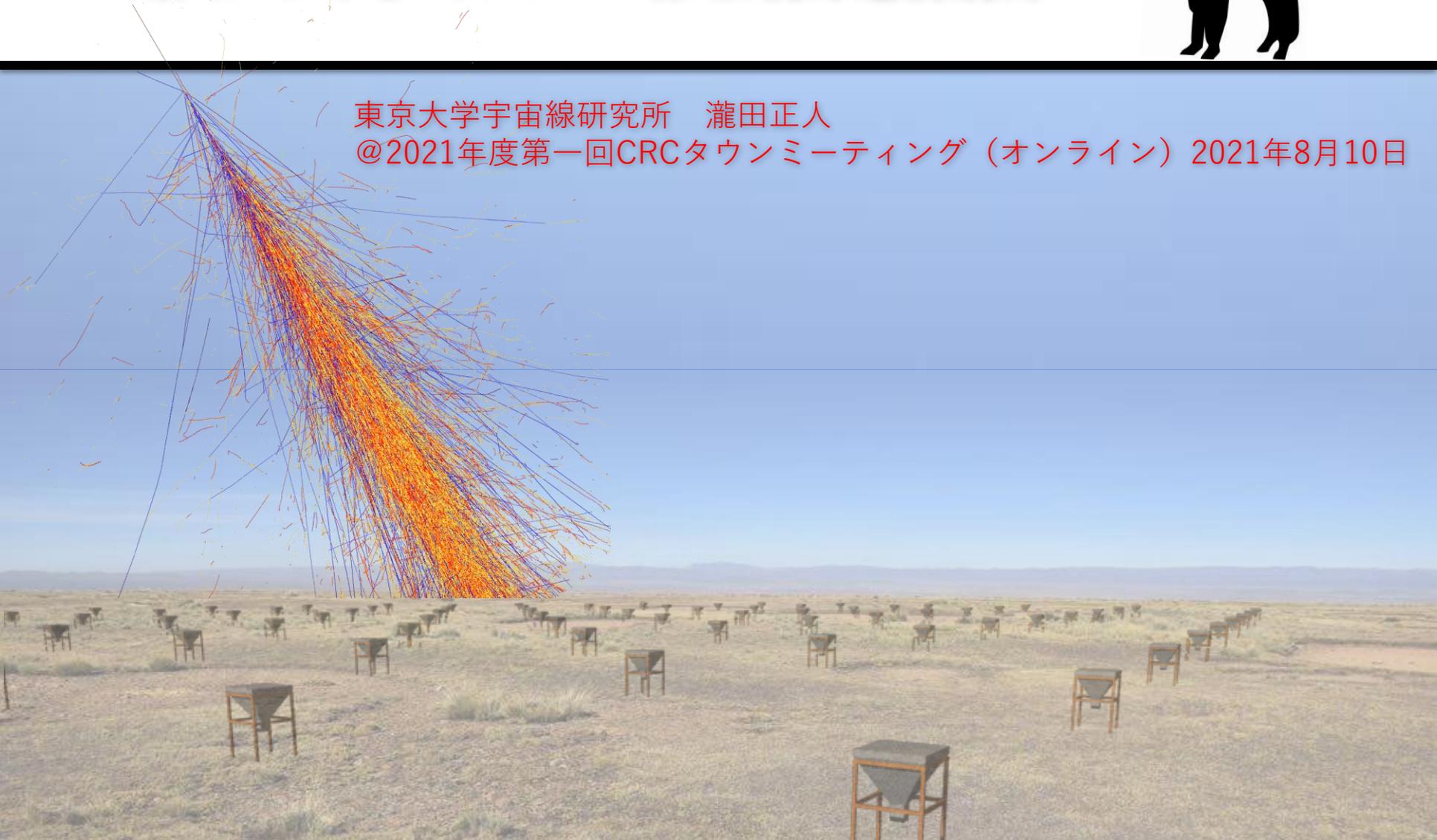
Mega ALPACA計画

- 南天におけるPeVガンマ線 広視野連続観測 -



東京大学宇宙線研究所 瀧田正人

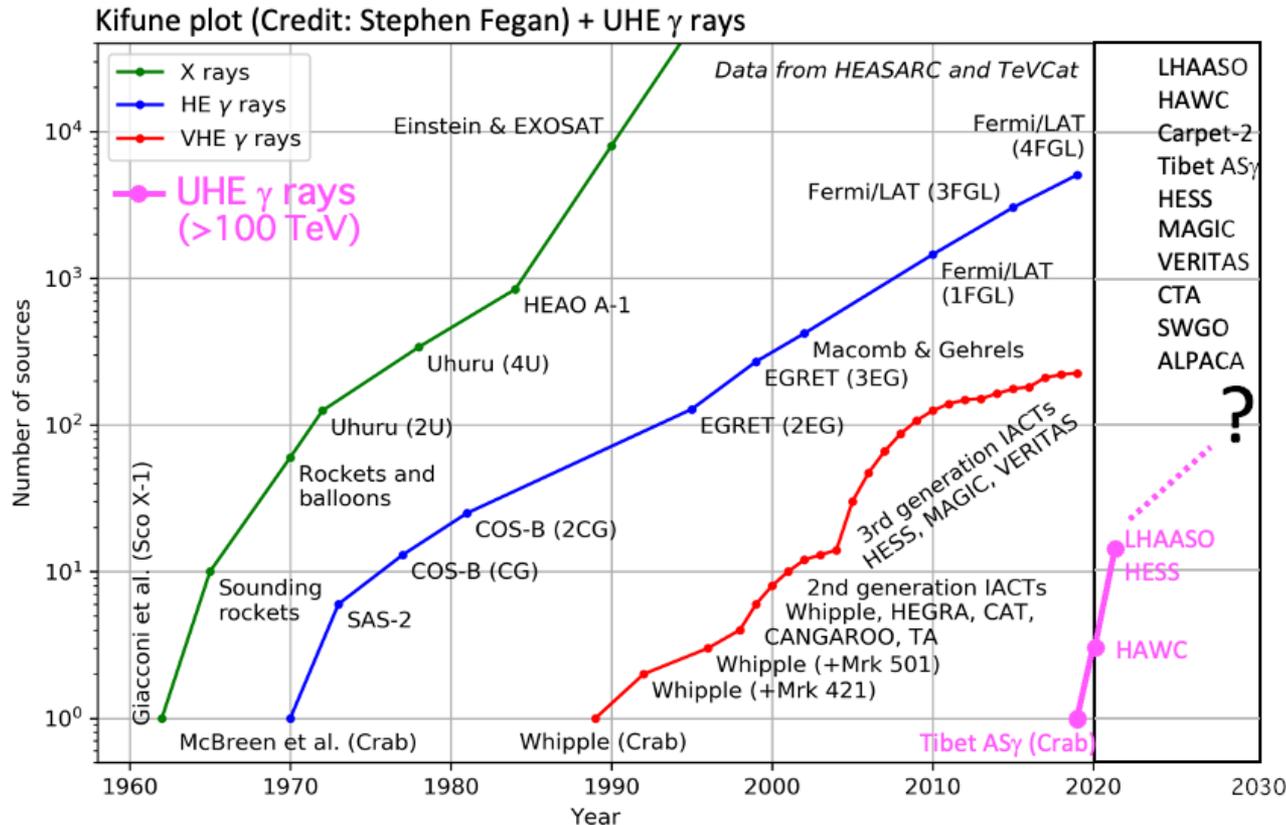
@2021年度第一回CRCタウンミーティング (オンライン) 2021年8月10日



北半球 Tibet AS γ 実験による重要な成果

- sub-PeVガンマ線の世界初検出 (Crab Nebula) *PRL 2019*
 - UHEガンマ線天文学の開拓
- PeVatronの有力候補の発見 (G106.3+2.7) *Nature Astronomy 2021*
 - 超新星残骸におけるPeV宇宙線加速
- sub-PeV銀河面拡散ガンマ線の世界初検出 (広視野!) *PRL 2021*
 - 銀河系内にPeVatronが存在する証拠
- Knee領域宇宙線スペクトル／化学組成の測定
 - ハドロン相互作用モデルの不定性依存度が少ない測定
- TeV-PeV領域の宇宙線異方性の精密測定
 - 太陽圏とその近傍における宇宙線の流れの研究
- “太陽の影”と太陽活動周期の相関の発見とその応用
 - 太陽近傍の磁場構造の検証と宇宙天気予測の応用研究
- “月の影”を用いた宇宙線の絶対エネルギー較正の開発
 - 地磁気を利用した世界初の宇宙線エネルギーの較正

UHEガンマ線天文学 $E > 100 \text{ TeV}$ (ICRC2021)



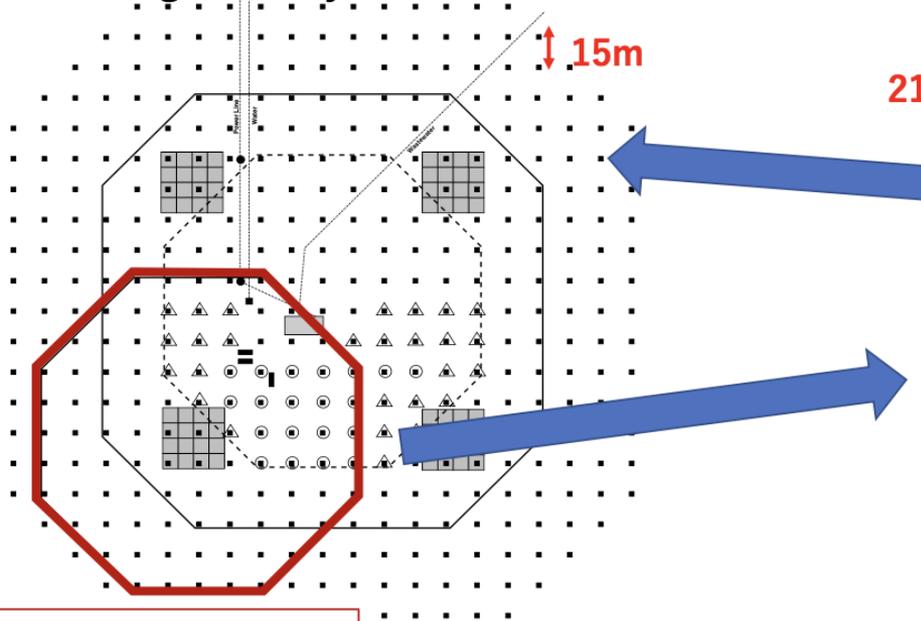
Draw the "Kifune" plot - the integral number of high energy sources detected as a function of year - in the style of a plot developed by Tadashi Kifune (for example <http://adsabs.harvard.edu/abs/1996NCimC...19..953K>).
 The data for the number of X-ray and HE (GeV) gamma-ray sources come from a page 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/>

- ✓ Tibet ASy 実験が100 TeV以上のエネルギー窓を拓いた
- ✓ 北天において十数個のUHEガンマ線源を発見(Tibet ASy, HAWC, LHAASO)
- 南半球のUHEガンマ線観測拠点が必要！

ALPACA実験 (南米ポリビア)

ALPACA staging

ALPACA (High Density)



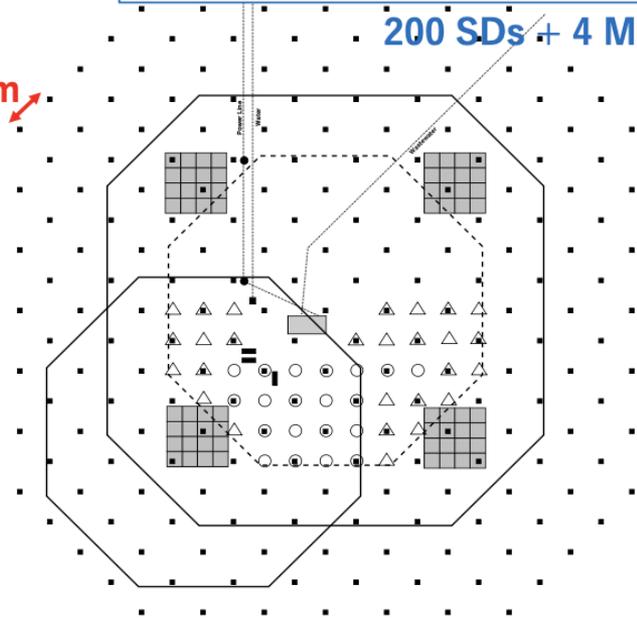
ALPAQUITA in 2021

97 SDs + 1 MD

■ 1 m² AS Detector x (97+304) (82,800 m²)
 ■ 58 m² Muon Detector x (16+48) (3,700 m²)

ALPACA (half) in 2022

200 SDs + 4 MDs



300 m

■ 1 m² AS Detector x (97+108) (82,800 m²)
 ■ 58 m² Muon Detector x (16+48) (3,700 m²)

ALPAQUITAの建設状況

フェンス



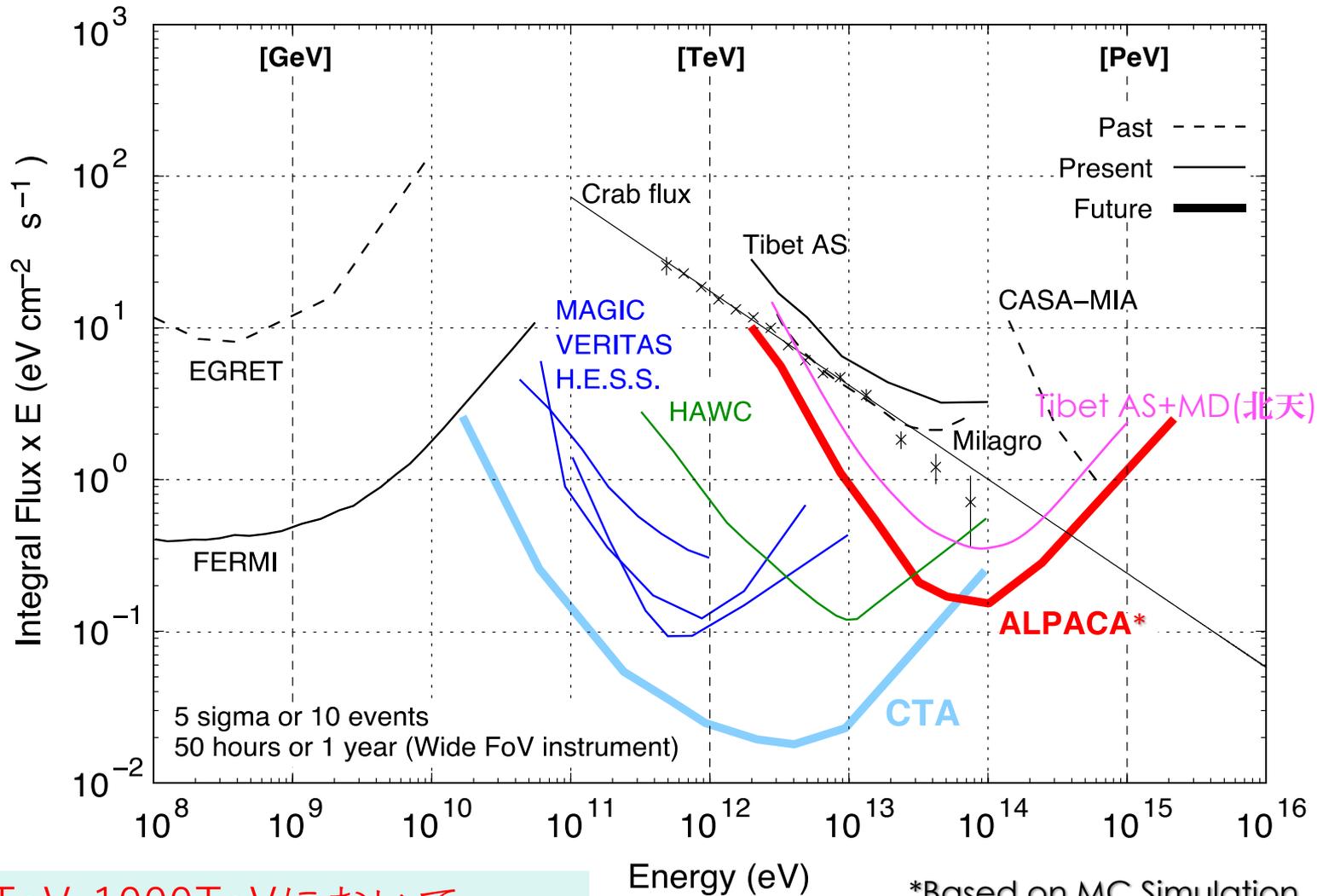
7kV送電線



プラスチックシンチレーション検出器を設置中



ガンマ線点源に対する感度



10TeV-1000TeVにおいて
銀河系中心やHESS天体の観測

*Based on MC Simulation
For the Tibet AS+MD

Mega ALPACA

検出器配置

1 km² Array + MD

30 m spacing AS array

Area 1,011,600 m²

of det. 1185

15 m spacing AS array

Area 82,800 m²

of det. 313

(Additional to 15 m spacing)

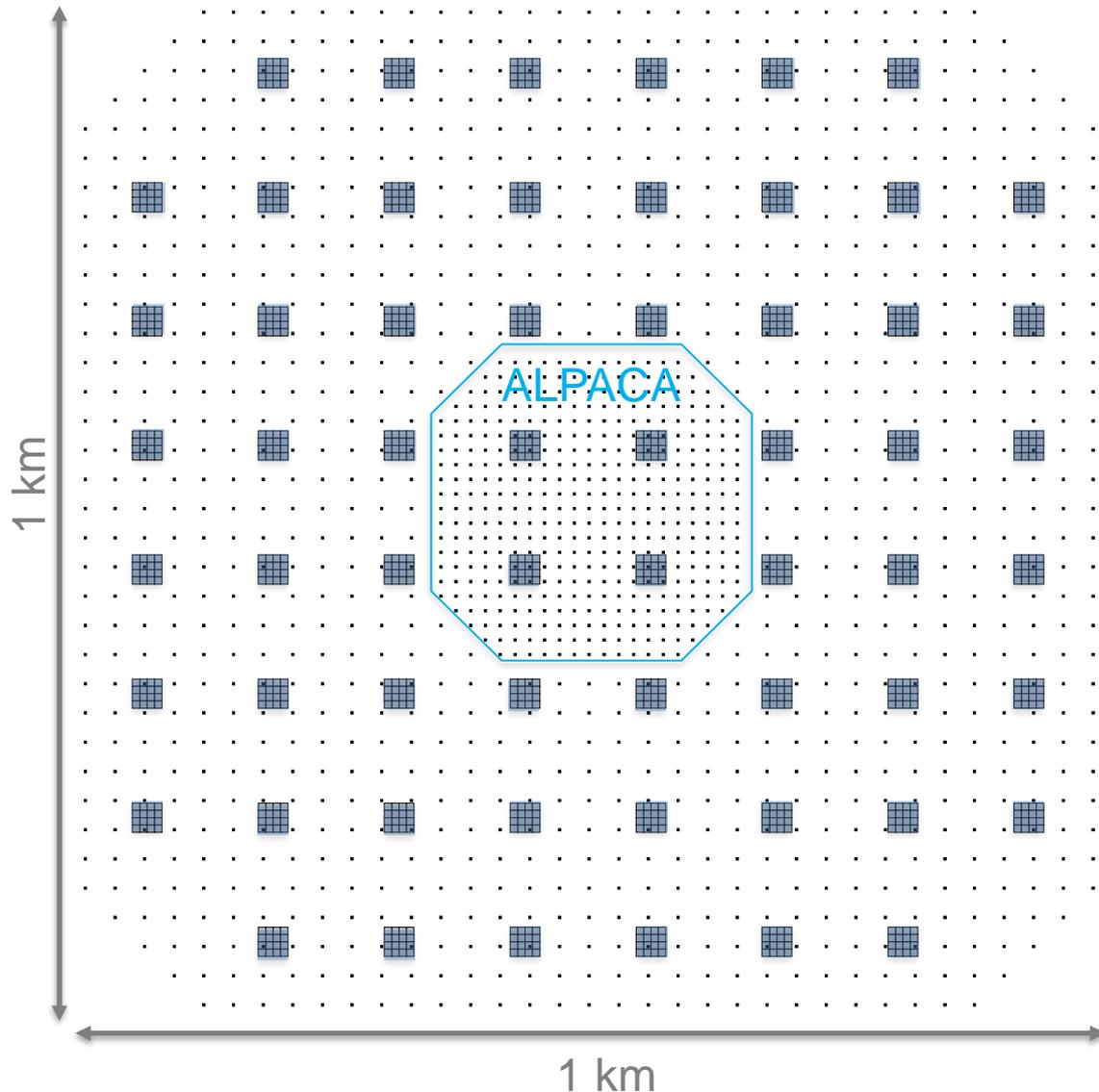
of total det. 1185 + 313 = 1498

Muon Detector (MD) Array

900 m² (16 Cells) x 60

= 54,000 m²

of cells 960



- ・計画規模： 中型B
- ・実施内容： 国際協力 100—200 人規模
- ・実施時期：

FY2027 建設準備

2028—2032 地下ミュオン検出器＋空気シャワーアレイ設置(部分観測)

2033—2042 本観測

- ・必要経費及び予算プロフィール

総額40億円 (FY2027-2042)

FY2027 建設準備 → 5億円

2028—2032 観測装置建設＋部分観測 → 5億円×5年＝25億円

2033—2042 本観測 毎年1億円×10年＝10億円

日本は総額の半分程度を負担予定。

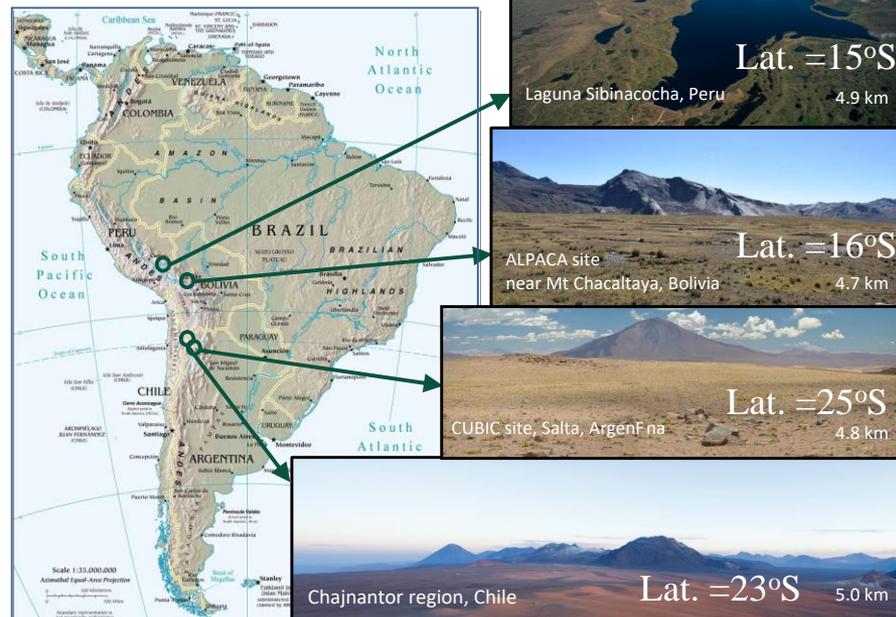
実験サイト

- サーチ中
- Bolivia Patacamaya ! ? (Lat. =16°S)
 - UMSA 所有の広い土地がある
- 可能ならばもっと南へ行きたい !

SWGGO Site Survey

Site?

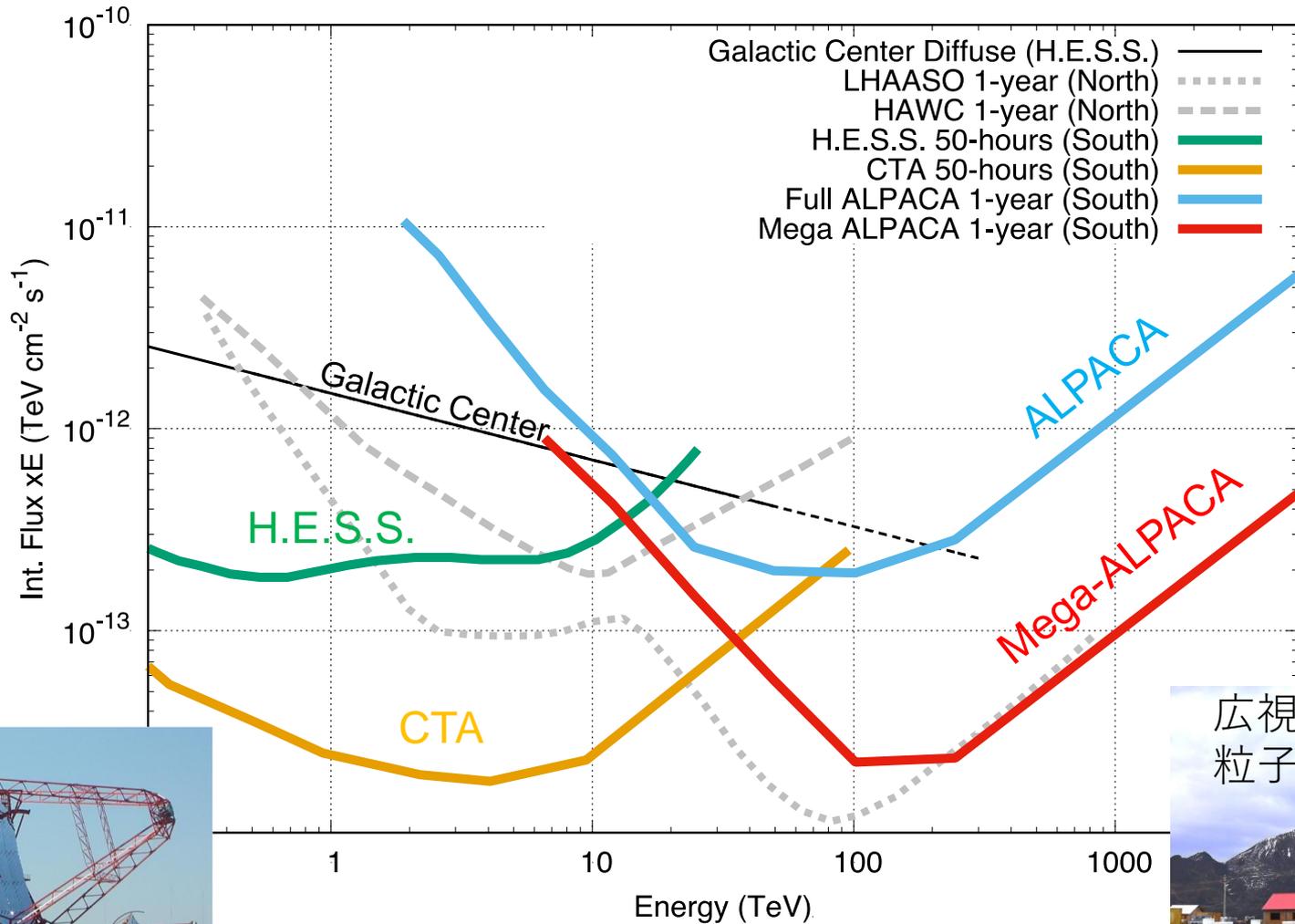
e.g.



⊙ Detailed characterisation work started

→ Shortlist by end 2020

Sensitivity to Gamma-Ray Sources

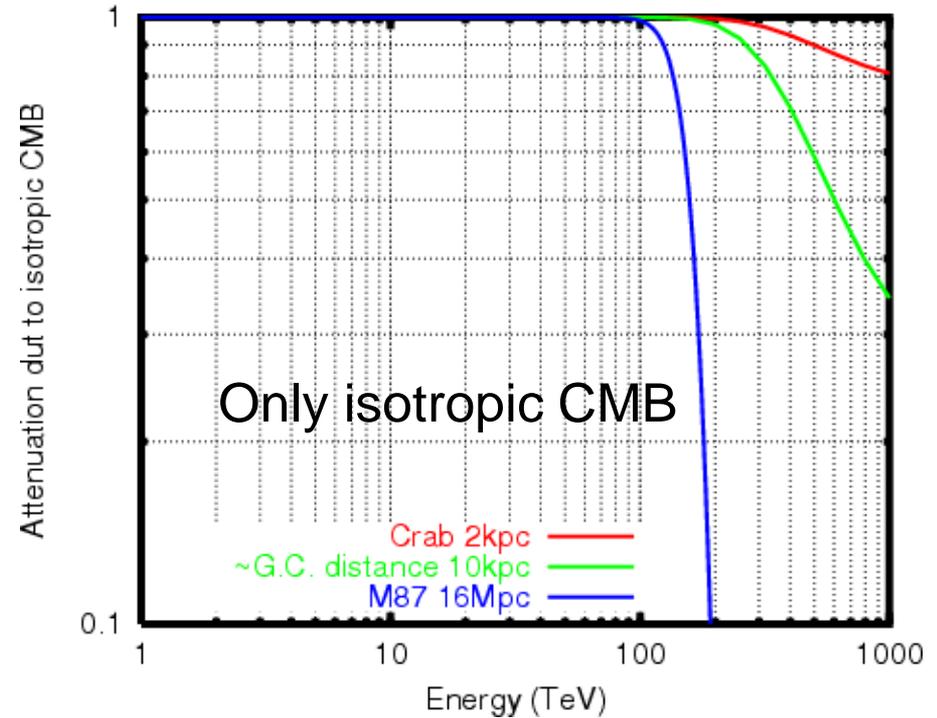
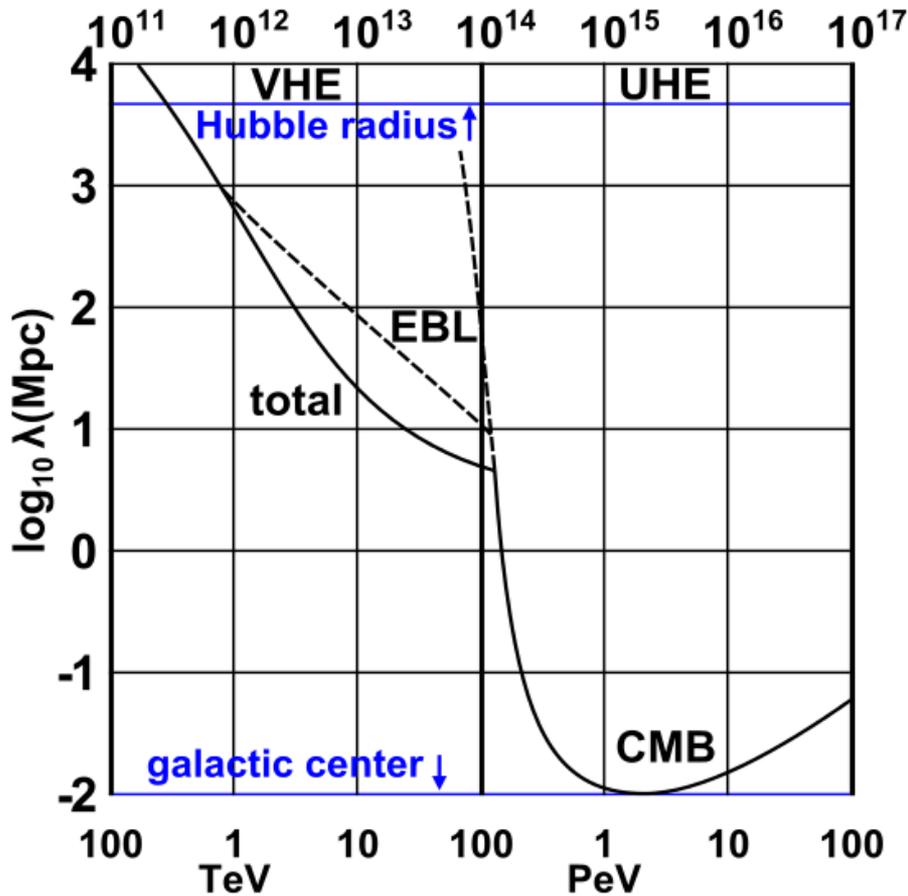


高解像度望遠鏡



広視野・連続観測
粒子検出器アレイ

VHE-UHE Gamma-ray Attenuation



銀河系内および銀河系近傍の宇宙の観測

Mega-ALPACA 科学目標

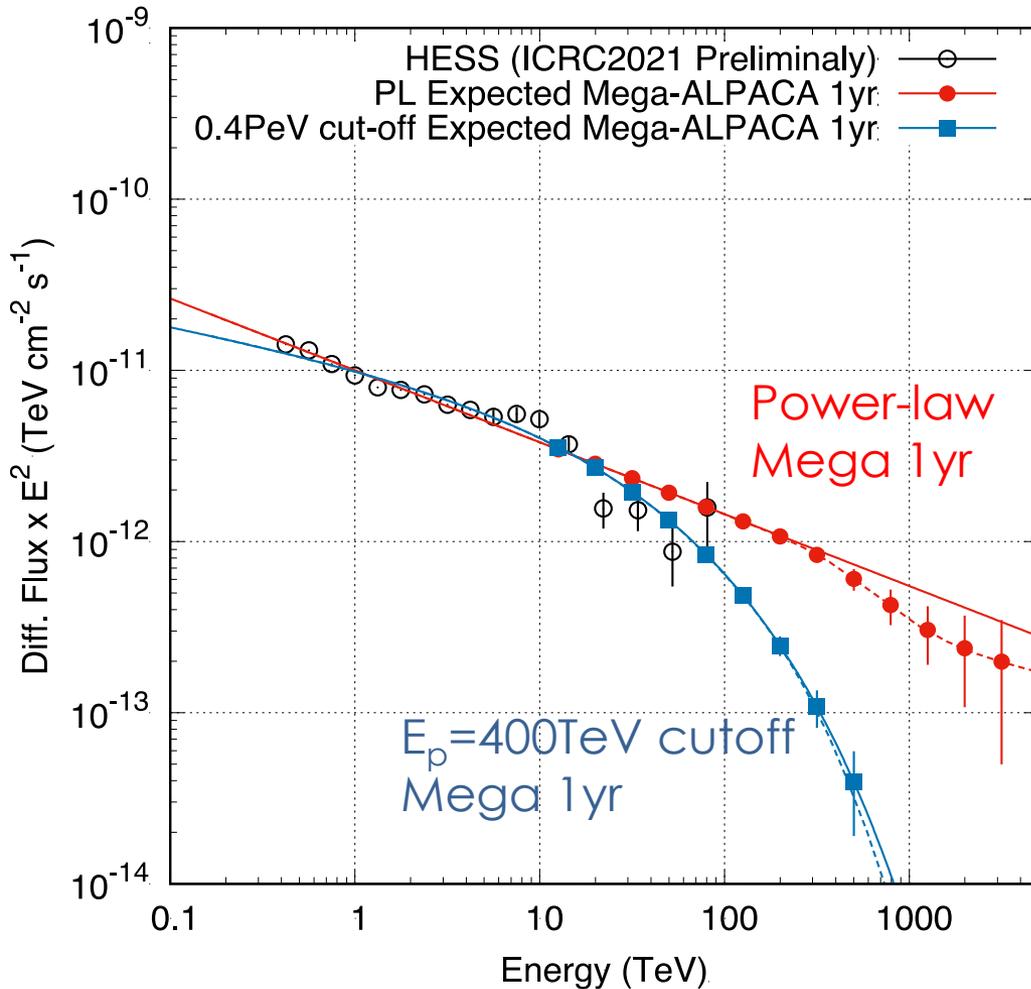
- 銀河系内PeV宇宙線起源(ペバトロン)候補のカタログ
(銀河中心領域、星形成領域、超新星残骸 ...)
- 銀河面からのPeV領域拡散ガンマ線の詳細観測
 - 銀河宇宙線の起源・伝搬・加速機構・加速限界の解明へ
- 近傍スターバースト銀河の宇宙線加速の証拠発見
- 銀河ハロー超重ダークマターの探索
- 太陽圏とその近傍における宇宙線の流れの解明
- 宇宙線を利用した太陽近傍磁場の構造解析
- 宇宙線を用いた宇宙天気予測の実用化

南天における観測対象

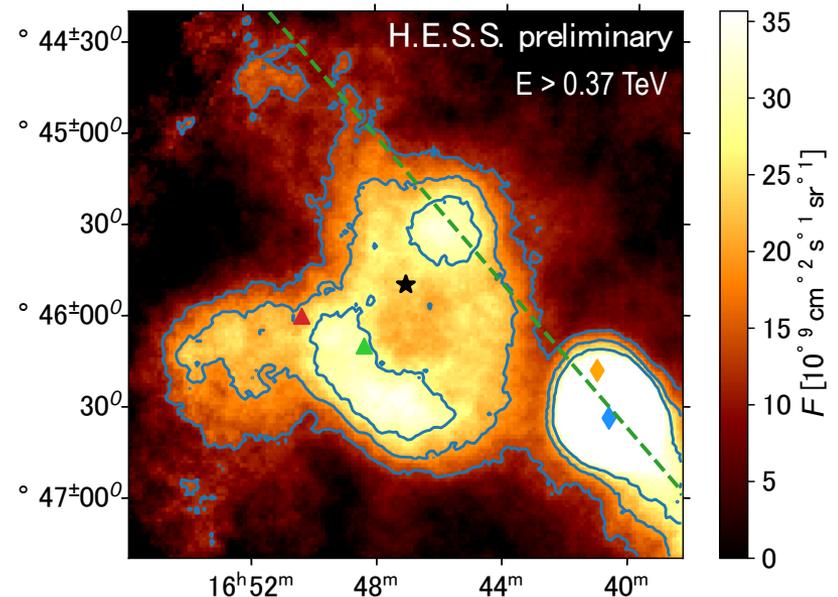
- 銀河系内のペバトロン候補
 - Westerlund 1 (Massive star cluster)
 - 銀河系中心領域 (Central molecular zone)
 - H.E.S.S. 天体 (UNID, SNR, PWN...)
- 銀河面からの拡散ガンマ線
- 銀河系中心ダークマターハロー
- 近傍銀河天体(スターバースト銀河)
 - Cen A, NGC 253, LMC
- 宇宙線異方性の精密観測
- “太陽の影”による宇宙天気予測
 - ※但し、高密アレイが必要 +3000SDs

Westerlund 1 (Massive Star Cluster)

Westerlund 1 ($D=3.9\text{kpc}$, $\text{Dec}=-46^\circ$)



- ✓ Distance 3.9kpc
- ✓ Age 3.5 – 5 Myr
- ✓ Good PeVatron candidate
- ✓ Diffuse GeV emission

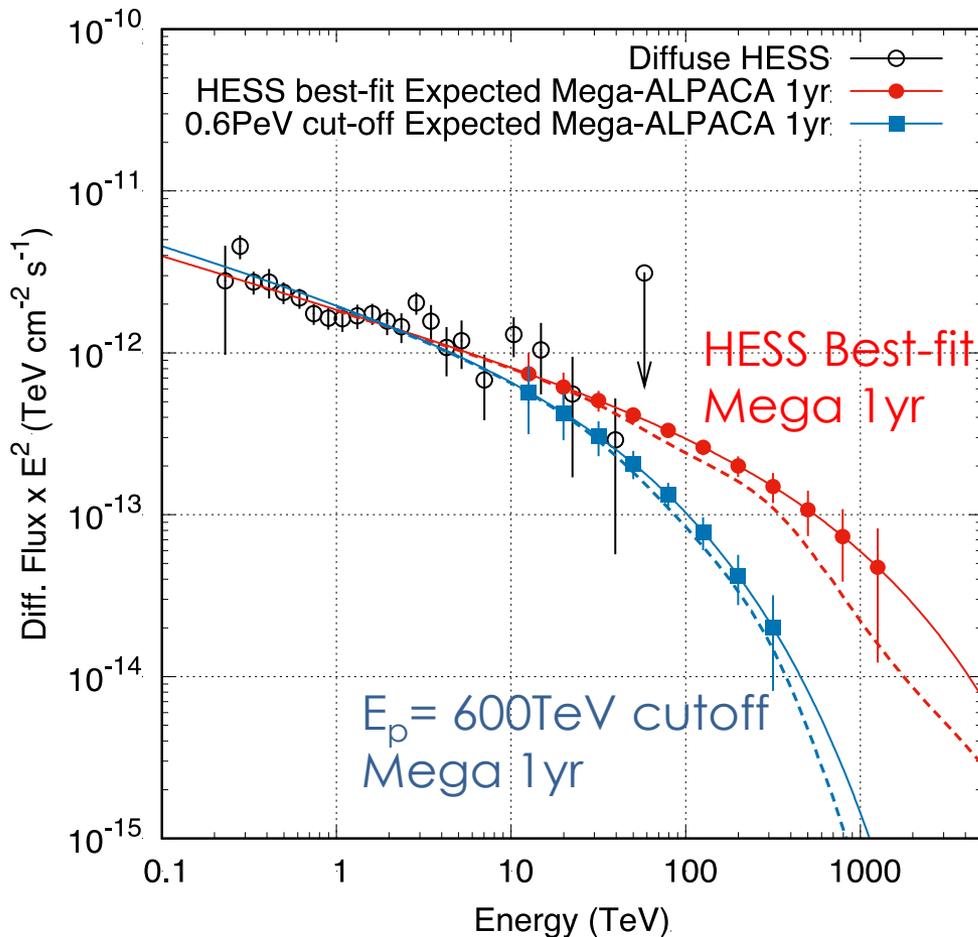


- ★ Westerlund 1
- 4FGL sources
- ◆ HESS J1640–465
- ◆ HESS J1641–463
- ▲ PSR J1648–4611
- ▲ PSR J1650–4601

Mohrmann (H.E.S.S. Collab.), ICRC2021
Aharonian+, Nature Astronomy, 3, 561 (2019)

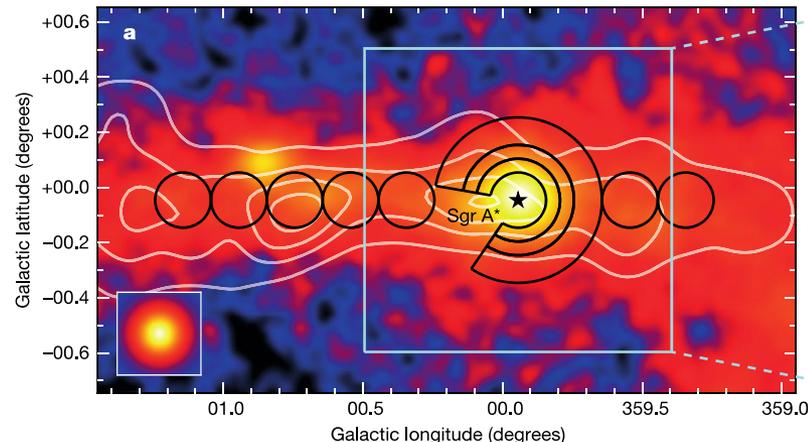
Galactic Center

Galactic Center (Diffuse)



- ✓ Distance 8 kpc
- ✓ Diffuse component
- ✓ Good PeVatron candidate
- ✓ Maximum proton energy?

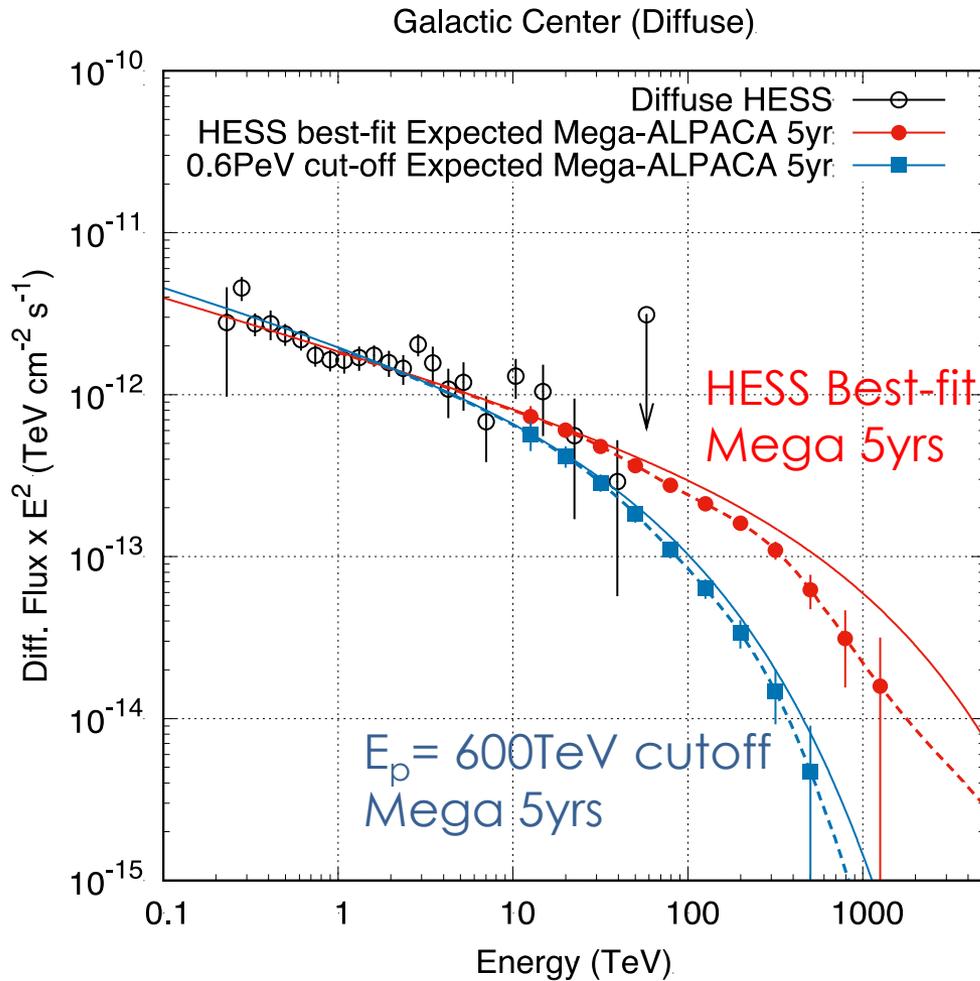
$$\frac{E_{\text{max}}^{\gamma}}{E_{\text{max}}^p} \sim O(1/10)$$



Abramowski+ (H.E.S.S.), Nature (2016)

“Acceleration of petaelectronvolt protons in the Galactic Centre”

Attenuation due to Pair Production



Vernetto+, PRD, 94, 063009 (2016)

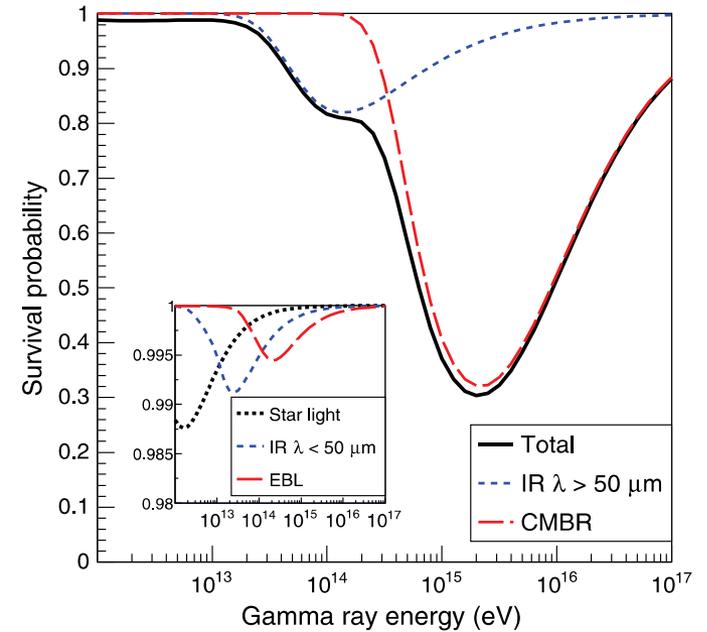
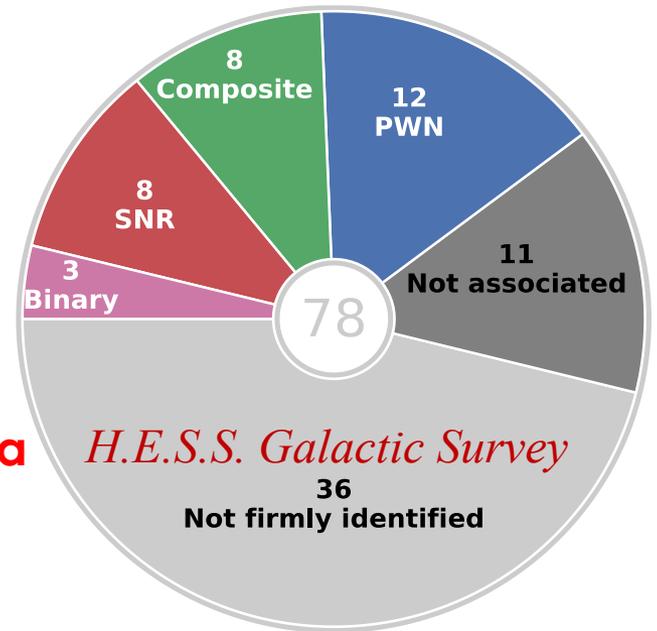
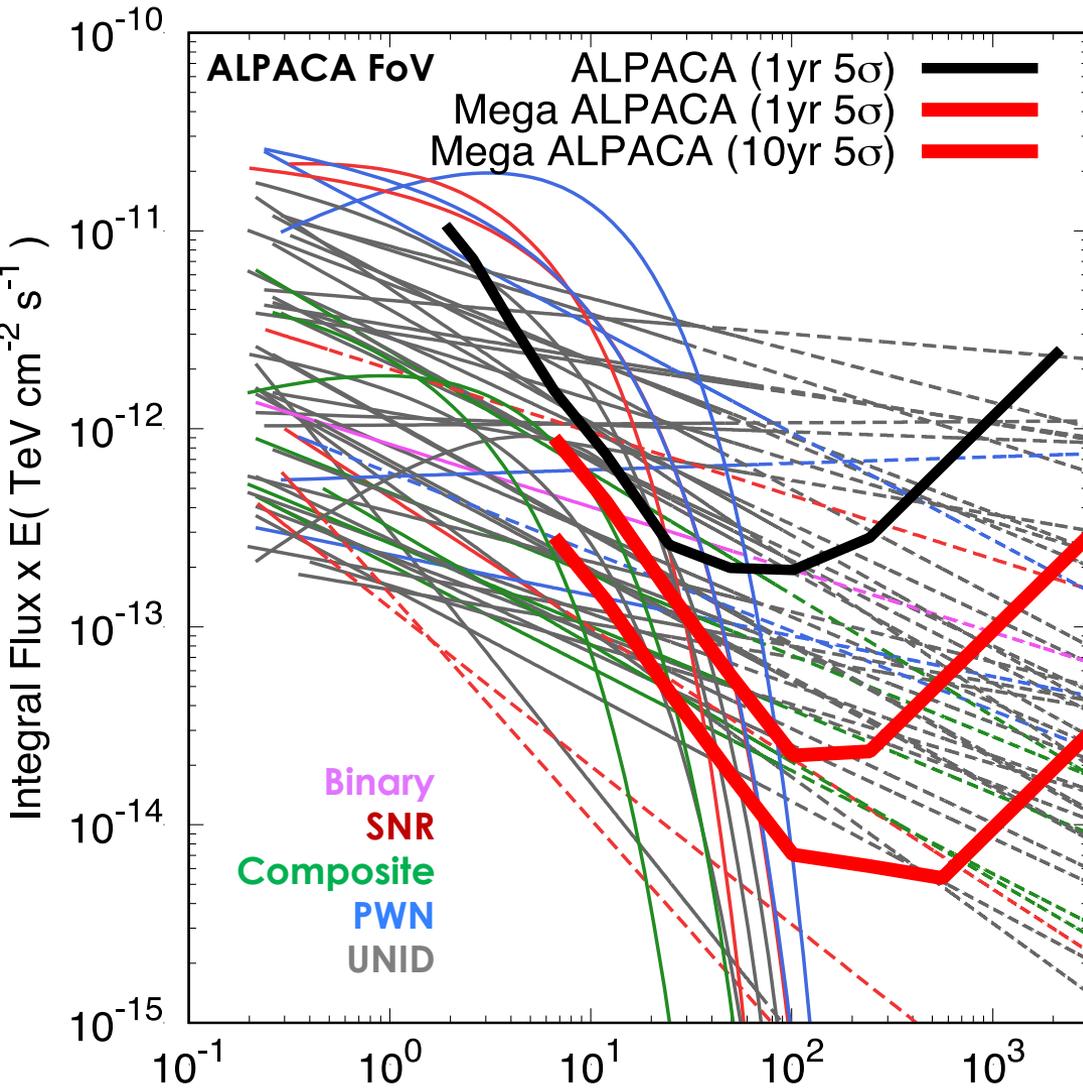


FIG. 12. Survival probability of gamma rays for a trajectory from the GC to the Sun, plotted as a function of the gamma ray energy. The contributions of different radiation fields are shown. The inset shows the contributions of starlight, infrared radiation with wavelength $\lambda < 50 \mu\text{m}$ and EBL.

H.E.S.S. Gamma-ray Sources



Mega
1 yr

Mega
10 yrs

A&A 612, A1 (2018)

hard spectrum (index~2)
+ source extension
+ molecular cloud
→ **PeVatron**

>40 sources above 100TeV PeVatron Survey

Galactic Diffuse Gamma Rays

高エネルギー宇宙線

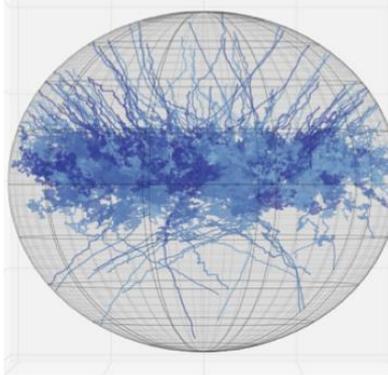
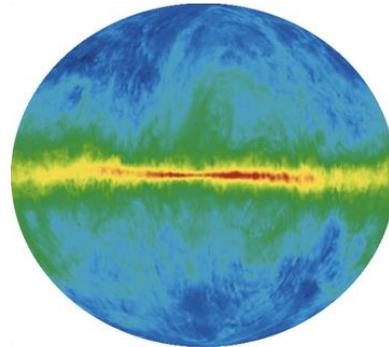


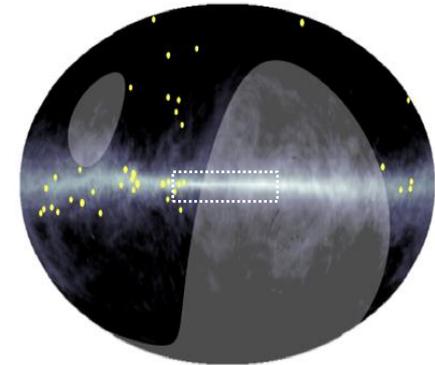
Figure from slide presented by A. Kääpä (Bergische Universität Wuppertal) at CRA2019 workshop

星間物質



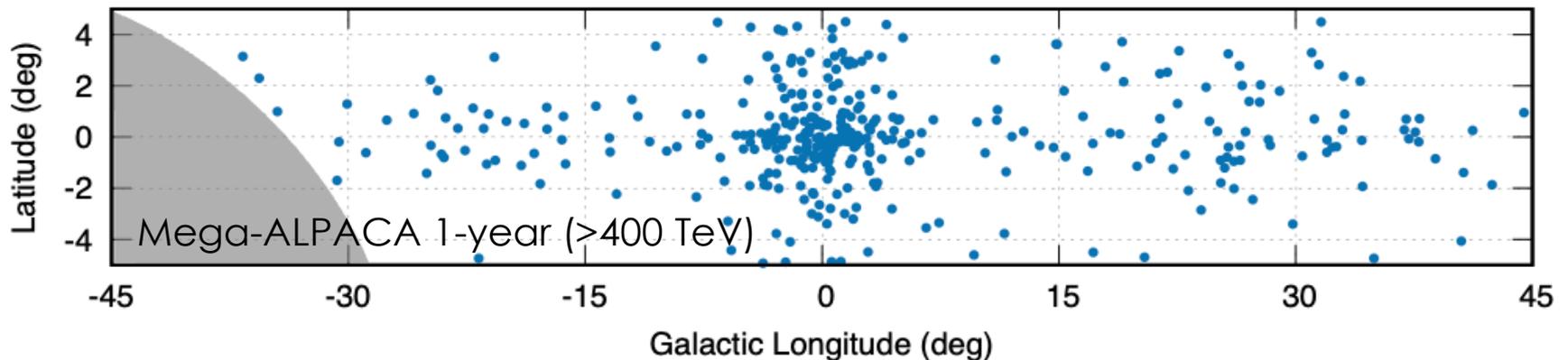
Radio (21cm) HI Map
Hartmann et al. (1997)
Dickey & Lockman (1990)

高エネルギーガンマ線



Tibet AS γ

Expected >400 TeV (Space-Dependent CR model)



Galactic Diffuse Gamma Rays

高エネルギー宇宙線

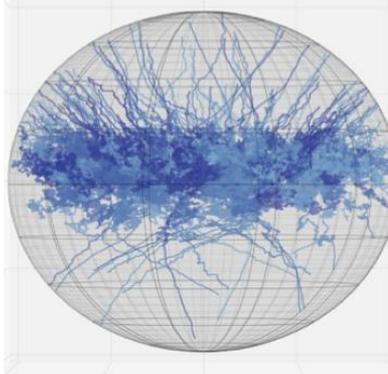
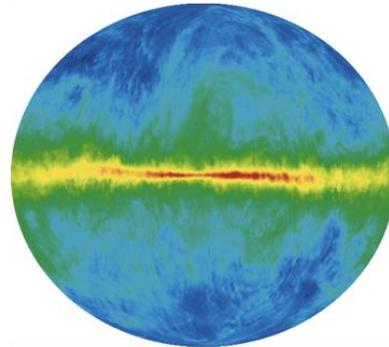


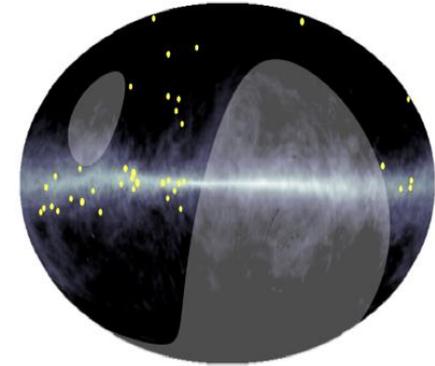
Figure from slide presented by A. Kääpä (Bergische Universität Wuppertal) at CRA2019 workshop

星間物質

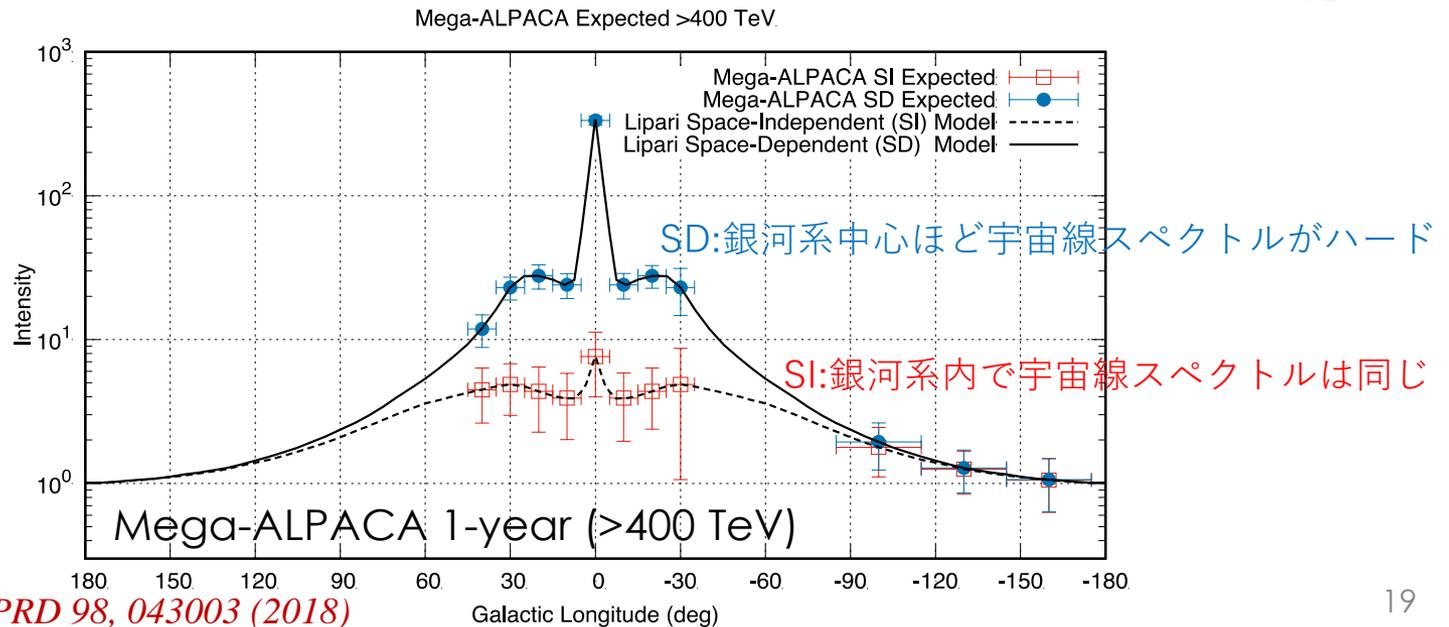


Radio (21cm) HI Map
Hartmann et al. (1997)
Dickey & Lockman (1990)

高エネルギーガンマ線



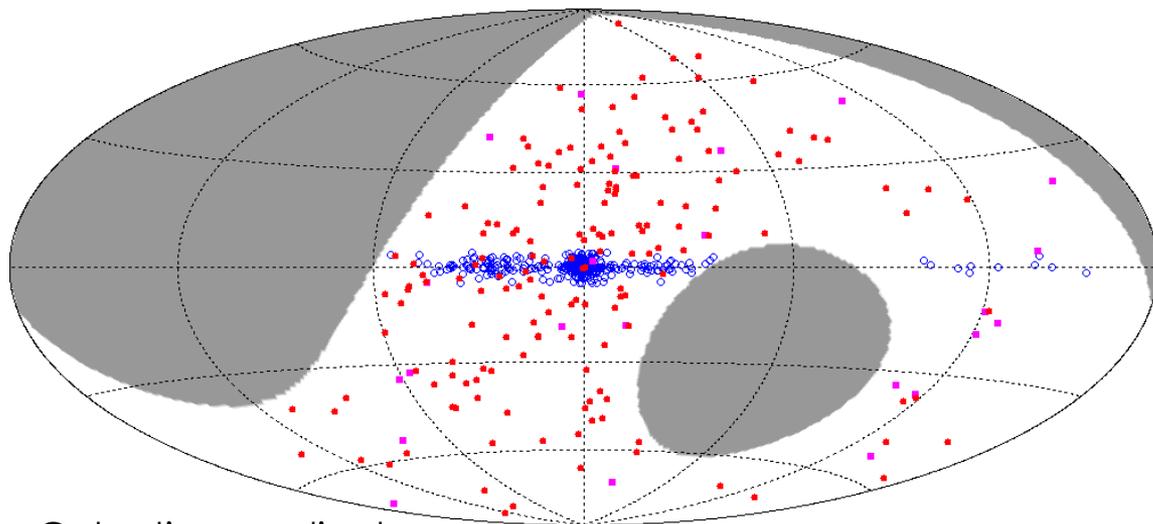
Tibet AS γ 400-1000 TeV



Dark Matter Halo ($E > 400 \text{ TeV}$)

*Murase et al.,
PRL 115, 071301 (2015)*

Mega-ALPACA 1 year ($>400 \text{ TeV}$)



Galactic coordinate

- Dark Matter Halo (Murase 2015)
- Galactic Diffuse γ (Lipari 2018)
- Background Noise

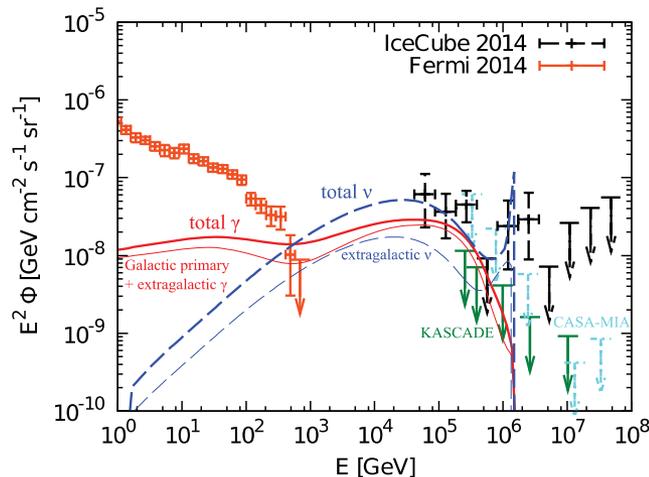
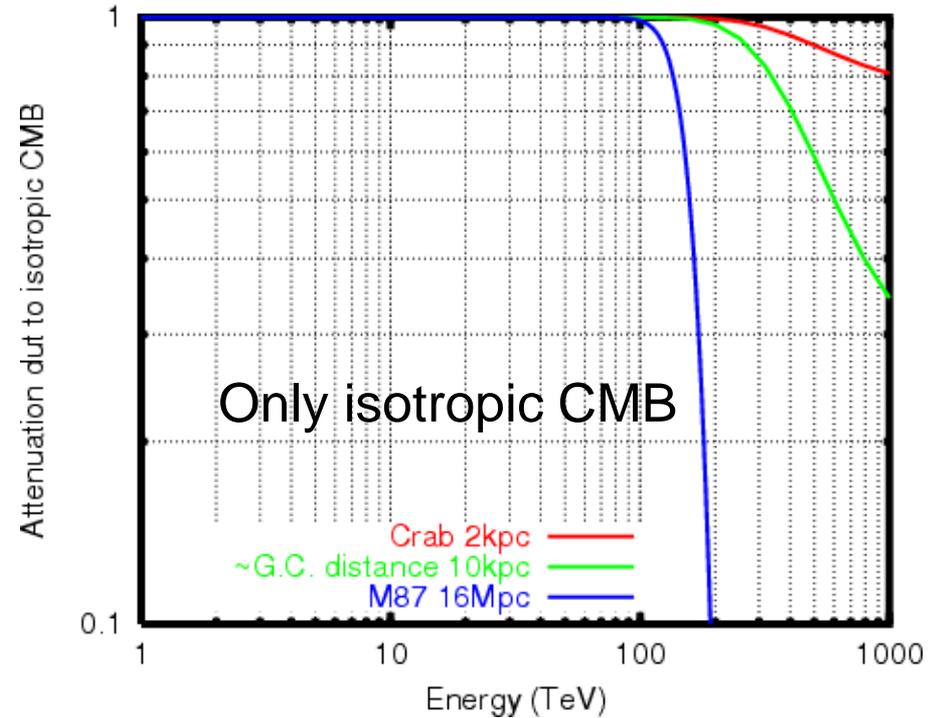
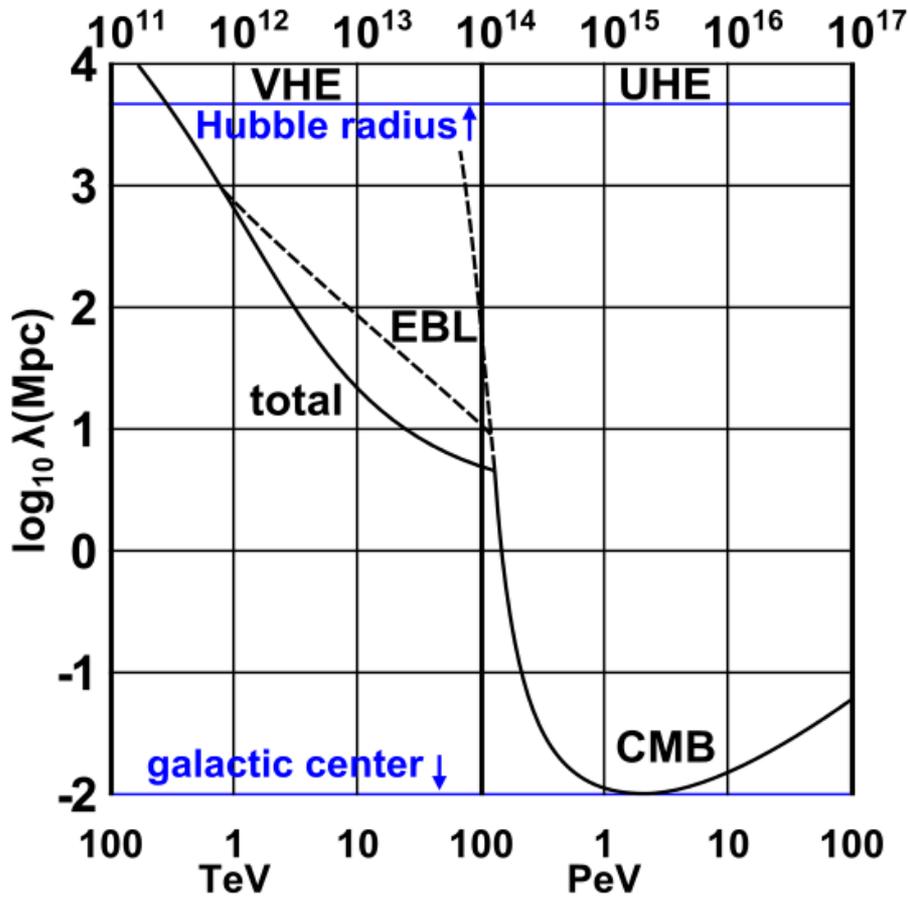


FIG. 1 (color online). Diffuse all-flavor neutrino and γ -ray intensities expected in the VHDM scenario. The ES13 model is assumed with $\tau_{\text{dm}} = 3.0 \times 10^{27} \text{ s}$. The total (thick dashed line) and extragalactic (thin dashed line) contributions to the cumulative neutrino background are shown with the observed data. The expected γ -ray background is also shown (thick solid) with the latest *Fermi* data. We also show contributions of extragalactic cascaded γ rays and direct γ rays from Galactic VHDM, which are not affected by uncertainty of Galactic magnetic fields. KASCADE and CASA-MIA γ -ray limits are indicated.

低バックグラウンド(宇宙線)ノイズでの観測

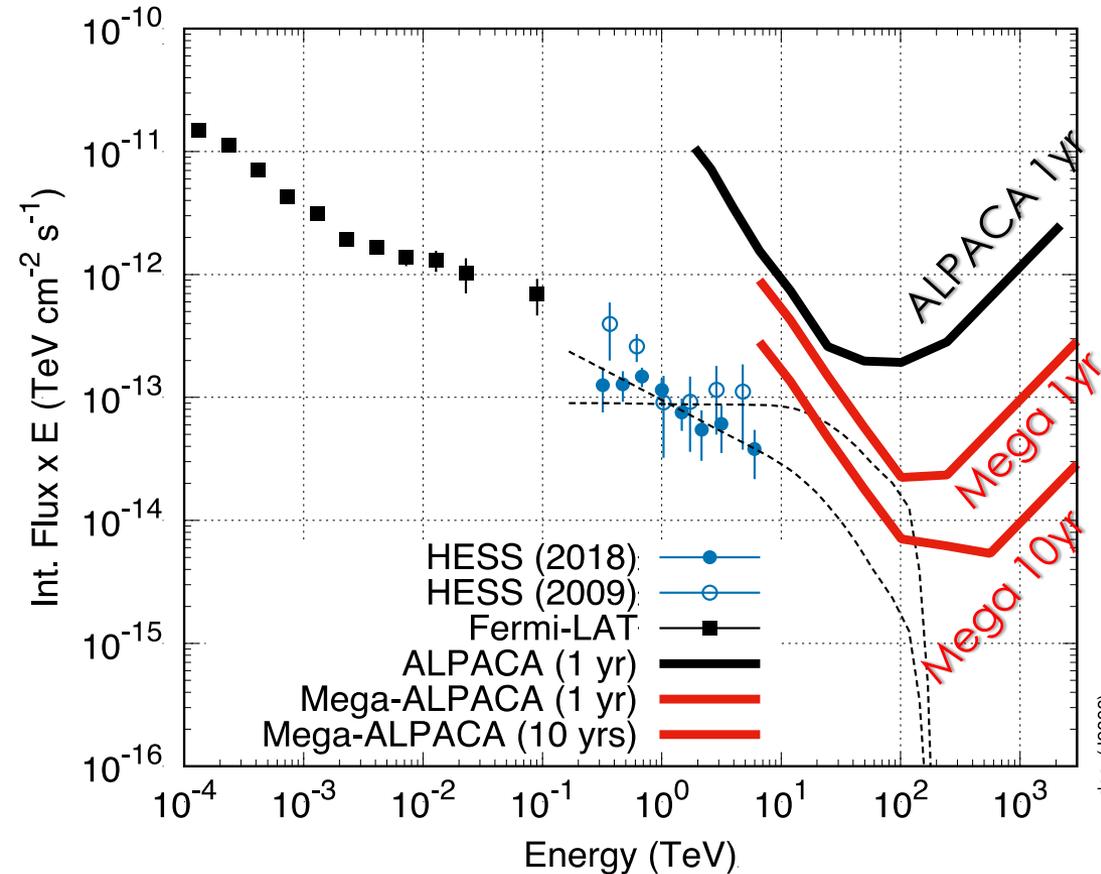
VHE-UHE Gamma-ray Attenuation



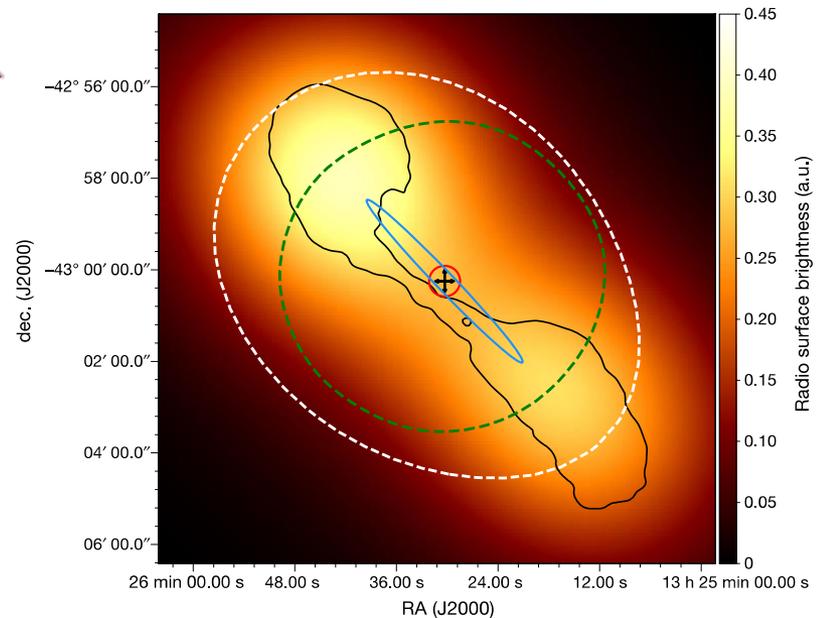
銀河系内および銀河系近傍の宇宙の観測

Starburst Galaxy: Centaurus A

CenA (D=3.5 Mpc, Dec=-43°)



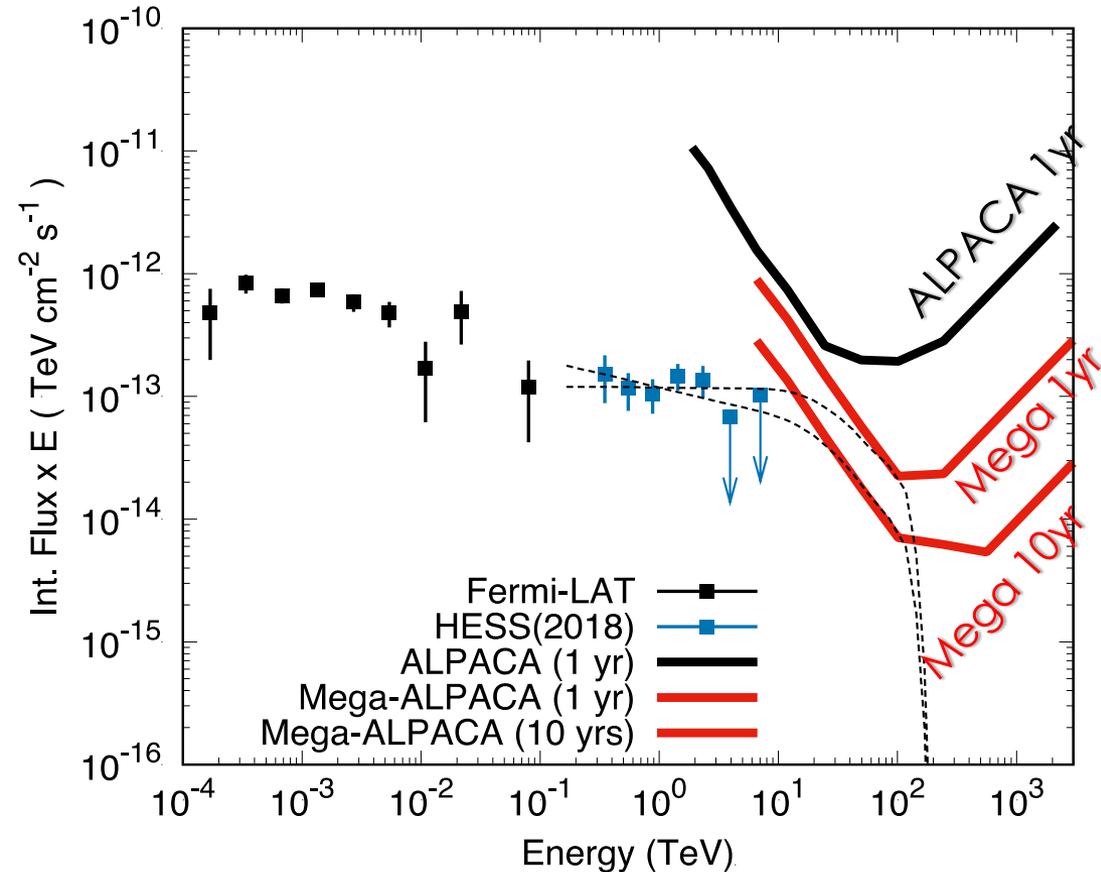
- ✓ Distance 3.5 Mpc
- ✓ Relativistic jets
- ✓ Hard spectral index
- ✓ Origin of UHECRs?



Aharonian+ (H.E.S.S.), ApJ, 695, L40 (2009)
Sahakyan+ (Fermi-LAT), ApJ, 770, L6(2013)
Abdalla+ (H.E.S.S.), A&A, 619, A71 (2018)
Abdalla+ (H.E.S.S.), Nature, 582, 356 (2020)

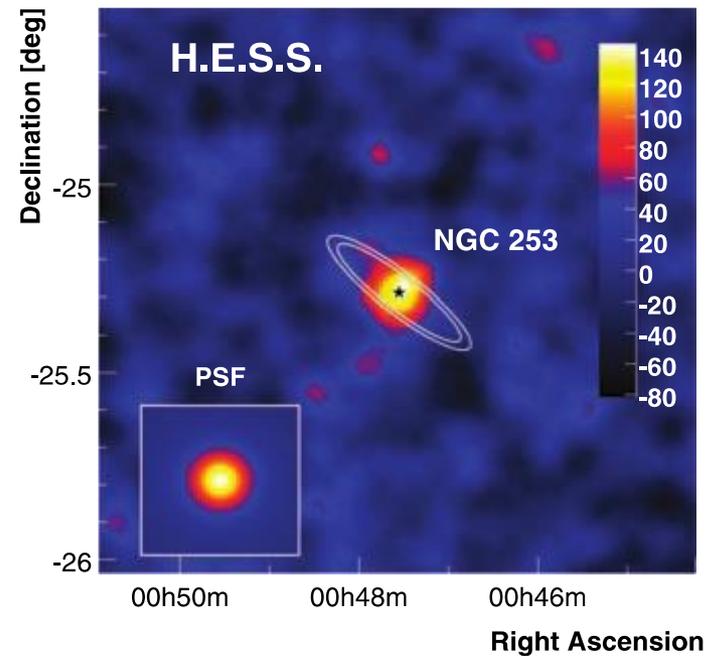
Starburst Galaxy: NGC 253

NGC 253 (D=3.5Mpc, Dec=-25°)



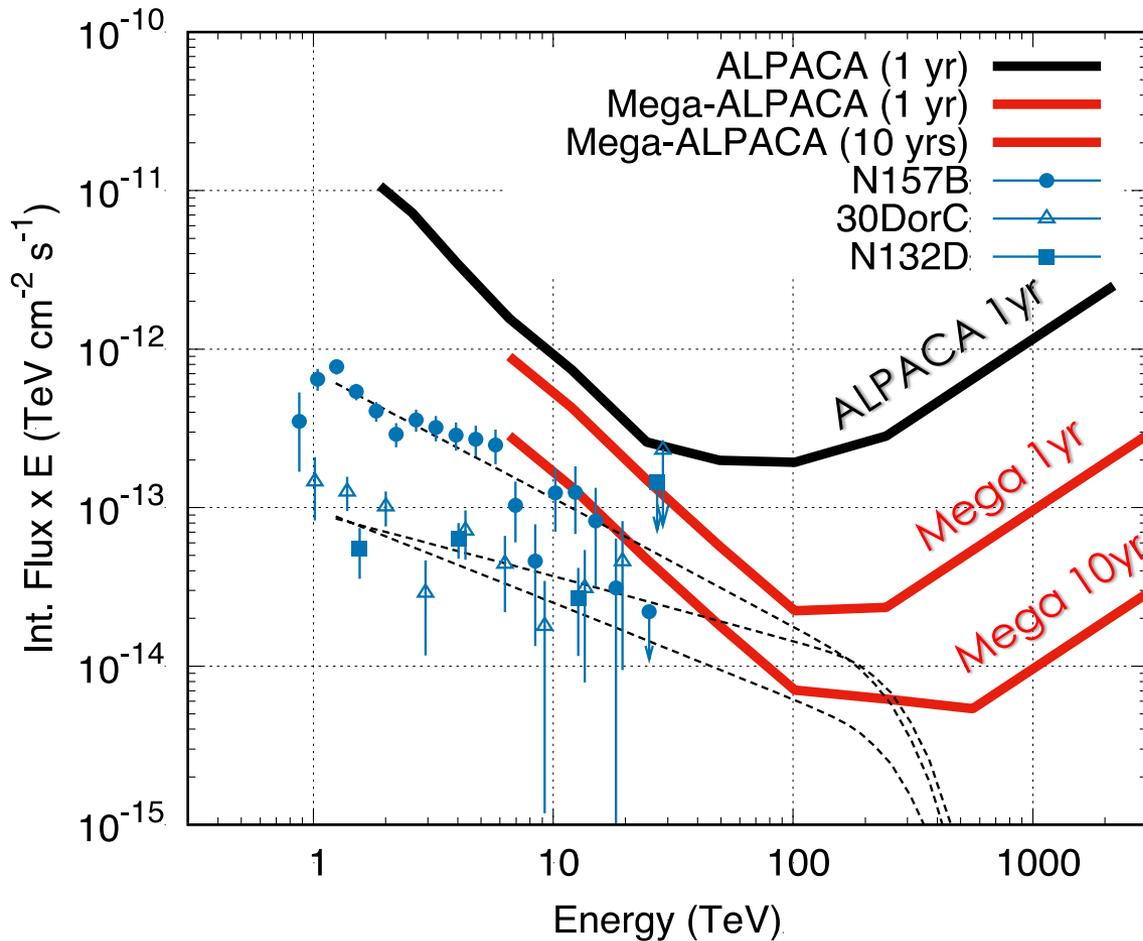
- ✓ Distance 3.5 Mpc
- ✓ Spiral galaxy
- ✓ Hard spectral index
- ✓ Origin of UHECRs?

Acero+ (H.E.S.S.), Science, 326, 1080 (2009)
Abdalla+ (H.E.S.S.), A&A, 617, A73 (2018)



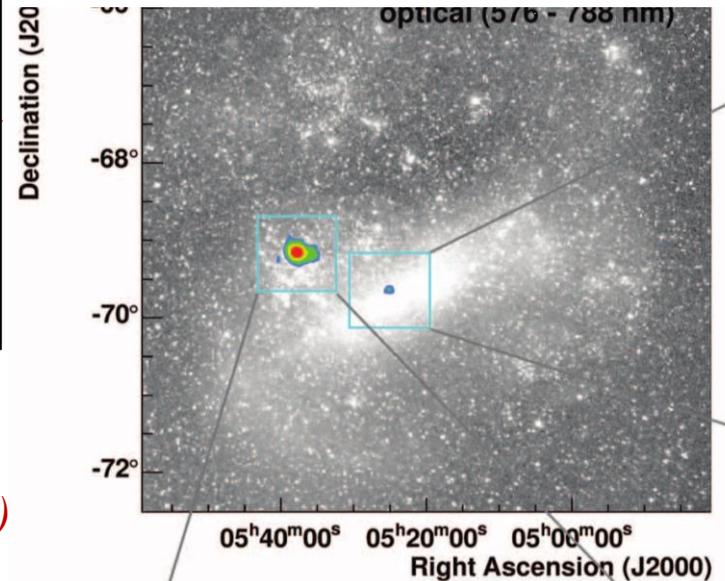
Large Magellanic Cloud (LMC)

LMC (D=50kpc, Dec=-69°)

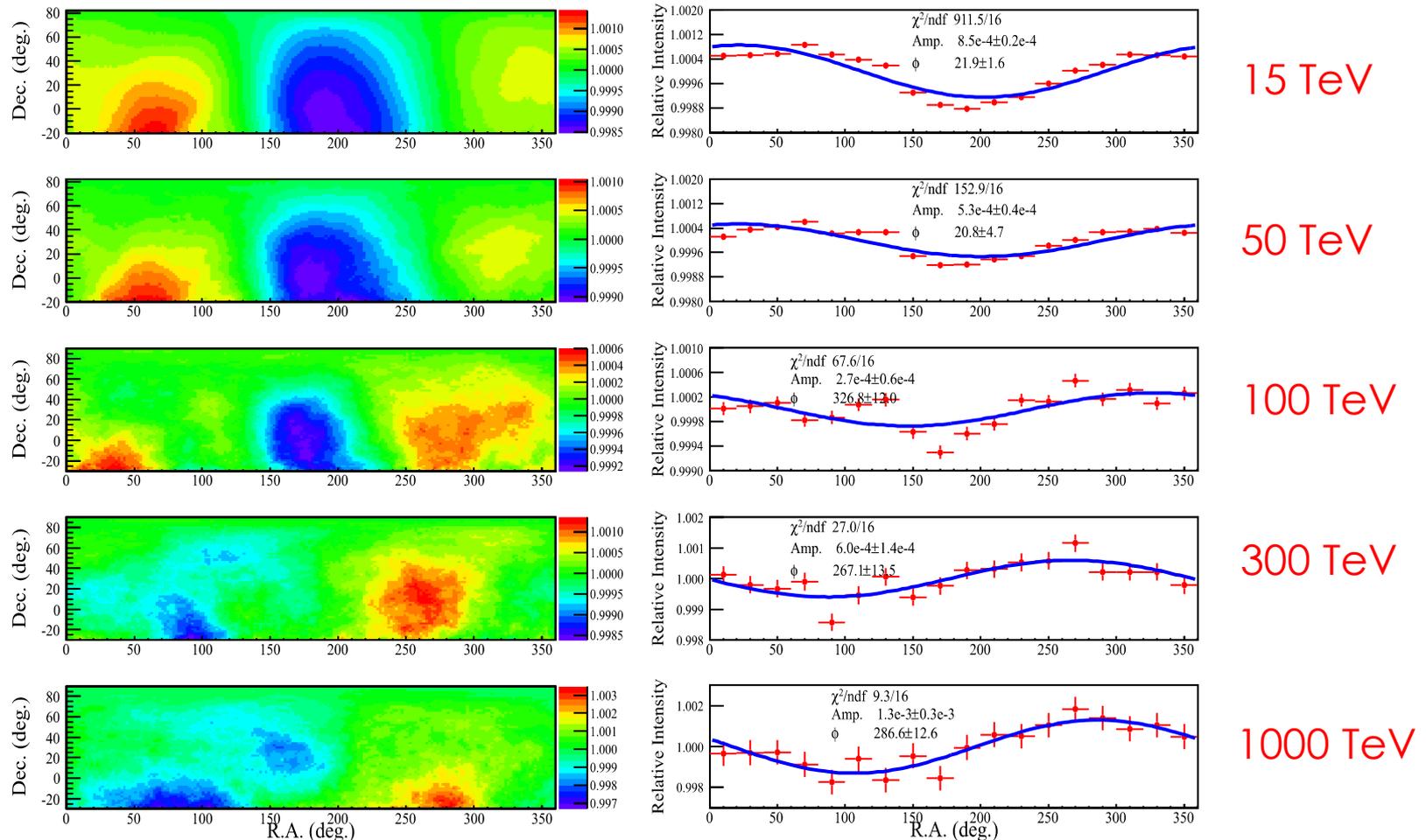


Abramowski+(H.E.S.S.), Science, 347, 406 (2015)

- ✓ Distance 50 kpc
- ✓ Declination -69°
(Large zenith angle)
- ✓ 30 Dor C (Superbubble)
N 157B (PWN)
N 132D (SNR)



宇宙線異方性の観測 Tibet AS γ (北天)



Amenomori+, ApJ, 836, 153 (2017)

~0.1%の異方性 → 起源は？

広エネルギー領域で南北両天の観測が重要！

宇宙線異方性の観測(南天)

Amenomori+(Tibet AS γ), Science, 314, 439 (2006)

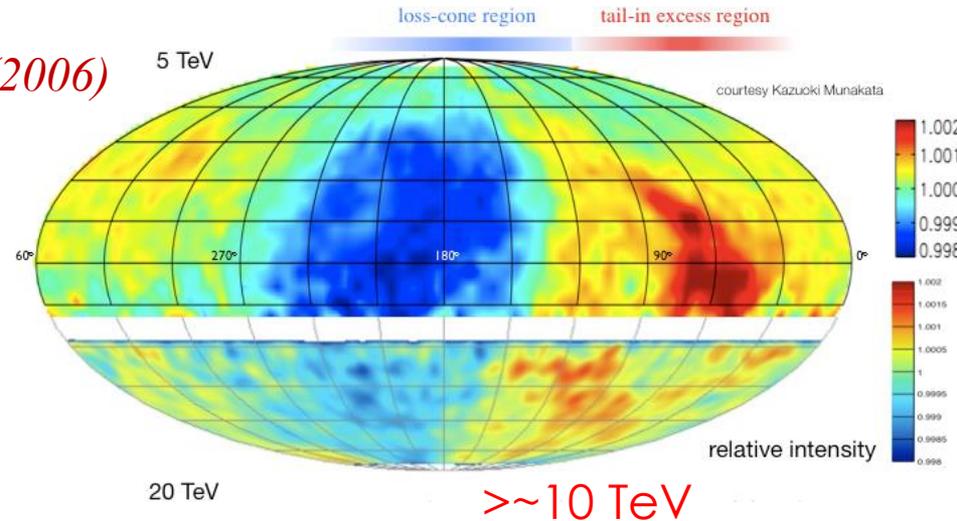
Abbasi+(IceCube), ApJL, 718, L194, (2010)

Tibet + IceCube combined

→ Local interstellar medium (LISM)

での粒子分布が起源？

太陽圏磁場の影響



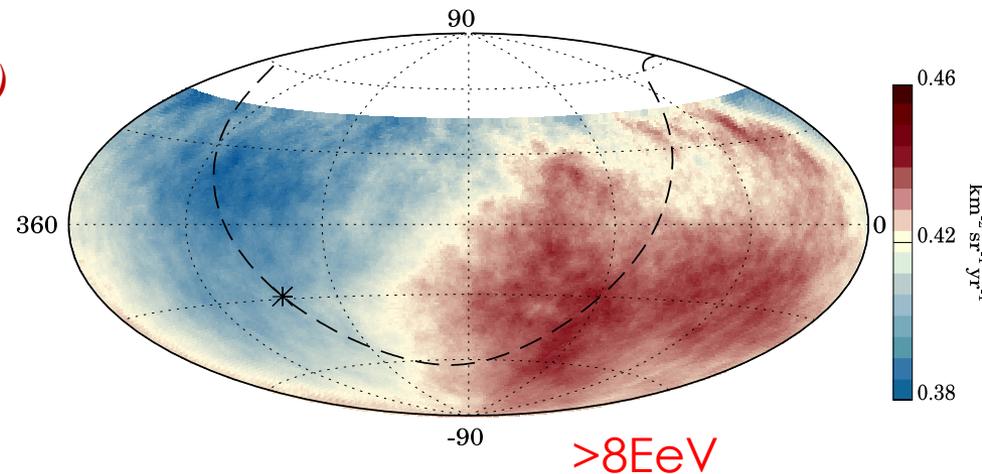
Auger Collabo., Science, 357, 1266 (2017)

Augerダイポール分布

→ 銀河磁場の曲がり方を考慮すると

2MRS銀河カタログの

flux-weighted dipoleの方向と一致

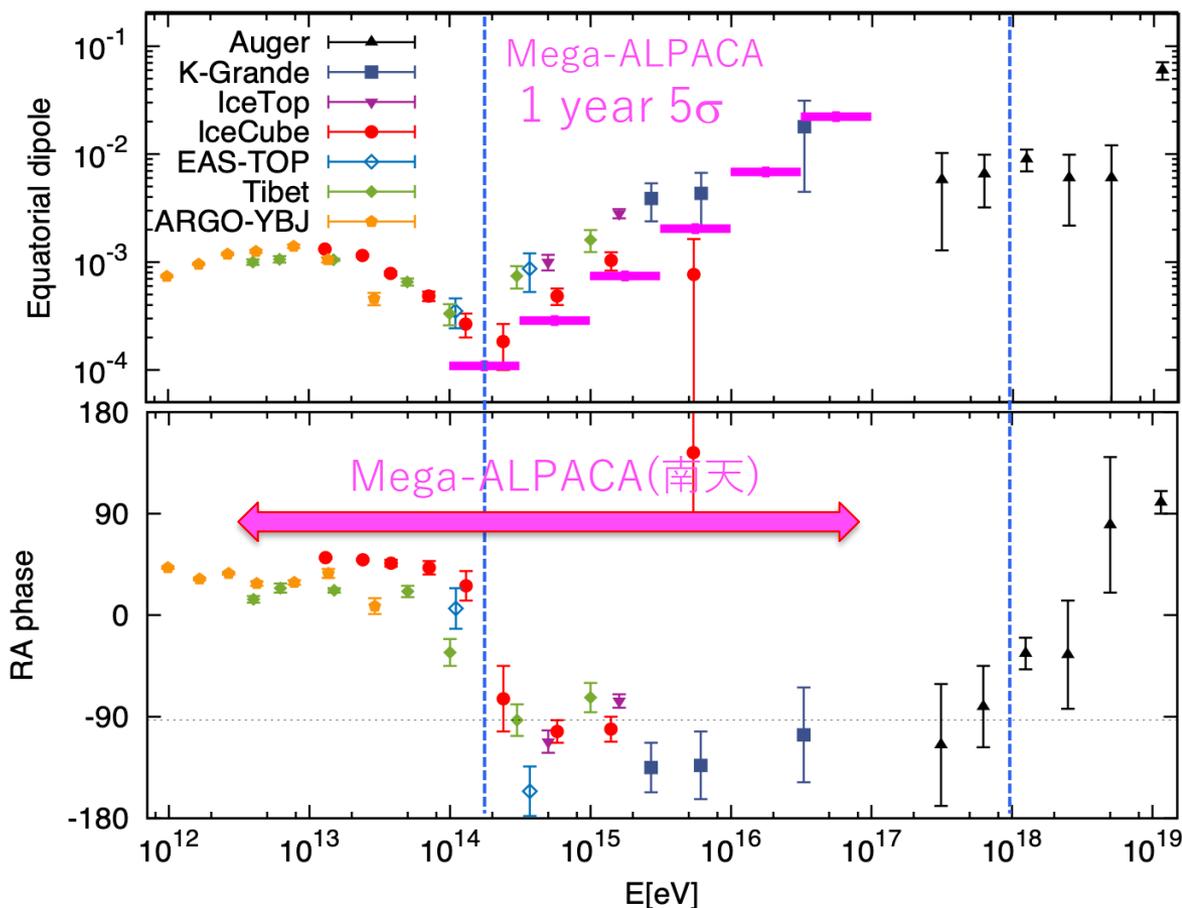


宇宙線異方性のエネルギー依存

局所星間物質分布
+太陽圏磁場?

銀河系内の
ソース分布?

銀河系外物質分布
+銀河磁場?



Mollerach & Roulet
arXiv:1710.11155

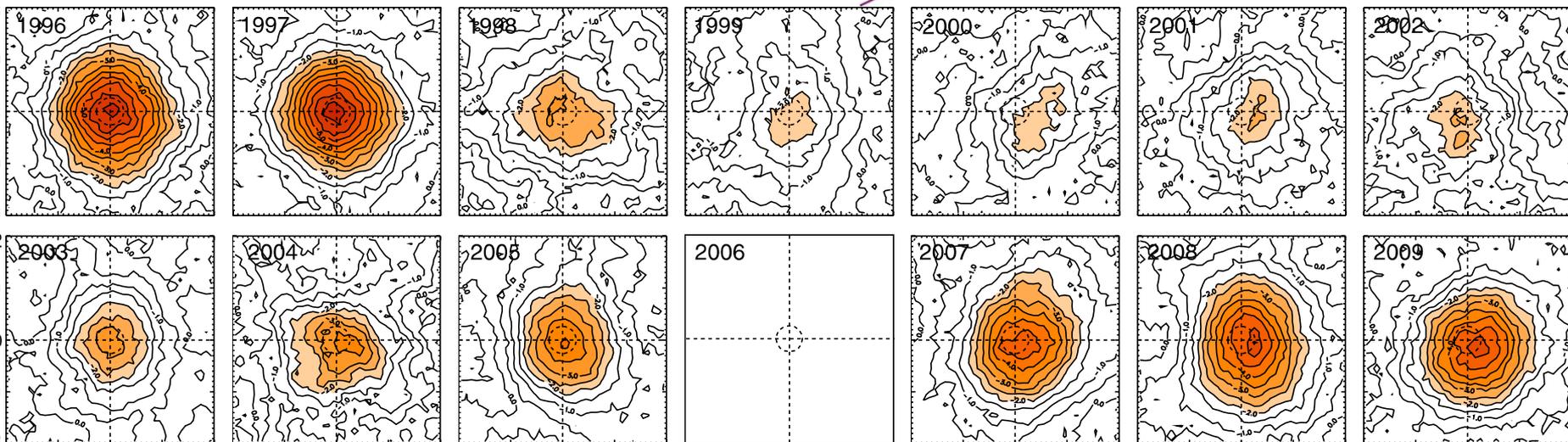
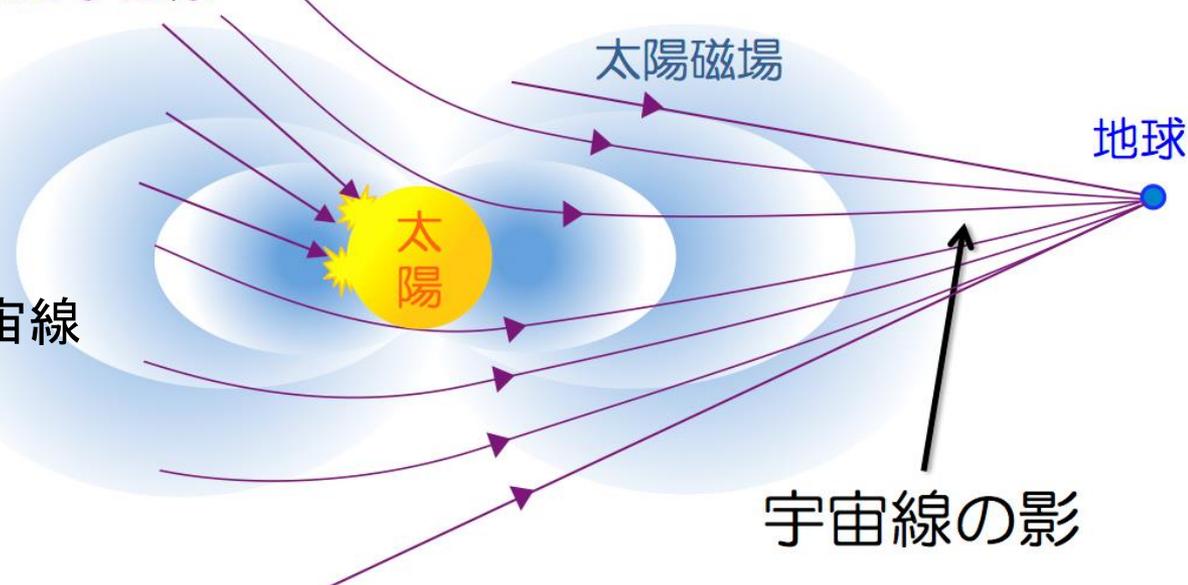
南北両天の・広エネルギー領域で観測が重要

太陽の影の観測

太陽地球間を通過する宇宙線を用いた太陽磁場構造のリモートセンシング

銀河宇宙線

Amenomori+ (Tibet AS γ), PRL (2013)



太陽磁場構造と良い相関。太陽表面の爆発現象「コロナ質量放出」との相関もあり！
→ Mega-ALPACA で 半日ごとに影の変化をモニター！ 宇宙天気予測への応用

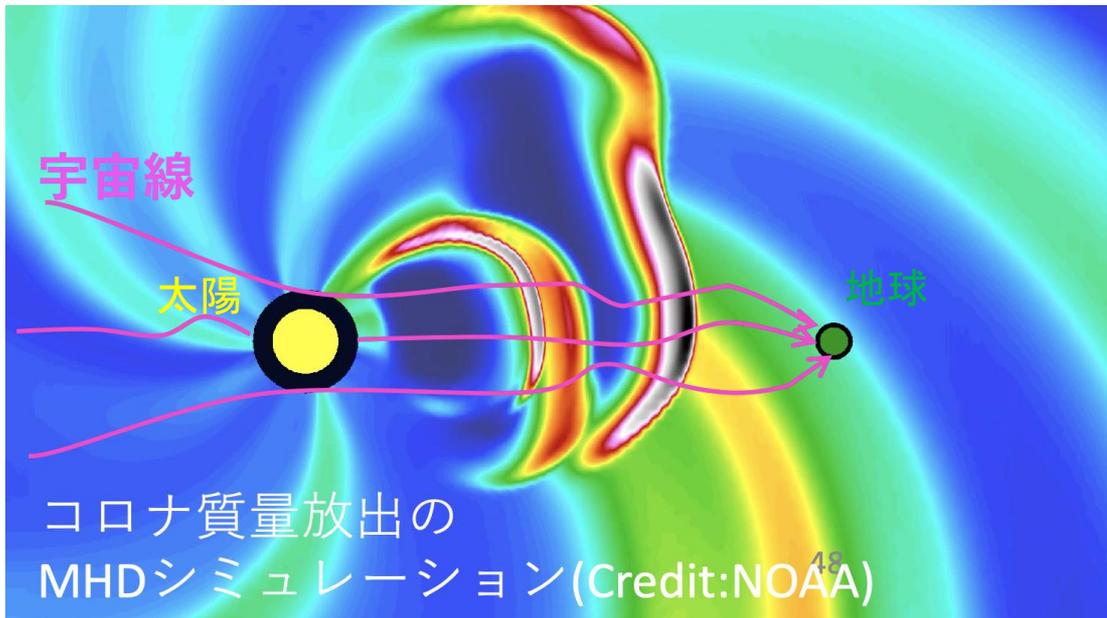
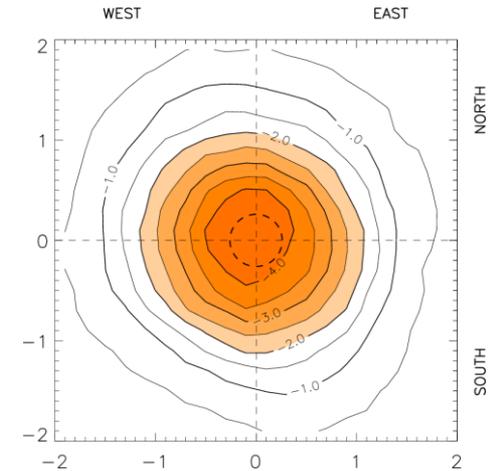
コロナ質量放出(CME)の事前予測

宇宙線から地球と太陽の間の磁場の情報を間接的に得られる!

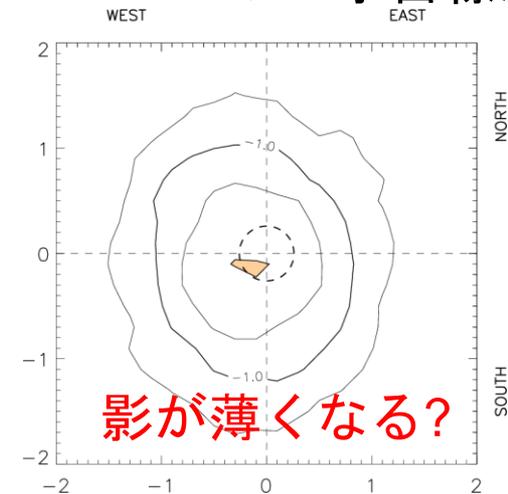
CMEは太陽から地球まで約4日間かかる

→宇宙線は約8分で到着

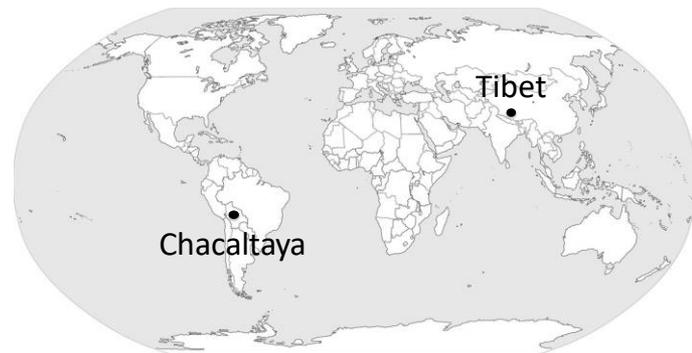
太陽の影のモニターで原理的に予測可能!



CME発生! ↓ 磁場により宇宙線が散乱

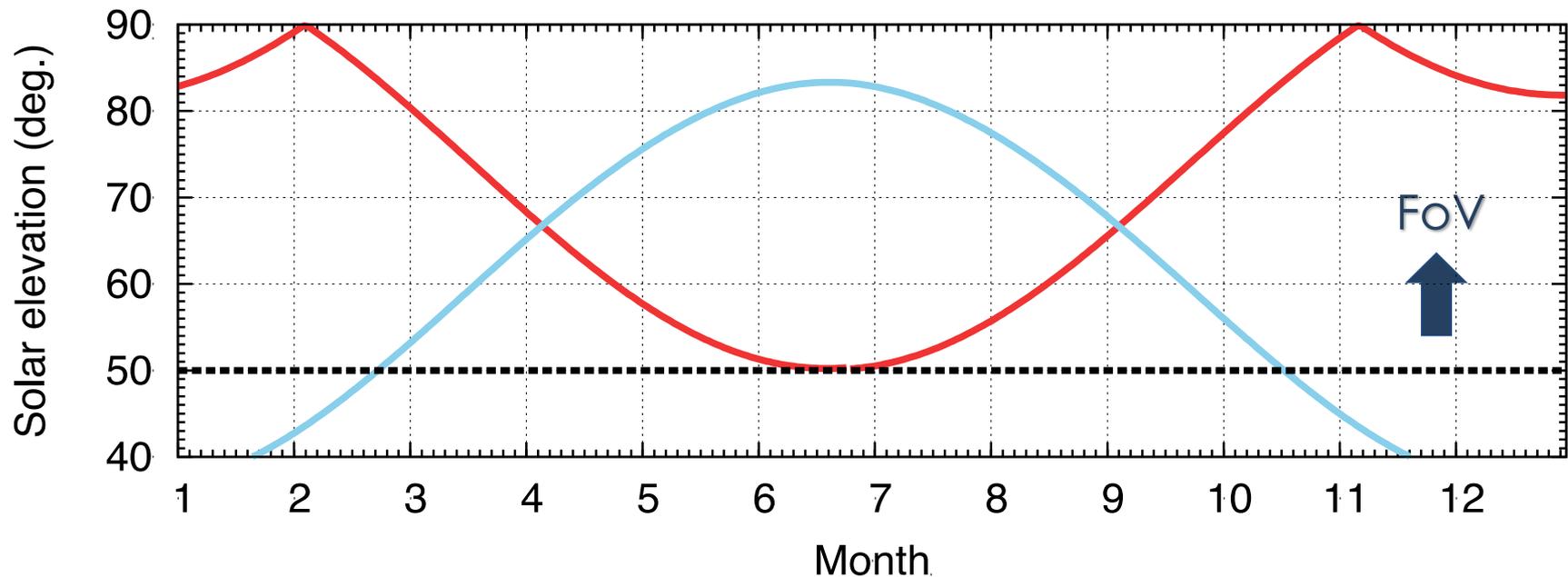


南半球ポリビア(チャカルタヤ山)での「太陽の影」の観測



Chacaltaya ———

Tibet ———



- ✓ 1年を通して観測可能。特に北半球の冬季(10月-2月)をカバー。
- ✓ 太陽の平均高度が高いので宇宙線の統計がチベットでの2倍

太陽の影の有意度の見積もり

- 20σ / 150 days by Tibet-III @極小期
 - Tibet-III 22,000 m² @>3TeV 0.9°
 - Mega ALPACA Dense (15 m spacing)
100万 m² @>5TeV 0.9°
→ 宇宙線の統計45倍
- $20\sigma \cdot \sqrt{45} = 134\sigma$ / 150days @>3TeV@極小期
→ $134/\sqrt{150} = 11\sigma/\text{day}(=8\text{hours}) = 4\sigma/\text{hour}$

Mega-ALPACA 科学目標

- 銀河系内のPeV宇宙線起源(ペバトロン)のカタログ
(銀河中心領域、星形成領域、超新星残骸 ...)
- 銀河面からのPeV領域拡散ガンマ線の詳細観測
 - 銀河宇宙線の起源・伝搬・加速機構・加速限界の解明へ
- 近傍スターバースト銀河の宇宙線加速の証拠発見
- 銀河ハロー超重ダークマターの探索
- 太陽圏とその近傍における宇宙線の流れの解明
- 宇宙線を利用した太陽近傍磁場の構造解析
- 宇宙線を用いた宇宙天気予測の実用化