

Telescope Array 2

佐川 宏行(東大宇宙線研)

2012年6月30日

東工大 大岡山キャンパス

概要

TA実験と最近の結果

TALE計画

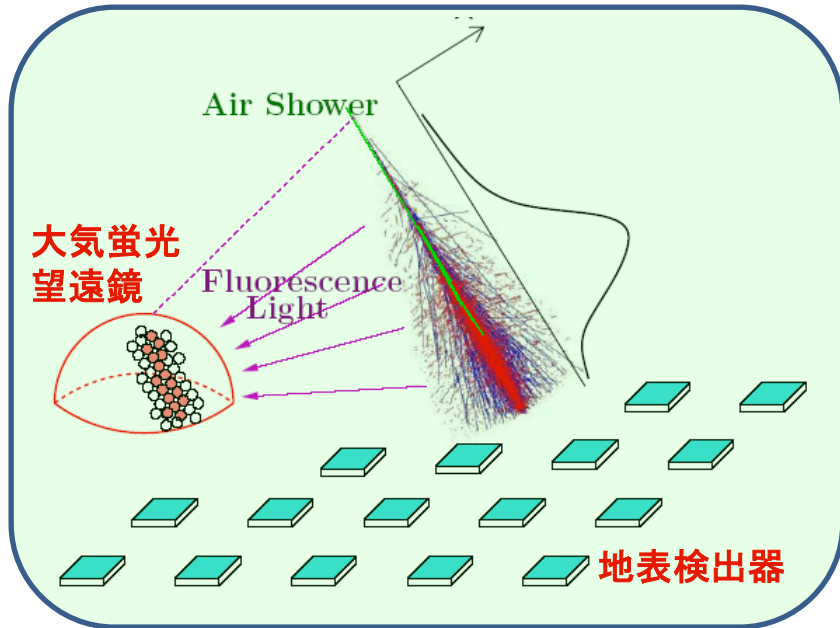
低エネルギー拡張

TAとAugerの結果の違い
解決へのアプローチ

Telescope Array 2

Aperture拡張

TA実験の目的



- エネルギースペクトル
- 組成
- 到来方向

最高エネルギー宇宙線による 宇宙極高現象の解明

特定領域科研費 (2003年度～2008年度)

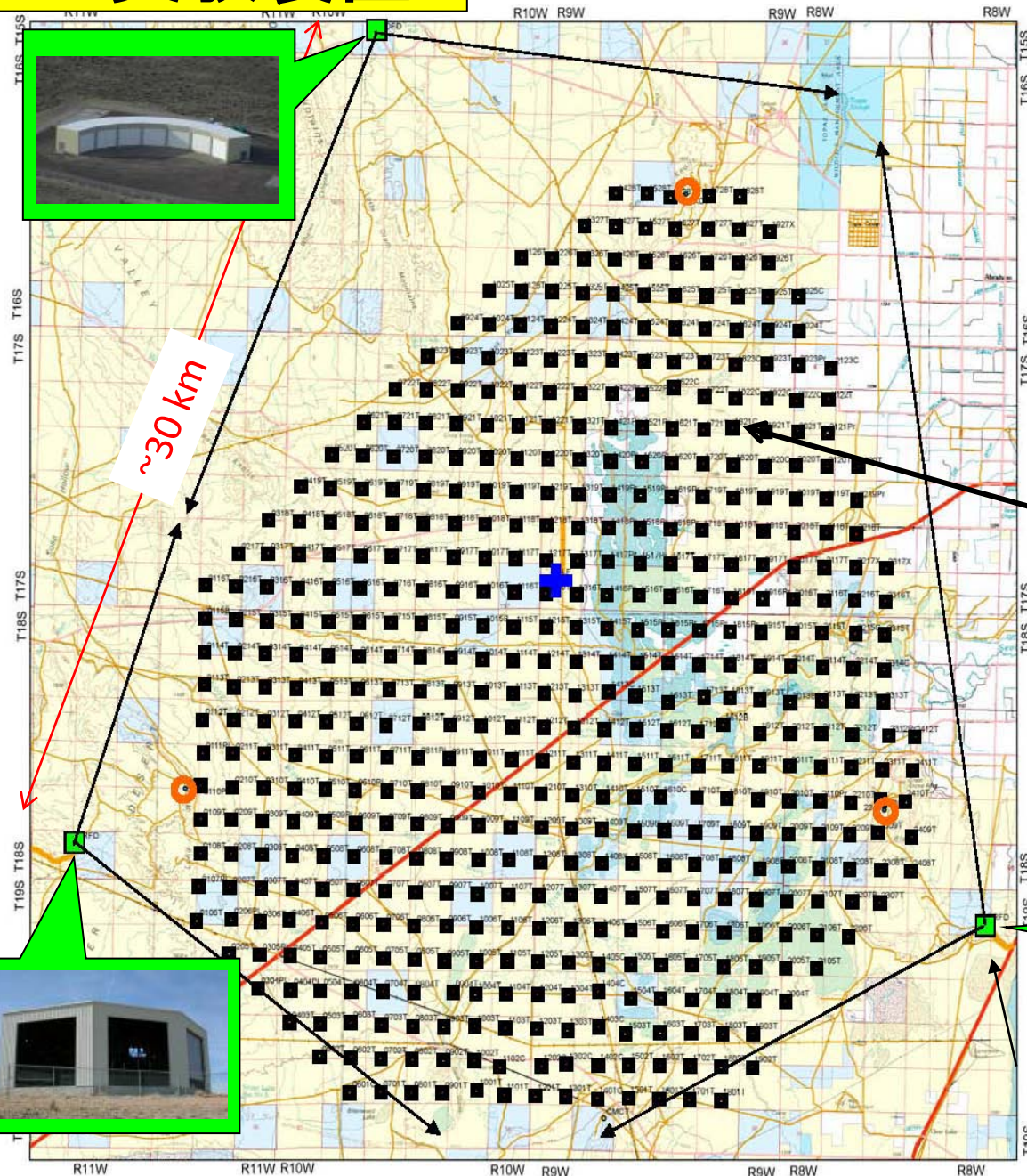
2007年11月からFDフル稼働

2008年 5月からSDとFDのハイブリッド観測

特別推進科研費 (2009年度～2013年度)

現在TA運用中

TA実験装置



米国ユタ州
北緯39.3度, 西経112.9度
標高 約1400 m

地表粒子検出器
507台(1.2 km 間隔) 700 km²



大気蛍光望遠鏡
3ステーション

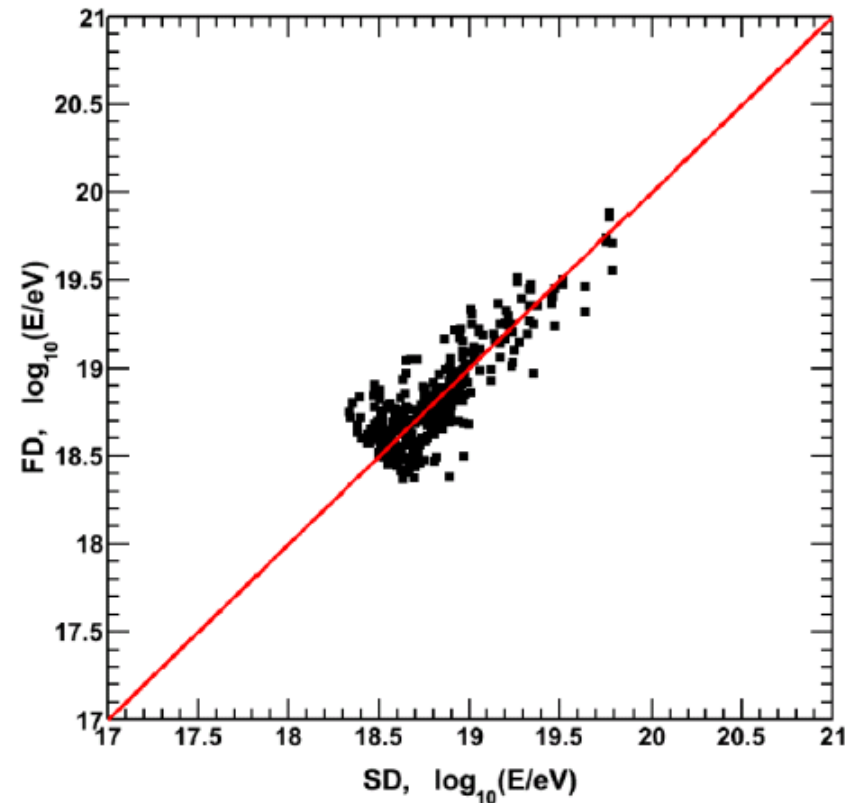
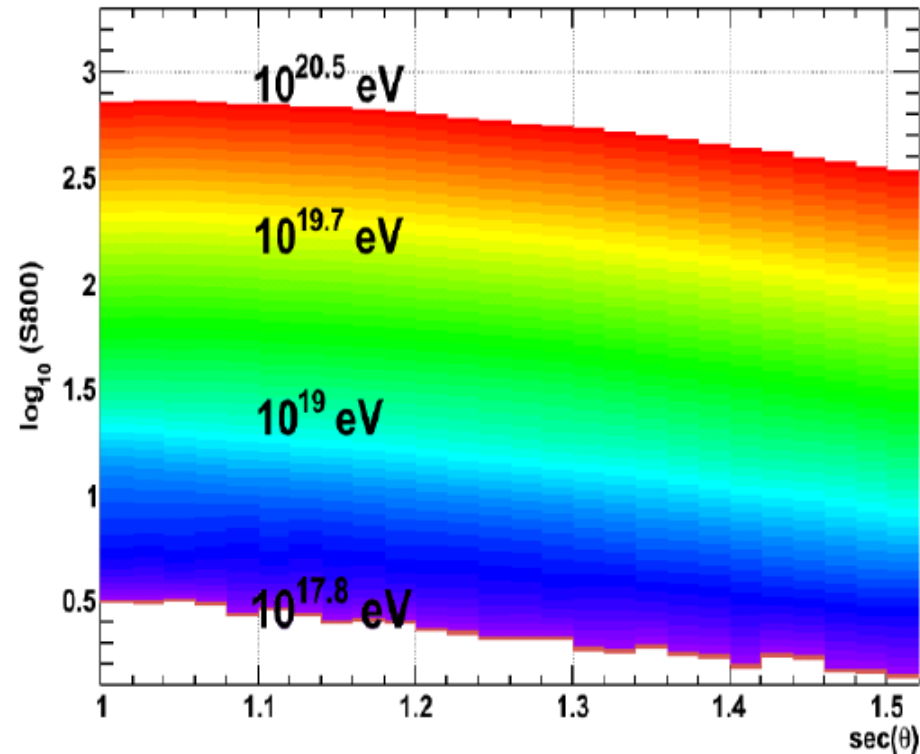


最近のTAの結果

超高エネルギー宇宙線(UHECR)の

- エネルギースペクトル
- 組成
- 到来方向

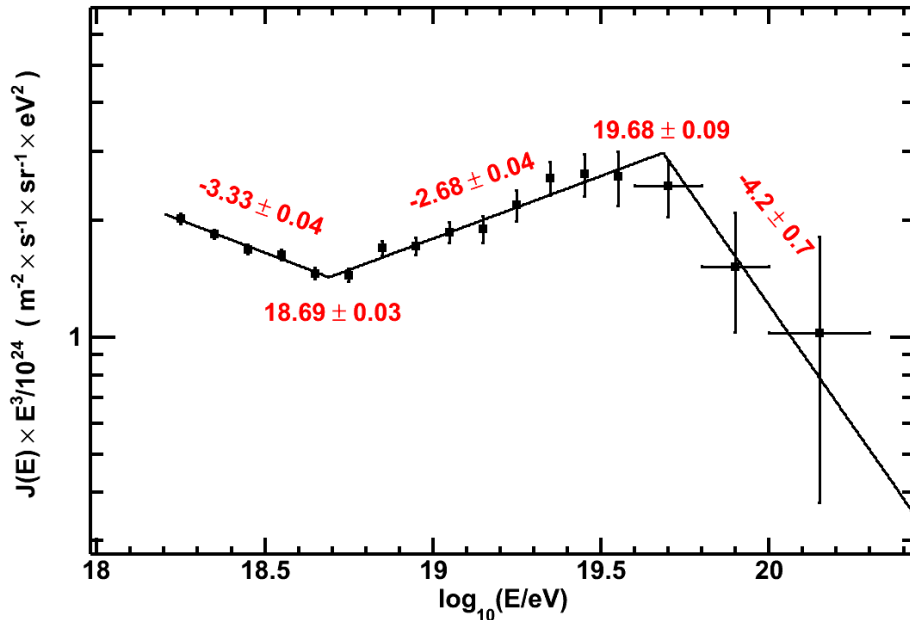
SDによるUHECRのenergyの測定



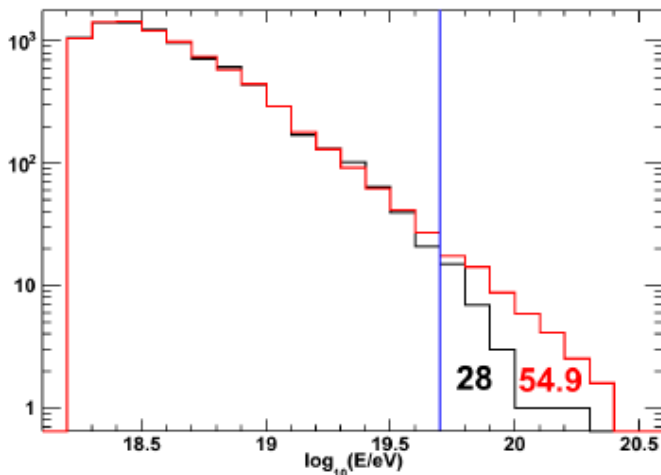
MCを用いてEnergy vs S800, zenith angle
のテーブルを作る
S800: シャワーコアから800m離れた
ところでのcharge density

SD energyを27%下げて、FD energy
と比較した図

SD エネルギースペクトル



N_{EXPECT} :
 GZK suppressionがないとして
 breakをこえてbroken power law fit
 を拡張して
 TA SDのexposureで期待される
 $\log_{10} E = 19.7$ 以上の事象数

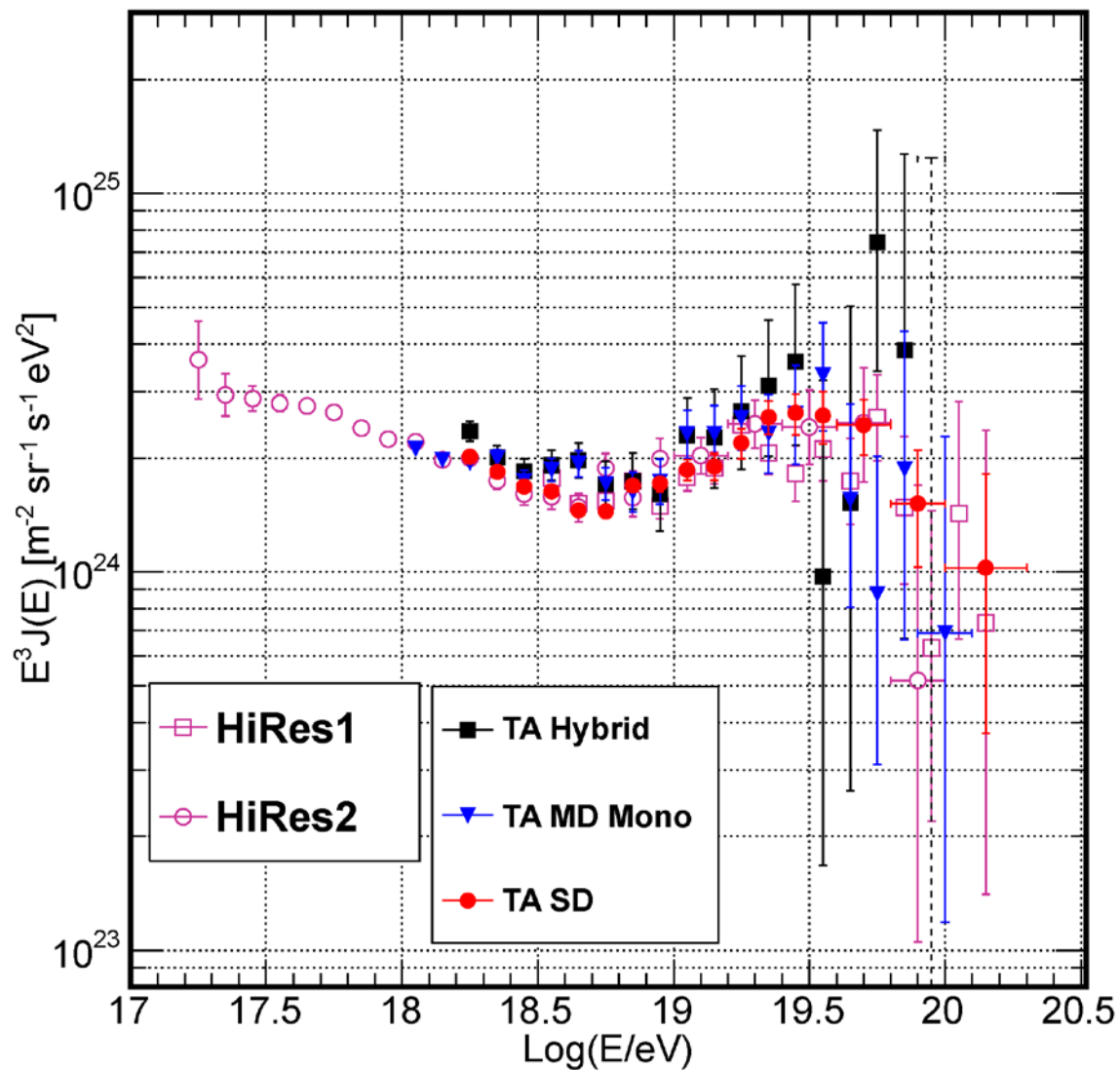


- $N_{\text{EXPECT}} = 54.9$
- $N_{\text{OBSERVE}} = 28$

$$\text{PROB} = \sum_{i=0}^{28} \text{Poisson}(\mu = 54.9; i) = 4.75 \times 10^{-5}$$

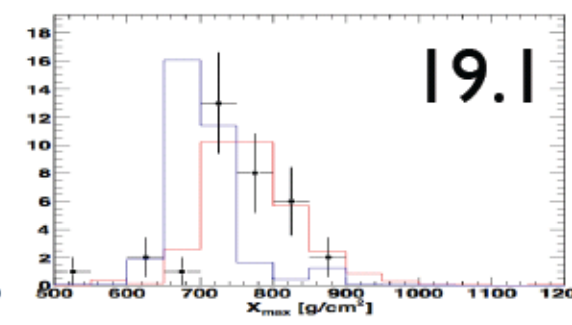
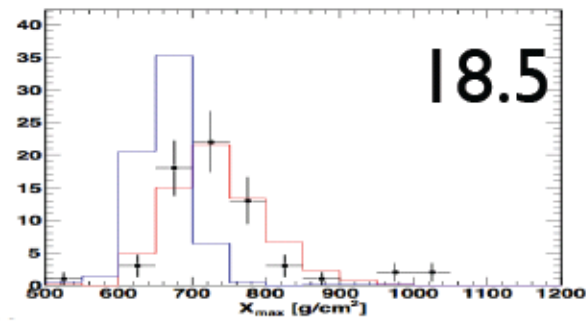
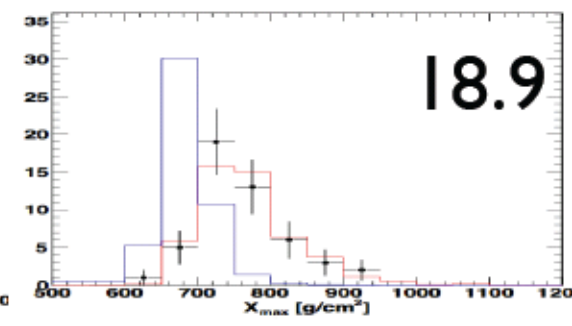
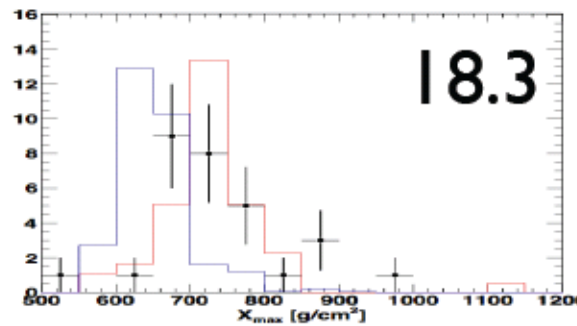
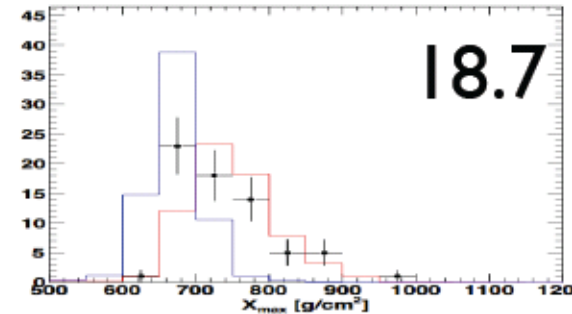
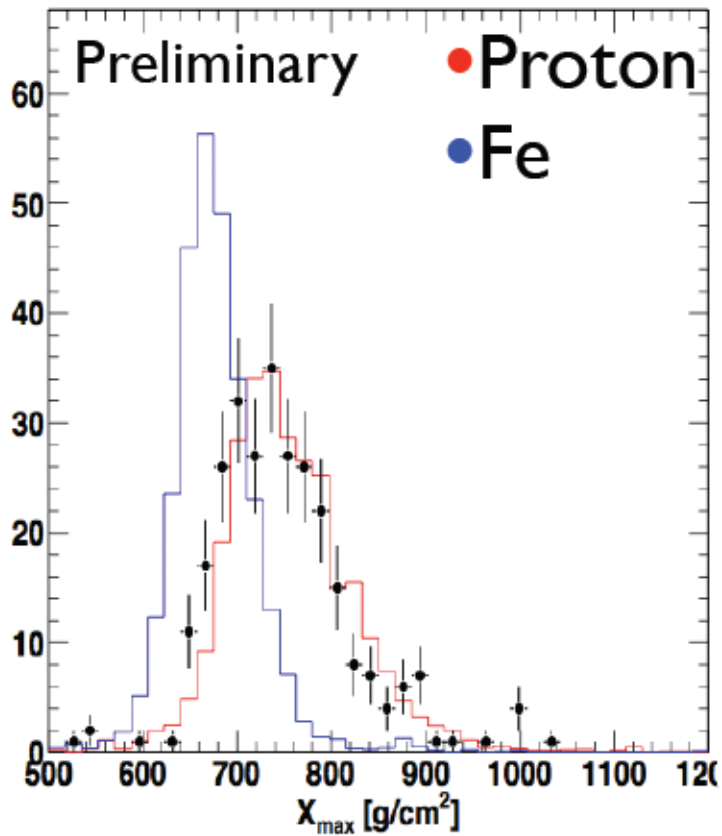
(3.9 σ)

エネルギーースペクトル

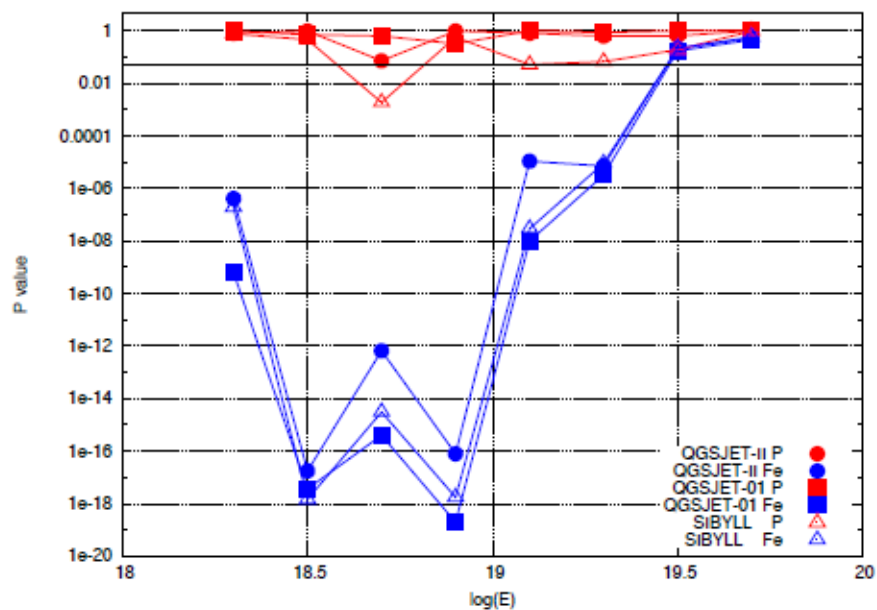
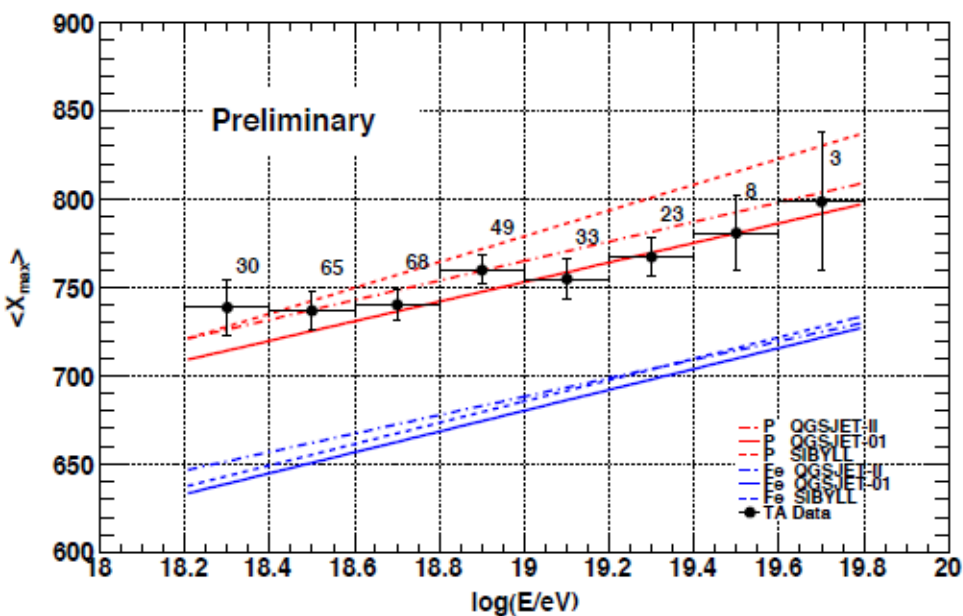


Xmax Distribution MC/Data (QGSJET-II)

TA



Evolution of $\langle X_{\max} \rangle$ w/ Energy

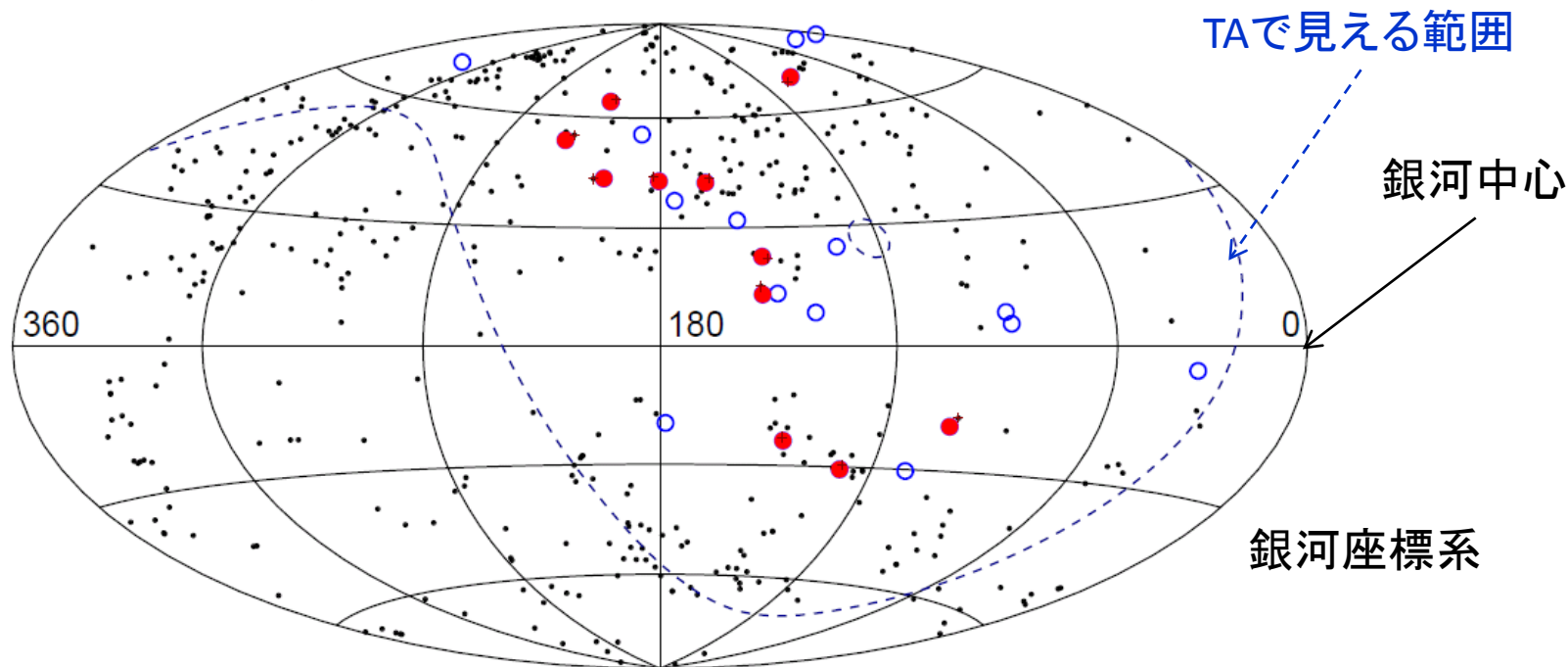


UHECRの到来方向

- 活動銀河核 (AGN) との相関
- 大規模構造 (LSS) との相関
- 自己相関 (autocorrelation)

最高エネルギー宇宙線とAGNの位置との相関

- AGNの距離が2.4億光年以内(黒点)
- 57 EeV以上の宇宙線: 25事象(赤丸+青丸)
- 3.1度以内の数を求める(赤丸)



- 観測相関数11(一様な到来方向の場合の期待相関数は5.9: chance probability 2%)

大規模構造 (LSS) との相関

LSSモデル

[250 Mpc 以下]

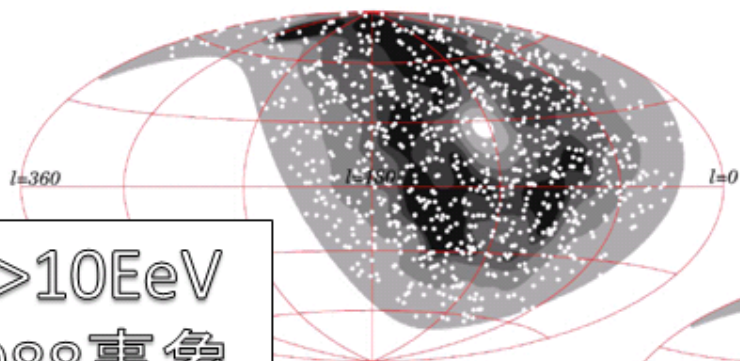
2MASS Extended source カタログ

陽子を仮定

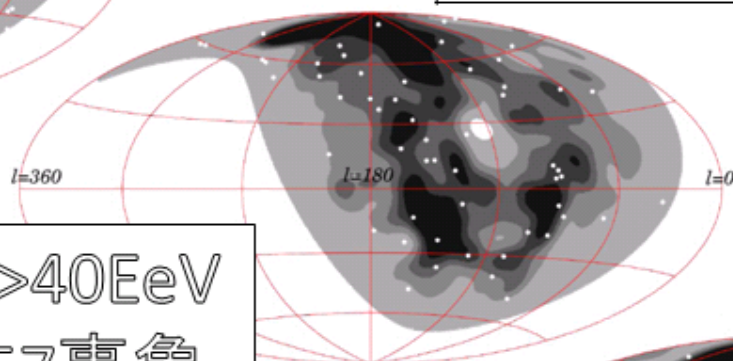
Smearing angle: $\Theta_s = 6^\circ$

[250 Mpc 以遠]

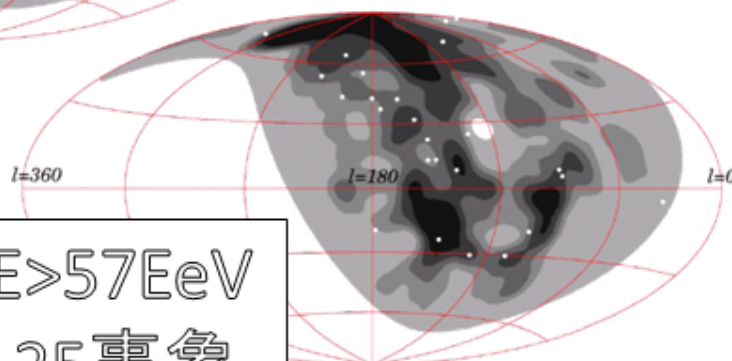
Isotropy



$E > 10 E_{\text{eV}}$
988事象



$E > 40 E_{\text{eV}}$
57事象



$E > 57 E_{\text{eV}}$
25事象

白点
宇宙線事象
TASD データ (40ヶ月)

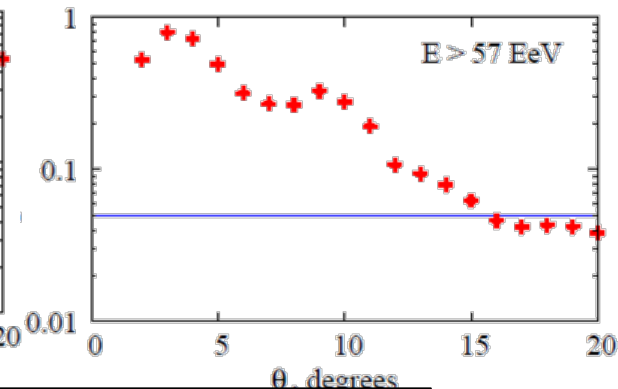
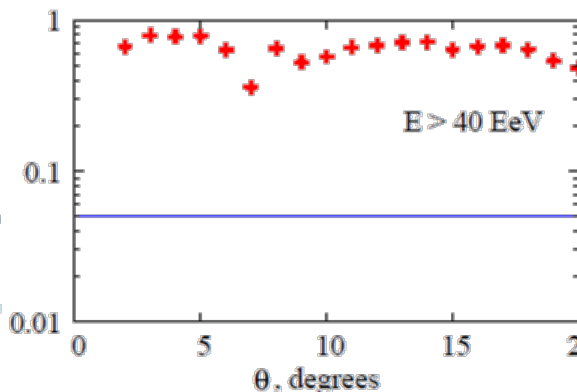
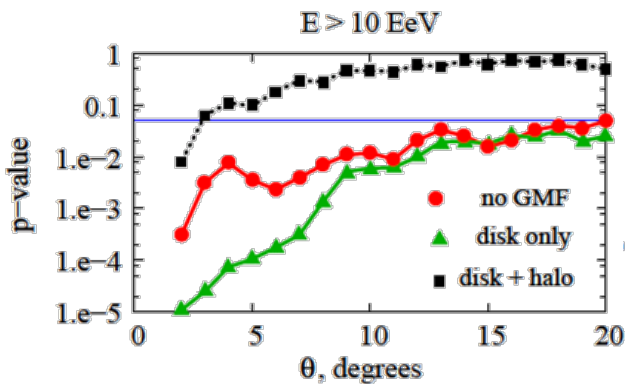
大規模構造 (LSS) との相関

LSSモデルとの適合確率

$E > 10\text{EeV}$

$E > 40\text{EeV}$

$E > 57\text{EeV}$



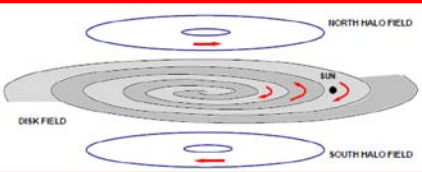
(0.5)

(0.9)

(0.6)

()内はisotropy modelに対する適合確率

Regular GMF
Disk + halo(*)

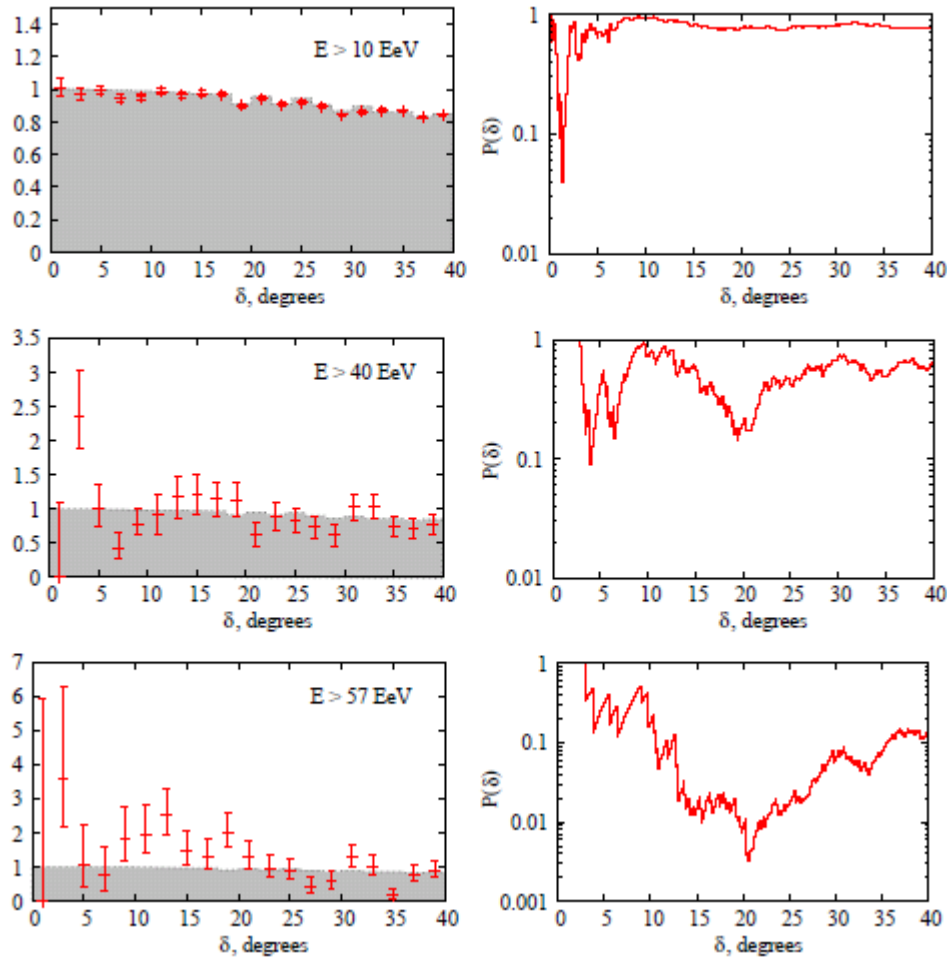


(*) strong/extended halo MF

横軸: smearing angle Θ_s (考慮されていない銀河系外磁場等の効果を角度の歪みとして取り入れる)

モデル	GMF	$E > 10\text{ EeV}$	$E > 40\text{ EeV}$	$E > 57\text{ EeV}$
Isotropy	-	OK	OK	OK
LSS	No	NO	OK	OK
LSS	regular	OK	OK	OK

Auto-correlation



宇宙線の到来方向の小角度スケールでのclusteringは見られない

概要

TA実験と最近の結果

TALE計画

TAとAugerの結果の違い
→解決へのアプローチ

Telescope Array 2

低エネルギーへの拡張

(TALE: TA Low energy Extension)

エネルギー範囲(TA+TALE)

$10^{16.5} \text{ eV} - 10^{20.5} \text{ eV}$

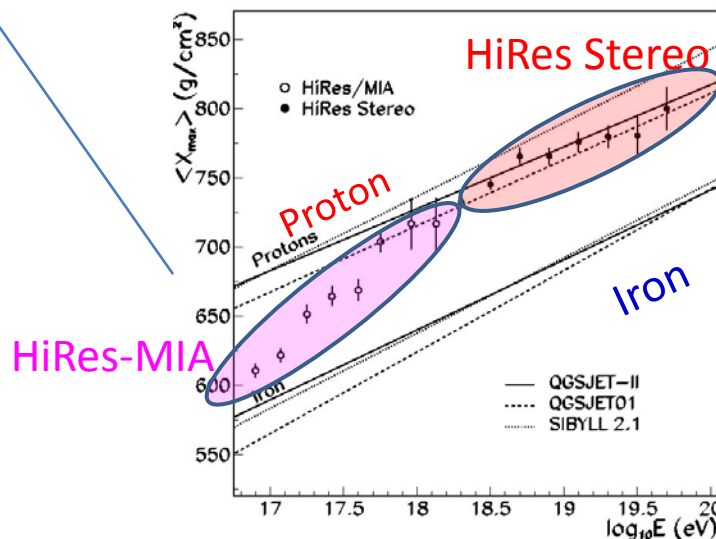
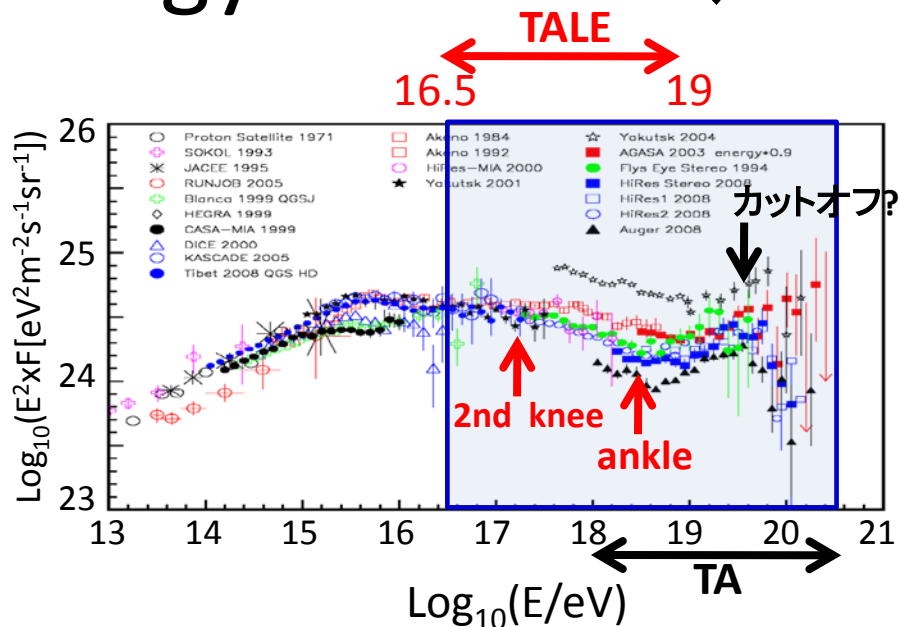
$\sim 10^{17.3} \text{ eV}$: 2nd knee

系外宇宙線への遷移?
(重い原子核 \rightarrow 陽子?)

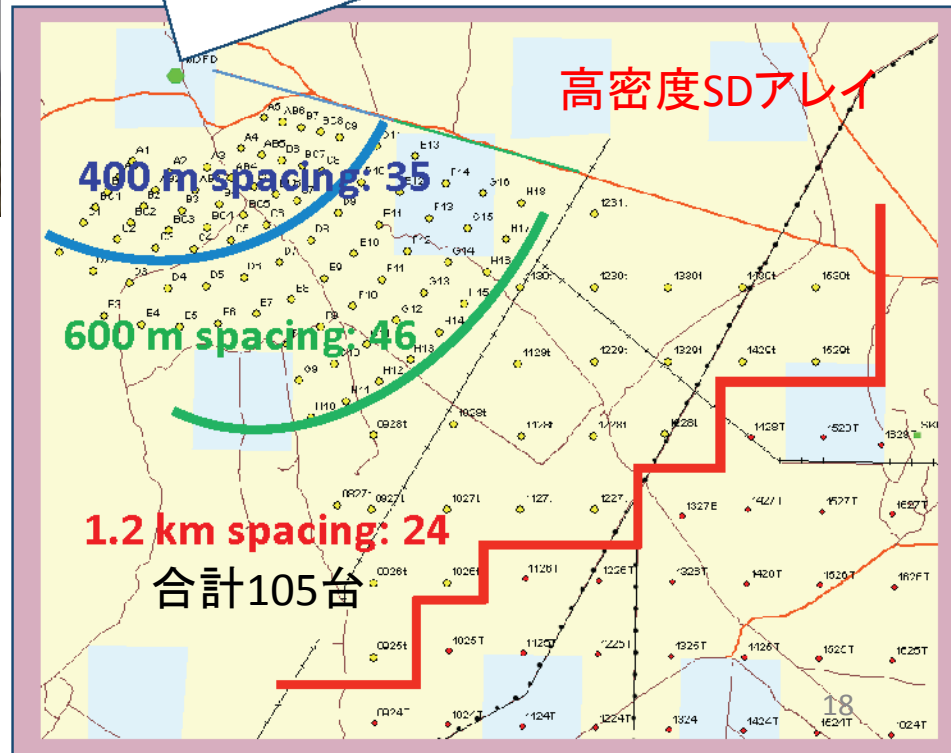
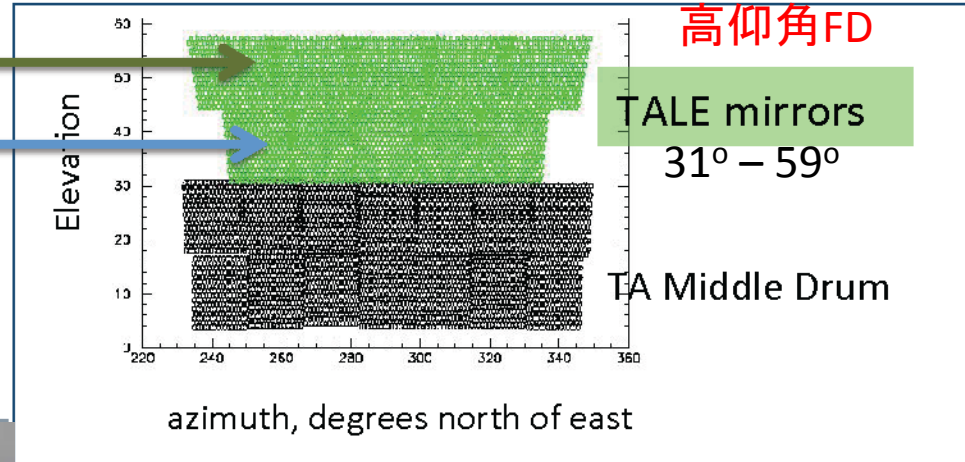
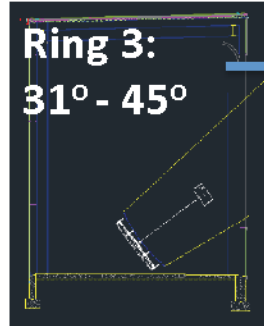
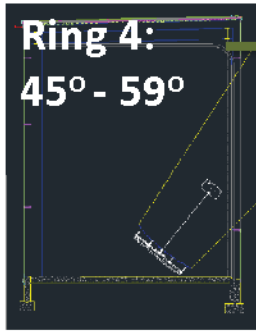
空気シャワーとLHCfとの比較@ 10^{17} eV



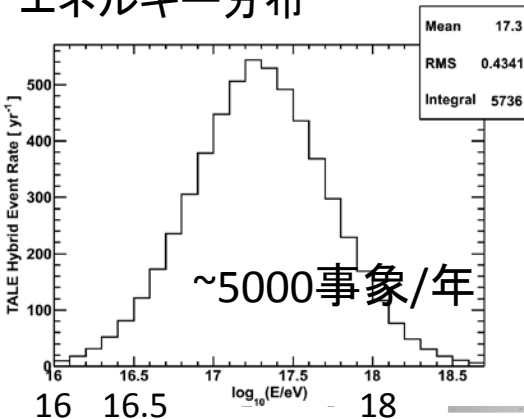
$10^{17} \sim 10^{18} \text{ eV}$ の異方性?
銀河系起源?



TALE測定器



期待されるハイブリッド事象
エネルギー分布



TALE測定器

TALE FD

ユタ大: HiRes移設

来年の春頃完成予定

韓国: 3台のlarge mirror担当

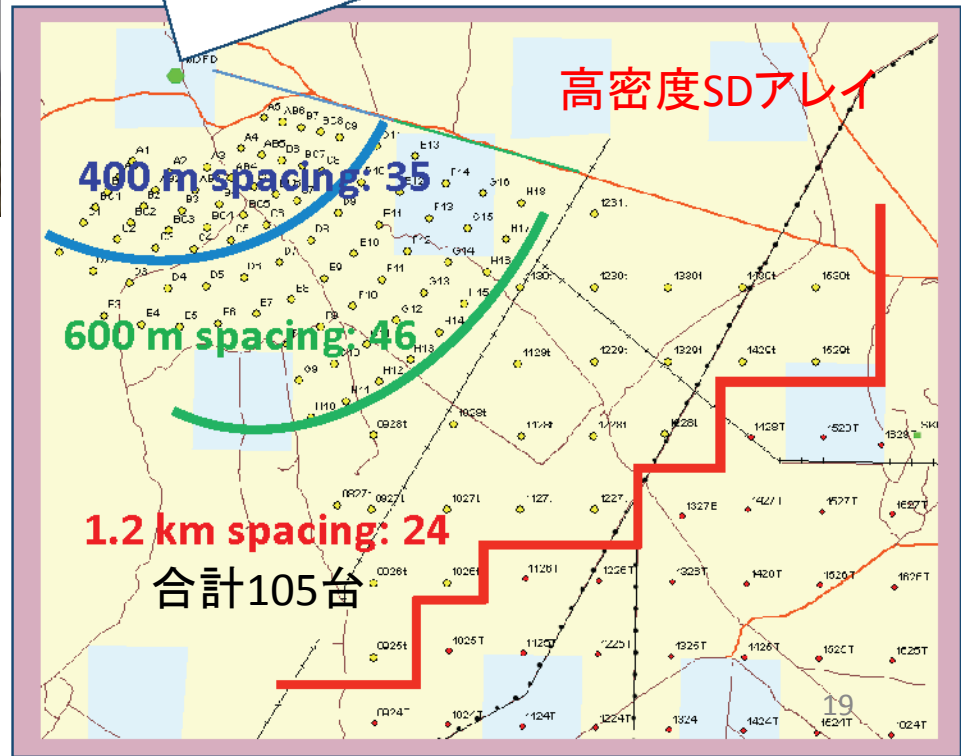
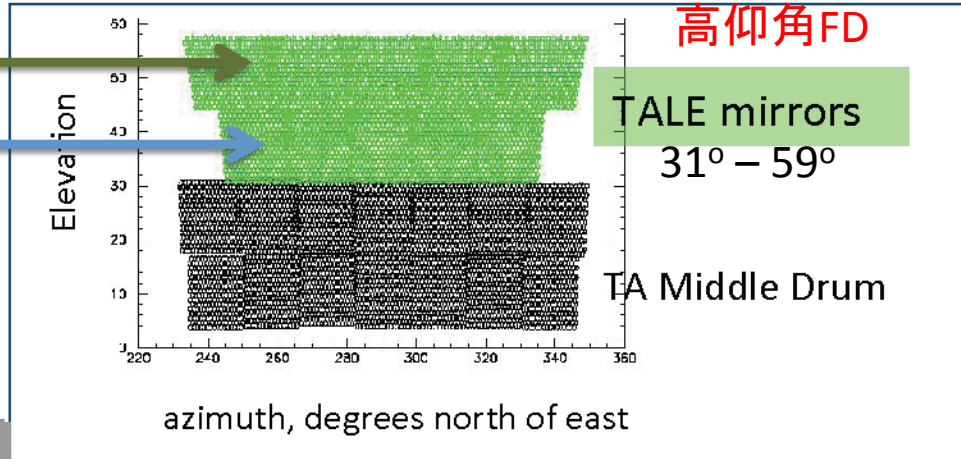
TALE SD

日本担当

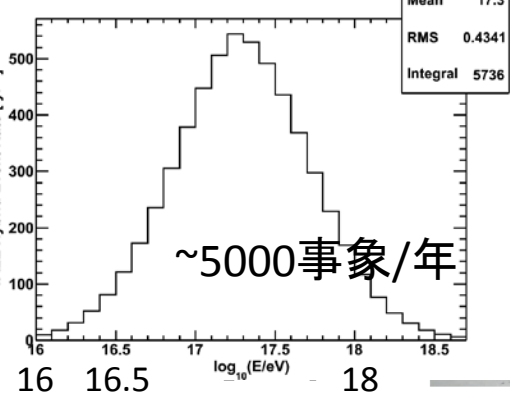
今秋: 一部TA SDのスペアを設置

残りのSDの予算の早期獲得を目指す

TA Middle Drum



期待されるハイブリッド事象 エネルギー分布



TA SDと同じSD

概要

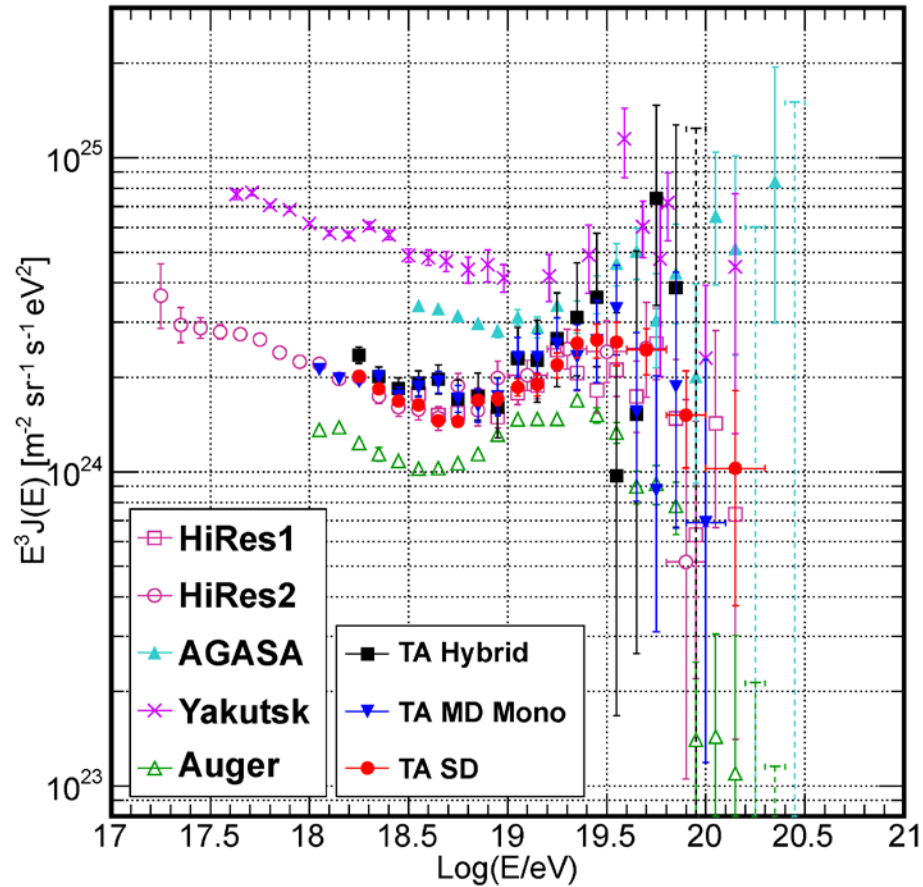
TA実験と最近の結果

TALE計画

TAとAugerの結果の違い
解決へのアプローチ

Telescope Array 2

スペクトル



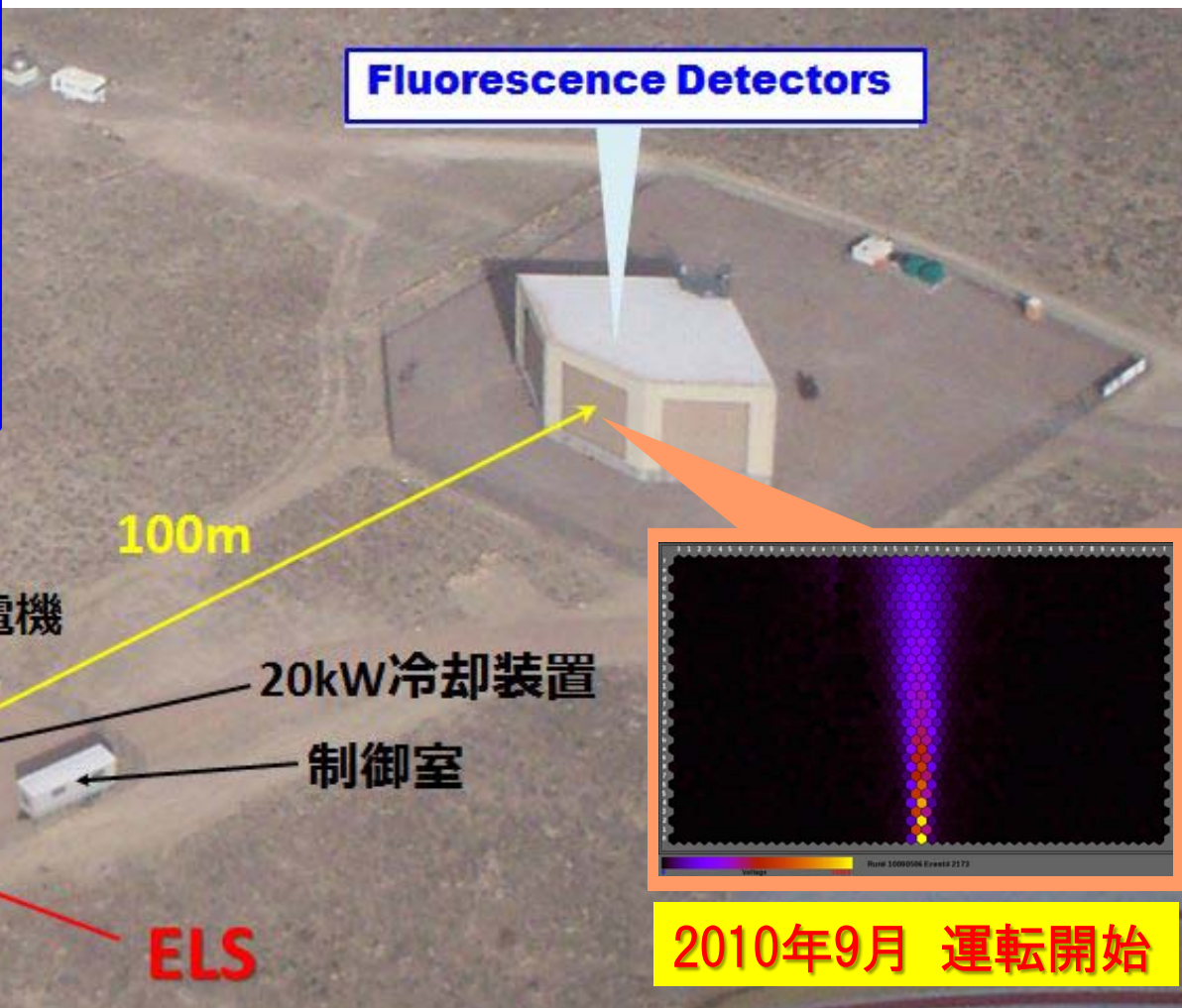
TA SD(■)とAuger(△)の差はエネルギースケールで
25%程度

Electron Light Source (ELS)

加速電子ビーム源 = 新しく提案されたTA実験でのエネルギー較正源
 → エネルギー測定に必要な較正定数の一括較正



ELS@KEK



ビーム射出方向

80kW発電機

20kW冷却装置

制御室

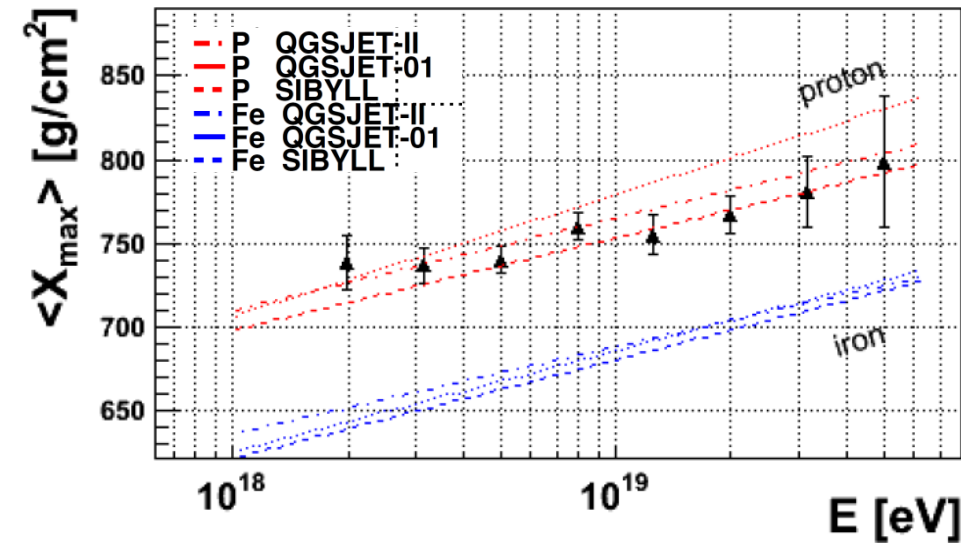
ELS

2010年9月 運転開始

出力電力=40 MeV × 10⁹e⁻/pulse × 0.1-0.5 Hz、パルス幅は1 μ sec

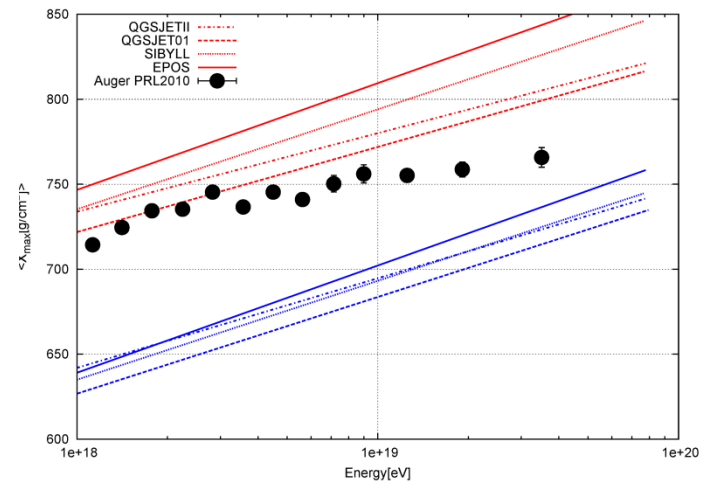
組成

TA



TAの結果は陽子モデルと一致

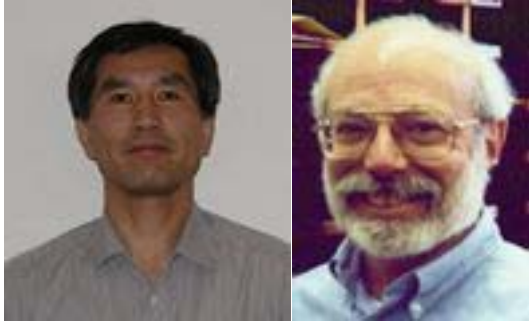
AUGER



Augerの結果は約 3×10^{18} eV以上から重くなっている

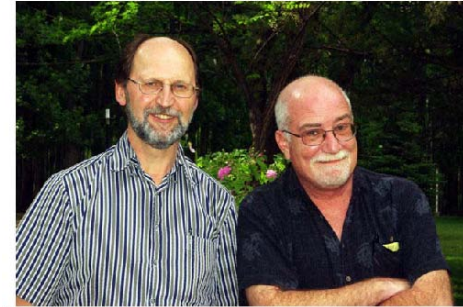
TA, Auger spokespersons

TA spokespersons



Hiroyuki Sagawa Gordon Thomson

Auger spokespersons



Karl-Heinz Kampert Jim Matthews

TAとAugerの懸案を解決するために
spokesperson間で打合せを行っている

これまで挙がっている項目

- TAとAugerのspokesperson間の打合せ
 - 2月のUHECR2012シンポジウムに向けて立ち上げたWorking Group(*)の継続
 - (*) Spectrum/composition/anisotropy/model/multi-messenger

TA – Auger の共同研究に関して 挙げられている案

- Photonic calibrationの交換
- 解析プログラムの公開?
 - 一部データ公開?
- 相手側のグループの会議に参加して議論
- 相手側のグループのupgradeに参加
 - R&Dに関しては、TAサイトで、AugerのKIT/ChicagoグループとTAで共同でELSからの電波観測試験を行っている。
- FD&SDの交換

Exchange of photonic calibration

- CRAYS@ICRR (TA)
 - AugerのPMTを較正



- ユタ大の較正装置 (TA)
 - AugerのPMTを較正

- Octocopter (Auger)
 - Photonic calibration
 - Absolutely calibrated light source

➡ TA



FDとSDの交換

TA 1 FD station + 100 TA SDs → Auger
Auger 1 FD station + 100 Auger SDs → TA

合成写真



概要

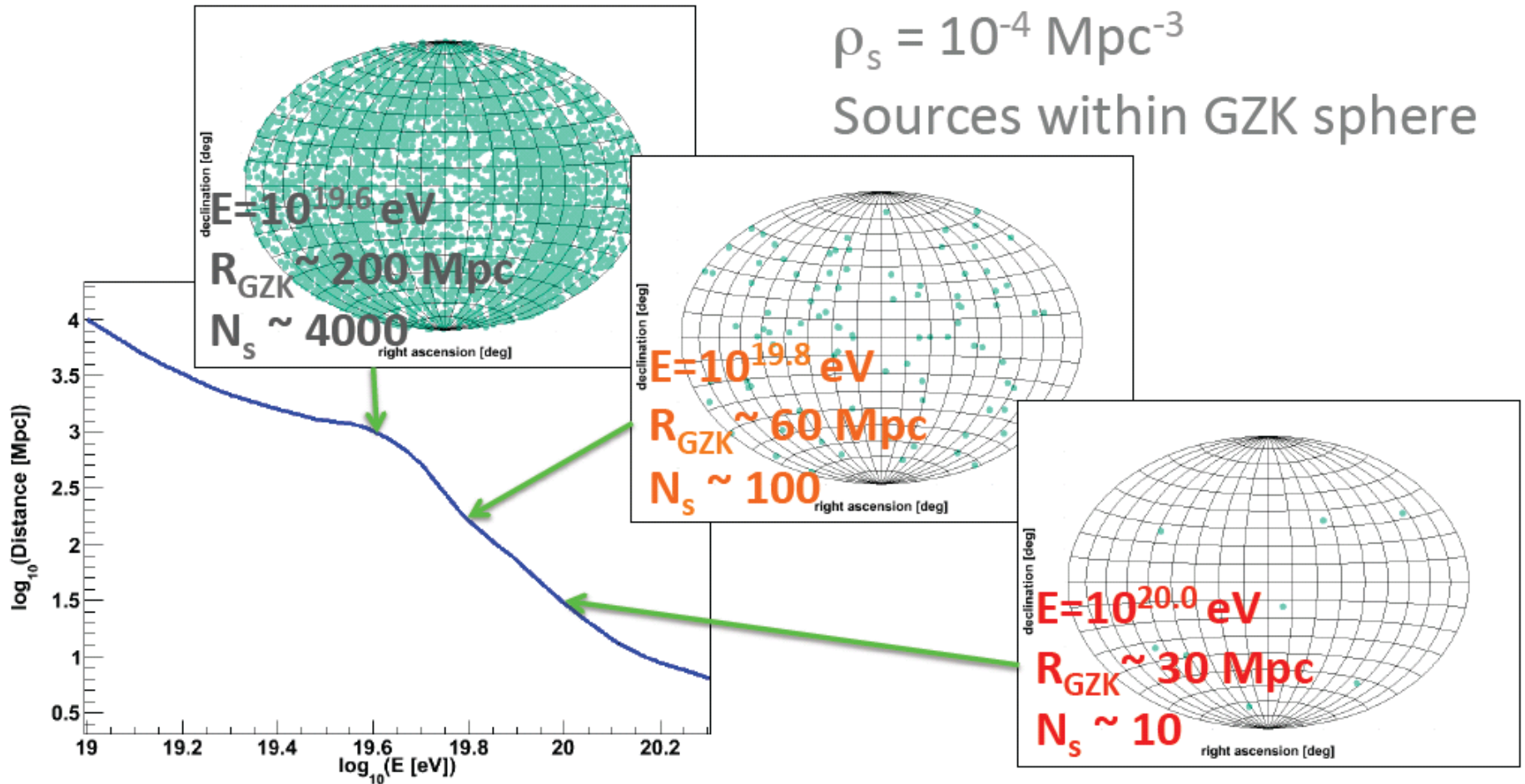
TA実験と最近の結果

TALE計画

TAとAugerの結果の違い
解決へのアプローチ

Telescope Array 2

点源の同定

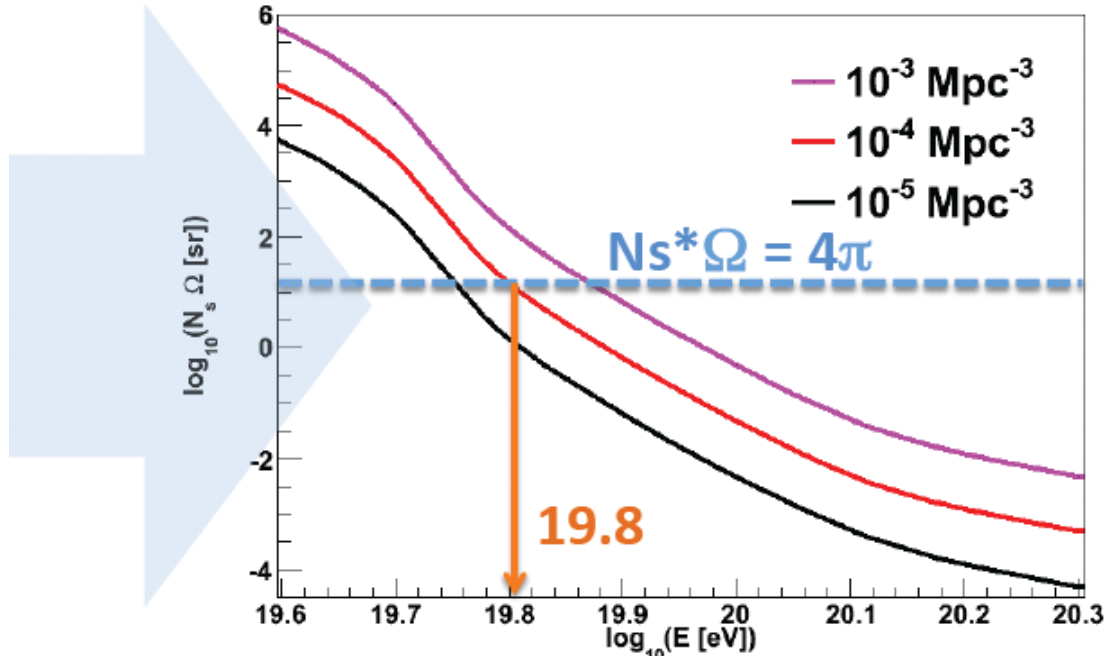


最高エネルギー宇宙線を使う \Rightarrow ソースの数を限る

点源の同定

点源の分離のために $\Rightarrow N_s \times \Omega < 4\pi$

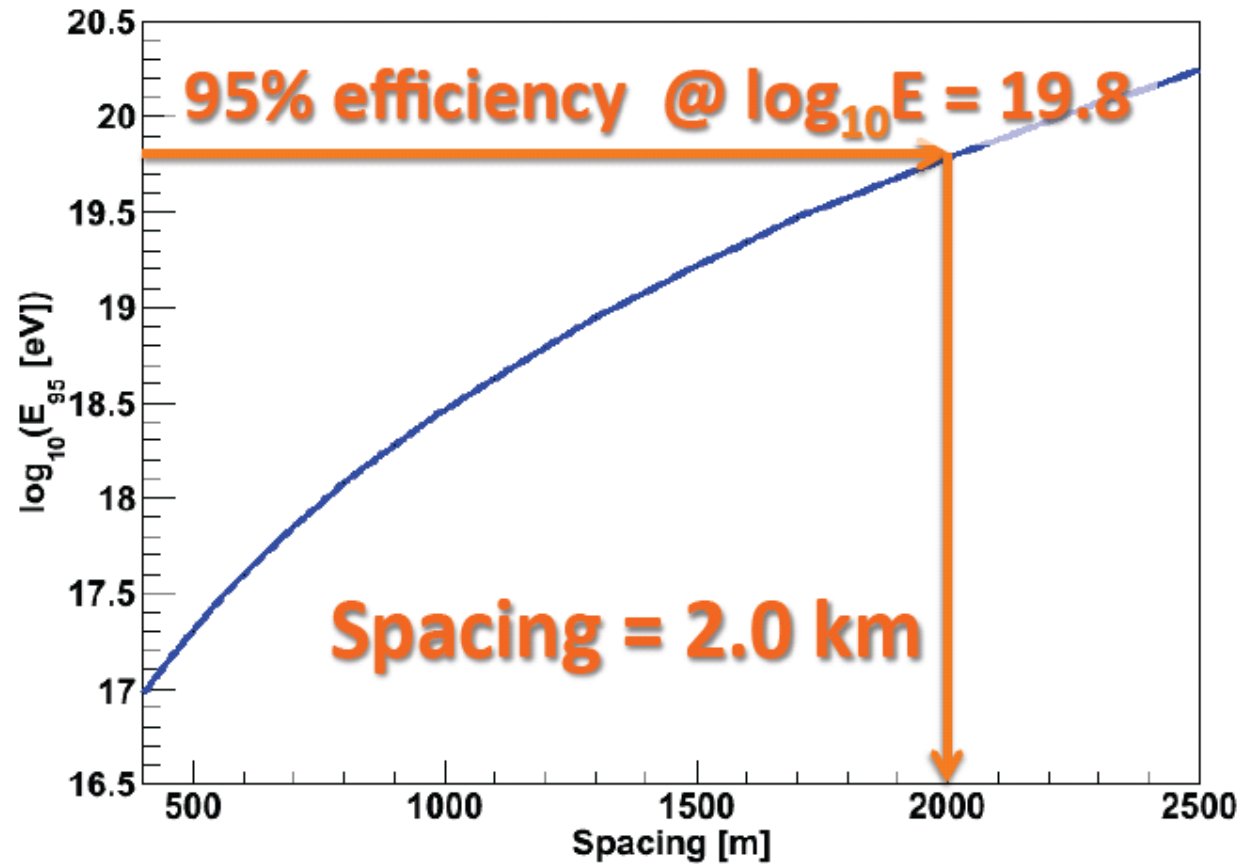
$(\log_{10} E)$	(N_s)
19.6	~ 4000
19.8	~ 100
20.0	~ 10



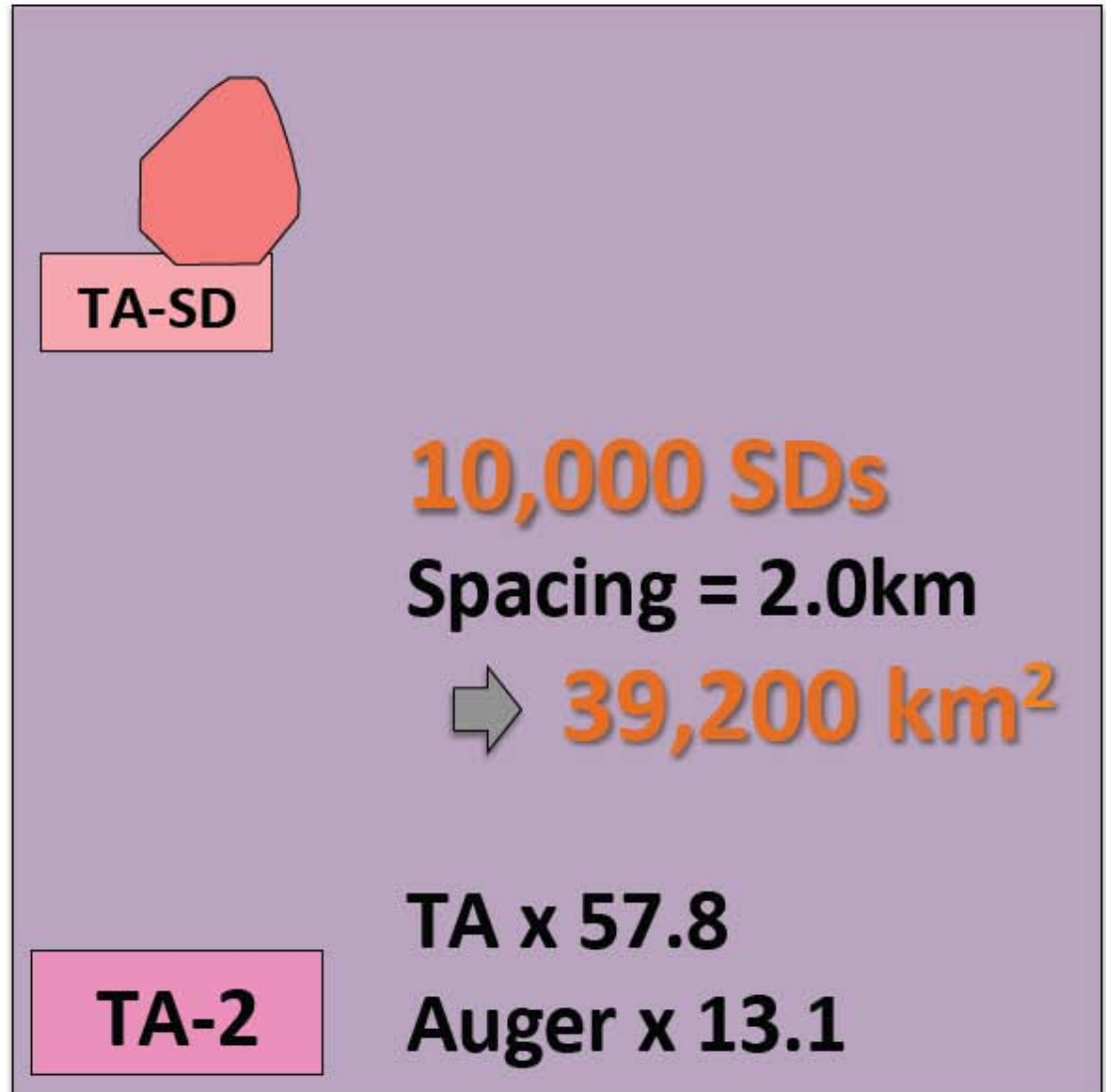
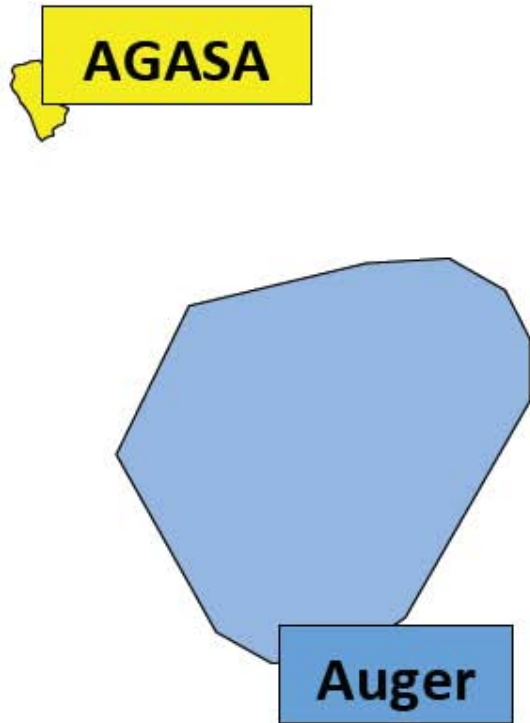
detector resolution, 2.1° ,
included

$$\Rightarrow \log_{10} E_{\text{th}} = 19.8 - 19.9$$

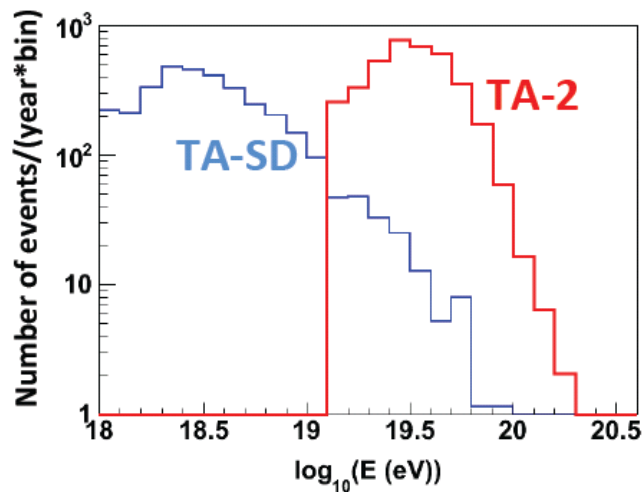
SD spacing



Huge air shower array



1年に期待される事象数



	[events/yr]
log ₁₀ E > 19.8	257.9
log ₁₀ E > 19.9	84.7
log ₁₀ E > 20.0	25.6
(* E > 57 EeV	434.5)

Telescope Array 2の課題

- ソース密度
- LSS proton model
- 加速限界
- 組成の同定
- $\text{UHE}\gamma$

ソース密度の制限

Table 1

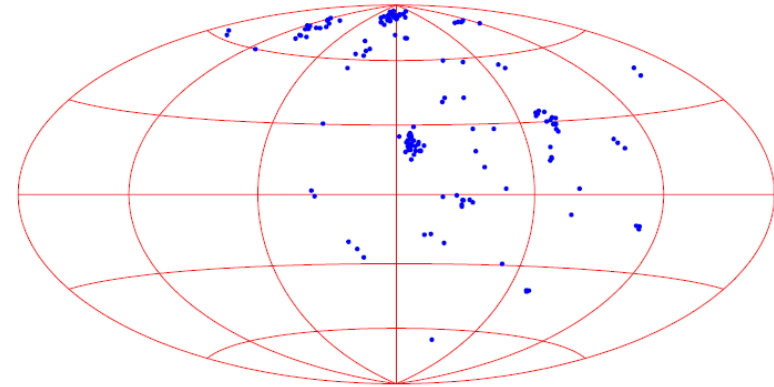
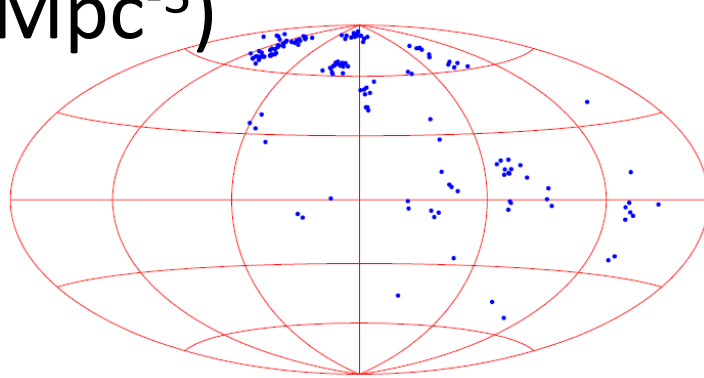
Takami et al. 2007

Local number densities of several active objects.

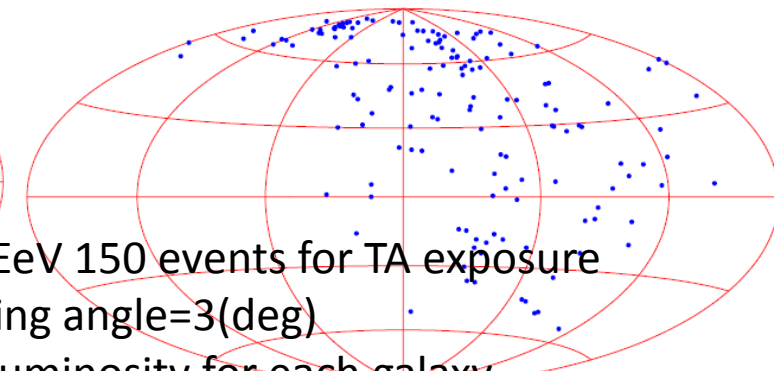
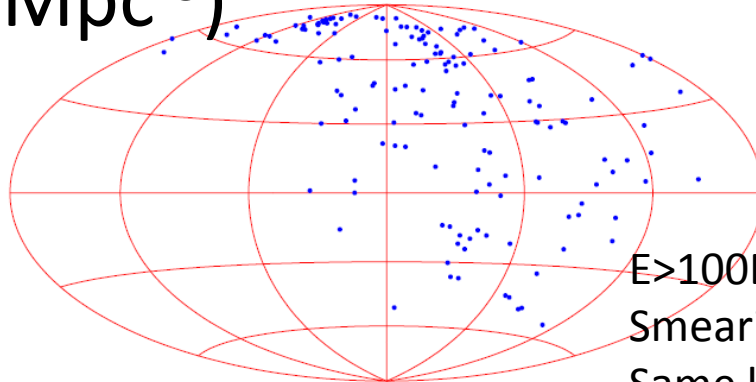
Object	Density (Mpc^{-3})	References
Bright galaxy	1.3×10^{-2}	[31]
Seyfert galaxy	1.25×10^{-3}	[31]
Bright quasar	1.4×10^{-6}	[32]
Fanaroff–Reilly 1	8×10^{-5}	[34]
Fanaroff–Reilly 2	3×10^{-8}	[33]
BL Lac objects	3×10^{-7}	[33]

(60倍 TA SD) × 5年の場合の100EeV以上のUHECRのsky mapの例

- $2 \cdot 10^{-4} \text{ (Mpc}^{-3}\text{)}$



- $2 \cdot 10^{-3} \text{ (Mpc}^{-3}\text{)}$

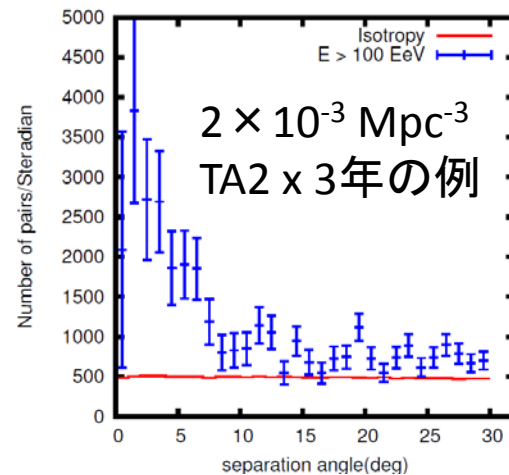
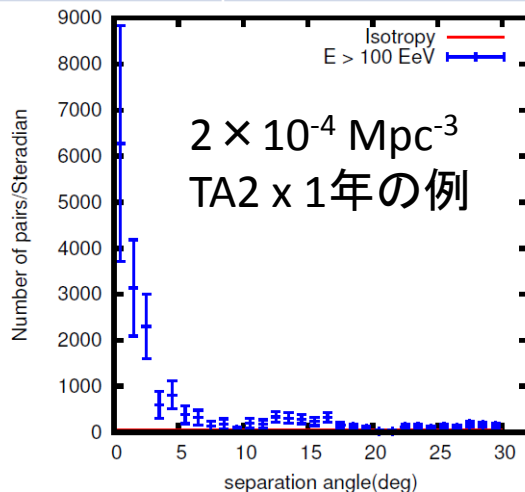


E>100EeV 150 events for TA exposure
Smearing angle=3(deg)
Same luminosity for each galaxy
Zenith angle < 45(deg)

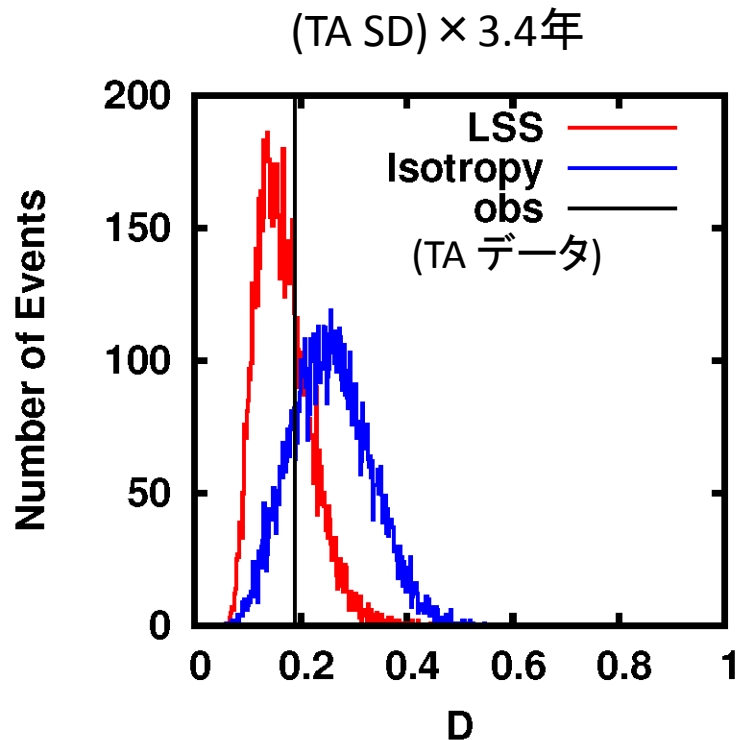
TA2(60倍TA SD)で3度以内の100EeV 以上のUHECRのペア数

モデル	LSS model		地球への到来方向 が一様分布 (Iso)
ソース密度	$2 \times 10^{-4} \text{ (Mpc}^{-3}\text{)}$	$2 \times 10^{-3} \text{ (Mpc}^{-3}\text{)}$	
1年	most probableなペア数	most probableなペア数	期待されるペア数
	12	3	0.6 ± 0.8
	Isoからのずれ: $>5\sigma$		
3年	most probableなペア数	Most probableなペア数	期待されるペア数
	122	26	6 ± 2
	Isoからのずれ: $>5\sigma$		

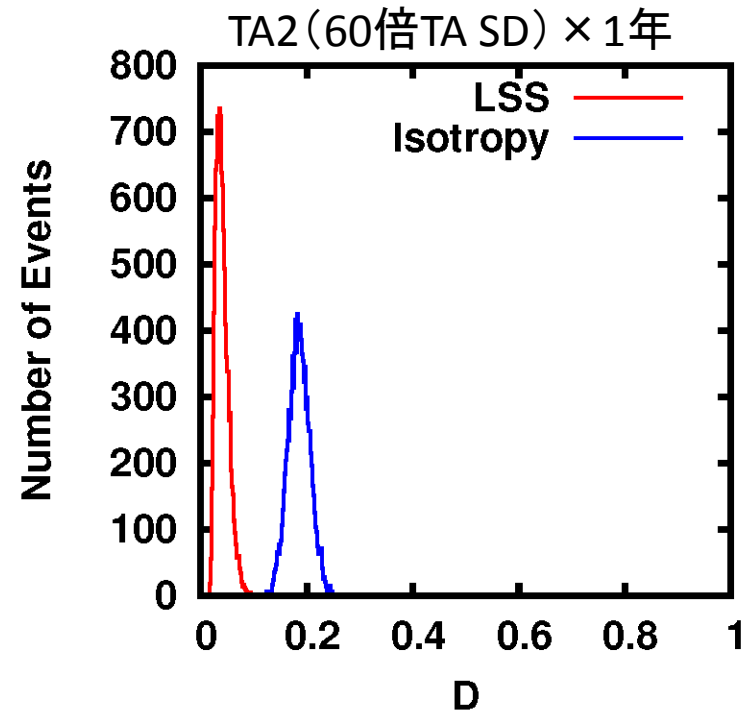
縦軸は
立体角で
normalize



LSS proton modelからのずれに関する expectation



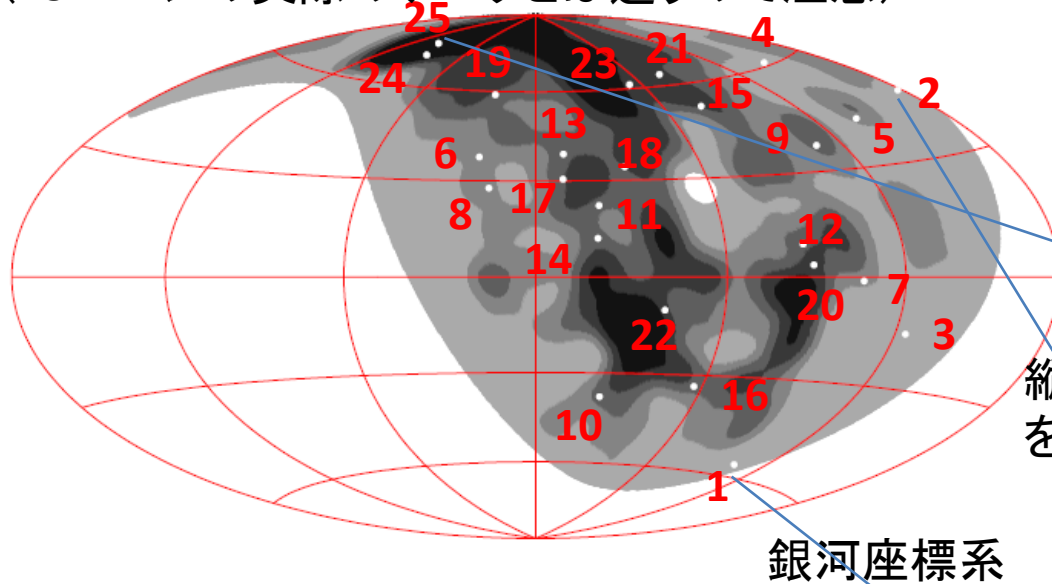
←
より合っている



6.5 σ でIsotropy model
が棄却できる

前ページ横軸Dの説明

下図の到来方向(白丸)はシミュレーションの1例
(13ページの実際のデータとは違うので注意)



白丸: 57EeV以上の宇宙線25事象(TA SD 3.3年分)
のMCシミュレーションの1例

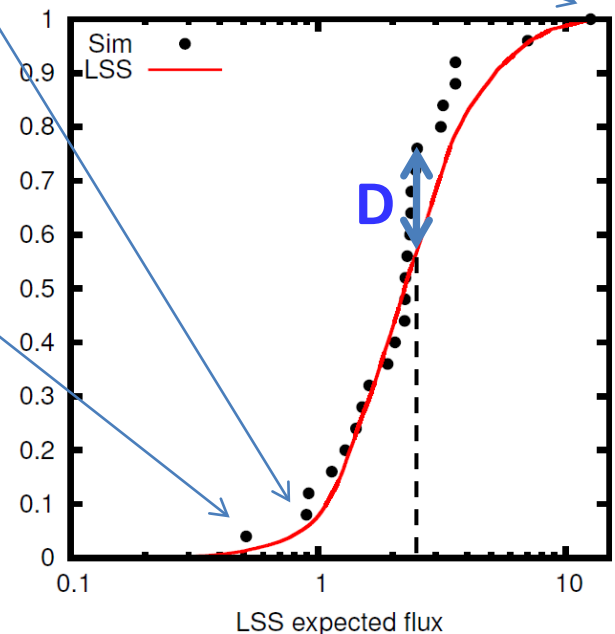
グレーで示した範囲がTAで観測できる領域
グレーはLSSモデルで期待されるflux分布
5段階表示(各領域は同じ頻度数)
濃いほどfluxが高い

D: モデルからの最大の差

Dが小さいほどモデルと合っている

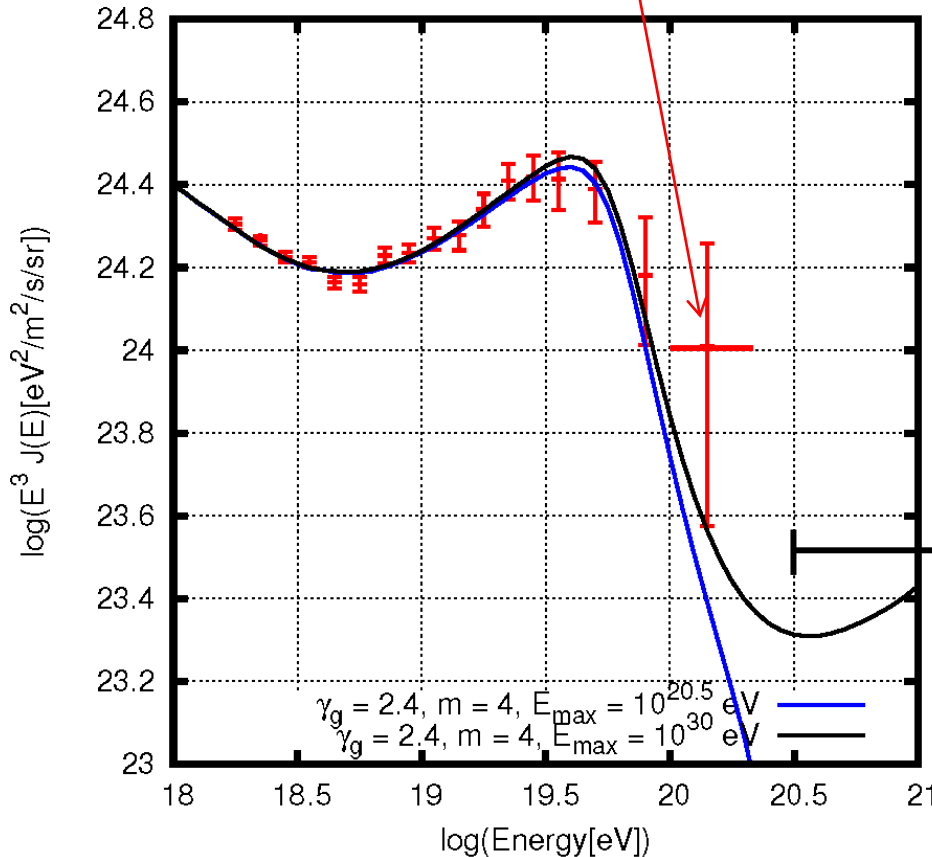
この場合、横軸~2.5の時にLSS
モデル(赤線)との差が約0.2と
最大になる

縦軸: 累積25事象数
を1に規格化



60倍TA SDで期待されるスペクトル

(TA SD) × 3年のデータ



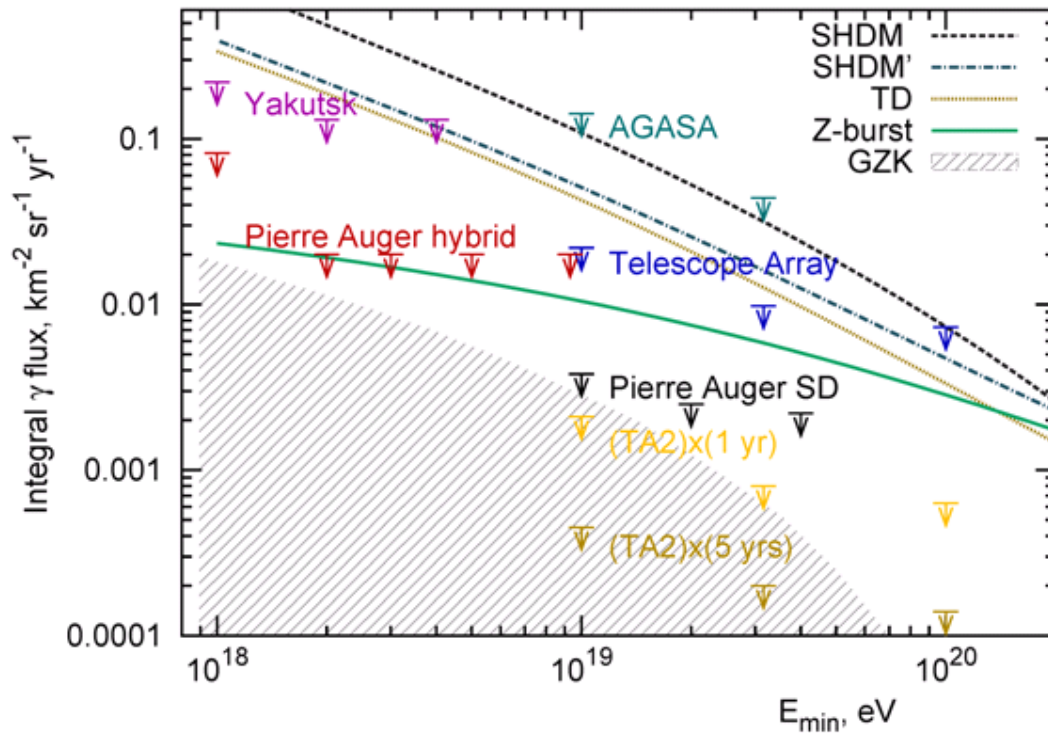
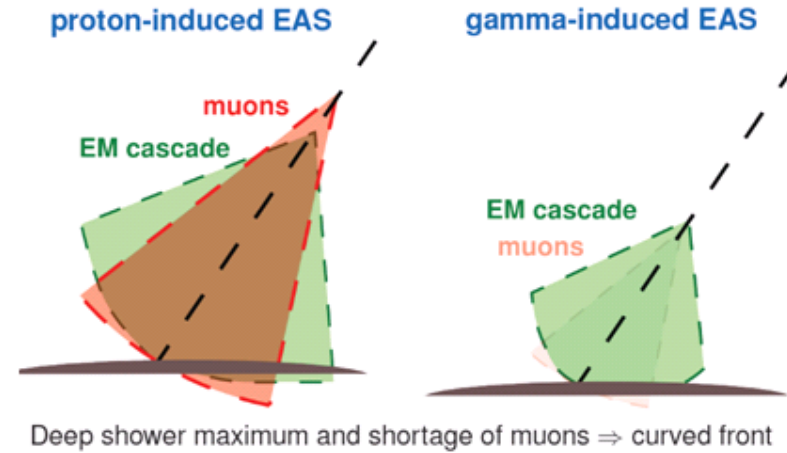
(60倍 TA SD) × 10年の場合に
 $10^{20.5} \text{ eV}$ 以上で

加速限界がほぼない場合
 に期待される事象数 20.6

加速限界が $10^{20.5} \text{ eV}$ の場合
 に期待される事象数 0

期待値が20.6でゼロになる確率
 は $\sim 6\sigma$

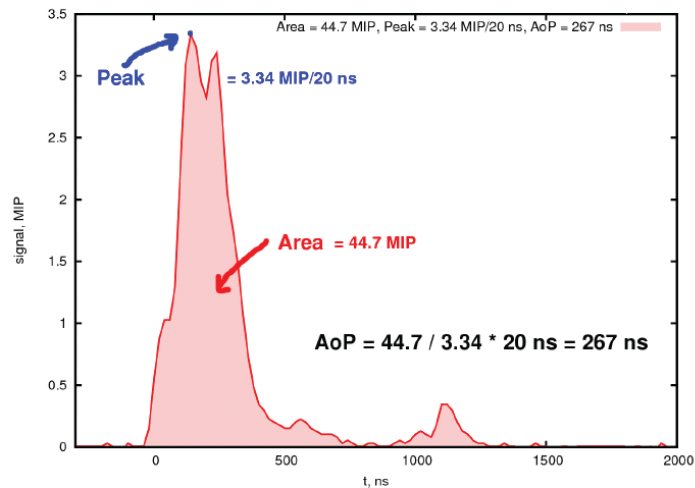
超高エネルギー光子の探索



組成の同定 (SD)

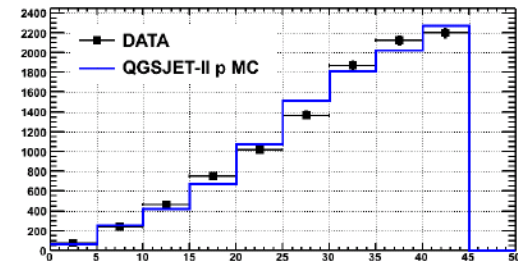
Area over peak - new SD observable

- ▶ Consider a detector waveform (front + back) / 2

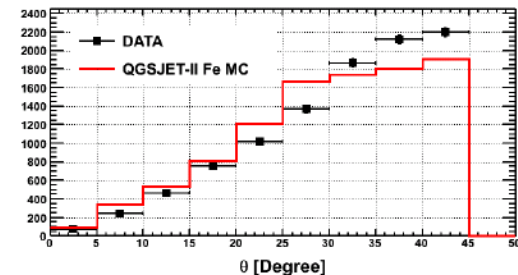


- ▶ First mentioned by Auger in context of neutrino search (very inclined events) *Phys.Rev.Lett. 100 (2008) 211101*

protons



iron



TA surface detector

TA SDの波形の情報、天頂角などの情報を使って、陽子・鉄の識別の試み
→将来の地表検出器による粒子識別の展望

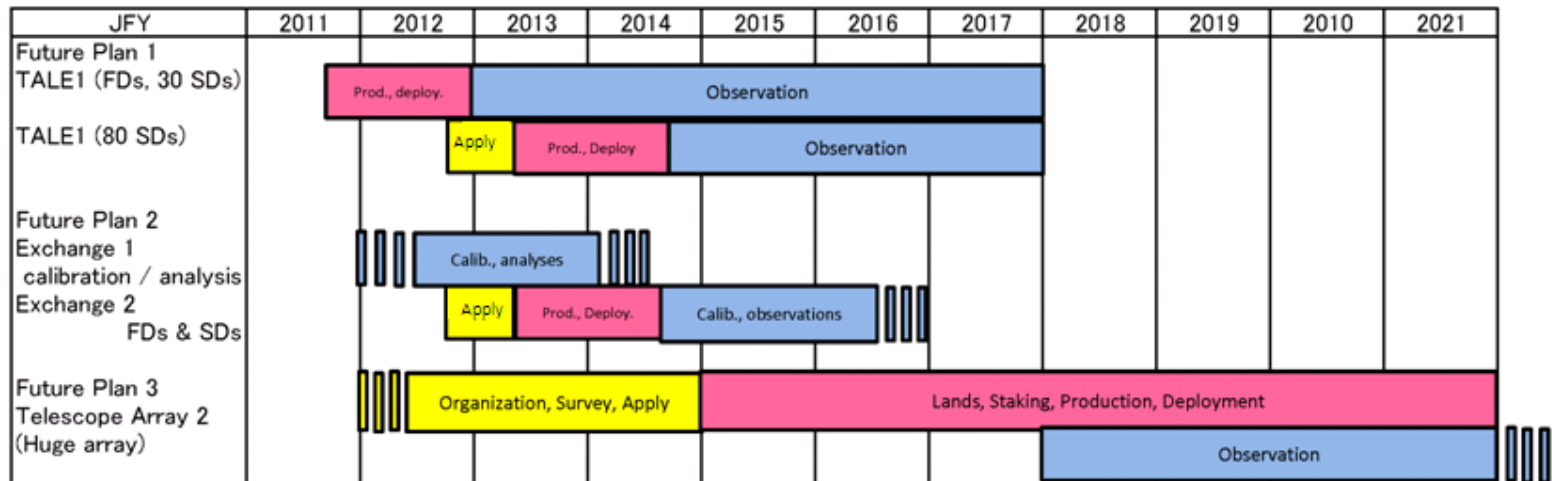
Prospect

	現TA			現TA	Telescope Array 2 (60倍 現TA SD)		
	3 yrs	3.3 yrs	3.7 yrs	11 yrs	1 yr	5 yrs	10 yrs
スペクトル							
GZK suppression	3.9 σ			$\sim 8\sigma$			
加速限界がない場合							$10^{20.5}$ eVの加速限界を $\sim 6\sigma$ で棄却
組成							
Pure protonの場合にIronを 5σ で棄却できるエネルギー(X_{max})			$10^{19.4}$ eV	$10^{19.6}$ eV	10^{20} eV (break pointの上)		
異方性							
ソース密度: Isoからのずれ					2×10^{-4} $\text{Mpc}^{-3} > 5\sigma$	2×10^{-3} $\text{Mpc}^{-3} > 5\sigma$	
Isotropy modelからの分離		$\sim 1\sigma$			6.5σ		
UHE γ					GZK γ に制限		

TA2の費用とスケジュール

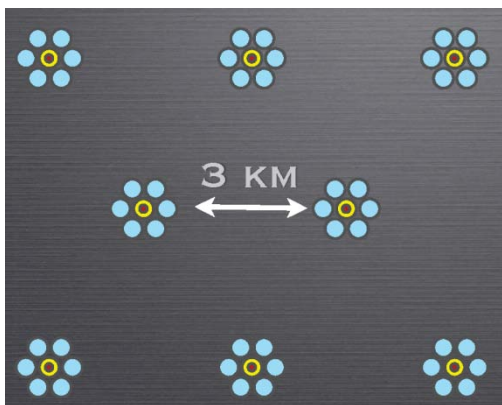
- 10,000 SD, spacing = 2.0 km
- 39,200 km² (TA x 57.8, Auger x 13.1)
- 費用 : ($\$10,000/\text{SD}$) \times 10,000 SDs = \$100M
 - 輸送・設置込

シンチレータベースのR&Dを日本側で始めている

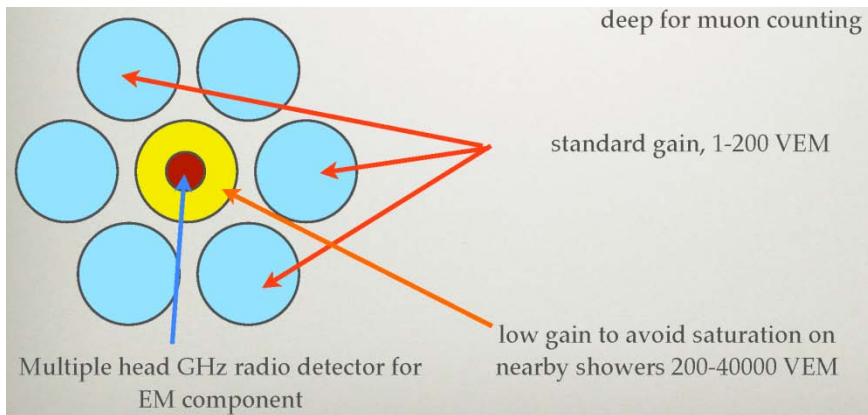


UHECR2012でのその他の大規模地上検出器の提案

多構成装置

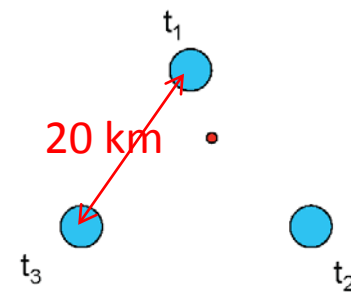


Radio
+
Water tank

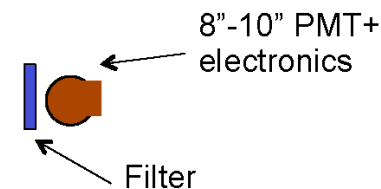


Low cost FD array

$>10^{19.5}$ eV with X_{max}
 >40000 km²
 20 km spacing
 One PMT at a station
 Low cost O(10M\$)



Fresnel lens
 30° x 30° fov
 1 m²



次世代実験に関して

- UHECR2012で話した何人かがやりとりをしてグループを立ち上げつつある
- TAとAugerのspokespersonの間の話し合い: 「次世代実験(*)」を新たなWorking Group(**)として強く推したい
 - *: 含JEM-EUSO
 - **: UHECR2012では以下の5 WGがあり
 - Spectrum/composition/anisotropy/model/multi-messenger

まとめ

- **TA実験**が順調に稼働
- TA実験を継続しつつ、**TALE実験**をスタートさせる
 - 銀河宇宙線と系外宇宙線の遷移を理解
 - 10^{17} eV付近のUHECRのデータとLHCfのデータを取り込んだ空気シャワーシミュレーションを比較
- TAとAugerの結果の違い→共同研究で解決を目指す
 - 既にある較正装置でcross calib.
 - 解析プログラム、一部データの交換?
 - **FDとSDの交換**→hybrid観測でcross calib.
- **次世代UHECR実験**計画を世界的な枠組みで進める