

# チベット高原での 高エネルギー宇宙線の研究

川田 和正 (東京大学宇宙線研究所)

For the Tibet AS $\gamma$  Collaboration

# 平成28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**

2002年に完成したTibet-III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 **385万円**

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



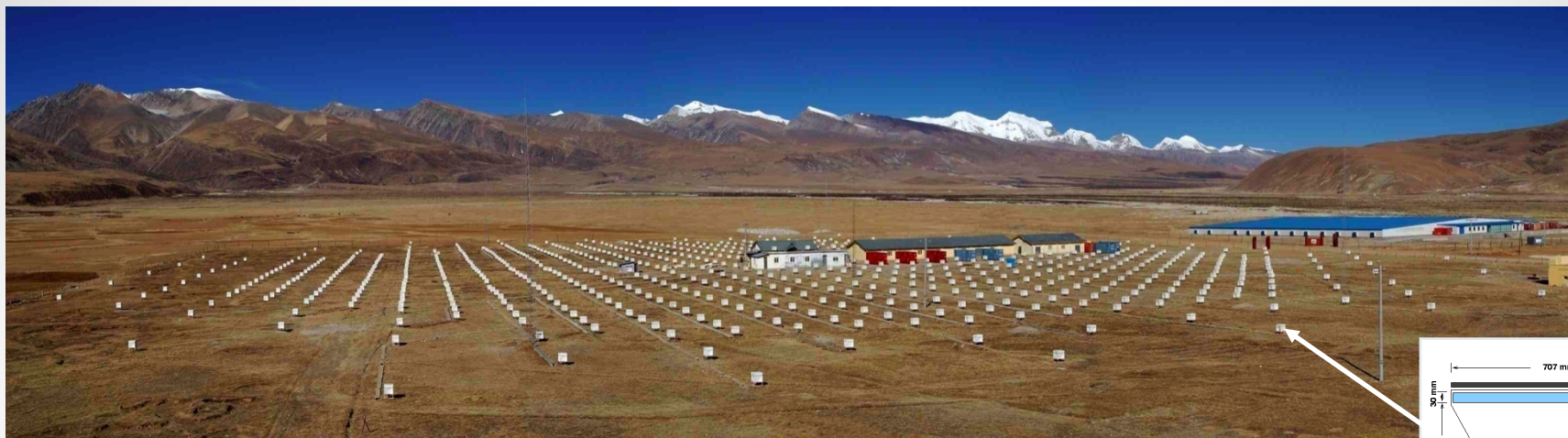
M.Amenomori(1), X.J.Bi(2), D.Chen(3), W.Y.Chen(2), S.W.Cui(4), Danzengluobu(5), L.K.Ding(2), X.H.Ding(5), C.F.Feng(6), Zhaoyang Feng(2), Z.Y.Feng(7), Q.B.Gou(2), H.W.Guo(5), Y.Q.Guo(2), H.H.He(2), Z.T.He(4,2), K.Hibino(8), N.Hotta(9), Haibing Hu(5), H.B.Hu(2), J.Huang(2), H.Y.Jia(7), L.Jiang(2), F.Kajino(10),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

- (1)Department of Physics, Hirosaki 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)Faculty of Engineering, Kanagawa University, Japan
- (9)Faculty of Education, Utsunomiya University, Japan
- (10)Department of Physics, Konan University, Japan
- (11)Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Japan

- (12)Faculty of Engineering, Yokohama National University, Japan
- (13)Department of Physics, Shinshu University, Japan
- (14)School of Information Science and Engineering, Shandong Agriculture University, China
- (15)Saitama University, Japan
- (16)National Institute of Informatics, Japan
- (17)Sakushin Gakuin University, Japan
- (18)Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, Japan
- (19)Max-Planck-Institut für Physik, Deutschland
- (20)College of Industrial Technology, Nihon University, Japan
- (21)Shonan Institute of Technology, Japan
- (22)RIKEN, Japan
- (23)School of General Education, Shinshu University, Japan



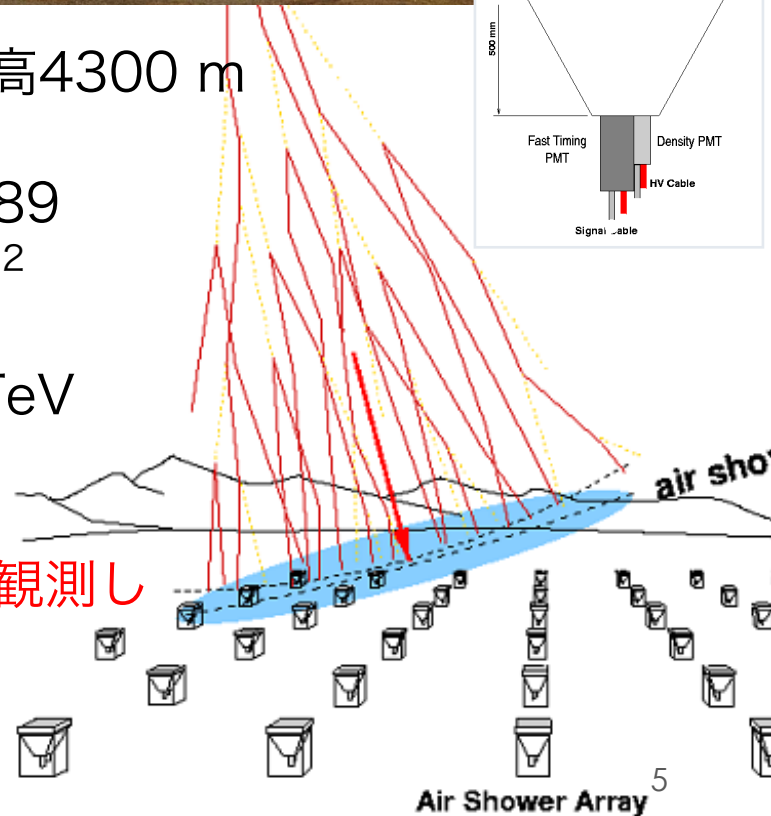
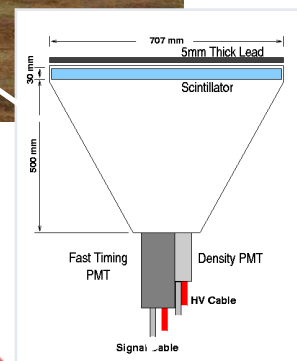
# チベット空気シャワー観測装置 (Tibet AS)



□ 中国チベット (90.522°E, 30.102°N) 標高4300 m

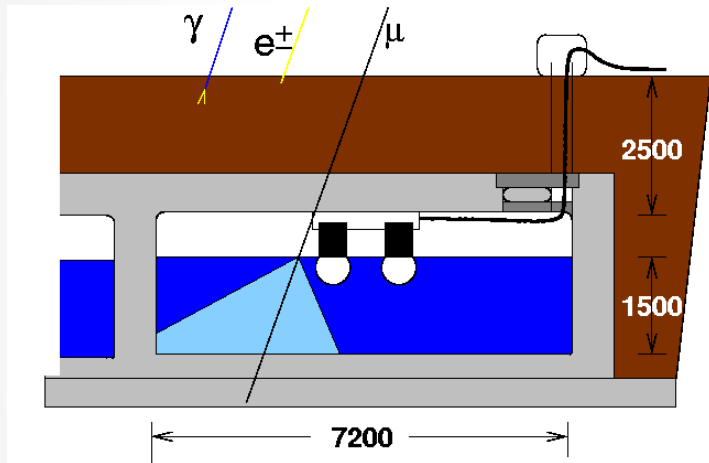
- シンチレーション検出器数  $0.5 \text{ m}^2 \times 789$
- 空気シャワー有効面積  $\sim 37,000 \text{ m}^2$
- 最頻エネルギー  $\sim 3 \text{ TeV}$
- 角度分解能  $\sim 0.9^\circ @ 3 \text{ TeV}$
- 視野  $\sim 2 \text{ sr}$

→ 空気シャワー中の二次粒子(主に $e^{\pm}, \gamma$ )を観測し  
一次宇宙線エネルギー、方向を測定

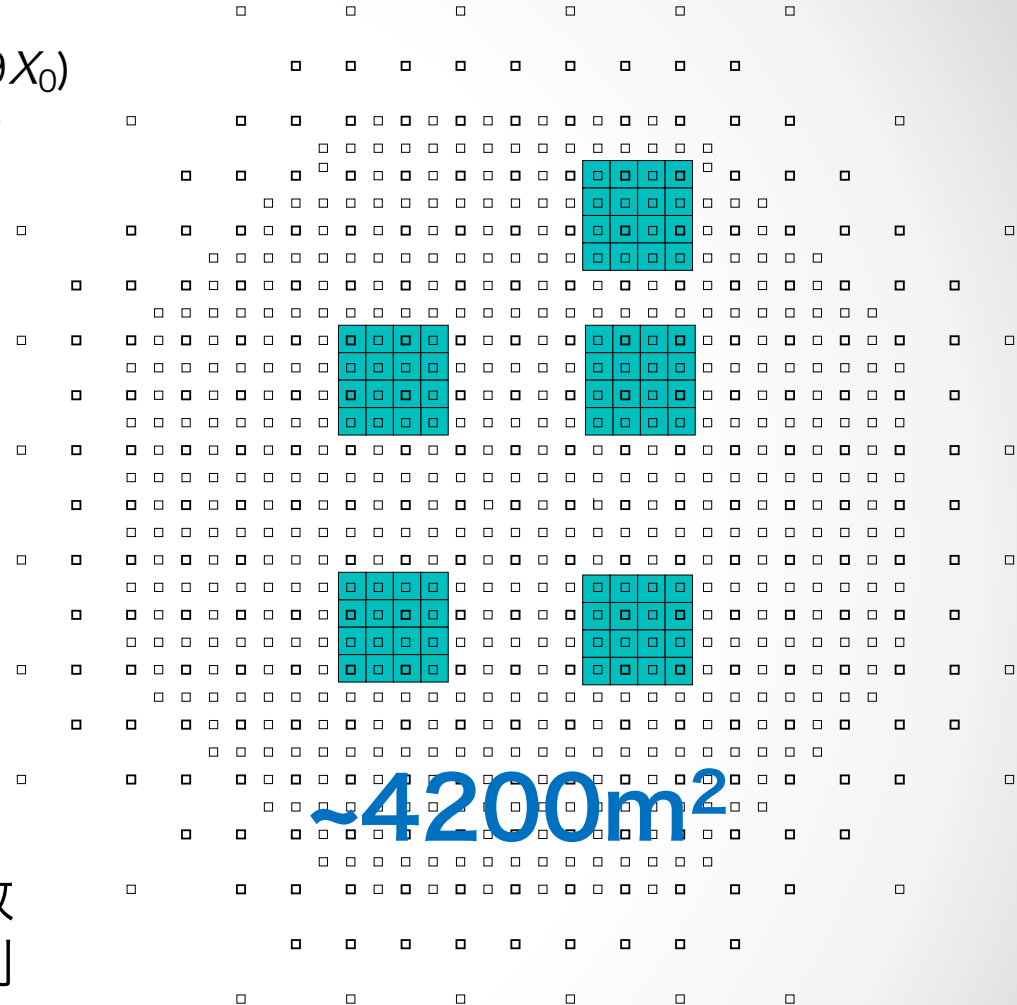


# チベット水チェレンコフミュオン観測装置 (Tibet MD)

- ✓ 地下 2.5m (物質厚  $\sim 515\text{g/cm}^2 \sim 19X_0$ )
- ✓ 7.2m $\times$ 7.2m $\times$ 水深1.5m 水槽 80台
- ✓ 20"  $\Phi$  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オン数を測定し、ガンマ線/核子選別



2014年3月 - 現在 **有効観測日数: 約730日** (10%死時間考慮後)

2013/10/10



Image © 2014 CNES / Astrium



2013/10/10



4,200m<sup>2</sup>  
地下施設

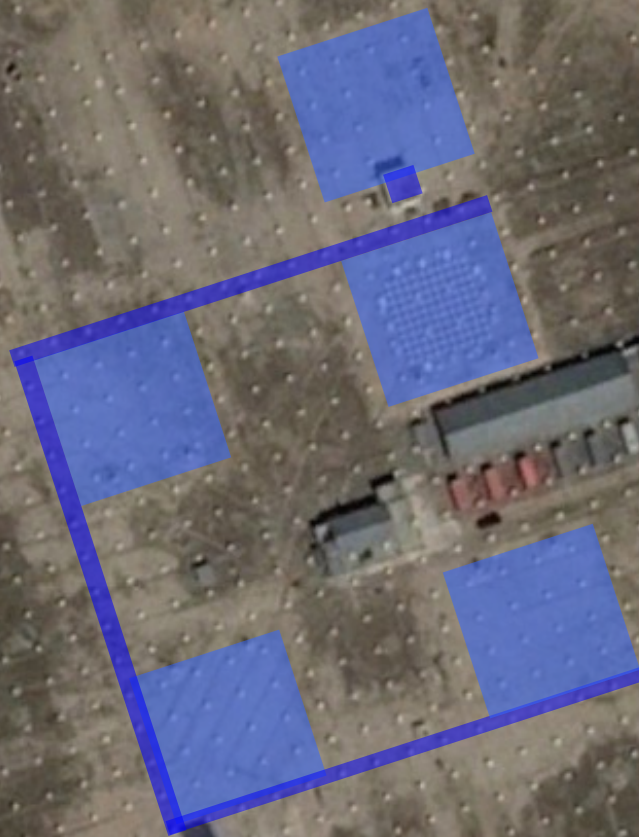
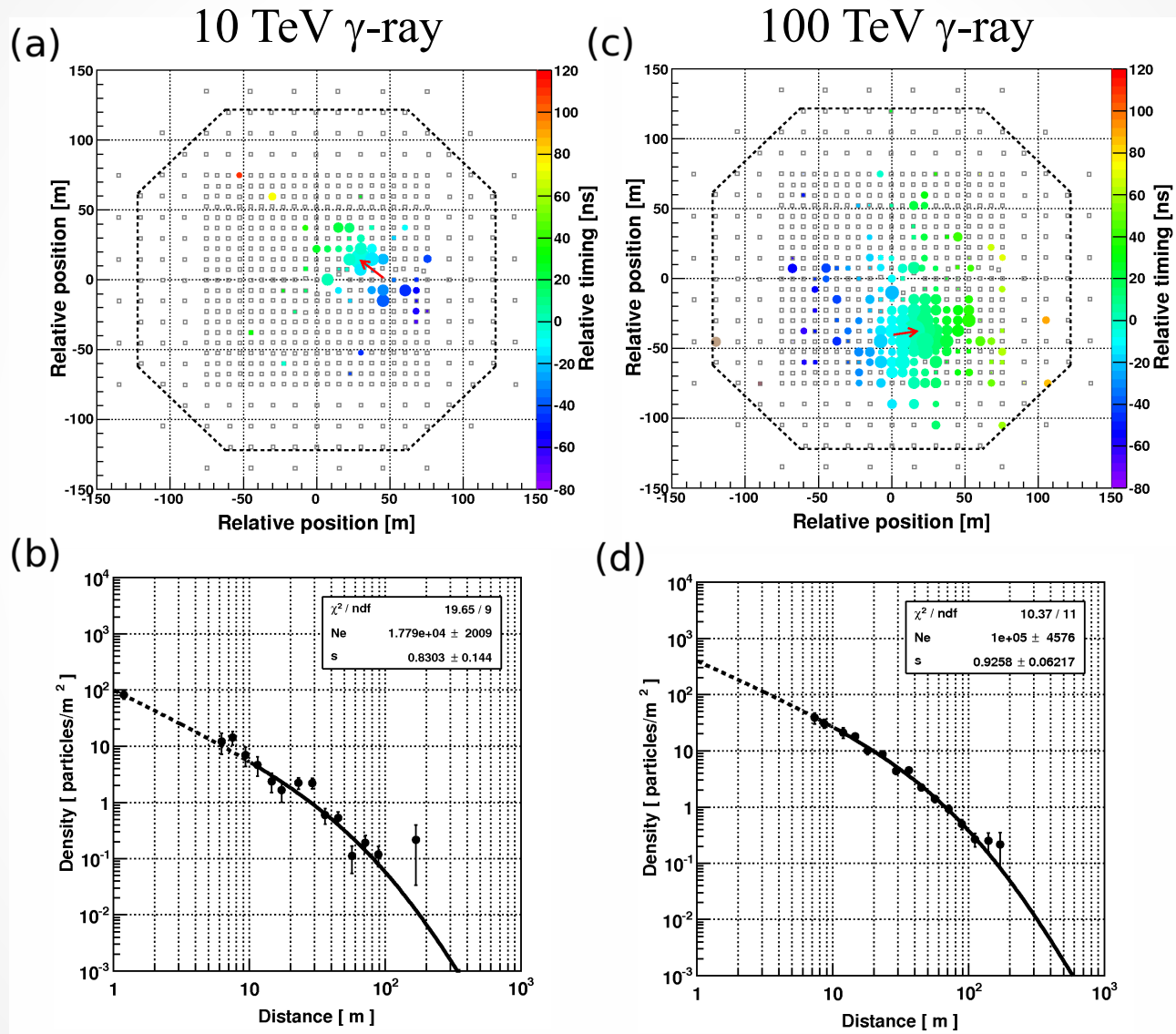


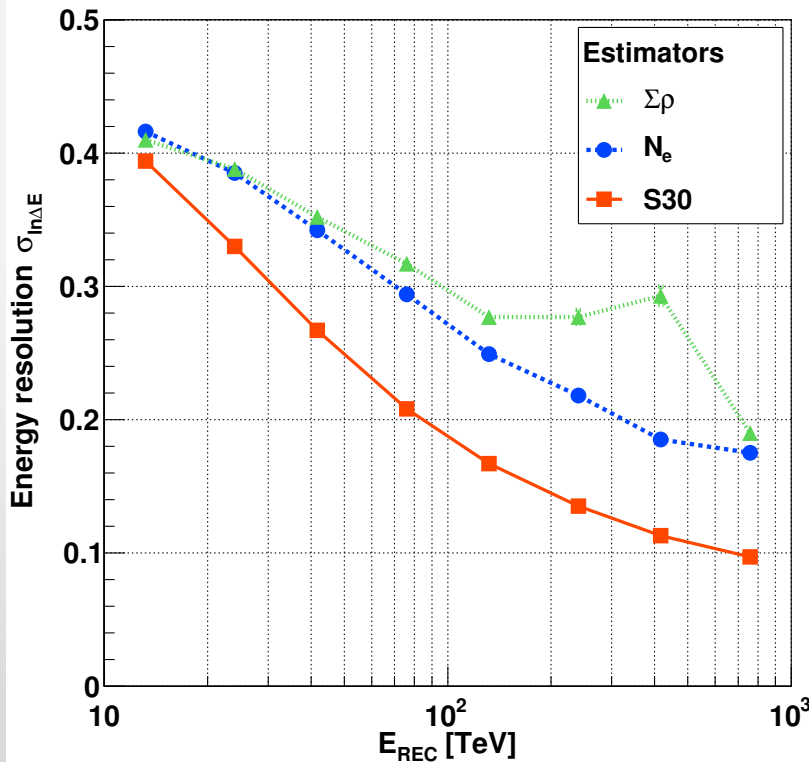
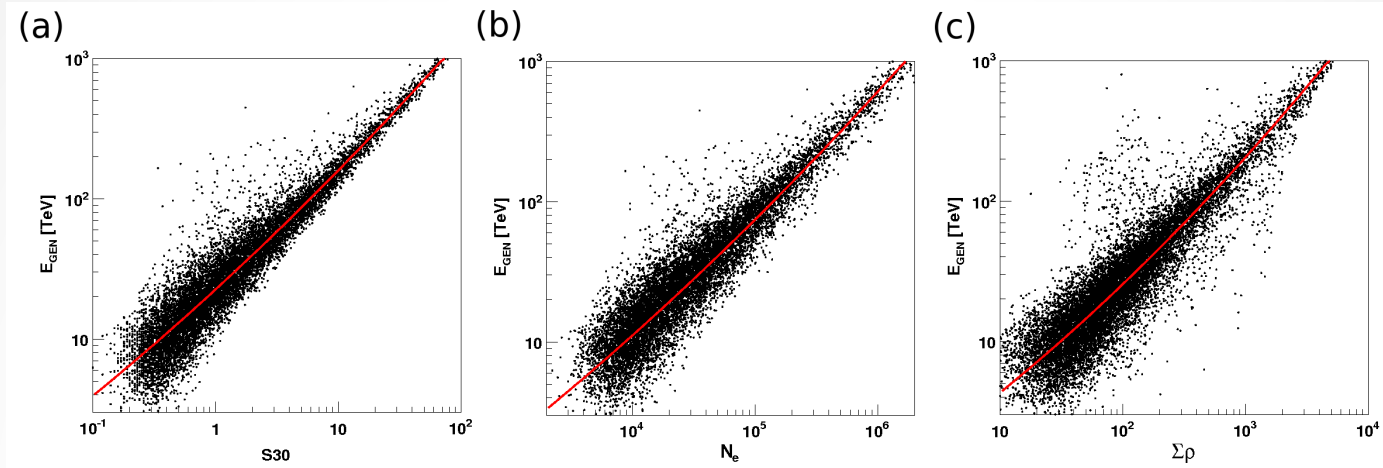
Image © 2014 CNES / Astrium



# 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)

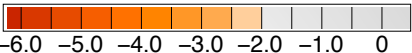
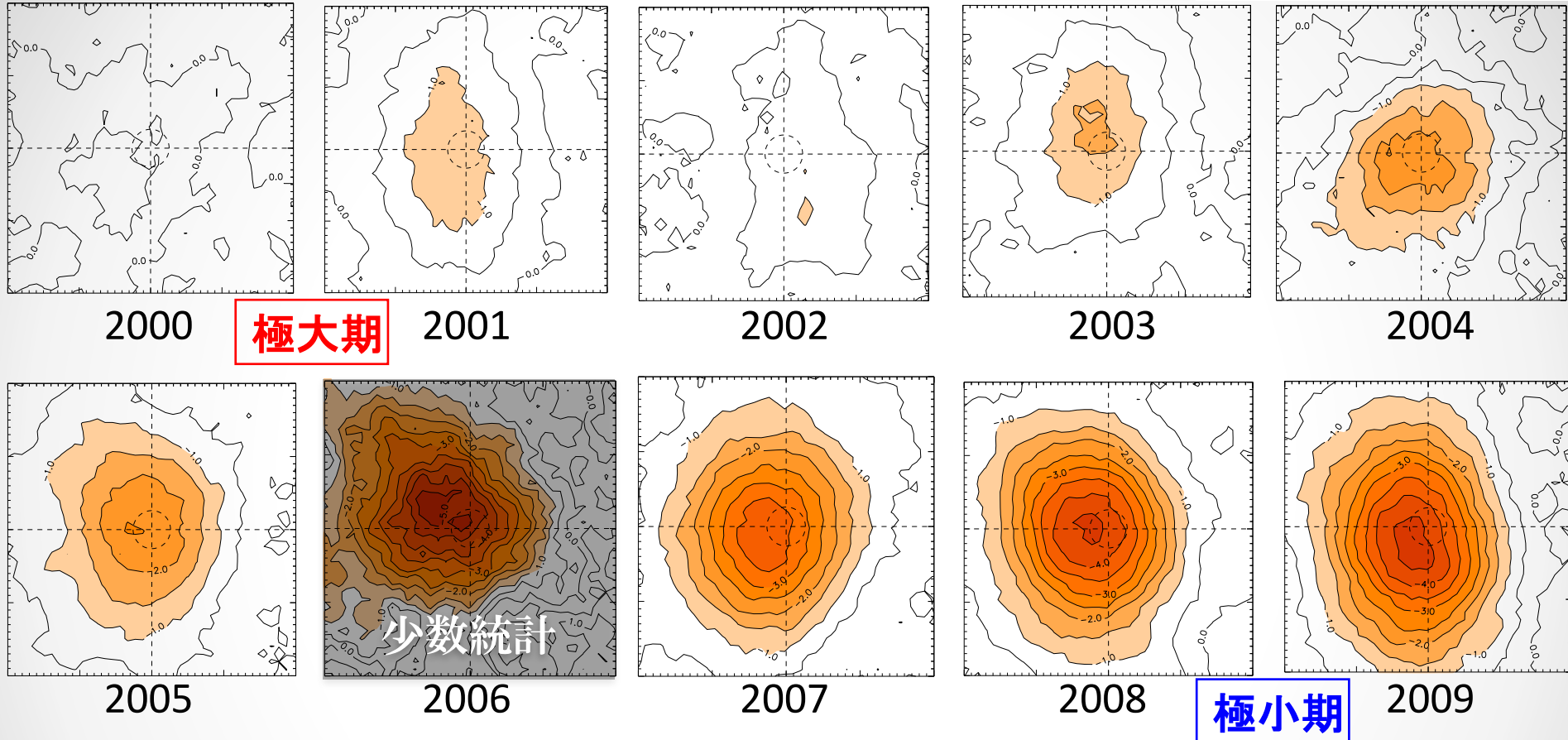


$S30$  : NKG関数で得られた  
コアから30m地点の粒子密度

$N_e$  : NKG関数で得られたシャワーサイズ

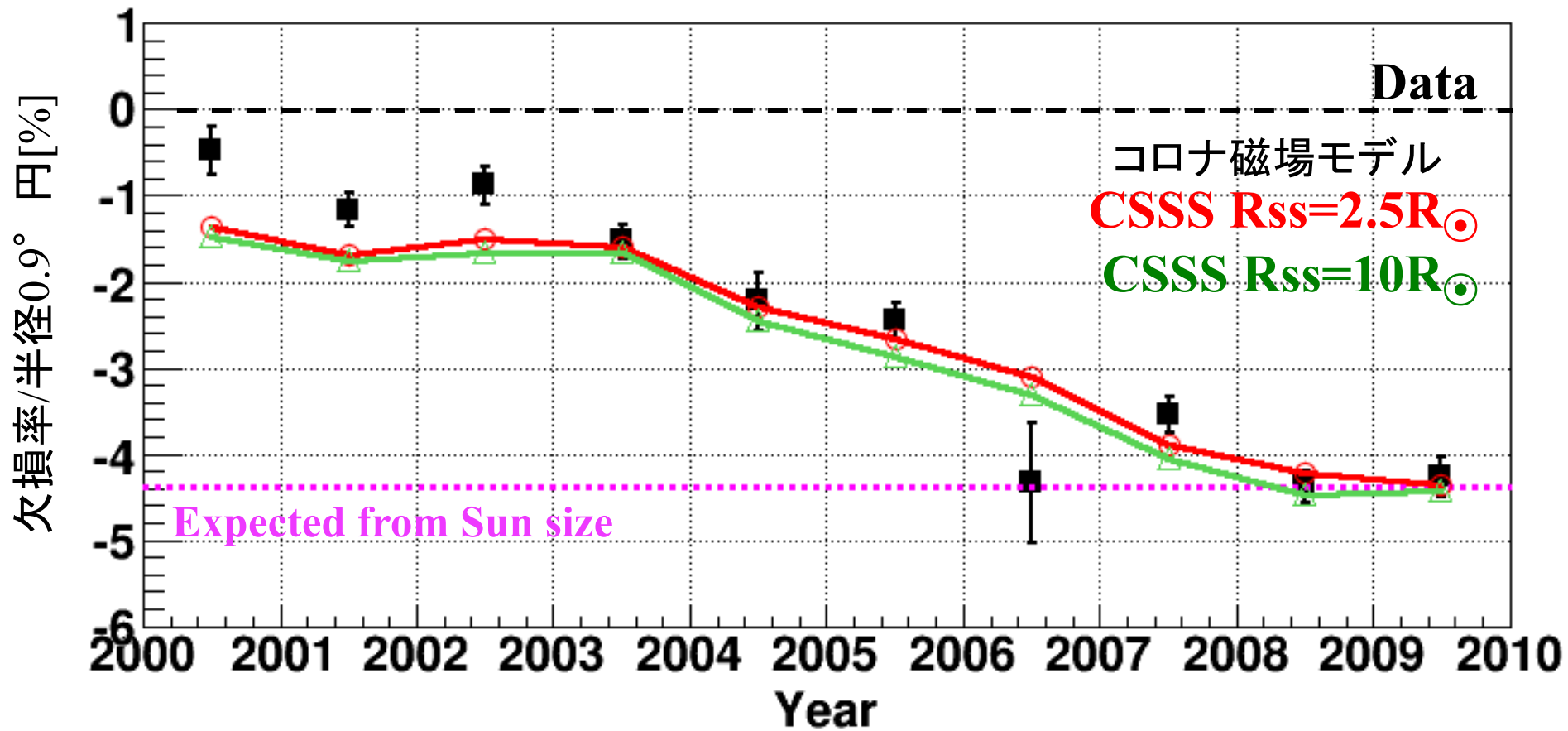
$\Sigma\rho$  : 検出器で得られた総粒子数

## 太陽の影の観測 TeV領域


 (%) -6.0 -5.0 -4.0 -3.0 -2.0 -1.0 0


- ✓ Tibet-III ( $>3\text{TeV}$ ) 2000年-2009年(10年間)
- ✓ 太陽方向を中心にした $4^\circ \times 4^\circ$ 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

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

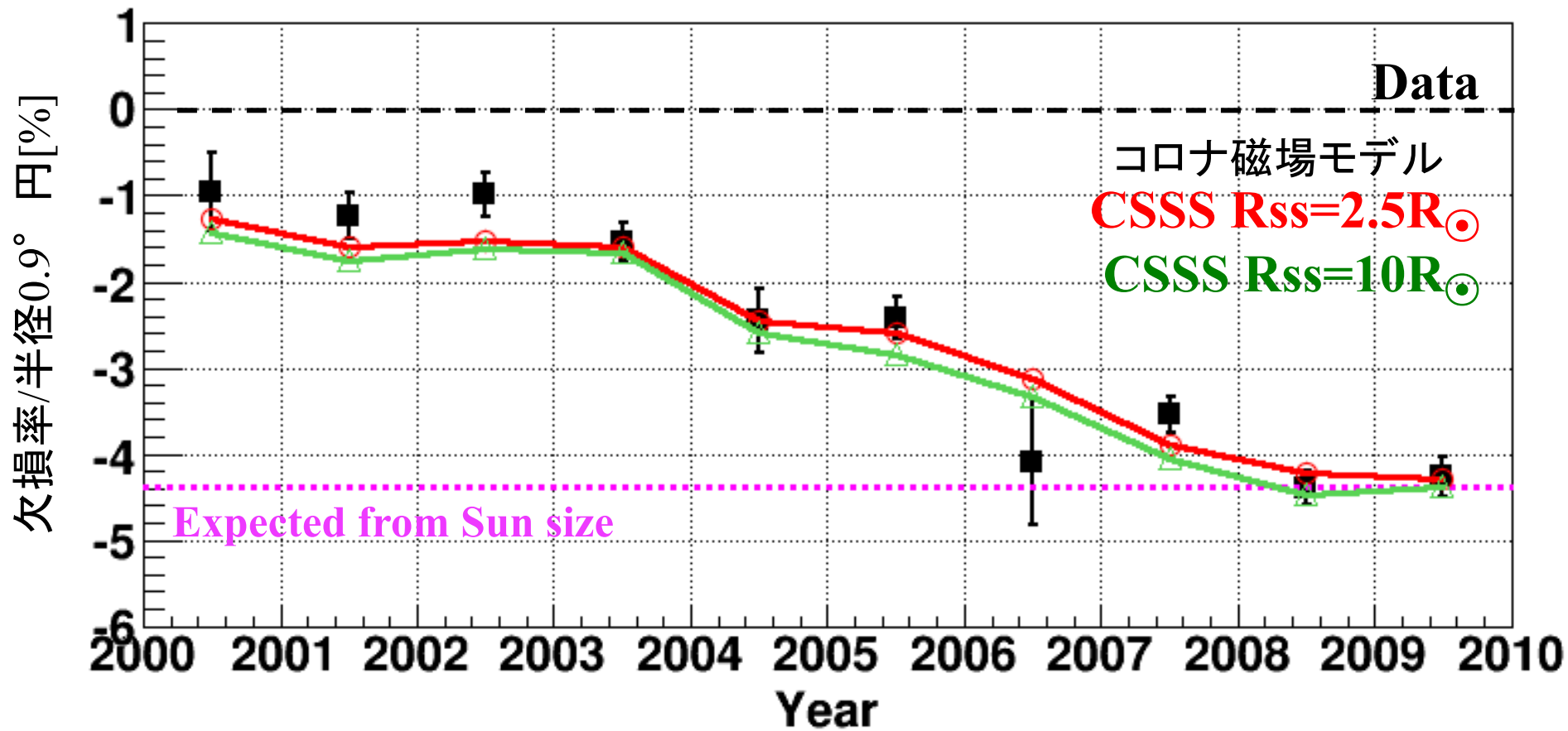
$$\chi^2 / \text{dof} = 46.9 / 10 (4.8\sigma)$$

※統計誤差のみ

CSSSは極大期を再現しない?

**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

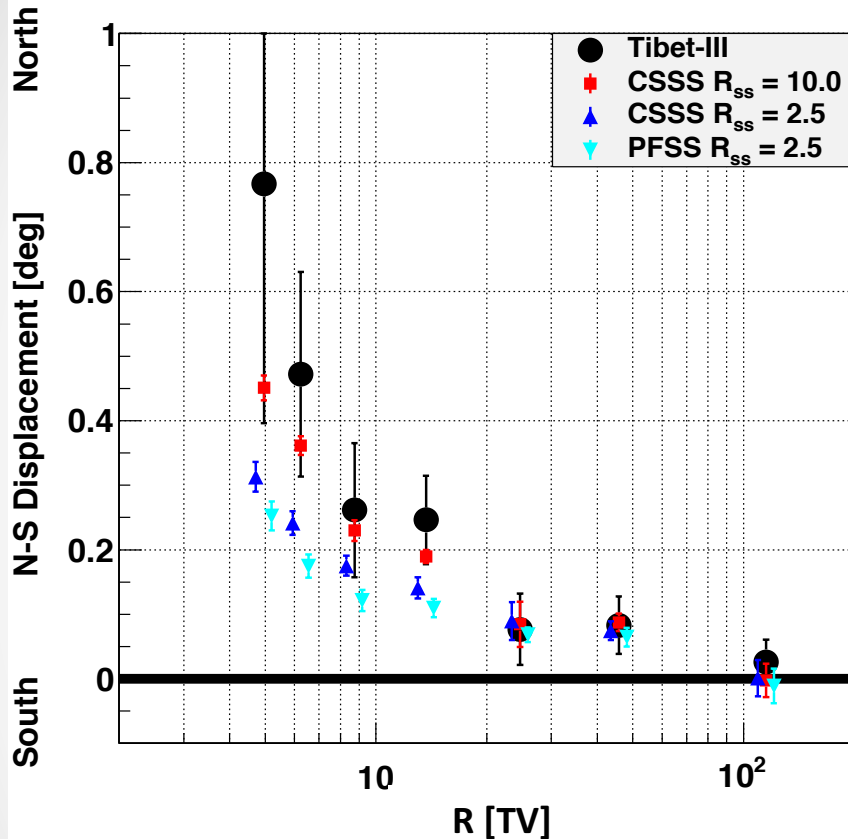
活動期で影が深くなる

CSSSは再現

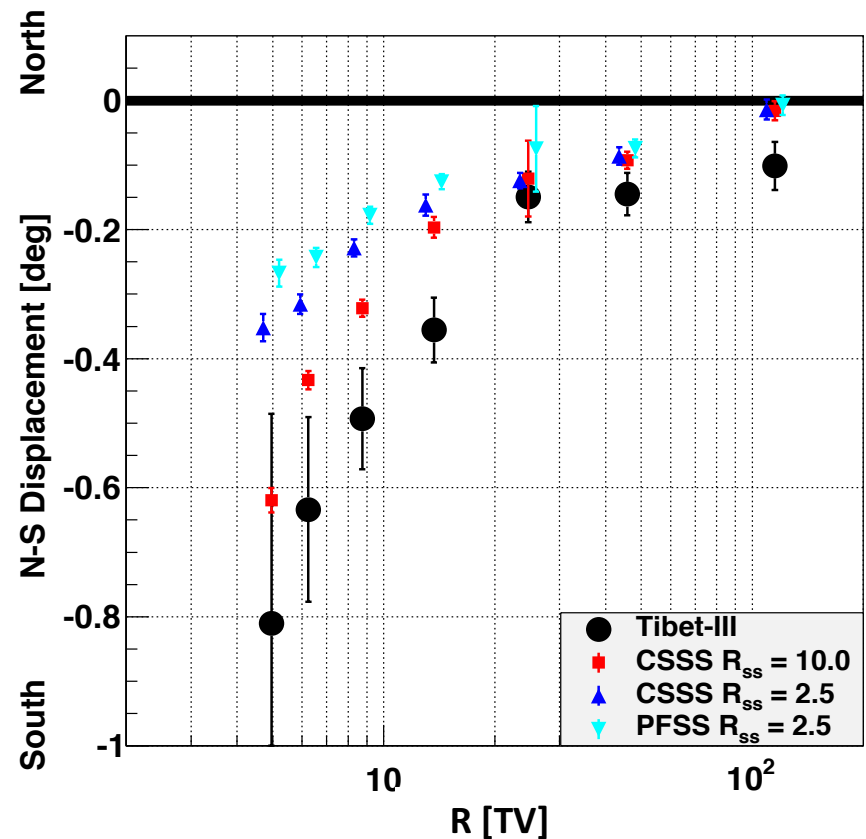
→ 磁場モデルにはCME等の  
短期変動は考慮されない

# 太陽の影の中心方向のずれ: 南北方向

Away 2000 ~ 2009



Toward 2000 ~ 2009



南北 惑星間空間磁場(IMF)には、極性が逆の Away セクターと Toward セクターが存在し、磁場の  $B_{yGSE}$  の符号によって宇宙線の曲がる方向が逆になる

Toward sector :  $B_{yGSE} < 0 \Rightarrow$  南向きのずれ

Away sector :  $B_{yGSE} > 0 \Rightarrow$  北向きのずれ

Paper in preparation

$\chi^2/d.o.f$

**CSSS  $R_{ss}=10$  :: 25.3/14 (1.9 $\sigma$ )**

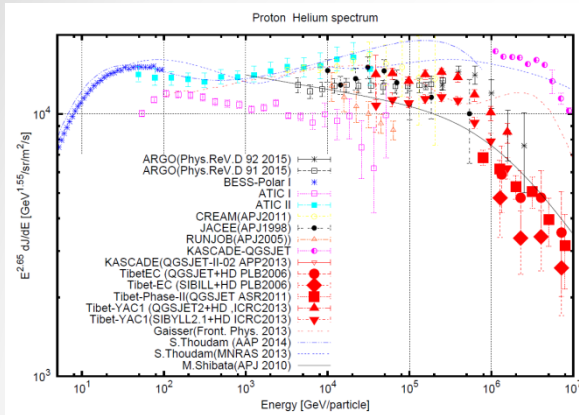
**CSSS  $R_{ss}=2.5$  :: 46.0/14 (4.0 $\sigma$ )**

**PFSS  $R_{ss}=2.5$  :: 67.7/14 (5.7 $\sigma$ )**

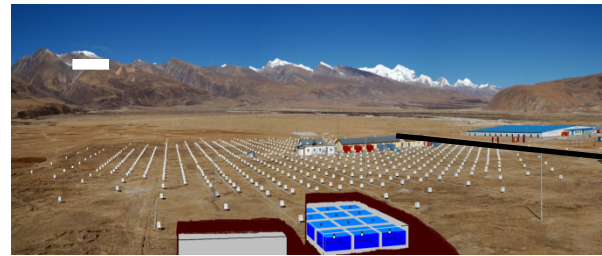


# Knee領域一次宇宙線組成の研究

(継続課題) 代表: 片寄祐作・横浜国立・工、他 13名、配分額 5万円



p+Heスペクトル



Total : 124 YAC detectors  
Cover area:  $\sim 280 \text{ m}^2$



## 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

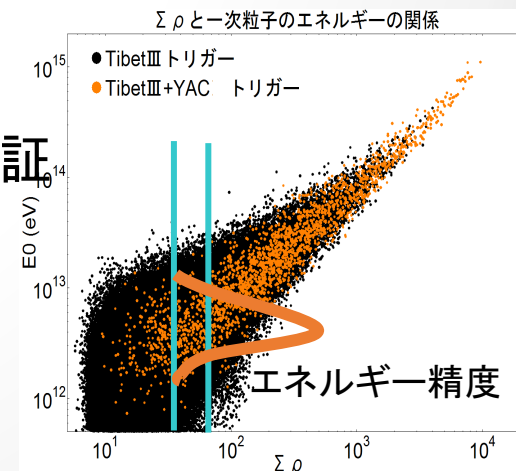
(将来計画)

- YAC-III観測実験:[目的]  $10^{16} \text{ eV}$ 領域での重原子核成分  
モンテカルロスタディーの精密化、読み出し回路開発
- TeV領域軽原子スペクトル測定:

[目的]数TeV領域のP+Heスペクトルハードニングの検証  
高密度 YACアレイによりトリガー  
⇒陽子、ヘリウムの選択、エネルギー決定精度の向上

## 最近の発表論文等

- Huang et al, Astropart.Phys. 66 (2015) 18-30
- L M Zhai et al, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 42 (2015) 045201
- ICRC2015 関係論文 3偏等

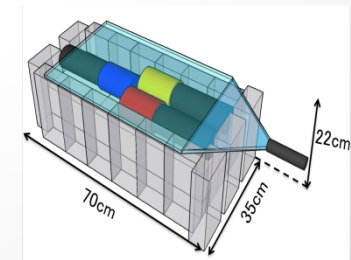
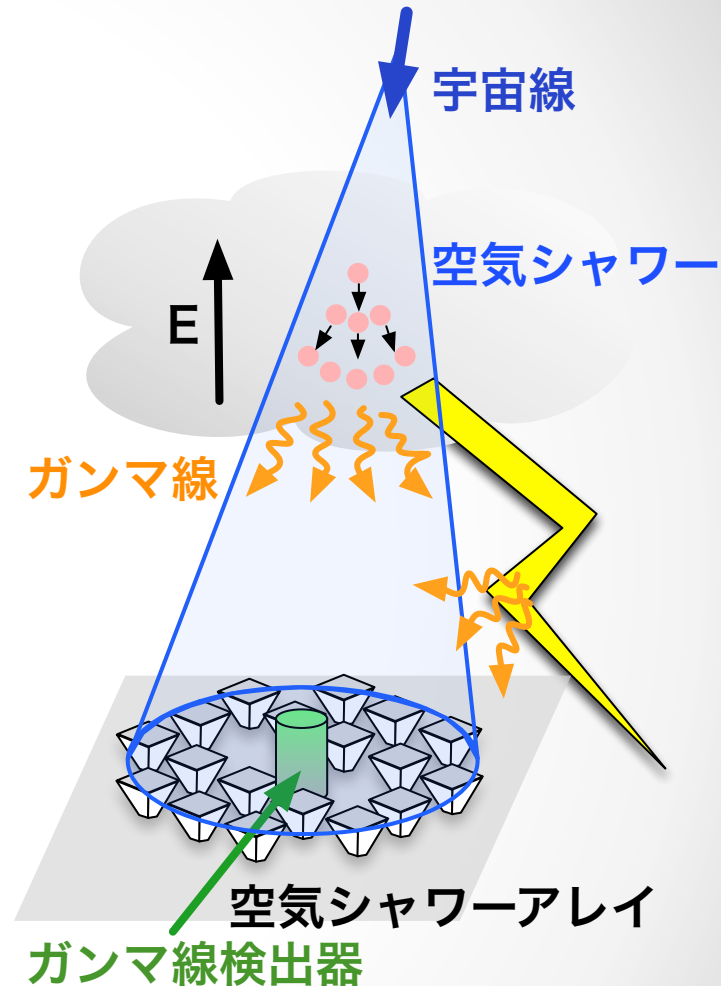
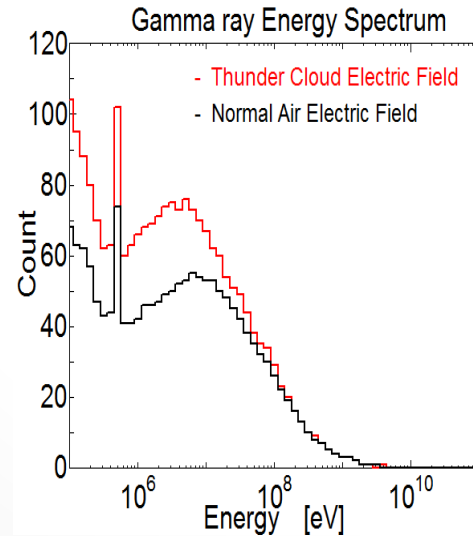
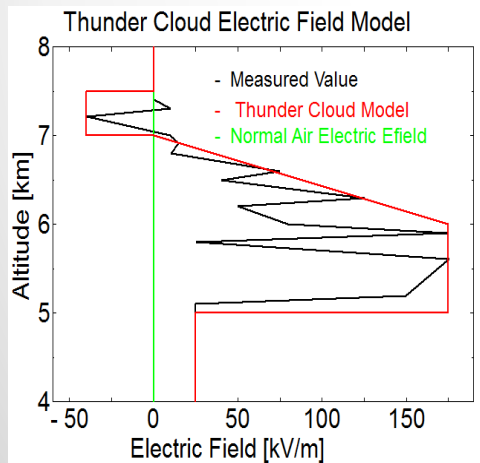


# チベットASでの落雷・雷雲起源のガンマ線、ASの同時観測

電場変動  
ガンマ線変動  
空気シャワー観測

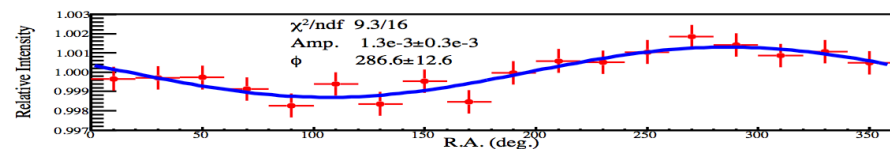
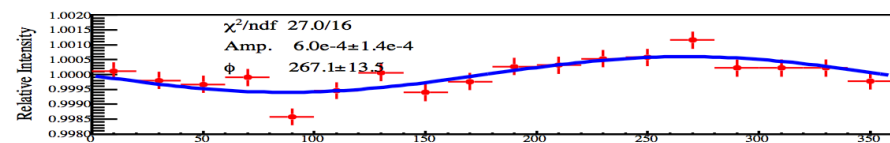
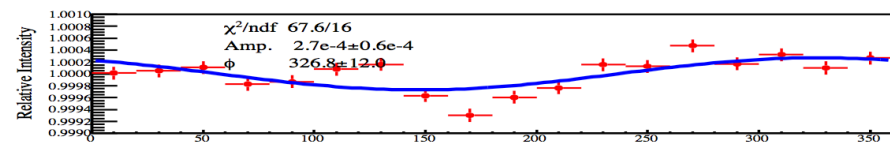
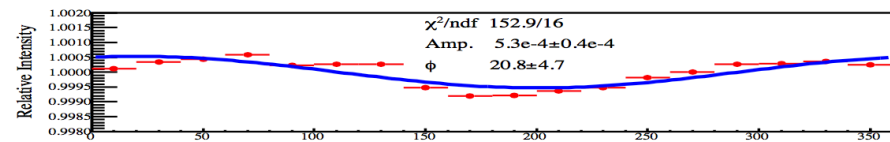
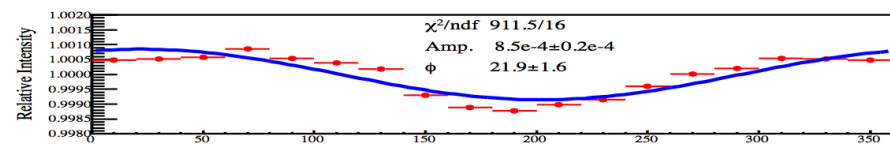
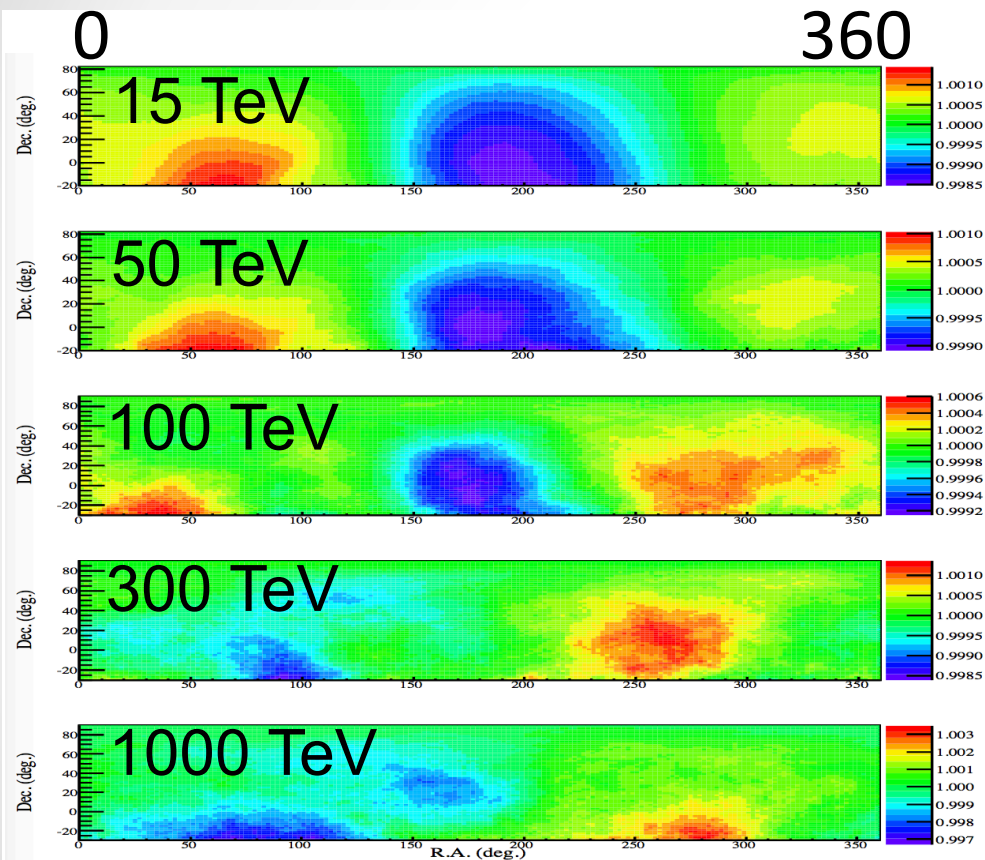
トリプル  
コインシデンス

- 雷雲電場モデルを用いた  
空気シャワーのシミュレーション
- COSMOSコード+単純化した雷雲電場モデル



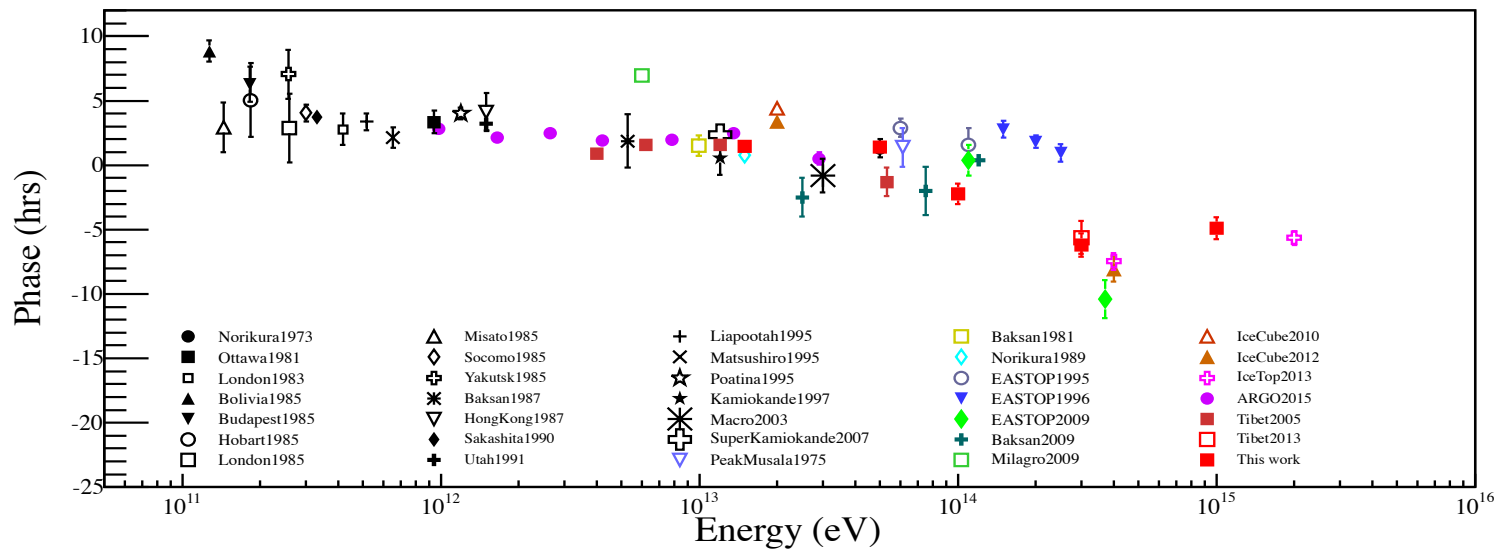
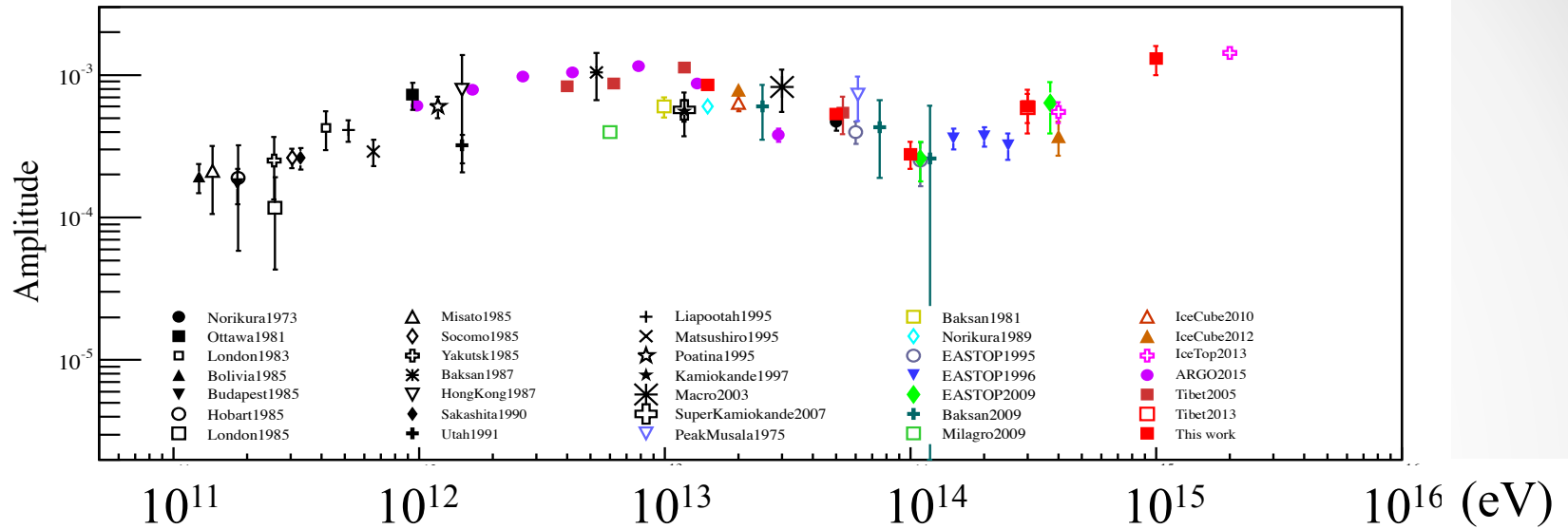
N. C. Lindy et. al,  
"The Cosmic-Ray Extensive Air Shower Environment of Thunderstorms"  
XV International Conference on Atmospheric Electricity, 2014

# 10-1000TeV以上の恒星時異方性





# 10-1000TeV以上の恒星時異方性



# まとめ

- Tibet AS+MD
  - 有効観測期間：約730日(現時点)
  - S30を使ったエネルギー決定<20%@100TeV
  - 除去率想定通り
- 太陽の影 (TeV領域の解析)
  - CMEの影響を確認
  - 影の中心方向のズレの解析
- 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
  - 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(投稿準備完了)