

Mega ALPACA

Takashi SAKO (ICRR)

Mega ALPACA計画

提 言

未来の学術振興構想（2023年版）

- 1 Mega m² (1 km²)の空気シャワーアレイを、南半球の4,000m以上の標高に建設し、PeVガンマ線天文学を推進する。

- Tibet ASγで実証され、ALPACAで利用する地下水チェレンコフミュオン検出器(MD)を利用して、ハドロン/ガンマ弁別

- 未来の学術振興構想（2023年版）

グランドビジョン18. 宇宙における天体と生命の誕生・共進化の解明

162. 南天におけるPeV領域ガンマ線広視野連続観測(Mega ALPACA)

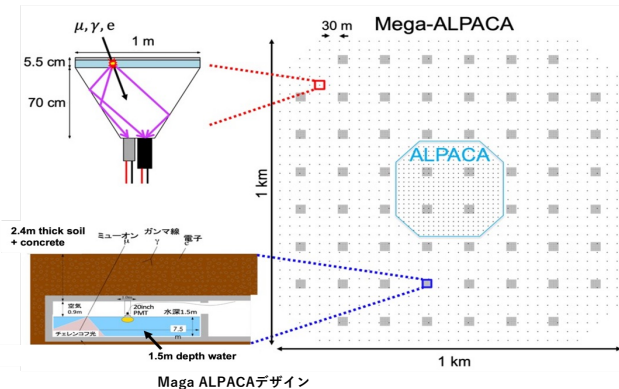


⑯ 宇宙における天体と生命の誕生・共進化の解明

No.	学術の中長期研究戦略の名称	提案者
156	宇宙望遠鏡 JASMINE による近赤外線系列位置・測光天文学で拓く天の川銀河と系外惑星の探究	渡部 潤一（自然科学研究機構・国立天文台首席教授、日本宇宙会議連携会員）
157	惑星科学、生命科学、および天文学に向けた紫外線宇宙望遠鏡計画（LAPYUTA）	中村 昭子（日本惑星科学会会長）
158	国際電波望遠鏡計画 SKAI による現代天文学の開拓	濱田 佳久（自然科学研究機構・国立天文台台長、日本宇宙会議連携会員）
159	惑星間宇宙望遠鏡による新時代のダストフリー天文学の創成	高橋 功（関西学院大学・理学部学部長）
160	CTA 国際宇宙ガンマ線天文台	中畑 隆行（東京大学・宇宙線研究所所長、日本宇宙会議連携会員）
161	30m 光学赤外線望遠鏡 TMT による天文学・宇宙物理学の革新と太陽系外惑星における生命の探求	川合 義紀（大学共同利用機関法人自然科学研究機構・日本宇宙会議連携会員）
162	南天における PeV 領域ガンマ線広視野連続観測（Mega ALPACA）	中畑 隆行（東京大学・宇宙線研究所所長（教授）、日本宇宙会議連携会員）
163	NASA 6m 紫外線可視近赤外線望遠鏡 Habitable Worlds Observatory への参加	佐々 貴志（大阪大学理学研究科教授、日本宇宙会議連携会員）
164	POEMMA 超高エネルギー粒子（γ・宇宙線）の衛星軌道からのステレオ観測	緑川 克実（理化学研究所・光子工学研究センターセンター長）
165	多波長・マルチメッセンジャー観測による初期宇宙探査・銀河時空探査	和田 隆志（国立大学法人次世代学生）

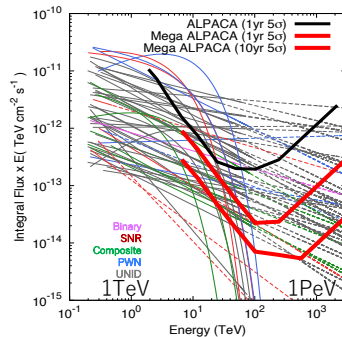
162	南天におけるPeV領域ガンマ線広視野連続観測(Mega ALPACA)(Wide Field-of-View PeV Cosmic Gamma-Ray Survey in the Southern Sky (Mega ALPACA))	マルチメッセンジャー天文学の欠けたワンピースである南天でのPeVガンマ線の観測を実現することで、宇宙線を利用した宇宙・素粒子原子核・太陽地球物理、考古学、防災等の多彩な学術研究領域を発展させる。	研究計画	南天におけるPeV領域ガンマ線広視野連続観測(Mega ALPACA)(Wide Field-of-View PeV Cosmic Gamma-Ray Survey in the Southern Sky (Mega ALPACA))	南米アンデス山脈の高地に総面積1平方キロメートルの観測装置を設置し、未開拓の南天におけるPeV(可視光の1000兆倍のエネルギー)領域宇宙ガンマ線の広視野連続観測を世界最高感度で行う。	宇宙線をPeV領域まで加速している宇宙粒子加速天体の発見とその正体の解明、PeV銀河系内拡散ガンマ線の観測による宇宙線の銀河系内拡散の解明、宇宙線中の太陽の影の観測による宇宙天気予報等が期待される。	マルチメッセンジャー天文学を通して、「人類の知の地平を開く」ことに資する。また、巨大太陽フレアに伴う磁気嵐の到来は、社会インフラへの大脅威であるが、宇宙天気予報の新たなフロップとして社会に貢献する。	【実施計画】 R9-R14:建設期間 R10-R14:部分運用 R15-R25:本格運用 【所要経費】 総額40億円 【実施機関と実施体制】 東大、横浜国大、神奈川大、宇都宮大、信州大、大阪公大、暮田サンアンドレス大、国立情報学研、中部大、都立産技高専、日大、理研、原子力機構、大阪電通大、広島市立大、墨田グアダラハラ大等	⑯
-----	---	---	------	---	--	---	---	--	---

Mega ALPACAデザイン



- 南米・アンデス山中に 1km^2 (1Mm^2)の地表+地下ハイブリッドアレイを建設し $>\text{PeV}$ ガンマ線放射天体を探索
- ボリビアに $82,800\text{m}^2$ のALPACAを建設中。南天sub PeVガンマ線天文学を開始する。

=> **Mega ALPACAのプロトタイプ開発**

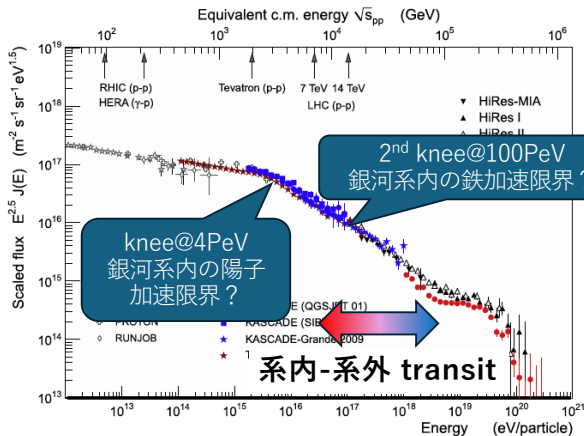


Mega ALPACAの感度



ALPACAサイト近くの候補地

PeV: 電磁波観測のエネルギーフロンティア = 銀河系内宇宙線の加速限界

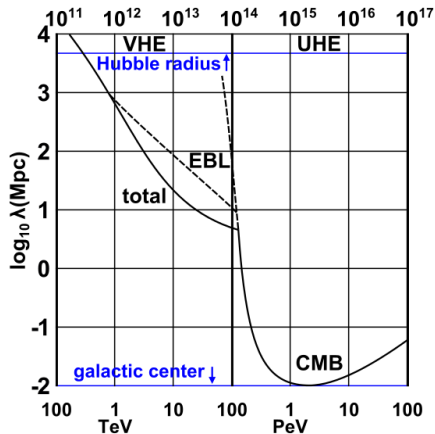


- 4PeV/電荷まで粒子加速する天体は？
- 4PeV/核子 + ISM $\rightarrow$ O(0.4PeV光子)
 $\Rightarrow$ sub-PeVから PeVのガンマ線スペクトル
 観測でkneeの起源（銀河系内宇宙線の加速限界）を解明

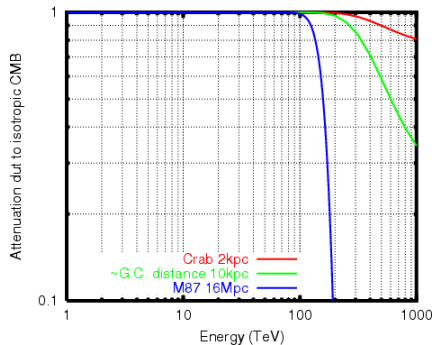
- 4PeV/核子を超える天体は？
- 近傍銀河のガンマ線観測
- 原子核成分質量組成測定
- 暗黒物質崩壊
- 太陽圏の物理・宇宙天気予報

(D'Enterria et al., Astropart. Phys., 35,98-113, 2011)

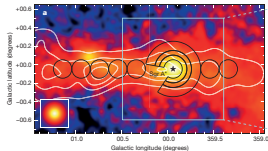
$\gamma\gamma$ 吸収



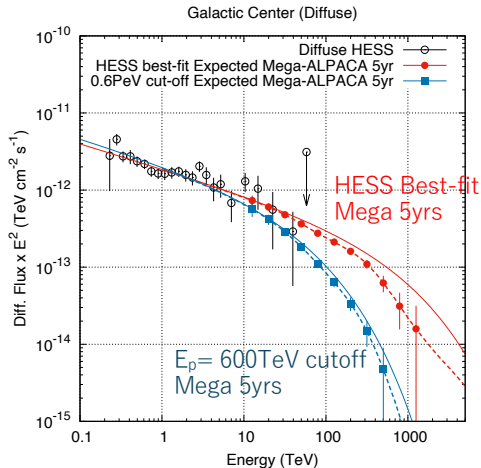
- 1PeV光子の吸収長は10kpc
- 銀河系内が主要な観測対象
($\gamma\gamma$ 反応の最高エネルギーでの検証)



Attenuation due to Pair Production



*Abramowski, et al. (H.E.S.S.),
Nature (2016)*



Vernetto+, PRD, 94, 063009 (2016)

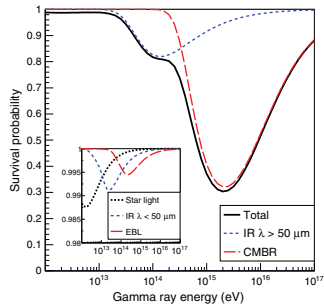


FIG. 12. Survival probability of gamma rays for a trajectory from the GC to the Sun, plotted as a function of the gamma ray energy. The contributions of different radiation fields are shown. The inset shows the contributions of starlight, infrared radiation with wavelength $\lambda < 50 \mu\text{m}$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

Galactic Diffuse Gamma Rays

高エネルギー宇宙線

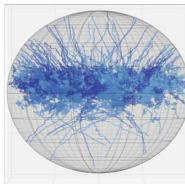
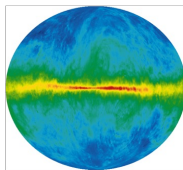


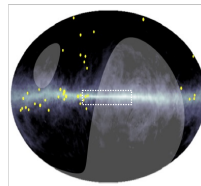
Figure from slide presented by A. Kääpä (Bergische Universität Wuppertal) at CRA2019 workshop

星間物質



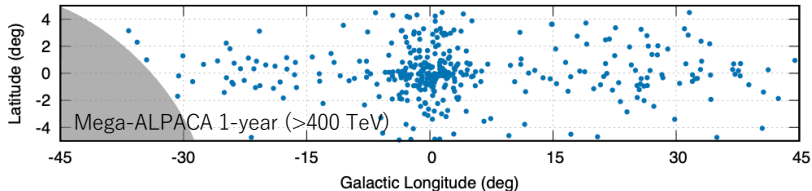
Radio (21cm) HI Map
Hartmann et al. (1997)
Dickey & Lockman (1990)

高エネルギーガンマ線



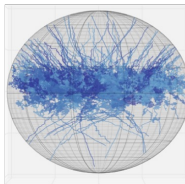
Tibet AS γ

Expected >400 TeV (Space-Dependent CR model)

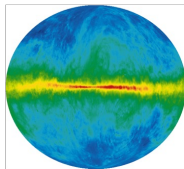


Galactic Diffuse Gamma Rays

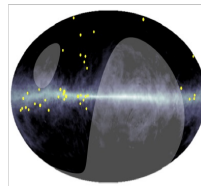
高エネルギー宇宙線



星間物質



高エネルギーガンマ線



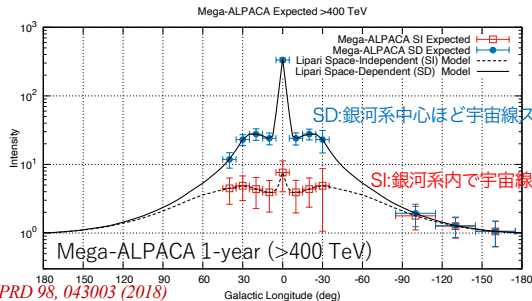
+

=

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

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

Tibet AS γ 400-1000 TeV

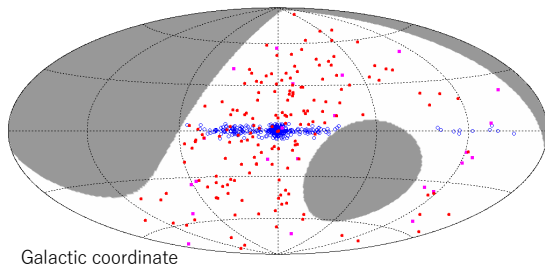


Lipari & Vernetto, PRD 98, 043003 (2018)

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

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

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



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

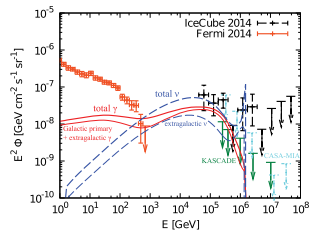
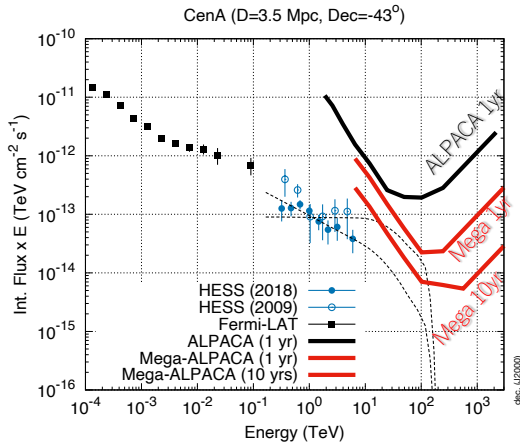


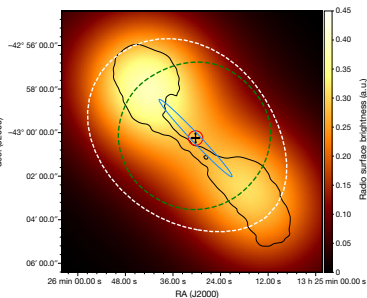
FIG. 1 (color online). Diffuse all-flavor neutrino and γ -ray intensities expected in the VHDM scenario. The ES13 model is assumed with $\tau_{\text{dm}} = 3.0 \times 10^{27} \text{ s}$. The total (thick dashed line) and extragalactic (thin dashed line) contributions to the cumulative neutrino background 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

Starburst Galaxy: Centaurus A



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



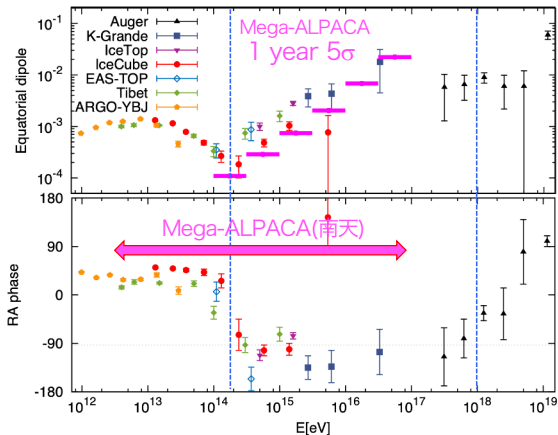
Aharonian+ (H.E.S.S.), ApJ, 695, L40 (2009)
Sahakyan+ (Fermi-LAT), ApJ, 770, L6(2013)
Abdalla+ (H.E.S.S.), A&A, 619, A71 (2018)
Abdalla+ (H.E.S.S.), Nature, 582, 356 (2020)

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?

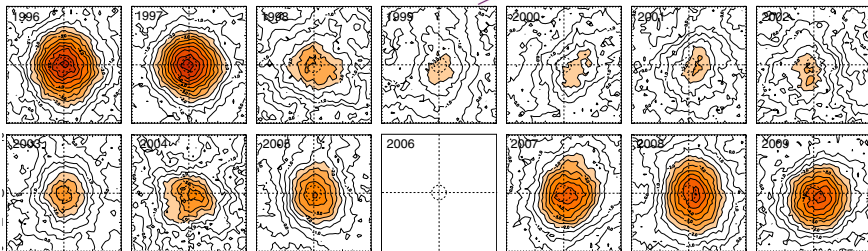
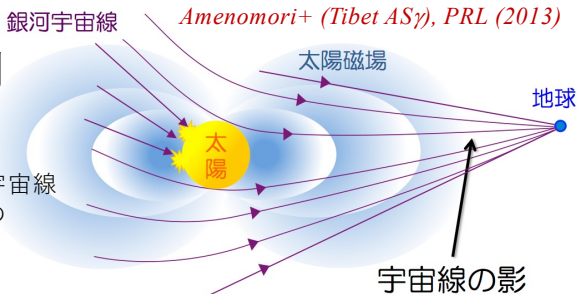


Mollerach & Roulet
arXiv:1710.11155

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

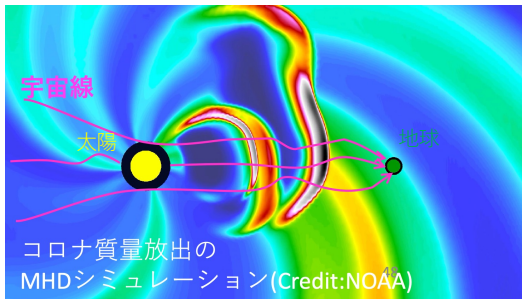
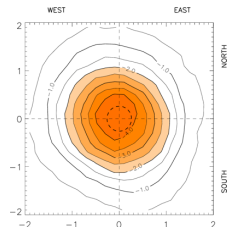


太陽磁場構造と良い相関。太陽表面の爆発現象「コロナ質量放出」との相関もあり！
→ Mega-ALPACA で 半日ごとに影の変化をモニター！ 宇宙天気予測への応用

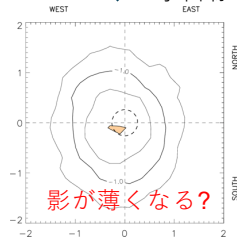
コロナ質量放出(CME)の事前予測

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！

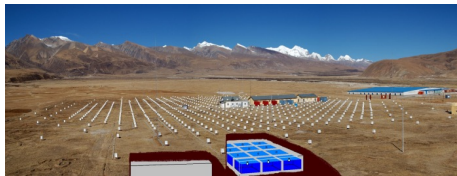
CMEは太陽から地球まで約4日間かかる
→宇宙線は約8分で到着
太陽の影のモニターで原理的に予測可能！



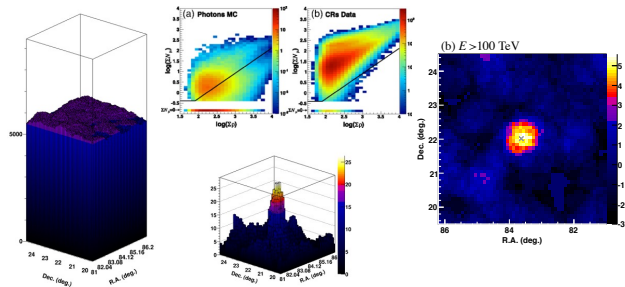
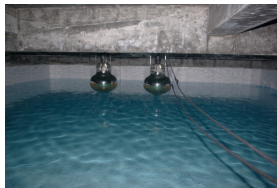
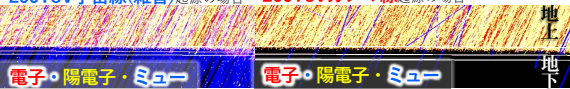
CME発生！ ↓ 磁場により
宇宙線が散乱



sub-PeVガンマ線観測の確立



200TeV宇宙線(雑音)起源の場合 200TeVガンマ線起源の場合



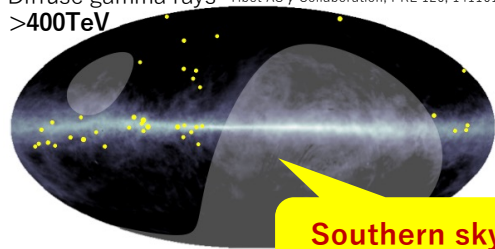
Tibet AS γ Collaboration, PRL 123, 051101 (2019)

- TibetAS γ 実験が地下ミュー粒子検出器で p/γ 弁別に成功
- 2019年に世界で初めて $>100\text{TeV}$ ガンマ線天体（かに星雲）を報告

Gamma-ray sky

Diffuse gamma rays Tibet AS γ Collaboration, PRL 126, 141101 (2021)

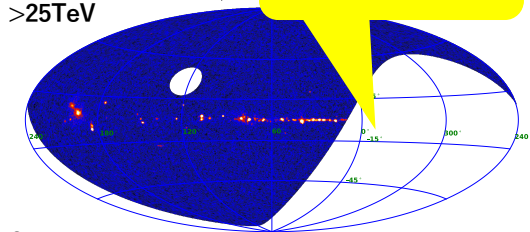
>400TeV



Southern sky
is not covered

>25TeV

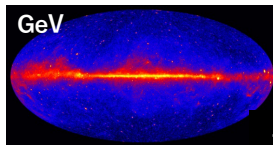
KM2A ($E > 25$ TeV)



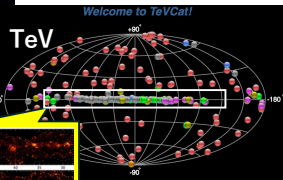
Gamma-ray sources

LHAASO Collaboration, arXiv:2305.1703v1 (2023)

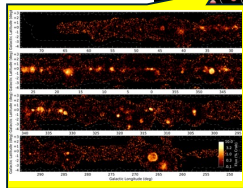
- Tibet, HAWC, LHAASOが北天の観測を深化
- Tibet, LHAASOによる拡散ガンマ線の発見
- 「南天（銀河中心）」が本命



<https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/>



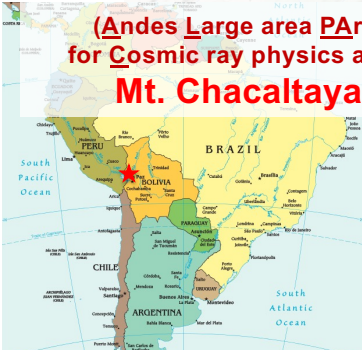
<http://tevcat.uchicago.edu>



HESS: A&A 612, A1 (2018)

ALPACA

(Andes Large area Particle detector
for Cosmic ray physics and Astronomy)
Mt. Chacaltaya, Bolivia



**UMSA CR Observatory
5200 m a.s.l.**

**ALPACA site
4740 m a.s.l.**

**4,740 m above sea level
(16° 23' S, 68° 08' W)**



Google

La Paz

16

ALPACA Air Shower Array

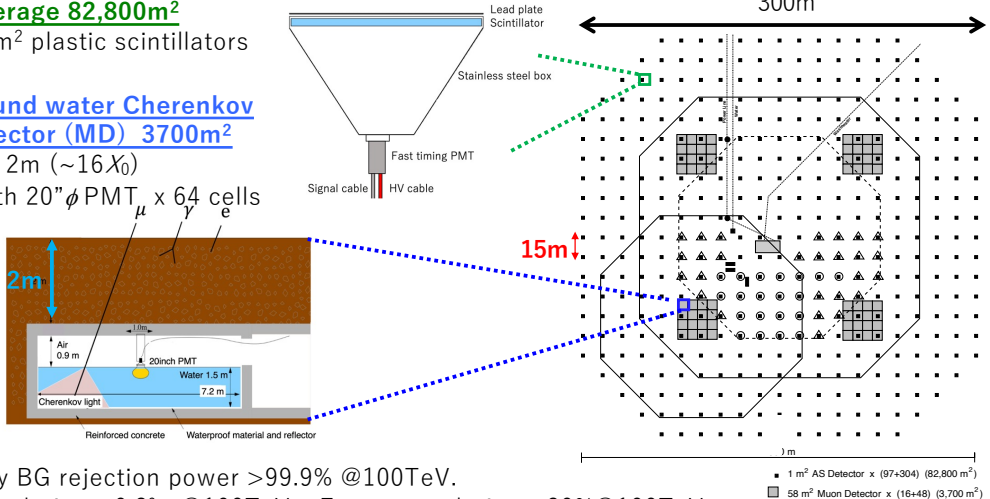
1. Array coverage 82,800m²

= 401 x 1m² plastic scintillators

2. Underground water Cherenkov muon detector (MD) 3700m²

Soil over 2m ($\sim 16X_0$)

= 58m² with 20" ϕ PMT x 64 cells



- ✓ Cosmic-ray BG rejection power >99.9% @100TeV.
- ✓ Angular resolution $\sim 0.2^\circ$ @100TeV, Energy resolution $\sim 20\%$ @100TeV
- ✓ 100% duty cycle, FOV $\theta_{zen} < 40^\circ$ (well studied), $\theta_{zen} < 60^\circ$ (in study)

ALPAQUITA

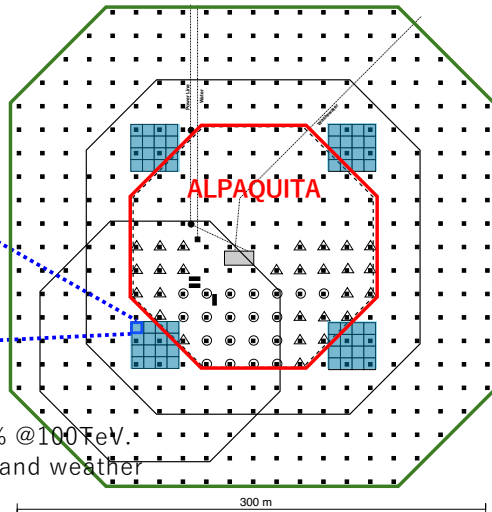
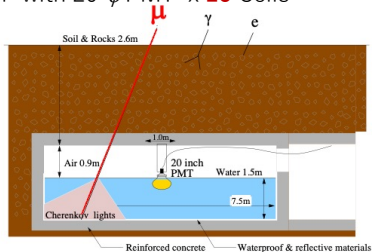
1. Air Shower (AS) Array ~83,000m²

= 97 x 1m² Scintillation Detector

2. Underground Muon Detector (MD) ~3600m²

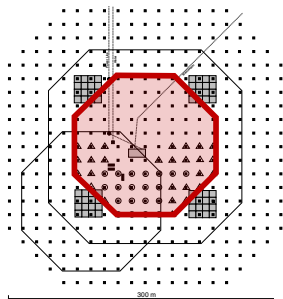
= Water-Cherenkov-Type, 2.5m overburden ($\sim 19X_0$)

56m² with 20" ϕ PMT x 16 Cells



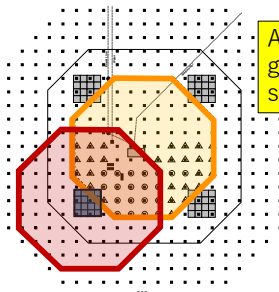
- ✓ Gamma-ray air shower has much less muons.
Background cosmic rays can be rejected by >99.9% @100TeV.
- ✓ Wide FoV ($\sim 2\text{sr}$) observation regardless day/night and weather
 - Angular resolution $\sim 0.2^\circ$ @100TeV
 - Energy resolution $\sim 20\%$ @100TeV

ALPACA Construction Plan



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

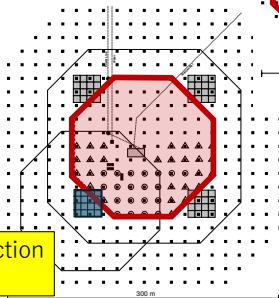
Current configuration



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

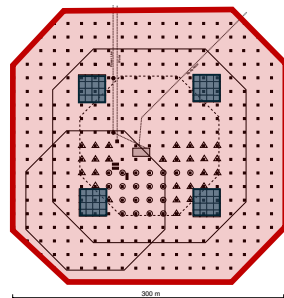
ALPAQUITA w/ MD
gamma-ray sensitive observation
starts in 2025

Full ALPACA
construction in 2026



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

1st MD construction
in 2025



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

ALPAQUITA Air Shower Array

$\frac{1}{4}$ ALPACA-scale air shower array
 1m^2 scintillation detector x 97 with 15m spacing
Effective area $\sim 18,000\text{m}^2$



1m^2 5mm lead plate
 1m^2 Scintillator
(50cm x 50cm x 5cm x4)

Inverse pyramid shape
Stainless steel box
(White painted inside)

2-inch PMT x1

Air Shower Trigger Condition :

Any 4 (Any3 since Jun 2024) detectors with >0.6 particles within 600ns

→ Rate $\sim 280\text{Hz}$ @ CR mode energy $\sim 7\text{ TeV}$

Counting Mode Condition :

Any1, Any2, Any3, Any4 rates every 0.1 sec

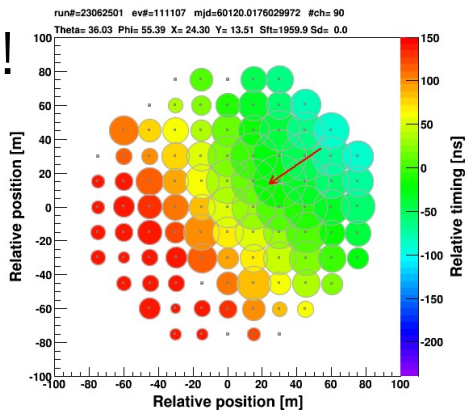
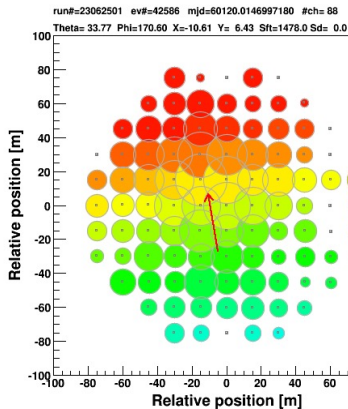
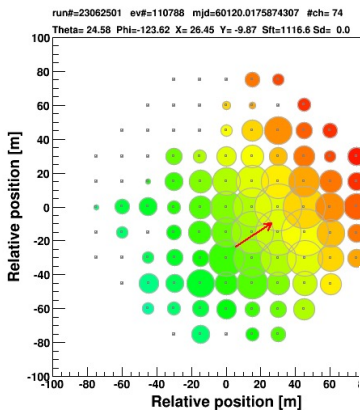
Construction status:

2022 Jun. Deploy detectors

2022 Sep. Partial operation

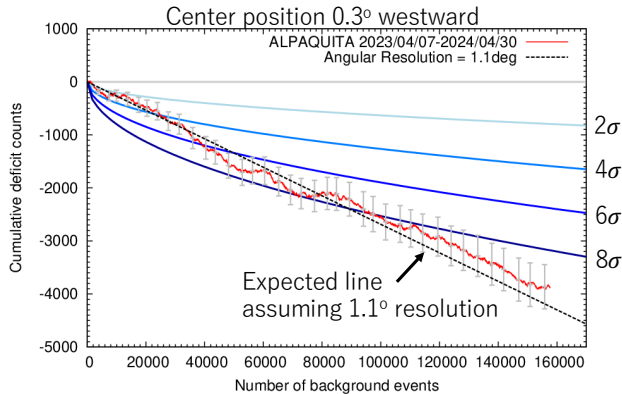
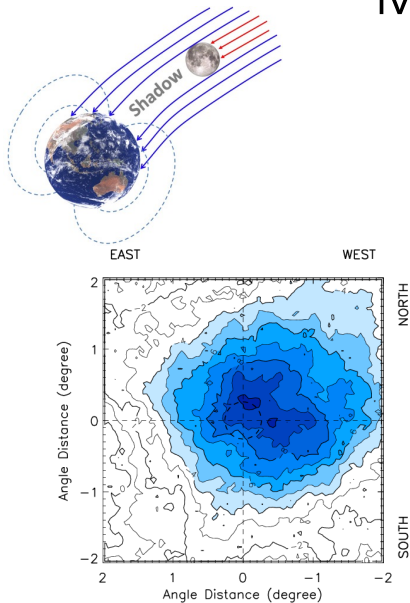
2023 Apr. Full operation

Big Events!



$E > 100 \text{ TeV}$
(mostly hadronic CRs)

Moon Shadow



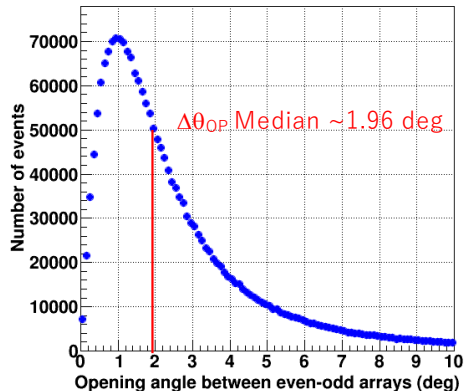
- Shadow of the moon is clearly detected at $>8\sigma$
- Evolution of the deficit depth suggests the angular resolution of 1.1° degree (mode energy = a few TeV)

Performance of ALPAQUITA

Even-Odd Method

Event selection criteria:

- Zenith angle < 40deg
- In Array flag = on
- 1.25 Any 4 flag = on
- Residual error < 1.0

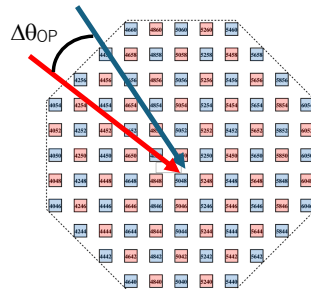


Even-Odd opening angle :

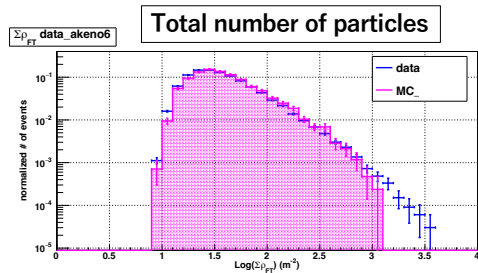
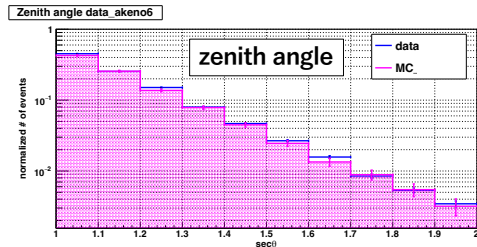
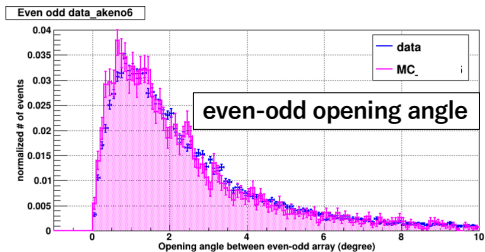
Opening angle between directions determined by two independent arrays (even and odd arrays)

Angular resolution

$$\sigma_{50} = \Delta\theta_{OP} / 2 = \sim 1^\circ$$



Data-MC comparison

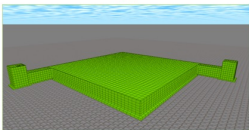


- Detector calibration data are taken into account
- Good agreement between experimental data and MC
- Air shower array shows expected performance

Heart of the experiment

~Underground muon detector~

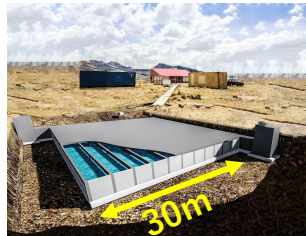
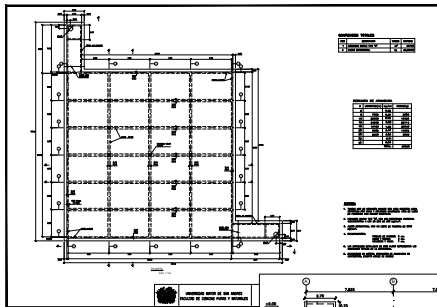
ESTUDIO Y DISEÑO ESTRUCTURAL DEL MÓDULO MD
POOL



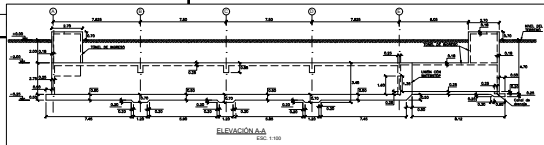
PROYECTO "ALPACA"

FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES
UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

OCTUBRE 2023

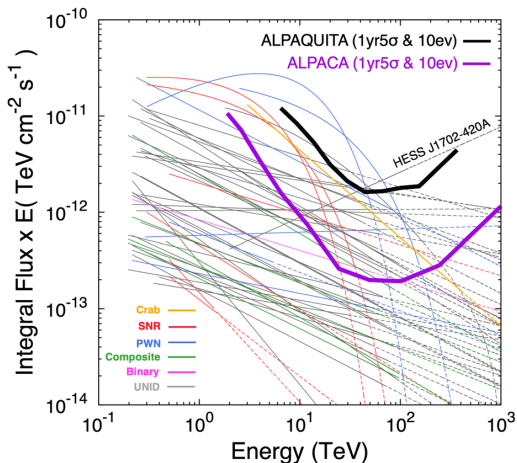


Site photo + CG image of MD by design company

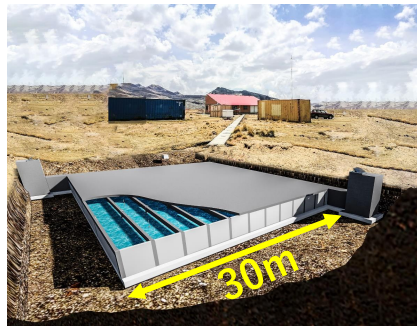


- Long discussions with Bolivian design companies => fixed
- Public call for construction company soon
- Construction of the 1st MD will start in 2025
- First gamma-ray sensitive observation starts in 2025

ALPAQUITA/ALPACAの感度



S.Kato et al., Experimental Astronomy (2021) 52:85-107



Site photo + CG image of MD by design company

- 2025年に地下ミュオン検出器（1台目）を完成
- 2026年にALPACA全体を完成
- ALPAQUITA 1年の観測で、数個の既知のTeV天体から>100TeV (sub-PeV)ガンマ線を検出可能
- ALPACA 1年の観測で、既知のTeV天体半分以上を>100TeVで検証可能

まとめ

- **Mega ALPACAは、南半球 PeVガンマ線天文学を開拓する計画**
 - 「銀河宇宙線の起源」をガンマ線で探る
 - 銀河中心方向の拡散ガンマ線観測、宇宙線分布の解明
 - ミュー粒子を用いた原子核種組成解析
 - 南半球中緯度で初の宇宙線異方性解析
 - 近傍銀河の粒子加速を検証
 - 暗黒物質起源ガンマ線の観測、最高エネルギーでの光子光子反応
 - 太陽活動に伴う宇宙線変動、宇宙天気予報への活用
- **ALPACAによる南半球・ボリビアでの空気シャワーアレイ実現、実証**
 - ALPAQUITA地表アレイが運転中
 - 地下ミュー粒子検出器1号器を今年建設予定
 - => 南半球 sub PeVガンマ線天文学を開始
 - 引き続きフルスケールのALPACAを建設

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atalog
(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

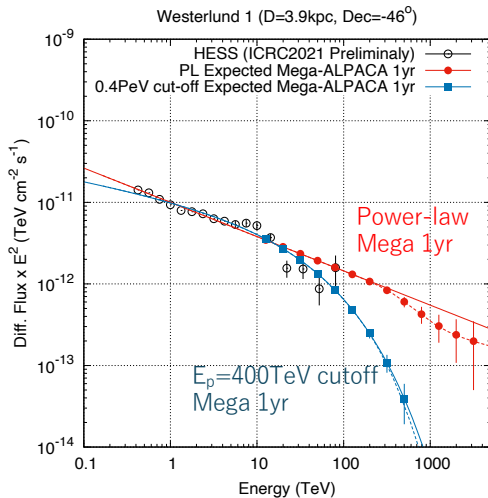
→ 銀河宇宙線の起源・伝搬・加速機構・加速限界の解明へ

- 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

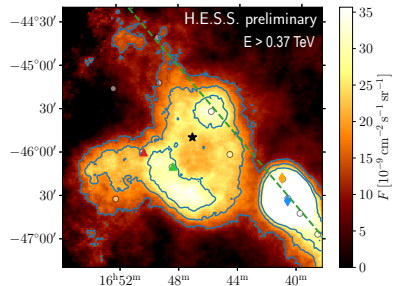
南天における観測対象

- 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)



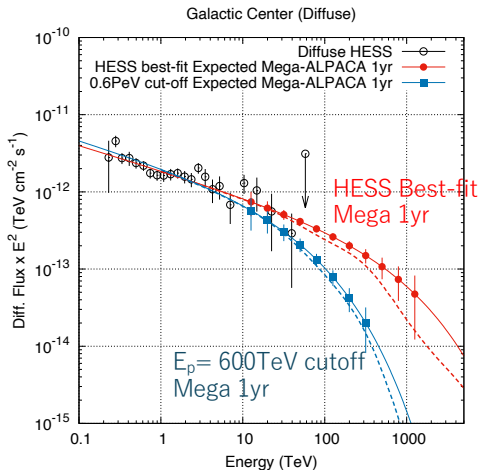
- ✓ Distance 3.9kpc
- ✓ Age 3.5 – 5 Myr
- ✓ Good PeVatron candidate
- ✓ Diffuse GeV emission



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

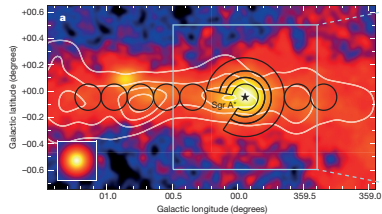
- ★ Westerlund 1
- 4FGL sources
- ◆ HESS J1640–465
- ◆ HESS J1641–463
- ▲ PSR J1648–4611
- ▲ PSR J1650–4601

Galactic Center



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

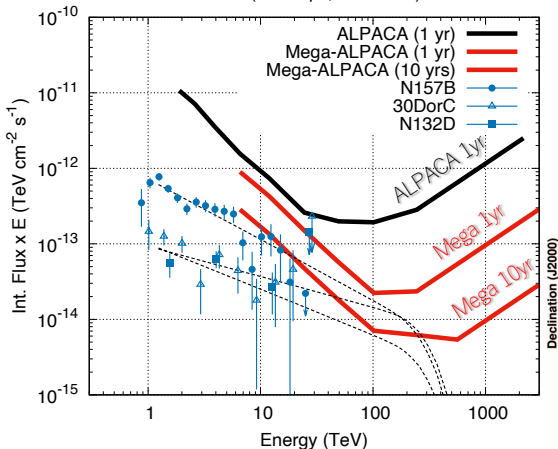
$$\frac{E_{\text{max}}^{\gamma}}{E_{\text{max}}^p} \sim O(1/10)$$



Abramowski+ (H.E.S.S.), Nature (2016)
 “Acceleration of petaelectronvolt protons in the Galactic Centre”

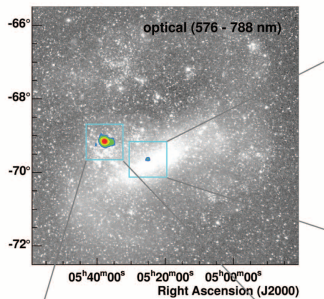
Large Magellanic Cloud (LMC)

LMC (D=50kpc, Dec=-69°)

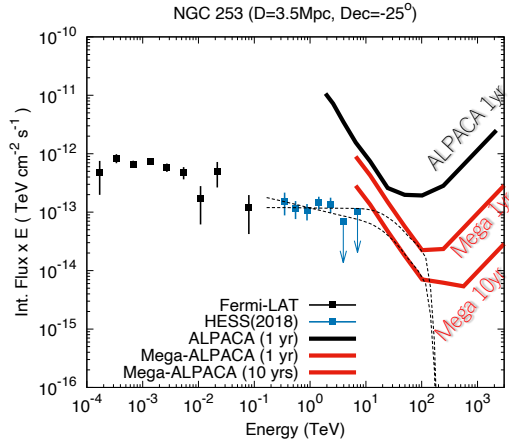


Abramowski+(H.E.S.S.), Science, 347, 406 (2015)

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



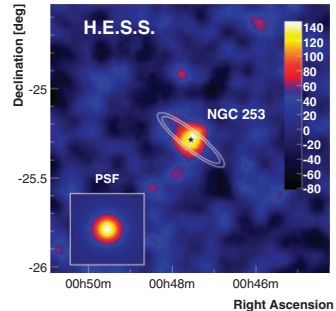
Starburst Galaxy: NGC 253



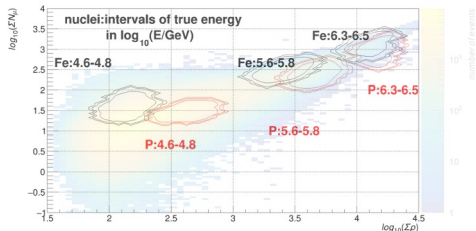
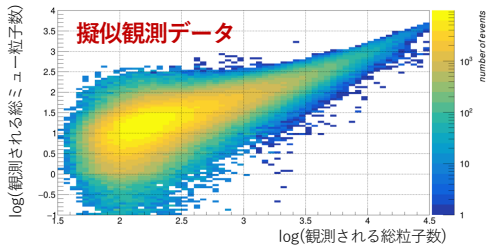
Acero+ (H.E.S.S.), Science, 326, 1080 (2009)

Abdalla+ (H.E.S.S.), A&A, 617, A73 (2018)

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



ミュー粒子数とベイズ推定を使った 原子核種測定方法開発



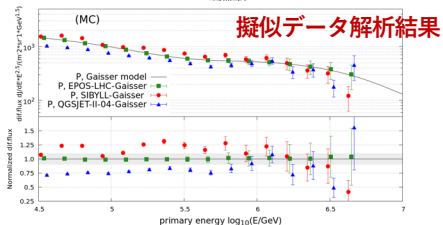
核種k・エネルギーjの宇宙線が
どう観測されるかの応答関数
右上の等高線

$$N_i(\Sigma\rho, \Sigma N_\mu) = T \sum_{k=1}^{N_{\text{nuc}}} \sum_{j=1}^{N_s} R_{ij}^k A_j^k x_j^k.$$

実際に観測される分布
左上の図

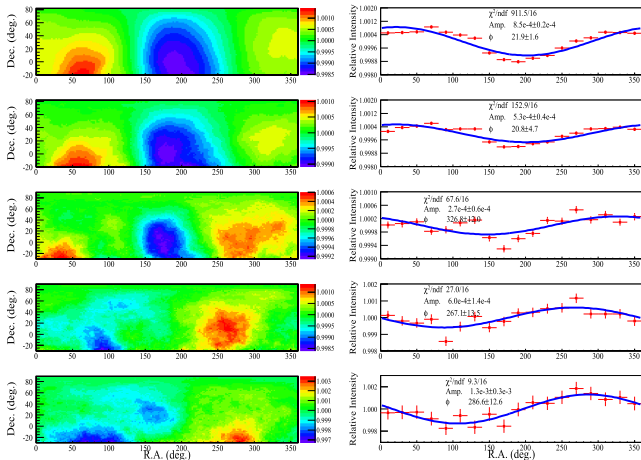
検出効率

核種k・エネルギーj
の宇宙線の到来頻
度=知りたい値



解析手法完成 => 実際のデータに適用する

宇宙線異方性の観測 Tibet AS γ (北天)



15 TeV

50 TeV

100 TeV

300 TeV

1000 TeV

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)

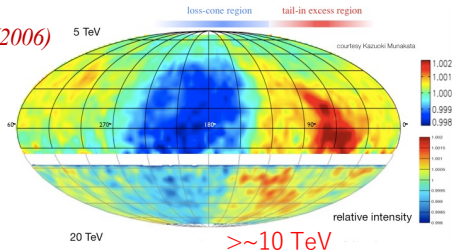
Abbasi+(IceCube), ApJL, 718, L194, (2010)

Tibet + IceCube combined

→ Local interstellar medium (LISM)

での粒子分布が起源?

太陽圏磁場の影響



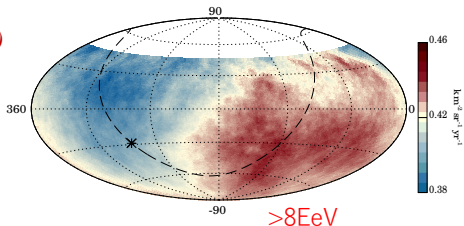
Auger Collabo., Science, 357, 1266 (2017)

Augerダイポール分布

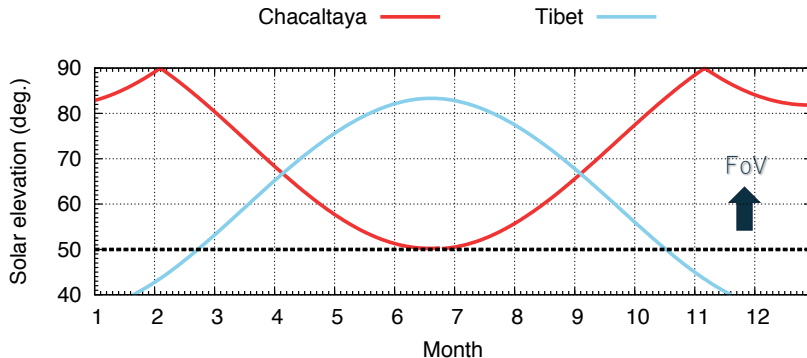
→ 銀河磁場の曲がりを考慮すると

2MRS銀河カタログの

flux-weighted dipoleの方向と一致



南半球ボリビア(チャカルタヤ山) での「太陽の影」の観測



- ✓ 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

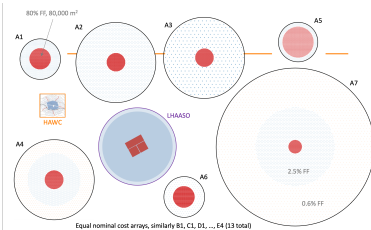
太陽の影の有意度の見積もり

- 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
- $20\sigma * \sqrt{45} = 134\sigma$ / 150days @>3TeV@極小期
→ $134 / \sqrt{150} = 11\sigma / \text{day}(=8\text{hours}) = 4\sigma / \text{hour}$

SWGO, UHECR2024 presentation

Detector options

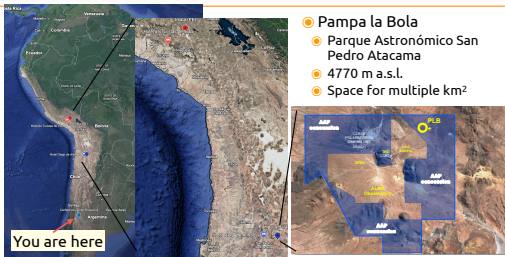
- Letter: Detector
- Number: Layout
- Simulated
 - All "A"
 - All "1"
 - "E4"
- Constant cost
 - depends on detector



Target: LHAASO size array
Site: primary candidate, San Pedro Atacama
Pathfinder: 100m array

Site

- Pampa la Bola
- Parque Astronómico San Pedro Atacama
- 4770 m a.s.l.
- Space for multiple km²



Next steps: Pathfinder and SWGO-A

