

チベット高原での高エネルギー 宇宙線の研究

片寄祐作 横浜国大・工

平成19年度共同利用成果発表会

@宇宙線研究所 15/12/2007

(For the Tibet ASycollaboration)

平成18年度チベット実験関係の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. 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)
4. 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488万円 -> 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785万円 -> 配分額**370万円**

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):

- Underground water Cherenkov muon detector array with the Tibet air shower array for gamma-ray astronomy in the 100 TeV region,
***Astrophysics and Space Science*, 309, 435–439 (2007)**
- Moon Shadow by Cosmic Rays under the Influence of Geomagnetic Field and Search for Antiprotons at Multi-TeV Energies,
***Astroparticle Physics*, Vol 28/1 pp 137–142 (2007)**
- The energy spectrum of all-particle cosmic rays around the knee region Tibet-III air-shower array,
***Advances in Space Research*[in press]**
- New estimation of the spectral index of high-energy cosmic rays as determined by the Compton-Getting anisotropy,
***The Astrophysical Journal Letter* [accepted]**

International Conference

- 30th International Cosmic Ray Conference (Merida, Mexico 2007)

16 talks/posters and proceedings papers

OG: 10 papers(Oral 3, Poster 7), HE: 3 papers (Oral 2, Poster 1),

SH: 3 papers (Oral 1 , Poster 2)

- “Implication of the sidereal anisotropy of ~ 5 TeV cosmic ray intensity observed with the

Tibet III air shower array”

6th IGPP Annual International Astrophysics Conference, Hawaii, USA,

K. Munakata on behalf of the Tibet ASgamma collaboration,

March 16 – March 22, 2007 , ORAL(invited talk)

- “Gamma-ray Observation with the Tibet ASgamma Experiment” ,

Particle Astrophysics 2007,

M. Ohnishi for the Tibet ASgamma collaboration, Venice, Italy,

August 27 – August 31, 2007, ORAL

“Tibet Air Shower Array: Results and Future Plan” ,

International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP) 2007,

K. Kawata for the Tibet ASgamma collaboration,

Sendai, Japan, September 11 – September 15, 2007, 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

3~100TeVの高エネルギーガンマ線放射天体の
探索、 $10^{14} \sim 10^{17}$ の一次宇宙線の観測から、
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.Amenomori,¹ S.Ayabe,² X.J.Bi,³ D.Chen,⁴ S.W.Cui,⁵ Danzengluobu,⁶ L.K.Ding,³ X.H.Ding,⁶ C.F.Feng,⁷ Zhaoyang Feng,³ Z.Y.Feng,⁸ X.Y.Gao,⁹ Q.X.Geng,⁹ H.W.Guo,⁶ H.H.He,³ M.He,⁷ K.Hibino,¹⁰ N.Hotta,¹¹ HaibingHu,⁶ H.B.Hu,³ J.Huang,¹² Q.Huang,⁸ H.Y.Jia,⁸ F.Kajino,¹³ K.Kasahara,¹⁴ Y.Katayose,⁴ C.Kato,¹⁵ K.Kawata,¹² Labaciren,⁶ G.M.Le,¹⁶ A.F. Li,⁷ J.Y.Li,⁷ Y.-Q. Lou,¹⁷ H.Lu,³ S.L.Lu,³ X.R.Meng,⁶ K.Mizutani,^{2,18} J.Mu,⁹ K.Munakata,¹⁵ A.Nagai,¹⁹ H.Nanjo,¹ M.Nishizawa,²⁰ M.Ohnishi,¹² I.Ohta,²¹ H.Onuma,² T.Ouchi,¹⁰ S.Ozawa,¹² J.R.Ren,³ T.Saito,²² T.Y.Saito,²³ M.Sakata,¹³ T.K.Sako,¹² T.Sasaki,¹⁰ M.Shibata,⁴ A.Shiomi,¹² T.Shirai,¹⁰ H.Sugimoto,²⁴ M.Takita,¹² Y.H.Tan,³ N.Tateyama,¹⁰ S.Torii,¹⁸ H.Tsuchiya,²⁵ S.Udo,¹² B. Wang,⁹ H.Wang,³ X.Wang,¹² Y.G.Wang,⁷ H.R.Wu,³ L.Xue,⁷ Y.Yamamoto,¹³ C.T.Yan,¹² X.C.Yang,⁹ S.Yasue,²⁶ Z.H.Ye,¹⁶ G.C.Yu,⁸ A.F.Yuan,⁶ T.Yuda,¹⁰ H.M.Zhang,³ J.L.Zhang,³ N.J.Zhang,⁷ X.Y.Zhang,⁷ Y.Zhang,³ Yi Zhang,³ Zhaxisangzhu,⁶ and X.X.Zhou⁸

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

(2) Dep. of Phys., Saitama Univ., Saitama, Japan

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

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

(5) Dep. of Phys., Hebei Normal Univ., Shijiazhuang, China

(6) Dep. of Math. and Phys., Tibet Univ., Lhasa, China

(7) Dep. of Phys., Shandong Univ., Jinan, China

(8) Inst. of Modern Phys., South West Jiaotong Univ.,
Chengdu, China

(9) Dep. of Phys., Yunnan Univ., Kunming, China

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

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

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

(13) Dep. of Phys., Konan Univ., Kobe, Japan

(14) Fac. of Systems Eng., Shibaura Inst. of Tech., Saitama, Japan

(15) Dep. of Phys., Shinshu Univ., Matsumoto, Japan

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

(17) Phys. Dep. and Tsinghua Center for Astrophys.,
Tsinghua Univ., Beijing, China

(18) Advanced Research Inst. for Sci. and Engin.,
Waseda Univ., Tokyo, Japan

(19) Advanced Media Network Center, Utsunomiya University,
Utsunomiya, Japan

(20) National Inst. of Info., Tokyo, Japan

(21) Tochigi Study Center, Univ. of the Air, Utsunomiya, Japan

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

(23) Max-Planck-Institut fuer Physik, Muenchen, Germany

(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

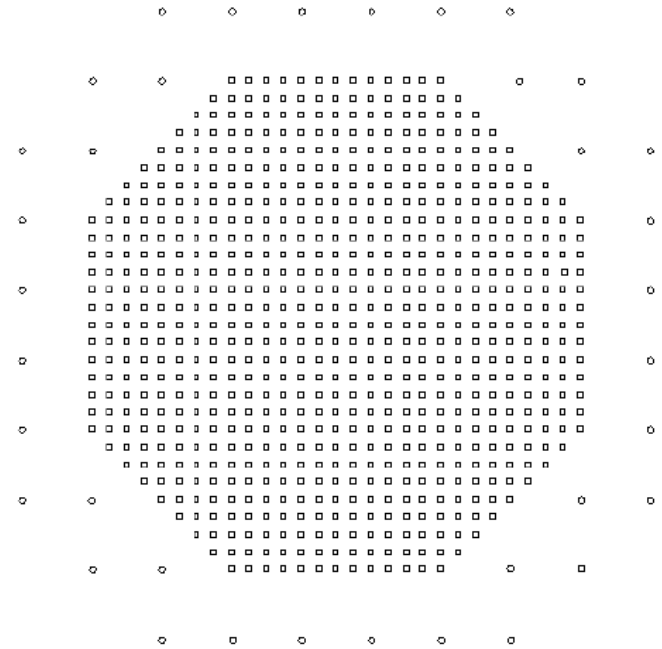
90° 53E, 30° 11N, 4,300 m a.s.l. (606g/cm²)

Tibet Airshower Array

Tibet III (37000m²)



Yangbajing (4300a.s.l.=606g/cm²),
Tibet, China



Total 789 detectors

Mode Energy

~3 TeV

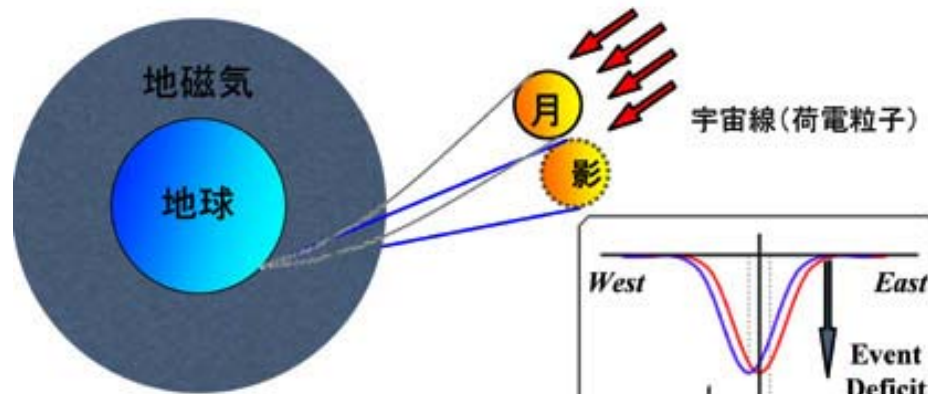
Angular Resolution

~0.9 deg @3TeV

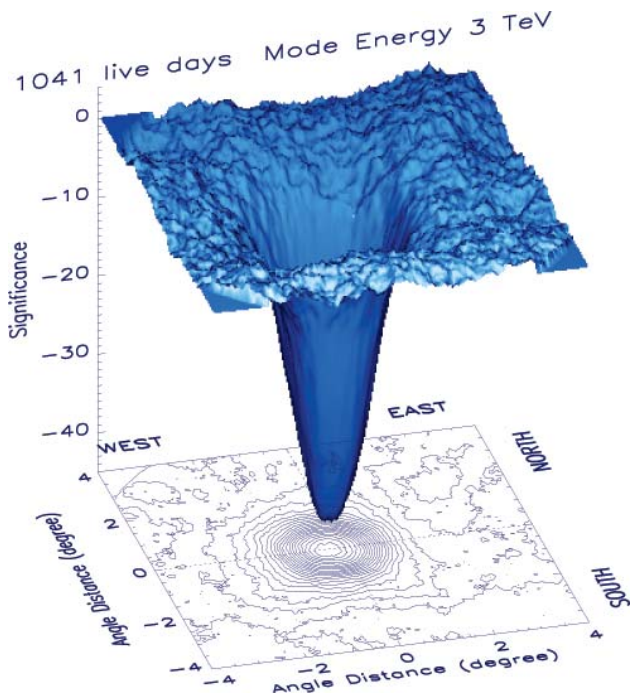
Trigger Rate

~1700 Hz

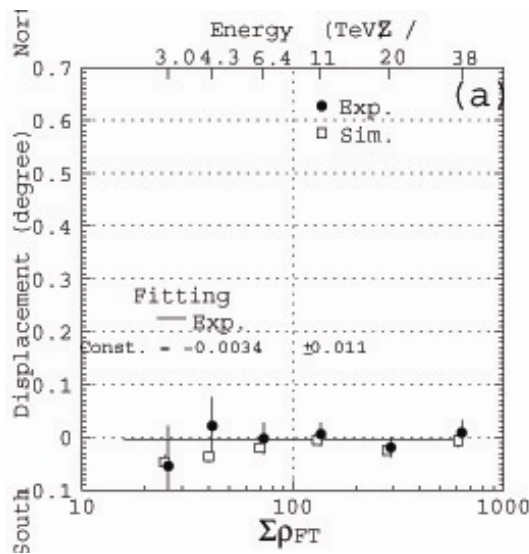
月の影 と 地磁気効果



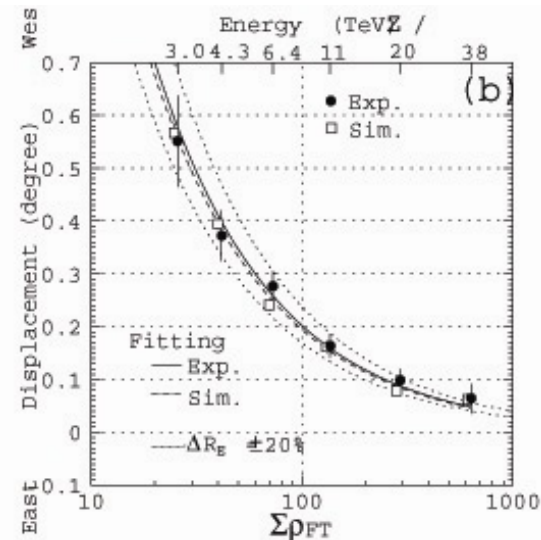
地磁気による影のずれ
 $\sim 0.25^\circ$ West @ mode 3TeV



観測された月の影



影の南北のズレ

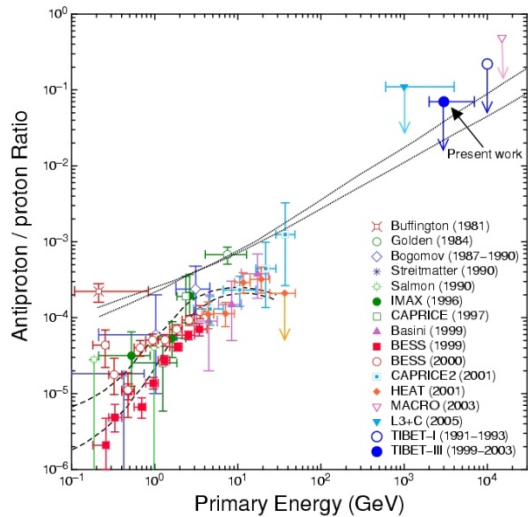
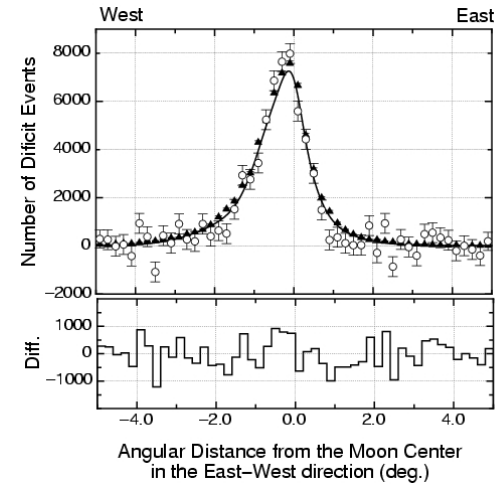
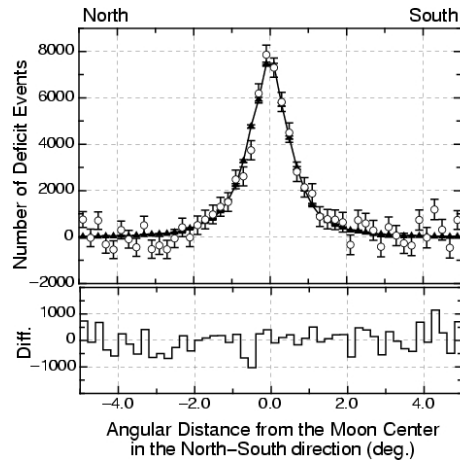
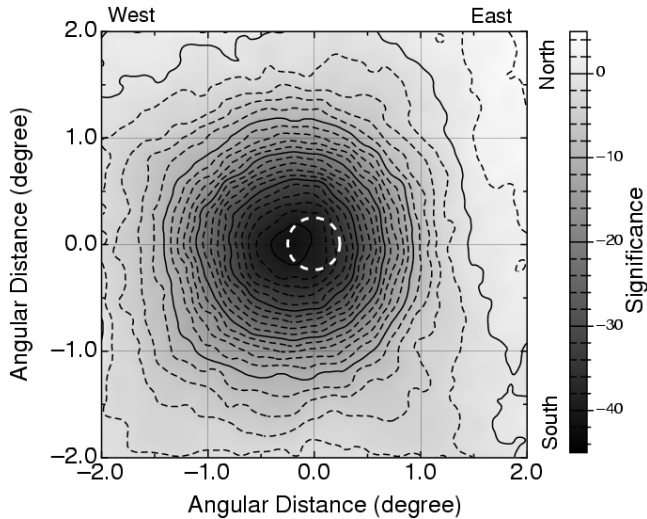


影の西へのズレ

Antiproton Search by Moon's Shadow

3TeV以上 $1.5 \times 10^{10} \text{ev}$, 40σ の影

Astroparticle Physics, 28, (2007) 137-142



Tibet-III:
7 % of CR
@90%CL

0.23度

西偏

O:DATA

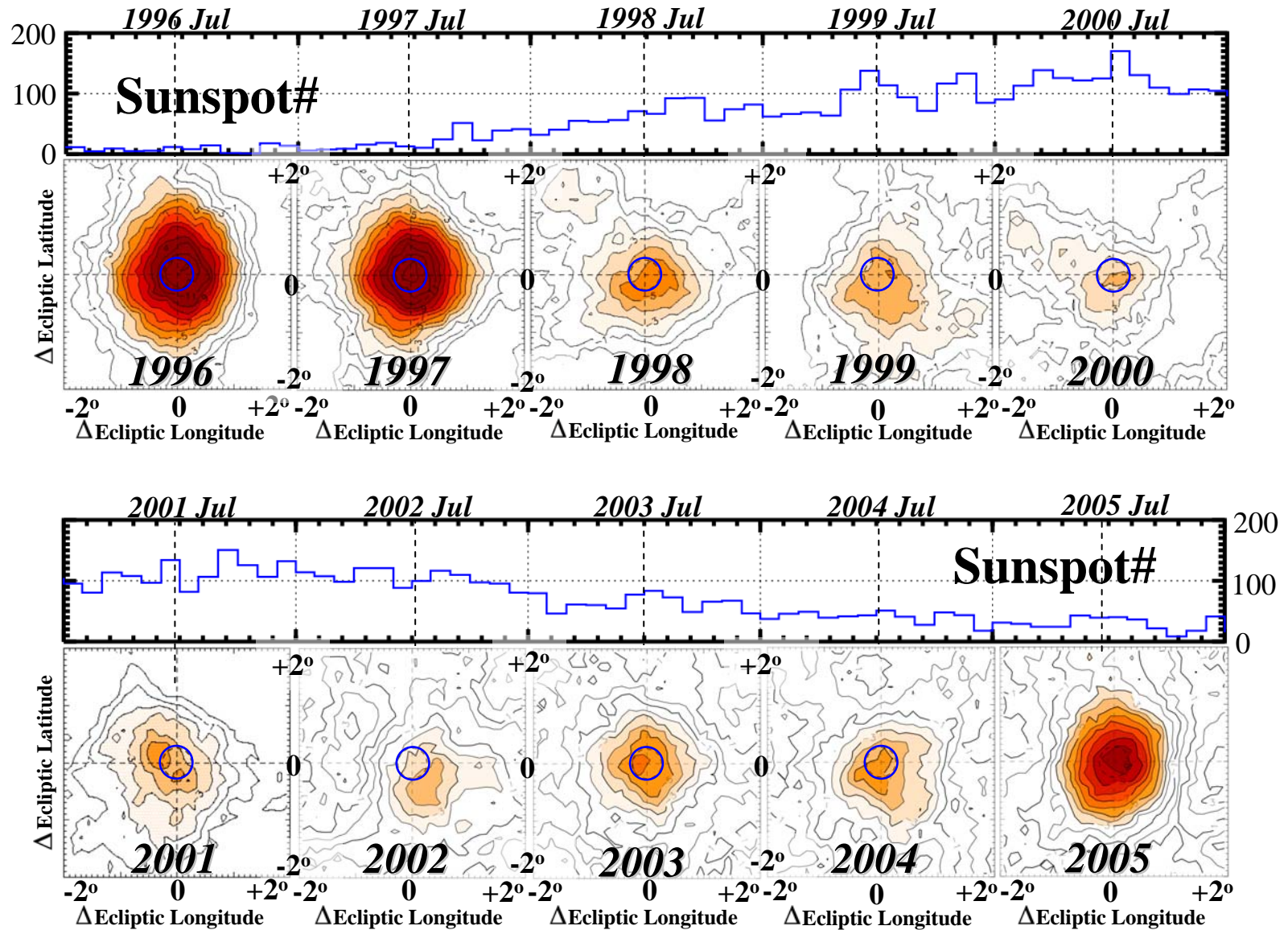
▲:MC

Dashed line: leaky box M.Simon et al. ApJ 499 (1998)250.

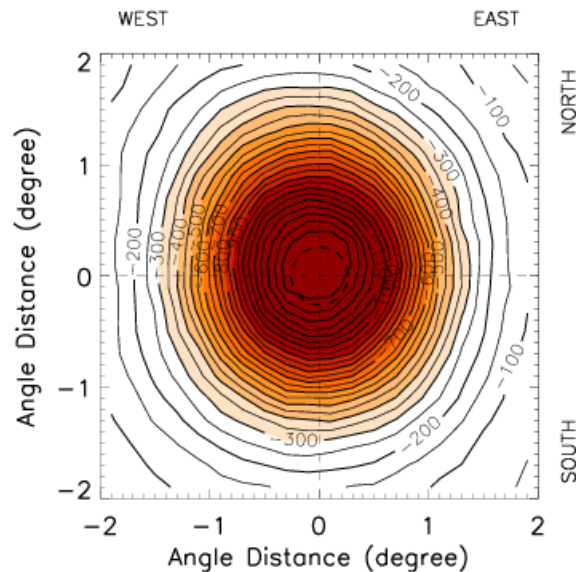
Dotted line: leaky box + antistars S.A. Stephan et al. Space Sci. Rev. 46 (1987) 31.

Observation – Sun Shadow

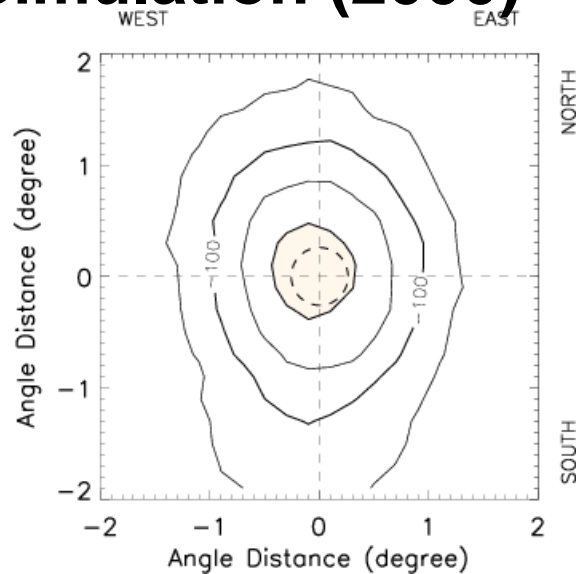
Anti-correlation between Sun shadow and sun spot # @ 10 TeV



Simulation (1996)

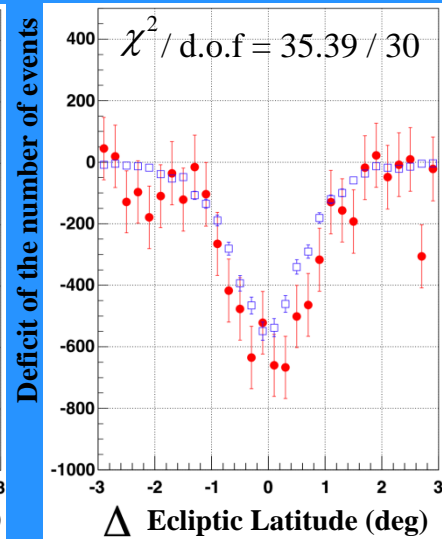
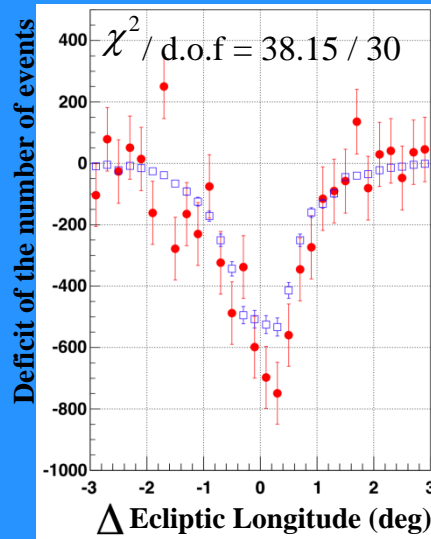


Simulation (2000)

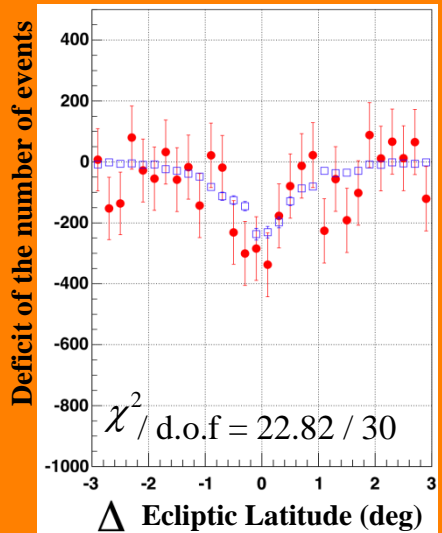
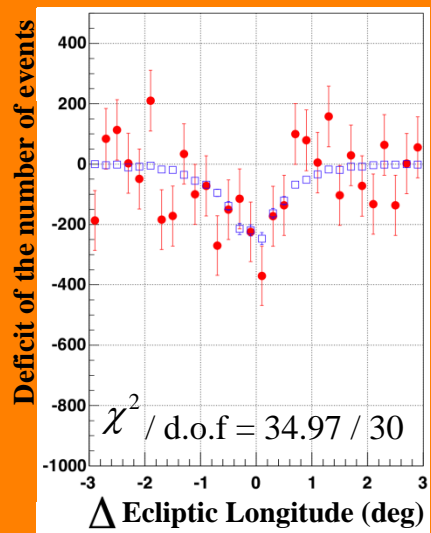


Solar Maximum 1996 Mar.-Aug.

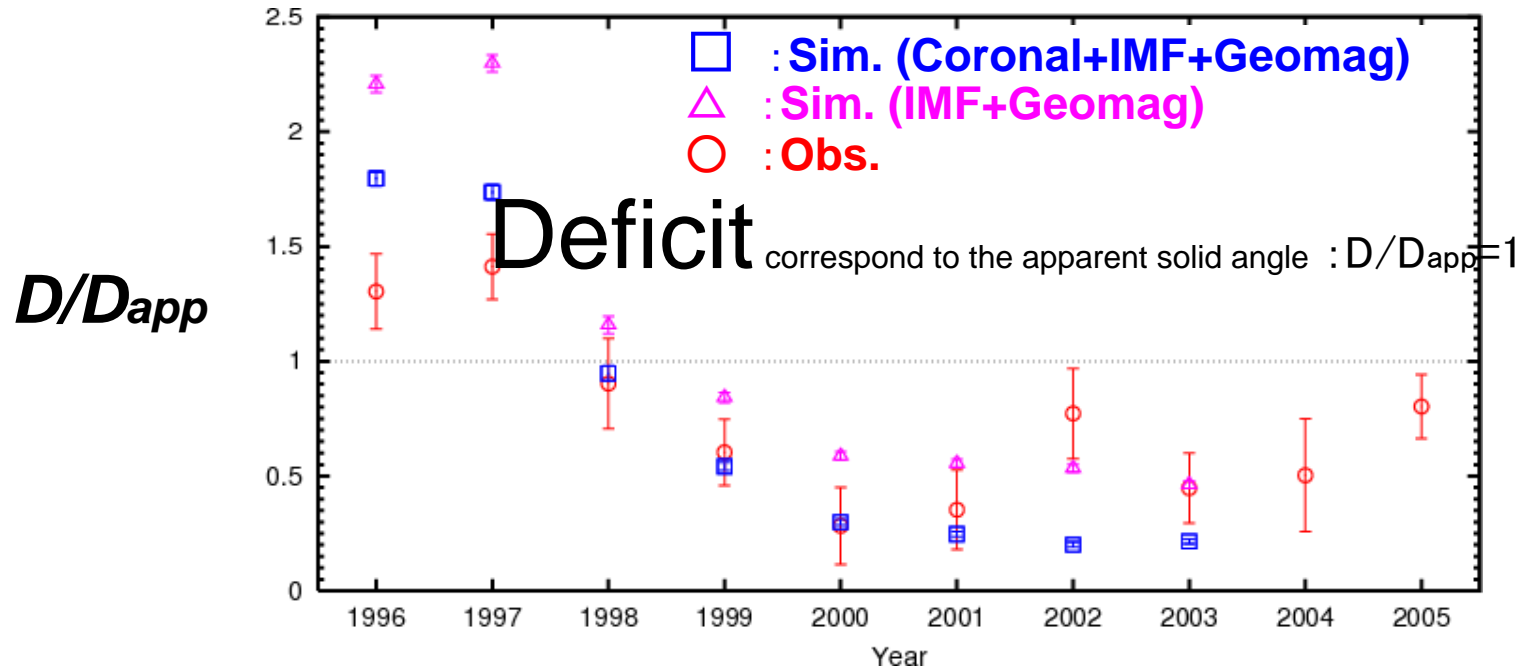
● Observation □ Simulation



Solar Maximum 2000 Mar.-Aug.



Normalized Density of sun's shadow (10 TeV)



Simulation Results

Quiet phase :

IMF influent to Cosmic-ray Deficit : increase about 230% \uparrow of D_{app}

Coronal MF influent to the Deficit : decrease about 45% \downarrow of D_{app}

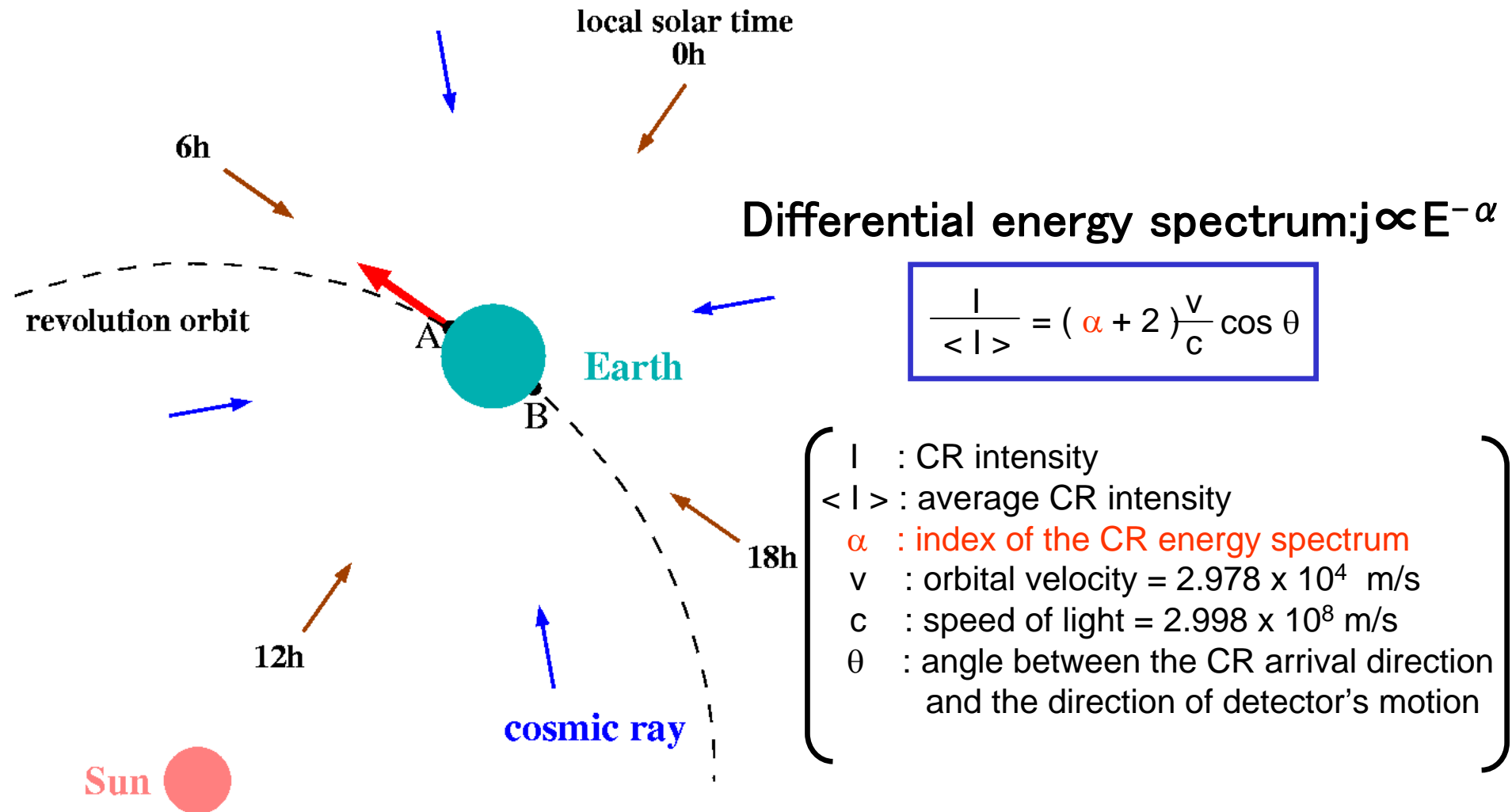
Active phase :

IMF influent to Cosmic-ray Deficit : decrease about 55% \downarrow of D_{app}

Coronal MF influent to the Deficit : decrease about 30% \downarrow of D_{app}

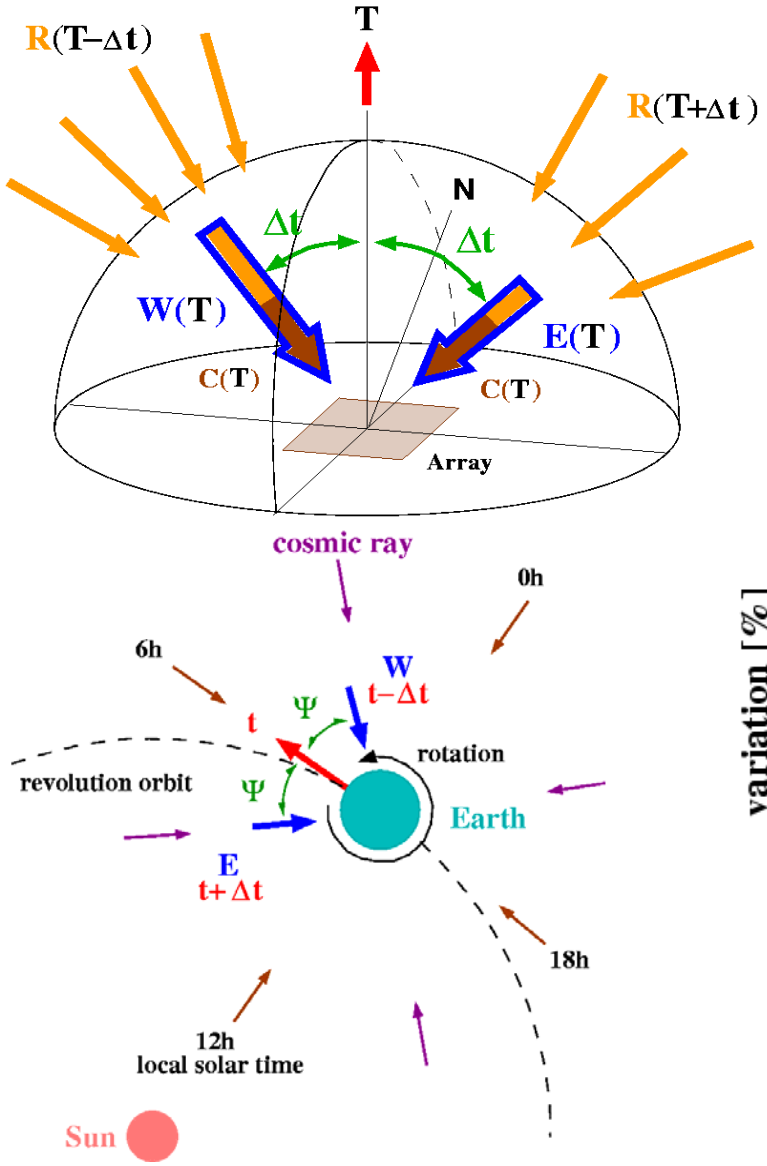
Spectral index of high-energy cosmic rays as determined by the Compton-Getting anisotropy

Apj. Letter [accepted]



A.H. Compton and I.A. Getting, Phys. Rev. **47**, 817(1935)
 L.J. Gleeson and W.I. Axford, Ap. Space Sci. **2**, 431(1968)

Analysis: E - W method



$\langle I \rangle$: constant component, $I(t)$: variable component
 \mathcal{R} : CR intensity outside the atmosphere, C : meteorological effect

$$\langle I \rangle + I(t) = (\langle \mathcal{R} \rangle + \mathcal{R}(t)) (\langle C \rangle + C(t))$$

$$= \langle \mathcal{R} \rangle \langle C \rangle + \mathcal{R}(t) \langle C \rangle + \langle \mathcal{R} \rangle C(t) + \mathcal{R}(t) C(t)$$

$$\langle I \rangle \equiv \langle \mathcal{R} \rangle \langle C \rangle$$

$$\frac{I(t)}{\langle I \rangle} = \frac{\mathcal{R}(t)}{\langle \mathcal{R} \rangle} + \frac{C(t)}{\langle C \rangle} + \frac{\mathcal{R}(t) C(t)}{\langle \mathcal{R} \rangle \langle C \rangle}$$

$$\approx \frac{\mathcal{R}(t)}{\langle \mathcal{R} \rangle} + \frac{C(t)}{\langle C \rangle}$$

$$\equiv R(t) + C(t)$$

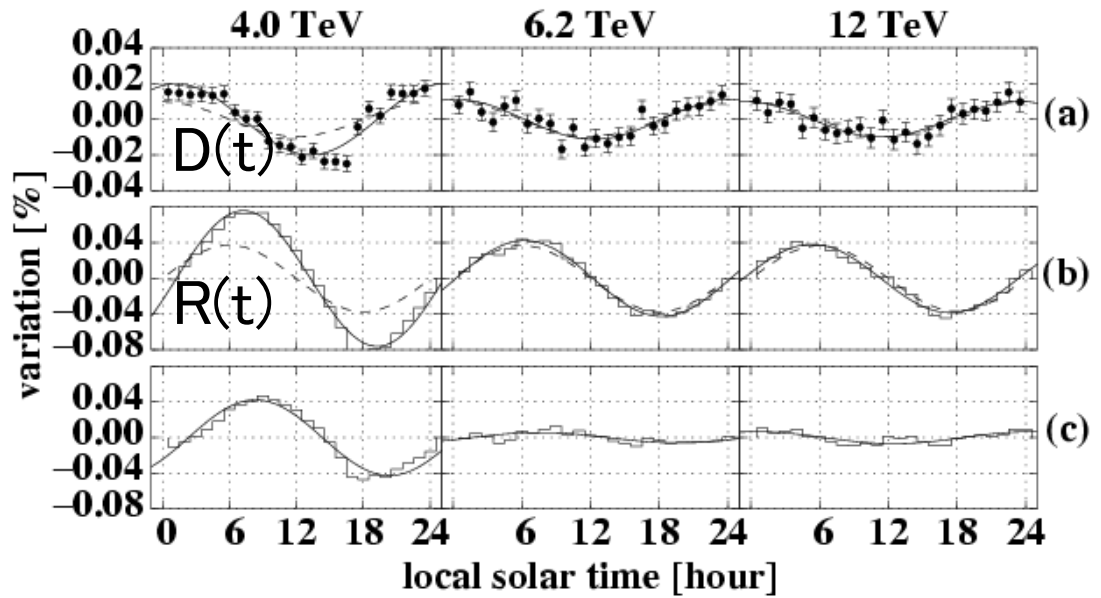
$$E(t) \equiv \frac{I(t + \delta t)}{\langle I \rangle} = R(t + \delta t) + C(t)$$

$$W(t) \equiv \frac{I(t - \delta t)}{\langle I \rangle} = R(t - \delta t) + C(t)$$

$$D(t) = \frac{E(t) - W(t)}{2 \delta t}$$

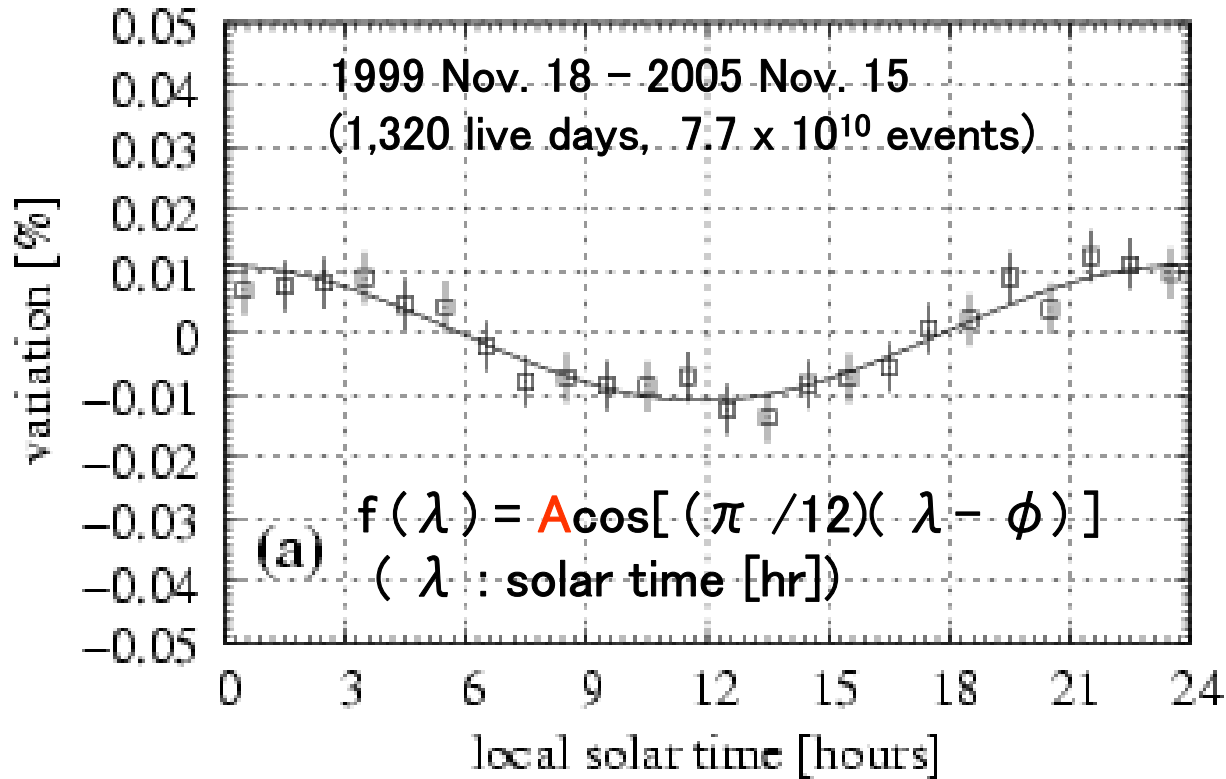
$$= \frac{R(t + \delta t) - R(t - \delta t)}{2 \delta t} \equiv \frac{d}{dt} R(t)$$

K.Nagashima *et al.*,
 Nuovo Cimento Soc.
 Ital Fis. **12C**,
 695(1989)



Phys. Rev. Lett., **93**, 061101 (2004)

The differential variation of relative CR intensity



selection :

- zenith angle < 45 deg.
- shower core in the array
- $\sum \rho_{ft} \geq 50$
- (6 - 40 TeV;
- 20 - 80% of median energy distribution)

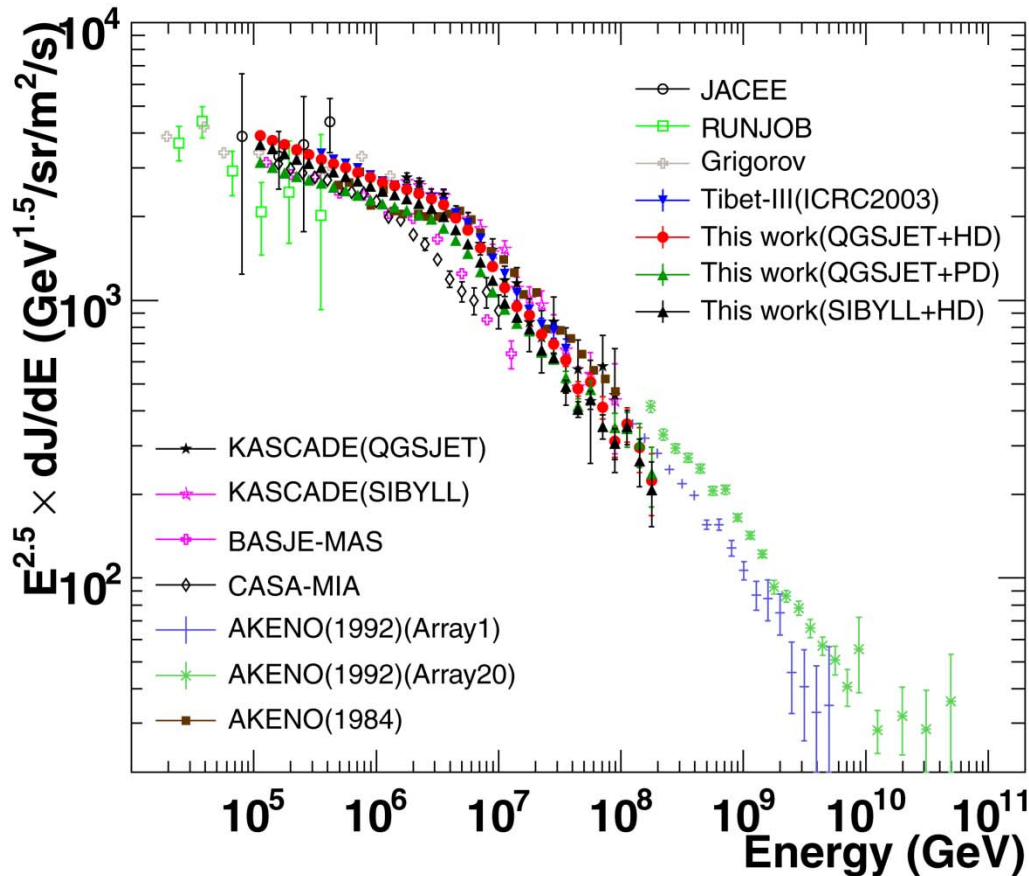
$$A = (1.09 \pm 0.12_{\text{stat}} \pm <0.13_{\text{syst}}) \times 10^{-4}$$

$$\rightarrow \alpha = 3.08 \pm 0.55_{\text{stat}} \pm <0.62_{\text{syst}} \quad (6 - 40 \text{ TeV})$$

consistent with -2.7 from direct energy spectrum measurements.

Energy spectrum of all-particle cosmic rays around the knee region experiments

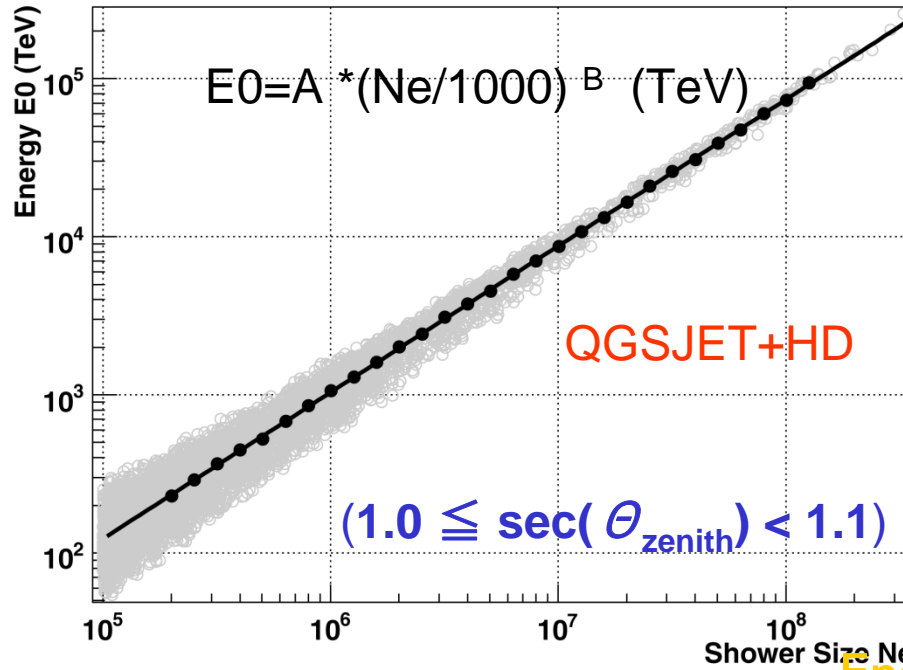
(Submitted to Apj.)



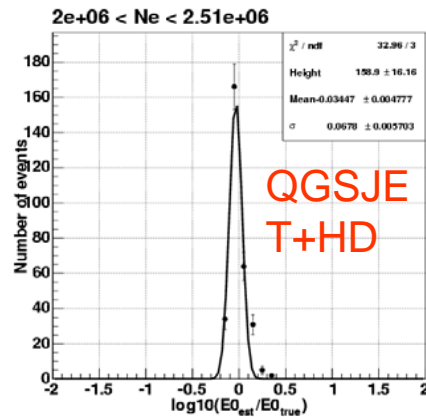
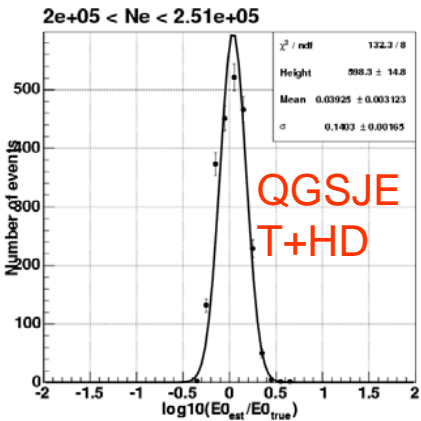
Model	Index of spectrum	Energy range (eV)
QGSJET +HD	-2.67 ± 0.01	$< 10^{15}$ eV
	-3.10 ± 0.01	$> 4 \times 10^{15}$ eV
QGSJET +PD	-2.65 ± 0.01	$< 10^{15}$ eV
	-3.08 ± 0.01	$> 4 \times 10^{15}$ eV
SIBYLL +HD	-2.67 ± 0.01	$< 10^{15}$ eV
	-3.12 ± 0.01	$> 4 \times 10^{15}$ eV

Shower size to primary energy

Shower Size \leftrightarrow Energy (by QGSJET+HD)

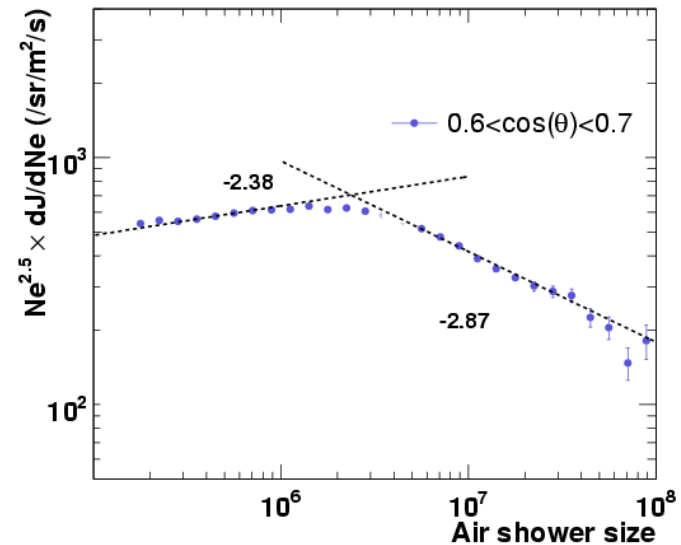
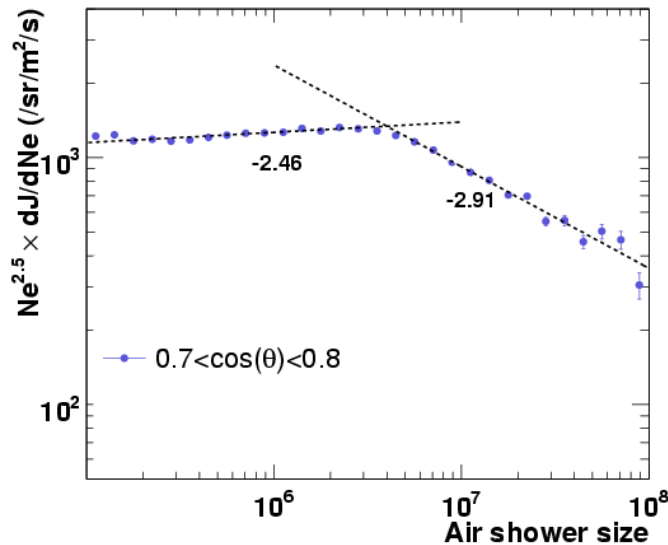
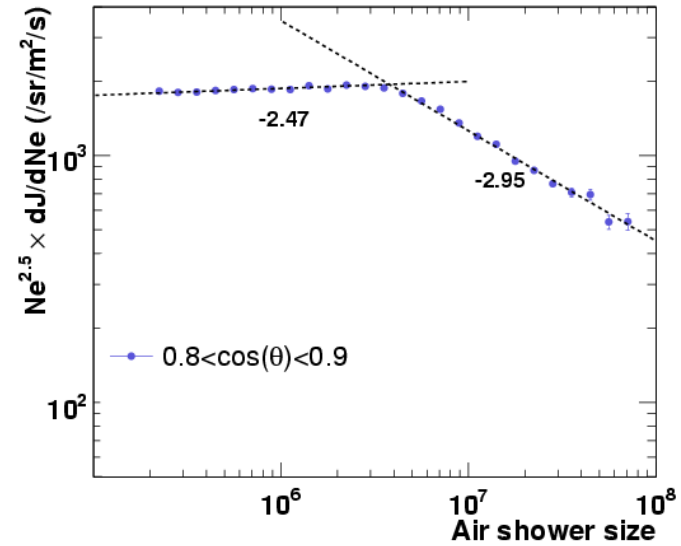
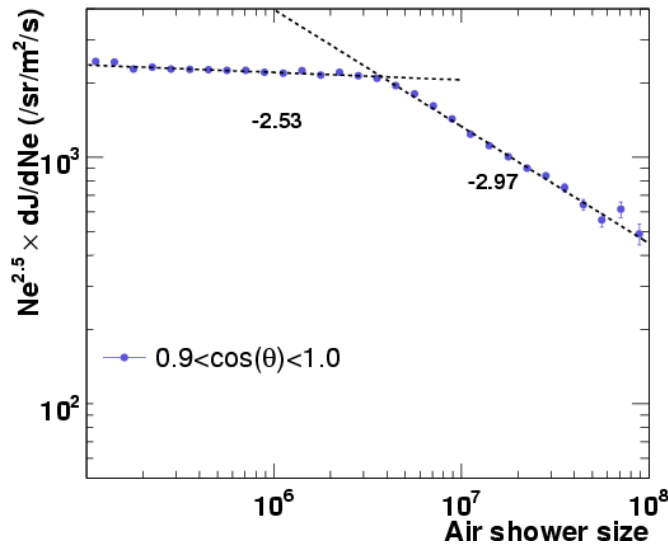


Energy resolution



Int. models		QGSJET		SIBYLL
	Primary	HD	PD	HD
150–250 TeV	Energy resolution	38.1 %	39.6 %	37.7 %
1500–2500 TeV	Energy resolution	16.9 %	19.3 %	18.5 %

Differential shower size spectra measured at different atmospheric depths (1)



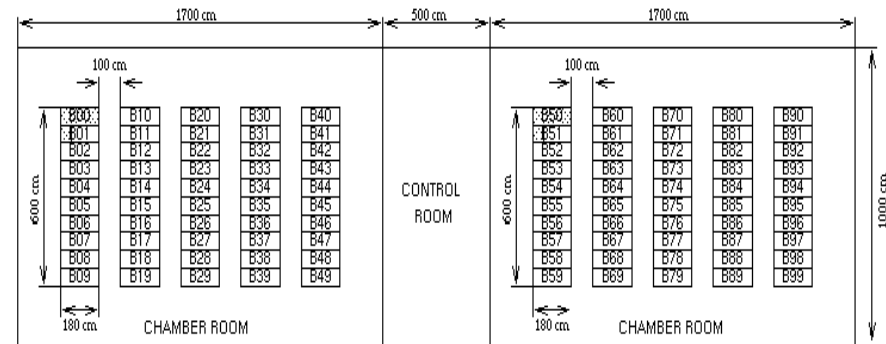
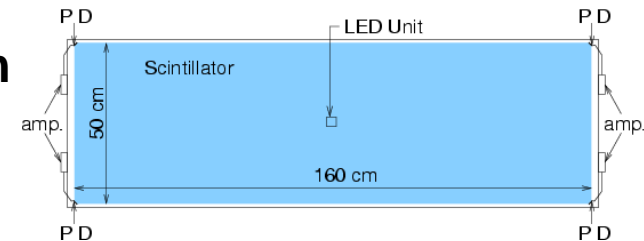
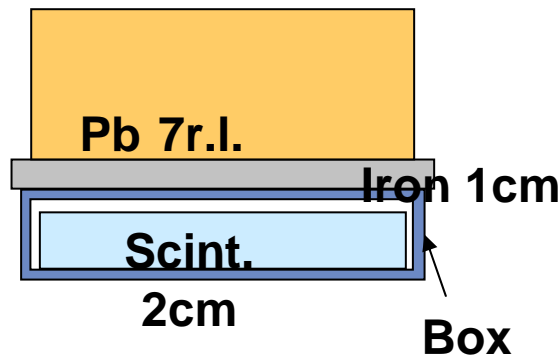
Proton+Helium spectrum with Tibet III AS array + Burst Detector

Electromagnetic component over GeV is responsible for burst size.

Scint. was calibrated by accelerator beam

733 Scintillators

Burst hut

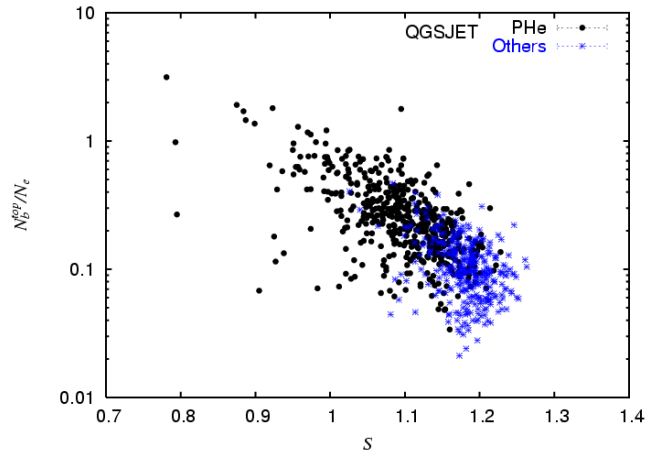


- FT Detector (b12)
- FT Detector w/ D-RMT (165)
- Density Detector (26)
- 733 scintillators

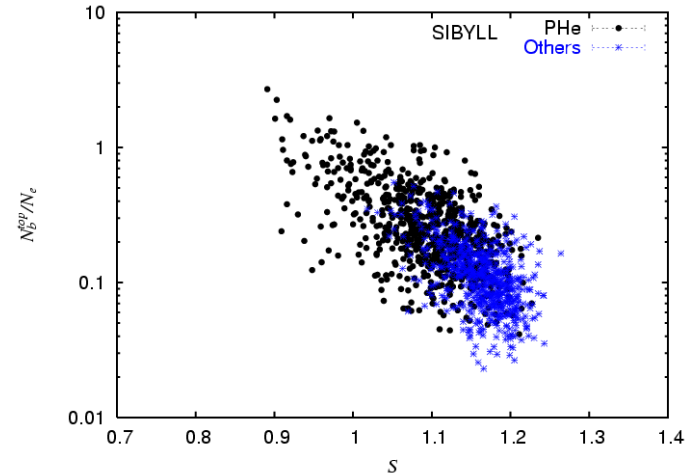
80 m² coverage
by 100 burst detectors.

Analysis

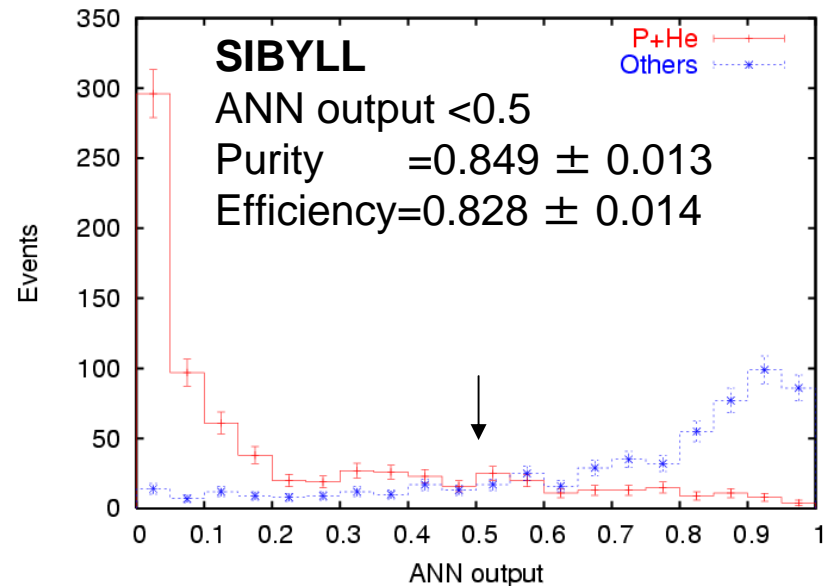
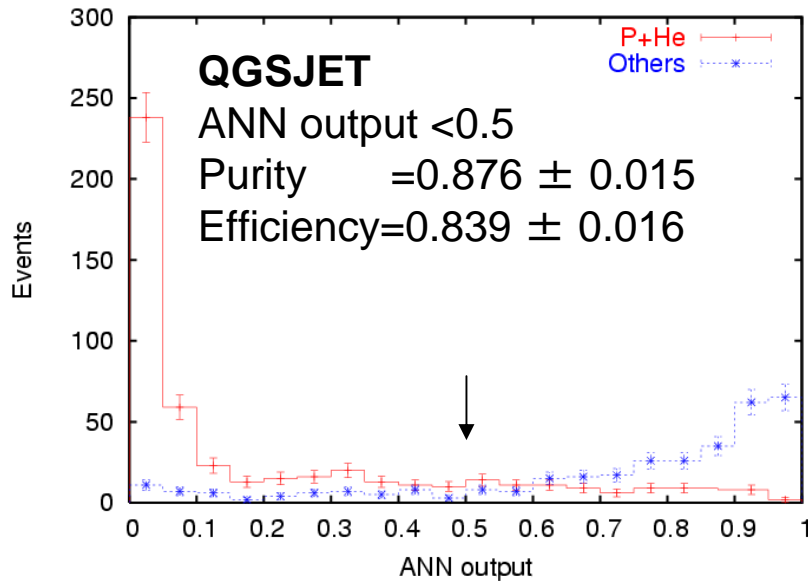
Sensitivity of used parameters to the particle identification



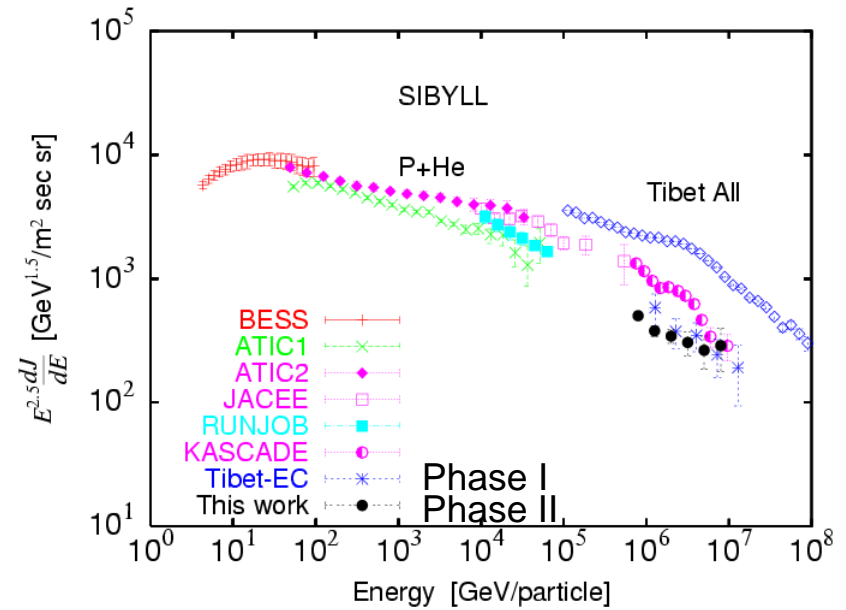
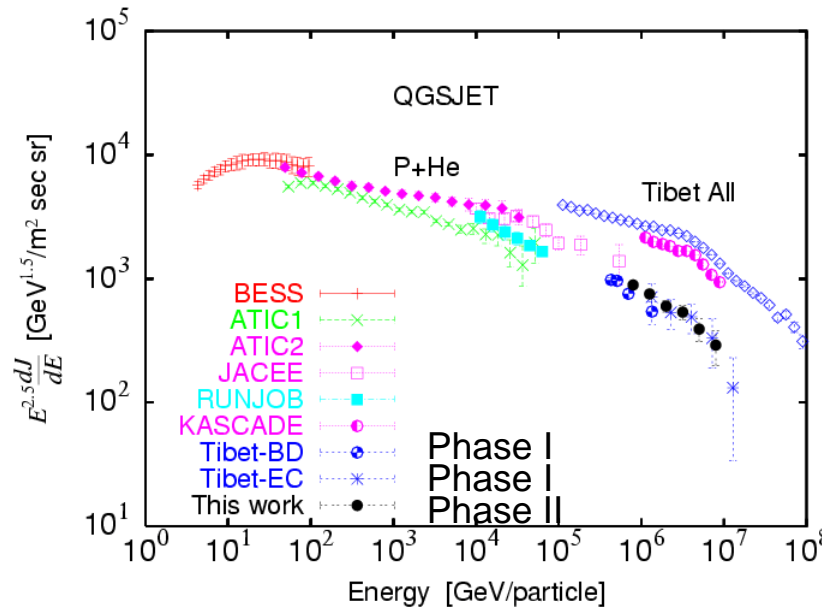
2 primary groups



Neural Network Output (Used parameters: N_D , N_b^{top} , N_e , s , θ)

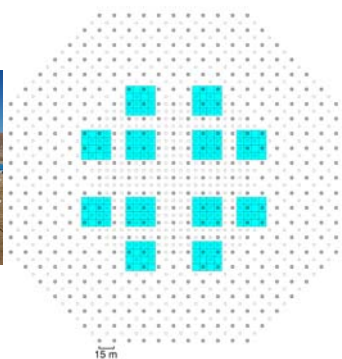
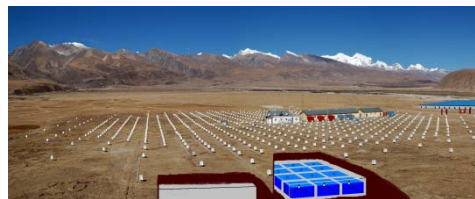


Proton+Helium spectrum

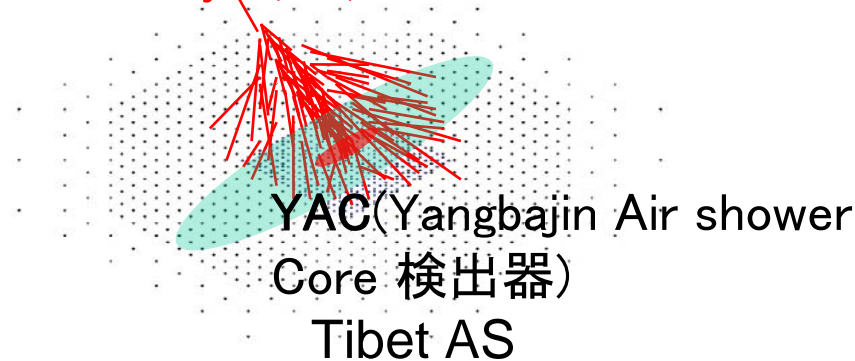


Tibet AS(~ 8.3 万 m^2)
+MD(384ch, $\sim 10^4 m^2$)

Tibet AS+YAC($1\sim 5$ 千 m^2)

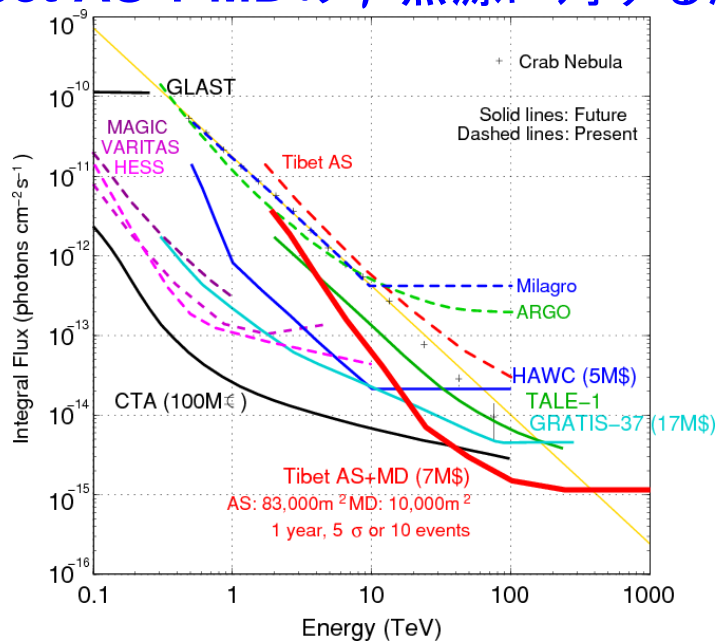


Cosmic ray(P,He,Fe \dots)

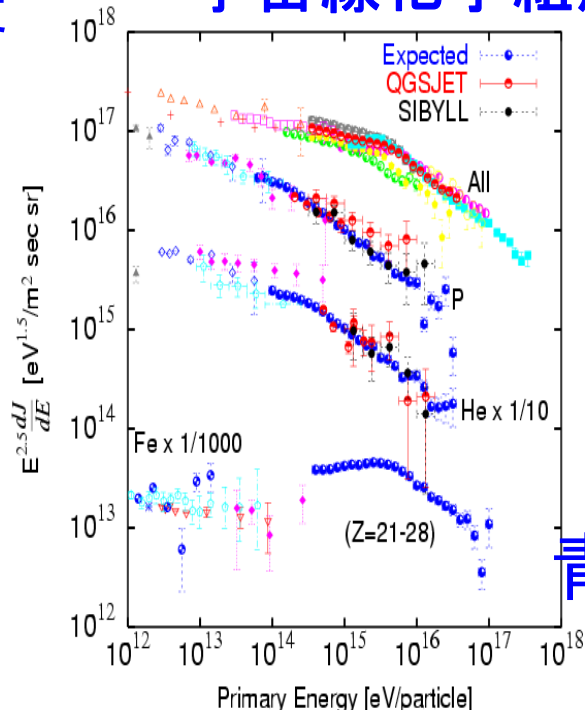


100TeV γ

Tibet AS + MDの γ 点源に対する感度

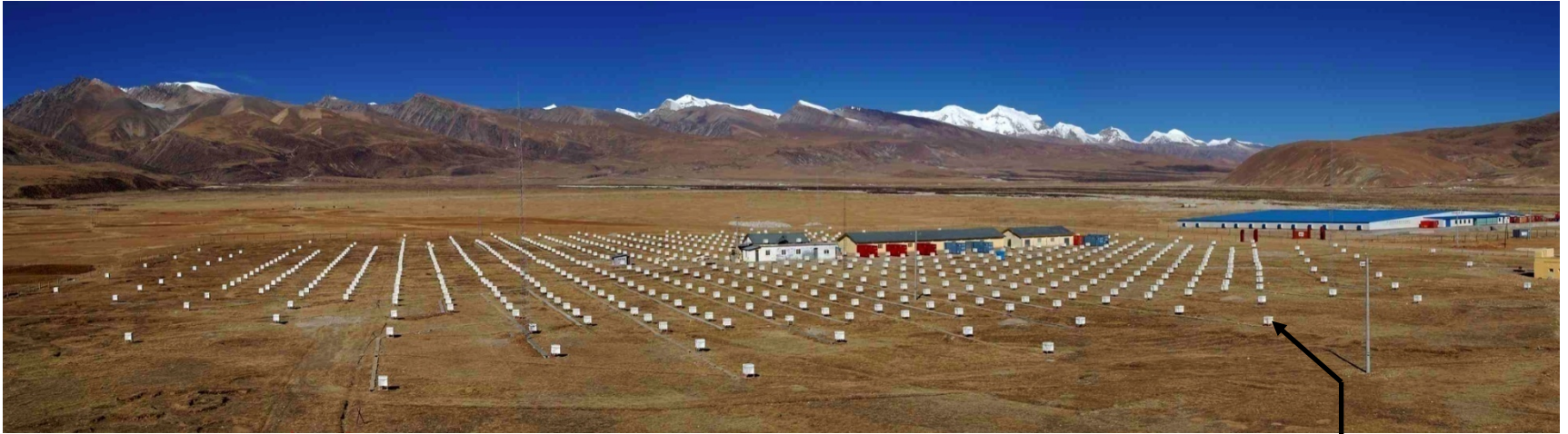


宇宙線化学組成



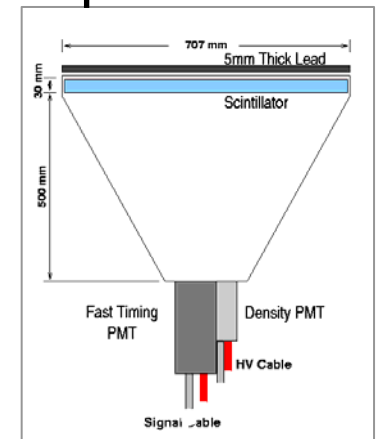
青が期待値

チベット空気シャワー観測装置 (Tibet AS)



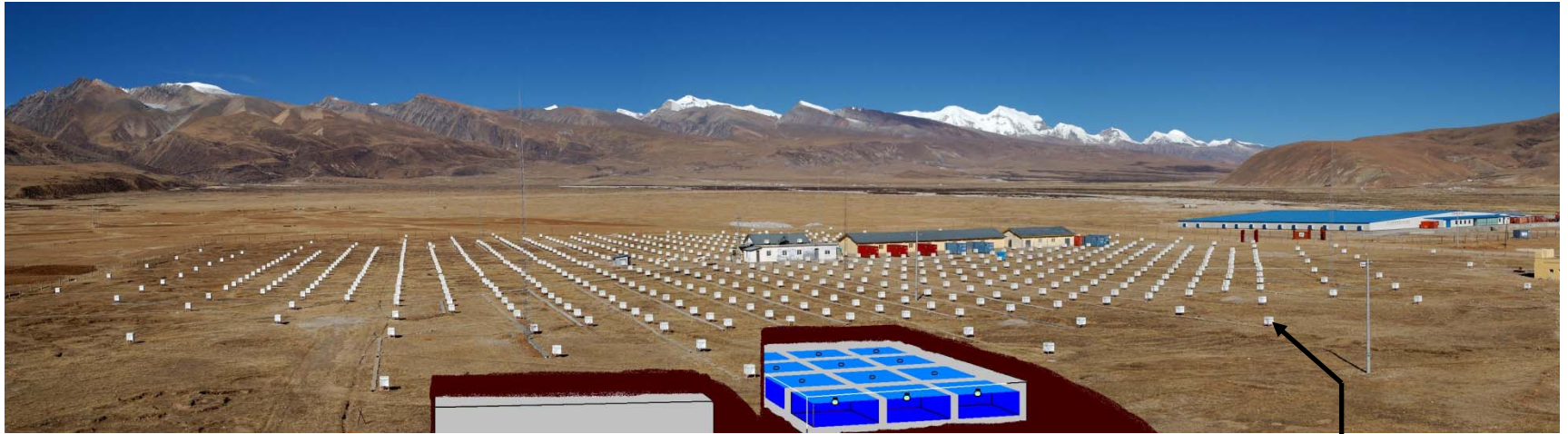
□ 中国チベット (90.522°E, 30.102°N) 標高4300 m

- | | |
|----------------|--------------------------|
| □ シンチレーション検出器数 | 0.5 m ² x 789 |
| □ 空気シャワー有効面積 | ~37,000 m ² |
| □ 最頻エネルギー | ~3 TeV |
| □ 角度分解能 | ~0.2 @100 TeV |
| □ エネルギー分解能 | ~40% @100TeV |
| □ 視野 | ~2 sr |



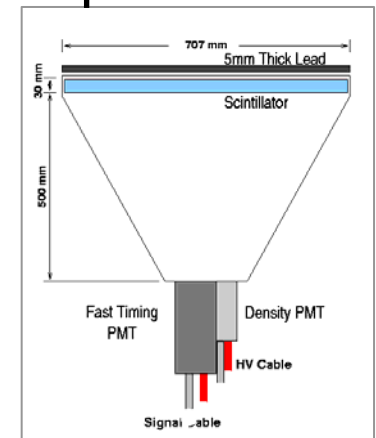
→空気シャワー中の電磁成分($e^{+/-}$, γ)を主に観測し
一次宇宙線エネルギー、方向、空気シャワーのコア位置などを測定

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 ↑

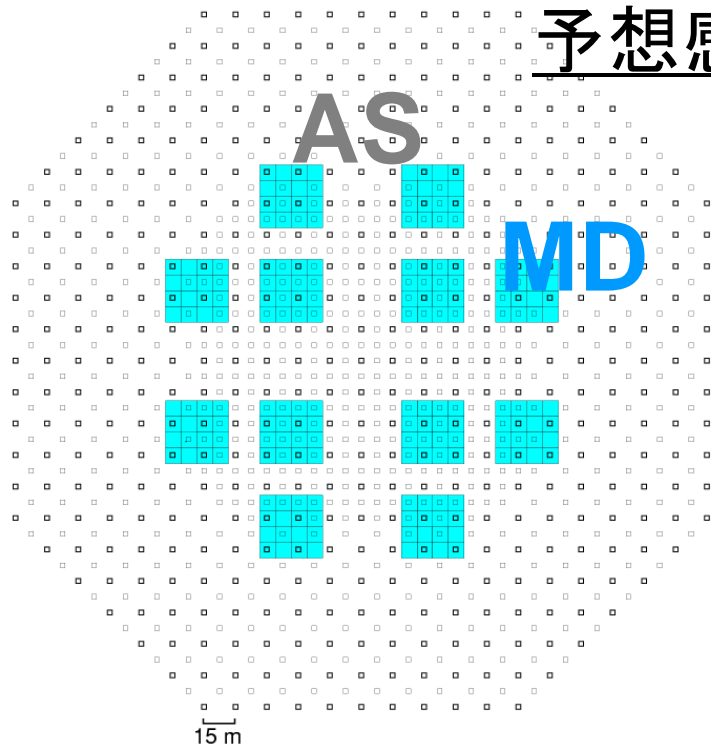
- 中国チベット (90.522°E, 30.102°N) 標高4300 m
- シンチレーション検出器数 0.5 m² x 789 +292 → 1081
- 空気シャワー有効面積 ~37,000 m² → 83,000 m²
- 最頻エネルギー ~3 TeV
- 角度分解能 ~0.2 @100 TeV
- エネルギー分解能 ~40% @100TeV
- 視野 ~2 sr



→水チェレンコフミュオン観測装置 (MD) により10-1000TeV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)

100TeV領域ガンマ線を広視野観測

予想感度シミュレーション



□ 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

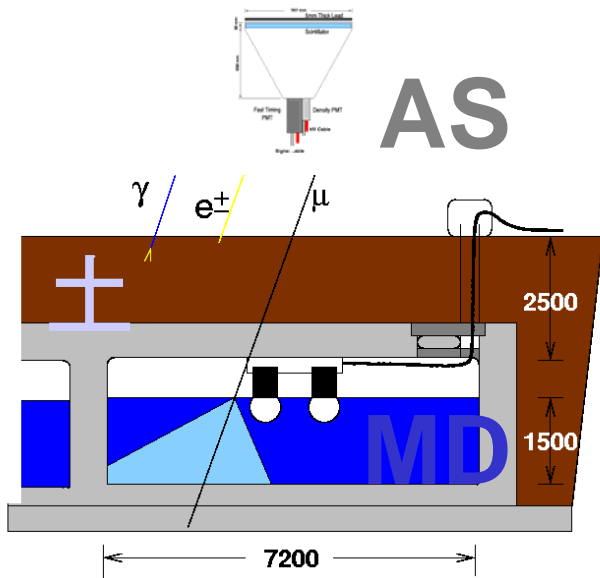
空気シャワーの粒子数、コア位置、方向などを推定

□ 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 $\sim 40\text{m}@400\text{nm}$ (波長依存)
PMT量子効率 $\sim 20\%@400\text{nm}$ (波長依存)

□ アクシデンタルミュオン

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

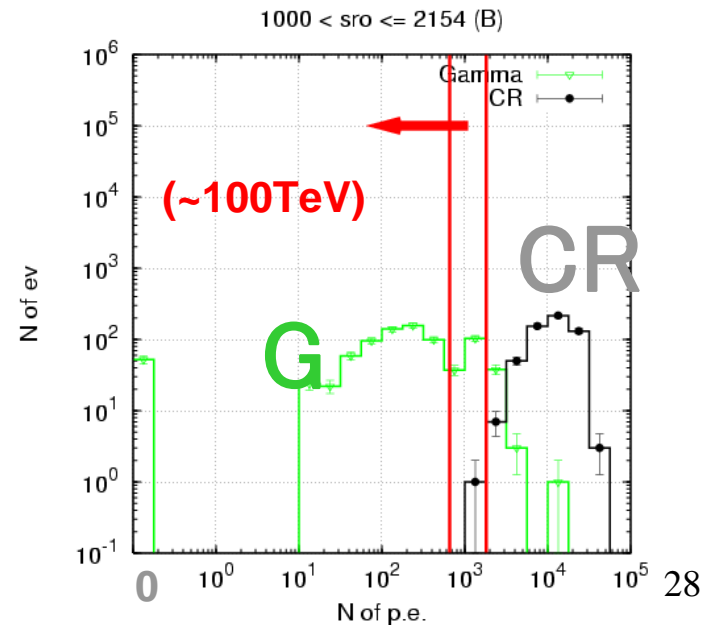
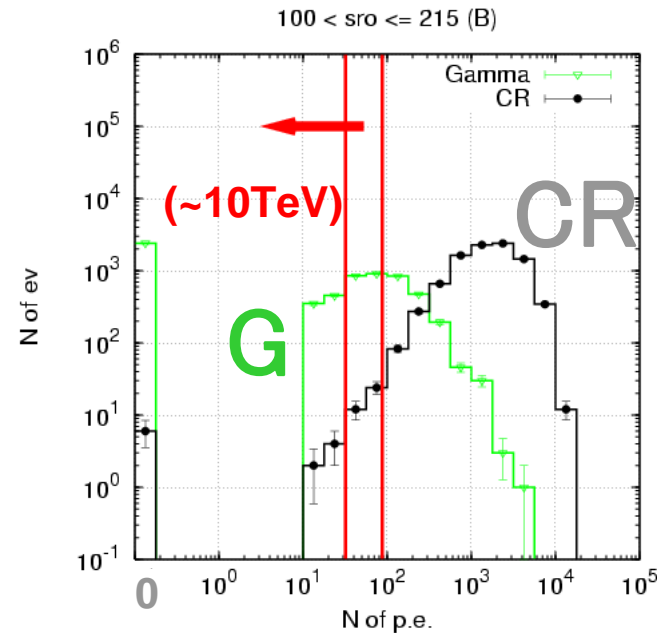
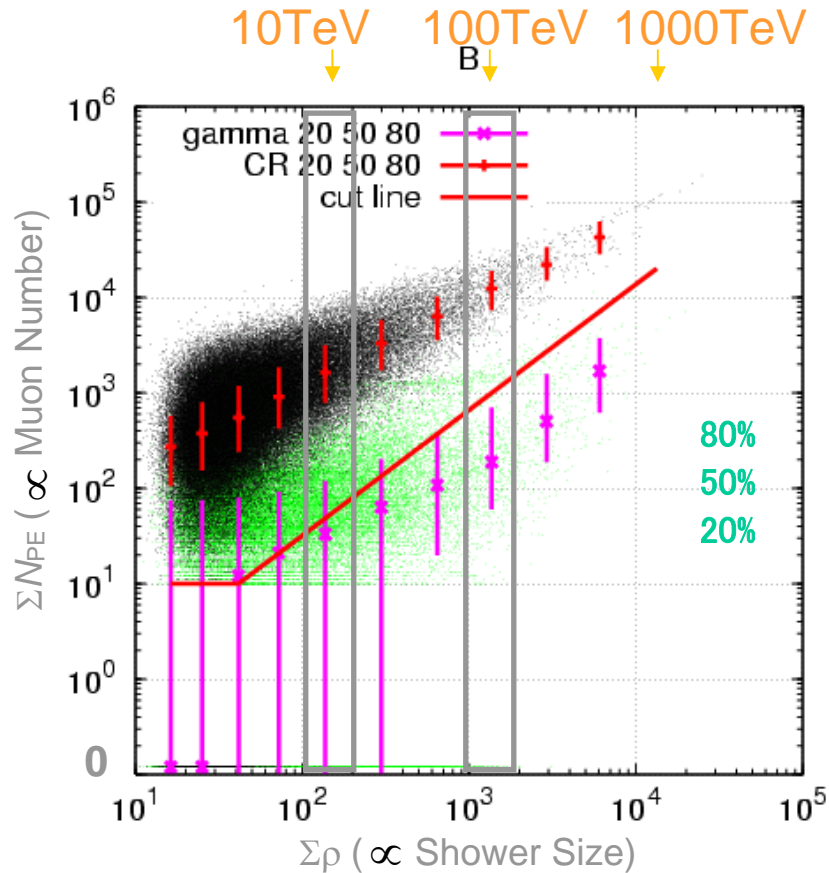
$\Sigma \rho$: シンチレータ検出器で観測した粒子密度の和

\propto シャワーサイズ

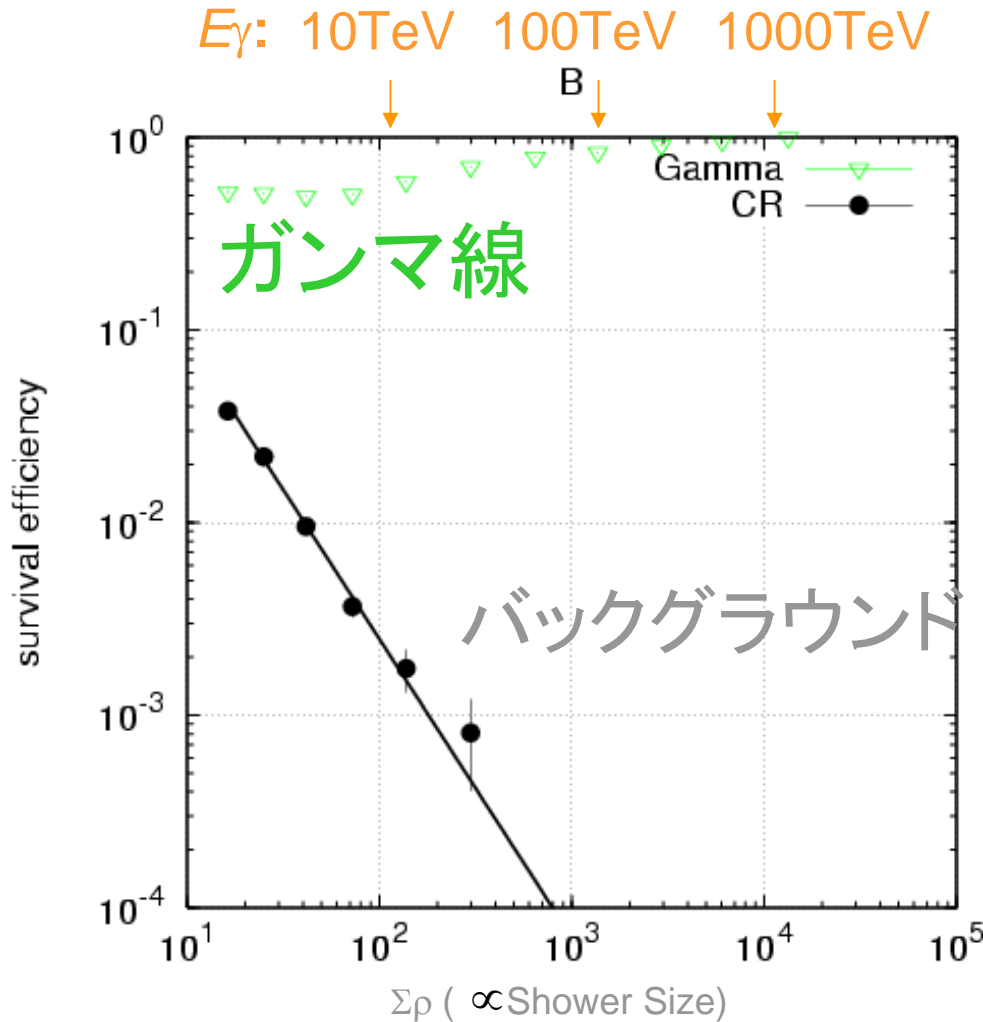
ΣN_{PE} : ミューオン検出器で観測した光電子数の和

\propto ミューオン数

(MD検出器の閾値 $N_{PE} > 10$ 光電子)



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: ~99.8% 除去

ガンマ線: ~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: ~99.99% 除去

ガンマ線: ~95% 生存

ガンマ線感度: バックグラウンドフリー!

1000TeV:

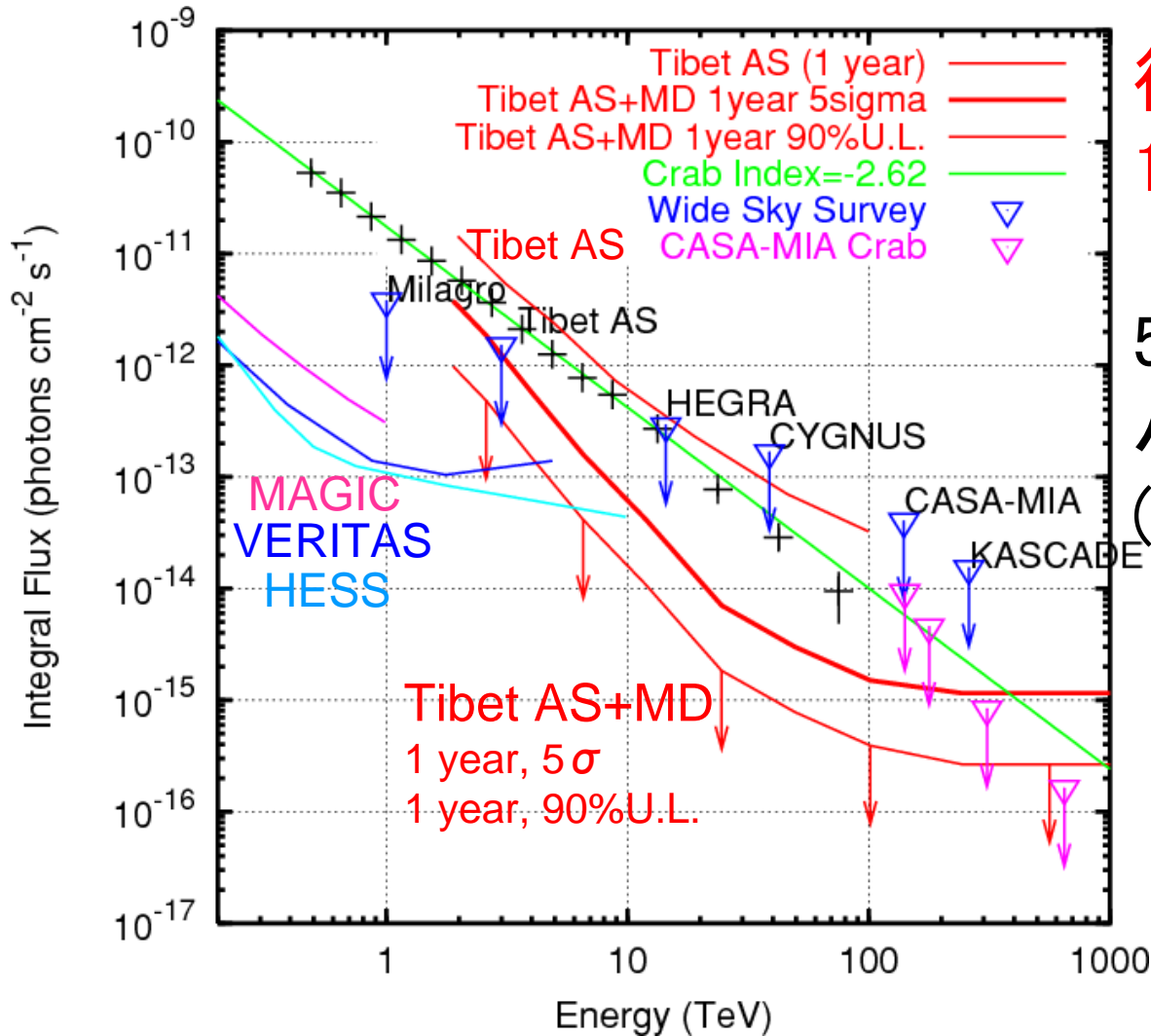
カット $\Sigma N_{PE} \sim 20000$

バックグラウンド: \gg ~99.99% 除去

ガンマ線: ~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)

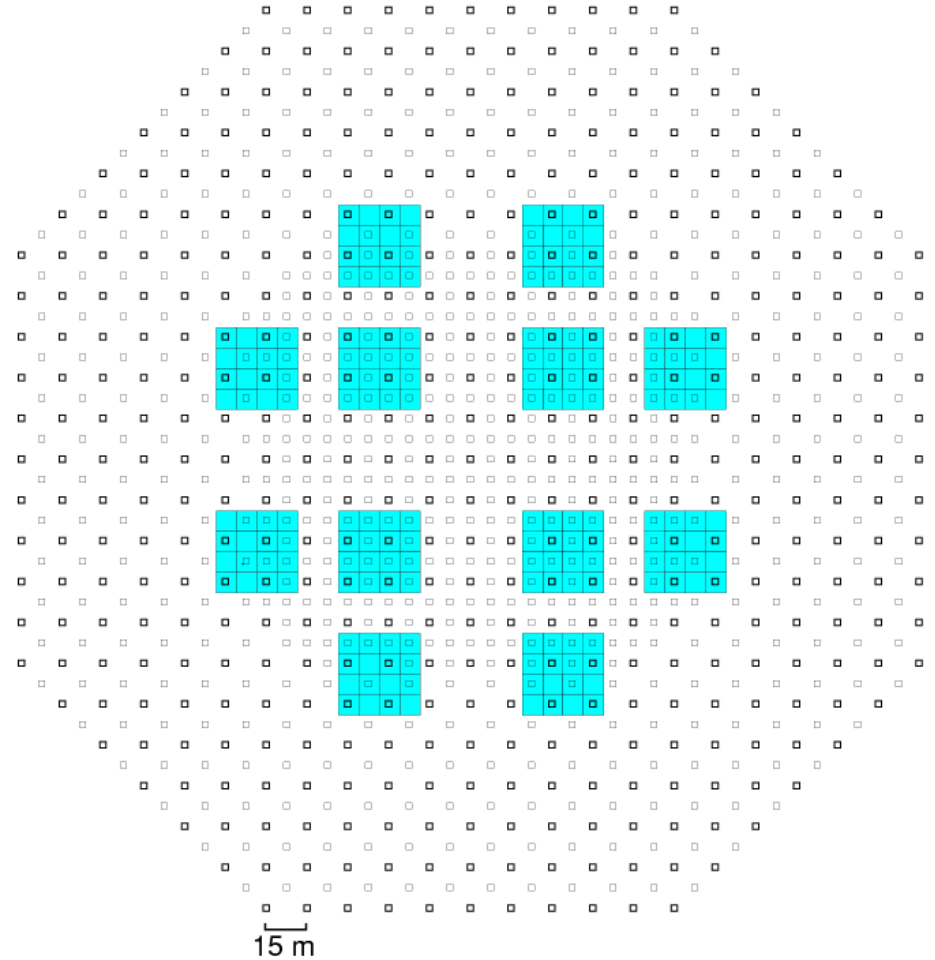
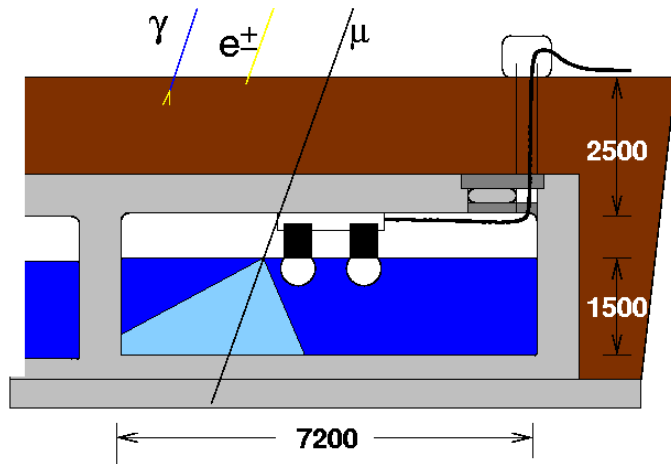
チベット水チェレンコフミュオン観測装置 (Tibet MD)

地下 2.5m (物質厚 $\sim 515\text{g}/\text{cm}^2 \sim 19X_0$)
7.2m \times 7.2m \times 水深1.5m 水槽 192台
20" Φ PMT 2本 (HAMAMATSU R3600)

水槽材質:
コンクリート
白色エポキシ樹脂塗装

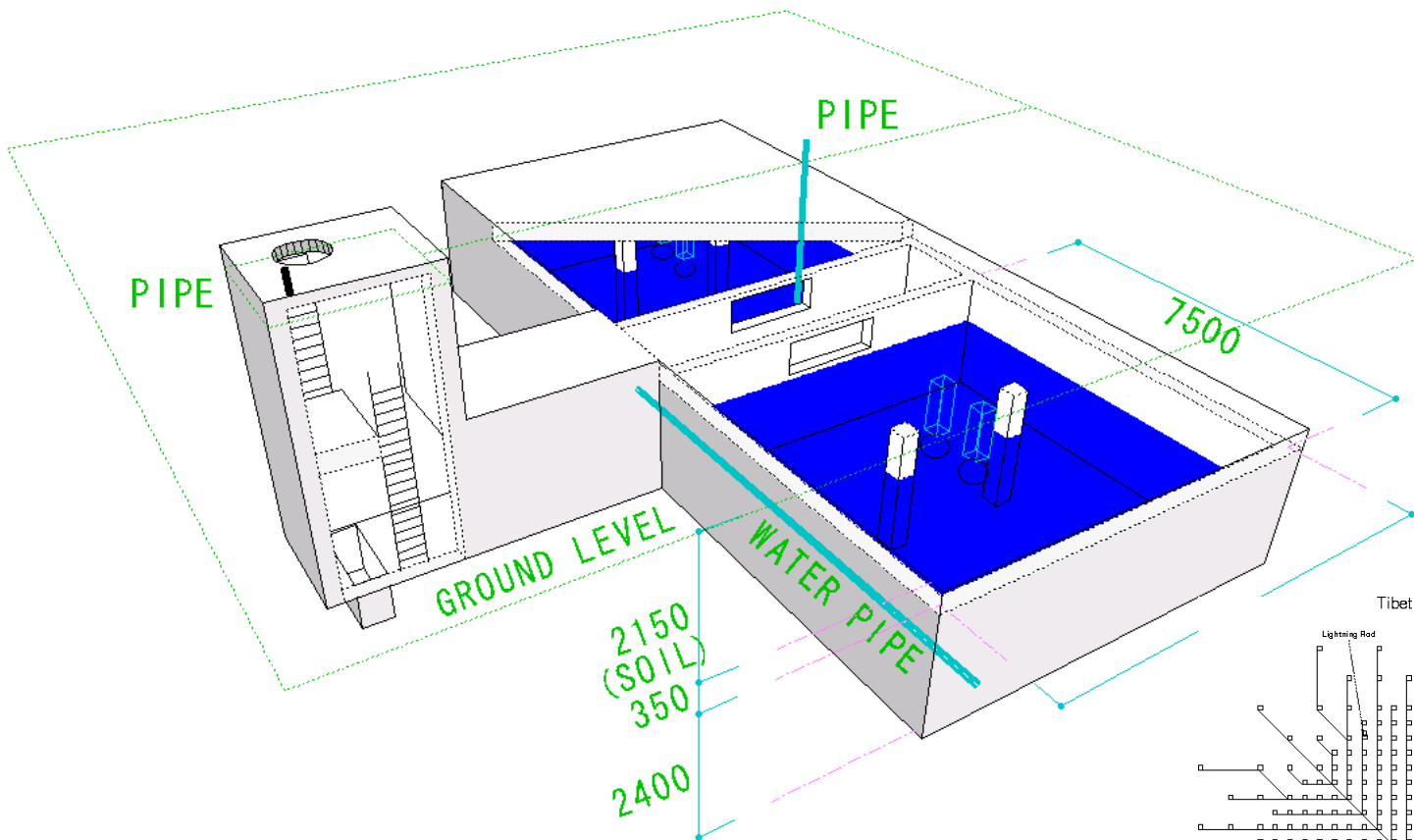


合計 $\sim 10,000\text{m}^2$

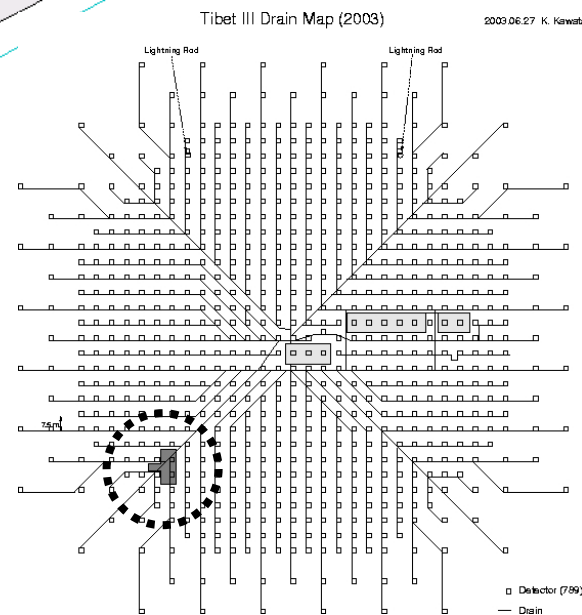


→ 空気シャワー中の電磁成分(e^\pm, γ)を主に観測し
一次宇宙線エネルギー、方向、空気シャワーのコア位置などを測定

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
シミュレーションとの比較
1000TeVガンマ線の観測





拉薩 鉄筋



鉄筋メーカー
JISCO (Jinquan Iron & Steel)
中国北西部の国営企業



観測所の南の河付近 砂礫場



礫(河の石)



セメント搬入



コンクリートミキサー



9月1日 建設開始



掘削



9月4日 掘削状態



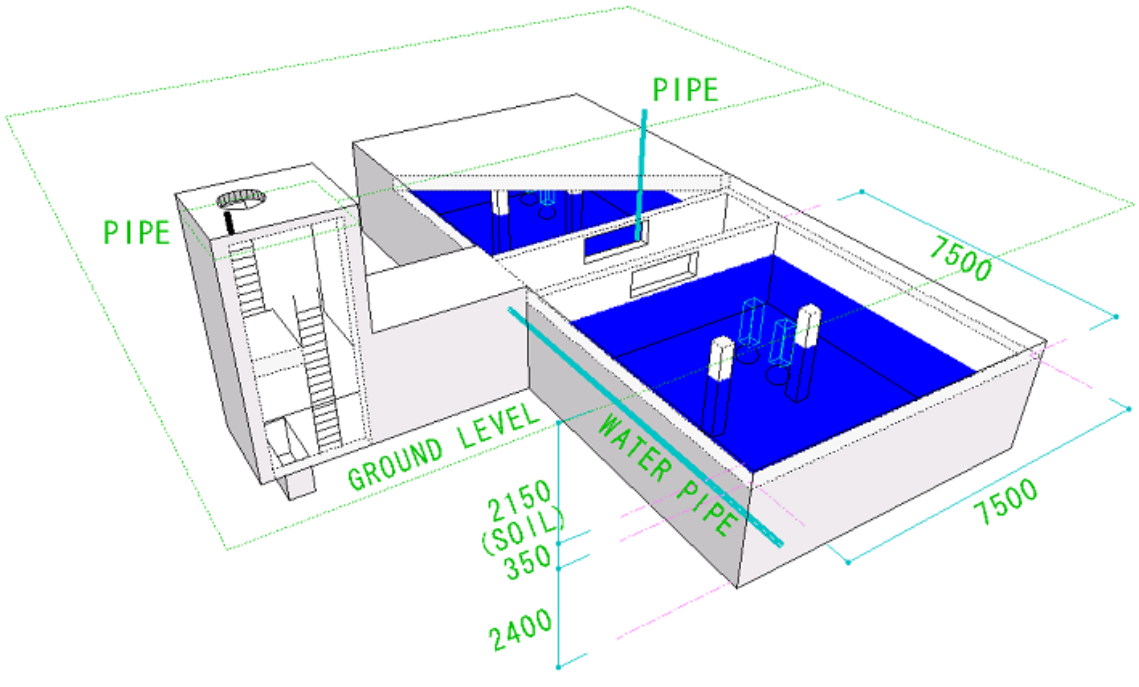
9月13日 捨てコン終了



配筋



10月20日 型枠撤去





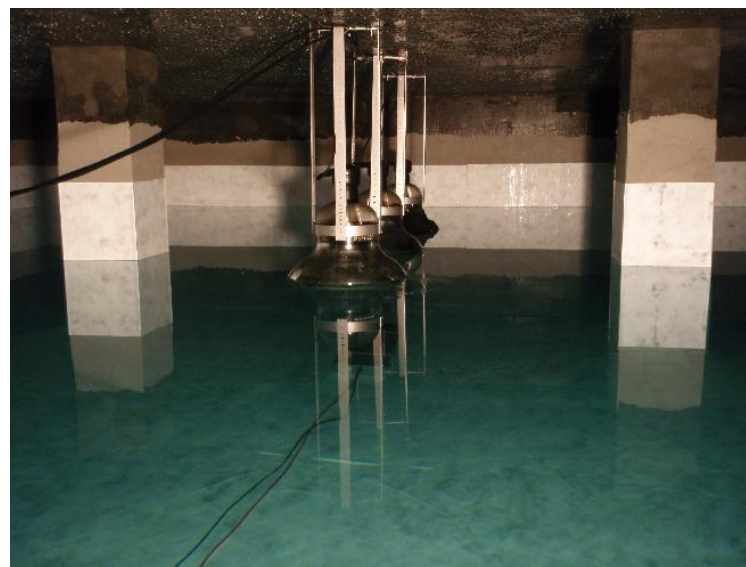
11月6日 南プール、エポキシ樹脂塗装



南プール（エポキシ系塗装壁）



北プール(セメント系防水＋
タイベックシート壁)



注水



井戸



11月20日 埋め戻し