

「グローバルな宇宙天文観測」研究会

チベット空気シャワーアレイ及び
プロトタイプミュオン検出器を用いた
高エネルギー宇宙ガンマ線の研究



東京大学宇宙線研究所

修士 吉越功一

2012.02.20

「グローバルな宇宙天文観測」研究会



The Tibet AS γ 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), W.J.Li(2,7), 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), 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), .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

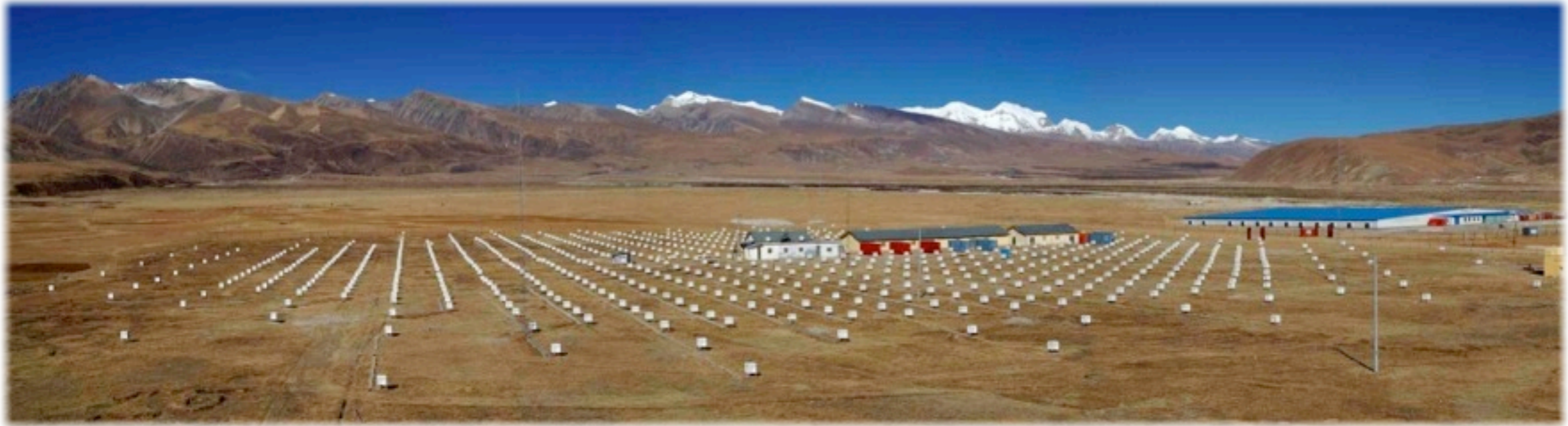
発表内容

1. Tibet 実験
2. Prototype MD
3. N_{μ} によるp/ γ 弁別
4. CrabNebula 解析
5. CrabNebula Flare
6. 結論/今後の展望



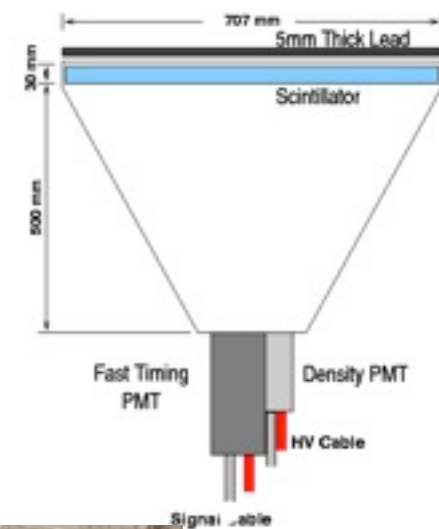
I. Tibet ASy experiment

Tibet Air Shower (AS) array



チベット自治区 羊八井 4,300 m a.s.l. (606 g/cm^2)

- ❁ 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 $\sim 37,000 \text{ m}^2$
- ❁ 観測エネルギー領域 $\sim \text{TeV} - 100 \text{ PeV}$
- ❁ 最頻エネルギー $\sim 3 \text{ TeV}$
- ❁ 角度分解能 $\sim 0.4 @ 10 \text{ TeV}$
 $\sim 0.2 @ 100 \text{ TeV}$
- ❁ エネルギー分解能 $\sim 70\% @ 10 \text{ TeV}$
 $\sim 40\% @ 100 \text{ TeV}$
- ❁ 視野 $\sim 2 \text{ sr}$



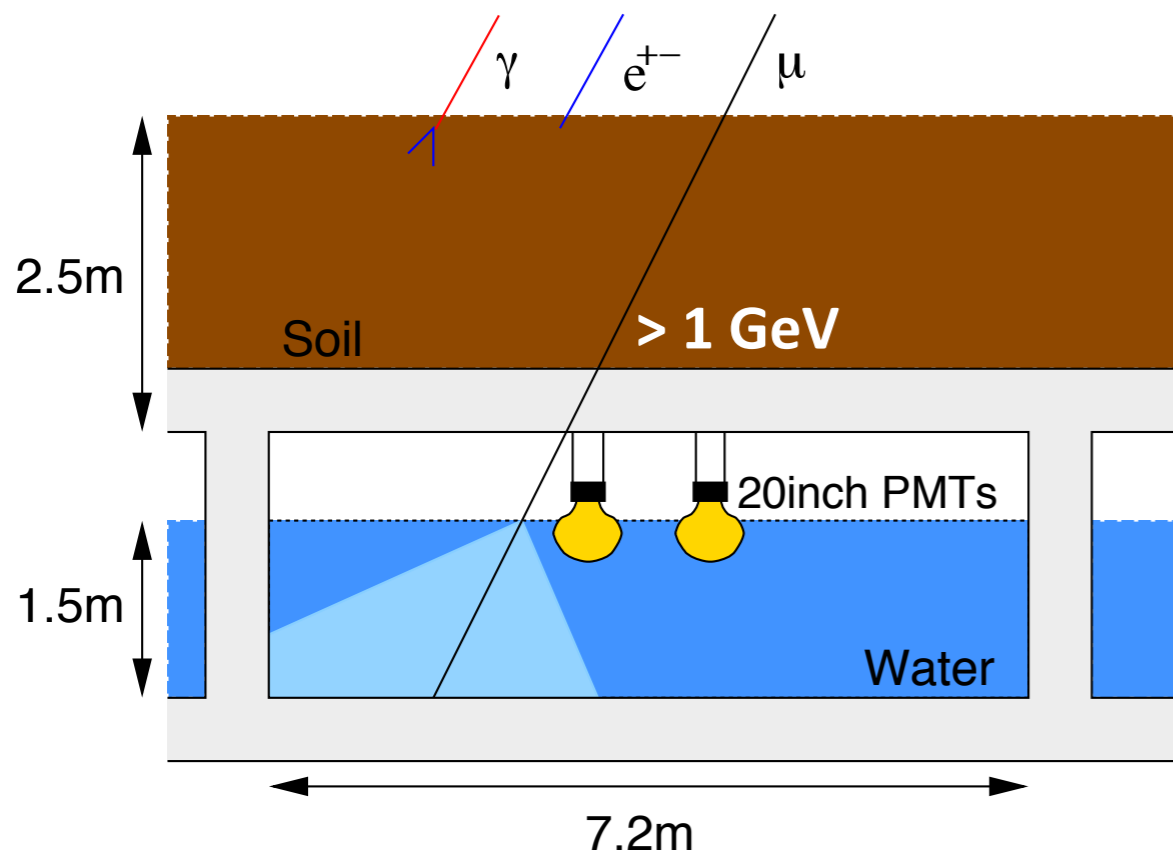
Tibet Muon Detector (MD)

“水チェレンコフミュオン観測装置”

- 空気シャワー中のミュオンを検出
- ASアレイ地下にプールを設置

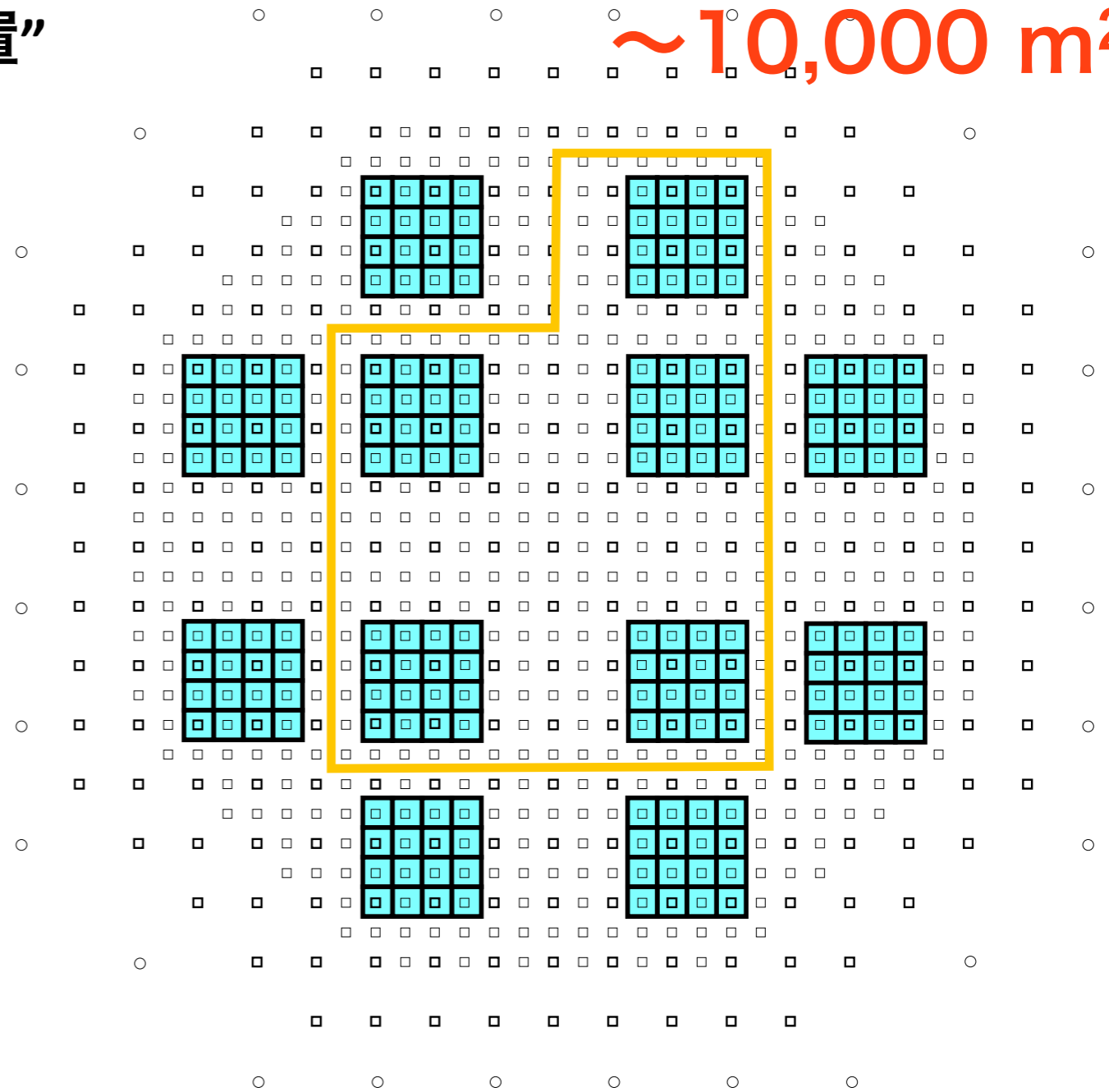
目的

ガンマ線/宇宙線弁別



水深 1.5m 1セル:7.2x7.2m²

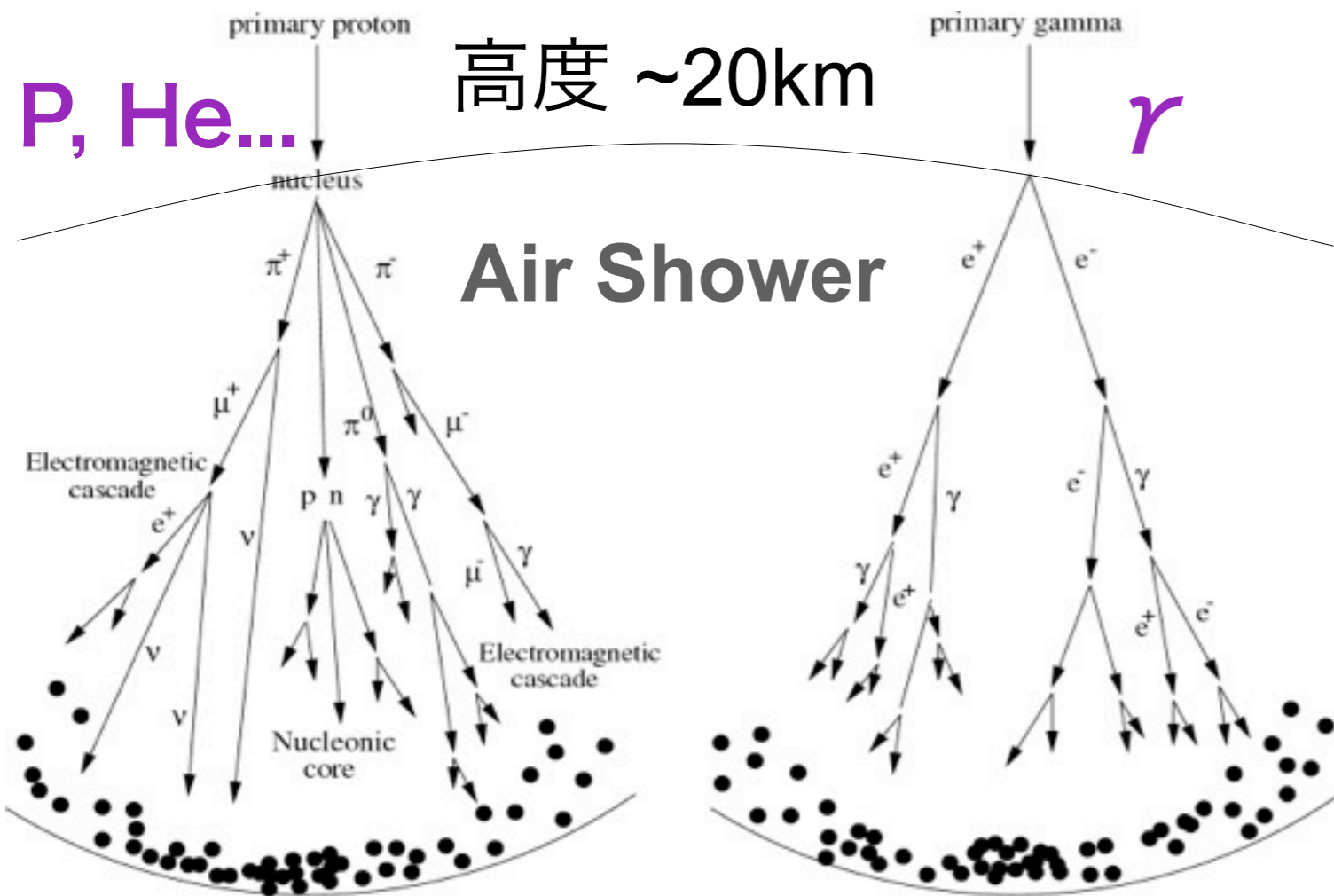
~10,000 m²



建設がほぼ終了

(2012年現在:5プール)

ミューオンによる p/γ 選別



ASアレイ + MD

BG(宇宙線)の除去



**TeV γ 線に対する
感度の向上**

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu})$$

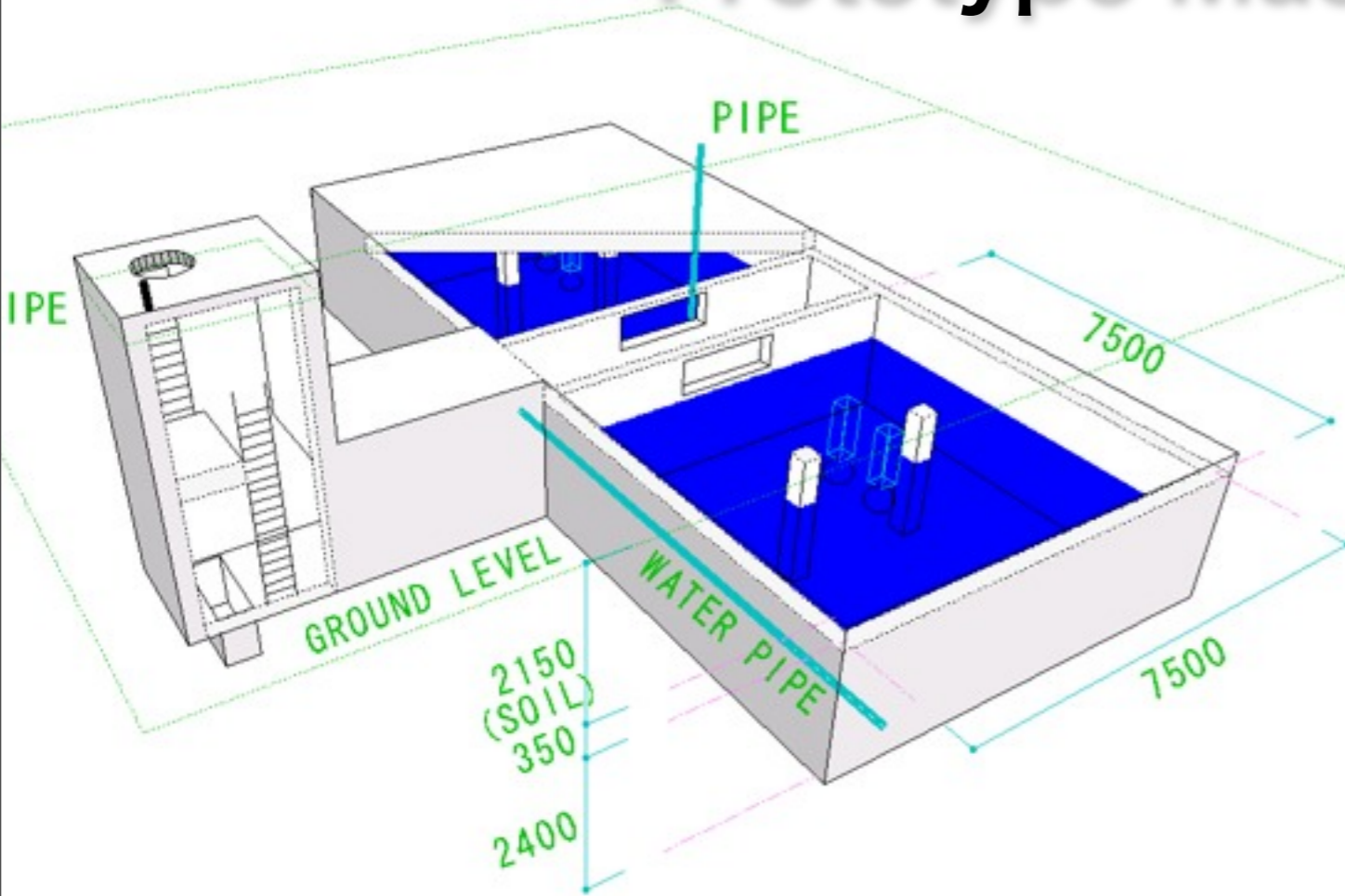
Proton : $N_{\mu} \sim 50$

Gamma : $N_{\mu} \sim 1$

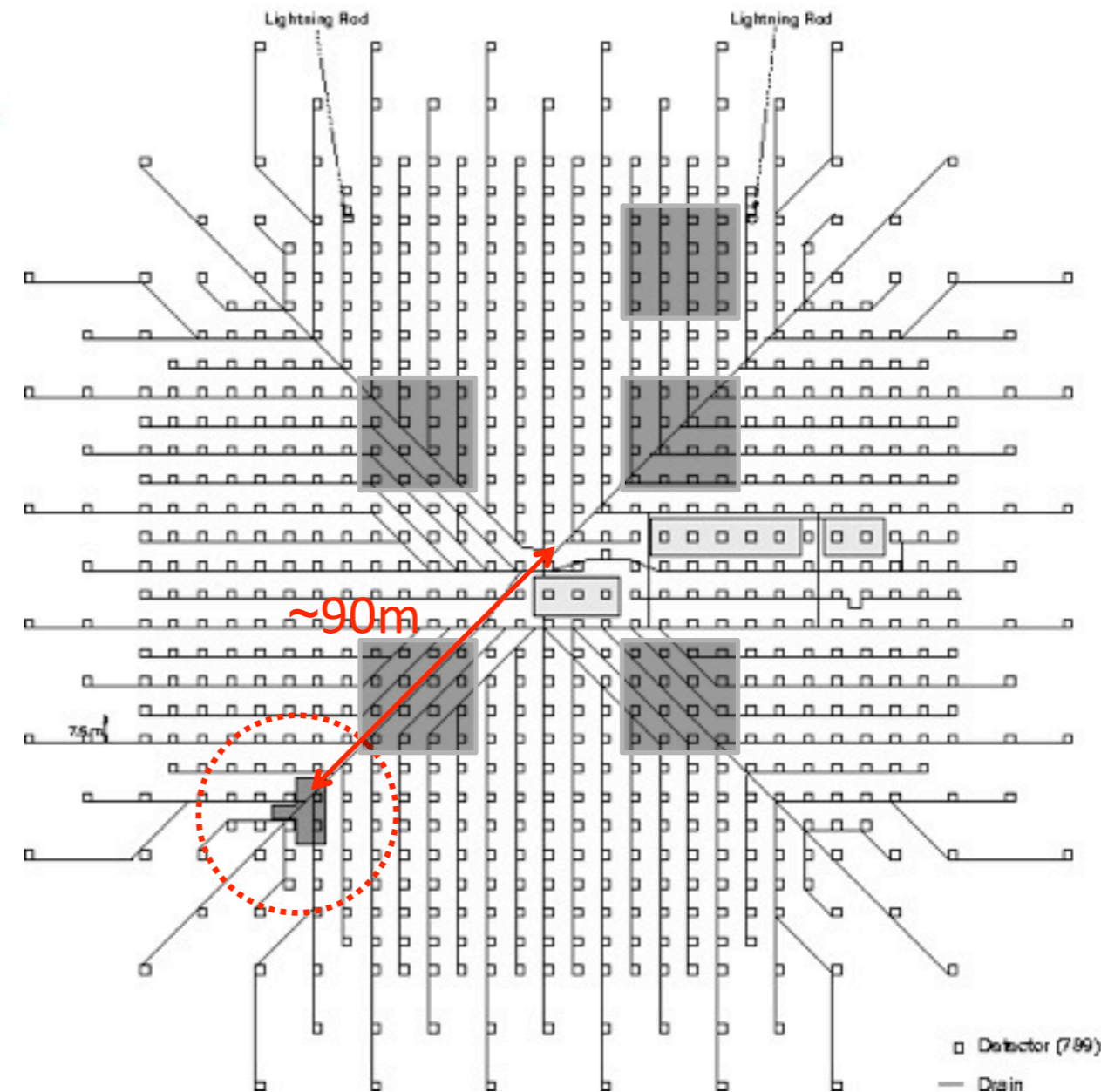
ミューオン数@100TeV
(/ 10,000m², 4300m a.s.l.)

2. Prototype MD

Prototype Muon Detector



水深 1.5m 52m²x 2セル



2007年 9月 : 建設開始
2007年12月 : データ取得開始
2010年 1月 : データ取得終了

- ◆ チベットでの建設実現性の確認
- ◆ MCシミュレーションの確認
- ◆ 数百TeVにおける γ 線探索



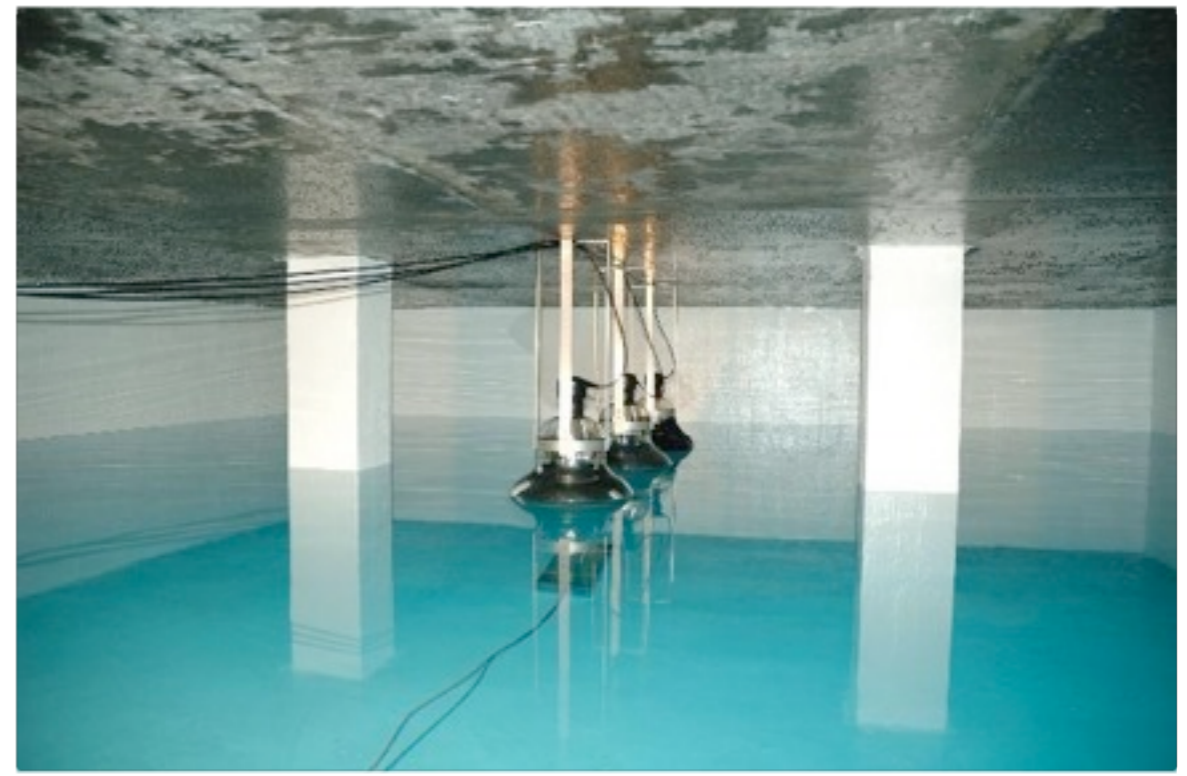
Prototype Muon Detector (2007年11月16日)



Prototype MD 埋め戻し後地表アレイ

Prototype MD プール内部

- * 透明度の高い地下水を使用
- * 20" ϕ PMT x 3:
Normal gain x 2,
1/100 gain x 1 for test
- * 水深 : 1.5 m
- * 土壌及びコンクリート: 2.6 m
~ 19 radiation length



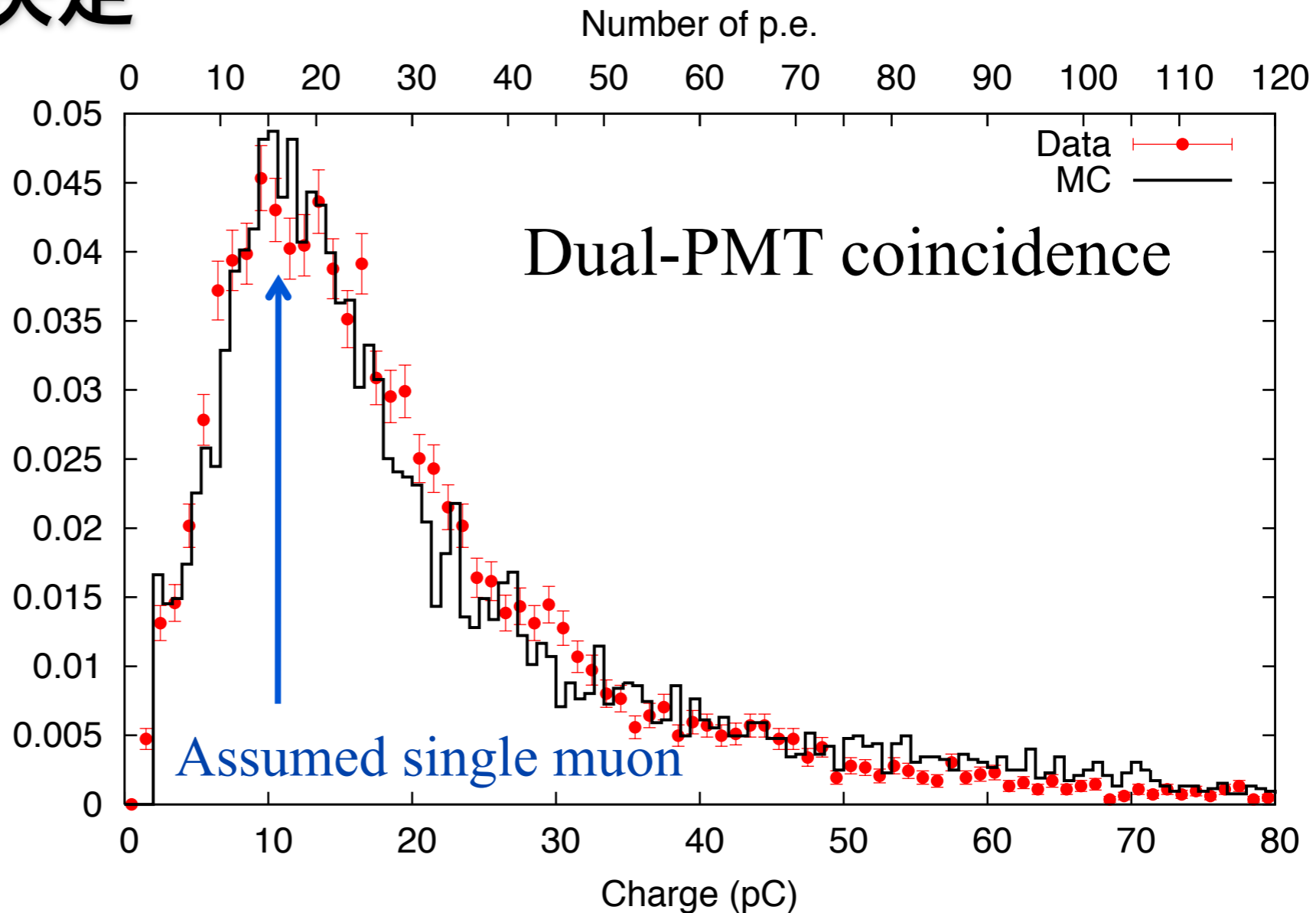
水深1.5m 注水完了後



反射材(防水材)

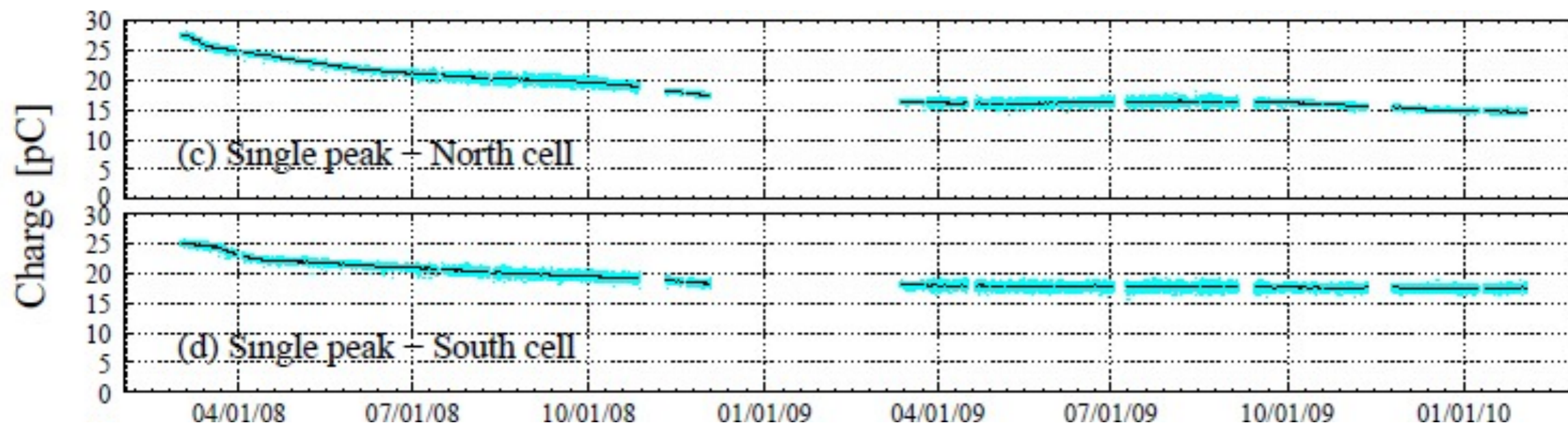
Single Muonの決定

- 各 RUN
- 各 PMT



Single Muonの日変化

~1/e per ~1000 days



3. p/ γ Separation by N_{μ}

MC Simulation of the Proto. MD

MCイベント生成条件:

- Dec.=22° (Crab 軌道)
- エネルギー 0.3TeV~10PeV

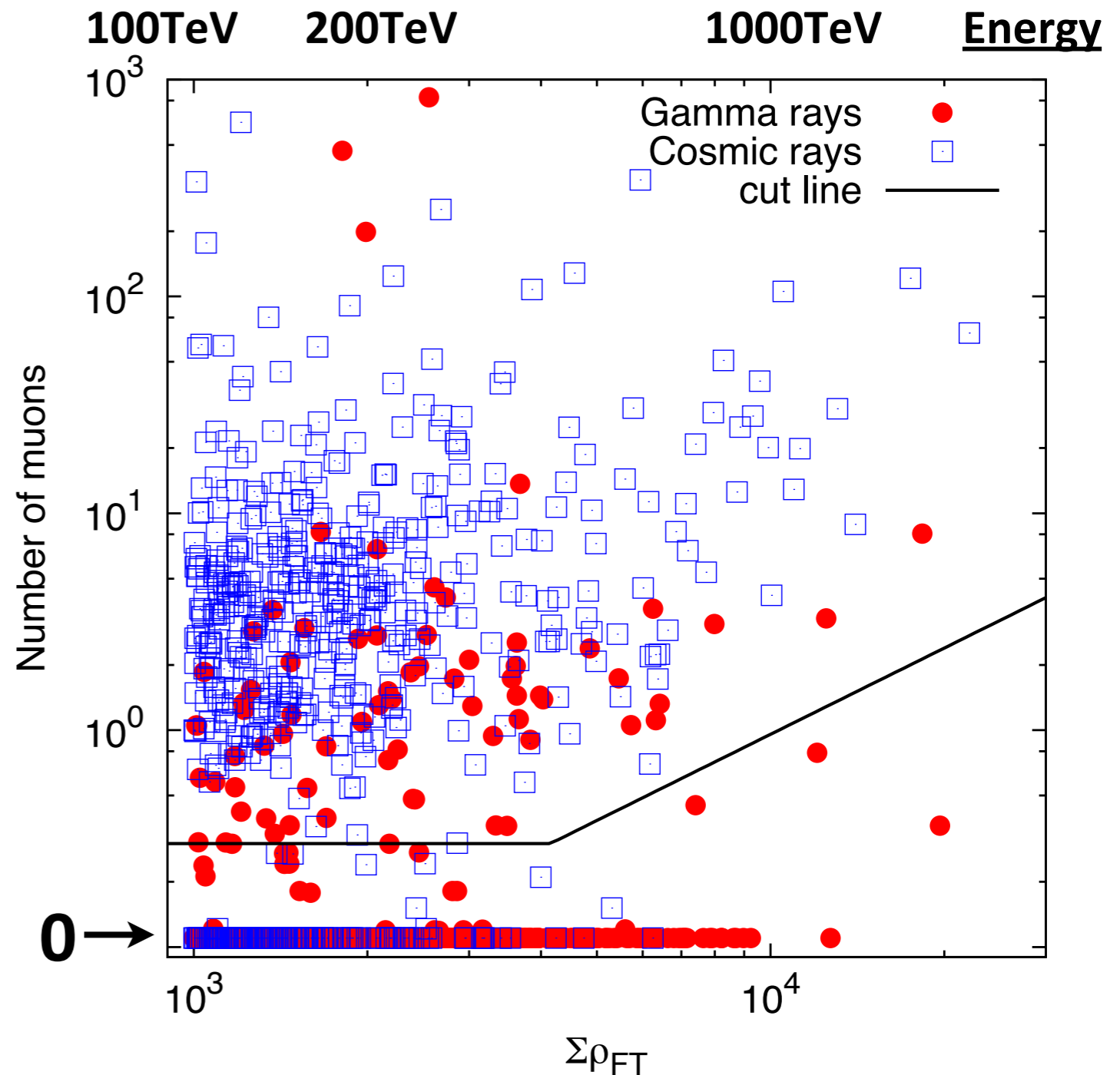
ガンマ線 : Index = -2.6

宇宙線 : 直接観測に基づく組成

+ 地表アレイ応答

+ プロトタイプMD応答

(実験と同様の解析)



$$N_{\mu} < \begin{cases} 0.3 & (\sum \rho_{FT} < 4150) \\ 0.3 \times (\sum \rho_{FT} / 4150)^{1.32} & (\sum \rho_{FT} \geq 4150) \end{cases}$$

MC Simulation of the Proto. MD

MCイベント生成条件:

- Dec.=22° (Crab 軌道)
- エネルギー 0.3TeV~10PeV

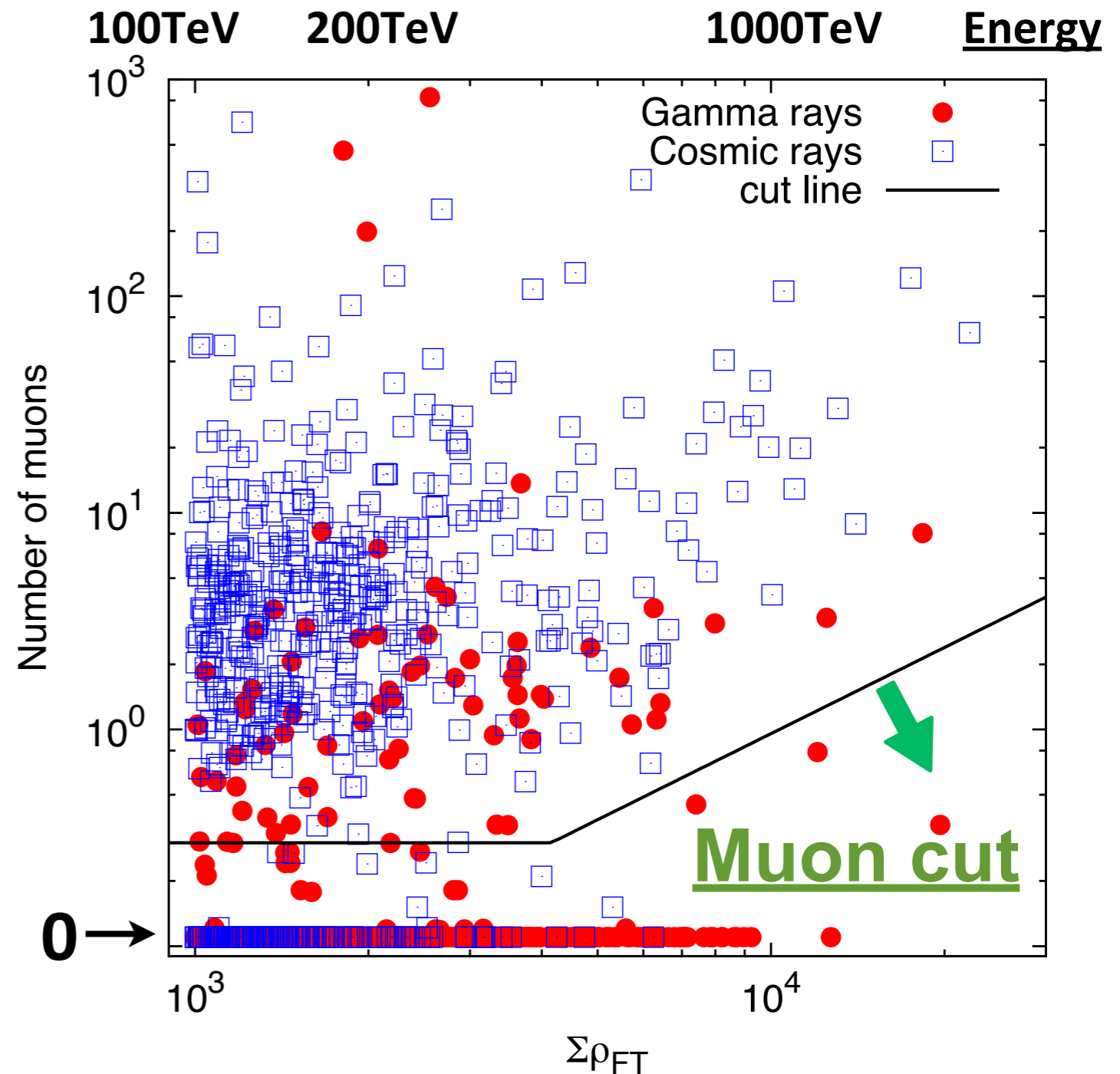
ガンマ線 : Index = -2.6

宇宙線 : 直接観測に基づく組成

+ 地表アレイ応答

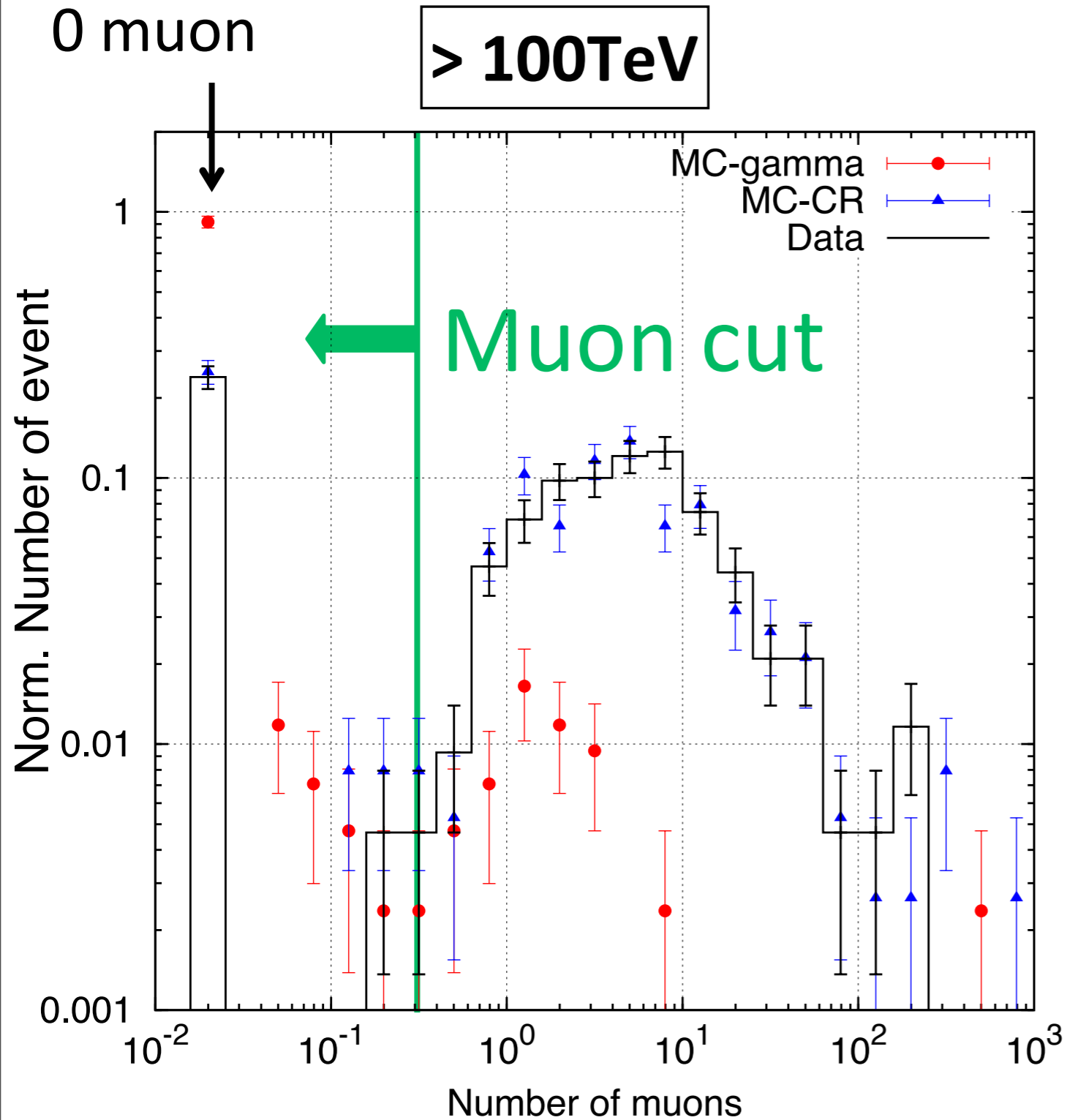
+ プロトタイプMD応答

(実験と同様の解析)



$$N_{\mu} < \begin{cases} 0.3 & (\sum \rho_{FT} < 4150) \\ 0.3 \times (\sum \rho_{FT} / 4150)^{1.32} & (\sum \rho_{FT} \geq 4150) \end{cases}$$

Proto.MD - ミューオン数分布(>100TeV)



Energy	γ 生存率	CR生存率
> 100 TeV	0.93	0.26
> 200 TeV	0.88	0.13
> 500 TeV	0.85	0.09

ガンマ線に対する感度

$$q = \frac{S}{\sqrt{S+B}}$$

S : 信号(ガンマ)
B : BG(BG)

figure of merit : **q の比**

Energy	figure of merit
> 100 TeV	1.61 ± 0.01
> 200 TeV	1.74 ± 0.05
> 500 TeV	2.54 ± 0.38

ガンマ線に対する感度の向上

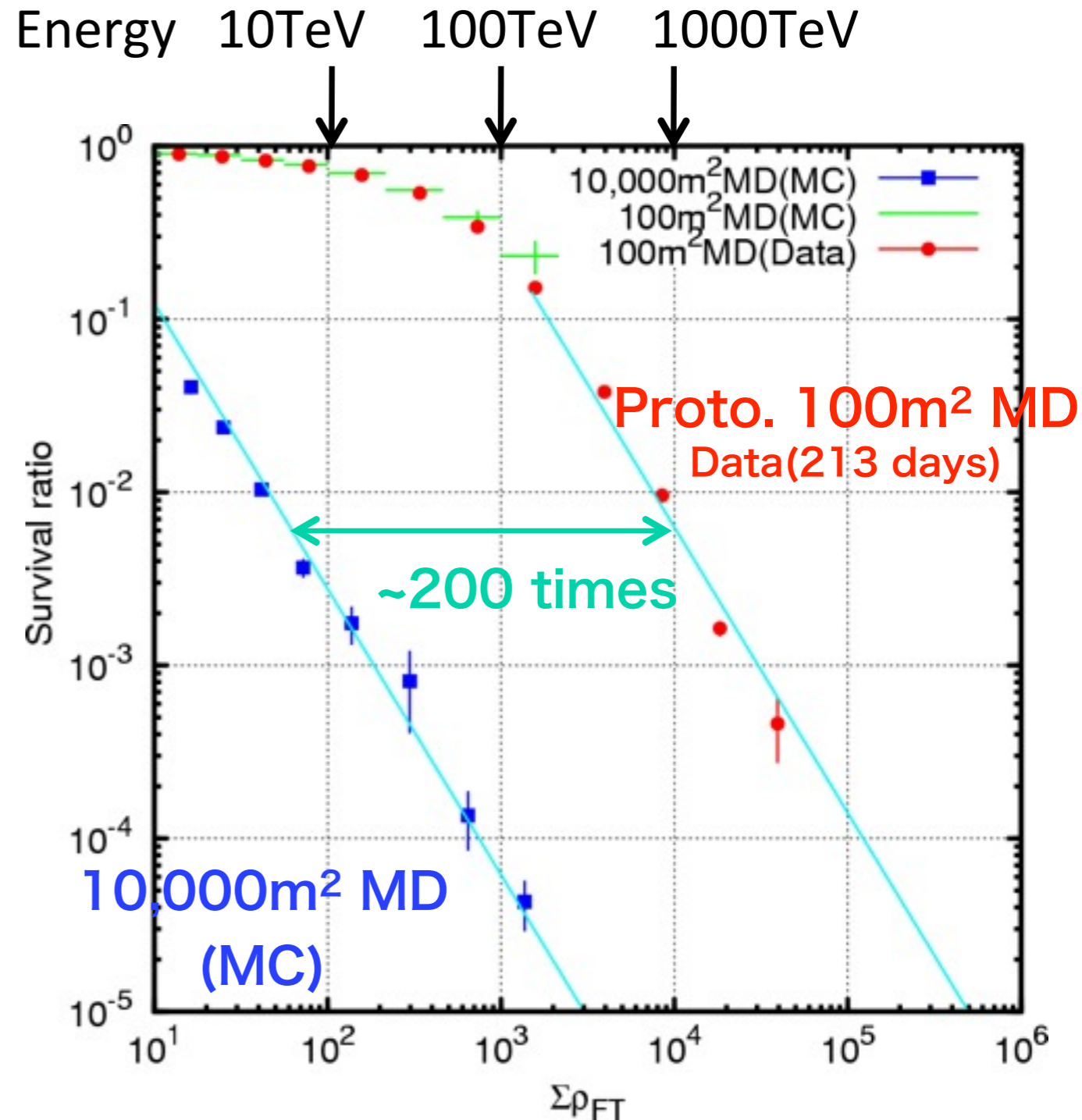
N_μ カットによる宇宙線生存率

Proto.MD

Energy	MC CR生存率	データBG生存率
> 107 TeV	0.26 ± 0.02	0.28 ± 0.02
> 215 TeV	0.18 ± 0.03	0.13 ± 0.02
> 507 TeV	0.09 ± 0.04	0.03 ± 0.03

MCと実験データで一致

$$N_\mu \sim \left(\frac{E_0}{20 \text{ GeV}} \right)^{0.85}$$



Full-MD MC OK (< 10TeV)

4. Crab Analysis

データ解析(Tibet AS + Proto.MD)



データ使用期間:

2008/3/2~ 2010/1/31

Live time: 438.3 days

解析方法: **等天頂角法**

イベント選択条件:

✓ $E > 100\text{TeV}$

(イベントレート: $\sim 1\text{Hz}$)

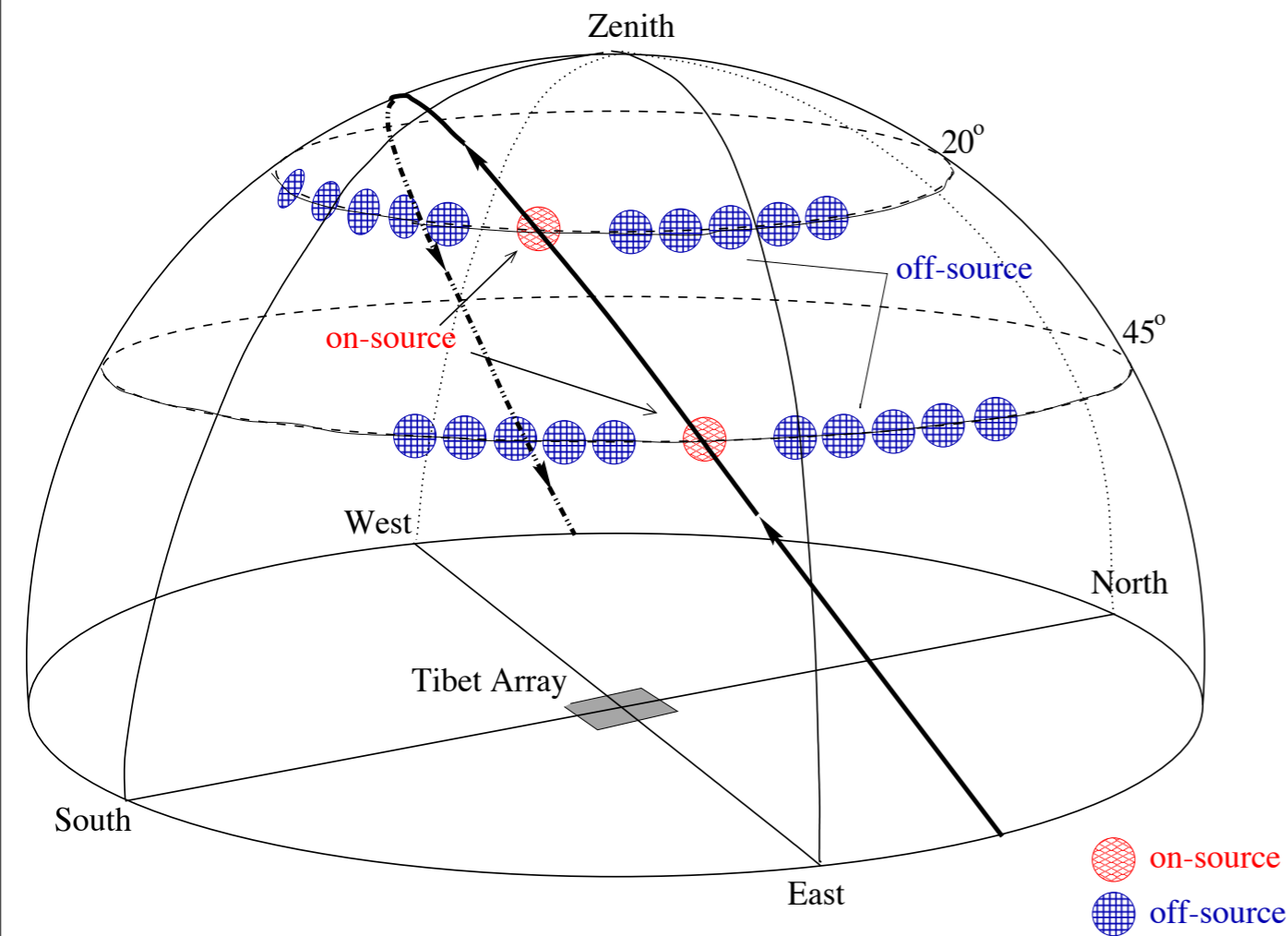
✓ 天頂角 $< 60^\circ$

✓ 解析窓半径 = 0.3°

(Crabからの γ 線 $\sim 90\%$ 含む)

✓ ミューオン数によるカット

→ **ガンマ線イベント**



N_{on} : on-source event

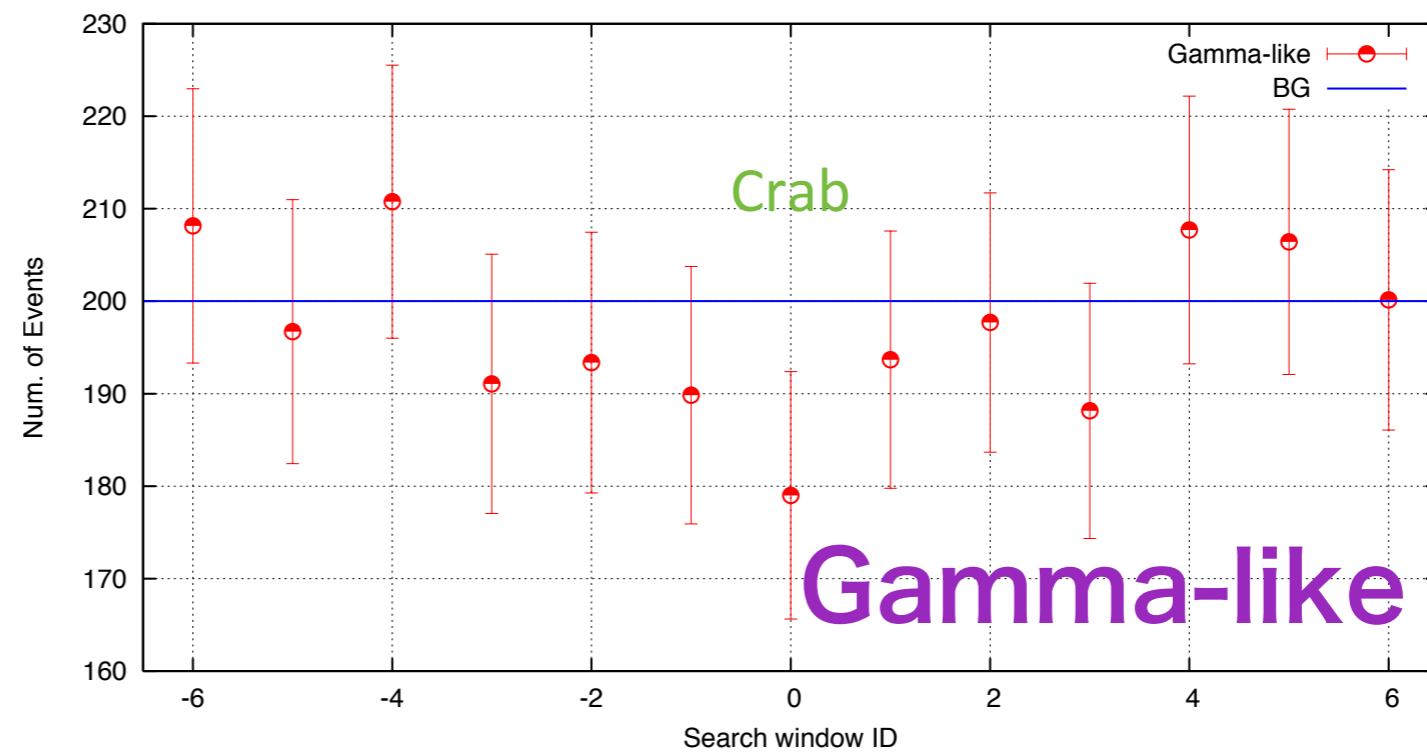
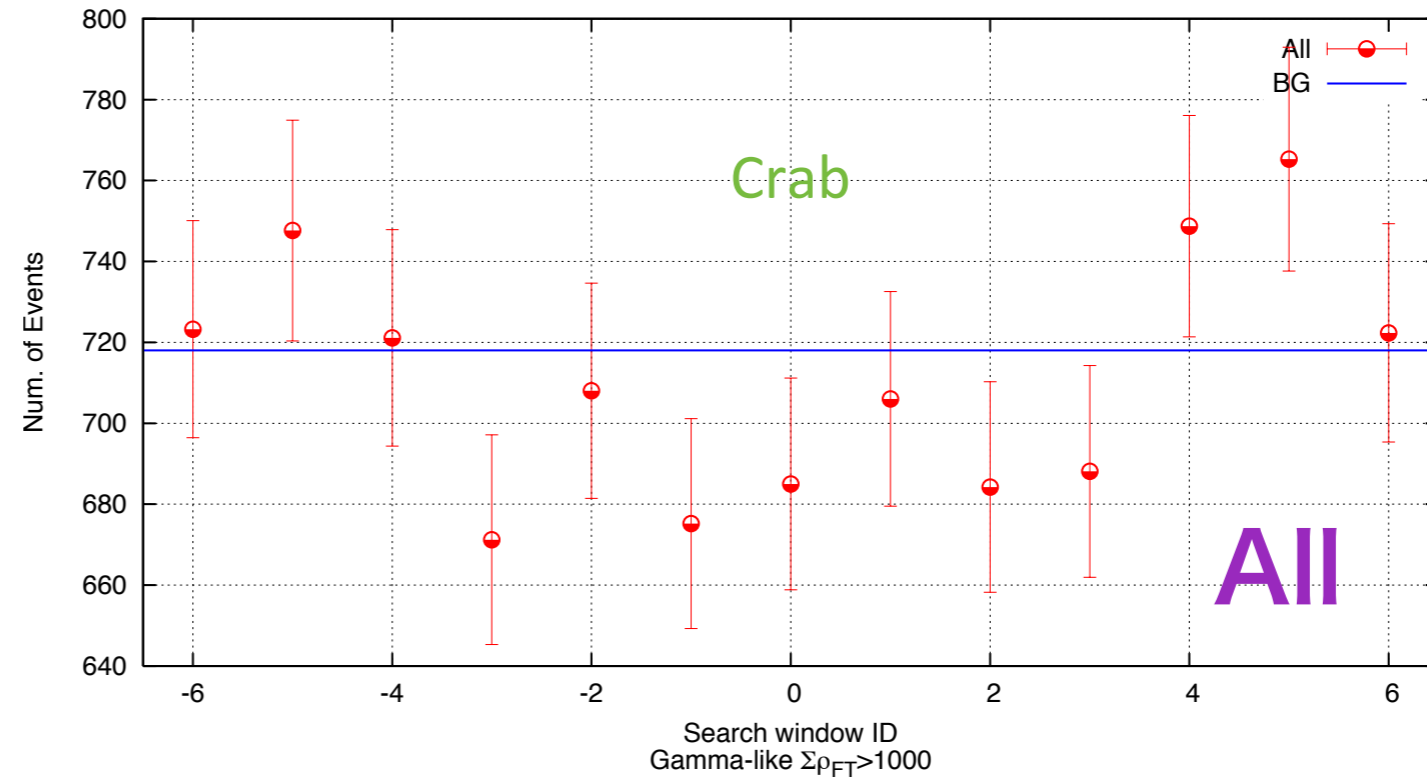
N_{off} : Ave. of off-source events

$$= \sum_{i=10} N_i$$

解析結果(1)

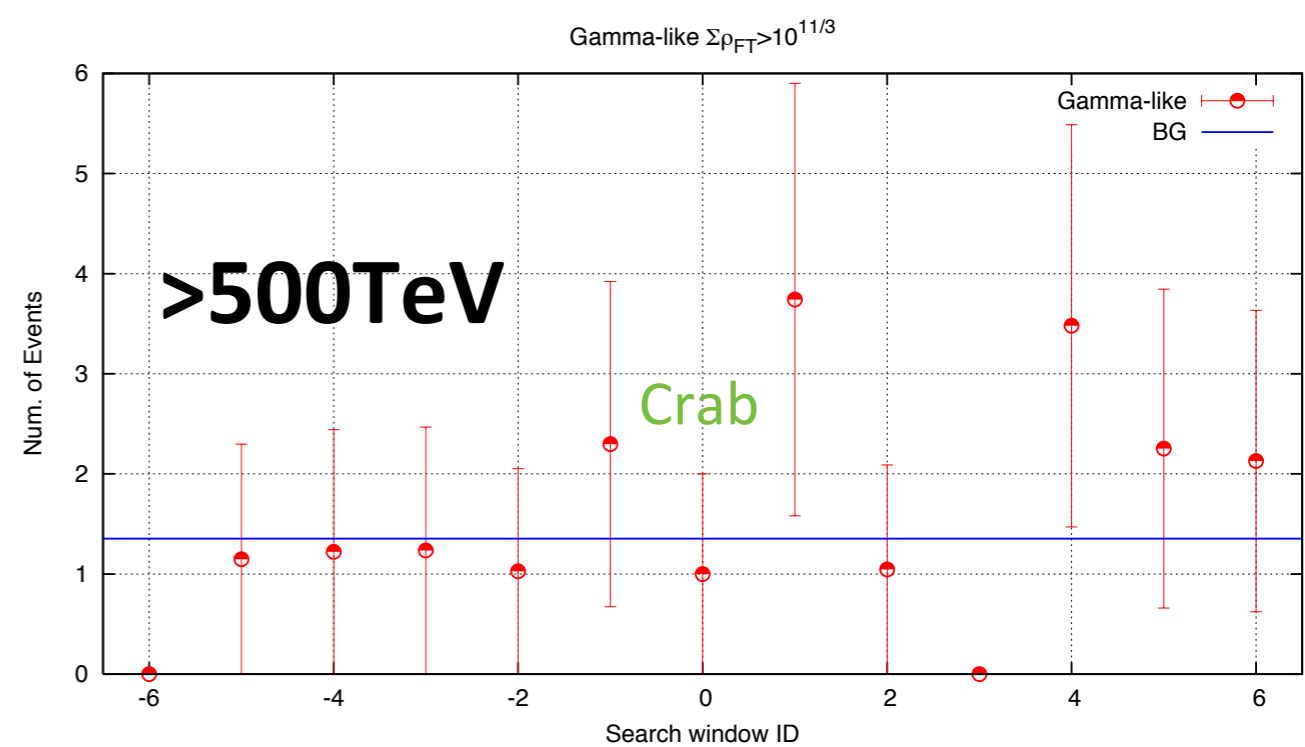
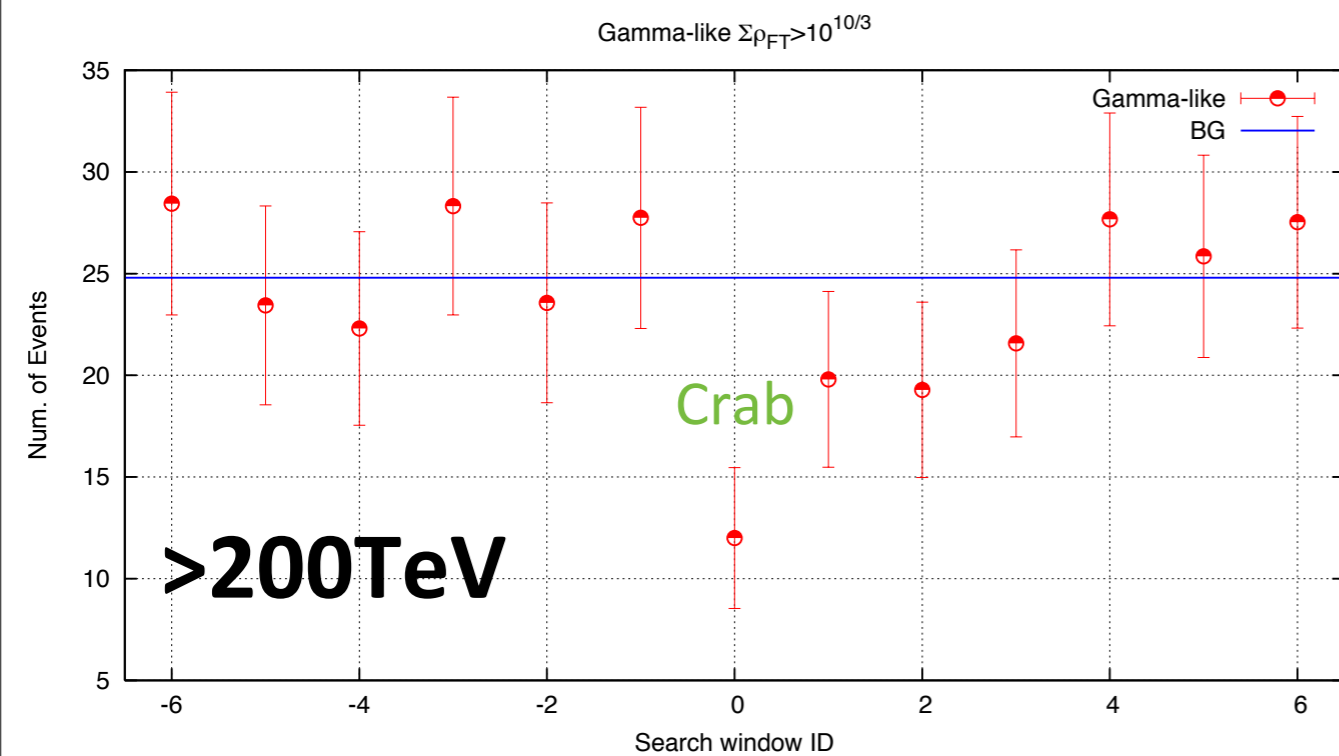
>100TeV

All $\Sigma\rho_{FT}>1000$



No significant excess

解析結果 (2)

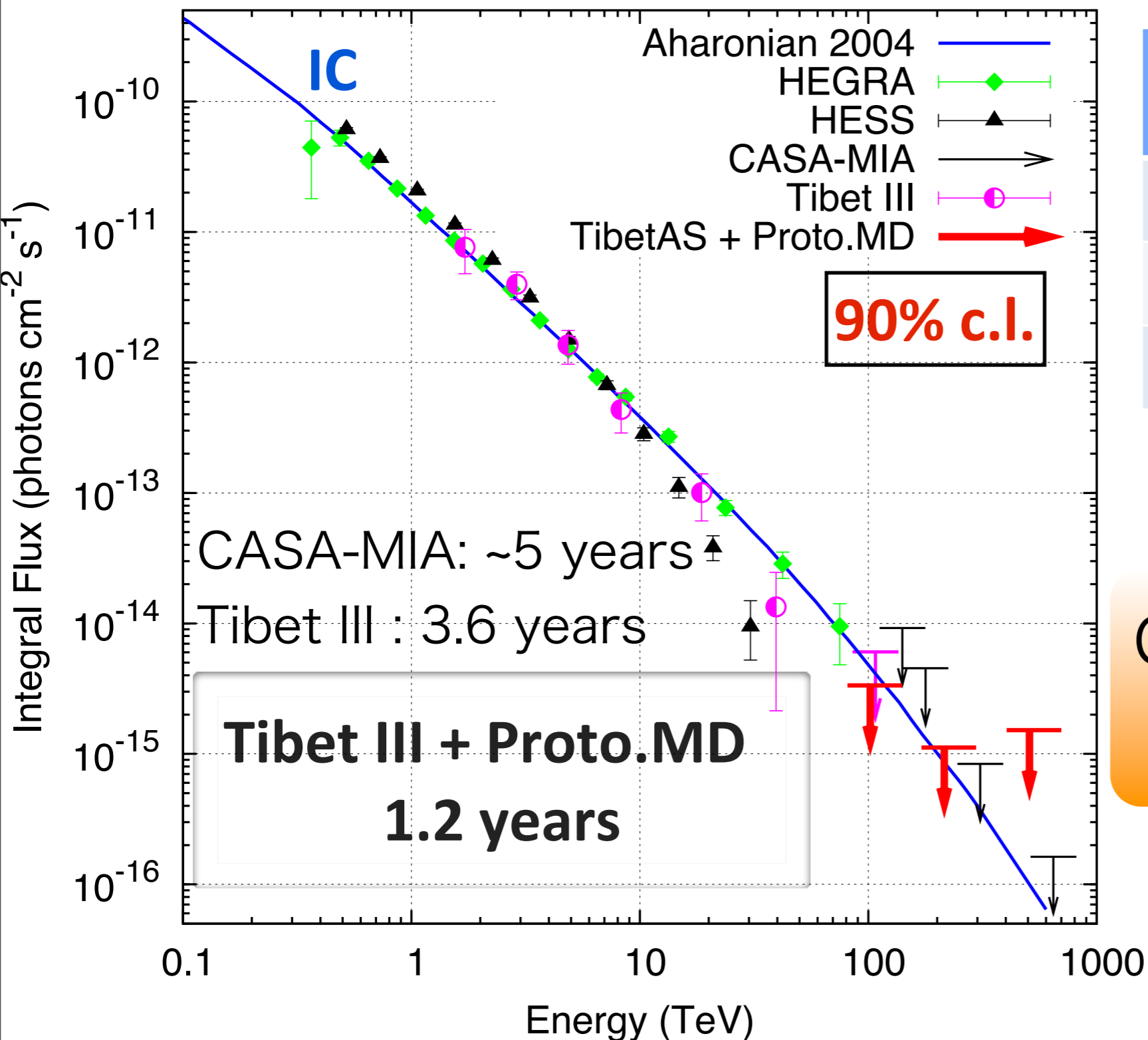


No significant excess

No significant excess

Energy	統計的有意性	Non/<Noff>
> 100 TeV	-1.4 σ	179/200.1
> 200 TeV	-2.7 σ	12/24.8
> 500 TeV	-0.3 σ	1/1.35

かに星雲 積分フラックス上限値



Energy	flux 上限値(90%c.l.) [cm ⁻² sec ⁻¹]
> 100 TeV	3.35×10^{-15}
> 200 TeV	1.12×10^{-15}
> 500 TeV	1.52×10^{-15}

100TeV~200TeV
CASA-MIAと同等以上
(最も厳しい上限値)

100TeV~200TeV
 ~ 1 Crab の上限値

5. Crab Flare

Crab Flare

Fermi/LAT • AGILE

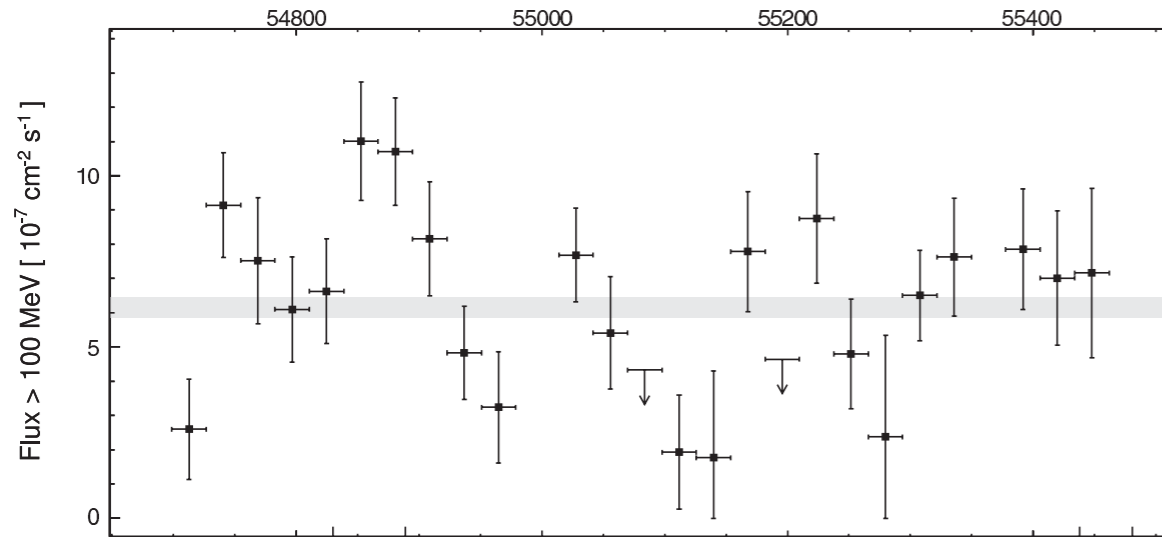
~100 MeV

2009.Feb

2010.Sep

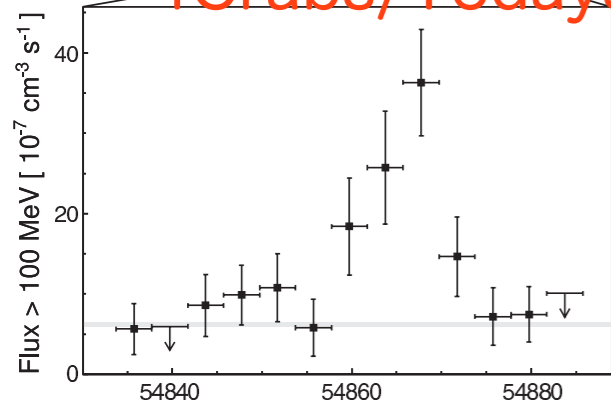
2011.Apr

[Abdo, A. A., et al. 2011, Science, 331, 739](#) MJD

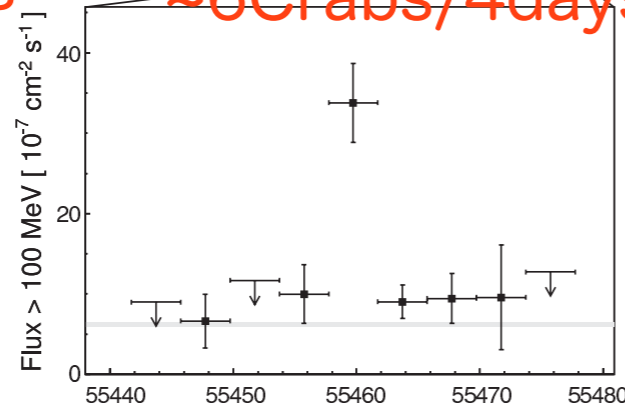


~4Crabs/16days

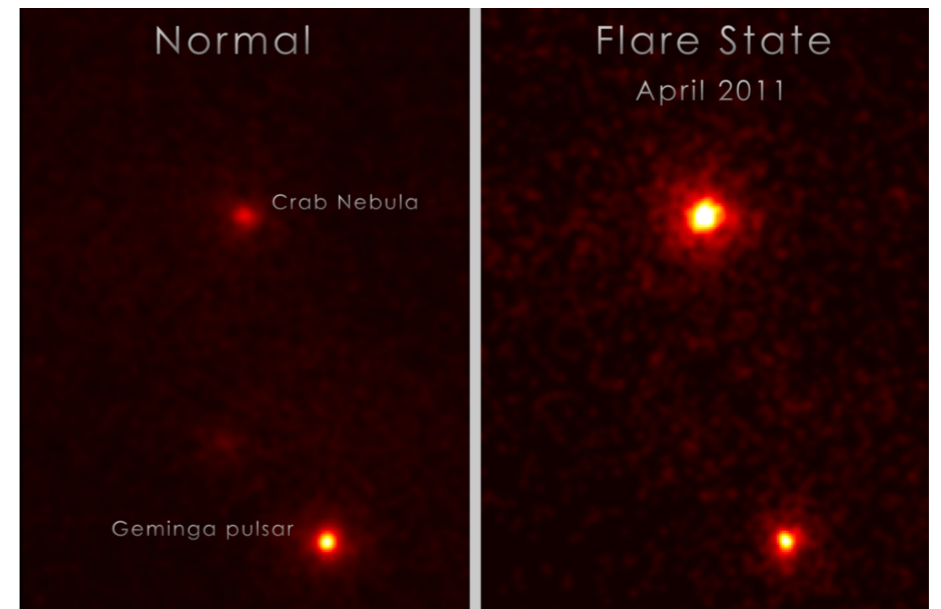
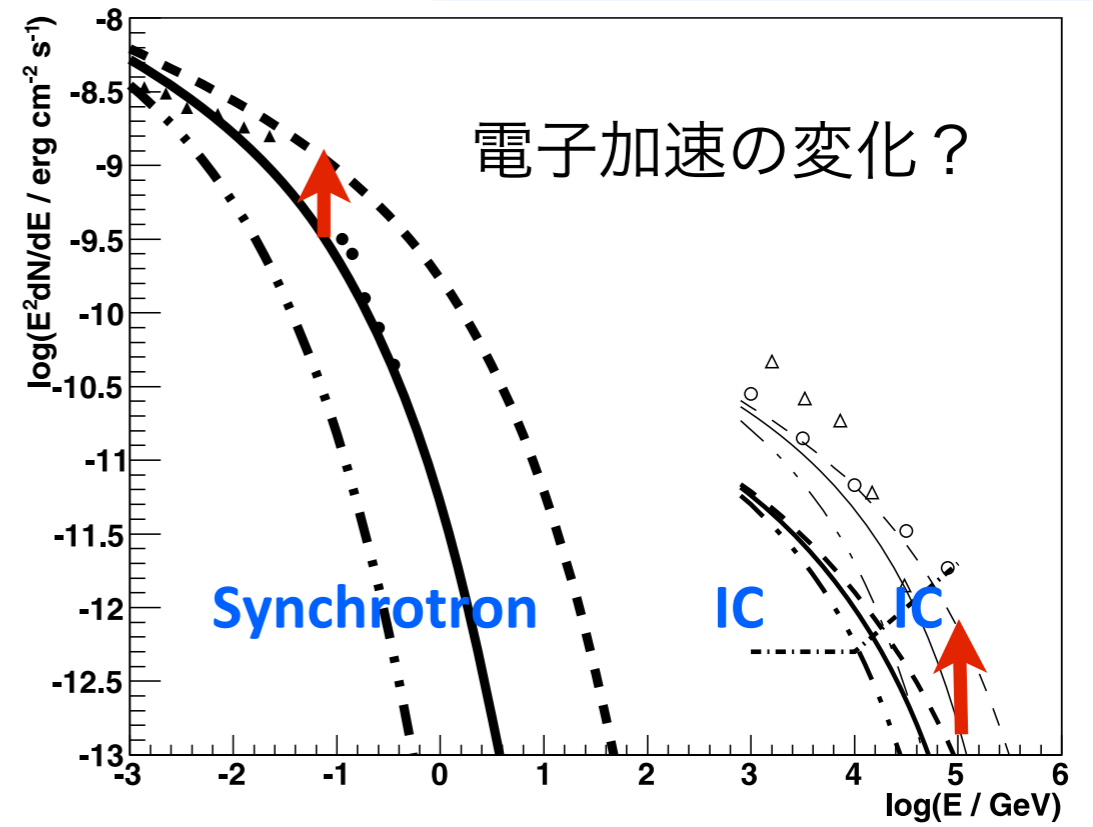
~6Crabs/4days



2009.Feb



2010.Sep



~ 30 Crab/12h ?

チベットASアレイは停止中...

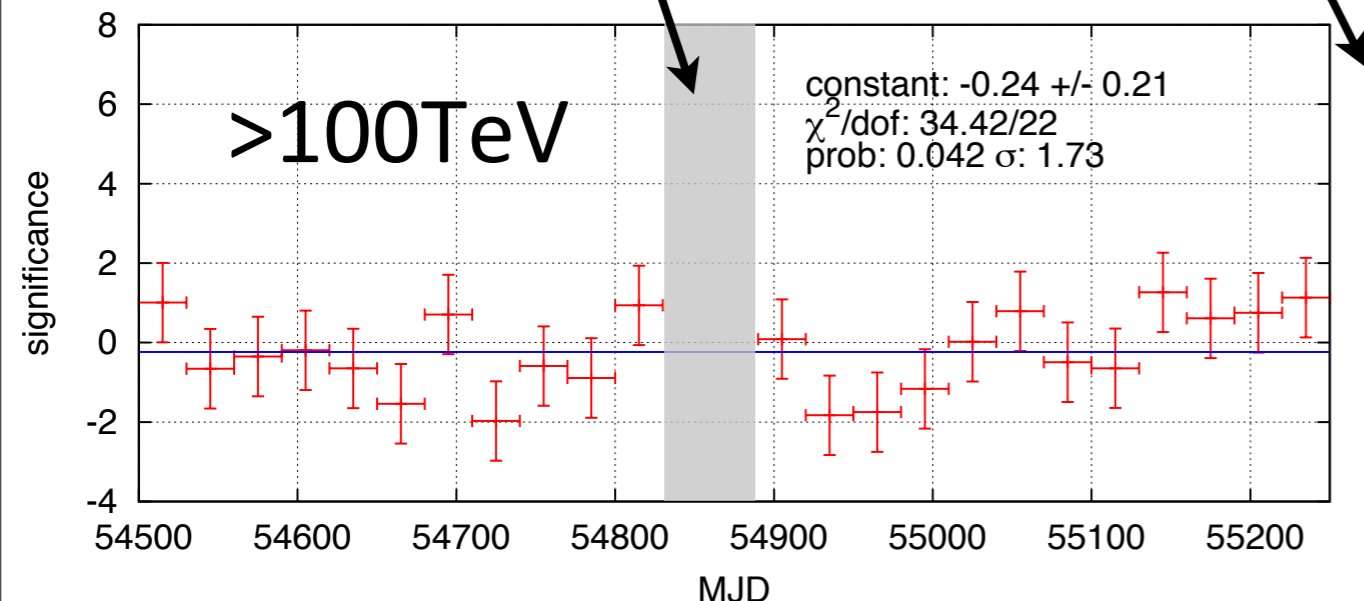
Tibet AS + Proto.MD

>100TeV, 10日、30日スケールで探索

Crab Flare Analysis

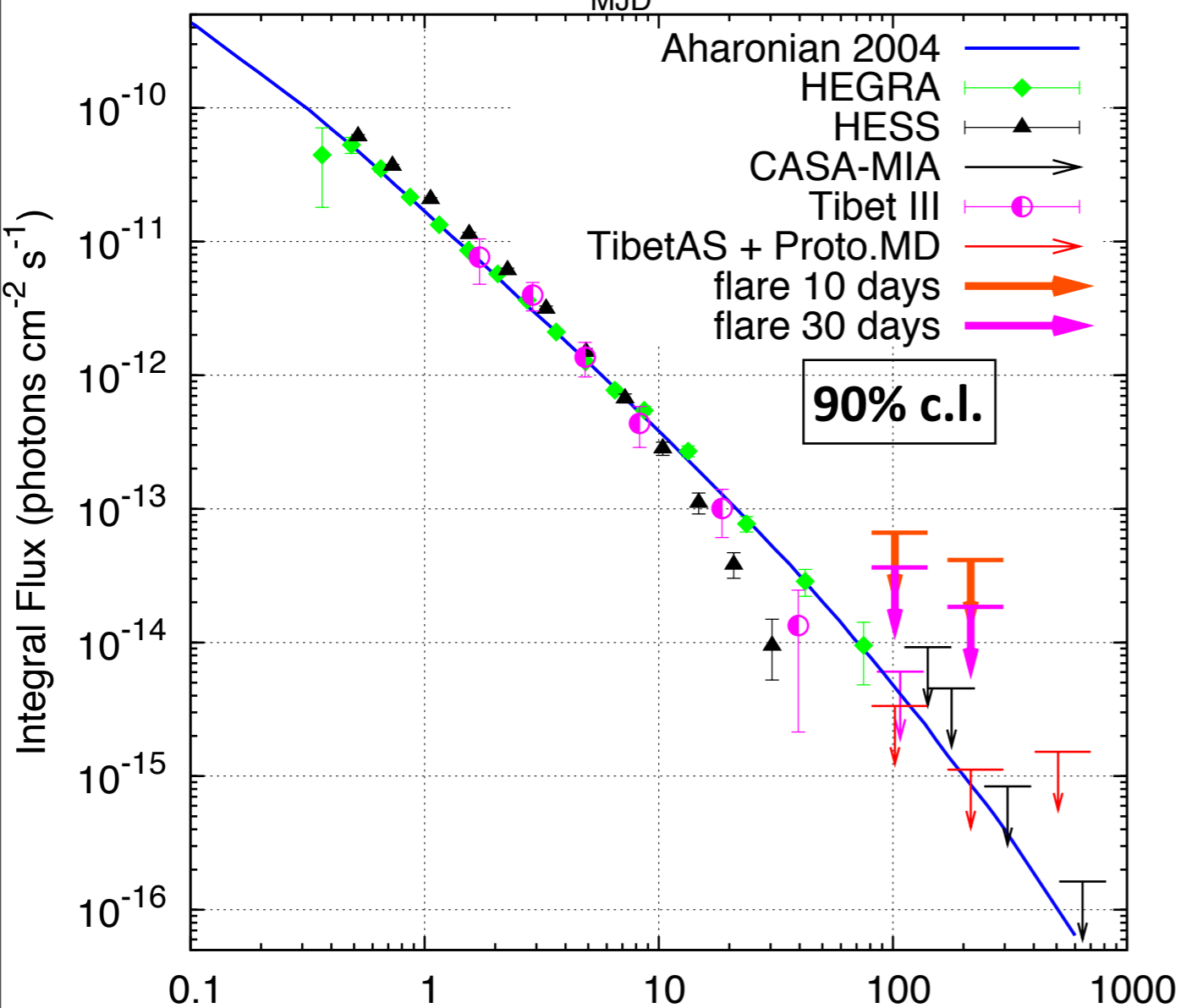
2009.Feb flare

2010.Sep flare



10 days

Energy	Significance	Flux 上限値(90% c.l.) [cm ⁻² sec ⁻¹]
> 100 TeV	-0.14σ	6.63 × 10 ⁻¹⁴
> 200 TeV	-0.34σ	2.64 × 10 ⁻¹⁴



20~24 Crabs

30 days

Energy	Significance	Flux 上限値(90% c.l.) [cm ⁻² sec ⁻¹]
> 100 TeV	-0.24σ	3.64 × 10 ⁻¹⁴
> 200 TeV	-0.07σ	1.84 × 10 ⁻¹⁴

11~16 Crabs

6. Conclusion

Conclusion

“チベット空気シャワーアレイ及び
プロトタイプミュオン検出器を用いた
高エネルギーガンマ線の研究”

Tibet ASアレイ+プロトタイプミュオン検出器(100m²)

ミュオン数によるガンマ線/宇宙線弁別 → 感度~2倍 >100TeV

Full-scale MD MC check

- <~10TeV OK

かに星雲からの定常的100TeV領域ガンマ線

- 統計的有意なシグナルなし
- 積分フラックスに90%c.l.上限値 ~1Crab

かに星雲からの100TeV領域フレアを10日・30日スケールで探索

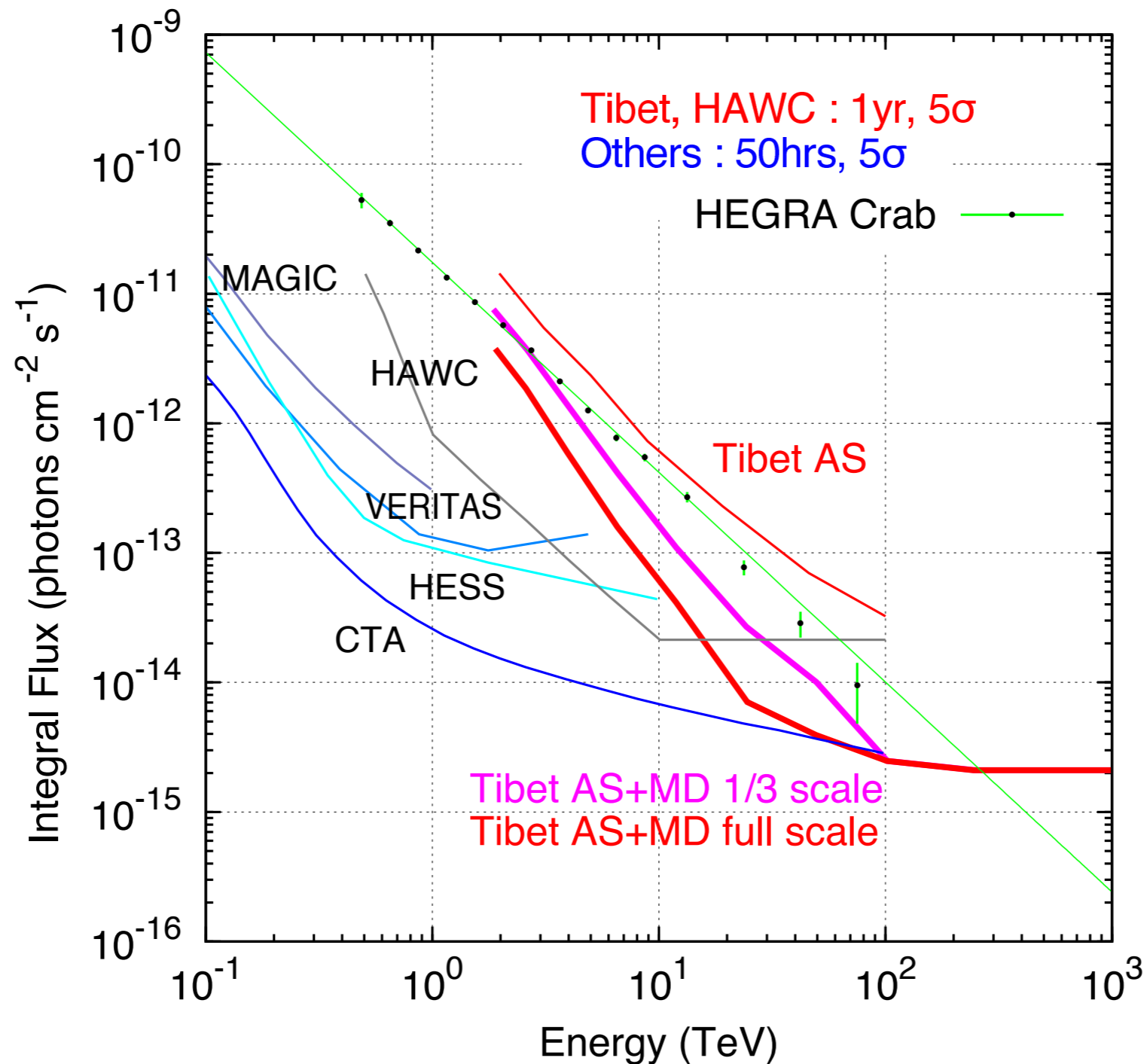
(かに星雲のフレア (100MeV) :6Crabs/4days, 4Crabs/16days)

- 統計的有意なフレアは検出されず
- 上限値(90%c.l.) 20~24Crabs(/10days)、11~16Crabs(/30days)

Near future prospect

◆ プロトタイプの40倍面積のMDが稼働予定 (2012)

→ 期待される感度：3~4倍@10TeV, ~15倍@100TeV



ご清聴ありがとうございました

組織的な若手研究者等海外派遣プログラム
「グローバルな宇宙天文観測」
ご支援ありがとうございました。
(2011.05.30 - 07.05 チベットでのMD建設作業)

