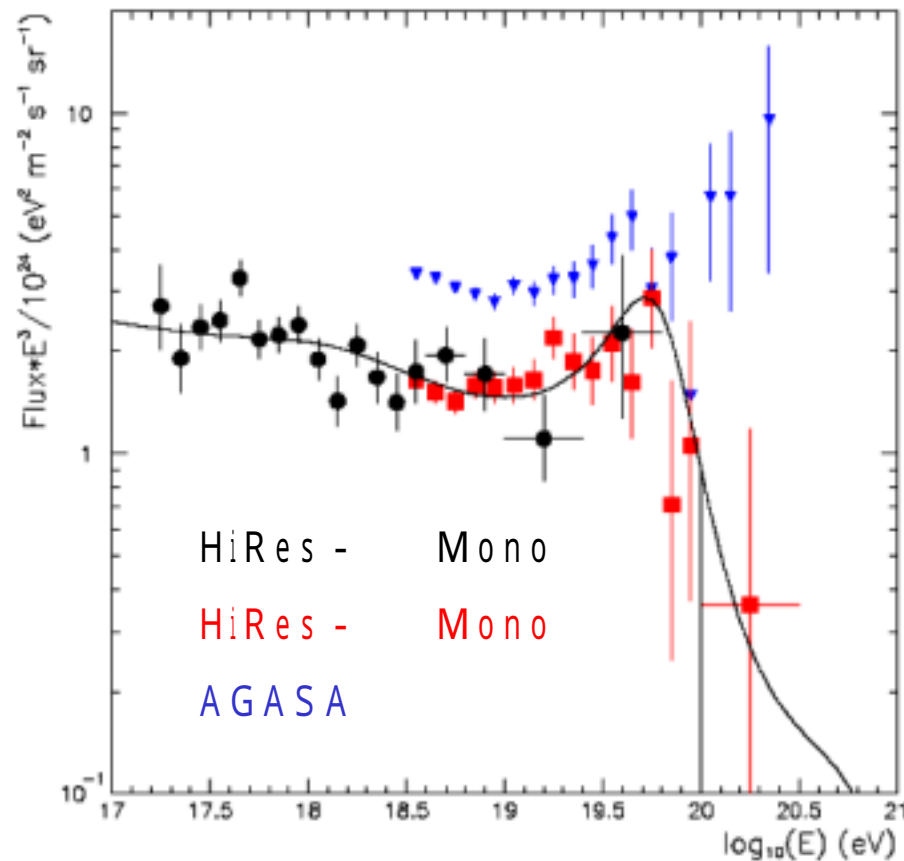


テレスコープアレイ計画54： 望遠鏡と地上アレイによるハイブリッド観測

Telescope Array Collaboration

東京工業大学 理工学研究科 基礎物理学専攻 荻尾 彰一

AGASAとHiResの観測結果



AGASA

GZK限界を超える高エネルギー宇宙線を観測

10年間 期待値1.6事象

(均一な宇宙線源分布を仮定)

→ 観測10事象 4.0

HiRes

10^{20} eV以上2事象(1998年以來)

宇宙線強度: $10^{19.6}$ eV以下でもAGASAの1/2

AGASAに比べエネルギーが系統的に低い(単眼観測、散乱補正など)

エネルギー決定の系統誤差

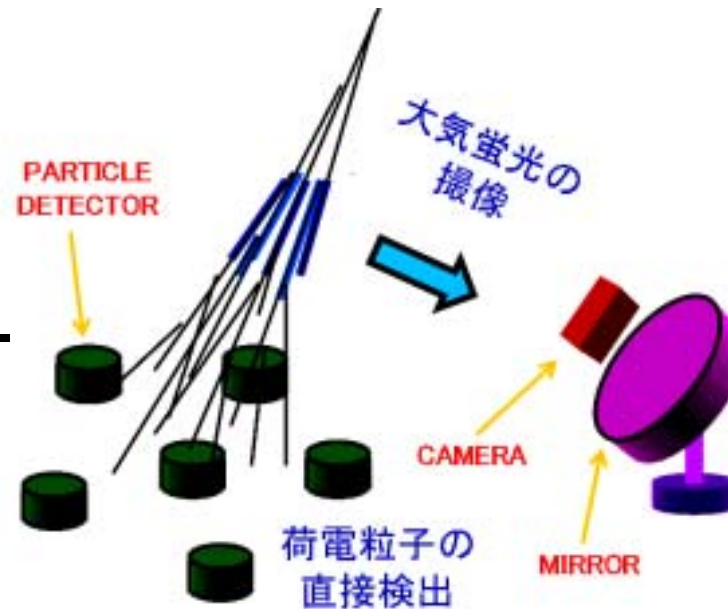
AGASA: 18%

HiRes: 21%

ハイブリッド検出法による同時観測の重要性

地表アレイ法

- 粒子数の横方向分布
- 地表での総粒子数
- 粒子種によるエネルギー推定の系統誤差



大気蛍光法

- 縦方向発達
- カロリメトリックなエネルギー推定
- ステレオ観測による幾何学的な到来方向の推定
- 蛍光の散乱、量子効率、反射率などの補正

- 地表でのシャワーサイズから縦方向発達曲線のスケール補正
- 大気蛍光の補正を高精度化
- 横方向分布からのエネルギー推定法の実験的評価

ハイブリッド観測装置：Phase-1 Hybrid TA



大気蛍光望遠鏡

3ステーション 全40台

直径3m合成鏡、256PMTカメラ

方位角 120° 、仰角 $3^\circ - 34^\circ$

40km間隔

地表アレイ

シンチレーション検出器 576台

厚さ1cm、面積 3m^2 、1.2km間

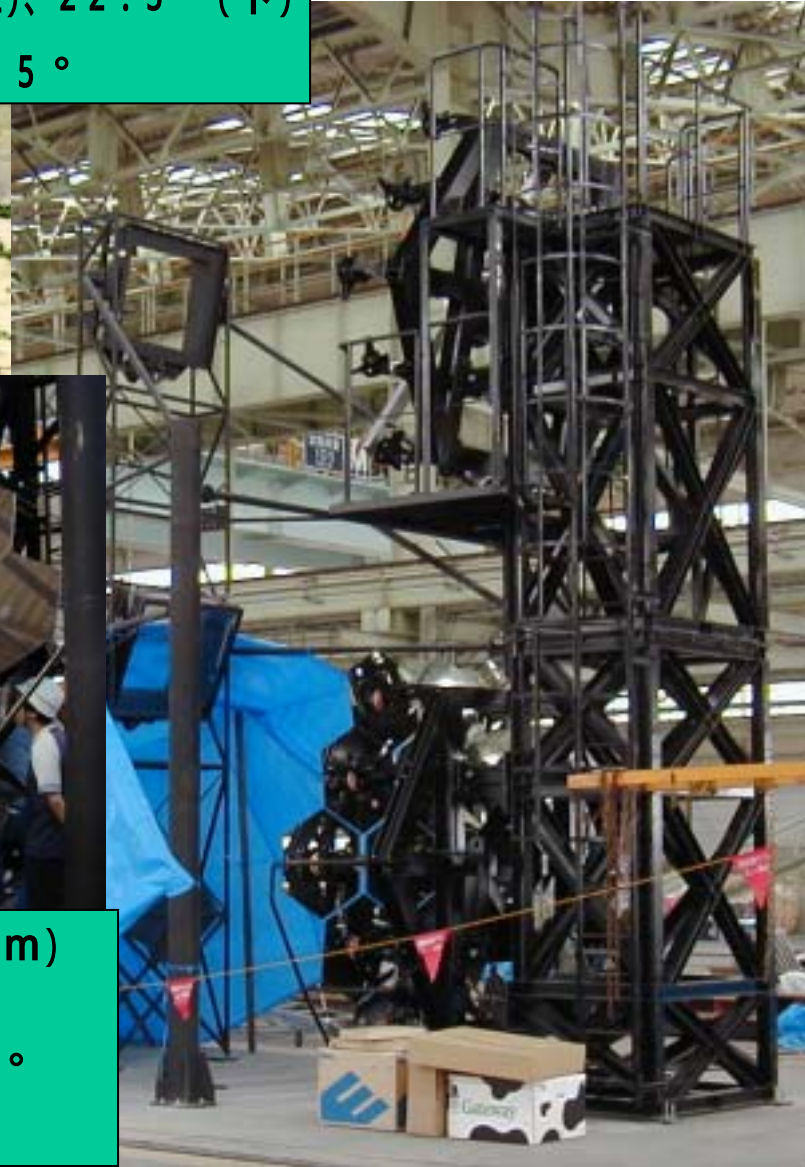
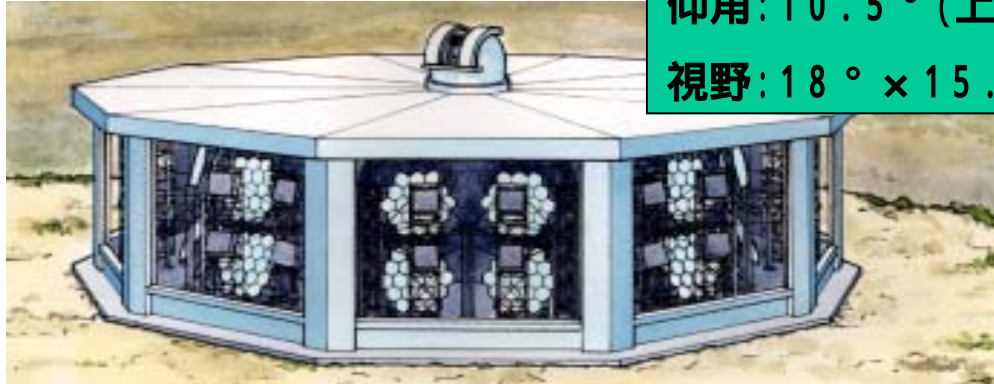
エネルギー下限 $10^{18.5}\text{eV}$

FADCの利用

→ 到来方向決定精度 1.0°

大気蛍光望遠鏡

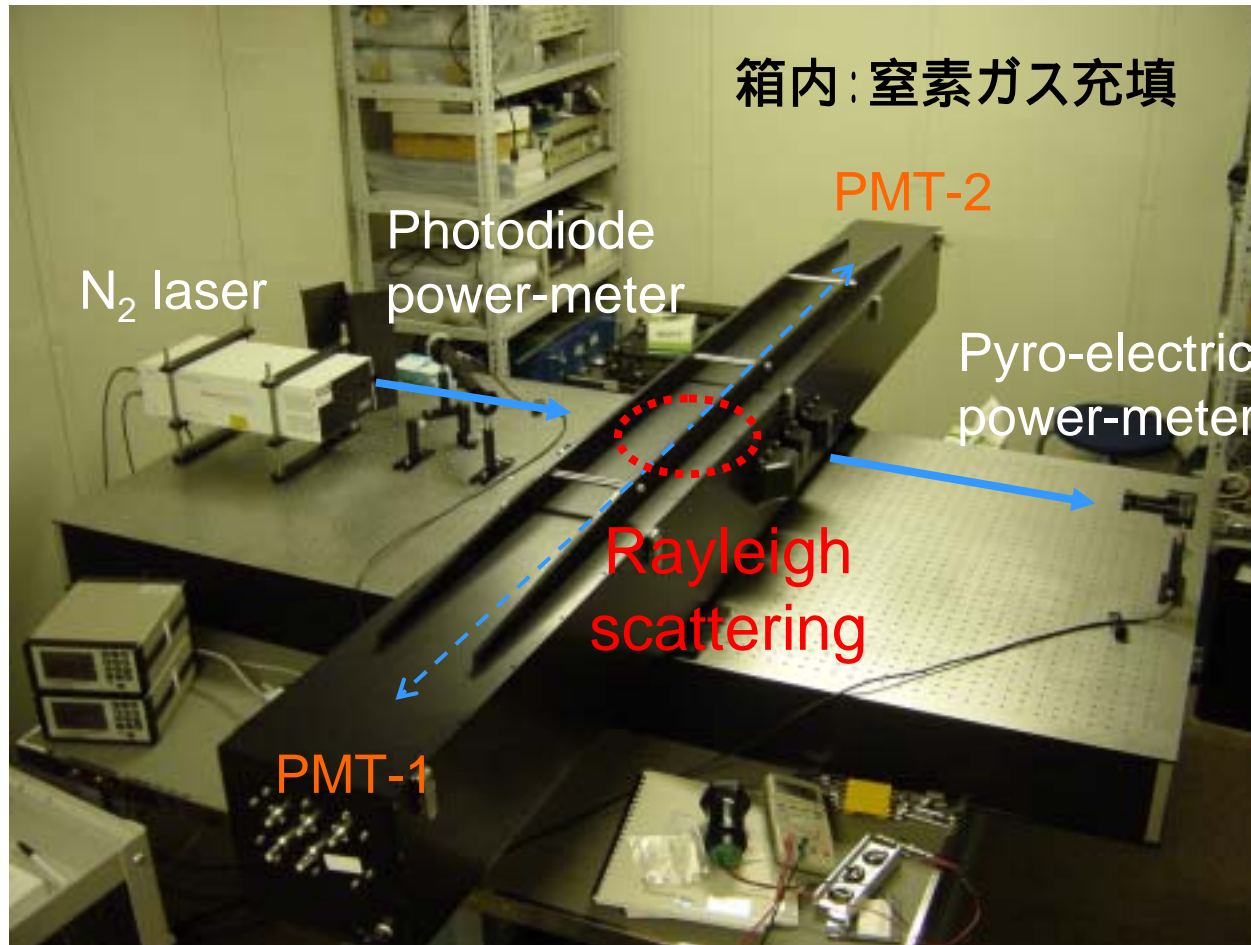
口径: 3m、18枚の球面鏡の合成
仰角: 10.5° (上)、 22.5° (下)
視野: $18^\circ \times 15.5^\circ$



Hexagonal PMT (60mm)
 $\times 256$
FOV: $18^\circ \times 15.5^\circ$
BG3フィルター



PMTの絶対光量較正(絶対光量光源装置)



窒素レーザー(パワー測定)
+
レーリー散乱(計算)
= 絶対光量光源



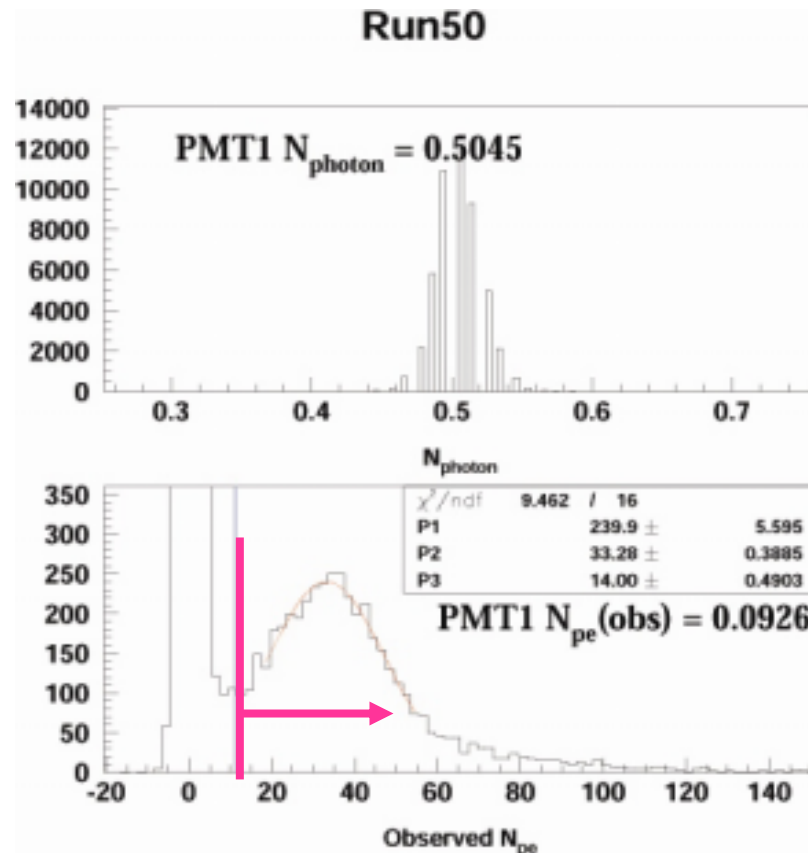
量子効率 + 収集効率

by 桜井 & Wiencke

2003/03/29

日本物理学会第58回年会

PMTの絶対光量較正(Q.E. + C.E.測定)



- ・ PMTに入射する光子数

$$N_{\text{ph}} = 0.50 \pm 0.03 / \text{laser shot}$$

- ・ PMTで検出された光電子数

(pulse height > 1 / 3 of 1 p.e. peak)

$$N_{\text{pe}} = 0.093 \pm 0.01 / \text{laser shot}$$

$$\text{Q.E.} \times \text{C.E.} = 0.19 \pm 0.02$$

0.260 0.74

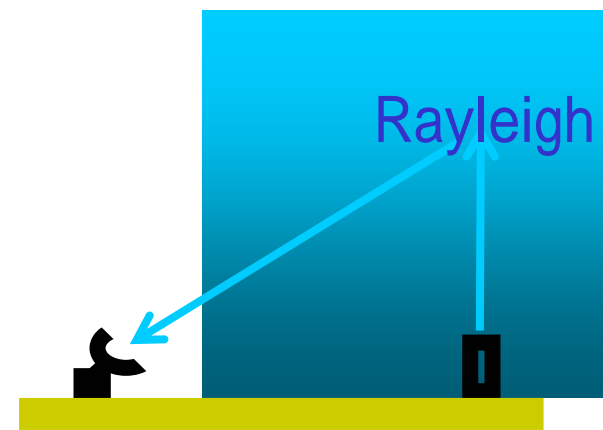
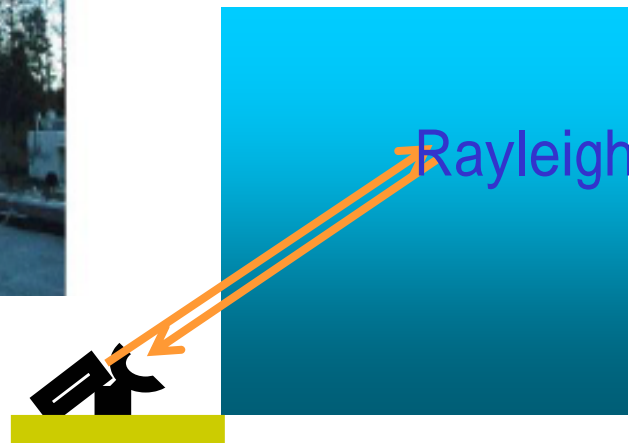
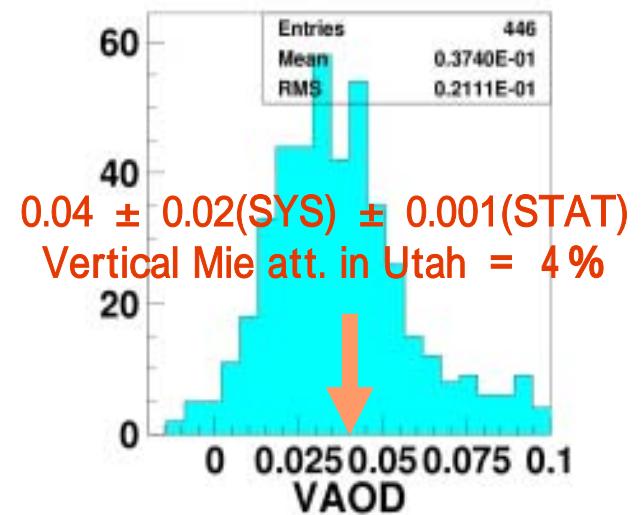
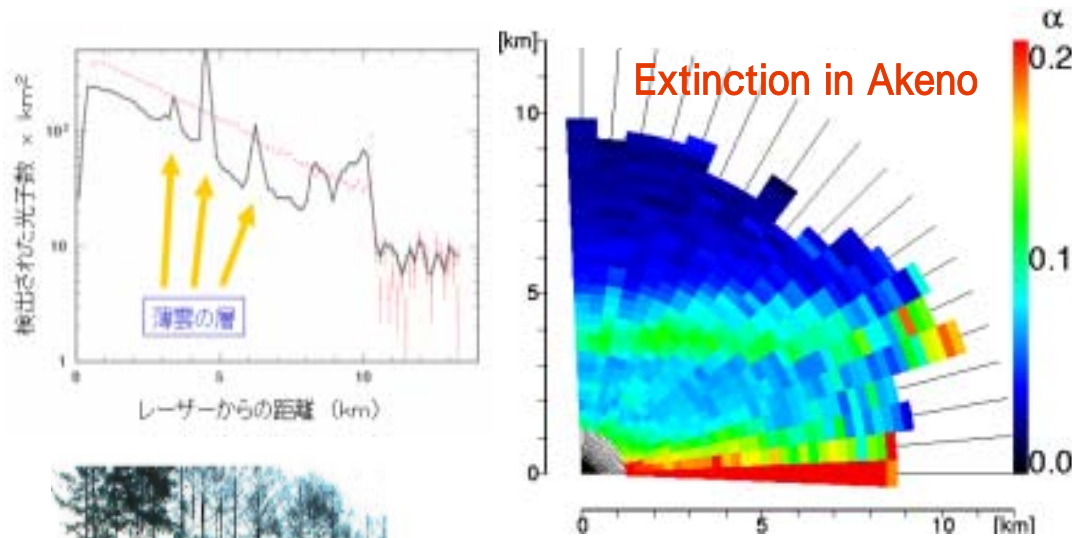
$$\text{Q.E.} \times \text{C.E.} = 0.19 \pm 0.03$$

浜松ホトニクス of データシート

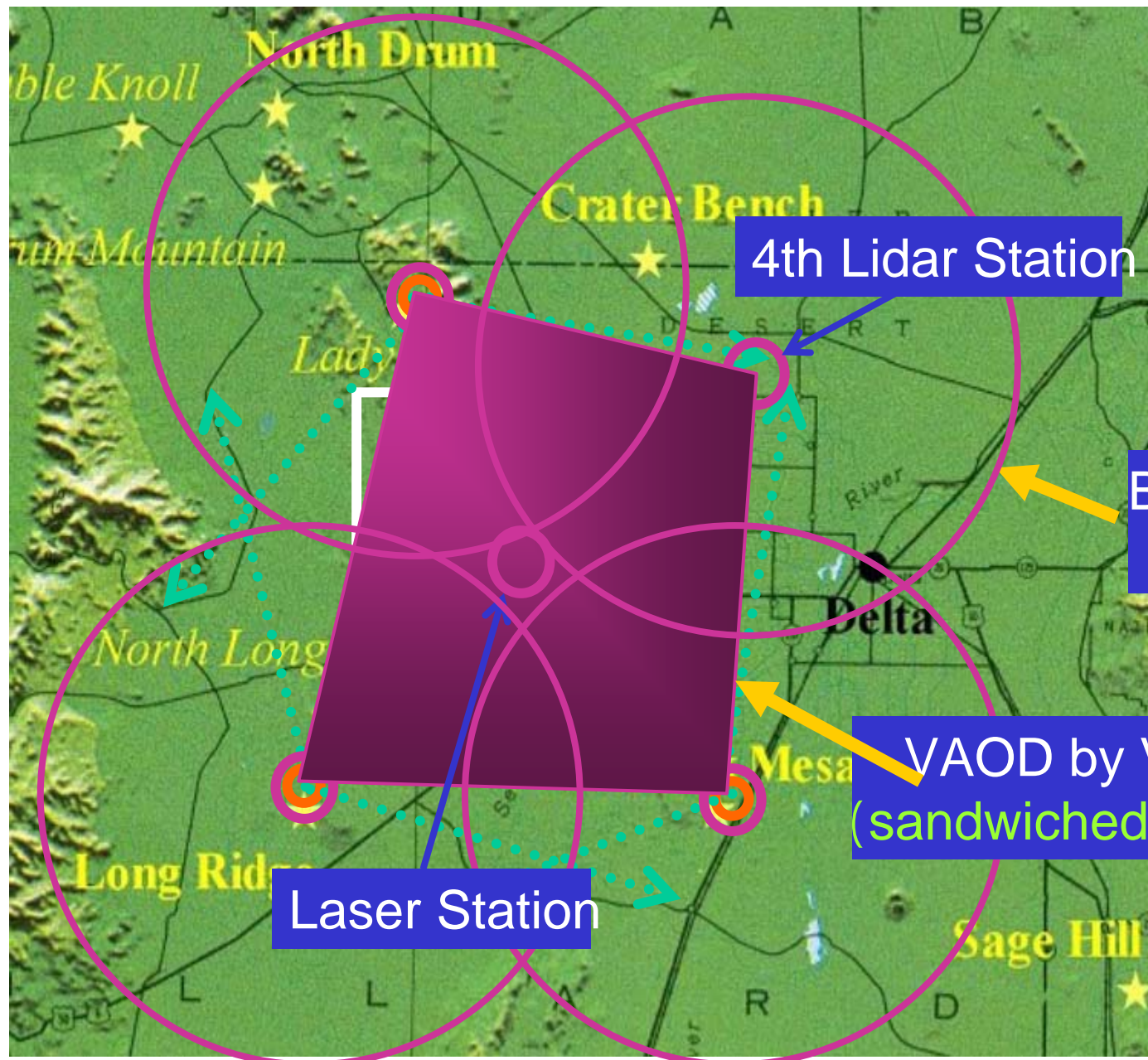
レーザーを用いた大気モニター法

後方散乱ライダー
 相対値測定から空間分布を得る

側方散乱モニター
 絶対値測定、積分減衰量



大気モニター装置の配置



3つの望遠鏡ステーションと1つのライダーステーションと中心にレーザーステーション

系統誤差10%以下を目標とする

Backscatt. Lidar (within 20 km)

VAOD by Vertical Shot (sandwiched by 2 stations)

Laser Station

4th Lidar Station

期待される装置感度、観測事象数

	装置感度 ($\text{km}^2 \text{sr}$)	相対 感度	角度 分解能	年間事象数	
				$> 10^{19} \text{eV}$	$> 10^{20} \text{eV}$
AGASA	162	= 1	1.6°	100	1
地表アレイ	1371	8.5	1.0°	700	9
大気蛍光望遠鏡*	670	4.1	0.6°	300	4
同時観測**	165	1.0	0.4°	80	1

* 観測時間効率10%と仮定 ** 同12%と仮定

エネルギースペクトル: super GZK事象

	AGASA 10年	TA - 3年
観測数	10	35.3
期待値 (GZKカットオフ)	1.6	5.6
有意性	4.0	8.3

Systematic Error of Energy Measurement

For a Typical Fluorescence Detector

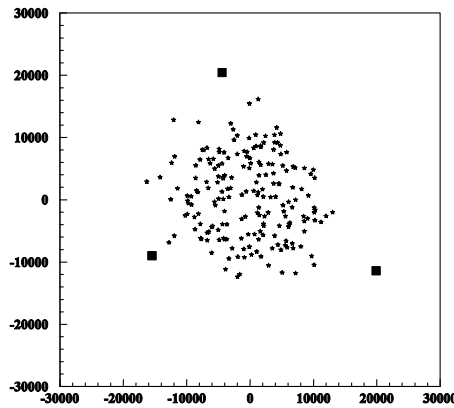
- 10% Fluorescence Efficiency
- 5% Atmospheric Corr.: Rayleigh
- 10% Atmospheric Corr. : Mie
- 10% Telescope Calibration
- 6% Reconstruction
- 5% Missing Energy (μ etc.)

20% Quadratic Sum

Major Systematics in AGASA astro-ph/0209422	
■ Detector	
• Detector Absolute gain	$\pm 0.7\%$
• Detector Linearity	$\pm 7\%$
• Detector response(box, housing)	$\pm 5\%$
■ Energy Estimator S(600)	
• Interaction model, P/Fe, Height	-10% $\pm 15\%$
■ Air shower phenomenology	
• Lateral distribution function	$\pm 7\%$
• S(600) attenuation	$\pm 5\%$
• Shower front structure	+5% $\pm 5\%$
• Delayed particle(neutron)	+5% $\pm 5\%$
■ Total	$\pm 0\% \pm 18\%$

同時観測による系統誤差の改善

- 地表でのシャワーサイズを用いた縦方向発達曲線の補正 → エネルギー決定
- 到来方向、コアポジションの補正 → 縦方向発達曲線決定



シミュレーション

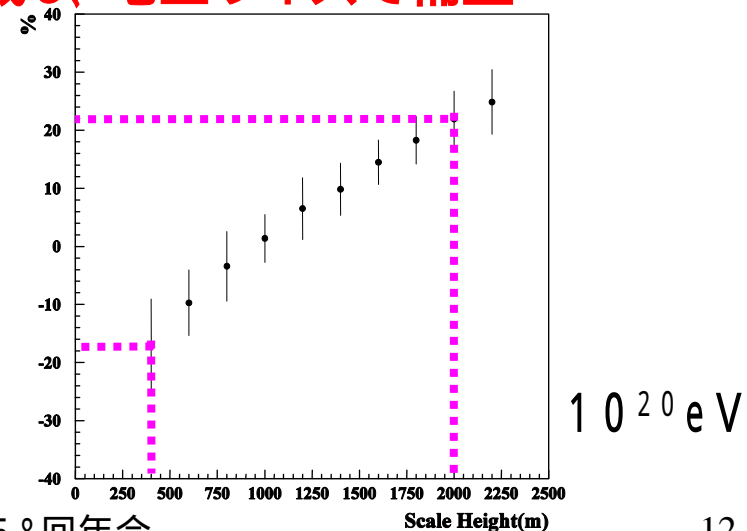
- エネルギー 10^{19} 、 10^{20} 、 10^{21} eV
各200イベント
- アレイ中心からのインパクトパラメーター $R_p < 10$ km
- 天頂角 $< 60^\circ$
- 地表アレイによるサイズ決定精度 10%

わざと20%系統誤差を持たせたデータを生成し、地上サイズで補正

今回のシミュレーションでは、系統誤差の原因をMie散乱に負わせる

シミュレーション: 減衰長20 km、
スケール高1200 m

解析: 減衰長20 km、
スケール高400 m、2000 m



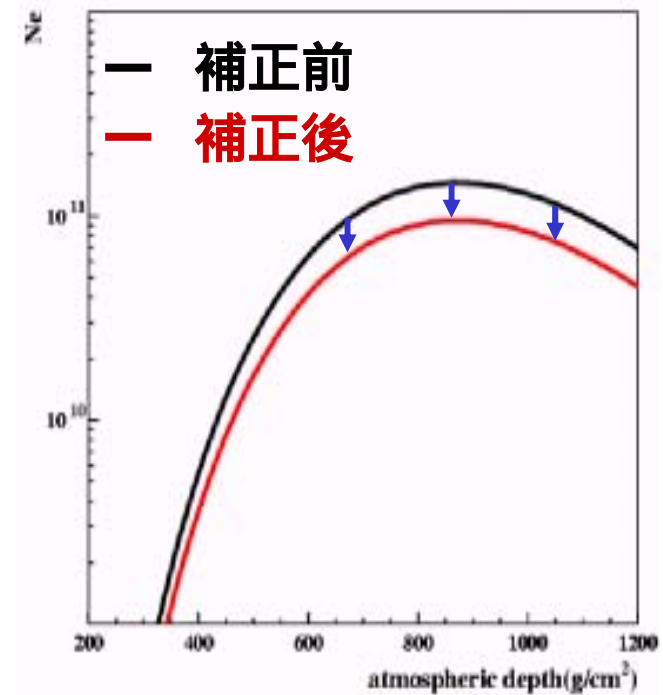
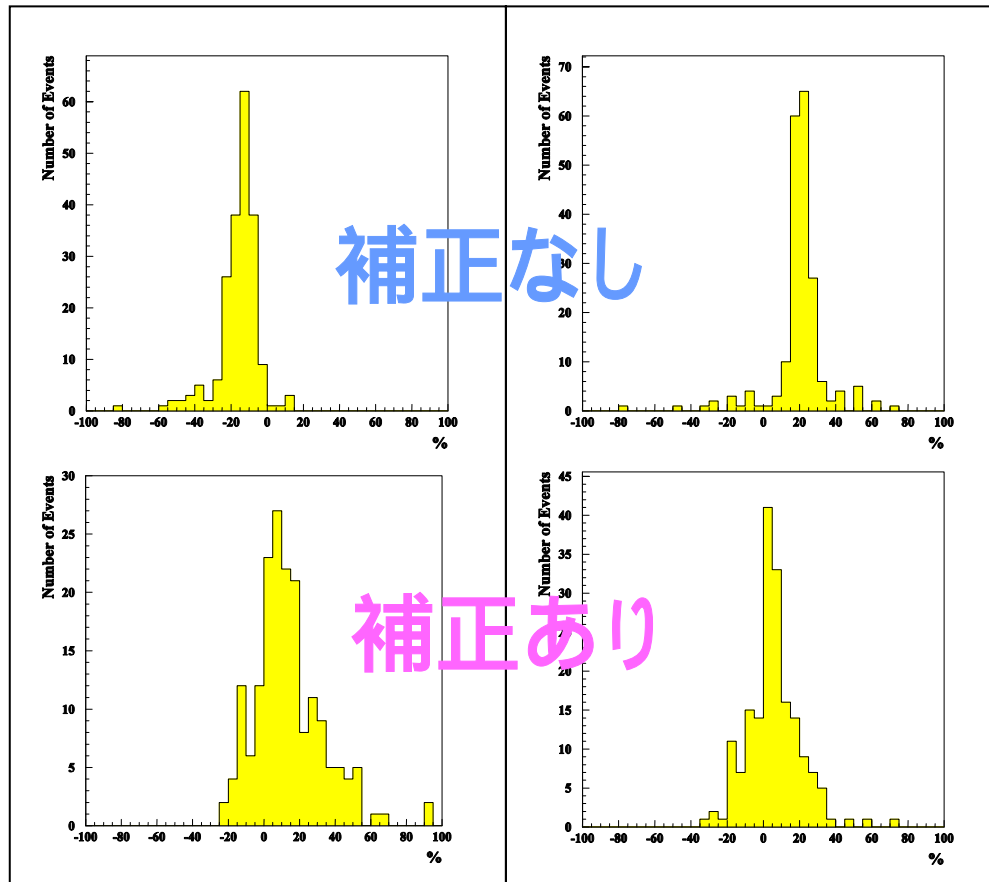
縦方向発達曲線の地表シャワーサイズによる補正

$$E = 10^{20} \text{ eV}$$

$$N_e^A(X_{\text{地上}}) / N_e^{\text{望}}(X_{\text{地上}})$$

400 m

2000 m



縦方向発達曲線の地表シャワーサイズによる補正

	Mie散乱スケール高 (1200 m)	補正なし	地表サイズで補正
10^{19} eV	400 m	$-9.5 \pm 6.0\%$	$+14.9 \pm 16.7\%$
	2000 m	$+21.7 \pm 6.0\%$	$-4.1 \pm 12.5\%$
10^{20} eV	400 m	$-13.9 \pm 6.3\%$	$+10.1 \pm 18.4\%$
	2000 m	$+21.2 \pm 4.8\%$	$+4.8 \pm 13.1\%$
10^{21} eV	400 m	$-17.7 \pm 6.8\%$	$+8.6 \pm 17.1\%$
	2000 m	$+21.8 \pm 5.8\%$	$+2.9 \pm 11.7\%$

20%以上 → ほぼ10%以下

まとめ

AGASAの成果を継承し、super - GZK宇宙線の存在を確立する

ハイブリッド検出器による高精度観測

- 地表でのシャワーサイズから縦方向発達曲線のスケール補正
- 大気蛍光の補正を高精度化
- 横方向分布からのエネルギー推定法の実験的評価
- 幾何学的シャワー再構成の補正

エネルギースペクトルの高精度測定

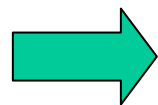
AGASAとHiResの不一致

エネルギー決定の系統誤差の圧縮

粒子組成測定、点源探索

空気シャワーの縦方向発達の高精度観測

高い角度分解能



粒子線天文学の開拓、宇宙開闢の素粒子物理