

チベット高原での 高エネルギー宇宙線の研究

大西宗博 東京大学宇宙線研究所

平成20年度共同利用成果発表会

@宇宙線研究所 2008.12.20

(For the Tibet AS γ Collaboration)

平成20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
(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
(柴田槇雄 横浜国立大学大学院工学研究院)
3. 銀河拡散ガンマ線の観測
(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
(西澤正己 国立情報学研究所人間・社会情報研究系)
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
(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

校費： 申請額 490万円 → 配分額 **220万円**

2002年に完成したTibet-IIIの維持・運転及び
将来計画のためのR&D費用の一部に使用。

旅費： 申請額 893.6万円 → 配分額 **375万円**

宇宙線研での研究打ち合わせ

チベット出張海外旅費

The Tibet AS γ Collaboration

Papers (in refereed journals):

- New Estimation of the Spectral Index of High-Energy Cosmic Rays as Determined by the Compton-Getting Anisotropy
The Astrophysical Journal Letters, **672**, L53–L56 (2008)
- The all-particle spectrum of primary cosmic rays in the wide energy range from 10^{14} eV to 10^{17} eV observed with the Tibet-III air-shower array
The Astrophysical Journal, **678**, 1165–1179 (2008)
- The energy spectrum of all-particle cosmic rays around the knee region observed with the Tibet-III air-shower array
Advances in Space Research, **42**, 467–472 (2008)
- Multi-TeV Gamma-Ray Observation from the Crab Nebula Using the Tibet-III Air Shower Array Finely Tuned by the Cosmic-Ray Moon's Shadow
The Astrophysical Journal, Accepted (2008)

International Conference

- “Recent results on gamma-ray observation by the Tibet air shower array and related topics”,
Advances in Cosmic Ray Science, Tokyo, Japan, March 17–19, 2008,
M. Takita for the Tibet AS γ Collaboration, **ORAL**
- “Chemical composition of cosmic rays around the knee observed by the Tibet air-shower core detector”,
Advances in Cosmic Ray Science, Tokyo, Japan, March 17–19, 2008,
M. Shibata for the Tibet AS γ Collaboration, **ORAL**
- “Sky-maps of the Sidereal Anisotropy of Galactic Cosmic Ray Intensity and its Energy Dependence”,
5th Asia Oceania Geosciences Society Conference, Busan, Korea, June 16–20, 2008,
K. Munakata for the Tibet AS γ Collaboration, **ORAL**
- “Underground Prototype Water Cherenkov Muon Detector with the Tibet Air Shower Array”,
4th Heidelberg Intl. Sympo. on High Energy Gamma-Ray Astronomy, Heidelberg, Germany, July 7–11, 2008,
K. Kawata for the Tibet AS γ Collaboration, **POSTER**
- “Cosmic Ray Energy Spectrum around the Knee Obtained by the Tibet Experiment and Future Prospects”,
37th COSPAR Scientific Assembly, Montreal, Canada, July 13–20, 2008,
Y. Katayose for the Tibet AS γ Collaboration, **ORAL**
- “Report on Observation of TeV Gamma Rays with the Tibet Air Shower Array and Future Prospects”,
37th COSPAR Scientific Assembly, Montreal, Canada, July 13–20, 2008,
T. Sako for the Tibet AS γ Collaboration, **ORAL**
- “Observations of TeV gamma rays with the Tibet air shower array and future prospects”,
21st European Cosmic Ray Symposium, Kosice, Slovakia, September 9–12, 2008,
K. Kawata for the Tibet AS γ Collaboration, **ORAL**

研究目的

大気チェレンコフ望遠鏡と相補的な
広視野(約2sr)連続観測高エネルギー宇宙線望遠鏡

3~100 TeVの高エネルギーガンマ線放射天体の
探索、 $10^{14} \sim 10^{17}$ eVの宇宙線の観測から、
宇宙線の起源、加速機構の研究を行う。

太陽活動期における“太陽の影”
(太陽による宇宙線の遮蔽効果)を観測し、
太陽近傍および惑星間磁場の大局的構造を知る。



The Tibet AS γ Collaboration



M.Amenomori¹, X.J.Bi², D.Chen³, S.W.Cui⁴, Danzengluobu⁵, L.K.Ding², X.H.Ding⁵, C.Fan⁶, C.F.Feng⁶, Zhaoyang Feng², Z.Y.Feng⁷, X.Y.Gao⁸, Q.X.Geng⁸, H.W.Guo⁵, H.H.He², M.He⁶, K.Hibino⁹, N.Hotta¹⁰, Haibing Hu⁵, H.B.Hu², J.Huang^{2,3}, Q.Huang⁷, H.Y.Jia⁷, F.Kajino¹¹, K.Kasahara¹², Y.Katayose¹³, C.Kato¹⁴, K.Kawata³, Labaciren⁵, G.M.Le¹⁵, A.F.Li⁶, J.Y.Li⁶, Y.-Q.Lou¹⁶, H.Lu², S.L.Lu², X.R.Meng⁵, K.Mizutani^{12,17}, J.Mu⁸, K.Munakata¹⁴, A.Nagai¹⁸, H.Nanjo¹, M.Nishizawa¹⁹, M.Ohnishi³, I.Ohta²⁰, T.Ouchi⁹, S.Ozawa¹², J.R.Ren², T.Saito²¹, T.Y.Saito²², M.Sakata¹¹, T.K.Sako³, M.Shibata¹³, A.Shiomi²³, T.Shirai⁹, H.Sugimoto²⁴, M.Takita³, Y.H.Tan², N.Tateyama⁹, S.Torii¹², H.Tsuchiya²⁵, S.Udo⁹, B.Wang², H.Wang², X.Wang¹², Y.Wang², Y.G.Wang⁶, H.R.Wu², L.Xue⁶, Y.Yamamoto¹¹, C.T.Yan³, X.C.Yang⁸, S.Yasue²⁶, Z.H.Ye¹⁵, G.C.Yu⁷, A.F.Yuan⁵, T.Yuda⁹, H.M.Zhang², J.L.Zhang², N.J.Zhang⁶, X.Y.Zhang⁶, Y.Zhang², Yi Zhang², Zhaxisangzhu⁵ and X.X.Zhou⁷

(1) Dept. of Phys., Hirosaki Univ., Hirosaki, Japan

(2) Key Lab. of Particle Astrophys., IHEP, CAS, Beijing, China

(3) ICRR, Univ. of Tokyo, Kashiwa, Japan

(4) Dept. of Phys., Hebei Normal Univ., Shijiazhuang, China

(5) Dept. of Math. and Phys., Tibet Univ., Lhasa, China

(6) Dept. of Phys., Shandong Univ., Jinan, China

(7) Inst. of Modern Phys., SouthWest Jiaotong Univ., Chengdu, China

(8) Dept. of Phys., Yunnan Univ., Kunming, China

(9) Fac. of Eng., Kanagawa Univ., Yokohama, Japan

(10) Fac. of Educ., Utsunomiya Univ., Utsunomiya, Japan

(11) Dept. of Phys., Konan Univ., Kobe, Japan

(12) Research Inst. for Sci. and Eng., Waseda University, Tokyo, Japan

(13) Fac. of Eng., Yokohama National Univ., Yokohama, Japan

(14) Dept. of Phys., Shinshu Univ., Matsumoto, Japan

(15) Center of Space Sci. and Application Research, CAS, Beijing, China

(16) Phys. Dept. and Tsinghua Center for Astrophys., Tsinghua Univ., Beijing, China

(17) Saitama Univ., Saitama, Japan

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

(19) National Inst. of Informatics, Tokyo, Japan

(20) Sakushin Gakuin Univ., Utsunomiya, Japan.

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

(22) MPI, Muenchen, Deutschland

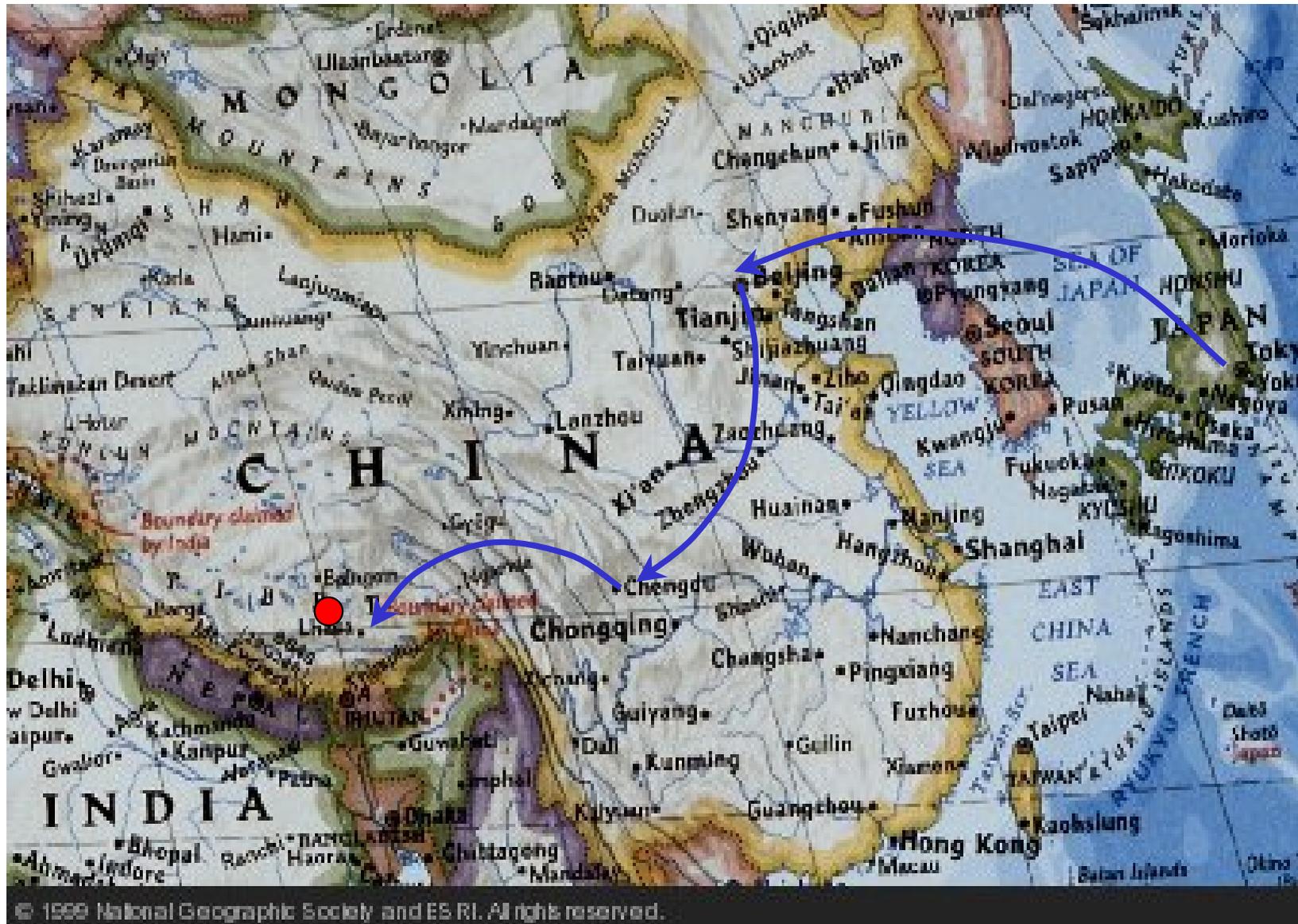
(23) College of Industrial Tech., Nihon Univ., Narashino, Japan

(24) Shonan Inst. of Tech., Fujisawa, Japan

(25) RIKEN, Wako, Japan

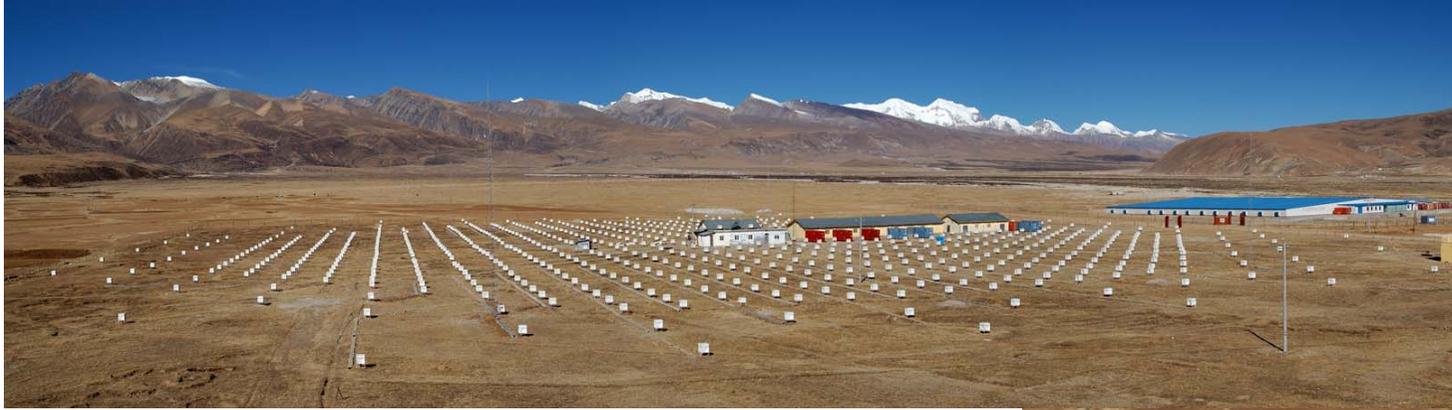
(26) School of General Educ., Shinshu Univ., Matsumoto, Japan

Our site : Tibet



Yangbajing, Tibet, China

90° 53E, 30° 11N, 4,300 m a.s.l. (606g/cm²)



Yangbajing,
Tibet, China

4300 m a.s.l. = 606 g/cm²

その他... 地図 航空写真 地形

Tibet Air Shower Array

Tibet III (37000 m²)

Total 789 detectors

Mode Energy

~3 TeV

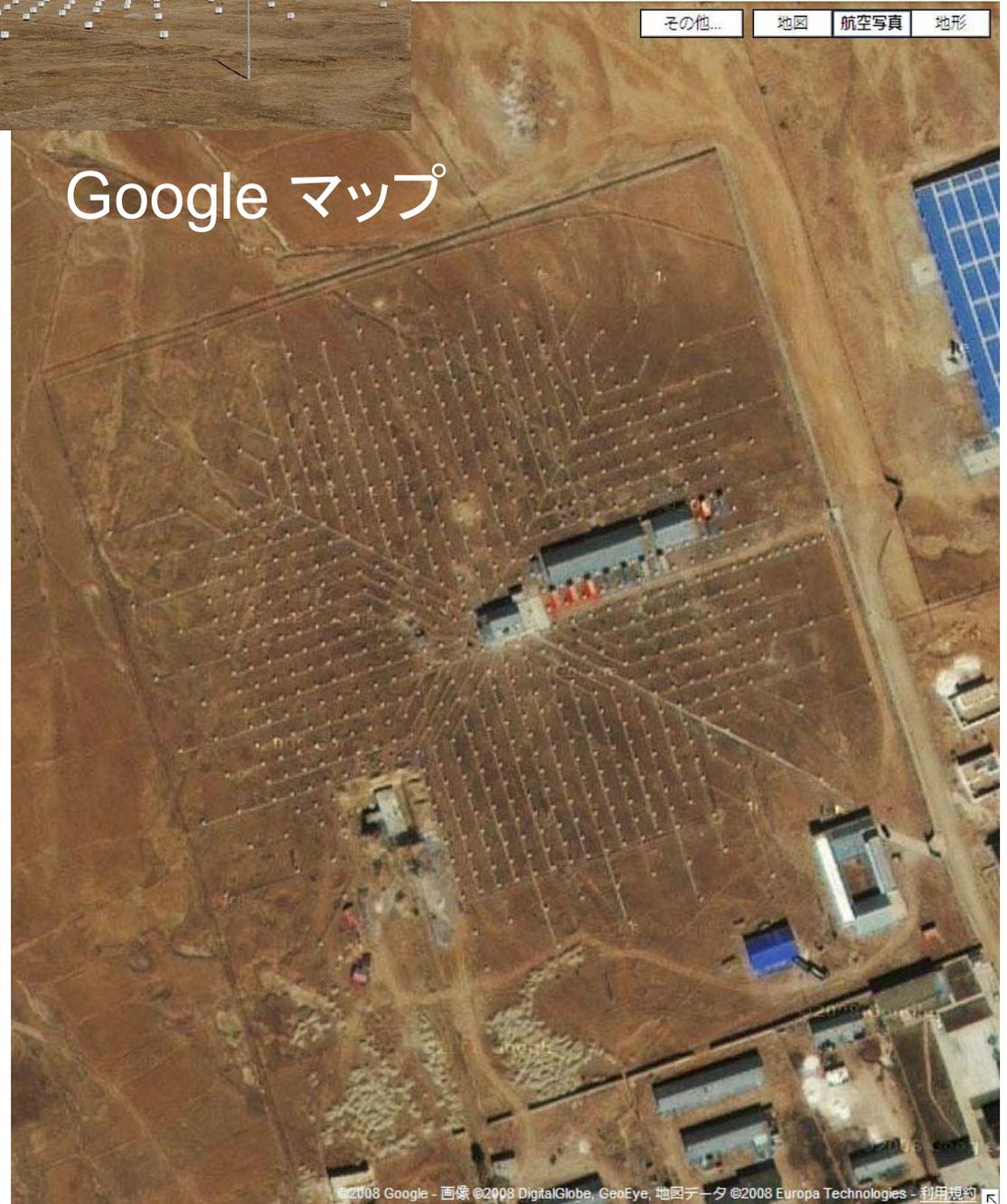
Angular Resolution

~0.9 deg @ 3 TeV

Trigger Rate

~1700 Hz

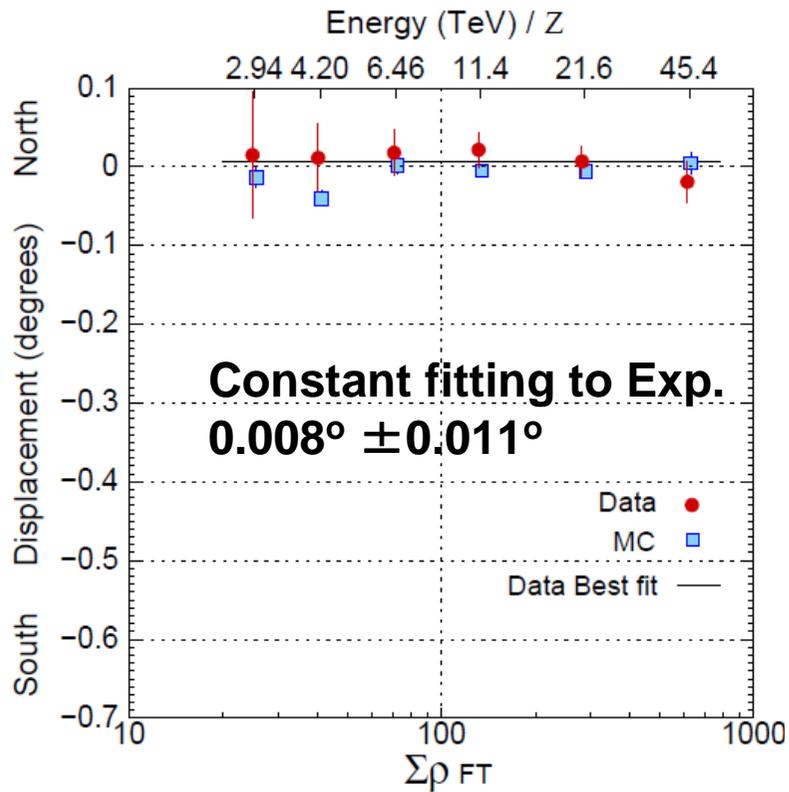
Google マップ



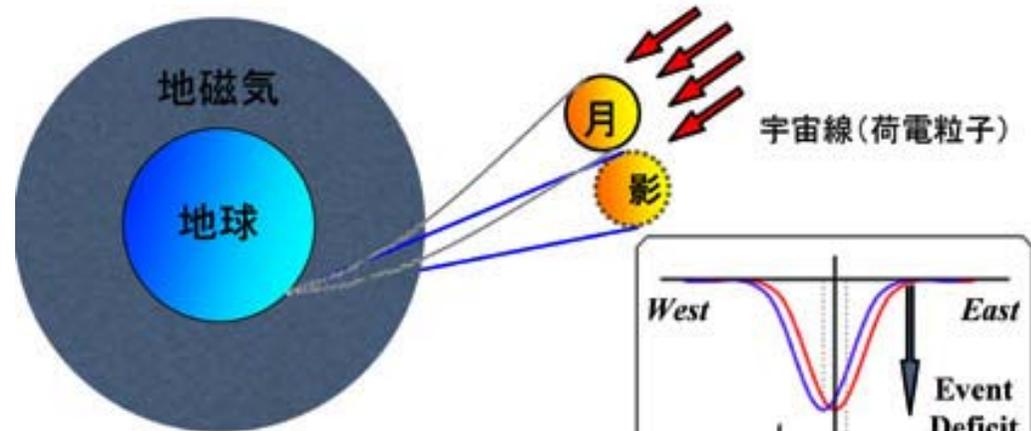
月の影による装置性能評価

The Astrophysical Journal,
Accepted (2008)

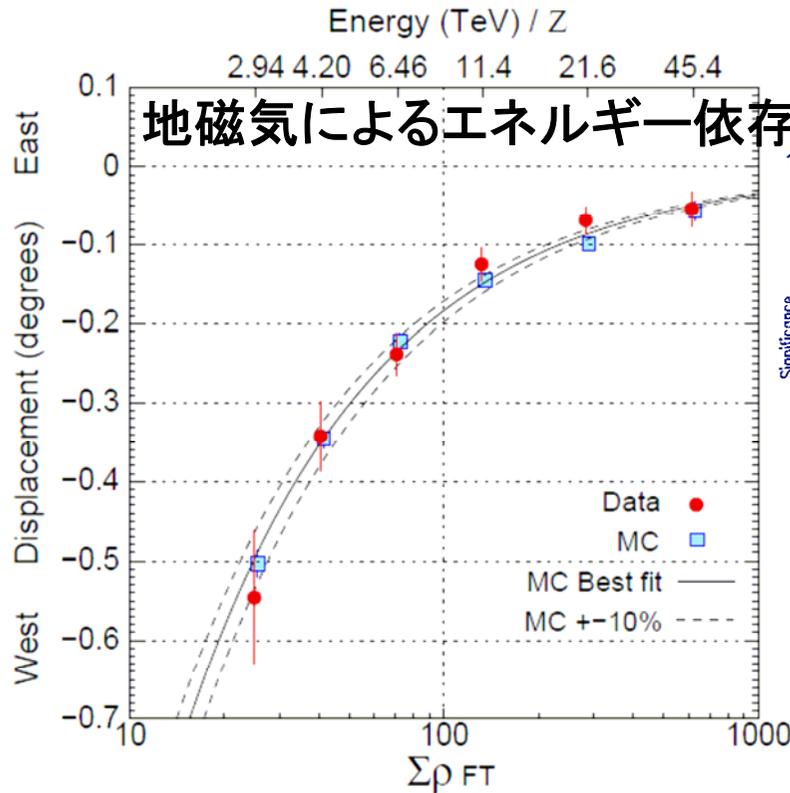
- 絶対エネルギー
- 角度分解能
- ポインティングエラー



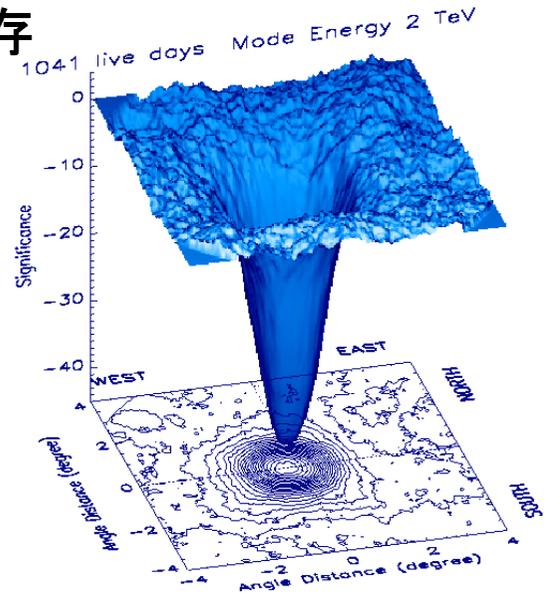
ポインティングエラー
< 0.011°



地磁気による影のずれ
~ 0.25° West @ mode 3TeV

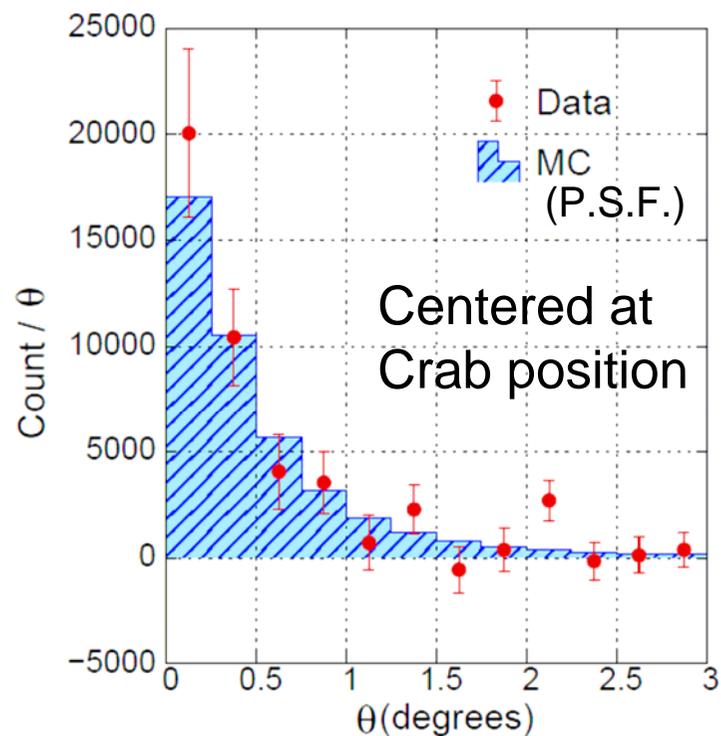
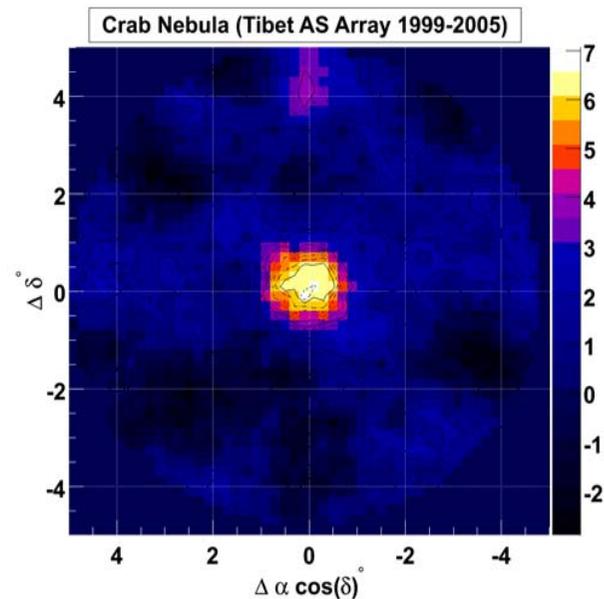
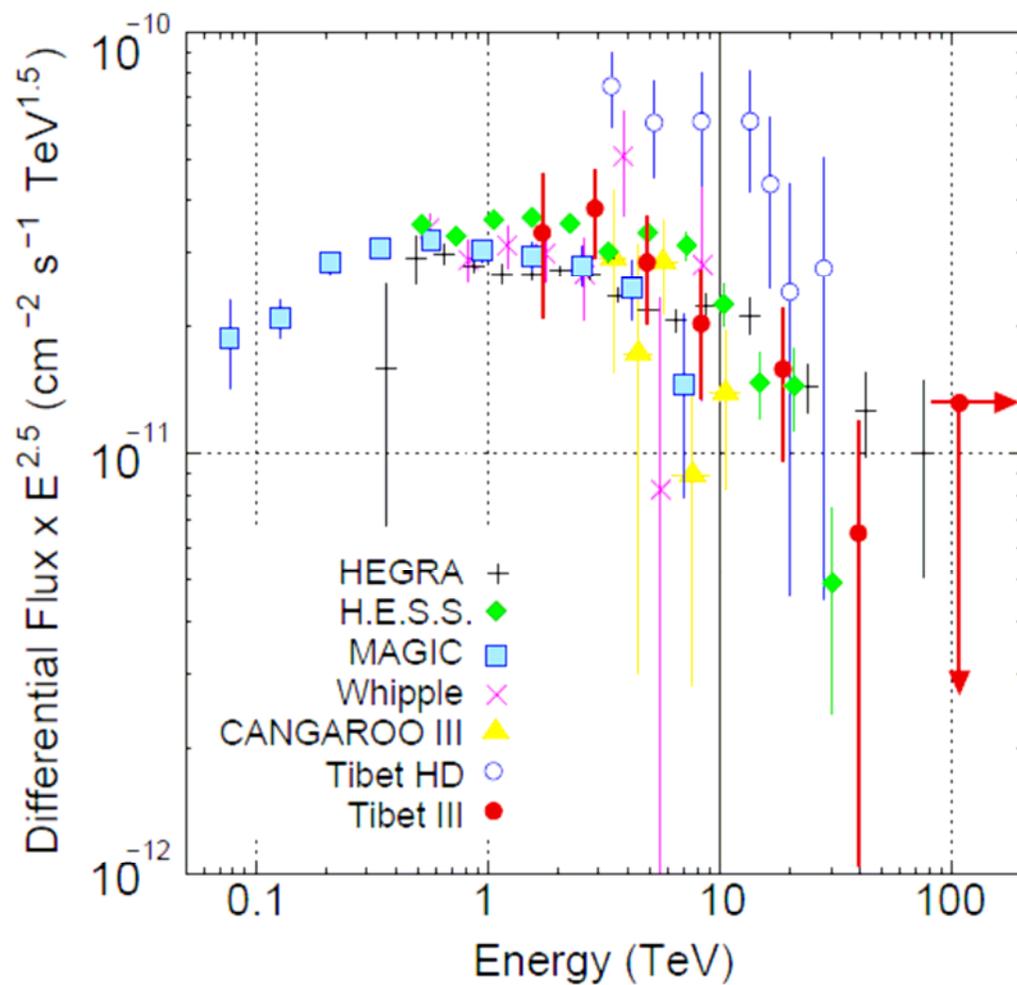


絶対エネルギーエラー < 12%
+4.5% (±8.6stat. ±6.7syst.)%



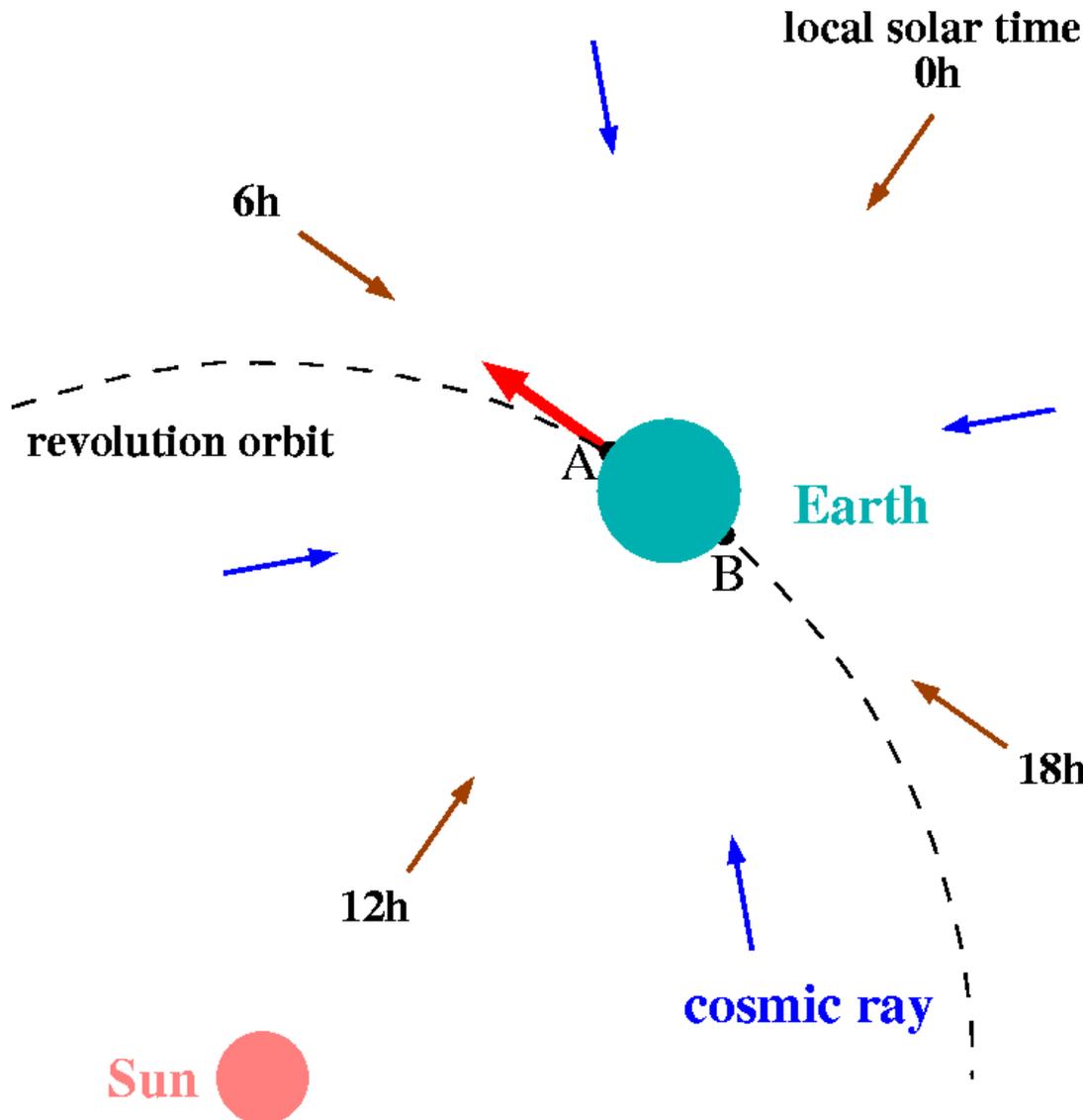
かに星雲 エネルギースペクトラム

The Astrophysical Journal,
Accepted (2008)



コンプトン-ゲッティング効果を利用した宇宙線スペクトラムの冪

Amenomori *et al.*, *ApJL*, **672**, L53 (2008)



宇宙線スペクトル: $j \propto E^{-\gamma}$

$$\frac{I}{\langle I \rangle} = (\gamma + 2) \frac{v}{c} \cos \theta$$

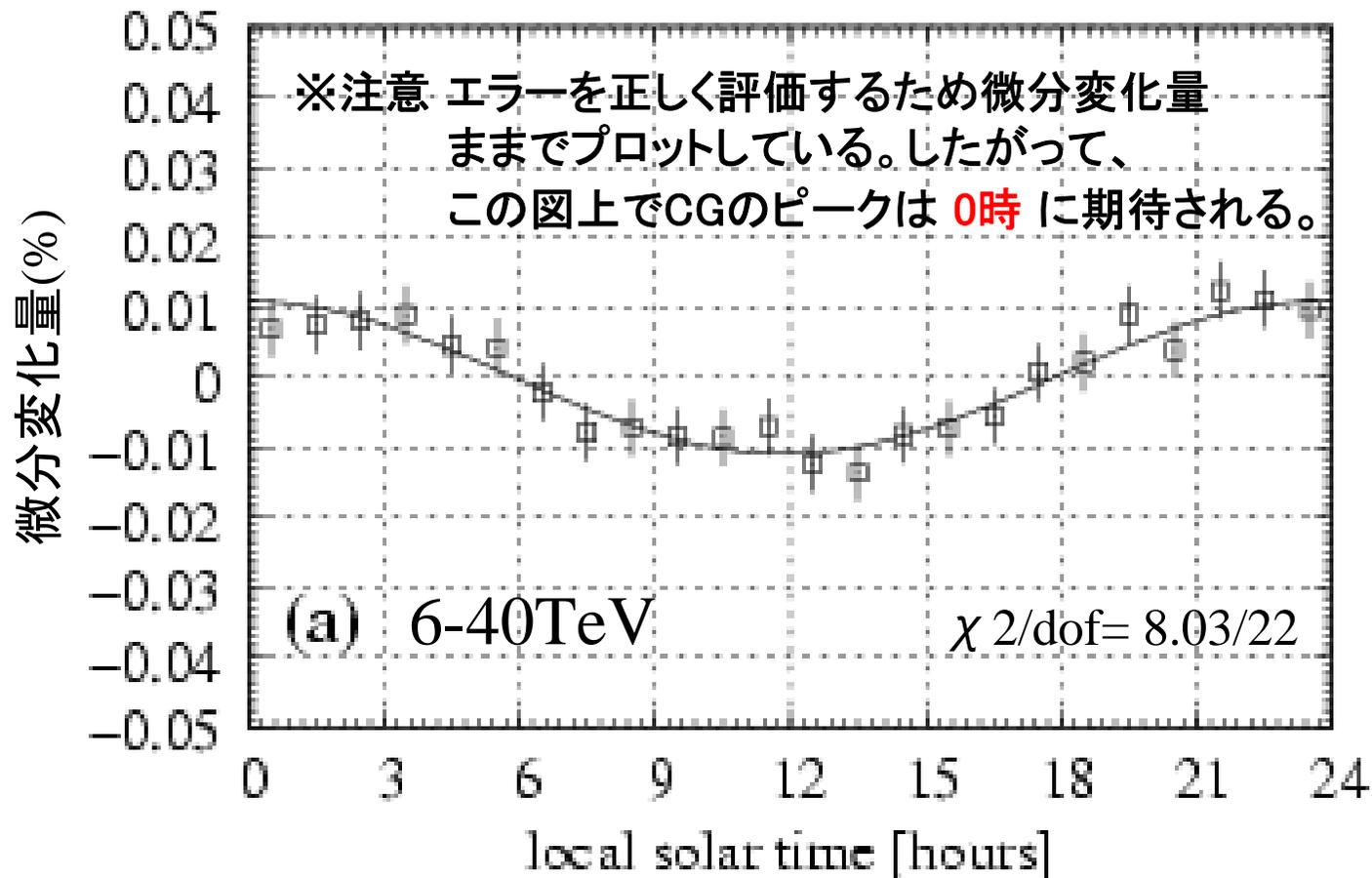
- I : CR intensity
- $\langle I \rangle$: average CR intensity
- γ : index of the CR energy spectrum
- v : orbital velocity = 2.978×10^4 m/s
- c : speed of light = 2.998×10^8 m/s
- θ : angle between the CR arrival direction and the direction of detector's motion

太陽時異方性の振幅を測定できれば、
宇宙線の冪が一意的に求まる。

→ 空気シャワーシミュレーションが不要。
→ 空気シャワー中のハドロン相互作用モデル等にほとんど依らない。

宇宙線 太陽時異方性

Amenomori *et al.*, ApJL, **672**, L53 (2008)



フィッティング関数 $f(\lambda) = \alpha \cos[(\pi/12)(\lambda - \phi)]$ (λ : solar time [hr])

CG振幅 $\alpha = (1.09 \pm 0.12_{\text{stat}} \pm <0.13_{\text{syst}}) \times 10^{-4}$

宇宙線の冪 $\gamma = 3.08 \pm 0.55_{\text{stat}} \pm <0.62_{\text{syst}}$ (6 - 40 TeV)

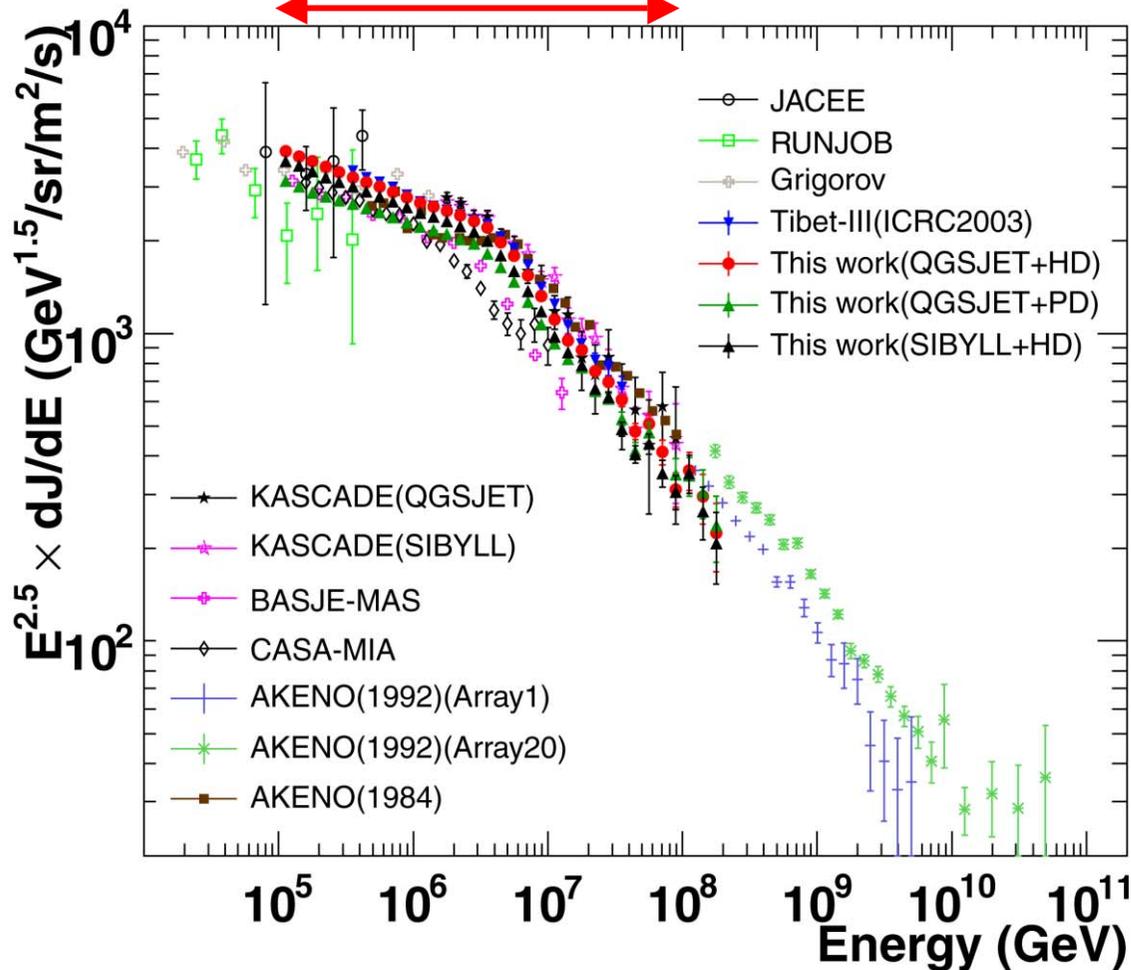
今後、もっと大きな観測装置を作って

Kneeエネルギー領域における冪変化を測定することができれば、おもしろい。

Knee領域全粒子エネルギースペクトラム

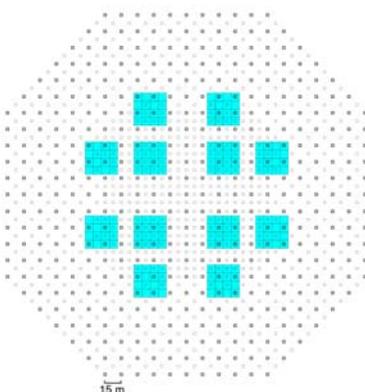
Amenomori *et al.*,
ApJ, **678**, 1165 (2008)

$10^{14} \text{ eV} \sim 10^{17} \text{ eV}$ 3桁

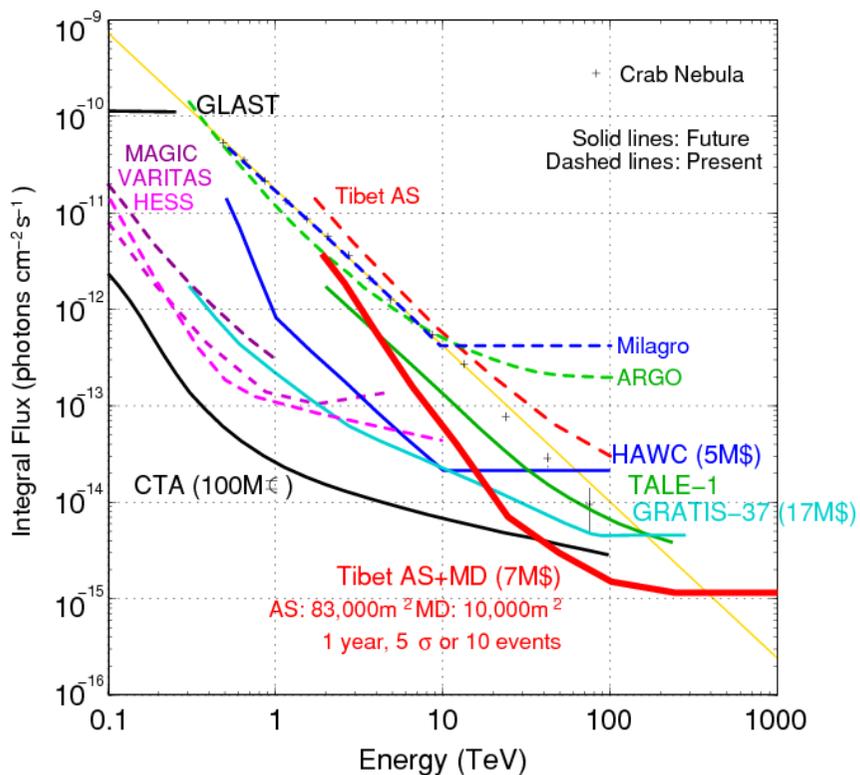


Model	Index of spectrum	Energy range (eV)
QGSJET +HD	-2.67 ± 0.01	$< 10^{15} \text{ eV}$
	-3.10 ± 0.01	$> 4 \times 10^{15} \text{ eV}$
QGSJET +PD	-2.65 ± 0.01	$< 10^{15} \text{ eV}$
	-3.08 ± 0.01	$> 4 \times 10^{15} \text{ eV}$
SIBYLL +HD	-2.67 ± 0.01	$< 10^{15} \text{ eV}$
	-3.12 ± 0.01	$> 4 \times 10^{15} \text{ eV}$

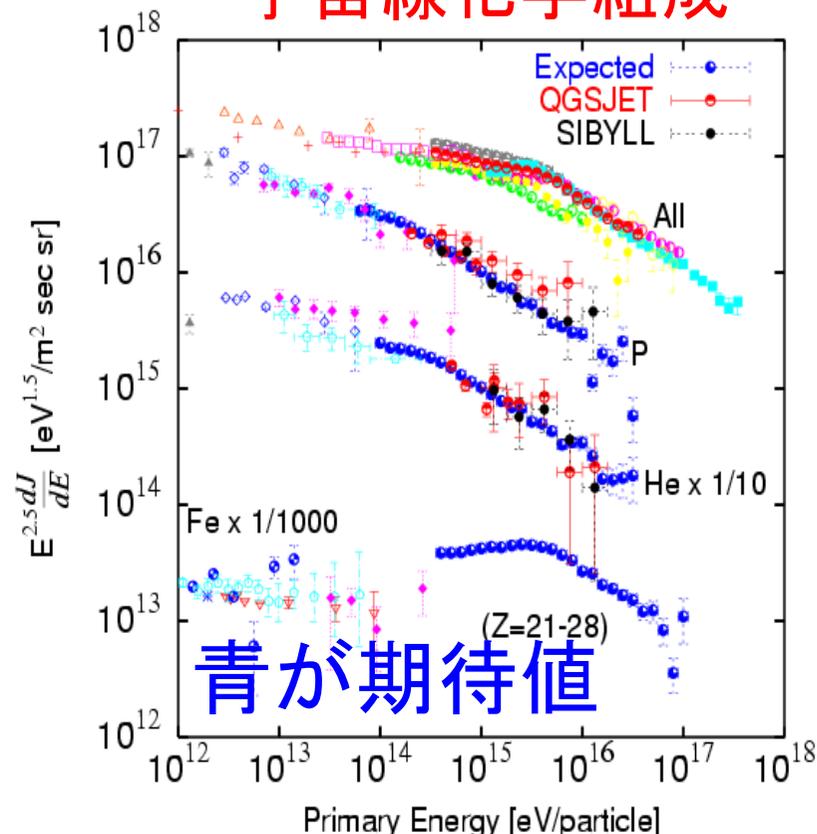
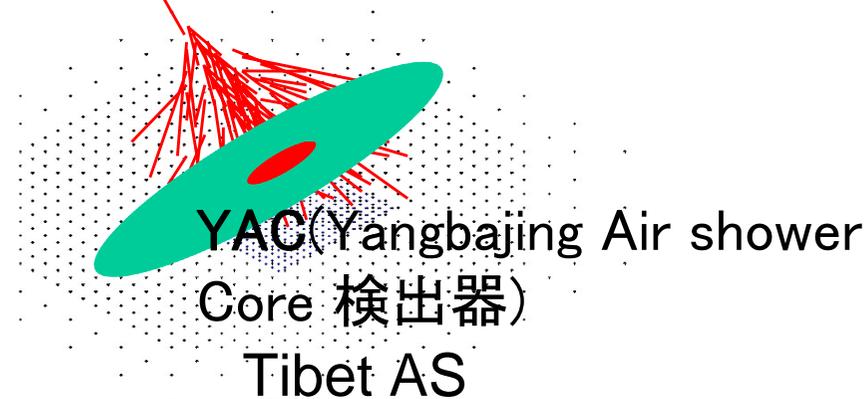
チベットミュオン 観測装置(MD)計画



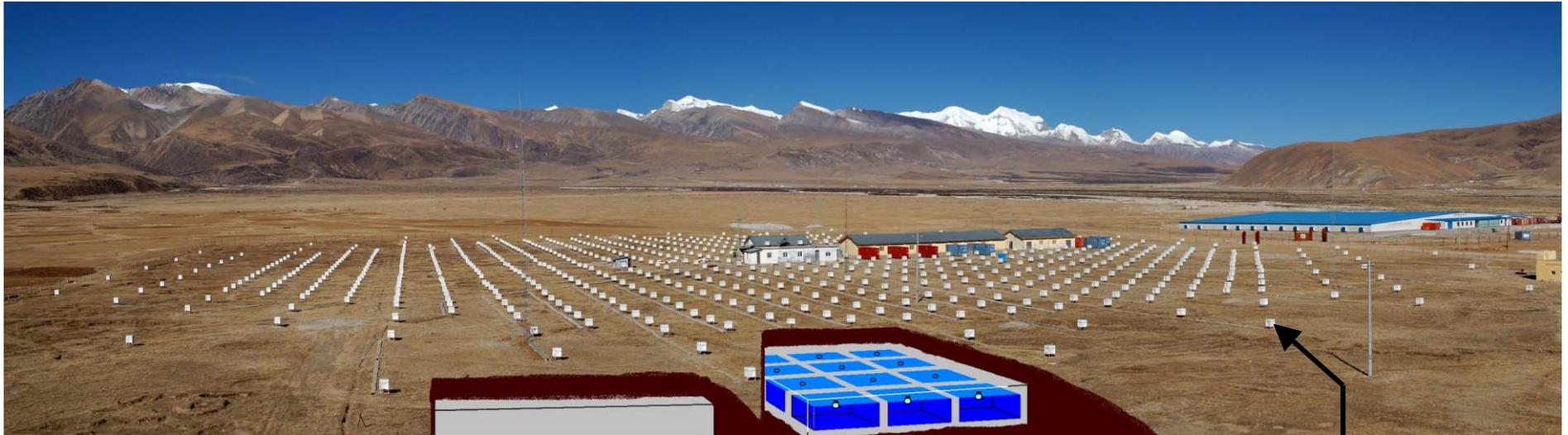
10-1000TeVガンマ線



Cosmic ray(P,He,Fe...)

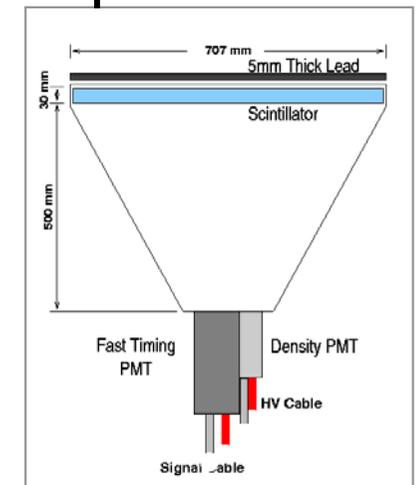


チベット空気シャワー観測装置 (Tibet AS)



水チェレンコフミュオン観測装置 (MD) のイメージ図 ↑

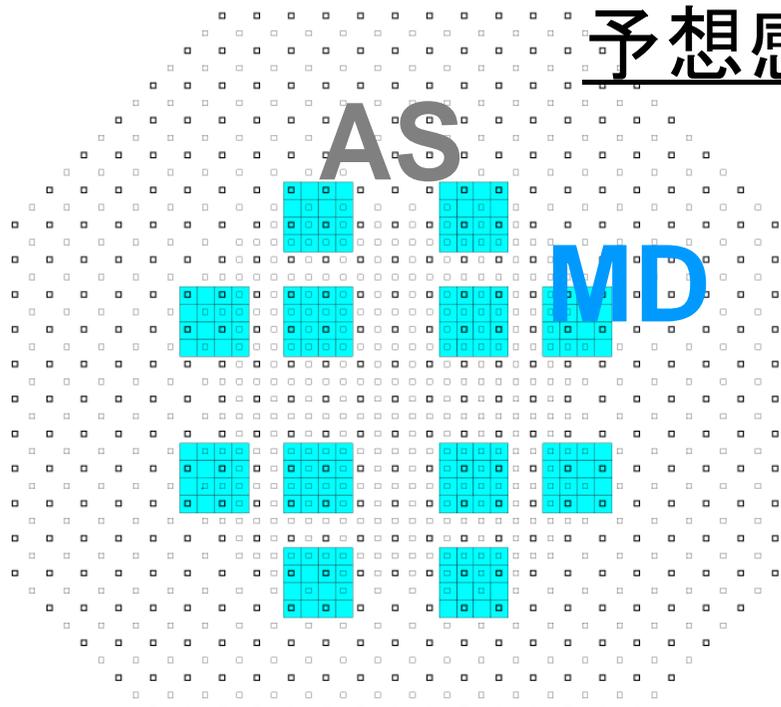
- シンチレーション検出器数 $0.5 \text{ m}^2 \times 789 \rightarrow 1081$
- 空気シャワー有効面積 $\sim 37,000 \text{ m}^2 \rightarrow 83,000 \text{ m}^2$
- 最頻エネルギー $\sim 3 \text{ TeV}$
- 角度分解能
 $\sim 0.4 \text{ deg @ } 10 \text{ TeV}$
 $\sim 0.2 \text{ deg @ } 100 \text{ TeV}$
- エネルギー分解能
 $\sim 70\% @ 10 \text{ TeV}$
 $\sim 40\% @ 100 \text{ TeV}$
- 視野 $\sim 2 \text{ sr}$



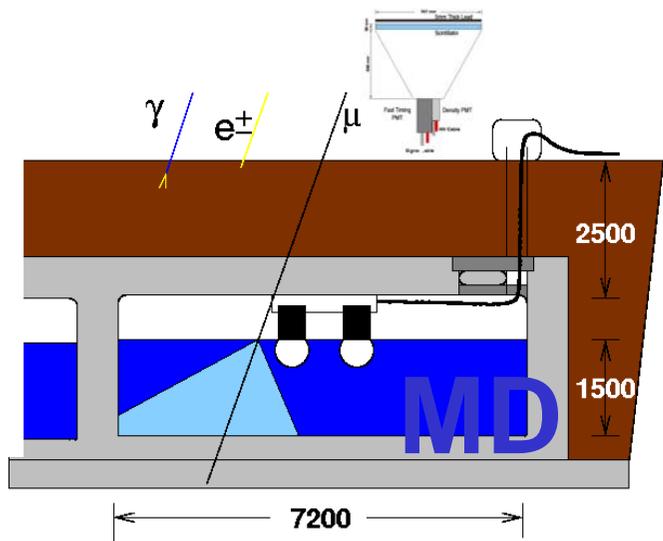
→ 水チェレンコフミュオン観測装置 (MD) により $10 \sim 1000 \text{ TeV}$ 空気シャワー中
ミュオン数を観測し、バックグラウンドを除去 (p/γ 選別)

10～1000 TeV領域ガンマ線を広視野観測

予想感度シミュレーション



50 m² × 192セル
15m
~10,000 m²



□ 空気シャワー発生 → Corsika Ver.6.204

宇宙線 0.3TeV-10PeV, Crab軌道
化学組成スペクトラムを考慮
核子相互作用モデル: QGSJET01c

ガンマ線 0.3TeV-10PeV, Crab軌道
 $\propto E^{-2.6}$

コア位置 半径300m以内にランダム入射

□ シンチレーション検出器 (Tibet AS) → Epics UV8.00

空気シャワーの粒子数、コア位置、方向などを推定

□ 土+水チェレンコフ検出器 (Tibet MD) → GEANT4 8.0

壁面での反射率 70%(一様反射)

水中での減衰長 ~40m@400nm (波長依存)

PMT量子効率 ~20%@400nm (波長依存)

□ アクシデンタルミュオン

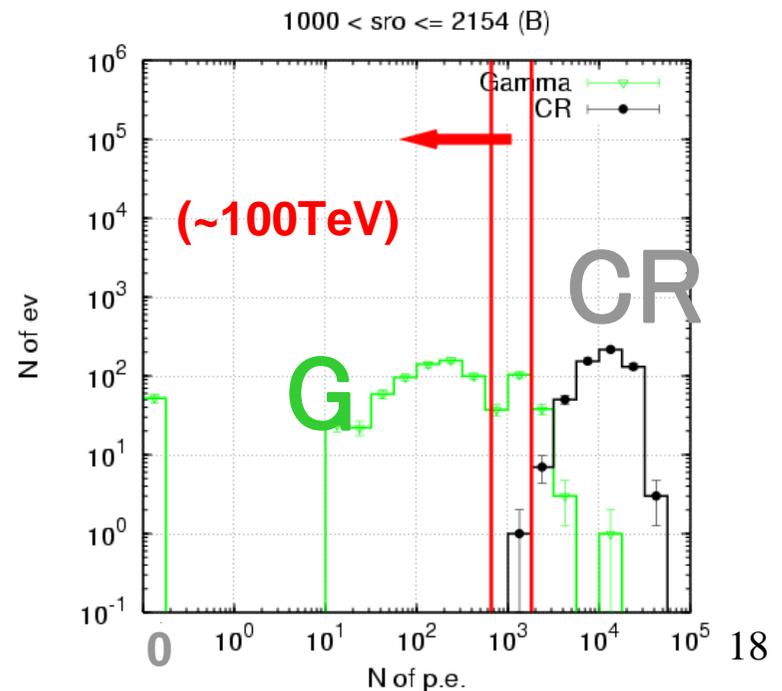
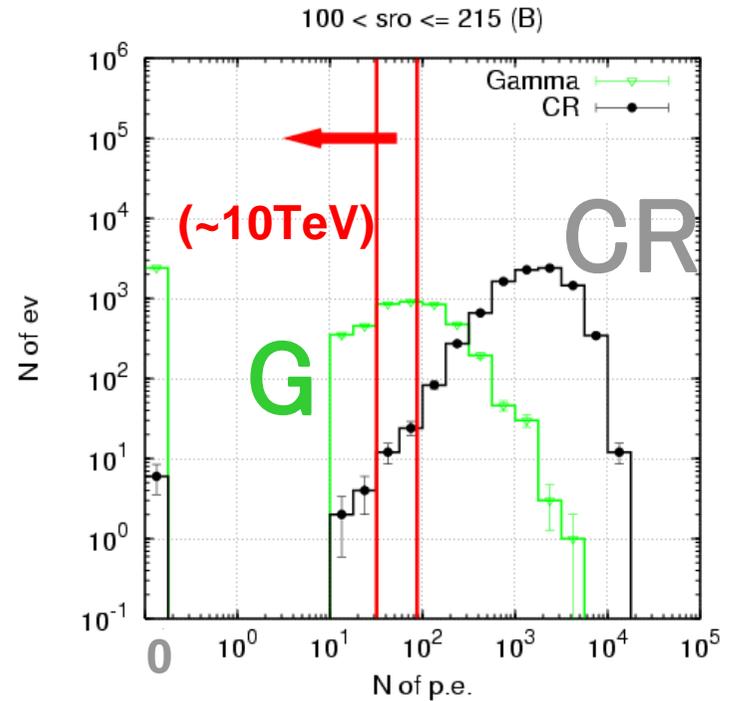
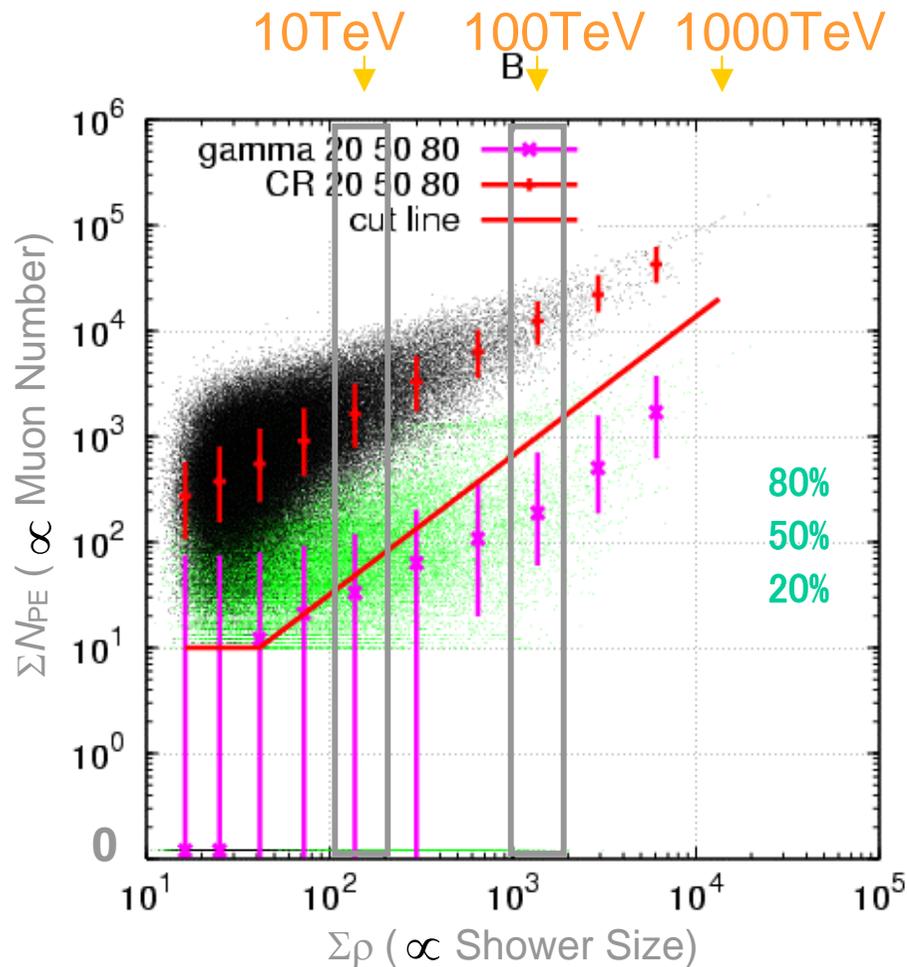
300 Hz/m² × 10,000 m² × 200 ns

→0.6 ミューオン/空気シャワー

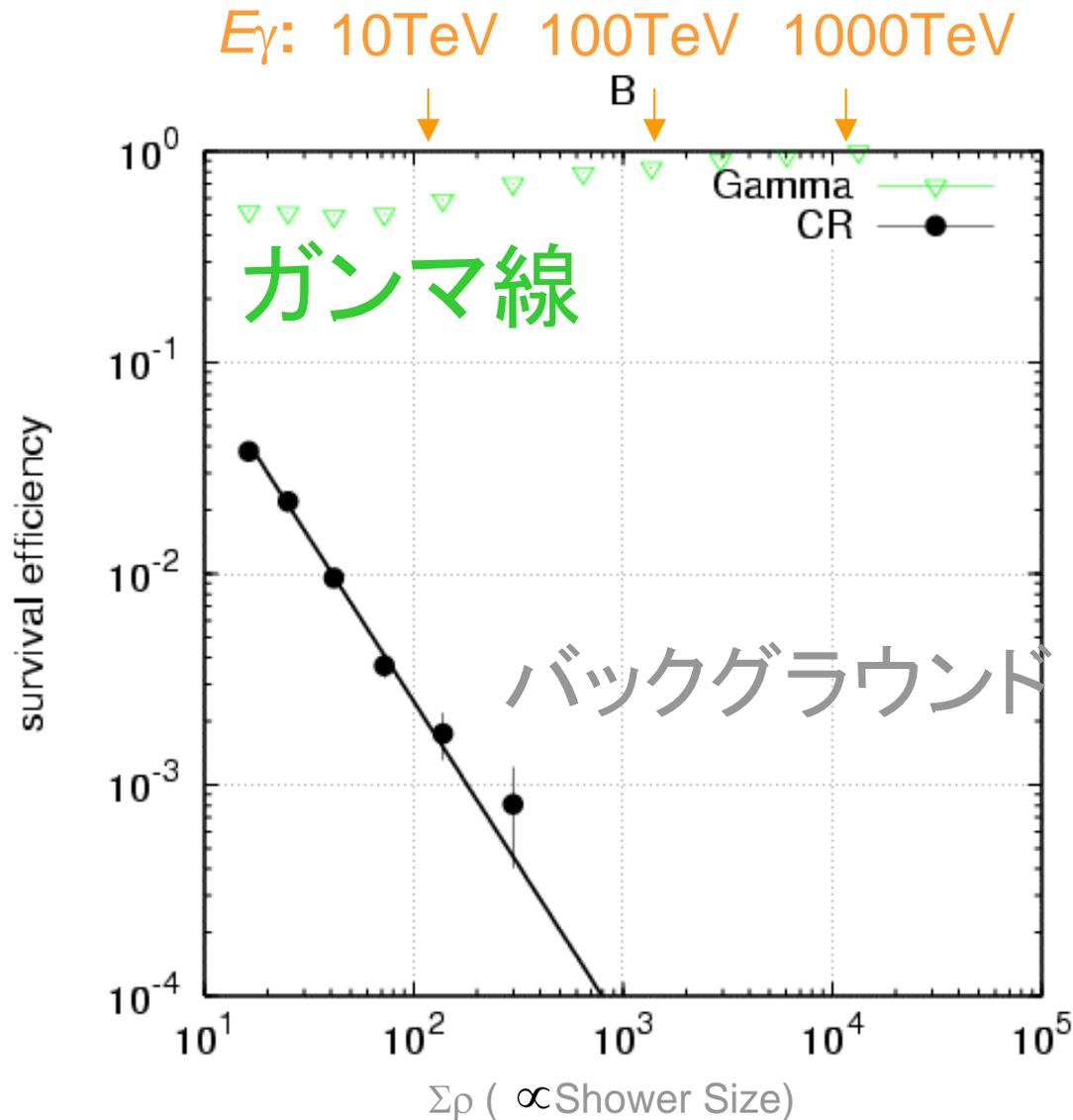
ポワソンノイズとして考慮

ミューオン数VSシャワーサイズ (シミュレーション)

- $\Sigma \rho$: シンチレータ検出器で観測した粒子密度の和
 \propto シャワーサイズ
- ΣN_{PE} : ミューオン検出器で観測した光電子数の和
 \propto ミューオン数
 (MD検出器の閾値 $N_{PE} > 10$ 光電子)



カット後の生存率 (シミュレーション)



10TeV:

カット $\Sigma N_{PE} \sim 50$

バックグラウンド: $\sim 99.8\%$ 除去

ガンマ線: $\sim 65\%$ 生存

ガンマ線感度: ~ 10 倍 感度UP!

100TeV:

カット $\Sigma N_{PE} \sim 1000$

バックグラウンド: $\sim 99.99\%$ 除去

ガンマ線: $\sim 95\%$ 生存

ガンマ線感度: バックグラウンドフリー!

1000TeV:

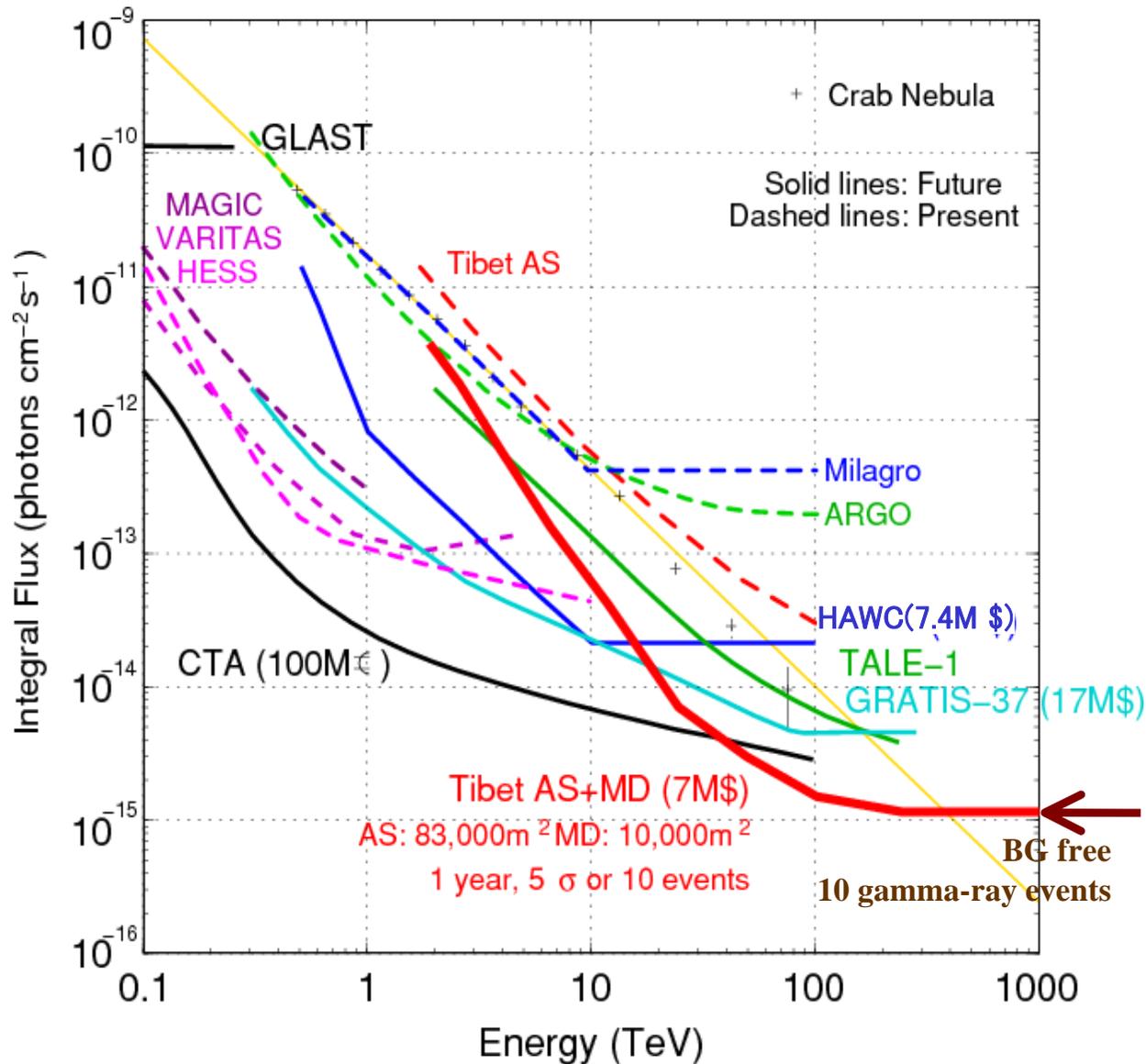
カット $\Sigma N_{PE} \sim 20000$

バックグラウンド: $\gg \sim 99.99\%$ 除去

ガンマ線: $\sim 99\%$ 生存

ガンマ線感度: バックグラウンドフリー!

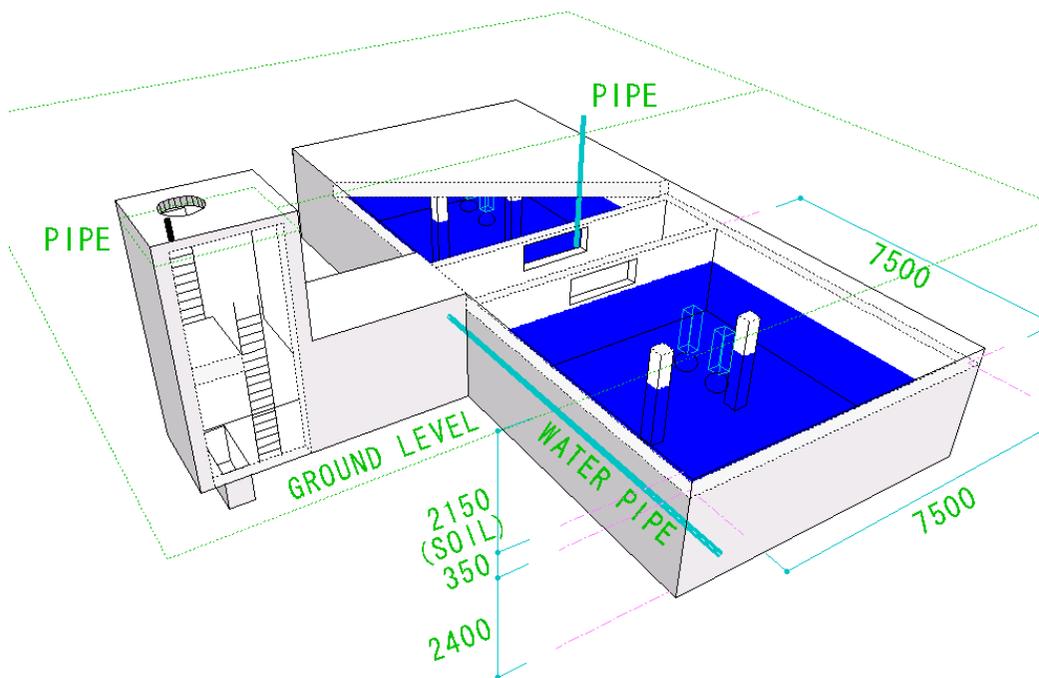
ガンマ線点源に対する予想感度 (5 σ or 10イベント)



従来の観測装置より
1桁から2桁改善

50TeV以上
バックグラウンドフリー
(<1 イベント)

プロトタイプ水チェレンコフミュオン観測装置



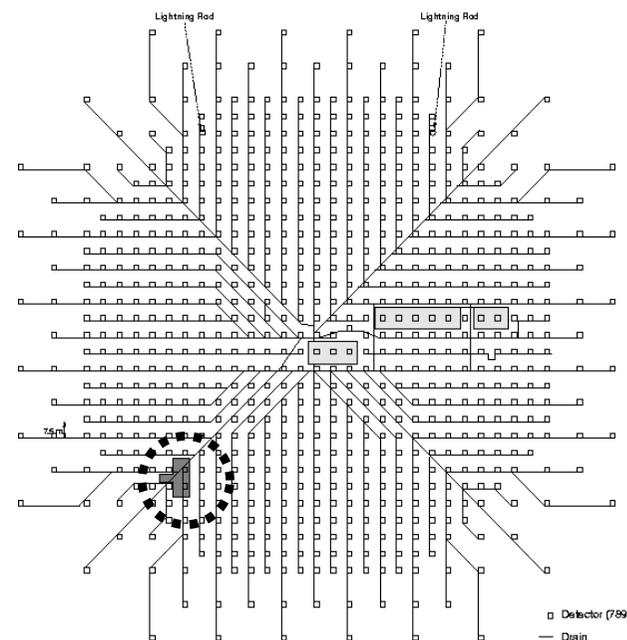
2007年 9月 1日 建設開始
2007年11月26日 竣工

Tibet III Drain Map (2003)

2003.06.27 K. Karata

地下 2.5m (物質厚 $\sim 515\text{g}/\text{cm}^2 \sim 19X_0$)
7.2m \times 7.2m \times 水深1.5m 水槽 2台
20" Φ PMT (HAMAMATSU R3600) 2本/水槽
水槽材質: コンクリート 白色壁
水循環なし・ろ過なし

チベットでの建設の実証
シミュレーションとの比較
数100TeV以上ガンマ線の観測





プロトタイプチベットミュージオン観測装置 土埋め戻し後

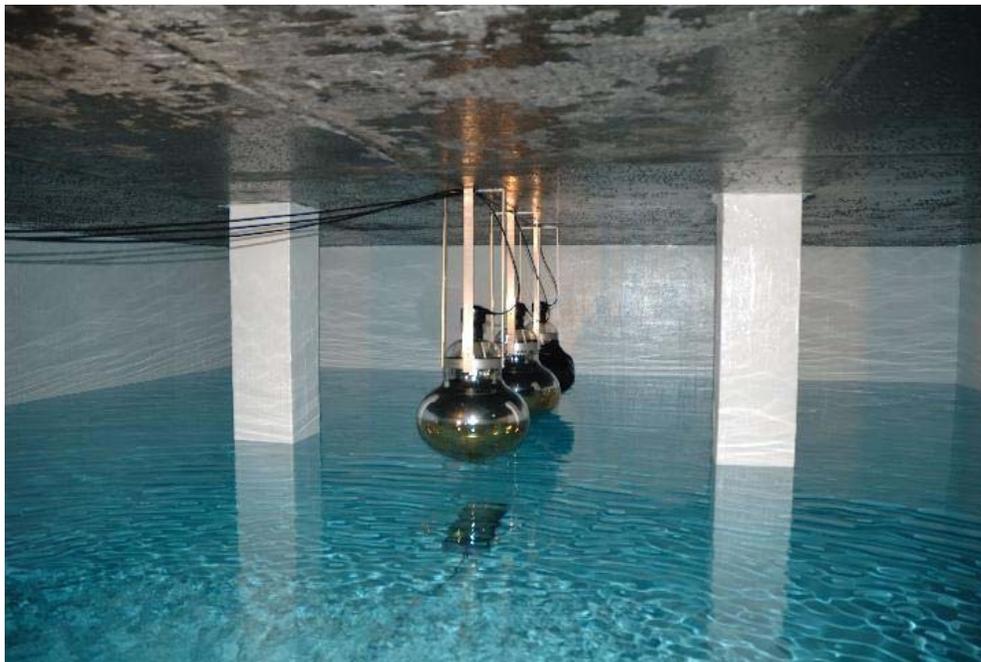
内装



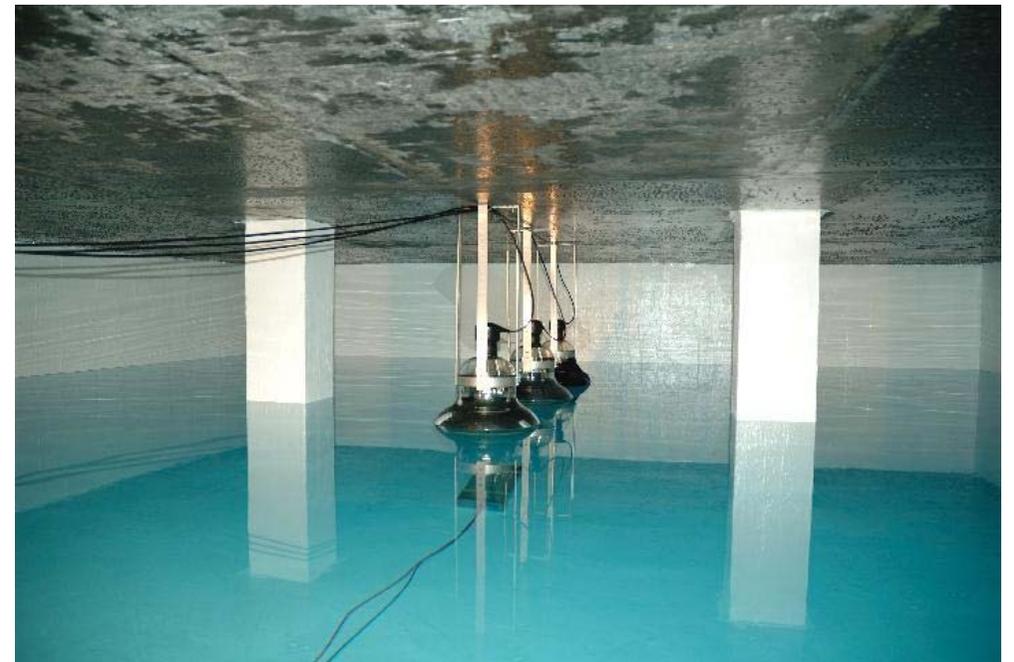
南セル: 白色エポキシ樹脂防水材 (高価)



北セル: セメント系防水材+タイベックシート (安価)

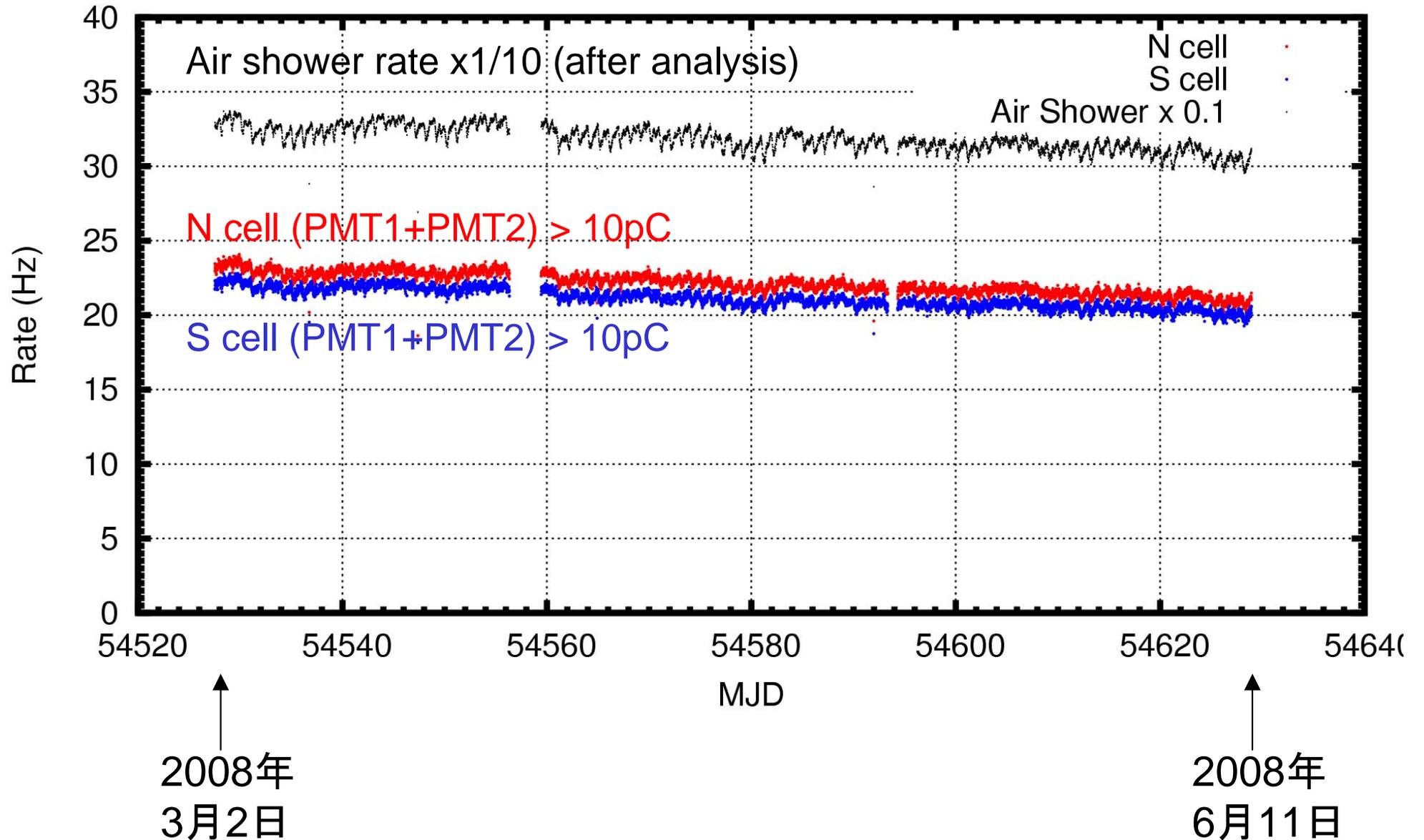


注水 (井戸の地下水)



注水完了 (深さ1.5m)

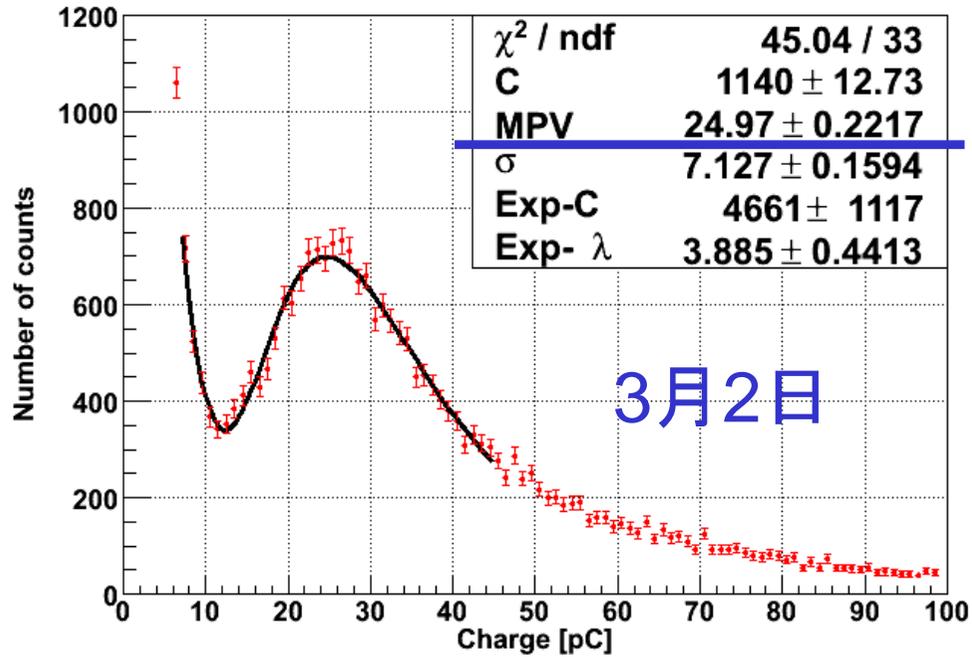
Detector Hit Rate (Air Shower Trigger)



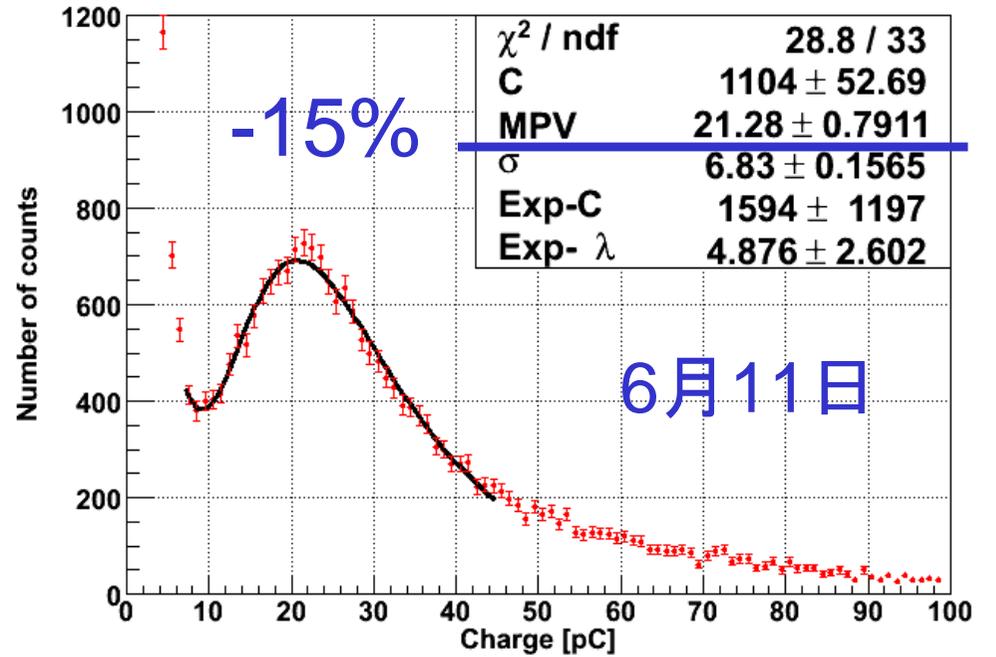
MD Charge分布

(1 cell, PMT1+PMT2)

S 20080302

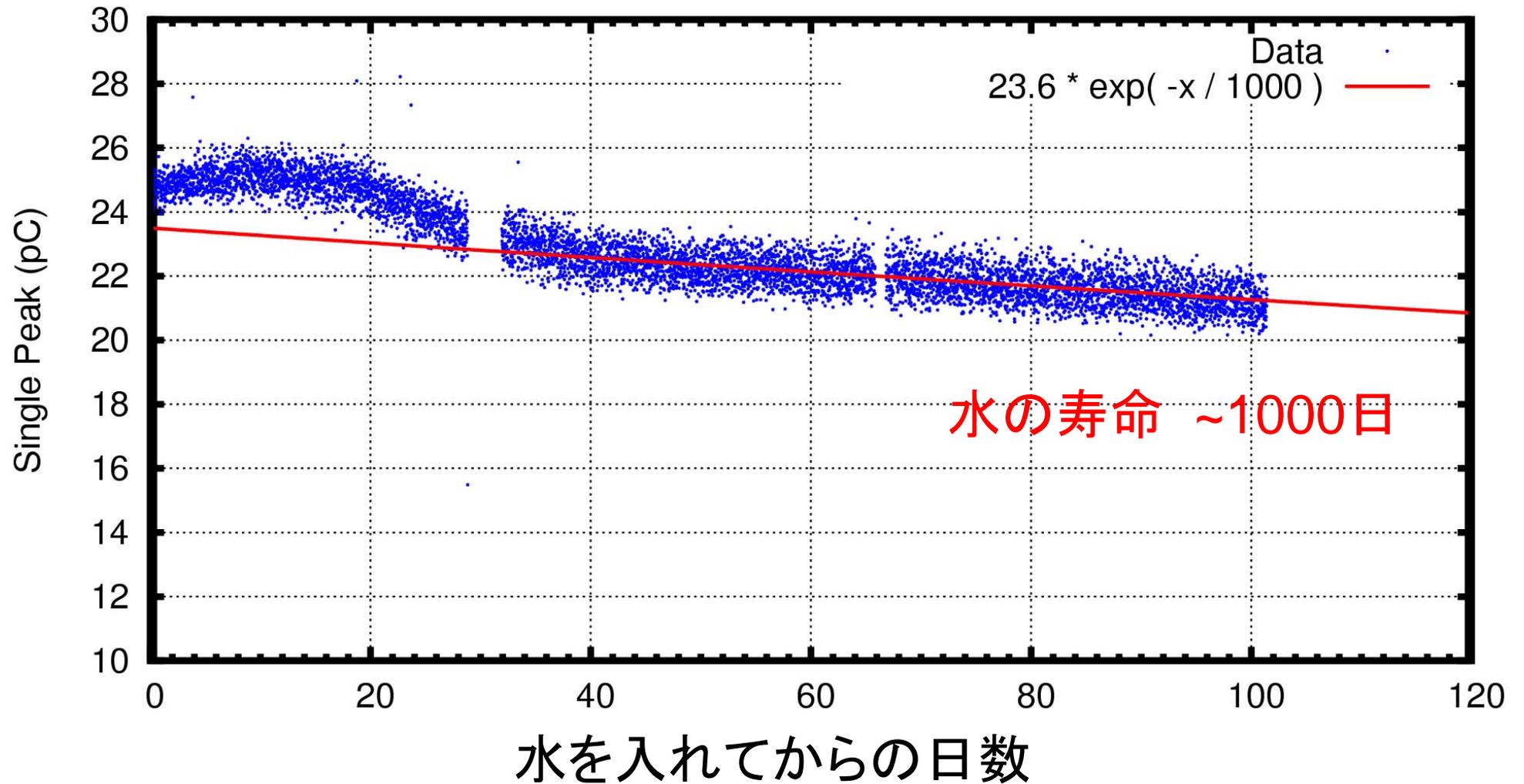


S0-20080611



MD Charge Peak の時間変化

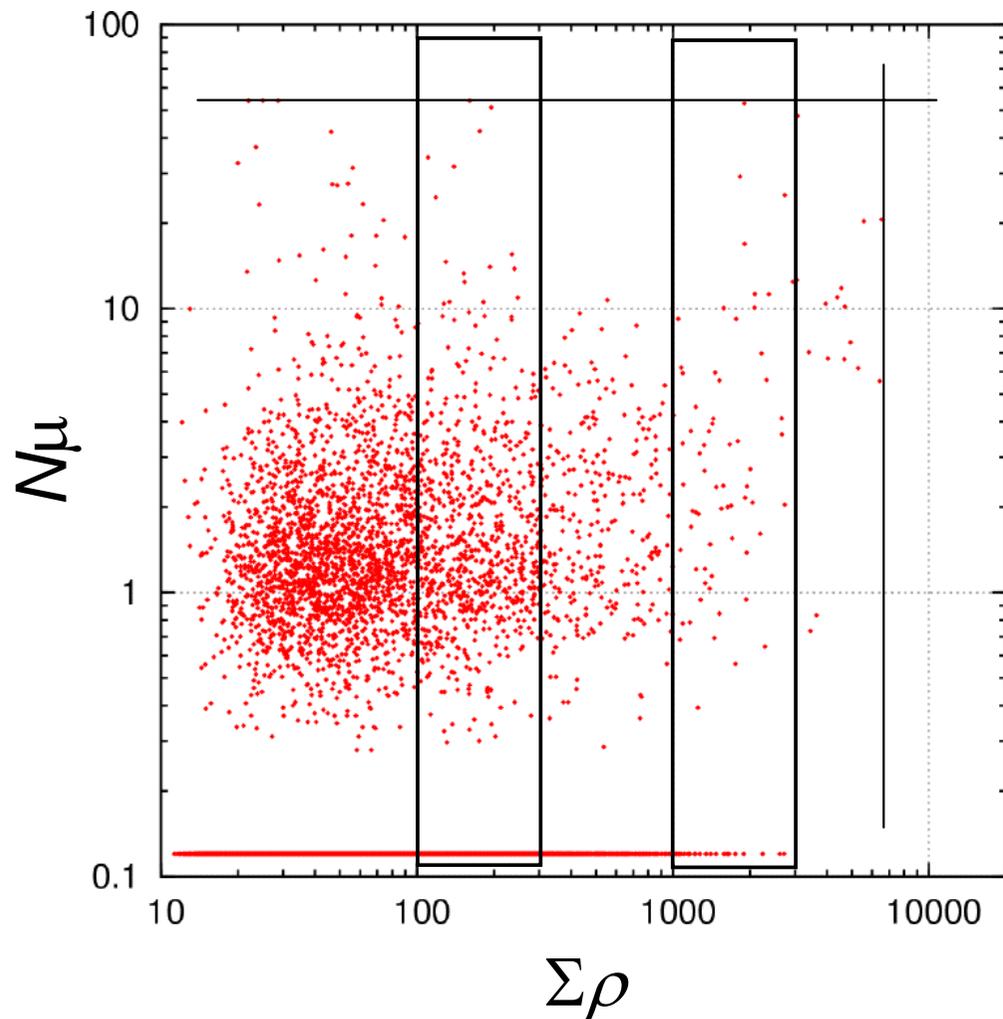
(1 cell, PMT1+PMT2)



$\Sigma\rho - N_\mu$ 分布(1 cell)

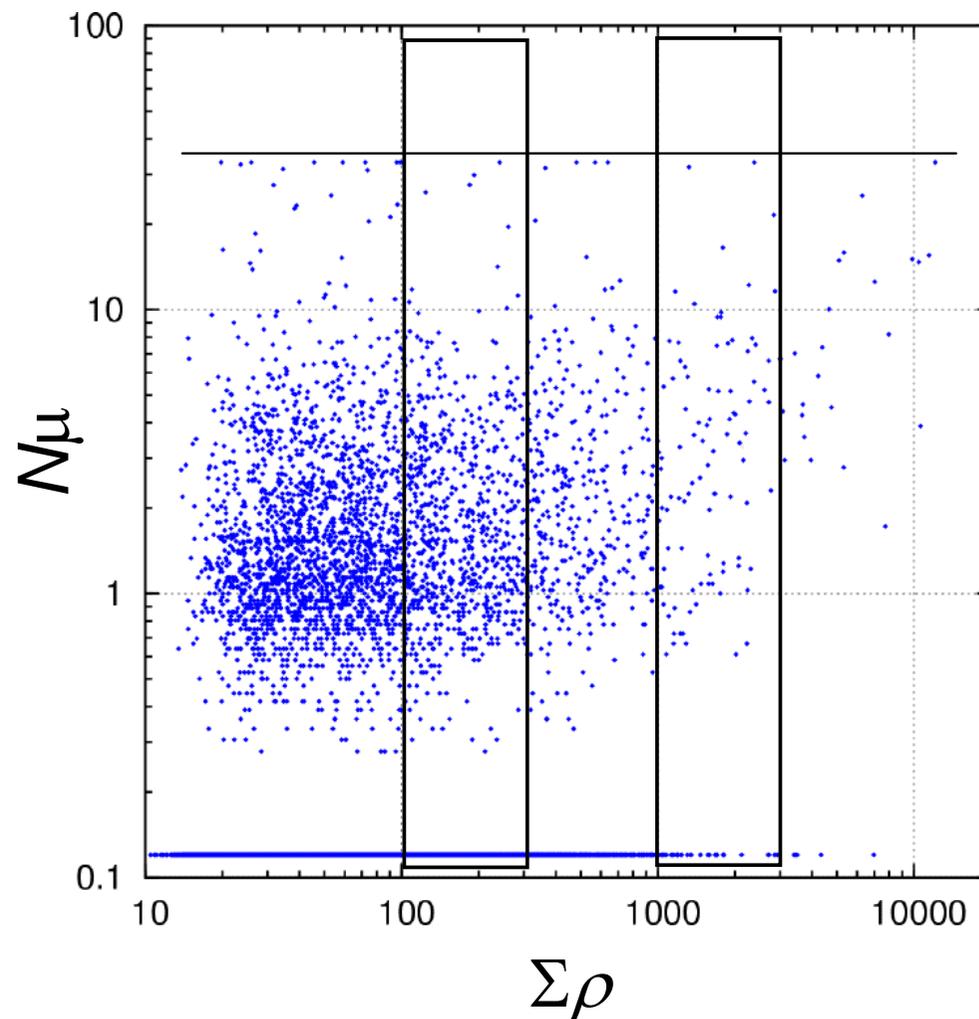
Data 26571 events

~10 TeV ~100 TeV



MC 26571 events

~10 TeV ~100 TeV

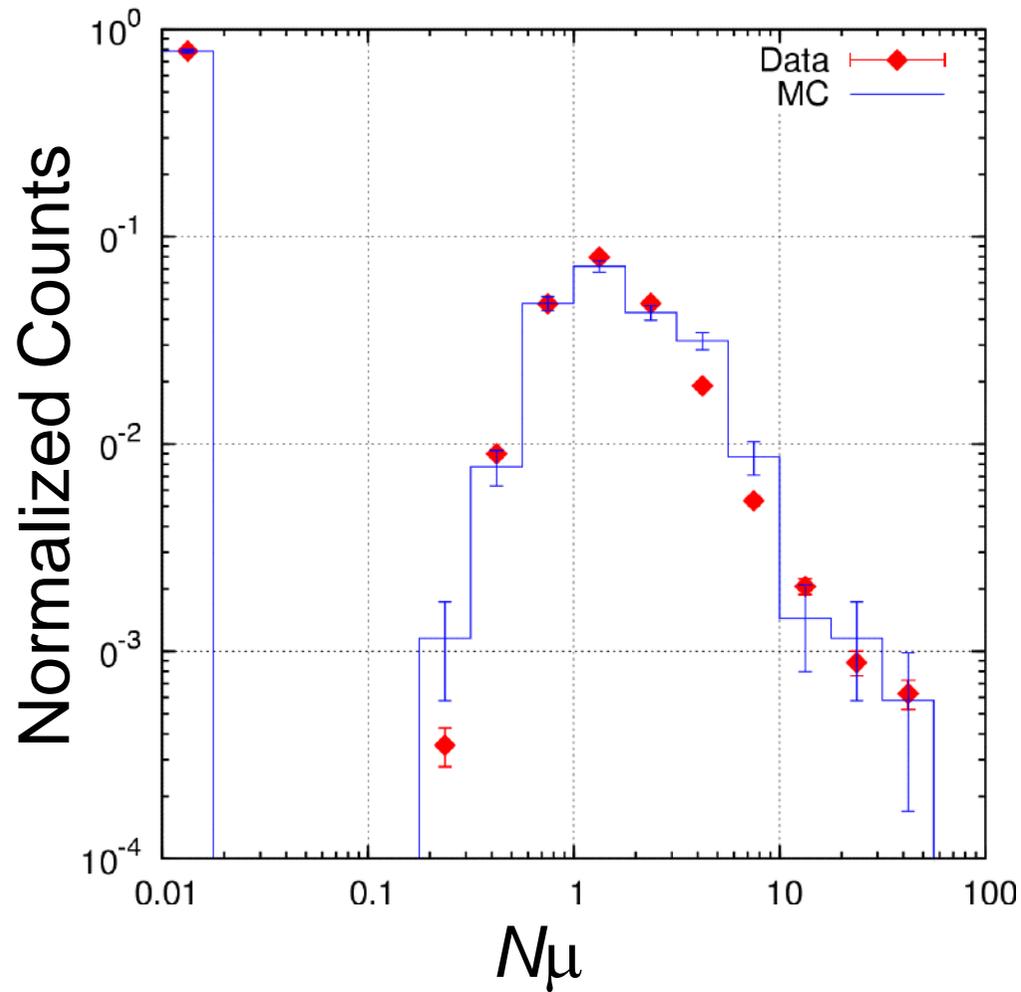


MD 閾値:

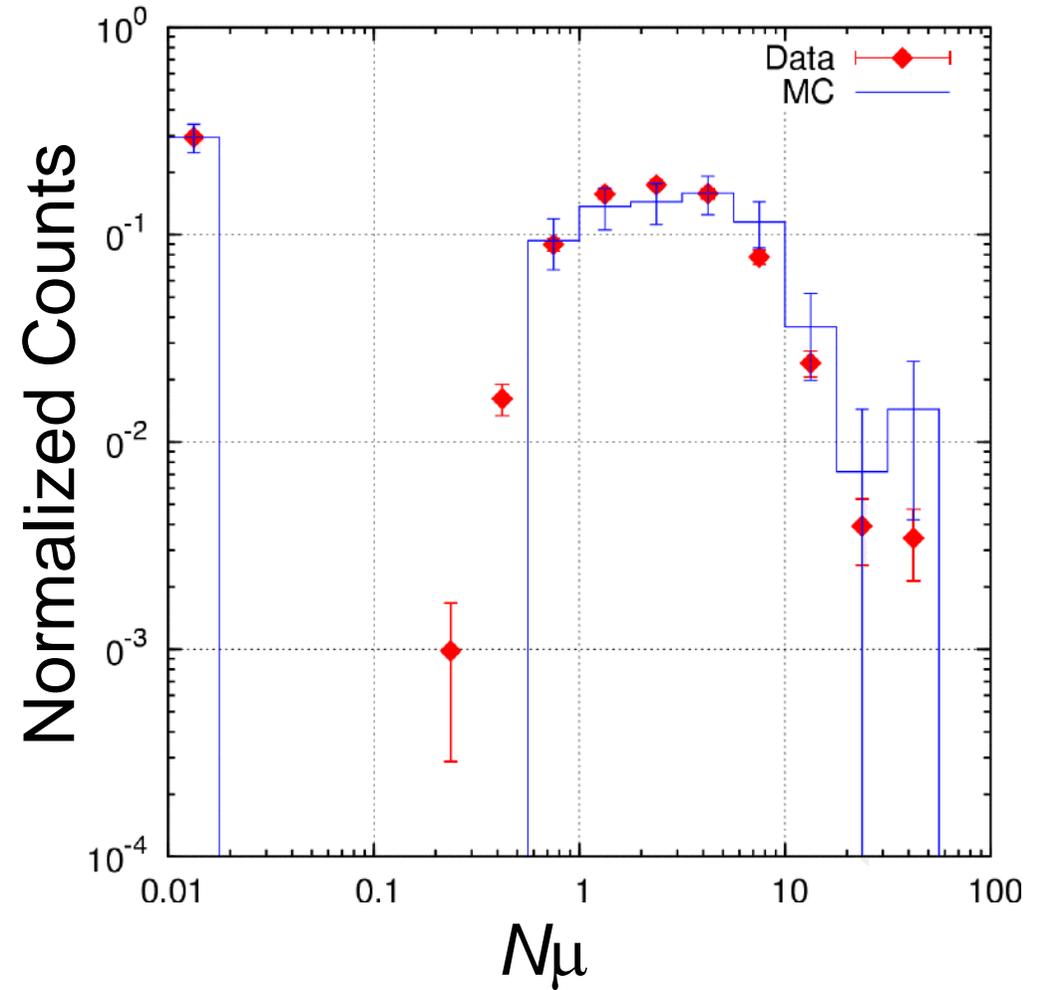
If (PMT1 < 0.3 μ || PMT2 < 0.3 μ) PMT1 = PMT2 = 0

N_μ 分布 (1 cell)

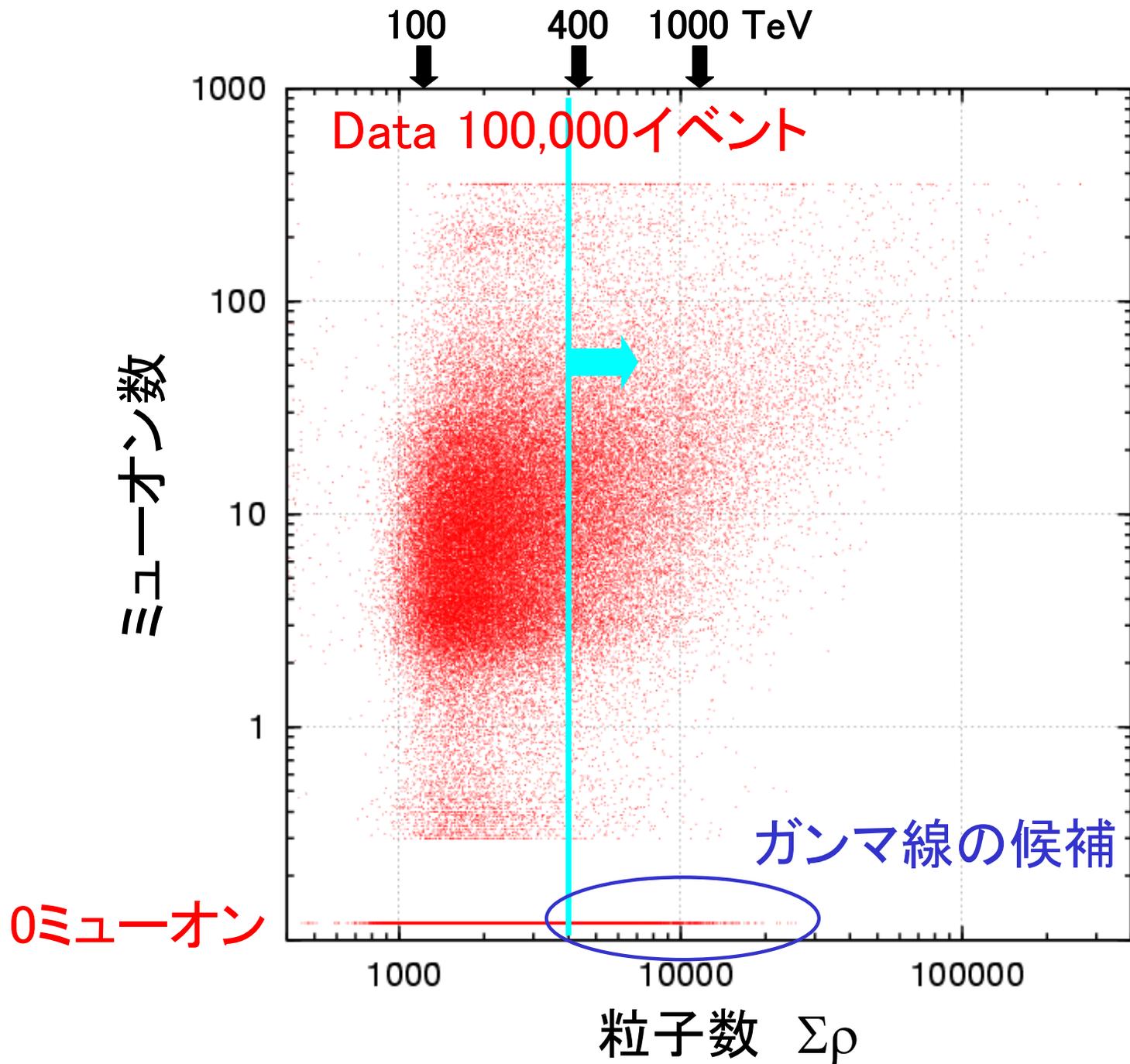
$100 < \Sigma\rho < 300$ (~ 10 TeV)



$1000 < \Sigma\rho < 3000$ (~ 100 TeV)

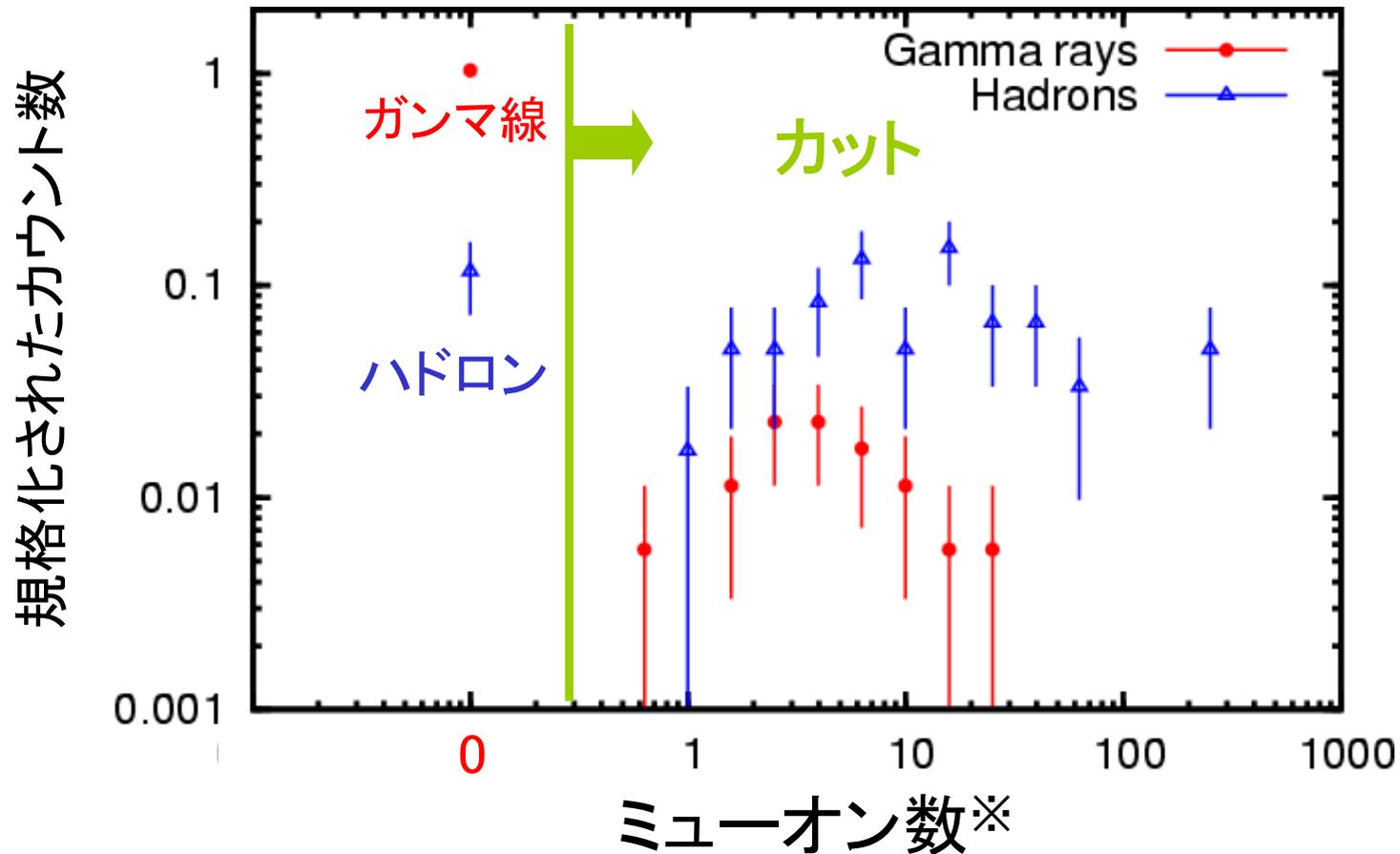


$\Sigma\rho - \Sigma N_\mu$ 分布 ($> \sim 100\text{TeV}$ データ)



プロトタイプ検出器MCシミュレーション

エネルギー: $> \sim 400 \text{ TeV}$ ($\Sigma\rho > 4000$)



※ 1 muon は MCシミュレーションでのシングルピークを基準とする。
検出器応答やノイズ(アクシデンタルミュオン)のシミュレーションも含む。

プロトタイプ検出器MCシミュレーション まとめ

0 ミューオン以外をカット

	カット前 イベント数	カット後 イベント数	イベント 生存率
ガンマ線 MC (信号)	201	182	0.91 ± 0.02
ハドロン MC (バックグラウンド)	54	7	0.13 ± 0.05
ハドロン Data (バックグラウンド)	18.5×10^5	2.1×10^5	0.11

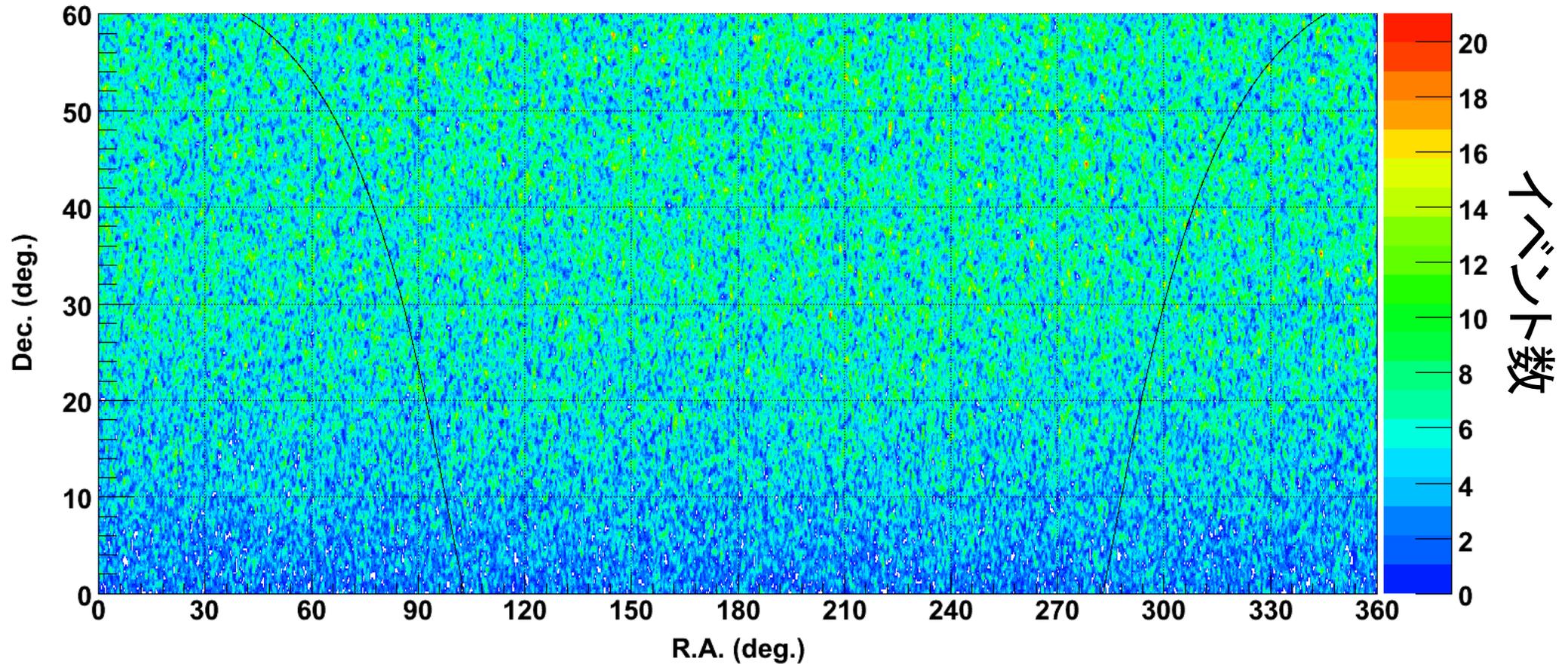


$$\text{S/N比: } \frac{0.91}{\sqrt{0.13}} \approx 2.5 \text{ 倍向上}$$

エネルギー: $> \sim 400 \text{ TeV}$ ($\Sigma p > 4000$)

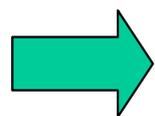
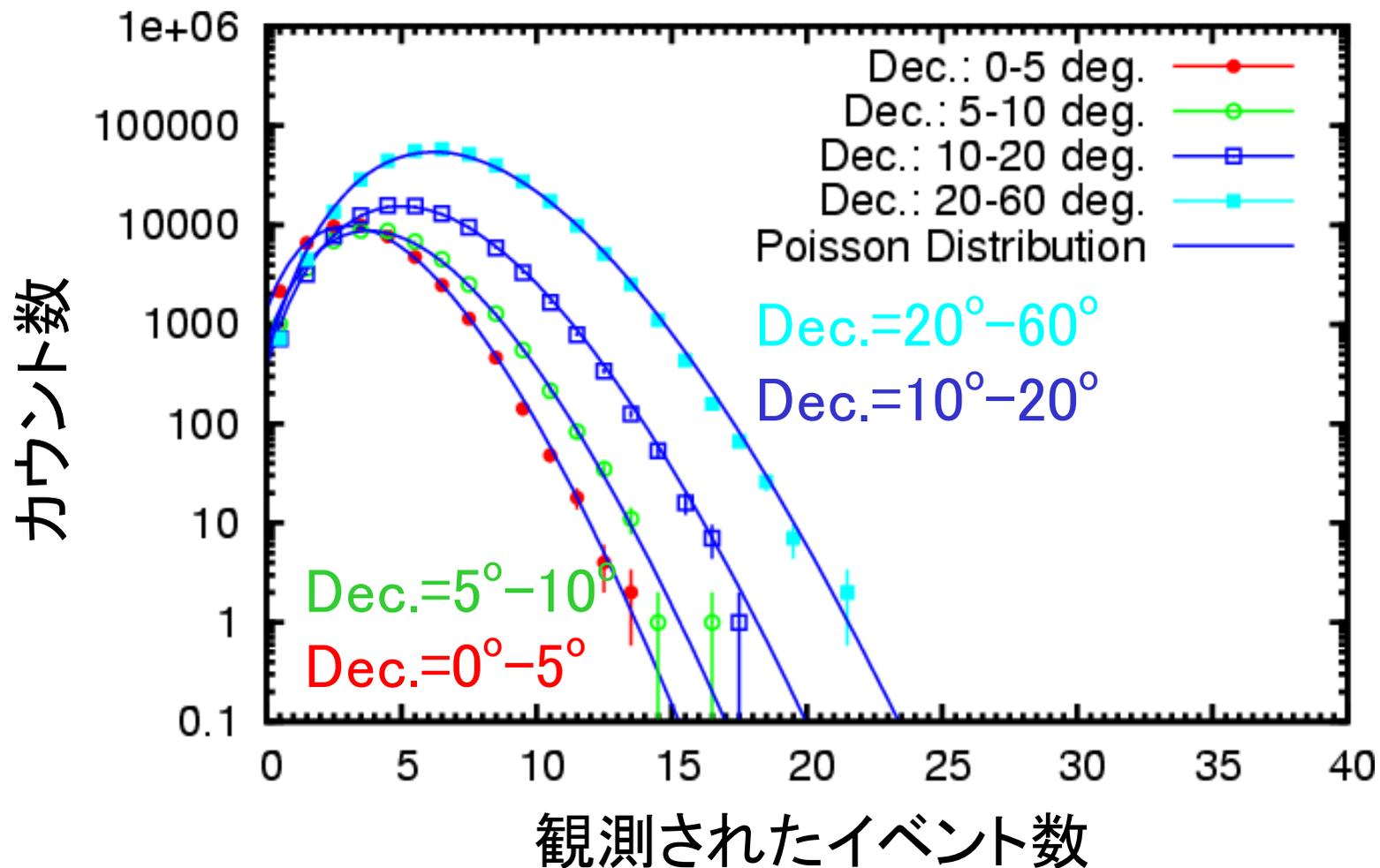
北天イベント分布(>400TeV)

解析窓のサイズ:半径 0.4° ミューオンカット後



ポワソン分布？

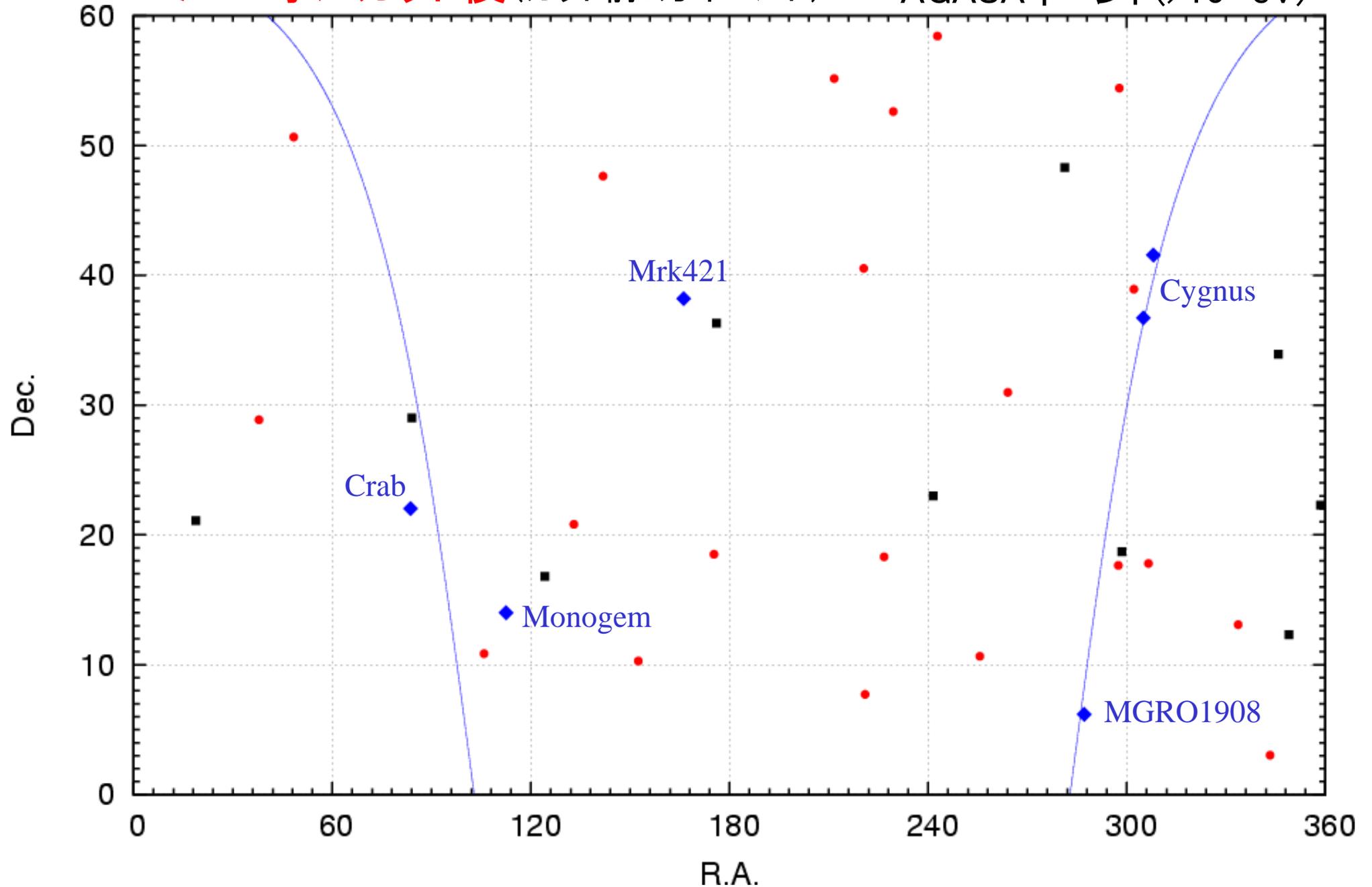
北天イベント分布の統計的評価



ポワソン分布と一致 (有意な信号なし)

4PeV以上 北天イベントマップ

ミュオンカット後 (カット前3万イベント) ■ AGASAイベント(>10²⁰eV)



2008年のまとめ

共同利用研究採択課題数: 5件

配分額: 校費 220万円, 旅費 375万円

査読付論文数: 4篇

国際会議発表: ORAL 6, POSTER 1

将来計画

Tibet MD 計画: 10 – 1000 TeV ガンマ線観測

10,000 m² 水チェレンコフ型地下ミュオン検出器

> 15 TeV 既存チェレンコフ望遠鏡より高感度

> 40 TeV チェレンコフ望遠鏡将来計画より高感度

50 m² × 2 プロトタイプ完成

→ シミュレーションとよく一致

YAC 計画: 100 TeV – 100 PeV 宇宙線化学組成

2009年に 16 ch プロトタイプ建設予定