

「宇宙の最高エネルギー 粒子生成源へ手がかり」 - 最高エネルギー宇宙線のホットスポットの兆候 -

川田 和正 (東京大学 宇宙線研究所 特任助教)

佐川 宏行 (東京大学 宇宙線研究所 准教授)

福島 正己 (東京大学 宇宙線研究所 教授)

荻尾 彰一 (大阪市立大学 大学院理学研究科 准教授)

テレスコープアレイ実験グループ



5カ国・30機関・126名
(内75名が日本機関に所属)



日本・アメリカ・韓国・ロシア・ベルギー

テレスコープアレイ実験 共同研究者

R.U. Abbasi¹, M. Abe¹³, T. Abu-Zayyad¹, M. Allen¹, R. Anderson¹, R. Azuma², E. Barcikowski¹, J.W. Belz¹, D.R. Bergman¹, S.A. Blake¹, R. Cady¹, M.J. Chae³, B.G. Cheon⁴, J. Chiba⁵, M. Chikawa⁶, W.R. Cho⁷, T. Fujii⁸, M. Fukushima^{8,9}, T. Goto¹⁰, W. Hanlon¹, Y. Hayashi¹⁰, N. Hayashida¹¹, K. Hibino¹¹, K. Honda¹², D. Ikeda⁸, N. Inoue¹³, T. Ishii¹², R. Ishimori², H. Ito¹⁴, D. Ivanov¹, C.C.H. Jui¹, K. Kadota¹⁶, F. Kakimoto², O. Kalashev¹⁷, K. Kasahara¹⁸, H. Kawai¹⁹, S. Kawakami¹⁰, S. Kawana¹³, K. Kawata⁸, E. Kido⁸, H.B. Kim⁴, J.H. Kim¹, J.H. Kim²⁵, S. Kitamura², Y. Kitamura², V. Kuzmin¹⁷, Y.J. Kwon⁷, J. Lan¹, S.I. Lim³, J.P. Lundquist¹, K. Machida¹², K. Martens⁹, T. Matsuda²⁰, T. Matsuyama¹⁰, J.N. Matthews¹, M. Minamino¹⁰, K. Mukai¹², I. Myers¹, K. Nagasawa¹³, S. Nagataki¹⁴, T. Nakamura²¹, T. Nonaka⁸, A. Nozato⁶, S. Ogio¹⁰, J. Ogura², M. Ohnishi⁸, H. Ohoka⁸, K. Okj⁸, T. Okuda²², M. Ono¹⁴, A. Oshima¹⁰, S. Ozawa¹⁸, I.H. Park²³, M.S. Pshirkov²⁴, D.C. Rodriguez¹, G. Rubtsov¹⁷, D. Ryu²⁵, H. Sagawa⁸, N. Sakurai¹⁰, A.L. Sampson¹, L.M. Scott¹⁵, P.D. Shah¹, F. Shibata¹², T. Shibata⁸, H. Shimodaira⁸, B.K. Shin⁴, J.D. Smith¹, P. Sokolsky¹, R.W. Springer¹, B.T. Stokes¹, S.R. Stratton^{1,15}, T.A. Stroman¹, T. Suzawa¹³, M. Takamura⁵, M. Takeda⁸, R. Takeishi⁸, A. Taketa²⁶, M. Takita⁸, Y. Tameda¹¹, H. Tanaka¹⁰, K. Tanaka²⁷, M. Tanaka²⁰, S.B. Thomas¹, G.B. Thomson¹, P. Tinyakov^{17,24}, I. Tkachev¹⁷, H. Tokuno², T. Tomida²⁸, S. Troitsky¹⁷, Y. Tsunesada², K. Tsutsumi², Y. Uchihori²⁹, S. Udo¹¹, F. Urban²⁴, G. Vasiloff¹, T. Wong¹, R. Yamane¹⁰, H. Yamaoka²⁰, K. Yamazaki¹⁰, J. Yang³, K. Yashiro⁵, Y. Yoneda¹⁰, S. Yoshida¹⁹, H. Yoshii³⁰, R. Zollinger¹, Z. Zundel¹

- 1 University of Utah 2 Tokyo Institute of Technology 3 Ewha Womans University 4 Hanyang University
5 Tokyo University of Science 6 Kinki University 7 Yonsei University 8 ICRR, University of Tokyo
9 IPMU, the University of Tokyo 10 Osaka City University 11 Kanagawa University 12 University of Yamanashi
13 Saitama University 14 Astrophysical Big Bang Laboratory RIKEN, Wako 15 Rutgers University
16 Tokyo City University 17 INR of the Russian Academy of Sciences 18 Waseda University
19 Chiba University 20 KEK 21 Kochi University 22 Ritsumeikan University 23 Sungkyunkwan University
24 Universite de Libre de Bruxelles 25 Ulsan National Institute of Science and Technology
26 ERI, University of Tokyo 27 Hiroshima City University 28 Advanced Science Institute, RIKEN
29 National Institute of Radiological Science 30 Ehime University



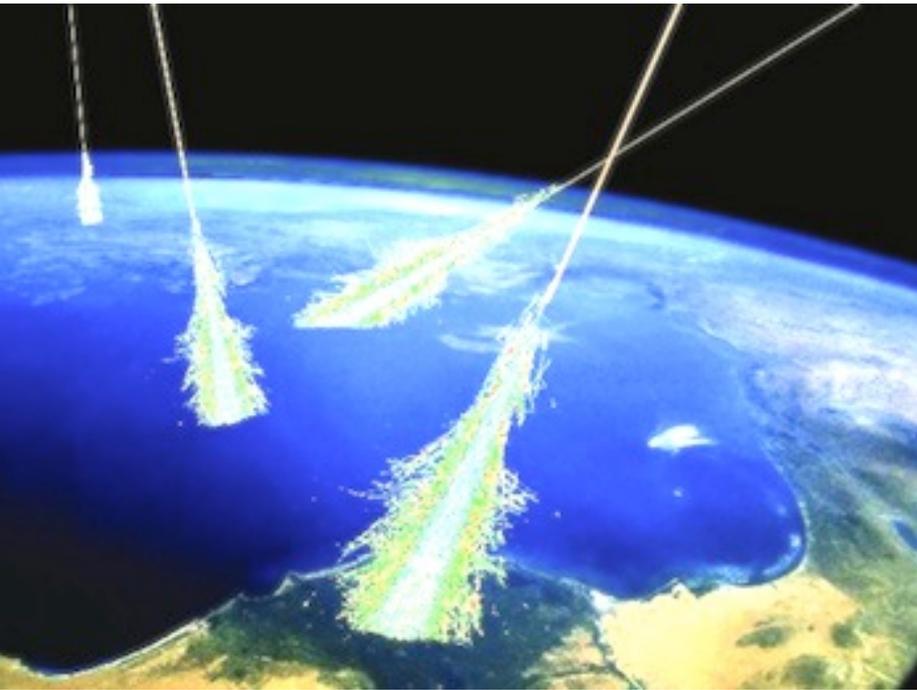
発表の流れ

- 最高エネルギー宇宙線
- 本研究の目的
- テレスコープアレイ実験
- 研究成果（ホットスポット）
- 研究成果の解釈
- まとめ



宇宙線

From NASA web page



- ❖ 宇宙を飛び交う高エネルギー放射線
 - 主成分は陽子
- ❖ 1912年にビクター・ヘスにより発見
 - 気球に乗って上空ほど放射線強度が高いことを発見
 - ノーベル賞受賞（1936年）

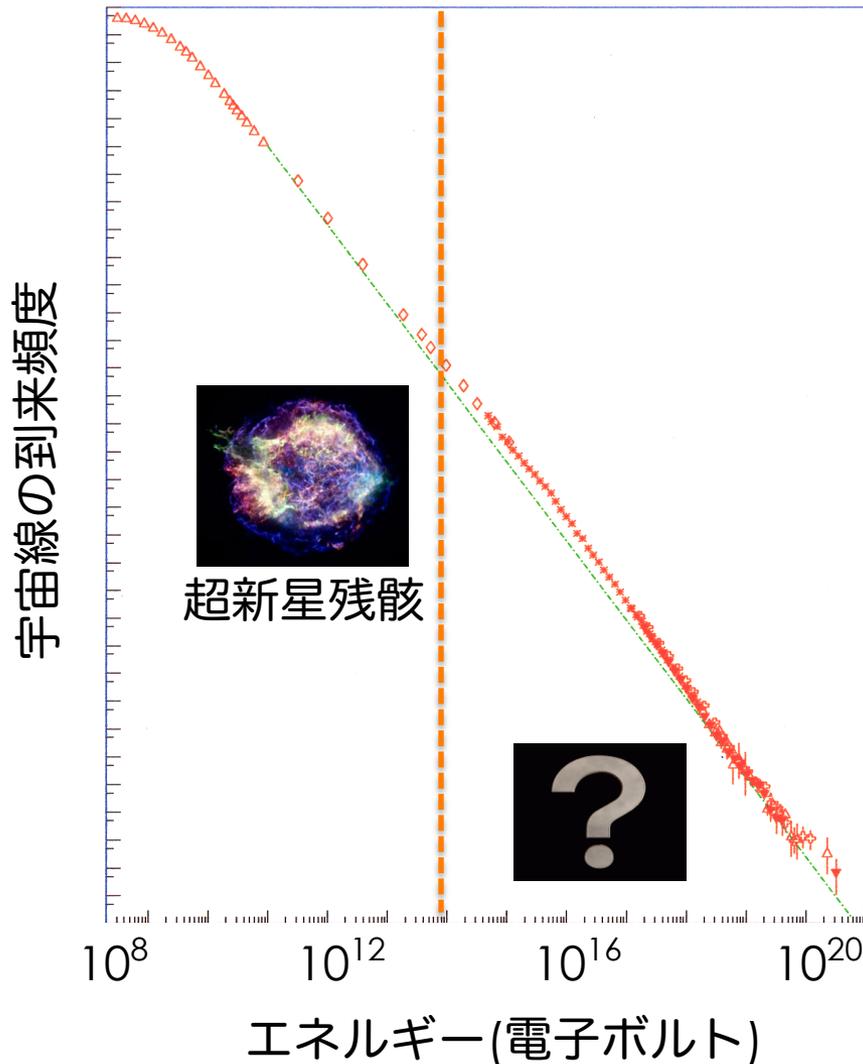
宇宙線発見以来100年の謎

どこで、どのように生成され？

どこで、どのようにエネルギーを獲得するのか？



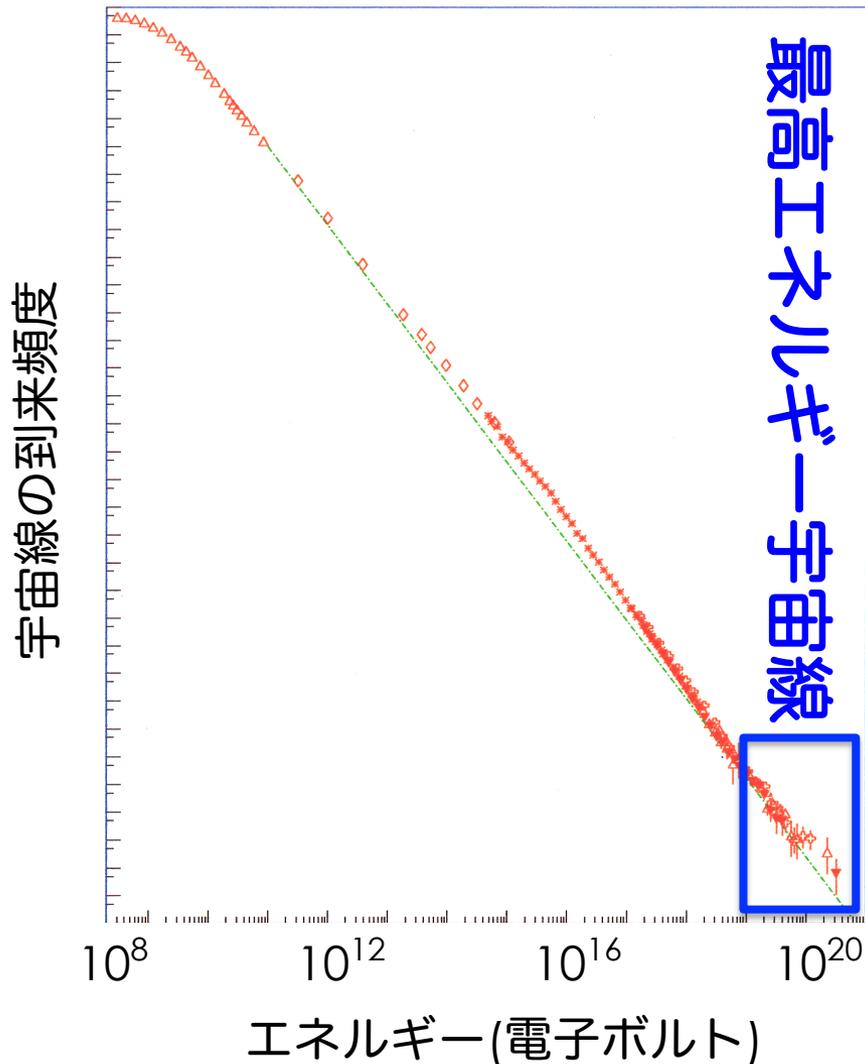
宇宙線



- ❖ 広いエネルギー範囲
- ❖ 1桁エネルギーが上がると頻度は1/100
- ❖ 低エネルギー領域の宇宙線
 - 銀河系内の超新星残骸 (星の爆発後の残骸) で生成されている間接的証拠はあり



最高エネルギー宇宙線

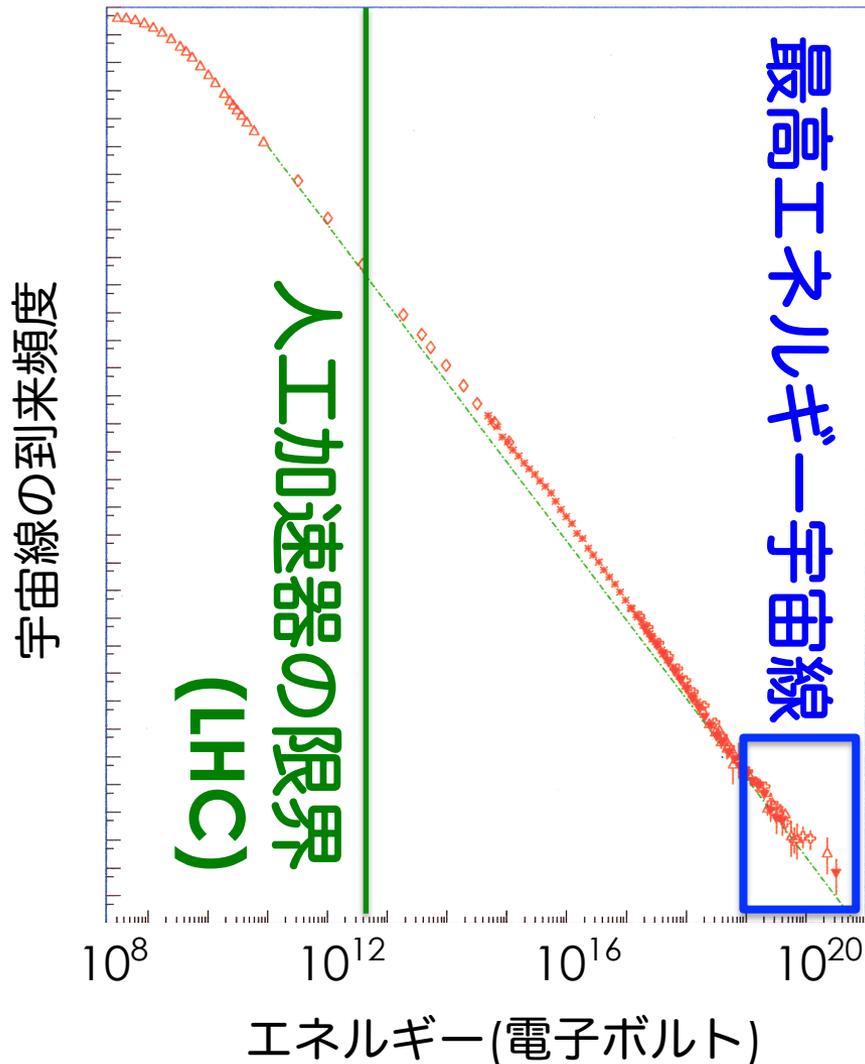


- ❖ 広いエネルギー範囲
- ❖ 1桁エネルギーが上がると頻度は1/100
- ❖ 最高エネルギー領域の宇宙線
 - 10km×10kmの範囲に1個/年
 - 非常に観測が困難
 - 存在自体が宇宙物理の謎の一つ

巨大な天体爆発や
ブラックホールから
吹き出すジェット？



最高エネルギー宇宙線



陽子加速器

磁場で閉込め
高周波電場で加速



10^{20} 電子ボルト (eV) =
人工加速器で生成できる
ビームエネルギーの1000万倍

本研究の目的

宇宙のどこかにある
最強加速器
の探査

活動銀河の高エネルギーのジェット (ケンタウルス座A)

ESO/WFI (visible); MPIfR/ESO/APEX/A.Weiss et al. (microwave); NASA/CXC/CfA/R.Kraft et al. (X-ray)

宇宙のどこかにある 最強加速器 の探査

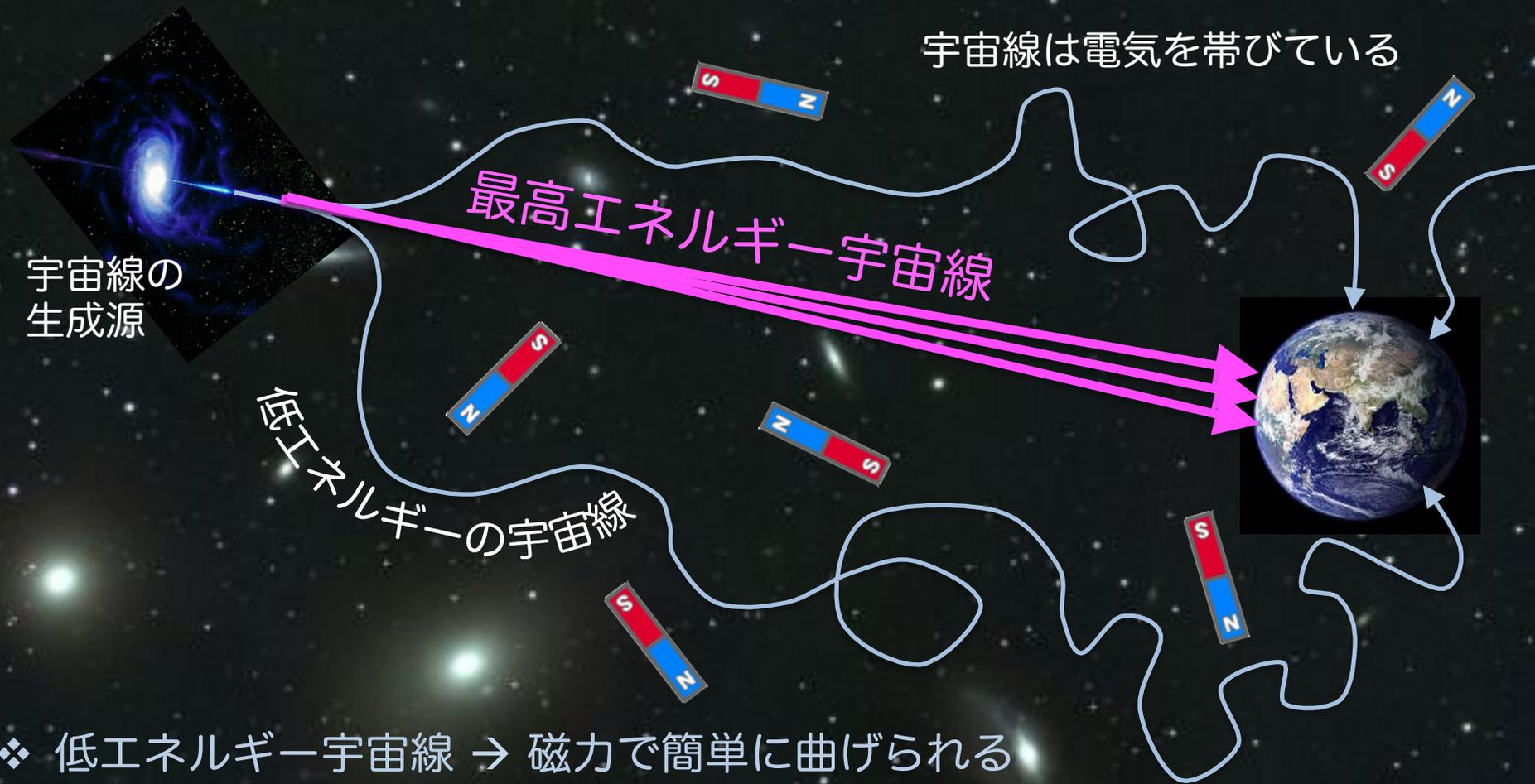
ガンマ線バースト
イメージ図 (ESO)

衝突する銀河団

STScI, U. Arizona, CfA, CXC, NASA



なぜ最高エネルギー宇宙線なののか？



- ❖ 低エネルギー宇宙線 → 磁力で簡単に曲げられる
→ 等方的にやってくる
- ❖ 最高エネルギー宇宙線 → 磁力に負けずに直進
→ ホットスポットを見つけやすい

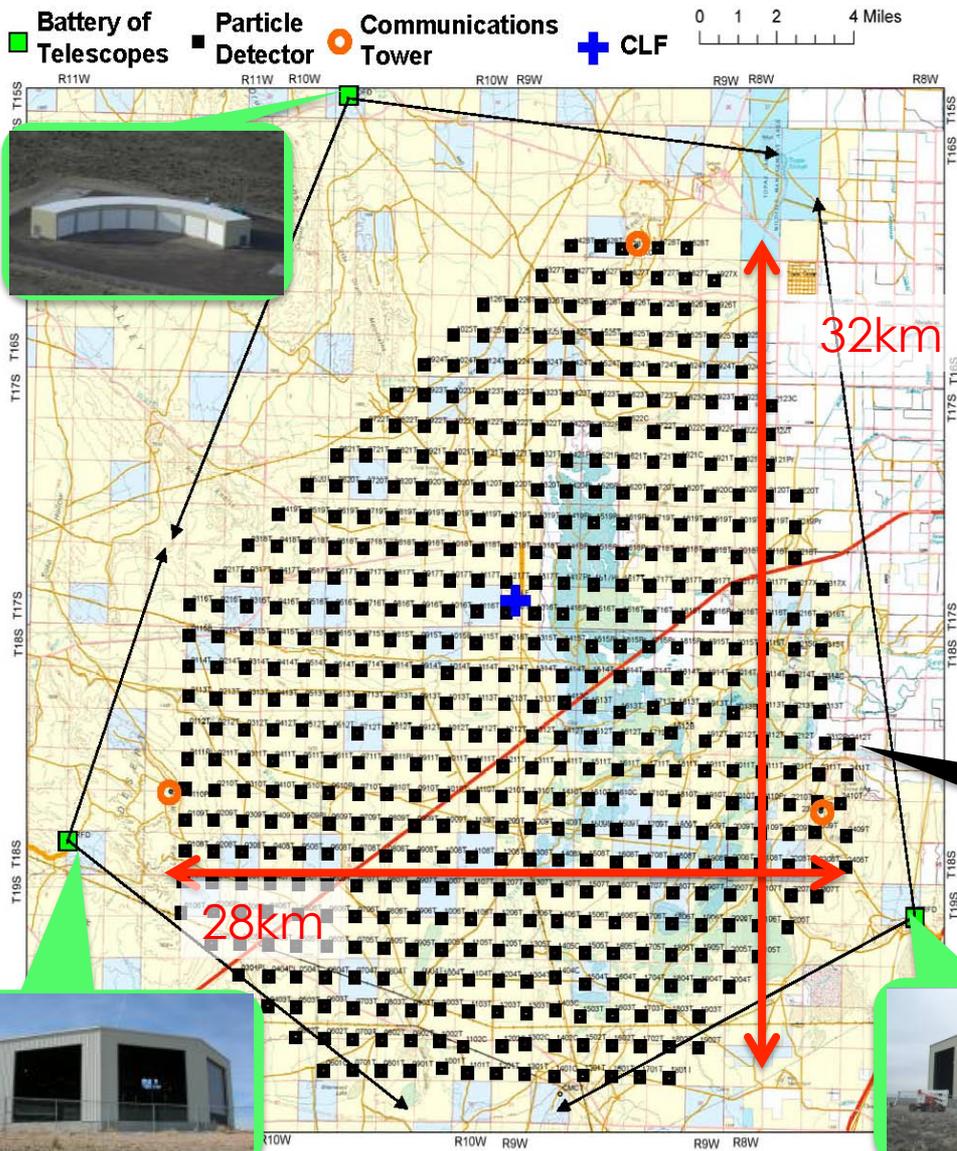


発表の流れ

- 宇宙線（最高エネルギー宇宙線）
- 本研究の目的
- **テレスコープアレイ実験**
- 研究成果（ホットスポット）
- 研究成果の解釈
- まとめ



テレスコープアレイ実験



❖ アメリカ・ユタ州 荒野

❖ 地表粒子検出器アレイ

- 3m² シンチレータ検出器
- 507台を 1.2km間隔
- 約700平方キロメートルを覆う

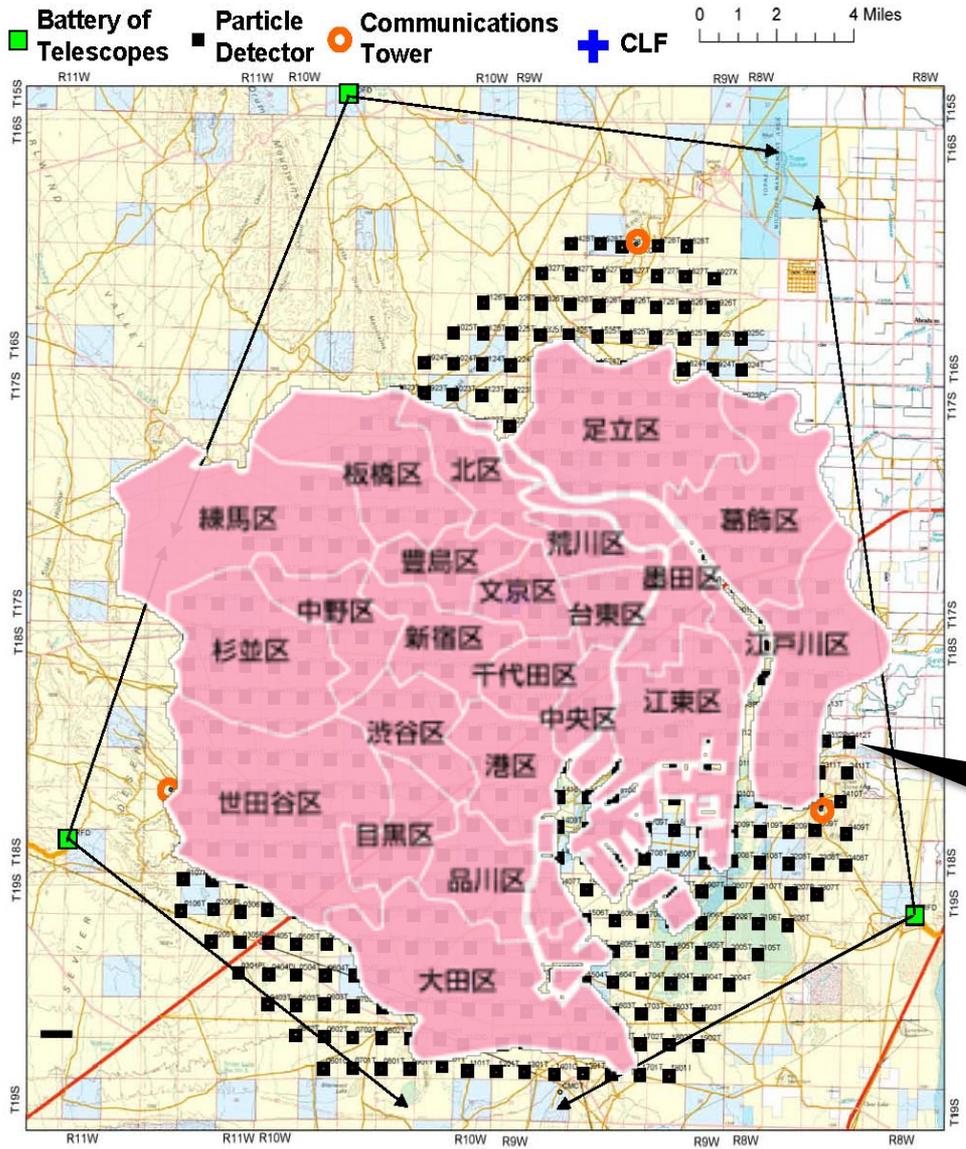
❖ 大気蛍光望遠鏡

- 3ステーション
- 12望遠鏡/ステーション





テレスコープアレイ実験



- ❖ アメリカ・ユタ州 荒野
- ❖ 地表粒子検出器アレイ
 - 3m² シンチレータ検出器
 - 507台を 1.2km間隔
 - 約700平方キロメートルを覆う
- ❖ 大気蛍光望遠鏡
 - 3ステーション
 - 12望遠鏡/ステーション

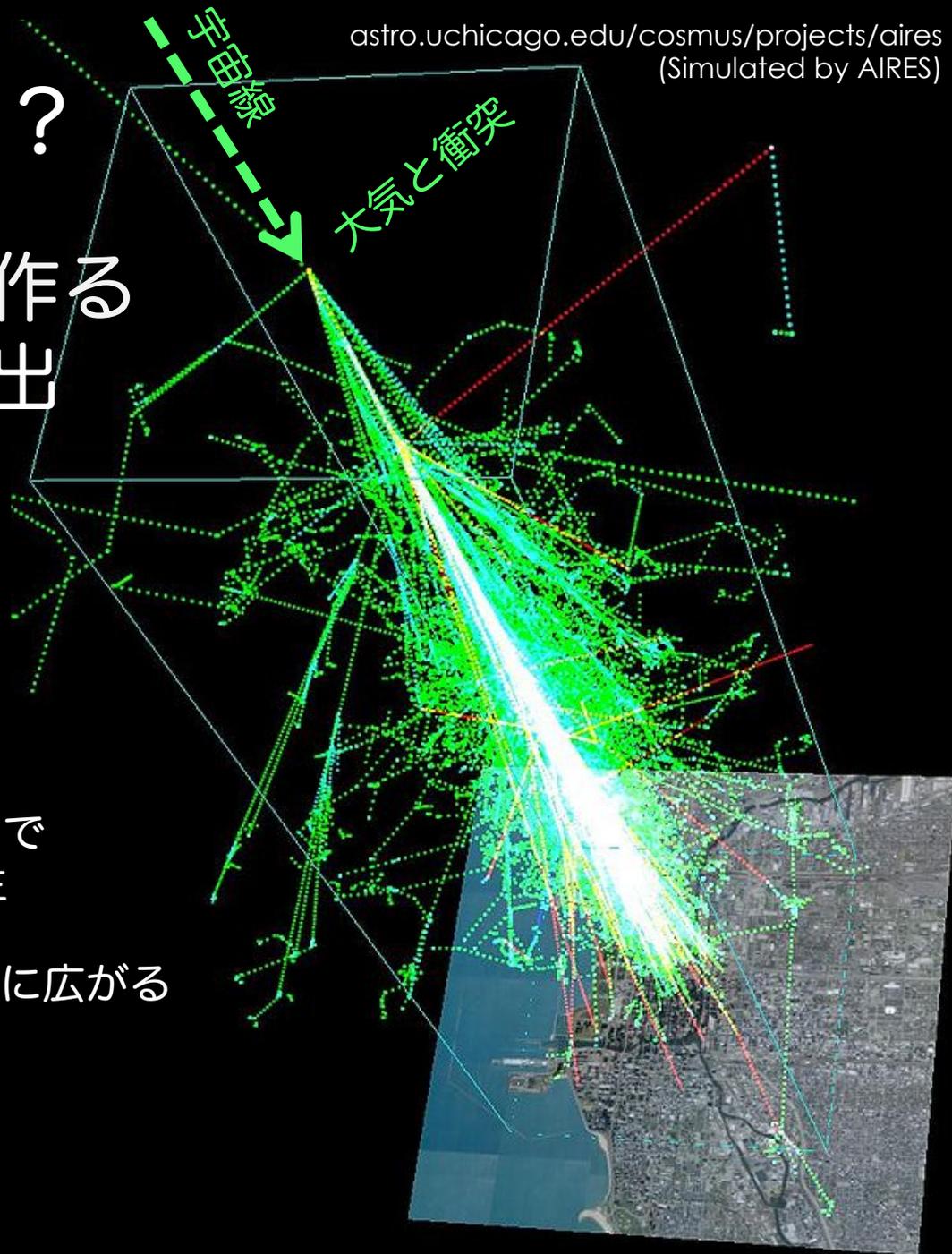


何を検出するのか？

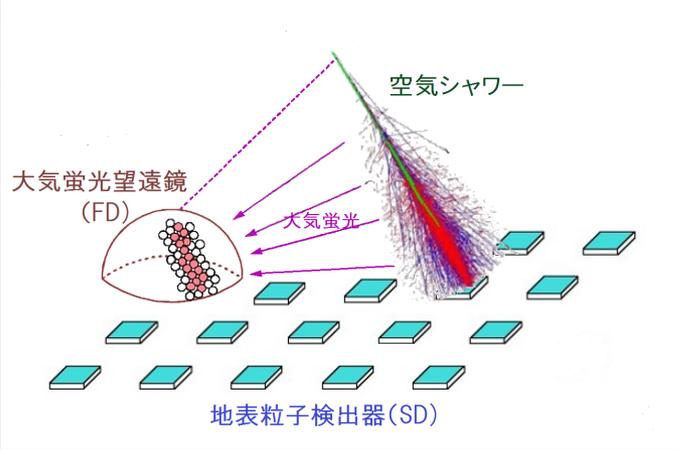
宇宙線が大気中で作る
空気シャワーを検出

宇宙線が大気に入射すると
大気中の原子核と相互作用し
多数の二次粒子を発生

- ◇ 最高エネルギー宇宙線は大気中で
1000億個以上の粒子を発生
- ◇ 地上では数キロメートルの範囲に広がる



空気シャワー中の粒子が大気中の窒素分子を励起したときに放射する大気蛍光を観測する



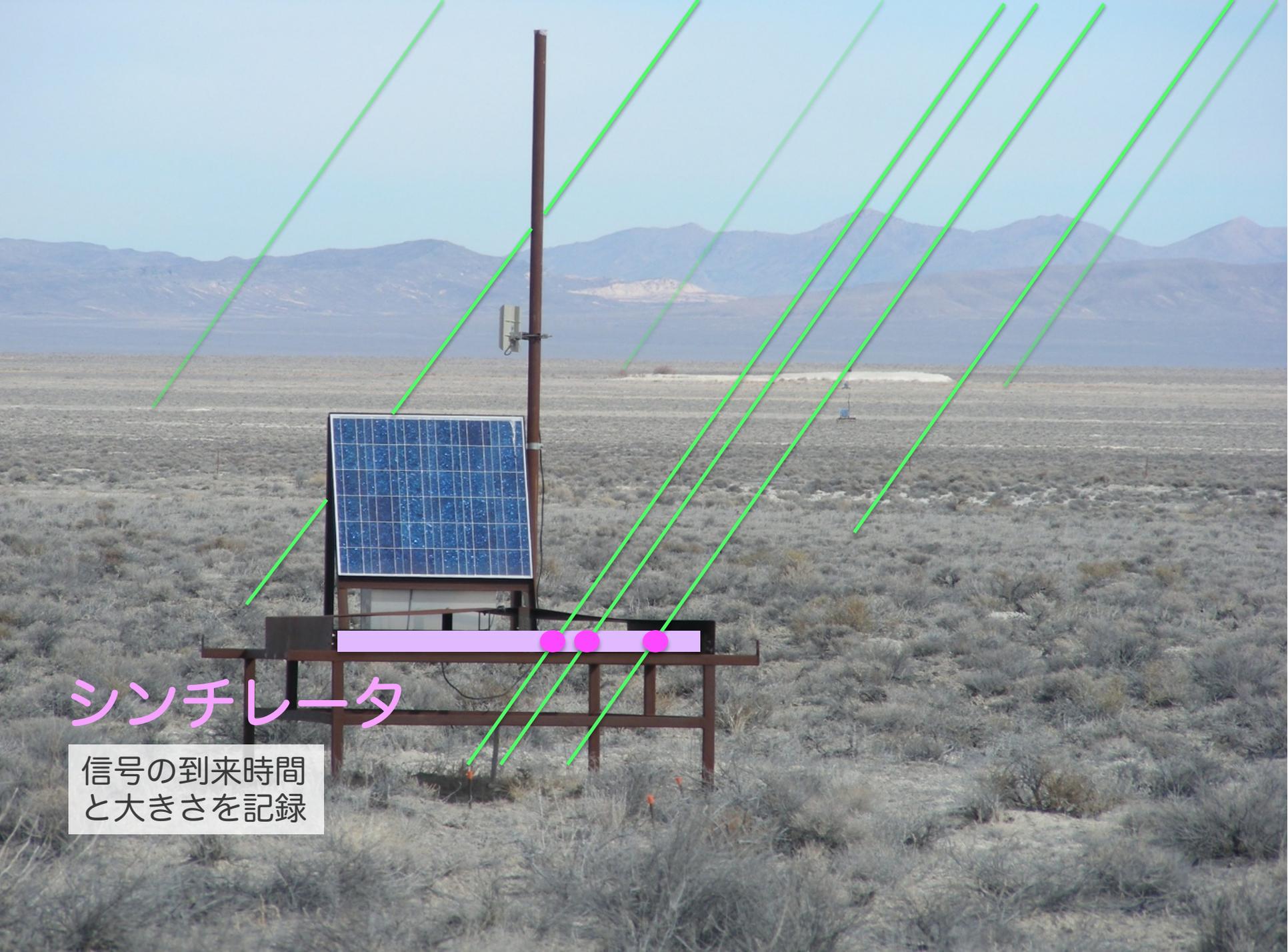
通信アンテナ

ソーラーパネル
(1 m×1 m)

東京都23区より広い領域
に1.2km間隔で設置

- シンチレータ
- データ収集装置
- ソーラーシステム
- 無線LAN通信

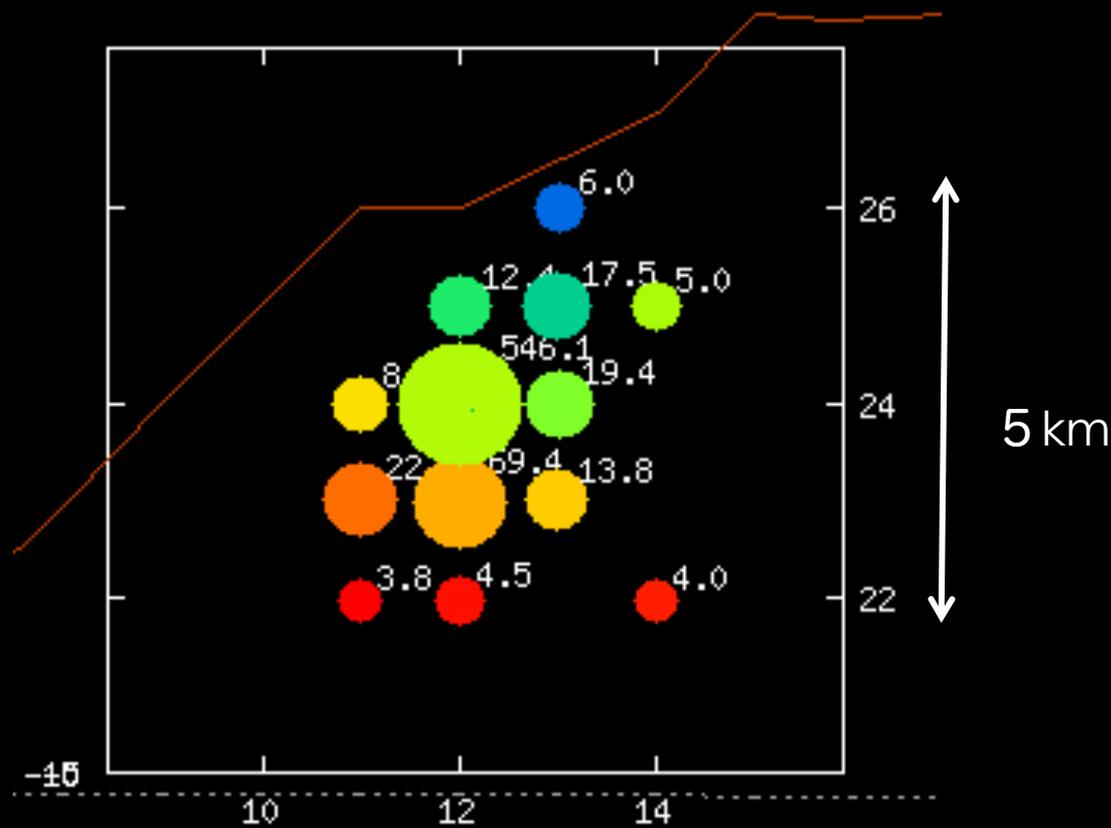
→ 完全自立型放射線検出器



シンチレータ

信号の到来時間
と大きさを記録

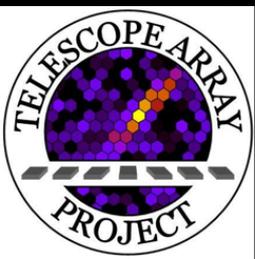
空気シャワー検出事例



上空から見た図

半径：信号の大きさ

カラー：到来時間 青→早い 赤→遅い



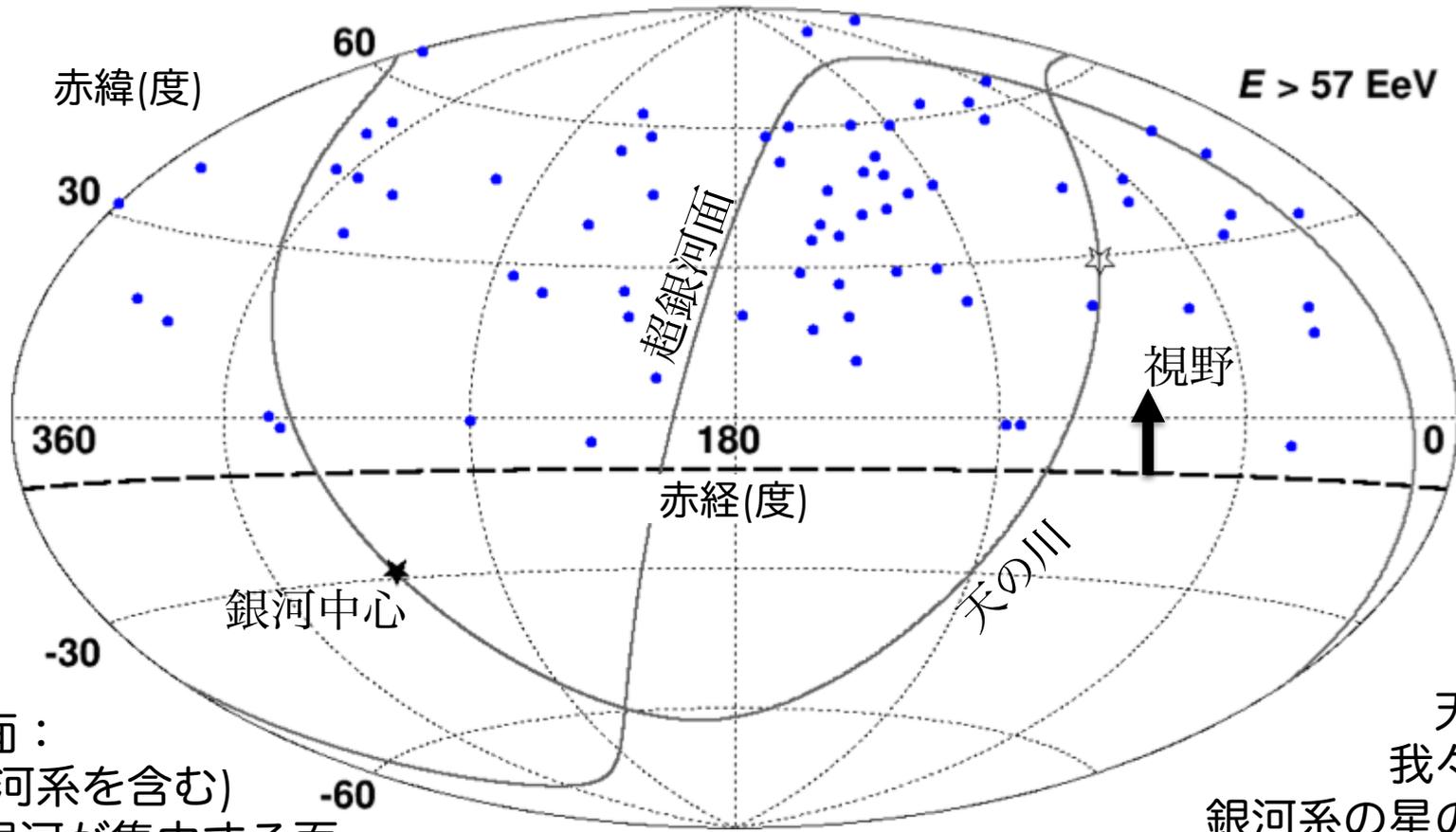


発表の流れ

- 宇宙線（最高エネルギー宇宙線）
- 本研究の目的
- テレスコープアレイ実験
- **研究成果（ホットスポット）**
- 研究成果の解釈
- まとめ



最高エネルギー宇宙線の方角



超銀河面：
(わが銀河系を含む)
多数の銀河が集中する面

天の川：
我々の住む
銀河系の星の集まり

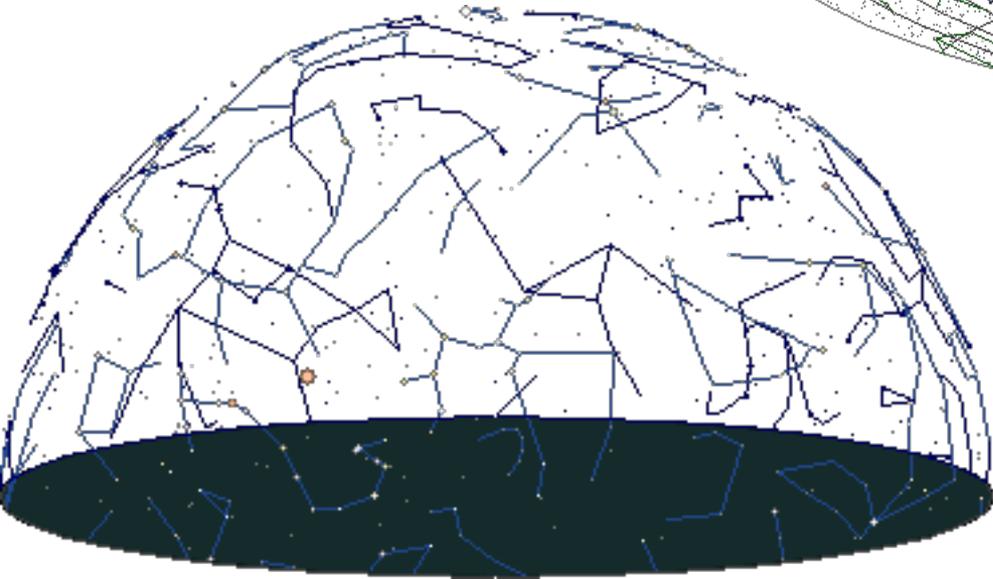
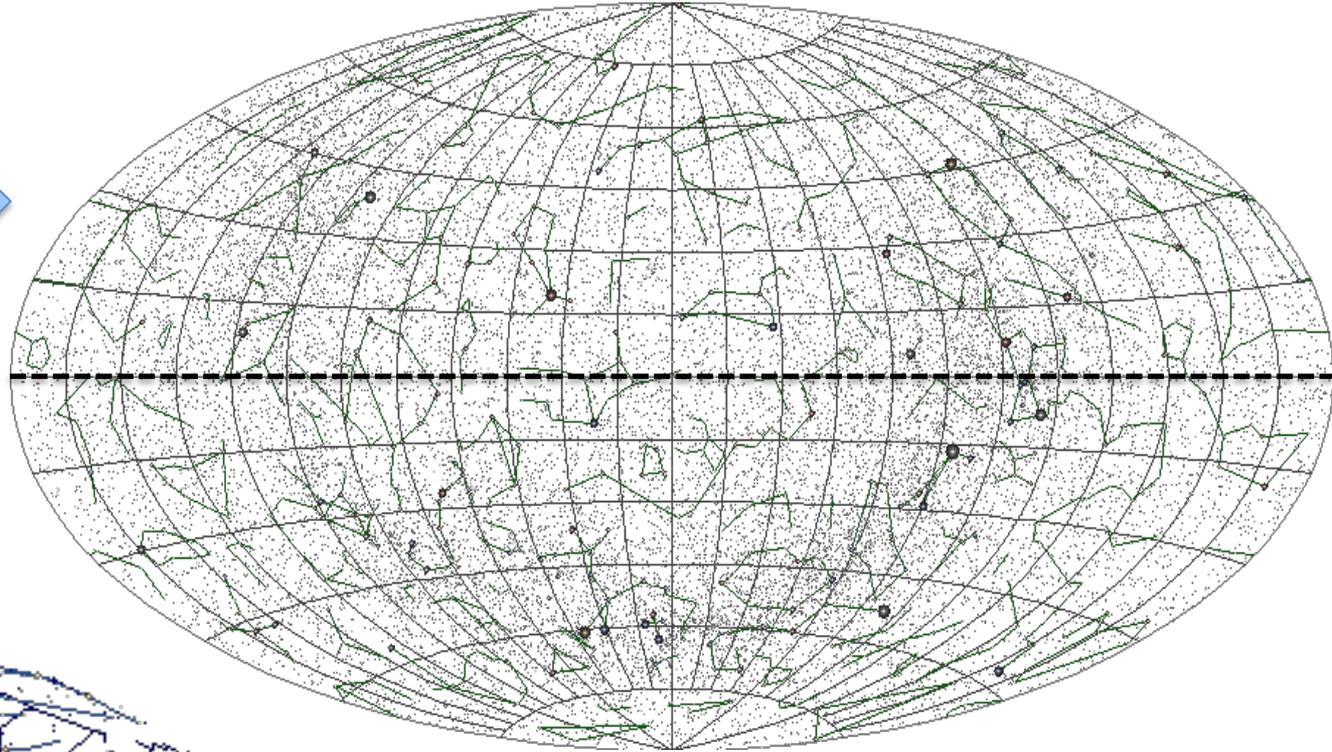
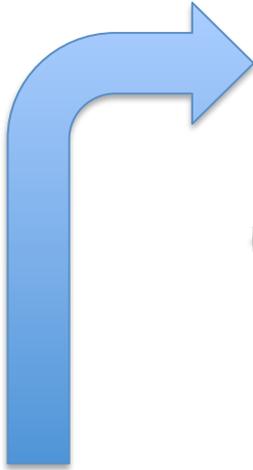
2008年から
5年間観測

星図上の宇宙線の到来方向分布
北半球で最大の72事象を観測



星図について

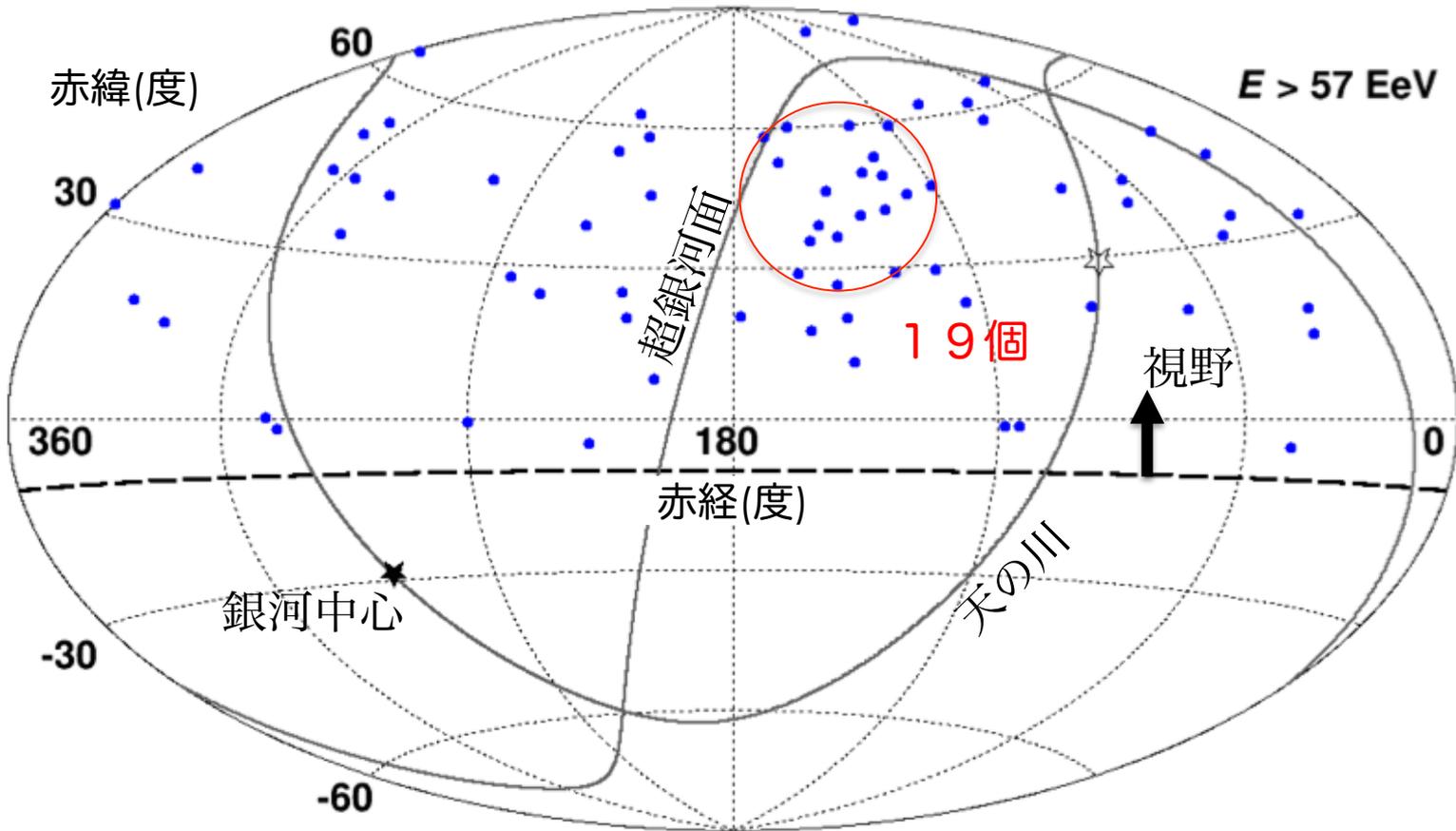
展開



星の固定した座標



最高エネルギー宇宙線の方法



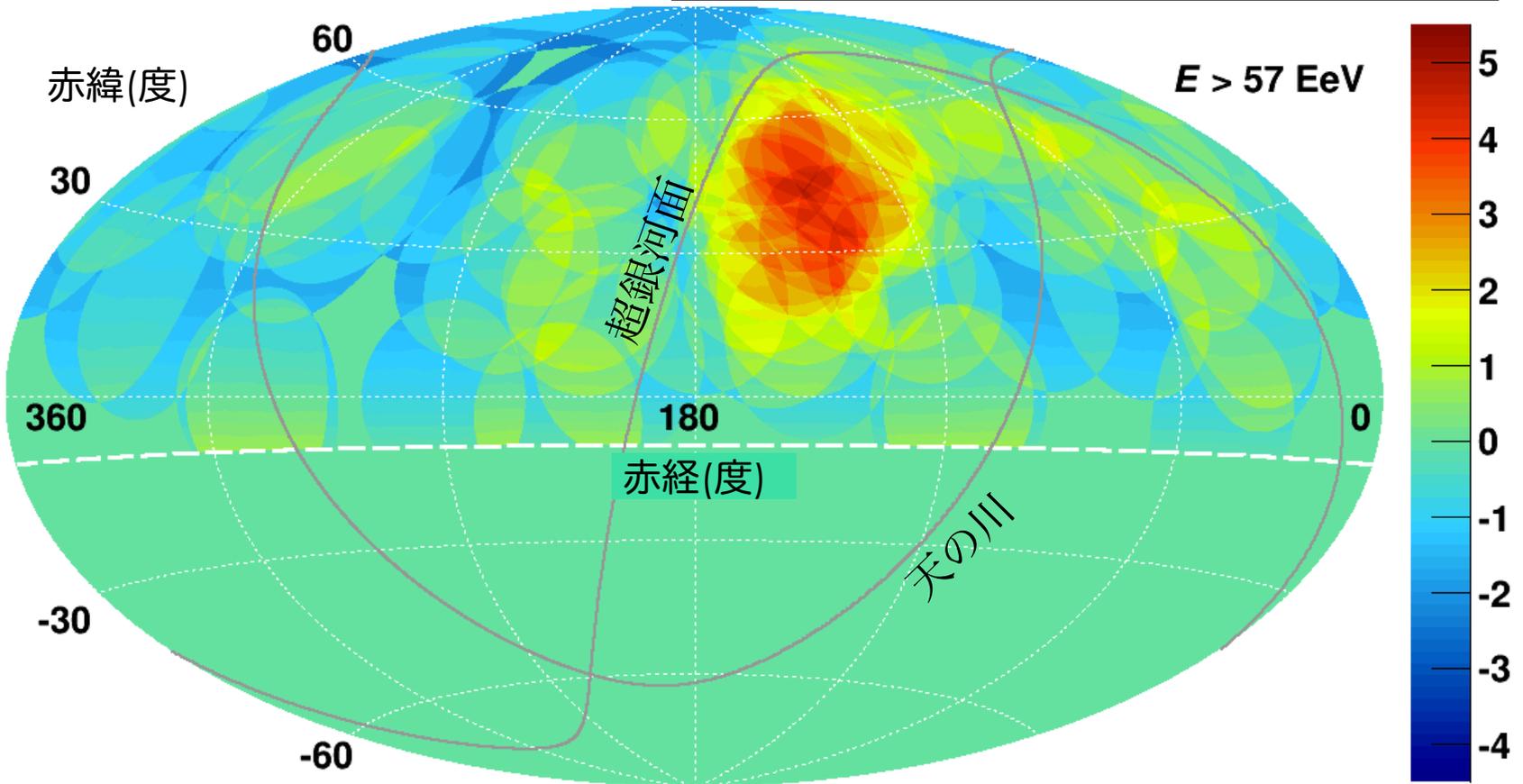
2008年から
5年間観測

星図上の特定の場所に集中 19個/72個)
(等方的な分布では 平均4.5個/72個)



宇宙線のホットスポット

平均的な宇宙線強度からのズレの度合い

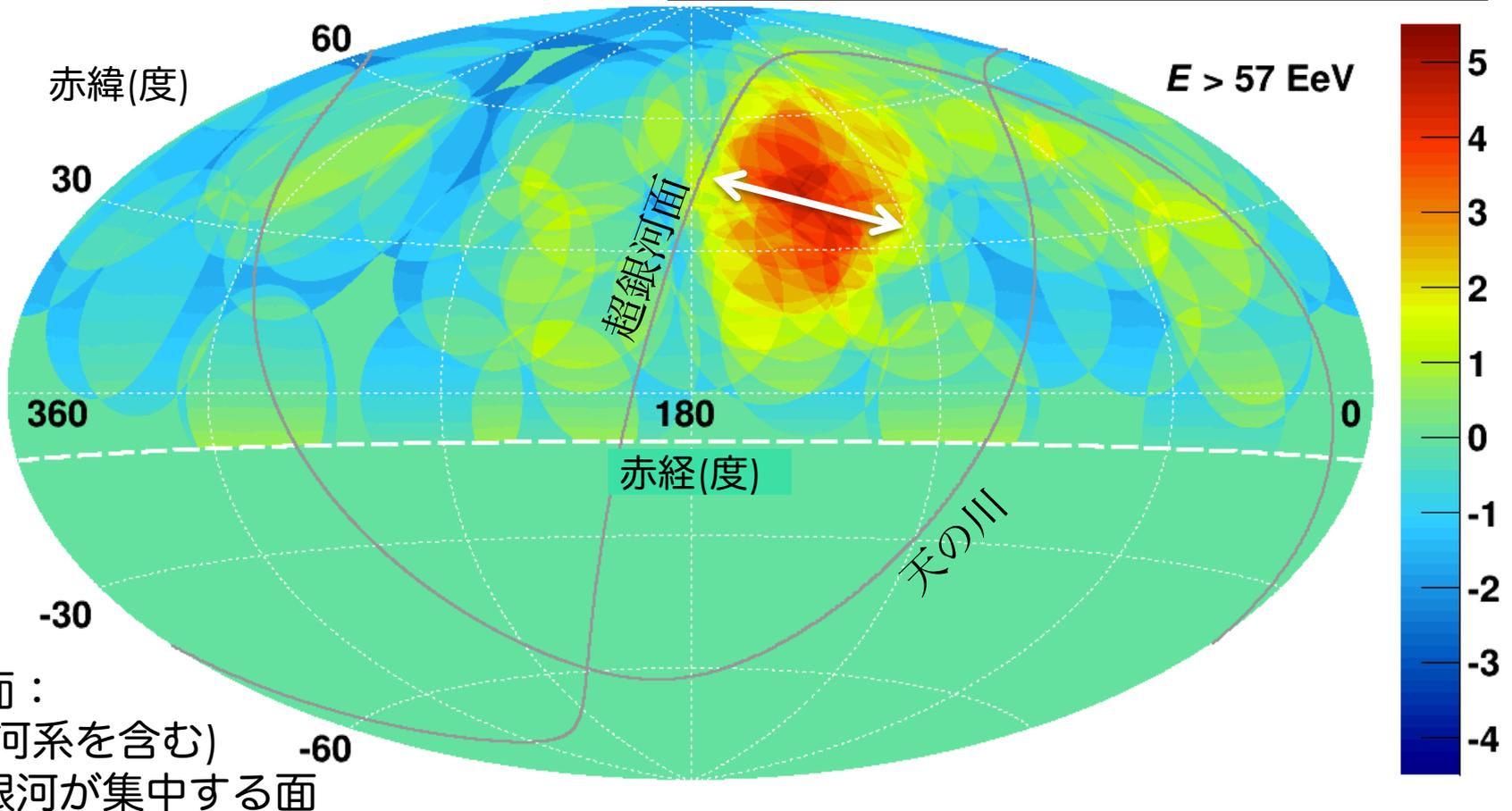


特定方向に最高エネルギー宇宙線のホットスポット
→ 等方的な分布から偶然に現れる確率：37/10万



ホットスポットの大きさ

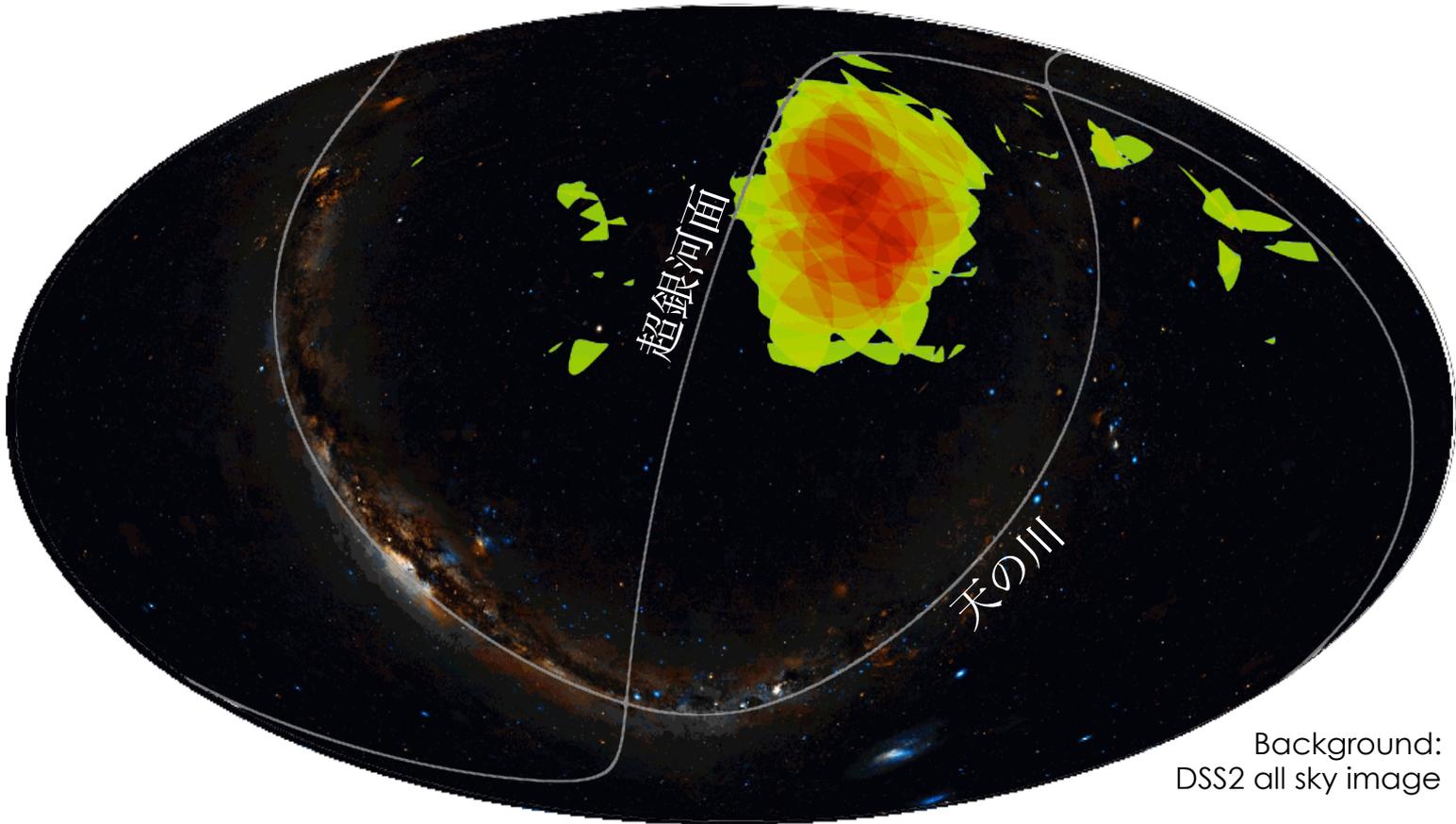
平均的な宇宙線強度からのズレの度合い



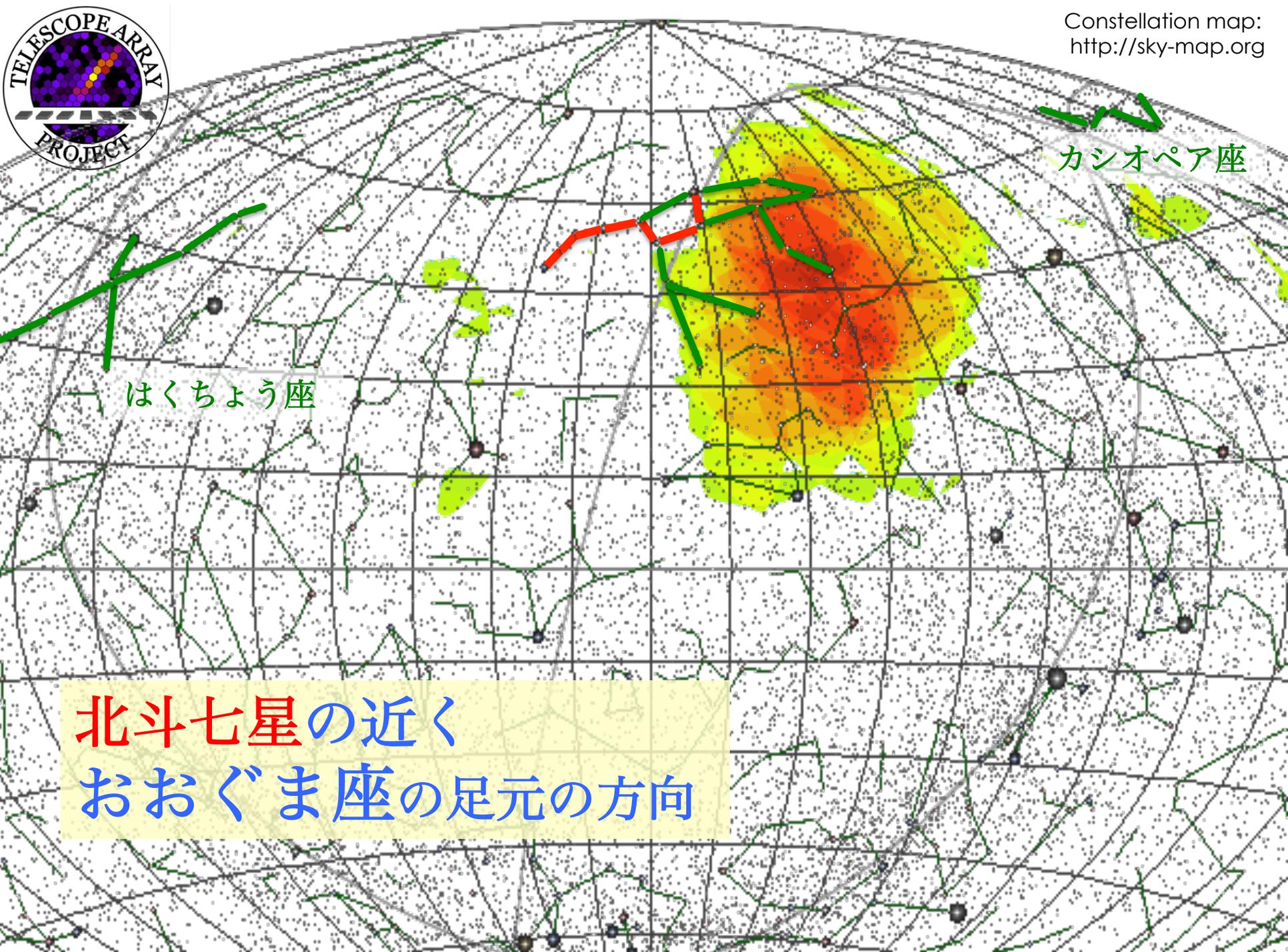
直径約40度の範囲に広がる
超銀河面の近く(ずれ19度)



ホットスポットの方向



天の川(我々の銀河系)から外れた方向
→ 銀河系の外からやって来た



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



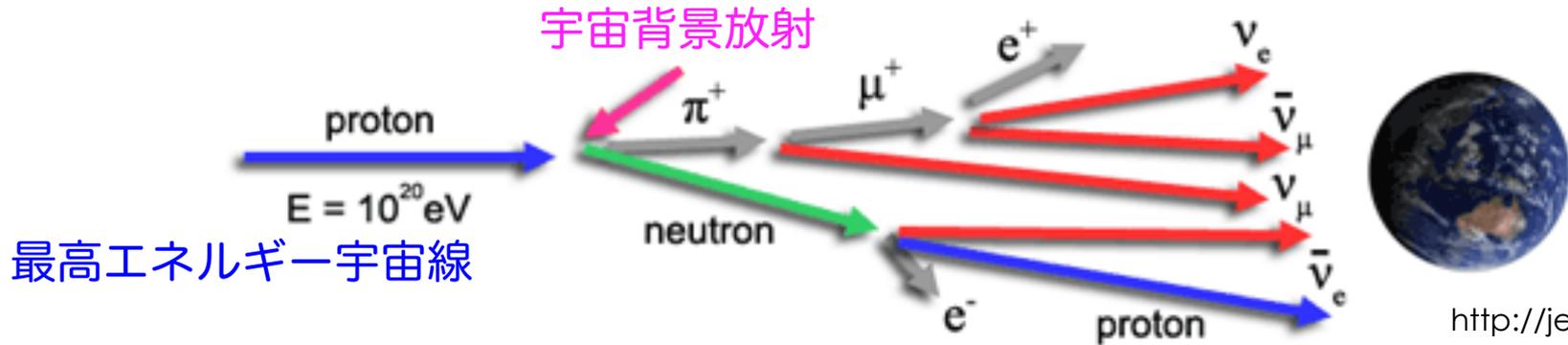
発表の流れ

- 宇宙線（最高エネルギー宇宙線）
- 本研究の目的
- テレスコープアレイ実験
- 研究成果（ホットスポット）
- **研究成果の解釈**
- **まとめ**



生成源までの距離

最高エネルギー宇宙線($>5.7 \times 10^{19} \text{eV}$)の利点



最高エネルギー領域

(宇宙の大きさ：約140億光年)

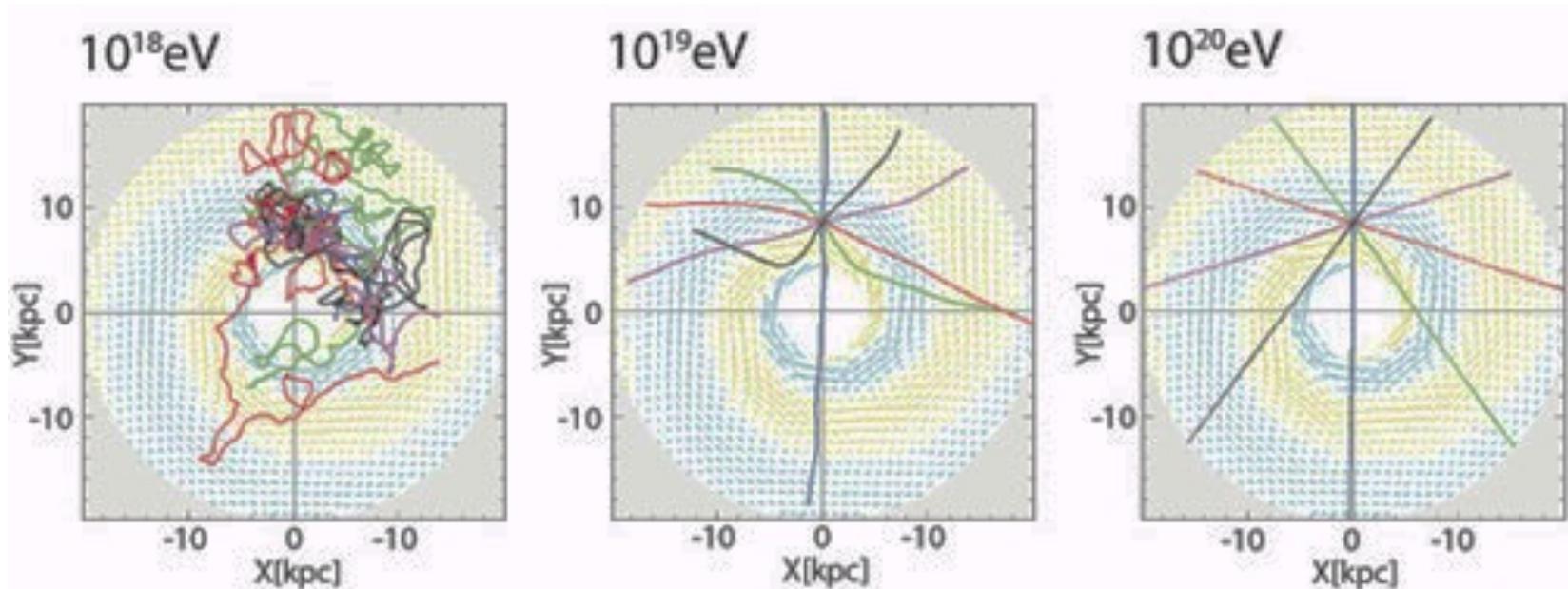
- ❖ 約1.5億光年より遠くからやってくる宇宙線は宇宙背景放射の光子(ビッグバンのなごり)と衝突してエネルギーを失う
→ GZK効果と呼ぶ

最高エネルギー宇宙線は遠方から届かない
宇宙線の生成源を近傍宇宙に限定



生成源の方向

最高エネルギー宇宙線($>5.7 \times 10^{19} \text{eV}$)の利点



宇宙線（陽子）は電気を帯びており銀河系の磁力に曲げられる

最高エネルギー宇宙線は直進性が高い
宇宙線源を特定できる可能性

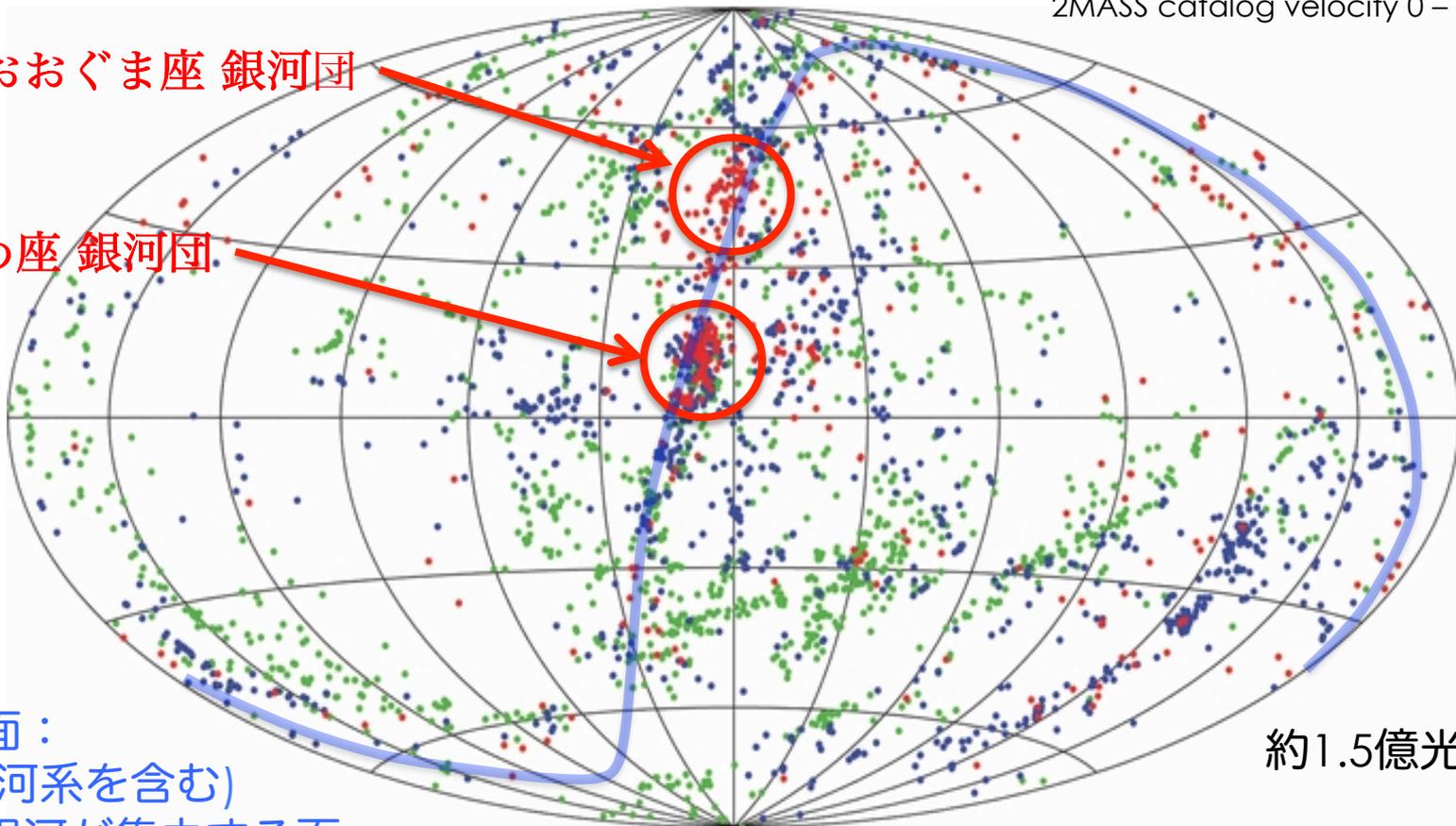


生成源の候補

John P. Huchra, et al 2012, ApJ, 199, 26
2MASS catalog velocity 0 – 3000 km/s

おおぐま座 銀河団

おとめ座 銀河団



超銀河面：
(わが銀河系を含む)
多数の銀河が集中する面

約1.5億光年以内

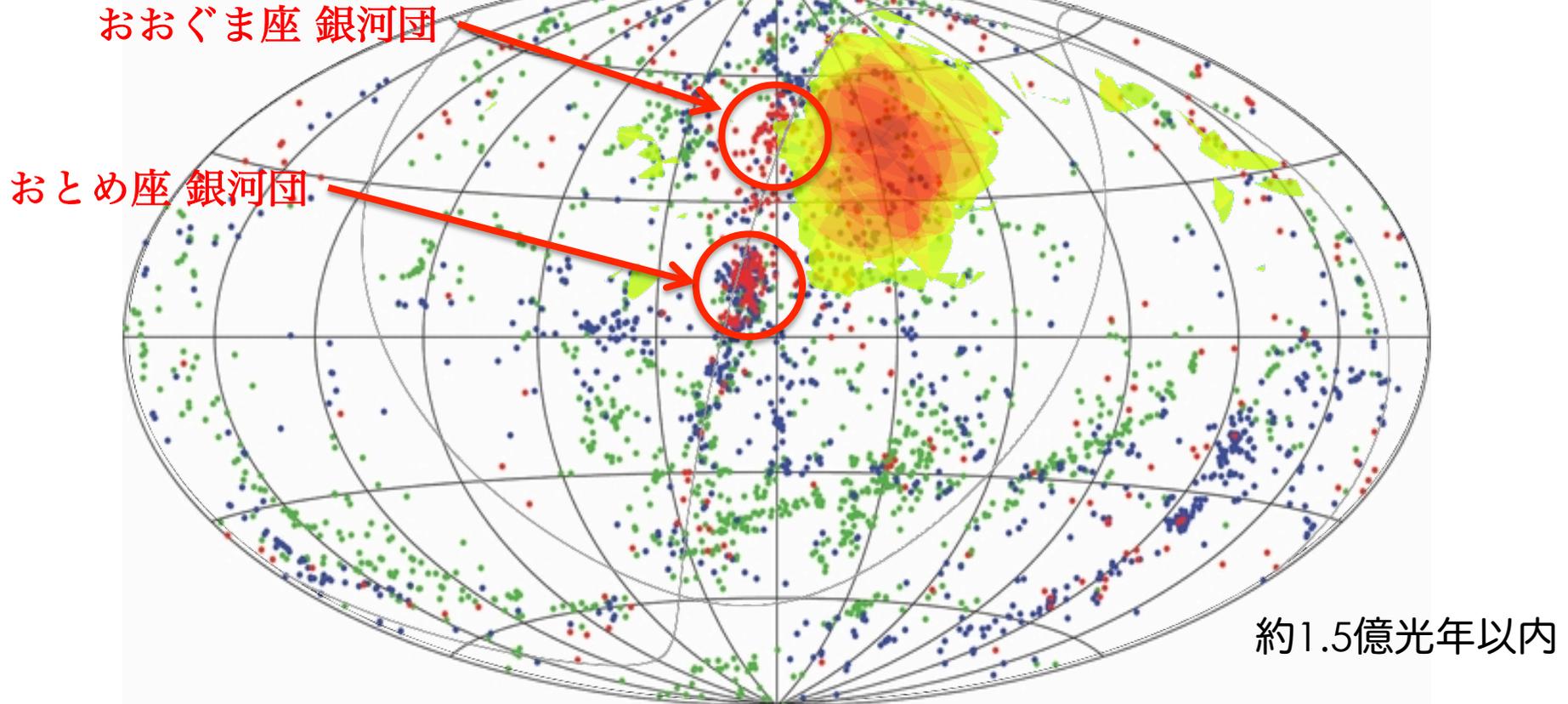
(宇宙の大きさ：140億光年)

近傍銀河の分布
銀河団：銀河の集団



生成源の候補

John P. Huchra, et al 2012, ApJ, 199, 26
2MASS catalog velocity 0 – 3000 km/s



約1.5億光年以内

(宇宙の大きさ：140億光年)

近傍銀河の分布
銀河団：銀河の集団



まとめ

- 研究成果

- テレスコープアレイ宇宙線観測装置により
5年間にわたり**最高エネルギー宇宙線**を観測
- おおぐま座付近の方向に
ホットスポットの兆候を初めて観測

- 今後の展望

- 近傍の銀河団に属する天体が最高エネルギー宇宙線の源の候補だが、観測事例を増やして生成源をつきとめ、生成源でおきている極高エネルギー現象との関連を明らかにしていく