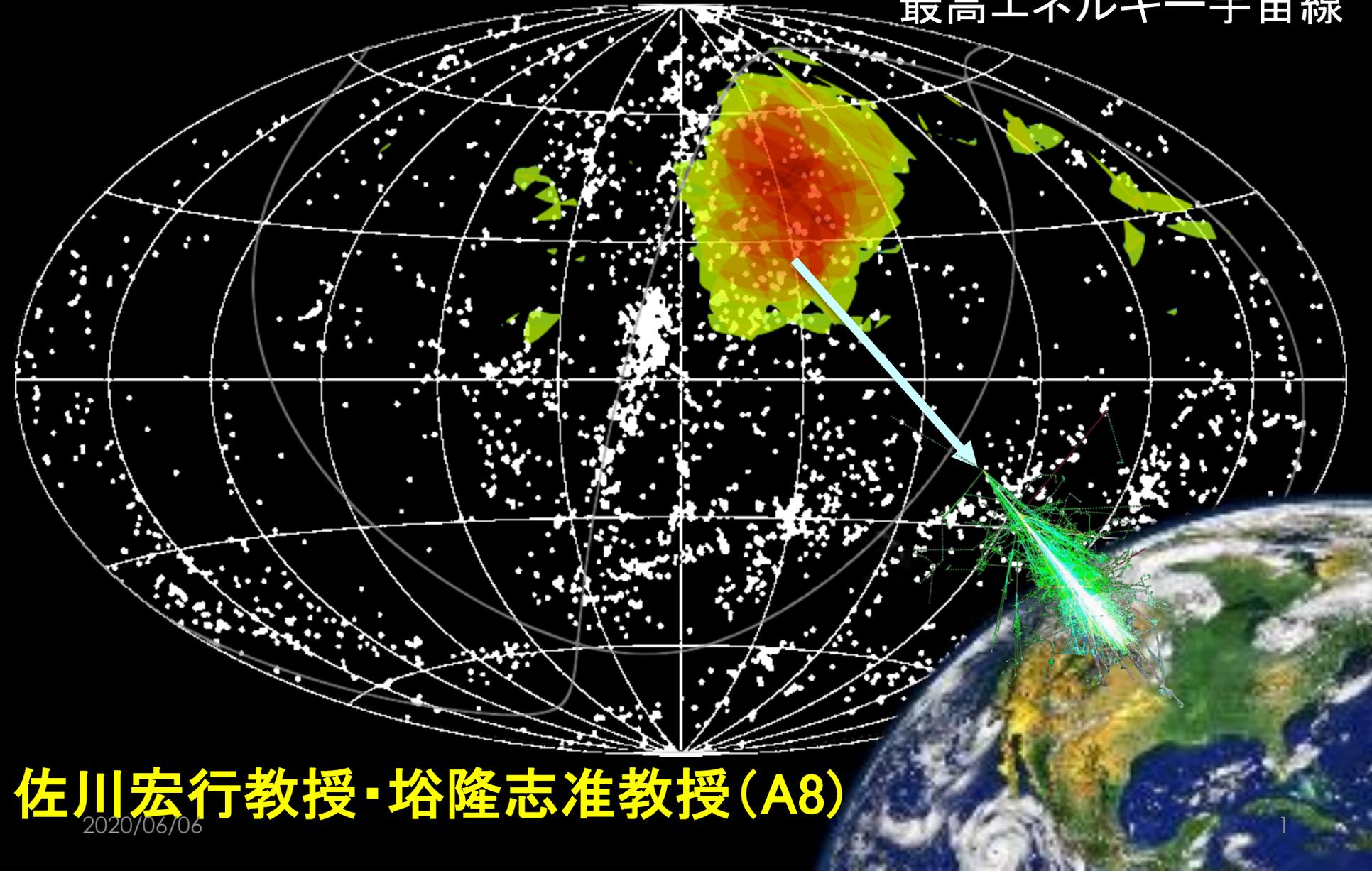


# テレスコープアレイ (TA) 実験

最高エネルギー宇宙線



佐川宏行教授・塔隆志准教授 (A8)

2020/06/06

# TA実験

## A) 最高エネルギー宇宙線の起源探索

- $\sim 10^{20}$ 電子ボルト(eV)
- TAおよび拡張TA (TAx4)

## B) 銀河宇宙線から銀河系外宇宙線の遷移

- $10^{15}$ eV  $\sim 10^{18}$ eV
- TALE

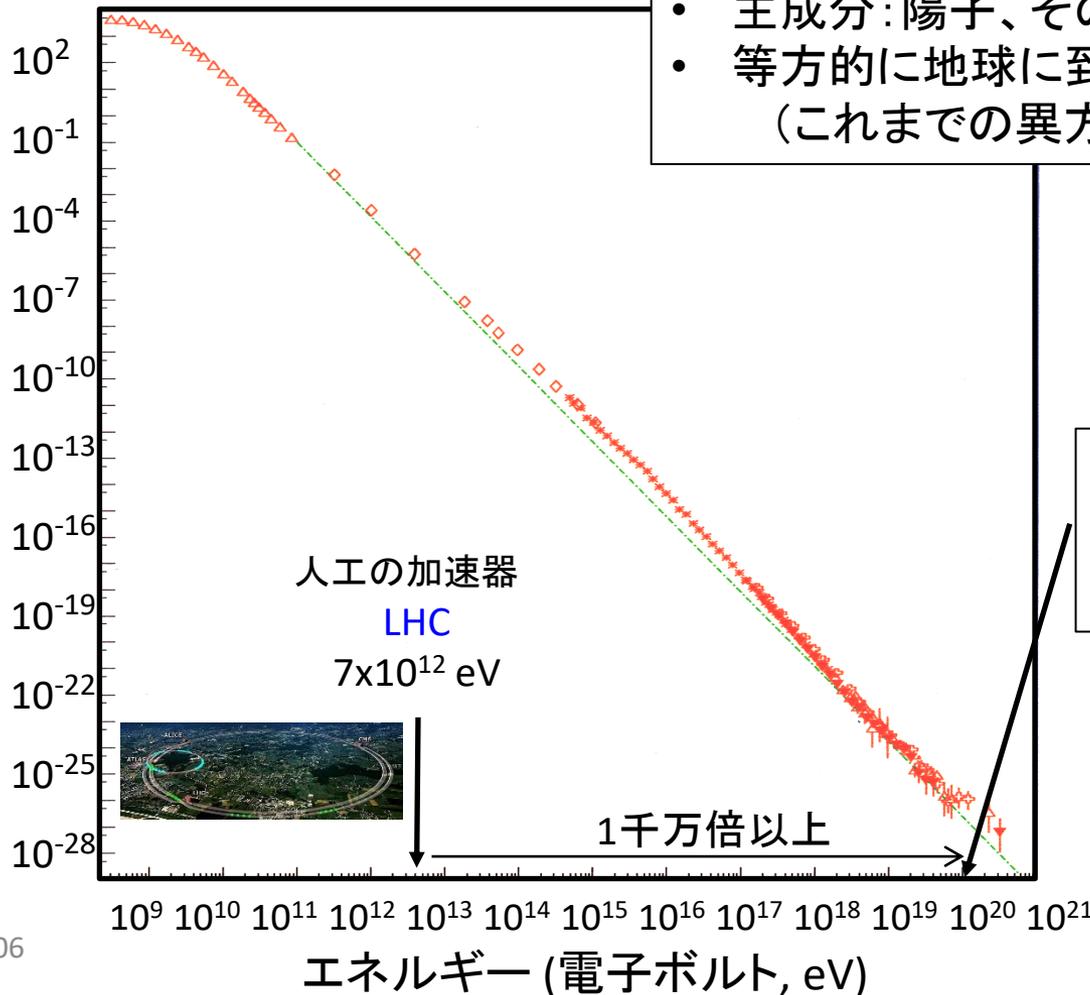
A)+B)で $10^{15}$ eV $\sim 10^{21}$ eV

- 6桁のエネルギー領域にわたる宇宙線の研究

## C) 将来の測定器開発の世界的拠点

# 宇宙線とそのエネルギー

宇宙線の到来頻度



# 最高エネルギー宇宙線の発生源候補 宇宙の最強加速器は？



宇宙最大BH  
 $M_{\text{BH}} \sim 10^6\text{--}9 M_{\text{sun}}$

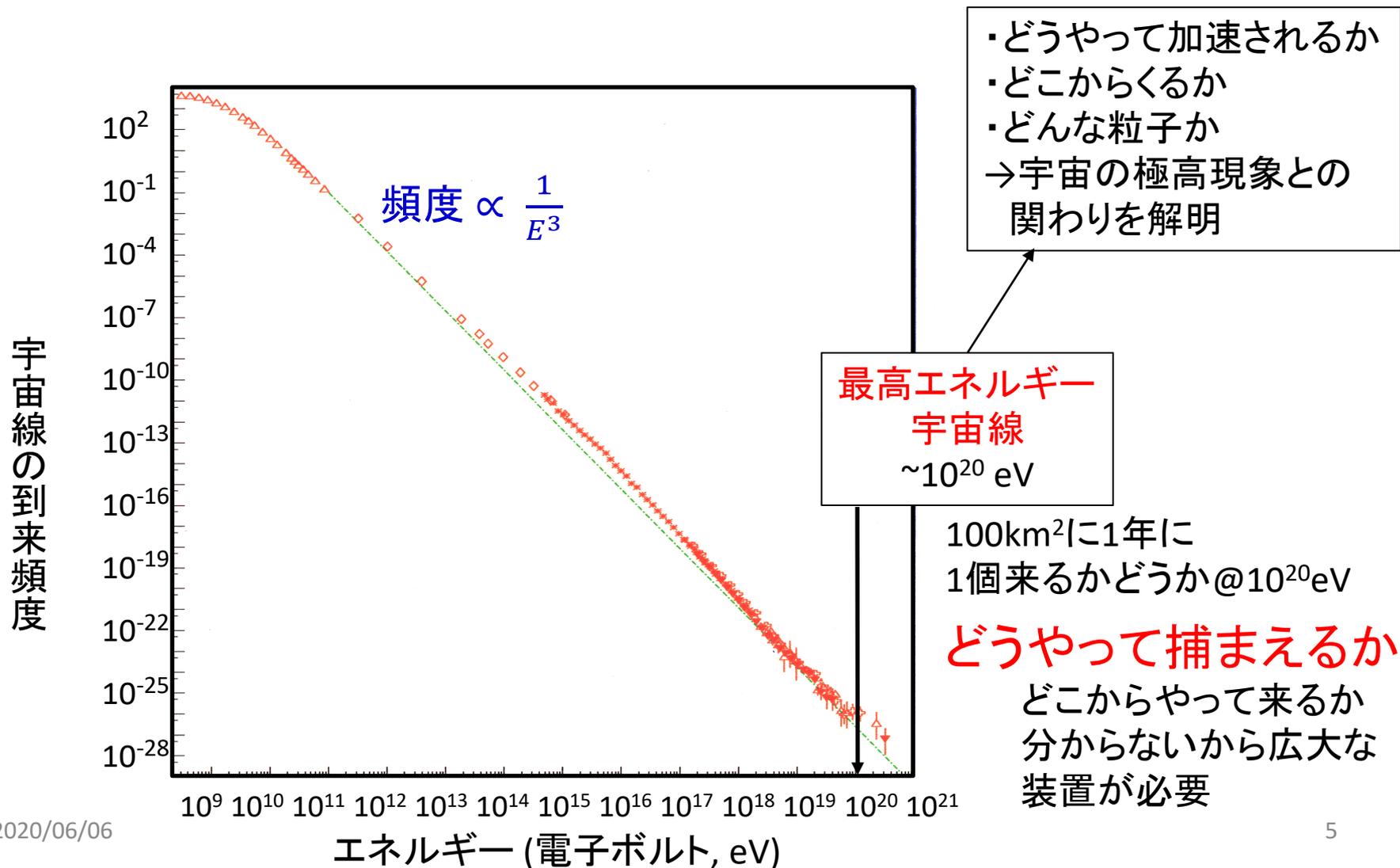
宇宙最強爆発  
 $E_{\text{GRB}} \sim 10^{51} \text{ergs}$

宇宙最強磁場  
 $B \sim 10^{15} \text{G}$

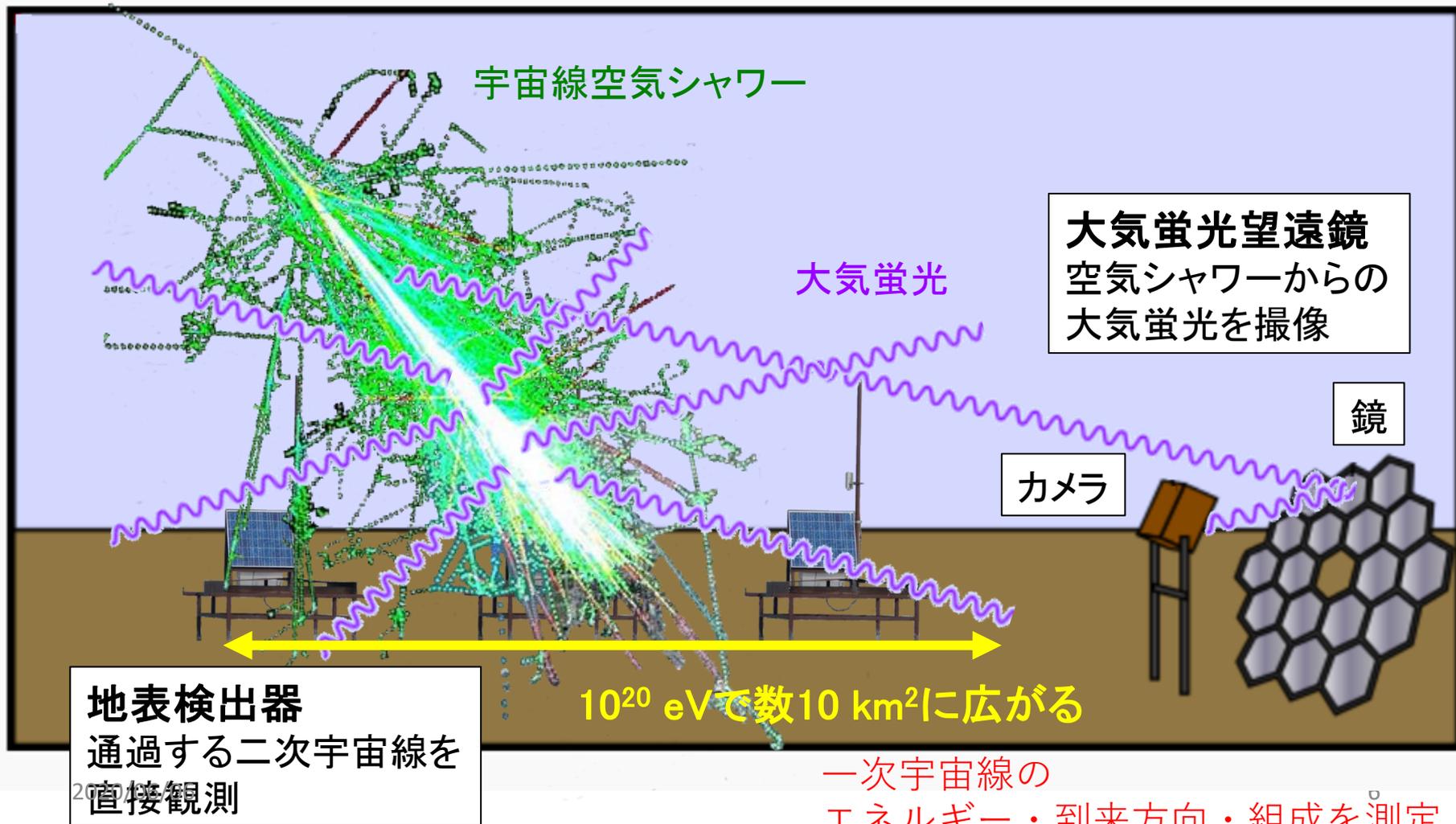
宇宙最大重力束縛天体  
 $r_{\text{vir}} \sim \text{a few Mpc}$

それとも  $10^{20} \text{eV}$  以上の他の未知現象？

# 宇宙線のエネルギー



# 地表検出器と大気蛍光望遠鏡



# テレスコープアレイ(TA)

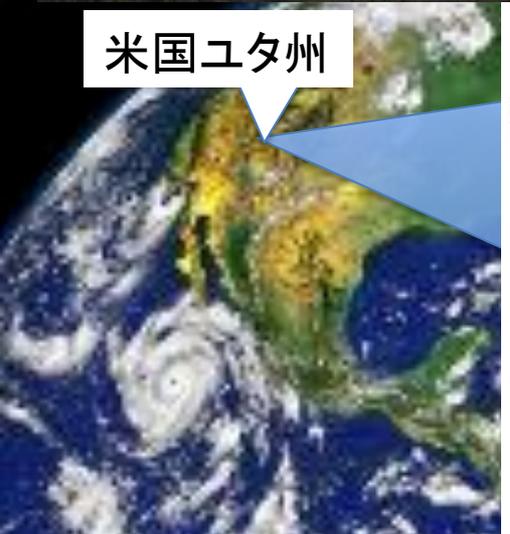


日米韓露ベルギー・チェコ6か国  
130名 (日本75名)

大気蛍光望遠鏡



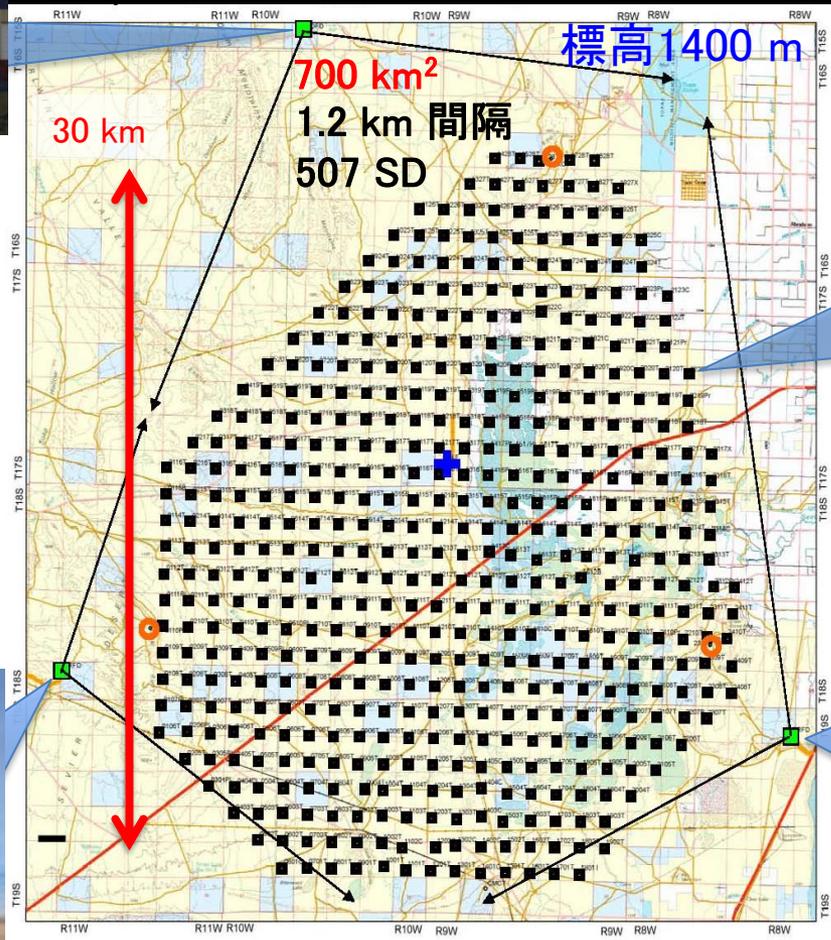
米国ユタ州



大気蛍光望遠鏡



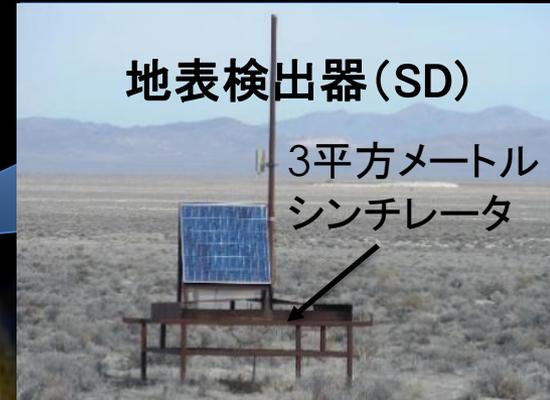
2026/06/06



2008年5月より  
ハイブリッド観測開始

地表検出器 (SD)

3平方メートル  
シンチレータ



大気蛍光望遠鏡 (FD)



# テレスコープアレイ(TA)



日米韓露ベルギー・チェコ6か国  
130名 (日本75名)

大気蛍光望遠鏡



米国ユタ州



大気蛍光望遠鏡



2020/06/06



2008年5月より  
ハイブリッド観測開始

地表検出器 (SD)

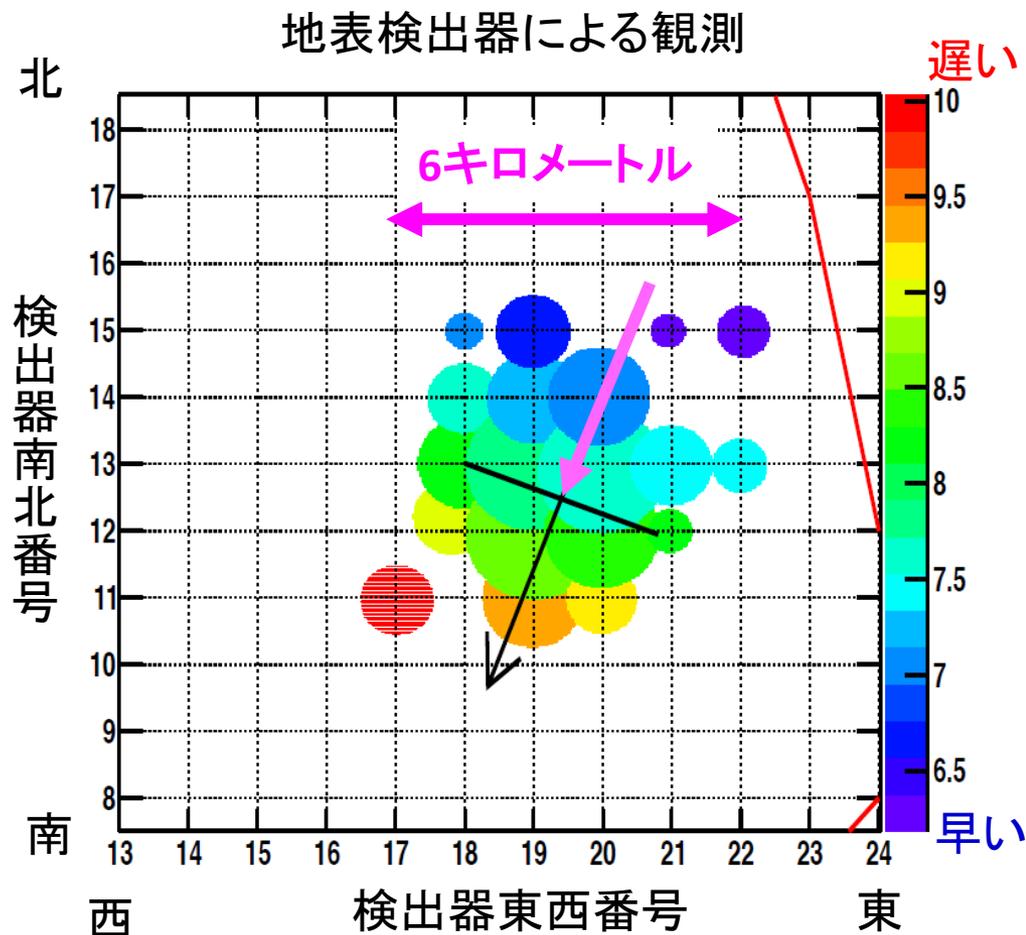
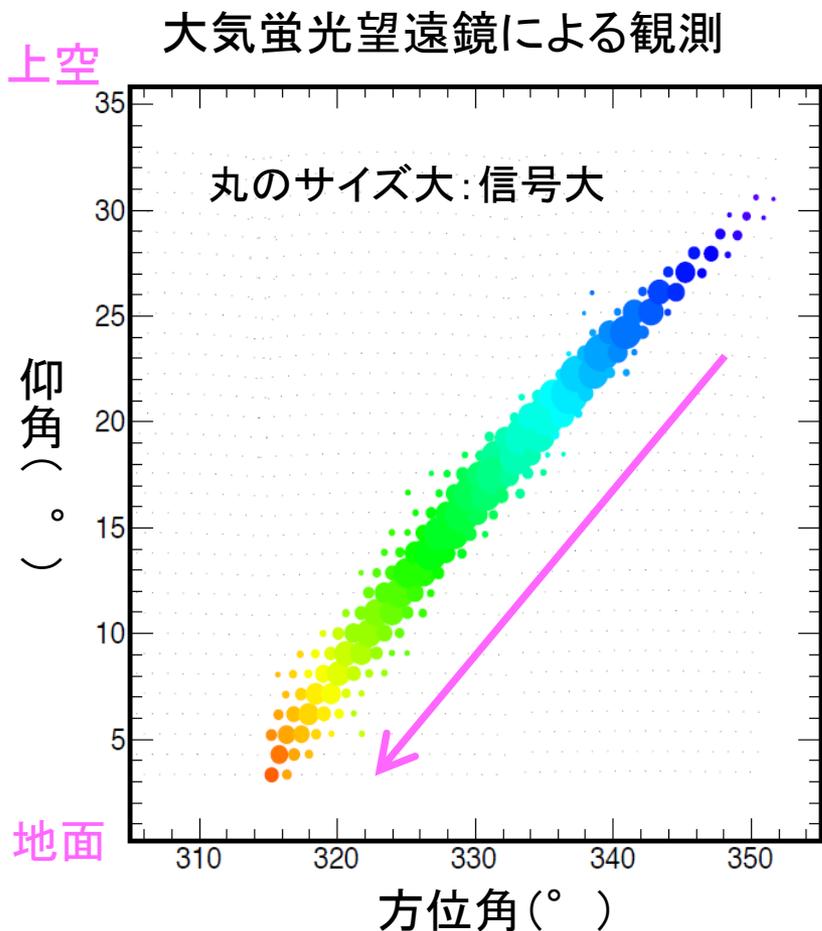
3平方メートル  
シンチレータ



大気蛍光望遠鏡 (FD)



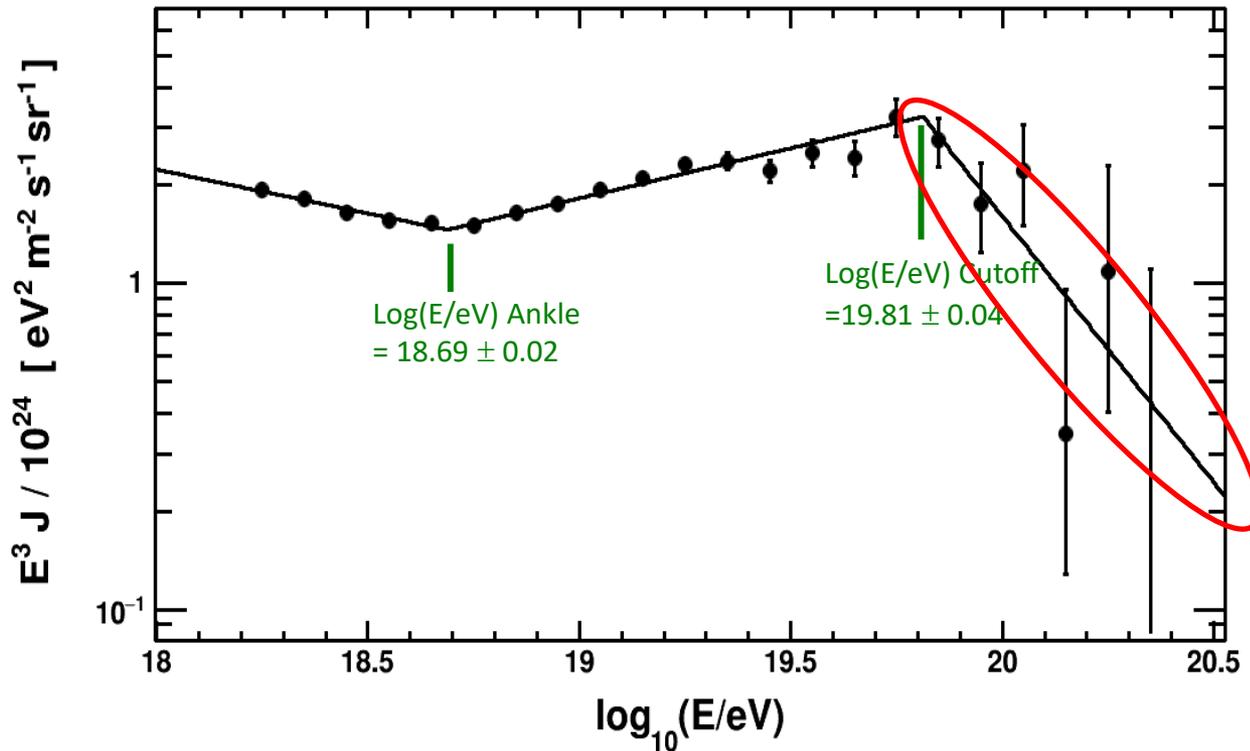
# 大気蛍光望遠鏡と地表検出器による 同時観測例



# TAにおける観測

- 超高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトル
- 最高エネルギー宇宙線の到来方向
- 超高エネルギー宇宙線の粒子種

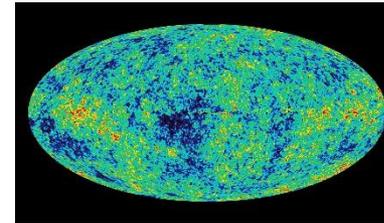
# TAのエネルギースペクトル (11年)



10<sup>20</sup>eV付近で急激に頻度減少

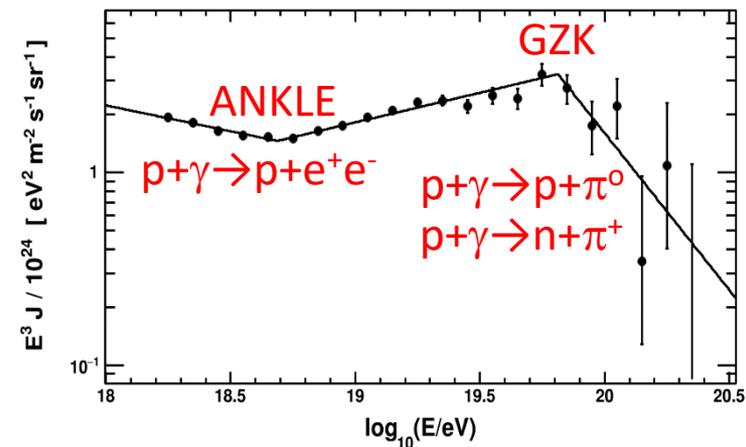
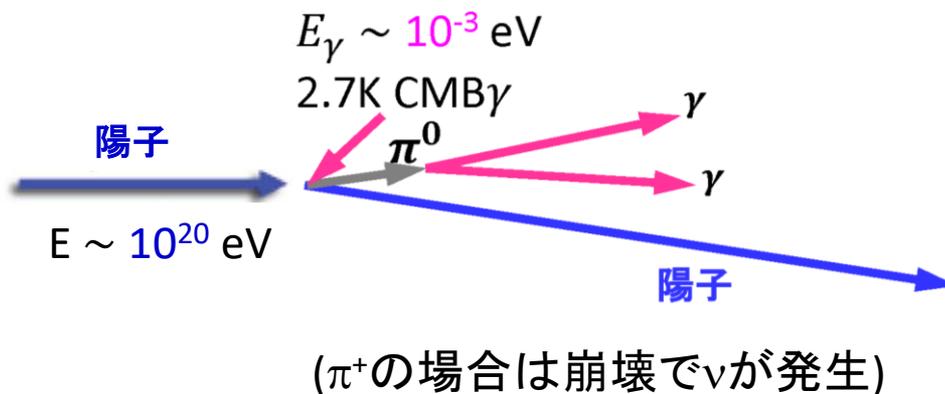
# GZK限界? (有力な解釈として)

- 1964年 宇宙背景放射 (CMB) の発見



(WMAP)

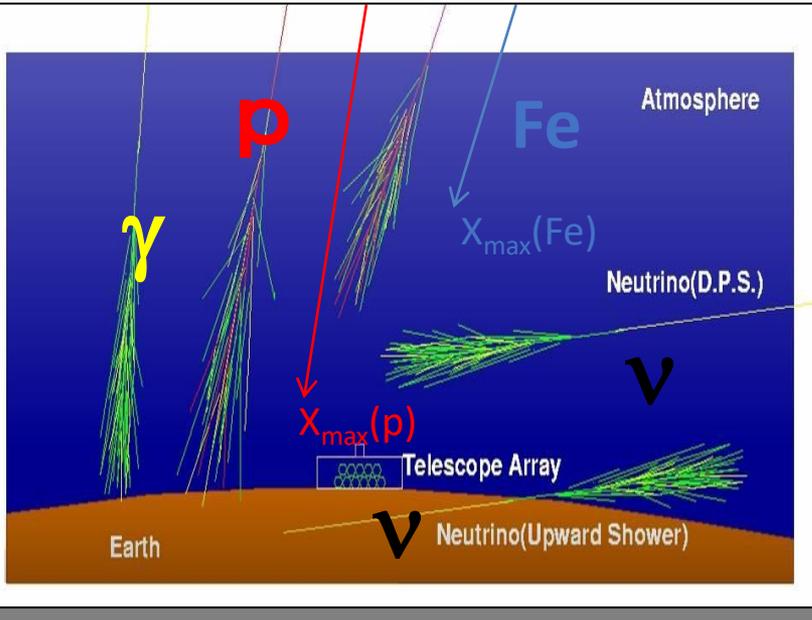
- 1965年 **GZK** (Greisen-Zatsepin-Kuzmin)の**予言**
  - 特殊相対性理論によると、**最高エネルギー宇宙線** ( $\sim 10^{20}$  eV) は**CMB光子**と相互作用して1.5億光年程度しか伝播できず、地球に届くときには頻度が急激に減少する



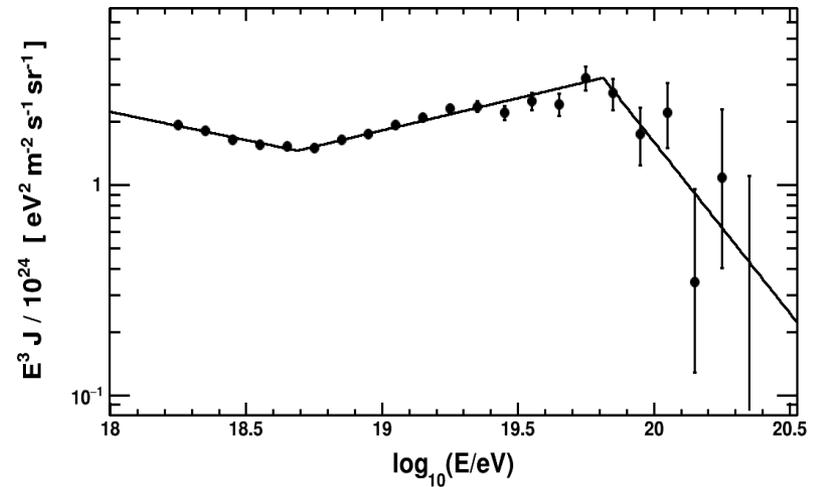
- 陽子静止エネルギーの $10^{11}$ 倍(1000億のローレンツ変換)
- プランクスケールに最も近い最高エネルギーでの特殊相対性理論の検証

超高エネルギーガンマ線や超高エネルギーニュートリノの探索が重要

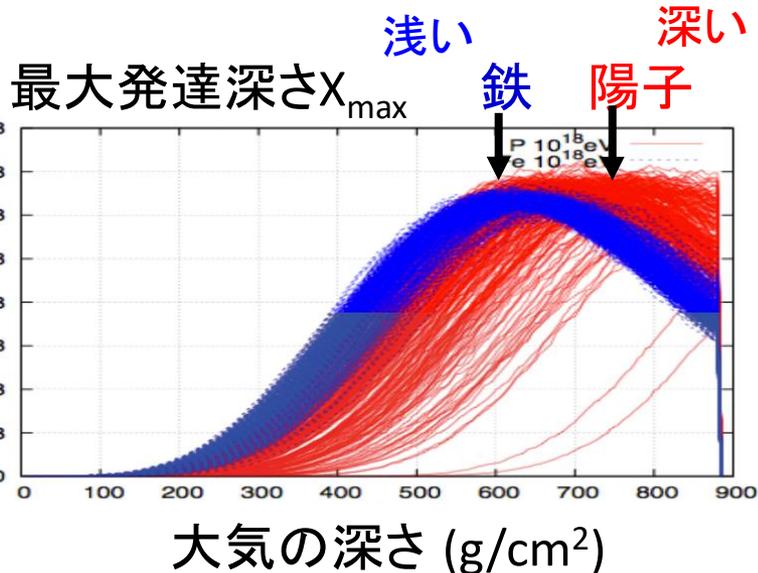
# 粒子の種類のご同定も重要



- 粒子によって大気中で**発達する深さが違う**
  - 大気蛍光望遠鏡で観測



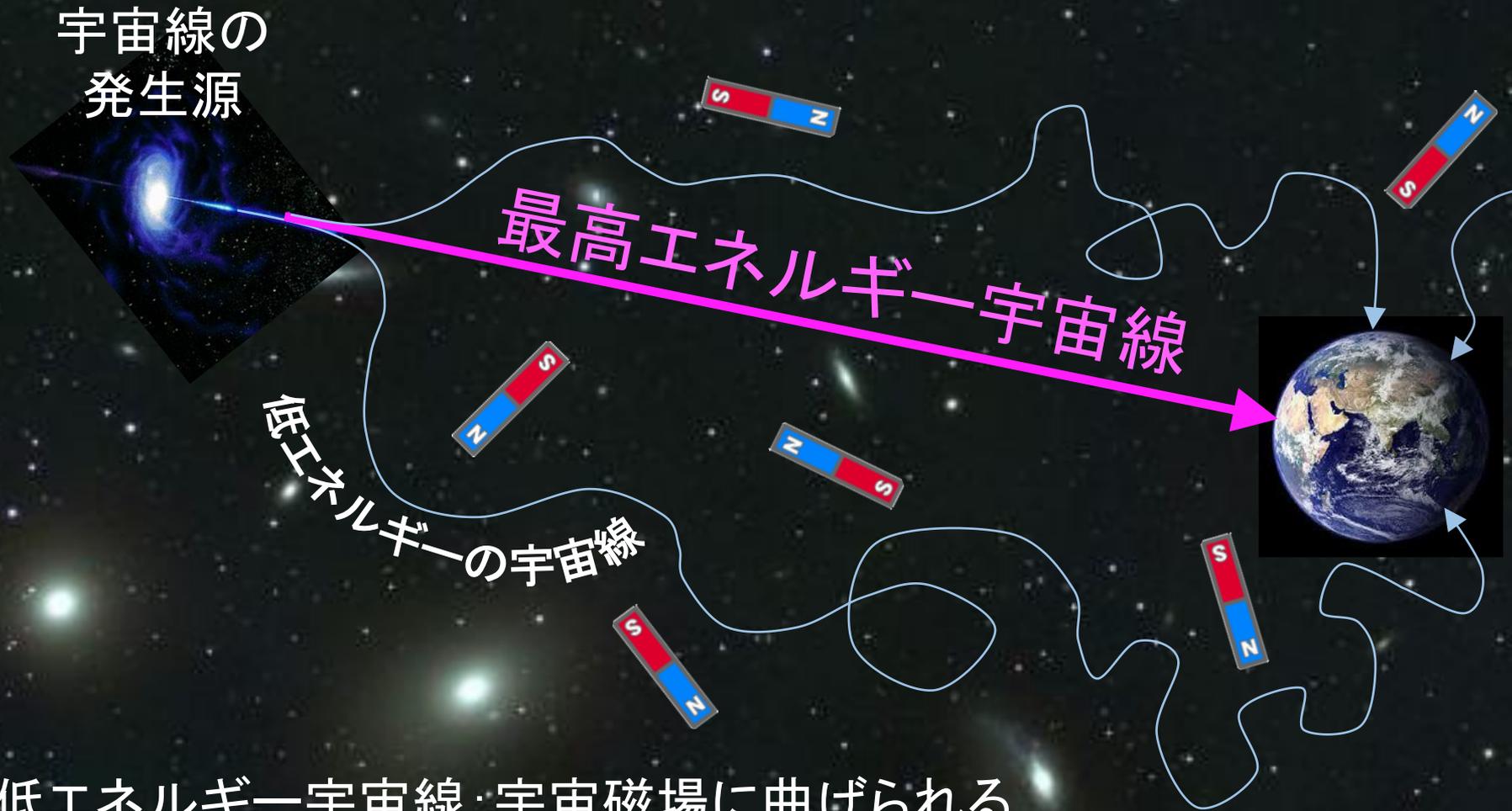
- スペクトルの折れ曲がり現象の現れ
- その原因を探るうえで粒子種の同定は重要
- 粒子の種類を知ることば発生および伝播のメカニズムを理解する上で重要



# TAにおける観測

- 超高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトル
- 最高エネルギー宇宙線の到来方向
- 超高エネルギー宇宙線の粒子種

# 最高エネルギー宇宙線の到来方向と発生源



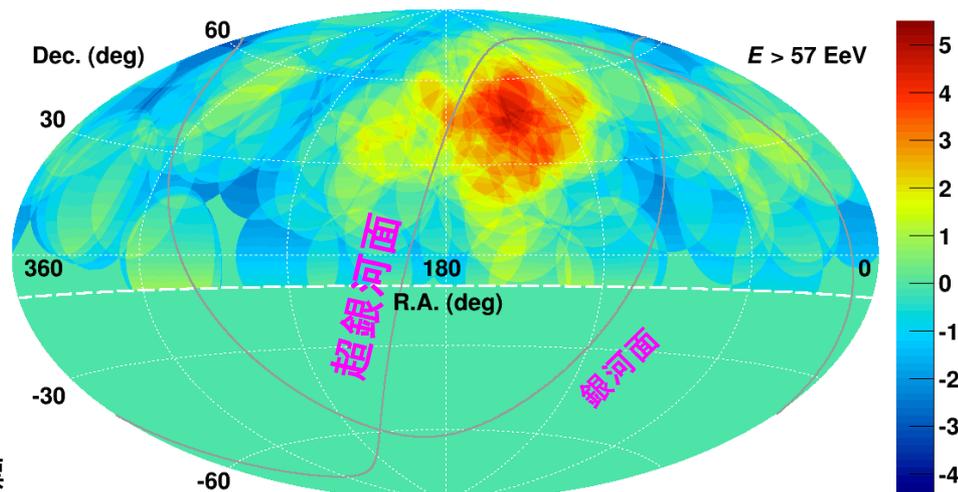
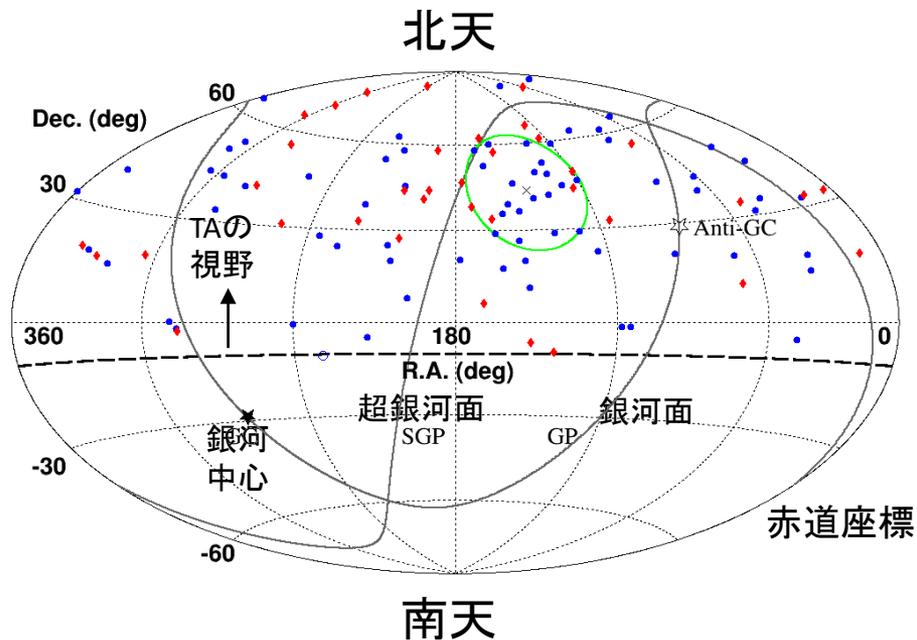
低エネルギー宇宙線：宇宙磁場に曲げられる

最高エネルギー宇宙線：ほぼ真っ直ぐ進む⇒発生源特定の期待

# 最高エネルギー宇宙線の異方性の兆候

(SD 7年間のデータ)

5.7x10<sup>19</sup> eV以上の宇宙線の到来方向分布 • 20°の半径の円でのoversampling



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

23/6.9 ~350%の流量超過

- 最大の有意度 5.1  $\sigma$
- 一様分布の場合に5.1  $\sigma$ を偶然超える確率:  $3.7 \times 10^{-4}$  (3.4  $\sigma$ )

この起源は何か → 今後統計を増やして確認  
その他の異方性の兆候も見えつつある

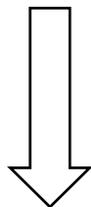
# TAの拡張

- TAx4（最高エネルギー宇宙線の観測面積拡張）
  - TAで $5.7 \times 10^{19}$  eV以上の事象の観測レートは~15/年
  - 最終的に観測レートを4倍に上げることを目指す
- TALE（低エネルギーへの拡張）

# TA拡張計画 TAx4

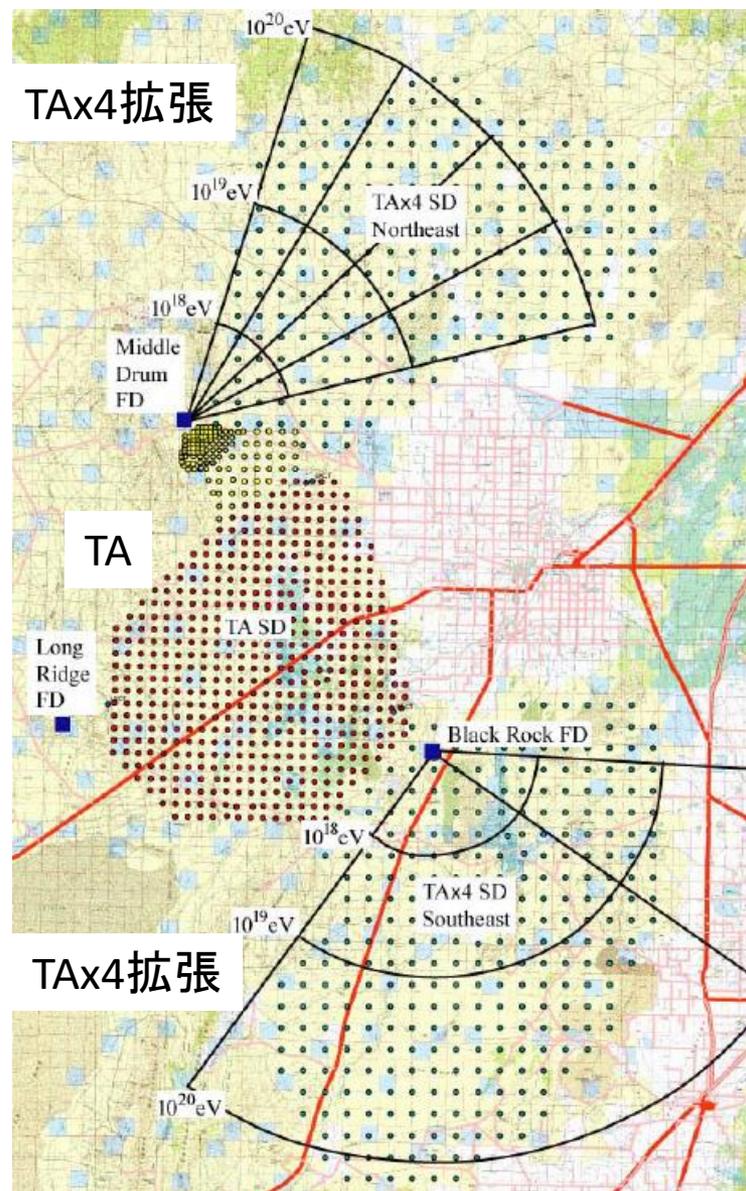
- 地表検出器の面積を拡張 (TAの4倍)

- 日本 (+韓国)
- シンチレータ検出器(3m<sup>2</sup>)500台:
  - 2.1km間隔設置

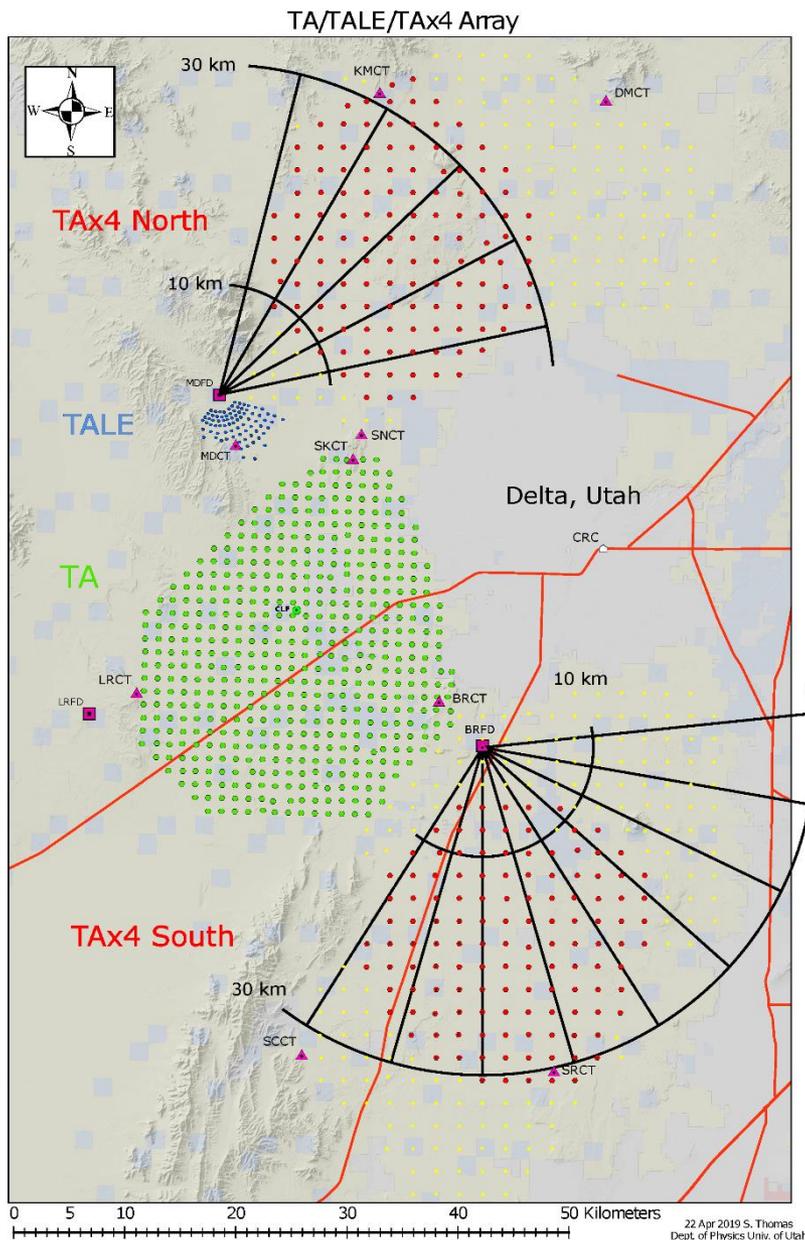


- データ取得ペースを上げてホットスポットなどの異方性を検証

- 大気蛍光望遠鏡を2か所追加
  - 米国担当



# TAx4 SD



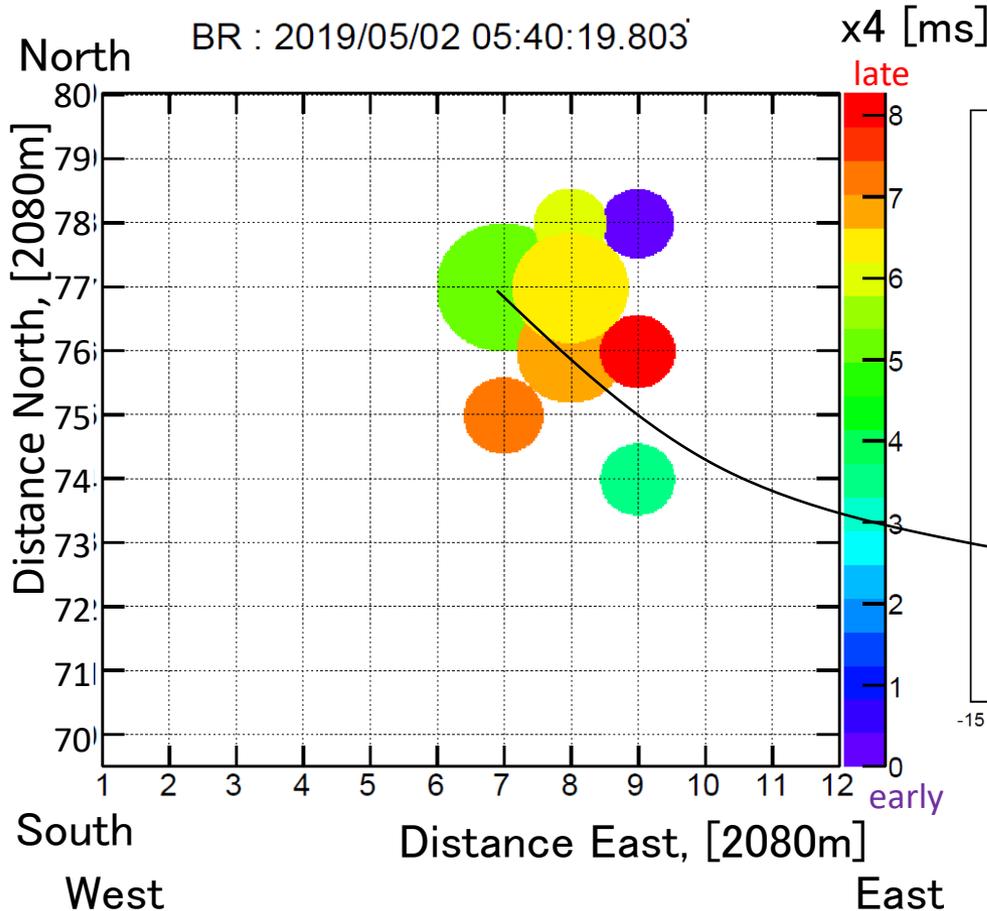
- TA
- TAx4: 2019年2月3日にヘリでSD**257**台設置
- TAx4: planned
- TALE

今は TA x 2.5 (東京都の面積に匹敵)

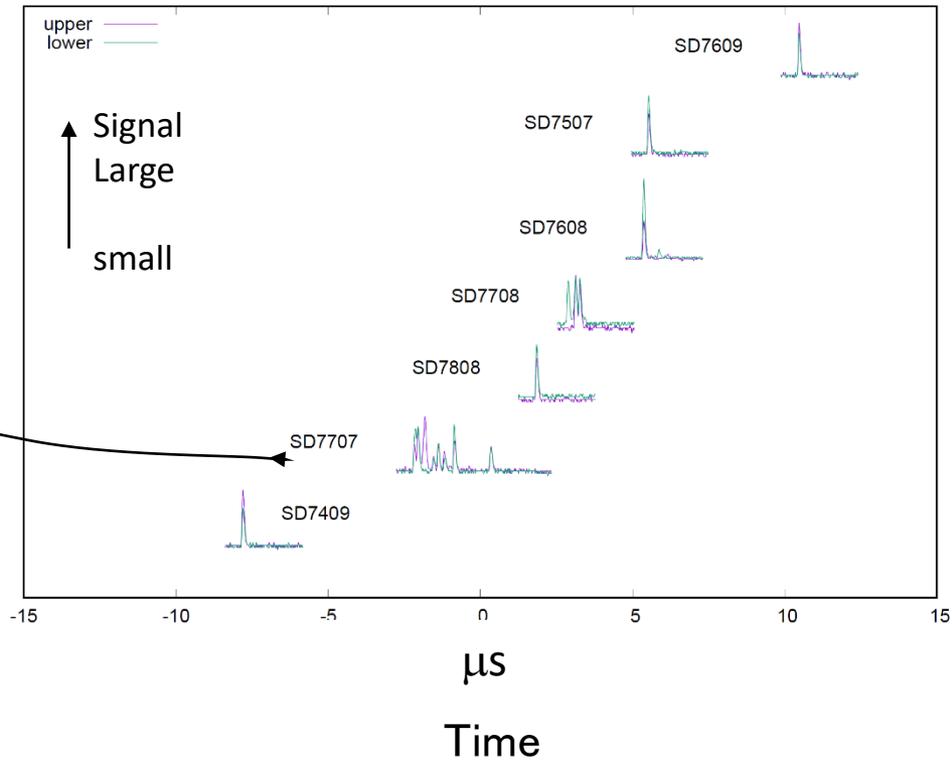
# TAx4 SD 事象例

Footprint on the ground

BR : 2019/05/02 05:40:19.803'



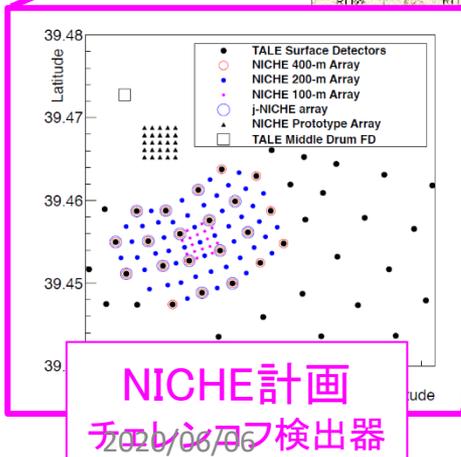
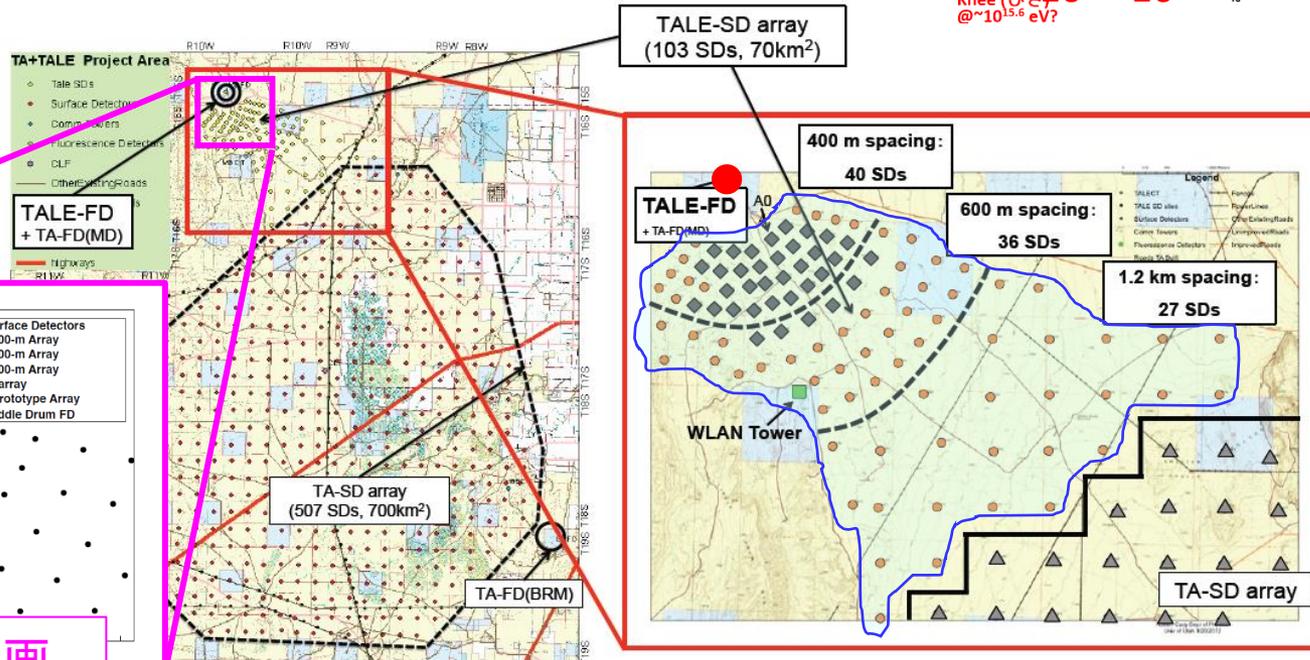
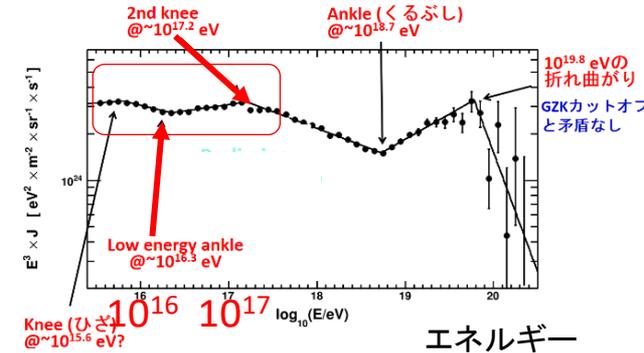
Wave forms of hit SDs



# TA低エネルギー拡張 (TALE)

- 銀河系宇宙線から銀河系外宇宙線への遷移を観測
  - スペクトルの折れ曲がりと粒子種の変化を研究
    - TALE望遠鏡(FD): 1ステーション稼働中
    - TALE地表検出器(SD):
      - シンチレータ検出器を密に設置 ⇒ 稼働中
  - SDデータを加えたFDデータ ⇒ 精度よく粒子種を同定

TAのエネルギースペクトル (平均)



NICHE計画  
2020/06/06  
700m検出器

TALEとNICHEで $\sim 10^{15} \text{ eV}$ 以上の粒子同定を目指す

# TA以外との共同研究@TAサイト

## • 次世代装置の開発試験

- **FAST** (新型大気蛍光望遠鏡アレイ)
- **CRAFFT** (フレネルレンズ型大気蛍光望遠鏡)
- **EUSO-TA** (EUSO試作機の試験)

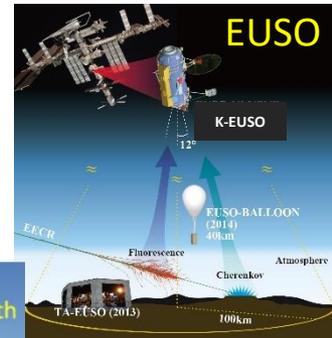
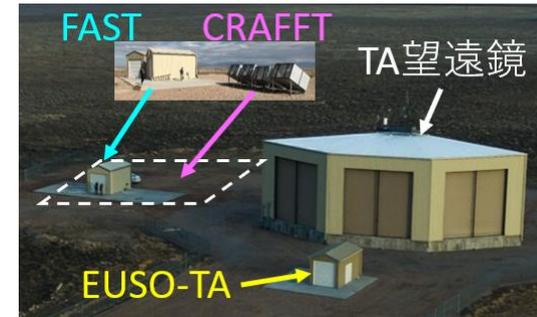
- *EUSO*: 国際宇宙ステーションからの最高エネルギー宇宙線の観測計画

## • 地表検出器の相互検証

- *Auger SDs@TA* (空気シャワー中の  
ミュオン過剰問題)

## • 学際的研究

- 雷とTA SD広域信号観測



Augerは南米の  
最高エネルギー観測所

# 大学院での研究

赤は海外、青は英語

- 修士1年前期
  - 講義@本郷
  - TAの研究・開発@柏
- 修士1年後期から
  - 年に1度か2度ユタに
    - 観測・保守
      - 1サイクルは約1か月
- ゼミ
- 修士テーマ
  - 宇宙線データの較正・解析
  - 測定器の開発

## TA会議

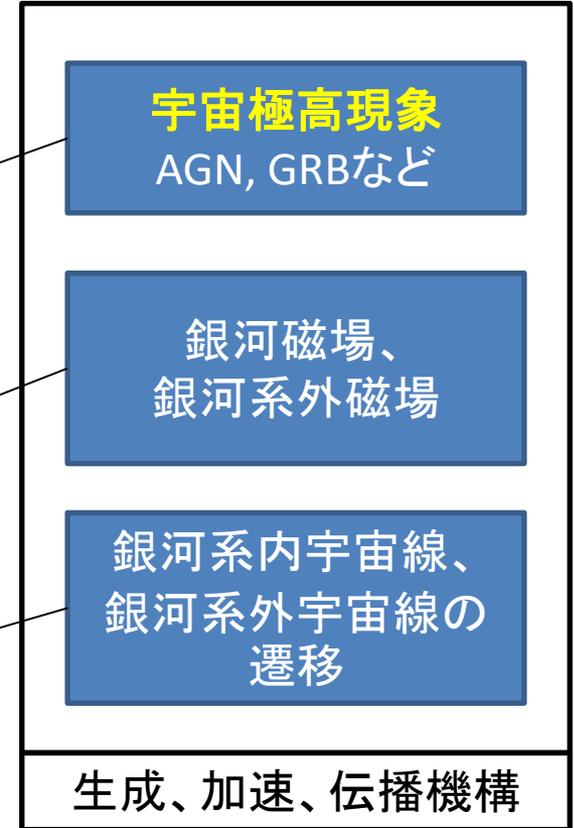
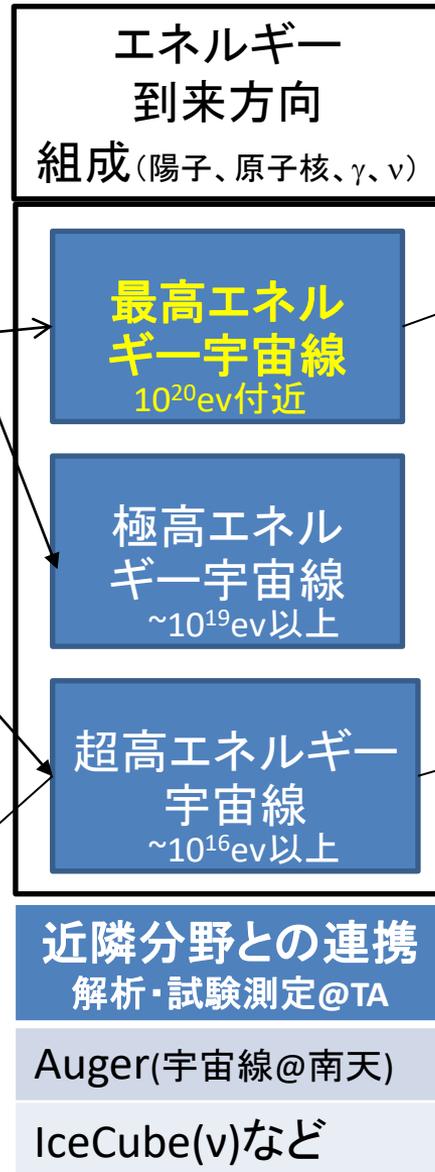
- 一堂に会して
  - 全体: 6月@米国 / 12月@日本
  - 日本 (\*): 隔月@柏など
  - 拡大解析: 3月@日本または韓国  
秋@ベルギー
- TV/電話/skype会議
  - 解析(全体): 毎月
  - 日本 (\*): 毎週
  - 運用(全体): 毎週
  - 個別の解析など: 毎週

皆さんの積極的な参加を歓迎

# TA(サイト)に関する研究

TA以外のグループとの共同研究を含む

<b>TA</b>	稼働中 $10^{18} \sim 10^{20.5}$ eV
最高エネルギーへ視野拡張計画	
<b>TAx4</b>	4倍TA (1/2完成)
次世代地表検出器計画	60倍TA: 高性能、安価SD、FD、電波観測の開発など
JEM-EUSO計画	宇宙(ISS)から
低エネルギーへの拡張計画	
TALE	$10^{16} \sim 10^{19}$ eV
NICHE計画	$10^{15} \sim 10^{18}$ eV



加速器実験  
実験データ(LHC)  
空気シャワーモデル  
(ハドロン相互作用)

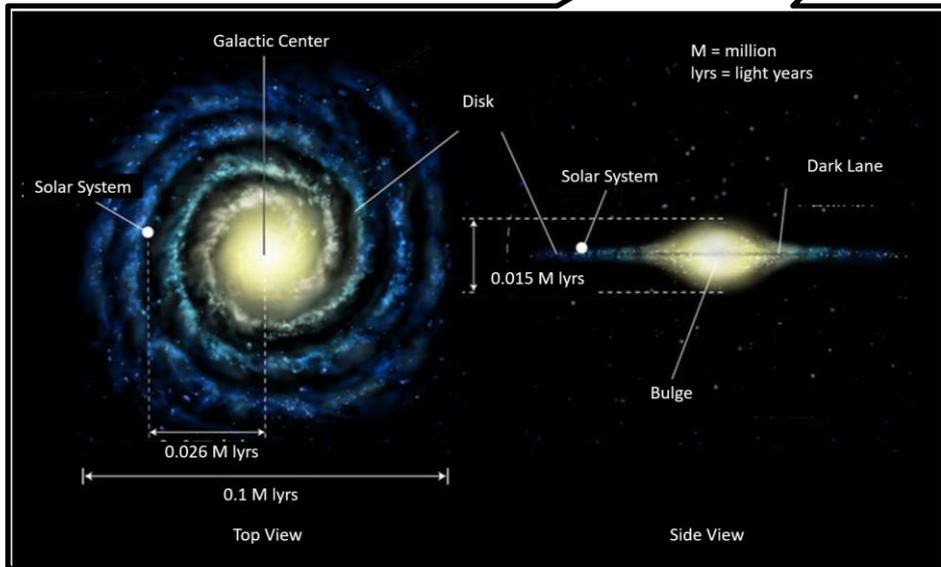
LHC:  $E_p \sim 7 \times 10^{12}$  eV

- ・ 雷の解明
- ・ DIMS: 暗黒物質探索と 流星観測

# How large is the place where we are?

To the local large scale structure of the Universe

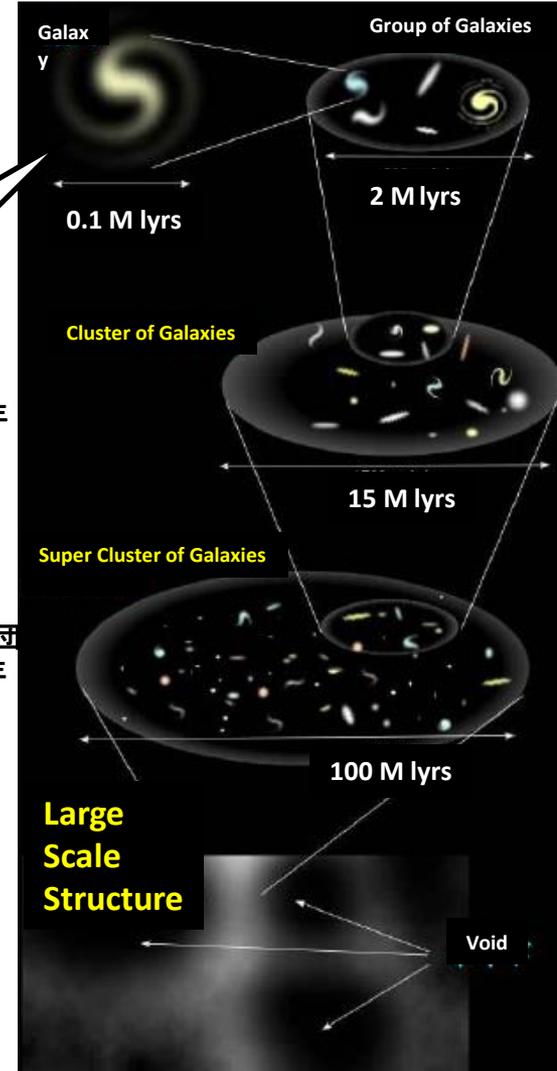
## Milky Way Galaxy



銀河  
10万光年

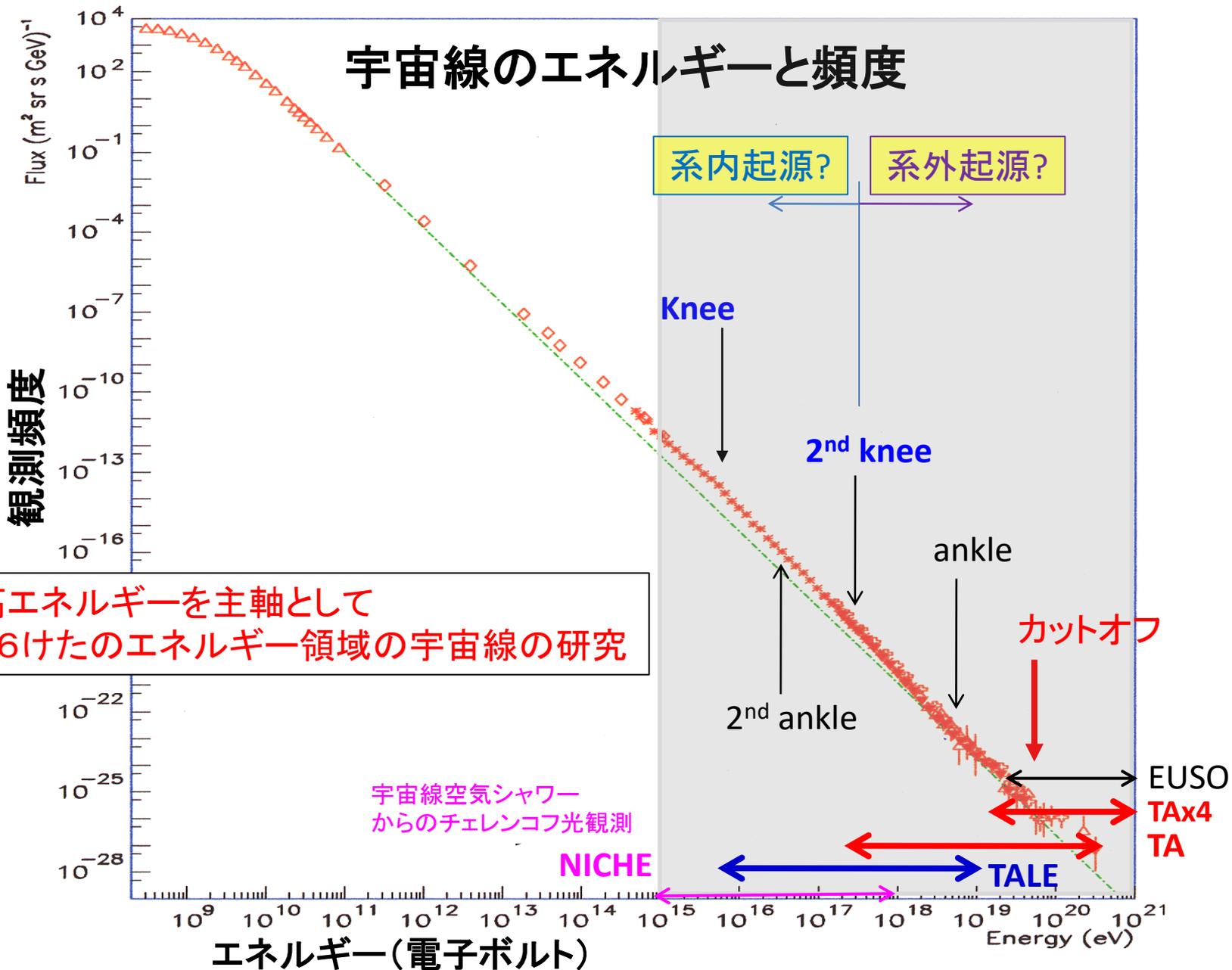
銀河團  
150万光年

超銀河團  
1億光年



lyrs = 光年、M=100万：1M lyrs=100万光年

# 宇宙線のエネルギーと頻度



# TA観測サイト

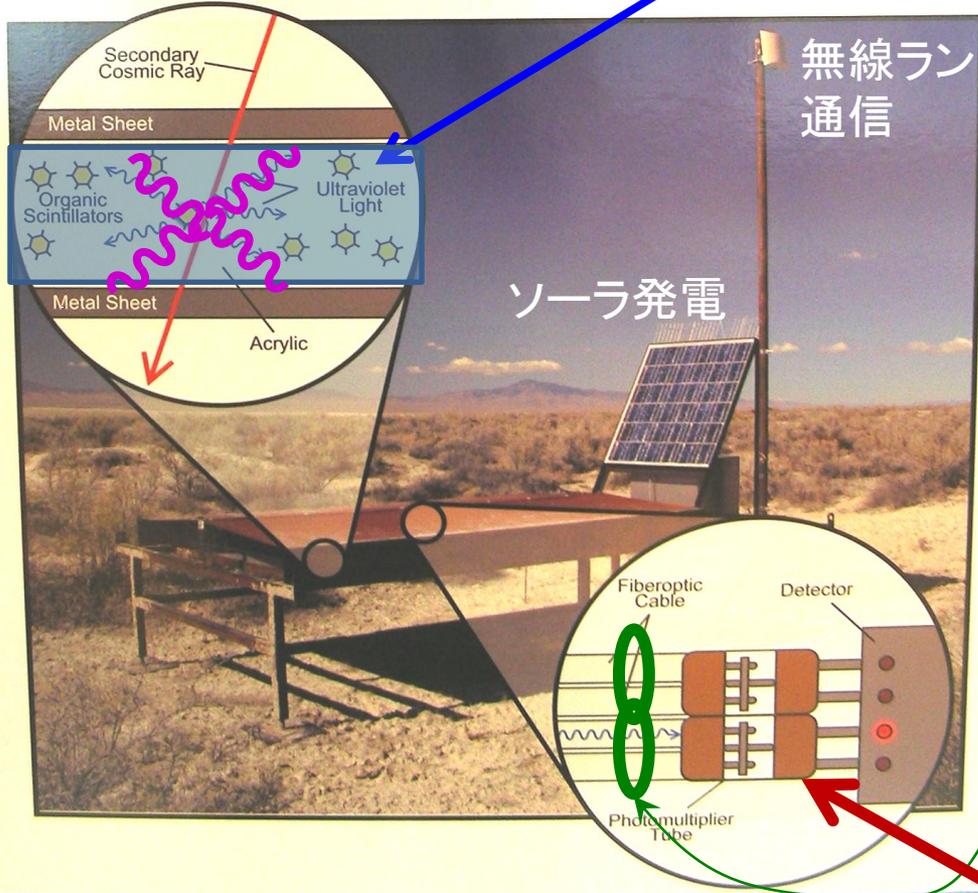
米国 ユタ州 **Salt Lake City (SLC)**  
ユタ大学



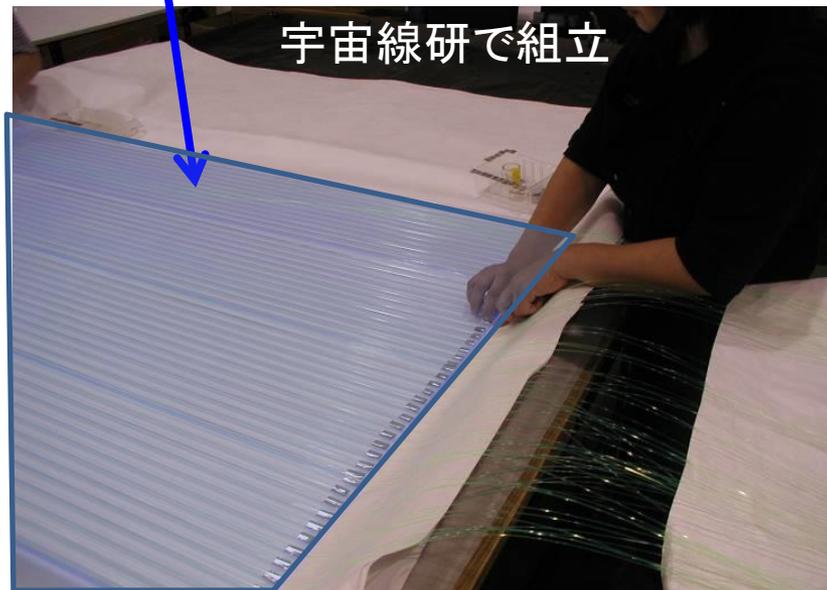
# シンチレータ地表検出器

二次宇宙線

プラスチックシンチレータ(3 m<sup>2</sup>)



宇宙線研で組立



光ファイバー



光→電気→デジタル化

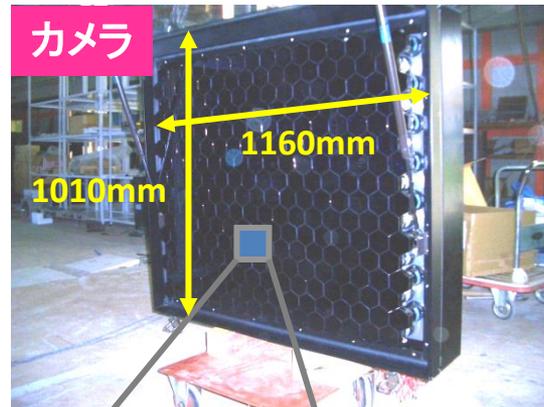
光電子増倍管

# 大気蛍光望遠鏡

夜月のない天気の良い日の観測

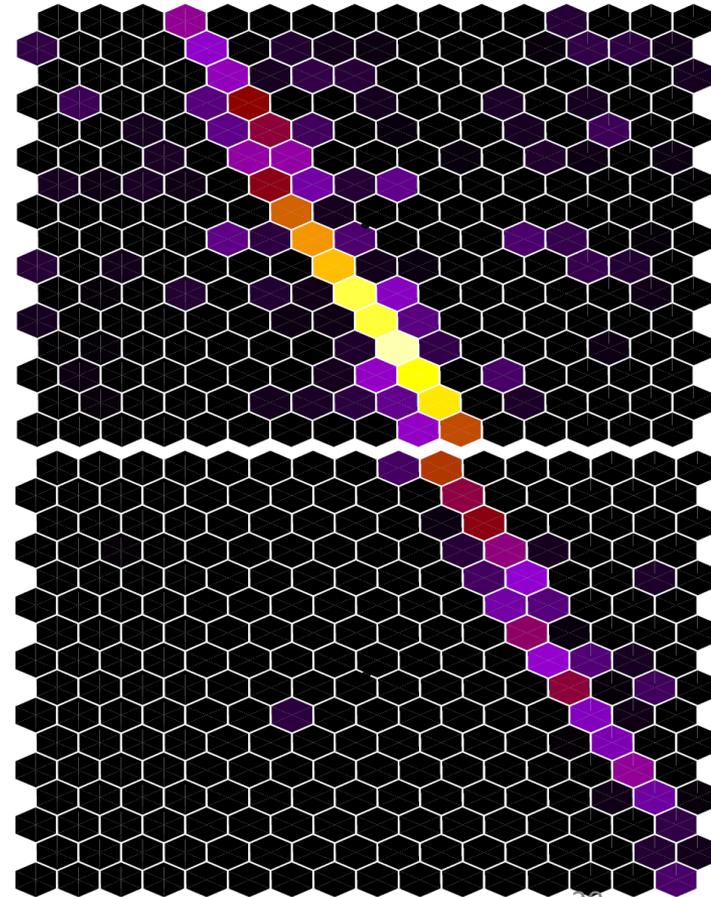


TA大気蛍光望遠鏡で捕らえた空気シャワー



六角形の光電子増倍管  
(PMT)

上視野カメラ



# デルタ市（人口約3500人）

- TA実験のための作業場、居住地

宇宙線センター  
敷地約8400 m<sup>2</sup>

デルタ市の家からリモートで望遠鏡を運用していることを竹田助教が梶田所長に説明



アンテナ

仮設置した  
雷探知用受信装置

ソーラーパネル

シンチレータ検出器はこの屋根の下に

フィールドに設置した地表検出器

# 大気蛍光望遠鏡の建物

TA-EUSOの小屋

人

6年間のデータ

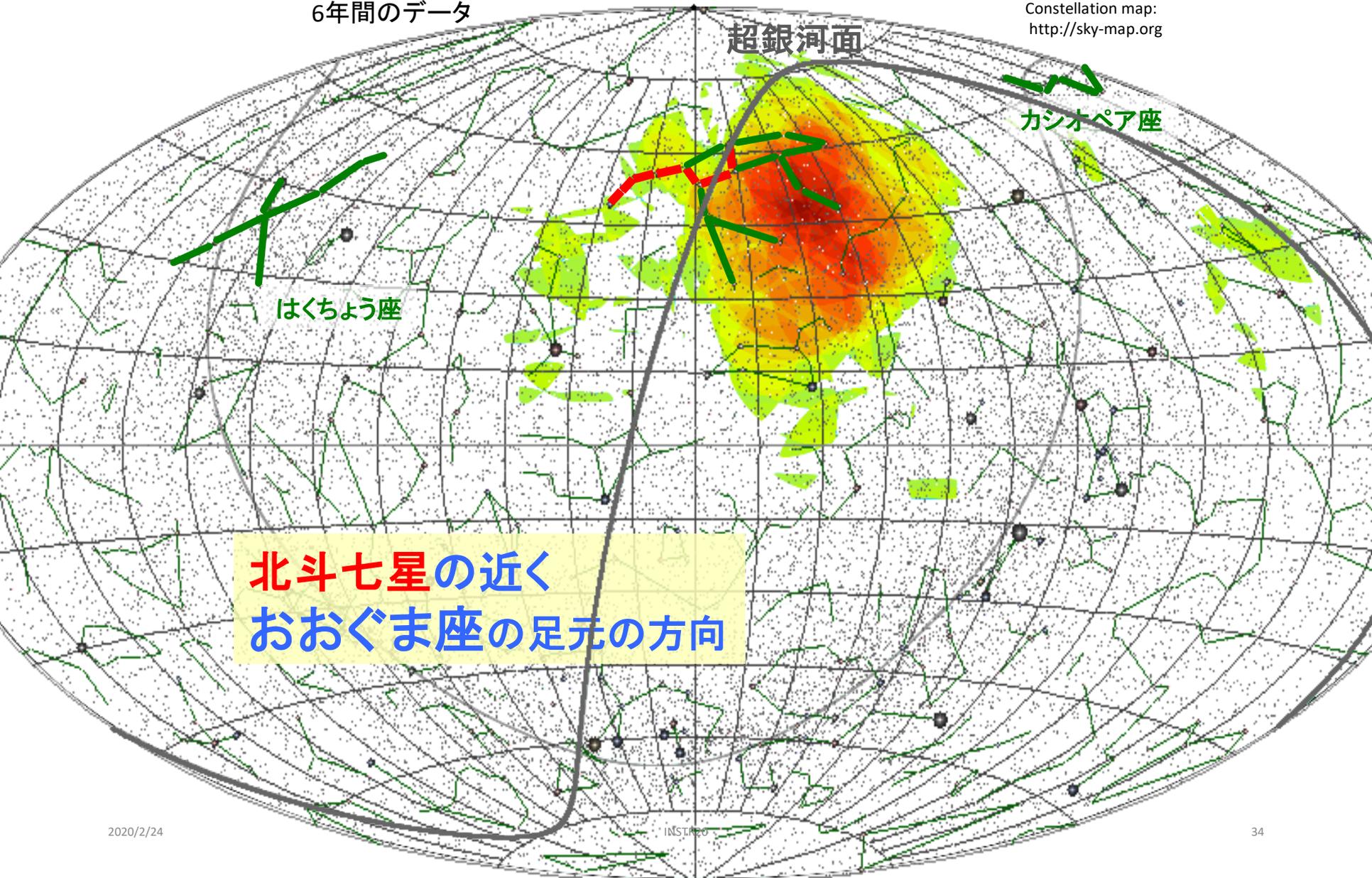
Constellation map:  
<http://sky-map.org>

超銀河面

カシオペア座

はくちょう座

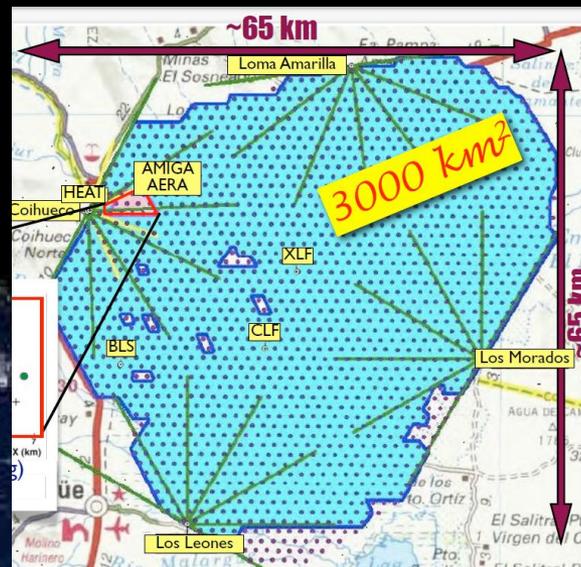
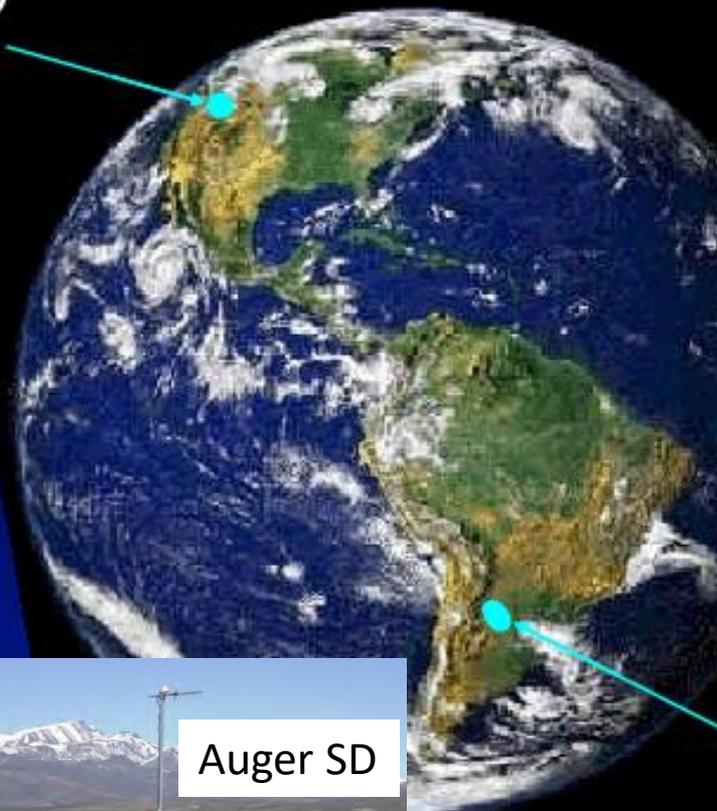
北斗七星の近く  
おおぐま座の足元の方



# 南北半球の宇宙線観測

Telescope Array  
Utah, USA

680 km<sup>2</sup> 地表検出器  
3箇所に大気蛍光望遠鏡



Pierre Auger  
Observatory  
Mendoza, Argentina

3000 km<sup>2</sup> 地表検出器  
4箇所に大気蛍光望遠鏡

Auger FD



Auger SD



# Significance map with nearby galaxies

TA 8 years  
Auger 10 years

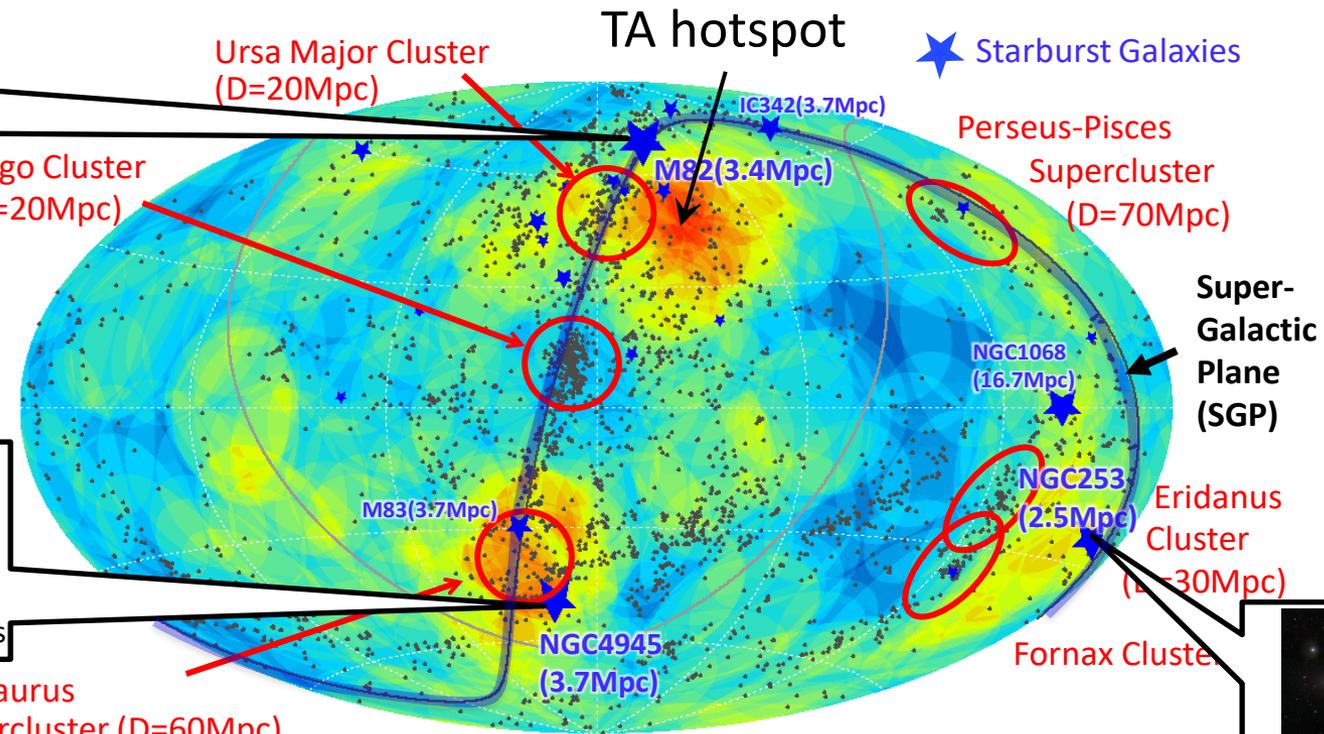


Virgo Cluster  
(D=20Mpc)



photo by La Silla Obs

Centaurus  
Supercluster (D=60Mpc)



Ursa Major Cluster  
(D=20Mpc)

TA hotspot

★ Starburst Galaxies

Perseus-Pisces  
Supercluster  
(D=70Mpc)

Super-  
Galactic  
Plane  
(SGP)

NGC1068  
(16.7Mpc)

NGC253  
(2.5Mpc)

Eridanus  
Cluster  
(D=30Mpc)

Fornax Cluster

M83(3.7Mpc)

NGC4945  
(3.7Mpc)

IC342(3.7Mpc)

M82(3.4Mpc)



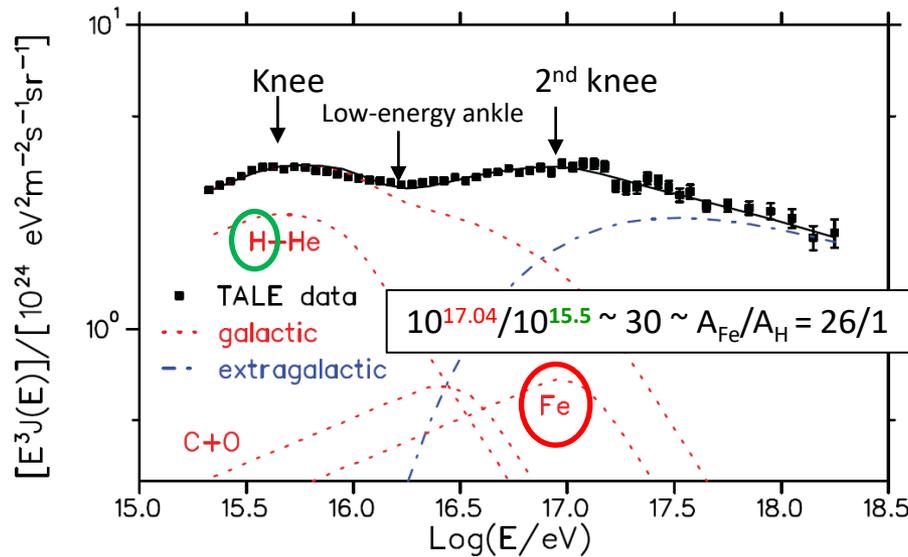
photo by Paranal Obs.

Dots : 2MASS catalog Heliocentric velocity <3000 km/s (D<~45 Mpc [~150 M lyrs])  
*Huchra, et al, ApJ, (2012)*

Significance of excess (red or yellow) is close to Super-Galactic Plane!

# TALE spectrum, overlaid with the phenomenological model

T.Abu-Zayyad et al., arXiv:1803.07052

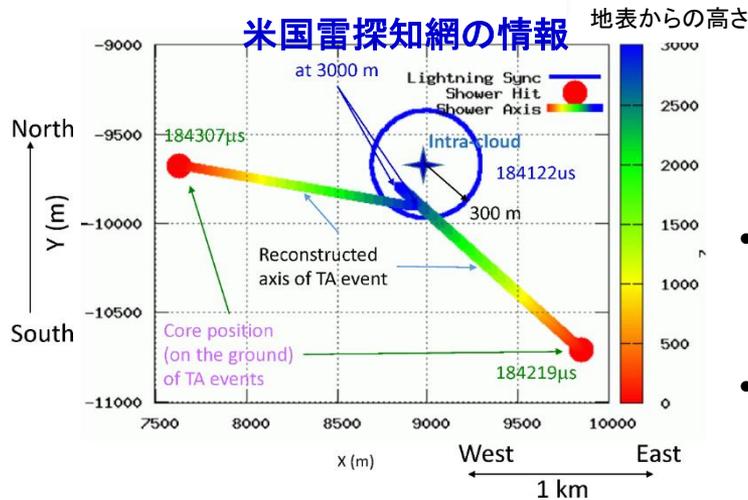
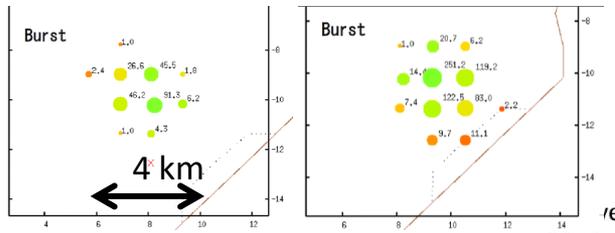


- Model: rigidity-dependent cutoff sequence
  - Knee: broad knee made from H and He
  - low-energy ankle: (a drop of H and He) and a rise of C+O
  - 2<sup>nd</sup> knee: the high energy end of the galactic cosmic ray spectrum
- **Very important to confirm the model experimentally**

# 雷と同期したTA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、移設したLMAのひとつ  
(R. Thomas, NMT@Long Ridge)
- 現在: 別の雷検出器も設置