

Tibet実験とMCシミュレーション

佐古 崇志

for the Tibet AS γ Collaboration

2015.3.19

内容

- 1) チベット空気シャワー実験
- 2) チベット MD 計画(約10,000 m²)の MC シミュレーション
- 3) プロトタイプ MD(約100 m²) による MC シミュレーションの検証
- 4) 現在のチベット MD(約4,000 m²)
- 5) まとめ

The Tibet AS γ Collaboration



M. Amenomori¹, X. J. Bi², D. Chen³, T. L. Chen⁴, W. Y. Chen², S. W. Cui⁵, Danzengluobu⁴, L. K. Ding², C. F. Feng⁶, Zhaoyang Feng², Z. Y. Feng⁷, Q. B. Gou², Y. Q. Guo², H. H. He², Z. T. He⁵, K. Hibino⁸, N. Hotta⁹, Haibing Hu⁴, H. B. Hu², J. Huang², H. Y. Jia⁷, L. Jiang², F. Kajino¹⁰, K. Kasahara¹¹, Y. Katayose¹², C. Kato¹³, K. Kawata¹⁴, M. Kozai¹³, Labaciren⁴, G. M. Le¹⁵, A. F. Li^{16,6,2}, H. J. Li⁴, W. J. Li^{2,7}, C. Liu², J. S. Liu², M. Y. Liu⁴, H. Lu², X. R. Meng⁴, T. Miyazaki¹³, K. Mizutani^{11,17}, K. Munakata¹³, T. Nakajima¹³, Y. Nakamura¹³, H. Nanjo¹, M. Nishizawa¹⁸, T. Niwa¹³, M. Ohnishi¹⁴, I. Ohta¹⁹, S. Ozawa¹¹, X. L. Qian^{6,2}, X. B. Qu², T. Saito²⁰, T. Y. Saito²¹, M. Sakata¹⁰, T. K. Sako¹⁴, J. Shao^{2,6}, M. Shibata¹², A. Shiomi²², T. Shirai⁸, H. Sugimoto²³, M. Takita¹⁴, Y. H. Tan², N. Tateyama⁸, S. Torii¹¹, H. Tsuchiya²⁴, S. Udo⁸, H. Wang², H. R. Wu², L. Xue⁶, Y. Yamamoto¹⁰, K. Yamauchi¹², Z. Yang², S. Yasue²⁵, A. F. Yuan⁴, T. Yuda¹⁴, L. M. Zhai², H. M. Zhang², J. L. Zhang², X. Y. Zhang⁶, Y. Zhang², Yi Zhang², Ying Zhang², Zhaxisangzhu⁴, X. X. Zhou⁷

¹Department of Physics, Hirosaki University, Japan

²Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, China

³National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, China

⁴Department of Mathematics and Physics, Tibet University, China

⁵Department of Physics, Hebei Normal University, China

⁶Department of Physics, Shandong University, China

⁷Institute of Modern Physics, SouthWest Jiaotong University, China

⁸Faculty of Engineering, Kanagawa University, Japan

⁹Faculty of Education, Utsunomiya University, Japan

¹⁰Department of Physics, Konan University, Japan

¹¹Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Japan

¹²Faculty of Engineering, Yokohama National University, Japan

¹³Department of Physics, Shinshu University, Japan

¹⁴Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Japan

¹⁵National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, China

¹⁶School of Information Science and Engineering, Shandong Agriculture University, China

¹⁷Saitama University, Japan

¹⁸National Institute of Informatics, Japan

¹⁹Sakushin Gakuin University, Japan

²⁰Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, Japan

²¹Max-Planck-Institut fuer Physik, Deutschland

²²College of Industrial Technology, Nihon University, Japan

²³Shonan Institute of Technology, Japan

²⁴Japan Atomic Energy Agency, Japan

²⁵School of General Education, Shinshu University, Japan

チベット空気シャワーアレイ



中国チベット自治区 (90.522°E, 30.102°N) 4300 m a.s.l.

シンチレーション検出器 0.5 m² x 789 台

エネルギー領域 ~TeV - 100 PeV

アレイの有効面積 ~37,000 m²

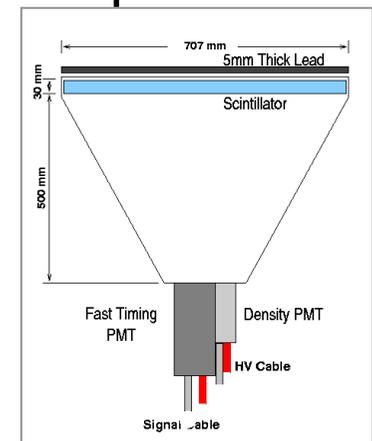
角度分解能(ガンマ線) ~0.4°@10 TeV

~0.2°@100 TeV

エネルギー分解能(ガンマ線) ~70% @10 TeV

~40% @100TeV

視野 ~2 sr



内容

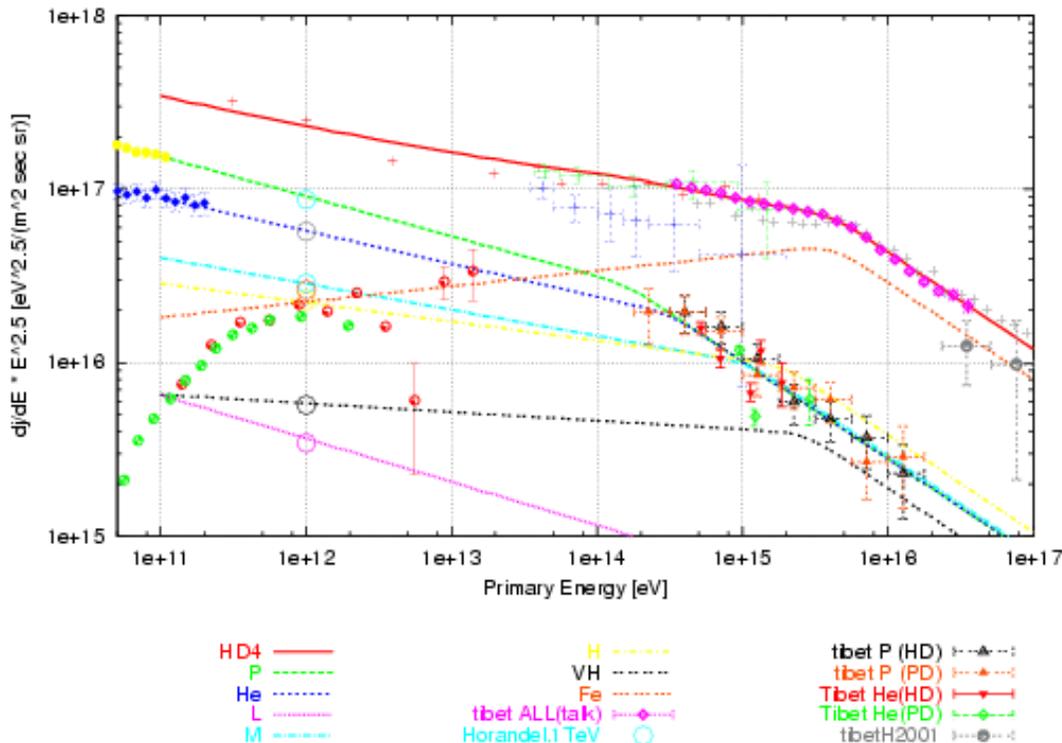
- 1) チベット空気シャワー実験
- 2) チベット MD 計画(約10,000 m²)の MC シミュレーション
- 3) プロトタイプ MD(約100 m²) による MC シミュレーションの検証
- 4) 現在のチベット MD(約4,000 m²)
- 5) まとめ

空気シャワーのシミュレーション

一次粒子

CORSIKA ver6.204 <https://web.i kp.kit.edu/corsika/>

- ガンマ線 : 0.3 TeV – 10 PeV、 3.9×10^7 イベント
かに星雲軌道、微分スペクトルの巾 -2.6 を仮定
- 宇宙線 : 0.3 TeV – 10 PeV、 1.8×10^8 イベント
かに星雲軌道
観測に基づく化学組成スペクトラムを仮定



Hadronic interaction model
QGSJET01c + fluka

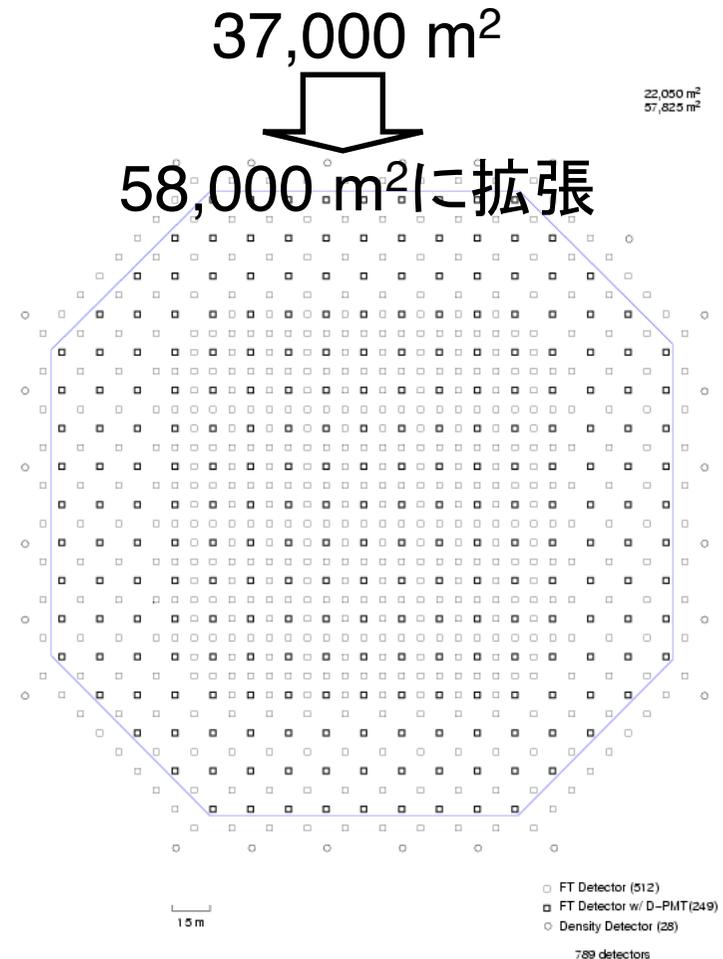
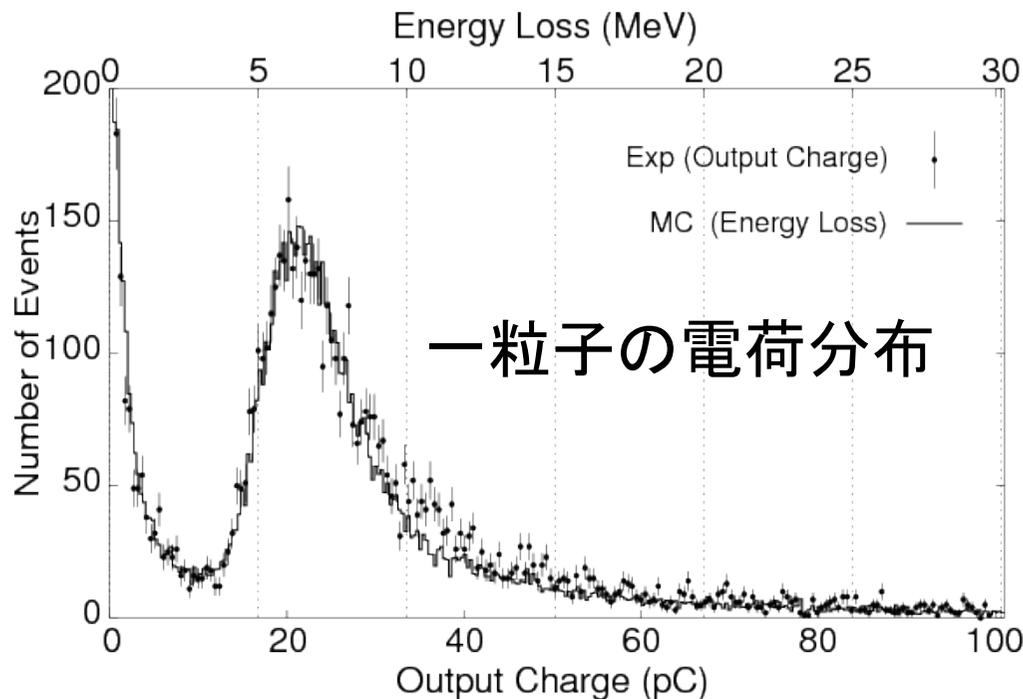
二次粒子の運動エネルギー
hadrons > 50 MeV
muons > 50 MeV
 $e^+e^- \gamma$ > 1 MeV

空気シャワーアレイ(ASアレイ)のシミュレーション

EPICS uv8.00

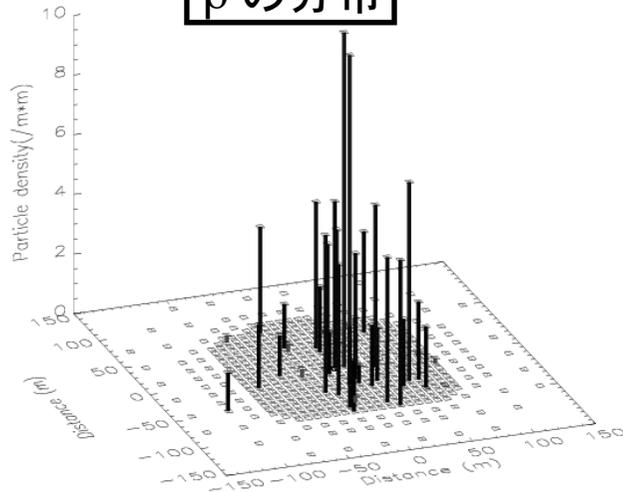
<http://cosmos.n.kanagawa-u.ac.jp/~kasahara/ResearchHome/EPICSHome/index.html>

空気シャワーのコア位置をアレイの中心から半径 300 m 以内にランダムに落とし、空気シャワー二次粒子を検出器に入射する。



空気シャワーアレイ(ASアレイ)のシミュレーション

ρ の分布

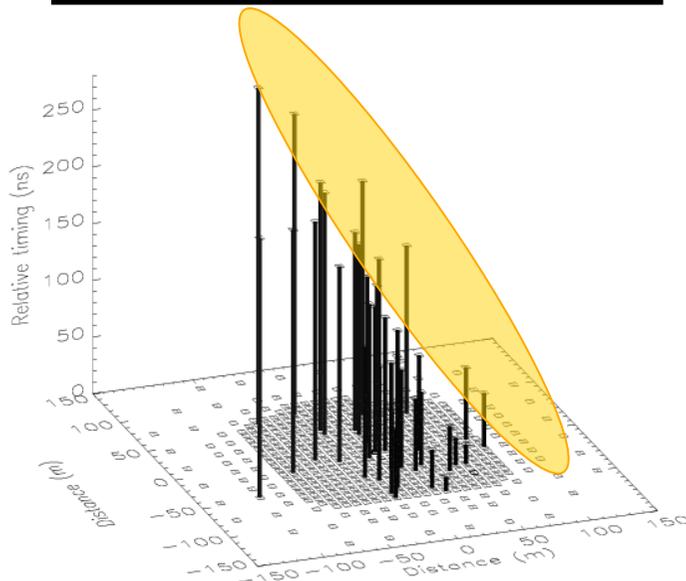


ρ : 検出器の検出粒子数 (1 粒子 ~20 pC) を
検出器の面積 (0.5 m²) で割った値

$\Sigma\rho$: 全ての検出器の ρ の和

ρ の分布から空気シャワーのコア位置を求める。

検出器間の相対的タイミング



コーンフィットを用いてシャワーフロントを再構成し、
空気シャワーの到来方向を決定する。

空気シャワーアレイ(ASアレイ)のシミュレーション

ASアレイによる空気シャワーイベントの選別

- 1) インナーエリアで 4 台以上の検出器が 1.25 粒子以上検出
- 2) 空気シャワーのコアがアレイの中にある
- 3) 空気シャワーイベントをコーンフィットした際の残差 $\chi < 1.0$ m

解析窓による空気シャワーイベントの選別

解析窓：点源方向を中心とする円
半径はS/Nが良くなるように設定する

窓半径：
$$W = \frac{6.9}{\sqrt{\Sigma\rho}} \quad (\text{最大 } 1.6 \text{ deg.、最小 } 0.3 \text{ deg.})$$

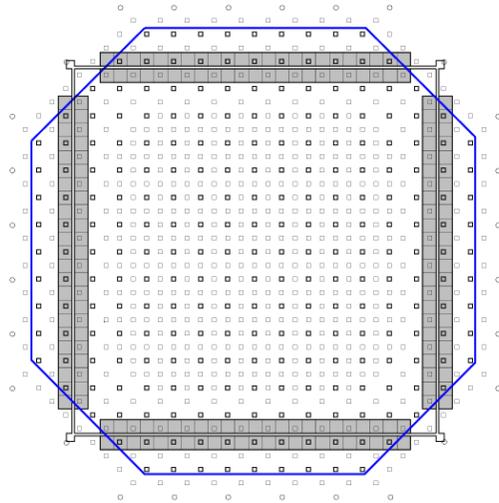
ミューオン観測装置(MDアレイ)のシミュレーション

MD ~10,000 m²

(外周型)

A

22,050 m²
57,825 m²
2006.07.25 Ver.0.25



15 m

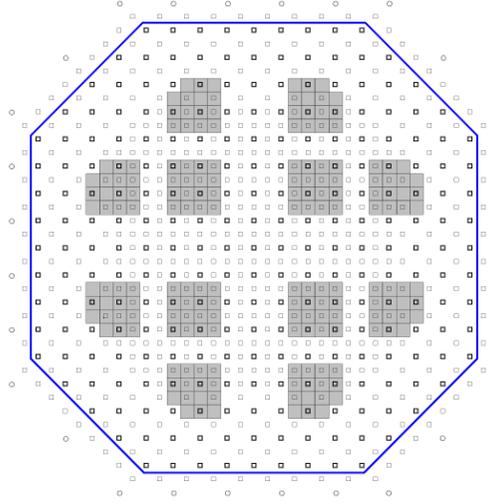
- UG Cherenkov Detector (184)
1619,540 m²
- FT Detector (512)
- FT Detector w/ D-PMT(249)
- Density Detector (28)

789 detectors

(クラスター型)

B

22,050 m²
57,825 m²
2006.07.03 Ver.0.20c



15 m

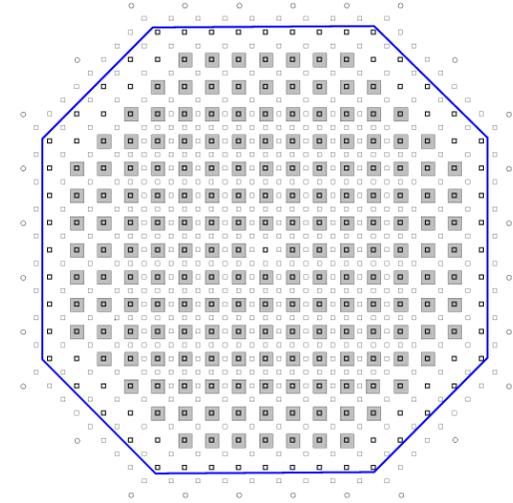
- UG Cherenkov Detector (184)
1619,540 m²
- FT Detector (512)
- FT Detector w/ D-PMT(249)
- Density Detector (28)

789 detectors

(分散型)

C

22,050 m²
57,825 m²
2006.07.03 Ver.0.24



15 m

- UG Cherenkov Detector (184)
1619,540 m²
- FT Detector (512)
- FT Detector w/ D-PMT(249)
- Density Detector (28)

789 detectors

厚さ 2 m の土壌の下に設置する。

土壌：組成 SiO₂ 70% Al₂O₃ 20% CaO 10%

密度 2 g/cm³

水の上の物質質量 : 515 g/cm² ~19 r.l.

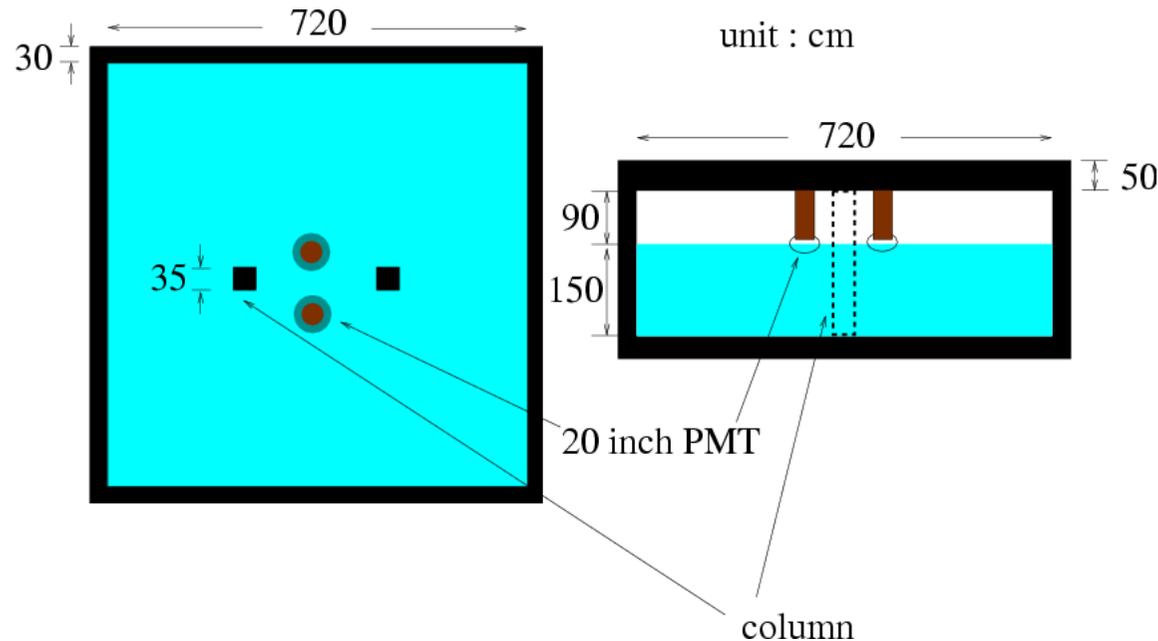
□ : インナーエリア

ミューオン観測装置(MDアレイ)のシミュレーション

GEANT4 8.0

<http://geant4.cern.ch>

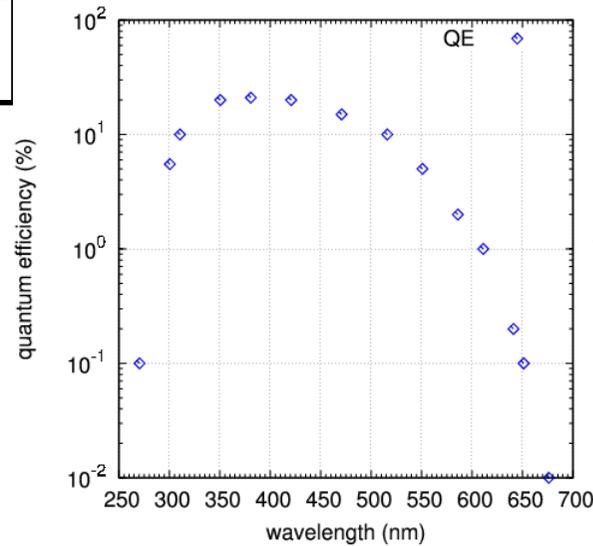
セルの構造



- セルの壁 : 組成 SiO_2 100% 密度 2.3 g/cm^3
- 水と壁の境界 : 反射率 70% 完全乱反射
- 空気層と壁の境界 : 反射率 0%
- 水と空気層の境界 : 正反射または透過

ミューオン観測装置(MDアレイ)のシミュレーション

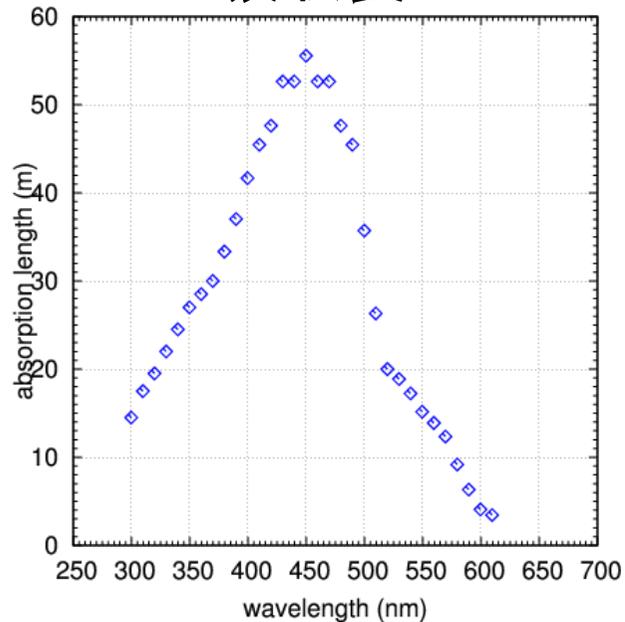
PMT の量子効率



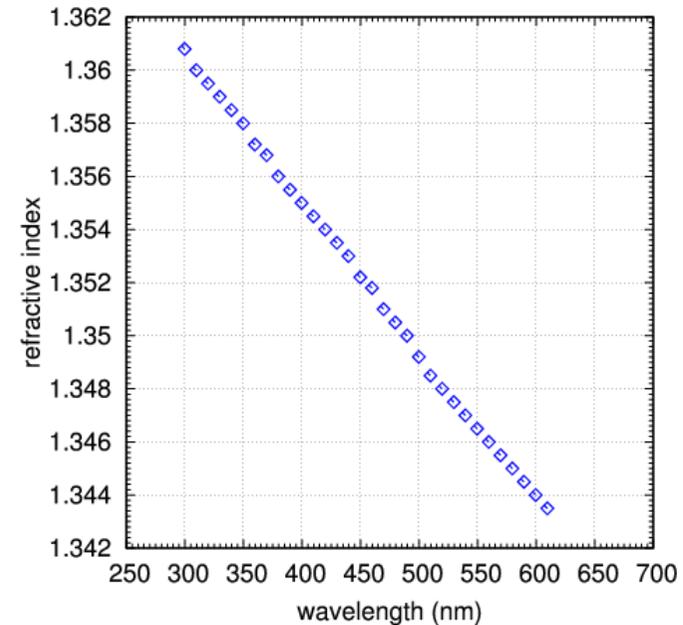
~20% (350 – 450 nm)

水の性質

吸収長



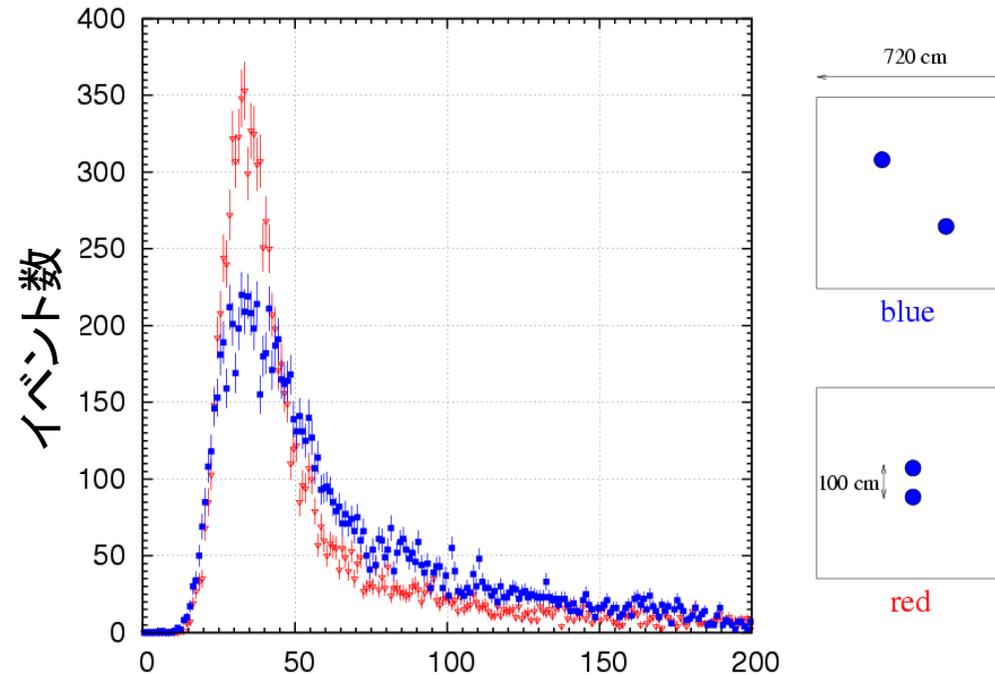
屈折率



ミューオン観測装置(MDアレイ)のシミュレーション

PMT の場所の比較

セル上面の一様な場所から垂直方向に 3 GeV のミューオンを 10,000 イベント入射させた。

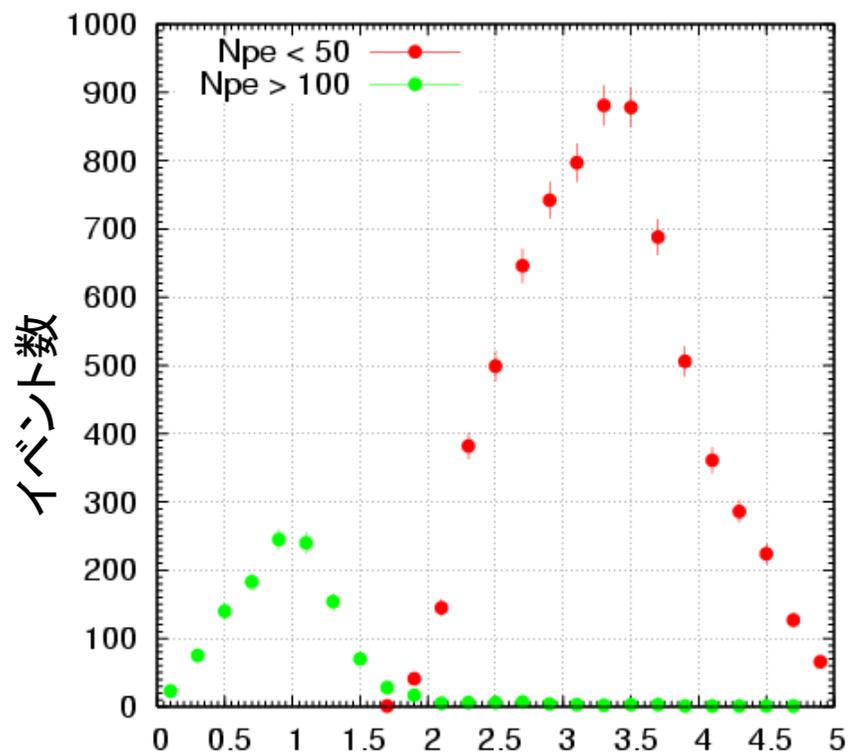


2つのPMTの検出光電子数の和

赤の配置のほうが、検出光電子数がミューオンの入射位置に依存しにくい。

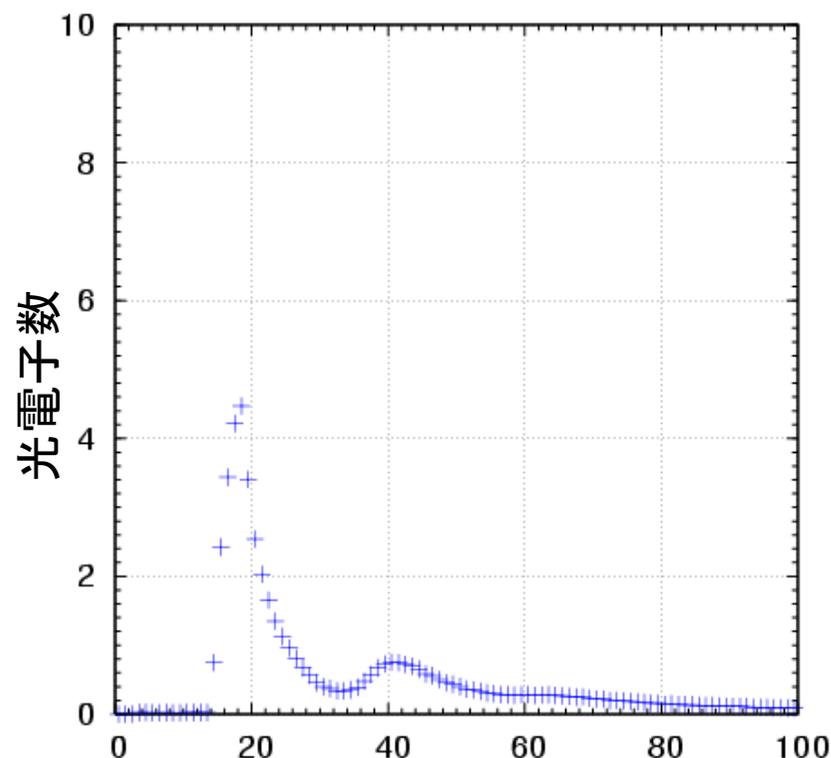
ミューオン シングルピーク = $34^{+140\%}_{-18\%}$ p.e.

ミューオン観測装置(MDアレイ)のシミュレーション



セル中心から入射位置までの距離(m)

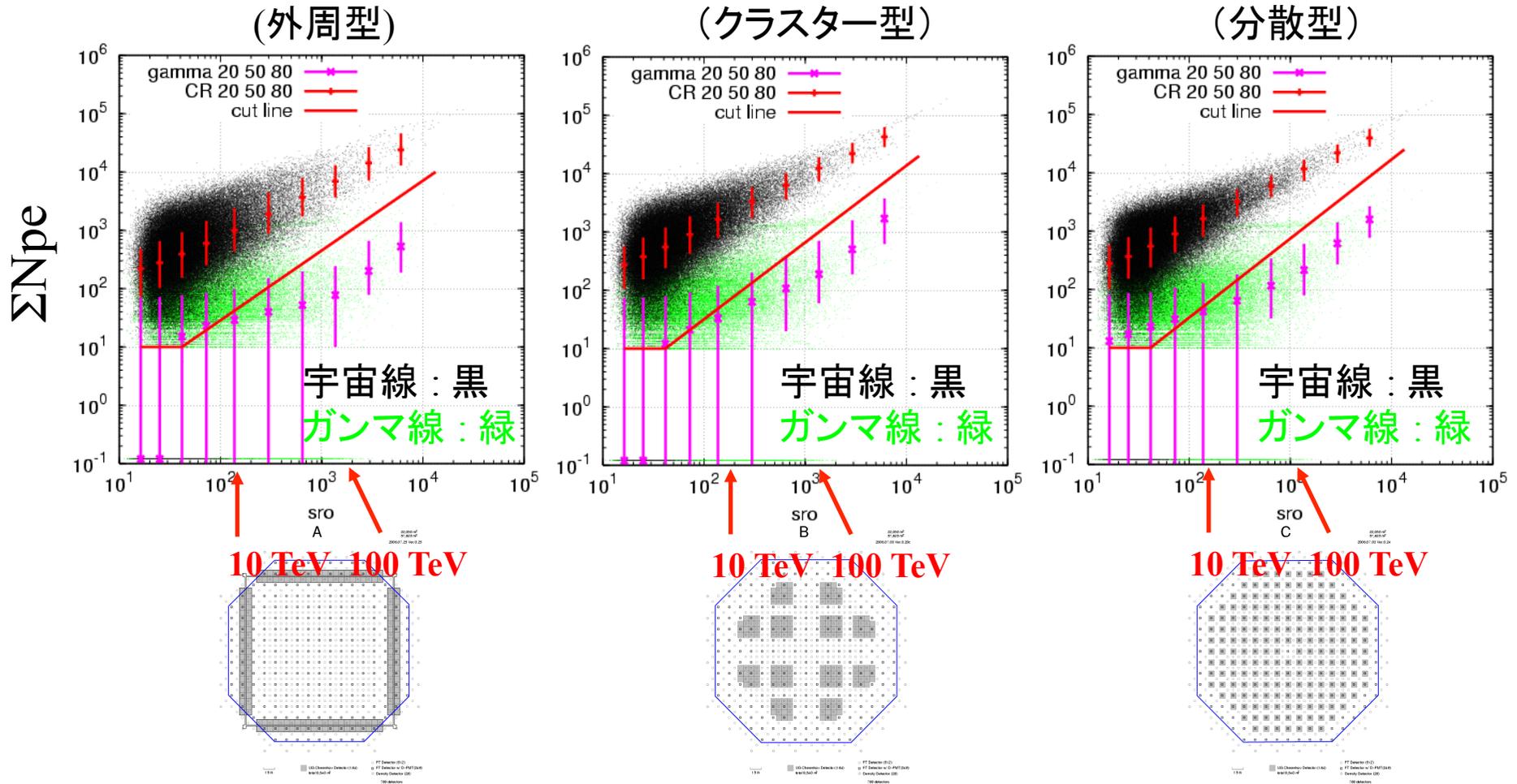
セル中心付近に入射したミューオンが光電子数分布の右側のすそを作っている。



光電子が検出されるまでにかかった時間 (ns)

検出されるチェレンコフ光は2回反射程度まで。
100 ns の間に 95% 入る。

$\Sigma\rho$ と ΣN_{pe} の関係

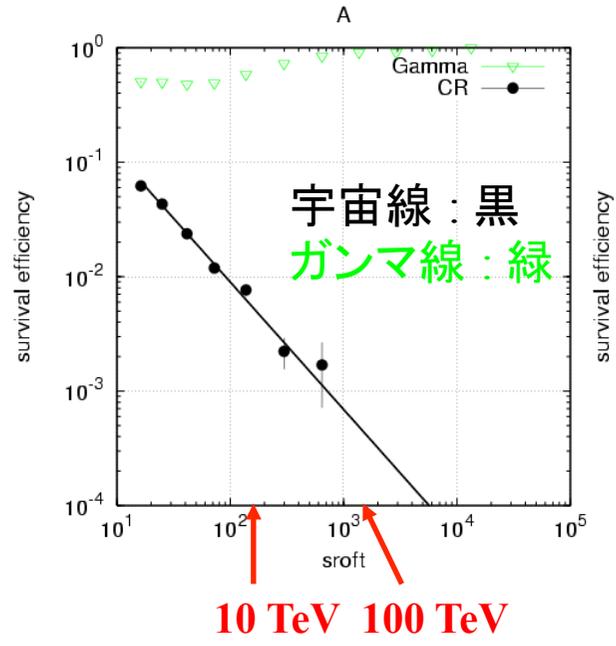


ΣN_{pe} によるカット

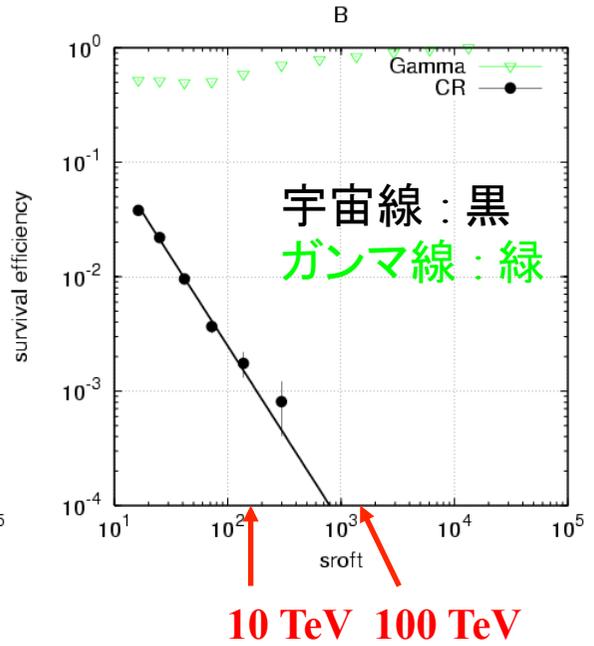
宇宙線イベント数を N 、ガンマ線イベント数を S としたとき、
 $\frac{S}{\sqrt{N+S}}$ がもっとも改善されるように ΣN_{pe} によるカットを決める。

ΣNpe によるカット後のイベント生存率

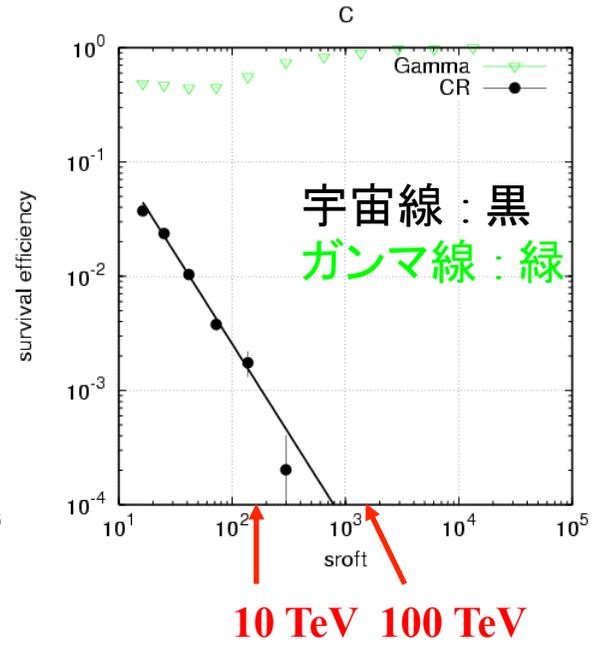
(外周型)



(クラスター型)



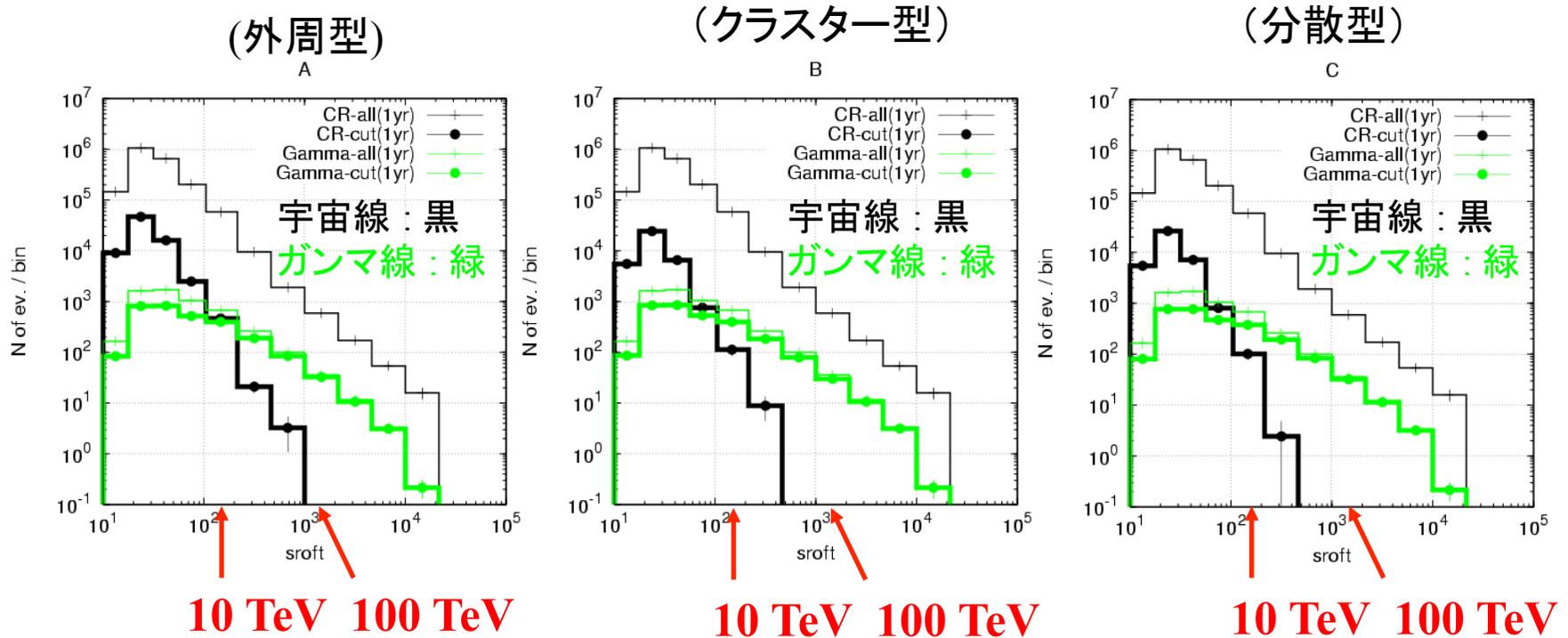
(分散型)



	ガンマ線	宇宙線	ガンマ線	宇宙線	ガンマ線	宇宙線
10 TeV	59%	0.76%	56%	0.15%	52%	0.15%
100 TeV	91%	~0.06%	80%	~0.004%	82%	~0.004%

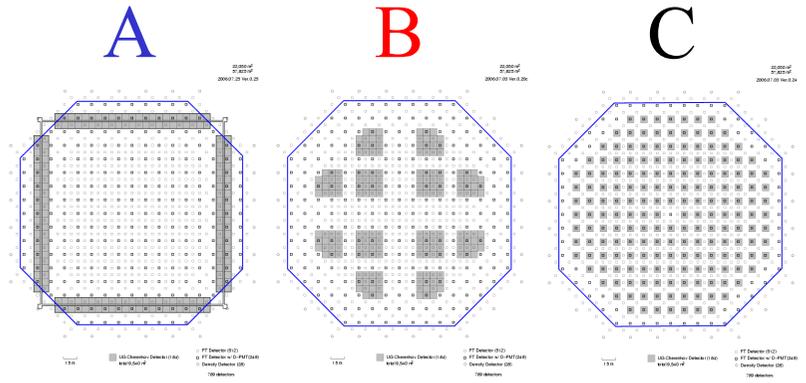
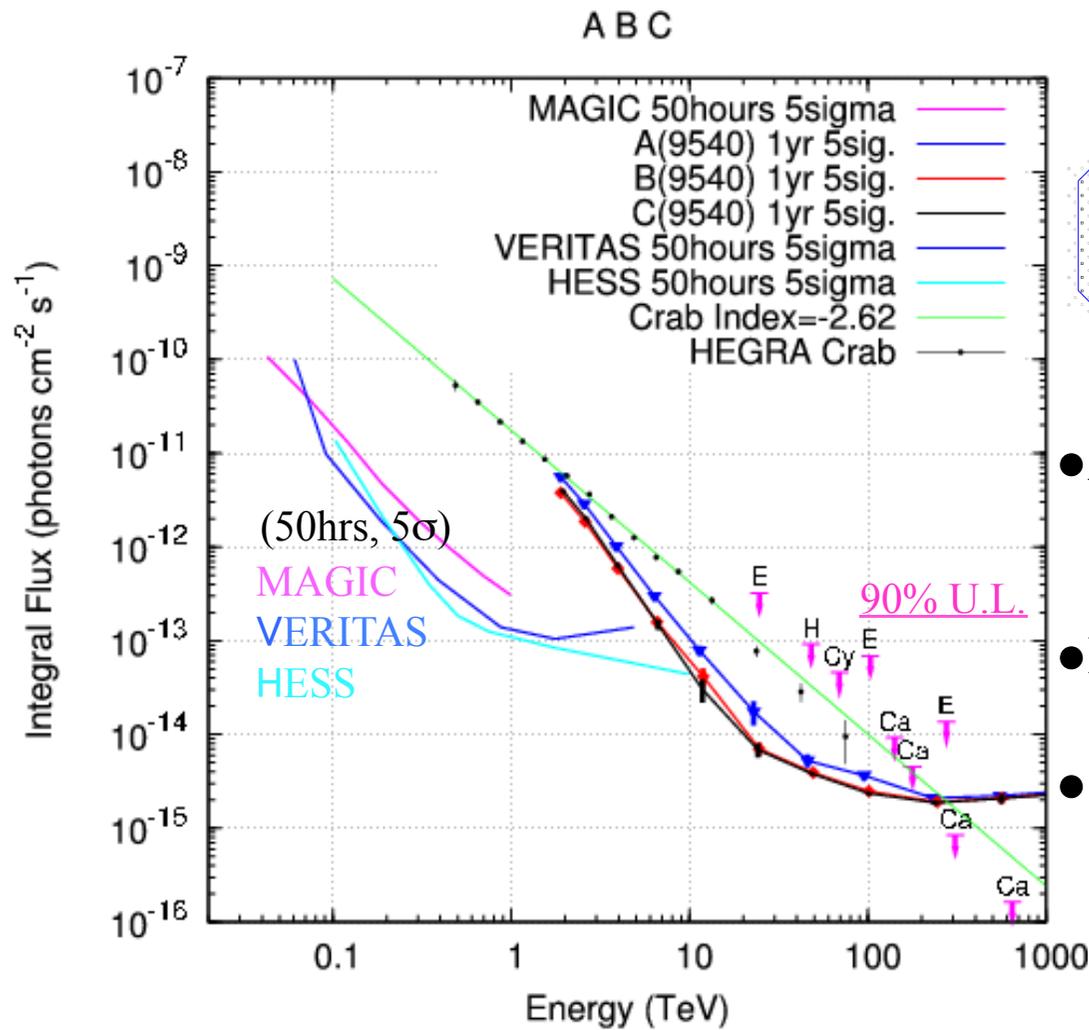
ΣN_{pe} によるカット前後のイベント数の $\Sigma\rho$ 分布

1 年の観測で得られる解析窓内のイベント数
(かに星雲、巾 -2.6 を仮定)

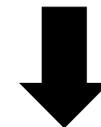


B(クラスター型)では、 $>50\text{TeV}$ でガンマ線 120 個に対して
バックグラウンド宇宙線 ~ 1 個となる。

1年の観測による感度曲線(5 σ or 10 events)



- AよりBCの方が数10 TeVで2倍程度感度がよい。
- BとCに大きな差はない。
- Bの方がCに比べてMDの建設が容易である。

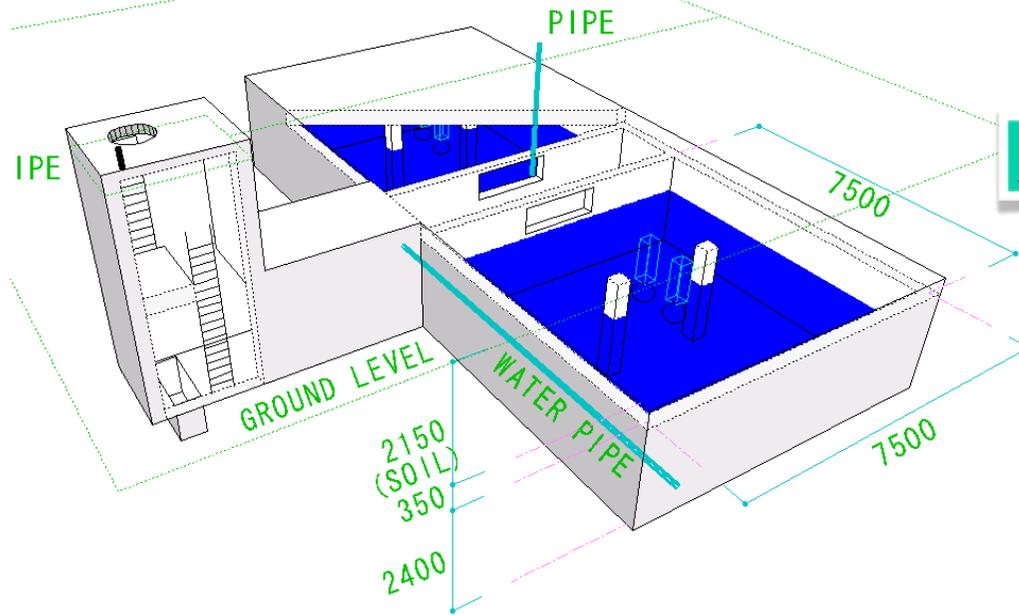


B (クラスター型) の配置を採用する。

内容

- 1) チベット空気シャワー実験
- 2) チベット MD 計画(約10,000 m²)の MC シミュレーション
- 3) プロトタイプ MD(約100 m²) による MC シミュレーションの検証**
- 4) 現在のチベット MD(約4,000 m²)
- 5) まとめ

プロトタイプMD(Muon Detector)



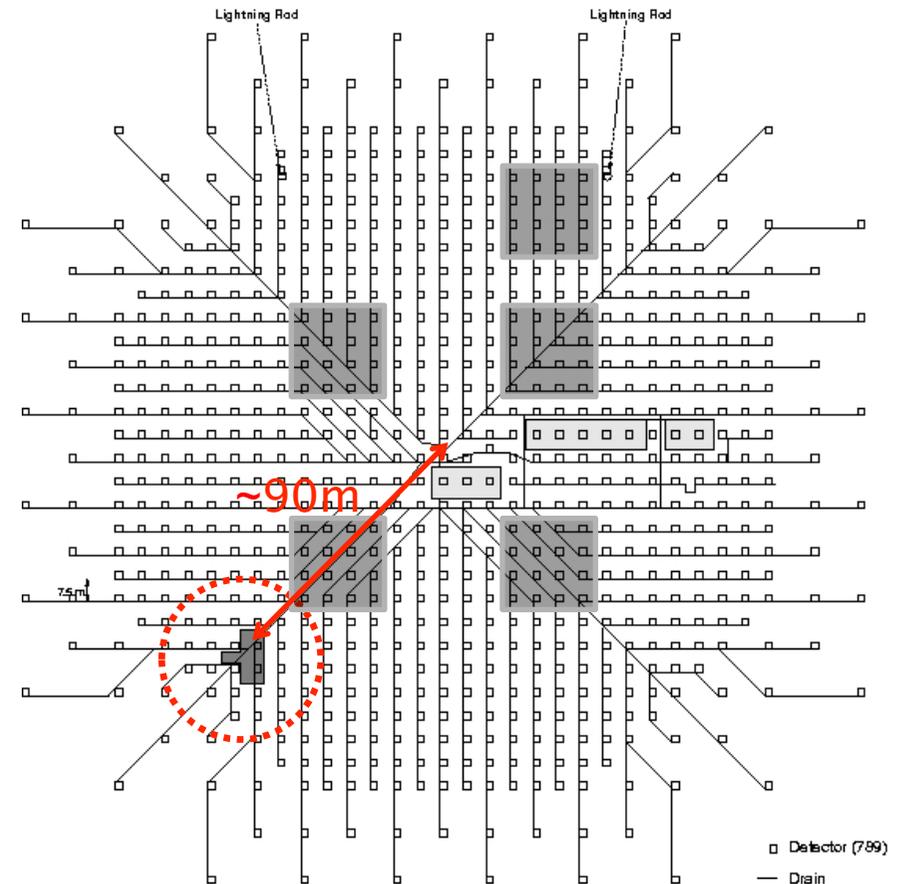
水深 1.5m 52m²x 2 プール

- ◆ 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

2007年 9月:建設開始

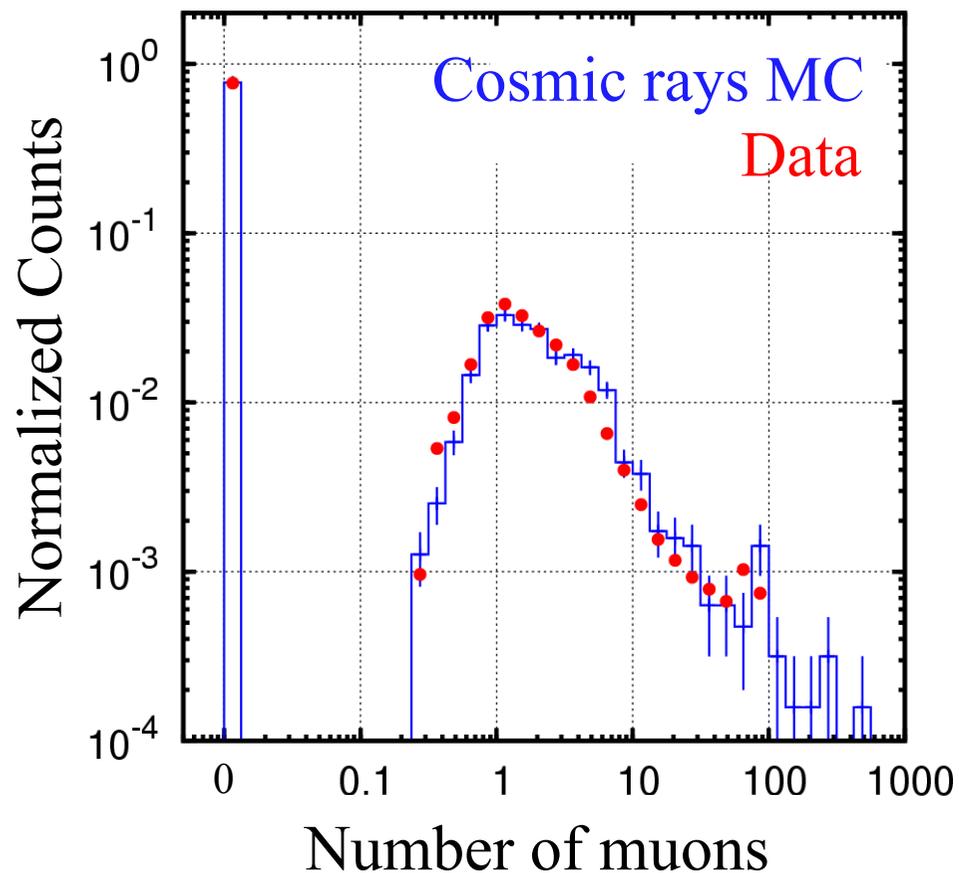
2007年12月:データ取得開始

2010年 3月:データ取得終了

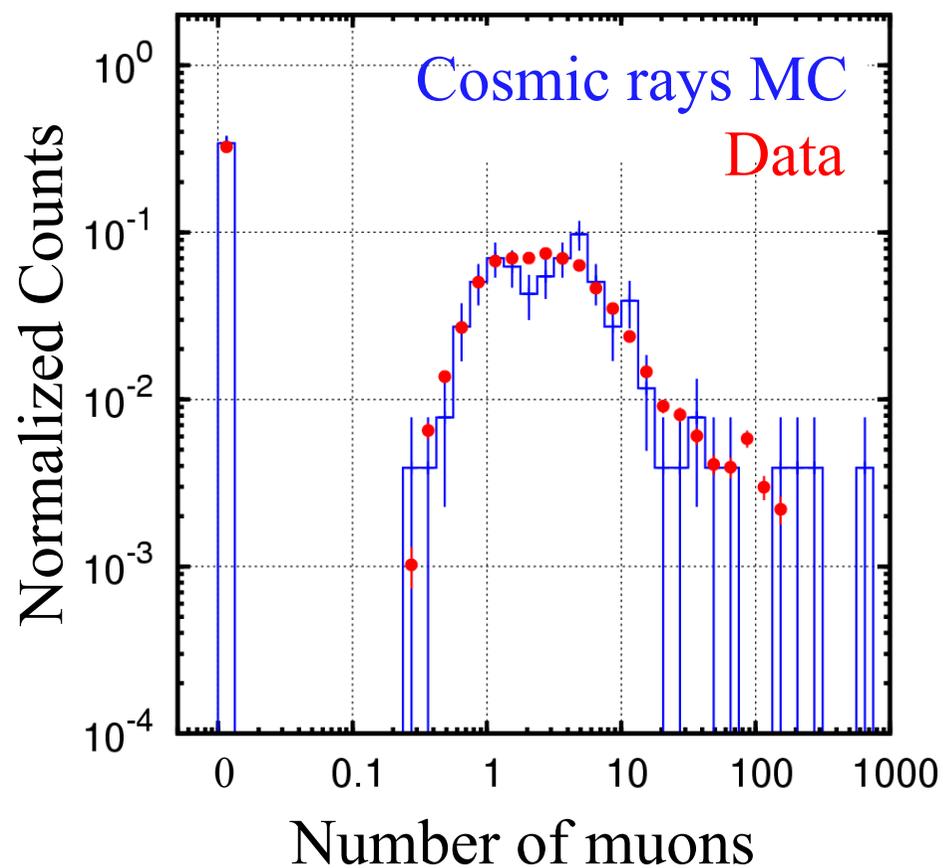


Number of muons

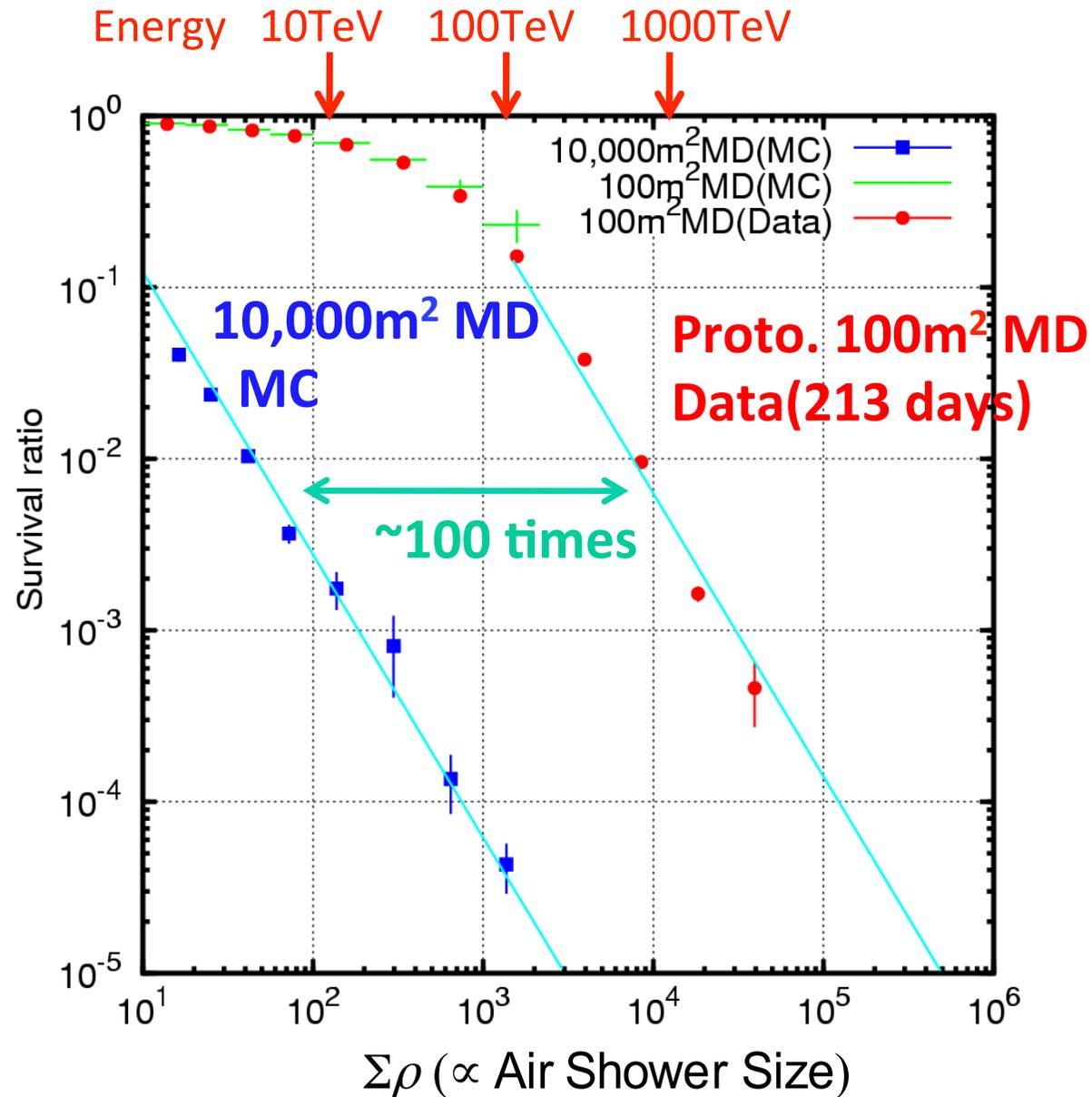
~10 TeV Air Showers



~100 TeV Air Showers



Cosmic Ray (Nucleus) Survival Ratio

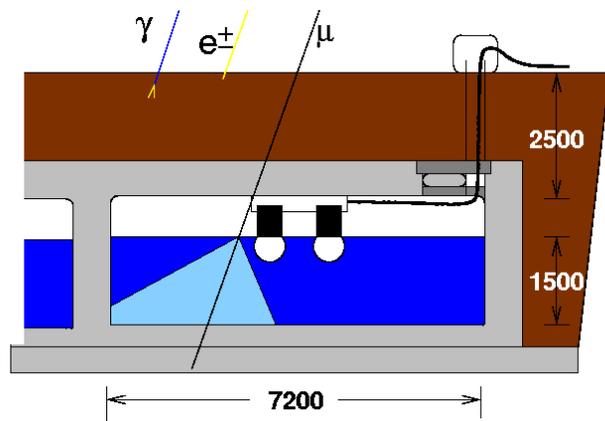


内容

- 1) チベット空気シャワー実験
- 2) チベット MD 本計画(約10,000 m²)の MC シミュレーション
- 3) プロトタイプ MD(約100 m²) による MC シミュレーションの検証
- 4) 現在のチベット MD(約4,000 m²)**
- 5) まとめ

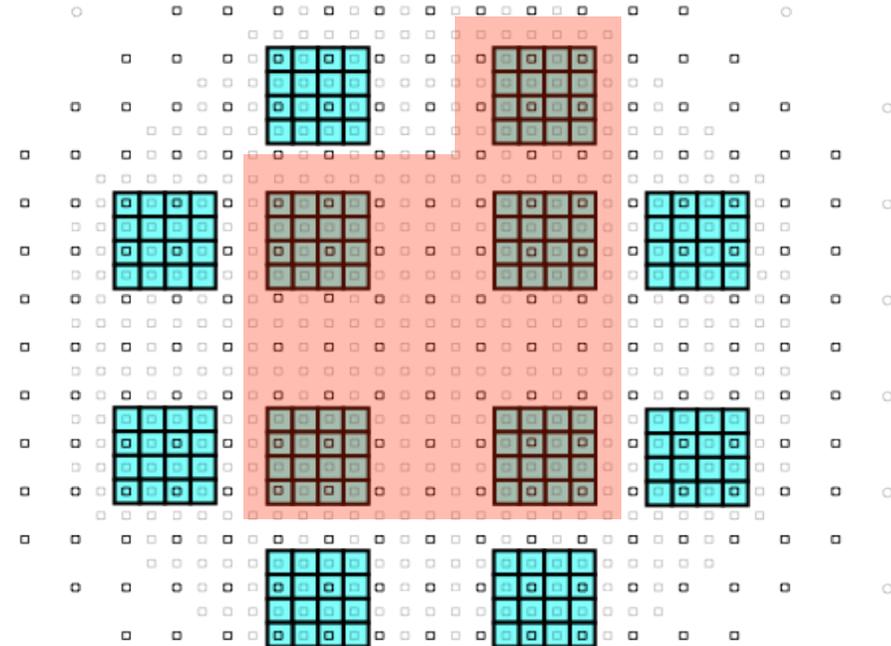
MD計画の現状

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 16 \times 5=80セル
20" Φ PMT 2本 (HAMAMATSU R3600)
白色反射材:タイベックシート



空気シャワーアレイ
37,000m²

36,900 m²
16.05.18 Ver.0.9



MD 約1/3スケール
~4,000m²完成

2014年からデータ取得開始

まとめ

- ・水チェレンコフミュオン観測装置(MD)を計画するにあたって、セルの構造や配置をシミュレーションを用いて決定し、ガンマ線点源に対する感度を調べた。
- ・空気シャワーMC : CORSIKA ver6.204
 ガンマ線 : 0.3 TeV – 10 PeV、 3.9×10^7 イベント
 宇宙線 : 0.3 TeV – 10 PeV、 1.8×10^8 イベント
ASアレイ応答MC : Epics uv8.00
MDアレイ応答MC : GEANT4 8.0
- ・100m²のプロトタイプMDのデータを用いて、~20TeVまでシミュレーションの妥当性を確認した。
- ・2014年から1/3スケールMD (約4000m²)のデータ取得を開始。