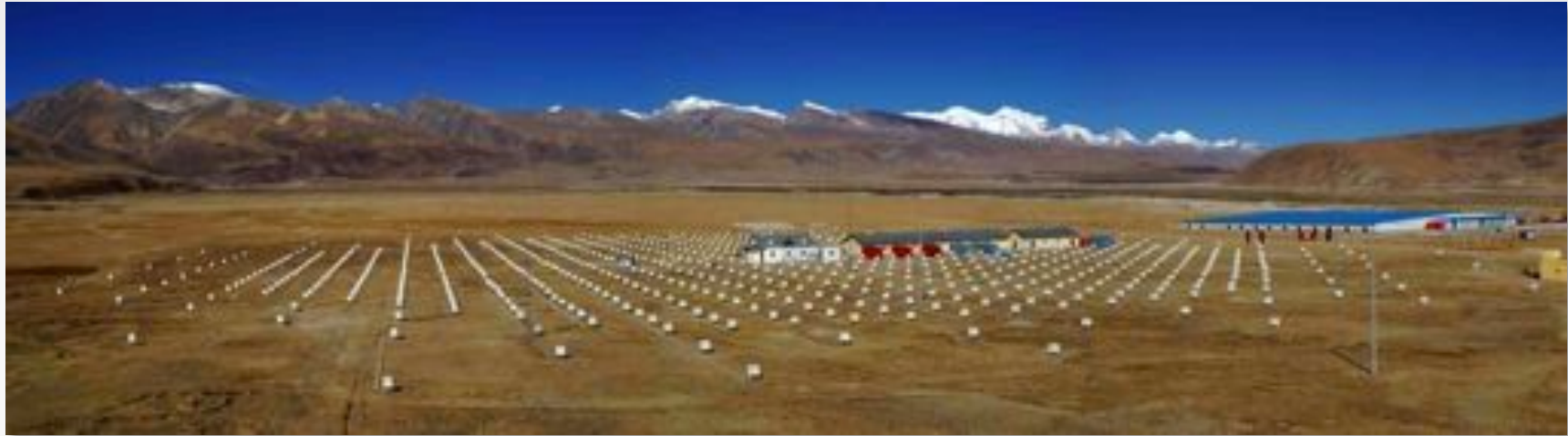


日本学術振興会研究者海外派遣基金助成金「グローバルな宇宙天文観測」2012年2月20日



チベット水チェレンコフ型ミュオン 観測装置による100TeV領域ガンマ線の観測

東京大学宇宙線研究所

川田 和正 (日本学術振興会特別研究員PD)

For the Tibet AS γ Collaboration





The Tibet ASy Collaboration



M.Amenomori(1), X.J.Bi(2), D.Chen(3), S.W.Cui(4), Danzengluobu(5), L.K.Ding(2), X.H.Ding(5), C.Fan(6), C.F.Feng(6), Zhaoyang Feng(2), Z.Y.Feng(7), X.Y.Gao(8), Q.X.Geng(8), Q.B.Gou(2), H.W.Guo(5), H.H.He(2), M.He(6), K.Hibino(9), N.Hotta(10), Haibing Hu(5), H.B.Hu(2), J.Huang(2), Q.Huang(7), H.Y.Jia(7), L.Jiang(8, 2), F.Kajino(11), K.Kasahara(12), Y.Katayose(13), C.Kato(14), K.Kawata(3), Labaciren(5), G.M.Le(15), A.F.Li(6), H.C.Li(4, 2), J.Y.Li(6), C.Liu(2), Y.-Q.Lou(16), H.Lu(2), X.R.Meng(5), K.Mizutani(12, 17), J.Mu(8), K.Munakata(14), A.Nagai(18), H.Nanjo(1), M.Nishizawa(19), M.Ohnishi(3), I.Ohta(20), S.Ozawa(12), T.Saito(21), T.Y.Saito(22), M.Sakata(11), T.K.Sako(3), M.Shibata(13), A.Shiomi(23), T.Shirai(9), H.Sugimoto(24), M.Takita(3), Y.H.Tan(2), N.Tateyama(9), S.Torii(12), H.Tsuchiya(25), S.Udo(9), B.Wang(2), H.Wang(2), Y.Wang(2), Y.G.Wang(6), H.R.Wu(2), L.Xue(6), Y.Yamamoto(11), C.T.Yan(26), X.C.Yang(8), S.Yasue(27), Z.H.Ye(28), G.C.Yu(7), A.F.Yuan(5), T.Yuda(9), H.M.Zhang(2), J.L.Zhang(2), N.J.Zhang(6), X.Y.Zhang(6), Y.Zhang(2), Yi Zhang(2), Ying Zhang(7, 2), Zhaxisangzhu(5) and 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)Department of Physics, Yunnan University, China.

(9)Faculty of Engineering, Kanagawa University, Japan.

(10)Faculty of Education, Utsunomiya University, Japan.

(11)Department of Physics, Konan University, Japan.

(12)Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Japan.

(13)Faculty of Engineering, Yokohama National University, Japan.

(14)Department of Physics, Shinshu University, Japan.

(15)National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, China.

(16)Physics Department and Tsinghua Center for Astrophysics, Tsinghua University, China.

(17)Saitama University, Japan.

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

(19)National Institute of Informatics, Japan.

(20)Sakushin Gakuin University, Japan.

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

(22)Max-Planck-Institut für Physik, Deutschland.

(23)College of Industrial Technology, Nihon University, Japan.

(24)Shonan Institute of Technology, Japan.

(25)RIKEN, Japan.

(26)Institute of Disaster Prevention Science and Technology, China.

(27)School of General Education, Shinshu University, Japan.

(28)Center of Space Science and Application Research, Chinese Academy of Sciences, China.

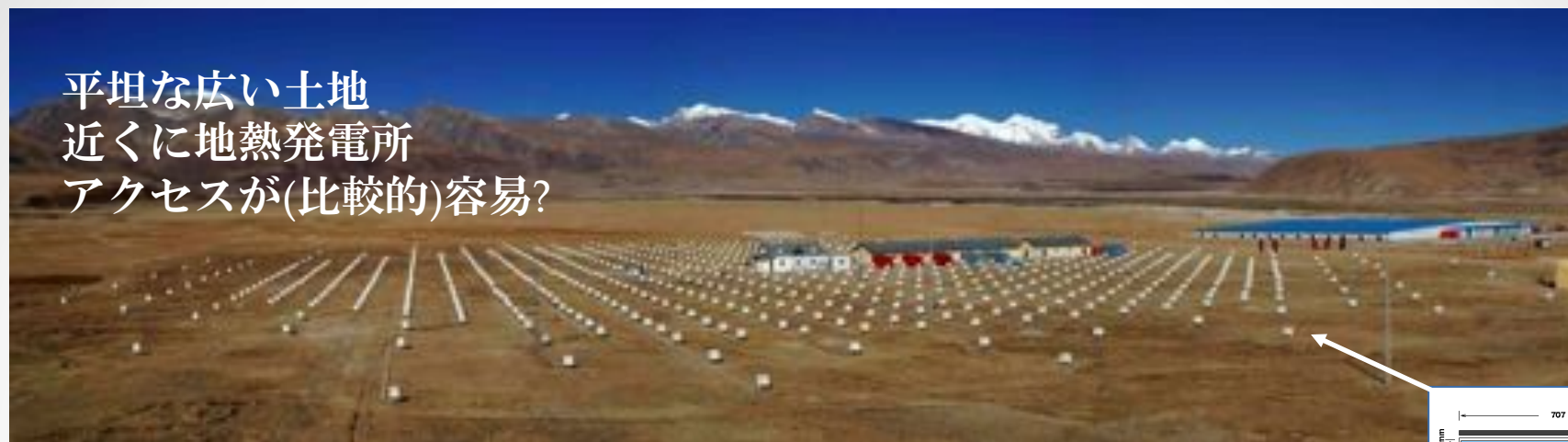
羊八井国際宇宙線観測所



90°522E, 30°102N, 4,300 m a.s.l. (606g/cm²)

- 中国チベット自治区羊八井(ヤンパーチン)

チベット空気シャワー観測装置 (Tibet AS)



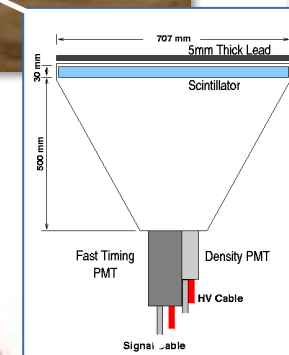
平坦な広い土地
近くに地熱発電所
アクセスが(比較的)容易?

□ 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 m² x 789
- 空気シャワー有効面積 ~37,000 m²
- 最頻エネルギー ~3 TeV
- 角度分解能 ~0.9° @3 TeV
~0.2° @100TeV

- 視野 ~2 sr

→空気シャワー中の二次粒子(主にe[±], γ)を観測し
一次宇宙線エネルギー、方向を測定



検出器で見た空気シャワー

二次粒子数分布

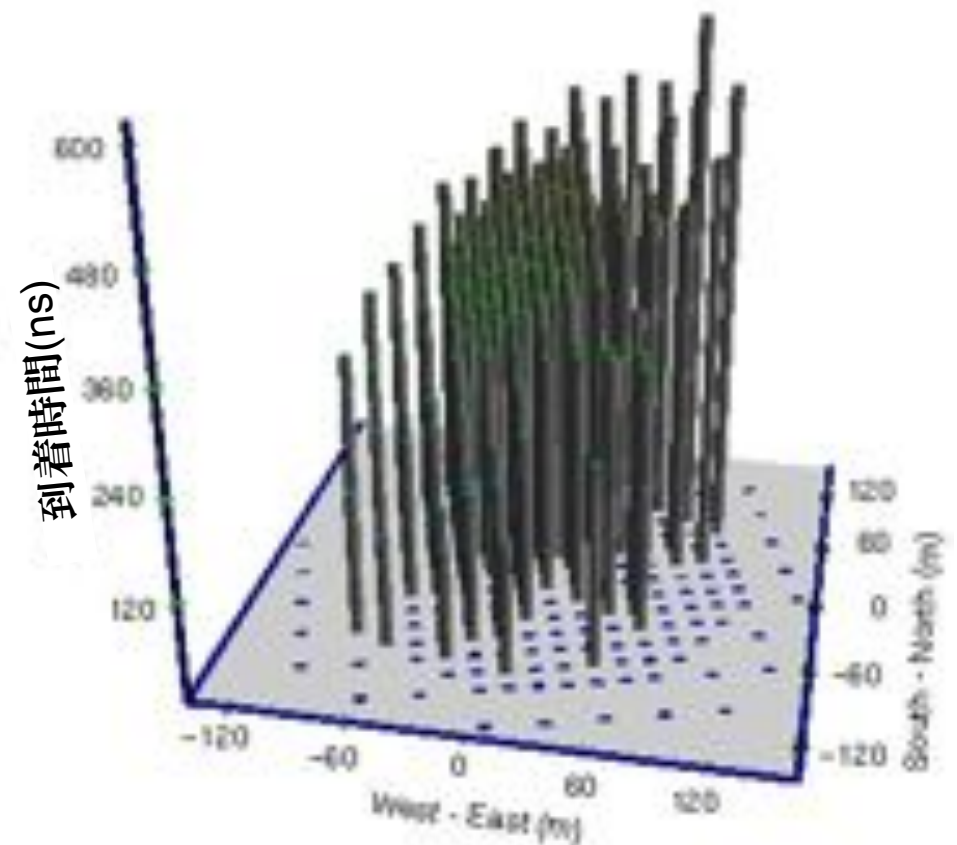
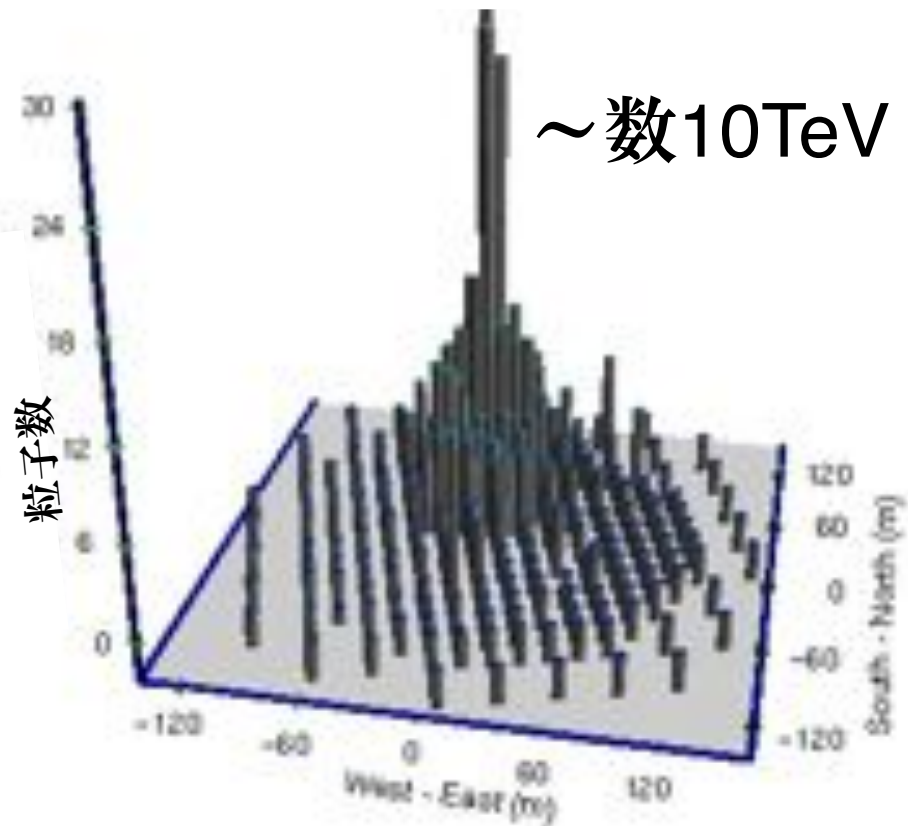


宇宙線のエネルギー

粒子到来時間分布



宇宙線の方角



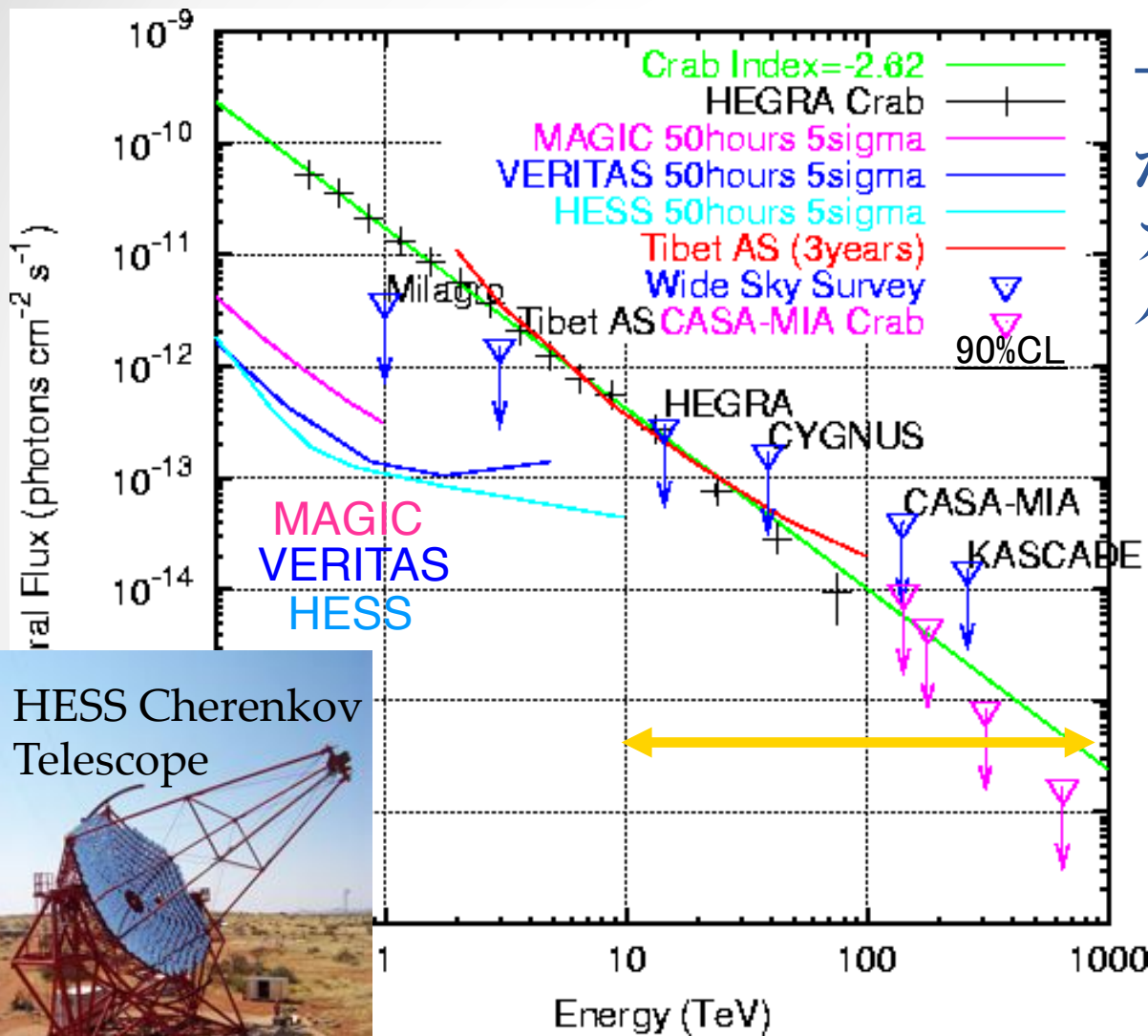
毎秒 ~1700個の空気シャワーを記録

Tibet AS γ 実験

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

- Knee領域(10^{14} - 10^{17} eV)
宇宙線スペクトル&化学組成の測定
- TeV宇宙線異方性の精密観測
- TeV太陽の影による太陽磁場研究
- TeV宇宙ガンマ線の広視野観測

TeV領域ガンマ線観測の現状



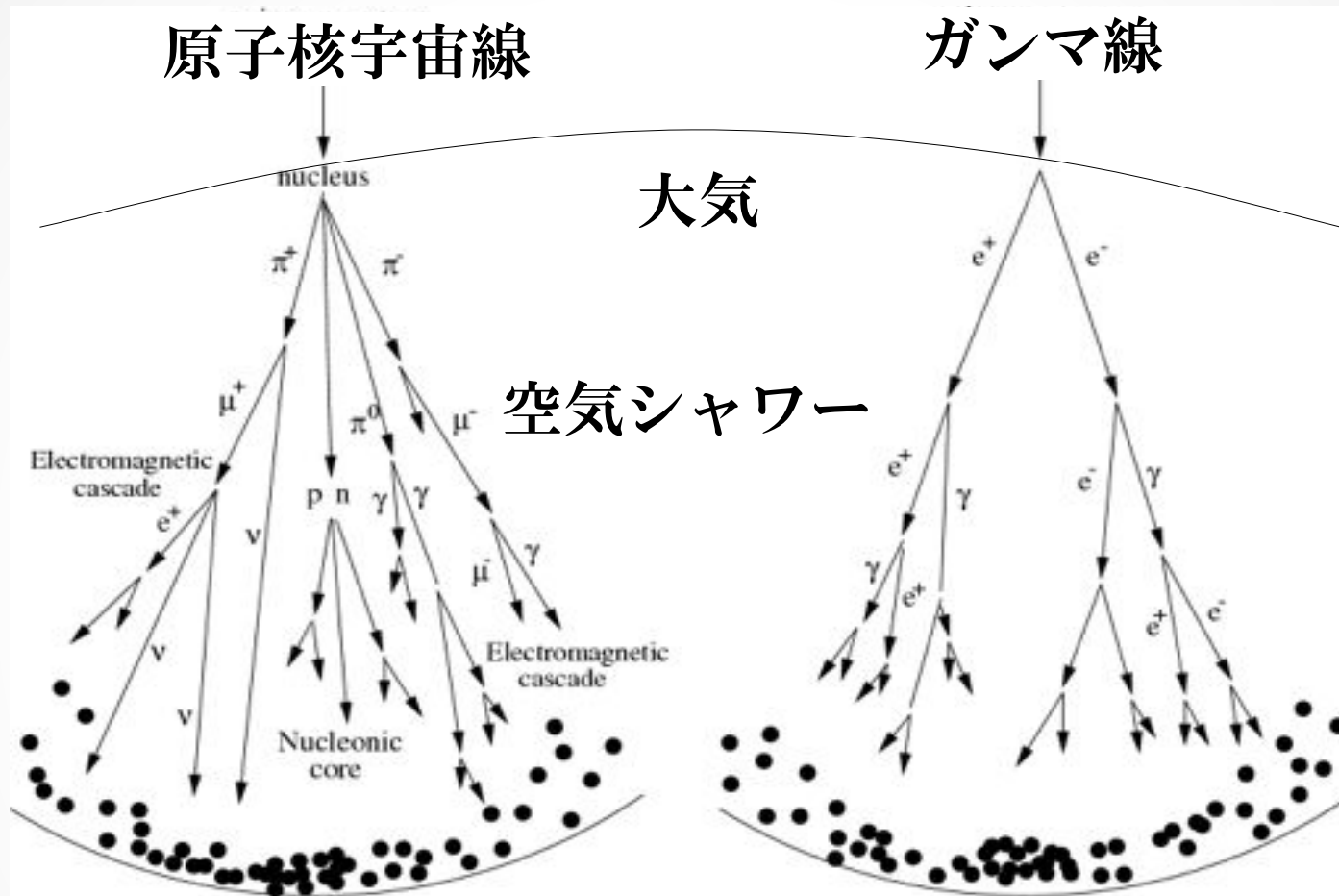
Tibet AS 1年観測
 かに星雲 100 TeV 以上
 ガンマ線 ~ 50個
 バックグラウンド(宇宙線)
 ~1000個



計画: 10-1000 TeV
 空気シャワー中
 ミューオンの観測
 で P/γ 選別

数10TeV以下で70以上の天体を発見

ミューオン数によるガンマ線／原子核選別



空気シャワー中ミューオン数 (コアから<100m, 4300m)

100TeV陽子
~50個

100TeVガンマ線
~1個

チベット水チェレンコフミュオン観測装置 (Tibet MD)

安価に大面積が可能

地下 2.5m (土石+コンクリート)

物質厚 $\sim 515\text{g}/\text{cm}^2 \sim 19X_0$

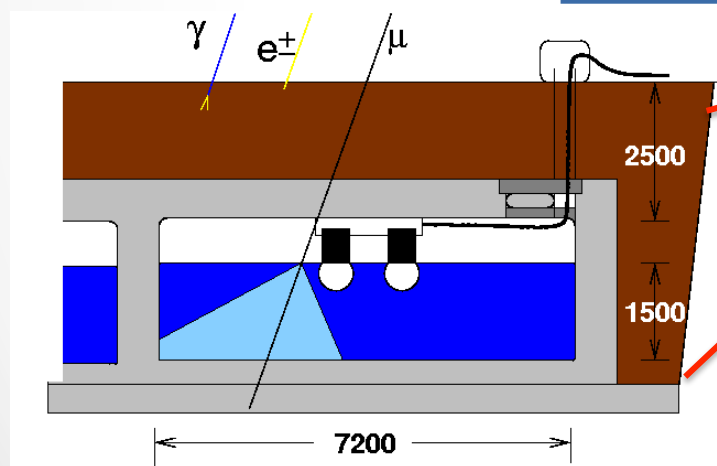
7.2m \times 7.2m \times 水深1.5m 水槽 192台

20インチ ϕ PMT x2本

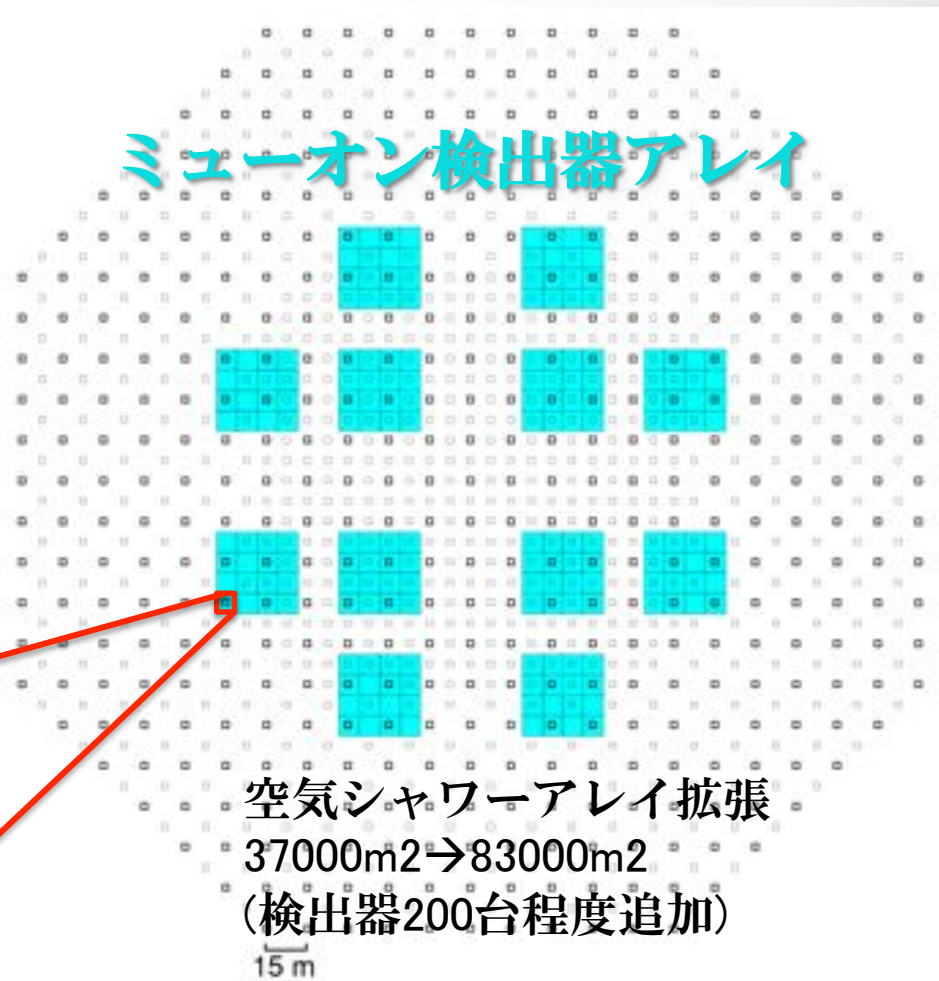
白色反射材



合計 $\sim 10,000\text{m}^2$



ミュオン検出器アレイ

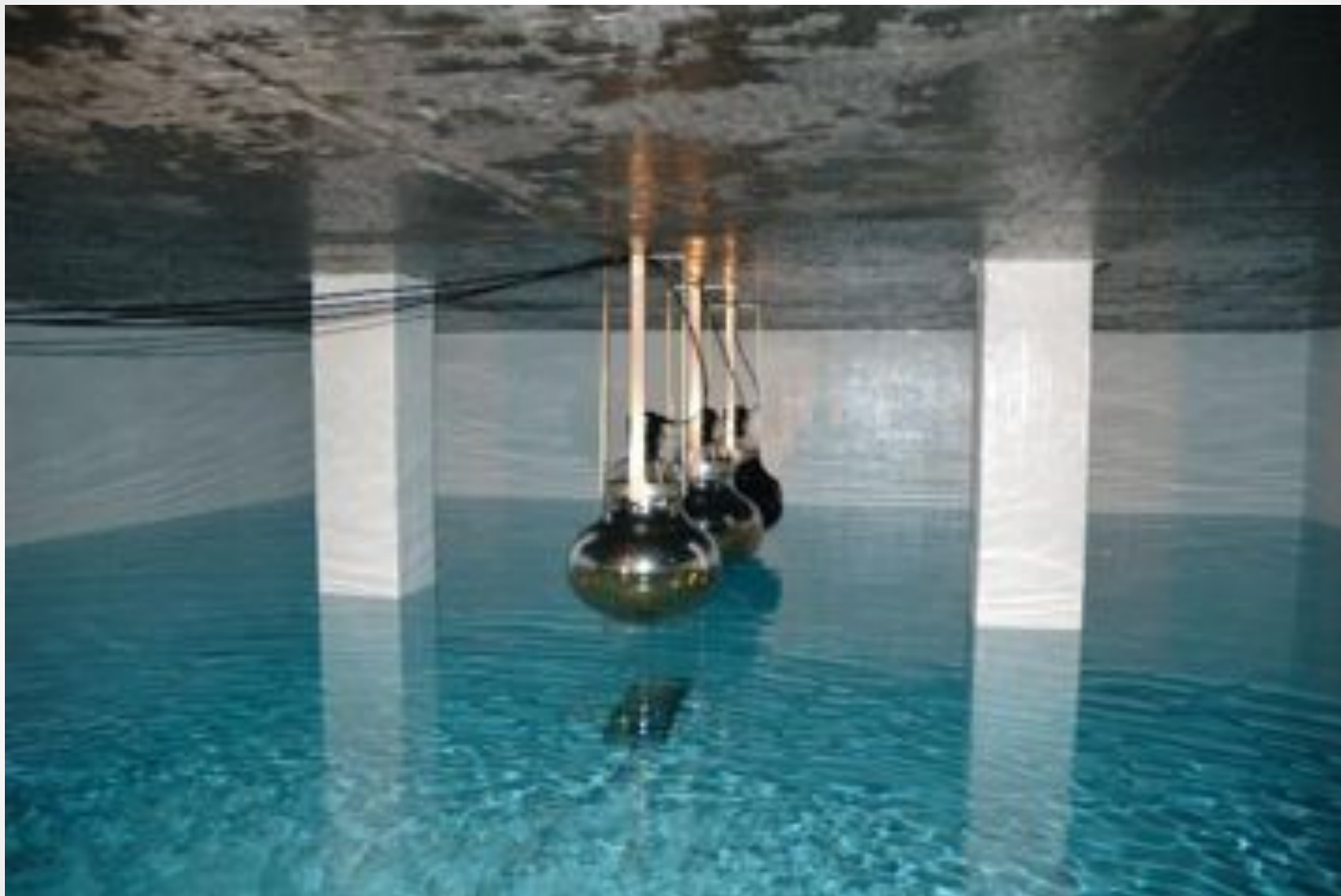


空気シャワーアレイ拡張
37000m² \rightarrow 83000m²
(検出器200台程度追加)

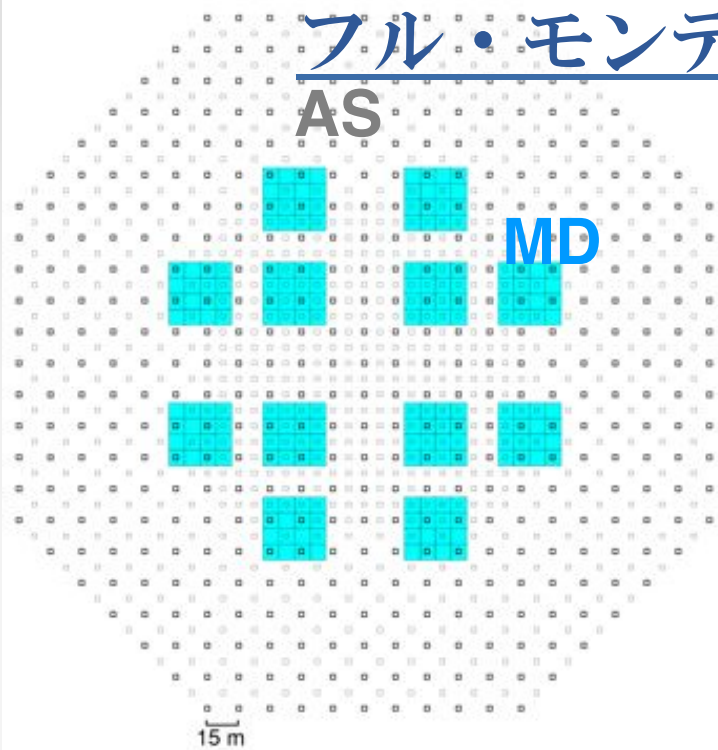
15 m

\rightarrow 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

プロトタイプ検出器 注水途中 (近くの井戸水から)



フル・モンテカルロシミュレーション



□ 空気シャワー発生 → Corsika Ver.6.204

二次粒子は 1 MeV まで追跡

宇宙線 0.3 TeV - 10 PeV, 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 0.3 TeV - 10 PeV, Crab 軌道 $\propto E^{-2.6}$

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

空気シャワー再構成の解析を行い、実際に実験的に得られる量に変換

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

粒子はチェレンコフ閾値まで追跡

チェレンコフ光も追跡 光電子数に変換

壁面での反射率 70% (一様反射)

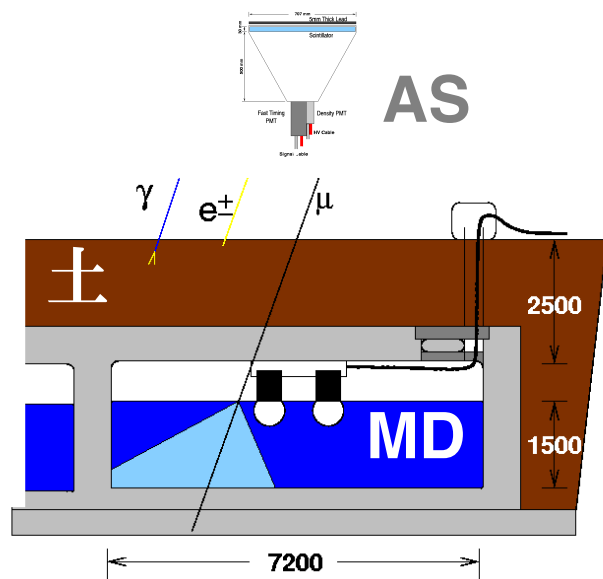
PMT量子効率 $\sim 20\%$ @ 400 nm (波長依存)

□ アクシデンタルミューオン

$300 \text{ Hz/m}^2 \times 10,000 \text{ m}^2 \times 200 \text{ ns}$

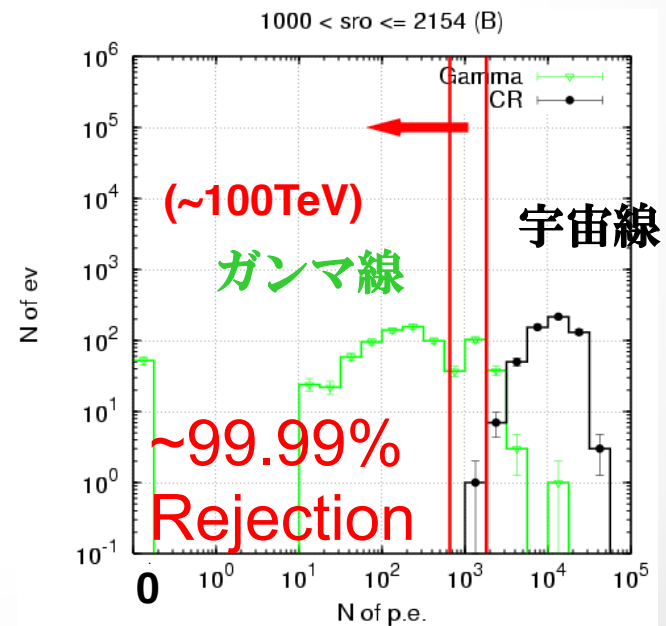
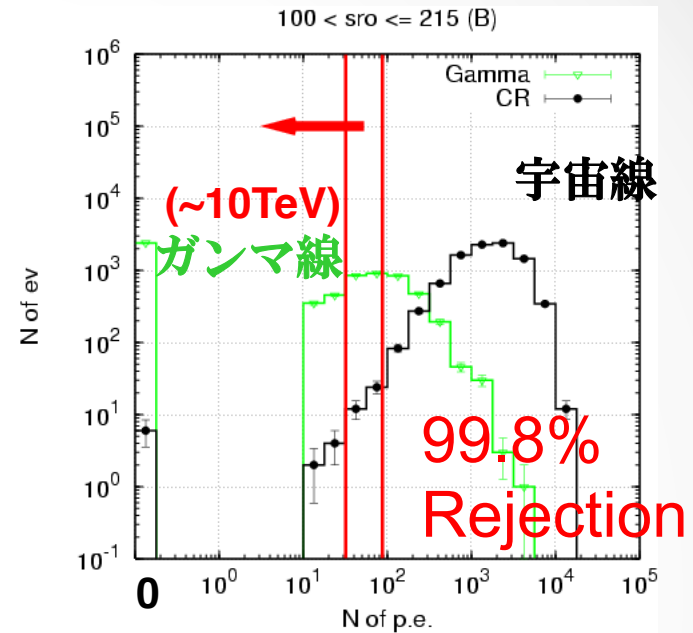
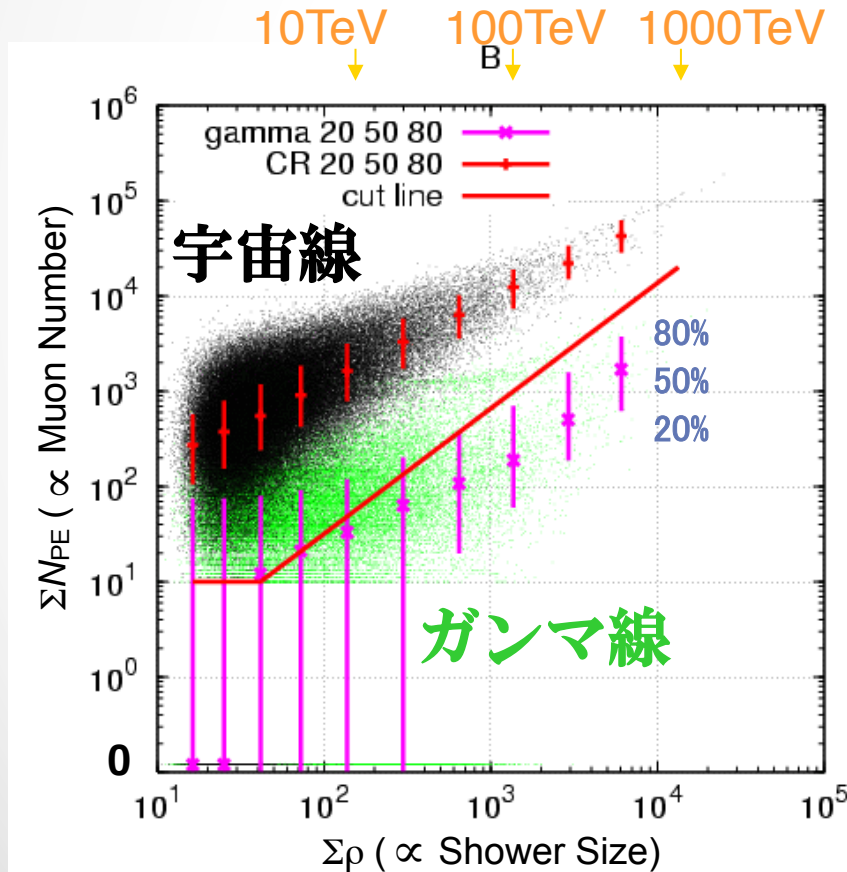
→ 0.6 ミューオン / 空気シャワー

ポワソンノイズとして考慮

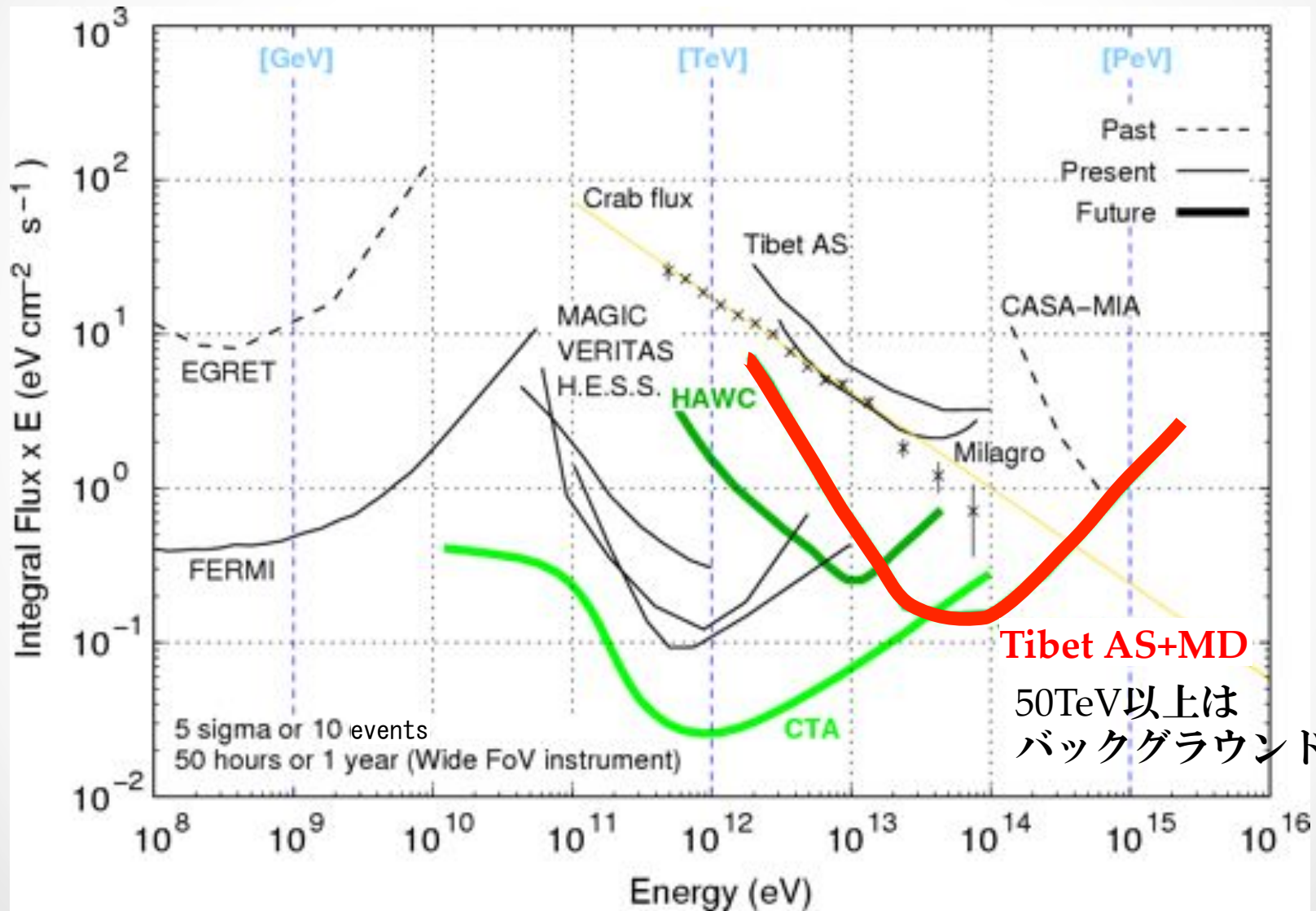


ミューオン数 VS シャワーサイズ (シミュレーション)

- $\Sigma \rho$: 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)



GeV-PeV領域ガンマ線感度

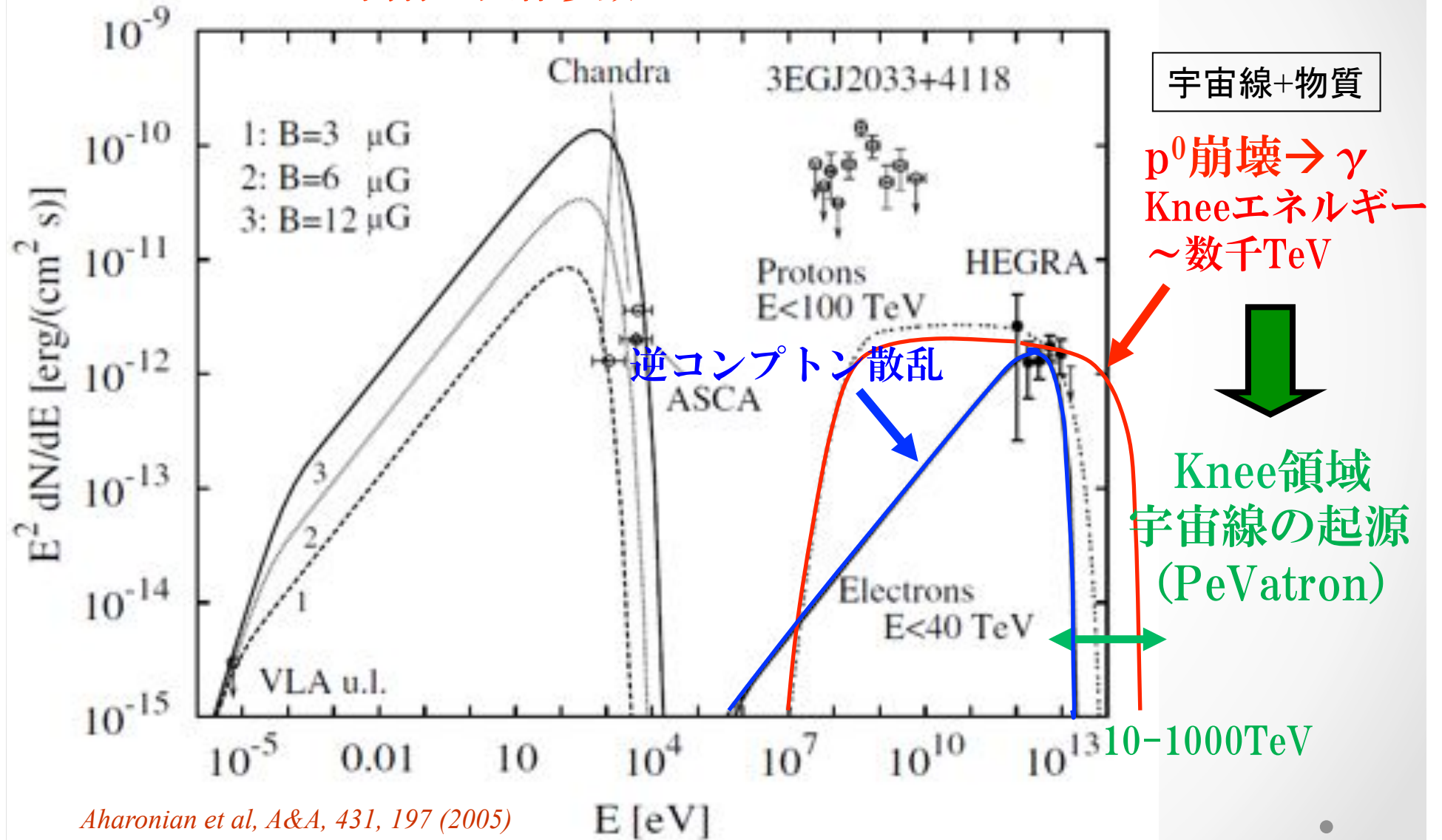


Tibet AS+MD
50TeV以上は
バックグラウンドフリー

10TeV以上のガンマ線広視野観測の動機

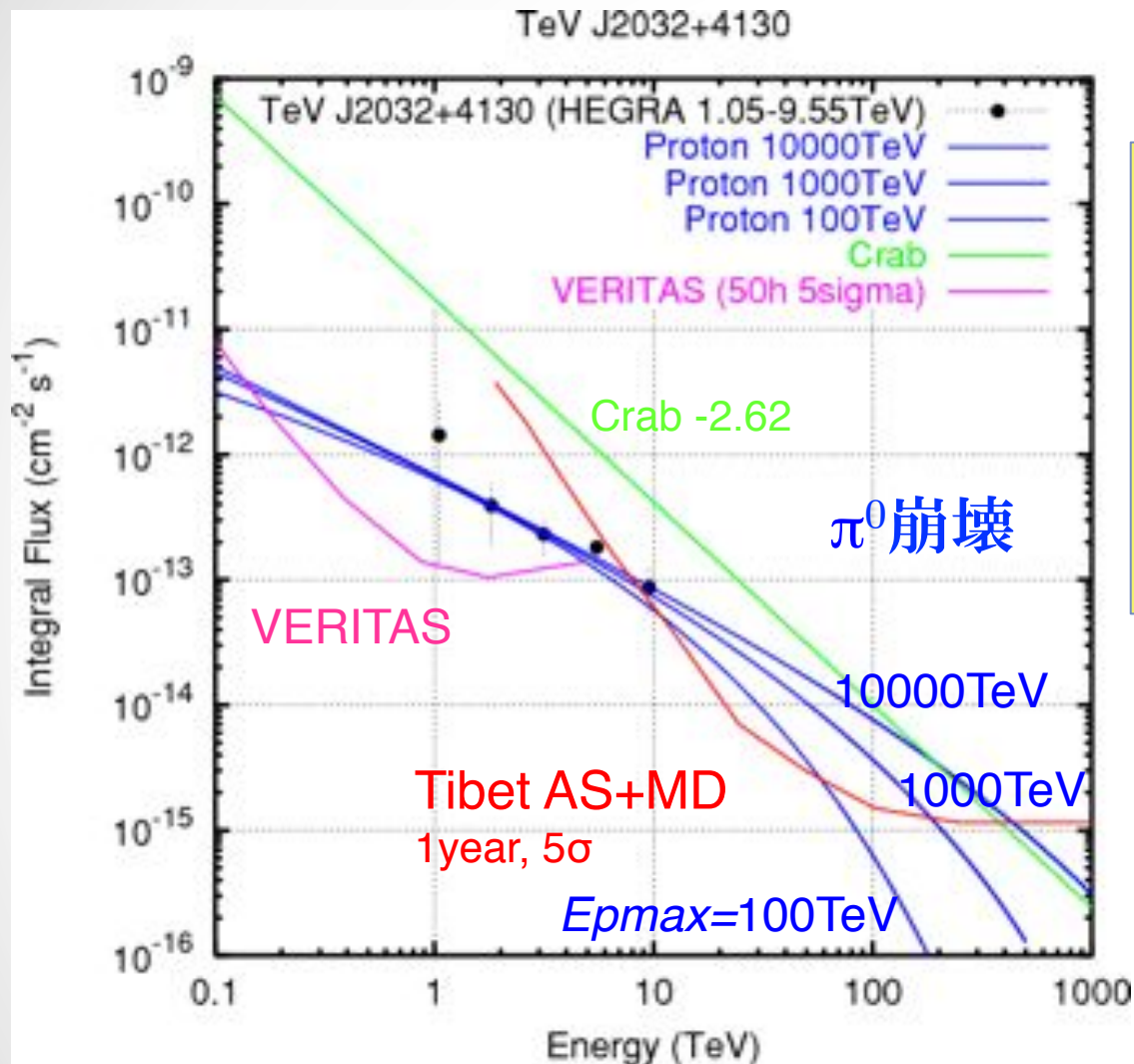
TeV J2032+4130 (~5% Crabs)
同様の天体多数

1. TeV領域でハードなスペクトラム
2. X線や電波で暗い



Aharonian et al, A&A, 431, 197 (2005)

TeV J2032+4130 π^0 崩壊との比較



銀河宇宙線加速器
“Pevatron”

$$\text{CR } E_{\text{max}} / 10 \sim \gamma E_{\text{max}}$$

天体中での宇宙線の
最大加速エネルギーの決定

π^0 崩壊モデル

Aharonian et al. *A&A*, 464, 235(2007)

Kelner et al., *PRD* 74, 034018 (2006)

Aharonian et al, *A&A*, 431, 197 (2005)

MGRO J2019+37

Cygnus領域のExtendedガンマ線

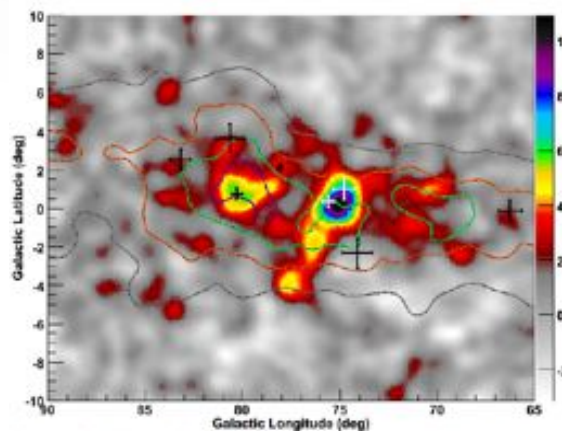
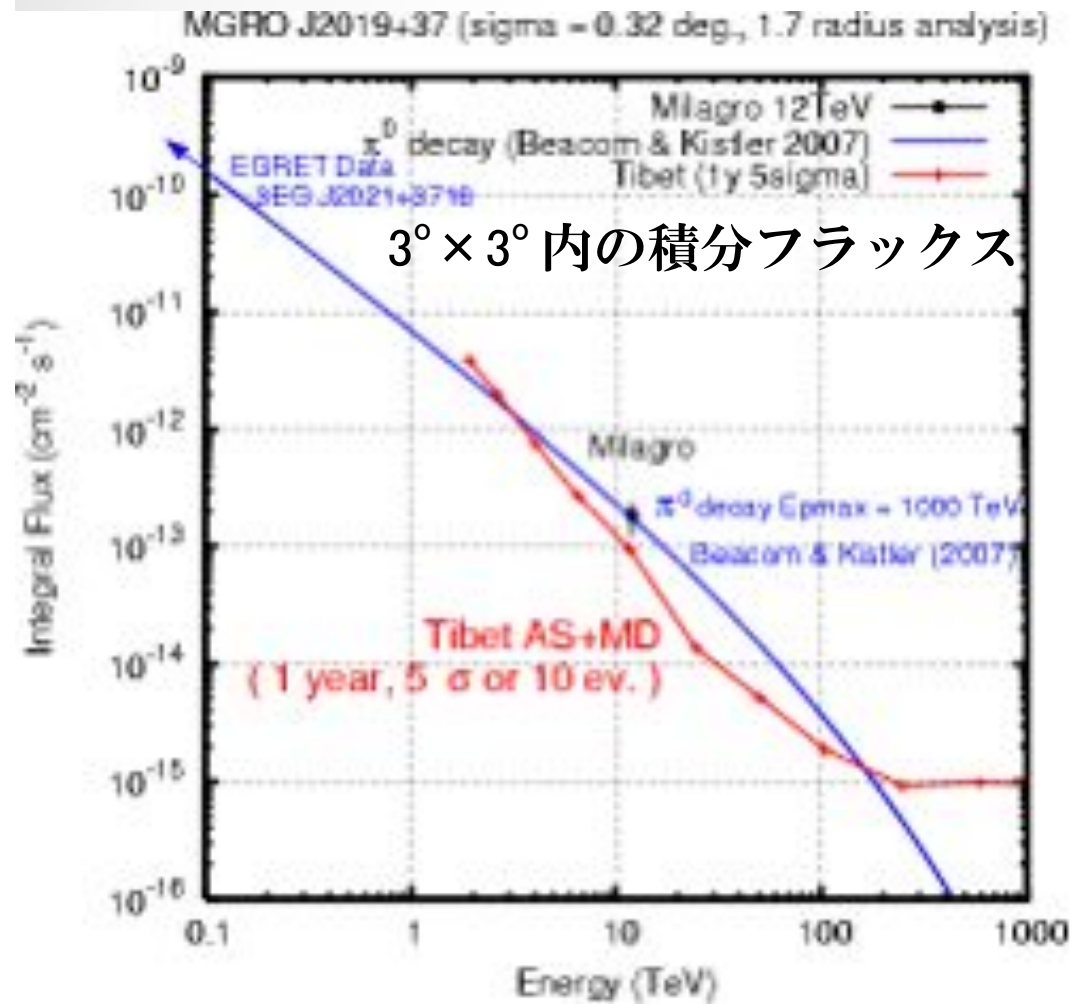
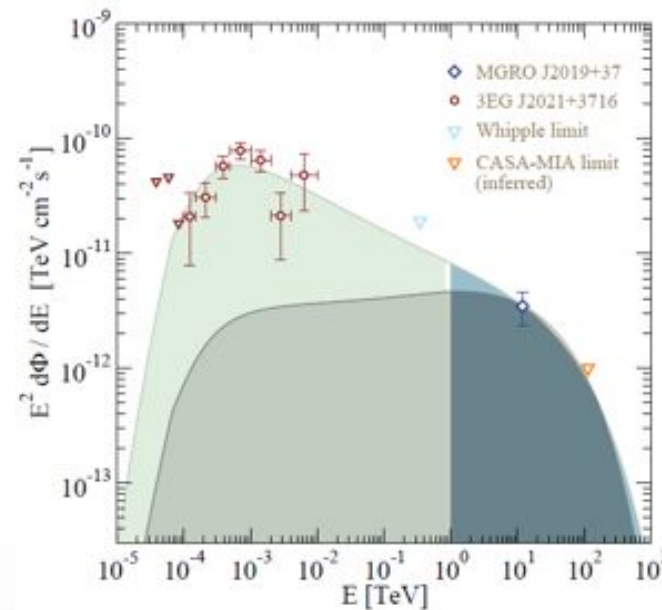


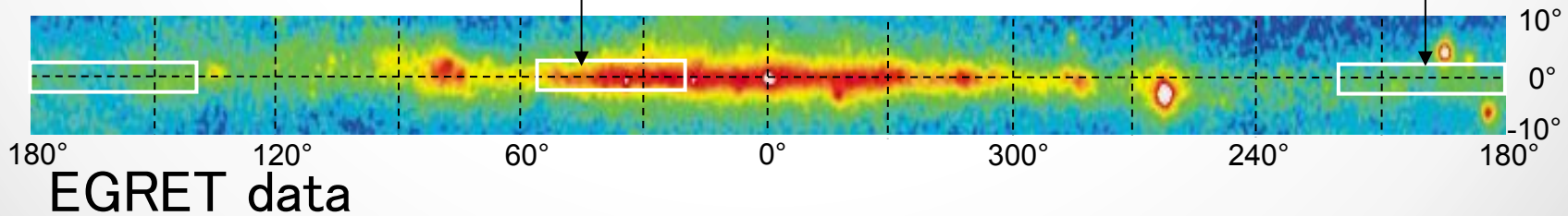
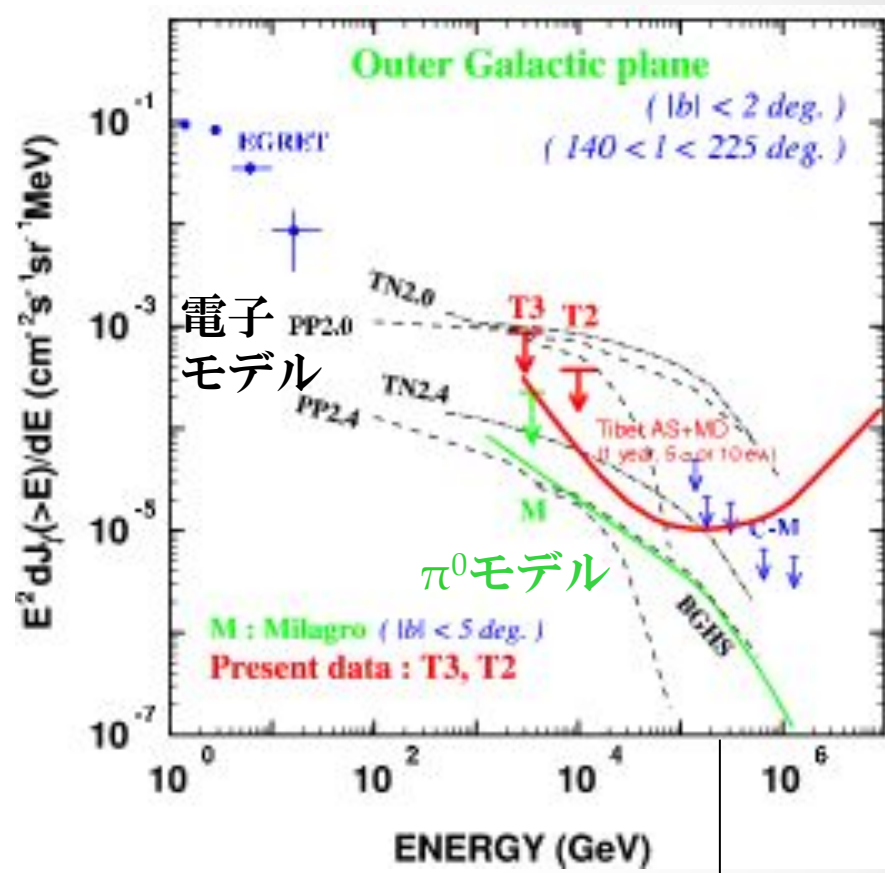
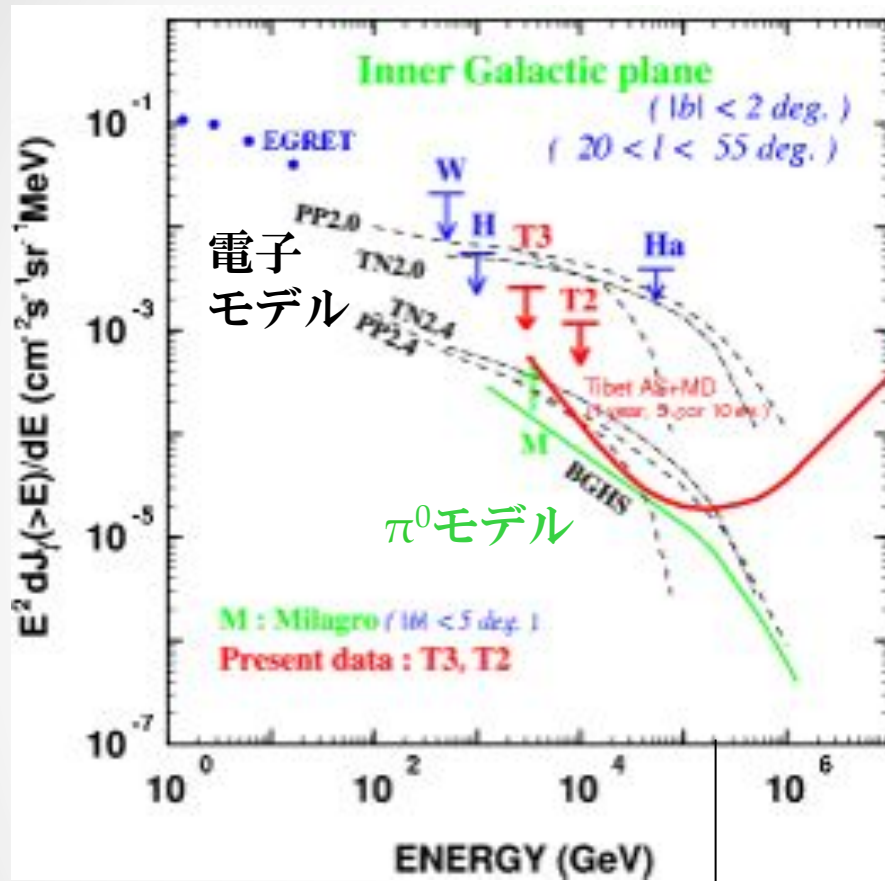
Figure 3 The Cygnus Region of the Galaxy as seen in TeV gamma rays. The color scale is the statistical significance of the gamma-ray excess at each location. Since the Milagro exposure and sensitivity are roughly constant over the region in the figure, the statistical significance is nearly proportional to the flux from each point. Superimposed on the image are contours showing the matter density in the region in steps of $3 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ starting at $3 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ with the outer grey contour. The matter density is a combination of atomic (HI) (Kalberla *et al.* 2005) and molecular hydrogen (H_2) (Dame *et al.* 2001). The 21 cm line survey data are used to determine the HI density and the CO $J=1-0$ survey data (Leung *et al.* 1992) are used to measure the H_2 density. The mass conversion factor $N_{\text{H}_2}/W_{\text{CO}}$ is taken to be $X=0.8 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ km}^{-1} \text{ s}$, which is the value used in this region in the GALPROP model (Strong *et al.* 2004b). With the exception of MGRO J2019+37 the matter density is correlated with the TeV excess, indicating that some of the TeV emission is due to interactions of cosmic rays with matter in the region. The crosses show the location of EGRET sources and their corresponding location errors.

Abdo *et al.* astro-ph/0611691 (2006)



Beacom *et al.* astro-ph/070175 (2007)

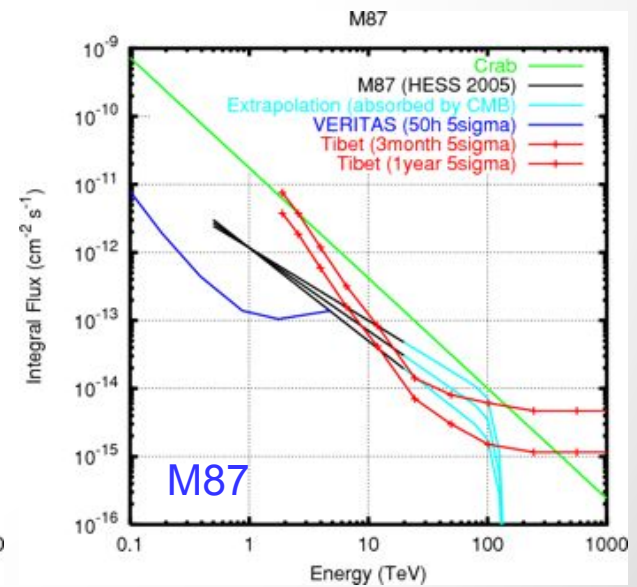
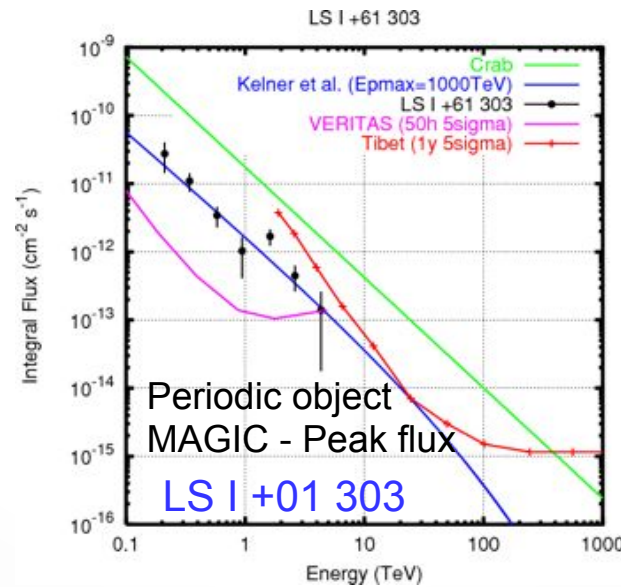
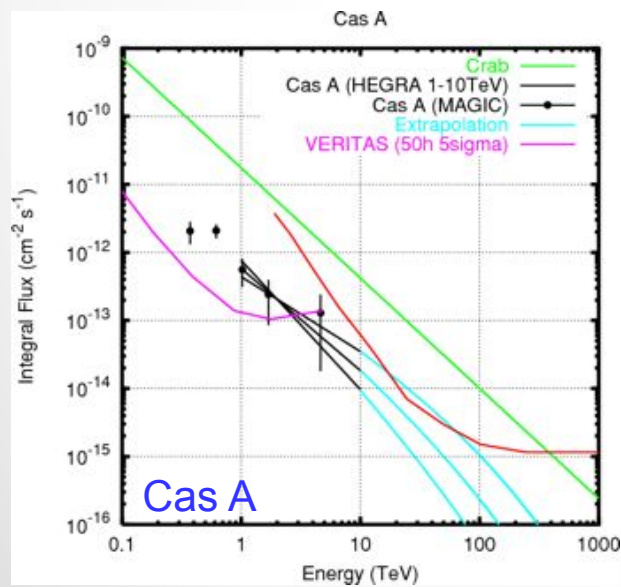
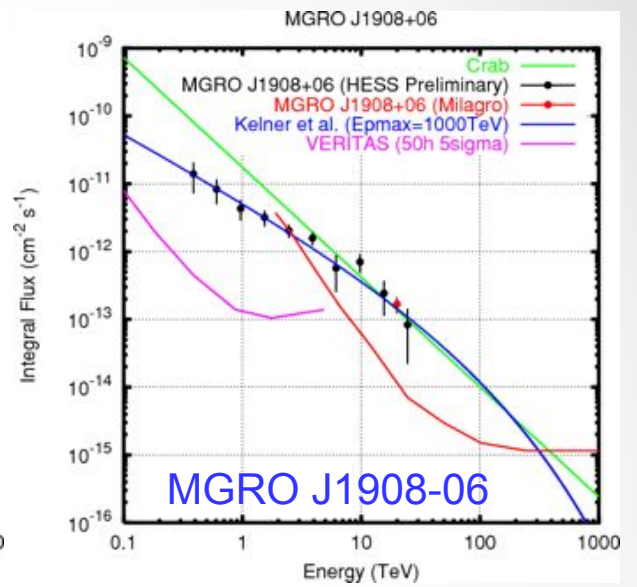
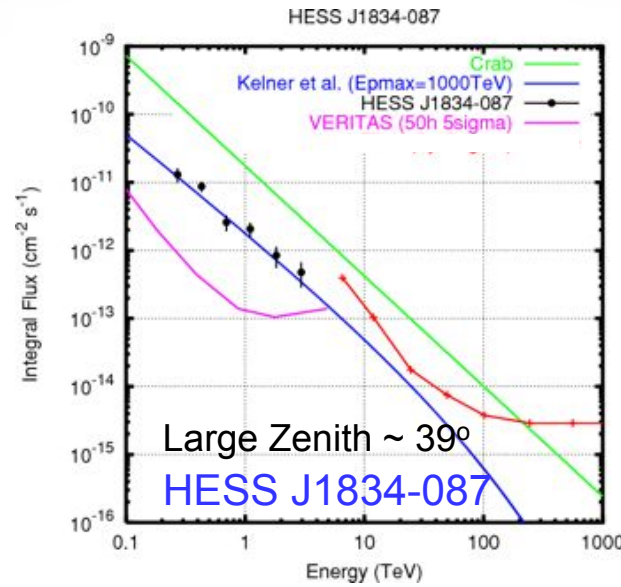
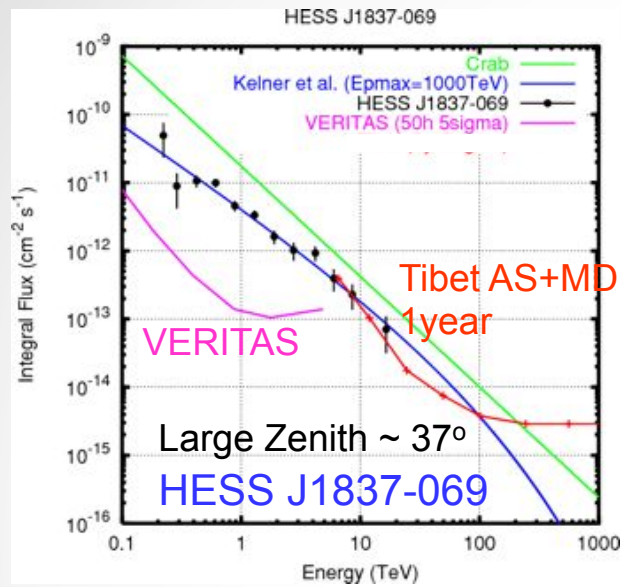
銀河面からのDiffuseガンマ線



EGRET data

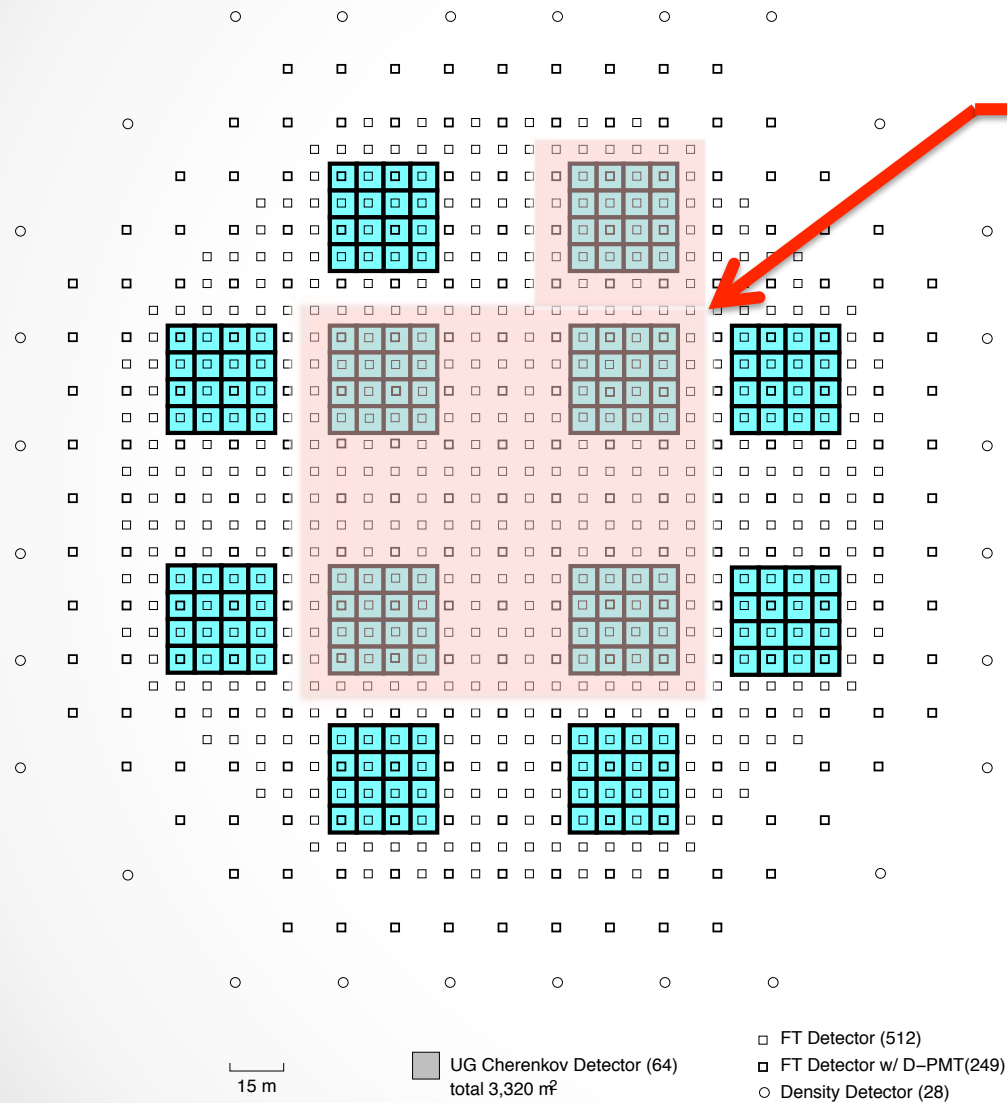
その他さまざまな既知天体の観測が可能

未知天体の発見の期待もある！



数年の観測で観測可能

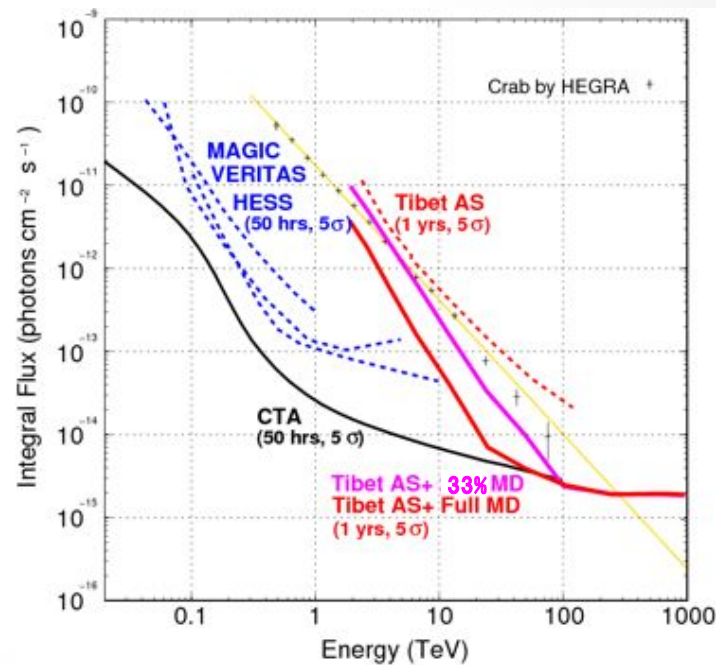
現在の状況

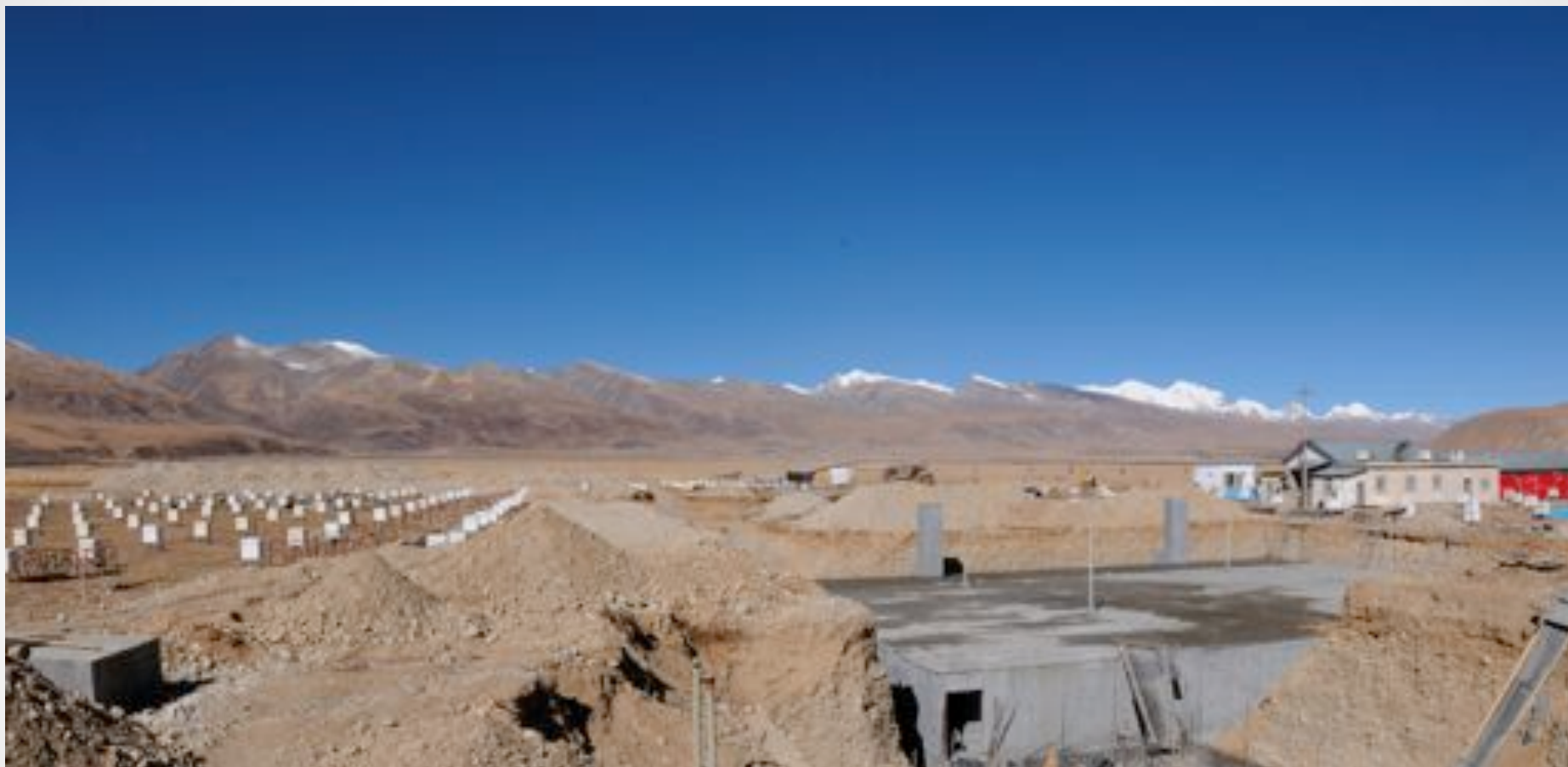


789 detectors

建設終了

5 プール ~ 4200m²





2010年11月29日 アレイ南西



2011年 建設状況



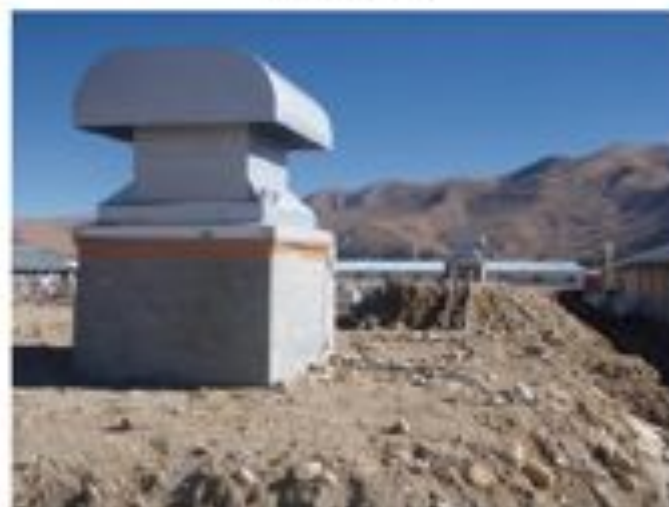
土盛量の測定



埋戻し作業



ケーブルドレインのブロック

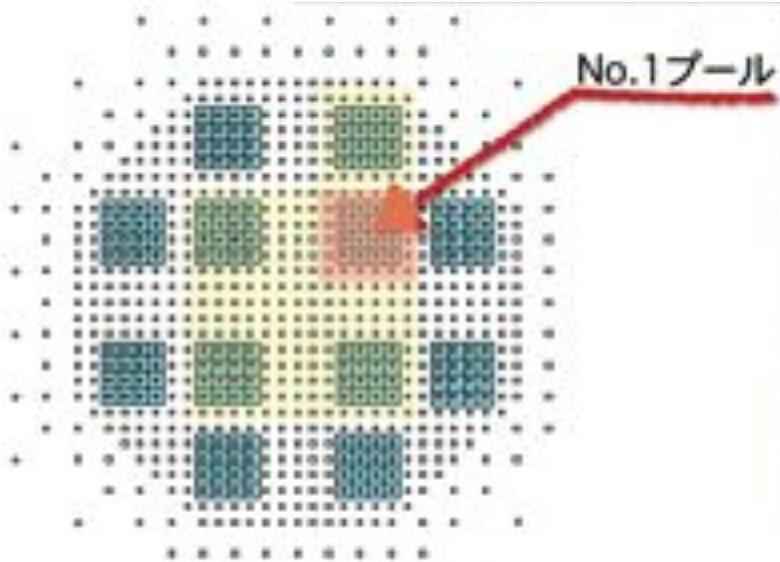


ファンの取付

空気シャワーアレイの回復



MD内部 PMTのインストール





支持金具の取り付け



天井への取り付け



PMT取り付け完了(1)



PMT取り付け完了(2)

まとめ

- Tibet AS+MD 計画 フル拡張:10,000m²
10-1000TeVのガンマ線天文学の開拓
宇宙線の起源 “Pevatron” 観測
天の川からの拡散ガンマ線観測
銀河系外ガンマ線背景放射(チャレンジング)
その他未同定天体の探索
- 現在の状況 4200m²建設終了
- 今後の予定
残りのPMTインストール、注水
近々(半年以内を目処に)観測開始

派遣期間

派遣先：中国チベット

- 平成23年5月30日～7月 5日（37日間）川田、吉越

水チェレンコフ型ミュオン観測装置の建設のため

ご支援ありがとうございました