

# チベット高原での 高エネルギー宇宙線の研究

瀧田 正人(東京大学宇宙線研究所)

For the Tibet AS $\gamma$  Collaboration

# 平成29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. チベット高原における雷雲からの高エネルギー放射線の研究(継続)  
(日比野欣也 神奈川大学工学部)
4. 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)
5. 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)

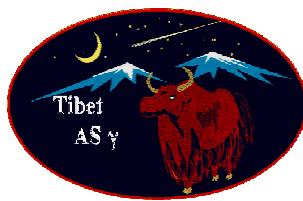
# チベットグループ共同利用研究 経費執行状況

研究費：申請額 577万円 → 配分額 **200万円**

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 1011万円 → 配分額 **375万円**

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！**



# The Tibet AS $\gamma$ Collaboration



M. Amenomori<sup>1</sup>, X. J. Bi<sup>2</sup>, D. Chen<sup>3</sup>, T. L. Chen<sup>4</sup>, W. Y. Chen<sup>2</sup>, S. W. Cui<sup>5</sup>, Danzengluobu<sup>4</sup>, L. K. Ding<sup>2</sup>, C. F. Feng<sup>6</sup>, Zhaoyang Feng<sup>2</sup>, Z. Y. Feng<sup>7</sup>, Q. B. Gou<sup>2</sup>, Y. Q. Guo<sup>2</sup>, H. H. He<sup>2</sup>, Z. T. He<sup>5</sup>, K. Hibino<sup>8</sup>, N. Hotta<sup>9</sup>, Haibing Hu<sup>4</sup>, H. B. Hu<sup>2</sup>, J. Huang<sup>2</sup>, H. Y. Jia<sup>7</sup>, L. Jiang<sup>2</sup>, F. Kajino<sup>10</sup>, K. Kasahara<sup>11</sup>, Y. Katayose<sup>12</sup>, C. Kato<sup>13</sup>, K. Kawata<sup>14</sup>, M. Kozai<sup>13,15</sup>, Labaciren<sup>4</sup>, G. M. Le<sup>16</sup>, A. F. Li<sup>17,6,2</sup>, H. J. Li<sup>4</sup>, W. J. Li<sup>2,7</sup>, C. Liu<sup>2</sup>, J. S. Liu<sup>2</sup>, M. Y. Liu<sup>4</sup>, H. Lu<sup>2</sup>, X. R. Meng<sup>4</sup>, T. Miyazaki<sup>13</sup>, K. Munakata<sup>13</sup>, T. Nakajima<sup>13</sup>, Y. Nakamura<sup>13</sup>, H. Nanjo<sup>1</sup>, M. Nishizawa<sup>18</sup>, T. Niwa<sup>13</sup>, M. Ohnishi<sup>14</sup>, I. Ohta<sup>19</sup>, S. Ozawa<sup>11</sup>, X. L. Qian<sup>6,2</sup>, X. B. Qu<sup>20</sup>, T. Saito<sup>21</sup>, T. Y. Saito<sup>22</sup>, M. Sakata<sup>10</sup>, T. K. Sako<sup>23,14</sup>, J. Shao<sup>2,6</sup>, M. Shibata<sup>12</sup>, A. Shiomi<sup>24</sup>, T. Shirai<sup>8</sup>, H. Sugimoto<sup>25</sup>, M. Takita<sup>14</sup>, Y. H. Tan<sup>2</sup>, N. Tateyama<sup>8</sup>, S. Torii<sup>11</sup>, H. Tsuchiya<sup>26</sup>, S. Udo<sup>8</sup>, H. Wang<sup>2</sup>, H. R. Wu<sup>2</sup>, L. Xue<sup>6</sup>, Y. Yamamoto<sup>10</sup>, K. Yamauchi<sup>12</sup>, Z. Yang<sup>2</sup>, A. F. Yuan<sup>4</sup>, L. M. Zhai<sup>3</sup>, H. M. Zhang<sup>2</sup>, J. L. Zhang<sup>2</sup>, X. Y. Zhang<sup>6</sup>, Y. Zhang<sup>2</sup>, Ying Zhang<sup>2</sup>, Zhaxisangzhu<sup>4</sup>, and X. X. Zhou<sup>7</sup>

1 Department of Physics, Hirosaki Univ., Japan

2 Key Laboratory of Particle Astrophysics, IHEP, CAS, China

3 National Astronomical Observatories, CAS, China

4 Department of Mathematics and Physics, Tibet Univ., China

5 Department of Physics, Hebei Normal Univ., China

6 Department of Physics, Shandong Univ., China

7 Institute of Modern Physics, SouthWest Jiaotong Univ., China

8 Faculty of Engineering, Kanagawa Univ., Japan

9 Faculty of Education, Utsunomiya Univ., Japan

10 Department of Physics, Konan Univ., Japan

11 Research Institute for Science and Engineering,  
Waseda Univ., Japan

12 Faculty of Engineering, Yokohama National Univ., Japan

13 Department of Physics, Shinshu Univ., Japan

14 ICRR, The Univ. of Tokyo, Japan

15 ISAS/JAXA, Japan

16 National Center for Space Weather,  
China Meteorological Administration, China

17 School of Information Science and Engineering,  
Shandong Agriculture Univ., China

18 National Institute of Informatics, Japan

19 Sakushin Gakuin Univ., Japan

20 College of Science, China Univ. of Petroleum, China

21 Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, Japan

22 Max-Planck-Institut für Physik, Deutschland

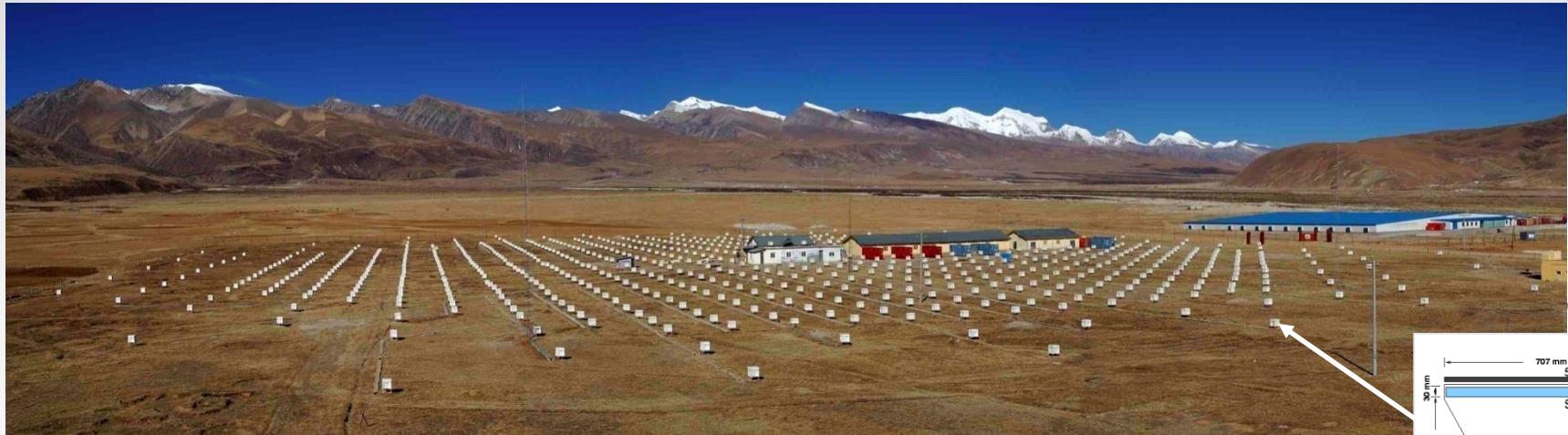
23 Escuela de Ciencias Físicas y Nanotecnología,  
Yachay Tech, Ecuador

24 College of Industrial Technology, Nihon Univ., Japan

25 Shonan Institute of Technology, Japan

26 Japan Atomic Energy Agency, Japan

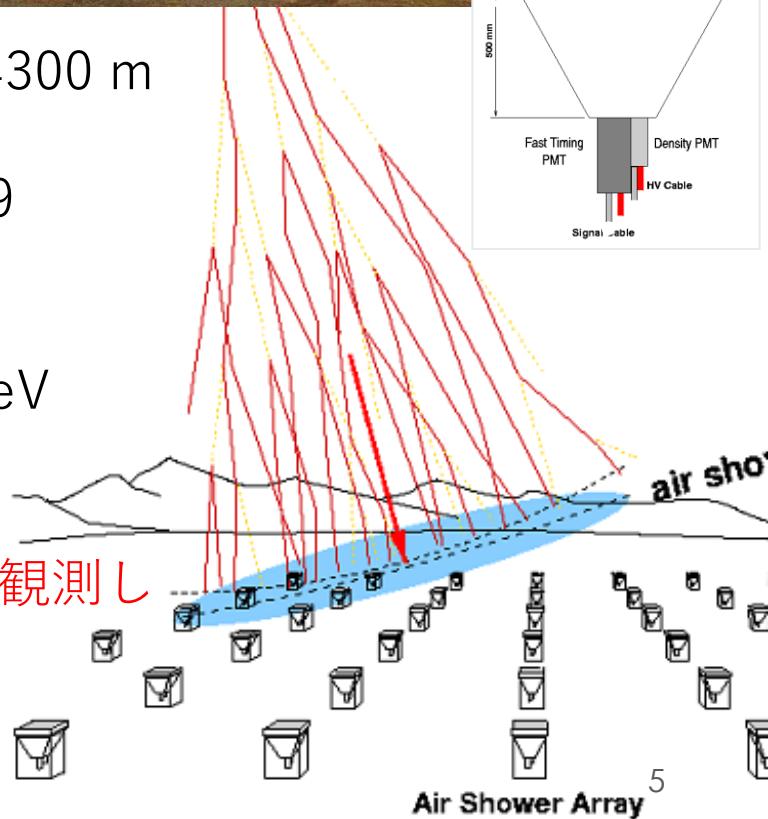
# チベット空気シャワー観測装置 (Tibet AS)



□ 中国チベット ( $90.522^{\circ}\text{E}$ ,  $30.102^{\circ}\text{N}$ ) 標高4300 m

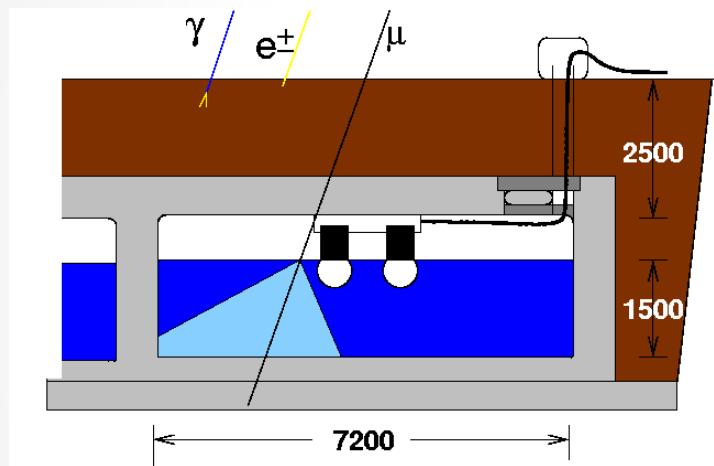
- シンチレーション検出器数  $0.5 \text{ m}^2 \times 789$
- 空気シャワー有効面積  $\sim 37,000 \text{ m}^2$
- 最頻エネルギー  $\sim 3 \text{ TeV}$
- 角度分解能  $\sim 0.9^{\circ} @ 3 \text{ TeV}$
- 視野  $\sim 2 \text{ sr}$

→ 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、方向を測定

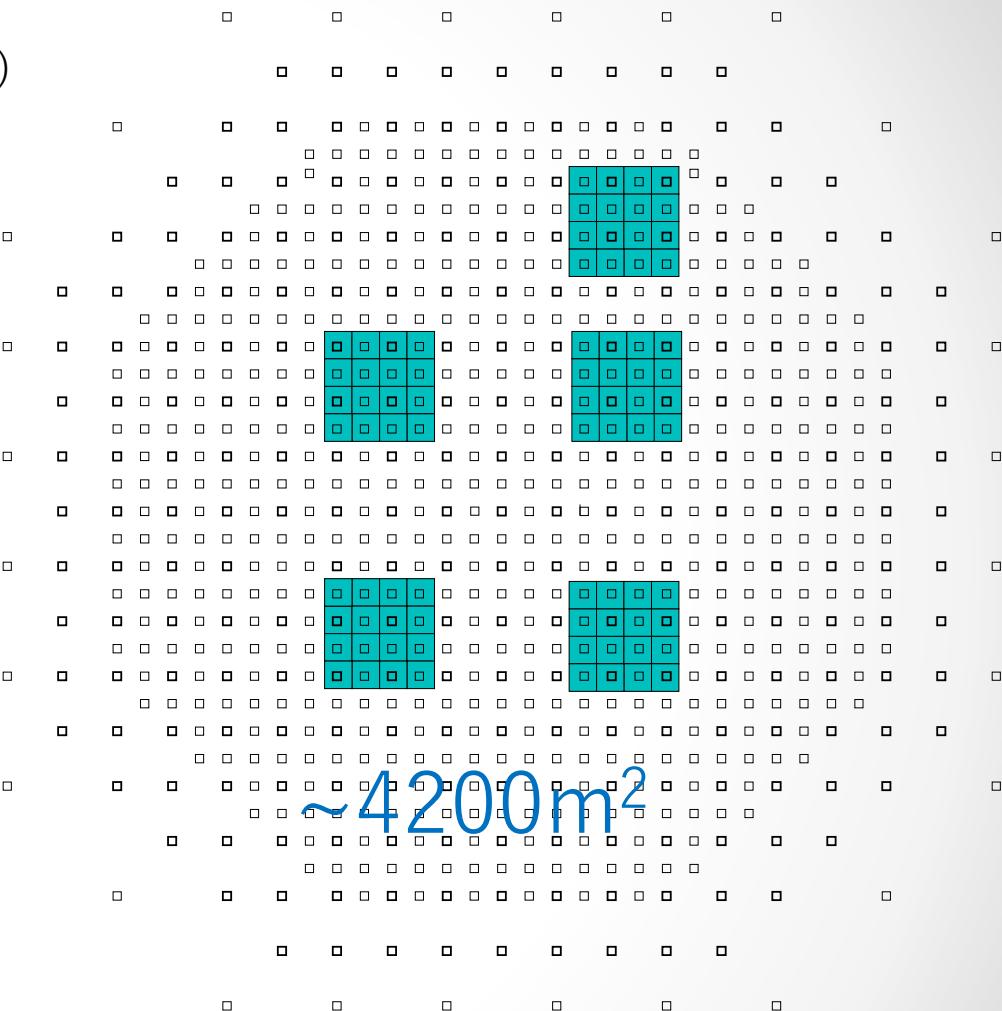


# チベット水チェレンコフミューオン観測装置 (Tibet MD)

- ✓ 地下 2.5m (物質厚  $\sim 515\text{g/cm}^2 \sim 19X_0$ )
- ✓  $7.2\text{m} \times 7.2\text{m} \times$  水深1.5m 水槽 80台
- ✓ 20"Φ PMT (HAMAMATSU R3600)
- ✓ 水槽材質：コンクリート+白色反射材



→ 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年から観測継続中

2013/10/10



Image © 2014 CNES / Astrium

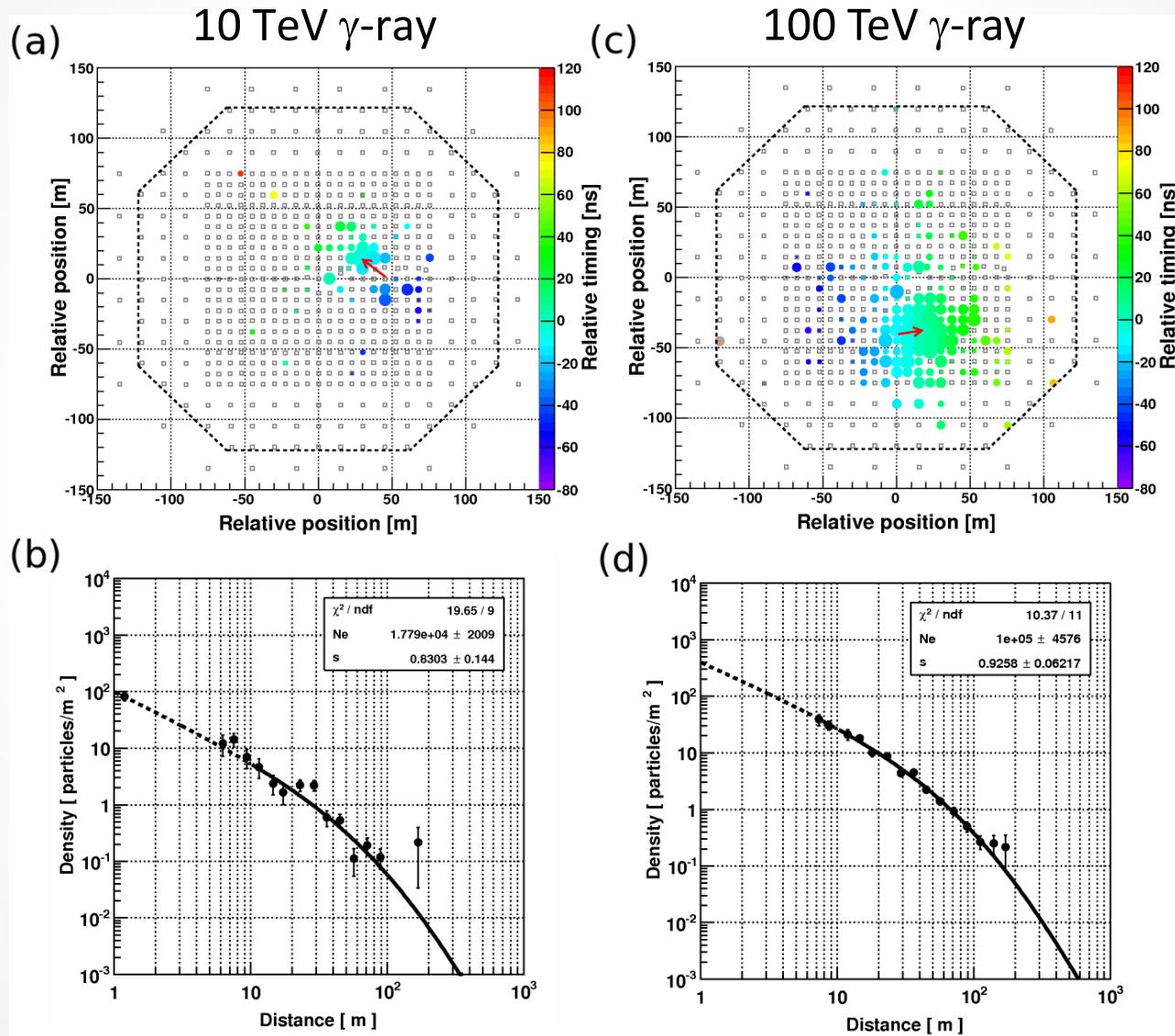
2013/10/10

4,200m<sup>2</sup>  
地下施設

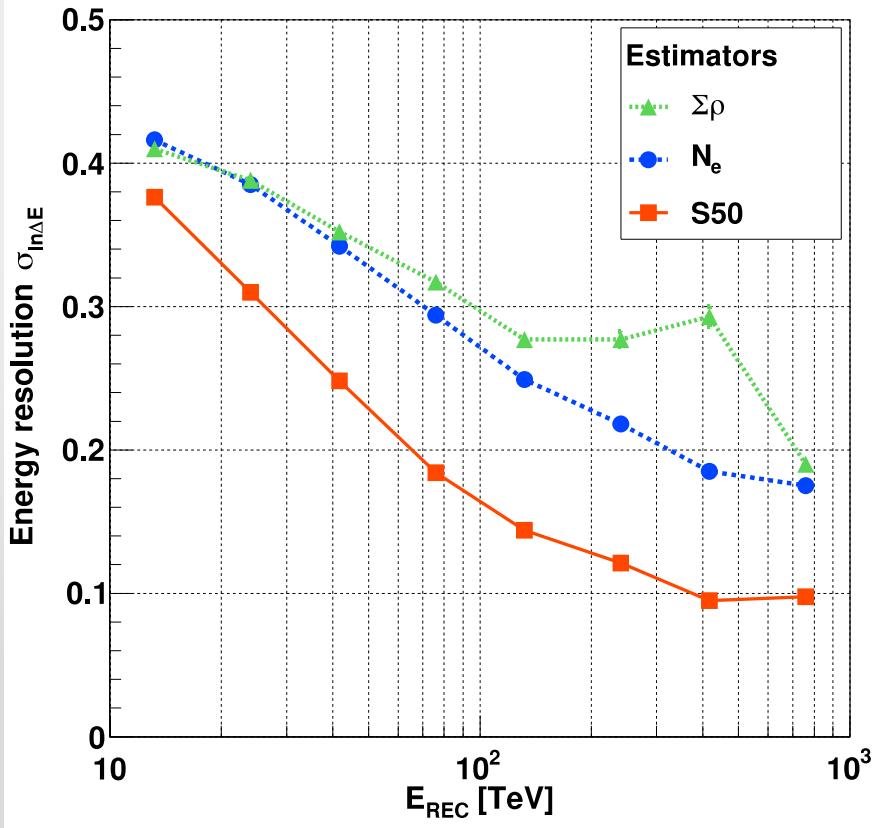
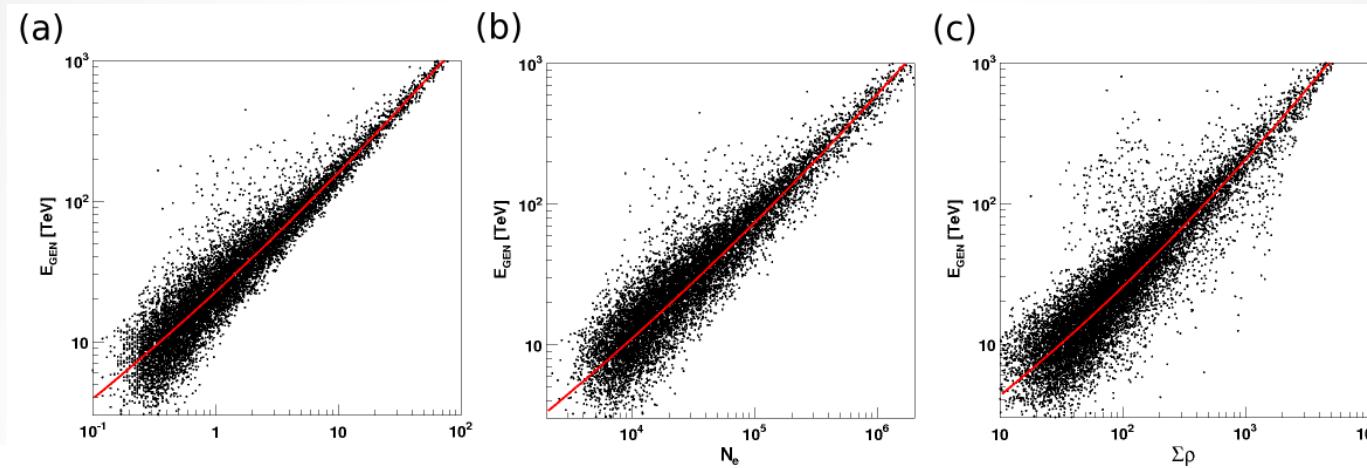


Image © 2014 CNES / Astrium

# 横方向分布によるエネルギー決定(MC)



# 横方向分布によるエネルギー決定(MC)

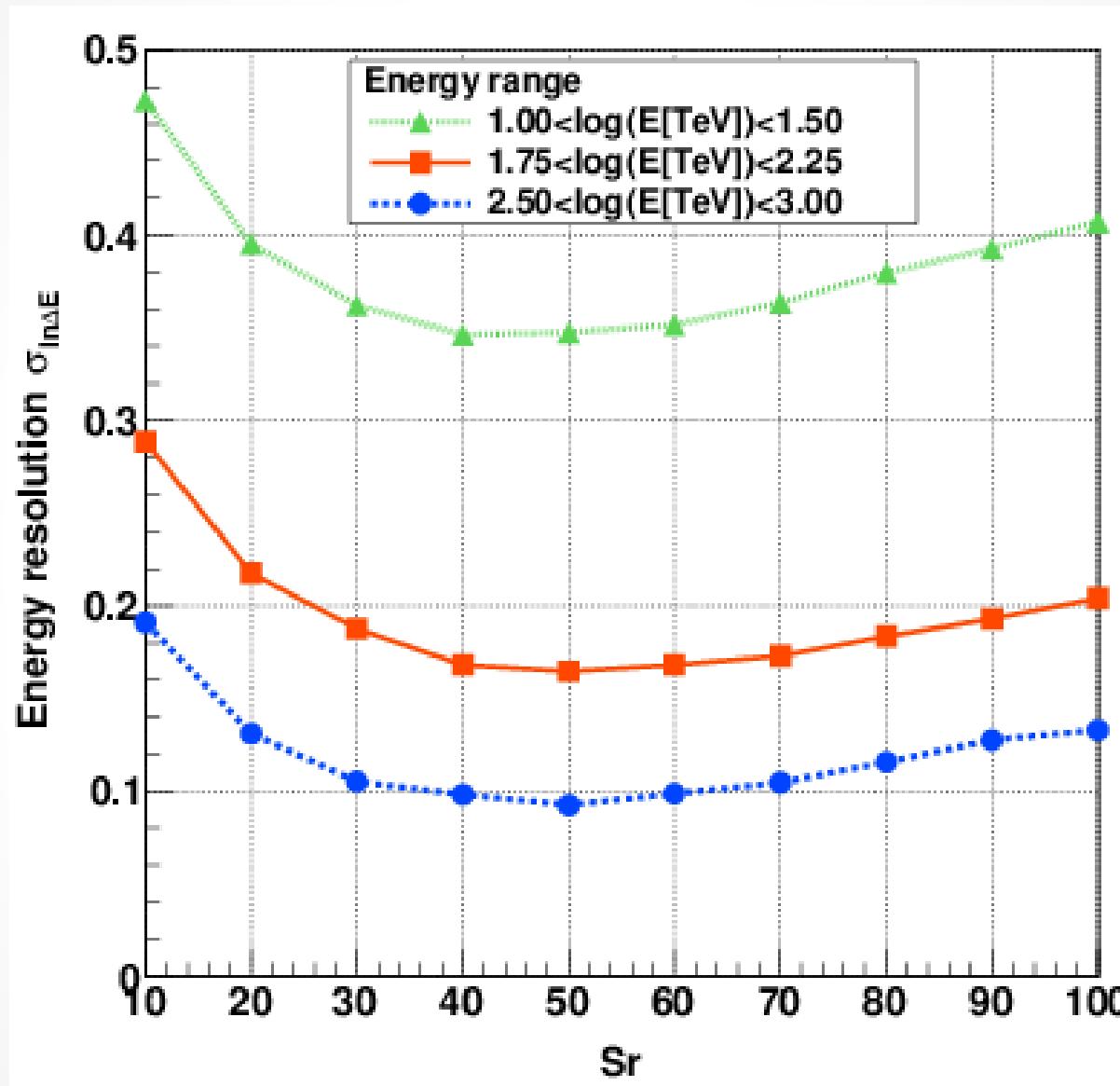


S50 : NKG関数で得られた  
コアから50m地点の粒子密度  
 $\sigma_E(S50) = 16\%$

$N_e$  : NKG関数で得られたシャワーサイズ

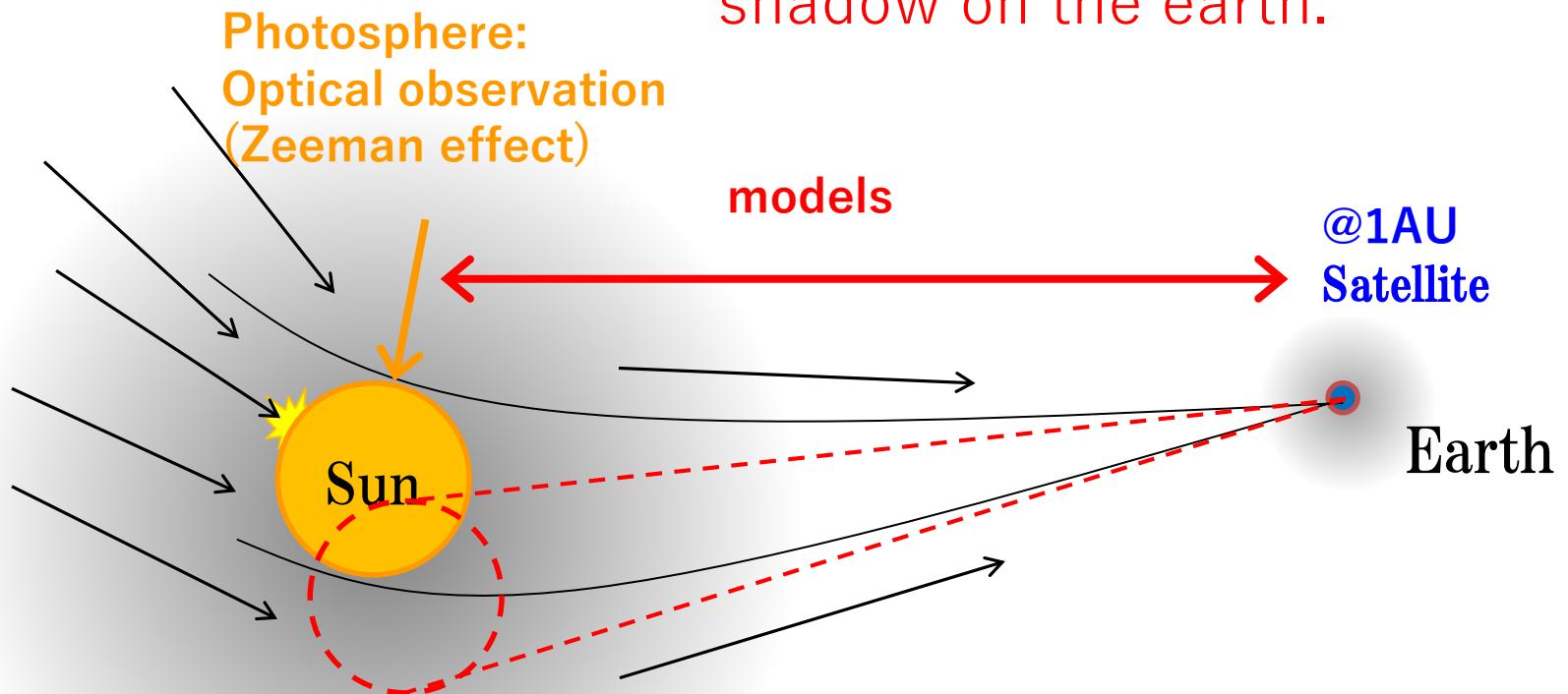
$\Sigma\rho$  : 検出器で得られた総粒子数(hump:  
direct hit + PMT saturation effect)

# エネルギー分解能のSr依存性(MC)



# Sun Shadow

Sun blocks VHE cosmic rays,  
and cast the cosmic-ray  
shadow on the earth.



TeV proton --> Charged particle  
Larmor radius  
 $\sim 7.4 \text{ AU}$  ( $B=30 \mu\text{G}$  near the earth)  
 $\sim 0.16 R_\odot$  ( $B=300 \text{ mG}$  near the sun)  
→ Probe of the solar MFs !

# Magnetic Fields between Sun and Earth

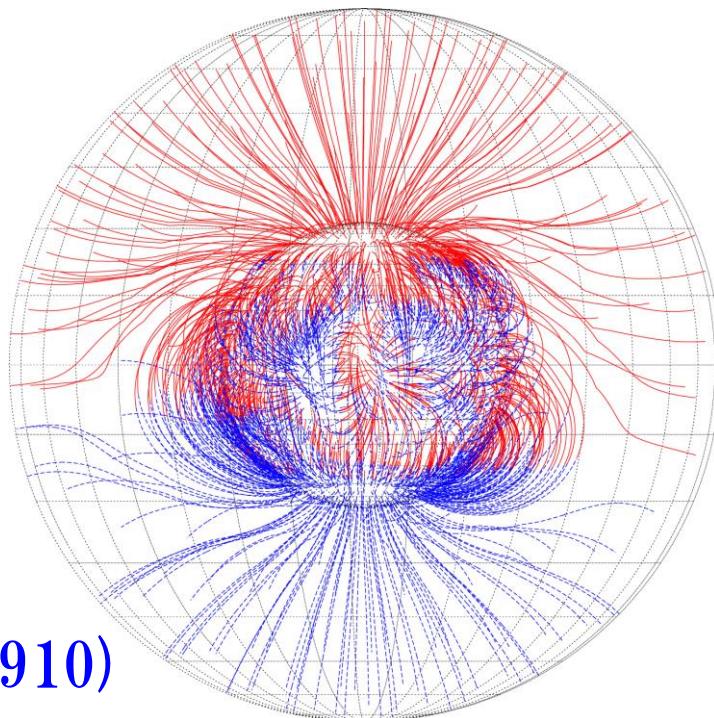
Corona -> Source Surface model *Zhao & Hoeksema, JGR (1995)*

(CSSS well reproduces the Tibet-II sun shadows)

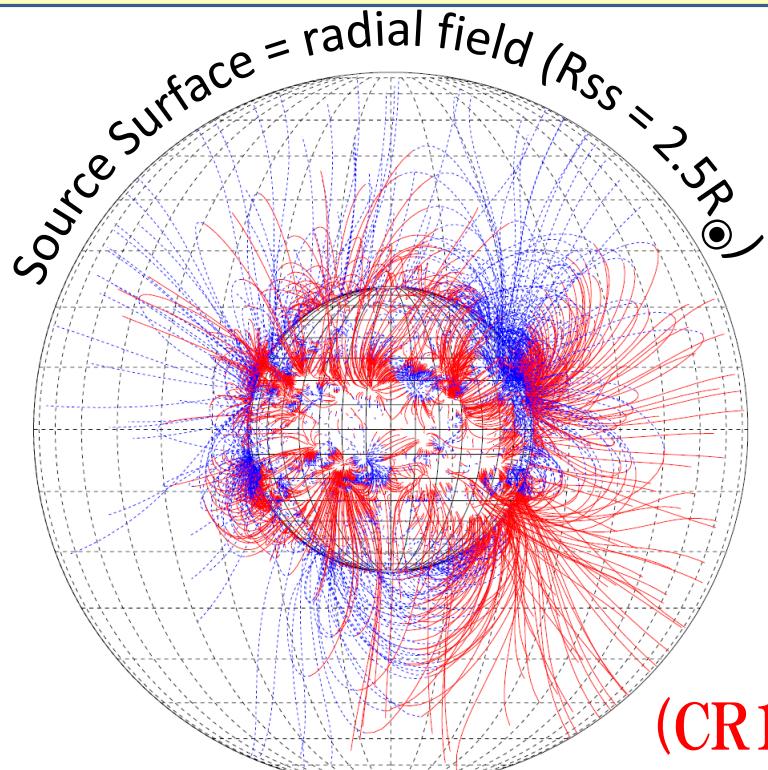
Derived from the magnetogram measured by  
Kitt Peak (KPVT / SOLIS) in each C.R.

IMF -> Parker spiral model with latitude dependence  
of the solar wind velocity taken into account.

Geomag. -> Dipole model



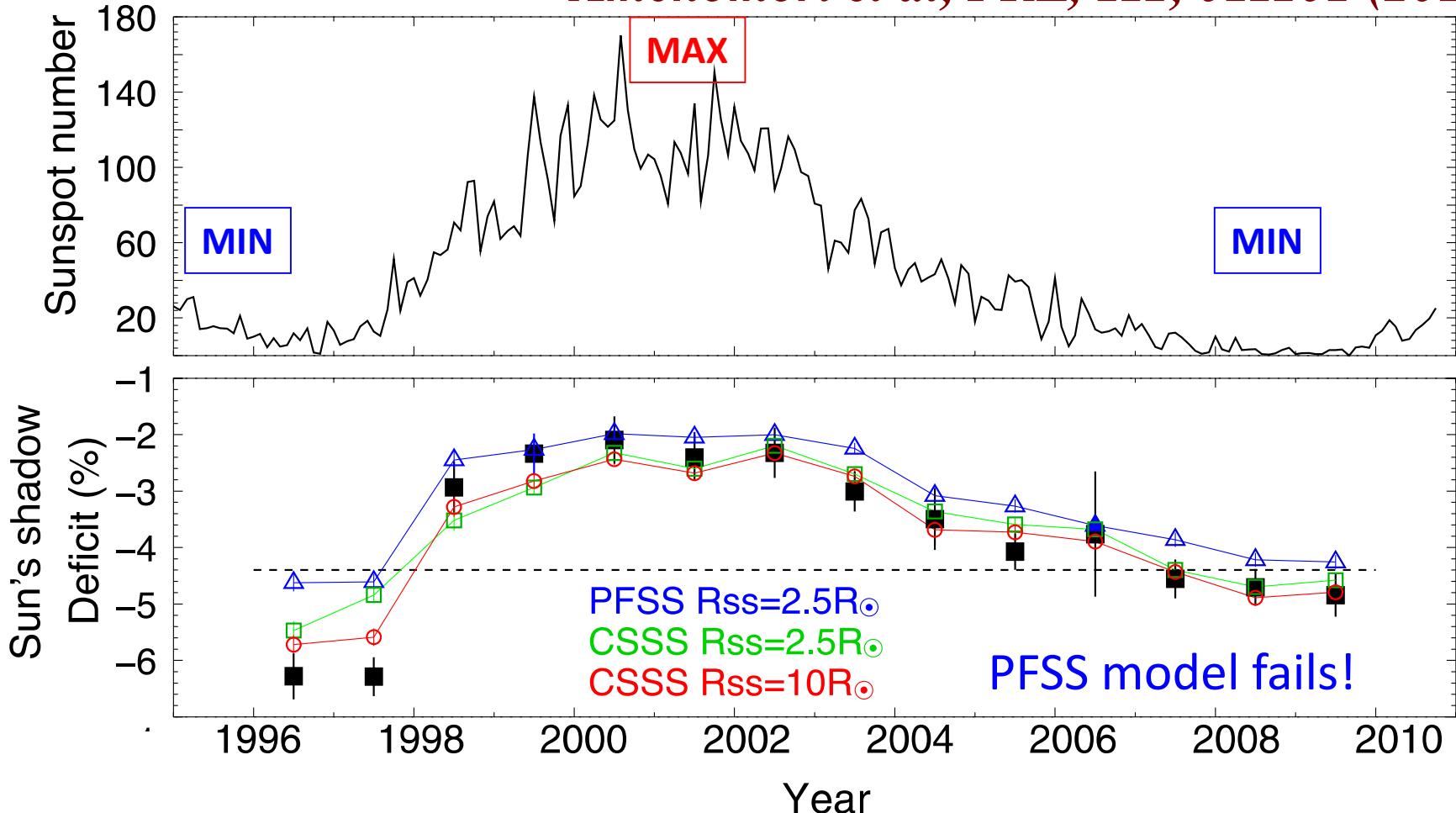
1996  
(CR1910)



2001  
(CR19<sub>18</sub>78)

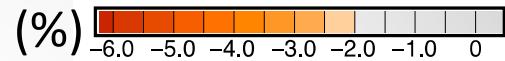
# Past Results (Tibet-II >10TeV)

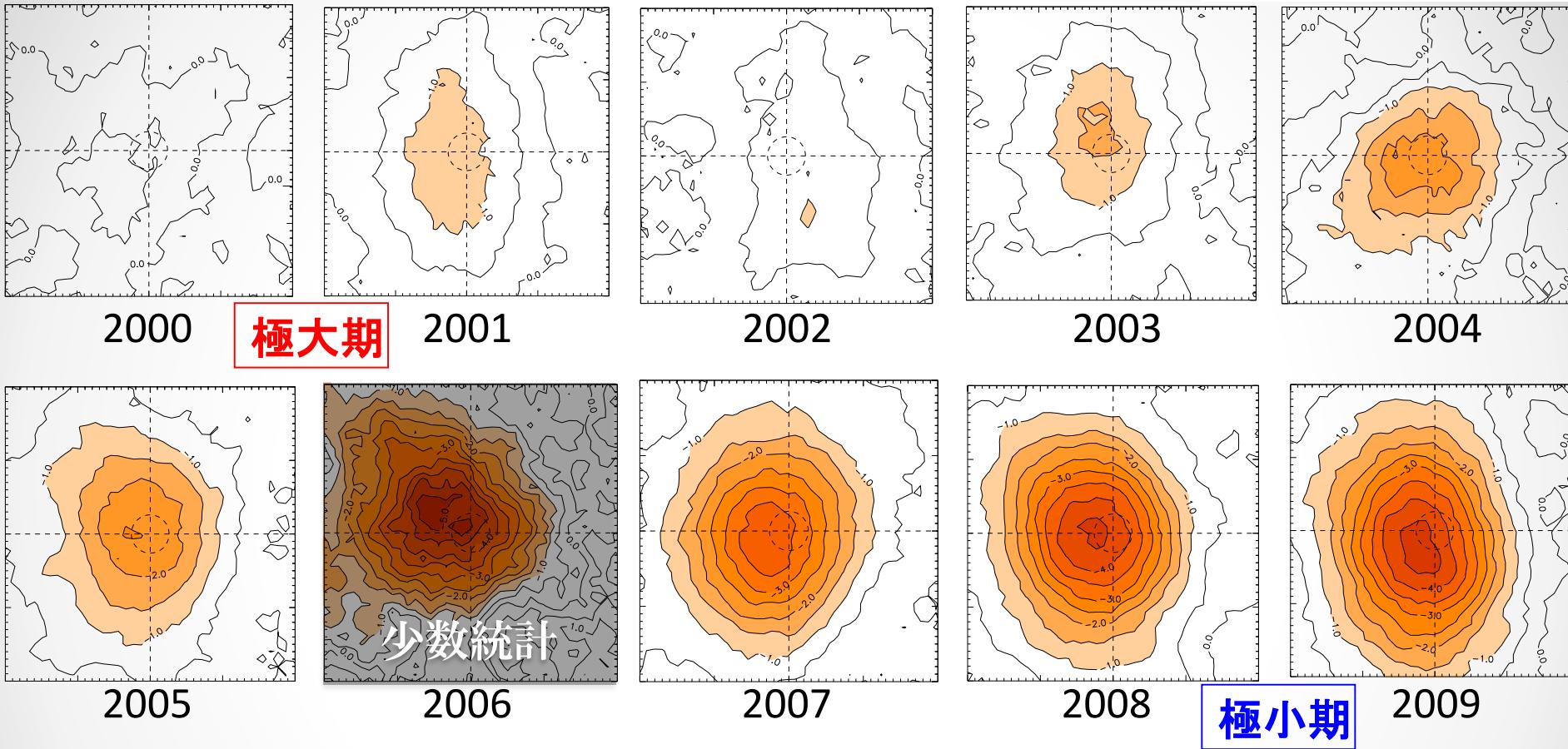
*Amenomori et al, PRL, 111, 011101 (2013)*



- ✓ Discovery of a clear anti-correlation of the deficits with SN
- ✓ Comparison b/w coronal MF models (PFSS/CSSS)

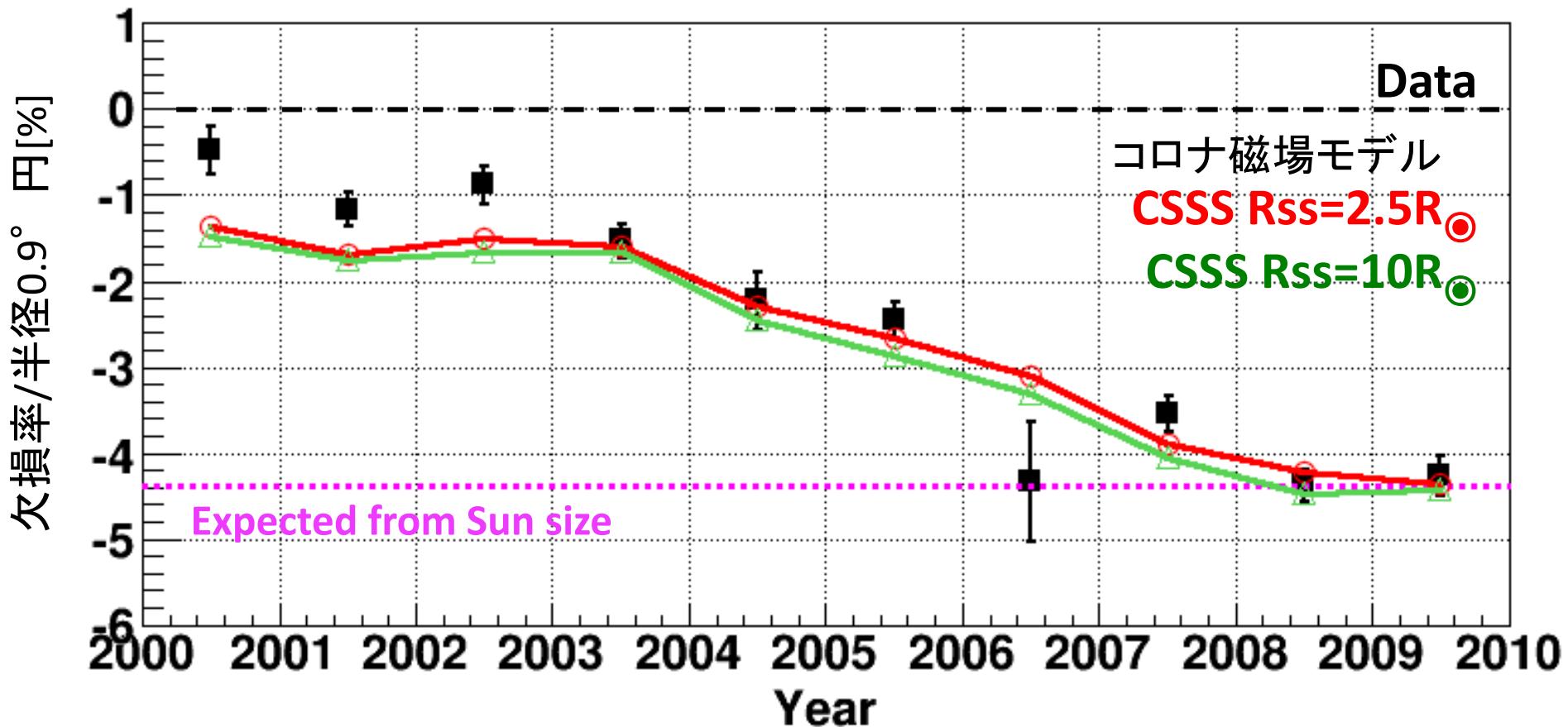
# 太陽の影の観測 > 3 TeV

(%) 



- ✓ 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  
(欠損率 = 欠損量 / バックグラウンド [%])  
→ 太陽活動と反相関 : 極大期は浅く、極小期は深い

# 影の深さの変化 全期間 - 3 TeV



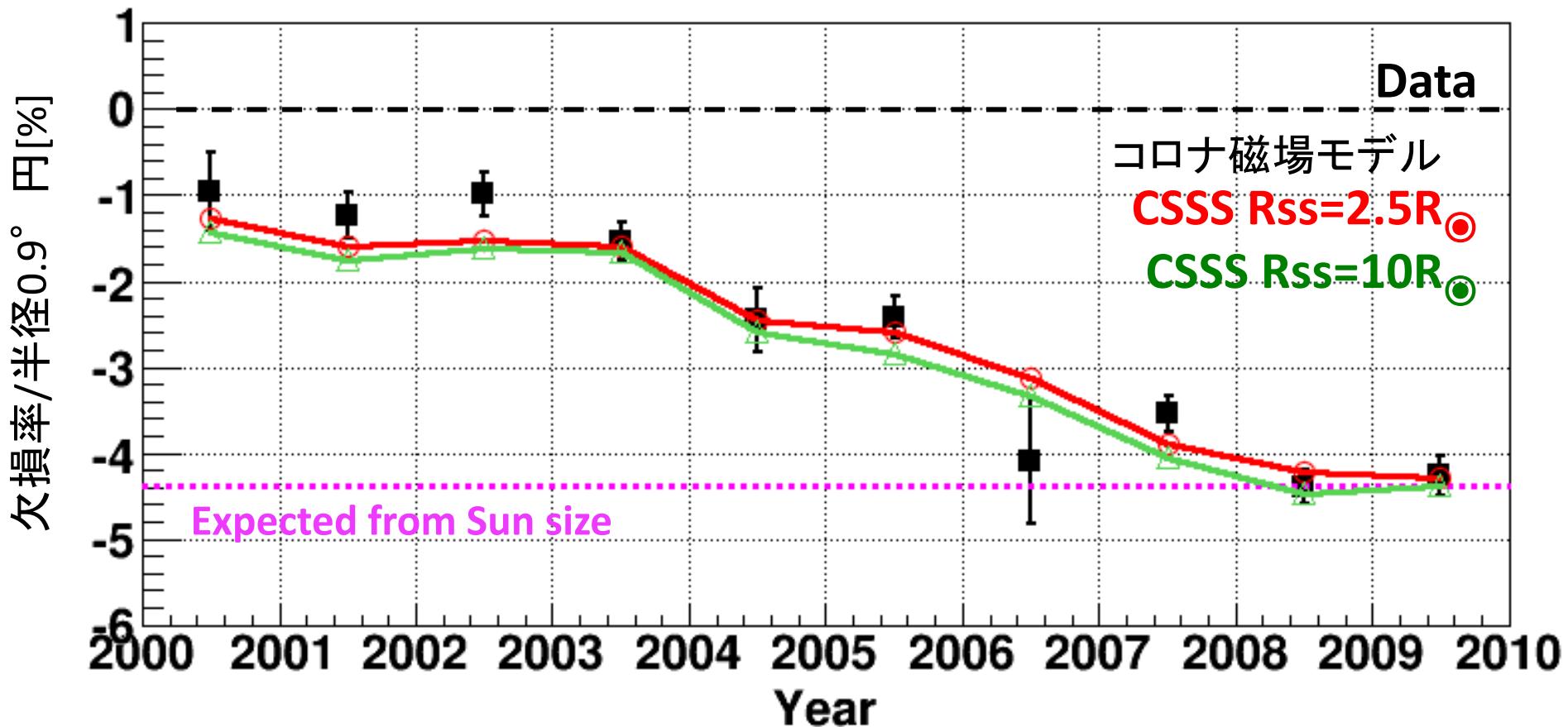
$$\chi^2 / \text{dof} = 32.1 / 10 (3.4\sigma)$$

$$\chi^2 / \text{dof} = 46.9 / 10 (4.8\sigma)$$

※統計誤差のみ

CMEの影響を調査

# 影の深さの変化 CME発生期間を除く



Paper in preparation

$$\chi^2 / \text{dof} = 12.2 / 10 (0.6\sigma)$$

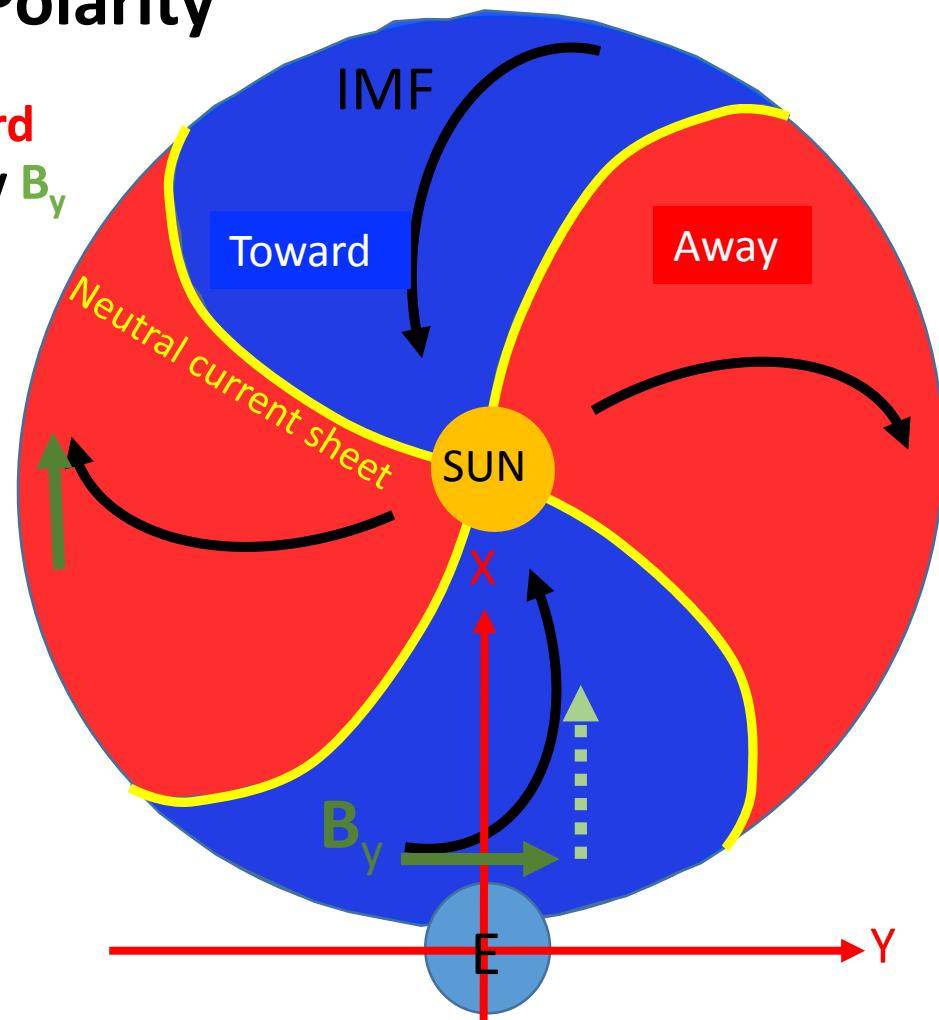
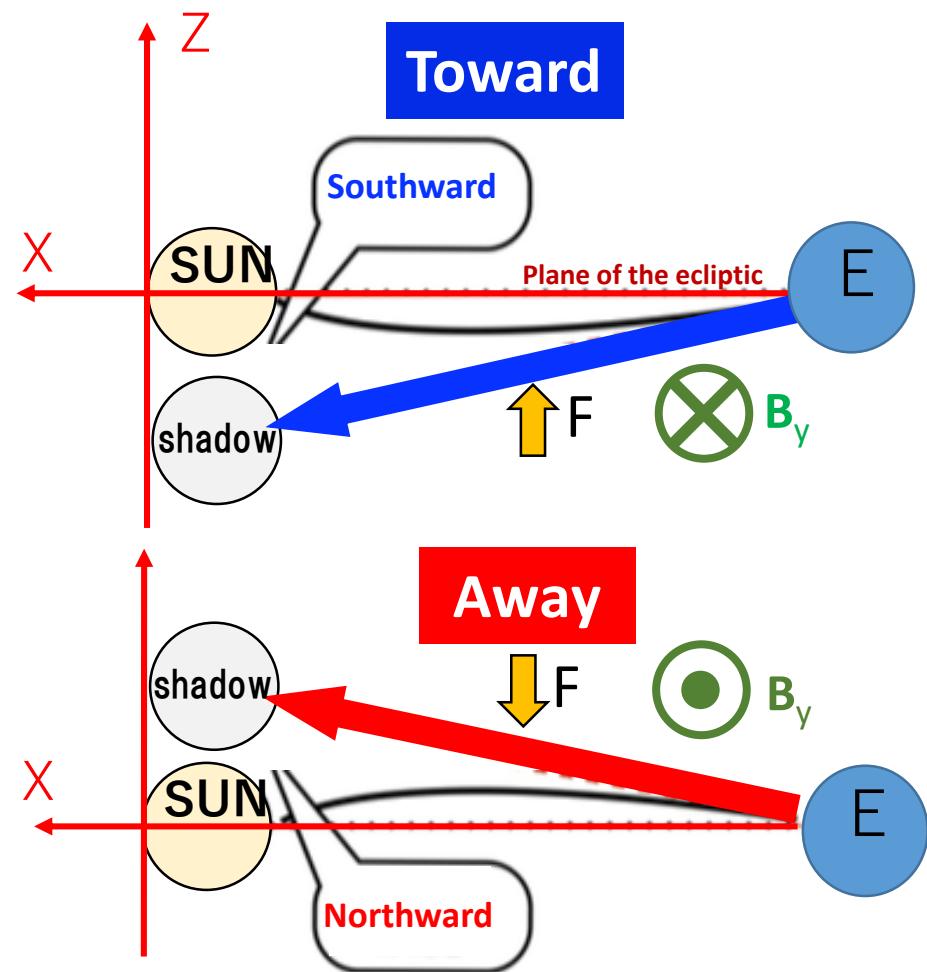
$$\chi^2 / \text{dof} = 21.3 / 10 (2.0\sigma)$$

※統計誤差のみ

活動期で影が深くなる  
CSSSは再現  
→ 磁場モデルにはCME等の  
短期変動は考慮されない

# Sun's Shadow and IMF Sector Polarity

- The Sun's shadow is deflected **northward** (**southward**) in **Away** (**Toward**) sector by  $B_y$



**Assignment of the sector polarity with  $B_x$  &  $B_y$  observed two days later**

$B_x < 0 \text{ & } B_y > 0 \Rightarrow \text{Away}$

$B_x > 0 \text{ & } B_y < 0 \Rightarrow \text{Toward}$

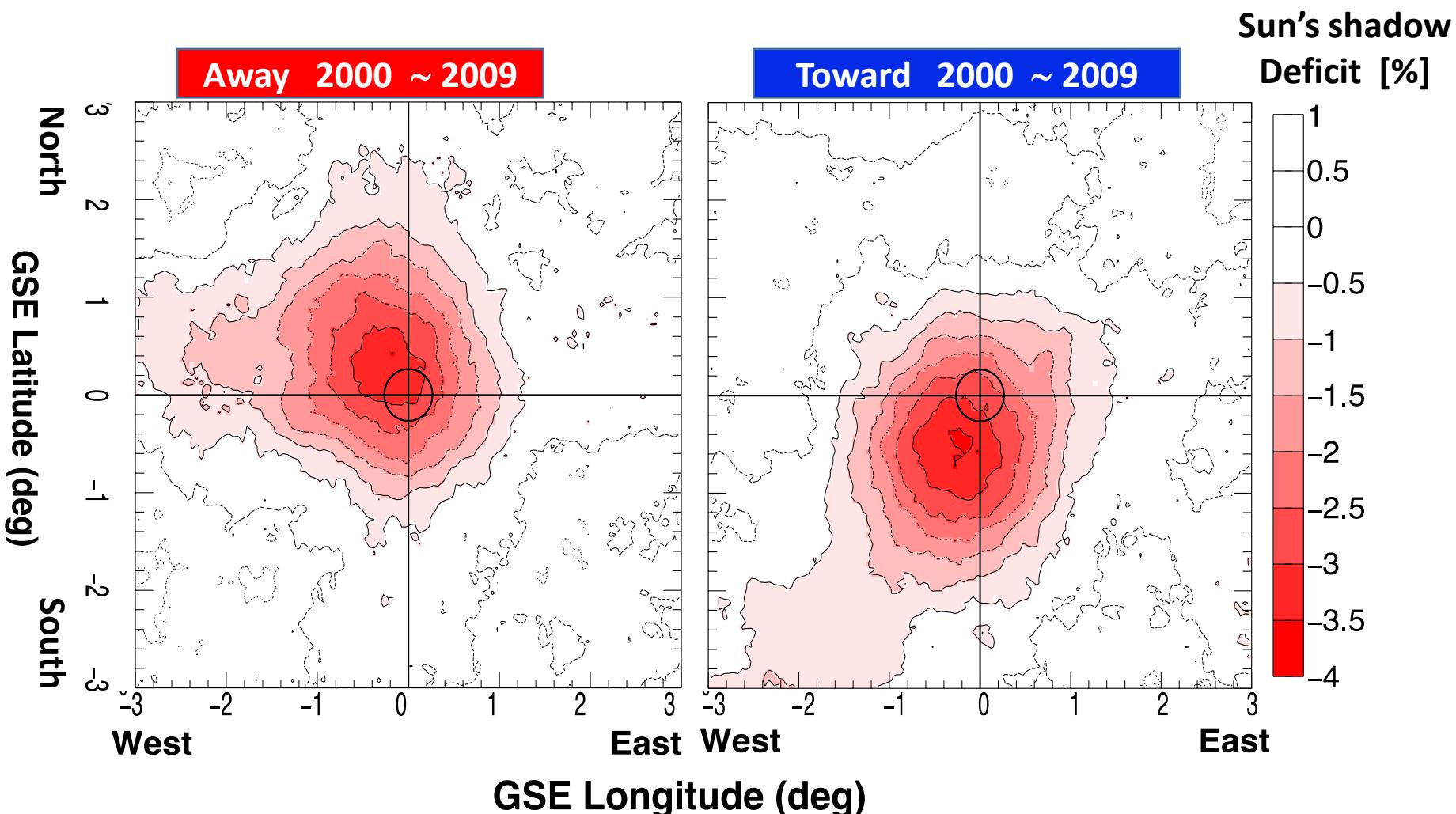
# Data Selection (Tibet-III)

1. Between 2000 and 2009 (only summer)
2. Zenith angle < 40°
3. Divide AS events into 7 energy bins according to the shower size :  $\Sigma\rho_{FT}$

7 energy bins		IMF sector polarity	
$\Sigma\rho_{FT}$	Rigidity[TV]	Away	Toward
		number of events	
17.8~31.6	4.4	$2.7 \times 10^6$	$3.2 \times 10^6$
31.6~56.2	5.9	$8.8 \times 10^5$	$1.0 \times 10^6$
56.2~100	8.2	$2.1 \times 10^5$	$2.4 \times 10^5$
100~215	13.1	$4.2 \times 10^4$	$5.0 \times 10^4$
215~464	24.0	$6.1 \times 10^3$	$7.2 \times 10^3$
464~1000	43.7	$7.0 \times 10^2$	$8.5 \times 10^2$
1000~	115	$9.2 \times 10^1$	$1.1 \times 10^2$

# Observed Sun's shadow @13TV

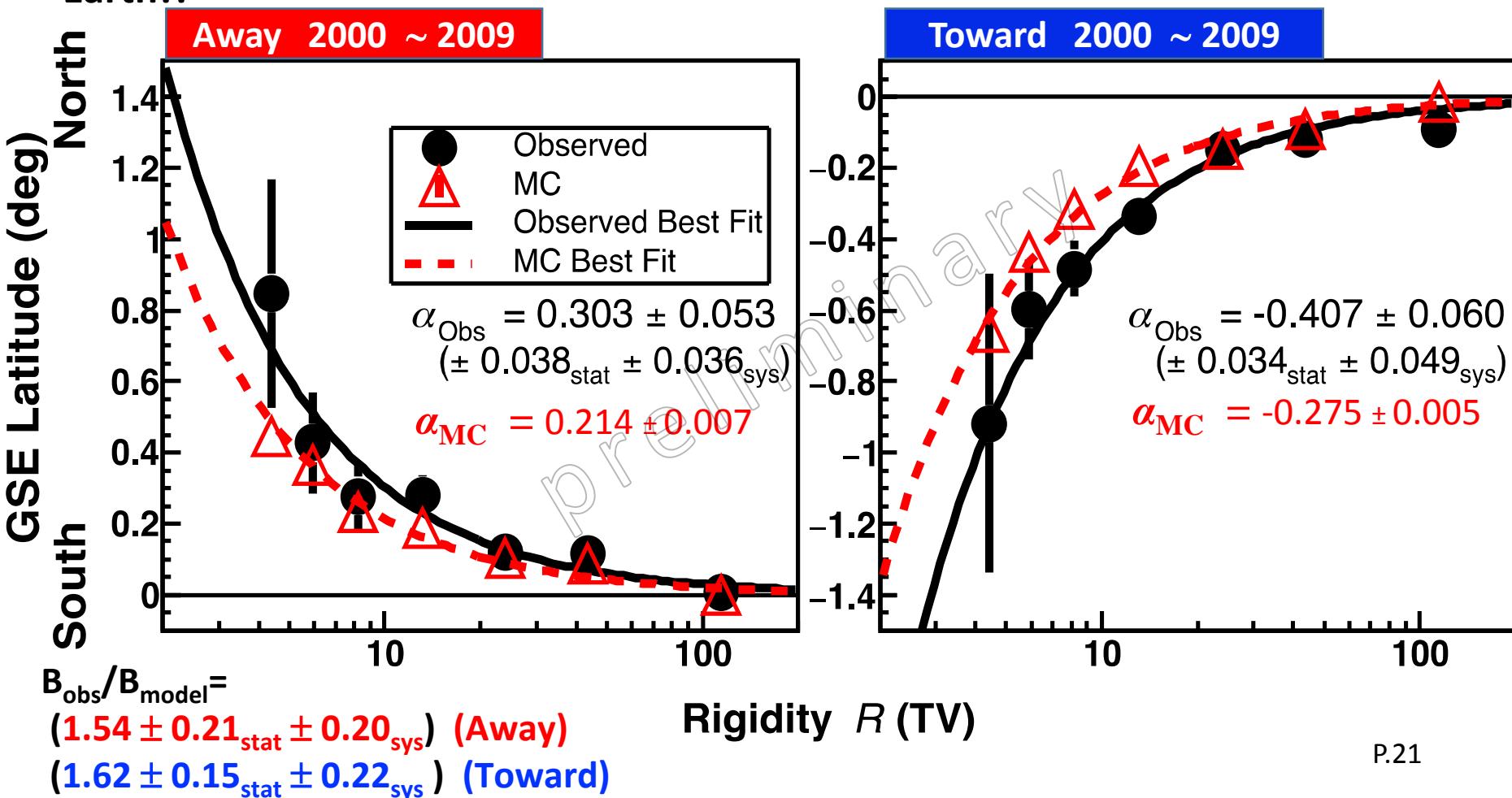
- The center of Sun's shadow clearly deviates from the center of the Sun.
- North-South(N-S) displacement in **Away(Toward)** sector is **Northward (Southward)**.



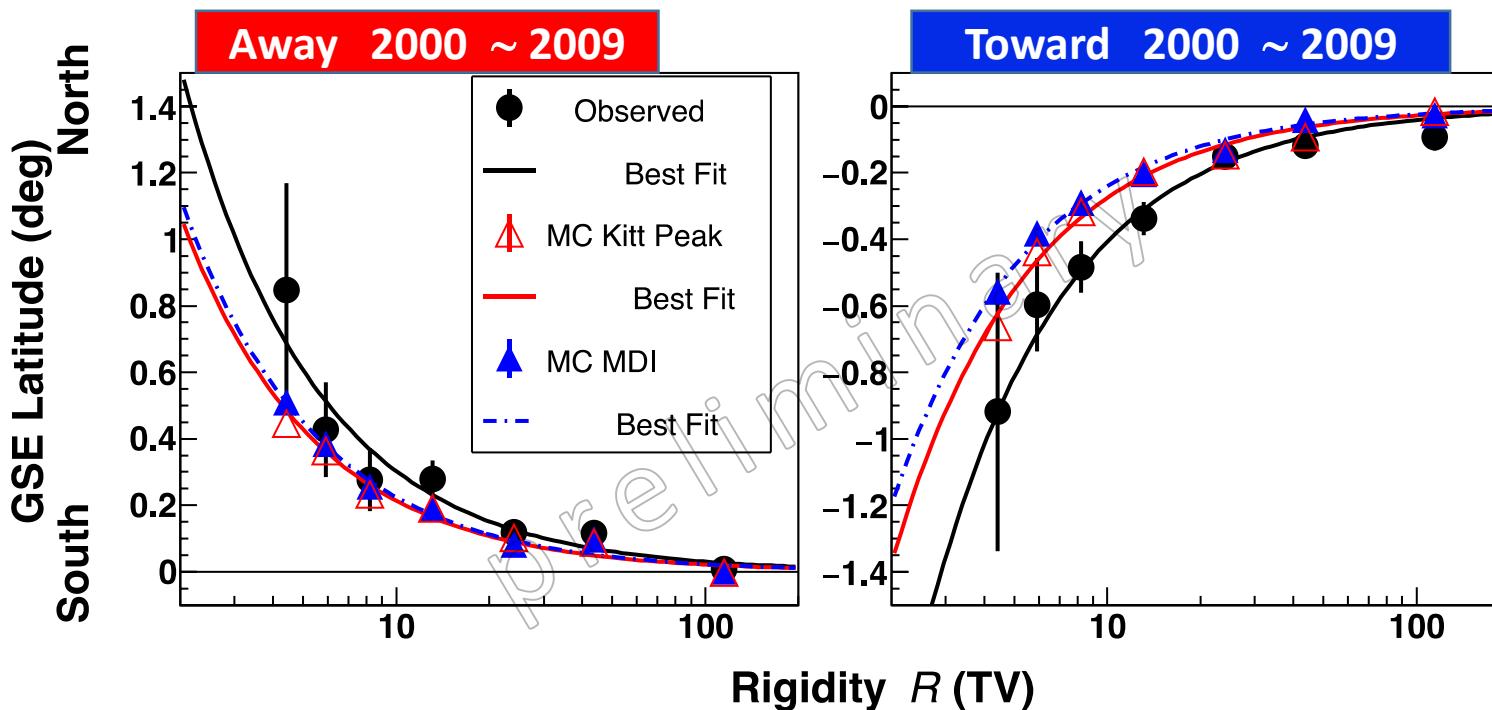
- Westward displacement is mainly due to the deflection in the geomagnetic field, as observed in the Moon's shadow.

# Tibet-III : North – South Displacement of the Sun's Shadow

- Rigidity ( $E/Ze$ ) Dependence of N-S displacement, fitted by  $f(R) = \alpha/(R/10[TV])$ , fitting parameter:  $\alpha$  denoting displacement angle at 10TV
  - Our MC simulation underestimates  $\alpha$  in both sectors!
- ⇒ the solar magnetic field model underestimates IMF strength between Sun and Earth!?

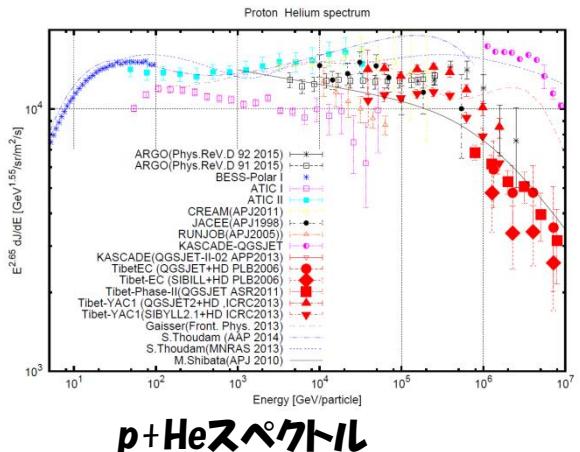


- The solar magnetic field model underestimates N-S displacement observed by Tibet-III, by underestimating the IMF strength
- Possible sources of this underestimation
  - ◆ underestimation of photospheric magnetic field ?  
; photospheric field strength observed by MDI is  $1.80 \pm 0.20$  times larger than Kitt peak used in our simulations (Riley et. al. 2014)  
=> But, the underestimation of  $\alpha$  is not improved in simulations even with MDI
  - ◆ refinement of the coronal magnetic field model needed? <= more likely



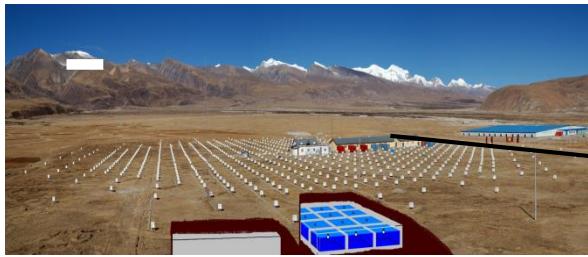
# Knee領域一次宇宙線組成の研究

(継続課題) 代表: 片寄祐作・横浜国立・工、他 15名、配分額 10万円



## 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
- TeV領域軽原子スペクトル測定:  
[目的] 数TeV領域からP+Heスペクトル測定  
高密度 YACアレイによりトリガー  $\Rightarrow$  陽子、ヘリウムの選択、エネルギー決定精度の向上



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



YAC-II

## 本年度の発表・論文等

- ICRC2017 関係 3件: "Measurement of high energy cosmic rays by the new Tibet hybrid experiment" 等
- 学会発表 1件: 「空気シャワーコア検出器を用いたTeV領域軽原子核宇宙線スペクトルの測定」

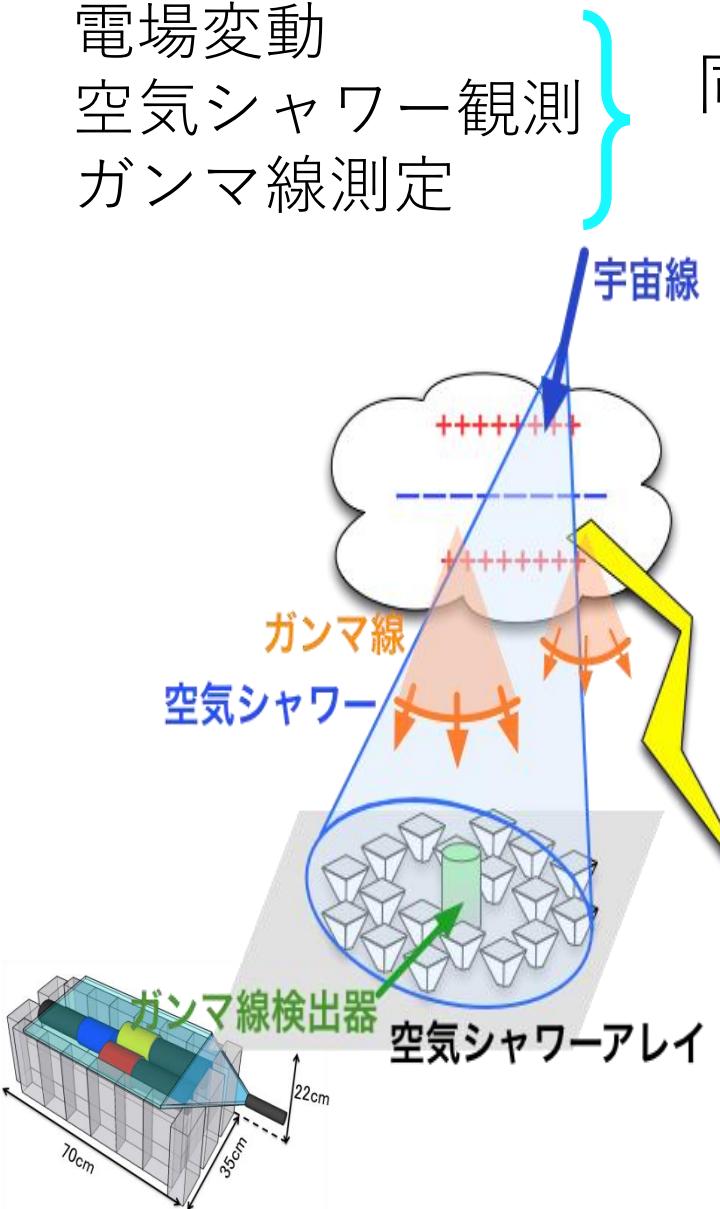
# Tibet-IIIを利用した 雷雲電場における粒子加速機構の研究

電場変動

空気シャワー観測

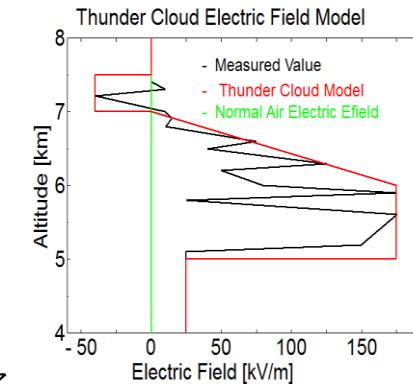
ガンマ線測定

同時測定

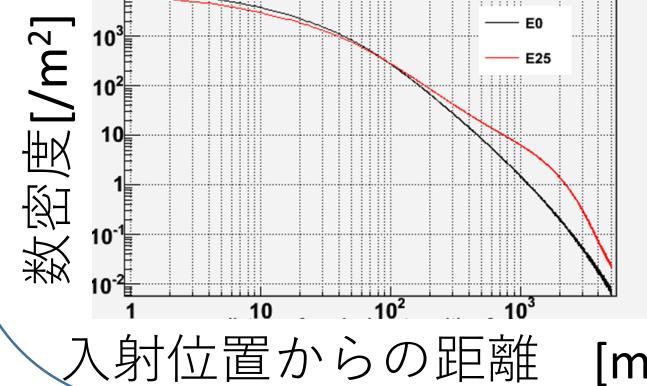


雷雲電場下の空気シャワー発達  
シミュレーション

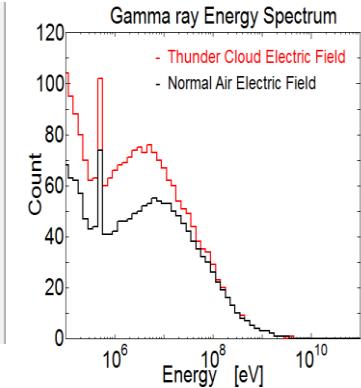
仮定した  
雷雲電場モデル



空気シャワー電子  
の横広がり

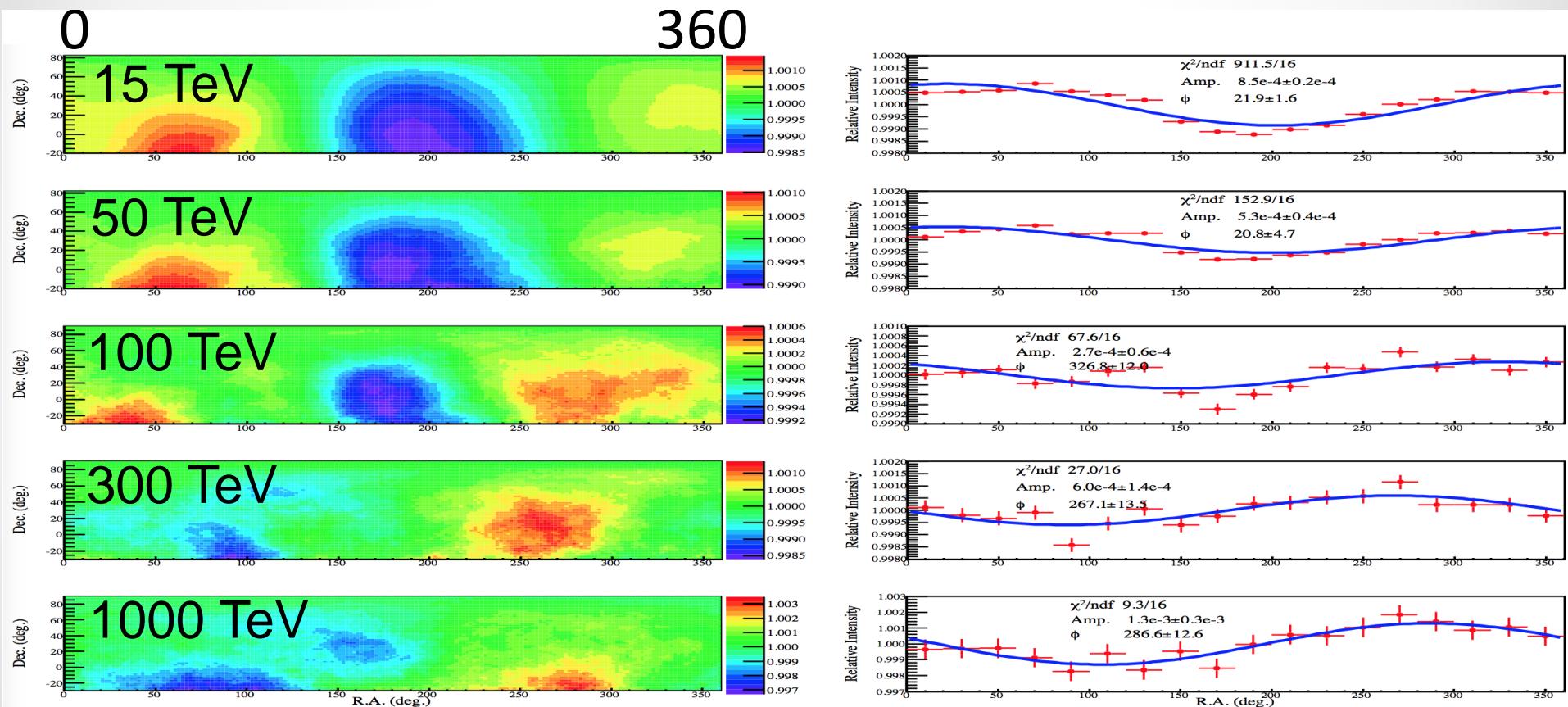


ガンマ線強度



入射位置からの距離 [m]

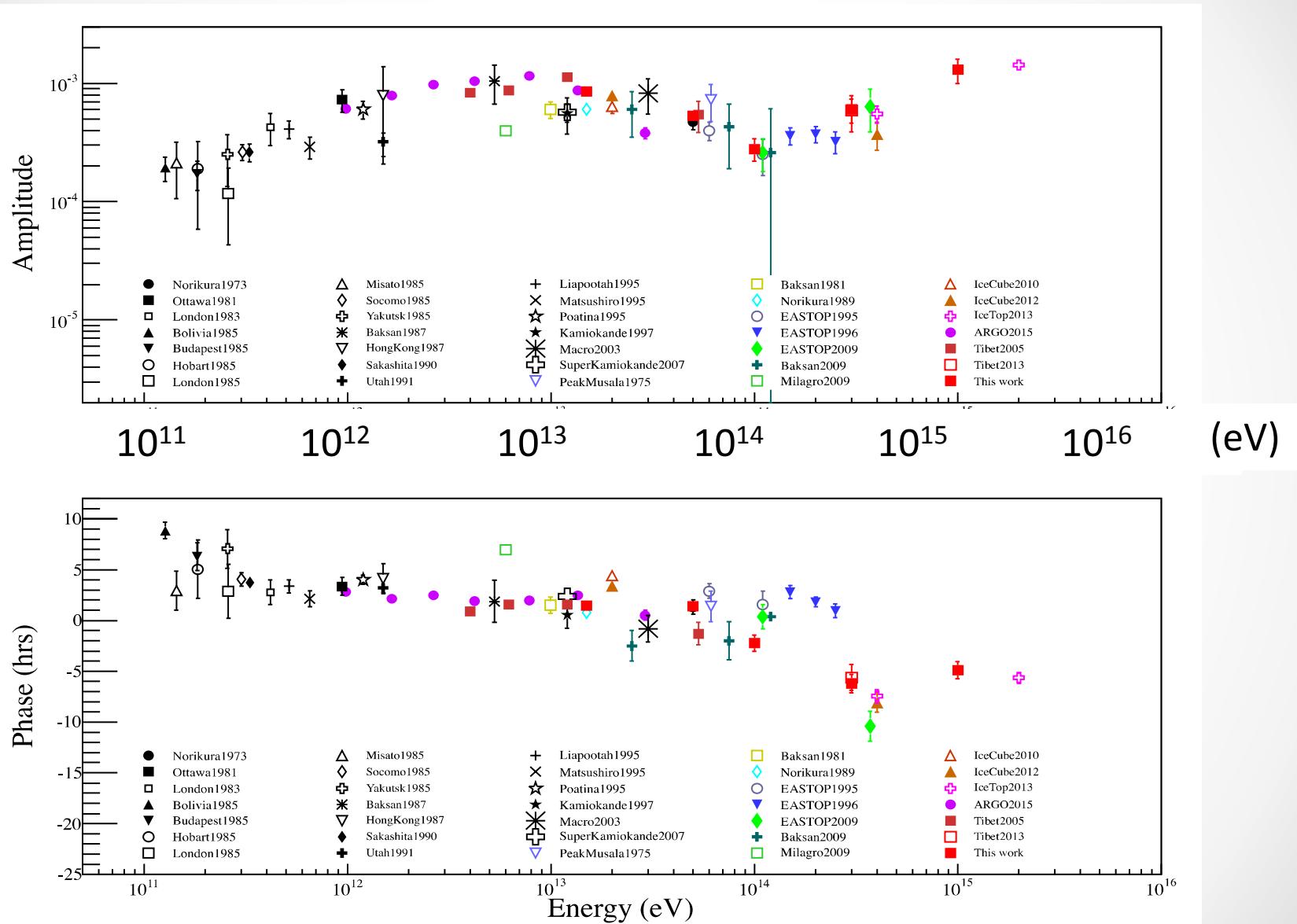
# 10-1000TeV以上の恒星時異方性



Amenomori et al, ApJ, 836, 153-1-7, (2016)

>300 TeV new component!, consistent with IceCube >400 TeV

# 10-1000TeV以上の恒星時異方性



# まとめ

- Tibet AS+MD
  - 2014年から観測継続中
  - S50を使ったエネルギー分解能=16%@100TeV (zenith angle < 20° )  
published in Experimental Astronomy (2017)
- 太陽の影 (TeV領域の解析)
  - CMEの影響を確認 submitted (2017)
  - 影の中心方向の南北方向のズレの解析 accepted by PRL (2017)
- Knee領域宇宙線組成
  - 数TeV領域のP+Heのハードニングの検証を目指す
  - Tibet AS + YAC 2014年から観測を継続中
- 雷雲からの高エネルギー放射
  - 電磁場 + ガンマ線放射 + 空気シャワー 同時観測を目指す
- 宇宙線異方性
  - 10-1000TeVエネルギー依存性 Published in ApJ (2016)