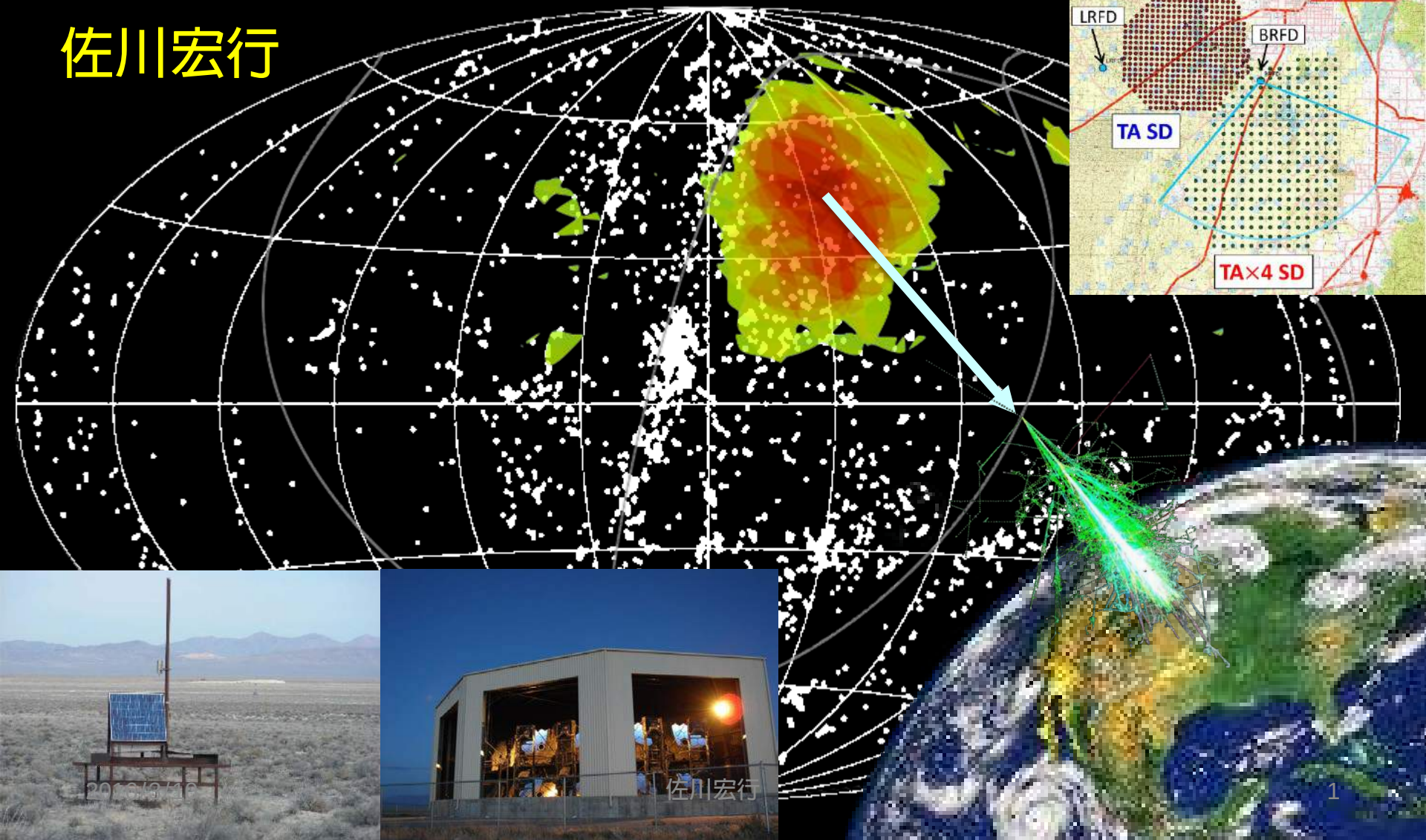


最高エネルギー宇宙線で宇宙を探索 テレスコープアレイ(TA)実験

佐川宏行

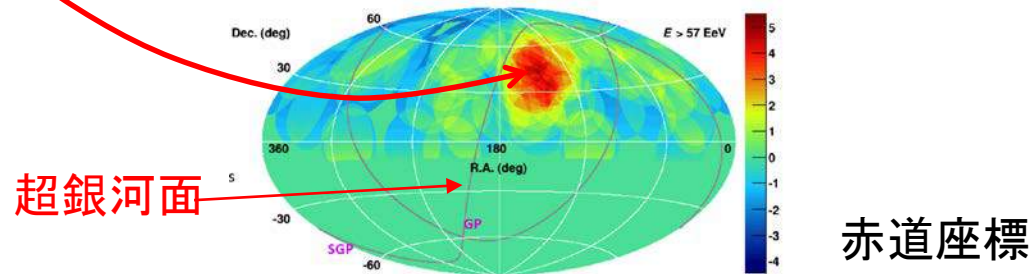


概要

- 最高エネルギー宇宙線の観測・物理
- テレスコープアレイ(TA)装置
- TAの最近のおもしろい結果
- その他の研究
- 国際化の中で

我々のグループの研究の主目的

- TA5年の観測で最高エネルギー宇宙線の到来方向に 大きな異方性を世界で初めてとらえた



代表: 佐川

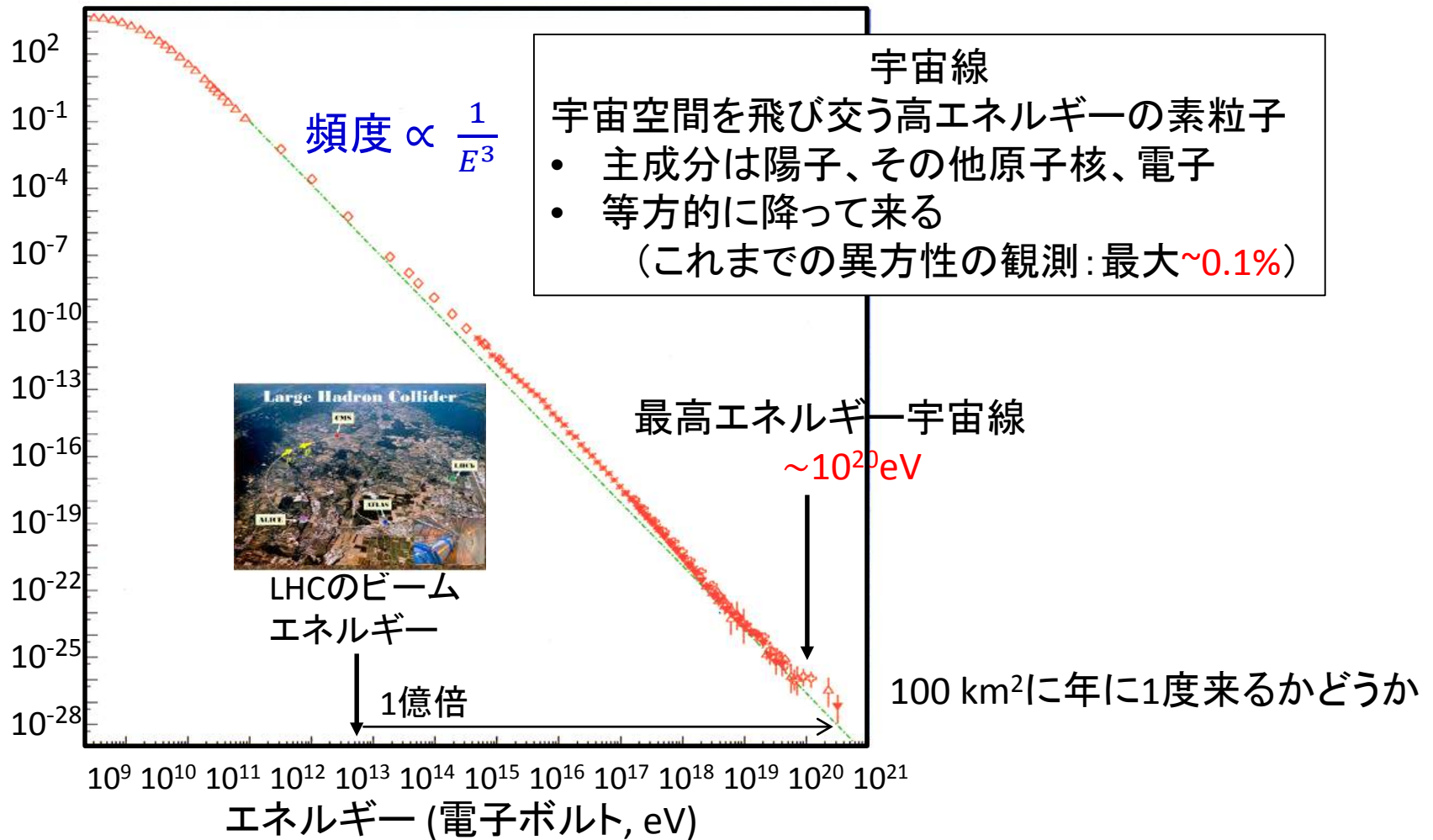
- 現TAの4倍拡張5か年計画(TA × 4)科研費が採択
 - 10²⁰eV付近の最高エネルギー宇宙線を生む
 - 近傍の超銀河宇宙の極限現象・極限天体を探索



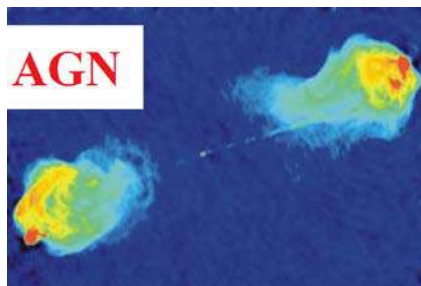
- 最高エネルギー宇宙線天文学の創成を目指す

宇宙線のエネルギー

宇宙線の到来頻度



最高エネルギー宇宙線の起源天体候補



最大ブラックホール $\sim 10^6\text{--}10^9 M_{\text{太陽}}$



最強磁場 $\sim 10^{15}$ ガウス



最大重力束縛天体 $\sim$ 数Mpc

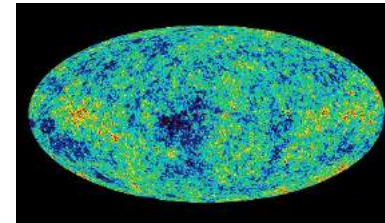


最強爆発 $\sim 10^{51}$ エルグ

どのようにして 10^{20} 電子ボルトのエネルギーが得られるかはいまだ謎

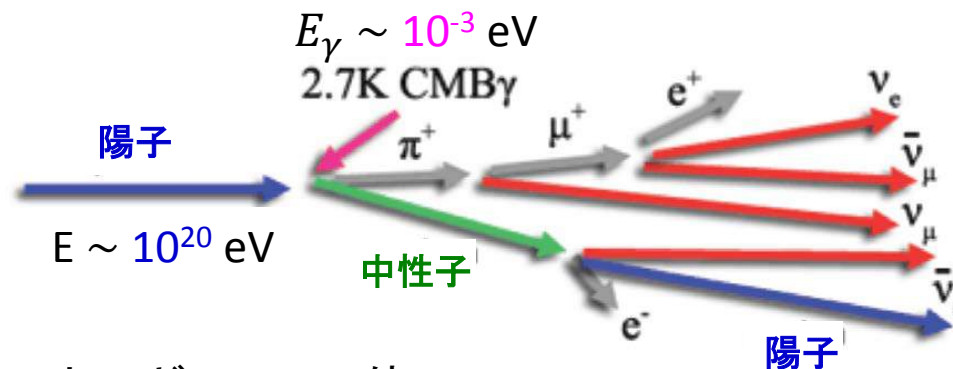
宇宙線のエネルギーに限界はあるか

- 1964年 宇宙背景放射 (CMB) の発見



この画像は後の
WMAPによる観測

- 1965年 GZK (Greisen-Zatsepin-Kuzmin) 限界の予言
 - 特殊相対性理論によると、最高エネルギー宇宙線 ($\sim 10^{20}$ eV) は CMB 光子と相互作用して 1.5 億光年程度しか伝播できず、地球に届くときには頻度が急激に減少する



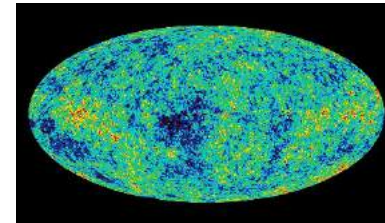
予想が正しければ
超高エネルギー
ニュートリノが
見つかるはず

陽子静止エネルギーの 10^{11} 倍
(1000億のローレンツ変換)

プランクスケールに最も近い最高エネルギーでの特殊相対性理論の検証

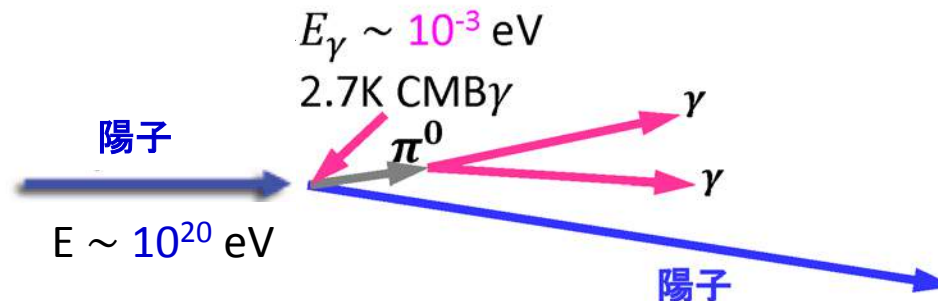
宇宙線のエネルギーに限界はあるか

- 1964年 宇宙背景放射 (CMB) の発見



この画像は後の
WMAPによる観測

- 1965年 GZK (Greisen-Zatsepin-Kuzmin) 限界の予言
 - 特殊相対性理論によると、最高エネルギー宇宙線 ($\sim 10^{20}$ eV) は CMB 光子と相互作用して 1.5 億光年程度しか伝播できず、地球に届くときには頻度が急激に減少する



予想が正しければ
超高エネルギー
ガンマ線が
見つかるはず

陽子静止エネルギーの 10^{11} 倍
(1000億のローレンツ変換)

プランクスケールに最も近い最高エネルギーでの特殊相対性理論の検証

最高エネルギー宇宙線の到来方向と発生源



低エネルギー宇宙線：宇宙磁場に曲げられる

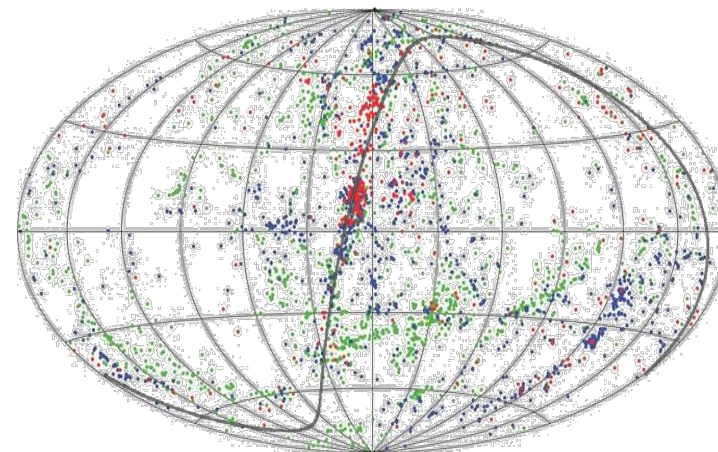
最高エネルギー宇宙線：ほぼ真直ぐ進む⇒発生源特定の期待

最高エネルギー宇宙線の 到来方向観測で期待される特徴

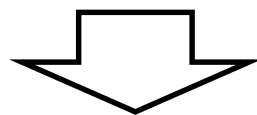
① GZKカットオフ

– 宇宙陽子線の到達限界
(地平～2億光年)

② 近傍1.5億光年以内の 宇宙の物質構造



近傍の銀河は非一様な分布



②を反映した最高エネルギー宇宙線の到来方向の異方性が
観測されるはず

概要

- 最高エネルギー宇宙線の観測と物理
- テレスコープアレイ(TA)装置
- TAの最近のおもしろい結果
- その他の研究
- 国際化の中で



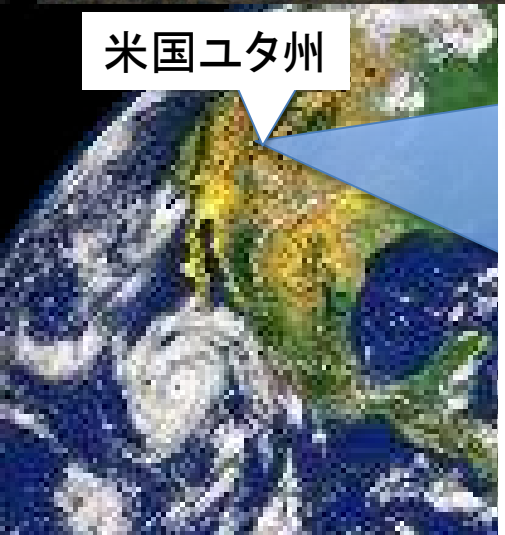
日米韓国ロシアベルギー5カ国 130名 (日本75名)

テレスコープアレイ(TA)

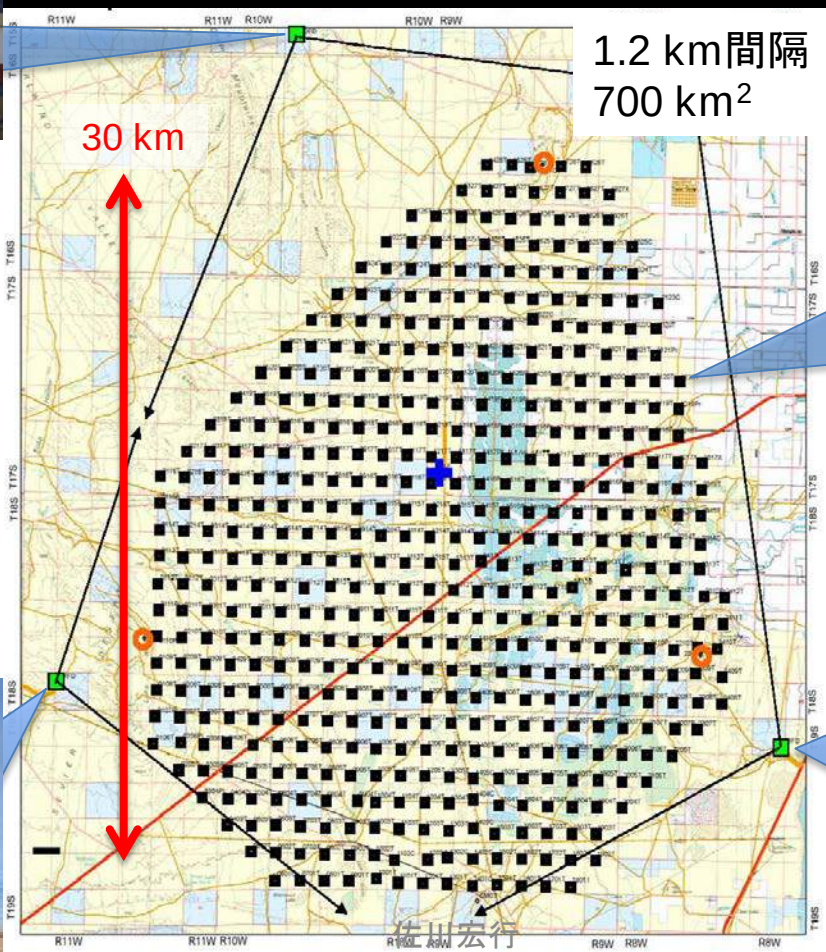
大気蛍光望遠鏡



米国ユタ州

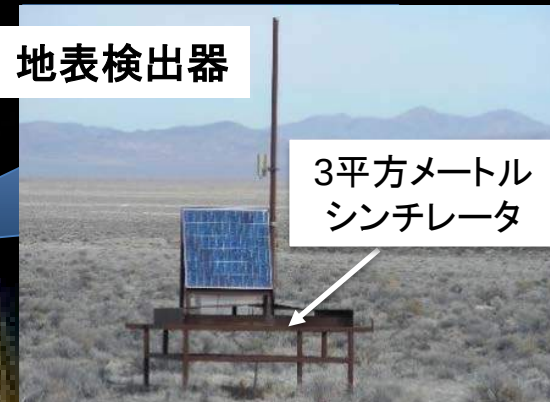


大気蛍光望遠鏡



2008年5月より
ハイブリッド観測開始

地表検出器



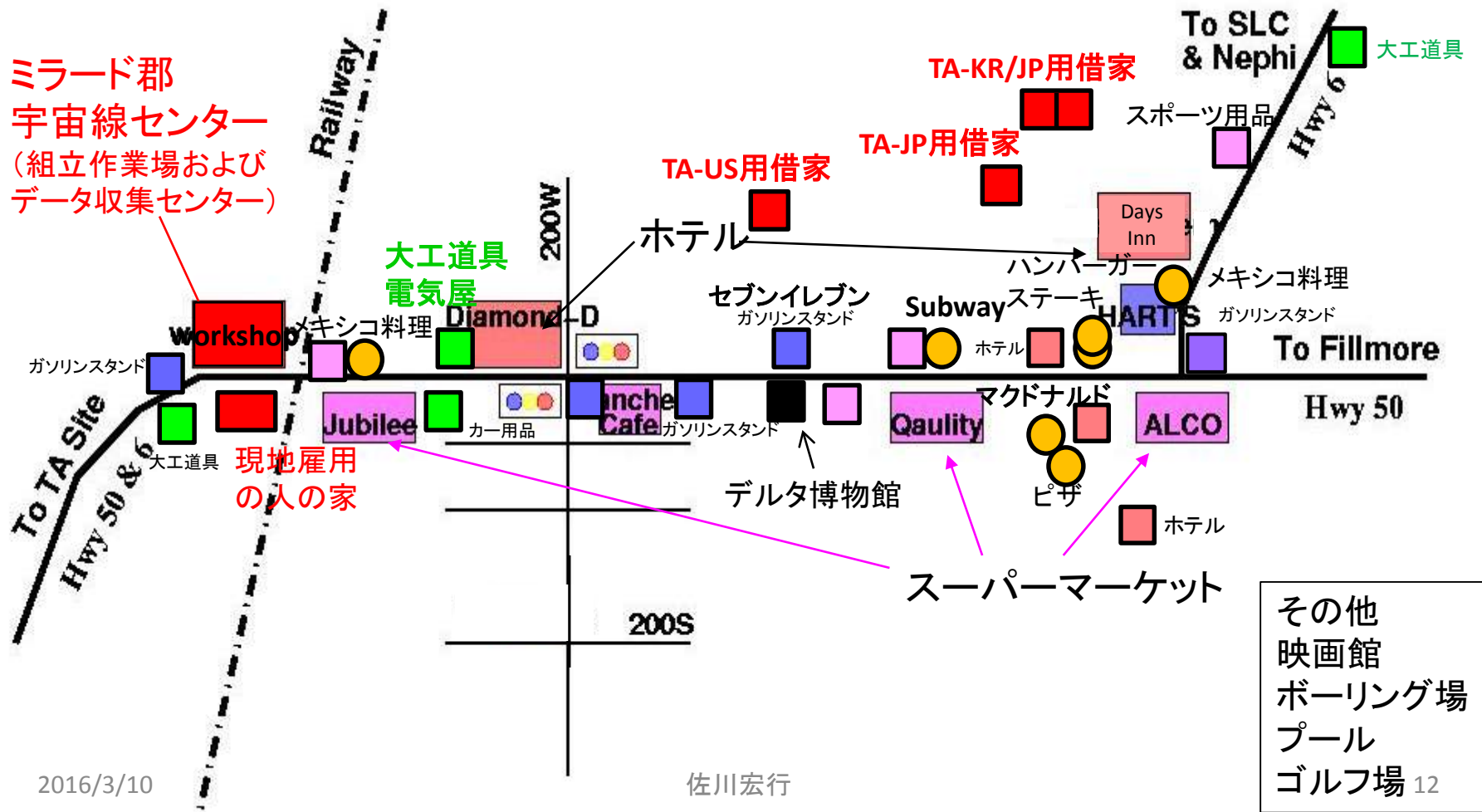
3平方メートル
シンチレータ

大気蛍光望遠鏡



デルタ市（人口約3500人）

• TA実験のための作業場、居住地



デルタの借家



外観



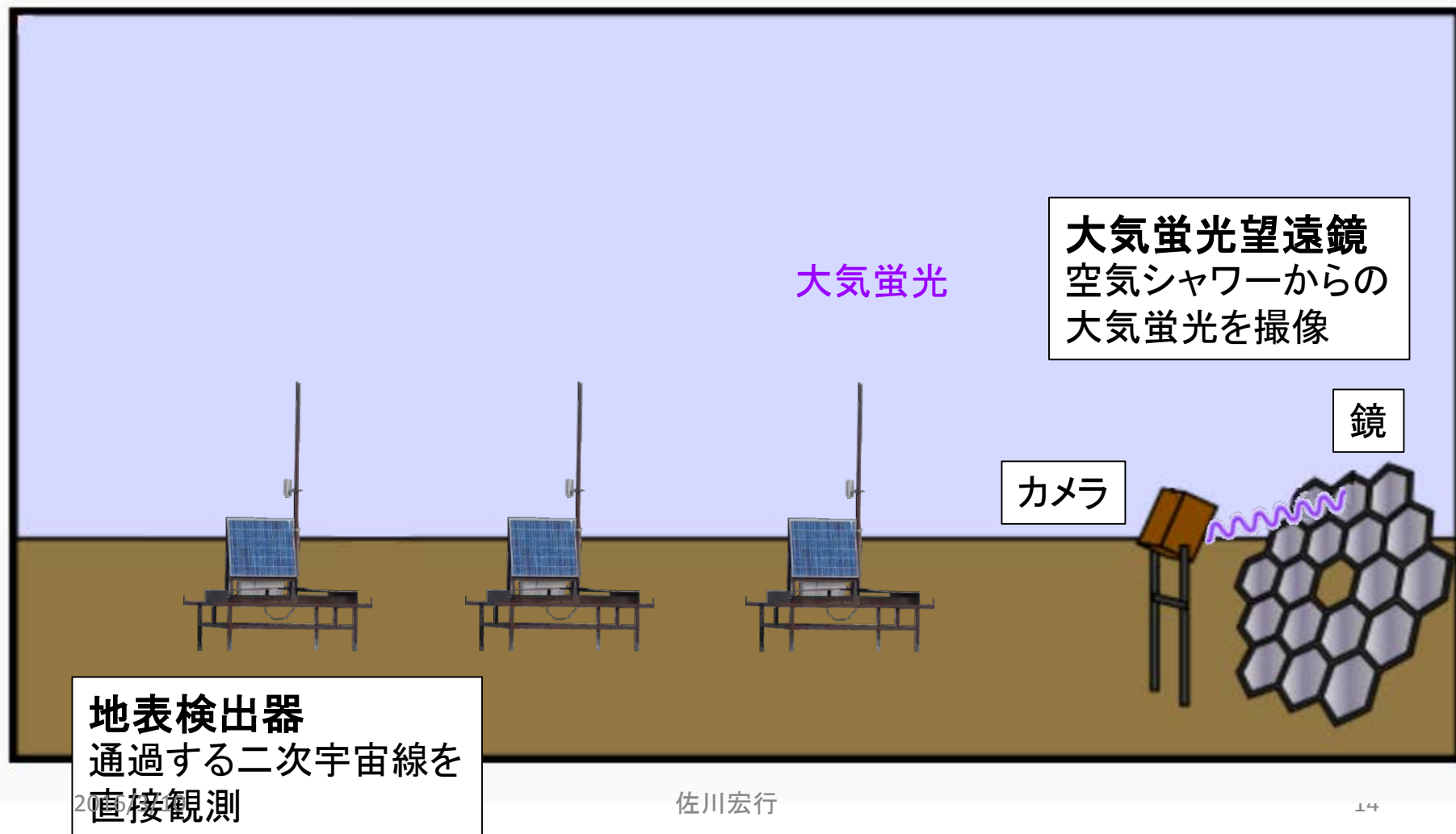
キッチン・ダイニングルーム



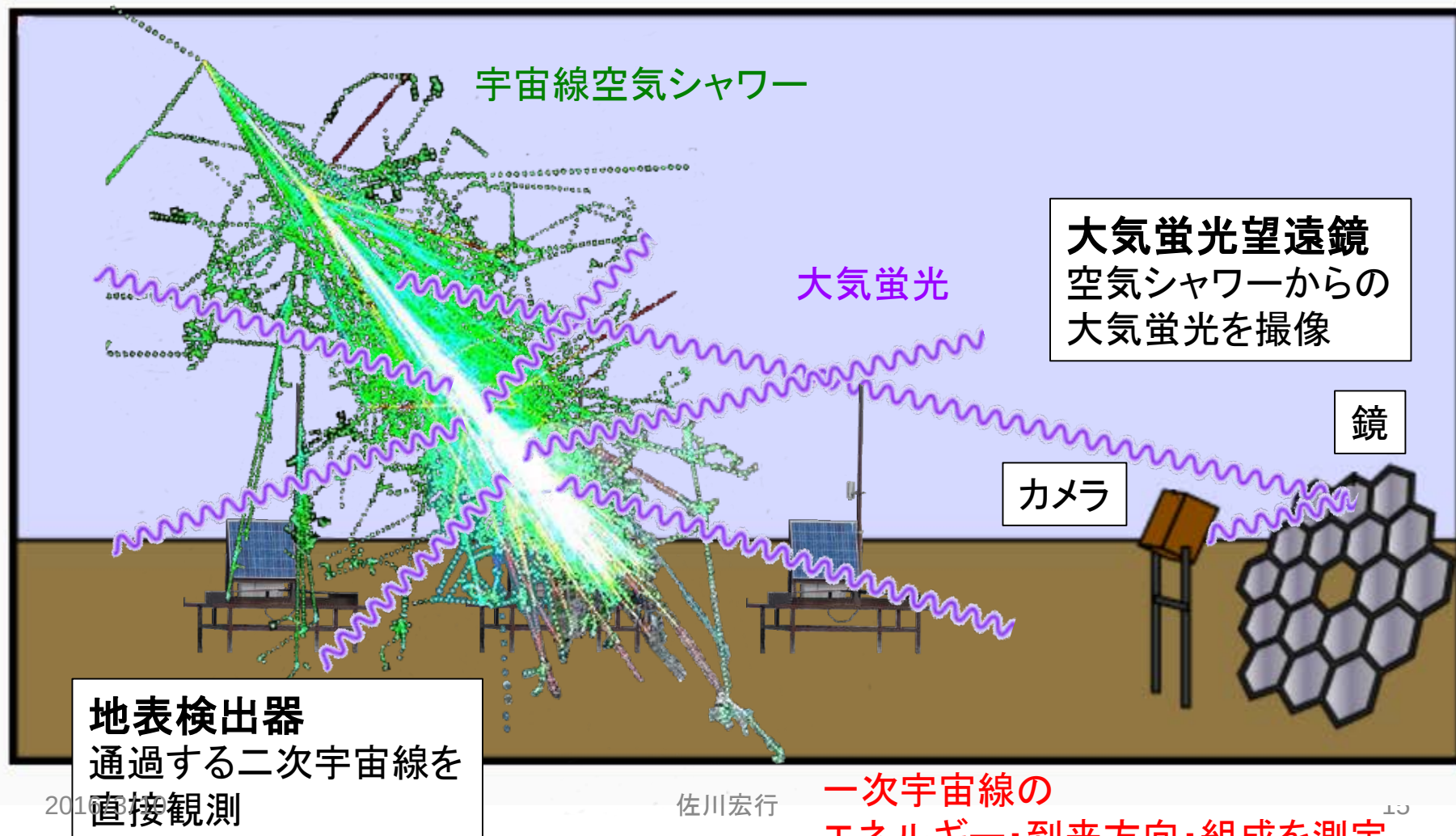
シフト室

2014年6月梶田所長がTA視察

地表検出器と大気蛍光望遠鏡

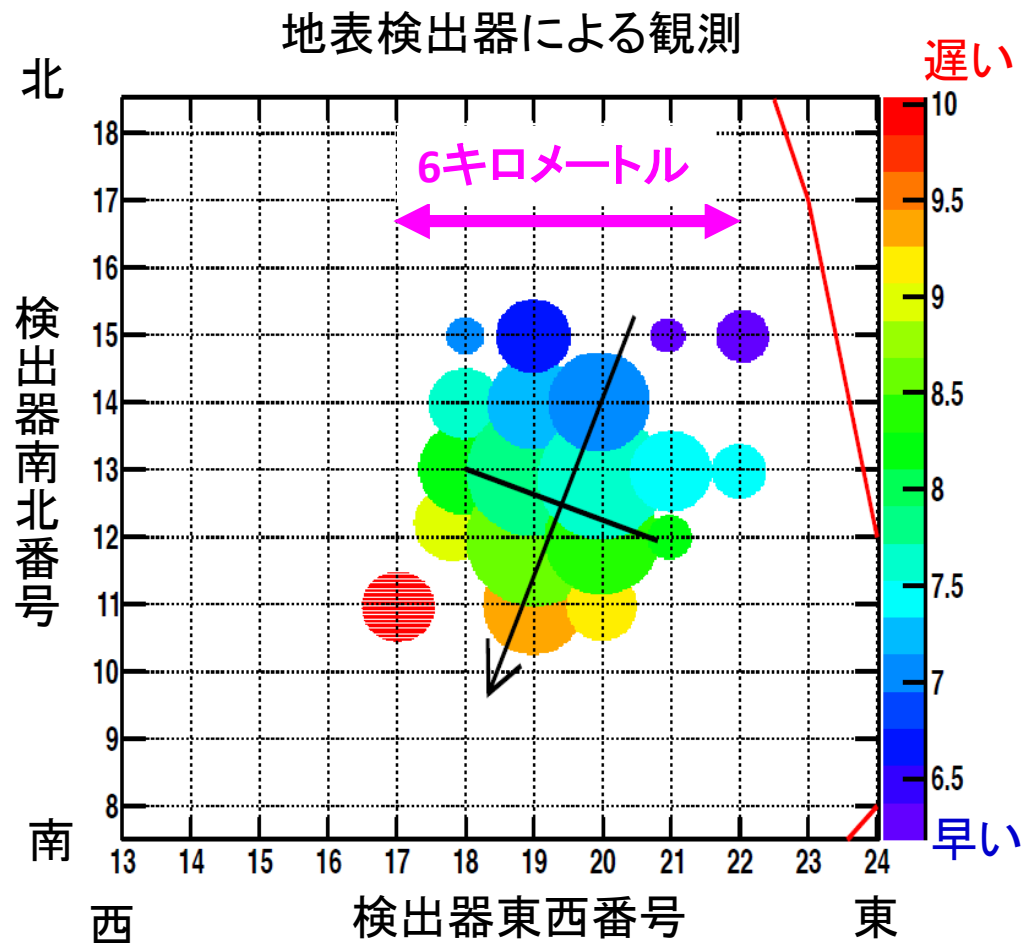
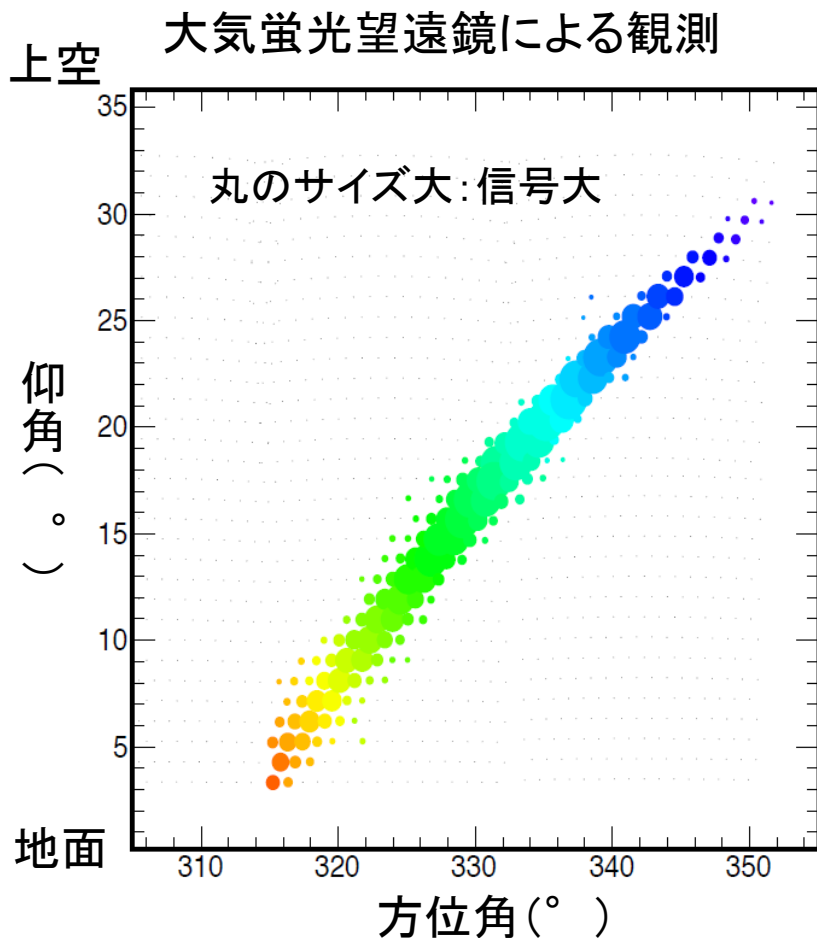


地表検出器と大気蛍光望遠鏡



大気蛍光望遠鏡と地表検出器による 空気シャワー同時観測例

(2008年10月26日5時51分50秒UTC)



概要

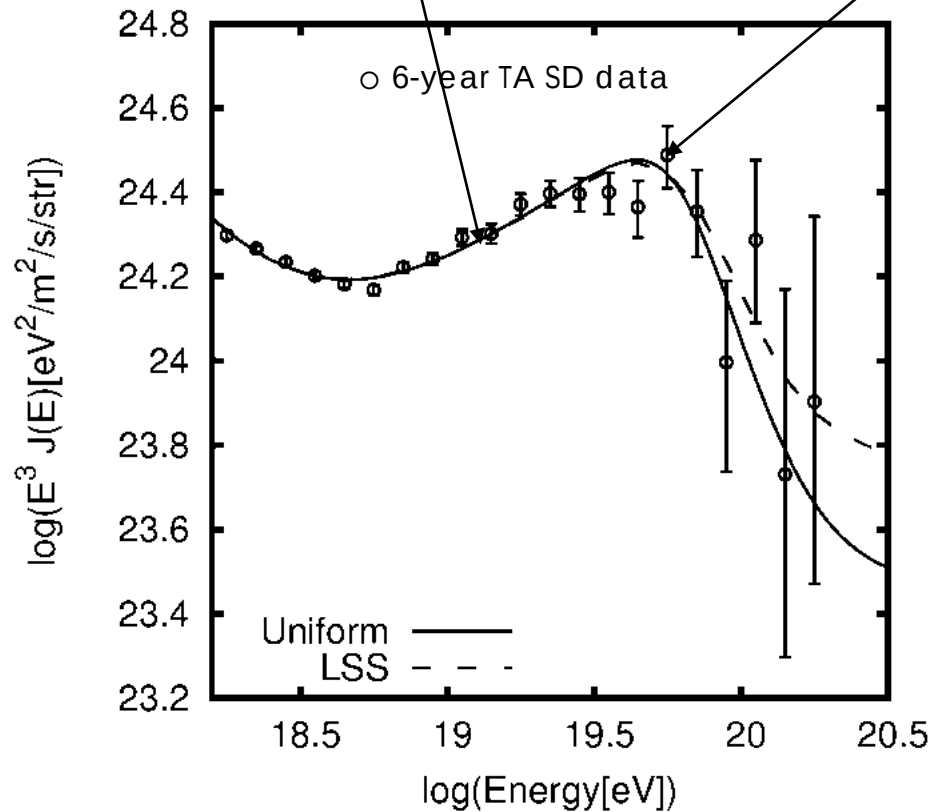
- 最高エネルギー宇宙線の観測と物理
- テレスコープアレイ(TA)装置
- TAの最近のおもしろい結果
- その他の研究
- 国際化の中で

TAのエネルギースペクトル

銀河系外陽子宇宙線伝播の理論計算(曲線)
宇宙背景放射光子と反応して伝播

6年間の地表検出器データ
(2008年5月～2014年5月)

([頻度 $J(E)$] $\times$ [エネルギー E]³)の対数



(エネルギー E) の対数

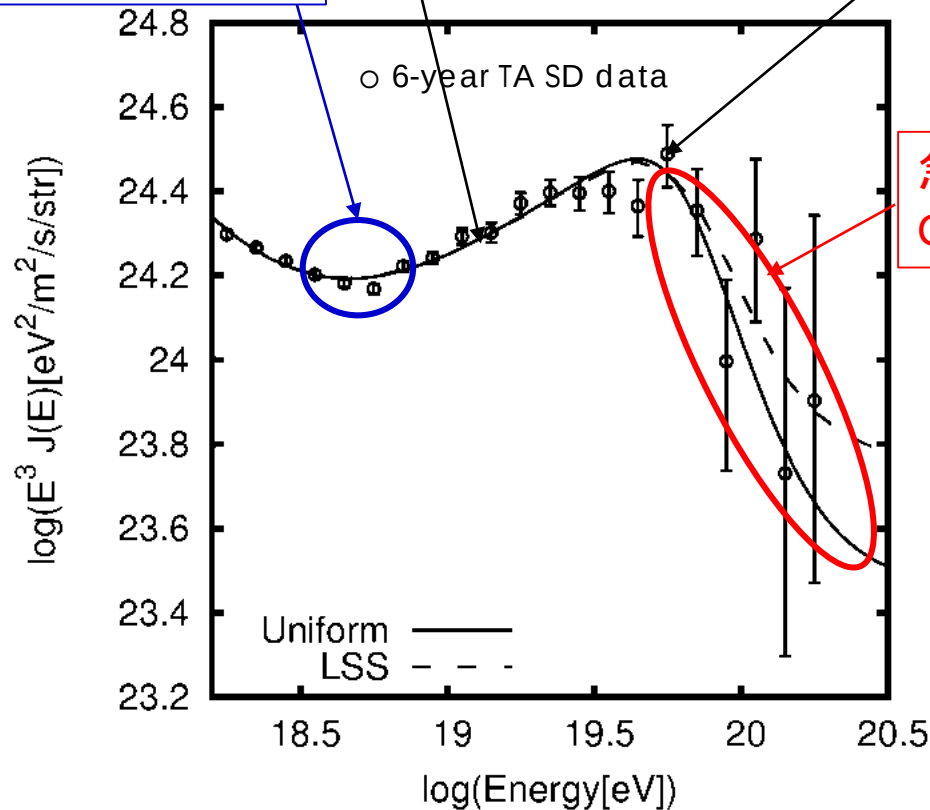
TAのエネルギースペクトル

銀河系外陽子宇宙線伝播の理論計算(曲線)
宇宙背景放射光子と反応して伝播

6年間の地表検出器データ
(2008年5月～2014年5月)

くぼみ
電子陽電子対生成

([頻度 $J(E)$] $\times$ [エネルギー E]³)の対数



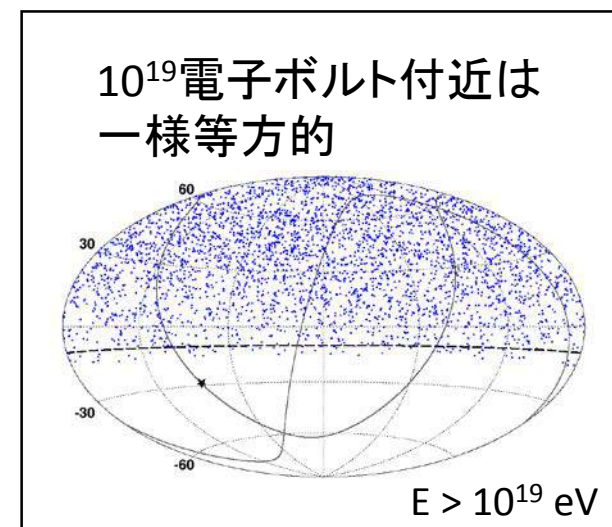
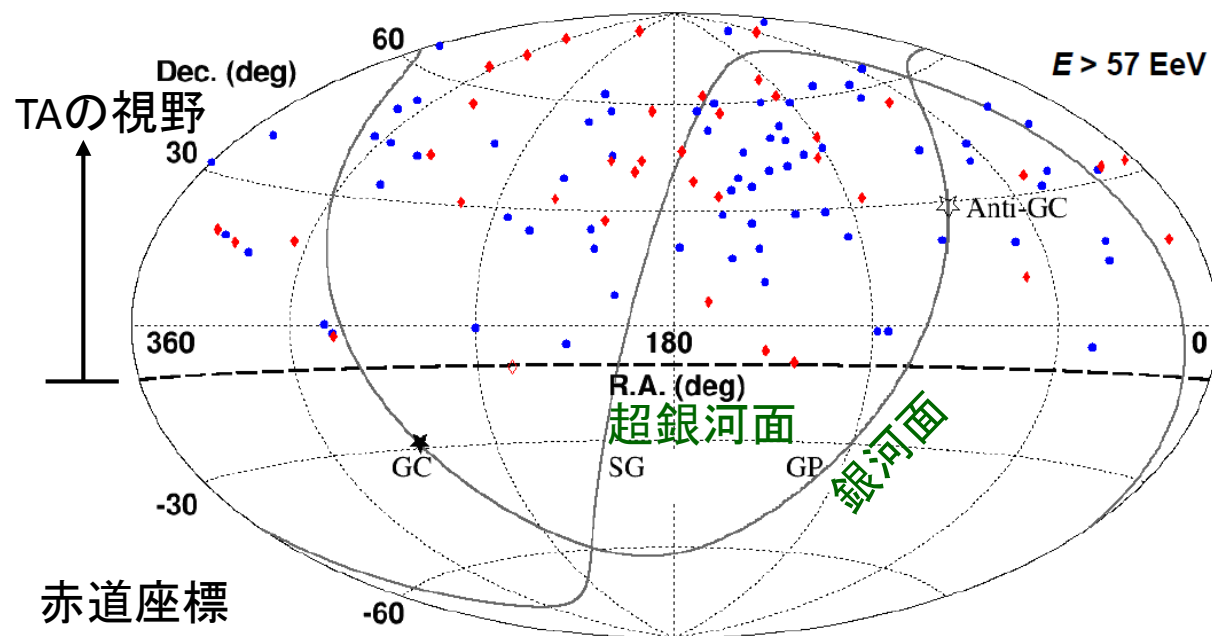
急激な頻度の減少
GZKカットオフと矛盾なし

(エネルギー E) の対数

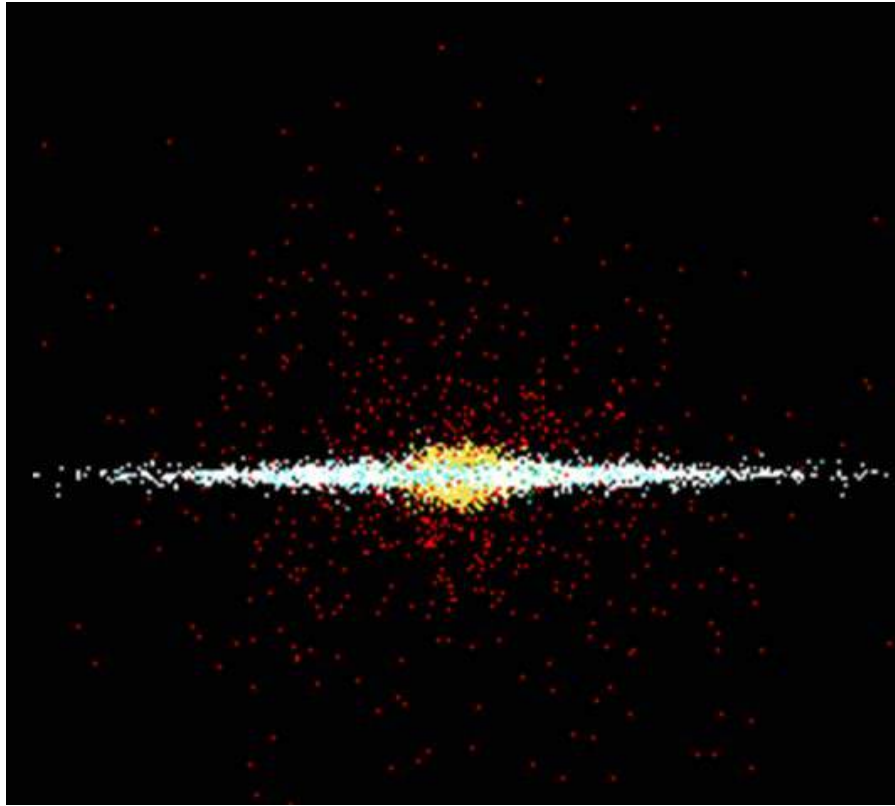
最高エネルギー宇宙線の到来方向の分布

- 2008年5月～2015年5月(7年間)のデータ
- 5.7×10^{19} 電子ボルト以上: 109事象

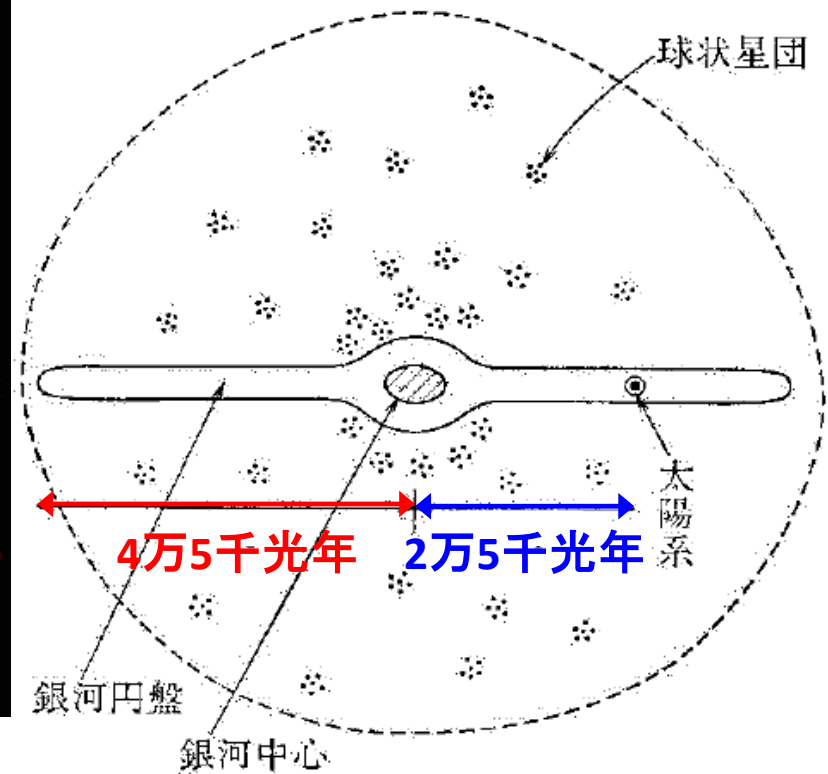
青: 2014年7月
プレスリリース



銀河系(天の川銀河)



側面図



我々の銀河系

超銀河面

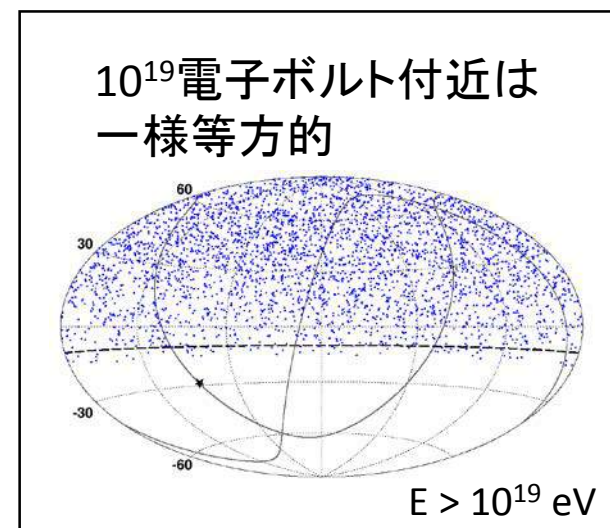
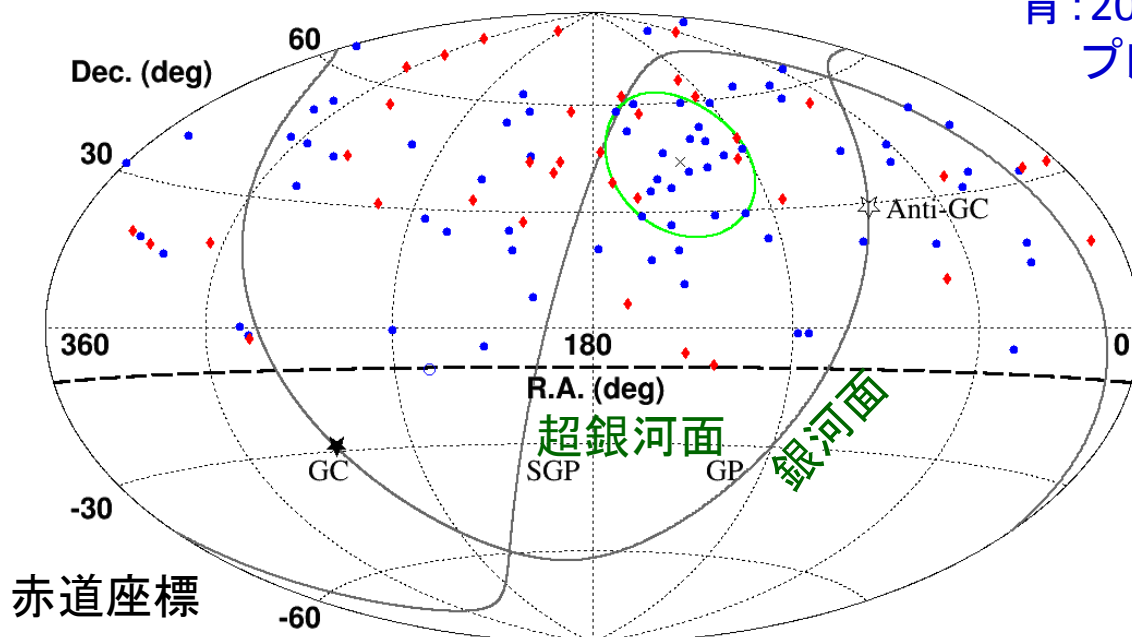


最高エネルギー宇宙線の到来方向の分布

- 2008年5月～2015年5月(7年間)のデータ

- 5.7×10^{19} 電子ボルト以上: 109事象

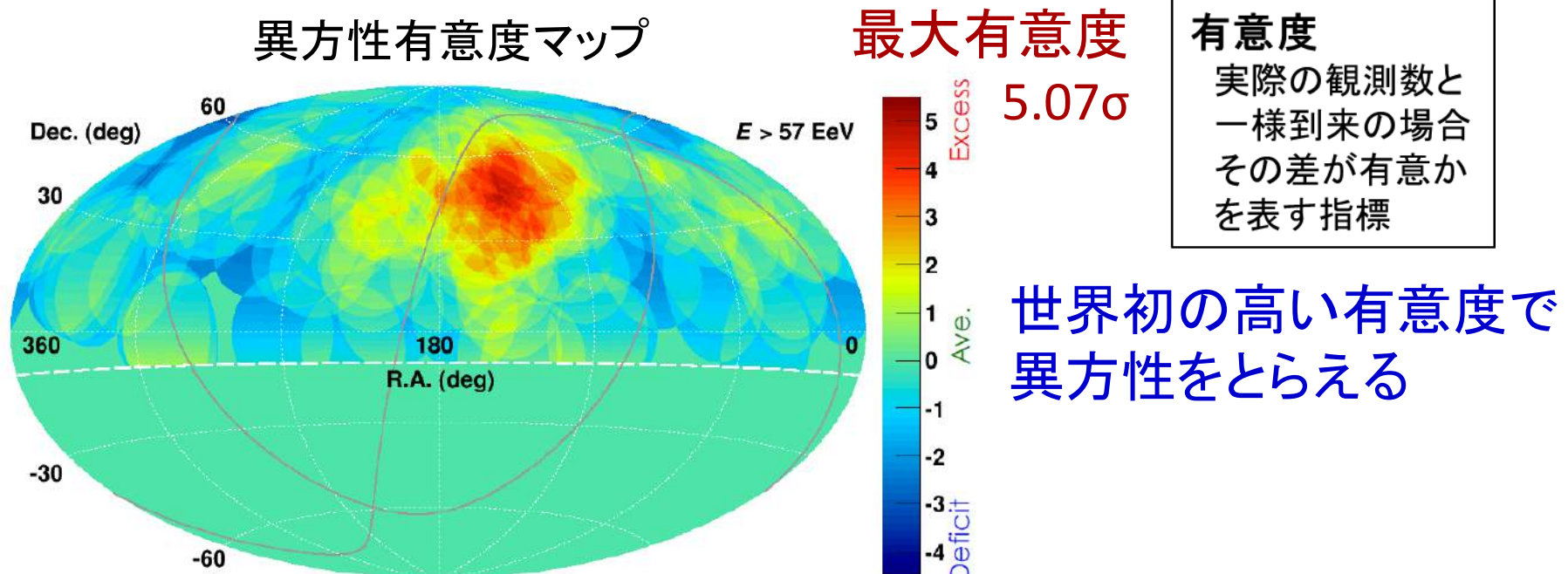
青: 2014年7月
プレスリリース



- 緑の半径20度の円内

- 等方的到来分布の期待数: 6.9 ↔ 観測数: 24 (24/6.9 ~ 350%)

最高エネルギー宇宙線の到来方向の異方性 ホットスポット



- 最大の有意度 (5.07σ) が偶然に生じる確率は約 **1万分の3.7**
(3.4σ)

最高エネルギー宇宙線天文学の創出

天の川銀河(我々の銀河)からはずれた方向→銀河系外からやってきたか

超銀河面

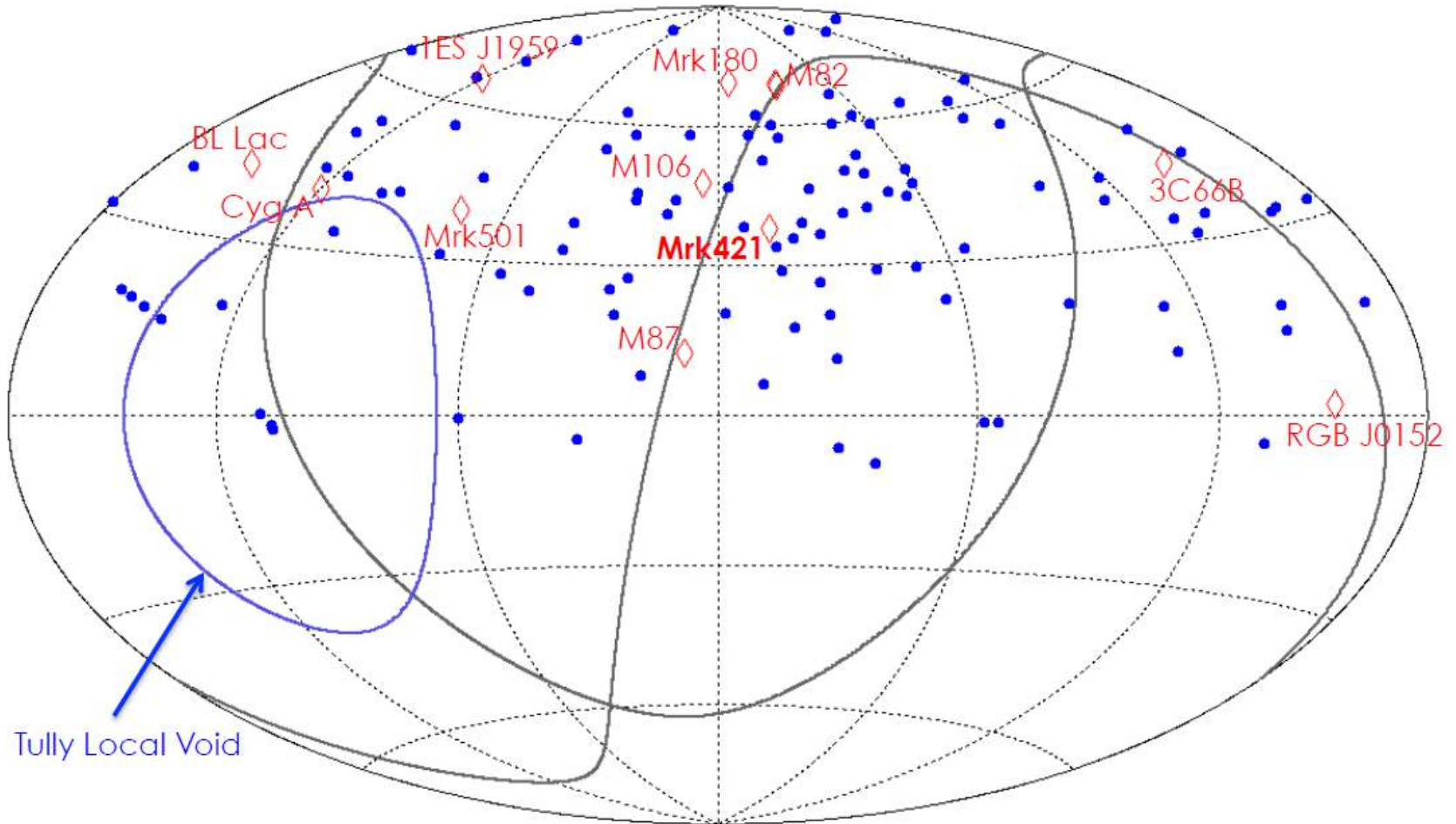
カシオペア座

はくちょう座

北斗七星の近く
おおぐま座の足元の方角

TAのホットスポットと近傍の顕著な天体

(地球から3億光年程度以内の距離)



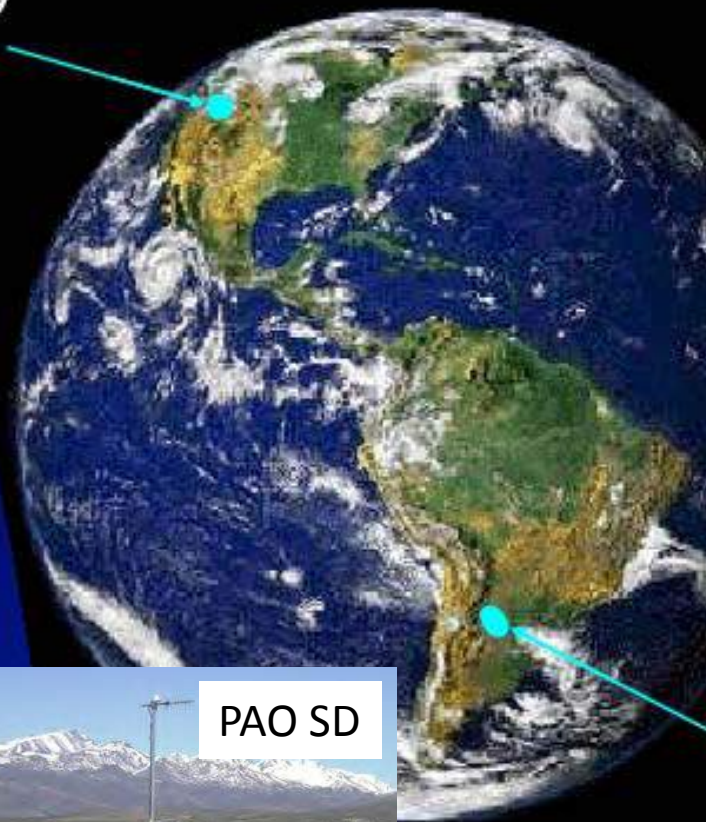
Mrk 421, Mrk 180: ブレーザー
M82: スターバースト銀河

K. Fang, et al., ApJ, 794, 126 (2014)
H.-N. He, et al., arXiv:1411.5273 (2014)

最高エネルギー宇宙線観測装置

Telescope Array
Utah, USA

680 km² 地表検出器
3箇所に大気蛍光望遠鏡



Pierre Auger
Observatory
Mendoza, Argentina

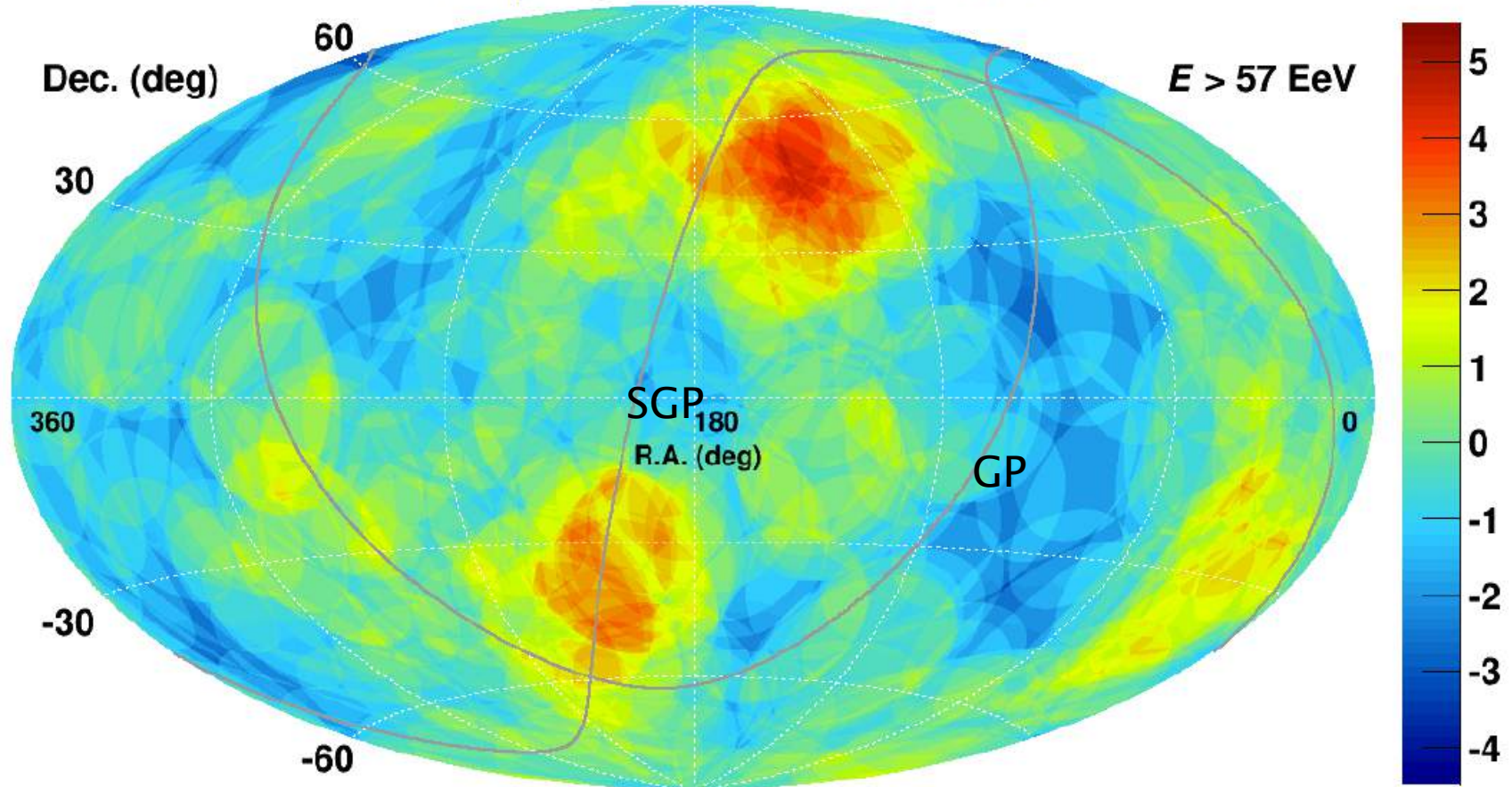
3000 km² 地表検出器
4箇所に大気蛍光望遠鏡

PAO FD

PAO SD

TAとAugerのデータを合わせた有意度マップ

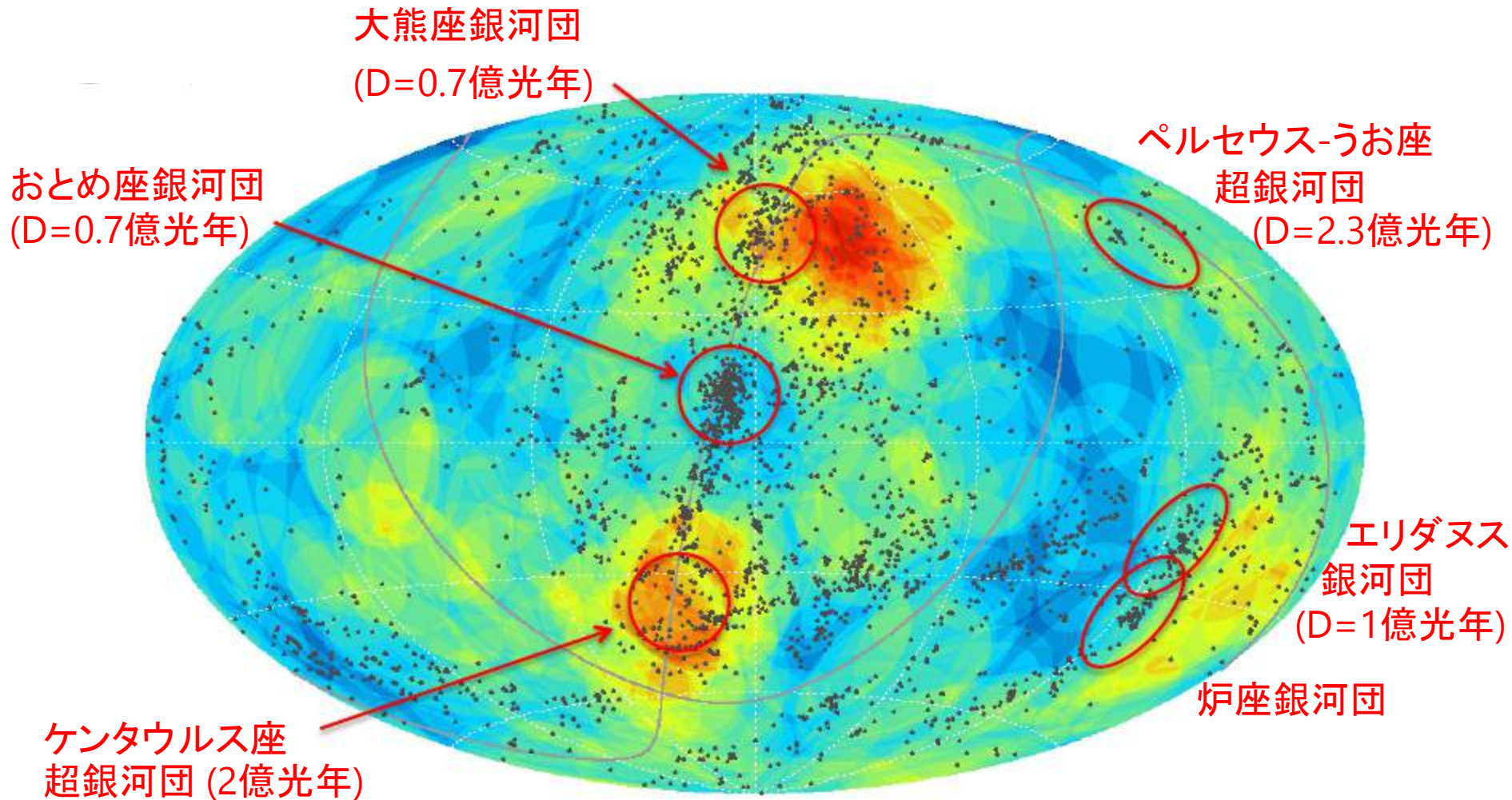
20度の半径の円の中の観測数が期待数より多いかどうかの有意度



TA (北天) 7年間 109事象 : TAホットスポット 5.1σ
Auger (南天) 10年間 157事象 : Auger ウォームスポット $\sim 3.6\sigma$

南米アルゼンチンにある最高エネルギー宇宙線観測所

TAとAugerの有意度マップと近傍の銀河(団)

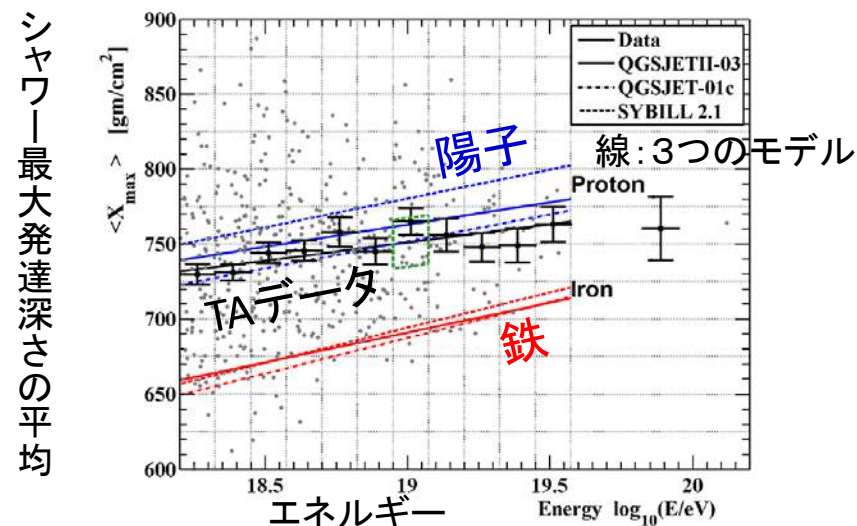
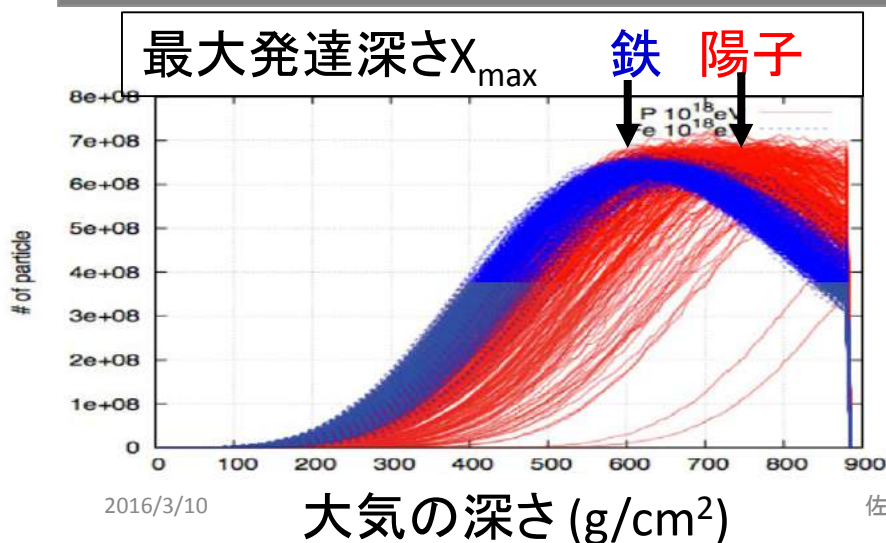
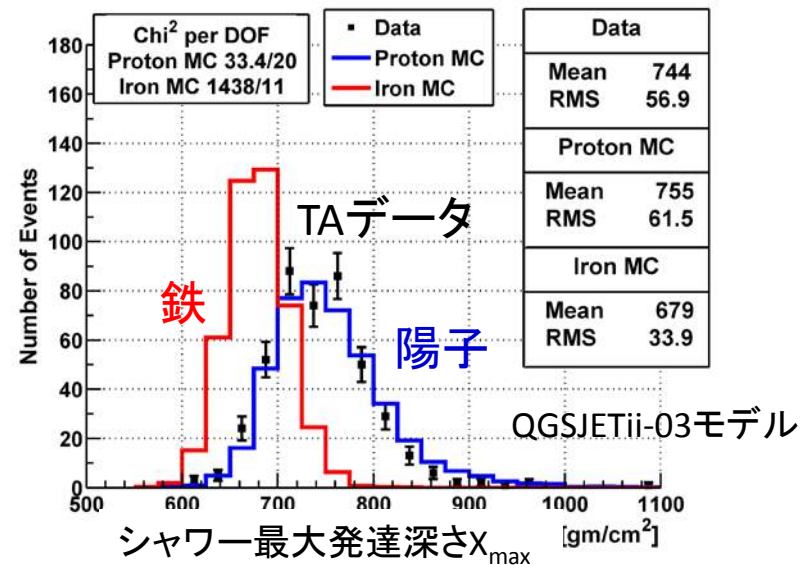
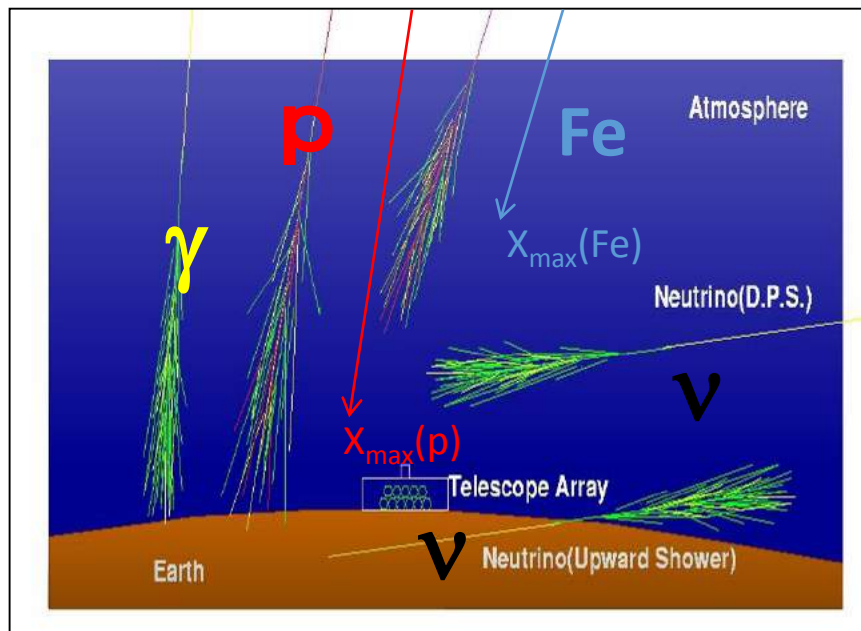


Huchra, et al, ApJ, (2012)

(黒点・): 2MASS カタログの銀河 ($D < \sim 1.5$ 億光年)

TAのホットスポットはおおぐま座(銀河団)の近くにある

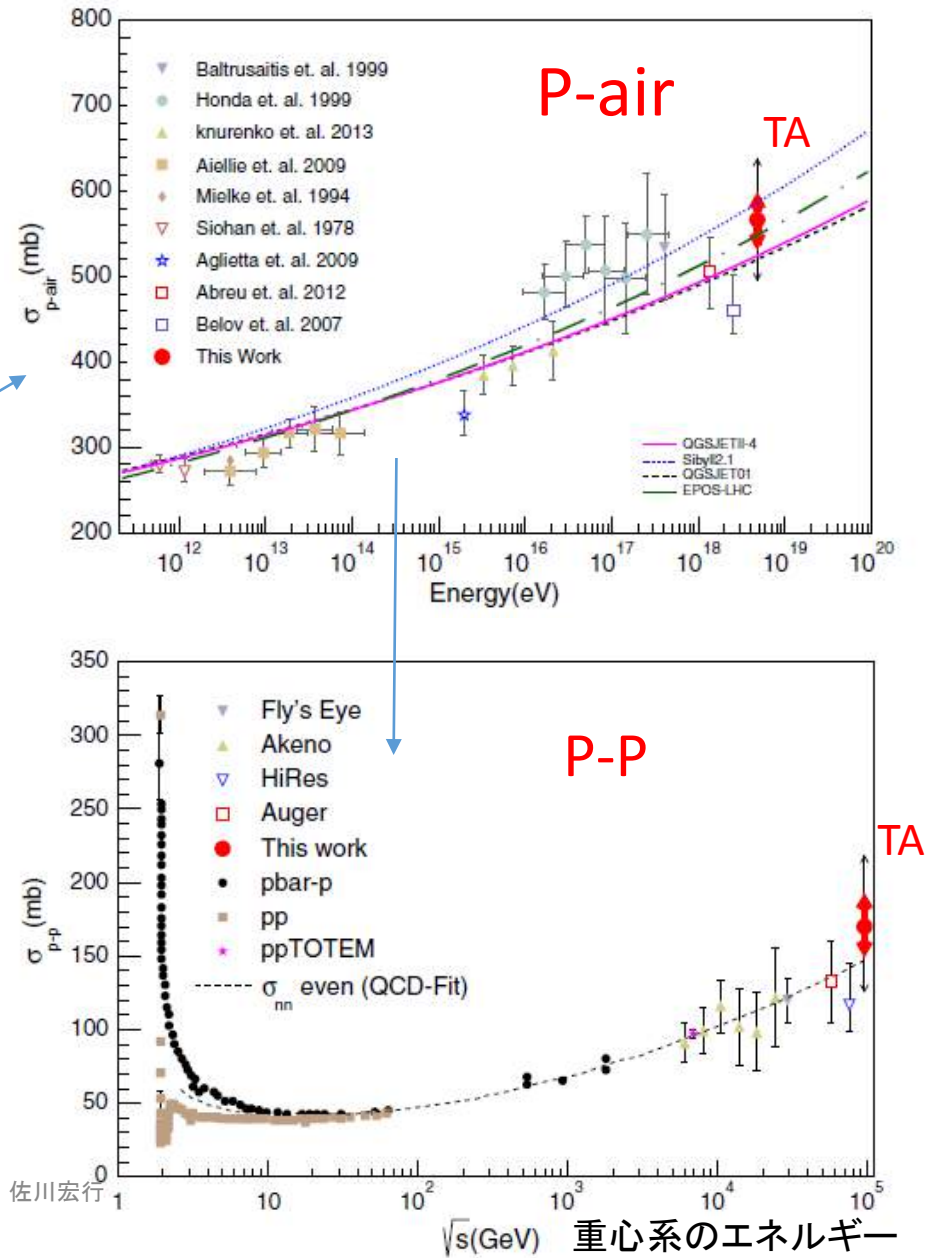
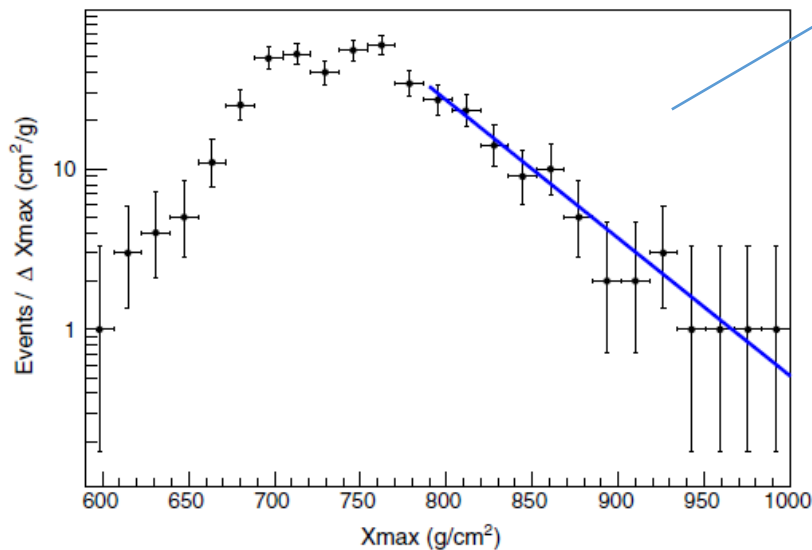
空気シャワー最大発達深さによる粒子種の同定



軽い組成(主に陽子)と矛盾なし
モデルに依存

陽子と空気の断面積→陽子・陽子断面積

$$E = 10^{18.3} - 10^{19.3} \text{ eV}$$



PHYSICAL REVIEW D 92, 032007 (2015)

2016/3/10

TA×4計画

最高エネルギー宇宙線天文学のフロンティア

500台のシンチレータ検出器
2.1 km間隔で設置(日本担当)



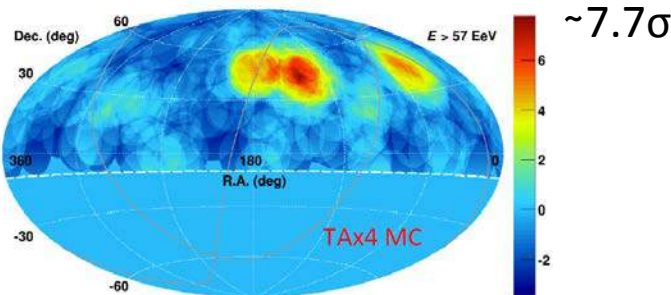
地表検出器を4倍に拡張

2015年度から建設
3年間弱で建設予定



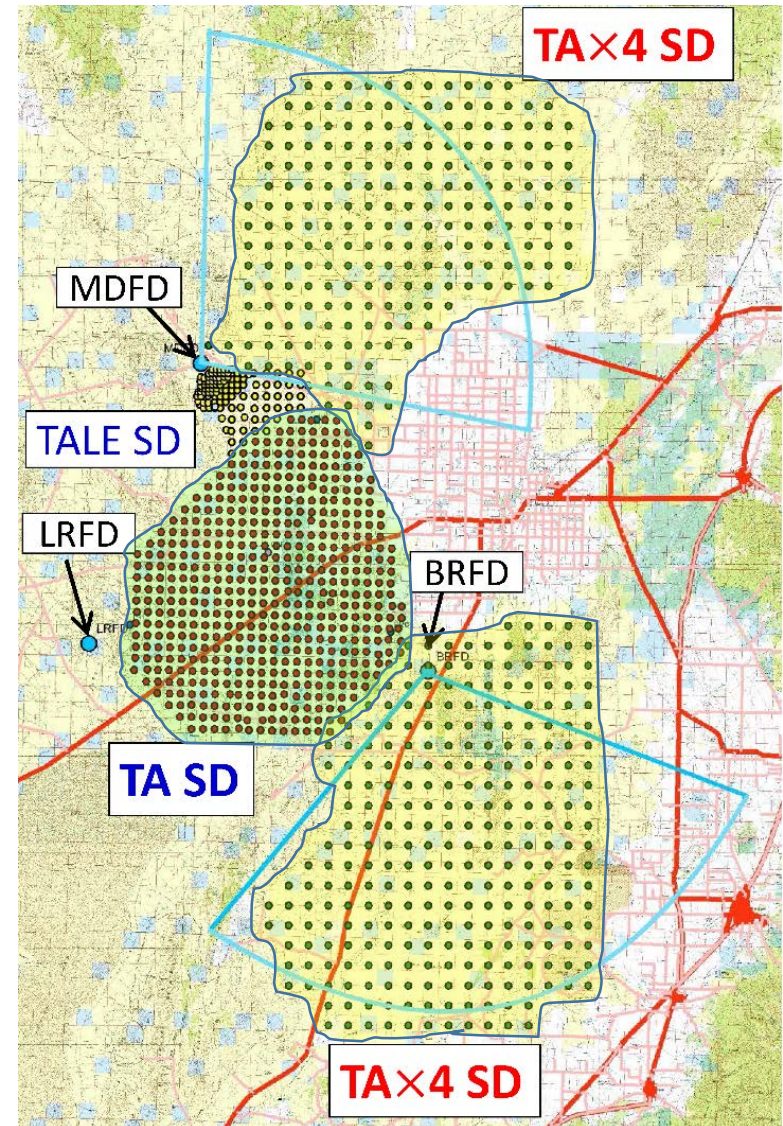
最高エネルギー宇宙線
2020年: TA19年分: ~300事象

3スポットの
場合の予想



2025年: TA40年分: ~600事象

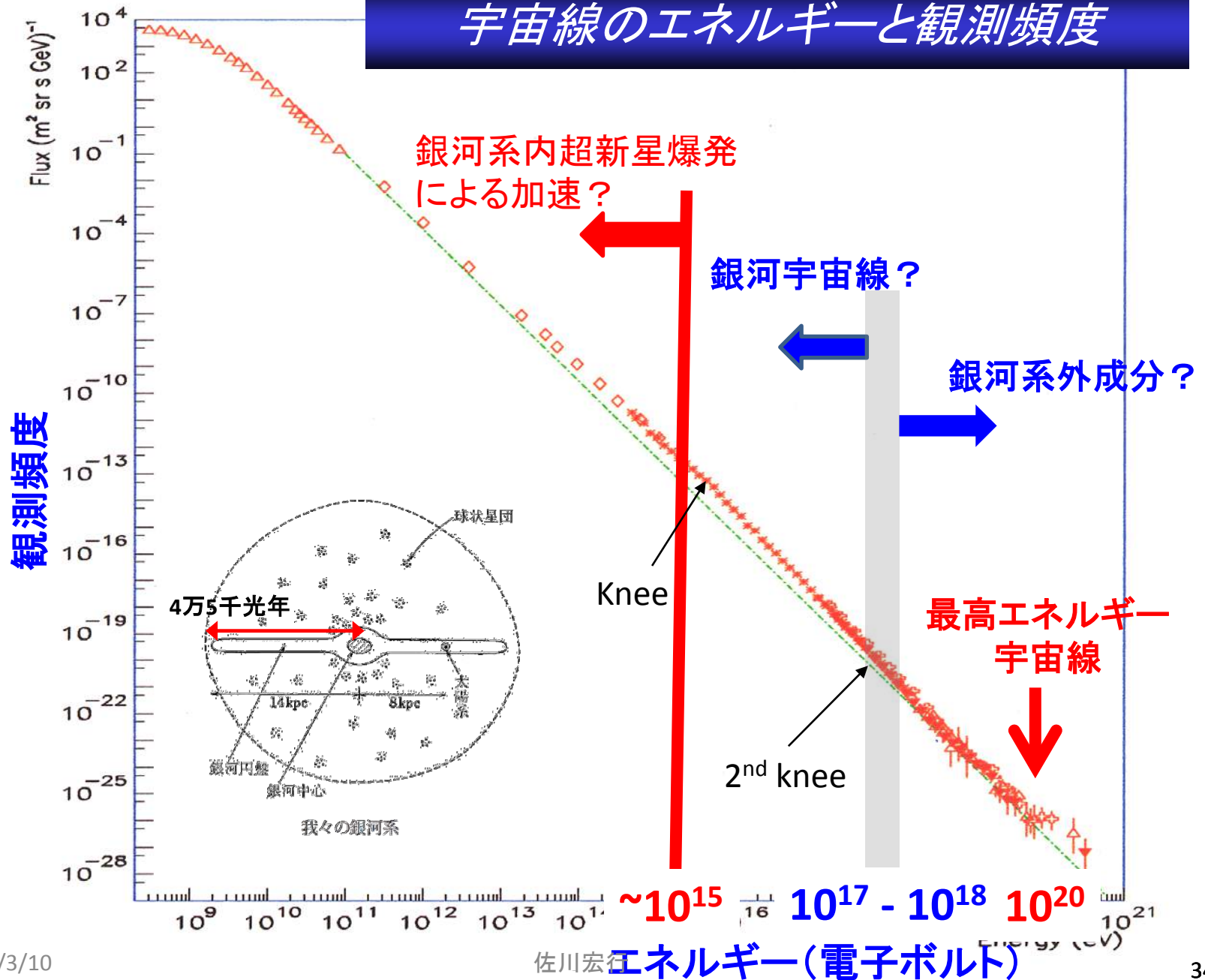
佐川宏行



概要

- 最高エネルギー宇宙線の観測と物理
- テレスコープアレイ(TA)装置
- TAの最近のおもしろい結果
- その他の研究
- 国際化の中で

宇宙線のエネルギーと観測頻度

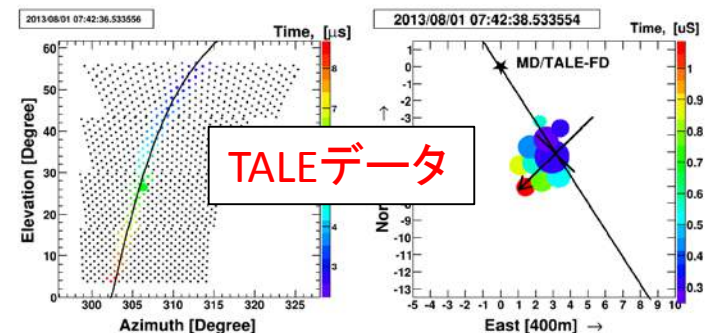
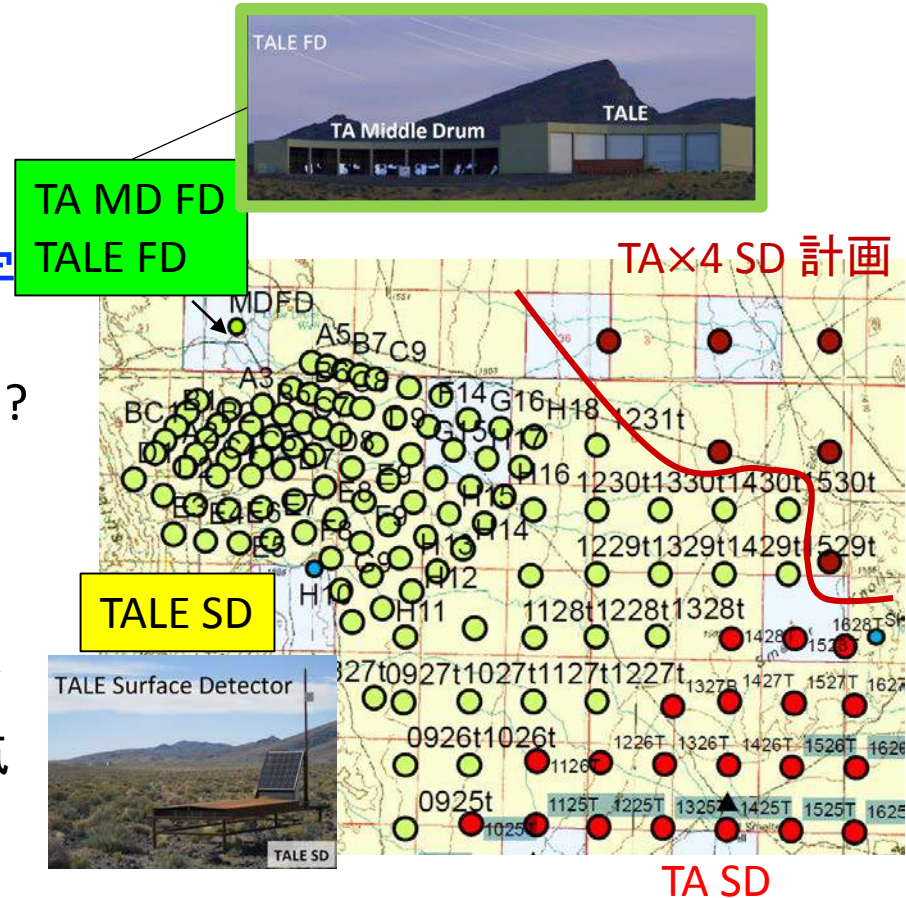


TALE (TA Low-energy Extension)

- $E = 10^{15.6} - 10^{19} \text{ eV}$
- Second knee at $\sim 10^{17.5} \text{ eV}$?
- 銀河系宇宙線から銀河系外宇宙線へ遷移?
 - $10^{17} \sim 10^{18} \text{ eV}$ で質量組成の変化?
- LHC p+p反応 ($7 \times 10^{12} \text{ eV} \times 7 \times 10^{12} \text{ eV}$)
 10^{17} eV 宇宙線空気シャワーと等価
 - ねらい
 - 最近エネルギーの加速器実験データ $\rightarrow$ air shower simulation $\leftrightarrow$ 宇宙線空気シャワーデータ

建設

- **TALE FD**: 10台建設済 $\rightarrow$ 稼働
- **TALE SD**: 105台中35台設置 $\rightarrow$ 部分稼働

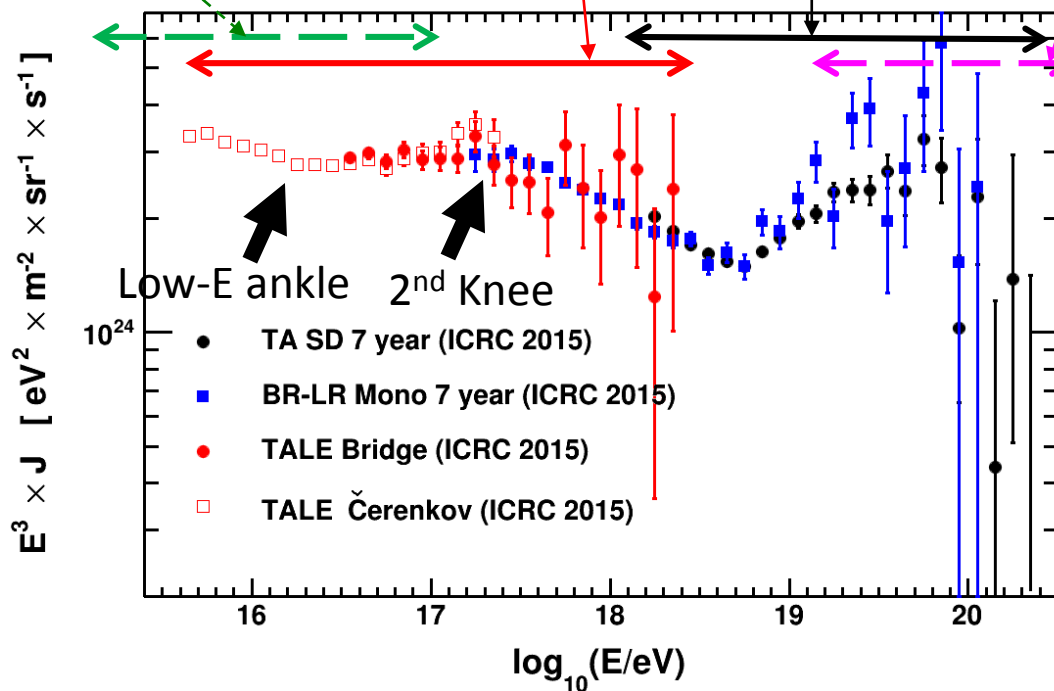


NICHE + TALE + TA + TAx4

(提案中)

全FDと
部分的にSD稼働

(提案中)



黒: TAの測定結果
赤: TALEの測定結果

最高エネルギー宇宙線の起源解明を基軸とし、
5桁 のエネルギー領域に渡って ($10^{15.0} \sim >10^{20.8}$ eV)
宇宙線の到来方向、エネルギーとXmax(組成) の測定

2015年度から5年計画でTALE SDの科研費
が採択(代表: 大阪市大荻尾先生)

2016/3/10

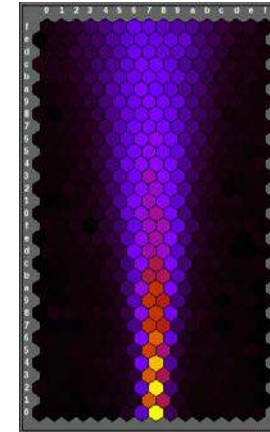
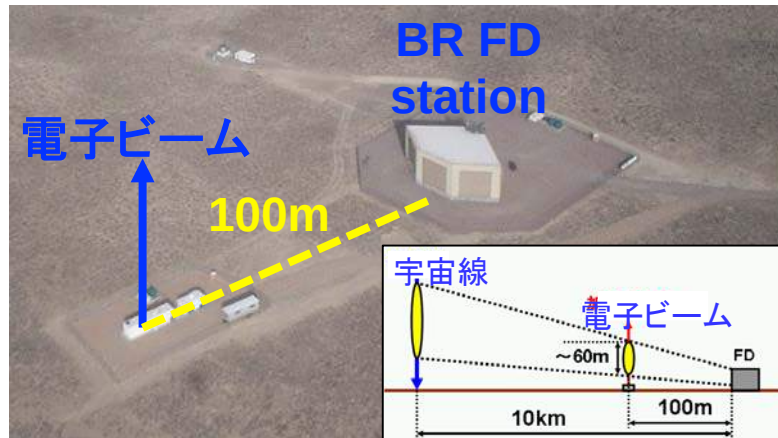
NICHE: Non-Imaging Cherenkov detector
PMTアレイ(部分的に建設中)

佐川宏行

2014年度から科研費採択(代表: 大阪市大常定先生)

電子加速器と望遠鏡較正

宇宙線研が中心となり、KEK加速器グループと共同開発製作



FDで撮像された
データのイメージ

- 40-MeV, 10^9 個の電子 (典型例) → 疑似シャワー
- End-to-end FD エネルギー較正

• 実データ

- ELS
 - 電子のエネルギーと
ビーム電流をモニタ
 - FDの測定値: FADC カウント

比較

• MC データ

- シャワー生成
 - Geantシミュレーション
- FD シミュレーション・再構成
 - TA オフラインソフトウェア

・もう一つの利用

- ・宇宙線の電波観測の開発研究

概要

- 最高エネルギー宇宙線の観測と物理
- テレスコープアレイ(TA)装置
- TAの最近のおもしろい結果
- その他の研究
- 国際化の中で

TAサイトにおけるバラエティに富んだ 国際共同実験

- TA外のグループとTAとのTAサイトでの共同実験

- TAとAugerの共同研究(実験、解析)

- • Auger標準光源(ドイツKIT+TA)@TAサイト

- • Auger地表検出器(コロラド鉱山大など+TA)@TAサイト

- TA/Auger 全天異方性解析($E > 10^{19}$ eV): 出版済

- 超高エネルギー宇宙線を電波で観測する試験

- • 電波エコー(TA/BNL/カンザス大/ネブラスカ大/宇宙線研/極地研)

- 分子制動放射(ドイツKIT/シカゴ大、甲南大+TA)+電子加速器

- 氷の中のアスカリアン効果(千葉大学/ウィスコンシン大など+TA)+電子加速器

- 南極のニュートリノグループ有志による

- 宇宙からの観測との共同実験

- • JEM-EUSOとTA-EUSO

- 新望遠鏡の開発試験

- FAST(シカゴ大その他+TA): 低価格

- • 雷と同期したTA SDバースト事象

- TAサイトでの雷観測: TA/LMA(ニューメキシコ工科大+TA)

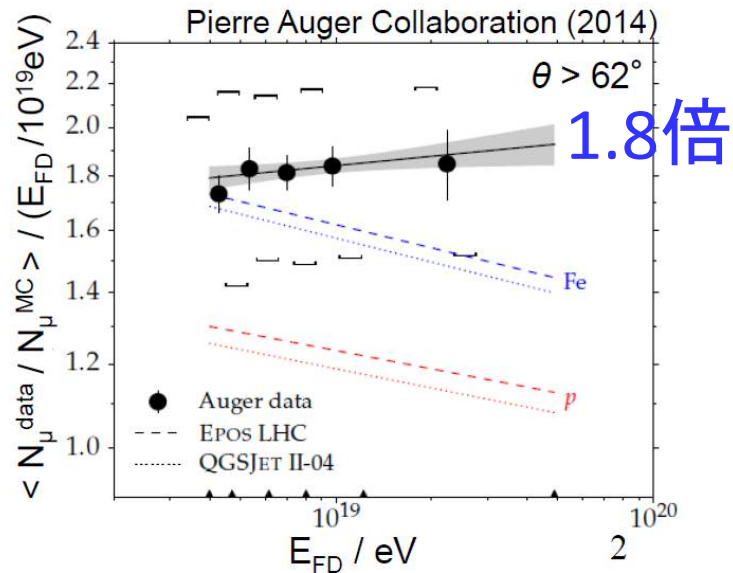
オプトコプター*搭載Auger光源をTAサイトの 大気蛍光望遠鏡で撮像 (2012年10月)

* 8枚ローター型ラジコン飛行体



Augerの水タンク地表検出器→TAサイトへ

Augerが得た空気シャワーの**ミュオン数過剰**をTAサイトで検証



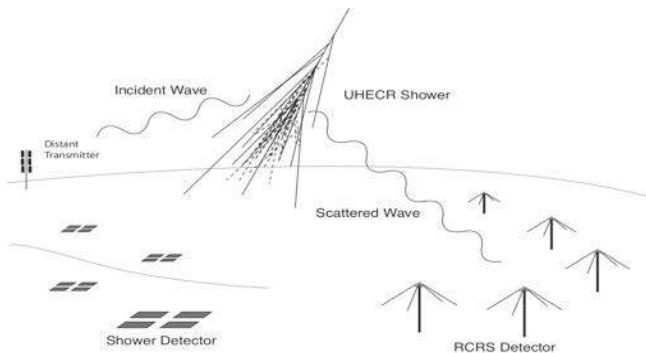
- Auger SD:水チェレンコフタンク
 - ミュオンに感度
- TA SD:シンチレータ
 - 電磁成分に感度



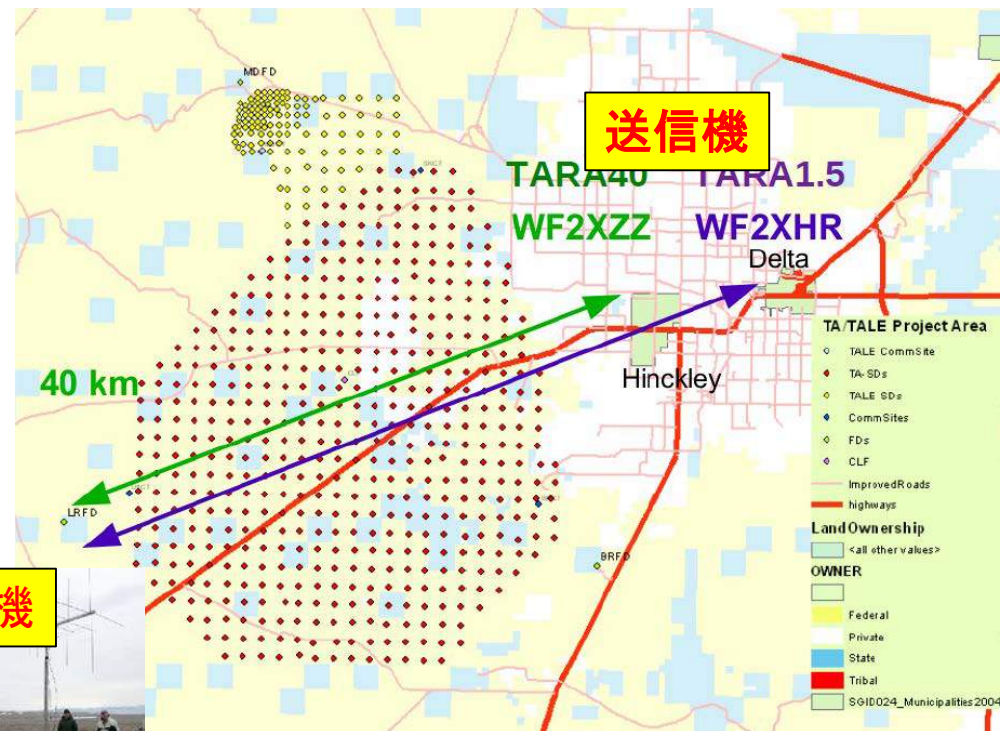
TAの空気シャワー事象と
同期したAuger水タンクの
信号取得！

TARA (TA Radar)

- 宇宙線空気シャワーからの反射電波エコー観測試験



- TARA1.5
 - 2011年4月-2012年7月
 - 54.1 MHz @ 1.5 kW
- TARA40
 - 2013年夏~
 - 54.1 MHz @ 40 kW



受信機

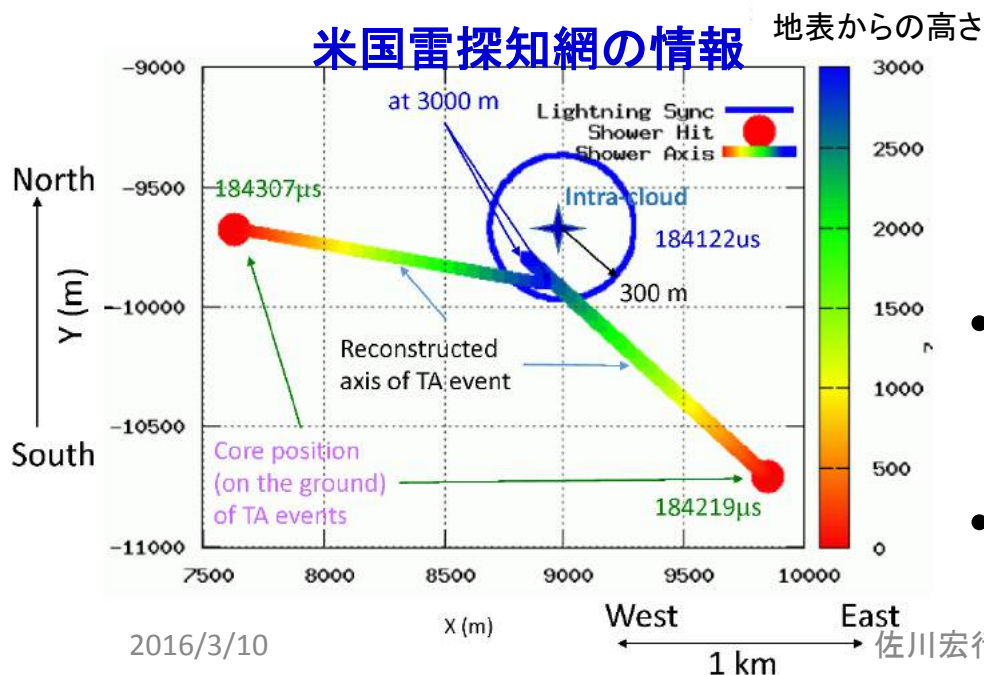
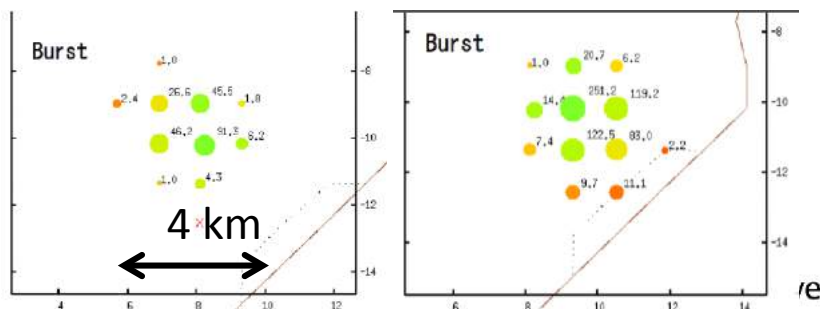


佐川 宏行

雷と同期したTAノバースト事象の発見

- 1ミリ秒に3以上のシャワートリガー現象が5年間に10例
 - 通常の100万倍多い
- 雷と同期した地表検出器事象

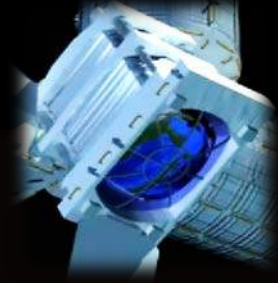
- **LMA: Lightning Mapping Array**
 - VHF受信機アレイ
 - ニューメキシコ工科大学 (NMT) で開発: 雷の三次元再構成



- この発見を受けて、仮移設したLMAのひとつ
(R. Thomas, NMT@Long Ridge)
- 現在:TAで雷検出器設置中

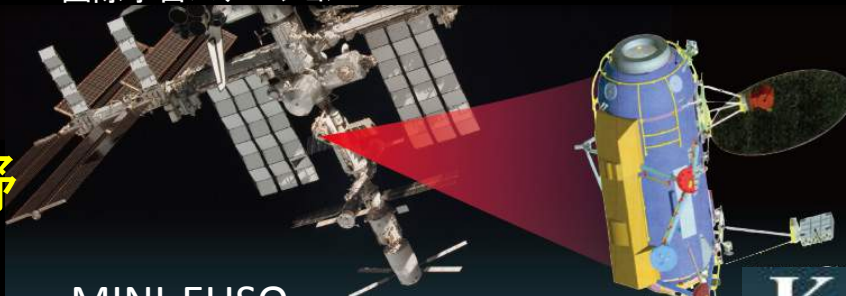
The EUSO program

最高エネルギー宇宙線大規模観測計画
—宇宙からの望遠鏡観測—



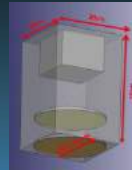
JEM-EUSO

国際宇宙ステーション



K-EUSO

MINI-EUSO



12°

EECR

Fluorescence

Cherenkov

Atmosphere

EUSO-BALLOON
(2014)
40km

TA-EUSO (2013)

佐川宏行

100km

44

大統計(TAx4の2倍)
全天ほぼ一様な視野

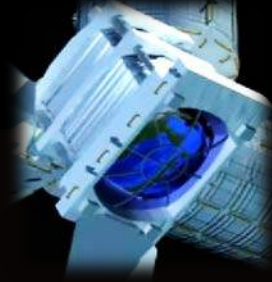
1. EUSO-TA: Ground detector at Telescope Array site: 2013-
2. EUSO-BALLOON: 1st balloon flight from Timmins, Canada (French Space Agency CNES) Aug 2014, 2017
3. MINI-EUSO (2017)
4. K-EUSO (2019)
5. JEM-EUSO (>2020+)

2016/3/10
宇宙線研も参加: TA-EUSOとPMT較正

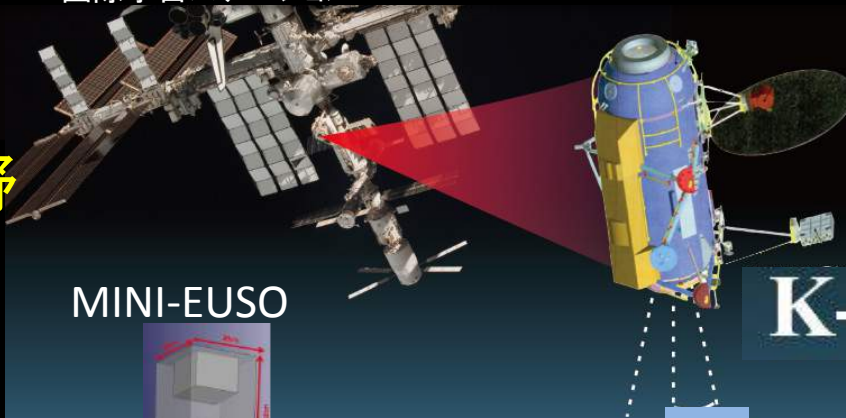
The EUSO program

最高エネルギー宇宙線大規模観測計画
—宇宙からの望遠鏡観測—

国際宇宙ステーション

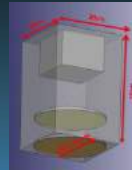


JEM-EUSO

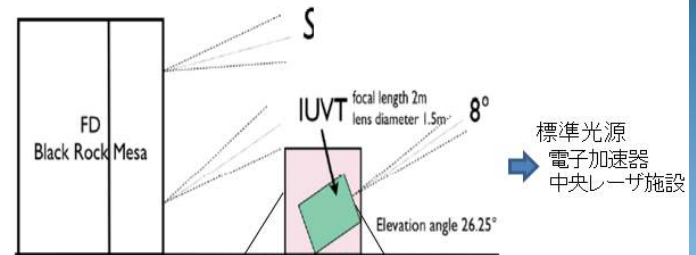


K-EUSO

MINI-EUSO



TA-EUSO: TAサイトでの試験



フレネル
レンズ

EECR

Fluo

TA-EUSO (2013)

佐川宏行

100km

45

大統計(TAx4の2倍)
全天ほぼ一様な視野

1. EUSO-TA: Ground detector at Telescope Array site: 2013-
2. EUSO-BALLOON: 1st balloon flight from Timmins, Canada (French Space Agency CNES) Aug 2014, 2017
3. MINI-EUSO (2017)
4. K-EUSO (2019)
5. JEM-EUSO (>2020+)

宇宙線研も参加: TA-EUSOとPMT校正

The EUSO program

最高エネルギー宇宙線大規模観測計画
—宇宙からの望遠鏡観測—

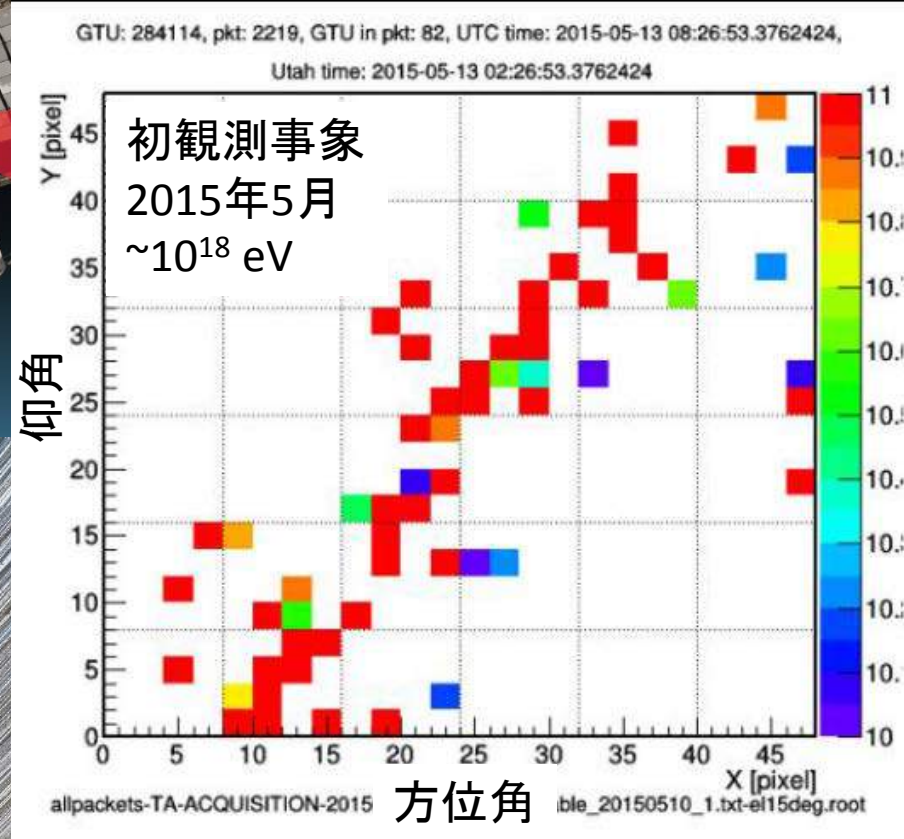
国際宇宙ステーション



大統計(TAx4の2倍)
全天ほぼ一様な視野

1. EUSO-TA: Ground
detector at Telescope
Array site: 2013-

MINI-EUSO



フレネル
レンズ

宇宙線研も参加: TA-EUSOとPMT校正

佐川宏行

100km

宇宙線のエネルギーと頻度

