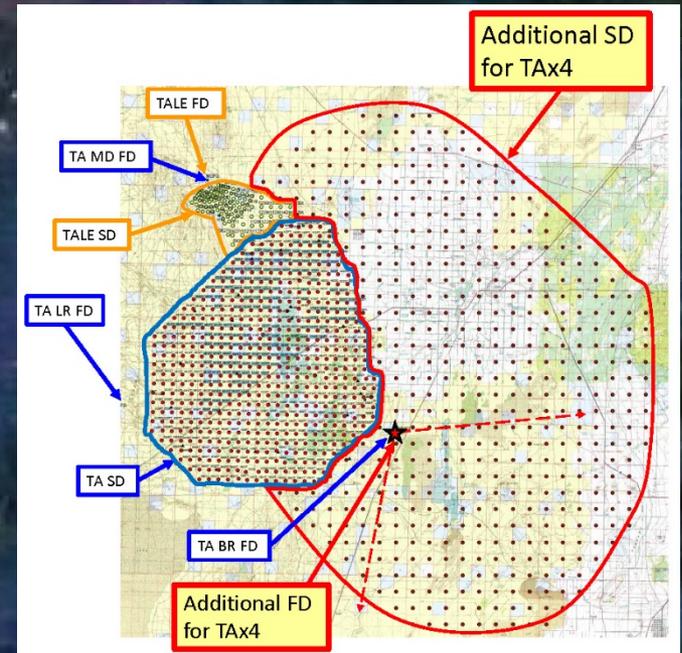


TAの拡張計画

佐川 宏行(宇宙線研)
日本物理学会



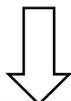
概要

Telescope Array (TA) 超高エネルギー宇宙線 観測装置



概要

Telescope Array (TA)
超高エネルギー宇宙線
観測装置



TAの最近の物理結果

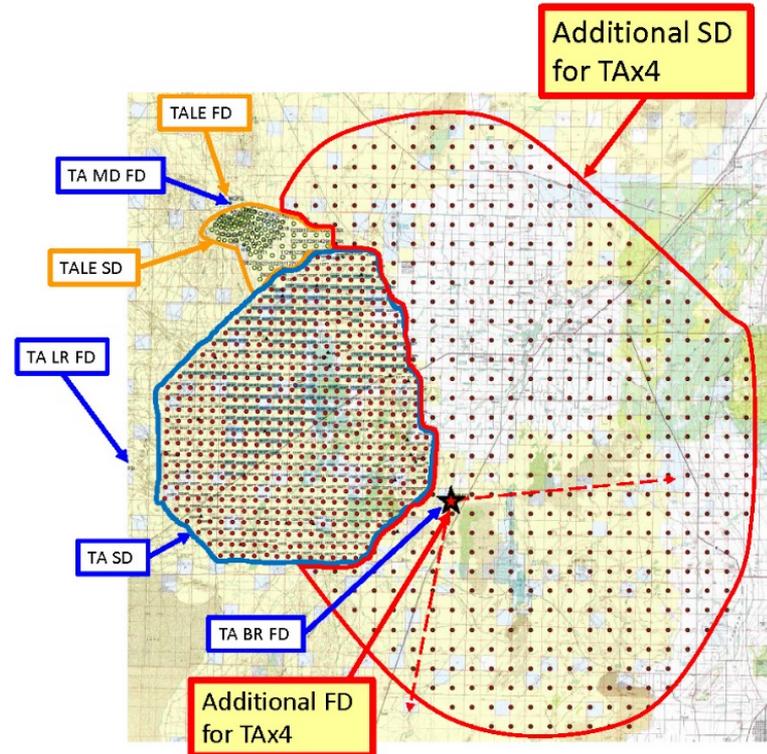
概要

Telescope Array (TA)
超高エネルギー宇宙線
観測装置



TAの最近の物理結果

TAの拡張計画



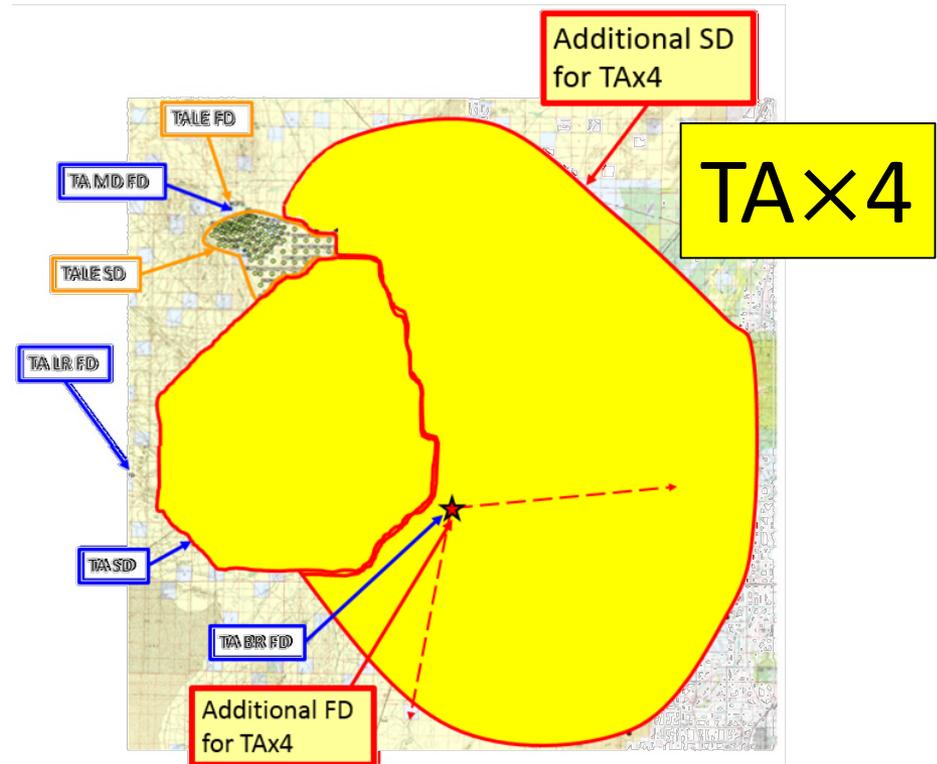
概要

Telescope Array (TA)
超高エネルギー宇宙線
観測装置



TAの最近の物理結果

TAの拡張計画



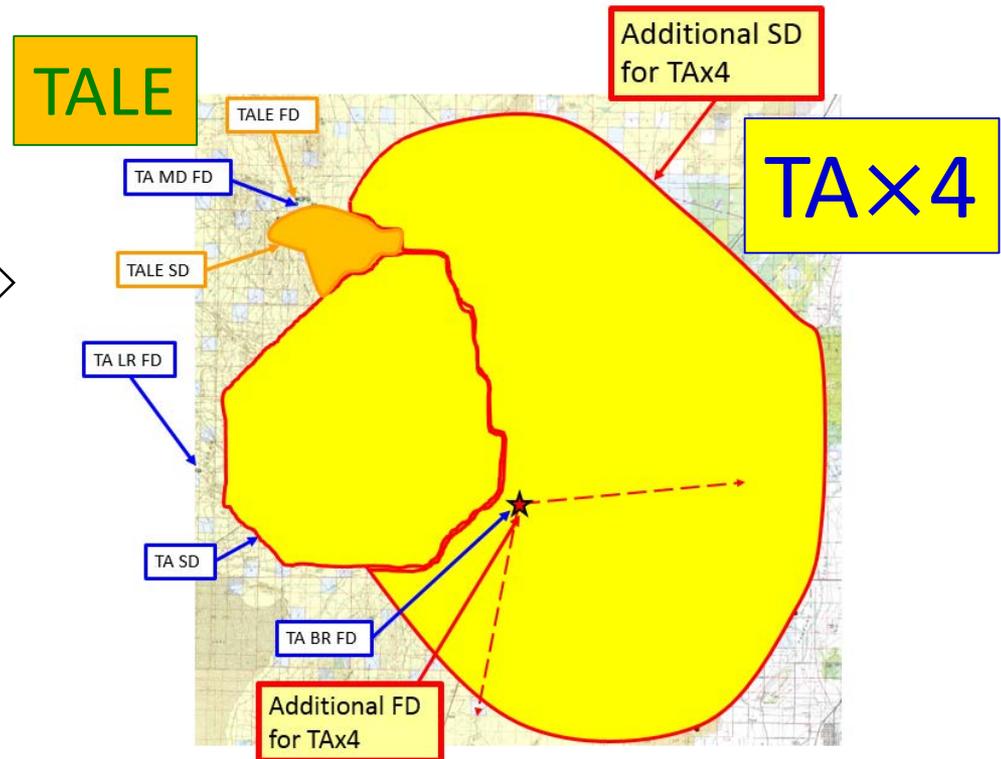
概要

Telescope Array (TA)
超高エネルギー宇宙線
観測装置

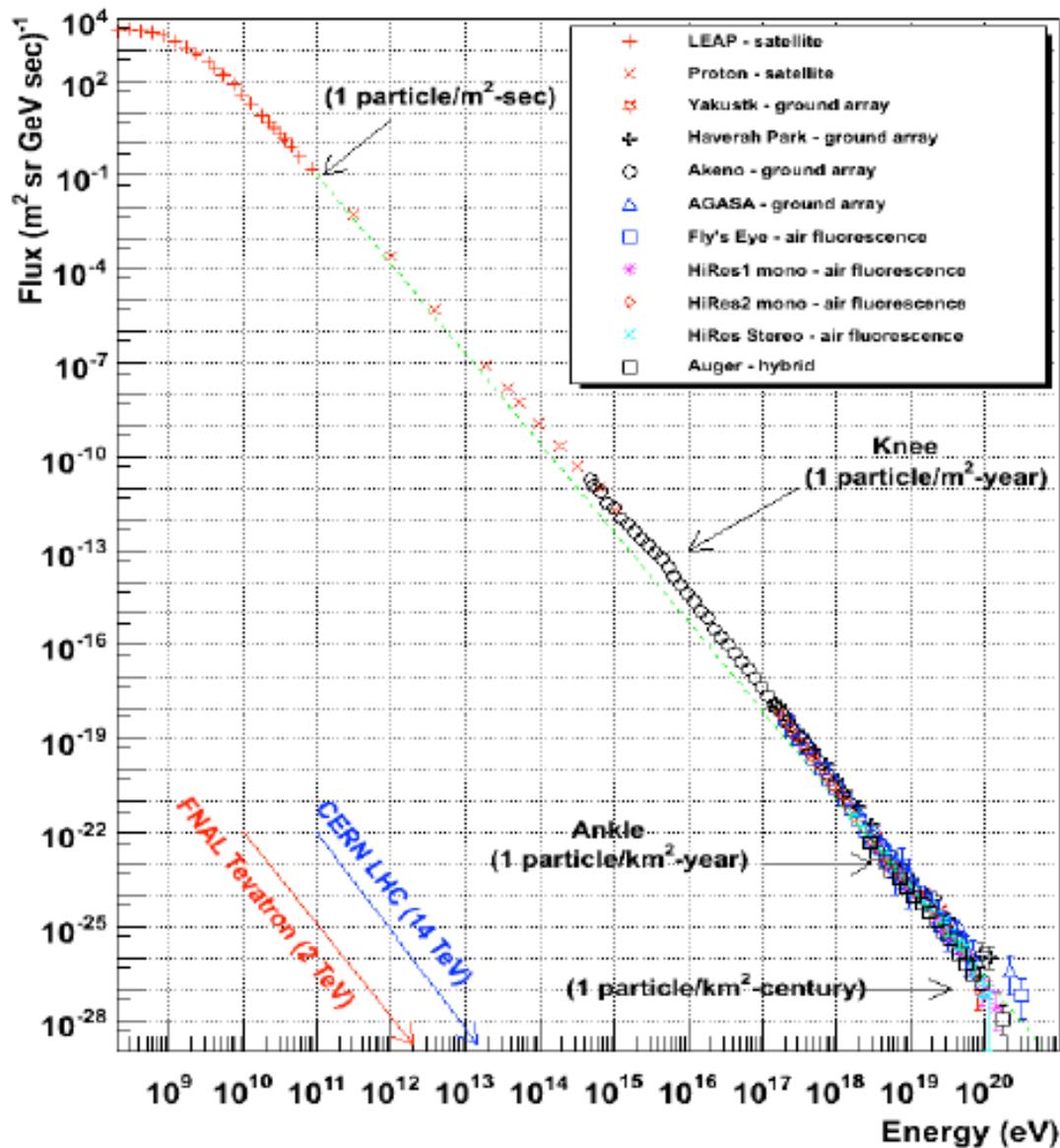


TAの最近の物理結果

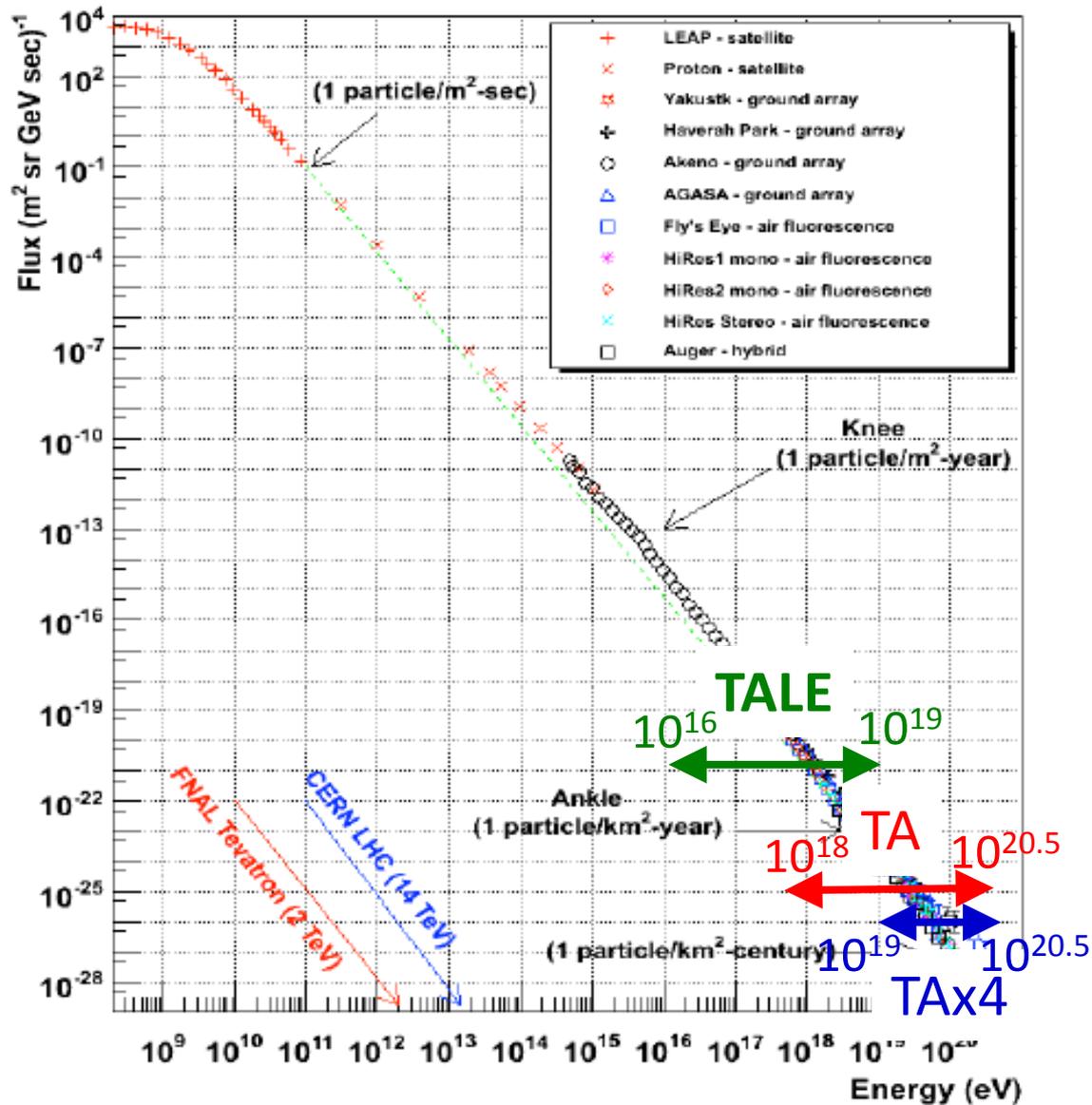
TAの拡張計画



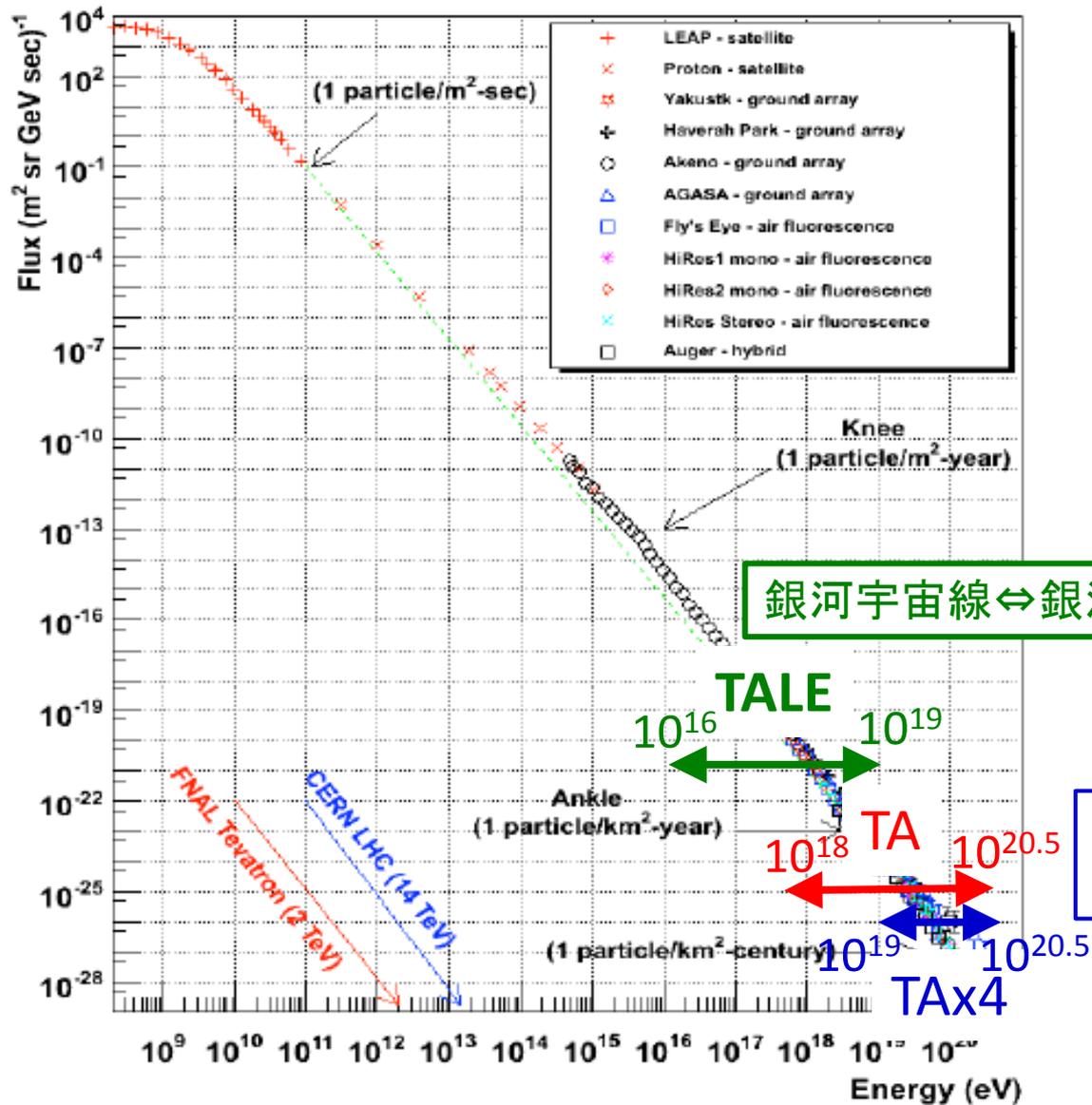
宇宙線のエネルギースペクトル



宇宙線のエネルギースペクトル



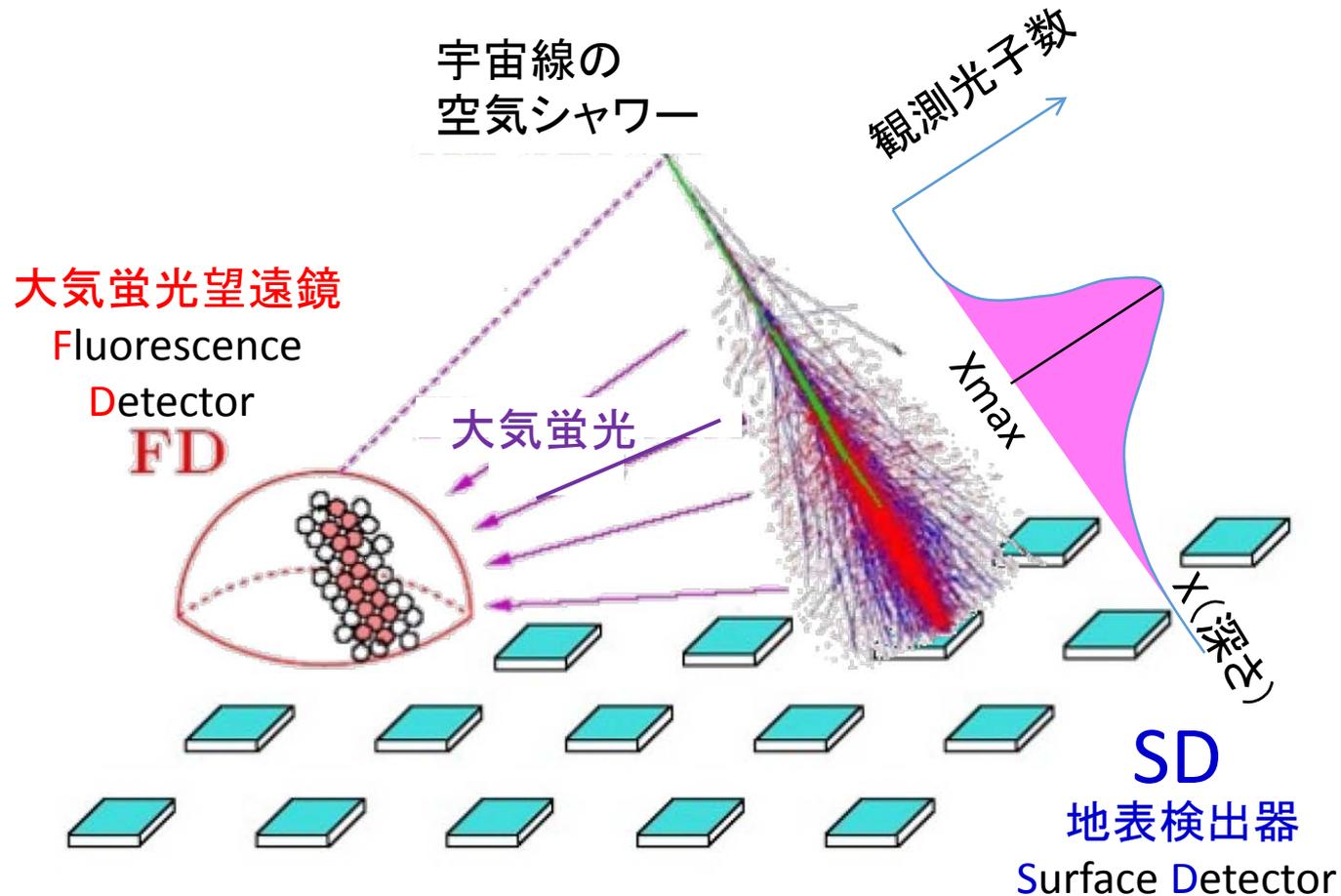
宇宙線のエネルギースペクトル



銀河宇宙線 ↔ 銀河系外宇宙線？

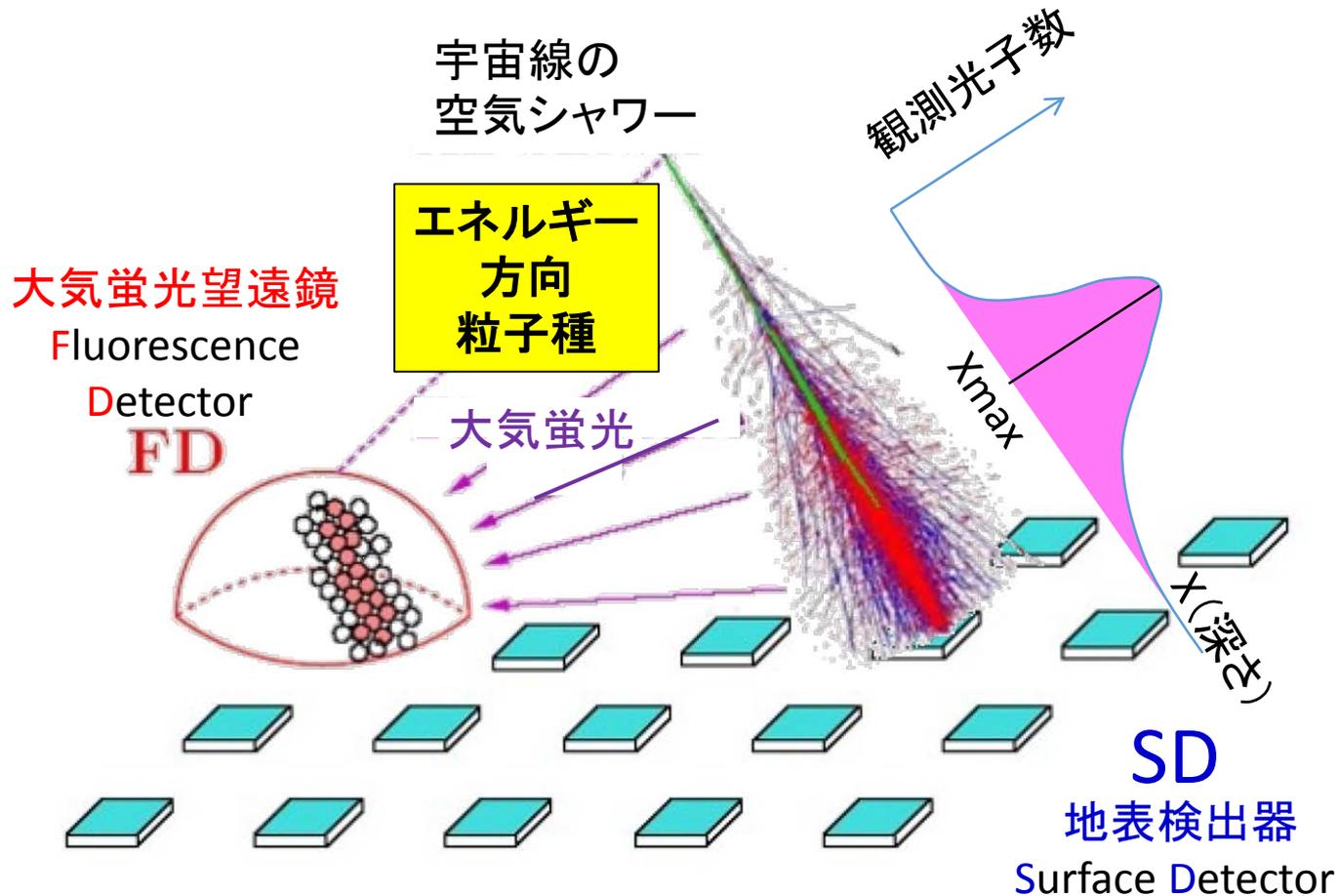
最高エネルギー宇宙線の起源

超高エネルギー宇宙線観測装置



- SD** : 地表に降り注ぐ空気シャワーの荷電二次粒子の通過を観測
→空気シャワーの横広がりを測定
- FD** : 空気シャワーから発生する大気蛍光を観測
→空気シャワー縦方向発達を測定

超高エネルギー宇宙線観測装置



- SD** : 地表に降り注ぐ空気シャワーの荷電二次粒子の通過を観測
→空気シャワーの横広がりを測定
- FD** : 空気シャワーから発生する大気蛍光を観測
→空気シャワー縦方向発達を測定

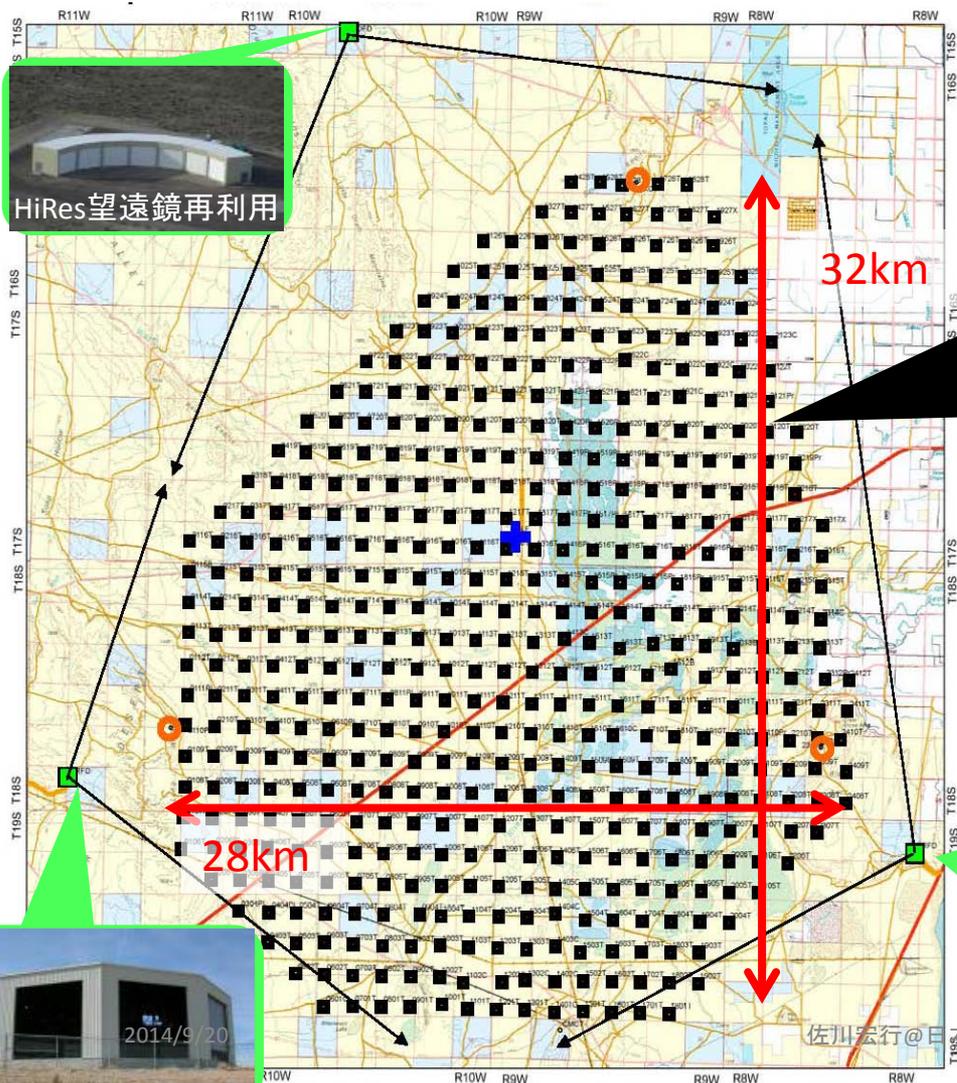


TA実験装置

- ❖ 米国、ユタ州の荒野
- 北緯39.30°、西経112.91°



HiRes望遠鏡再利用



地表検出器 (SD)

3m²のシンチレータ検出器
507台、1.2km間隔
約700km²に展開



大気蛍光望遠鏡 (FD)

仰角方向: 3~33°

2008年3月よりハイブリッド観測

2014/9/20

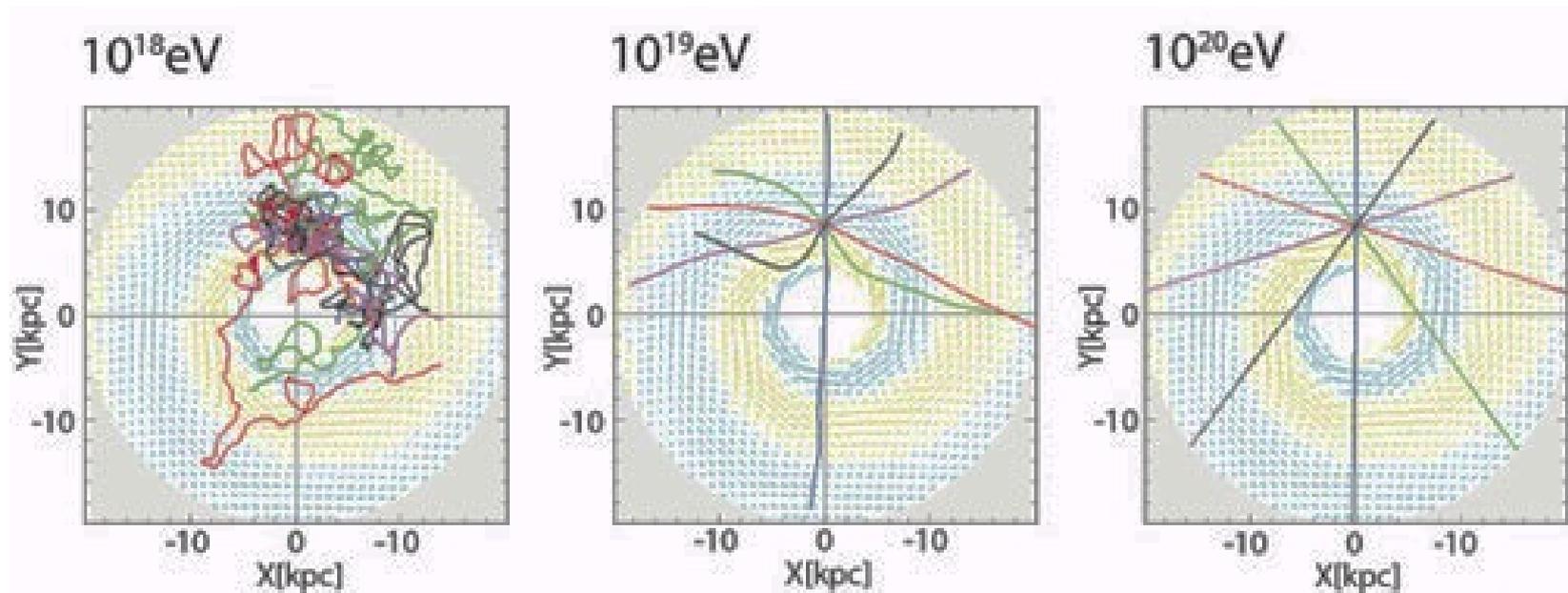
佐川宏行@日本物理学会

TAの最近の結果

異方性 (hot spot)
質量組成 (X_{\max})
エネルギースペクトル

宇宙線の到来方向 (異方性、宇宙線源)

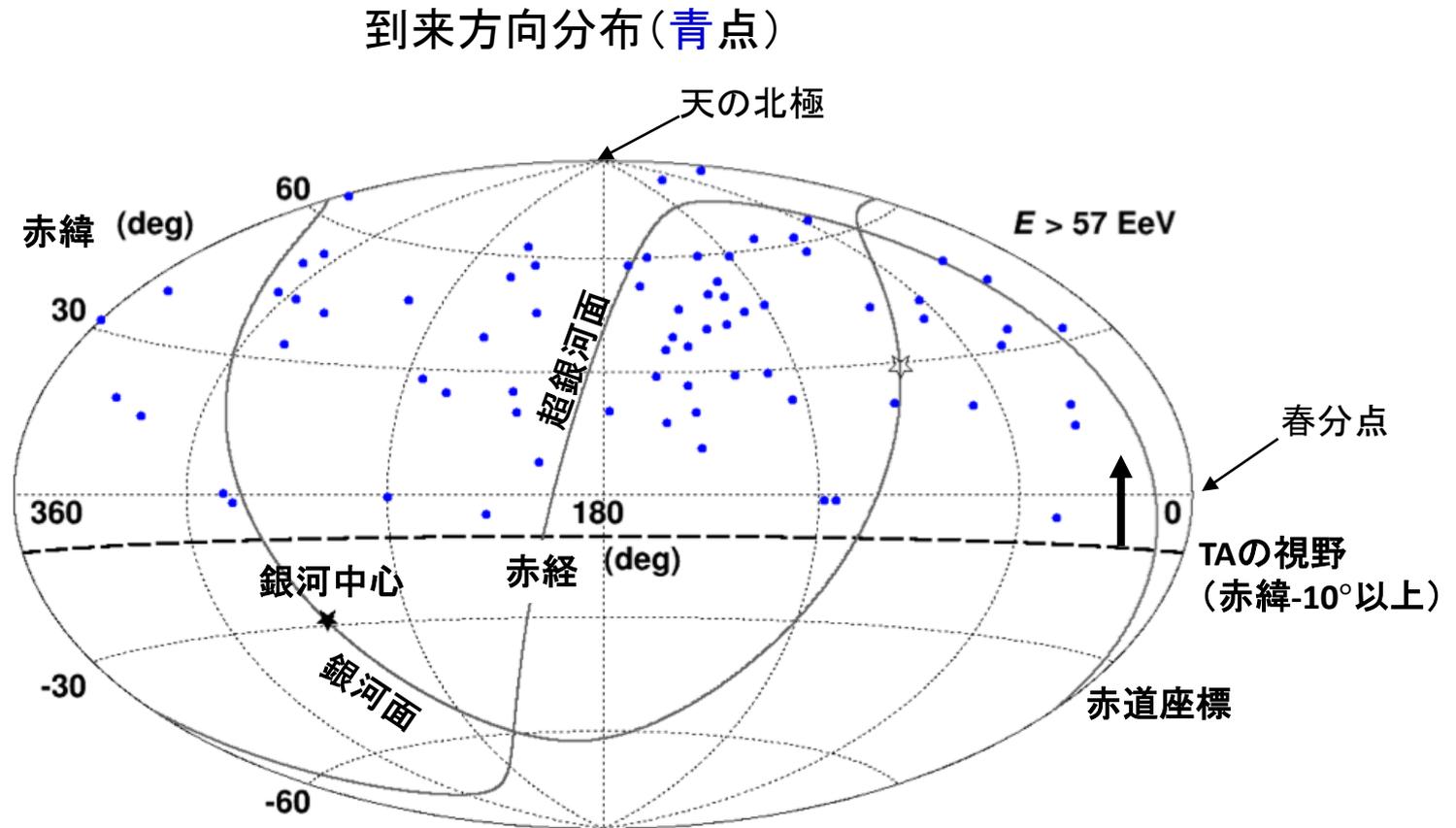
陽子宇宙線の場合



最高エネルギー宇宙線は
銀河磁場でほとんど曲がらない

最高エネルギー宇宙線の異方性 (Hotspot)

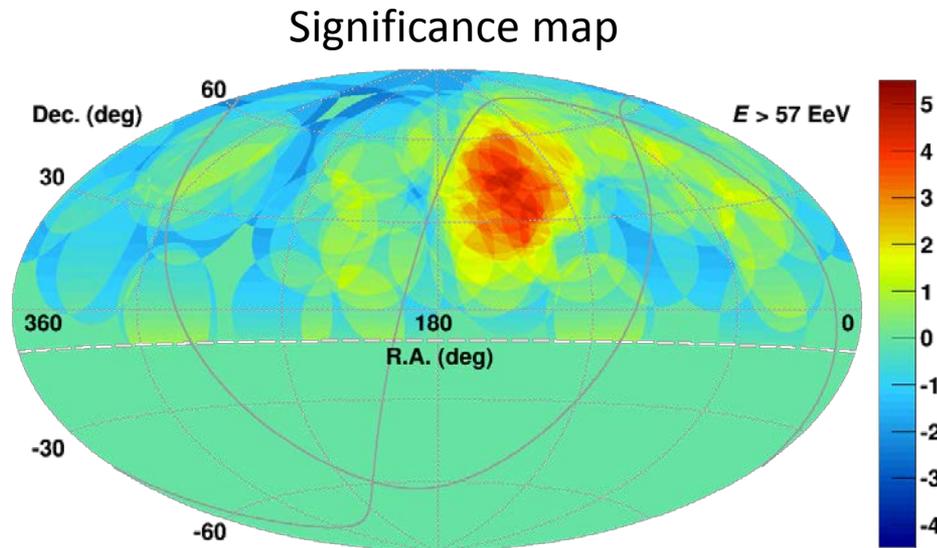
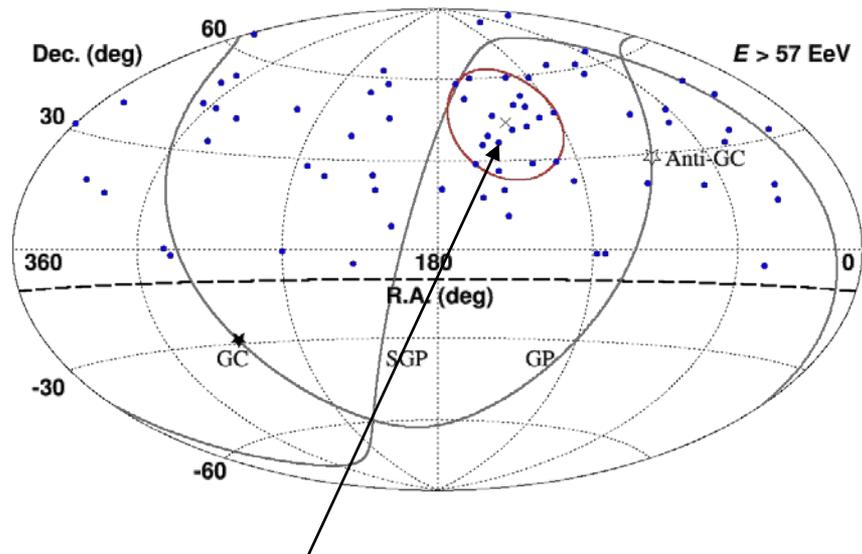
- TA SDデータ5年間 (2008年5月～2013年5月) の結果
- エネルギーE が $5.7 \times 10^{19} \text{eV}$ 以上、天頂角55度未満の事象数: 72





Hotspot 最高エネルギー宇宙線の異方性

データを20度の半径の円でoversampling



- 最大のsignificance

- 方向: R.A. = 146.7°, Dec. = 43.2°
- 観測数: 19 (19/72=26%)
- 等方的分布の期待値: 4.5 (4.5/72=6%)
- Li-Ma significance: 5.1 σ

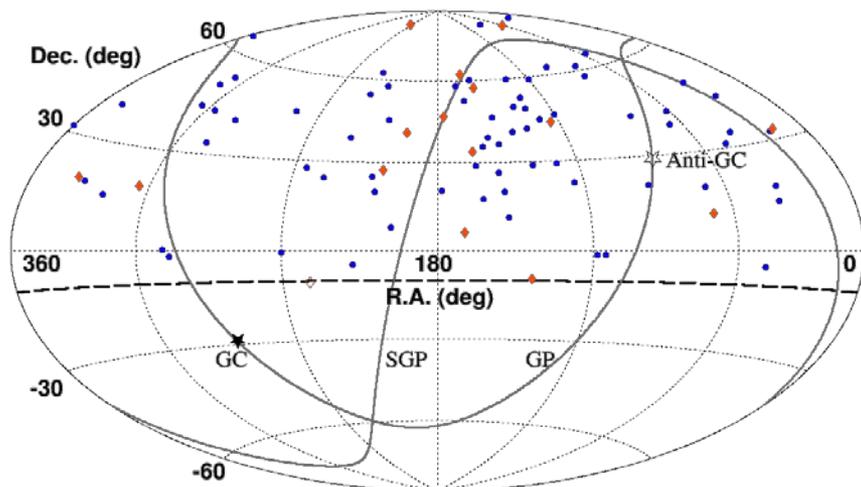
- 等方的な分布の場合に5.1 σ 以上の有意度を得る偶然の確率: 3.7×10^{-4} (3.4 σ)
 - MC: 15, 20, 25, 30, 35度の半径の円

ApJ 790, L21 (2014)

Hotspot +1年間

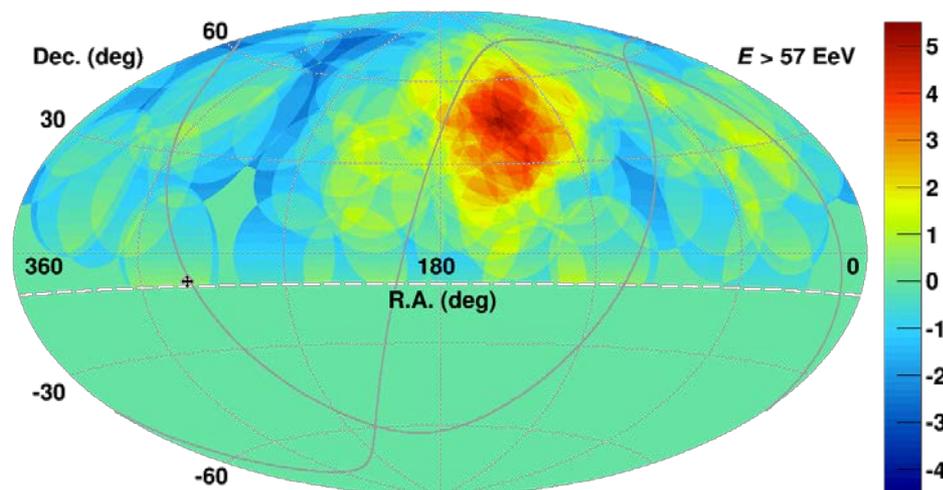
- 2008年5月—2014年5月 (6年間)

到来方向分布



青: 5年間のデータ
赤: 最近の1年間のデータ

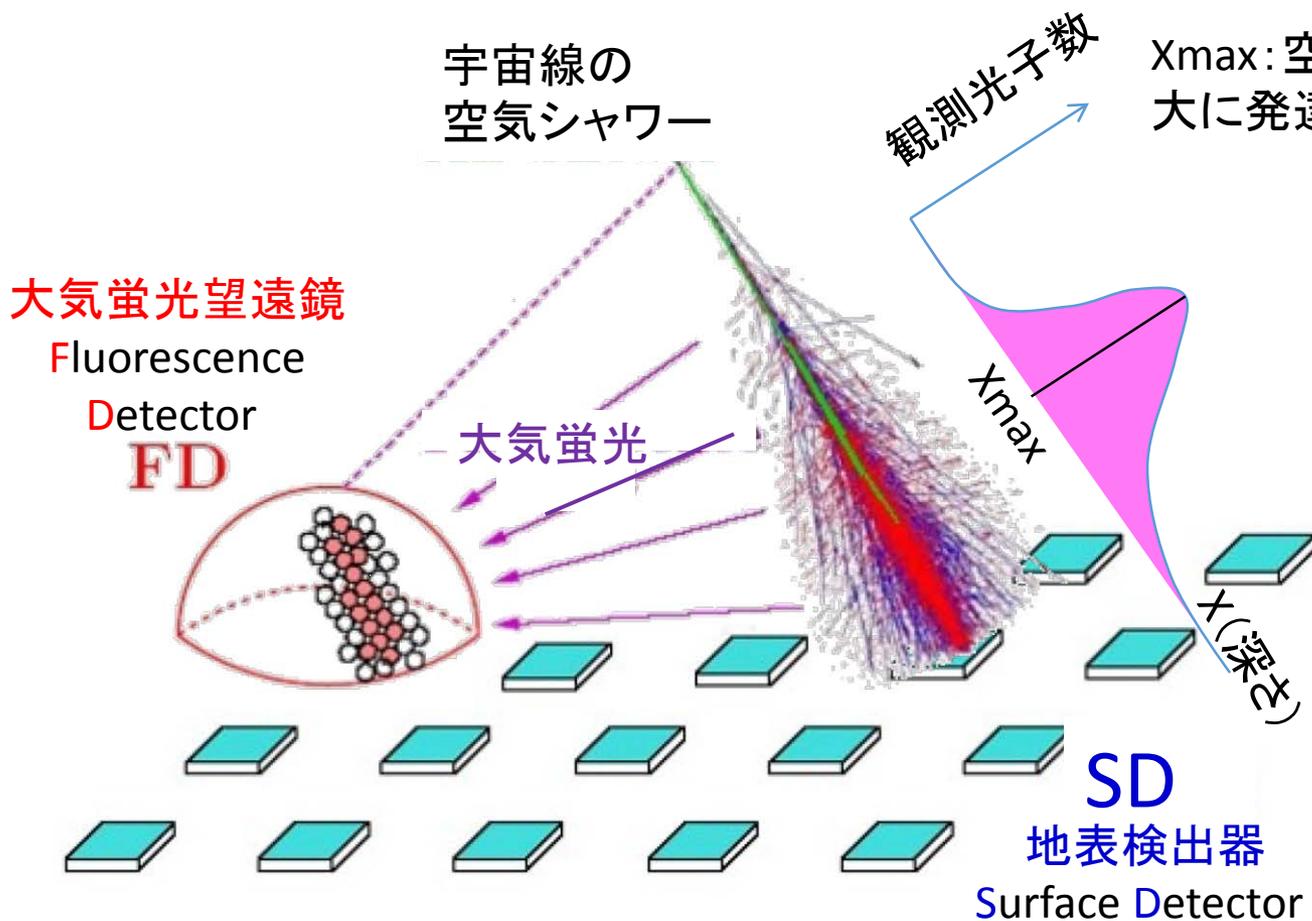
Significance map



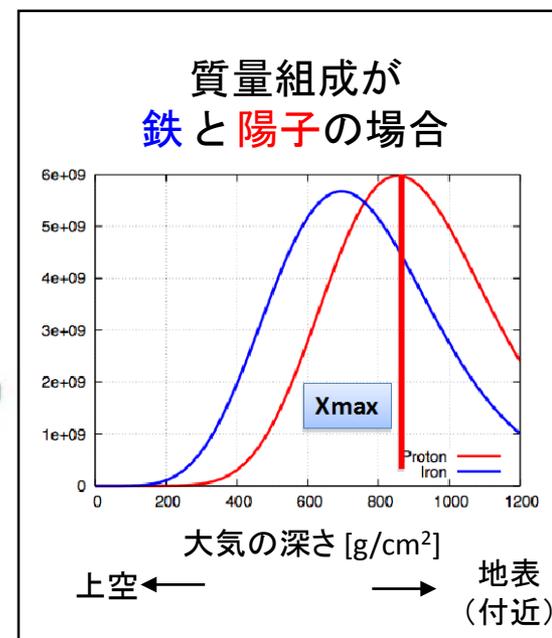
- $E > 5.7 \times 10^{19} \text{ eV}$: 72事象 \rightarrow 87事象 (+15)
- Hotspot内: 19事象 \rightarrow 23事象 (+4)
- 最大のLi-Ma significance: $5.1\sigma \rightarrow 5.5\sigma \implies$ 偶然の確率 = $3.4\sigma \rightarrow 4.0\sigma$

5年 +1年
(19/72 \sim 26%, 4/15 \sim 26%)

Xmaxによる質量組成の同定

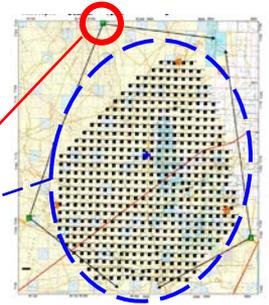


Xmax: 空気シャワーが最大に発達した大気の深さ



J.N.Matthews
Qui Nhon 2014
arXiv:1408.1726
Submitted to APP

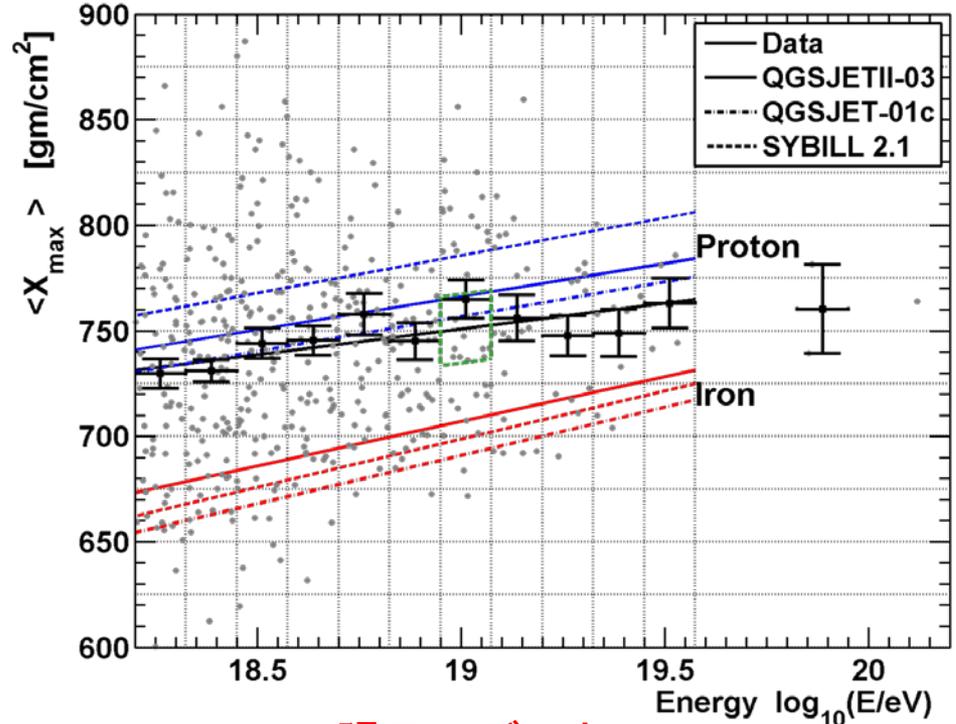
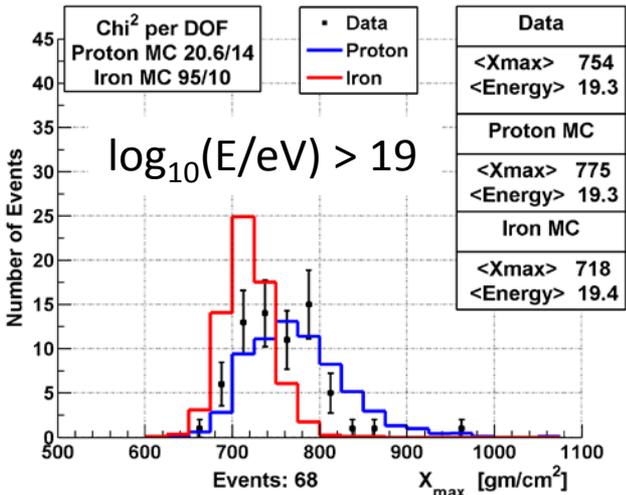
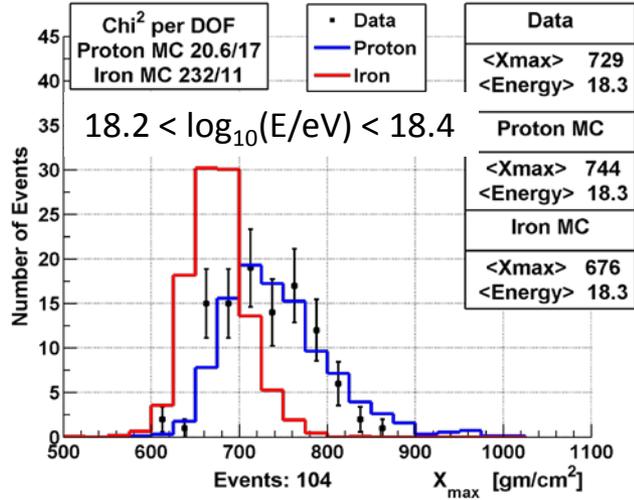
ハイブリッド事象を使ったXmax解析



• MD FD: [HiRes望遠鏡再利用] + SD

ハイブリッド

黒点: TAデータ
MC (QGSJET-II-03)
青: Proton, 赤: Fe

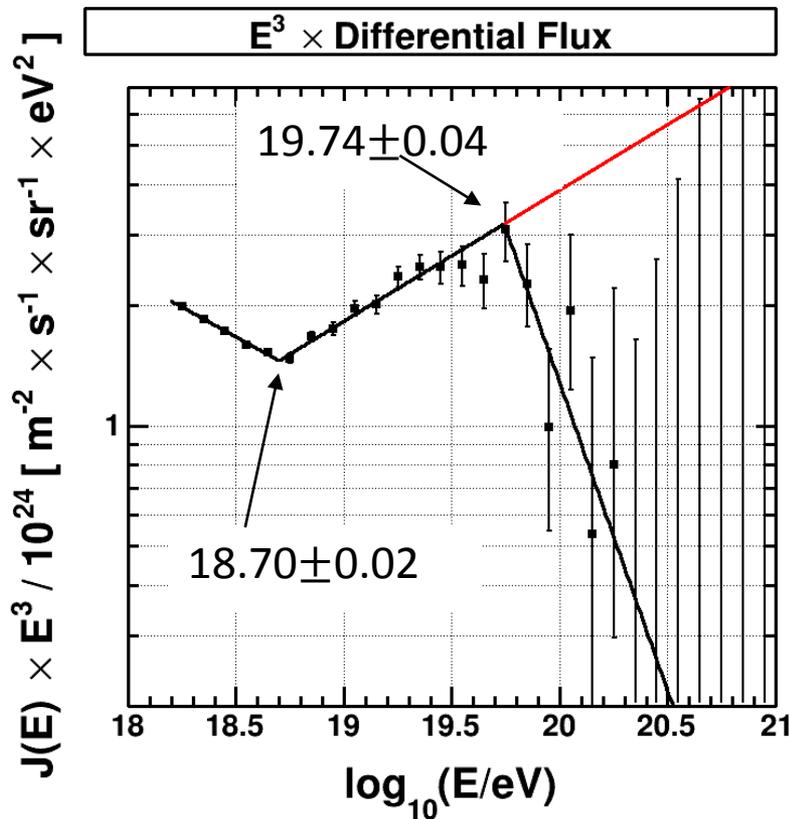


陽子モデルとconsistent
鉄モデルとinconsistent



TA エネルギースペクトル

- SDデータ: 2008年5月～2014年5月 (6年間)



アンクル
GZK cutoffとconsistentなcutoff

$E > 10^{19.8}\text{eV}$ で
期待数(カットオフなし) = 85.93
観測数 = 32
カットオフの偶然確率 = 6.59σ



極高エネルギー宇宙線モデル

発生源

銀河系外陽子宇宙線

分布

- 一様
- LSS (2MASS < 250 Mpc)

➤ Evolution $(1+z)^m$

➤ Injection spectrum E^{-p}

➤ エネルギースケール

➤ フラックス規格因子

4フィットパラメータ

伝播

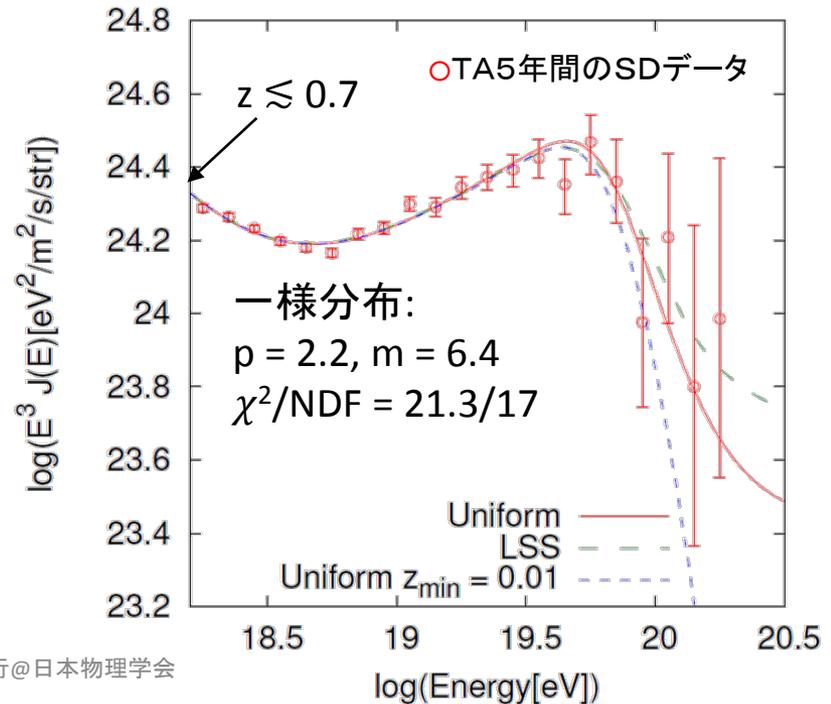
伝播コード

- Kalashev + Kido, arXiv:1406.0735

Photon background

- CMB
- IRB

銀河間磁場、銀河磁場なし





極高エネルギー宇宙線モデル

発生源

銀河系外陽子宇宙線

分布

- 一様
- LSS (2MASS < 250 Mpc)

➤ Evolution $(1+z)^m$

➤ Injection spectrum E^{-p}

➤ エネルギースケール

➤ フラックス規格因子

4フィットパラメータ

GZK効果が成り立っているとすると
最高エネルギー宇宙線の発生源
は近傍天体に限られる可能性

伝播

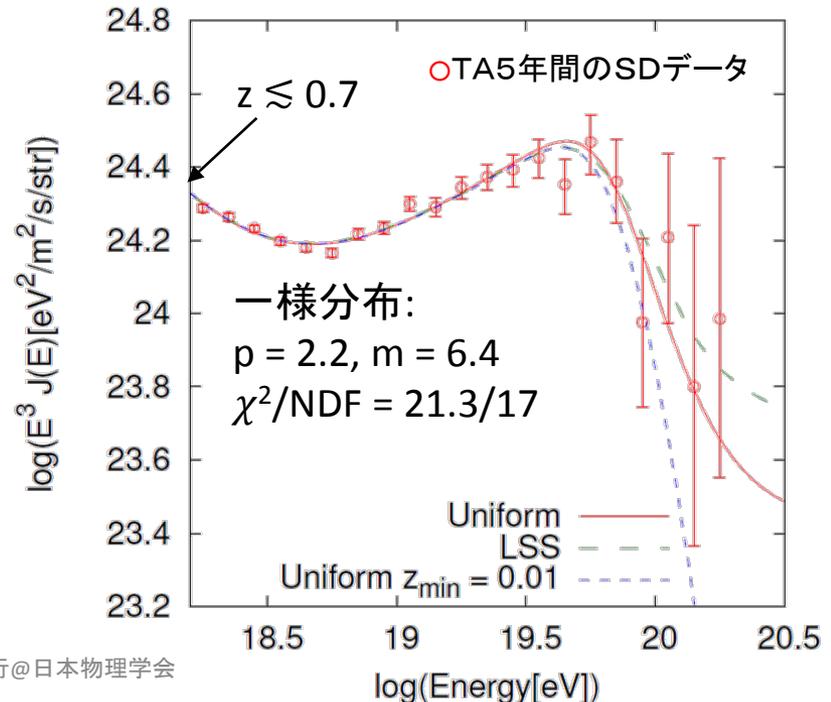
伝播コード

- Kalashev + Kido, arXiv:1406.0735

Photon background

- CMB
- IRB

銀河間磁場、銀河磁場なし



近傍の銀河団

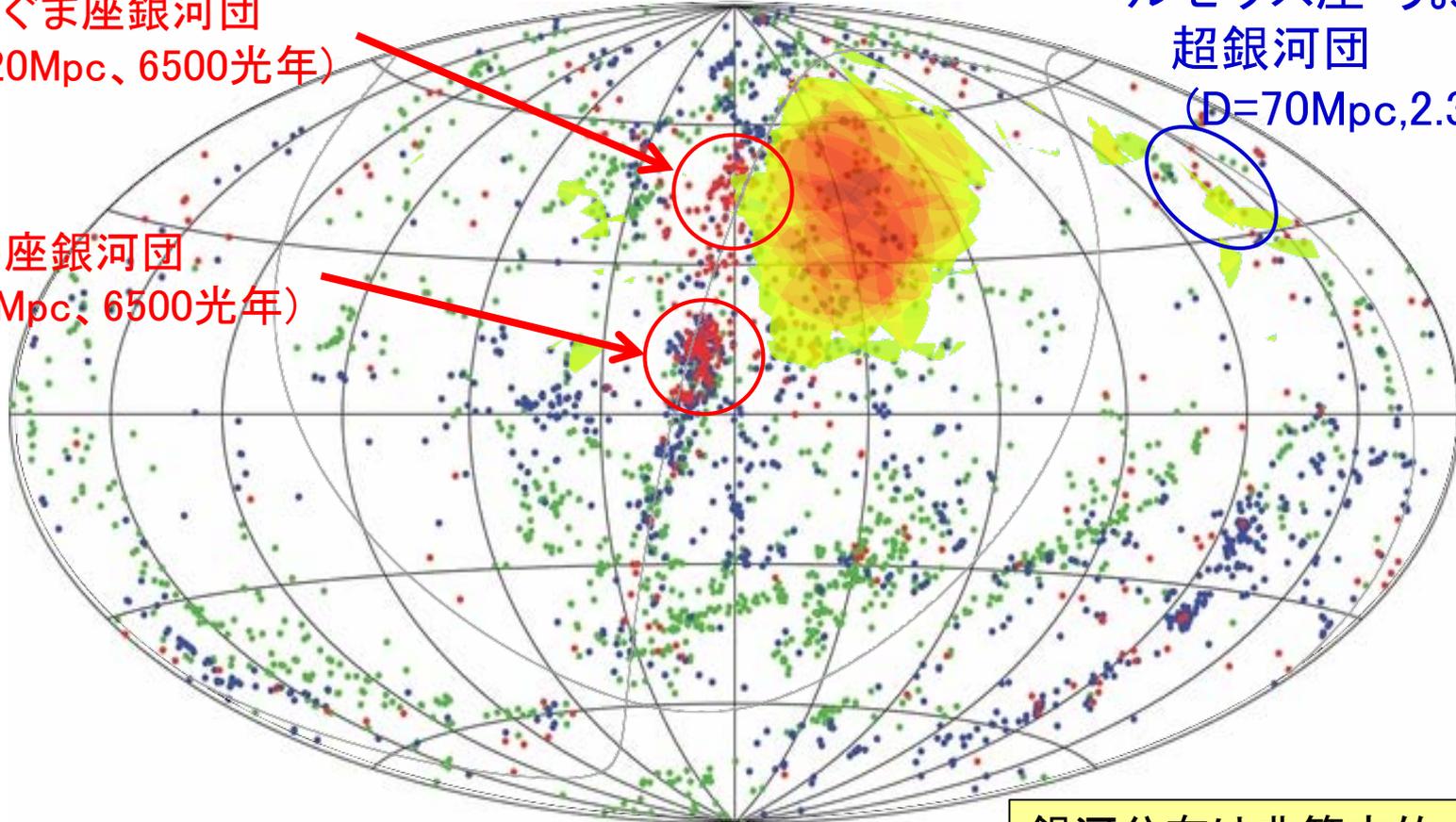
(1.5億光年以内) ペルセウス座・うお座

おおぐま座銀河団
($D=20\text{Mpc}$ 、6500光年)

超銀河団

($D=70\text{Mpc}$ 、2.3億光年)

おとめ座銀河団
($D=20\text{Mpc}$ 、6500光年)



銀河分布は非等方的



最高エネルギー宇宙線の到来方向
の異方性が期待される

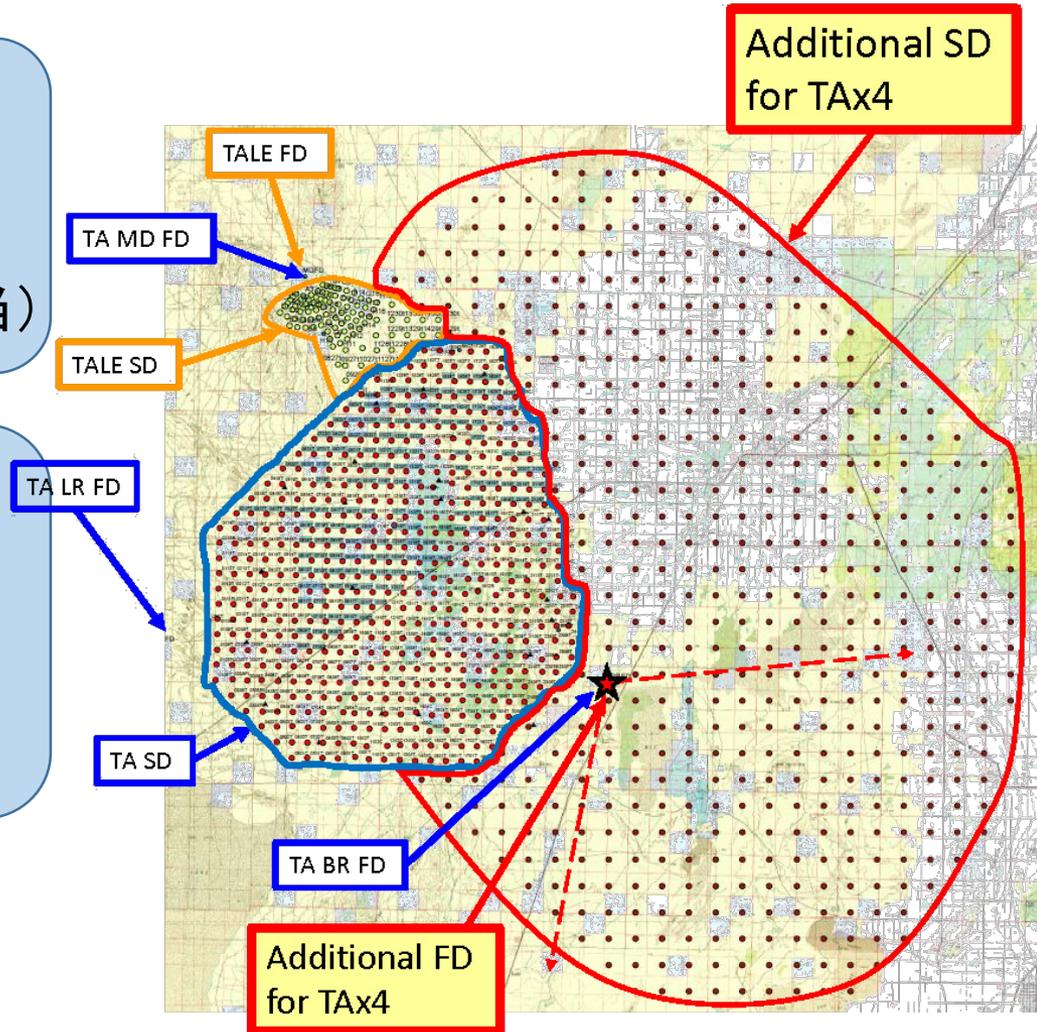
2MASS カタログ (1.5億光年程度以内)
John P. Huchra, et al 2012, ApJ, 199, 26
+ TA 5年の有意度 (カラーマップ)



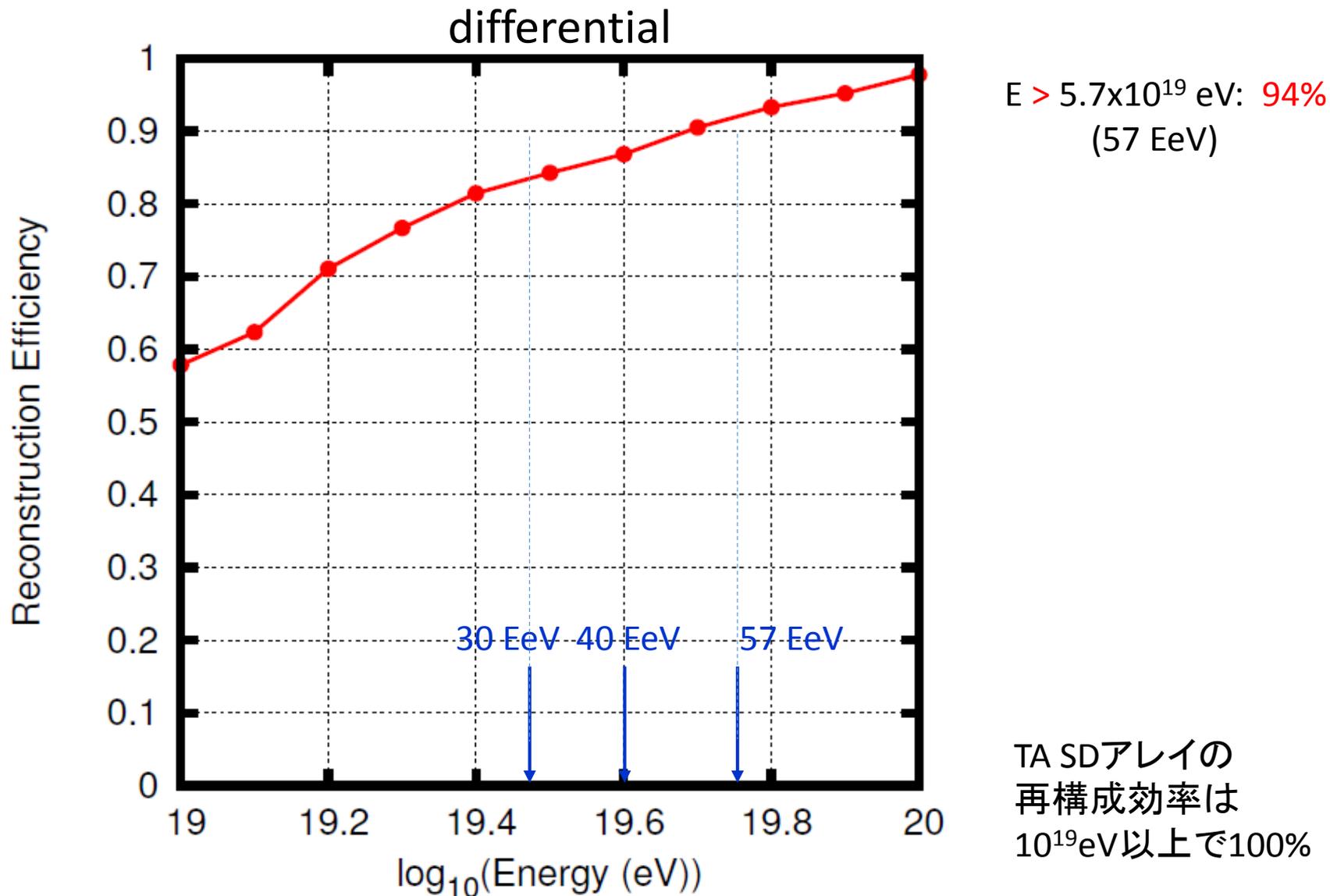
TA×4計画

- TA SDを**4倍**(~3000 km²)に拡張
 - **500台**のシンチレータ検出器を**2.1 km** 間隔で設置(**日本担当**)
 - **HiRes FD** (10台)再利用(**米国担当**)

- この秋に科研費申請
- 2年間建設
- 3年間観測すると
 - **21年 TA SD** データ
 - 15年 TA hybrid データ



TA × 4 追加SDアレイで再構成できる効率

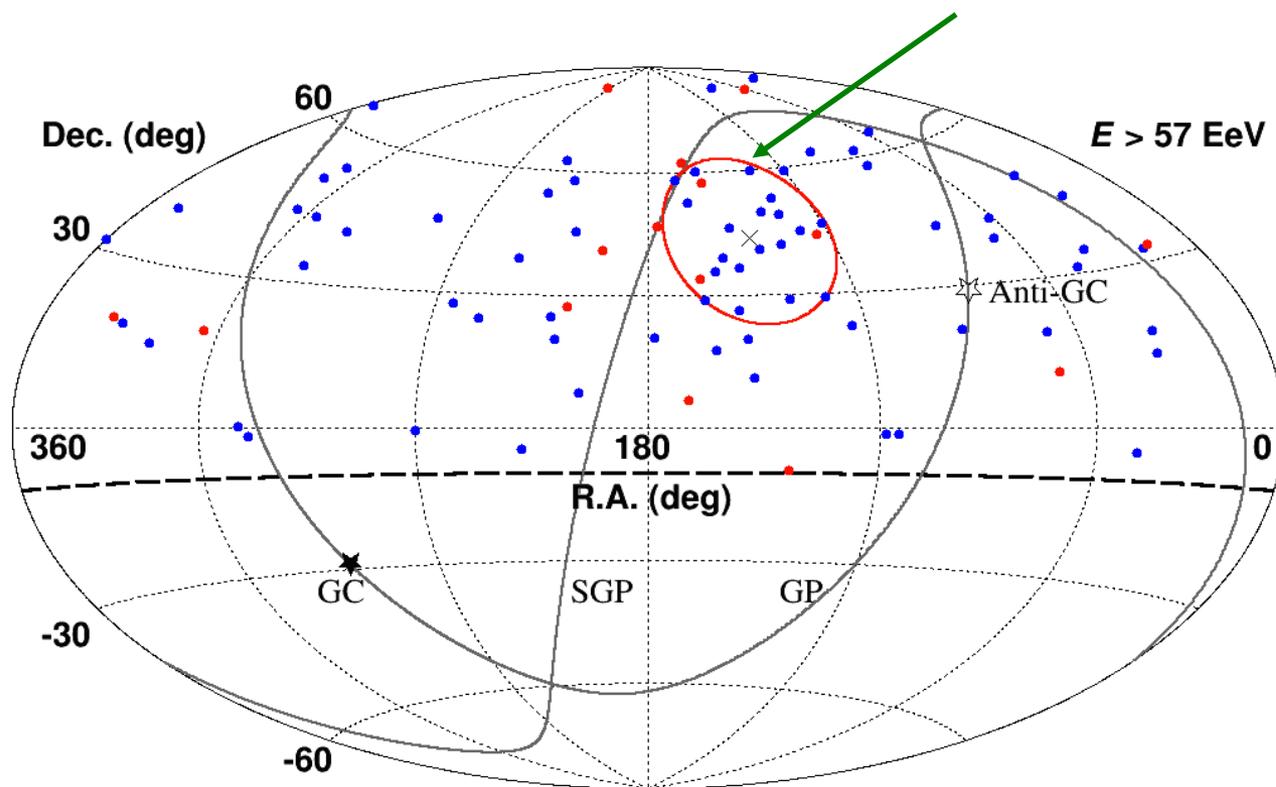




TA×4の展望

- 到来方向
 - Hotspot
 - 5σ 以上で確認
 - さらに構造があるか?
 - その他の過剰到来spotが見えてくるか?
 - 銀河磁場と銀河系の外の磁場の影響の研究
 - 点源探索
 - 他の実験結果との相関の研究
 - TA/Auger全天解析
 - HotspotでのMAGIC実験等でのガンマ線源の探索
 - IceCube実験で観測されたニュートリノとの相関
- 高統計で、最高エネルギー付近以上でのエネルギースペクトルと X_{max} の測定
- 超高エネルギー ガンマ線とニュートリノ探索

TAの6年のデータ

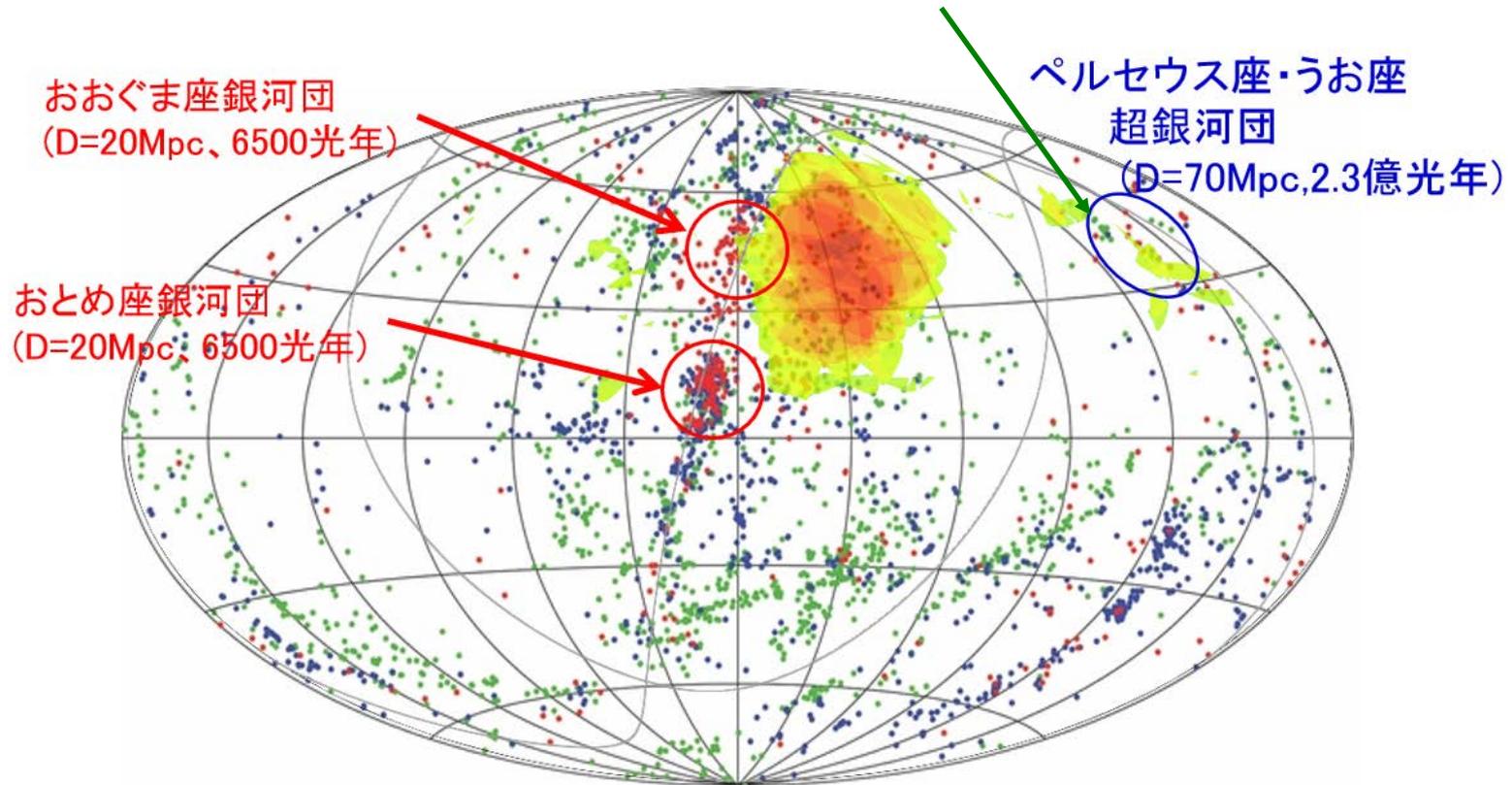




TA×4の展望

- 到来方向
 - **Hotspot**
 - 5σ 以上で確認
 - さらに構造があるか?
 - **その他の過剰到来spotが見えてくるか?**
 - 銀河磁場と銀河系の外の磁場の影響の研究
 - **点源探索**
 - **他の実験結果との相関の研究**
 - TA/Auger全天解析
 - HotspotでのMAGIC実験等でのガンマ線源の探索
 - IceCube実験で観測されたニュートリノとの相関
- 高統計で、**最高エネルギー付近以上でのエネルギースペクトルと X_{max} の測定**
- 超高エネルギー **ガンマ線とニュートリノ探索**

近傍の銀河団とhotspot





TA×4の展望

- 到来方向
 - **Hotspot**
 - 5σ 以上で確認
 - さらに構造があるか?
 - その他の過剰到来spotが見えてくるか?
 - **銀河磁場と銀河系の外の磁場の影響の研究** 銀河フィラメント?
 - **点源探索**
 - **他の実験結果との相関の研究**
 - TA/Auger全天解析
 - IceCube実験で観測されたニュートリノとの相関
 - HotspotでのMAGIC実験等でのガンマ線源の探索
- 高統計で、最高エネルギー付近以上でのエネルギー**スペクトル**と **X_{max}** の測定
- 超高エネルギー **ガンマ線**と**ニュートリノ**探索

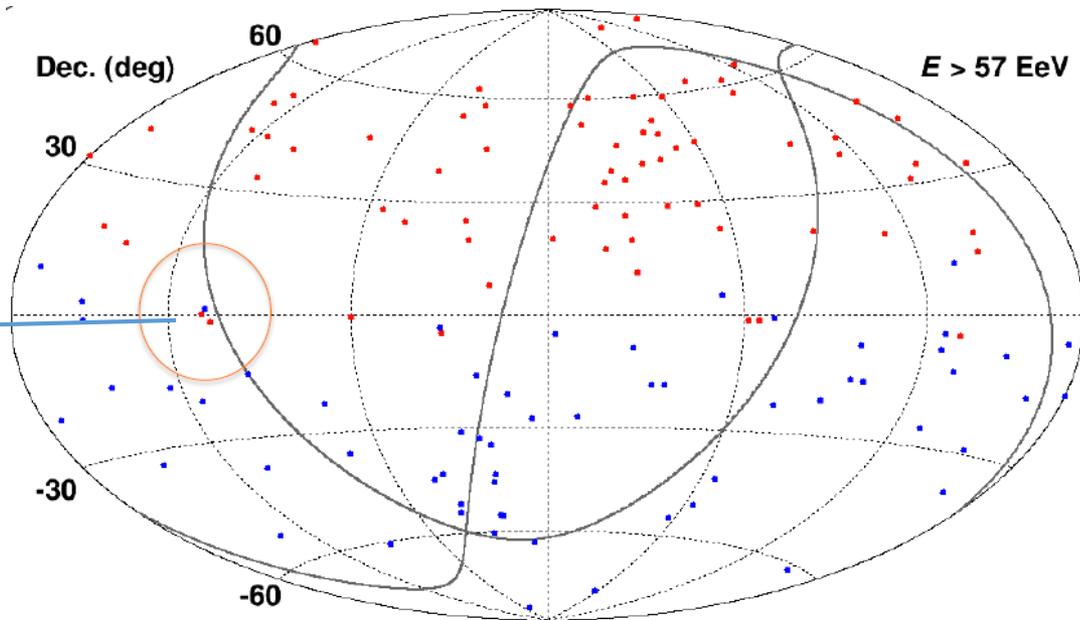
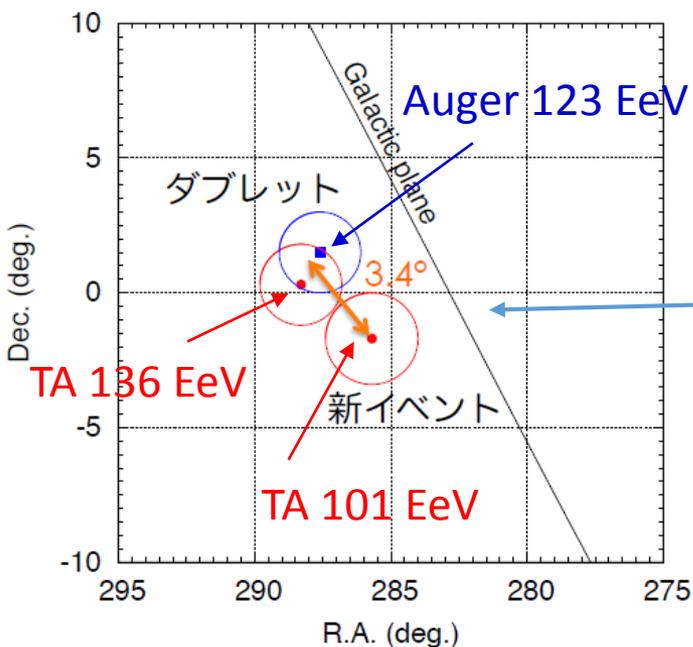


TA×4の展望

- 到来方向
 - **Hotspot**
 - 5σ 以上で確認
 - さらに構造があるか?
 - その他の過剰到来spotが見えてくるか?
 - 銀河磁場と銀河系の外の磁場の影響の研究
 - **点源探索**
 - **他の実験結果との相関の研究**
 - TA/Auger全天解析
 - HotspotでのMAGIC実験等でのガンマ線源の探索
 - IceCube実験で観測されたニュートリノとの相関
- 高統計で、最高エネルギー付近以上でのエネルギー**スペクトル**と**Xmax**の測定
- 超高エネルギー **ガンマ線**と**ニュートリノ**探索

極高エネルギー宇宙線のクラスター探索

$E > 5.7 \times 10^{19} \text{eV}$



TA: 2008/5月 - 2013/5月 (5年) 72事象 [ApJ 790 (2014) L21]
Auger: 2004 1月 - 2009 12月 (5.5年) 62事象 [APP 34 (2010) 314]

点源のヒント?



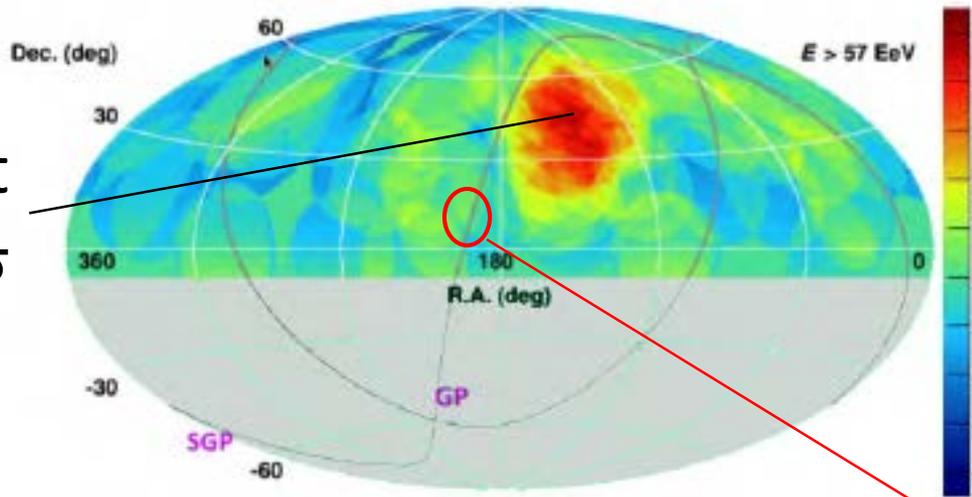
TA×4の展望

- 到来方向
 - **Hotspot**
 - 5σ 以上で確認
 - さらに構造があるか?
 - その他の過剰到来spotが見えてくるか?
 - 銀河磁場と銀河系の外の磁場の影響の研究
 - 点源探索
 - **他の実験結果との相関の研究**
 - **TA/Auger全天解析**
 - HotspotでのMAGIC実験等でのガンマ線源の探索
 - IceCube実験で観測されたニュートリノとの相関
 - 高統計で、最高エネルギー付近以上でのエネルギー**スペクトル**と**Xmax**の測定
 - 超高エネルギー **ガンマ線**と**ニュートリノ**探索



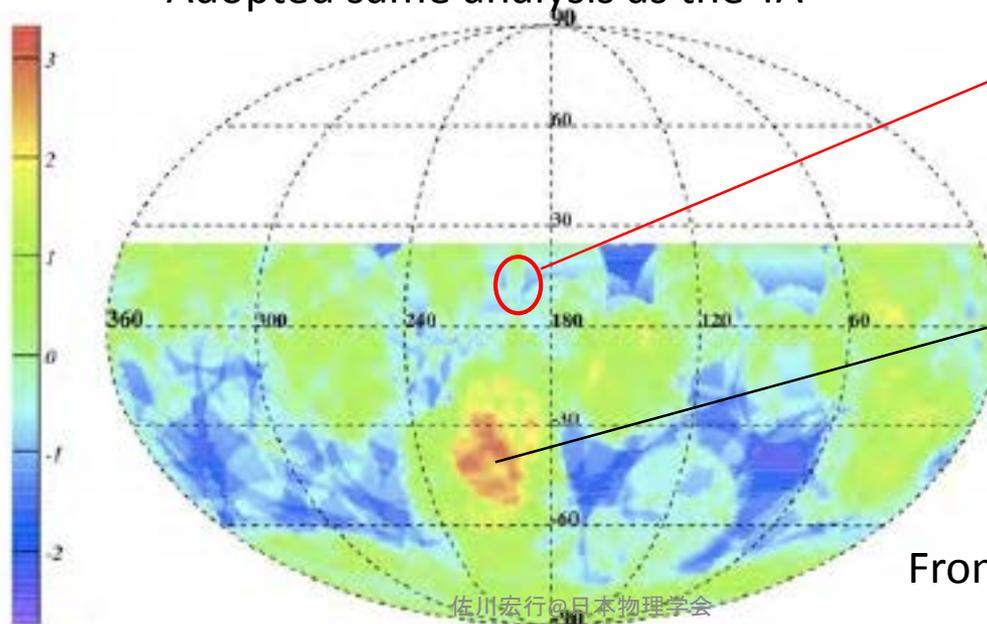
Auger Events Summed Over with 20° -radius Circle

TA Hotspot
 5.1σ



Adopted same analysis as the TA

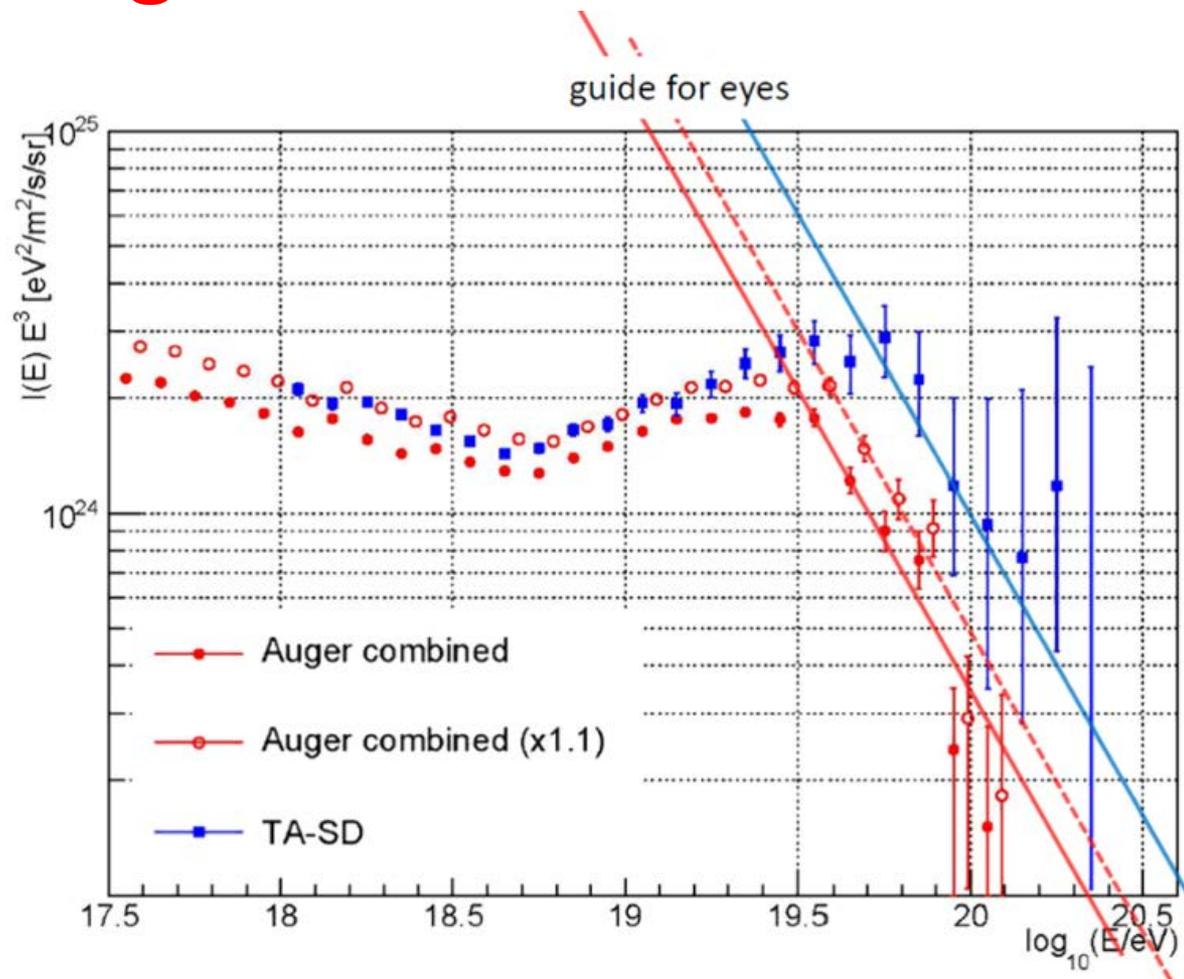
Virgo Cluster
($D=20\text{Mpc}$)



Auger $\sim 3\sigma$
around Cen A

From A. Olinto

TAとAugerのエネルギースペクトル



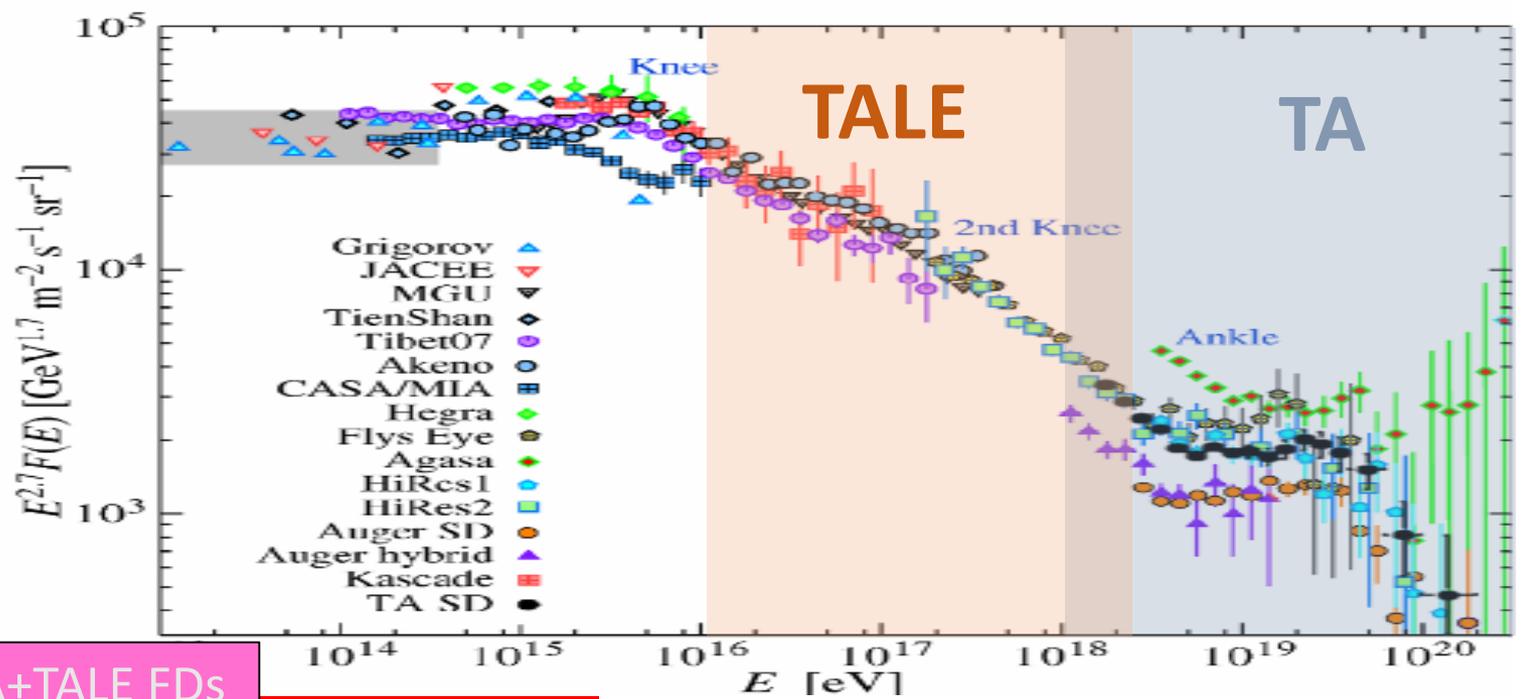


TA×4の展望

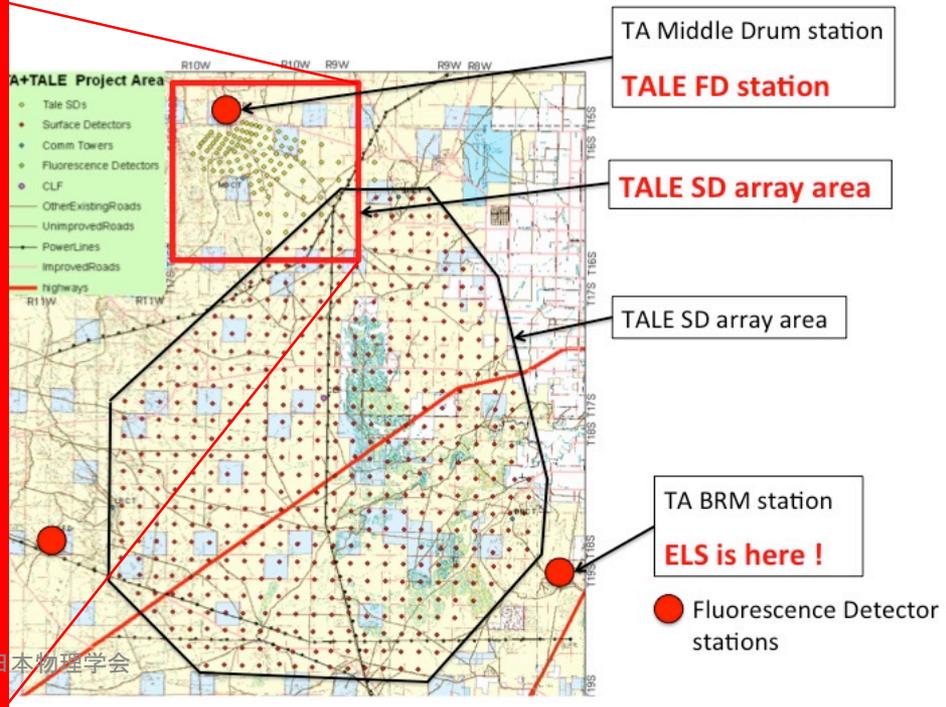
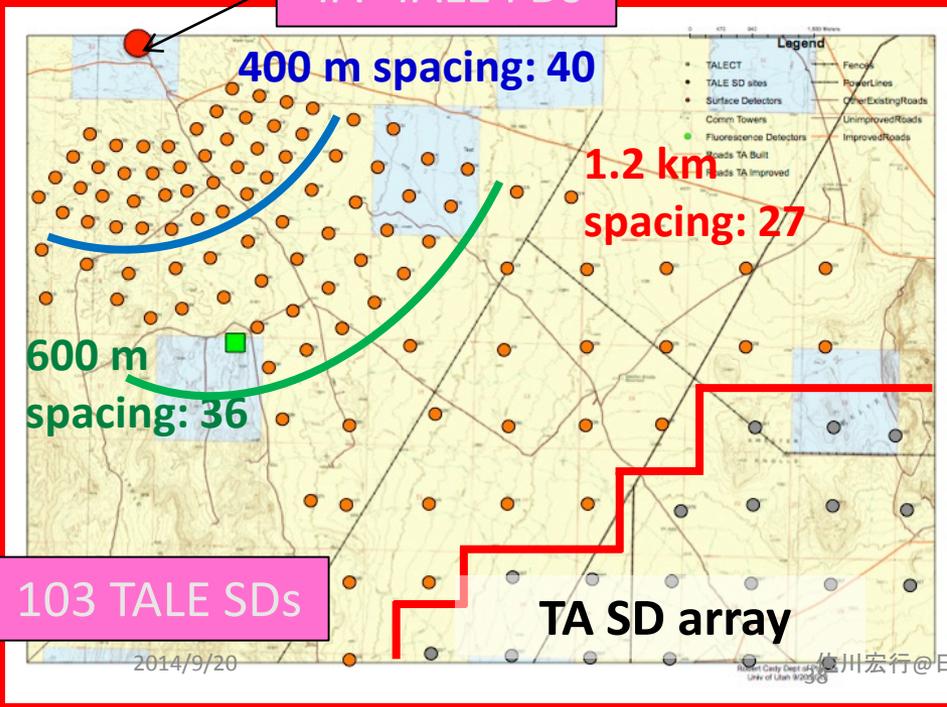
- 到来方向
 - **Hotspot**
 - 5σ 以上で確認
 - さらに構造があるか?
 - その他の過剰到来spotが見えてくるか?
 - 銀河磁場と銀河系の外の磁場の影響の研究
 - **点源探索**
 - **他の実験結果との相関の研究**
 - TA/Auger全天解析
 - HotspotでのMAGIC実験等でのガンマ線源の探索
 - IceCube実験で観測されたニュートリノとの相関
- 高統計で、最高エネルギー付近以上でのエネルギー**スペクトル**と **X_{max}** の測定
- 超高エネルギー **ガンマ線**と**ニュートリノ**探索

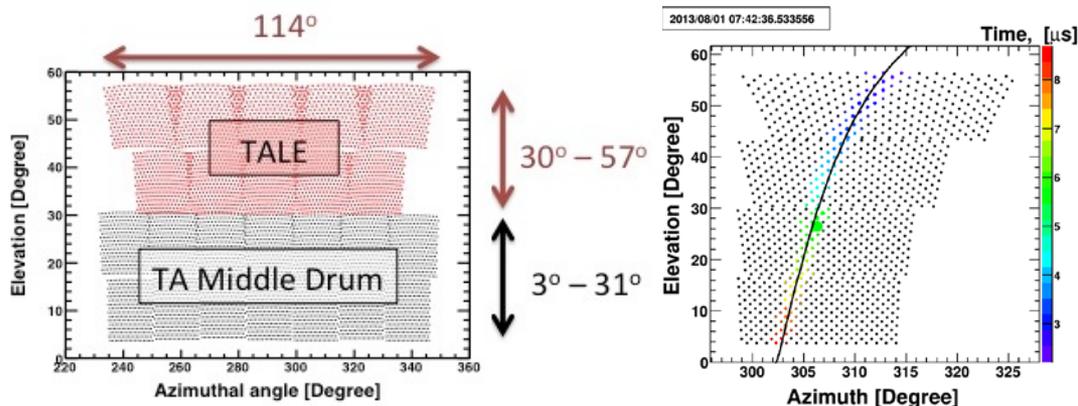
低エネルギーへの拡張

TALE実験



TA+TALE FDs





TALE実験

FDs + SDs = ハイブリッド

→ 高分解能

高仰角 (30°~57°)、高密度配置

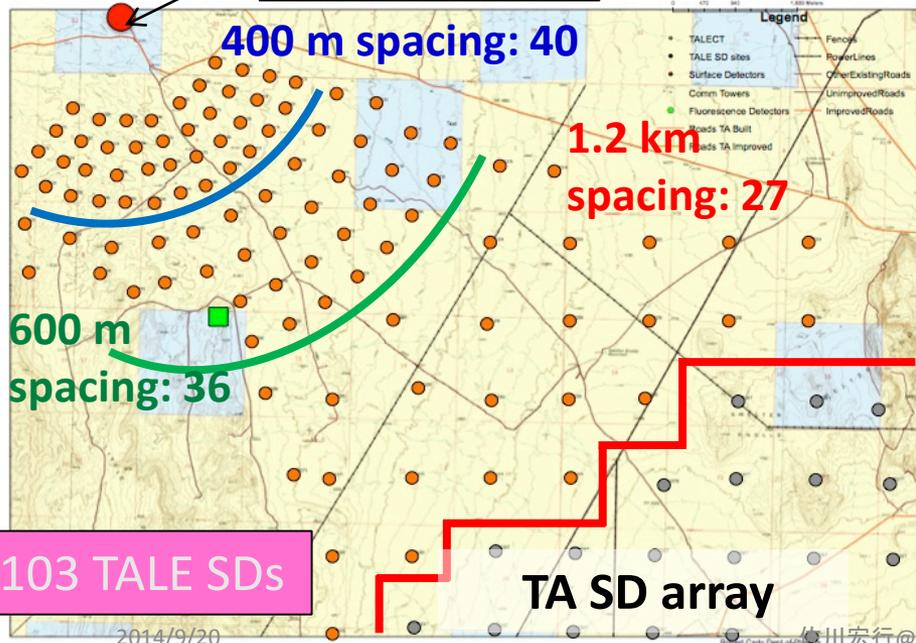
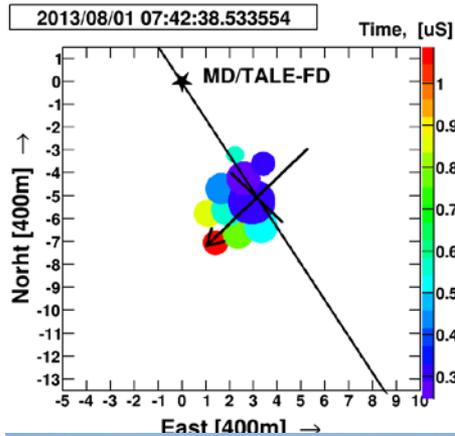
→ $10^{16} \text{eV} < E < 10^{18.5} \text{eV}$

TAとの接続

→ 単一のエネルギースケール
電子加速器による較正



TA+TALE FDs



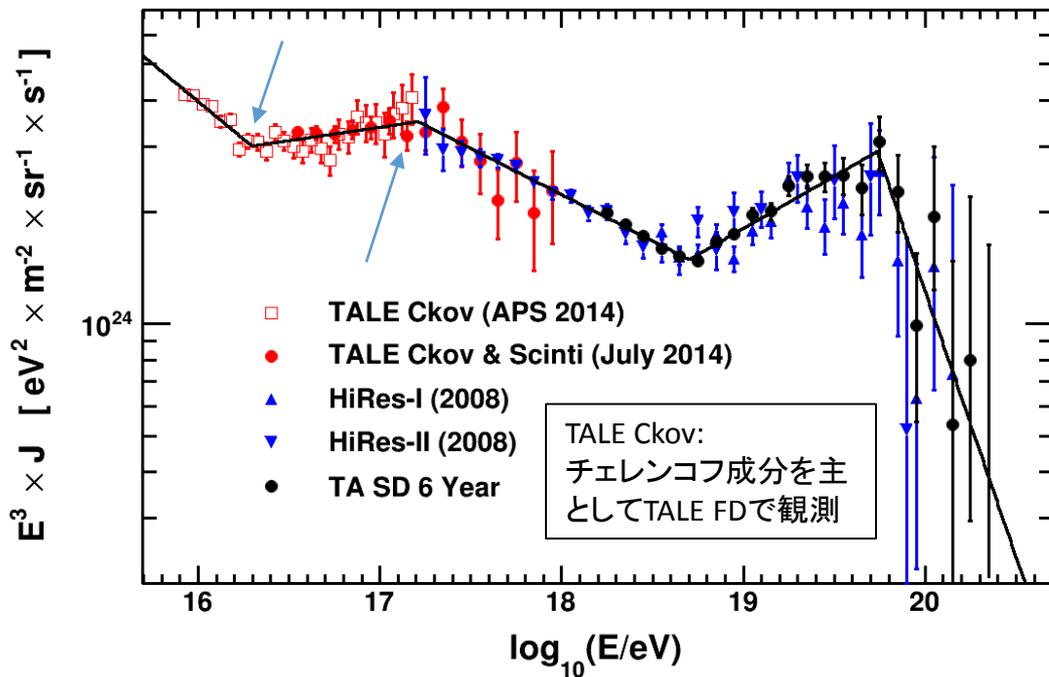
35台設置
部分的に稼働



TALE+TA spectrum ($E > 10^{15.9}$ eV)

(FD) (SD)

4桁以上にわたるエネルギー領域



$10^{16.2}$ eVと $10^{17.3}$ eV付近に折れ曲がり

ハイブリッド事象を用いた X_{max} による組成解析が喫緊の課題

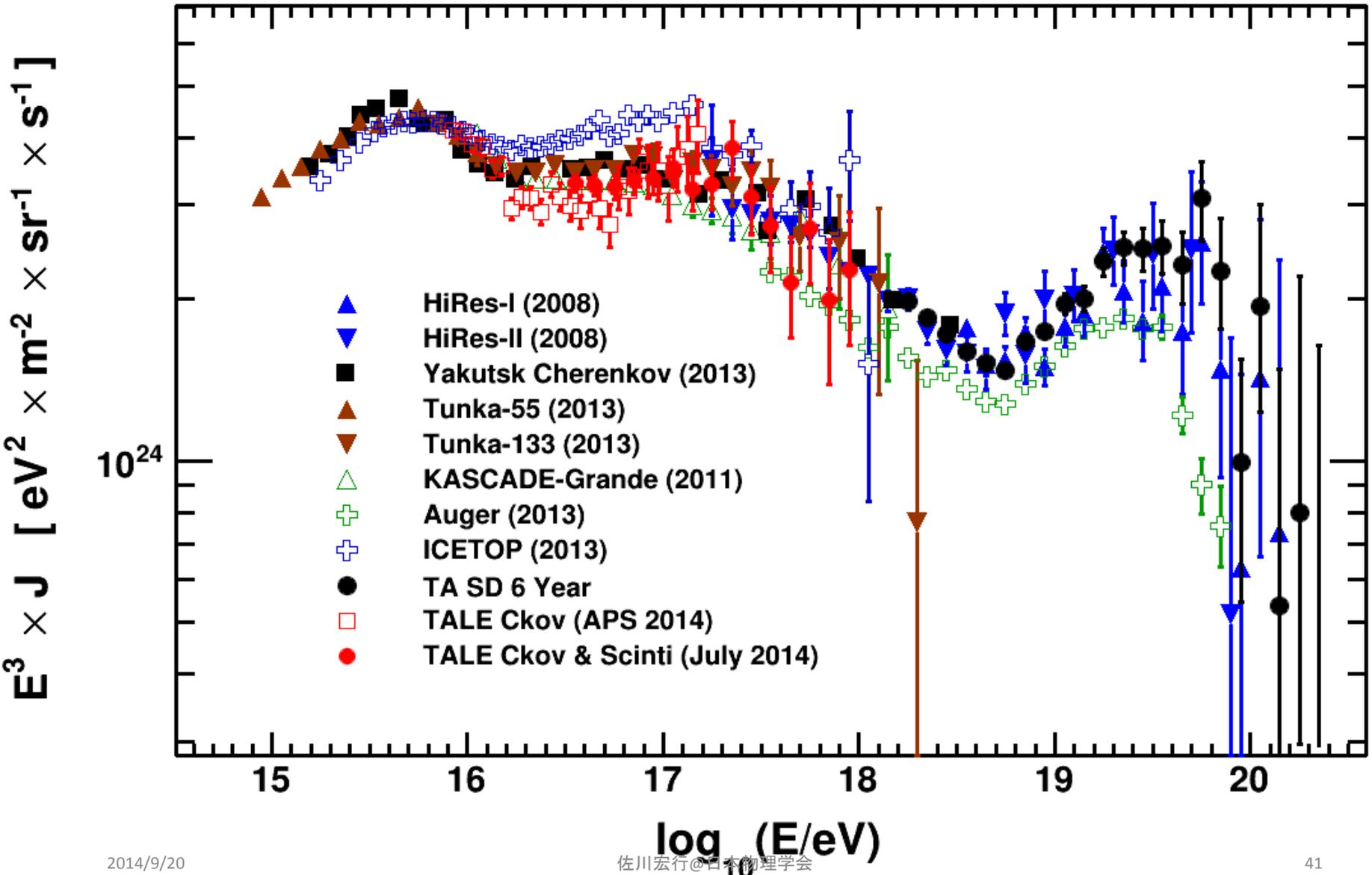
TALE

観測時間144時間分のデータ
(2013年9月6日~2013年12月6日)

残りの約70 TALE SD(●)建設の
科研費申請予定

AGASA SD再利用
電波観測併用
を検討中

エネルギースペクトル: TALE+TA+その他の実験

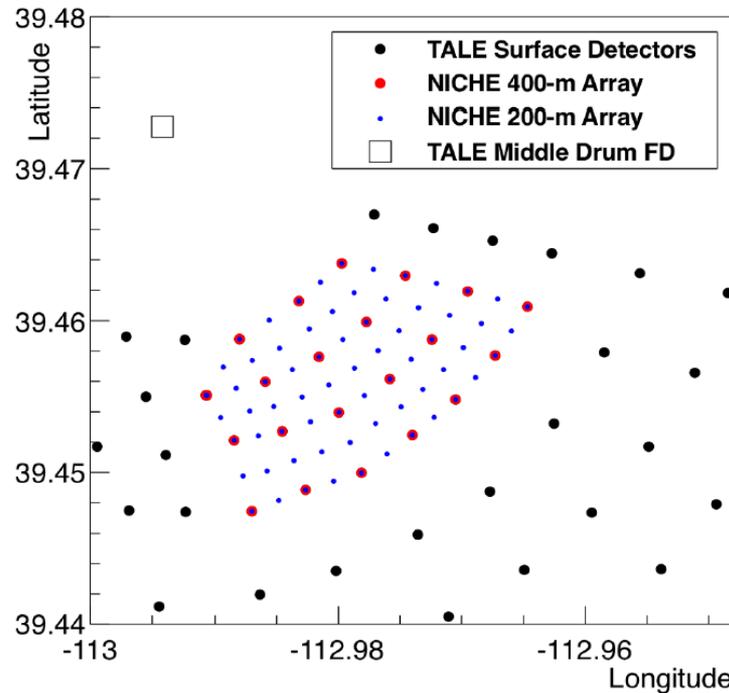
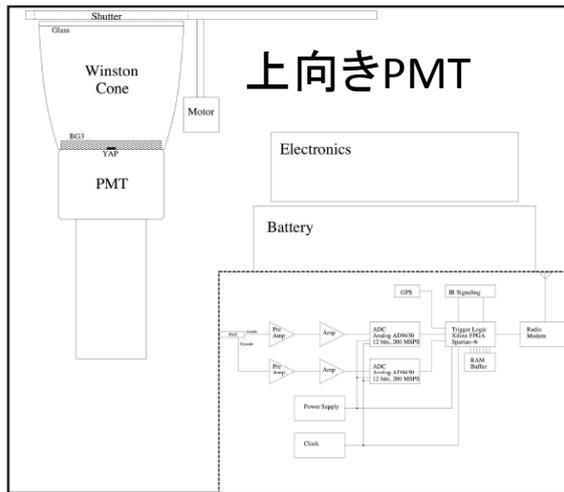


NICHE

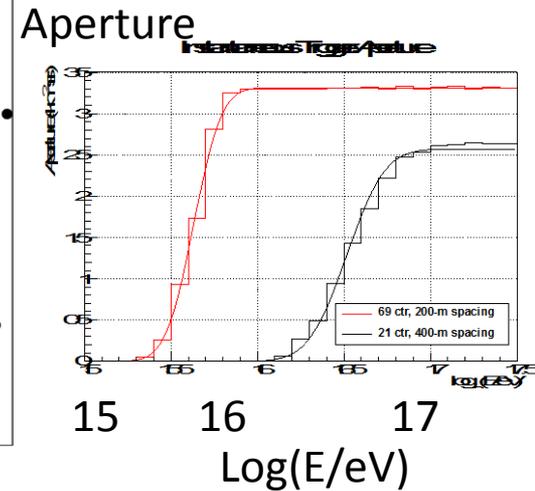
Non-Imaging Cherenkov Array

- エネルギーと X_{max} の測定によるTA/TALE 拡張($E = 10^{15.5}$ to 10^{18} eV)

TALE SD アレイ内のCherenkov カウンタ

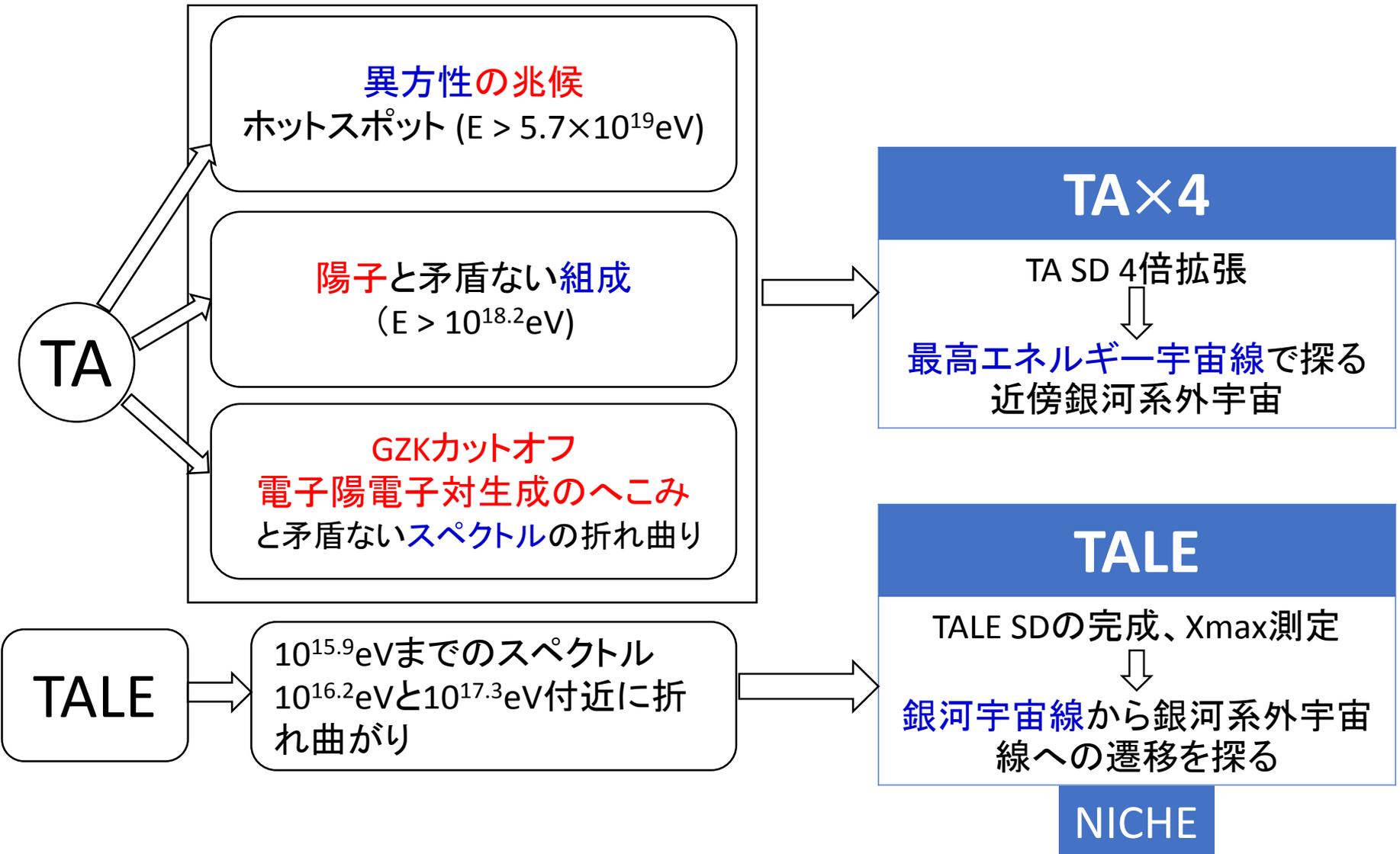


400m 21台
200m 67台



400 m 15台でスタート

まとめ



END