



最高エネルギー宇宙線

目次

- Telescope ArrayとPierre Auger Observatory
- TA×4計画と拡張TA
- TA史上最高エネルギー宇宙線
- 今後

高エネルギー宇宙線研究部門／TA実験前代表

荻尾 彰一

予習をするなら

グラフ用紙（片対数グラフ用紙）に手書きでプロットする実習をします。
データ点と用紙は次ページに貼り付けておきます。

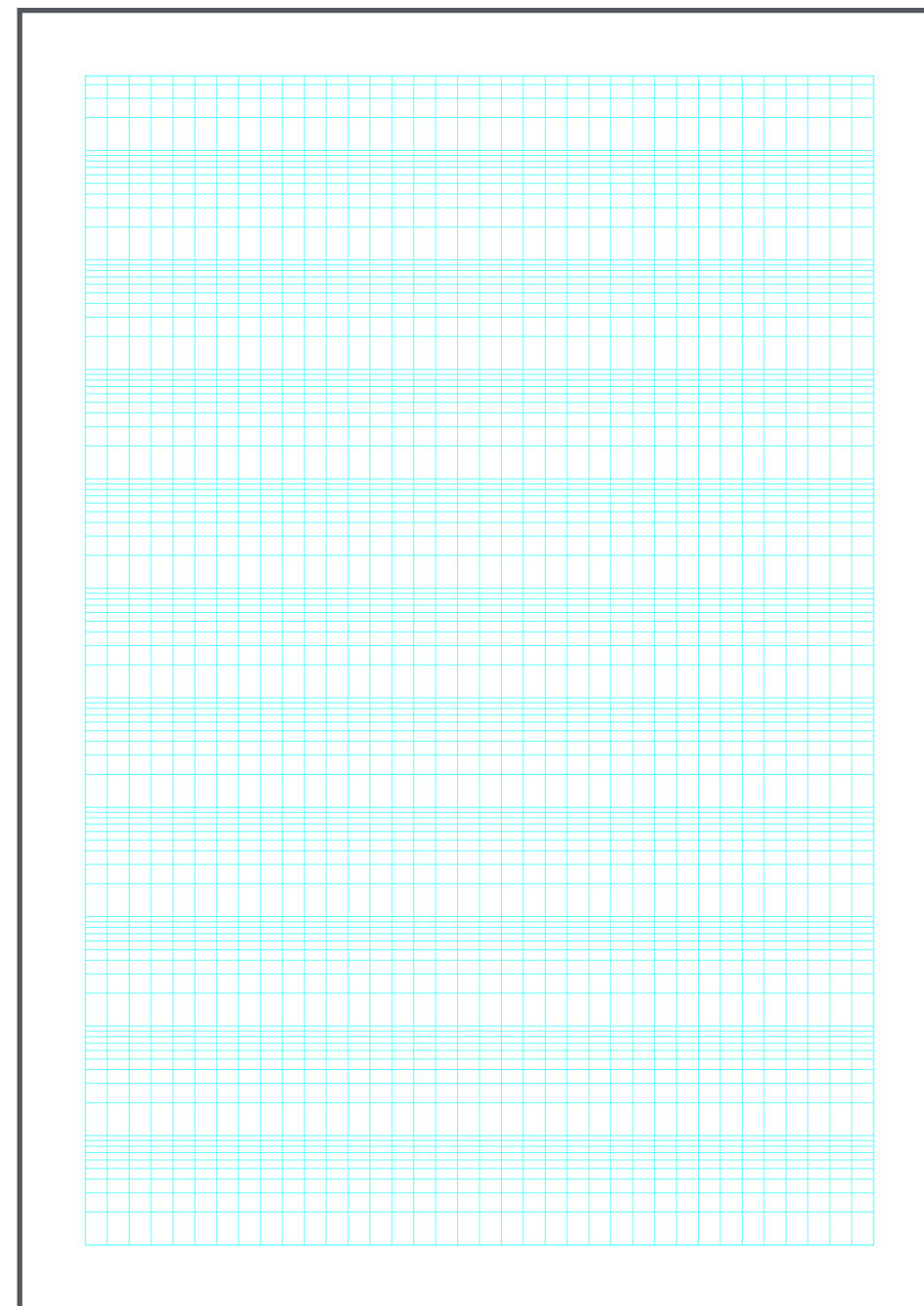
グラフ用紙への手書きプロットについて、不慣れな方は以下を参考に
<https://jikken.ihe.tohoku.ac.jp/science/advice/make-graphs.html>

実習で使うデータとグラフ用紙

(グラフ用紙はA4に印刷すると良いです)

log(E/eV) J [eV⁻¹ m⁻² sr⁻¹ s⁻¹]

18.25	3.434e-31
18.35	1.625e-31
18.45	7.378e-32
18.55	3.508e-32
18.65	1.724e-32
18.75	8.445e-33
18.85	4.636e-33
18.95	2.468e-33
19.05	1.376e-33
19.15	7.481e-34
19.25	4.136e-34
19.35	2.111e-34
19.45	9.884e-35
19.55	5.634e-35
19.65	2.720e-35
19.75	1.827e-35
19.85	7.745e-36
19.95	2.475e-36
20.05	1.568e-36
20.15	1.233e-37
20.25	1.931e-37



最高エネルギー宇宙線研究で

解明したいこと

- 大きなエネルギーはどこまで？
- その仕組み = 宇宙最大の
高エネルギー現象とは？

①そのエネルギーは？

②その源は？



最高エネルギー
宇宙線

③どのくらいの到来頻度？

④どうやってつかまえる（見る）？

①そのエネルギーは？

②その源は？



最高エネルギー
宇宙線

③どのくらいの到来頻度？

④どうやってつかまえる（見る）？

大きなエネルギーはどこまで？

観測史上最高エネルギーは

300,000,000,000,000,000,000,000eV

= 3かける10の20乗 = 3×10^{20}



最高エネルギー

宇宙線

①そのエネルギーは？

$$= 3 \times 10^{20} \text{eV}$$

可視光より20桁以上大きい
(観測史上最高記録)

②その源は？



最高エネルギー
宇宙線

③どのくらいの到来頻度？

④どうやってつかまえる(見る)？

①そのエネルギーは？

$$= 3 \times 10^{20} \text{eV}$$

可視光より20桁以上大きい
(観測史上最高記録)

②その源は？



最高エネルギー
宇宙線

③どのくらいの到来頻度？

④どうやってつかまえる(見る)？

①そのエネルギーは？

$$= 3 \times 10^{20} \text{eV}$$

可視光より20桁以上大きい
(観測史上最高記録)

②その源は？

? わかっていません



最高エネルギー
宇宙線

③どのくらいの到来頻度？

④どうやってつかまえる(見る)？

候補は考えられているでしょ？

3×10^{20} eVは、
とんでももない高エネルギーなので、
候補となる宇宙現象は限られている
(宇宙物理学の常識では…)

銀河と銀河の衝突

衝突しているNGC4038(左)とNGC4039(右)

NASA, ESA Hubble
Composition & ©: Domingo Pestana



①そのエネルギーは？

$$= 3 \times 10^{20} \text{eV}$$

可視光より20桁以上大きい
(観測史上最高記録)

②その源は？

? わかっていません
候補は
銀河と銀河の衝突、など



最高エネルギー
宇宙線

③どのくらいの到来頻度？

④どうやってつかまえる(見る)？

①そのエネルギーは？

$$= 3 \times 10^{20} \text{eV}$$

可視光より20桁以上大きい
(観測史上最高記録)

②その源は？

? わかっていません
候補は
銀河と銀河の衝突、など



最高エネルギー
宇宙線

③どのくらいの到来頻度？

④どうやってつかまえる(見る)？

単位時間、単位面積、単位立体角、
単位エネルギー幅、あたりの
宇宙線到来数 =

エネルギースペクトル

実際にグラフをプロットしてみよう！

どれくらいの頻度でやってくる？

300,000,000,000,000,000,000 eV

というとんでもない高エネルギー粒子

到来頻度は、1 km²に100年に1個

← とても少ない！

1,000km²ってどれくらい？

①東大柏キャンパス	0.2 km ²
②文京区	11 km ²
③柏市	110 km ²
④東京23区	630 km ²
⑤琵琶湖	700 km ²

①そのエネルギーは？

$$= 3 \times 10^{20} \text{eV}$$

可視光より20桁以上大きい
(観測史上最高記録)

②その源は？

? わかっていません
候補は
銀河と銀河の衝突、など



最高エネルギー
宇宙線

③どのくらいの到来頻度？

とても少ない！

~1km²に100年に1個

④どうやってつかまえる(見る)？

①そのエネルギーは？

$$= 3 \times 10^{20} \text{eV}$$

可視光より20桁以上大きい
(観測史上最高記録)

②その源は？

? わかっていません
候補は
銀河と銀河の衝突、など



最高エネルギー
宇宙線

③どのくらいの到来頻度？

とても少ない！

~1km²に100年に1個

④どうやってつかまえる(見る)？

どうやってつかまえる（見る）？

1個の高エネルギー宇宙線  空気中の原子核と衝突して、2次粒子を生成する

空気の厚さにして $100\text{g}/\text{cm}^2$ 進むごとに粒子を多重（5個くらい）生成（ざっくりすぎる説明だけど）

どうやってつかまえる（見る）？

1個の高エネルギー宇宙線 → 多数の放射線

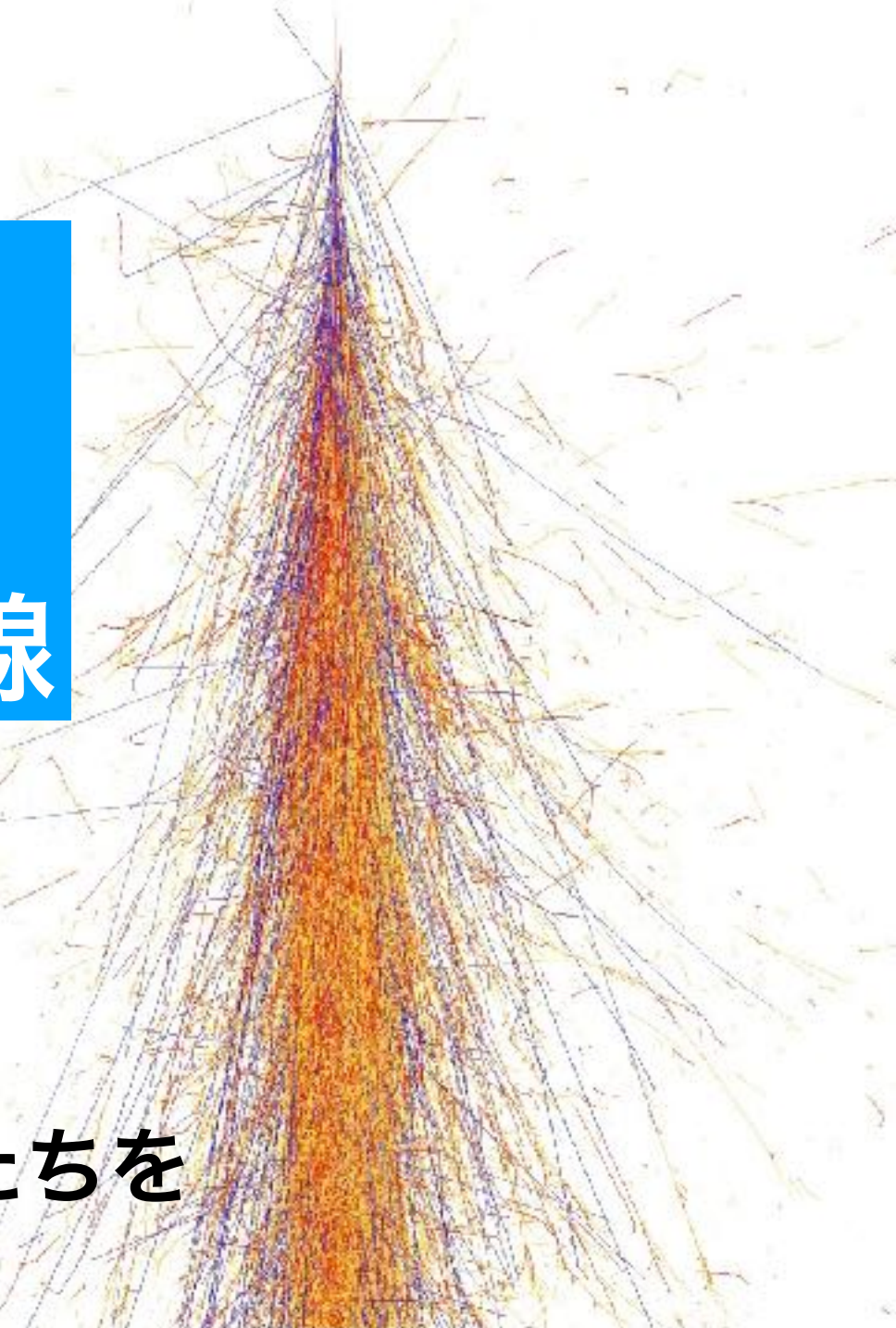
大気上空で 10^{20} eVの宇宙線



大気の底で1000億個の放射線

「空気シャワー」

大気の底=地上に到来するこれらの粒子たちをとらえればよい

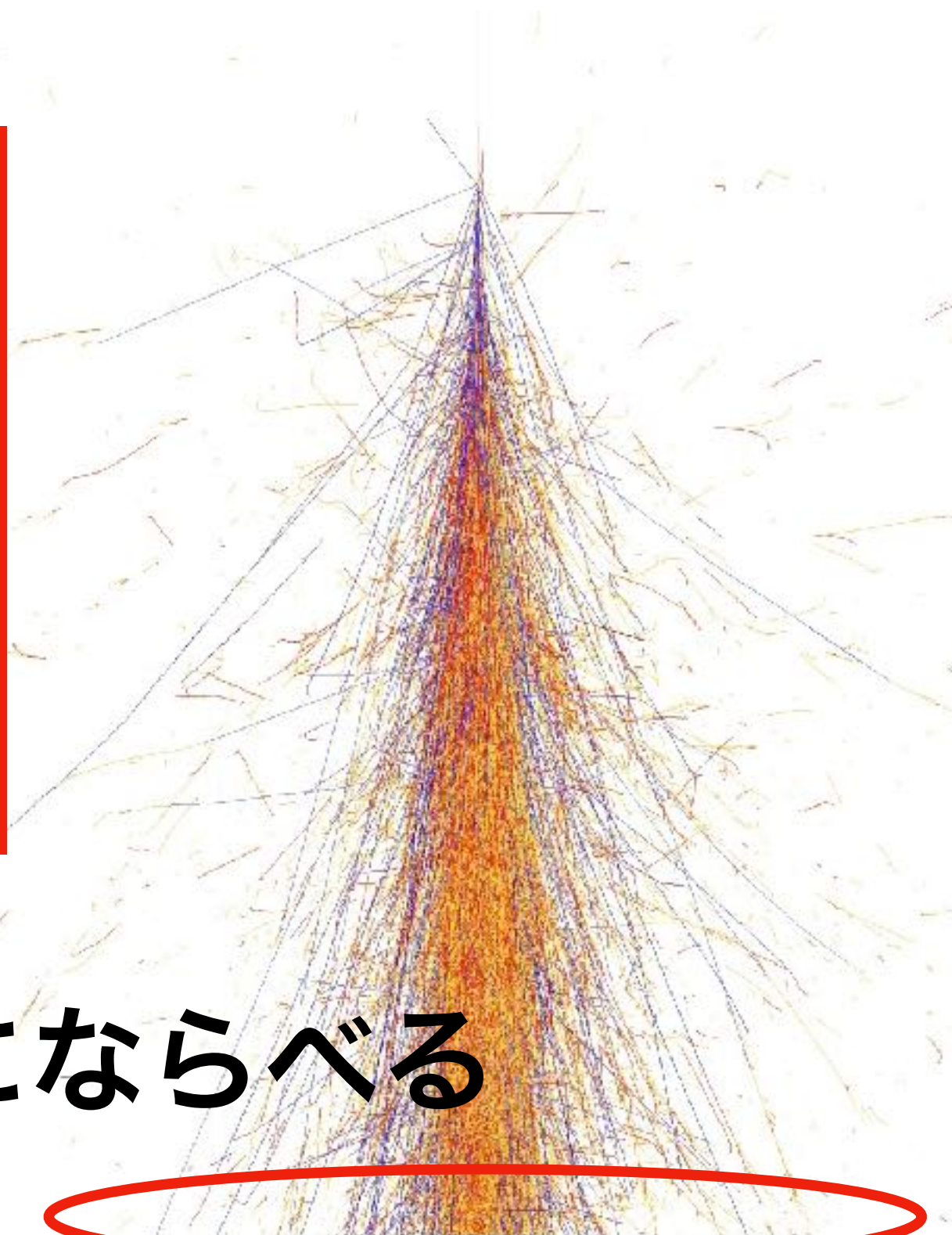


どうやって捕まえる（見る）？

方法①

**地上に落ちてきた
空気シャワー粒子
をつかまえる**

放射線検出器を地上にならべる



どうやって捕まえる (見る) ?



どうやって捕まえる（見る）？

方法①

地上に落ちてきた
空気シャワー粒子
をつかまえる

放射線検出器を地上にならべる



どうやって捕まえる（見る）？

方法②

このあたりの空気が光る



大気の発光を検出する

夜空の写真撮る（撮りまくる）



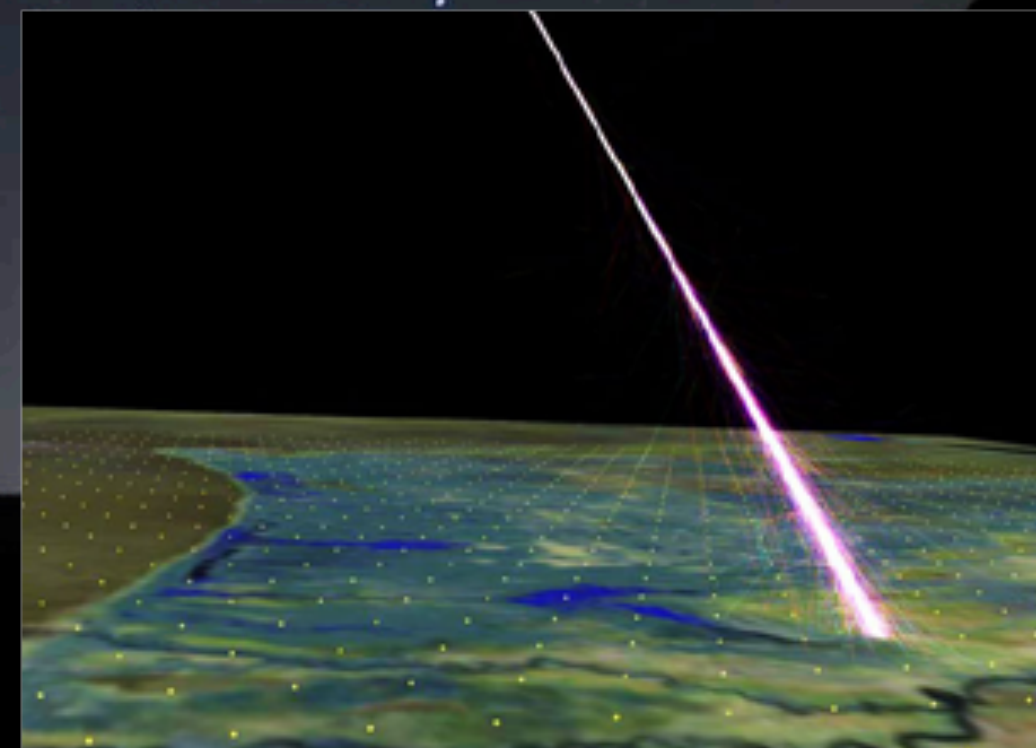
どうやって捕まえる (見る) ?

方法②

このあたりの空気が光る



大気の発光を検出する



どうやって捕まえる（見る）？

方法②

このあたりの空気が光る



大気の発光を検出する

夜空の写真撮る（撮りまくる）



2つの方法の比較

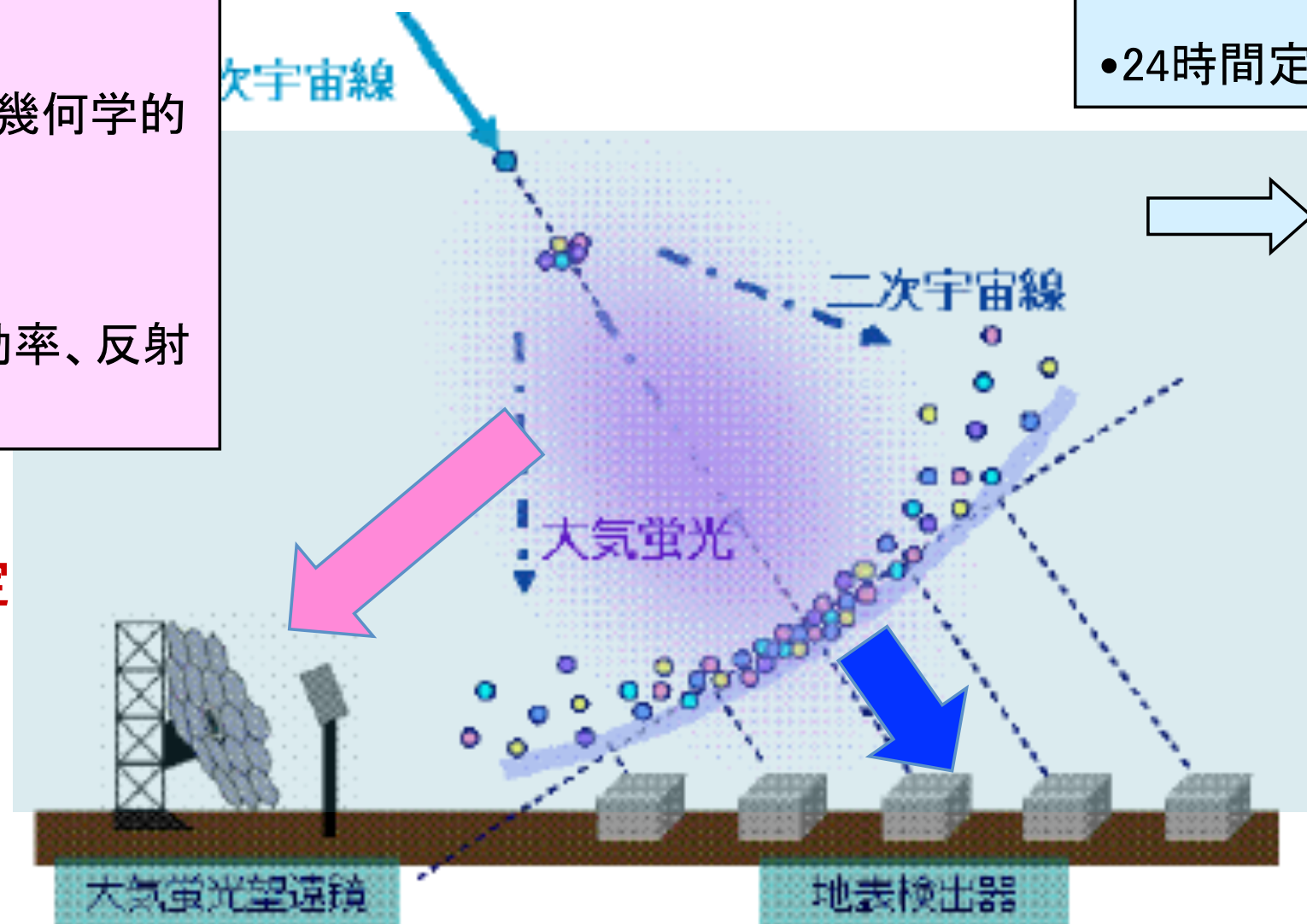
大気蛍光法

- 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
- 晴天&夜間のみ
- 蛍光の散乱、量子効率、反射率などの補正

地表検出器法

- 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
- 24時間定常観測

→ 粒子種同定



高統計精度
点源探索

①そのエネルギーは？

$$= 3 \times 10^{20} \text{eV}$$

可視光より20桁以上大きい
(観測史上最高記録)

②その源は？

? わかっていません
候補は
銀河と銀河の衝突、など



最高エネルギー
宇宙線

③どのくらいの到来頻度？

とても少ない！
~1km²に100年に1個

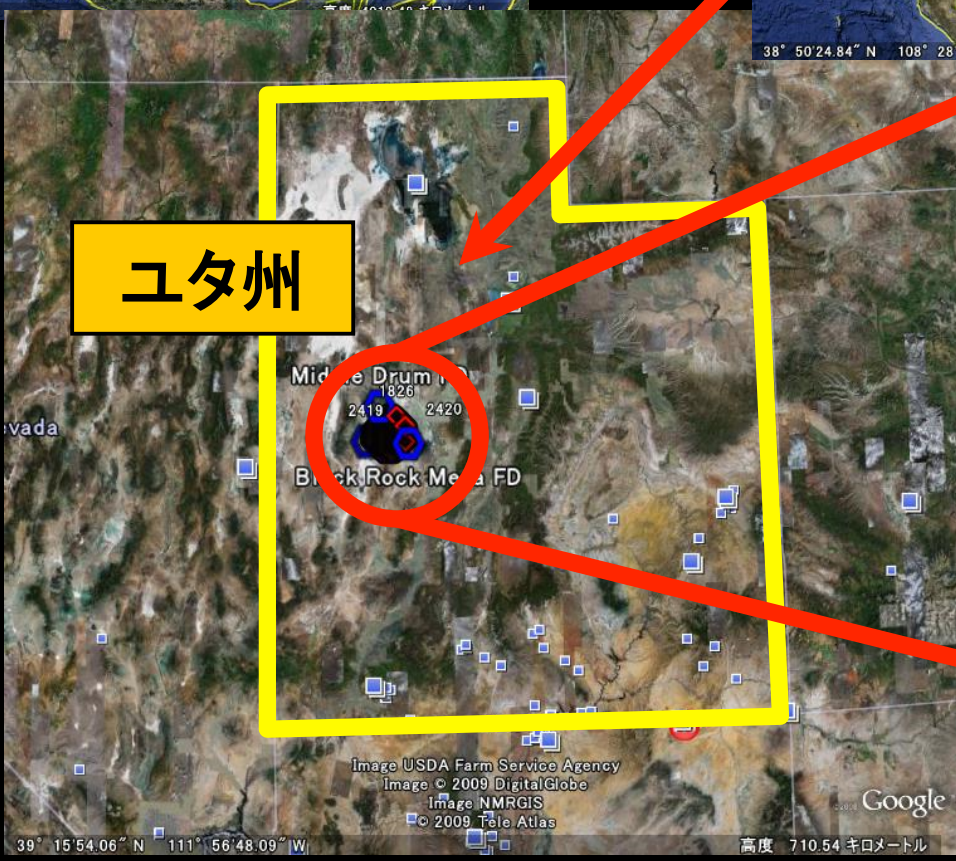
④どうやってつかまえる(見る)？

空気シャワーを捕まえる！

宇宙線望遠鏡実験 (TA実験)

- 日本、米国、ロシア、韓国、ベルギー、チェコ、スロベニア、ポーランド
- 35 研究機関、約140人の共同研究者
- 2003年から建設開始、2008年完成
- アメリカ合衆国ユタ州南西部

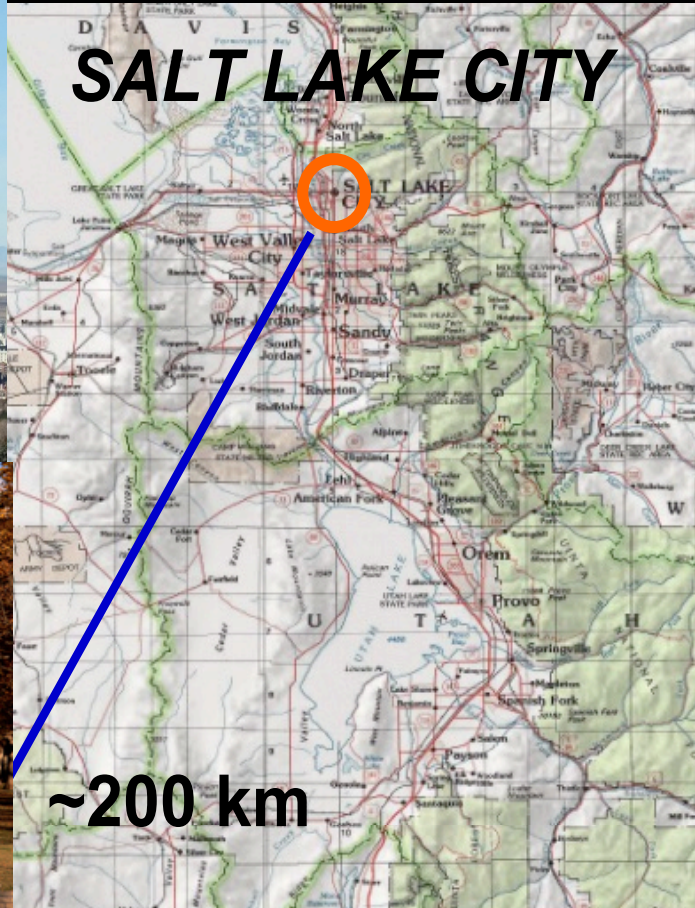
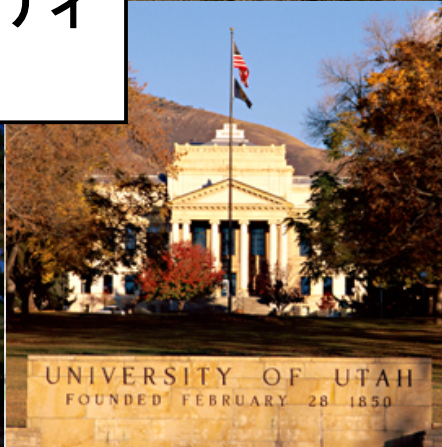
宇宙線望遠鏡実験 (TA実験)



宇宙線望遠鏡実験 (TA実験)



ソルトレイクシティ
ユタ大学



SALT LAKE CITY

~200 km



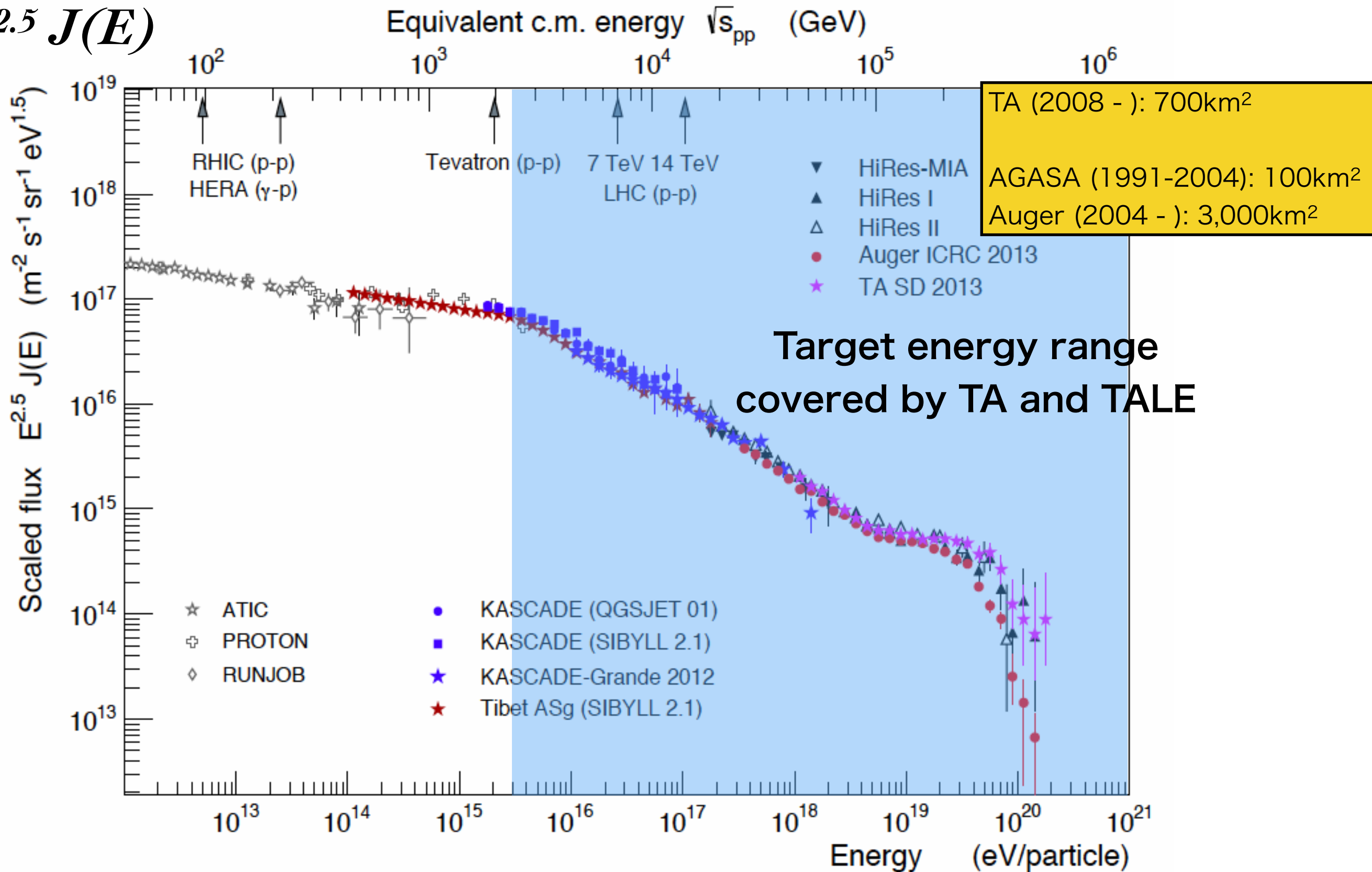
DELTA

ユタ大学附属
ミラード郡宇宙線研究センター



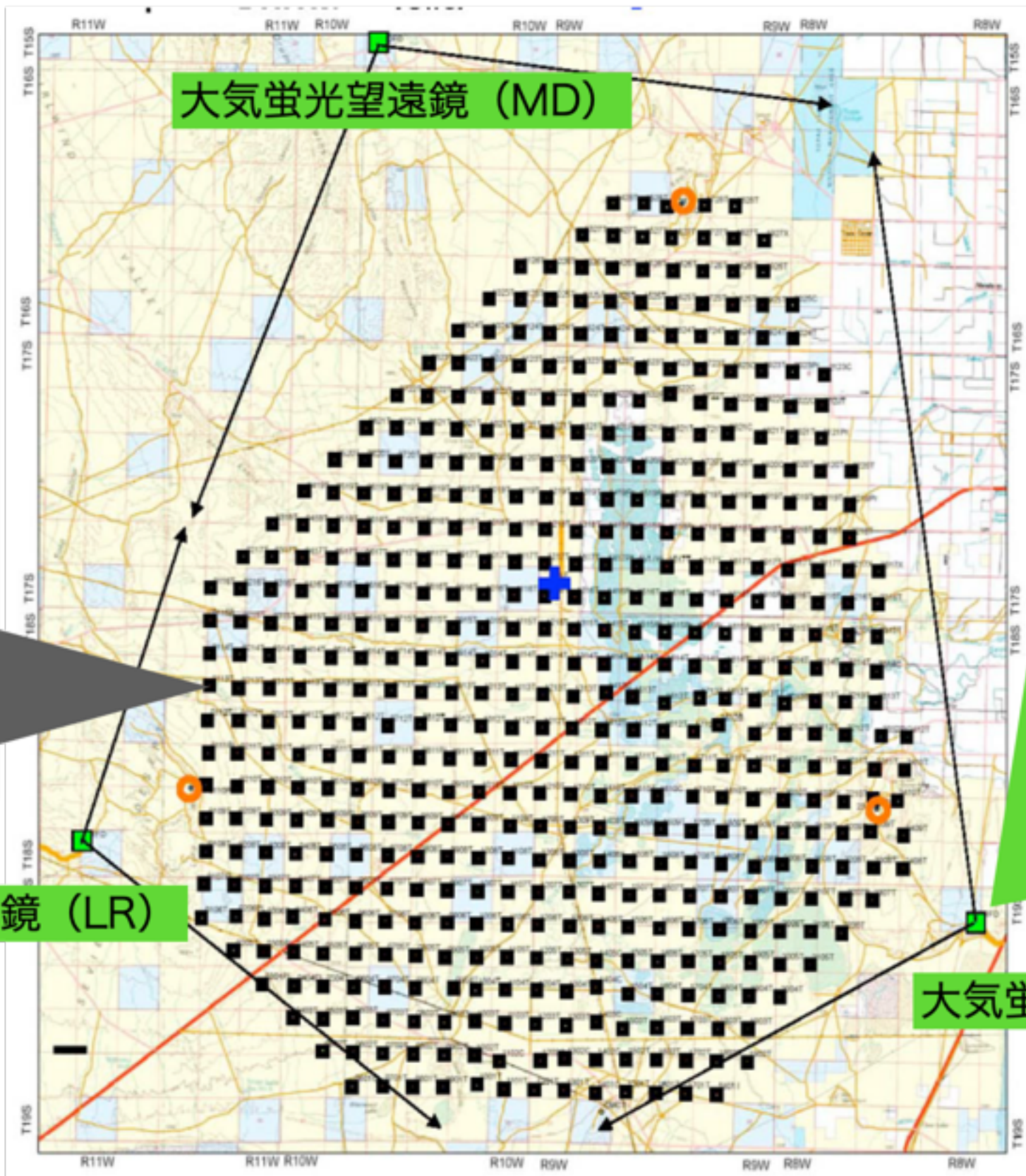
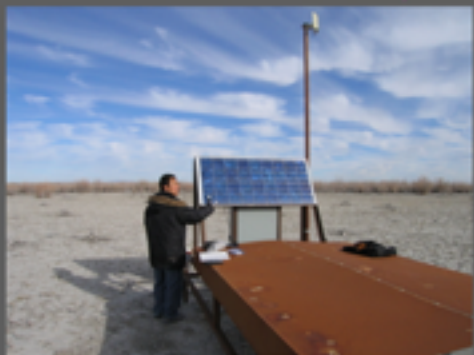
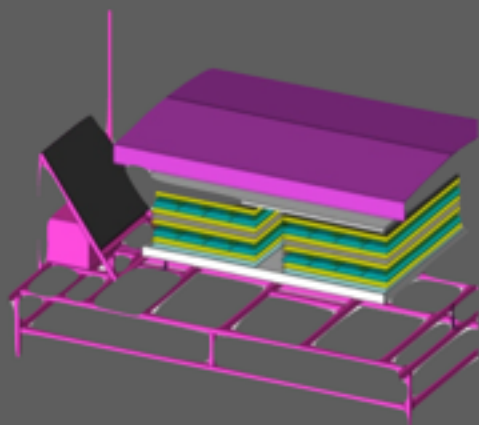
Telescope Array (TA) : UHECR observatory in the northern hemisphere

$E^{2.5} J(E)$



Telescope Array

地表粒子検出器
3m²、507台
1.2km間隔

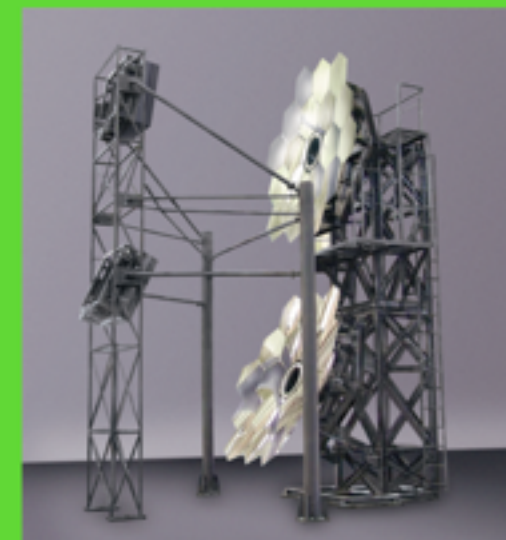


大気蛍光望遠鏡 (MD)

大気蛍光望遠鏡 (LR)

大気蛍光望遠鏡 (BRM)

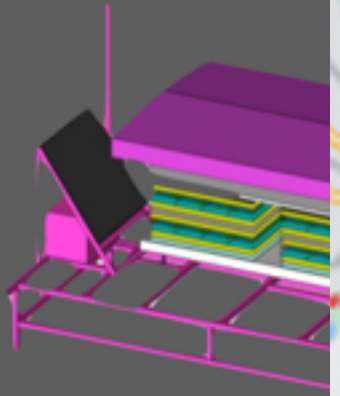
大気蛍光望遠鏡
口径3m、38台
3力所



面積 ~700 km²

Telescope Array

地表粒子検
3m²、50
1.2km間



大気

面積 ~700



望遠鏡
38台
所



(RM)

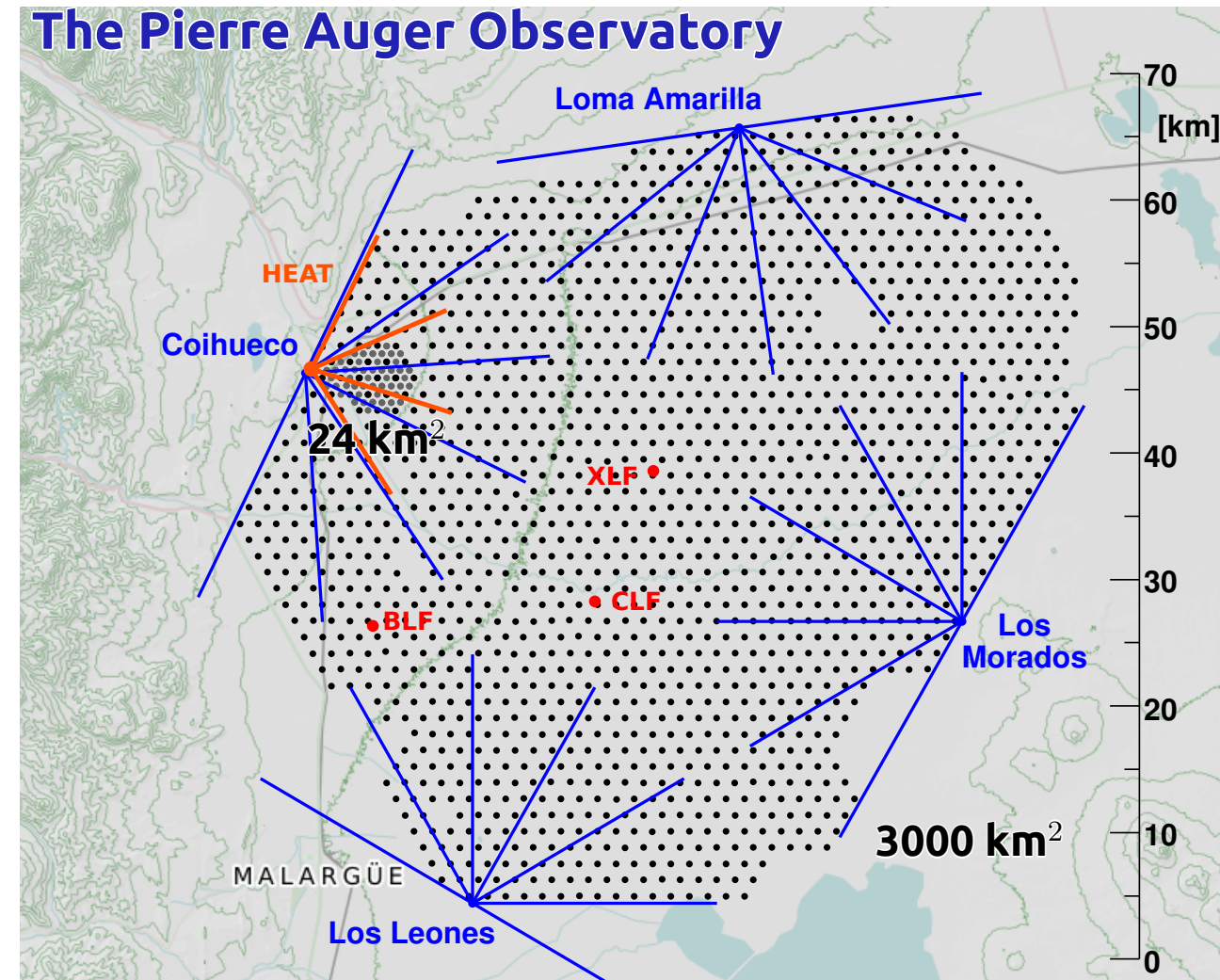
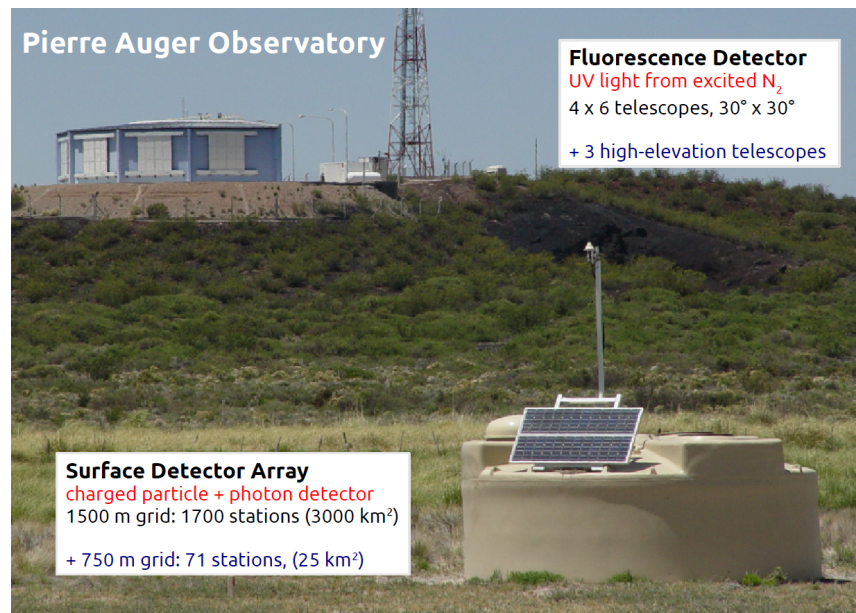
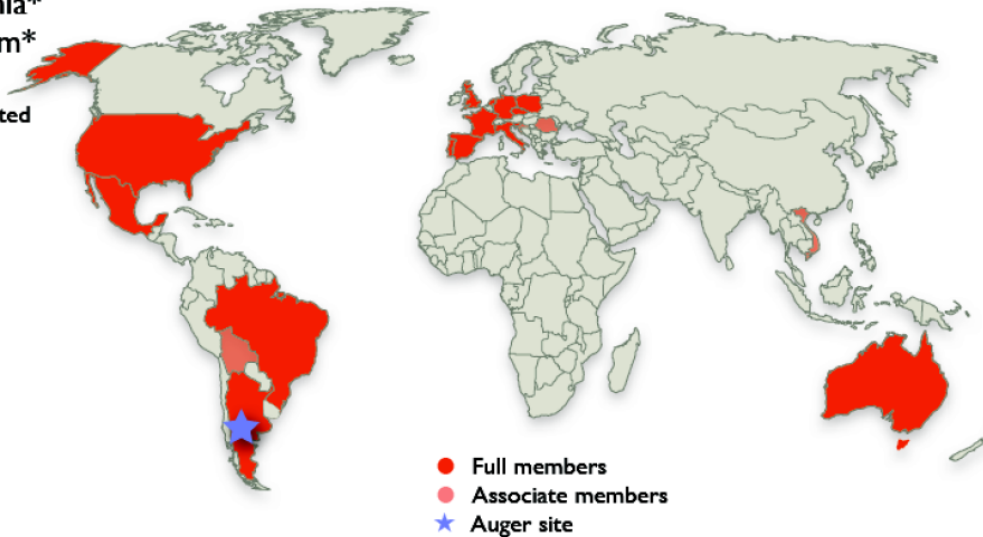
Pierre Auger Observatory

About 500 members from 19 countries

- Argentina
- Australia
- Brazil
- Croatia
- Czech Republic
- France
- Germany
- Italy
- Mexico
- Netherlands
- Poland
- Portugal
- Slovenia
- Spain
- United Kingdom
- USA

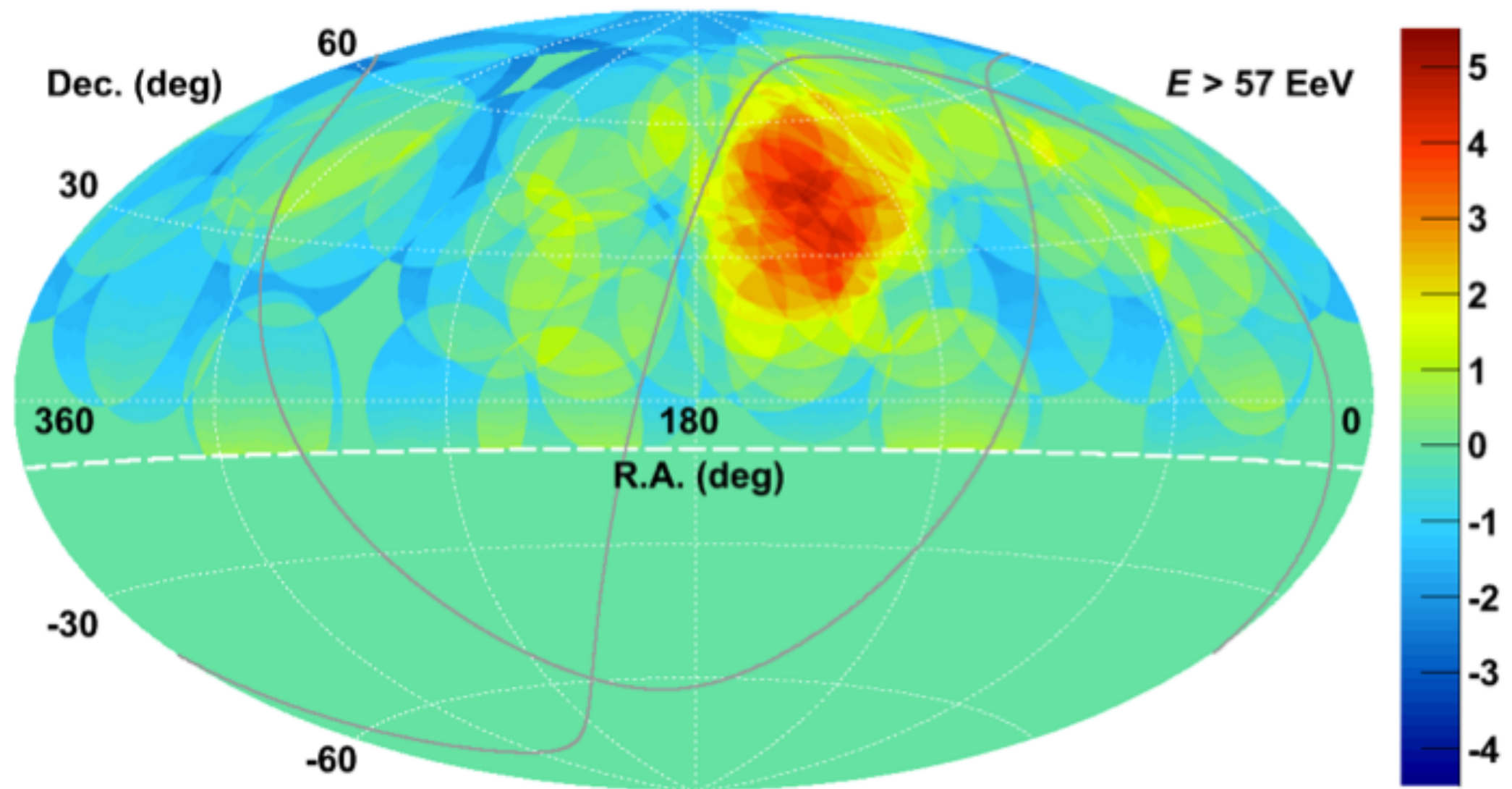
- Bolivia*
- Romania*
- Vietnam*

*Associated



Published “Hotspot” (5 yr data)

Ap. J., 790, L21(2014)



$E > 57$ EeV (Observed 72 events)

Events over-sampled using 20° circles

19 events fall in “Hotspot” centered at $\alpha = 146.7^\circ$, $\delta = 43.2^\circ$ (Expected = 4.5 events)

Li-Ma significance $\sim 5.1 \sigma$, chance probability in an isotropic sky to be 3.4σ

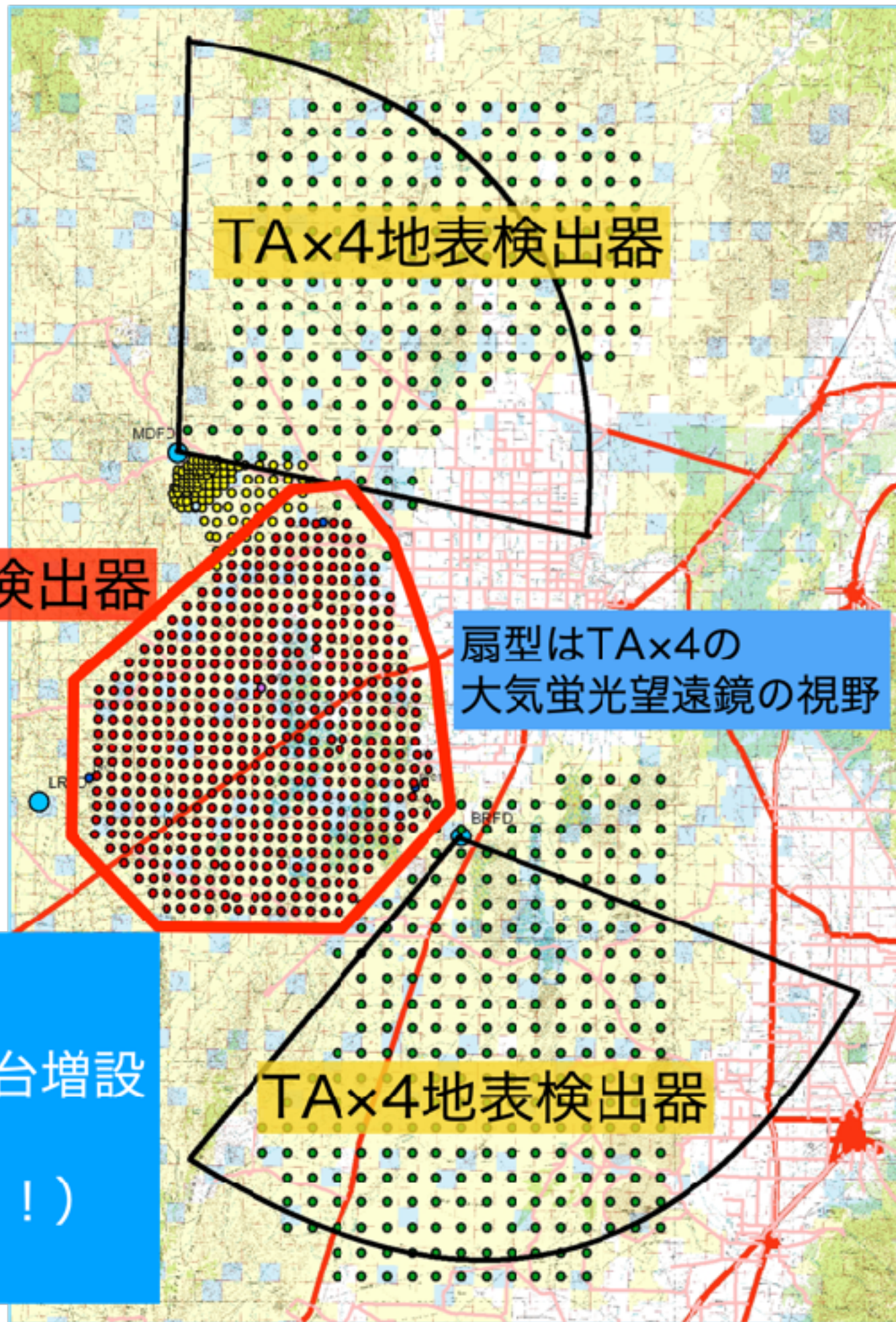
拡張テレスコープアレイ実験

- 最高エネルギー宇宙線で解明する近傍の極限宇宙 -

佐川 宏行

東京大学 宇宙線研究所

2015年3月26日 特別推進研究ヒアリング



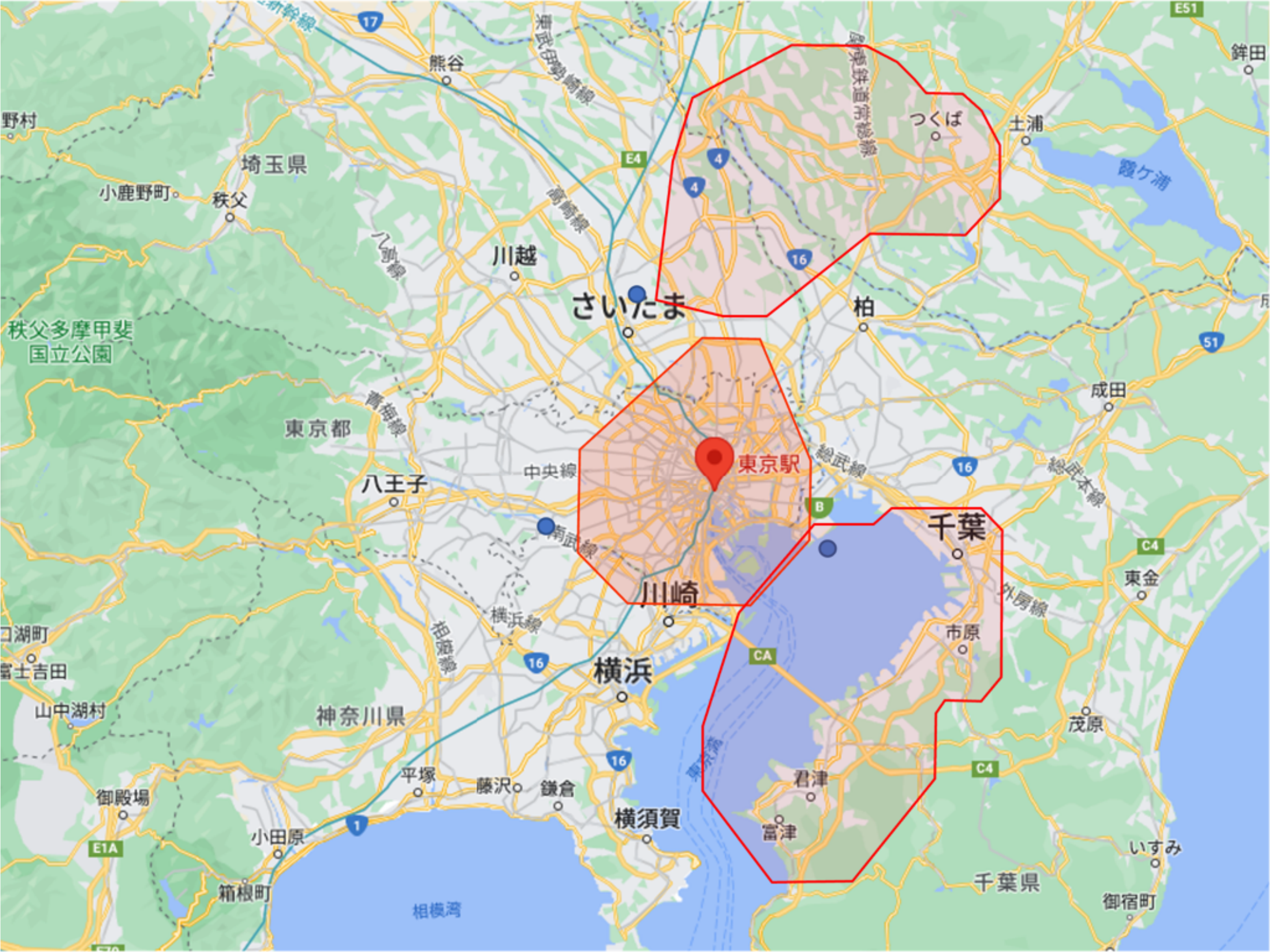
TAx4計画

現行TA実験の南北に地表検出器500台増設

→1,000台、面積3,000km²

2015年から建設開始 (予算がついた!)

2019年運用開始 (約760台)



熊谷

埼玉県

小鹿野町

秩父

川越

さいたま

つくば

土浦

霞ヶ浦

秩父多摩甲斐
国立公園

東京都

八王子

中央線

東京駅

千葉

川崎

横浜

市原

神奈川県

平塚

藤沢

鎌倉

横須賀

君津

富津

千葉県

御宿町

御殿場

小田原

箱根町

相模湾

いすみ

鉾田

51

16

16

16

E1A

E4

4

4

16

E51

C4

CA

C4

B

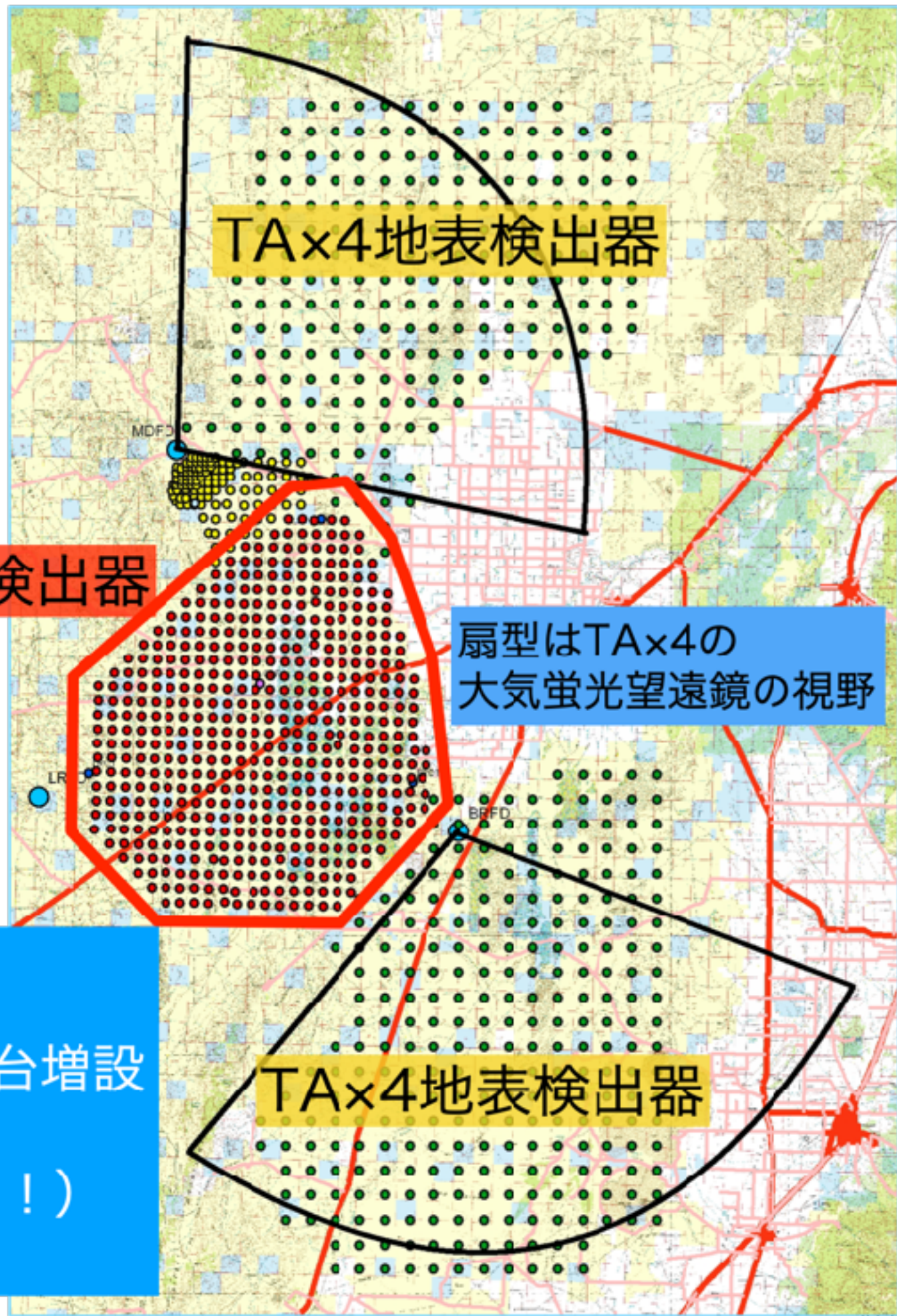
拡張テレスコープアレイ実験

- 最高エネルギー宇宙線で解明する近傍の極限宇宙 -

佐川 宏行

東京大学 宇宙線研究所

2015年3月26日 特別推進研究ヒアリング



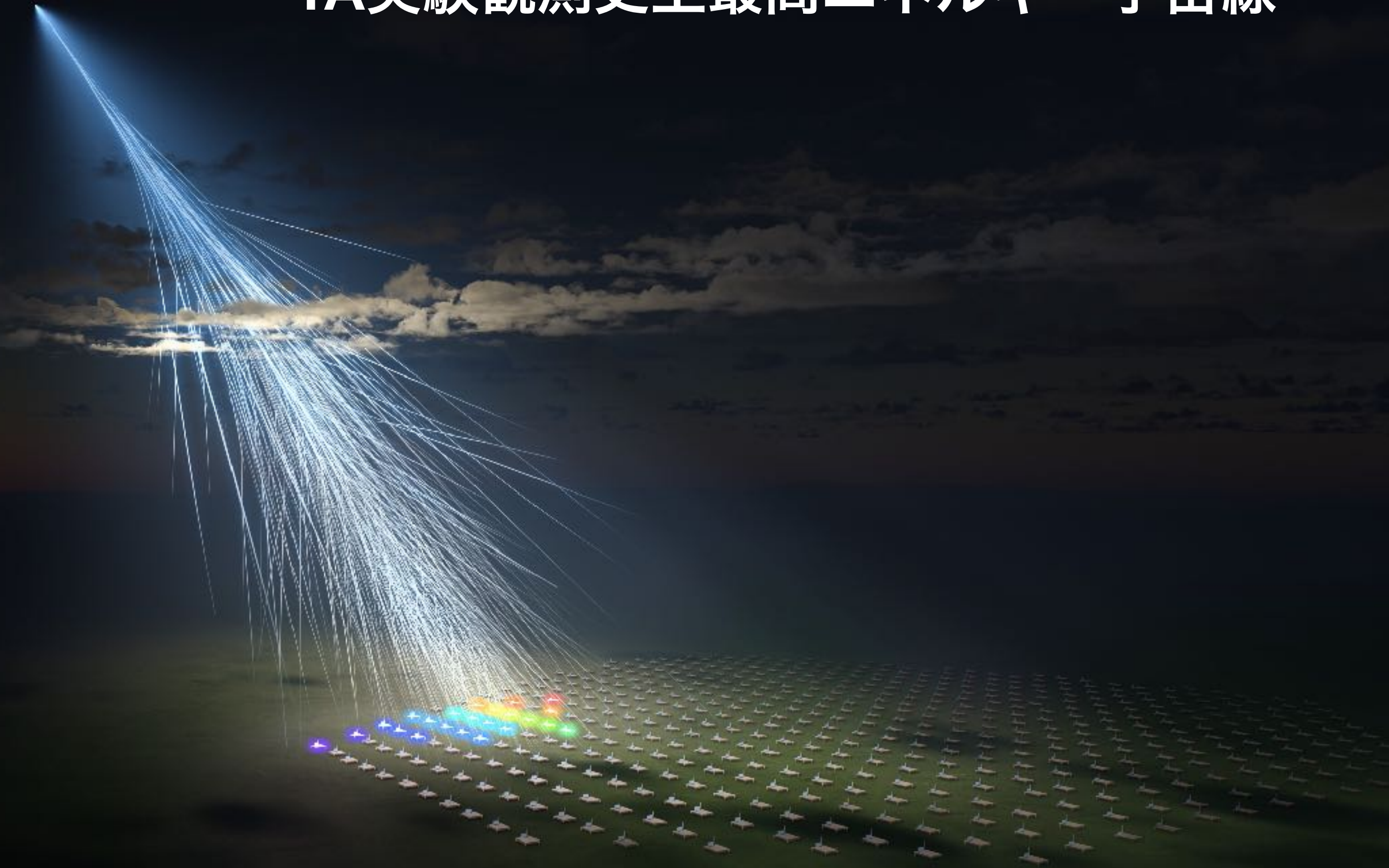
TAx4計画

現行TA実験の南北に地表検出器500台増設
→1,000台、面積3,000km²

2015年から建設開始 (予算がついた!)

2019年運用開始 (約760台)

TA実験観測史上最高エネルギー宇宙線



2021年5月27日に観測された宇宙線



$E = 244 \pm 29$ (stat.) ± 51 (syst.) EeV

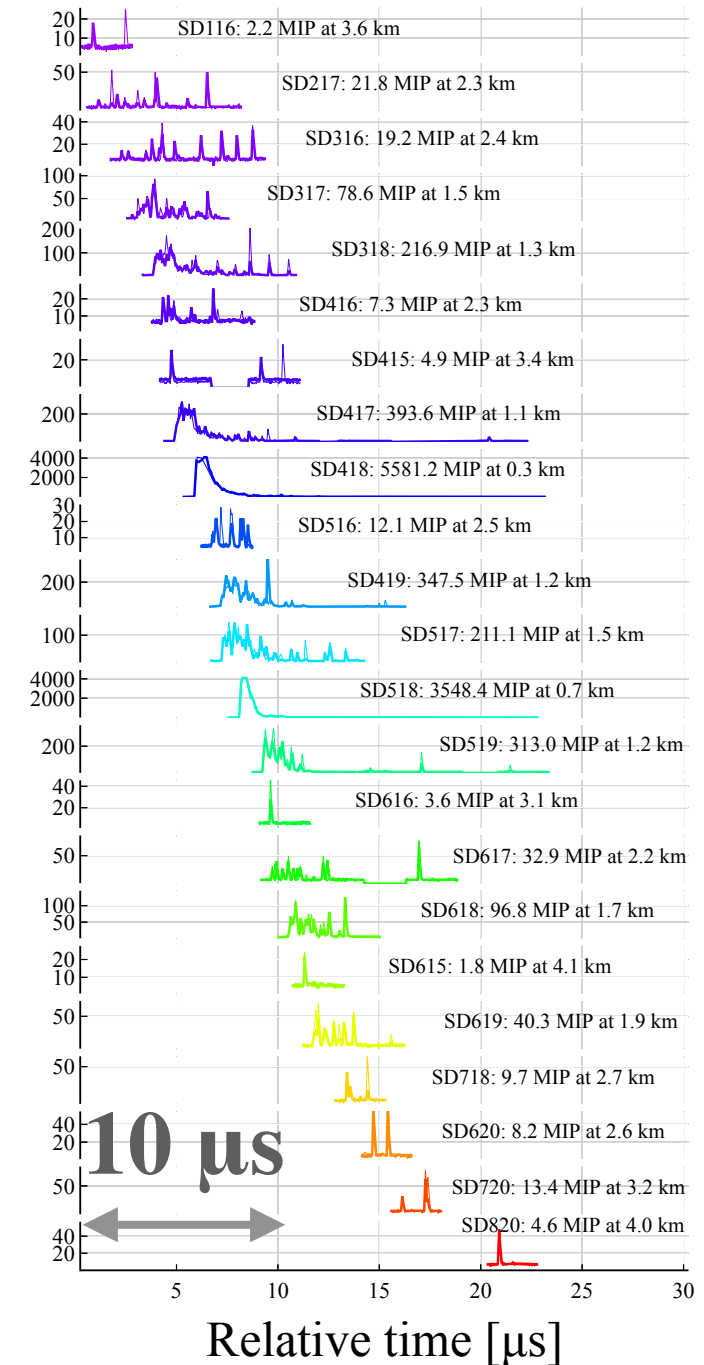
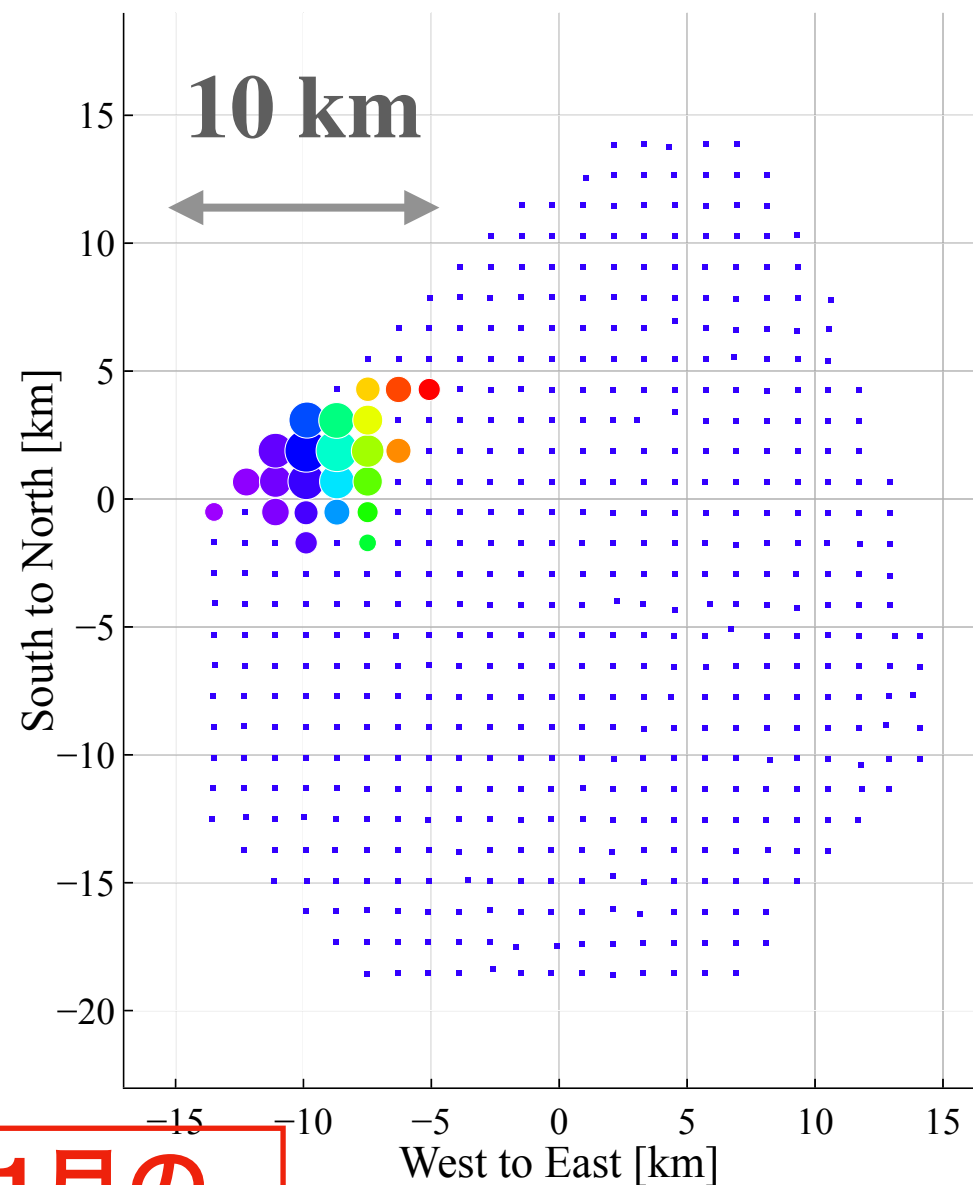
コア位置から800 mでの
粒子数密度

$S_{800} = 530 \pm 57$ (m⁻²)

天頂角 $\theta = 38.6^\circ$

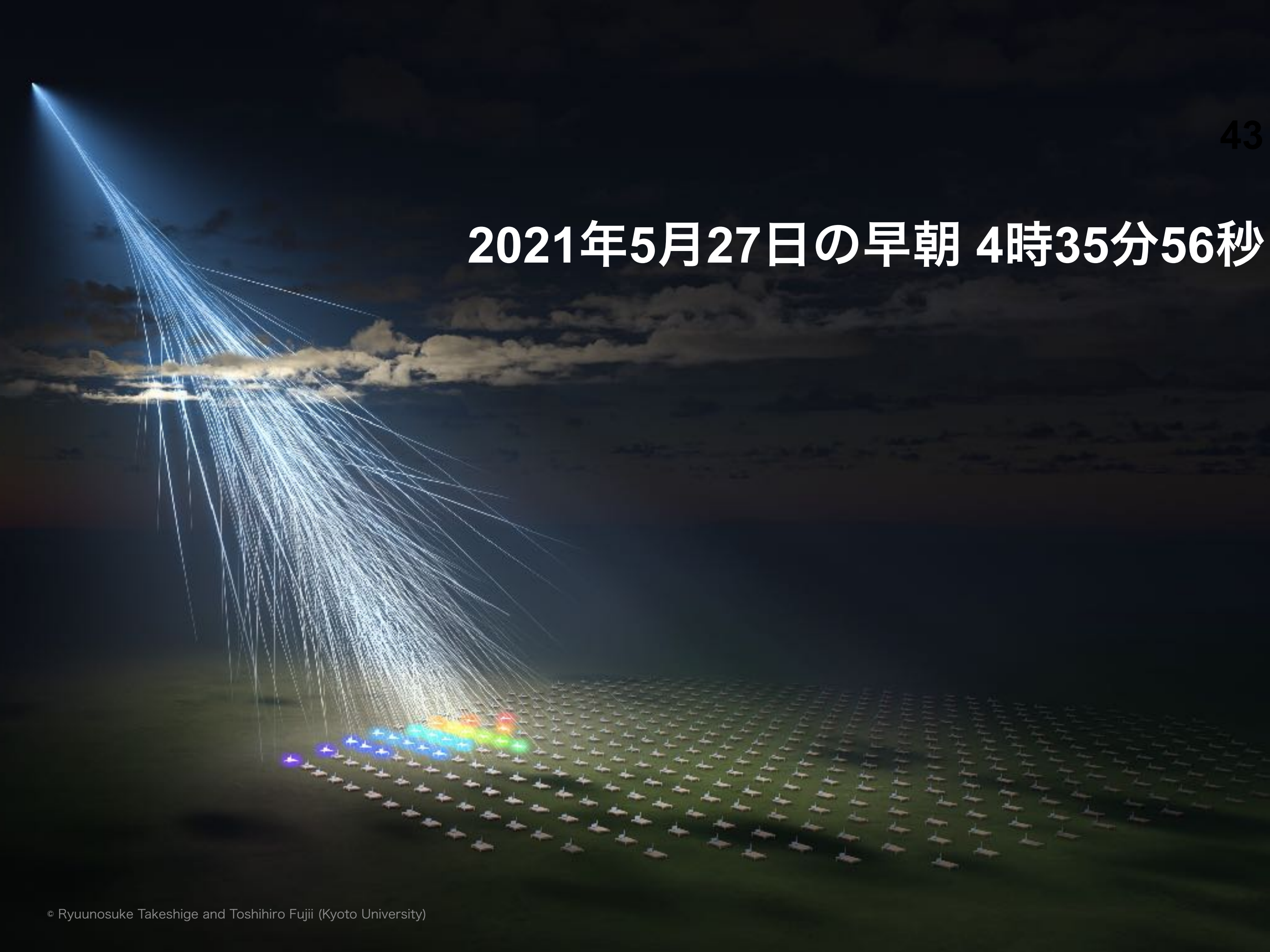
大気蛍光望遠鏡による観
測なし

Surface detector array of TA

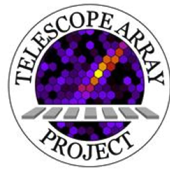


2008年5月から2021年11月の
13.5年のTAの観測運用の中で
最もエネルギーの高い宇宙線

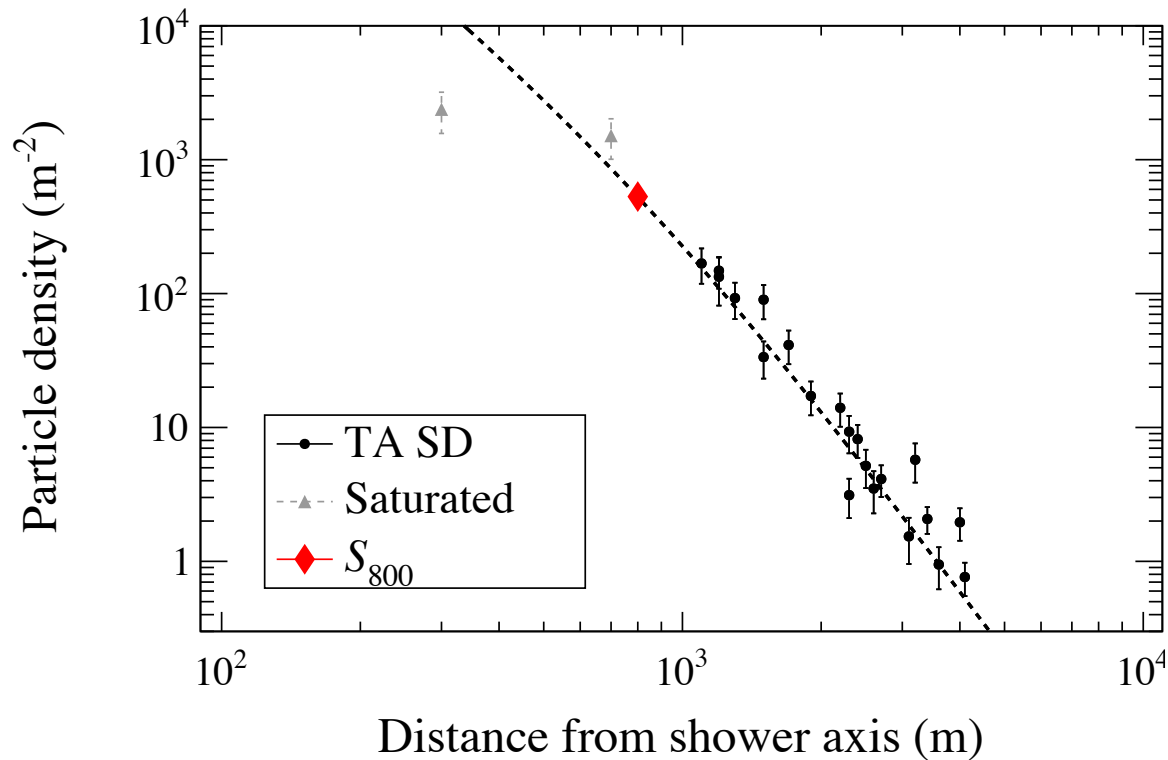
2021年5月27日の早朝 4時35分56秒



この事象固有のエネルギー分解能の評価

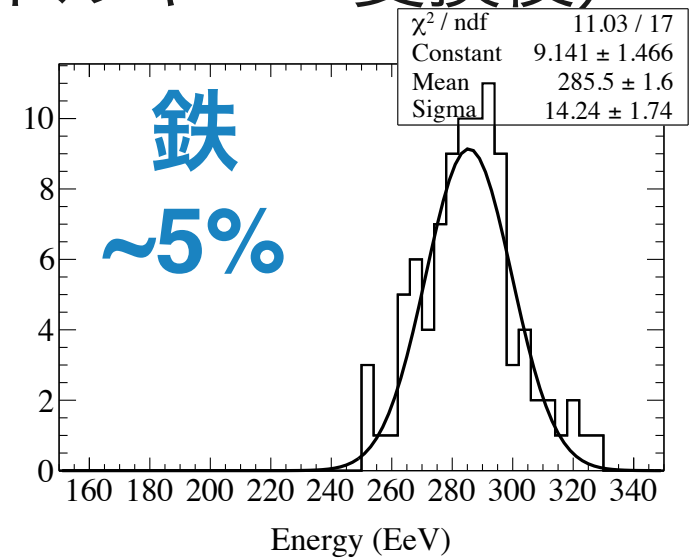
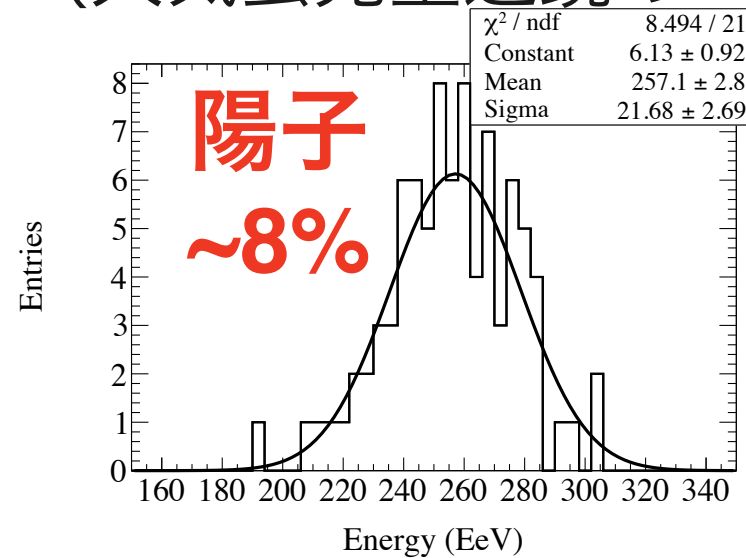


横方向密度分布



QGSJetII-04のシミュレーションによる エネルギー決定精度評価

(大気蛍光望遠鏡のエネルギーへ変換後)

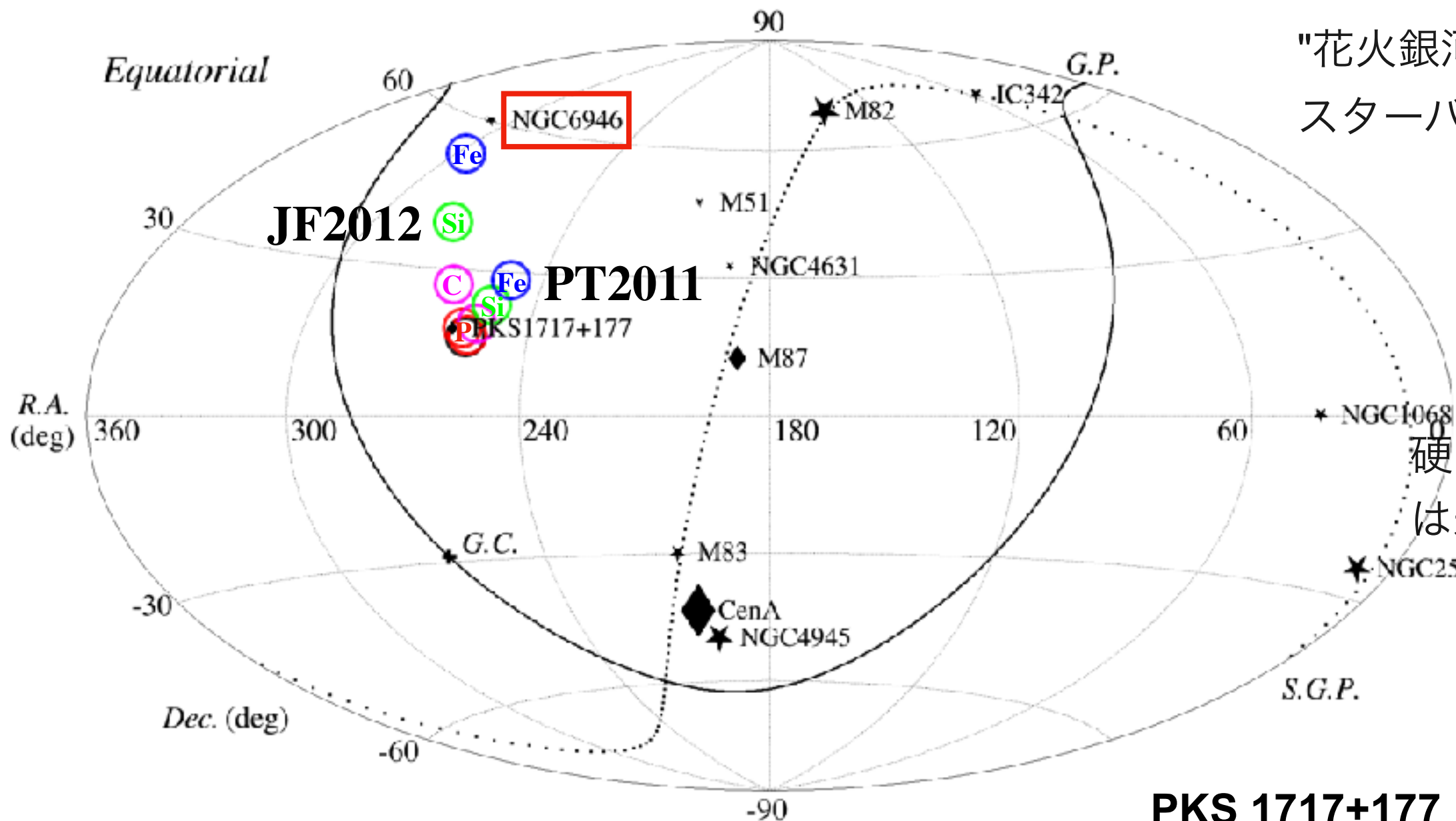


SDでの再構成エネルギーは310 EeV、大気蛍光望遠鏡でのエネルギーに変換すると244 EeV

同じ到来方向と同じエネルギーを仮定してこの事象固有のエネルギー分解能を評価した

	Day	Time	E
1	2021/05/	10:35:56	244
2	2014/06/	15:32:41	176
3	2016/05/	07:02:03	172

銀河磁場での曲がり角を補正



NGC6946 (5.9 Mpc)

"花火銀河"と呼ばれる
スターバースト銀河



硬X線やガンマ線
は未検出

PKS 1717+177 (~600 Mpc)

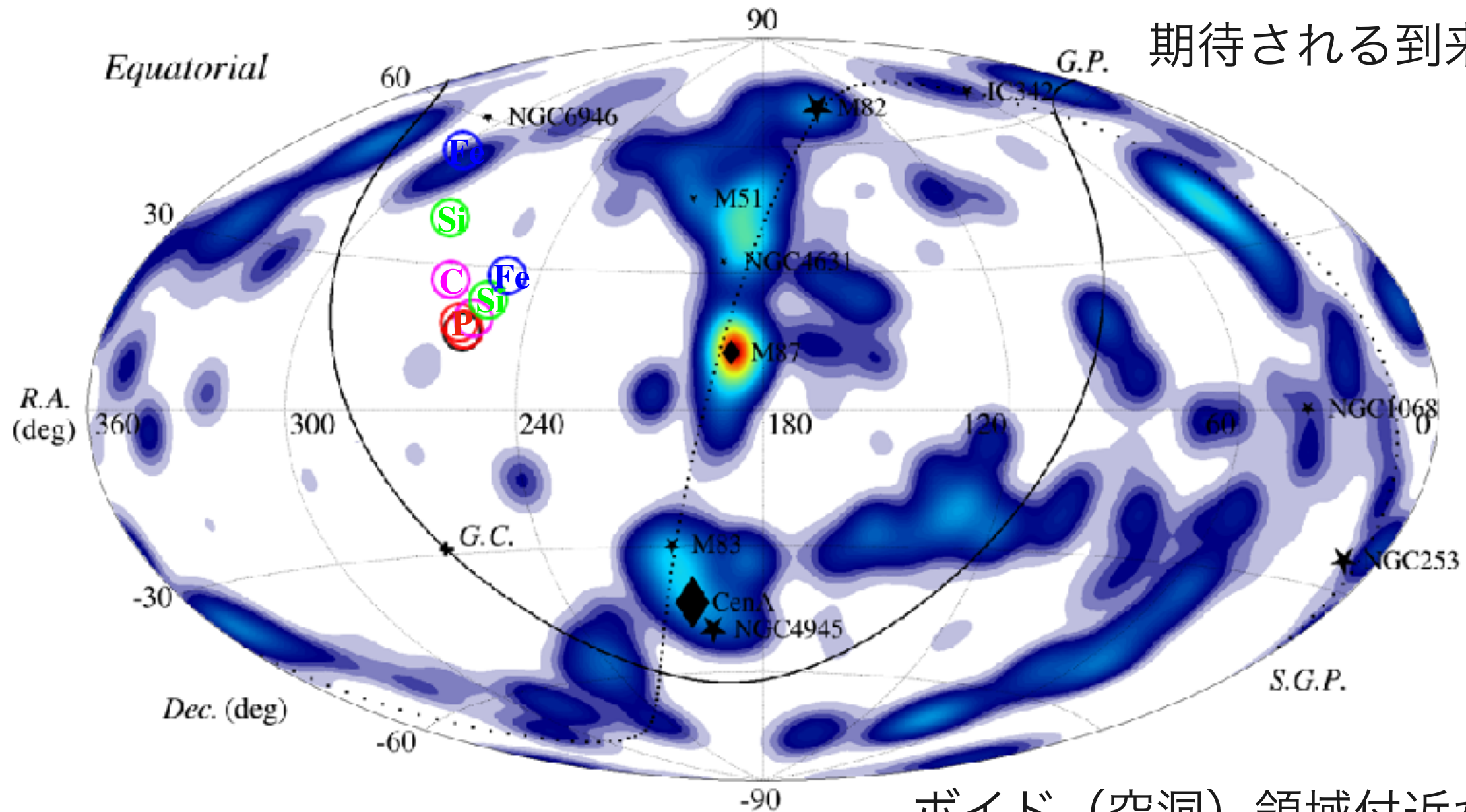
過去にフレアがある活動銀河核
GZK限界のため到来できない

近傍天体分布から期待される異方性



46

近傍天体から244 EeVの
鉄原子核が到来した場合に
期待される到来方向分布

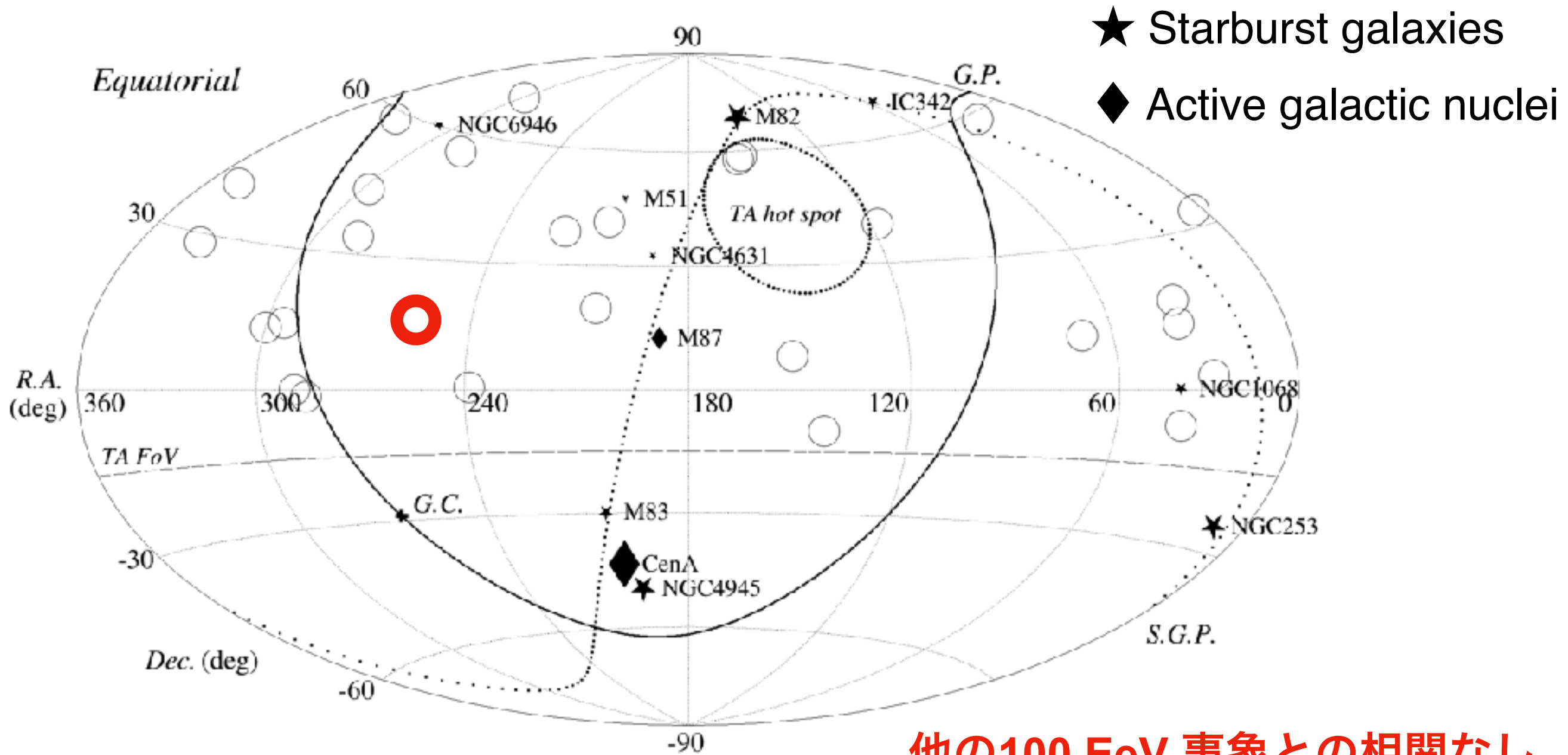


Calculated by M. Kuznetsov

ボイド（空洞）領域付近から到来
→ 天体起源では可能性が低い方向

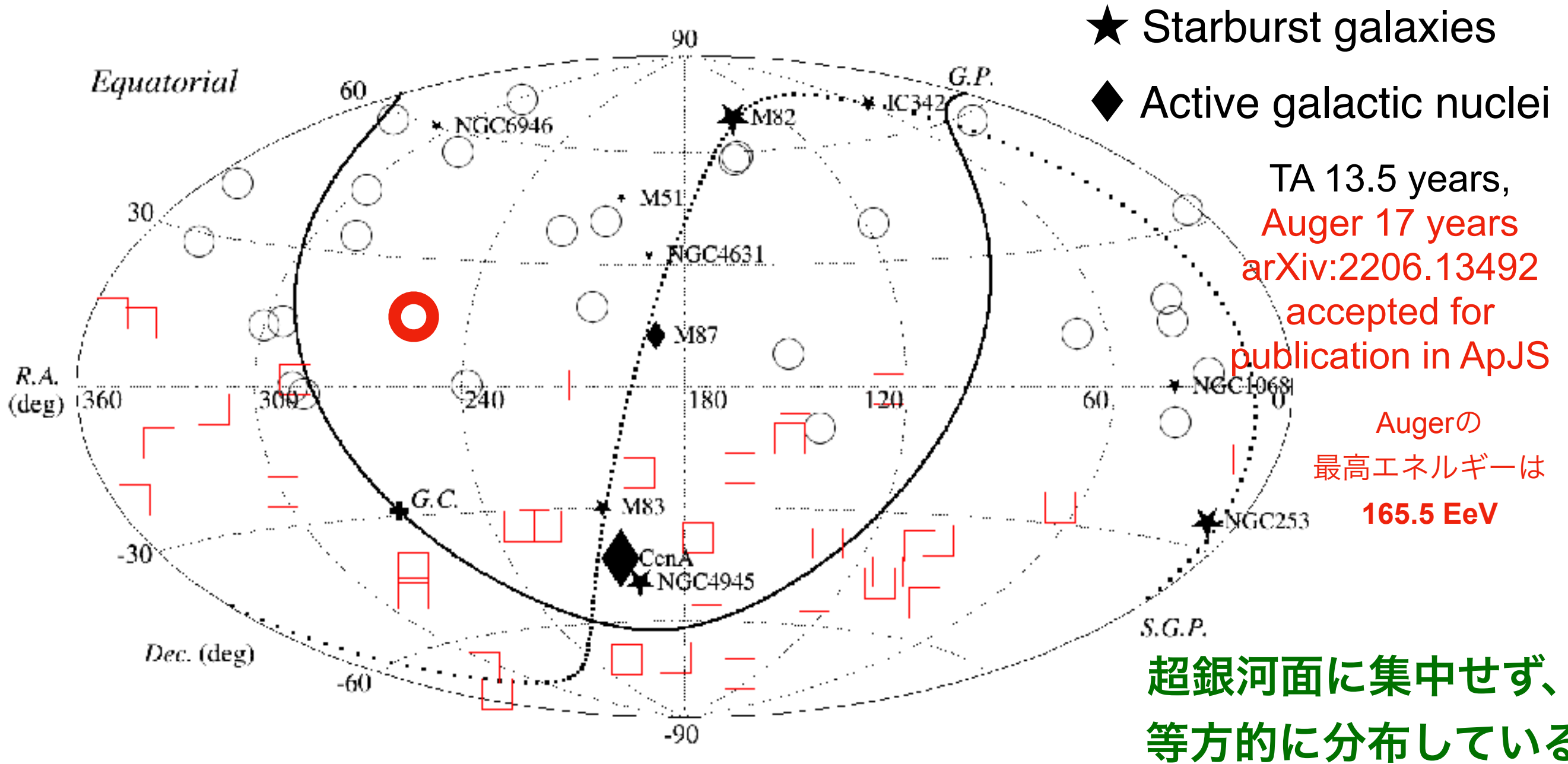
100 EeV以上の28事象の到来方向分布

47



他の100 EeV 事象との相関なし
ホットスポットとも異なる方向

TAとAugerの100 EeV以上の到来方向分布

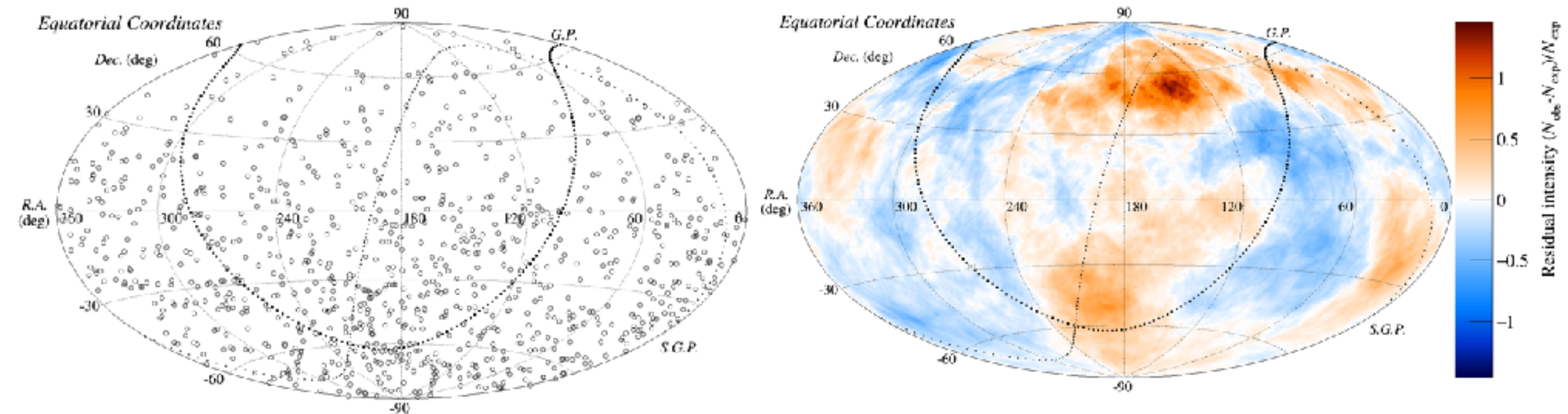


>50 EeVでの到来方向分布



Cutoff ($E_{TA} > 52.3$ EeV $E_{Auger} > 40$ EeV)

T. Fujii et al., PoS (ICRC2021) 291 (2020), arXiv: 2107.02949



- 中角度スケール (~25度) での異方性 (hot/warm spots) が報告されている
- 超銀河面に沿って宇宙線の到来数の過剰が見られる → 天体起源を示唆
- 100 EeVでは等方的に分布 → 50 EeV以上とは別の起源かもしれない

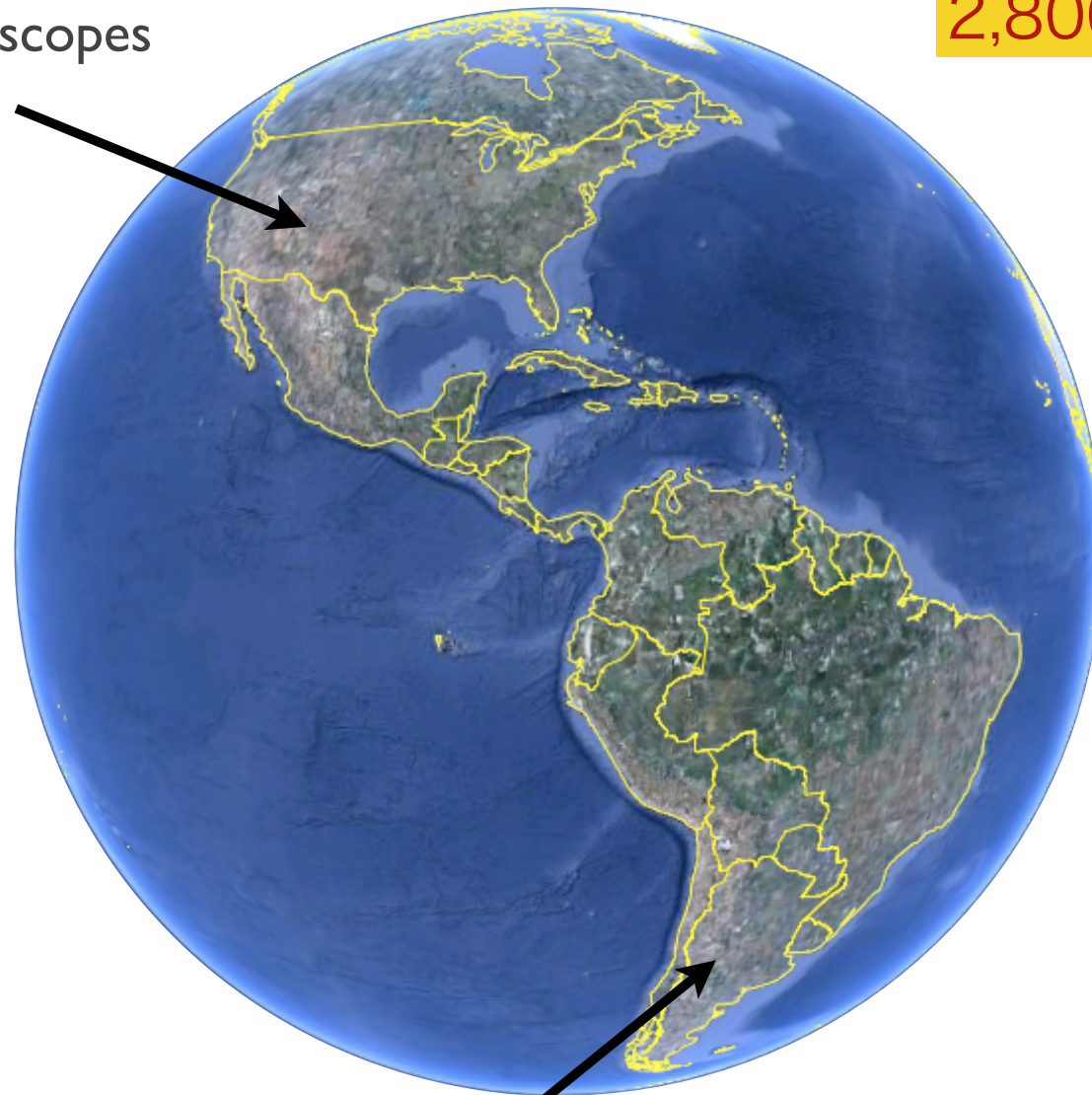
今後 : TA×4, AugerPrime

Telescope Array (TA)

Delta, UT, USA

507 detector stations, 700 km²

36 fluorescence telescopes



TA×4

1000 scinti. SDs

2,800 km² + 48 FDs

Pierre Auger Observatory

Province Mendoza, Argentina

1660 detector stations, 3000 km²

27 fluorescence telescopes

Auger Prime

1660 water tank+scinti.+antenna SDs

3,000 km² + 27 FDs

Backup