

大学院ガイダンス2020年度

2020年6月6日 オンライン

「千ベット実験・ALPACA実験グループ 大学院ガイダンス」

宇宙線研究所 瀧田正人

研究の主な目的

- ★ TeV領域以上の高エネルギーガンマ線放射天体の探索と観測
 - ★ Knee領域(10^{15-16} eV)の一次宇宙線の研究
 - ★ 一次宇宙線の異方性の研究
 - ★ 太陽活動期の宇宙線変動の研究
- 

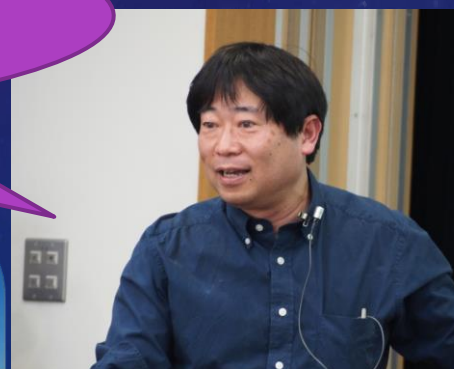
銀河宇宙線・ガンマ線

- **宇宙線の起源、Pevatronを探せ！**
 - PeVatronからのsub-PeV領域ガンマ線の世界初検出を目指します。

比較的小規模でユニークな研究
が好きな方、お待ちしております。



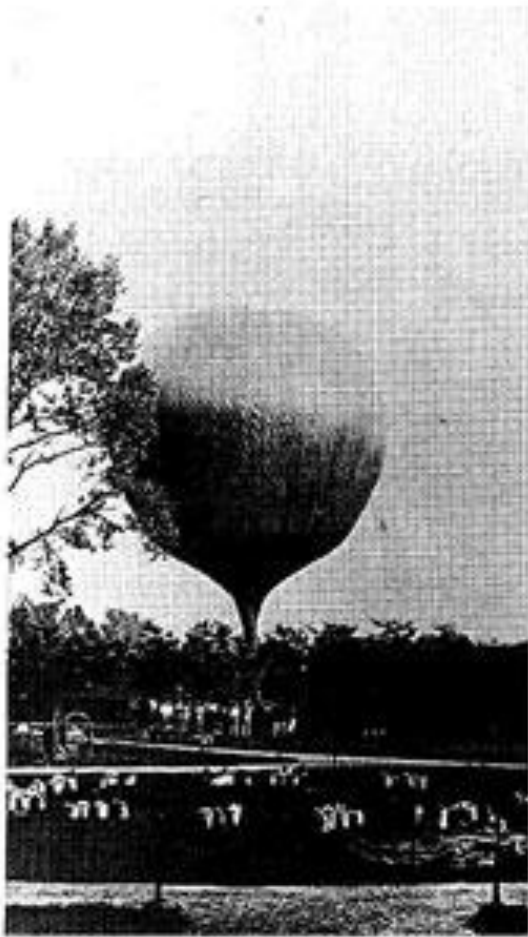
塔 (A8)



瀧田 (A8)



宇宙線の発見(1912年): 気球に乗り込むVictor HESS



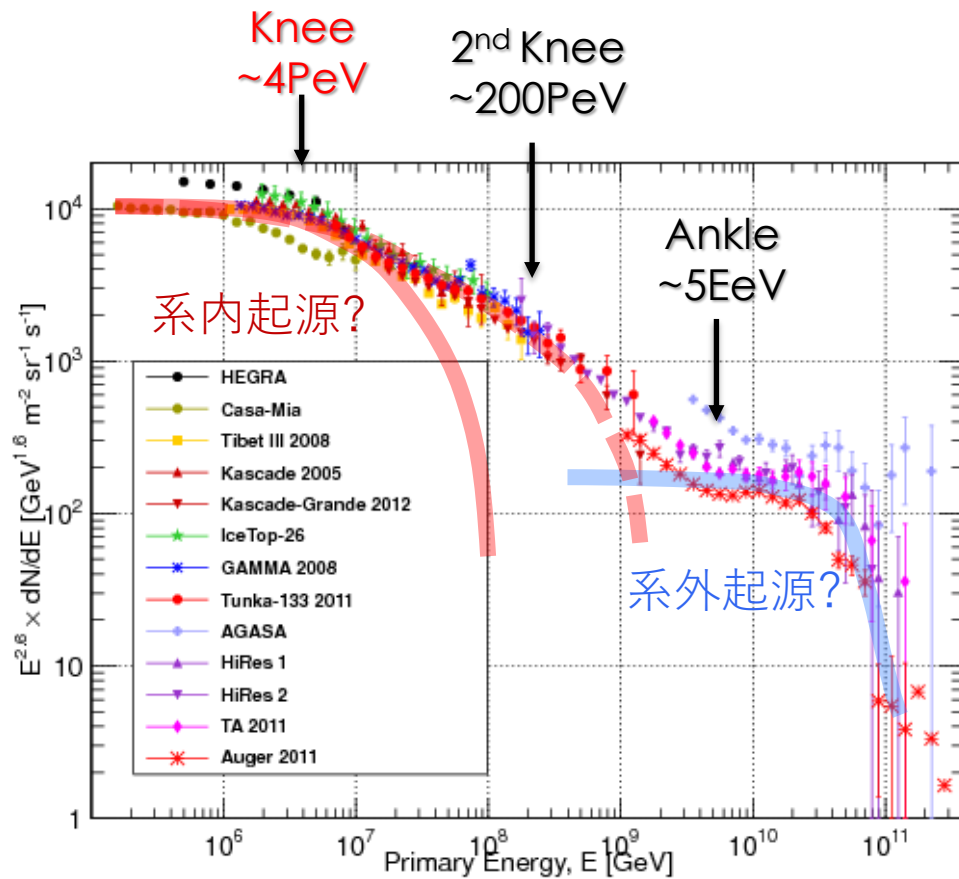
(a)



(b)

宇宙線: Particles from outer space (H, He, C, N, O,...Fe 原子核)

ガンマ線観測：宇宙線の起源



Gaissner et al. Front.Phys.(Beijing) 8 (2013) 748

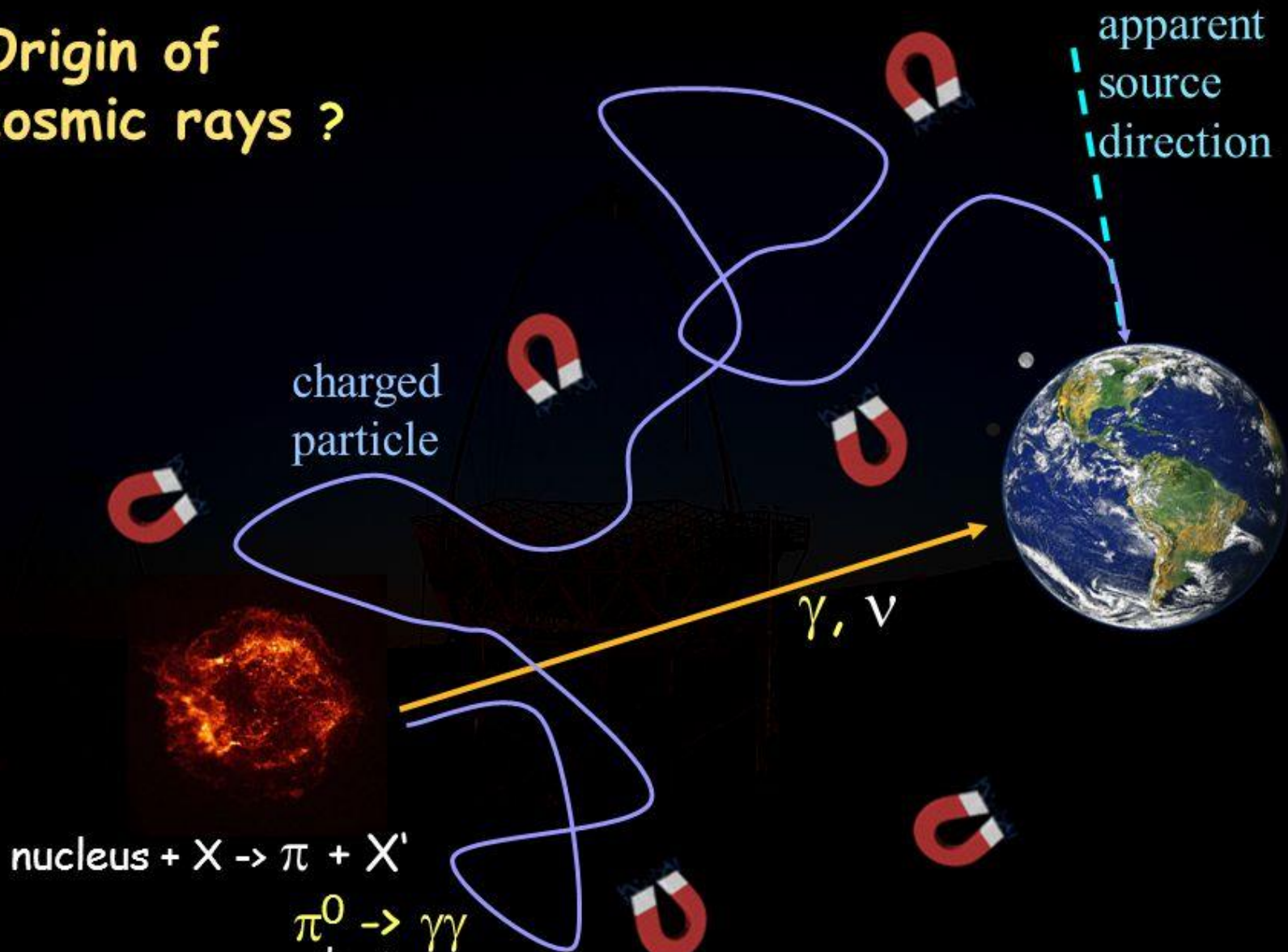
- ✓ 銀河系内の宇宙線の起源
→ 超新星残骸(SNR)??, 銀河中心?
- ✓ かに星雲 距離: 7000 光年
1000TeV陽子ジャイロ半径: 1 光年



- ✓ ガンマ線による間接的な観測
高エネルギー電子+光子
逆コンプトン散乱
and/or
高エネルギー陽子+星間物質
($p + \text{ISM} \rightarrow \pi^0 \rightarrow 2\gamma$)
→ 100TeV以上にエネルギースペクトルが
硬いベキ(~ 2) $\propto E_\gamma^{-2}$ で続く
広がった天体 (+分子雲)

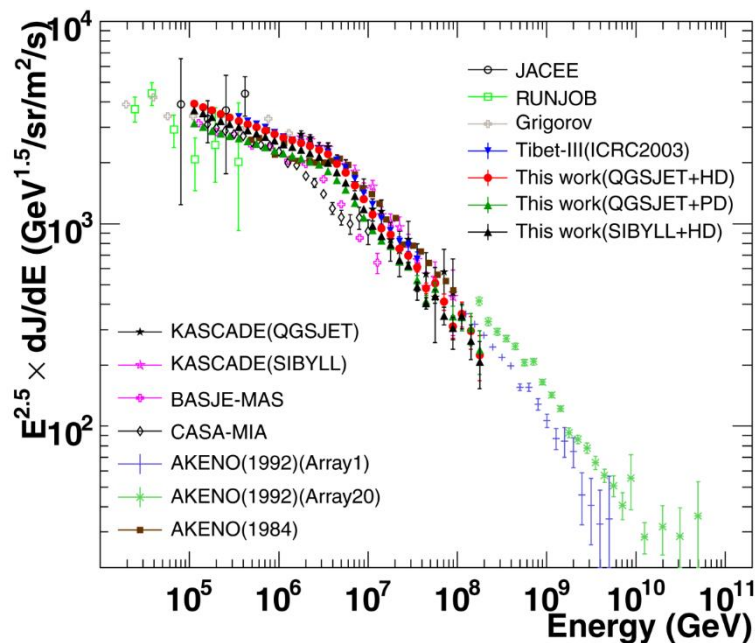
銀河系内のどこで／どのように／どのエネルギーまで
宇宙線が加速されているのか? (cf. 人口加速器LHC @ CERN 7 TeV!)

Origin of cosmic rays ?

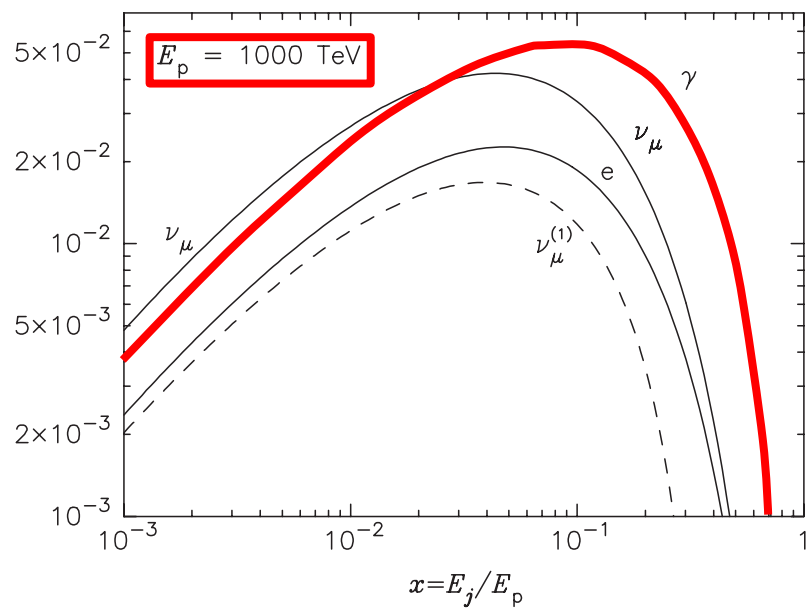


PeV宇宙線を加速している天体 = **PeVatron**
CMBによる吸収で銀河系内天体

Knee 領域宇宙線の起源



$x^2 F_j(x, E_p)$ Kelner et al., PRD 74, 034018 (2006)



宇宙線スペクトル

- ✓ S N Rなどでの(斜め)衝撃波加速により宇宙線を100~数1000TeV程度まで加速可能
- ✓ Knee~ 4 PeVまでは銀河系内起源？

ガンマ線スペクトル

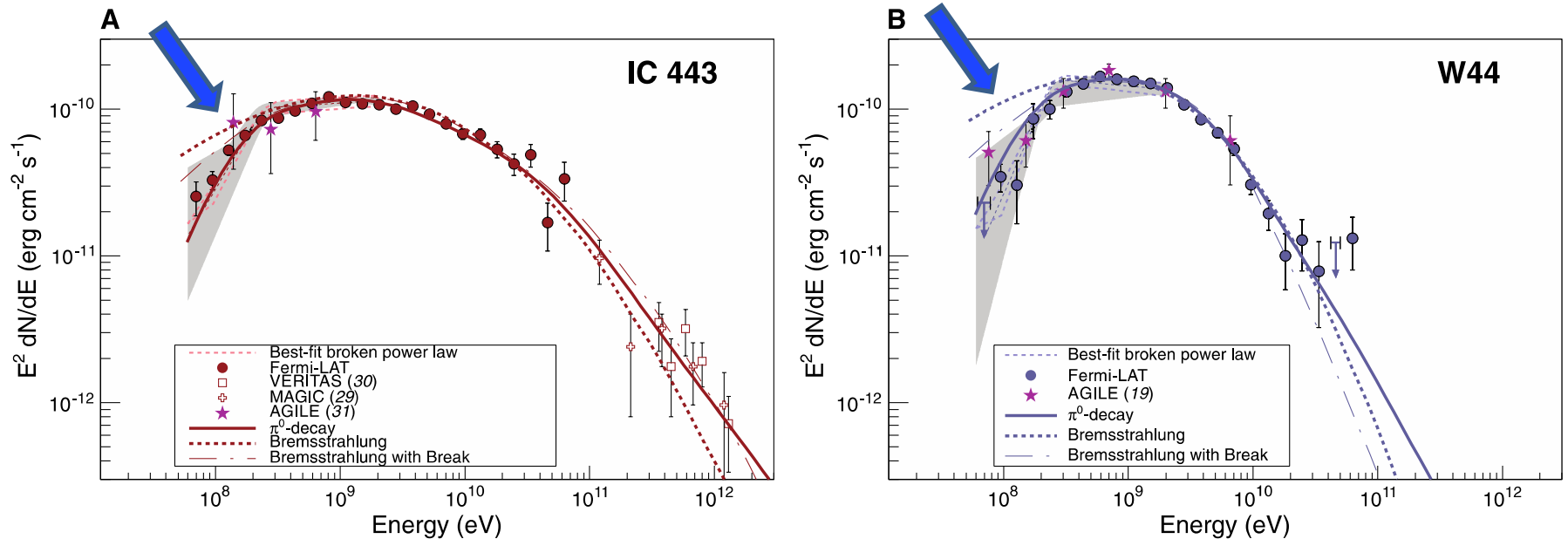
- ✓ 宇宙線+星間物質 $\rightarrow \pi^0 + \dots \rightarrow 2\gamma$
- ✓ 陽子の最大エネルギーの一桁下のガンマ線・ニュートリノが生成

PeV宇宙線を加速している天体 = **PeVatron** を探せ (Sub-PeVのガンマ線)
CMBによる吸収で銀河系内天体 (超新星残骸??、銀河中心?)

ガンマ線観測：陽子加速天体

Fermi-LAT（衛星）による超新星残骸の観測

→ W44, IC443, W51 – π^0 崩壊の証拠



Ackermann, et al (Fermi-LAT), Science (2013)

“Detection of the Characteristic Pion-Decay Signature in Supernova Remnants”



The Tibet AS γ Collaboration

(2018年)



M.Amenomori(1), X.J.Bi(2), D.Chen(3), S.W.Cui(4), Danzengluobu(5), L.K.Ding(2), X.H.Ding(5), C.Fan(6), C.F.Feng(6), Zhaoyang Feng(2), Z.Y.Feng(7), X.Y.Gao(8), Q.X.Geng(8), Q.B.Gou(2), H.W.Guo(5), H.H.He(2), M.He(6), K.Hibino(9), N.Hotta(10), Haibing Hu(5), H.B.Hu(2), J.Huang(2), Q.Huang(7), H.Y.Jia(7), L.Jiang(8, 2), F.Kajino(11), K.Kasahara(12), Y.Katayose(13), C.Kato(14), K.Kawata(3), Labaciren(5), G.M.Le(15), A.F.Li(6), H.C.Li(4, 2), J.Y.Li(6), C.Liu(2), Y.-Q.Lou(16), H.Lu(2), X.R.Meng(5), K.Mizutani(12, 17), J.Mu(8), K.Munakata(14), A.Nagai(18), H.Nanjo(1), M.Nishizawa(19), M.Ohnishi(3), I.Ohta(20), S.Ozawa(12), T.Saito(21), T.Y.Saito(22), M.Sakata(11), T.K.Sako(3), M.Shibata(13), A.Shiomi(23), H.Sugimoto(24), M.Takita(3), Y.H.Tan(2), N.Tateyama(9), S.Torii(12), H.Tsuchiya(25), S.Udo(9), B.Wang(2), H.Wang(2), Y.Wang(2), Y.G.Wang(6), H.R.Wu(2), L.Xue(6), Y.Yamamoto(11), C.T.Yan(26), X.C.Yang(8), S.Yasue(27), Z.H.Ye(28), G.C.Yu(7), A.F.Yuan(5), T.Yuda(9), H.M.Zhang(2), J.L.Zhang(2), N.J.Zhang(6), X.Y.Zhang(6), Y.Zhang(2), Yi Zhang(2), Ying Zhang(7, 2), Zhaxisangzhu(5) and X.X.Zhou(7)

(1)Department of Physics, Hiroasaki University, Japan.

(2)Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, China.

(3)Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Japan.

(4)Department of Physics, Hebei Normal University, China.

(5)Department of Mathematics and Physics, Tibet University, China.

(6)Department of Physics, Shandong University, China.

(7)Institute of Modern Physics, SouthWest Jiaotong University, China.

(8)Department of Physics, Yunnan University, China.

(9)Faculty of Engineering, Kanagawa University, Japan.

(10)Faculty of Education, Utsunomiya University, Japan.

(11)Department of Physics, Konan University, Japan.

(12)Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Japan.

(13)Faculty of Engineering, Yokohama National University, Japan.

(14)Department of Physics, Shinshu University, Japan.

(15)National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, China.

(16)Physics Department and Tsinghua Center for Astrophysics, Tsinghua University, China.

(17)Saitama University, Japan.

(18)Advanced Media Network Center, Utsunomiya University, Japan.

(19)National Institute of Informatics, Japan.

(20)Sakushin Gakuin University, Japan.

(21)Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, Japan.

(22)Max-Planck-Institut fur Physik, Deutschland.

(23)College of Industrial Technology, Nihon University, Japan.

(24)Shonan Institute of Technology, Japan.

(25)RIKEN, Japan.

(26)Institute of Disaster Prevention Science and Technology, China.

(27)School of General Education, Shinshu University, Japan.

(28)Center of Space Science and Application Research, Chinese Academy of Sciences, China.

Yangbajing Cosmic Ray Observatory



90° 522E, 30° 102N, 4,300 m a.s.l. (606g/cm²)

チベット空気シャワー観測装置

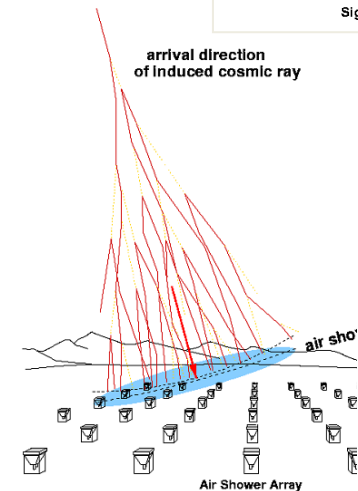
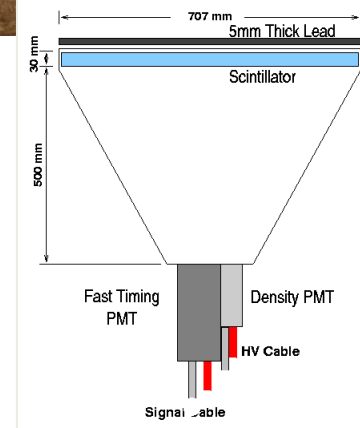


□ チベット (90.522°E, 30.102°N) 標高4300 m

現行スペック

- シンチレーション検出器数 $0.5 \text{ m}^2 \times 597$
- 空気シャワー有効面積 $\sim 50,000 \text{ m}^2$
- 観測エネルギー $> \text{TeV}$
- 角度分解能
 $\sim 0.5^\circ$ @10TeV
 $\sim 0.2^\circ$ @100TeV
- 視野 $\sim 2 \text{ sr}$

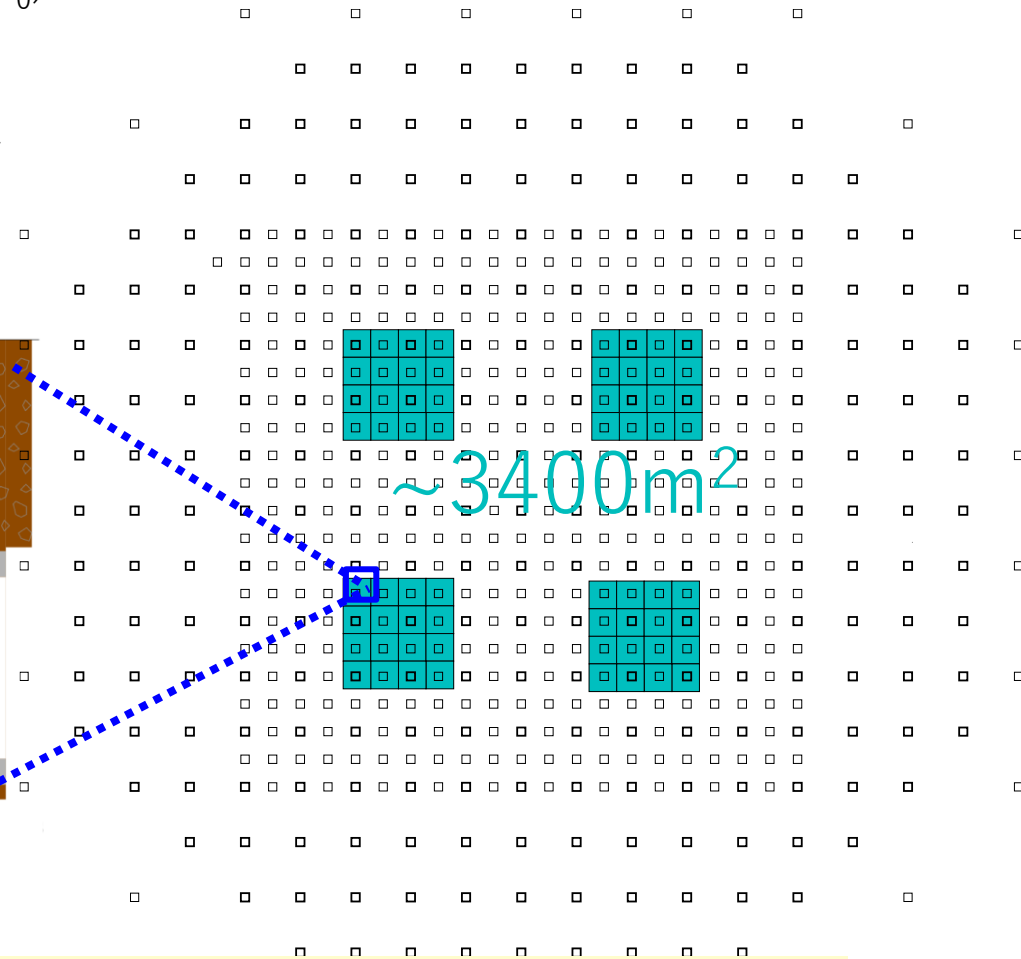
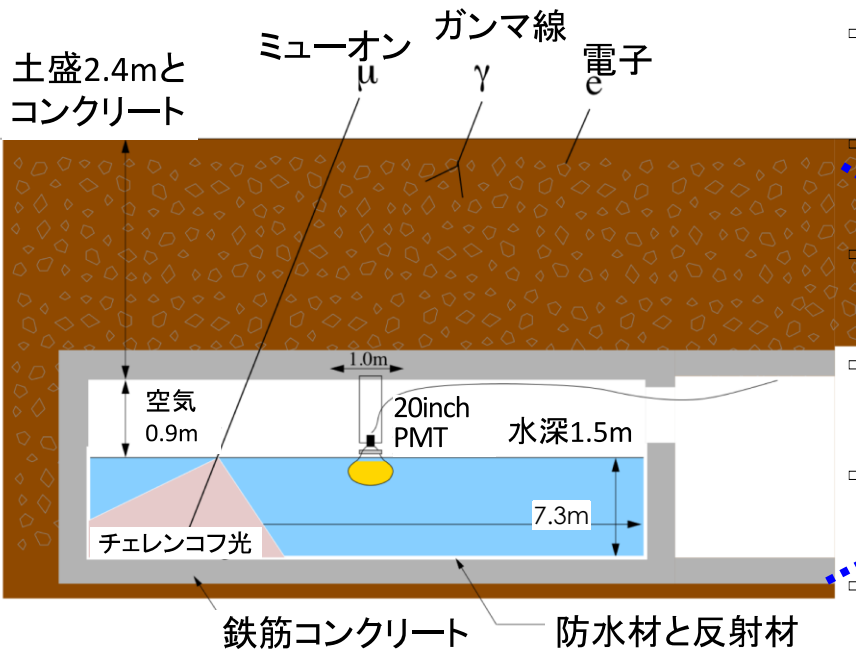
→ 空気シャワー中の二次粒子(主に $e^{+/-}$, γ)を観測し
一次宇宙線エネルギー、方向を決定



水チェレンコフ型ミュオン観測装置

- ✓ 地下 2.4m (物質厚 $\sim 515\text{g/cm}^2 \sim 19X_0$)
- ✓ $7.35\text{m} \times 7.35\text{m} \times$ 水深 1.5m 水槽
- ✓ 20" Φ PMT (HAMAMATSU R3600)
- ✓ 水槽材質：コンクリート+タイベック

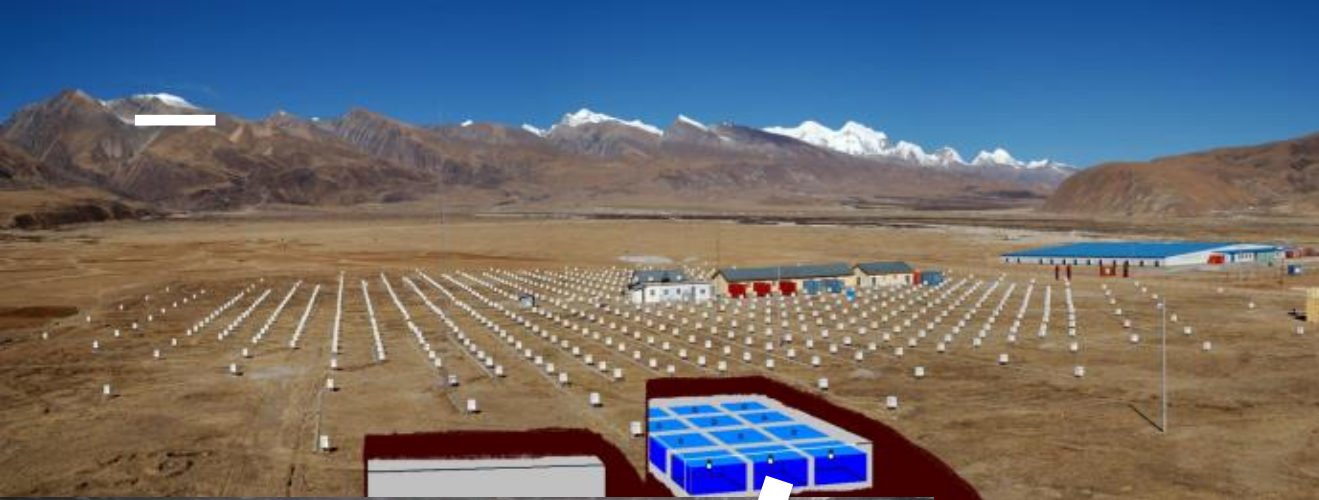
シンチレーション検出器数
 $0.5\text{ m}^2 \times 597 = \sim 50,000\text{m}^2$



→ 空気シャワー中のミュオン数を測定し、ガンマ線／核子選別

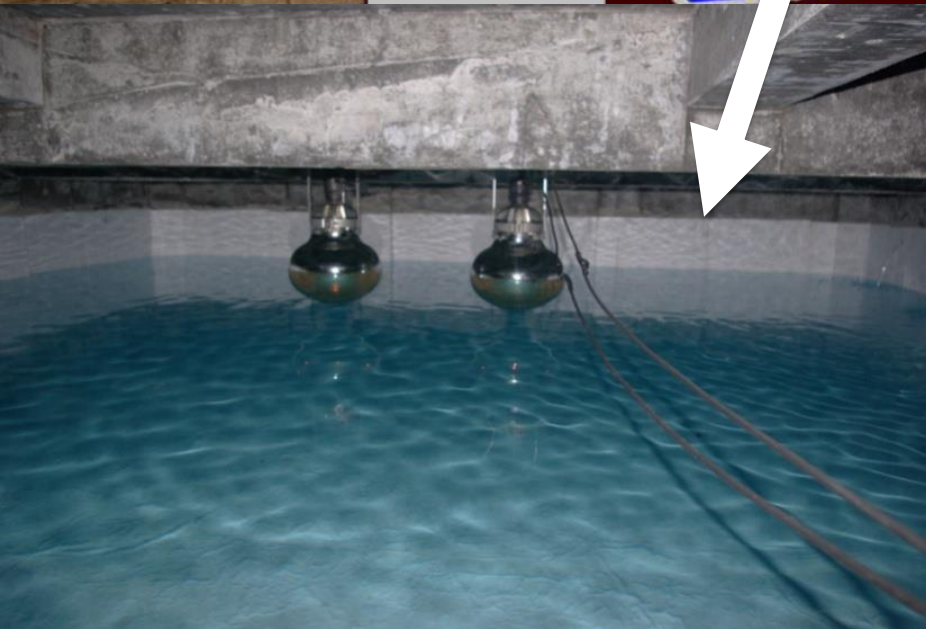
2014年2月 — 2017年5月 有効観測時間：720日

羊八井高原,
中国, チベット
海拔4300 m . = 606 g/cm²

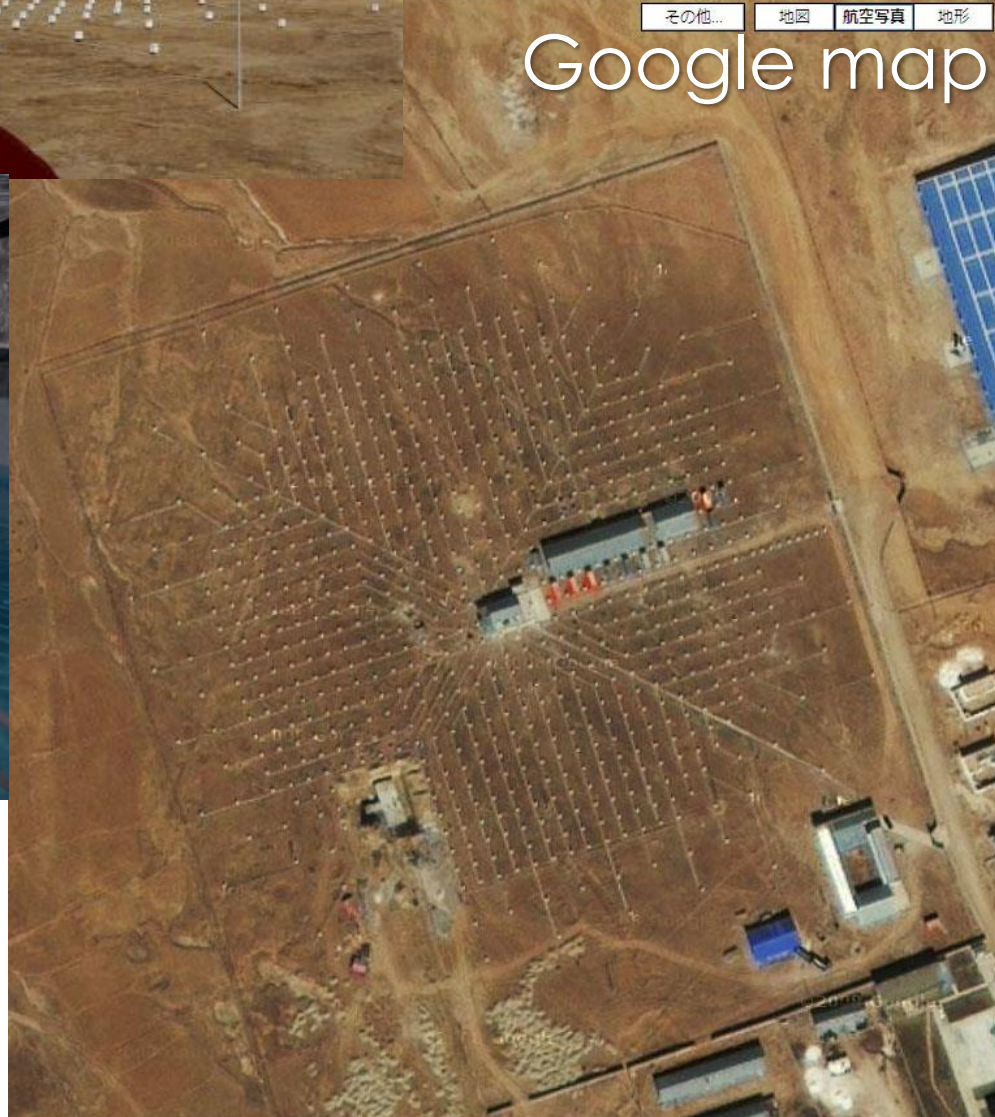


その他... 地図 航空写真 地形

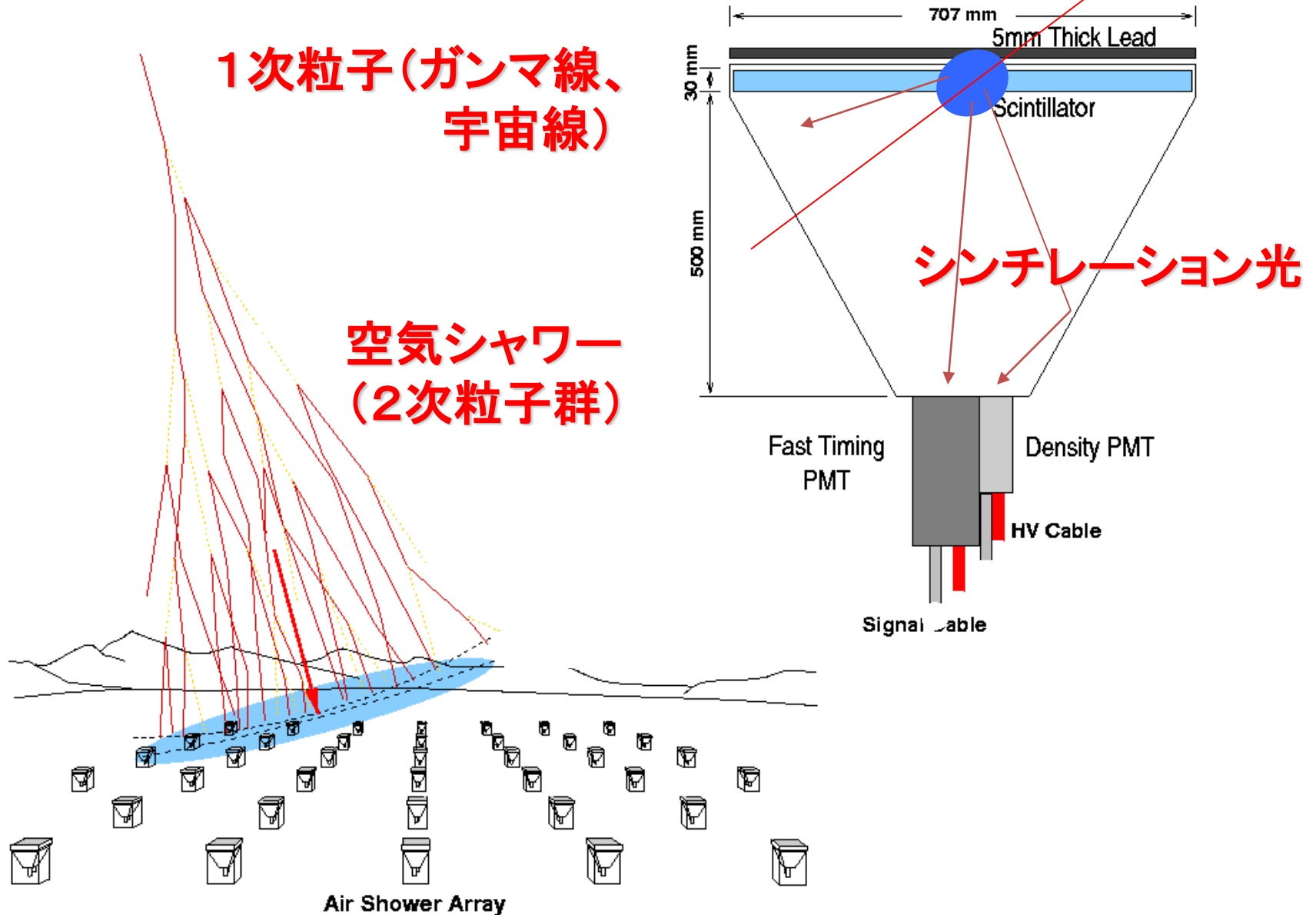
Google map



チベット空気シャワーアレイと
地下ミュオン検出器



空気シャワーアレイによる宇宙線・ガンマ線検出原理

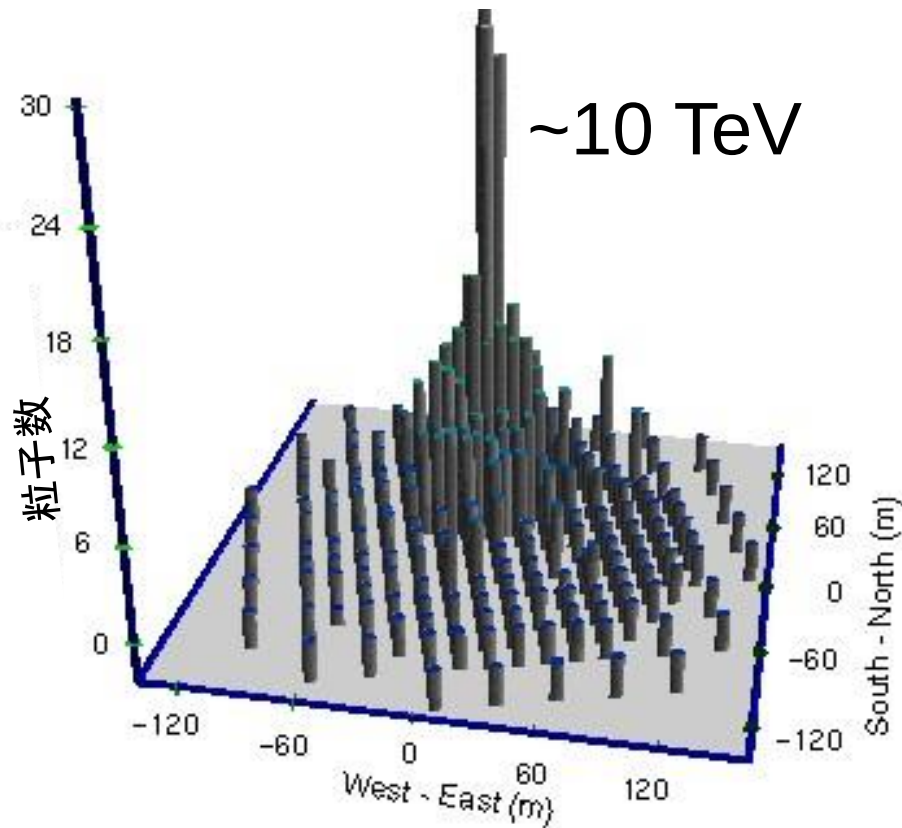


空気シャワーアレイによるAir Shower 検出

空気シャワー2次粒子密度



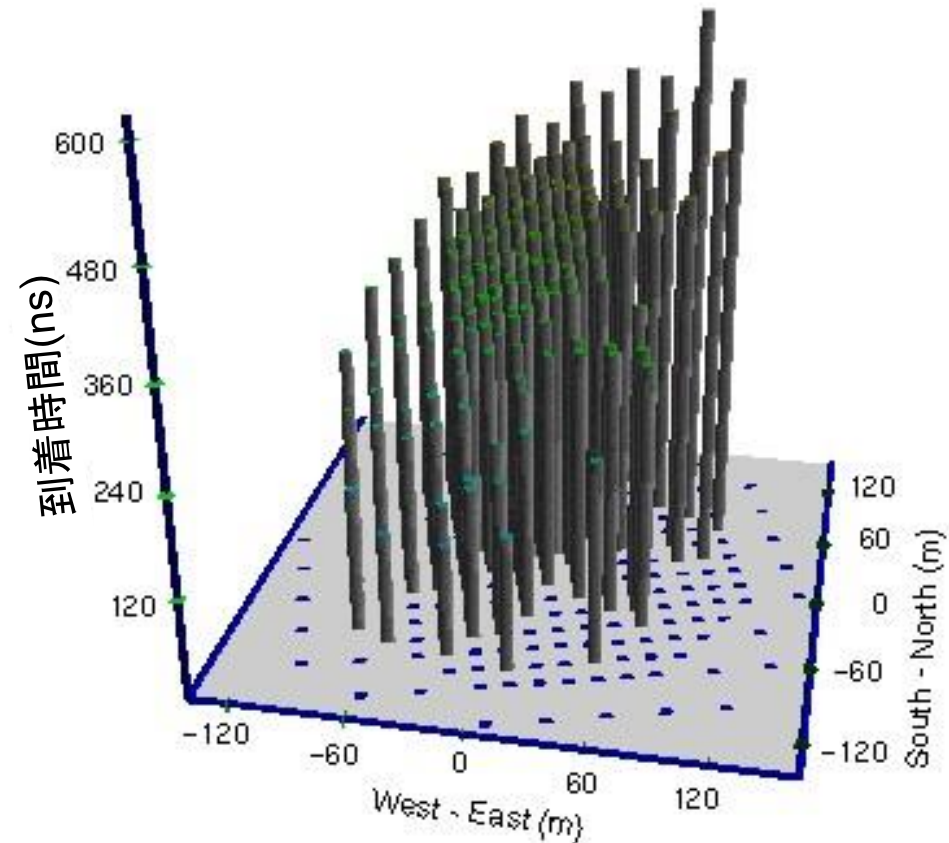
1次粒子エネルギー決定



空気シャワー2次粒子タイミング



1次粒子方向決定



宇宙線雑音中のガンマ線の選別

ガンマ線を観測するには100倍以上ある原子核宇宙線が邪魔である

ガンマ線を選別的に観測したい

ガンマ線の作る空気シャワー中にはミューオンが少ない

空気シャワーの主な成分

電子、陽電子、光子・・・土で吸収される

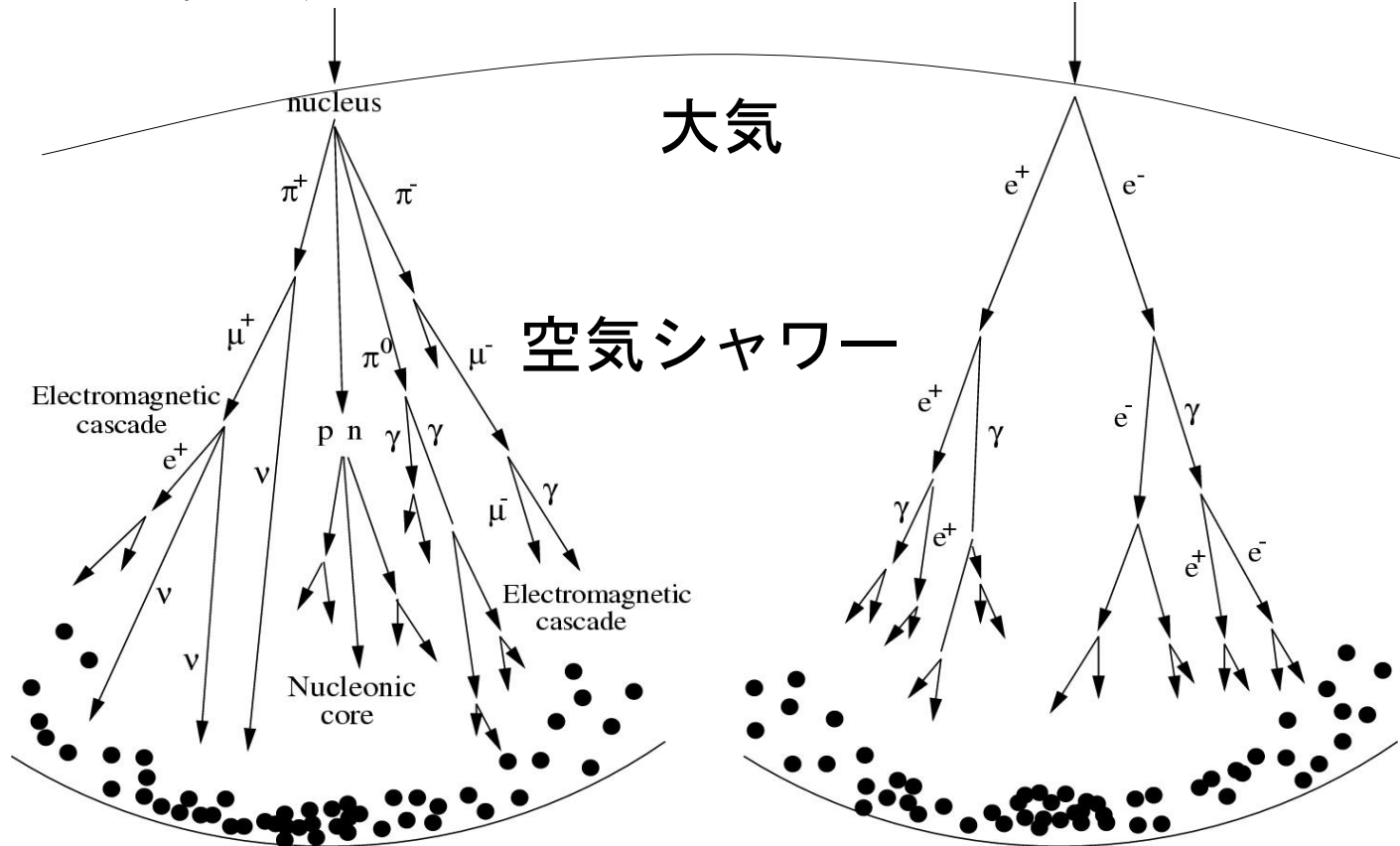
ミューオン・・・土で吸収されにくい

地下に粒子検出器を追加すればよい!

ミューオン数によるガンマ線／原子核選別

TeV陽子、ヘリウム...

TeVガンマ線



空気シャワー中ミューオン数 (コアから<100m, 標高4300m)

100TeV陽子 ~50個

100TeVガンマ線 ~1個

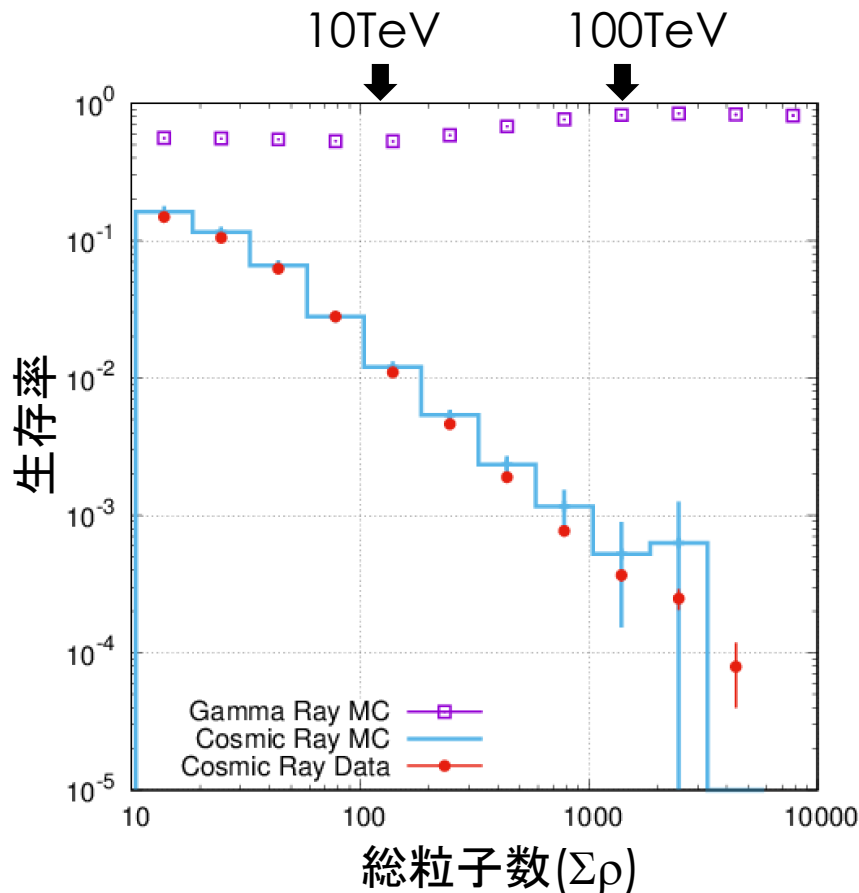
ミューオン数が少ない空気シャワーはガンマ線！

ミューオン・カット

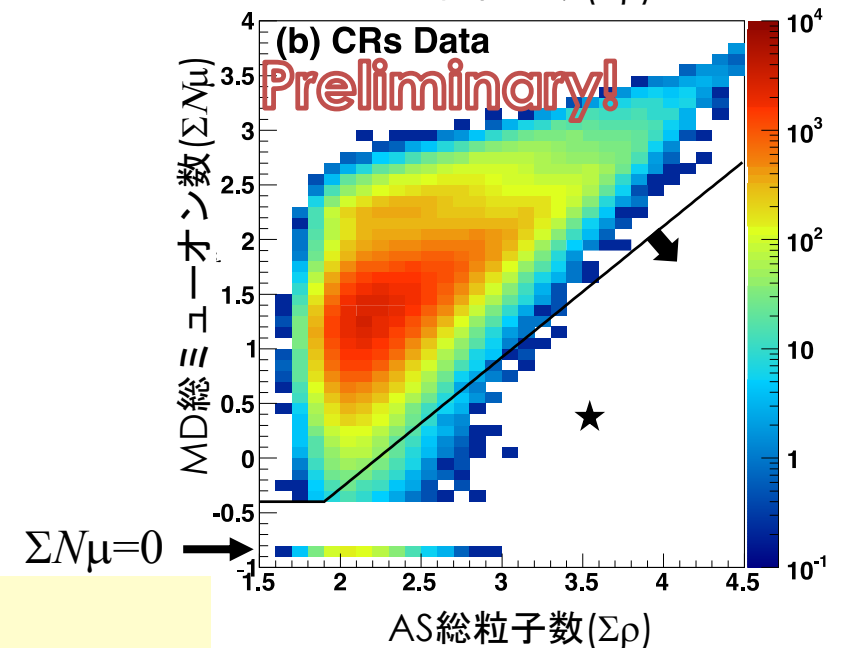
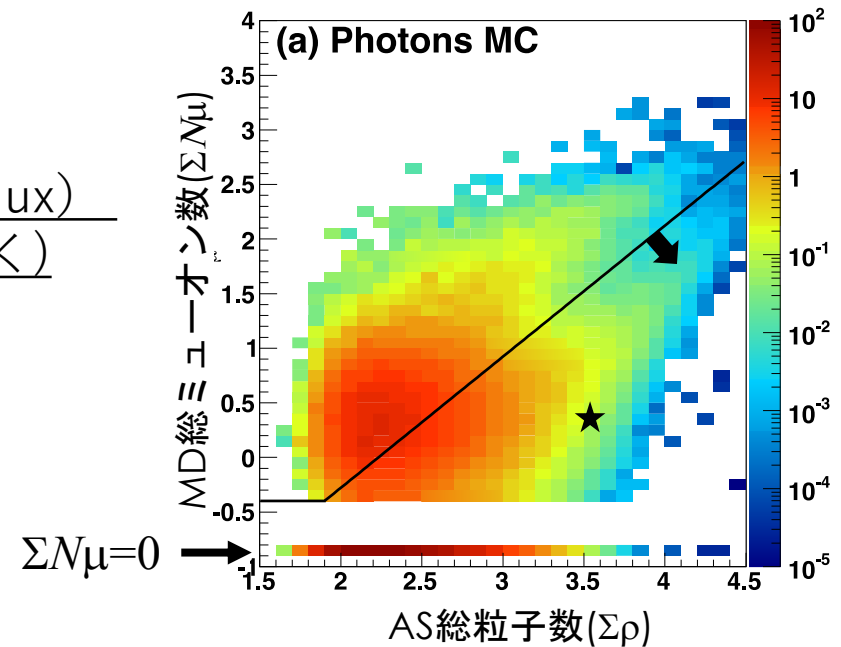
→ カットの最適化

ガンマ線：MCデータ (Crab軌道、Crab Flux)

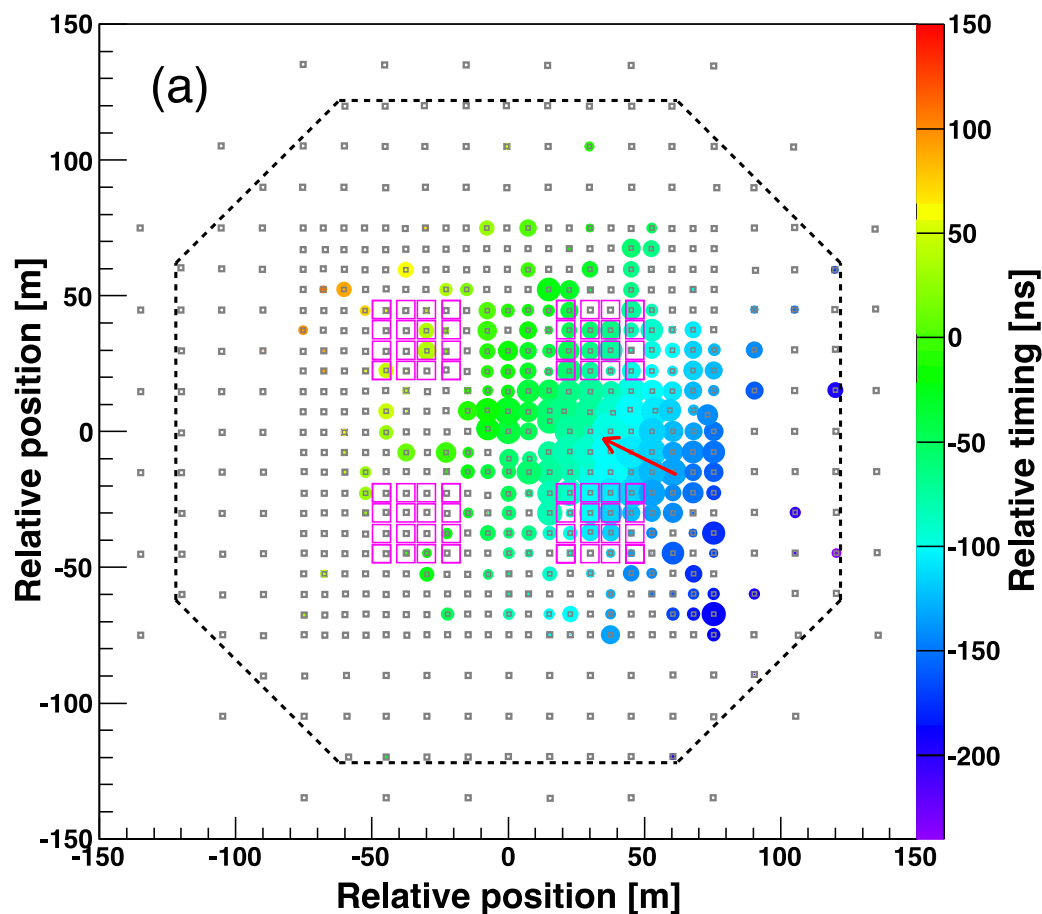
宇宙線：実験データ(銀河面・Crab方向除く)



ミューオンカット後、100TeV領域で
約99.9%の宇宙線を除去、約90%のガンマ線を残す



「かに星雲」 ガンマ線空気シャワー候補事象



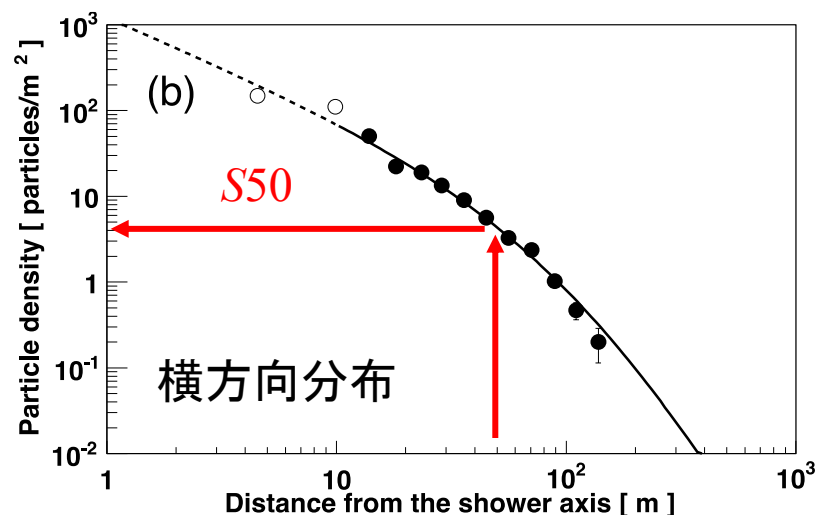
円サイズ $\propto \log(\text{粒子数})$
 円カラー：相対到着時間[ns]
 → 方向決定

M. Amenomori +123, 051101 (2019)

- 総粒子数 ($\Sigma\rho$) = 3256
- 総ミューオン数 (ΣN_μ) = 2.3
- 天頂角 (θ) = 29.8°

- エネルギー = $(25^{+46}_{-43}) \text{ TeV}$

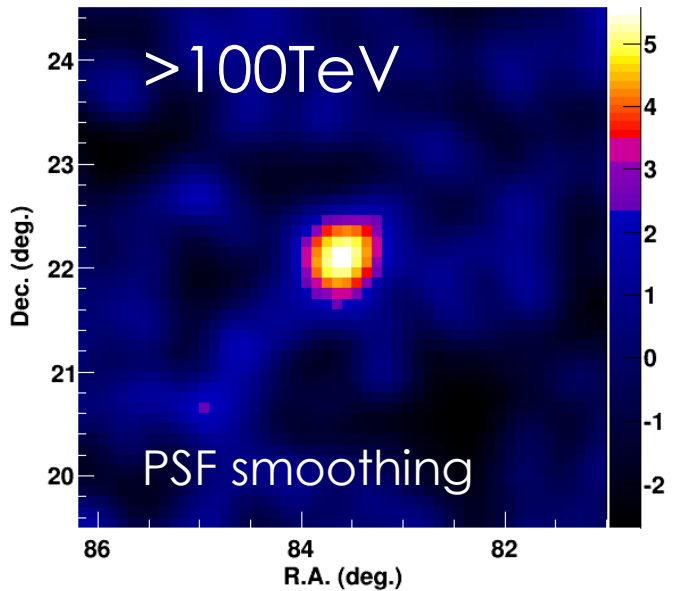
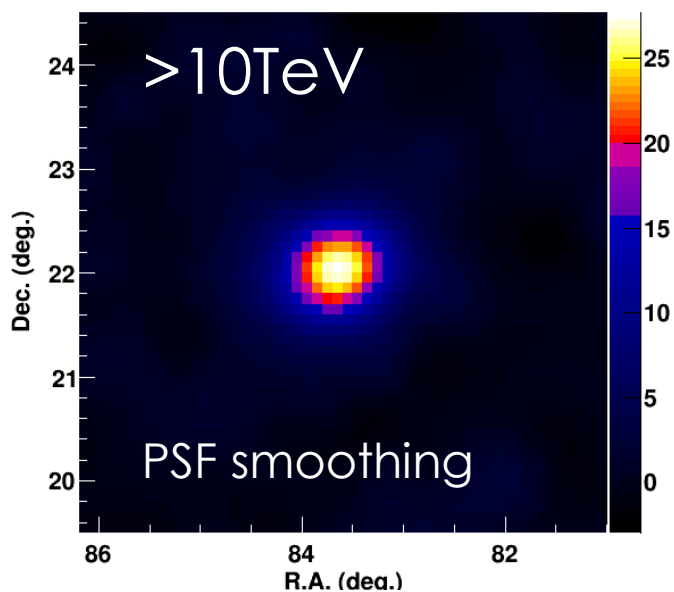
※Eスケールの系統誤差含む



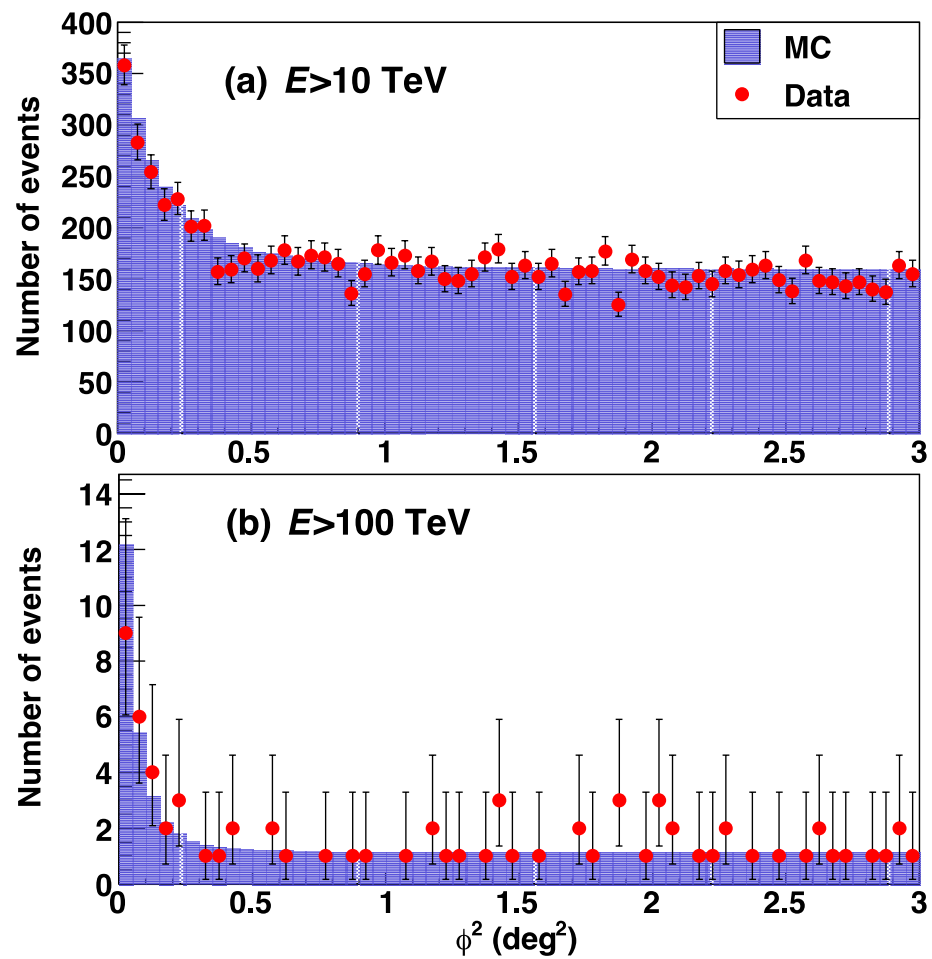
NKG関数によるフィット
 → エネルギー推定 S50

Kawata+ Exp Astron (2017)

「かに星雲」 >10TeVガンマ線放射



Data/MC比較

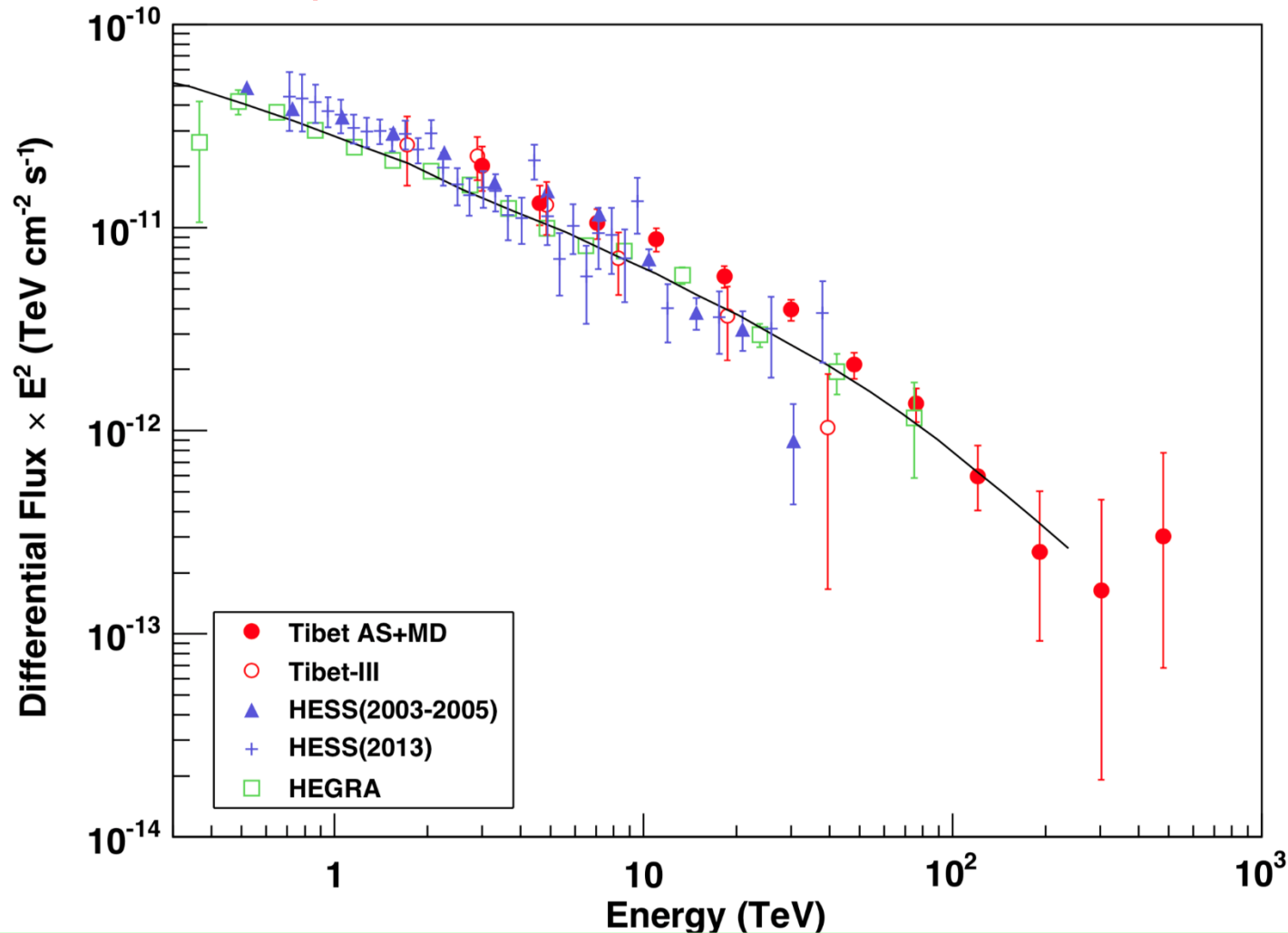


開き角の二乗分布 → 点源と矛盾なし

かに星雲からのガンマ線スペクトル

Sub-PeVガンマ線の世界初観測 (世界記録 450 TeV)

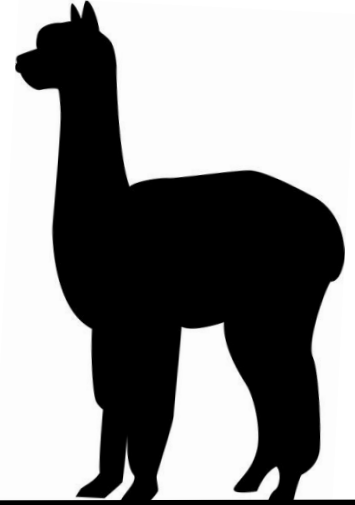
Sub-PeV ガンマ線天文学の始まり M. Amenomori+, PRL **123**, 051101 (2019)



Thick curve : the calculated flux by (IC model by HEGRA) normalized to HEGRA data
Aharonian+, ApJ, 614, 897 (2004)

ALPACA実験

- 南天 宇宙線/ガンマ線 広視野・連続観測 -



Andes

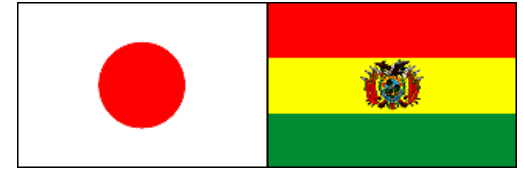
Large area

Particle detector for

Cosmic ray physics and

Astronomy

ALPACA共同研究者（2018）



IIF, UMSA, Bolivia

Martin SUBIETA, Rolando TICONA, Hugo RIVERA,
Mirko RALJEVICH, Javier QUISPE, Pedro MIRANDA

Faculty of Education, Utsunomiya Univ., Japan

Naoki HOTTA

Japan Atomic Energy Agency, Japan

Harufumi TSUCHIYA

Dept. of Physics, Shinshu Univ., Japan

Kazuoki MUNAKATA, Chihiro KATO

ICRR, Univ. of Tokyo, Japan

Masato TAKITA, Munehiro OHNISHI,
Kazumasa KAWATA, Takashi SAKO,
Takashi K. SAKO

College of Industrial Technology, Nihon Univ., Japan

Atsushi SHIOMI

Tokyo Metropolitan College of Industrial Tech., Japan

Toshiharu SAITO

National Inst. of Informatics, Japan

Masaki NISHIZAWA

RIKEN, Japan

Norio TAJIMA

Faculty of Engineering, Kanagawa Univ., Japan

Kinya HIBINO, Shigeharu UDO

Faculty of Engineering, Yokohama National Univ., Japan

Yusaku KATAYOSE, Mikihiro KATAOKA,
Masaru SUZUKI, Miho WAKAMATSU,
Takuro SASAKI, Takanori ASABA

College of Engineering, Chubu Univ., Japan

Akitoshi OSHIMA, Shoichi SHIBATA

Faculty of Engineering, Aichi Inst. of Tech., Japan

Hiroshi KOJIMA

Graduate School of Science, Osaka City Univ., Japan

Shoichi OGIO, Yoshiki TSUNESADA

Faculty of Engineering, Osaka Electro-Communication University, Japan

Yuichiro TAMEDA

Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City University, Japan

Koichi TANAKA

観測サイト

ボリビア・チャカルタヤ山中腹



Narita→Dallas→Miami (16 hours)
Miami→La Paz (7 hours)

観測サイト

チャカルタヤ山山頂
宇宙線観測所
at 5200m a.s.l.

ALPACA観測サイト
4740m a.s.l



サン・アンドレス大学 (UMSA) 宇宙線観測所

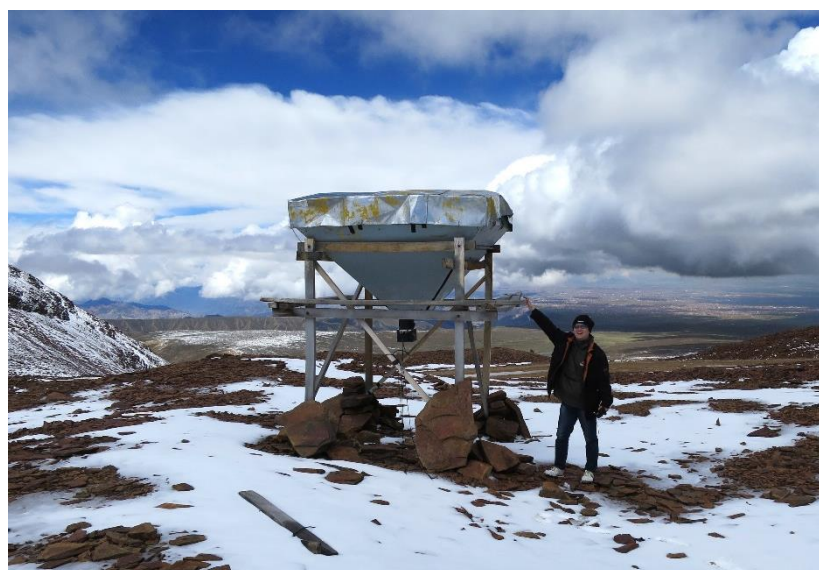
Universidad Mayor de San Andrés



✓ チャカルタヤ山(海拔5,200m)

✓ 世界最高高度にある宇宙線観測所

✓ 1947年:C. F. Powellらによる
パイ中間子の発見
(1950 ノーベル賞)



ALPACA 実験場所：Chacaltaya Plateau (チャカルタヤ・プラトー)

- 16°23'S, 68°08' W
- ラパスから車で約1時間
- 海拔4740m ($\sim 570\text{g/cm}^2$)
- 250,000m² (500m $\times$ 500m)
- 平坦は土地 (傾斜度 $\sim \pm 1^\circ$)



どうしてボリビアか？

- 平らな高地: (海拔 > 4000m)

宇宙線やガンマ線が大気で吸収されてしまうため
大きな観測装置用の平らで大きな敷地が必要

- 南半球；

南天にある銀河中心等面白いガンマ線放射天体が観測可能
(北半球からでは観測不可能)

銀河中心は宇宙線加速器 (PeVatron) として最有力

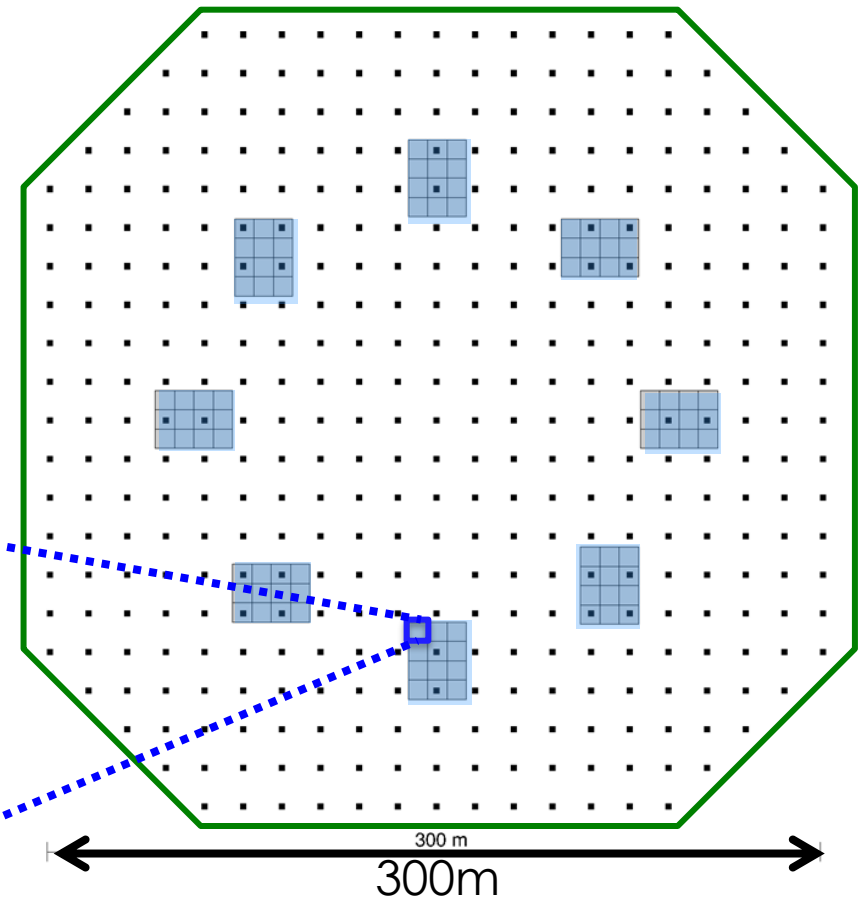
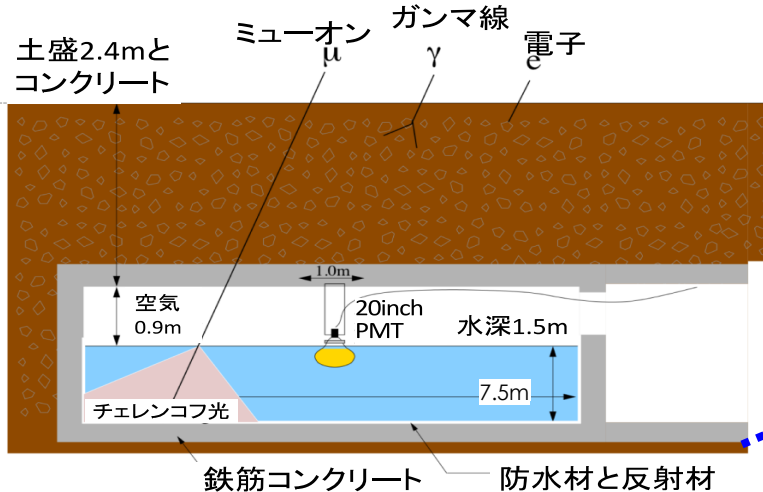
- 宇宙線研究における日本とボリビアの長期実績

(インフラストラクチャー: 電気, 水, 道路, BASJE実験: 1962年より)

ALPACA実験計画

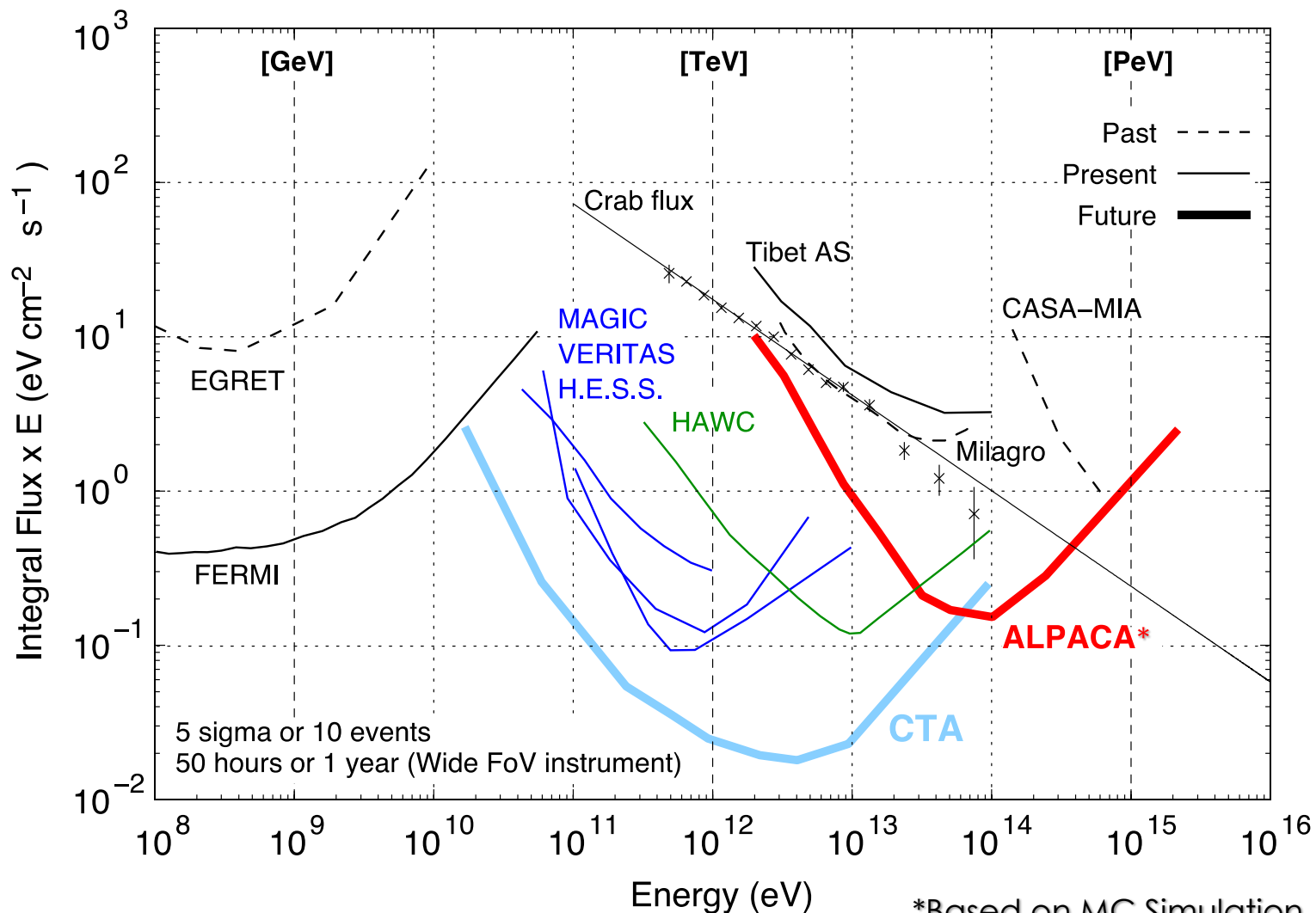
1. 空気シャワーアレイ ~83,000m²
= 401 x 1m² シンチ検出器

2. 地下水チェレンコフ型
ミュオン検出器~5400m²
地下 2.5m (~19X₀)
= 56m² with 20"φPMT x 96セル



- ✓ ガンマ線起源の空気シャワーはミュオンが少ないことを利用
バックグラウンド原子核宇宙線の除去率 >99.9% @100TeV.
- ✓ 広視野(~2sr)で昼夜問わず24時間観測可能
角度分解能 ~0.2° @100TeV エネルギー分解能 ~20%@100TeV

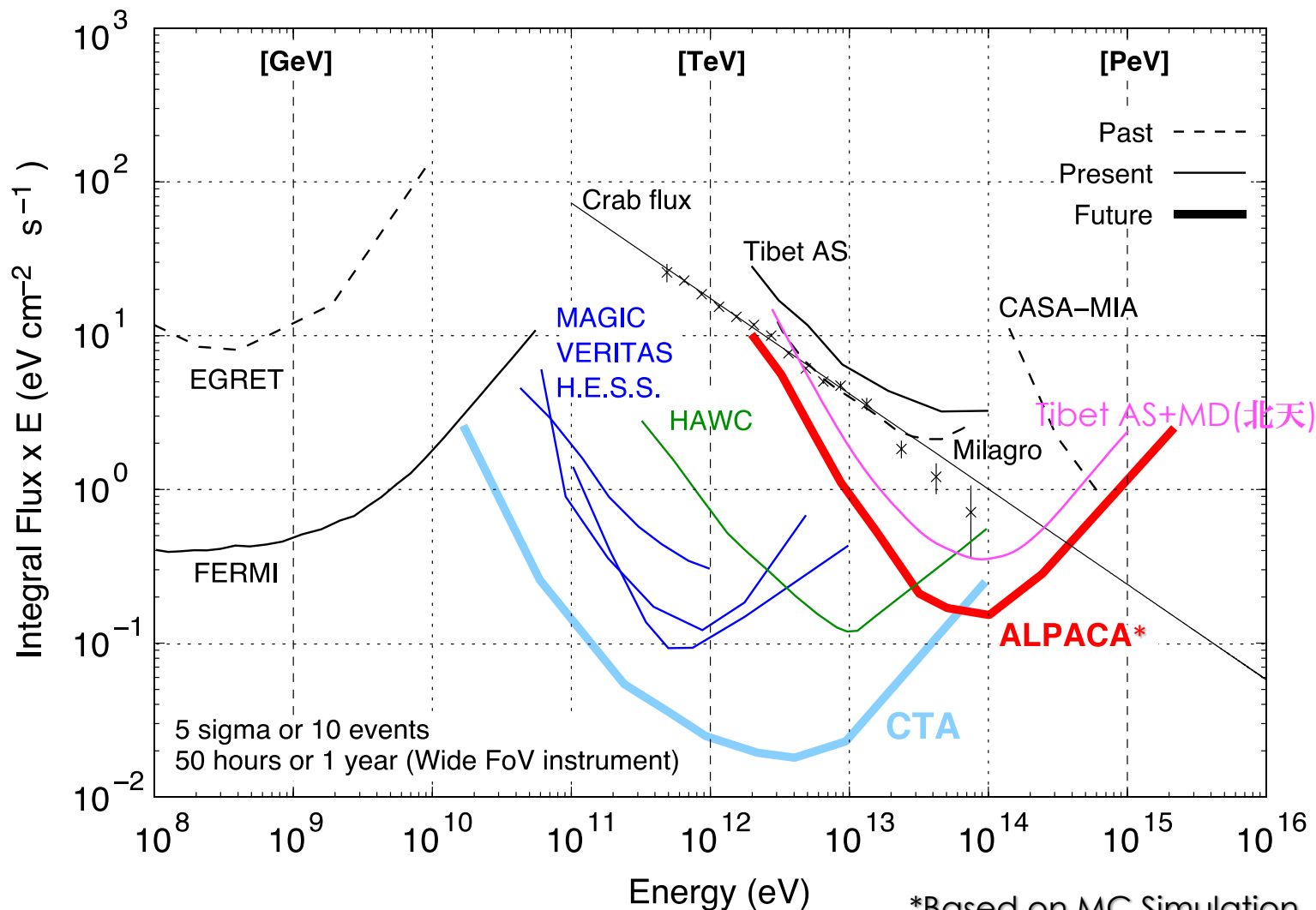
ガンマ線点源に対する感度



*Based on MC Simulation
For the Tibet AS+MD

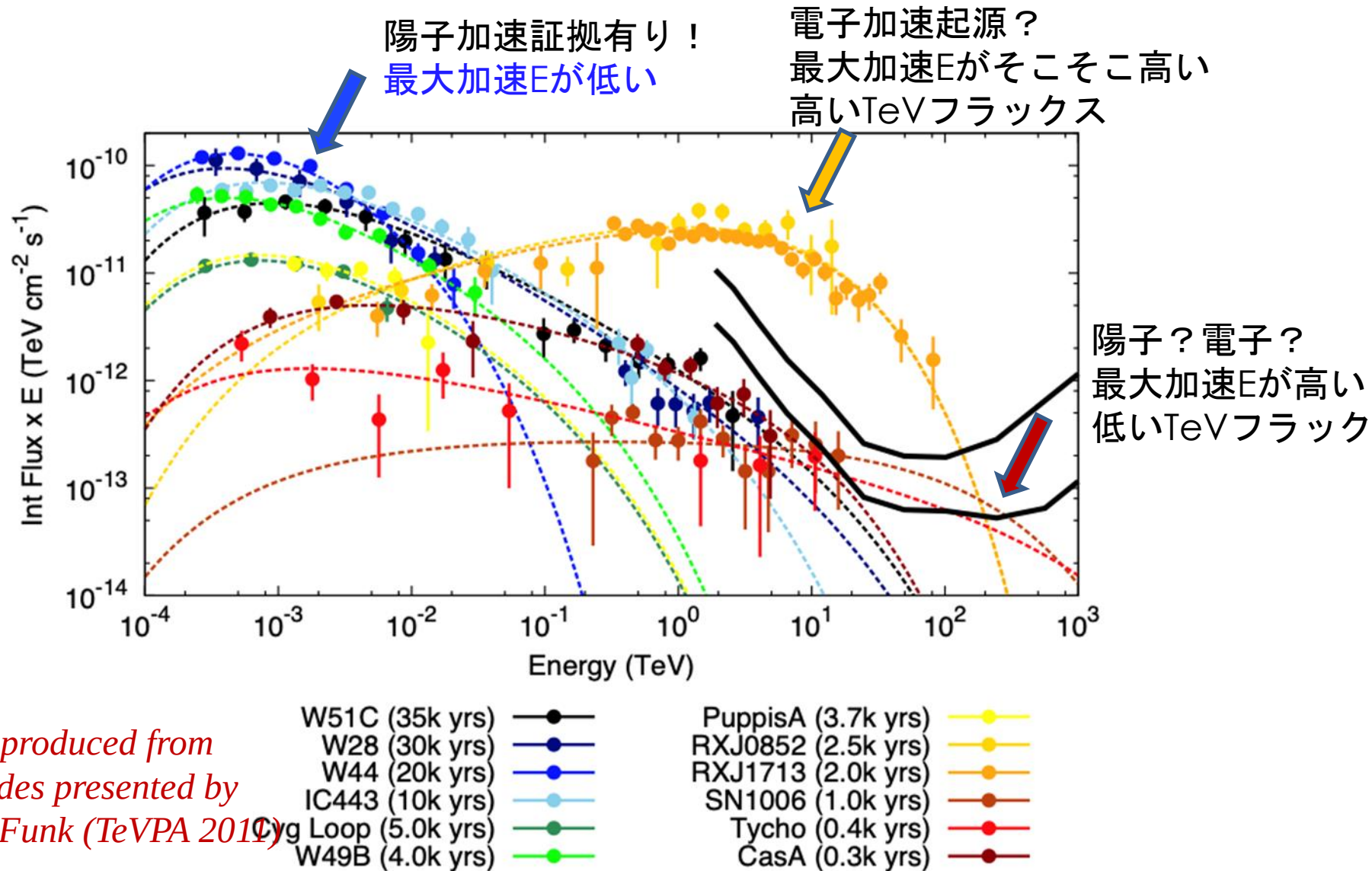
南天を広く視野・連続観測

ガンマ線点源に対する感度



南天を広く視野・連続観測

ガンマ線観測：超新星残骸



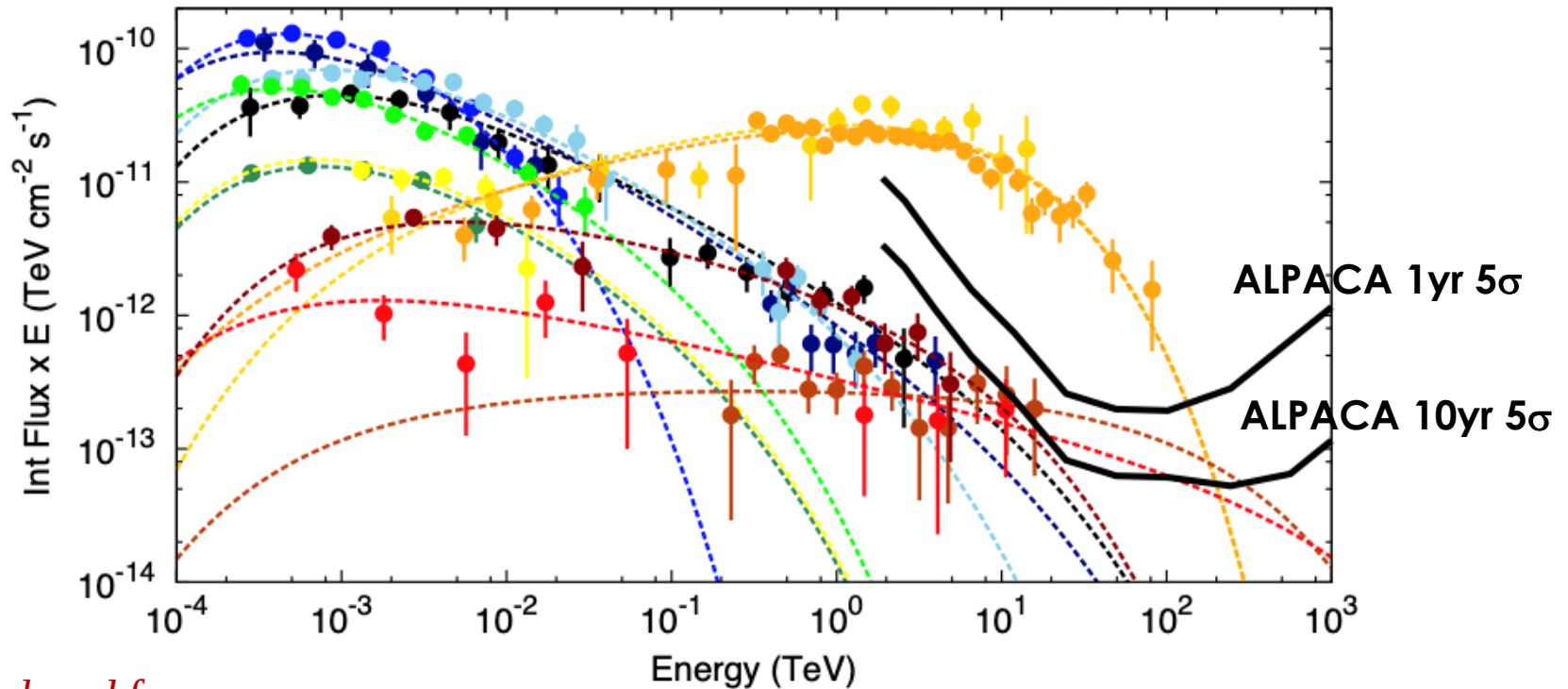
Reproduced from
slides presented by
S. Funk (TeVPA 2010)

ガンマ線観測：超新星残骸

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

PeVatronの証拠

10TeV – PeV



Reproduced from
slides presented by
S. Funk (TeVPA 2011)

W51C (35k yrs) —●—
W28 (30k yrs) —●—
W44 (20k yrs) —●—
IC443 (10k yrs) —●—
Cyg Loop (5.0k yrs) —●—
W49B (4.0k yrs) —●—

PuppisA (3.7k yrs) —●—

RXJ0852 (2.5k yrs) —●—

RXJ1713 (2.0k yrs) —●—

SN1006 (1.0k yrs) —●—

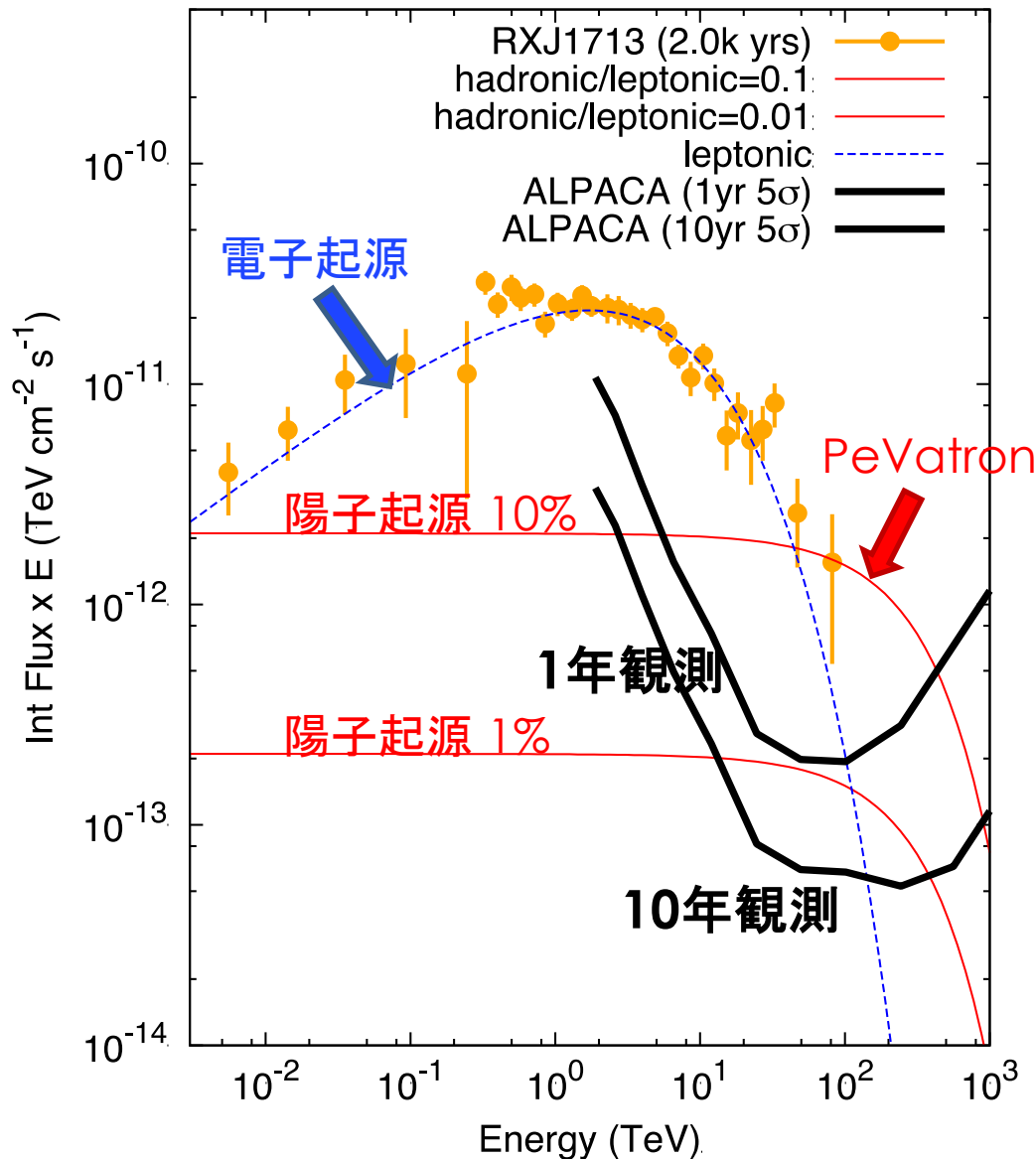
Tycho (0.4k yrs) —●—

CasA (0.3k yrs) —●—

→南天ALPACAI

→北天 Tibet

ガンマ線観測：超新星残骸

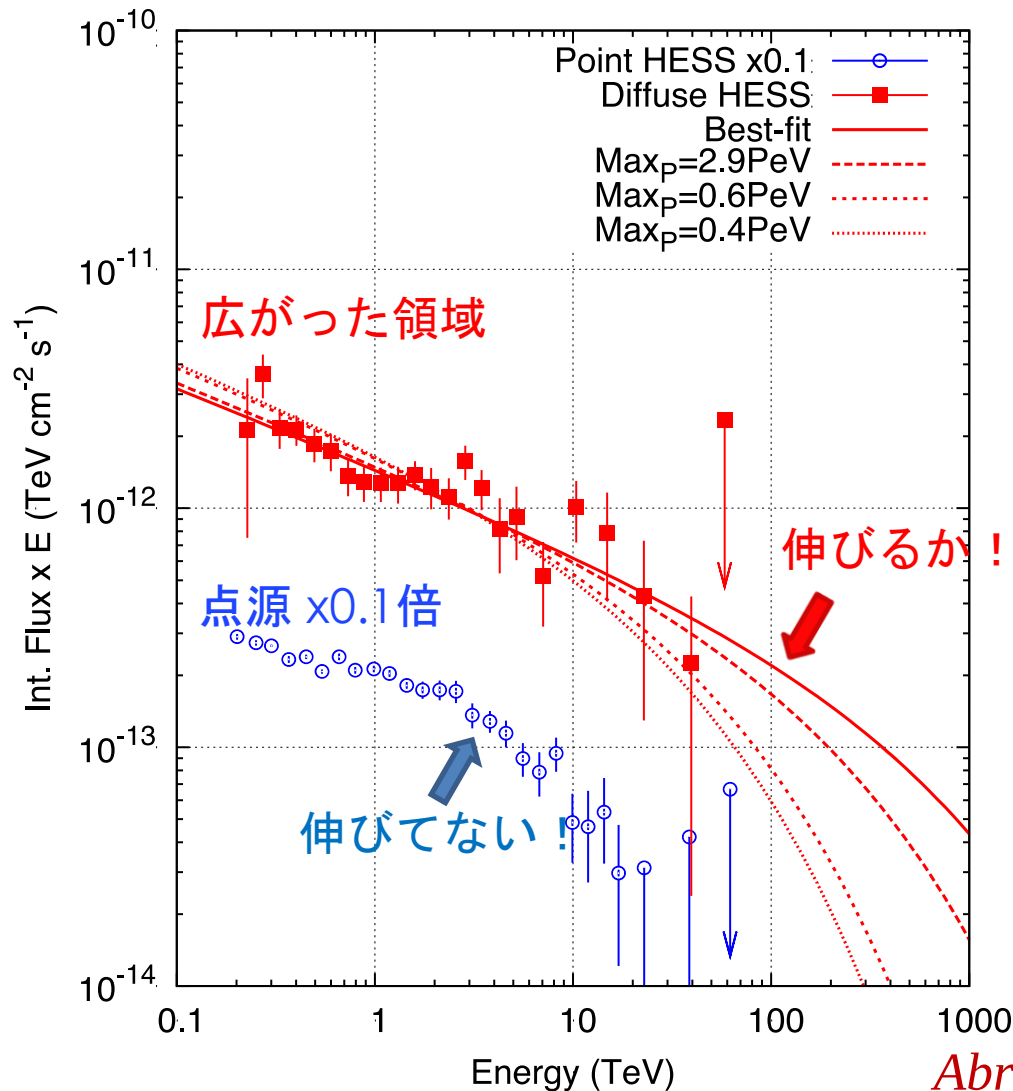


RX J1713.7-3946

- ✓ Fermi-LAT hard index $\Gamma \sim 1.5$
電子起源(IC)を示唆？
- ✓ 電子起源とすると $B = 20 \mu\text{G}$
- ✓ X線によるフィラメント構造や
フラックスの時間変動を説明
するには $B > 100 \mu\text{G}$ 必要？
- ✓ 局所的には陽子起源もあり？
- ✓ スペクトルのバンプが見えれば
陽子加速の有力証拠

Acero+, ApJ, 840, 74 (2017)

ガンマ線観測：銀河系中心



✓ 広がったガンマ線成分

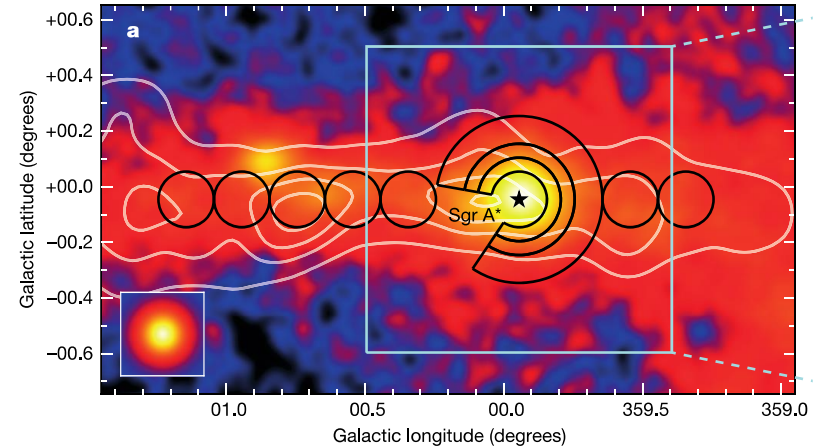
→ 電子起源ではSync.&IC損失が大きく、硬いエネルギースペクトルや広がりを説明不可

✓ Sub-PeV ガンマ線の可能性

✓ スペクトルカットオフは？

→ 陽子の最大加速エネルギーは？

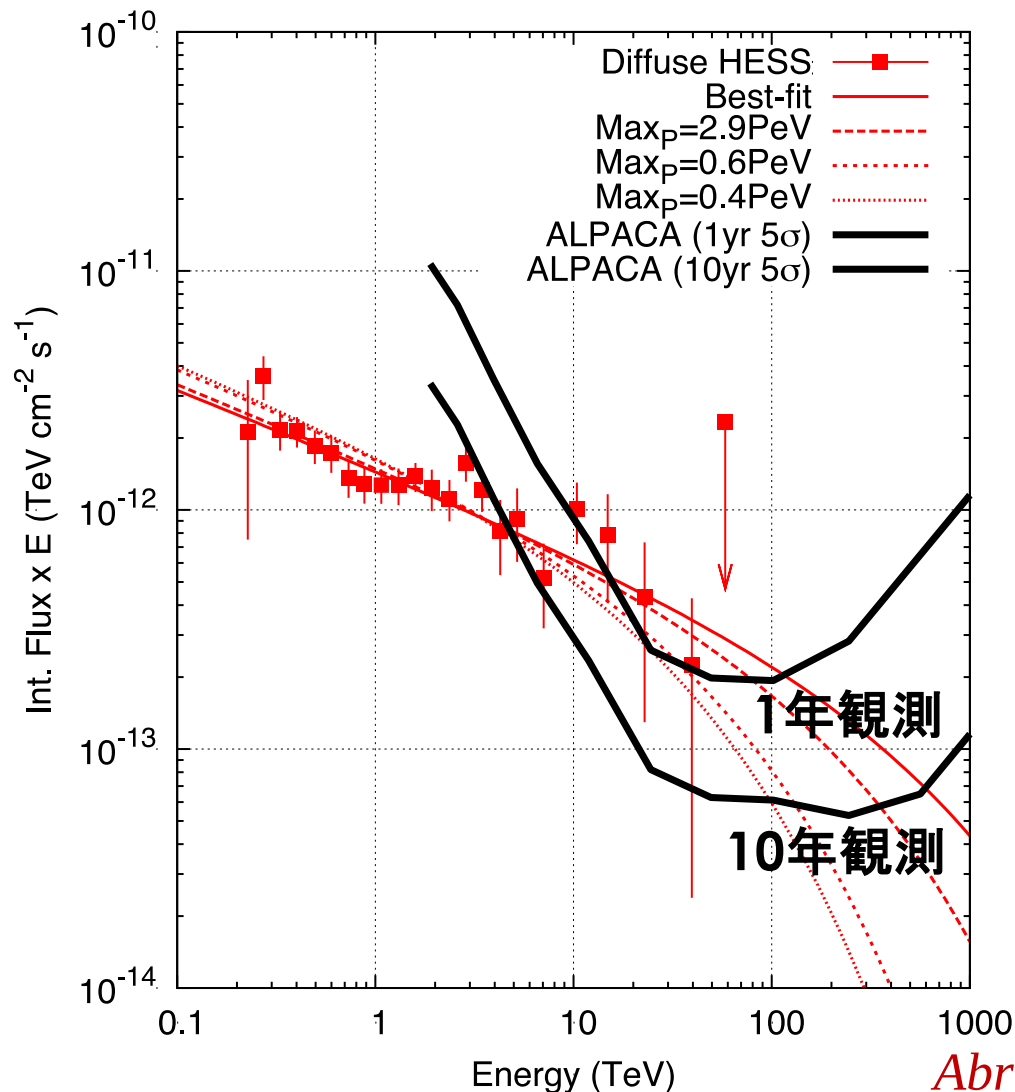
$$\frac{E_{\max}^{\gamma}}{E_{\max}^p} \sim O(1/10)$$



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

“Acceleration of petaelectronvolt protons in the Galactic Centre”

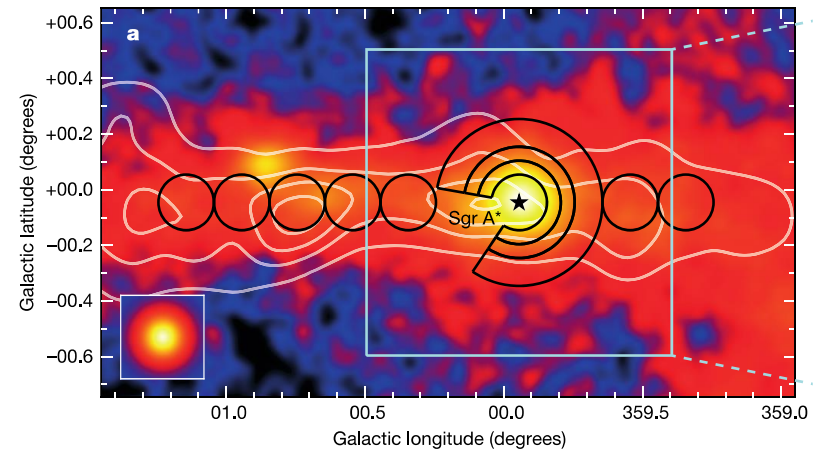
ガンマ線観測：銀河系中心



Sub-PeVのガンマ線観測！
→ PeVatron

Knee領域宇宙線を
説明できるか？

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

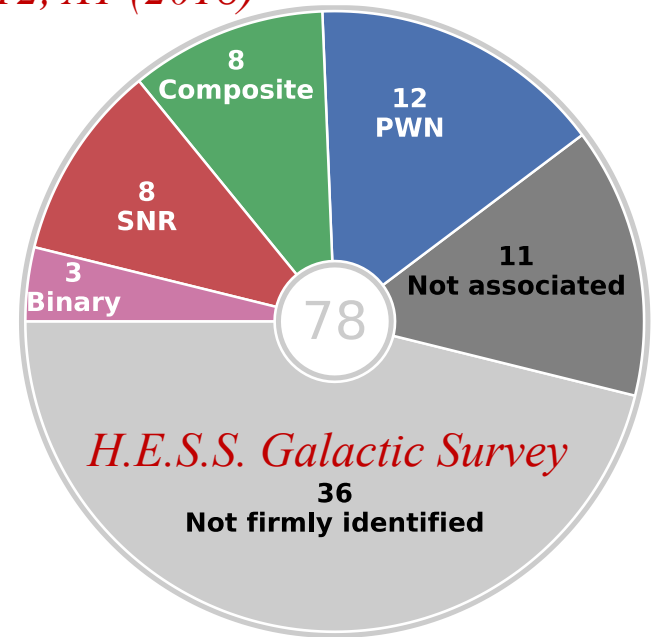
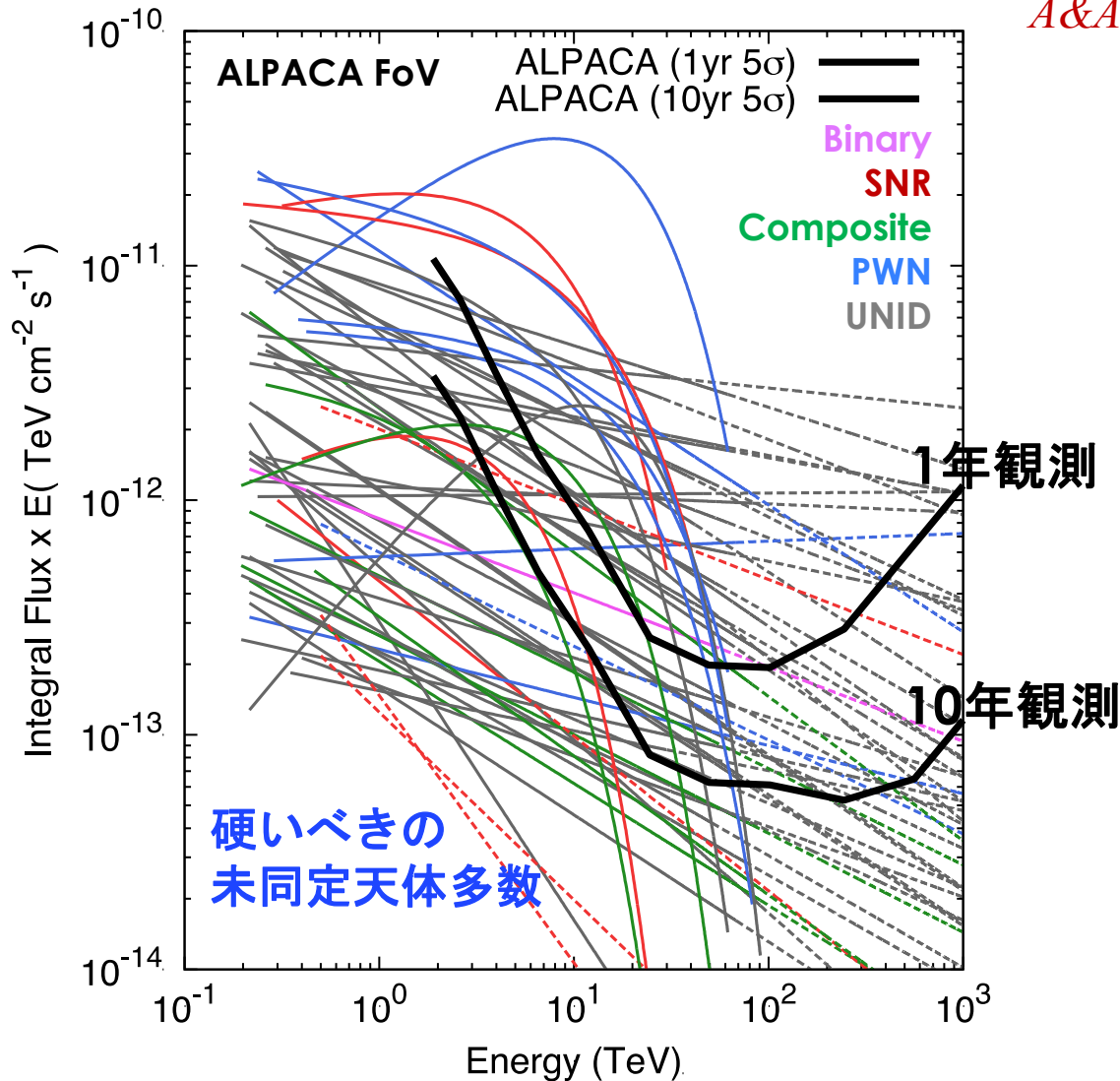


Abramowski+ (H.E.S.S.), Nature (2016)

“Acceleration of petaelectronvolt protons in the Galactic Centre”

ガンマ線観測：Dark Accelerators

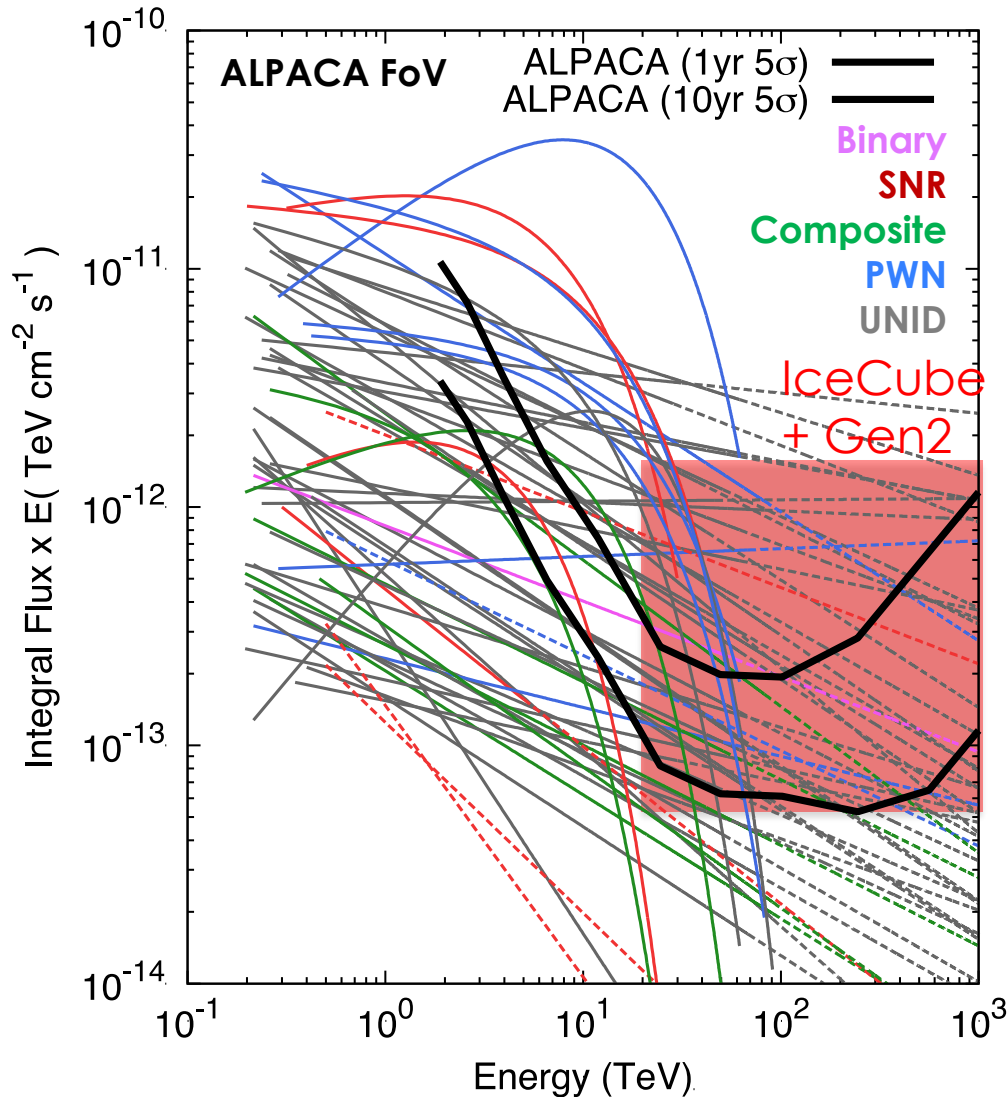
A&A 612, A1 (2018)



100TeV以上に
硬いベキ(~ 2)で続く
広がった天体 (+分子雲)
→ PeVatronの可能性大

数10TeV以上 >30天体 PeVatronの探索

超高エネルギーニュートリノ観測との比較



- ✓ 銀河系内 > 100 TeV ニュートリノ
ガンマ線と同程度のフラックス

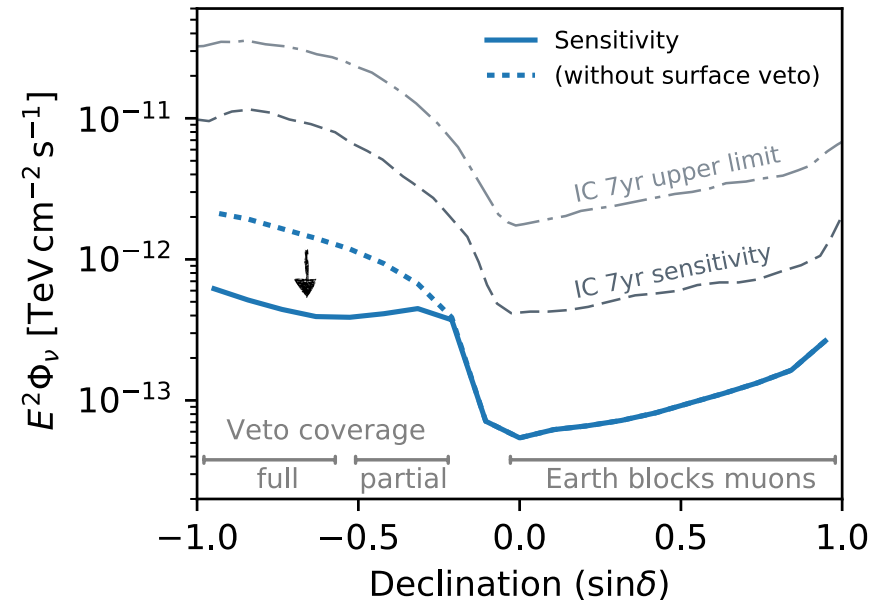
$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

$$\pi^{+/-} \rightarrow \mu^{+/-} + \nu_{\mu}$$

$$\mu^{+/-} \rightarrow e^{+/-} + \nu_e + \nu_{\mu}$$

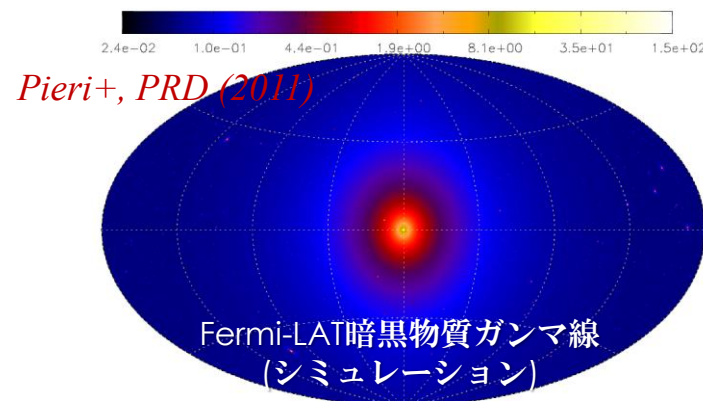
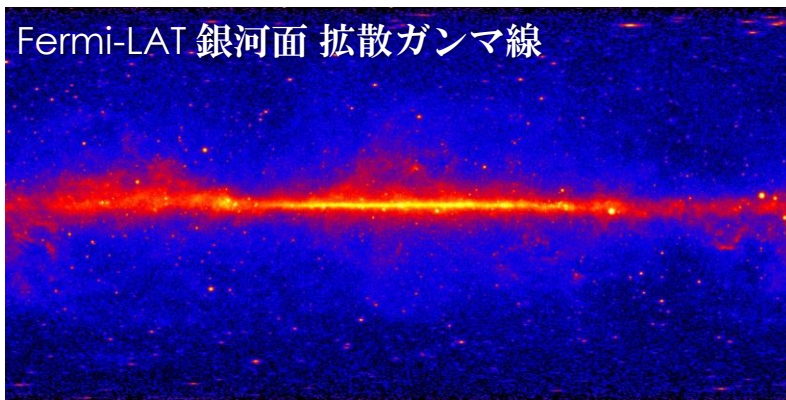
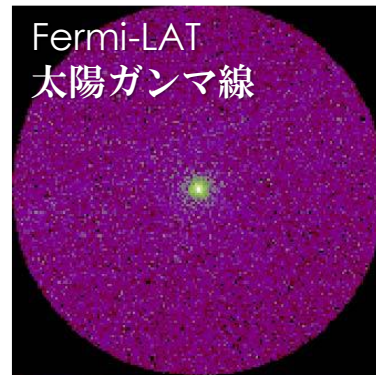
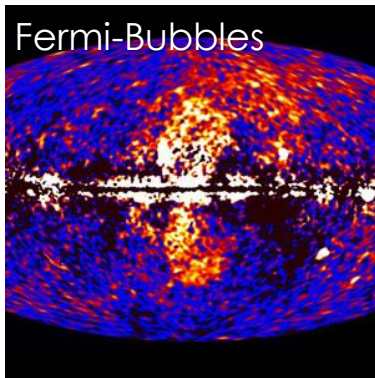
- ✓ IceCube + Gen2
同じエネルギー領域で観測

15 years IceCube + 15 years Gen2



Jakob van Santen (ICRC 2017)

その他 10TeV以上ターゲット



- ✓ Fermi Bubbles
 - 広視野観測、
 - 銀河中心付近は硬いベキ ~ -2
- ✓ Galactic diffuse gamma
 - 広視野観測、南天で非常に明るい
- ✓ Solar disk gamma rays
 - 昼間の観測が必要
 - 宇宙線起源? 硬いベキ ~ -2
- ✓ Nearby AGN
 - $>10\text{TeV}\gamma$ を広視野モニター
 - high z でも硬いベきのAGN存在
- ✓ Very heavy dark-matter search
 - $>10\text{TeV}$ 銀河中心、矮小銀河、太陽
 - 球対称に広がったガンマ線分布

広視野・連続観測

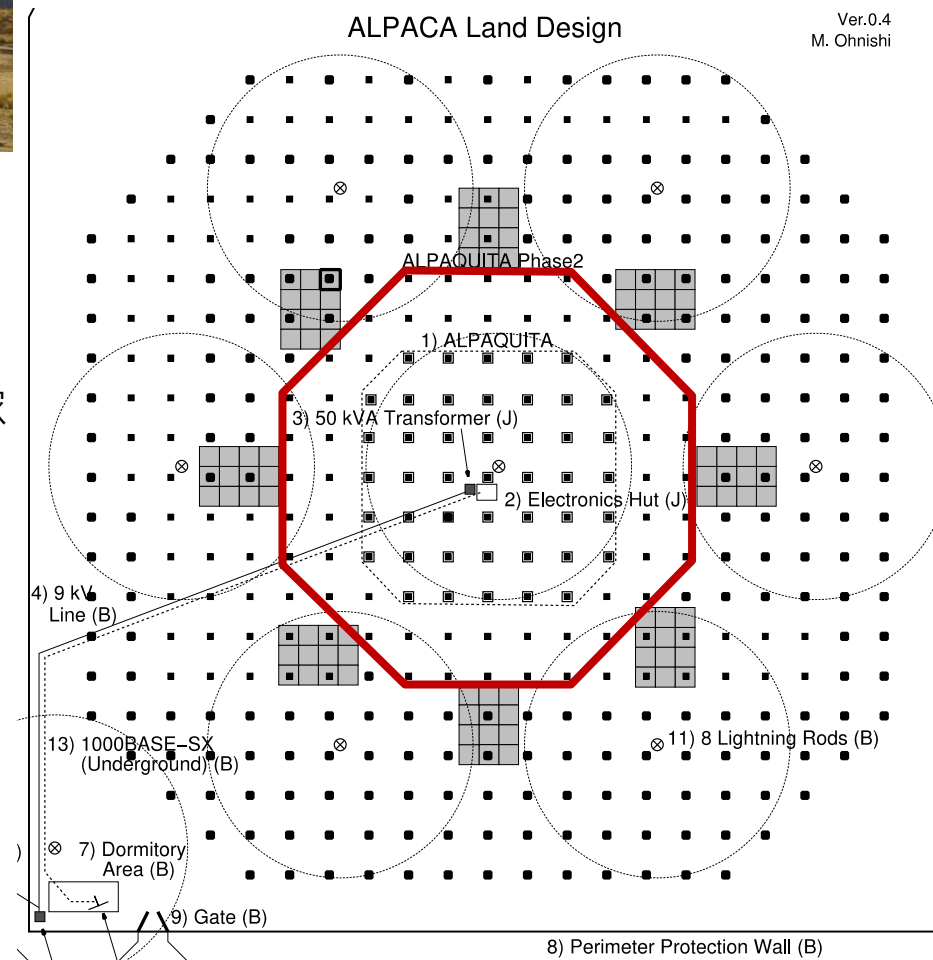


ALPAQUITA

(アルパキータ: 赤線内)

- プロトタイプ 空気シャワーアレイ 約 100 台 + 約 $\sim 1000\text{m}^2$ ミューオン検出器
 - ~25% of ALPACA 空気シャワーアレイ 2019-2020年インフラ整備・建設・稼動予定
 - ~20% of ALPACA ミューオン検出器 2020年建設・稼動予定

- 期待される物理
 - 明るい100 TeV領域ガンマ線放射天体
 - 宇宙線異方性 (TeV 領域)
 - 太陽の影



大学院生活

- **現行実験** : Tibet-AS+MD 100TeV γ **天文学の開拓** :
• PeVatronを探せ！」
Tibet-AS+YAC 宇宙線の加速機構解明
MD & YAC-II Started 2014
- **次期計画** ALPACA計画 南天100 TeV γ , Pevatron等
ALPAQUITA ~25% ALPACA 2020
Good Timing For You!
- **チベット・ボリビア出張** 約1ヶ月/年
- **その他** : 本郷で講義、柏でゼミ、
• 測定器開発やデータ解析

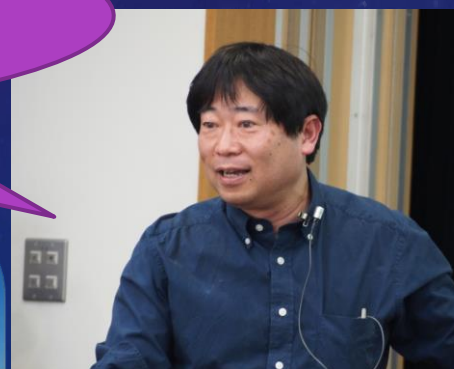
銀河宇宙線・ガンマ線

- **宇宙線の起源、Pevatronを探せ！**
 - PeVatronからのsub-PeV領域ガンマ線の世界初検出を目指します。

比較的小規模でユニークな研究
が好きな方、お待ちしております。



塔 (A8)



瀧田 (A8)



End

