

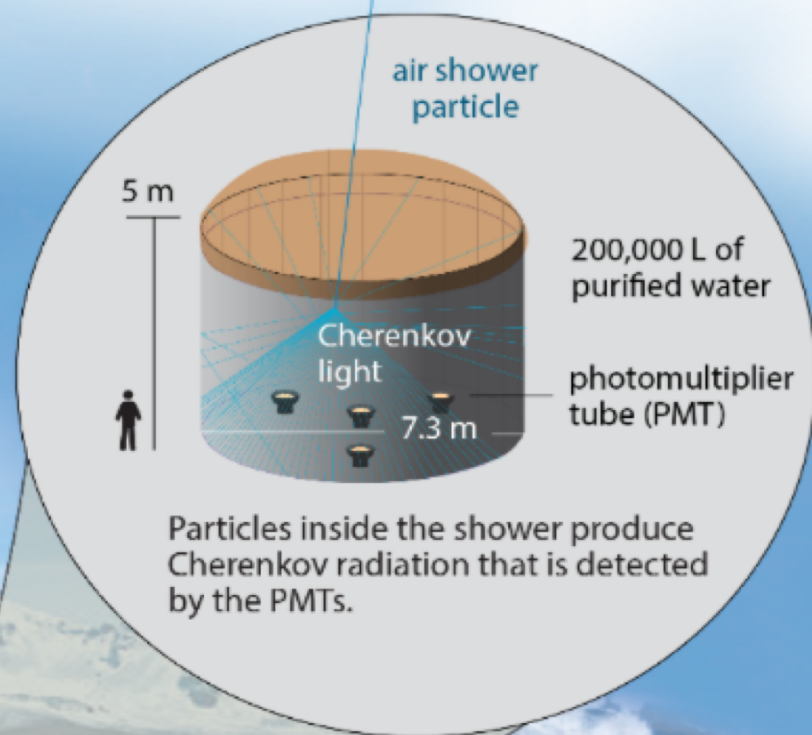
ガンマ線起源空気シャワーのエネルギー決定

川田 和正 (東大宇宙線研)

1. HAWC実験
2. Tibet AS+MD実験
3. まとめ

HAWC実験

Mt. Sierra Negra, Mexico
標高4100m、北緯19°
300 tanks 20,000m²

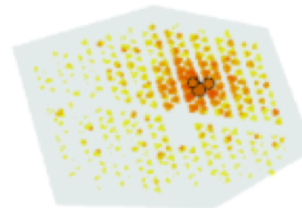


空気シャワー二次粒子がタンク内で
発する水チェレンコフ光を観測

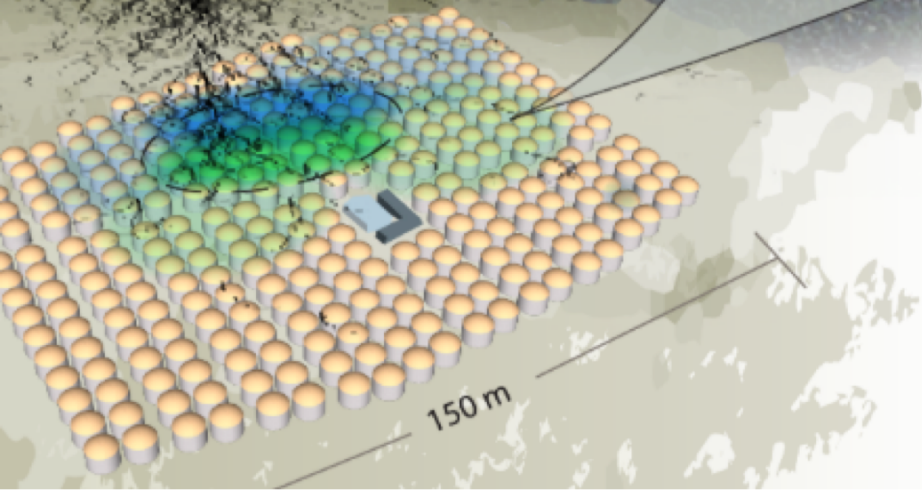
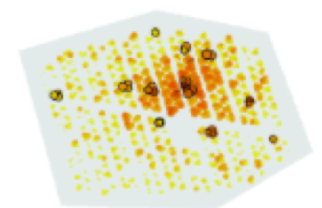
Gamma rays vs cosmic rays

HAWC selects gamma rays from among a much more abundant background of cosmic rays.

gamma-ray shower



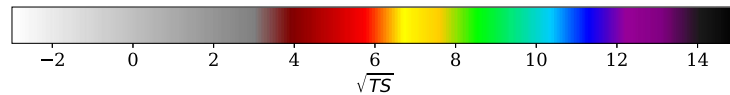
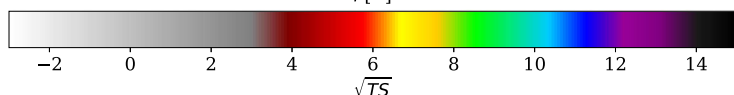
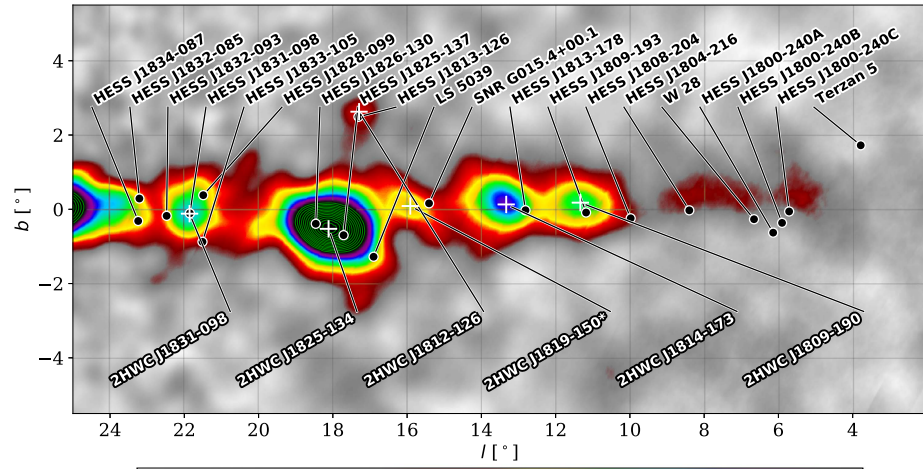
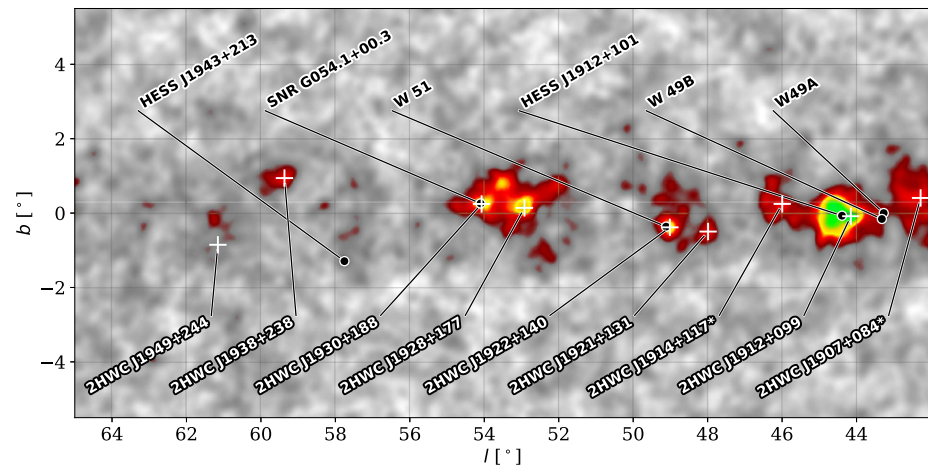
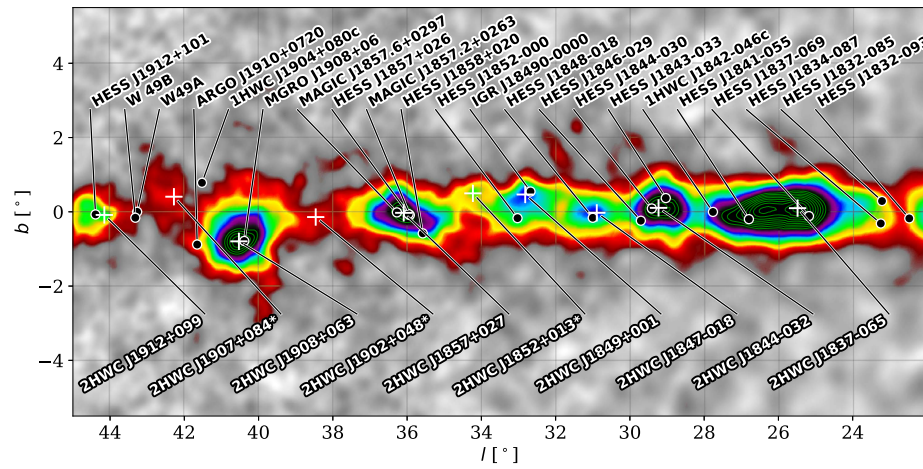
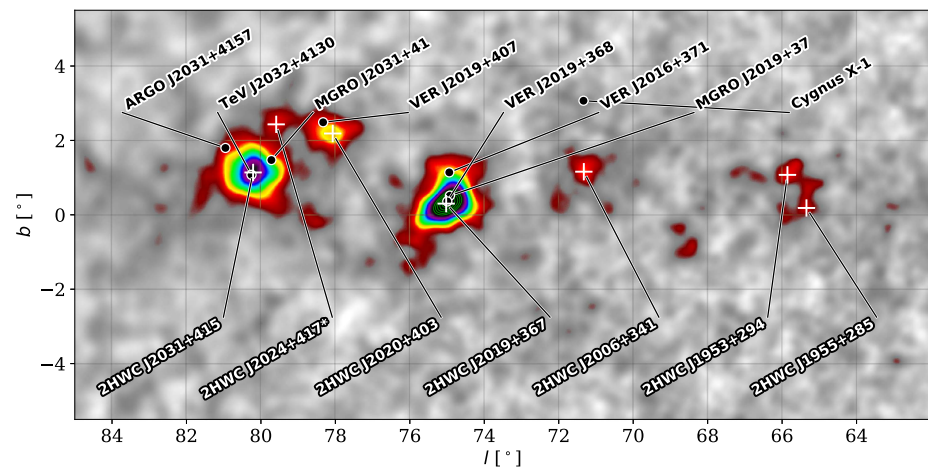
cosmic-ray shower



HAWC実験：北天サーベイ(2017)

Abeysekara+ (HAWC Collab.), ApJ, 843, 40 (2017)

広がったガンマ線源を多数発見

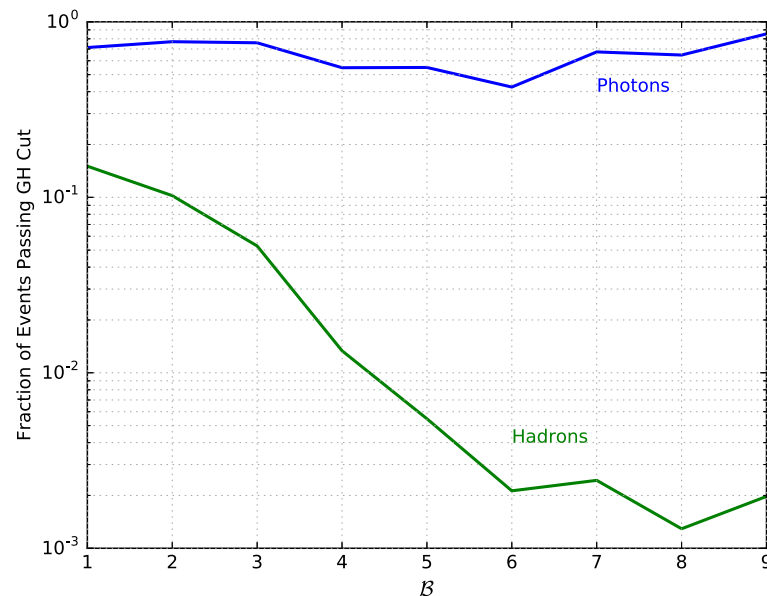
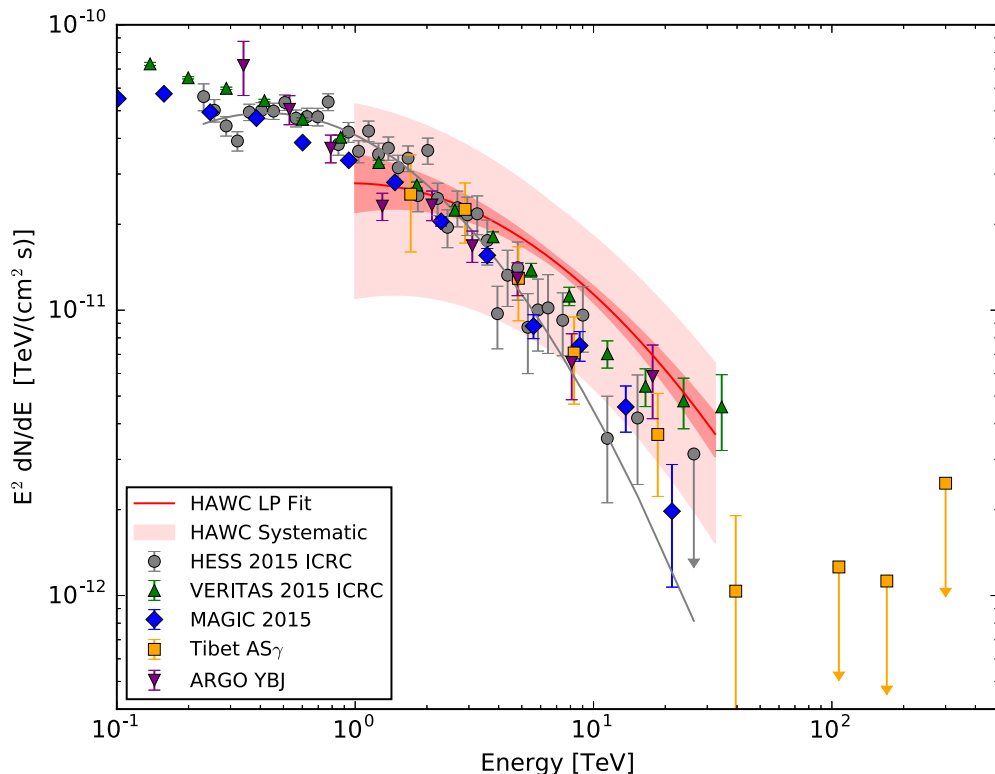


HAWC実験：Crab Nebula (2017)

Abeysekara+ (HAWC Collab), ApJ, 843, 39 (2017)

北天の標準天体

有効観測日数：507日間 (2014年11月 – 2016年6月)



Gamma / Hadron 選別後の生存率

- ✓ エネルギー範囲：1 TeV – 30 TeV
- ✓ 小さな統計誤差、大きな系統誤差

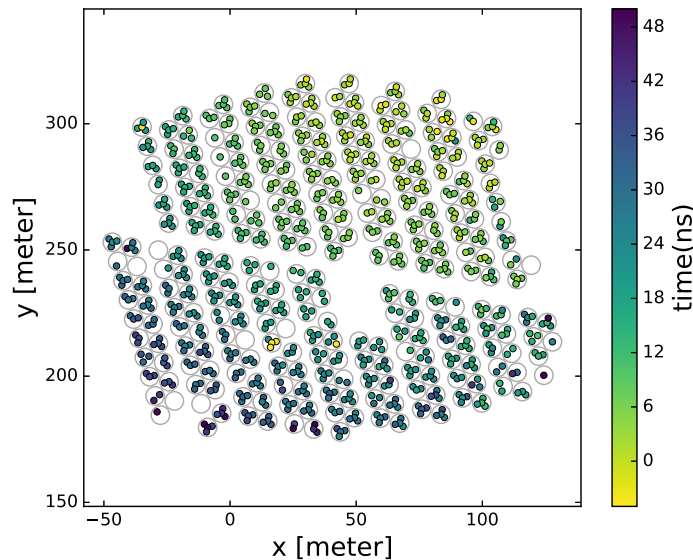
LP (log parabola) fit :
$$\phi(E) = \phi_0 (E/E_0)^{-\alpha - \beta \cdot \ln(E/E_0)}$$

HAWC実験：イベント再構成

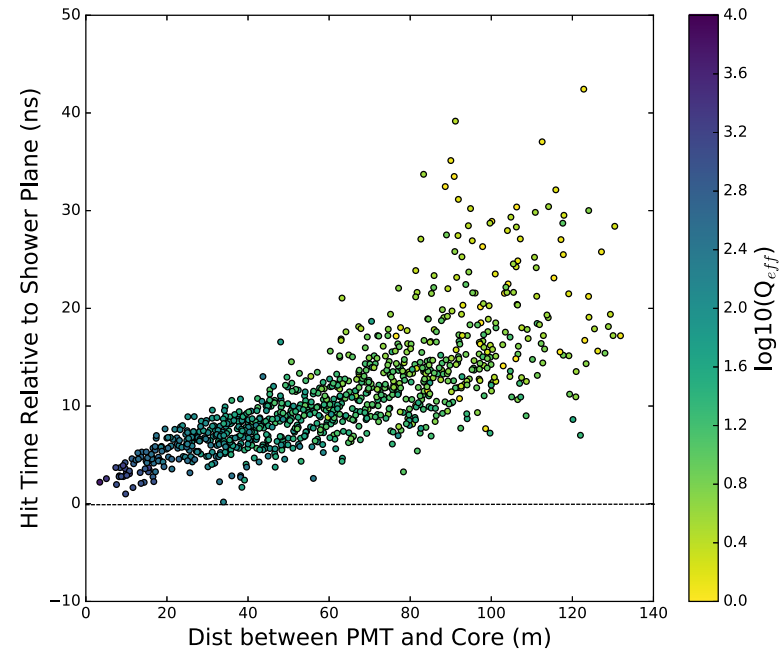
Abeysekara+ (HAWC Collab), ApJ, 843, 39 (2017)

Crabからのガンマ線候補事象
エネルギー不明 >10TeV?

方向決定



(c) Recorded Time



(d) Shower Curvature/Sampling

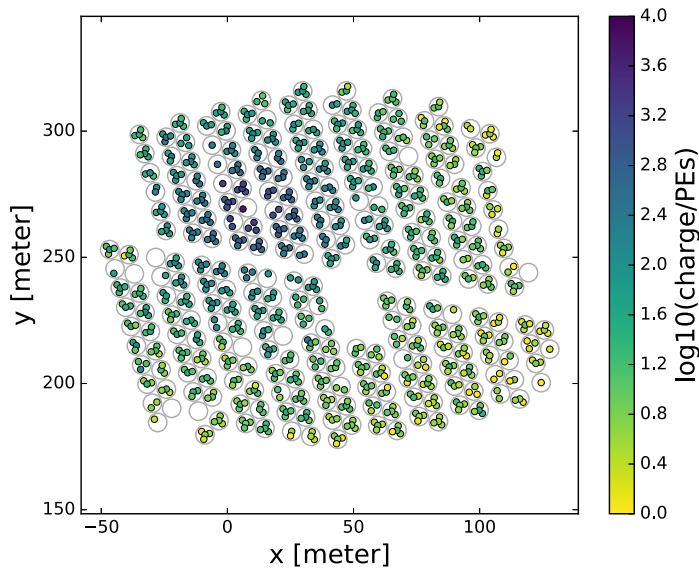
- ✓ 検出器間の相対的時間差
- ✓ 水タンク：空気シャワー中のガンマ線にも高感度
- ✓ 高い有感面積 → 良い角度分解能

HAWC実験：イベント再構成

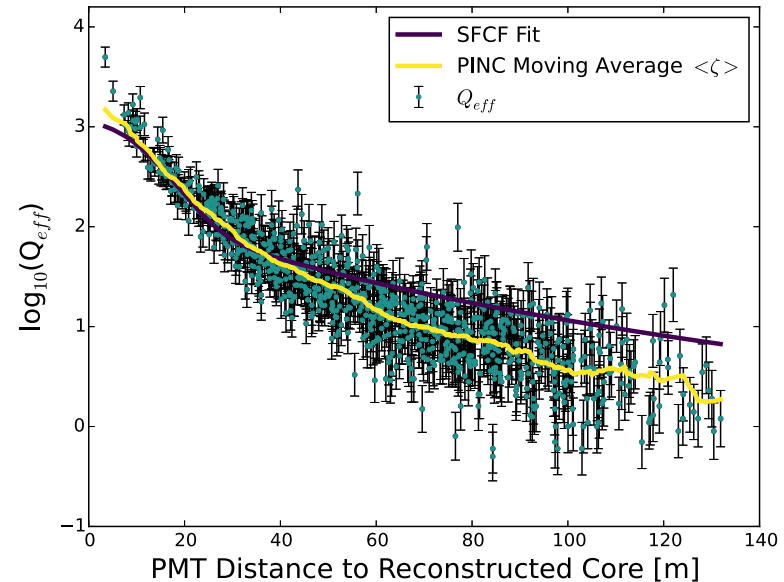
Abeyssekara+ (HAWC Collab), ApJ, 843, 39 (2017)

Crabからのガンマ線候補事象
エネルギー不明 >10TeV?

エネルギー決定



(a) Recorded Effective Charge



(b) Lateral Distribution Function

ラテラル分布 : SFCF : Super Fast Core Fit

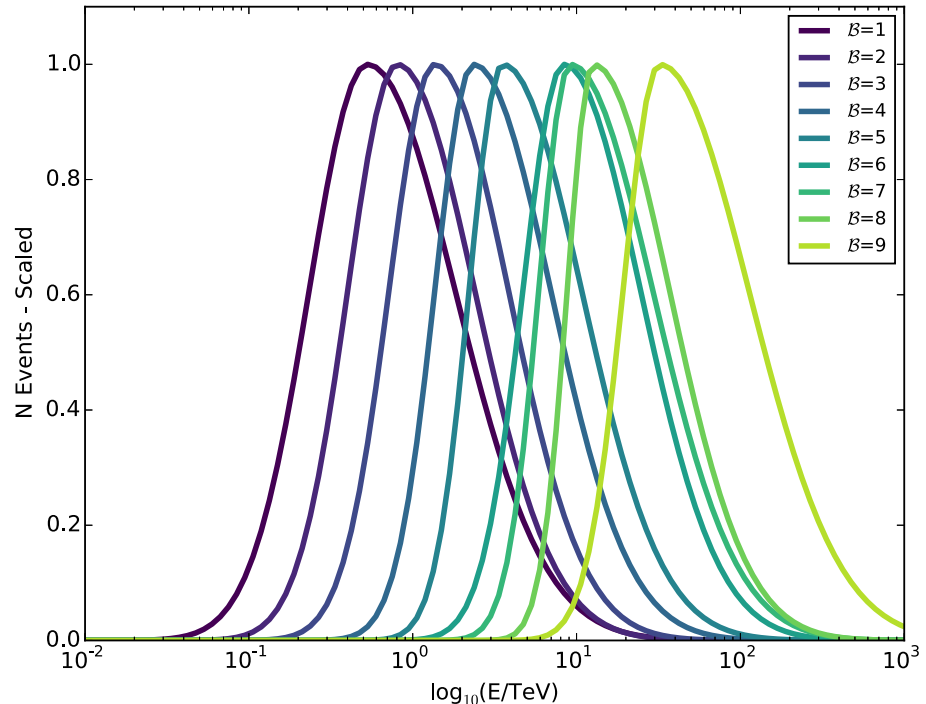
$$S_i = S(A, \vec{x}, \vec{x}_i) = A \left(\frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-|\vec{x}_i - \vec{x}|^2 / 2\sigma^2} + \frac{N}{(0.5 + |\vec{x}_i - \vec{x}| / R_m)^3} \right)$$

✓ 簡略化したNKG関数?

HAWC実験：エネルギー分解能

Abeysekara+ (HAWC Collab), ApJ, 843, 39 (2017)

\mathcal{B}	f_{hit}	ψ_{68}
1	6.7 - 10.5%	1.03
2	10.5 - 16.2%	0.69
3	16.2 - 24.7%	0.50
4	24.7 - 35.6%	0.39
5	35.6 - 48.5%	0.30
6	48.5 - 61.8%	0.28
7	61.8 - 74.0%	0.22
8	74.0 - 84.0%	0.20
9	84.0 - 100.0%	0.17



MCシミュレーションによる各ビン(f_{hit})のエネルギー分布

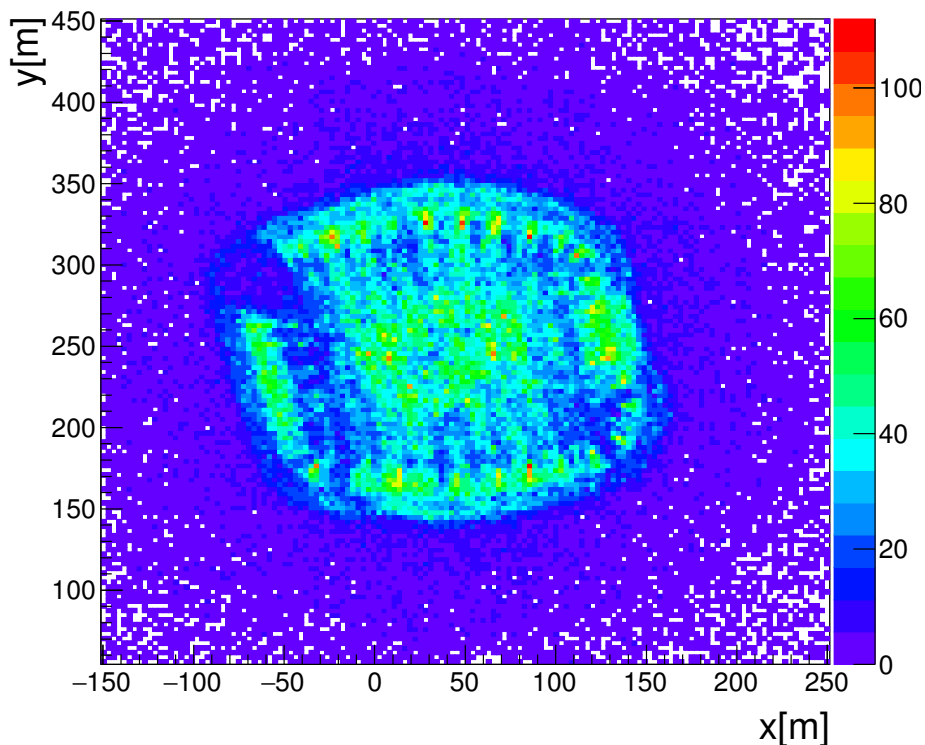
$$f_{\text{hit}} = \frac{\# \text{ of PMT hits}}{\text{total } \# \text{ of available PMTs}}$$

- ✓ エネルギー分解能 ~1000%
- ✓ ラテラル分布は使わない？使えない？

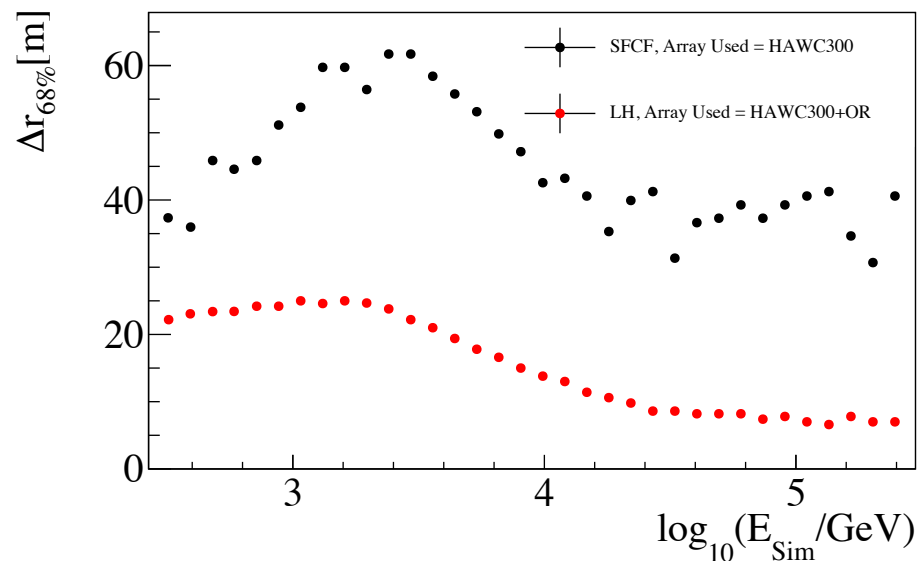
HAWC実験：エネルギー決定の不定性

- ✓ 空気シャワーの発生高度のばらつき
- ✓ コア位置の決定精度 40 - 60m (68%C.L.)
- ✓ アレイ外側に落ちたイベントの染み込み
- ✓ その他？

Reconstructed Core



コア位置決定精度



HAWC実験：系統誤差 (2017)

Abeysekara+ (HAWC Collab), ApJ, 843, 39 (2017)

Systematic	Overall Flux	Spectral Index	$\log_{10}(E)$
Charge Resolution/ Efficiency	$\pm 20\%$	± 0.05	$< \pm 0.1$
Relative Quantum Efficiency	$\pm 15\%$	± 0.05	$< \pm 0.1$
PMT Absolute Quantum Efficiency	$\pm 10\%$	± 0.1	$< \pm 0.1$
Time Dependence, PMT Layout and Crab Optimization	$\pm 20\%$	± 0.1	
Angular Resolution	$\pm 40\%$	± 0.15	$< \pm 0.15$
Late Light Simulation	$\pm 50\%$	± 0.2	< 0.2
Total Flux			

- ✓ シミュレーションでは信号の到来時間分布はおおよそ10ns以内に収まるが、50PEs以上のPE分布等は何かモデルが間違っていることを示唆
- ✓ データの到来時間分布はシミュレーションの期待値より広がっている。
 - チェレンコフ光の反射とか?(タンク内壁は黒プラスチック)
 - ToT(Time over Threshold)による電荷測定による系統誤差?

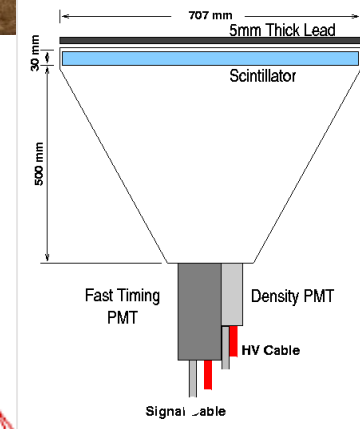
チベット空気シャワー観測装置



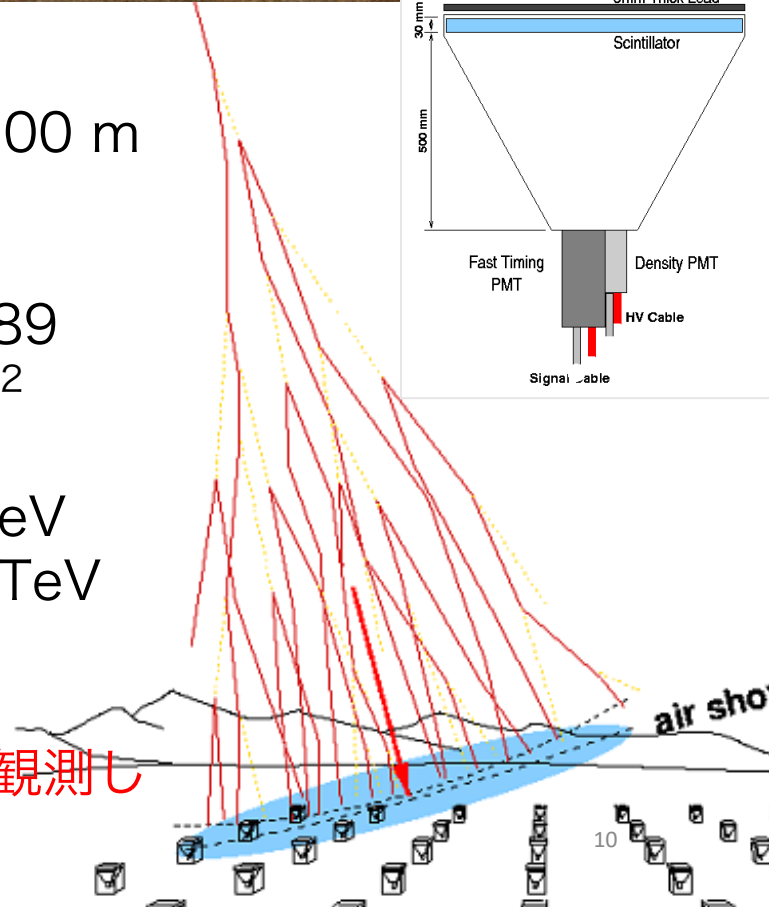
□ チベット (90.522°E, 30.102°N) 標高4300 m

現行装置のスペック

- 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 $> \text{TeV}$
- 角度分解能 $\sim 0.5^\circ @ 10 \text{ TeV}$
 $\sim 0.2^\circ @ 100 \text{ TeV}$
- 視野 $\sim 2 \text{ sr}$

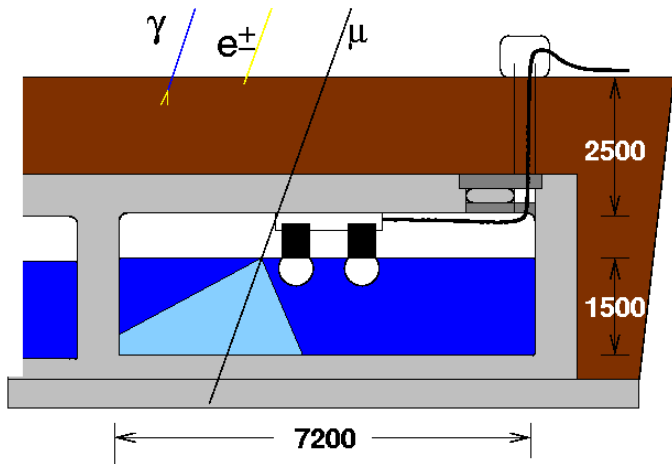


→ 空気シャワー中の二次粒子(主に e^{\pm} , γ)を観測し
一次宇宙線エネルギー、方向を測定



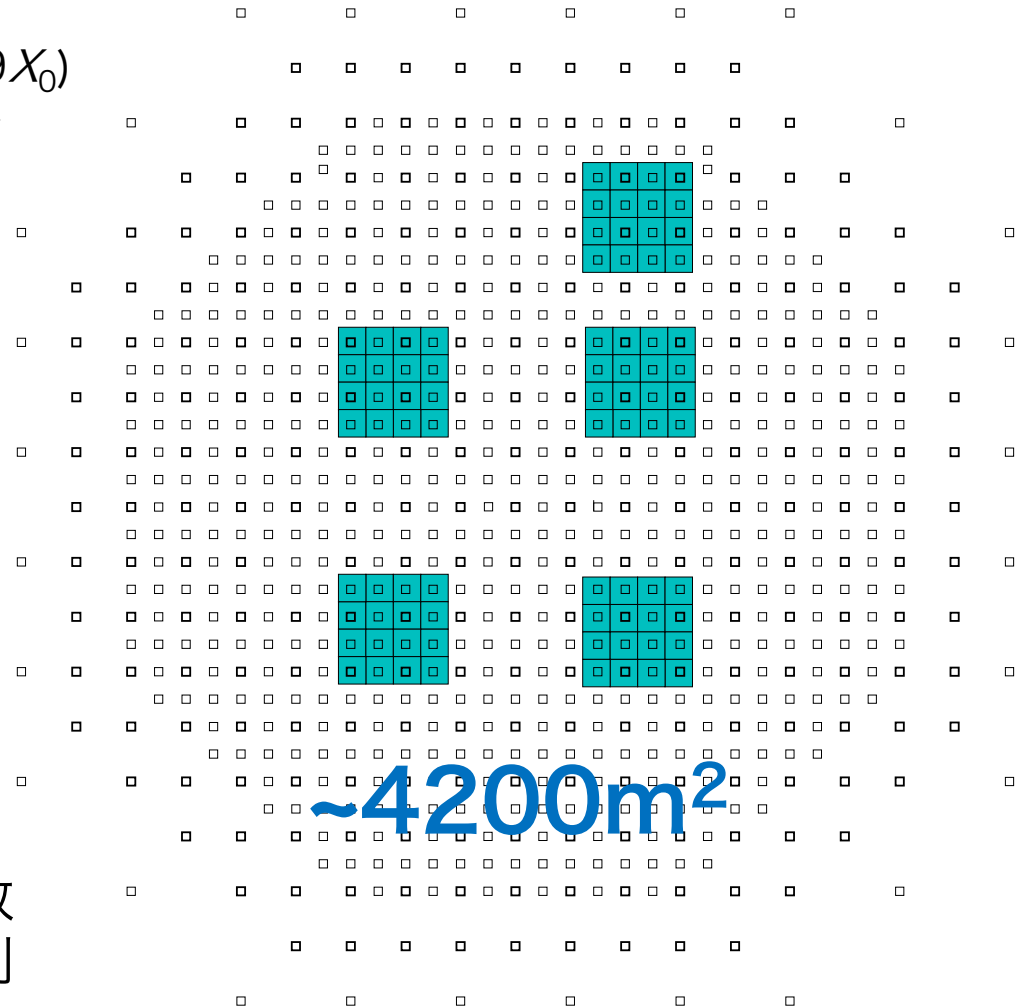
チベット水チェレンコフミュージオン観測装置 (Tibet MD)

- ✓ 地下 2.5m (物質厚 $\sim 515\text{g/cm}^2 \sim 19X_0$)
- ✓ 7.2m \times 7.2m \times 水深1.5m 水槽 80台
- ✓ 20" Φ PMT (HAMAMATSU R3600)
- ✓ 水槽材質：コンクリート+白色反射材



→空気シャワー中のミュージオン数を測定し、ガンマ線/核子選別

100TeV以上ではほぼバックグラウンドフリーでガンマ線起源の空気シャワーを観測可能



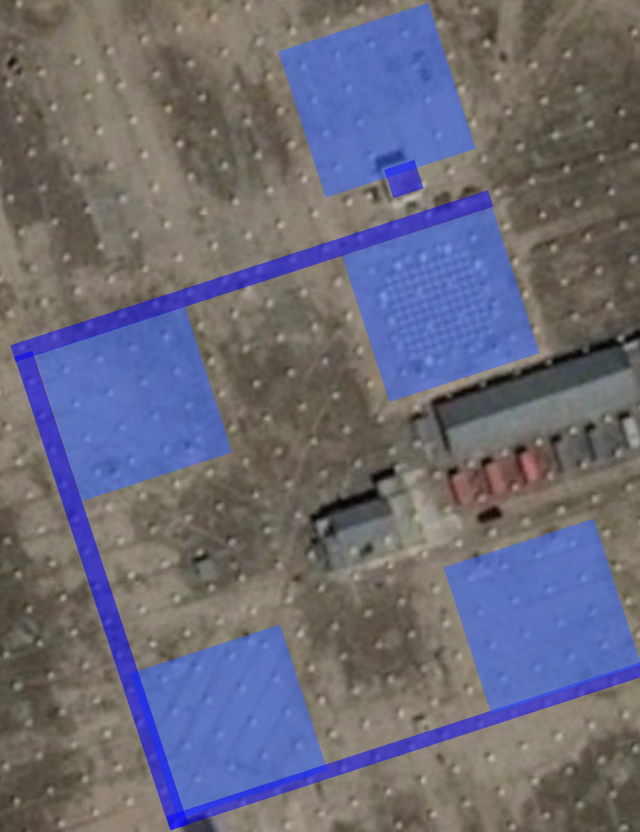
2013/10/10



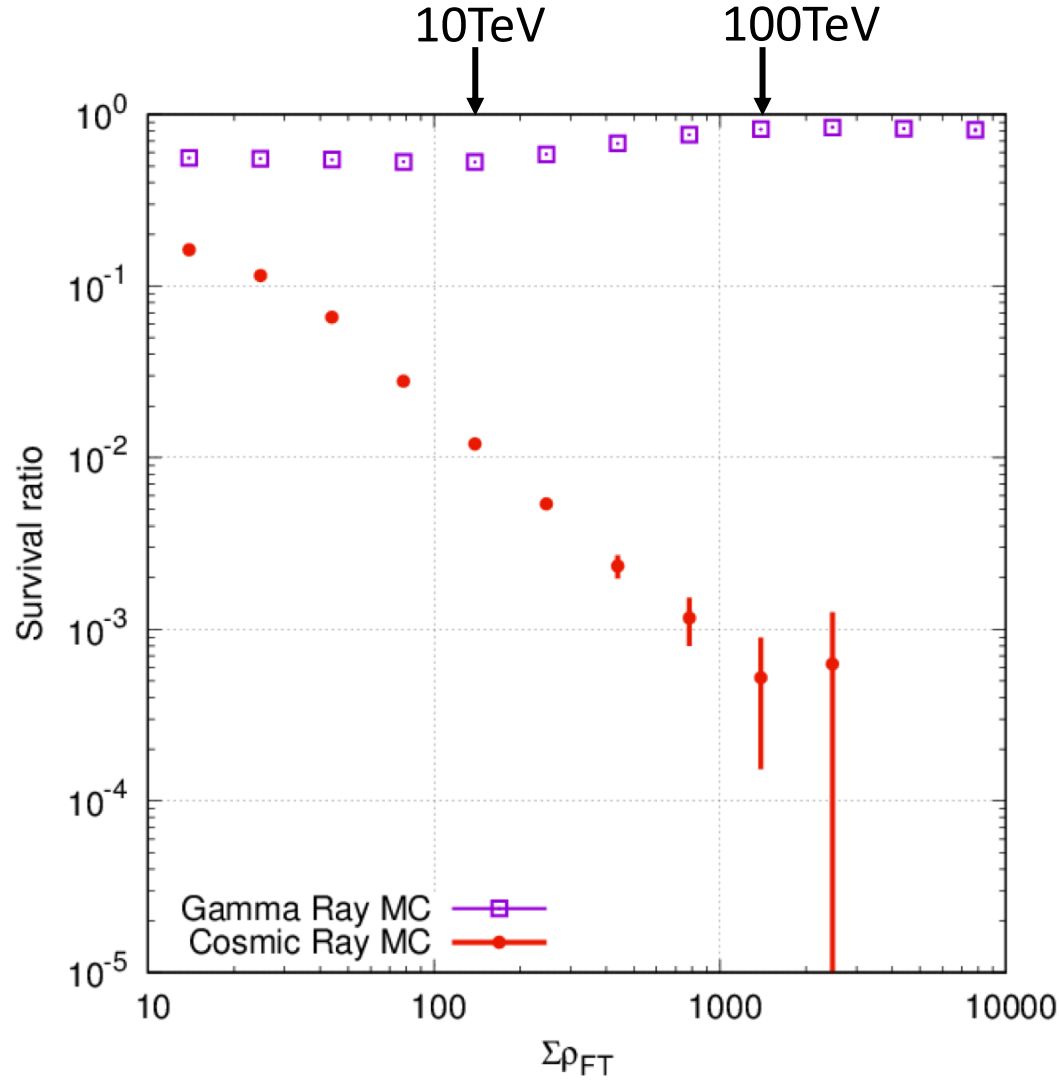
Image © 2014 CNES / Astrium



4,200m²
地下施設



バックグラウンドフリーガンマ線



カット後、>99.9%の宇宙線を除去@100TeV
→ バックグラウンドフリー、電磁成分優勢のシャワー

100TeVガンマ線は存在するか？

>80TeV 全天で未観測領域

HEGRA → Power-Law
HESS → Cut-off

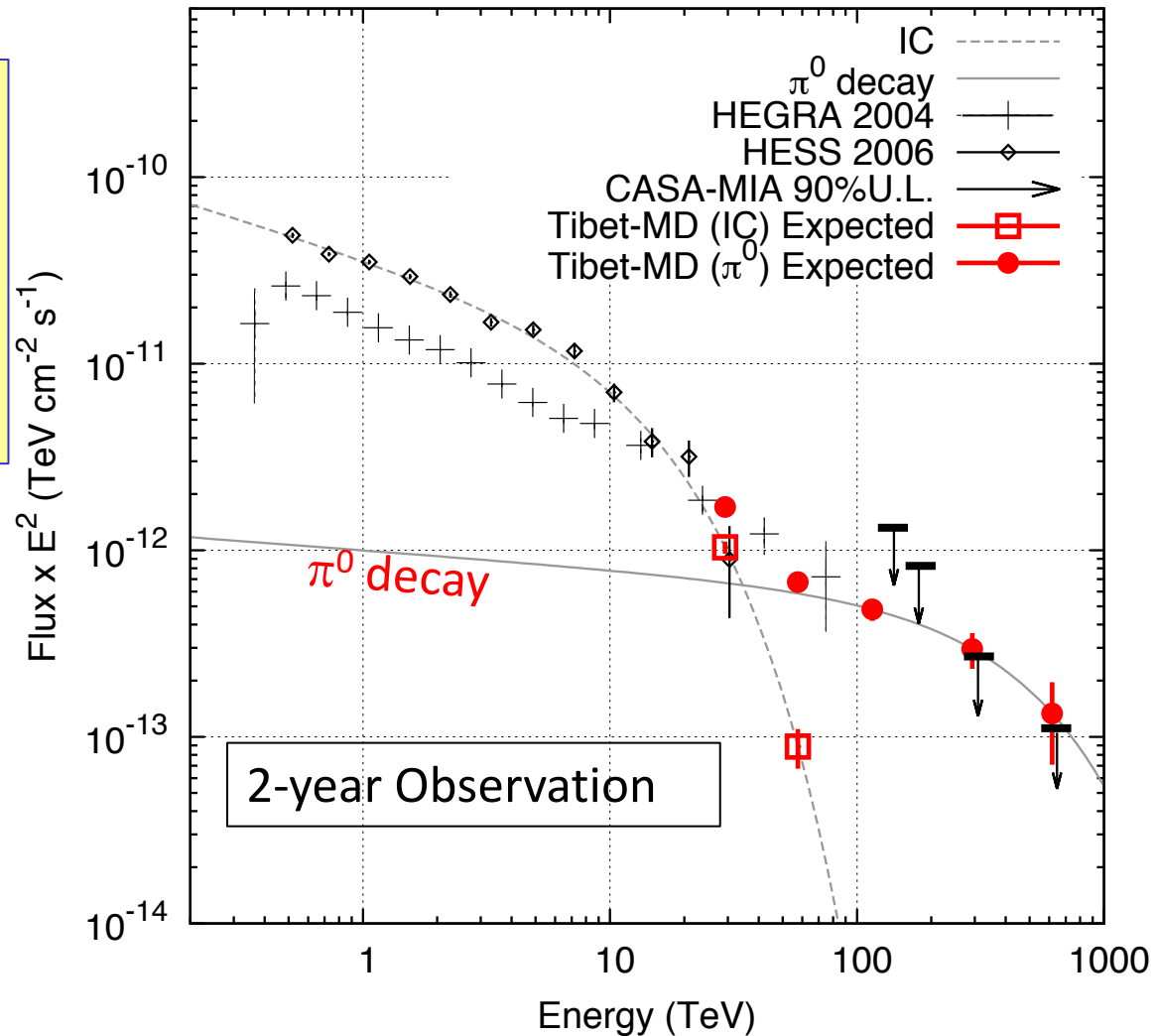
π^0 decay成分による構造

エネルギー分解能の向上



ガンマ線起源の空気シャワーの
横方向分布を用いてNKG関数
によりエネルギー推定

Crab Nebula

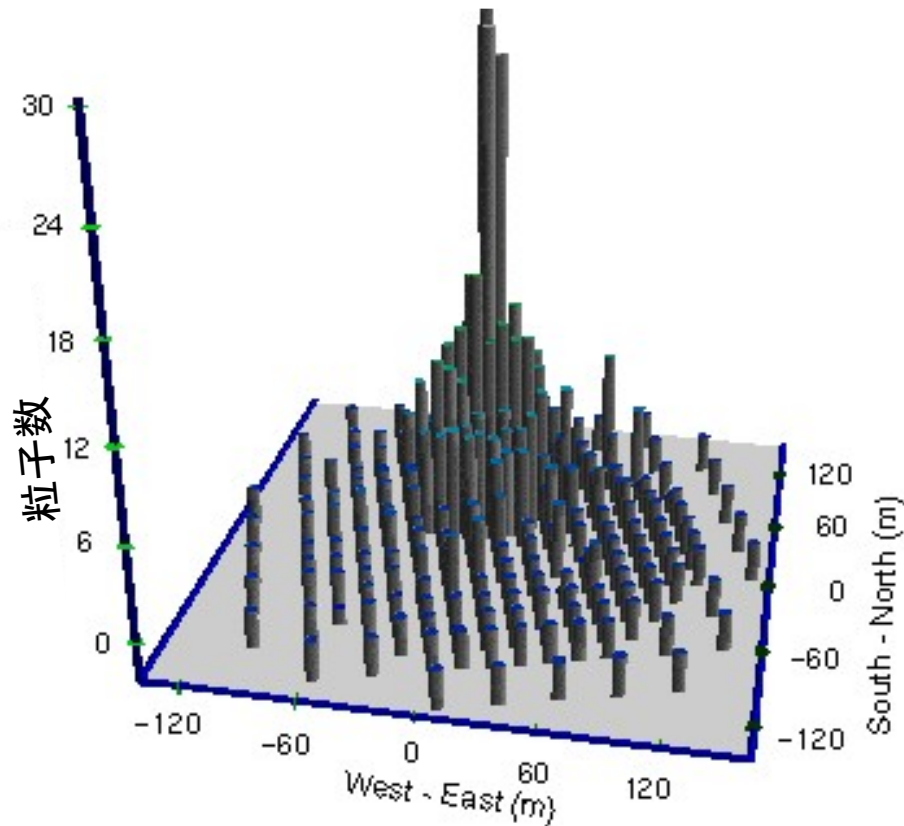


検出器で見た空気シャワー

二次粒子数分布



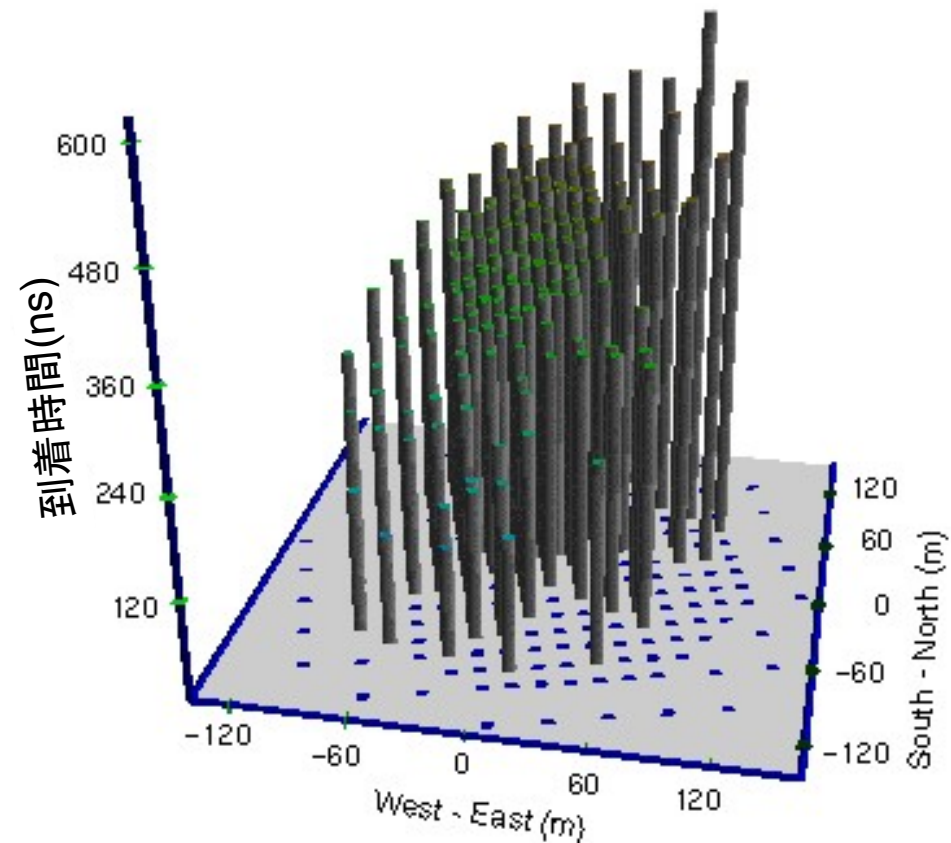
宇宙線のエネルギー



粒子到来時間分布

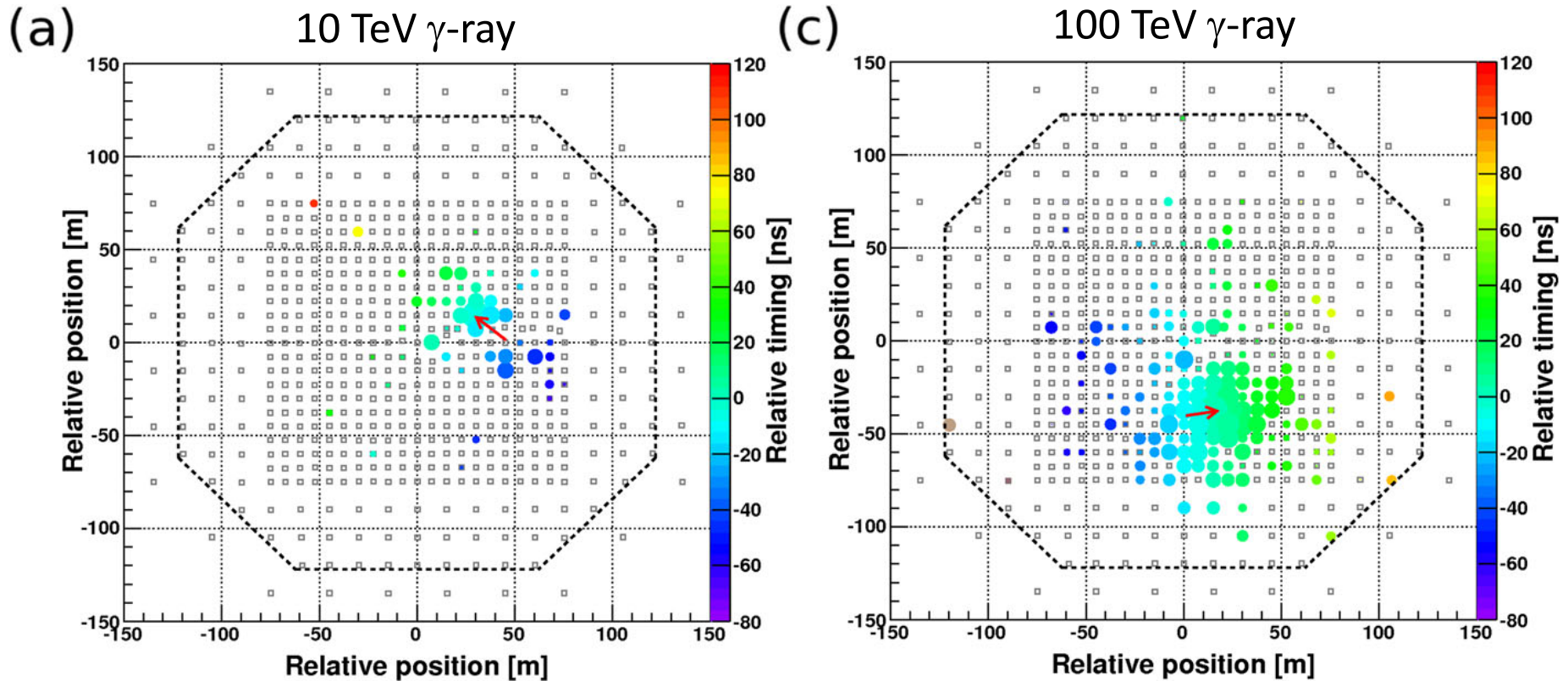


宇宙線方向



10TeV以下のラテラルフィットできないイベント
→ 総粒子数 $\Sigma\rho \propto$ 宇宙線エネルギー

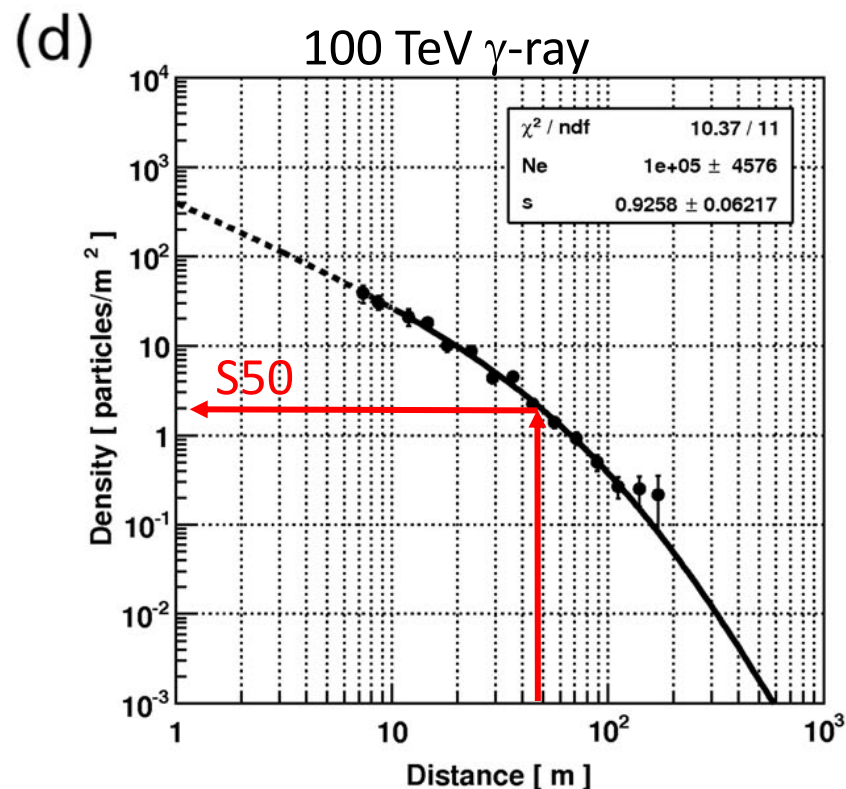
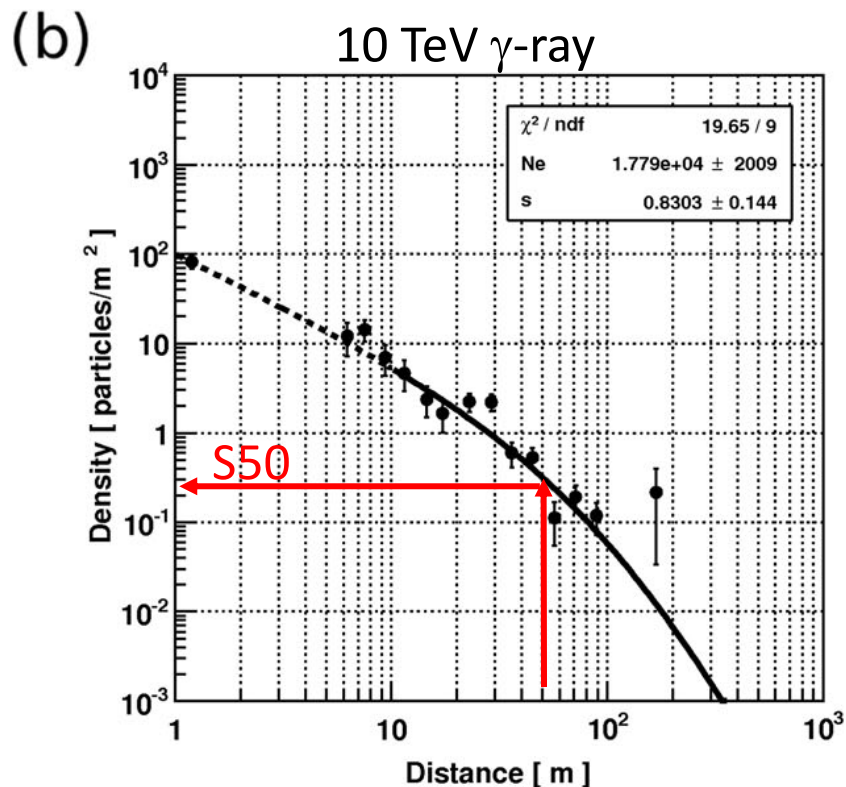
ガンマ線空気シャワーのイベントマップ(MC)



再構成コア位置 $(X_{\text{core}}, Y_{\text{core}}) = \left(\frac{\sum_i \rho_i^2 x_i}{\sum_i \rho_i^2}, \frac{\sum_i \rho_i^2 y_i}{\sum_i \rho_i^2} \right)$

決定精度： 10m @10TeV (68%C.L.)
4.7m @100TeV (68%C.L.)

ガンマ線空気シャワー横方向分布(MC)



ガンマ線起源空気シャワーは電磁成分が優勢 → オリジナルのNKG関数でフィット

$$\rho_{\text{NKG}}(r) = \frac{N_e}{r_m^2} \frac{\Gamma(4.5 - s)}{2\pi \Gamma(s)\Gamma(4.5 - 2s)} \left(\frac{r}{r_m}\right)^{s-2} \left(1 + \frac{r}{r_m}\right)^{s-4.5}$$

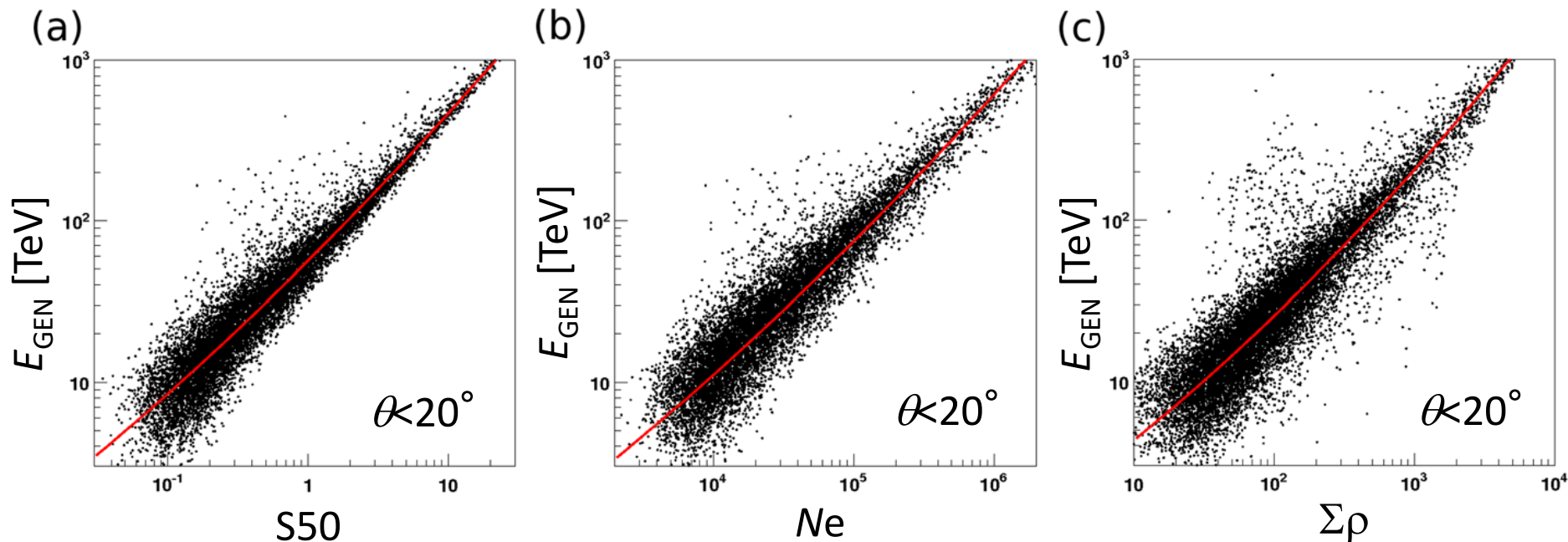
N_e : 空気シャワーサイズ

Kawata+ Exp Astron, 44, 1 (2017)

S50 : コアから50mでの粒子密度

(極高エネルギー宇宙線実験で使われる AGASA:S600, TA:S800)

真のエネルギーとの相関(MC)

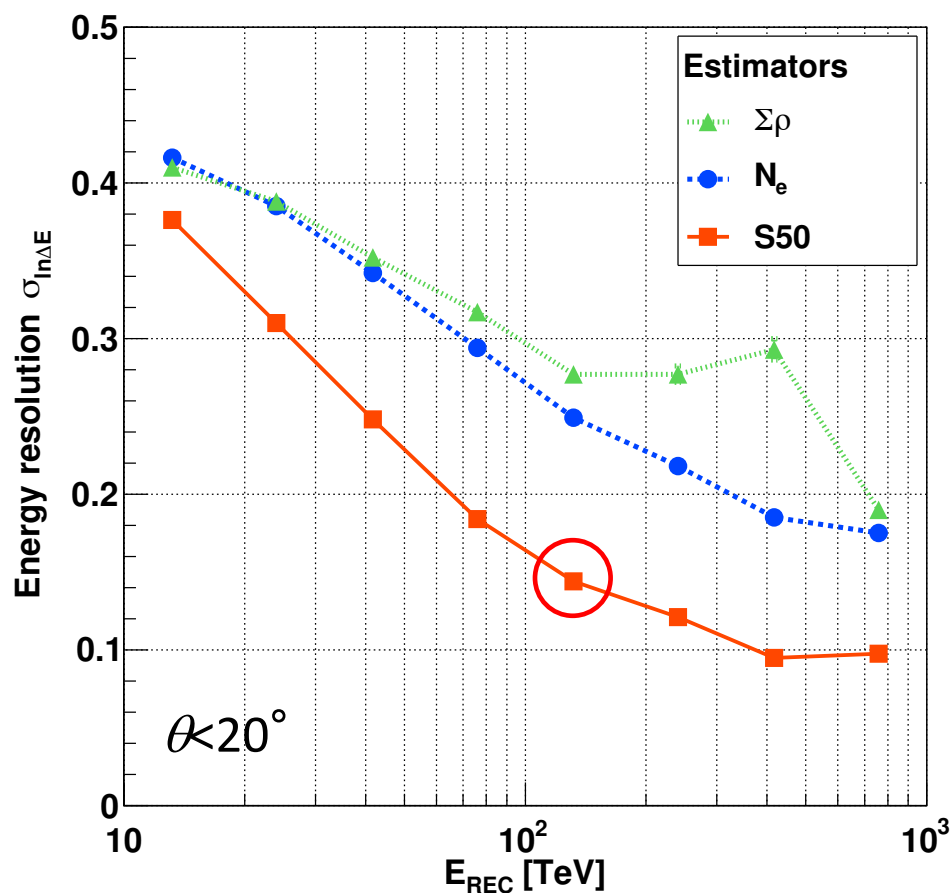


赤曲線: エネルギー変換関数(多項式フィット)

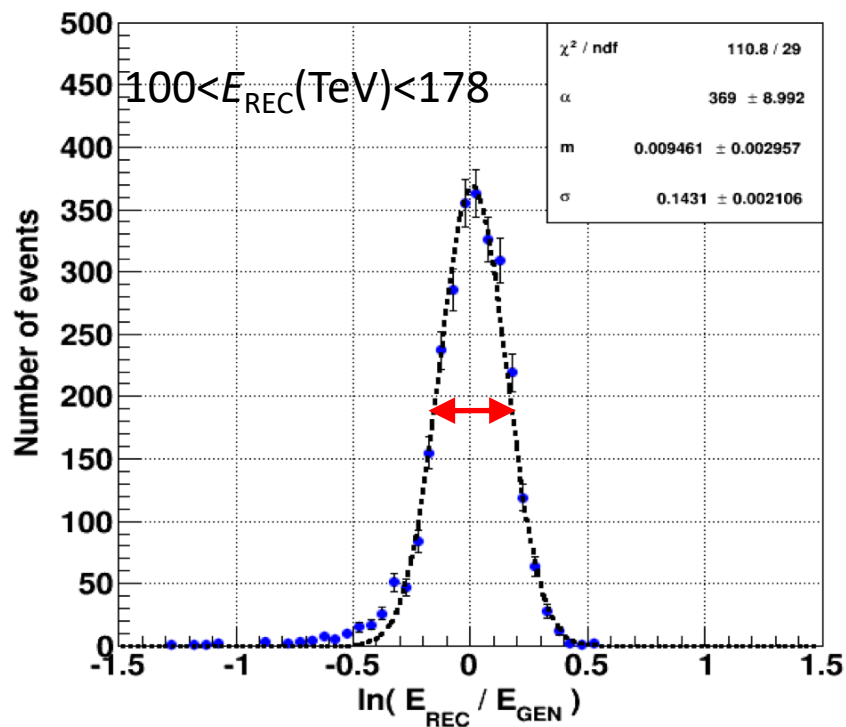
→完全にリニアではない(空気シャワーの発達による)

- (a) S50 : NKG関数で得られた
コアから50m地点の粒子密度
- (b) N_e : NKG関数で得られたシャワーサイズ
- (c) $\Sigma\rho$: 検出器で得られた単純な総粒子数

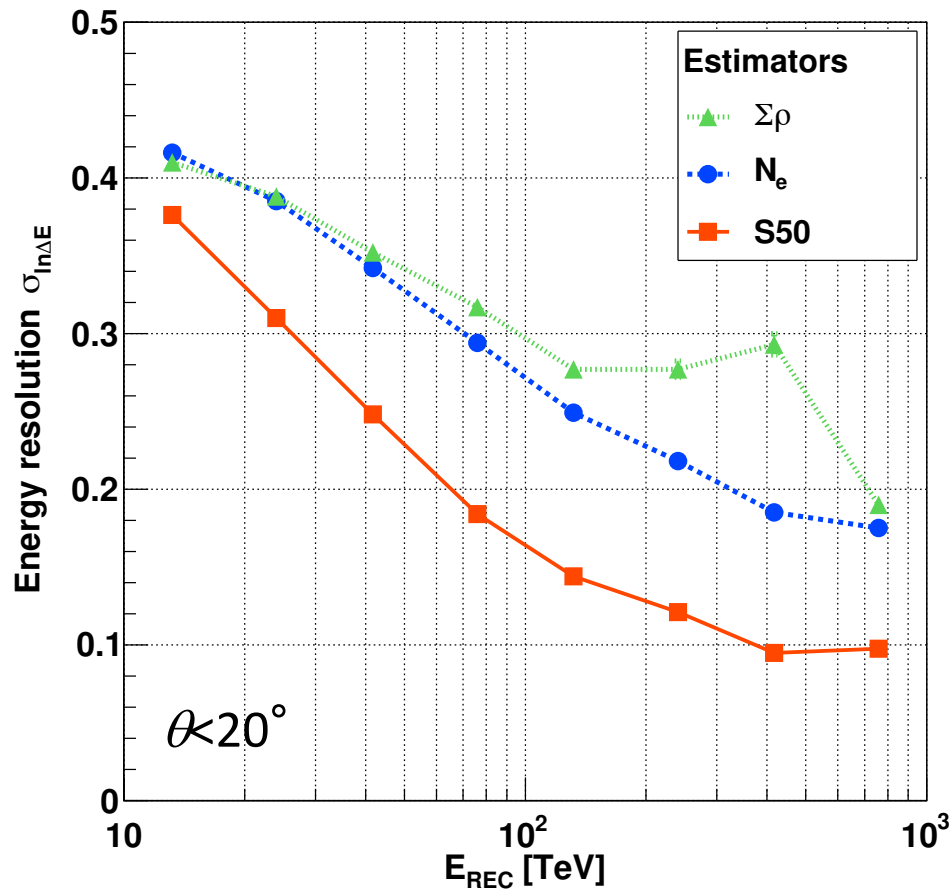
各決定因子によるエネルギー分解能(MC)



✓ $\ln(E_{\text{REC}}/E_{\text{GEN}})$ をガウス分布
でフィット → 分散: $\sigma_{\ln\Delta E}$

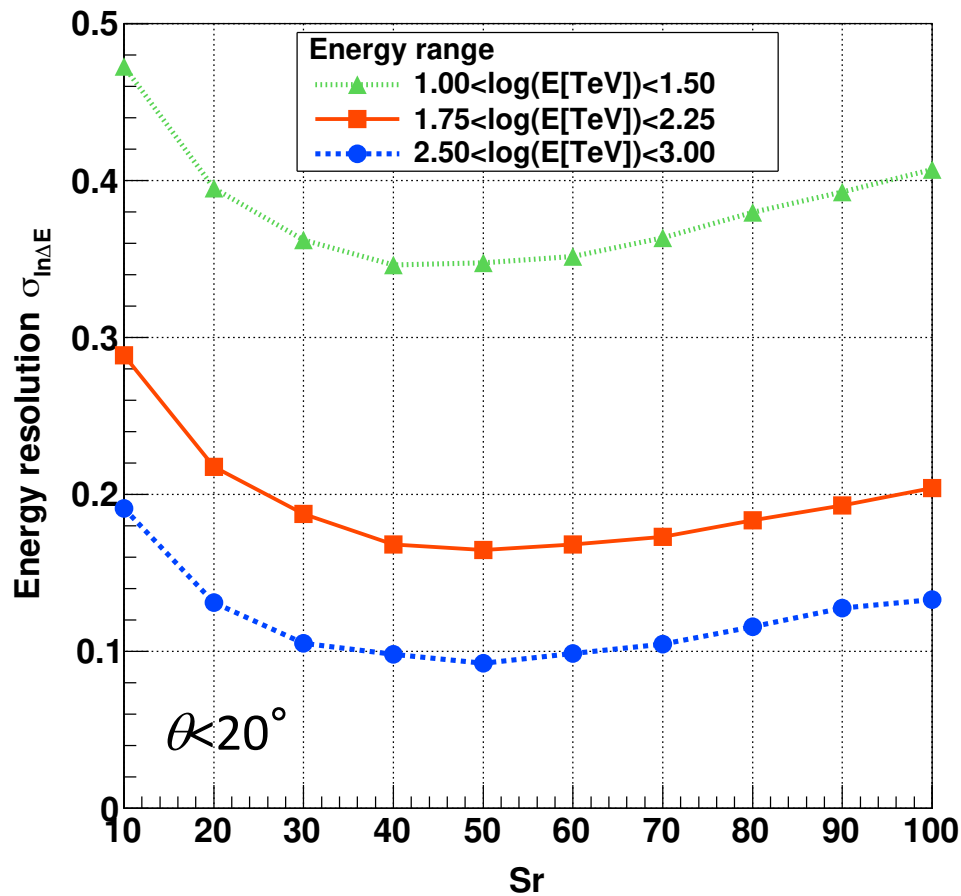


各決定因子によるエネルギー分解能(MC)



- ✓ $\ln(E_{\text{REC}}/E_{\text{GEN}})$ をガウス分布でフィット \rightarrow 分散: $\sigma_{\ln\Delta E}$
- ✓ S50が10-1000TeVで最も良いエネルギー分解能
- ✓ 10TeV以下は $\Sigma\rho$ が良い
- ✓ 1000TeV以上は同程度に近づく
- ✓ $\Sigma\rho$ の200TeV以上での分解能低下: 空気シャワーコアが検出器を直撃したイベントの影響。700TeVで回復するのは検出器がサチり影響が薄まるため。

Srパラメータの最適化(MC)



S10からS100を調べた結果

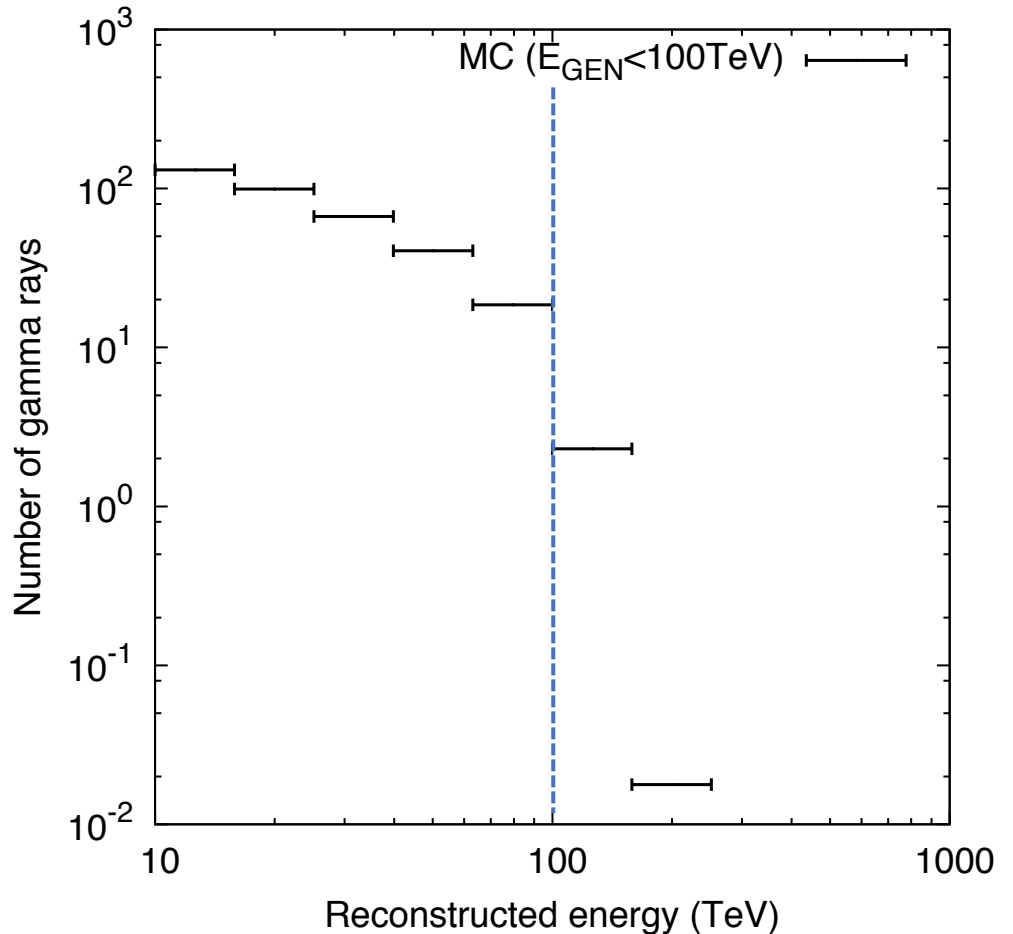
- ✓ どのエネルギー領域でもS40-S60が最適
- ✓ ガンマ線の天頂角にも若干の依存性あり

100TeVガンマ線は存在するか？

エネルギー決定精度によるもれだし
新手法 S50 : ~2 events
従来法 $\Sigma\rho$: ~4 events

信号13 events の場合
新手法 : 5.1σ
従来法 : 3.5σ

1.5倍のSignificanceの改善



まとめ

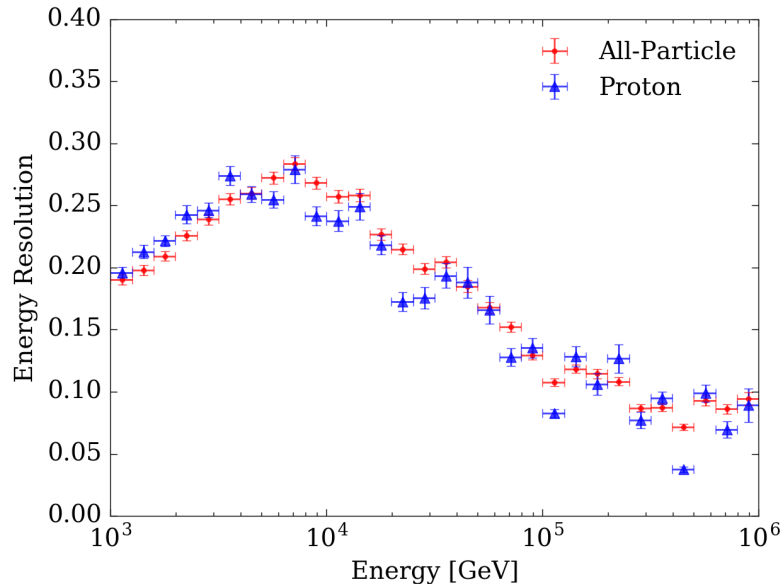
- HAWC
 - 1TeV-30TeV で多数のガンマ線源を検出／発見
 - エネルギー分解能：～1000% (PMTのヒット数による推定)
 - フラックス系統誤差：～50% (Late light simulation)
- Tibet AS+MD
 - 10TeV-数100TeV領域がターゲット
 - エネルギー分解能：～20% @100TeV, ～40% @10TeV
- S50(コアから50m地点の粒子密度)
 - 従来と比べて格段に良いエネルギー分解能を達成

決定因子	10TeVガンマ線 ($\theta < 20^\circ$)	100TeVガンマ線 ($\theta < 20^\circ$)
S50	-30+50% ($\sigma_{\ln \Delta E} \sim 0.4$)	15+17% ($\sigma_{\ln \Delta E} \sim 0.16$)
$\Sigma\rho$	-30+50% ($\sigma_{\ln \Delta E} \sim 0.4$)	-26+35% ($\sigma_{\ln \Delta E} \sim 0.3$)

HAWC実験：陽子のエネルギー決定について

※ 藤井さんからのコメントについて

<https://arxiv.org/abs/1710.00890>



縦軸はLog Gaussian の標準偏差

→ 0.3 : E resolution ~100%@10TeV

→ 0.2 : E resolution ~58%@~1TeV

→ 0.1 : E resolution ~26%@~100TeV

TABLE II. Passing percentages for successive application of event quality cuts in simulation and data, including the observed event rate in data. The percentages represent the fraction of events that passed the previous cut, with the set of triggered events being the reference selection.

Cut	% Passing		Data Event Rate [kHz]
	MC	Data	
No cut (trig. threshold)	100 %	100 %	24.7
Core & angle fit pass	99 %	96 %	23.6
$N_{\text{hit}} \geq 75$	31 %	23 %	5.7
$\theta < 17^\circ$	8 %	6 %	1.5
$N_{r40} \geq 40$	2 %	2 %	0.43

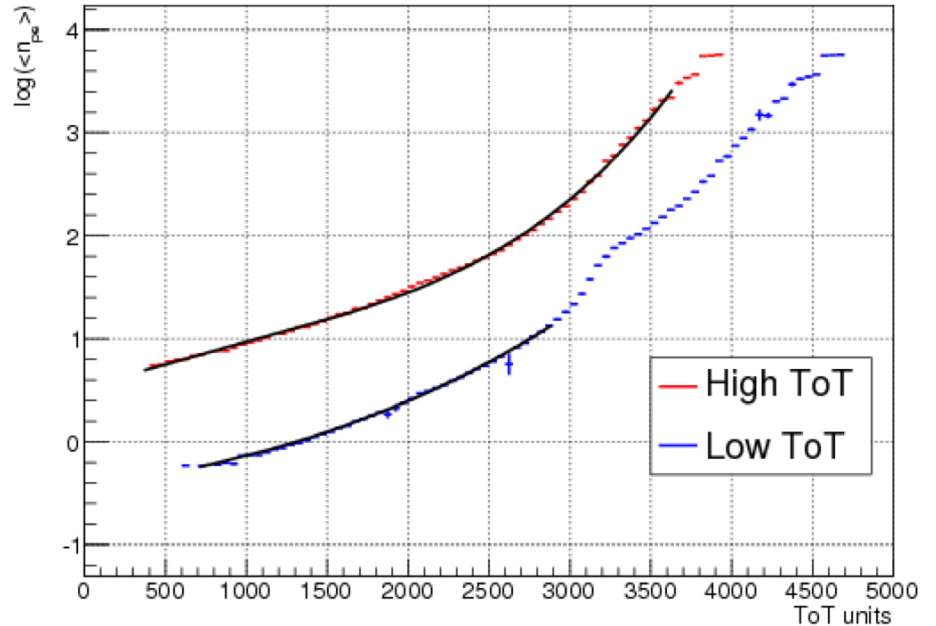
ガンマ線よりエネルギー決定が良い原因

- ✓ 天頂角カットが厳しい $\theta < 17.6^\circ$
- ✓ コア位置カットが厳しい
- ✓ ラテラル分布を使用
- ✓ 水タンク検出器では電磁成分と比べるとミュオンとハドロンの光量が大きくなるので、それらを多く含む陽子起源空気シャワーの方がエネルギー決定が良い可能性はある(推測)

HAWC実験： ToT Method

電荷量の測定

ToT : Time over Threshold



2段階のしきい値→

一つの大きなパルス
or
複数の小さなパルス

を判別

Low ToT

High ToT

