

チベット高原での 高エネルギー宇宙線の研究

塩見 昌司 (日本大学生産工学部)

For the Tibet AS γ Collaboration

令和元年度チベット実験関係 共同利用研究採択課題一覧

1. チベット高原での高エネルギー宇宙線の研究（継続）
(瀧田正人 東京大学宇宙線研究所)
2. Knee領域一次宇宙線組成の研究（継続）
(片寄祐作 横浜国立大学大学院工学研究院)
3. 宇宙線による太陽の影を用いた太陽周辺磁場の時間変動の研究
(継続)
(西澤正己 国立情報学研究所情報社会相関研究系)
4. チベット空気シャワーアレイによる10TeV宇宙線強度の
恒星時日周変動の観測（継続）
(宗像一起 信州大学理学部)

チベットグループ共同利用研究経費 執行状況

研究費： 申請額 577万円 → 配分額 150万円

Tibet-ASの維持・運転及び
YAC空気シャワーコア観測装置と
水チェレンコフ型地下ミューオン観測装置の
維持・運転に必要な経費の一部に使用。

旅費： 申請額 985万円 → 配分額 275万円

中国出張海外旅費や宇宙線研での研究打ち合わせに使用。

ご支援、どうもありがとうございます！

成果発表

- **査読論文**

- Amenomori et al., PRL, 123/5, 051101(2019)
→ 東京大学・横浜国立大学・日本大学・神奈川大学より
合同プレスリリース

- **学会発表**

- | | |
|------------------------|----------|
| • ICRC2019(Wisconsin) | 15件 |
| • CRA2019(Itary) | 1 件 |
| • TAUP2019(Toyama) | 1 件 |
| • AOOGS2019(Singapore) | 1 件 |
| • ISEE太陽圏研究集会2019年2月 | 1 件 (予定) |
| • 日本物理学会2019年秋(山形大学) | 4 件 |
| • 日本物理学会2020年春(名古屋大学) | 3 件 (予定) |

Viewpoint: Highest Energy Astrophysical Photons Detected

Rene A. Ong, Department of Physics and Astronomy, University of California, Los Angeles, CA, USA

July 29, 2019 • *Physics* 12, 87

PHYSICAL REVIEW LETTERS 123, 051101 (2019)

Editors' Suggestion

Featured in Physics

Received April 4, 2019, accepted June 13, published July 29, 2019 in PRL

First Detection of Photons with Energy beyond 100 TeV from an Astrophysical Source

M. Amenomori,¹ Y. W. Bao,² X. J. Bi,³ D. Chen,⁴ T. L. Chen,⁵ W. Y. Chen,³ Xu Chen,^{3,6,†} Y. Chen,² Cirennima,⁵ S. W. Cui,⁷ Danzengluobu,⁵ L. K. Ding,³ J. H. Fang,^{3,6} K. Fang,³ C. F. Feng,⁸ Zhaoyang Feng,³ Z. Y. Feng,⁹ Qi Gao,⁵ Q. B. Gou,³ Y. Q. Guo,³ H. H. He,³ Z. T. He,⁷ K. Hibino,¹⁰ N. Hotta,¹¹ Haibing Hu,⁵ H. B. Hu,³ J. Huang,^{3,§} H. Y. Jia,⁹ L. Jiang,³ H. B. Jin,⁴ F. Kajino,¹² K. Kasahara,¹³ Y. Katayose,¹⁴ C. Kato,¹⁵ S. Kato,¹⁶ K. Kawata,^{16,*} M. Kozai,¹⁷ Labaciren,⁵ G. M. Le,¹⁸ A. F. Li,^{19,8,3} H. J. Li,⁵ W. J. Li,^{3,9} Y. H. Lin,^{3,6} B. Liu,² C. Liu,³ J. S. Liu,³ M. Y. Liu,⁵ Y.-Q. Lou,²⁰ H. Lu,³ X. R. Meng,⁵ H. Mitsui,¹⁴ K. Munakata,¹⁵ Y. Nakamura,³ H. Nanjo,¹ M. Nishizawa,²¹ M. Ohnishi,¹⁶ I. Ohta,²² S. Ozawa,¹³ X. L. Qian,²³ X. B. Qu,²⁴ T. Saito,²⁵ M. Sakata,¹² T. K. Sako,¹⁶ Y. Sengoku,¹⁴ J. Shao,^{3,8} M. Shibata,¹⁴ A. Shiomi,²⁶ H. Sugimoto,²⁷ M. Takita,^{16,‡} Y. H. Tan,³ N. Tateyama,¹⁰ S. Torii,¹³ H. Tsuchiya,²⁸ S. Udo,¹⁰ H. Wang,³ H. R. Wu,³ L. Xue,⁸ K. Yagisawa,¹⁴ Y. Yamamoto,¹² Z. Yang,³ A. F. Yuan,⁵ L. M. Zhai,⁴ H. M. Zhang,³ J. L. Zhang,³ X. Zhang,² X. Y. Zhang,⁸

成果発表

- 1. チベット高原での高エネルギー宇宙線の研究

全体： ICRC2019 (1) , CRA2019

超高エネルギー線：

ICRC2019 (6) , TAUP2019, 日本物理学会 (4) ,日本天文学会 (1)

- 2. Knee領域一次宇宙線組成の研究

ICRC2019 (3) , 日本物理学会 (1)

- 3. 宇宙線による太陽の影を用いた太陽周辺磁場の時間変動の研究

ICRC2019 (1) , 日本物理学会 (1)

- 4. チベット空気シャワーアレイによる10TeV宇宙線強度の恒星時
日周変動の観測 → (宗像)

ICRC2019 (3) , AOGS2019, 日本物理学会 (1)



チベットAS γ 実験 共同研究者



M. Amenomori¹, Y.W. Bao², X.J. Bi³, D. Chen⁴, T.L. Chen⁵, W. Y. Chen³, Xu Chen^{3,6}, Y. Chen², Cirennima⁵, S. W. Cui⁷, Danzengluobu⁵, L.K. Ding³, J.H. Fang^{3,6}, K. Fang³, C.F. Feng⁸, Zhaoyang Feng³, Z.Y. Feng⁹, Qi Gao⁵, Q.B. Gou³, Y.Q. Guo³, H.H. He³, Z.T. He⁷, K. Hibino¹⁰, N. Hotta¹¹, Haibing Hu⁵, H.B. Hu³, J. Huang³, H.Y. Jia⁹, L. Jiang³, H.B. Jin⁴, F. Kajino¹², K. Kasahara¹³, Y. Katayose¹⁴, C. Kato¹⁵, S. Kato¹⁶, K. Kawata¹⁶, M. Kozai¹⁷, Labaciren⁵, G.M. Le¹⁸, A.F. Li^{19,8,3}, H.J. Li⁵, W.J. Li^{3,9}, Y.H. Lin^{3,6}, B. Liu², C. Liu³, J.S. Liu³, M.Y. Liu⁵, Y.-Q. Lou²⁰, H. Lu³, X.R. Meng⁵, H. Mitsui¹⁴, K. Munakata¹⁵, Y. Nakamura³, H. Nanjo¹, M. Nishizawa²¹, M. Ohnishi¹⁶, I. Ohta²², S. Ozawa¹³, X.L. Qian²³, X.B. Qu²⁴, T. Saito²⁵, M. Sakata¹², T.K. Sako¹⁶, Y. Sengoku¹⁴, J. Shao^{3,8}, M. Shibata¹⁴, A. Shiomi²⁶, H. Sugimoto²⁷, M. Takita¹⁶, Y. H. Tan³, N. Tateyama¹⁰, S. Torii¹³, H. Tsuchiya²⁸, S. Udo¹⁰, H. Wang³, H. R. Wu³, L. Xue⁸, K. Yagisawa¹⁴, Y. Yamamoto¹², Z. Yang³, A. F. Yuan⁵, L. M. Zhai⁴, H.M. Zhang³, J.L. Zhang³, X. Zhang², X.Y. Zhang⁸, Y. Zhang³, Yi Zhang³, Ying Zhang³, Zhaxisangzhu⁵, and X. X. Zhou⁹

1. 弘前大学理工学部
2. 南京大学
3. 中国科学院高能物理研究所
4. 中国科学院国家天文台
5. チベット大学
6. 中国科学院大学
7. 河北師範大学
8. 山東大学
9. 西南交通大学
10. 神奈川大学工学部
11. 宇都宮大学教育学部
12. 甲南大学理工学部
13. 早稻田大学理工学術院
14. 横浜国立大学大学院工学研究院

15. 信州大学理学部
16. 東京大学宇宙線研究所
17. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
18. 中国気象局
19. 山東農業大学
20. 清華大学
21. 国立情報学研究所
22. 作新学院大学
23. 山東管理学院
24. 中国石油大学
25. 東京都立産業技術高等専門学校
26. 日本大学生産工学部
27. 湘南工科大学
28. 日本原子力研究開発機構

チベット空気シャワー観測装置

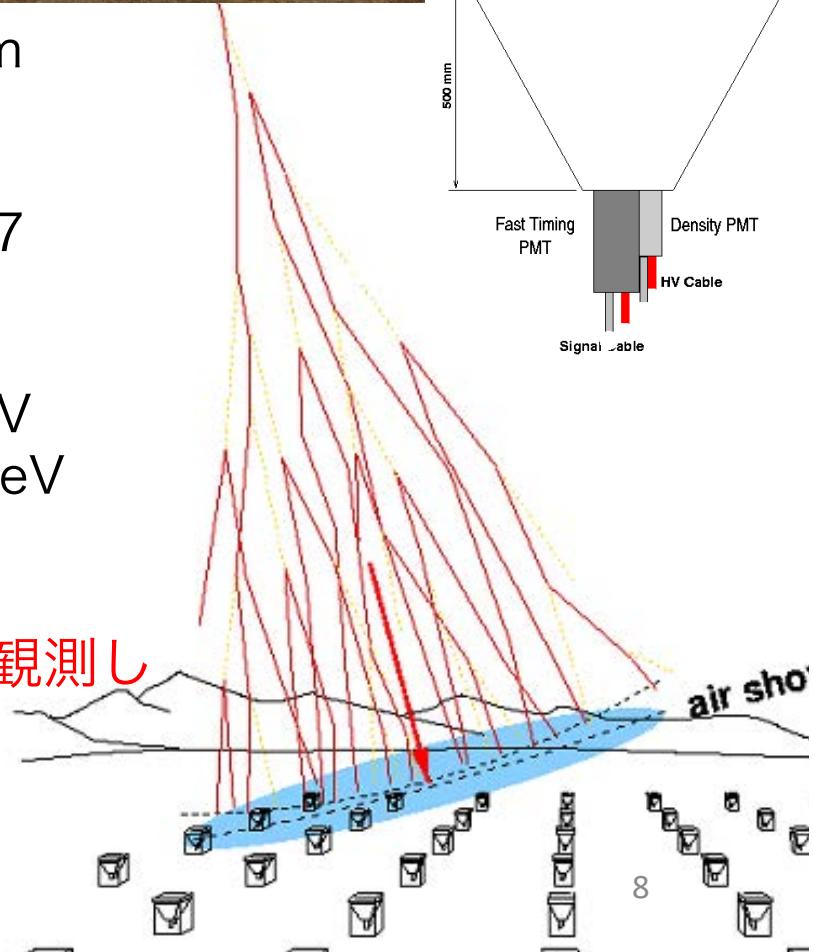
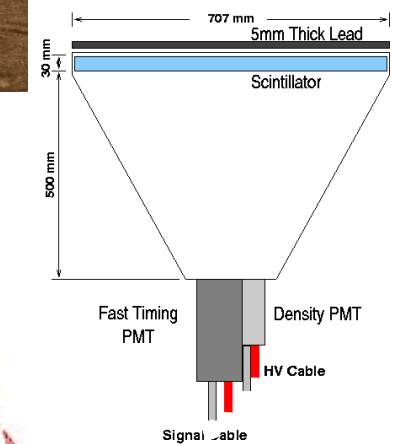


□ チベット (90.522°E , 30.102°N) 標高4300 m

現行スペック

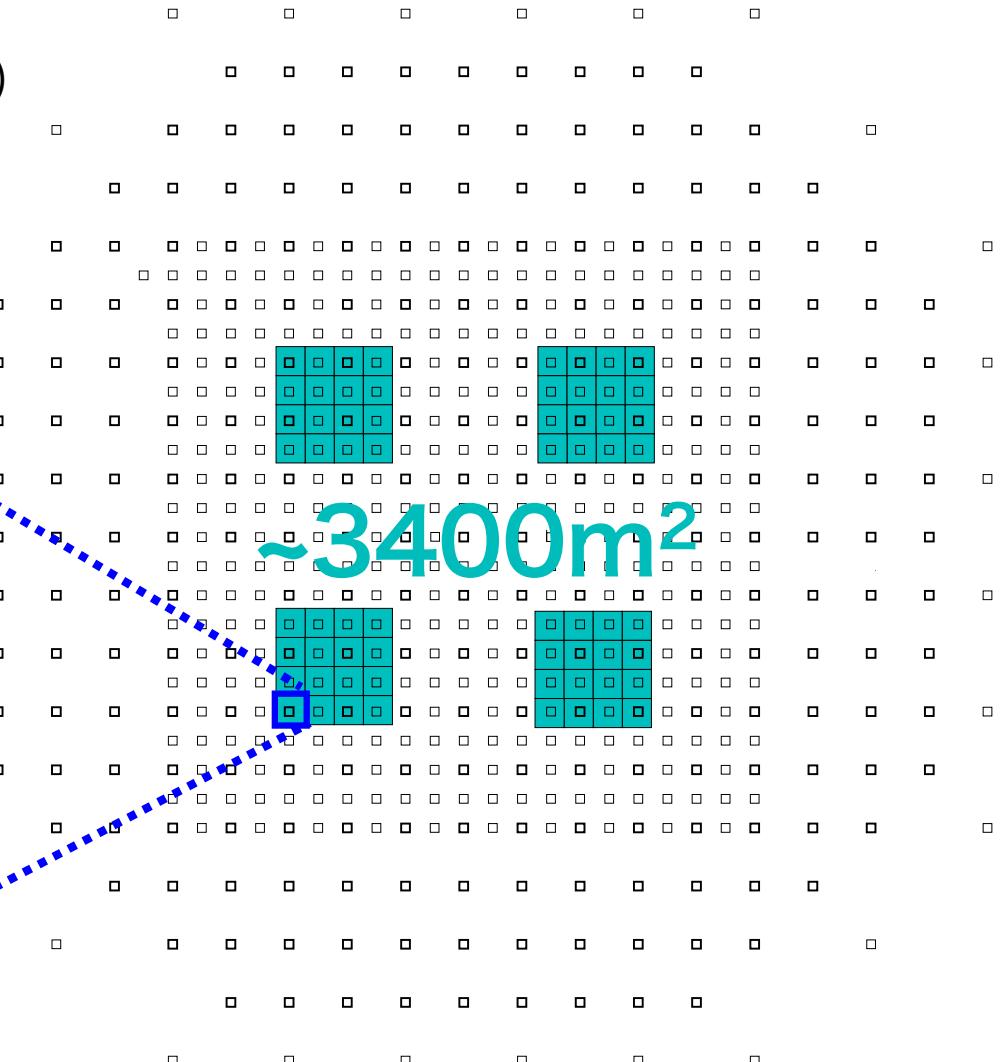
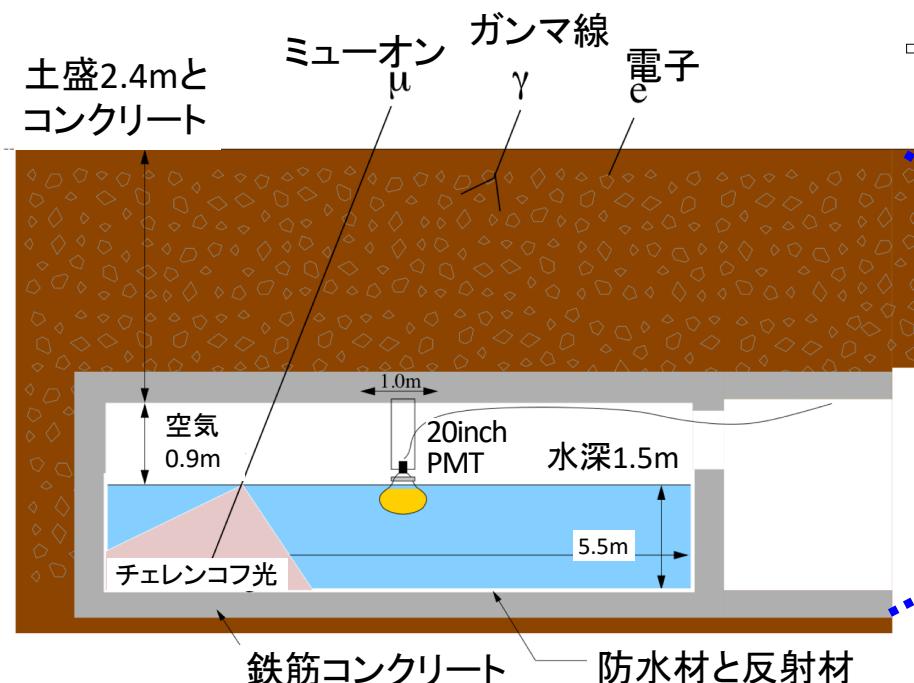
- | | |
|----------------|---|
| □ シンチレーション検出器数 | $0.5 \text{ m}^2 \times 597$ |
| □ 空気シャワー有効面積 | $\sim 50,000 \text{ m}^2$ |
| □ 観測エネルギー | $>\text{TeV}$ |
| □ 角度分解能 | $\sim 0.5^{\circ} @ 10\text{TeV}$ $\sim 0.2^{\circ} @ 100\text{TeV}$ |
| □ 視野 | $\sim 2 \text{ sr}$ |

→空気シャワー中の二次粒子(主に $e^{+/-}, \gamma$)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ーオン観測装置

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



→ 空気シャワー中のミューオン数を測定し、ガンマ線／核子選別

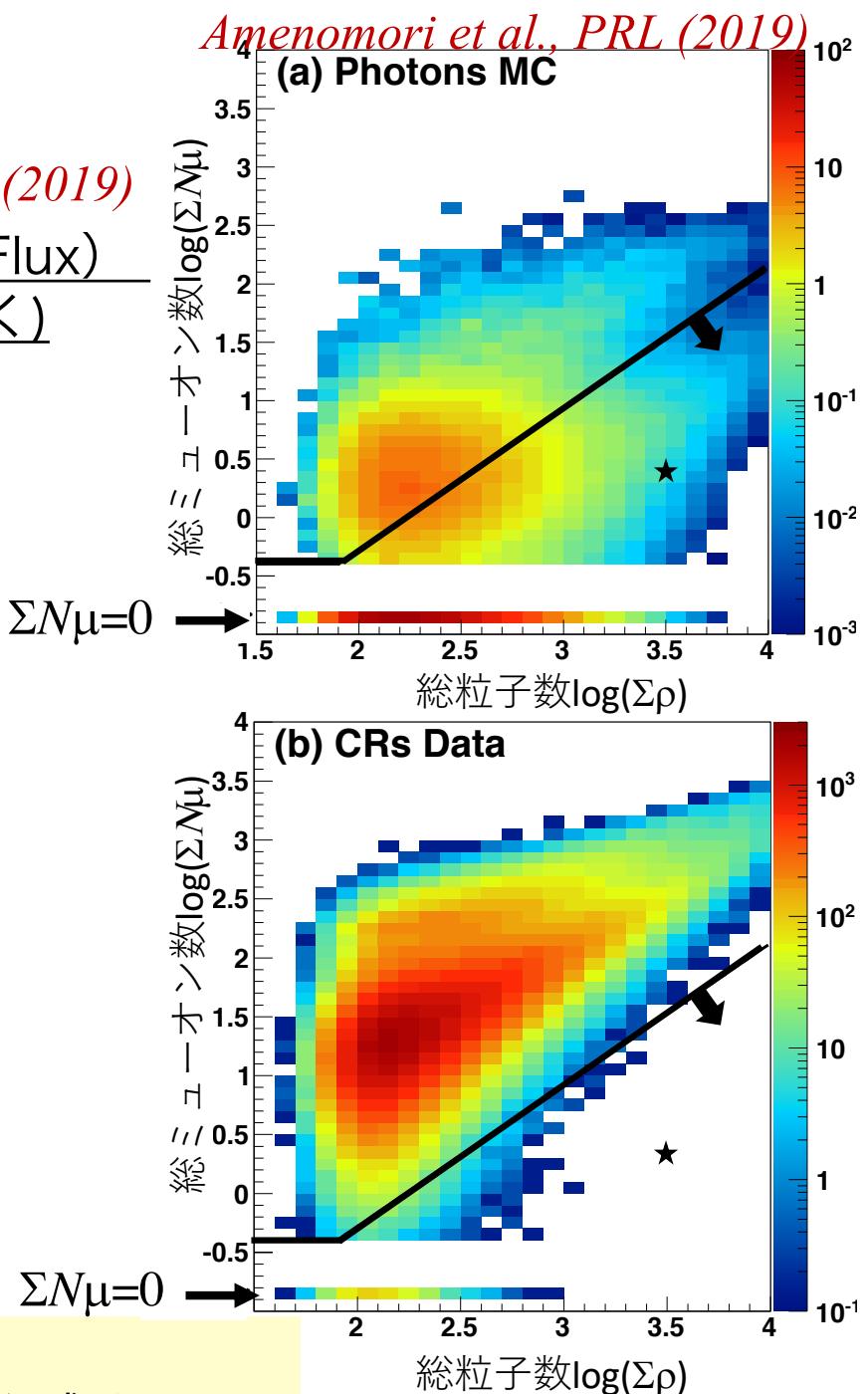
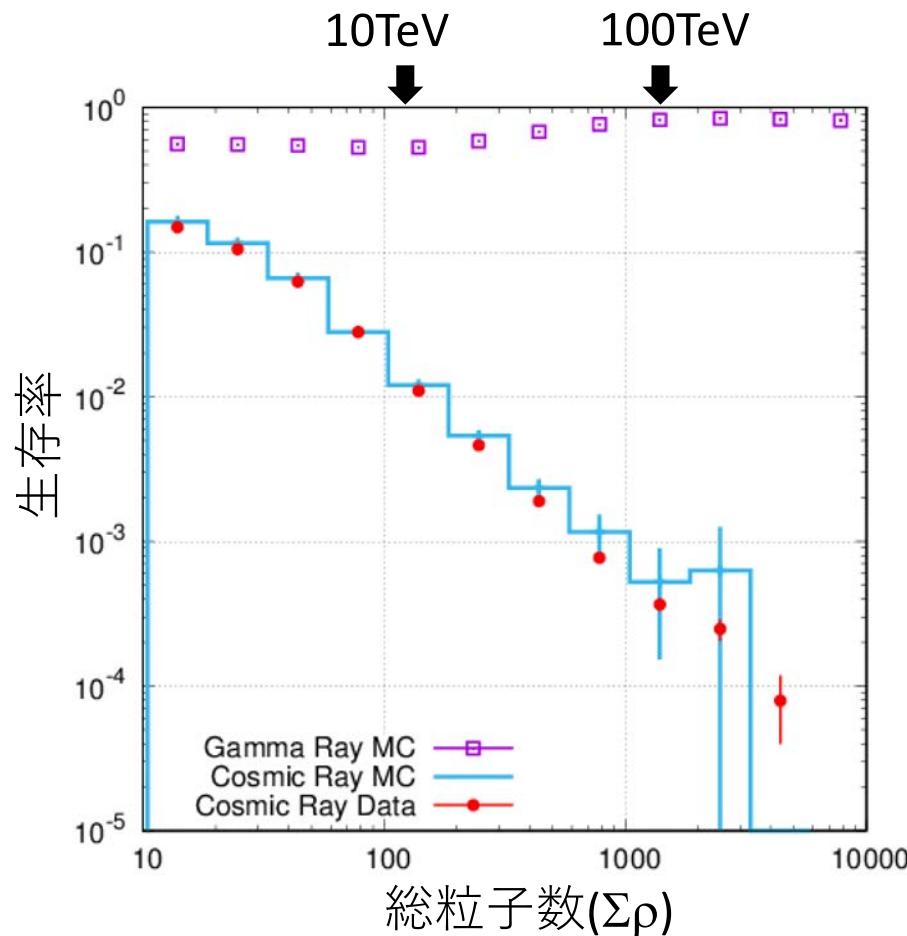
2014年2月 – 2017年5月 有効観測時間：719日

ミューオン・カット

→ カットの最適化 *Amenomori et al., PRL (2019)*

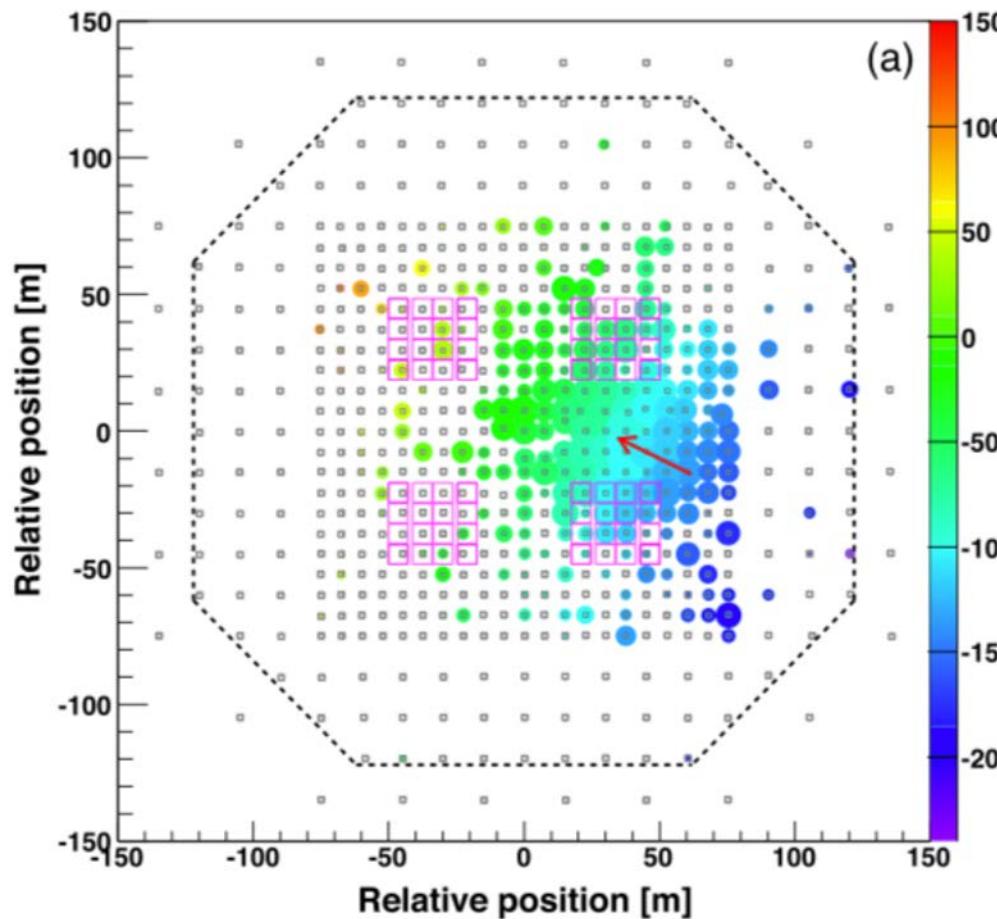
ガンマ線: MCデータ (Crab軌道、Crab Flux)

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

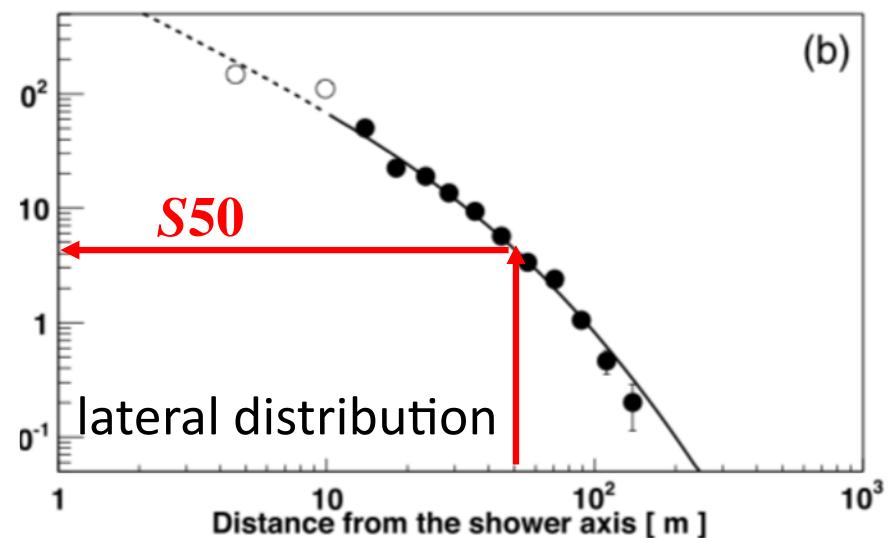
「かに星雲」 ガンマ線空気シャワー候補事象



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

Amenomori et al., PRL (2019)

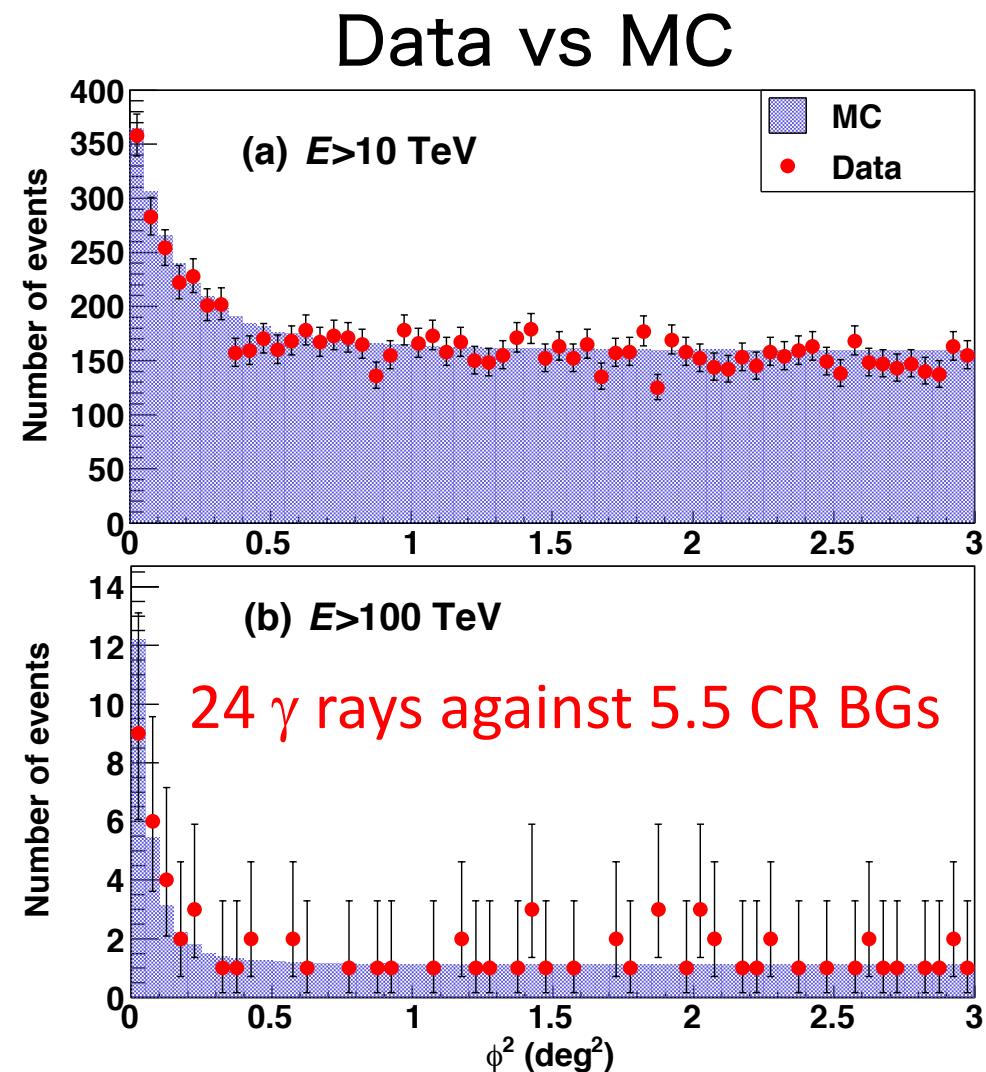
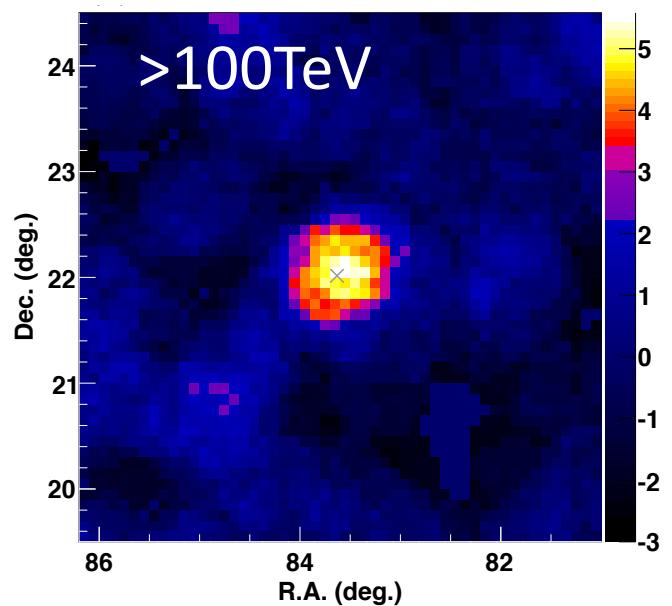
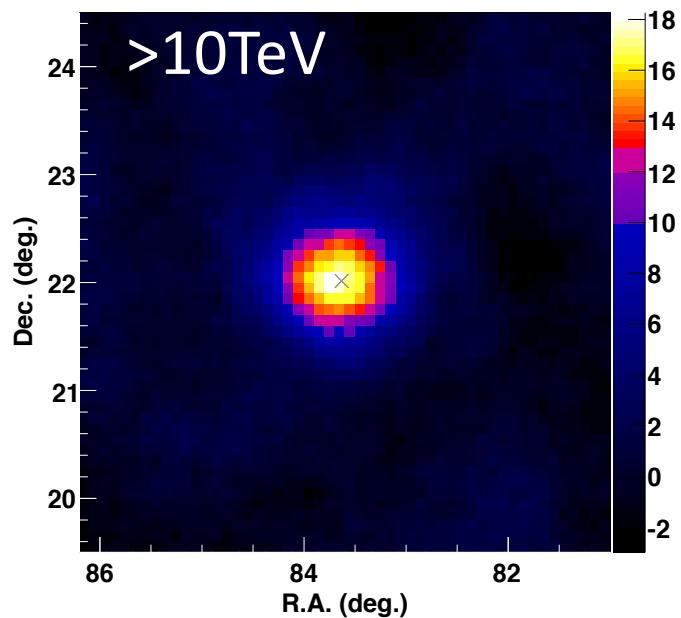
- 総粒子数 ($\sum \rho$) = 3256
- 総ミューオン数 (SN_μ) = 2.3
- 天頂角 (q) = 29.8°
- エネルギー = $(251^{+46}_{-43}) \text{ TeV}$



NKG関数によるフィット
→ エネルギー推定 ($S50, \theta$)
(Kawata+ Exp Astron (2017))

S50 により E 決定精度が向上 (10-1000 TeV)
→ ~40%@10 TeV, ~20%@100 TeV

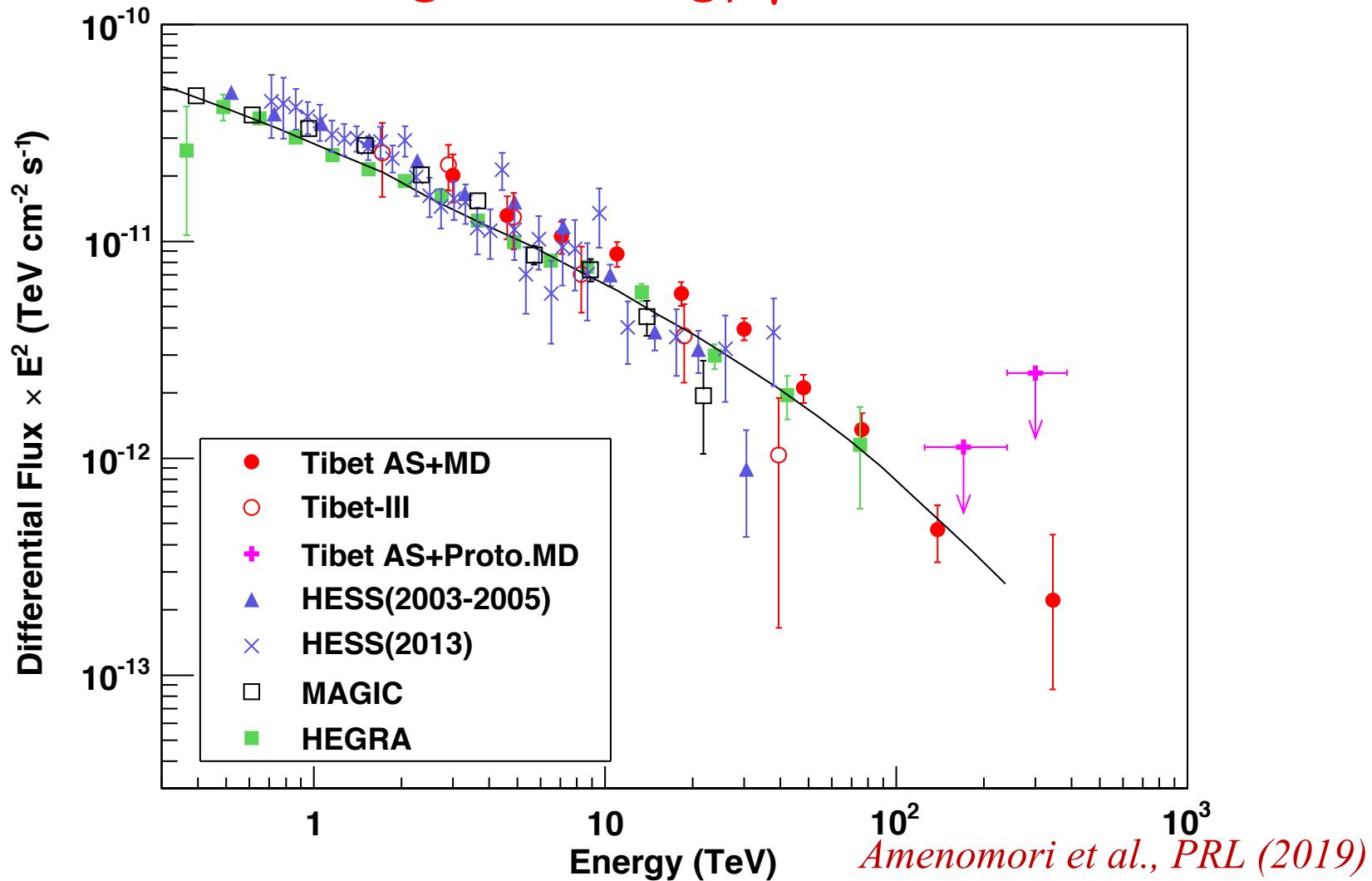
「かに星雲」>10TeVガンマ線放射



First Detection of Sub-PeV γ (5.6σ)
Amenomori et al., PRL
Supplemental Material (2019)

「かに星雲」のエネルギースペクトル

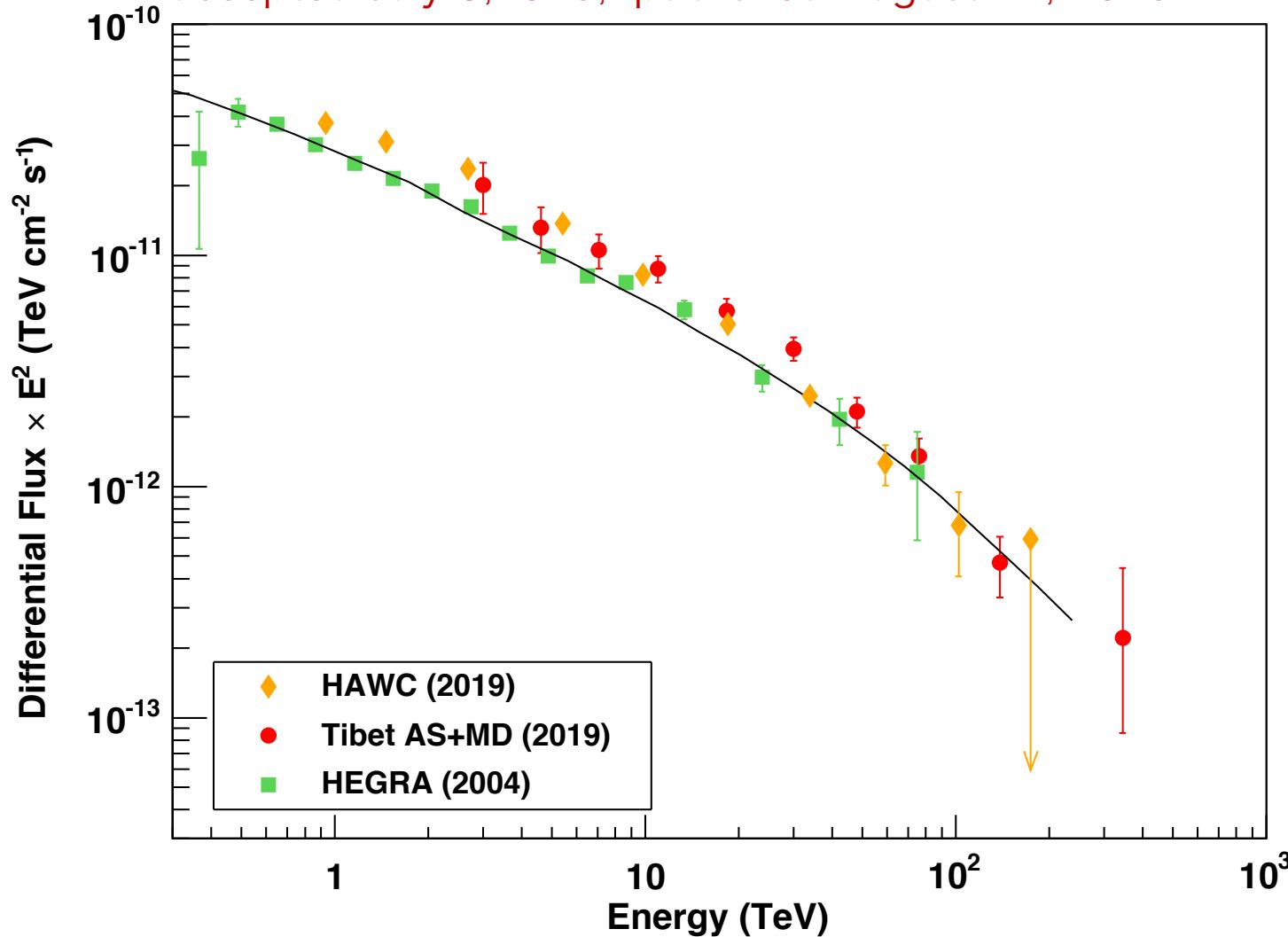
The highest energy $\gamma \sim 450$ TeV



曲線：HEGRA のデータ (*Aharonian+, ApJ, 614, 897 (2004)*) を基とした場合の逆コンプトンモデルで期待されるガンマ線頻度

HAWC (3.3 σ >100TeV) との比較

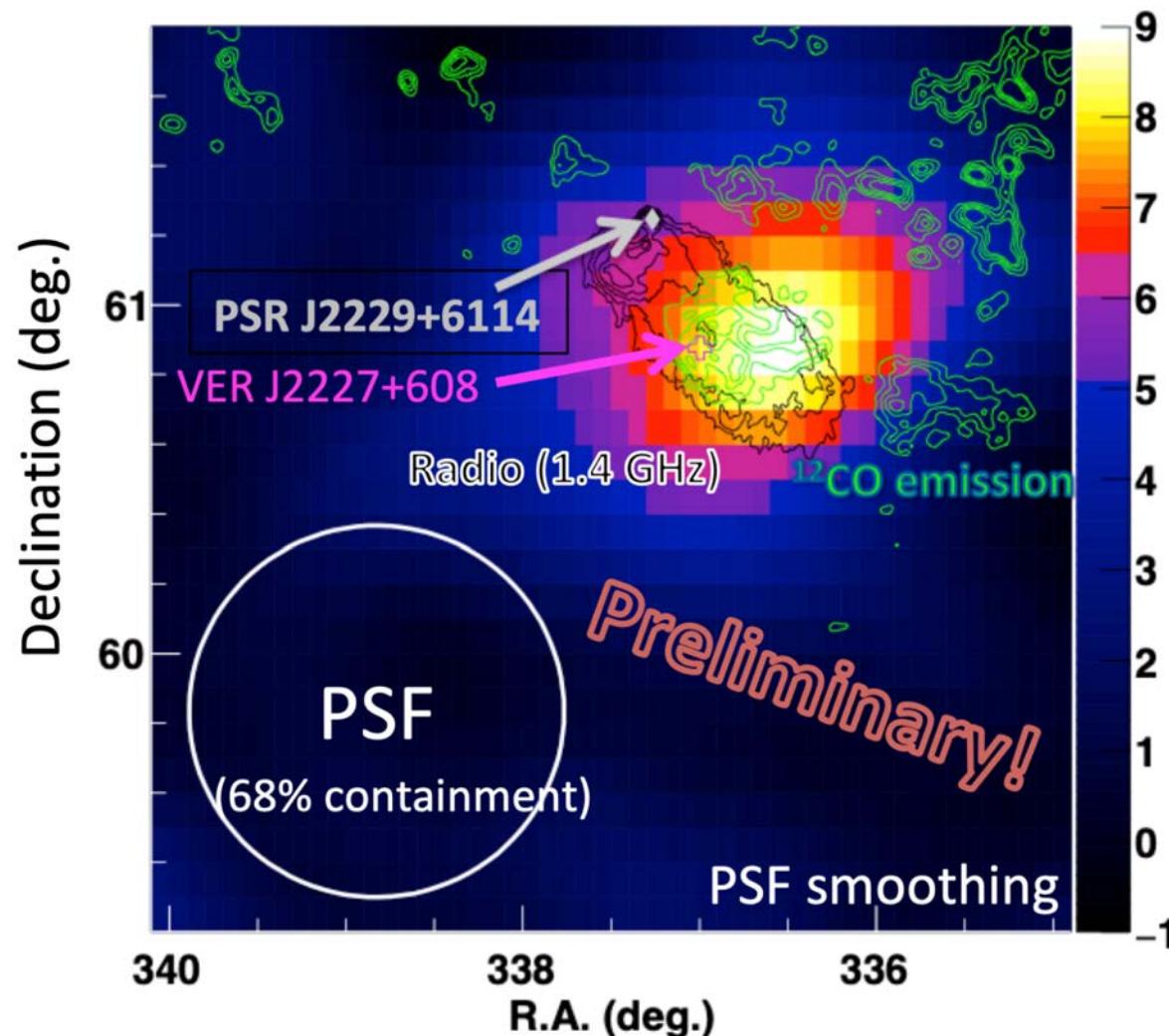
Abeysekara et al. ApJ 881:134 (pp1-13), Received May 28, 2019,
accepted July 3, 2019, published August 21, 2019



曲線：HEGRA のデータ (*Aharonian+, ApJ, 614, 897 (2004)*) を基とした場合の逆コンプトンモデルで期待されるガンマ線頻度

SNR G106.3+2.7

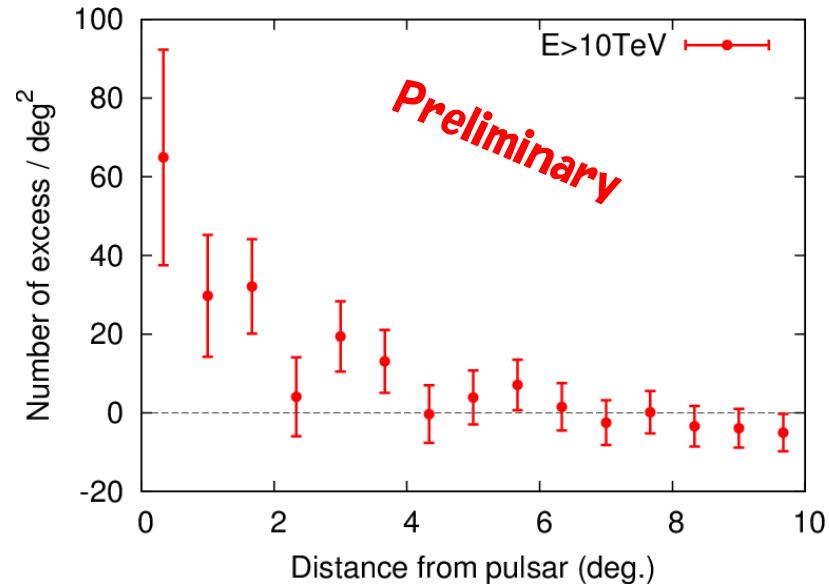
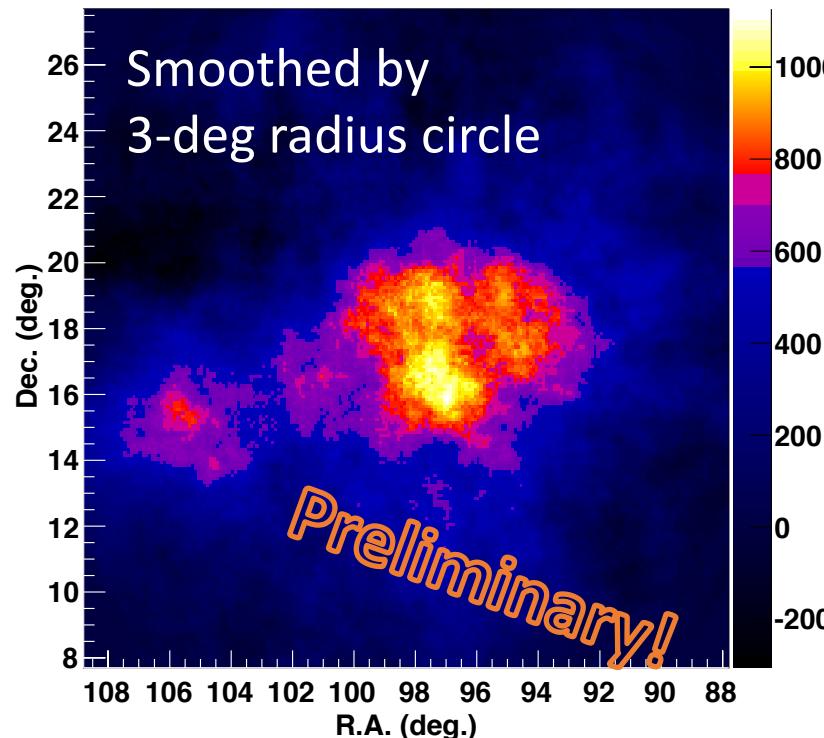
$E > 10 \text{ TeV}$



- ✓ 観測領域は CO放射領域から示唆される分子雲の領域と一致
※VERITASの結果と一致
- ✓ スペクトル解析中

Geminga

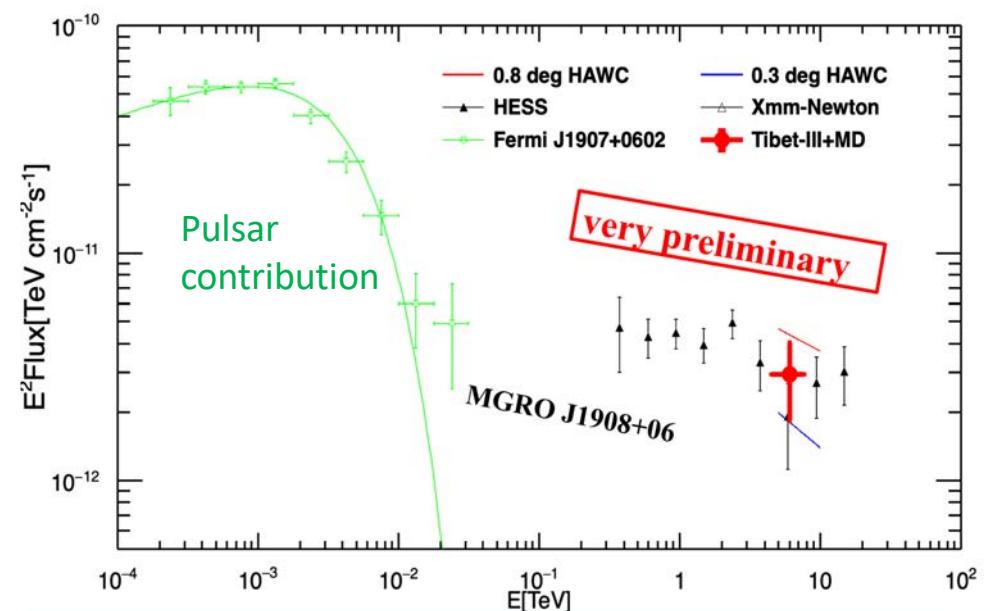
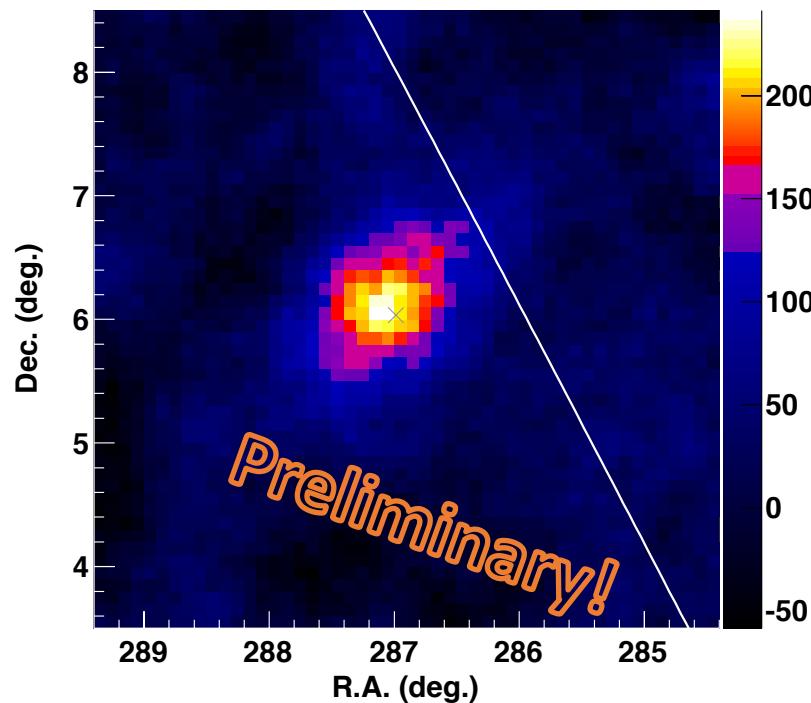
$E > 10 \text{ TeV}$



- ✓ 広がった天体 → HAWCの結果と一致
- ✓ スペクトル解析中

MGRO J1908+06

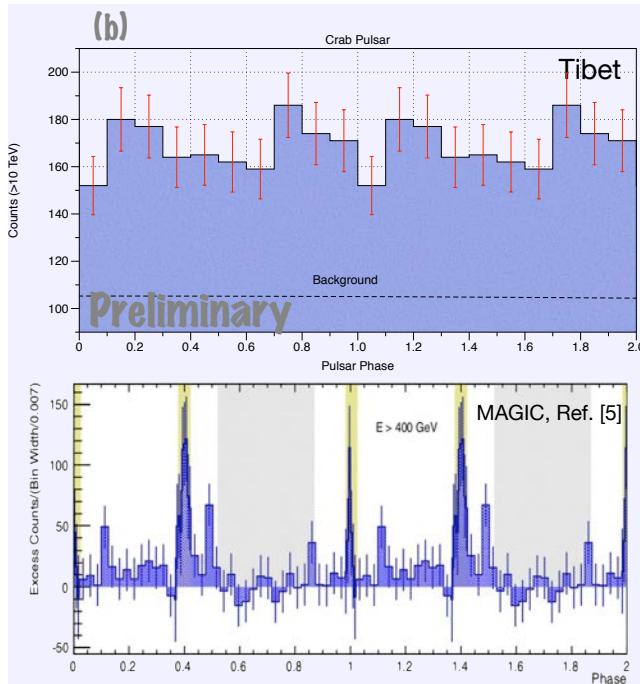
$E > 10 \text{ TeV}$



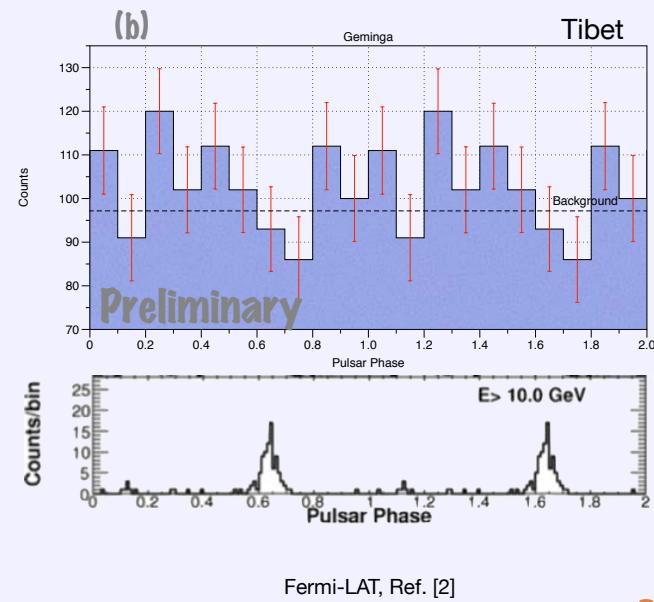
- ✓ 10TeV 以下で VERITAS の結果と一致
- ✓ スペクトル解析中

パルサー解析 ($>10\text{TeV}$)

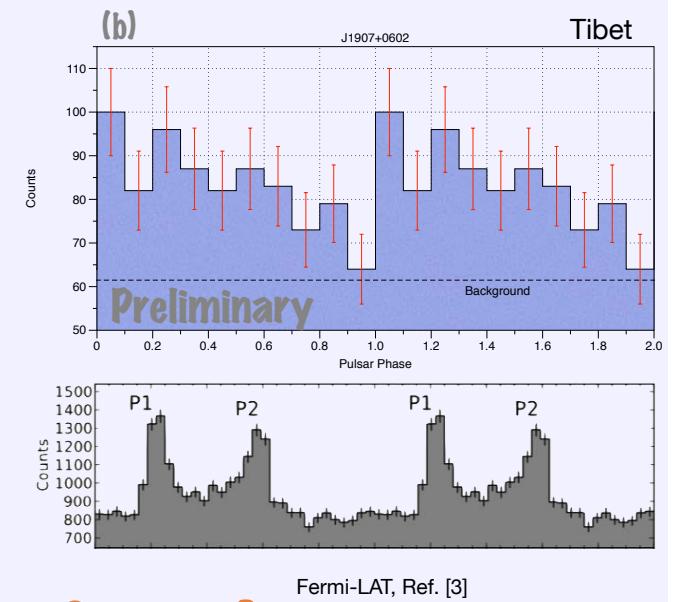
Crab pulsar



Geminga pulsar



PSR J1907+0602

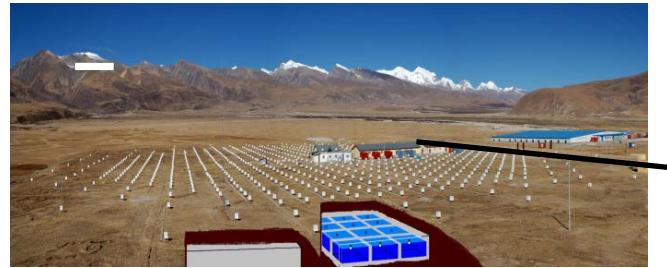
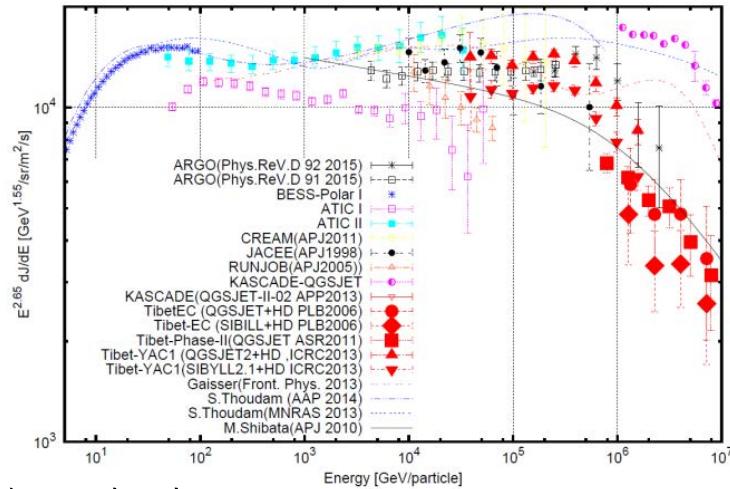


Preliminary!

- ✓ 優位な信号は見つからず
- ✓ 100 TeV 領域解析中

Knee領域一次宇宙線組成の研究

p+Heスペクトル



Total : 124 YAC detectors
Cover area: $\sim 500 \text{ m}^2$

経過報告

- YAC-II観測実験：[目的]100 TeV以上のエネルギー領域の陽子、ヘリウムスペクトル
2014年度からの観測を継続中
(将来計画)
- YAC-III観測実験：[目的] 10^{16} eV領域での重原子核成分
モンテカルトスタディーの精密化、読み出し回路開発、光センサー試験

本年度の発表・論文等

- ICRC2019 4件

Liuming Zhai, "Primary Cosmic-ray Spectra and Composition in the Energy Range of 50 TeV- 10^{16} eV with the New Tibet Hybrid Experiment (YAC-II + Tibet-III + MD)"

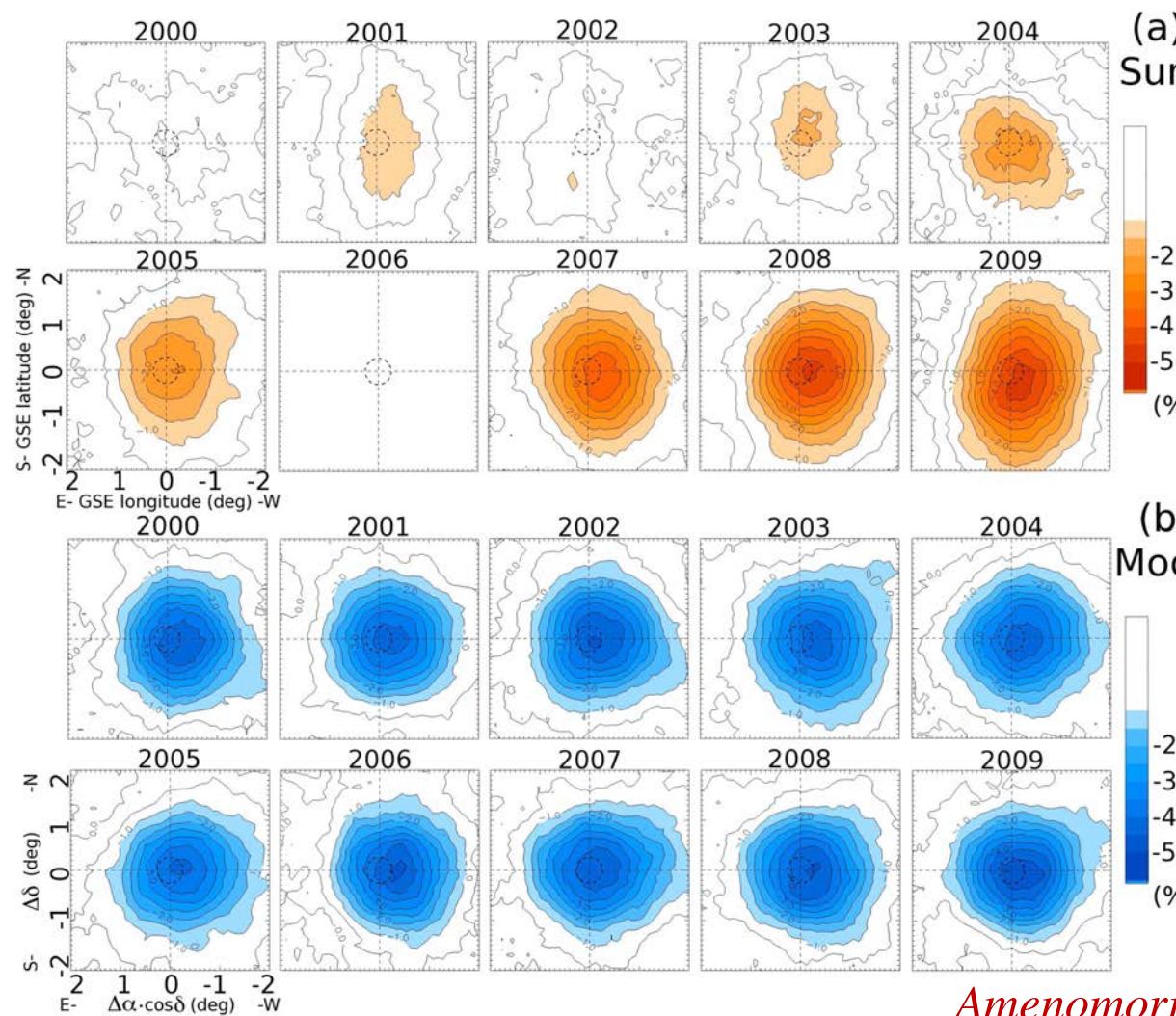
J. Huang, "Hadronic interactions and EAS muon multiplicity investigated with the new Tibet hybrid experimental muon data"

Y. Zhang, "Test of hadronic interaction models in the forward region from 10 TeV to 1 PeV with the new Tibet EAS core data"

Y. Zhang, "Study of the sharp "knee" phenomenon of cosmic ray spectrum by using newly upgraded Tibet ASy experiment"

宇宙線による太陽の影を用いた太陽周辺磁場の時間変動の研究

TeV領域



太陽の影
→太陽コロナ磁場
の影響で変動

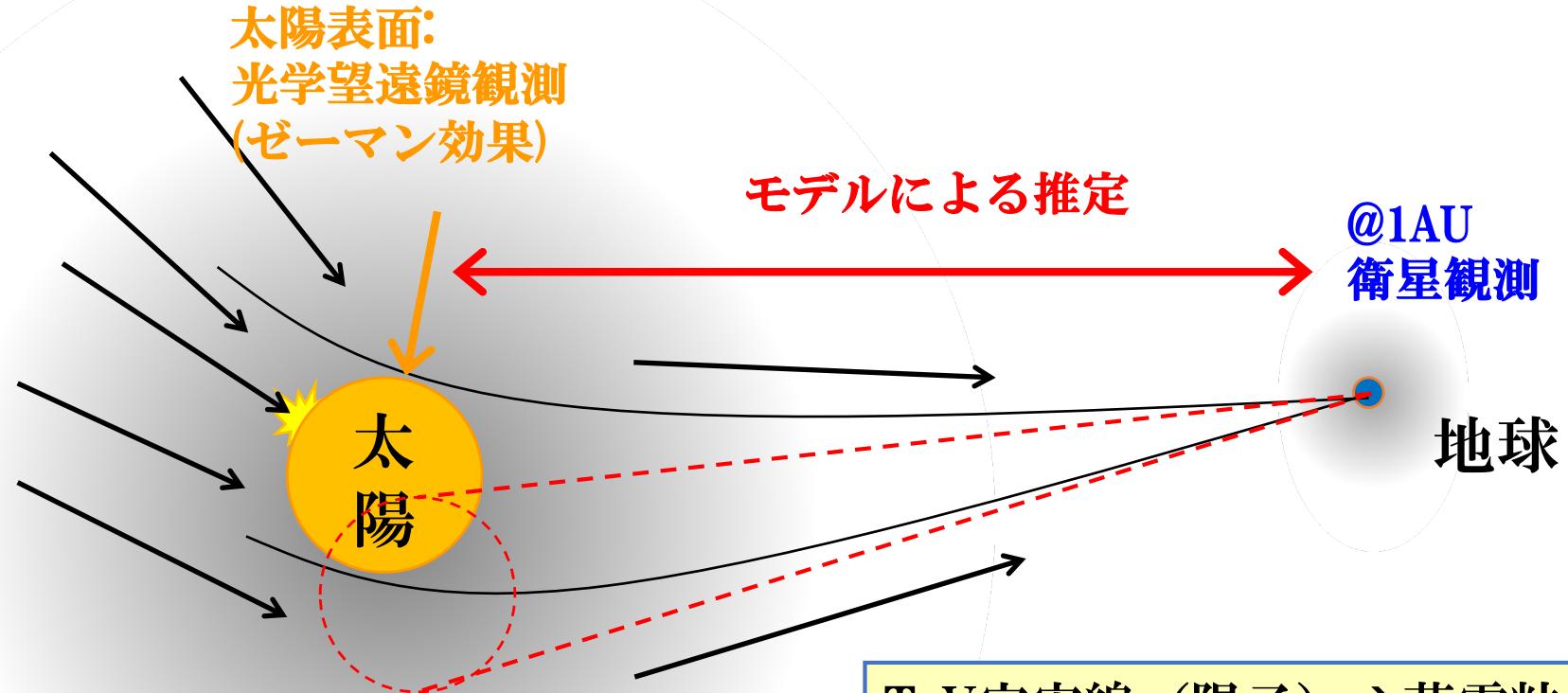
月の影

Amenomori et al., ApJ, 860, 13 (2018)

- ✓ Tibet-III (>3TeV) 2000年-2009年(10年間)
- ✓ 太陽方向を中心とした $4^\circ \times 4^\circ$ の欠損率マップ

「太陽の影」影

太陽による宇宙線の遮蔽



「太陽の影」の
深さ、方向、形に影響

TeV宇宙線（陽子）→荷電粒子
ラーモア半径
~7.4AU ($B=30\mu G$ 地球近辺)
~ $0.16R_{\odot}$ ($B=300mG$ 太陽近辺)
→ 太陽磁場構造のプローブ！

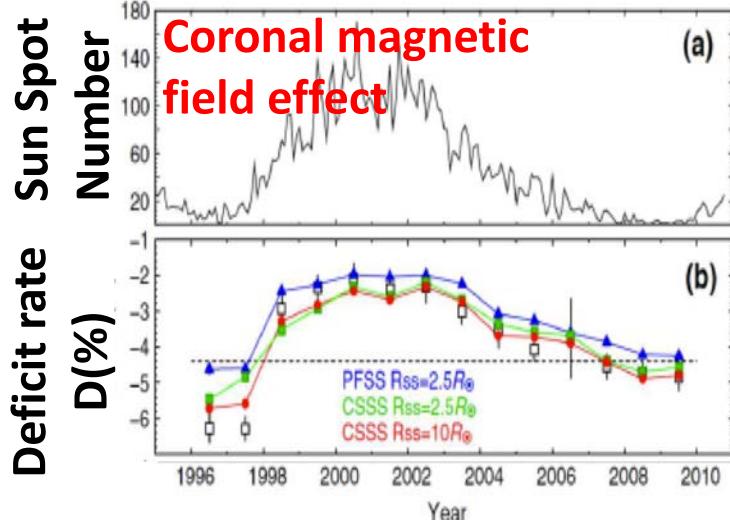
中村佳昭他、2019年9月日本物理学会

Y. Nakamura, ICRC2019 : Can we estimate the variation of the z-component of the interplanetary magnetic field from the sun shadow?

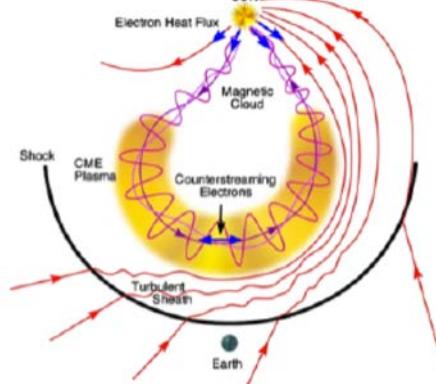
先行研究

太陽の影からコロナ磁場、惑星間空間磁場のモデルの評価が可能

CSSSモデル $R_{ss}=10R_{\odot}$ のモデルで観測をよく再現



CME(コロナ質量放出)の影響

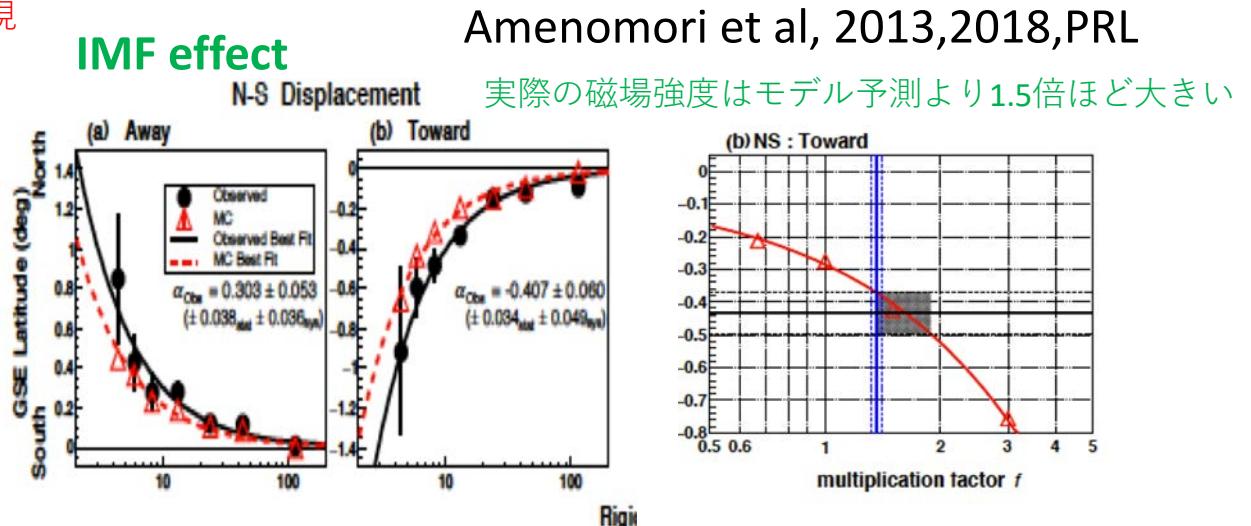


CMEの模式図 (Richardson & Cane 2010)

IMF effect

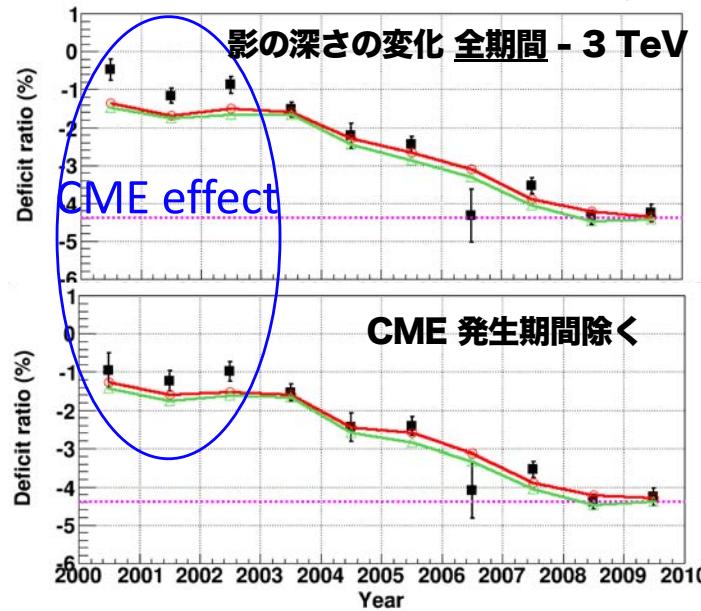
N-S Displacement

実際の磁場強度はモデル予測より1.5倍ほど大きい



Amenomori et al, 2018, ApJ

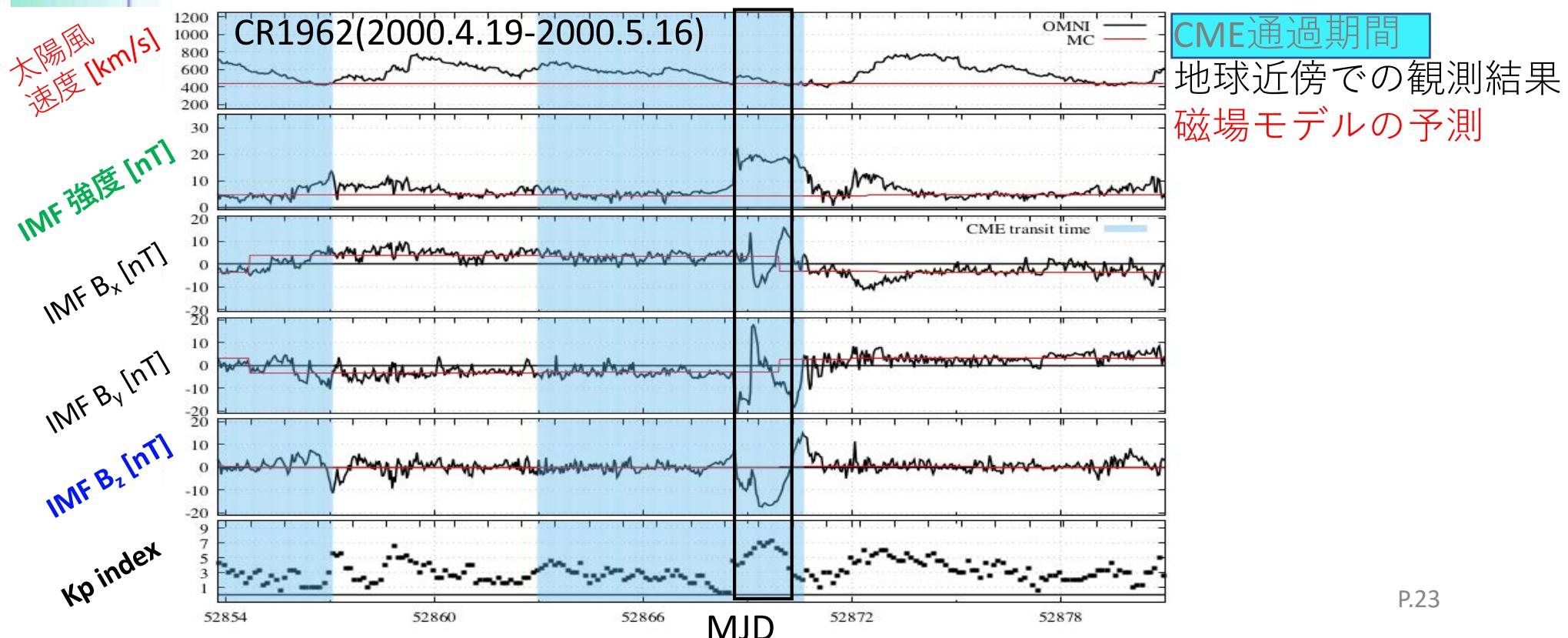
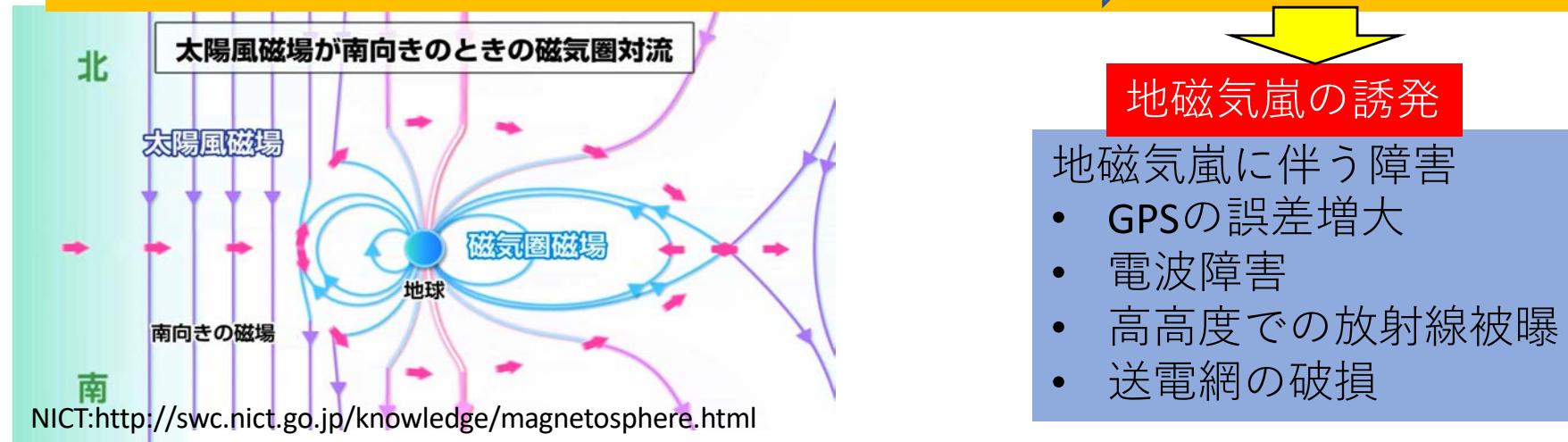
Black : Experimental
Red : MC with best magnetic field model



CMEの影響により影が薄くなる

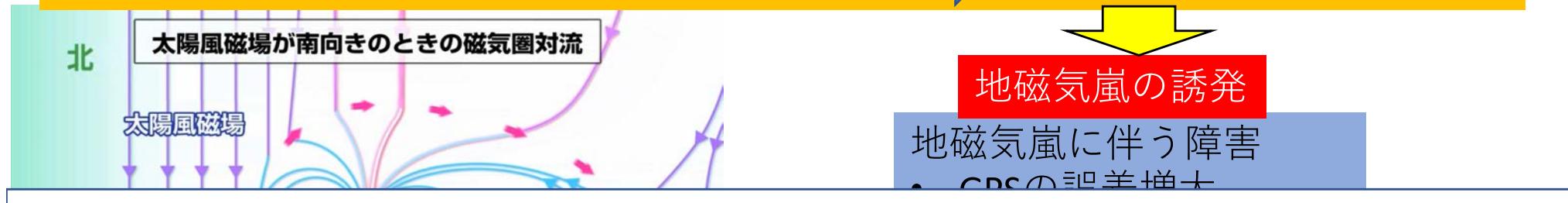
Bzの変動と地磁気嵐

惑星間空間磁場(IMF)の **z 成分が負(南向き)** に卓越 → 地磁気とのリコネクション



Bzの変動と地磁気嵐

惑星間空間磁場(IMF)の **z 成分が負(南向き)** に卓越 → 地磁気とのリコネクション

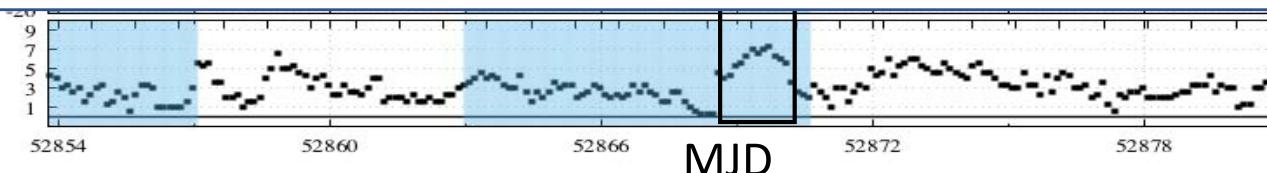


太陽の影から B_z の推定 => B_z が地球に 到来する前に 推定が可能

宇宙天気の新しいツール

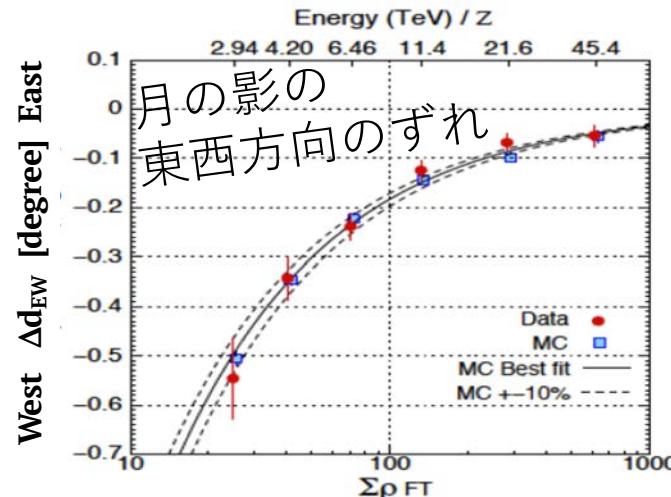
本研究の目的

まずは B_z と 太陽の影の東西方向のずれ の相関を調べる

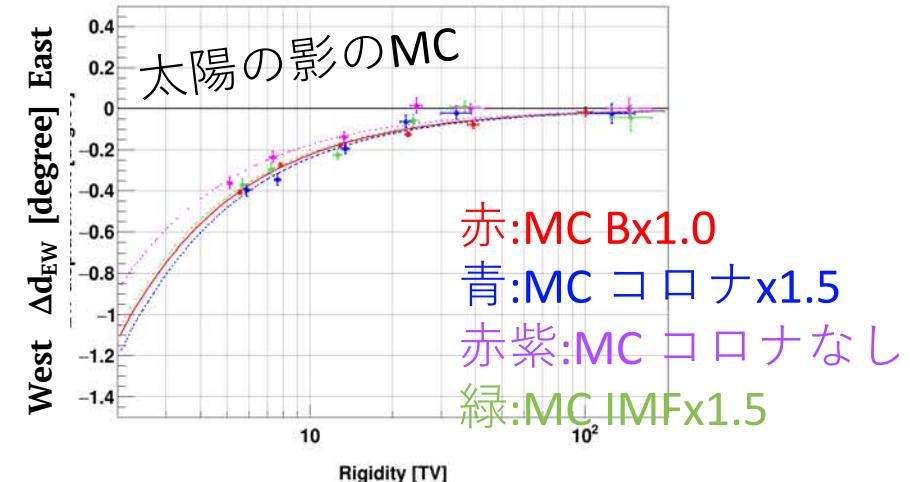


太陽の影の東西方向のずれ その他の原因

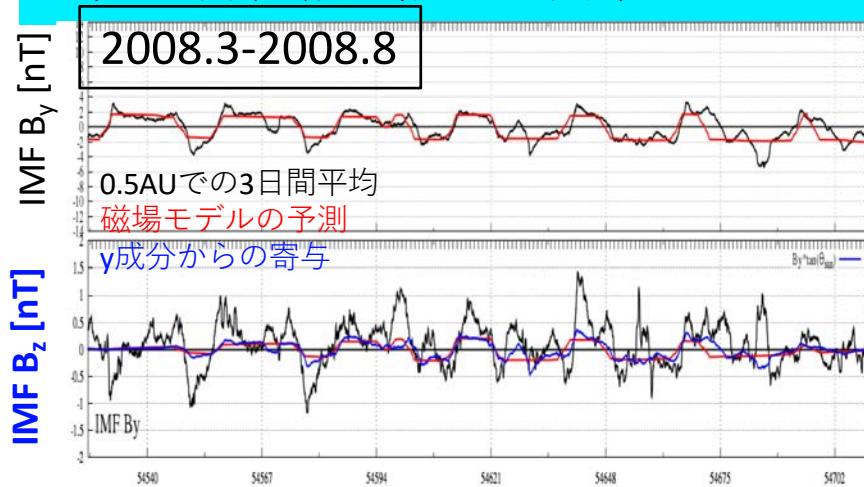
1. 地磁気 0.15度程度(@10TV)
月の影で観測可



2. コロナ磁場のdipole成分 0.05度程度
2000-2009 -> 地磁気と同じ向き

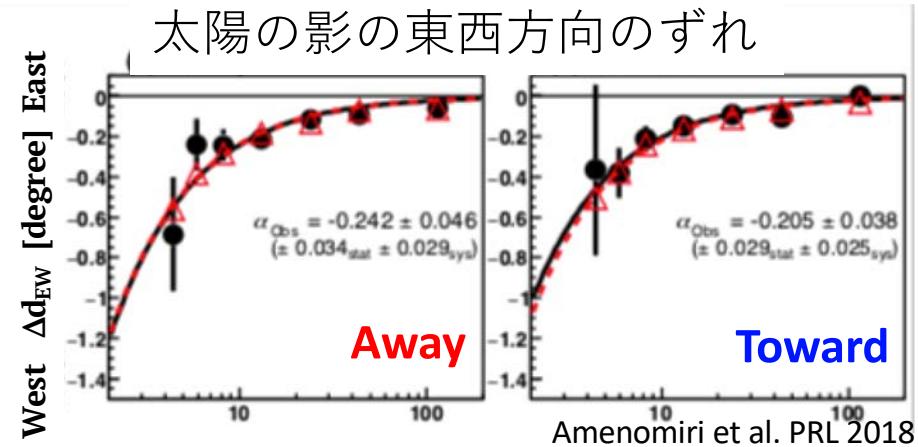


3. Parker磁場のy成分からの寄与
太陽の自転軸の傾きに由来するBzの季節変動 =>半年の観測ではセクター依存性



これらの変動は MCで再現可能

MC と観測の差 <=> Bz 成分の寄与



使用したデータ

観測

期間 : 2000 - 2009 (3月から8月)

天頂角: 40度以下

1.25 粒子以上を4台以上で検出

$\Sigma\rho$ (粒子数密度の総和) > 31.6 以上で5分割

| $\Sigma\rho$ | event数 | 平均 Rigidity [TV] |
|--------------|-------------------|------------------|
| 31.6~56.2 | 1.3×10^7 | 6TV |
| 56.2~100 | 7.2×10^6 | 8TV |
| 100~215 | 4.3×10^6 | 13TV |
| 215~464 | 1.4×10^6 | 20TV |
| 464.2~ | 6.3×10^5 | 50TV |

MC

磁場モデル

コロナ:

Current Sheet Source Surface (CSSS) モデル

IMF: Parker 磁場

地磁気: dipole

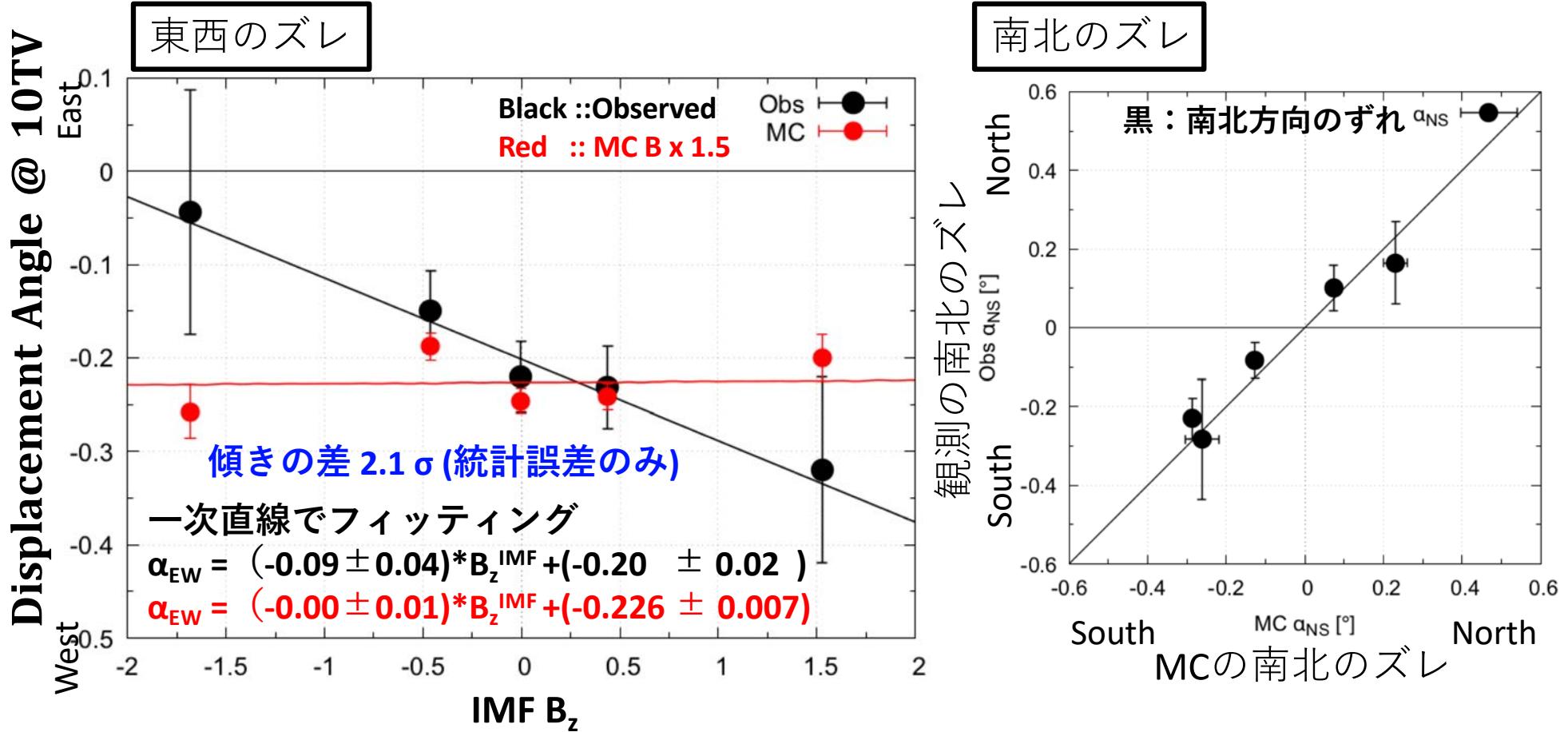
光球面磁場データ ; Kitt Peak 太陽望遠鏡

※全体の磁場強度 1.5倍

0.5AUでの Bz の変動でデータを分割

| DATASET NAME | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 |
|--------------|--------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------|
| Bz Condition | $Bz < -0.8$ [nT] | $-0.8 < Bz < 0.2$ [nT] | $-0.2 < Bz < 0.2$ [nT] | $0.2 < Bz < 0.8$ [nT] | $0.8 < Bz$ [nT] |
| 平均 Bz [nT] | -1.638 ± 0.024 | -0.444 ± 0.004 | -0.003 ± 0.002 | 0.431 ± 0.003 | 1.524 ± 0.024 |
| 総イベント数 | 3.5×10^6 | 6.5×10^6 | 6.9×10^6 | 6.5×10^6 | 3.1×10^6 |

10TeVでのズレ α の B_z 依存性



MCに含まれない(突発的な) $IMF B_z$ 変動によって太陽の影の東西のズレが変化することを示唆

まとめ

1. Tibet AS+MD

- かに星雲から史上最高エネルギーのガンマ線を観測
(最大エネルギー450TeV、新しいガンマ線観測手法の成果)
- >100TeV領域の天文学を開拓
- SNR G106.3+27, Geminga, MGRO J1908+06からの>10TeV
ガンマ線を観測 (さらに解析中)

2. YAC

- YAC-II : 2014年から観測を継続中、MDデータも含め解析中
- YAC-III (将来計画) モンテカルロスタディの精密化、読み出し回路開発、光センサー試験中

3. 太陽の影

- 影の東西方向のズレとIMFの解析
→ IMFのBz成分と相関あるが、MCとは2.1°ずれあり
→ MCに含めなかったIMF Bz変動がズレに影響している可能性
を示唆する初めての結果

4. 宇宙線異方性 (宗像、12/13発表参照)