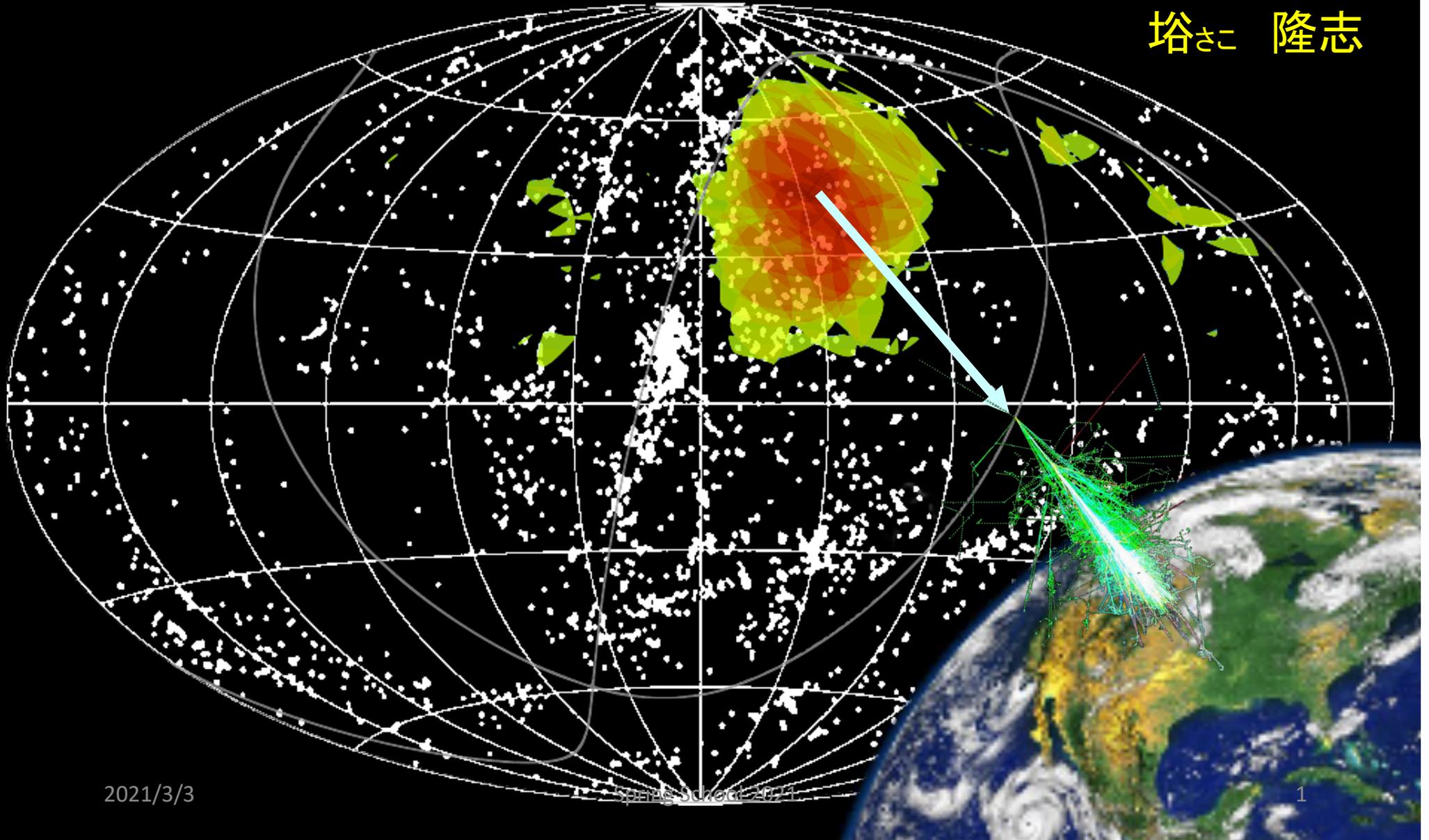
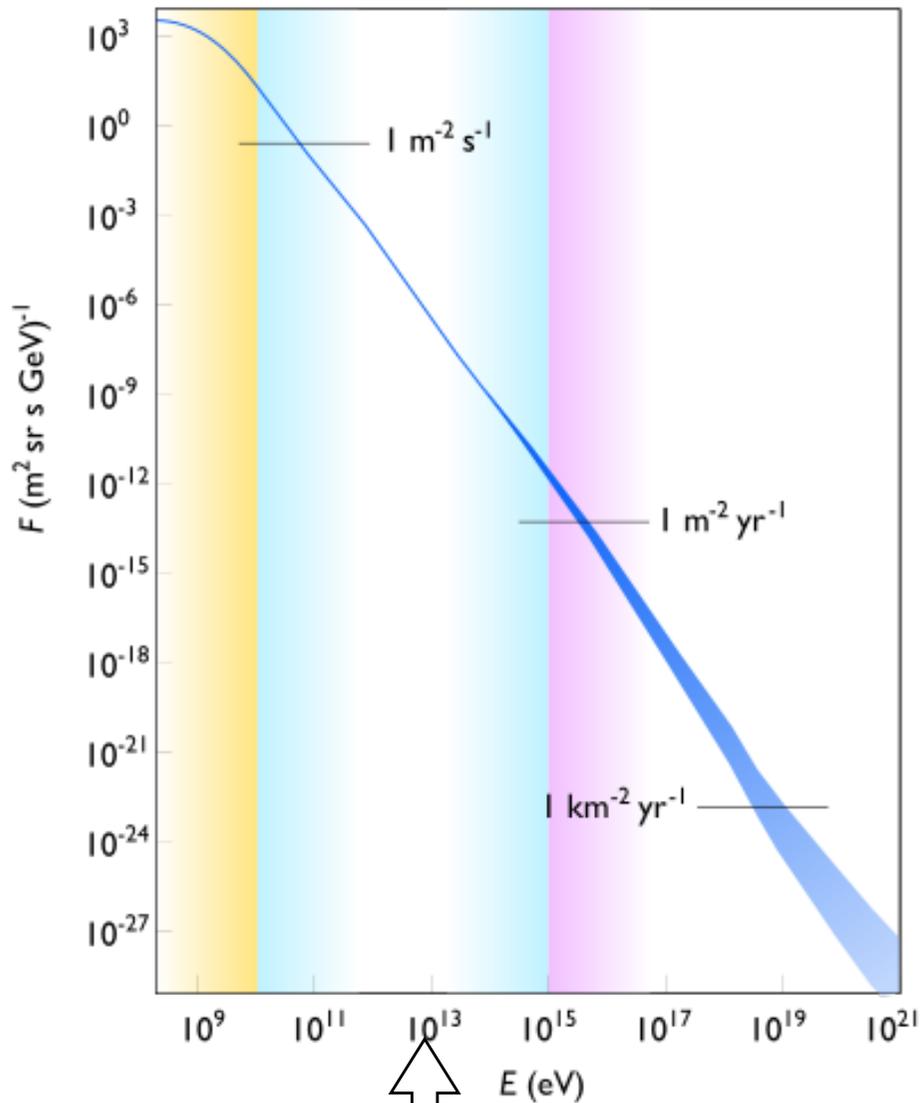


# 最高エネルギー宇宙線

塚さこ 隆志



# 1ページで学ぶ「宇宙線とは？」



横軸の単位はeV (エレクトロンボルト)  
1eV = 電子を1Vで加速した場合のエネルギー  
=  $1.6 \times 10^{-19}$  J (ジュール)

[狭義]宇宙から降り注ぐ高エネルギー放射線

- 陽子、ヘリウム原子核、各種原子核

[広義]

- 電子、陽電子、ガンマ線、ニュートリノ
- ダークマター、重力波

様々なエネルギーの宇宙線がやってくる

- 大体 1秒間に指先( $1\text{cm}^2$ )を1回貫通 [注：大気の外]
- エネルギーが一桁増えると、頻度は約 1/1000
- $10^{20}\text{eV}$ の宇宙線が来ている( $100\text{km}^2$ に年に一個)
- 人口加速器の最高エネルギーは  $7 \times 10^{12}\text{eV}$

宇宙加速器はどこにある？

- 謎??
- 宇宙の極限天体・現象に関わるはず

世界最大の粒子加速器 LHC  
(CERN, スイス, フランス国境)



# 粒子を加速するには

電場 (V [Volt])



陽子 (電荷  $e$  [C])

$E=eV$  [eV]に加速

# 粒子を加速するには

電場 (V [Volt])



天体（加速器）から脱出



陽子 (電荷  $e$  [C])

$E=eV$  [eV]に加速

# 粒子を加速するには

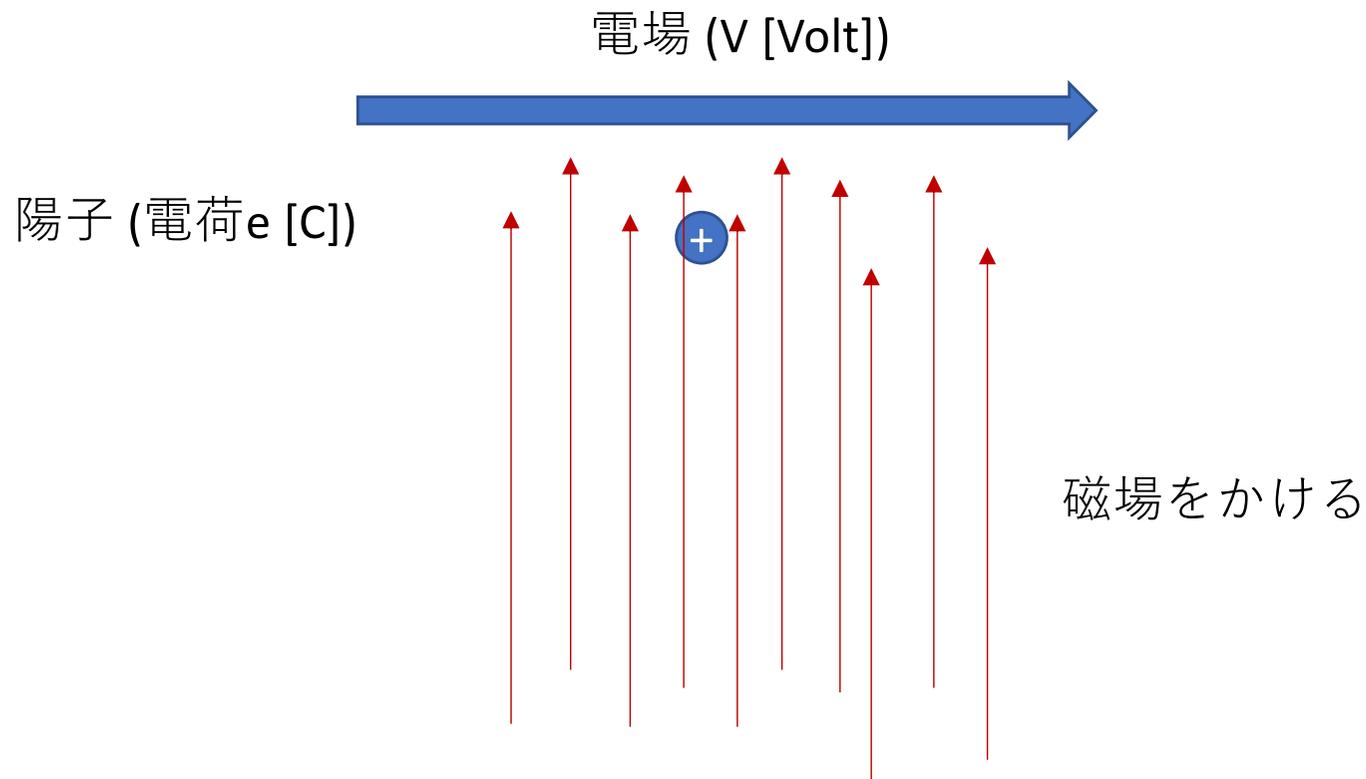
電場 (V [Volt])



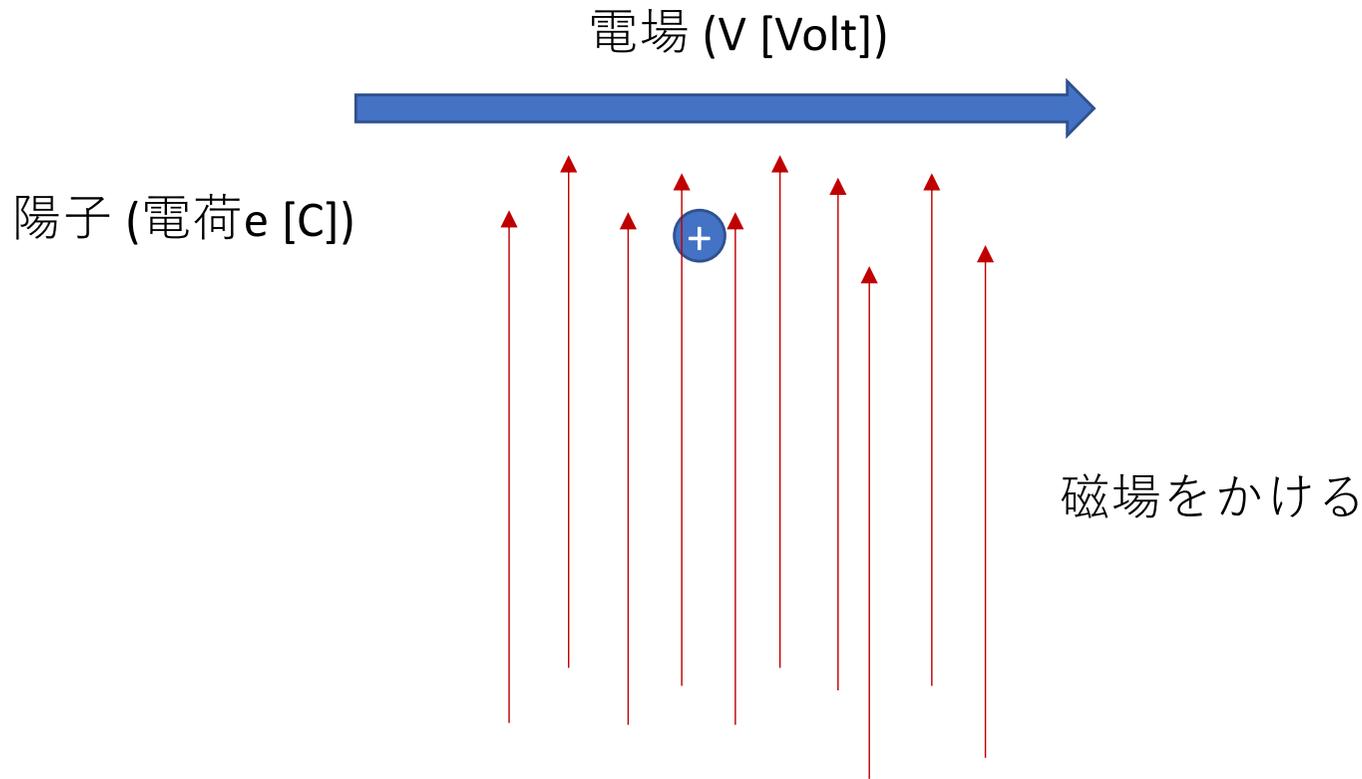
陽子 (電荷  $e$  [C])

$E=eV$  [eV]に加速

# 粒子を加速するには



# 粒子を加速するには

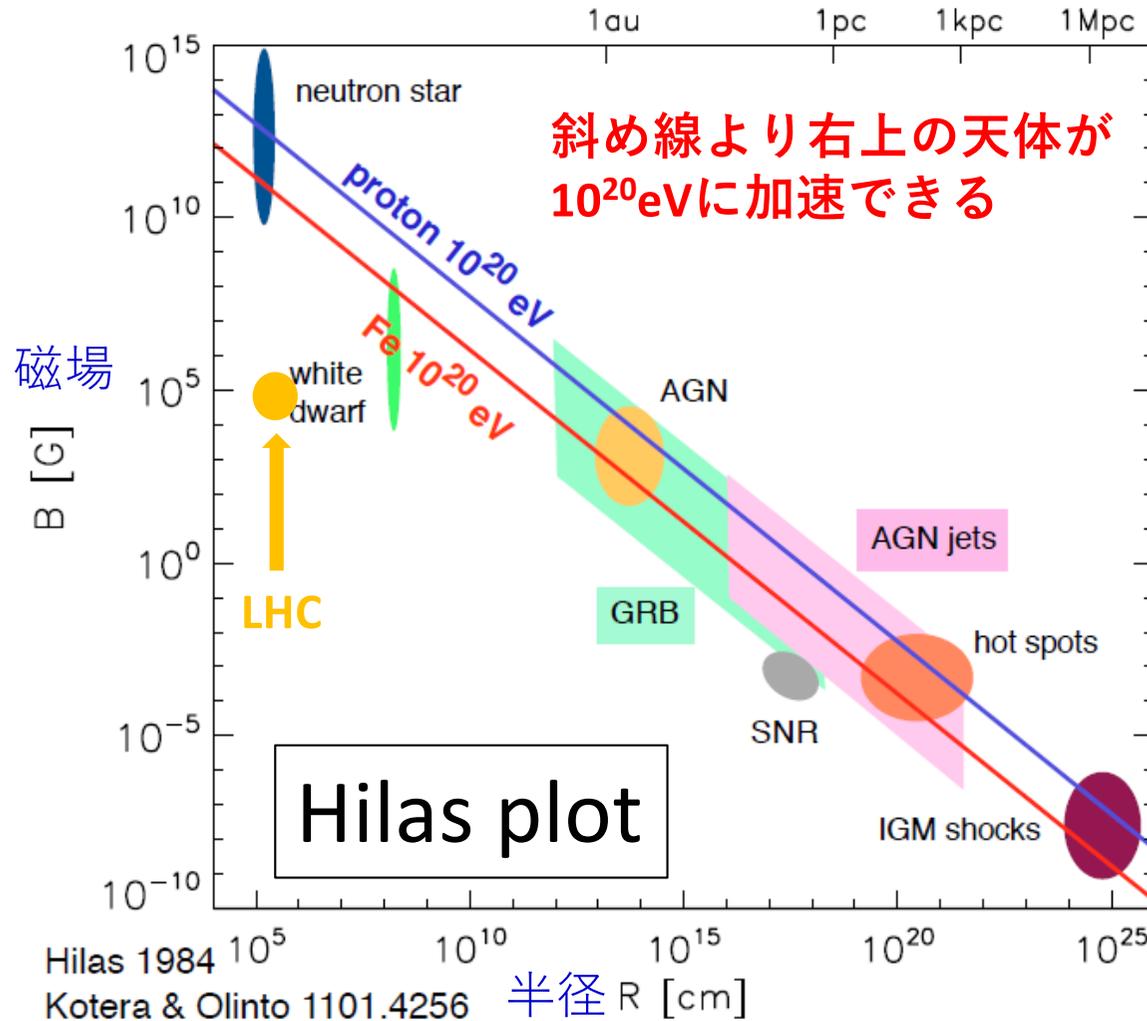


天体（加速器）で加速できる（正確には「閉じ込められる」）

最大エネルギーは  $E_{max} \propto BR$  (B:磁場強度、R:サイズ)

# 最高エネルギー宇宙線の発生源候補

$$E_{max} \propto BR$$



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

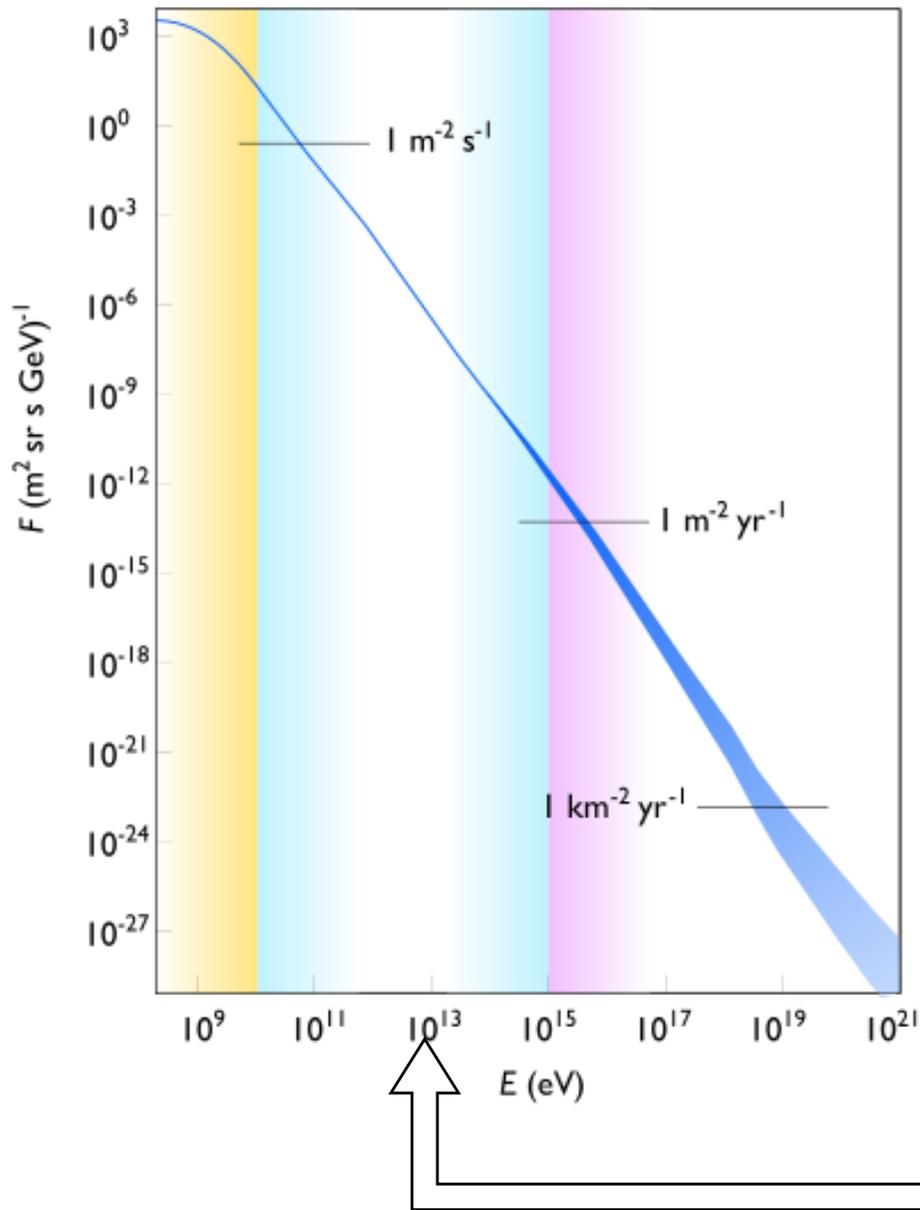
宇宙最強爆発  
 $E_{GRB} \sim 10^{51}$  ergs

宇宙最強磁場  
 $B \sim 10^{15}$  G

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

既知天体の限界は  $10^{20}$  eV? => どの天体?  $>10^{20}$  eVの未知現象は?

# 1ページで学ぶ「宇宙線とは？」



横軸の単位はeV (エレクトロンボルト)  
1eV = 電子を1Vで加速した場合のエネルギー  
=  $1.6 \times 10^{-19}$  J (ジュール)

[狭義]宇宙から降り注ぐ高エネルギー放射線

- 陽子、ヘリウム原子核、各種原子核

[広義]

- 電子、陽電子、ガンマ線、ニュートリノ
- ダークマター、重力波

様々なエネルギーの宇宙線がやってくる

- 大体 1秒間に指先( $1\text{cm}^2$ )を1回貫通 [注: 大気の外]
- エネルギーが一桁増えると、頻度は約 1/1000
- $10^{20}\text{eV}$ の宇宙線が来ている( $100\text{km}^2$ に年に一個)
- 人口加速器の最高エネルギーは  $7 \times 10^{12}\text{eV}$

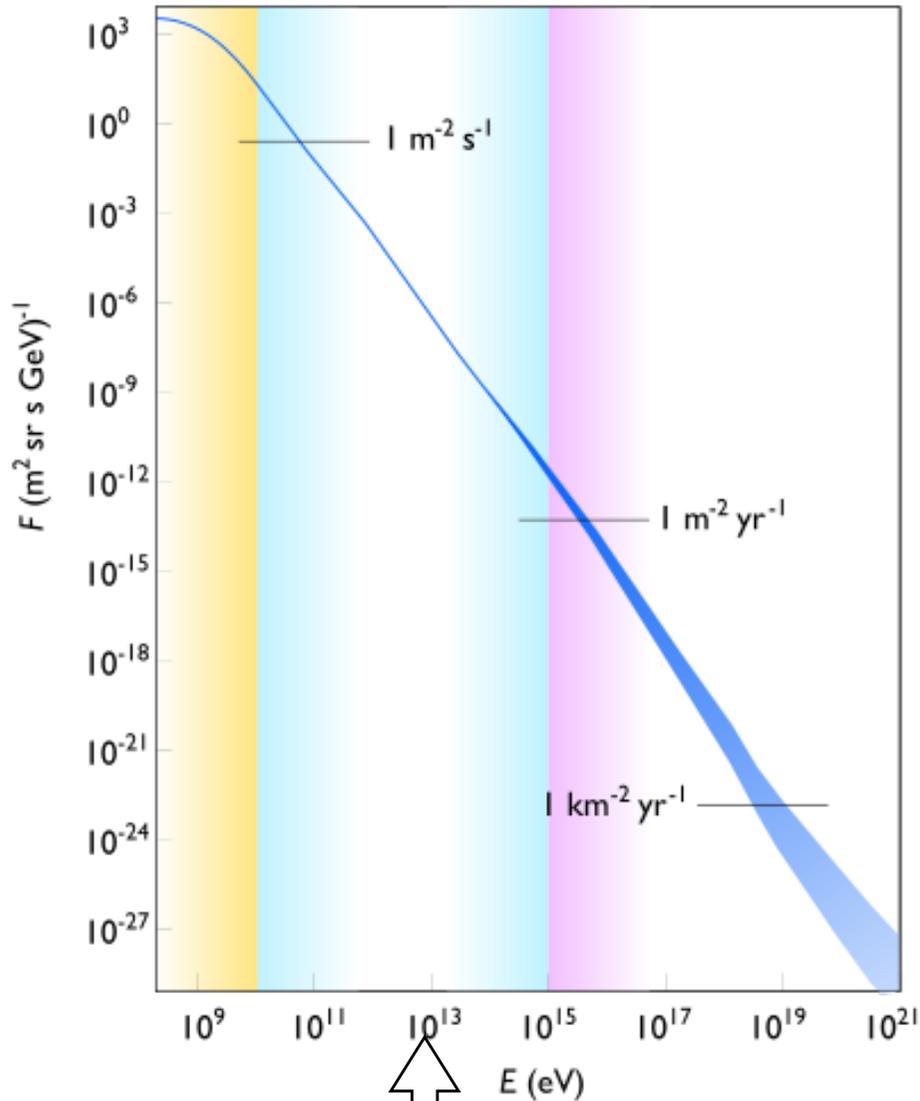
宇宙線はどこから来るのか？

- 謎??
- 宇宙の極限天体・現象に関わるはず

世界最大の粒子加速器 LHC  
(CERN, スイス, フランス国境)



# 1ページで学ぶ「宇宙線とは？」



横軸の単位はeV (エレクトロンボルト)  
1eV = 電子を1Vで加速した場合のエネルギー  
=  $1.6 \times 10^{-19}$  J (ジュール)

[狭義]宇宙から降り注ぐ高エネルギー放射線

- 陽子、ヘリウム原子核、各種原子核

[広義]

- 電子、陽電子、ガンマ線、ニュートリノ
- ダークマター、重力波

様々なエネルギーの宇宙線がやってくる

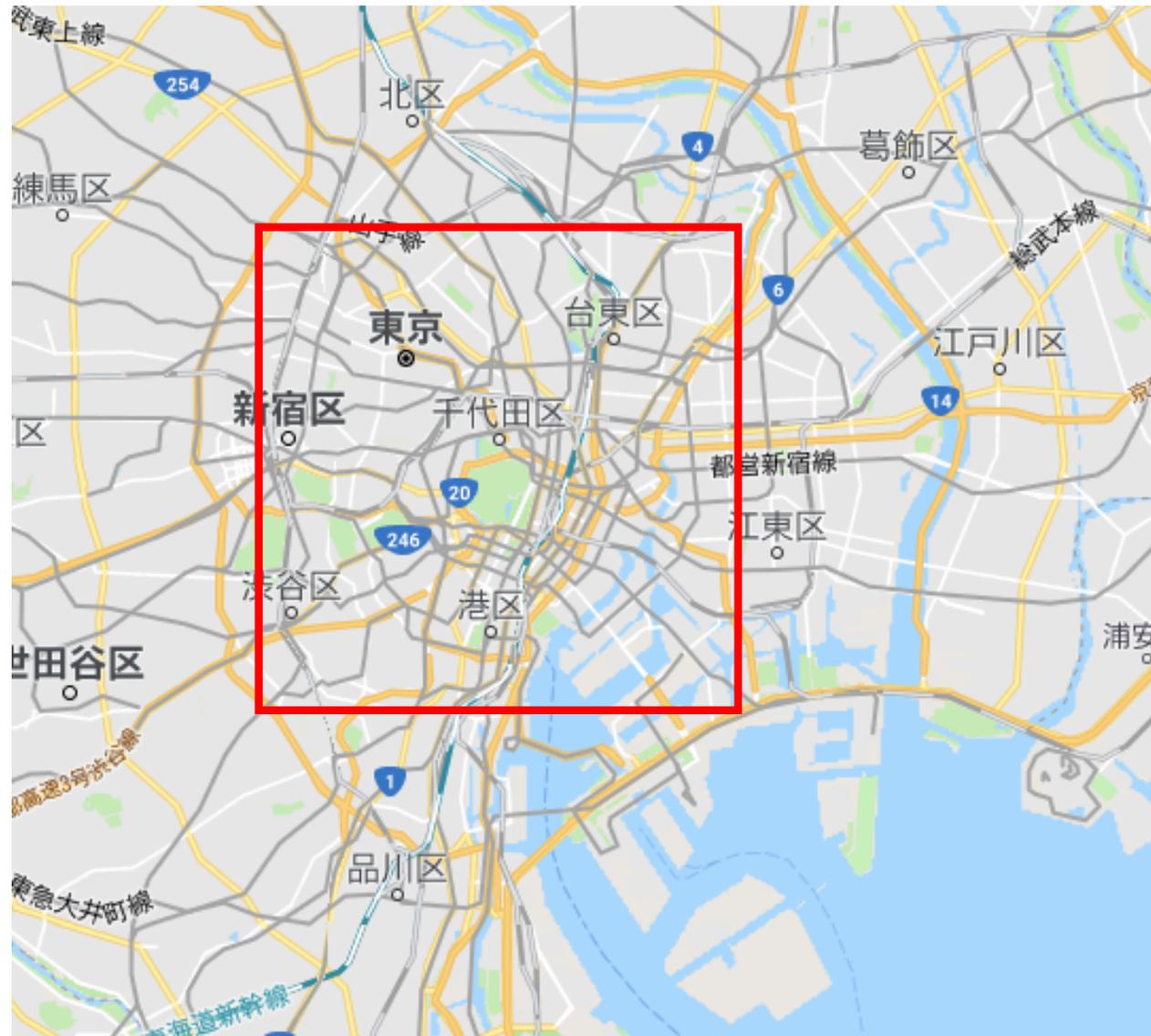
- 大体 1秒間に指先(1cm<sup>2</sup>)を1回貫通 [注：大気の外]
- エネルギーが一桁増えると、頻度は約 1/1000
- 10<sup>20</sup>eVの宇宙線が来ている(100km<sup>2</sup>に年に一個)
- 人口加速器の最高エネルギーは  $7 \times 10^{12}$  eV

宇宙線はどこから来るのか？

- 謎??
- 宇宙の極限天体・現象に関わるはず

世界最大の粒子加速器 LHC  
(CERN, スイス, フランス国境)





宇宙線

エネルギーが高いと、  
空気の分子と衝突して  
大量の粒子を生成

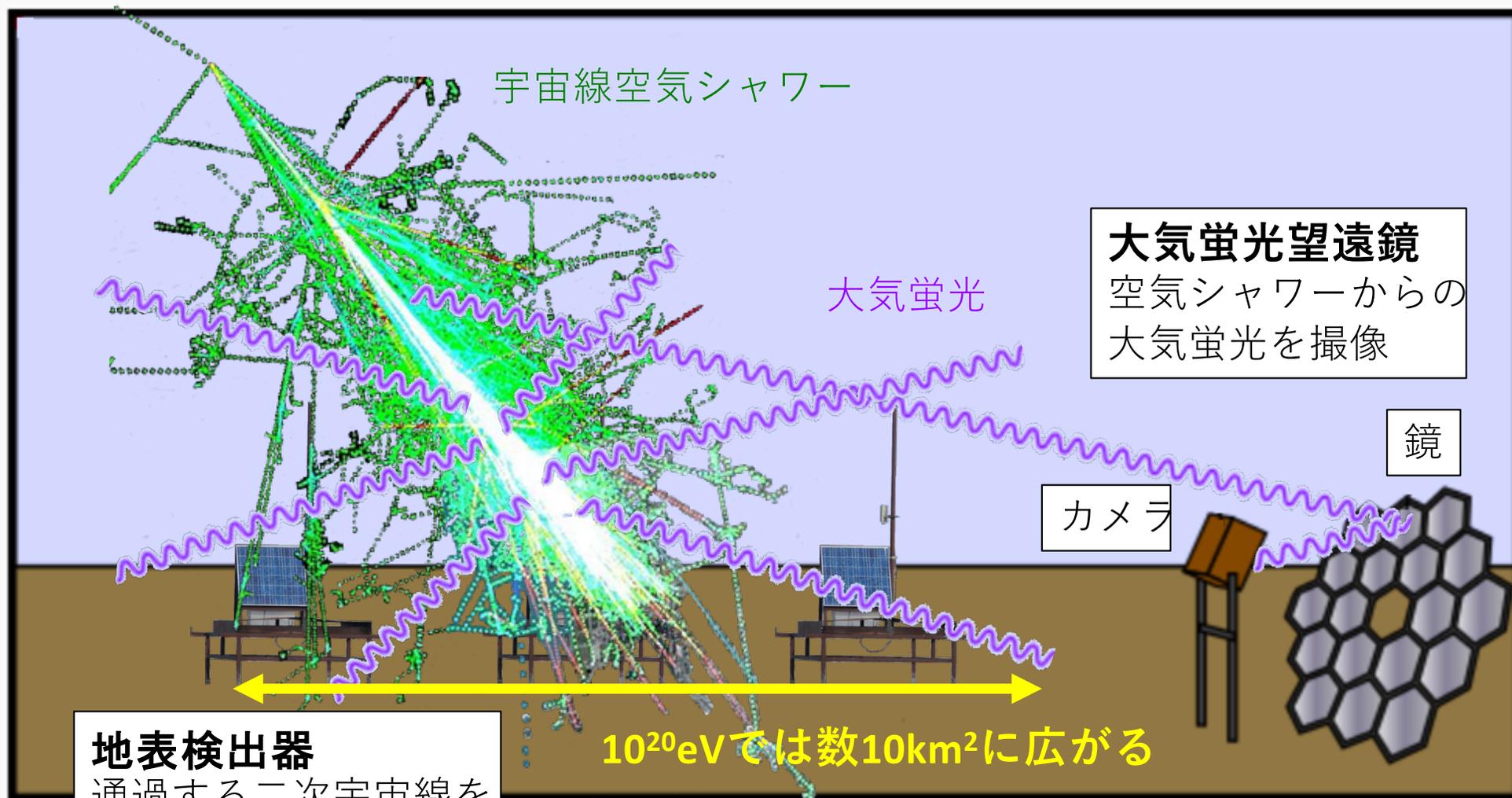
10mの水相当の物質  
量

ほとんどが地球の大気に吸収される

地上に大量の粒子が降り注ぐ  
= **空気シャワー現象**



# 地表検出器と大気蛍光望遠鏡



宇宙線空気シャワー

大気蛍光

**大気蛍光望遠鏡**  
空気シャワーからの  
大気蛍光を撮像

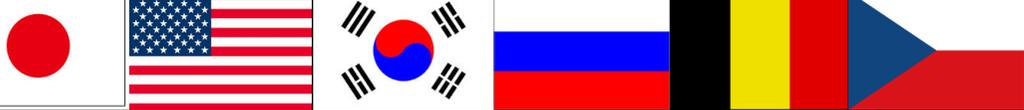
鏡

カメラ

**地表検出器**  
通過する二次宇宙線を  
直接観測

$10^{20}$  eVでは数 $10 \text{ km}^2$ に広がる

一次宇宙線の  
エネルギー・到来方向・組成を測定



日米韓国ロシアベルギーチェコ6カ国  
130名 (日本約70名)

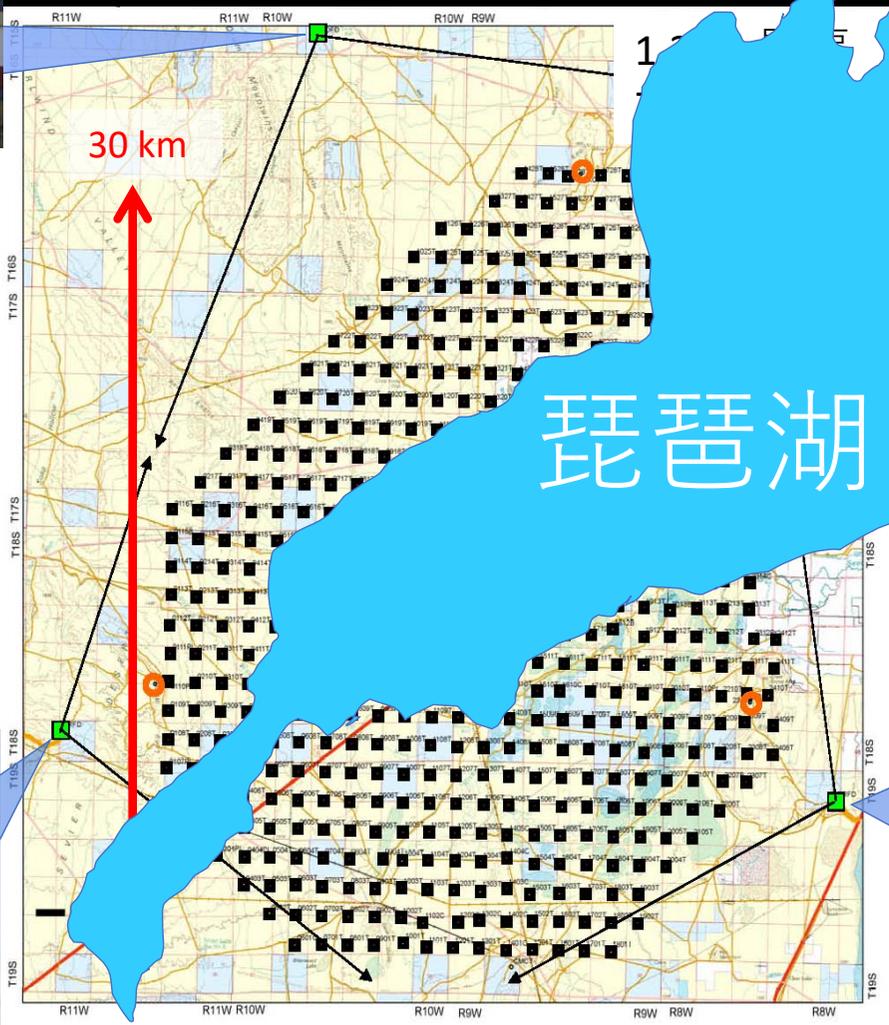
# テレスコープアレイ(TA)



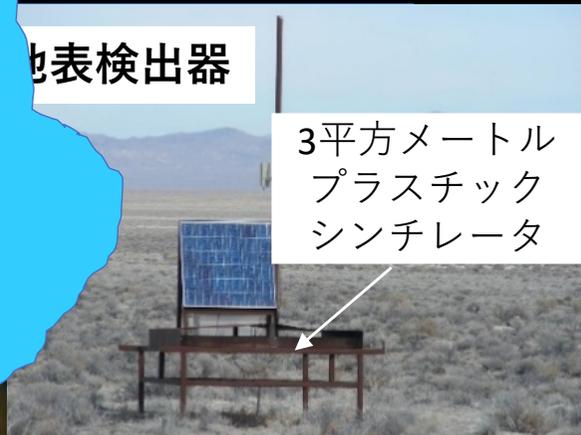
大気蛍光望遠鏡

米国ユタ州

標高1400 m



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  
プラスチック  
シンチレータ

琵琶湖

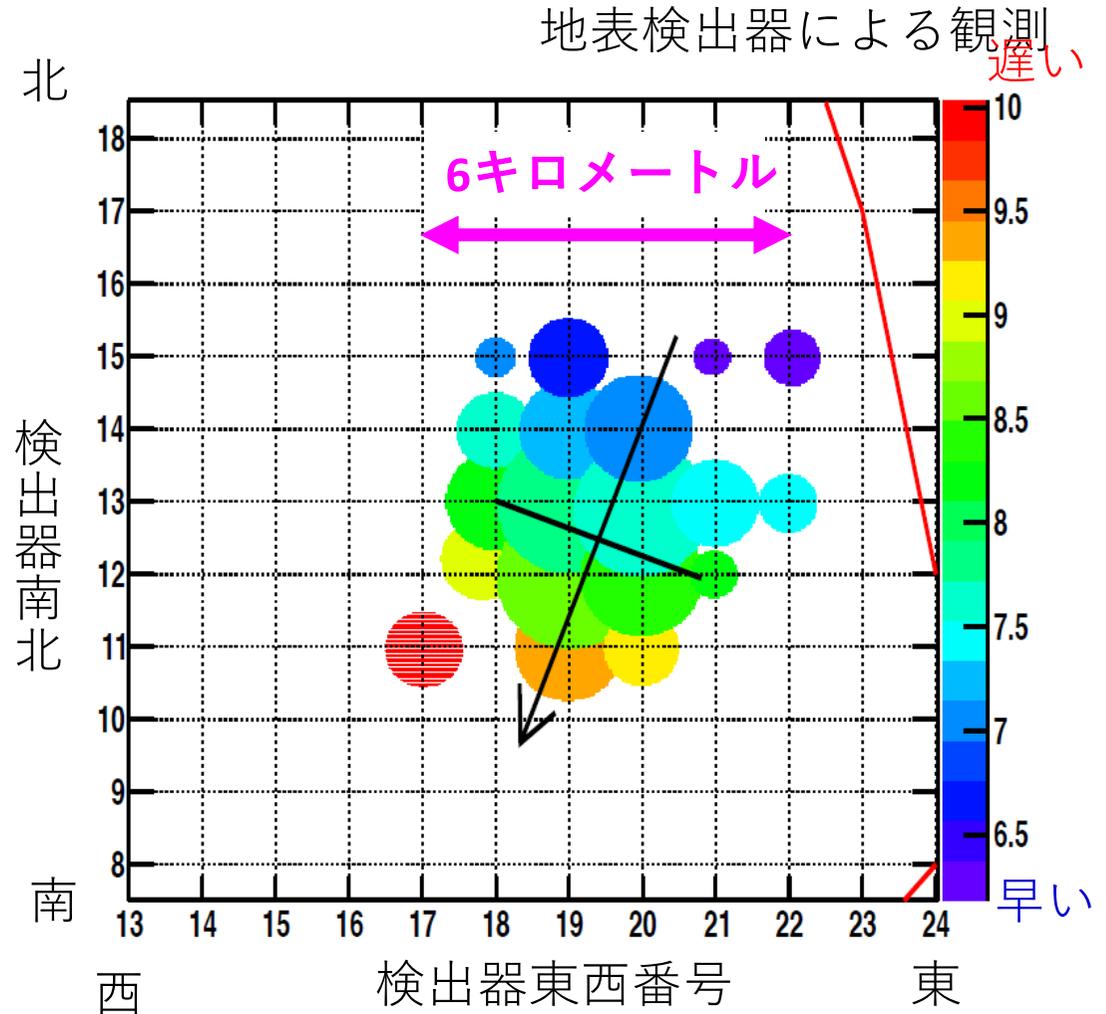
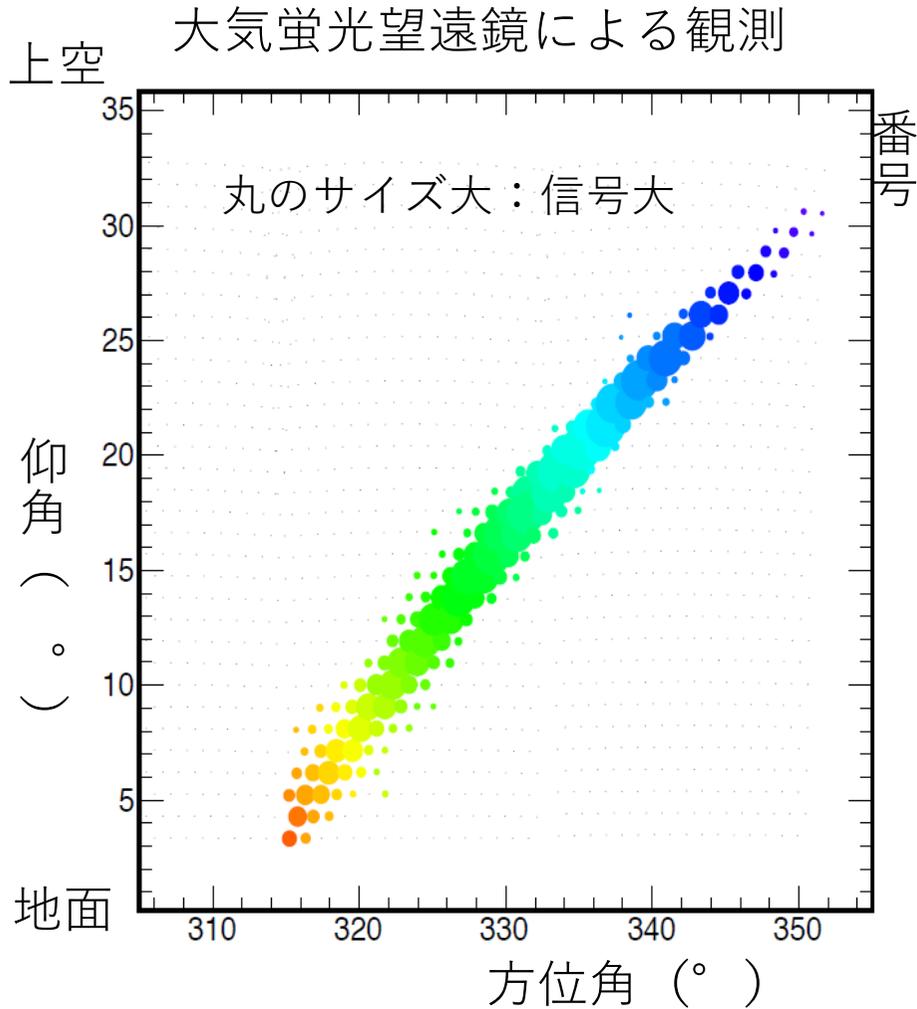


大気蛍光望遠鏡



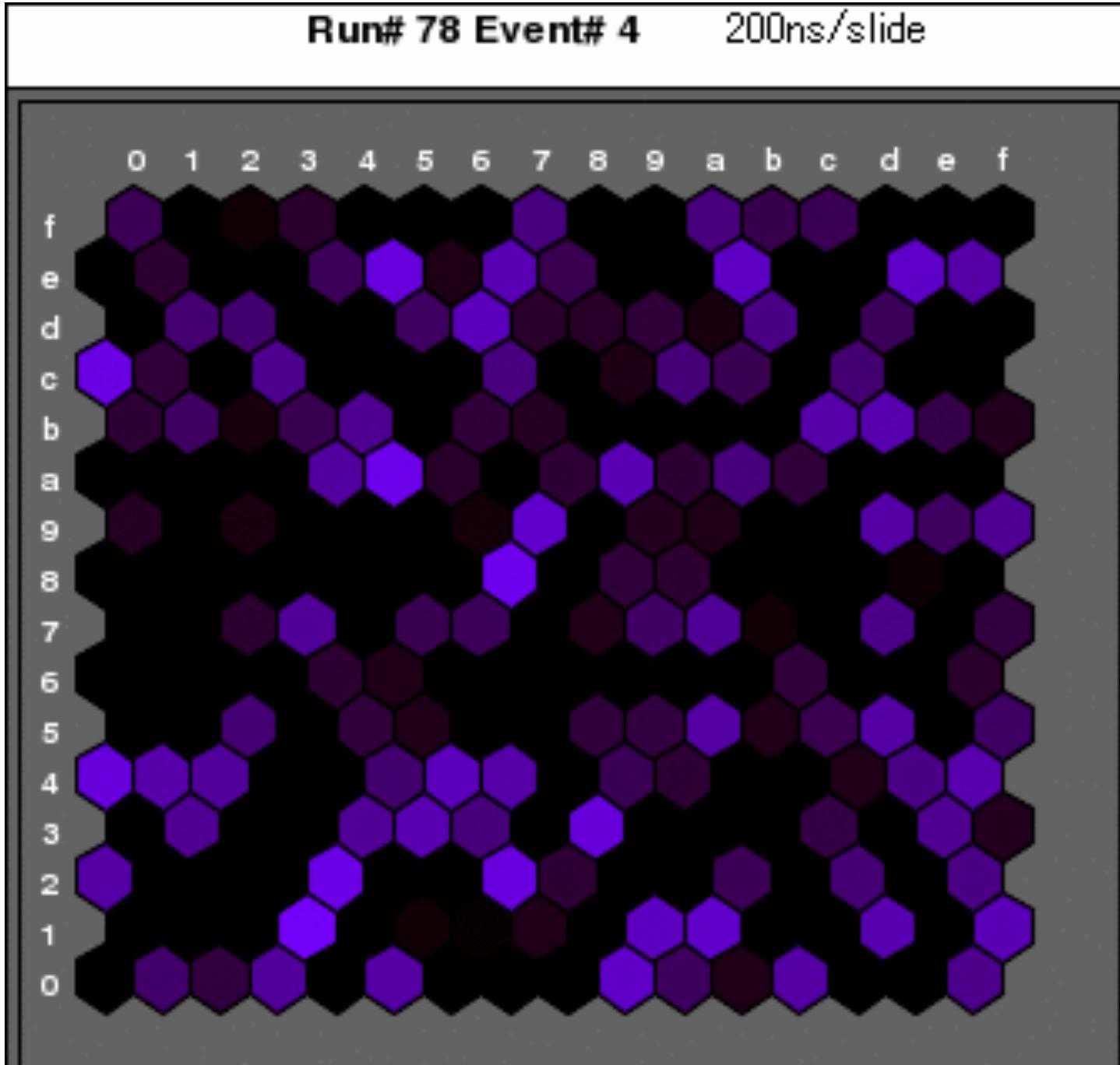
大気蛍光望遠鏡

# 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)



$2 \times 10^{19}$ 電子ボルトの宇宙線

# TA大気蛍光望遠鏡イベント例 (アニメ : 200ns=2x10<sup>-7</sup>秒/スライド)



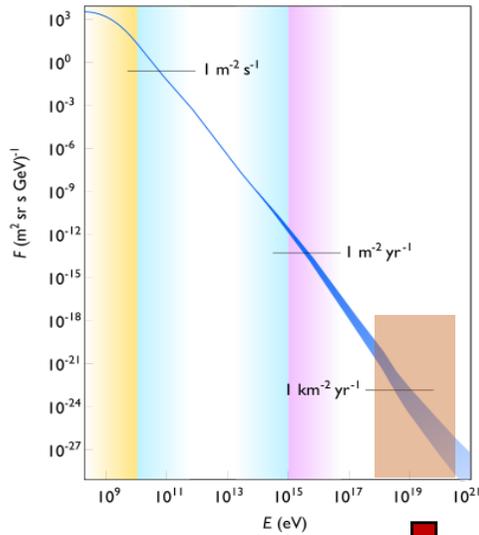
# TAの重要な成果

- 最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
- 最高エネルギー宇宙線の粒子種

# TAの重要な成果

- 最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
- 最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

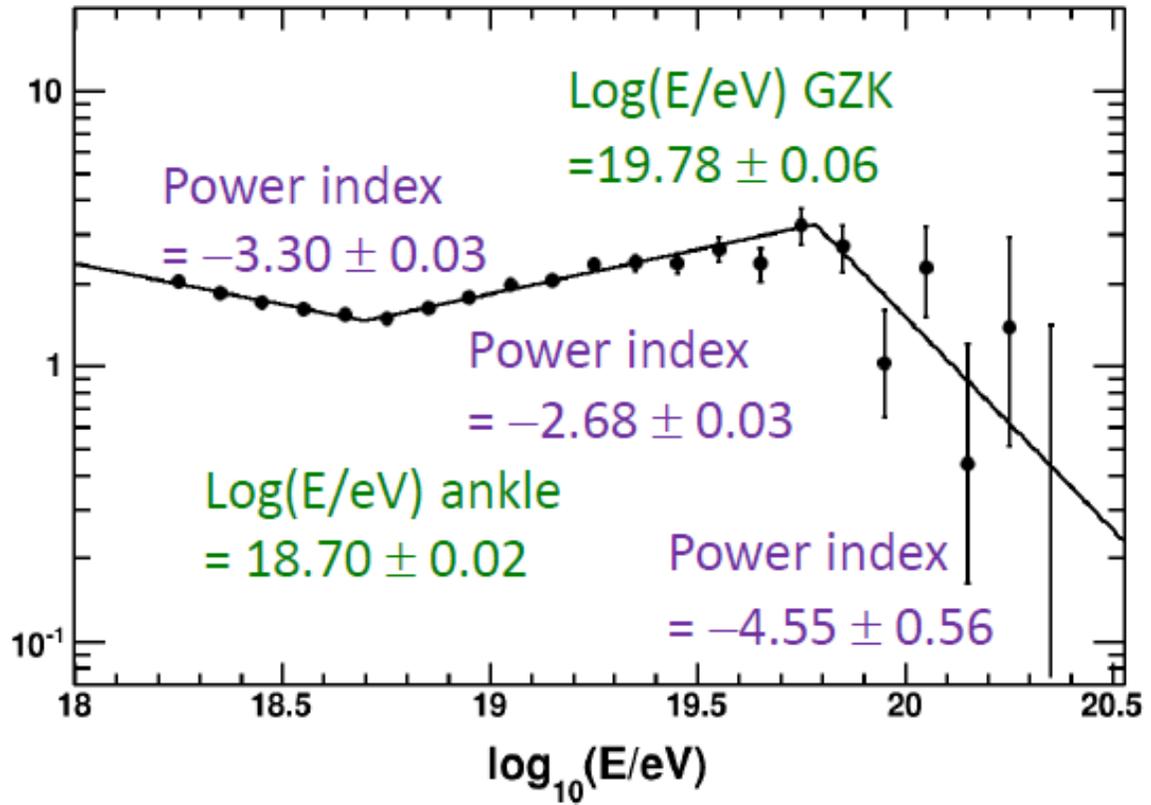


頻度Jに  $E^3$  をかけて  
傾きの変化を強調

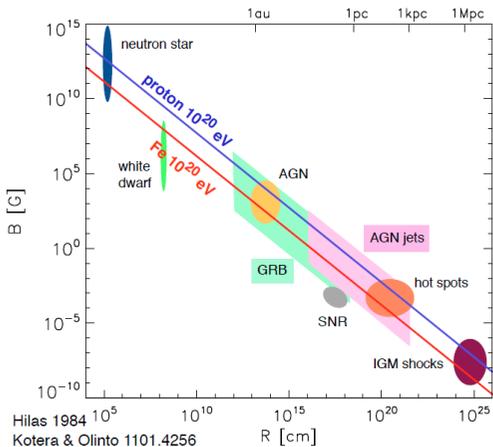


([頻度J (E)] × [エネルギーE]<sup>3</sup>) の対数

TA SD 7年のデータ



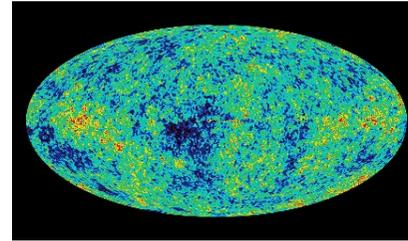
(エネルギーE) の対数



- $10^{20}$  eVで急激に頻度減少
- Hillas plotの予測と一致？（既知の天体での加速限界？）

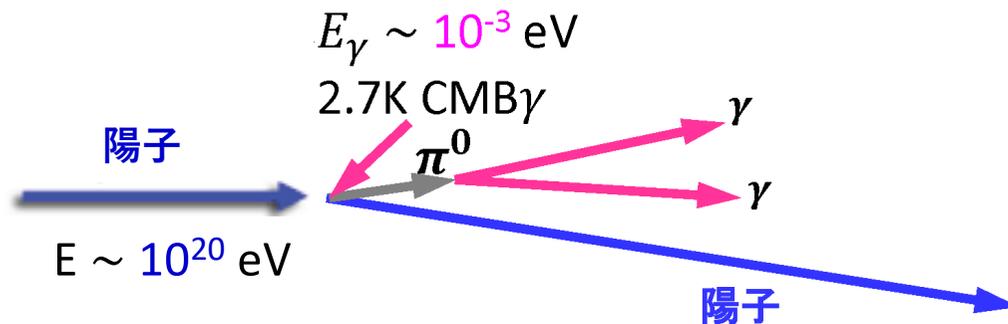
# 宇宙線のエネルギーに限界はあるか

- 1964年 宇宙背景放射 (CMB) の発見

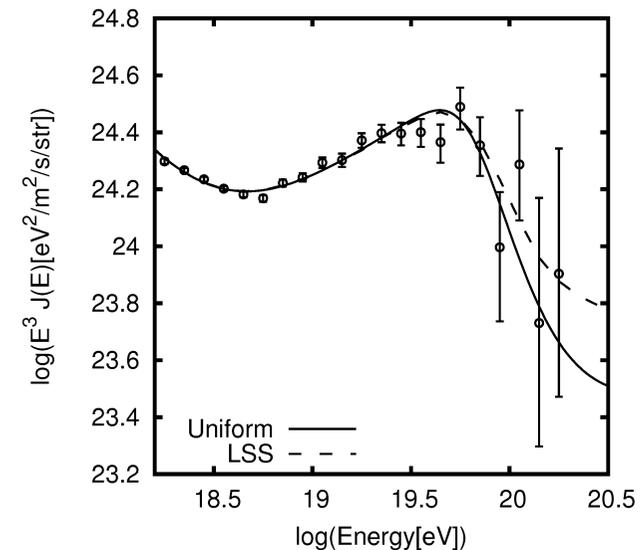


この画像は後の  
WMAPによる観測

- 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



最高エネルギー宇宙線にとって宇宙は不透明



- 陽子静止エネルギーの  $10^{11}$  倍 (1000 億のローレンツ変換)
- 2.7K の光子が宇宙線には 100MeV のガンマ線に見える
- 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
- $>10^{20}$  eV 宇宙線 + GZK 過程で TA の結果は説明できる

加速限界 =  $10^{20}$  eV との判定が今後の課題

# TAの重要な成果

- 最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
- 最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

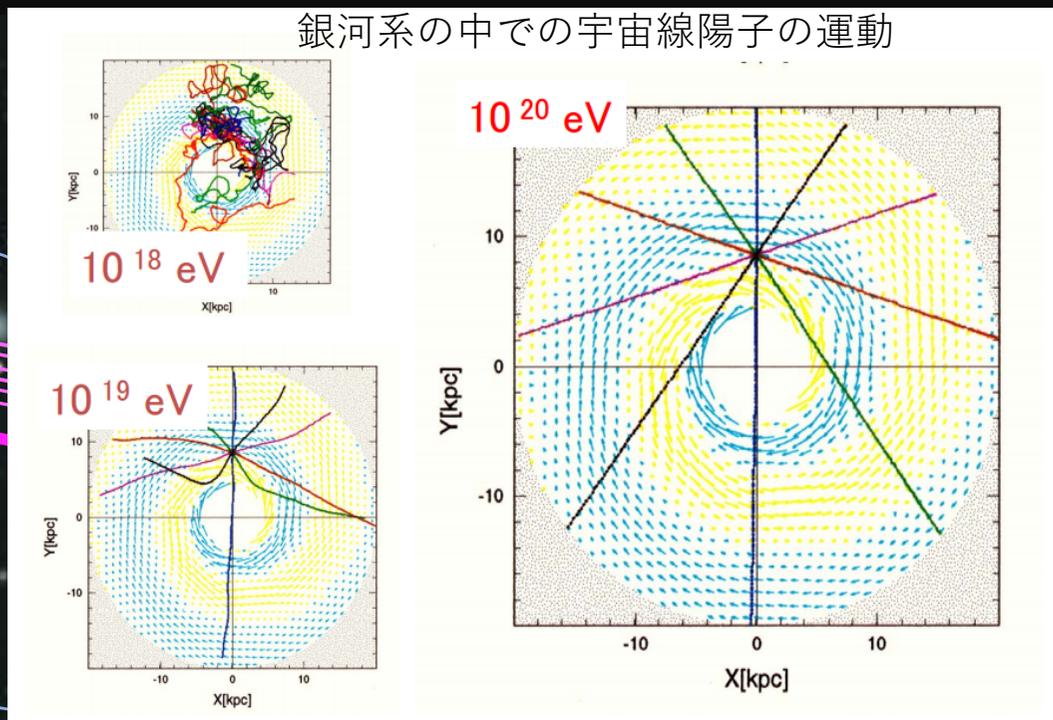
宇宙線の  
発生源



最高

低エネルギーの宇宙線

銀河系の中での宇宙線陽子の運動



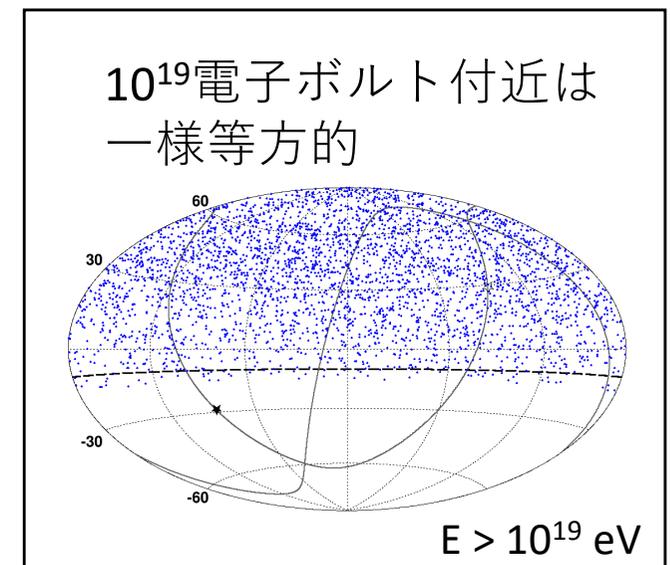
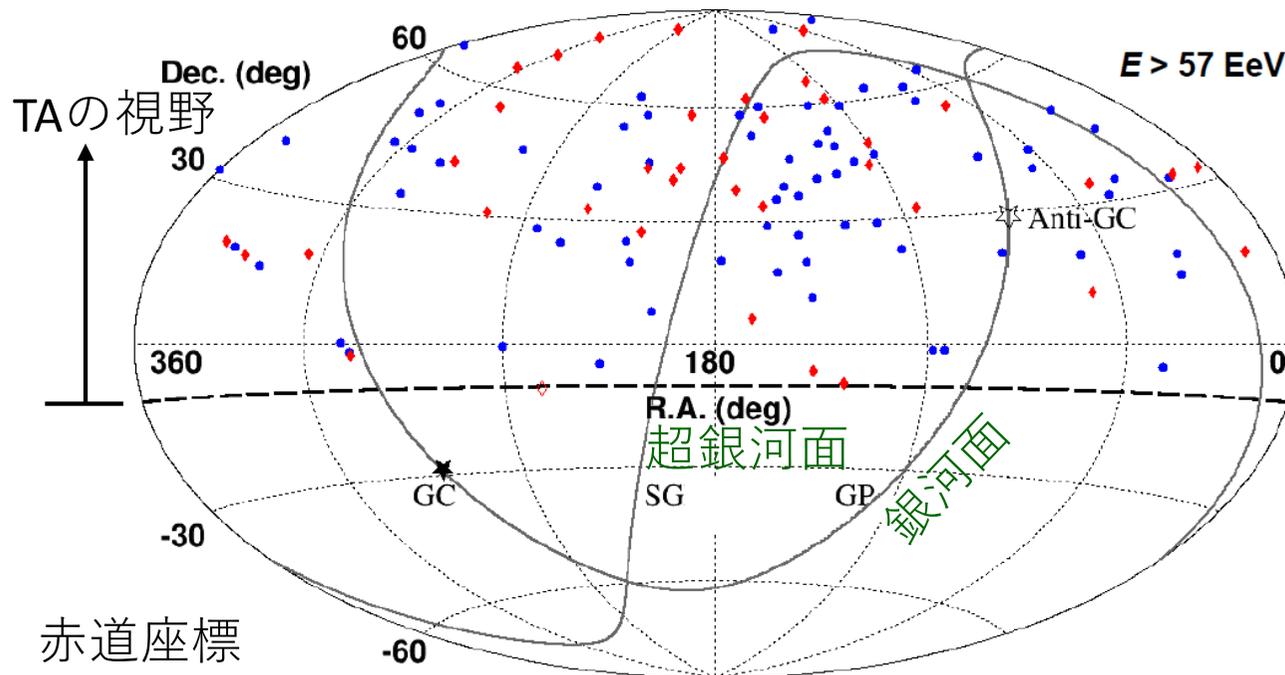
低エネルギー宇宙線：宇宙磁場に曲げられる

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到来方向の分布

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

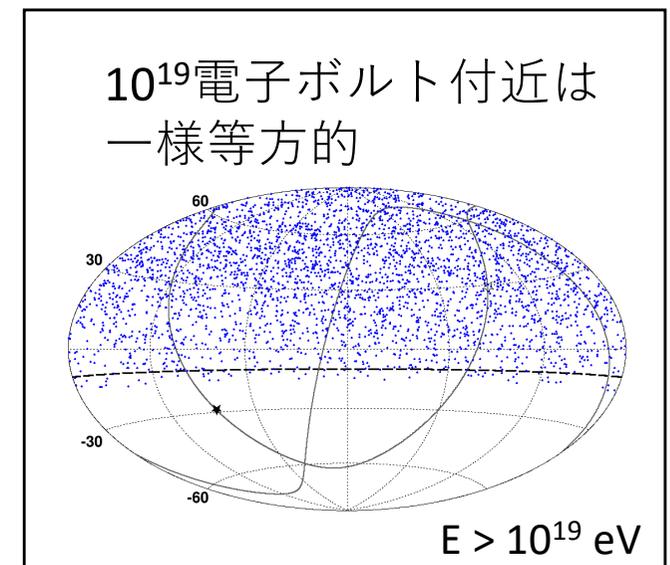
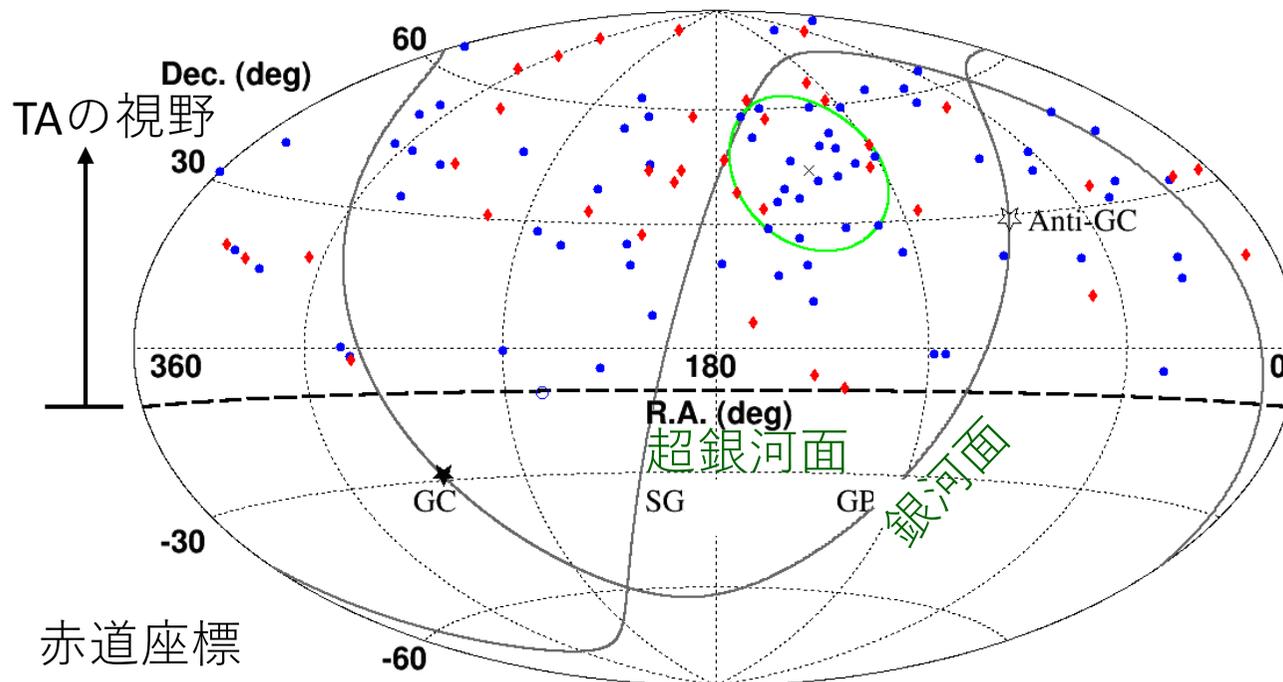
青：2014年7月  
プレスリリース



# 最高エネルギー宇宙線の 到来方向の分布

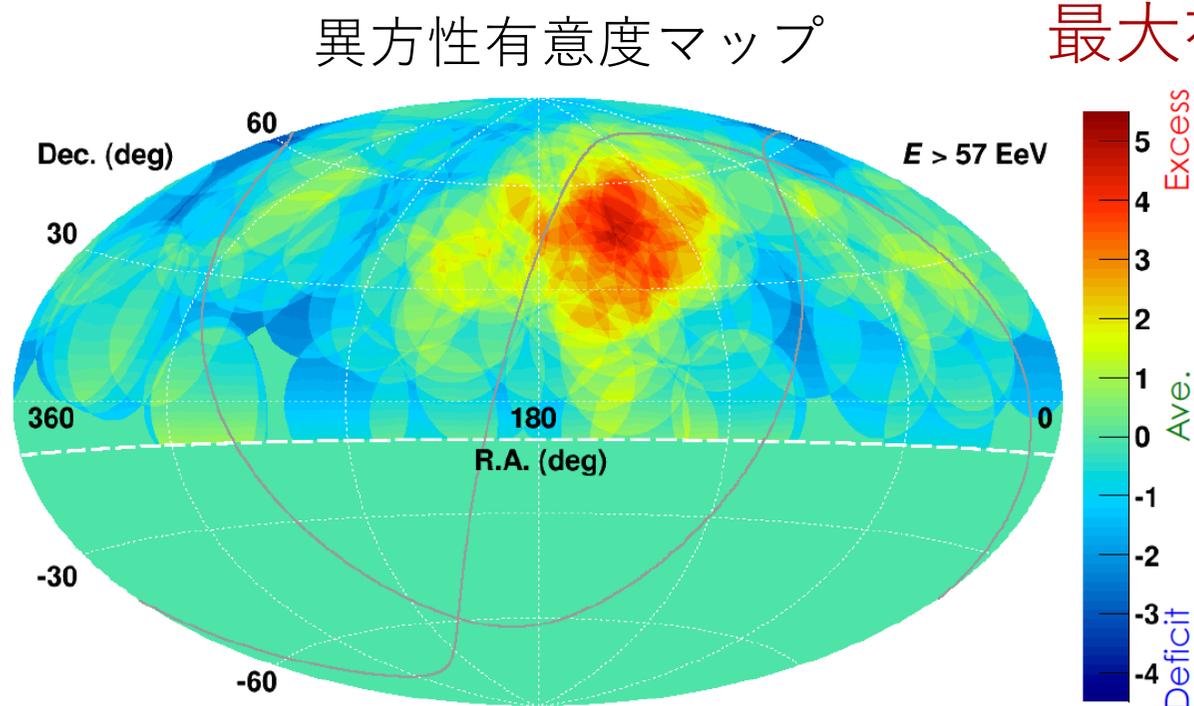
- 2008年5月～2015年5月（7年間）のデータ
- $5.7 \times 10^{19}$  電子ボルト以上: 109事象

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

# 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



最大有意度

$5.07\sigma$

有意度

実際の観測数と  
一様到来の場合  
その差が有意か  
を表す指標

世界初の高い有意度で  
異方性をとらえる

( $3.4\sigma$ )

- 最大の有意度 ( $5.07\sigma$ ) が偶然に生じる確率は約1万分の3.7
- 以下、参考のネット情報
  - 年末ジャンボ1等の当選確率 1,000万分の1
  - ガリガリ君あたり確率 1/25

6年間のデータ

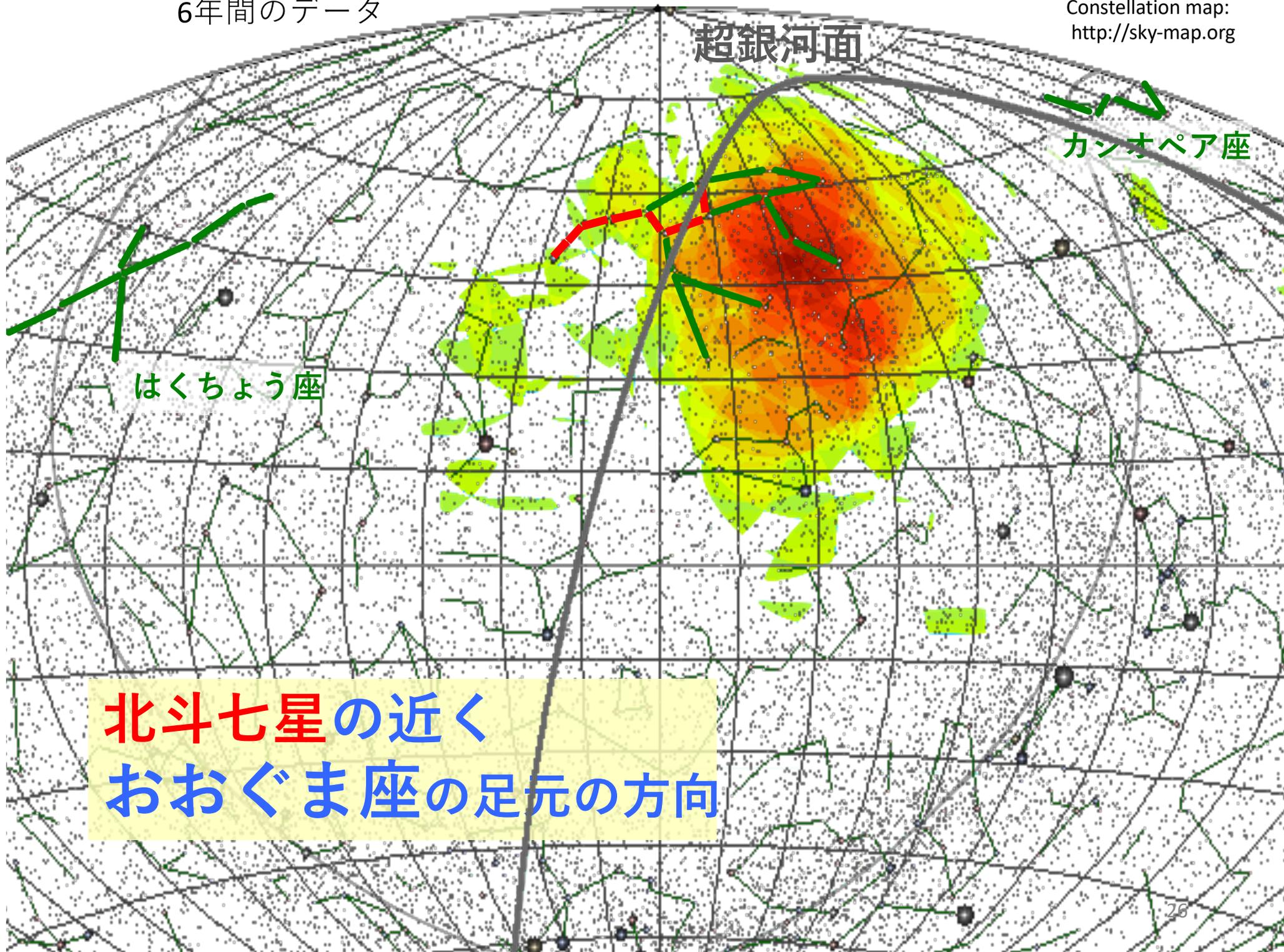
Constellation map:  
<http://sky-map.org>

超銀河面

カシオペア座

はくちょう座

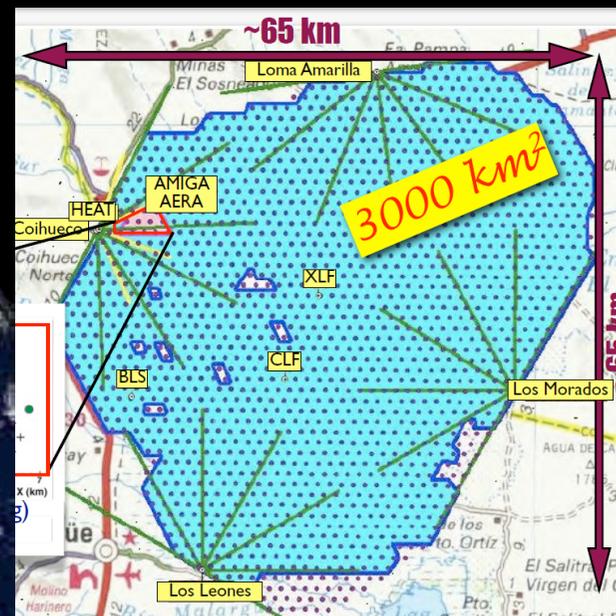
北斗七星の近く  
おおぐま座の足元の方向



# 南北半球からの宇宙線観測

## 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



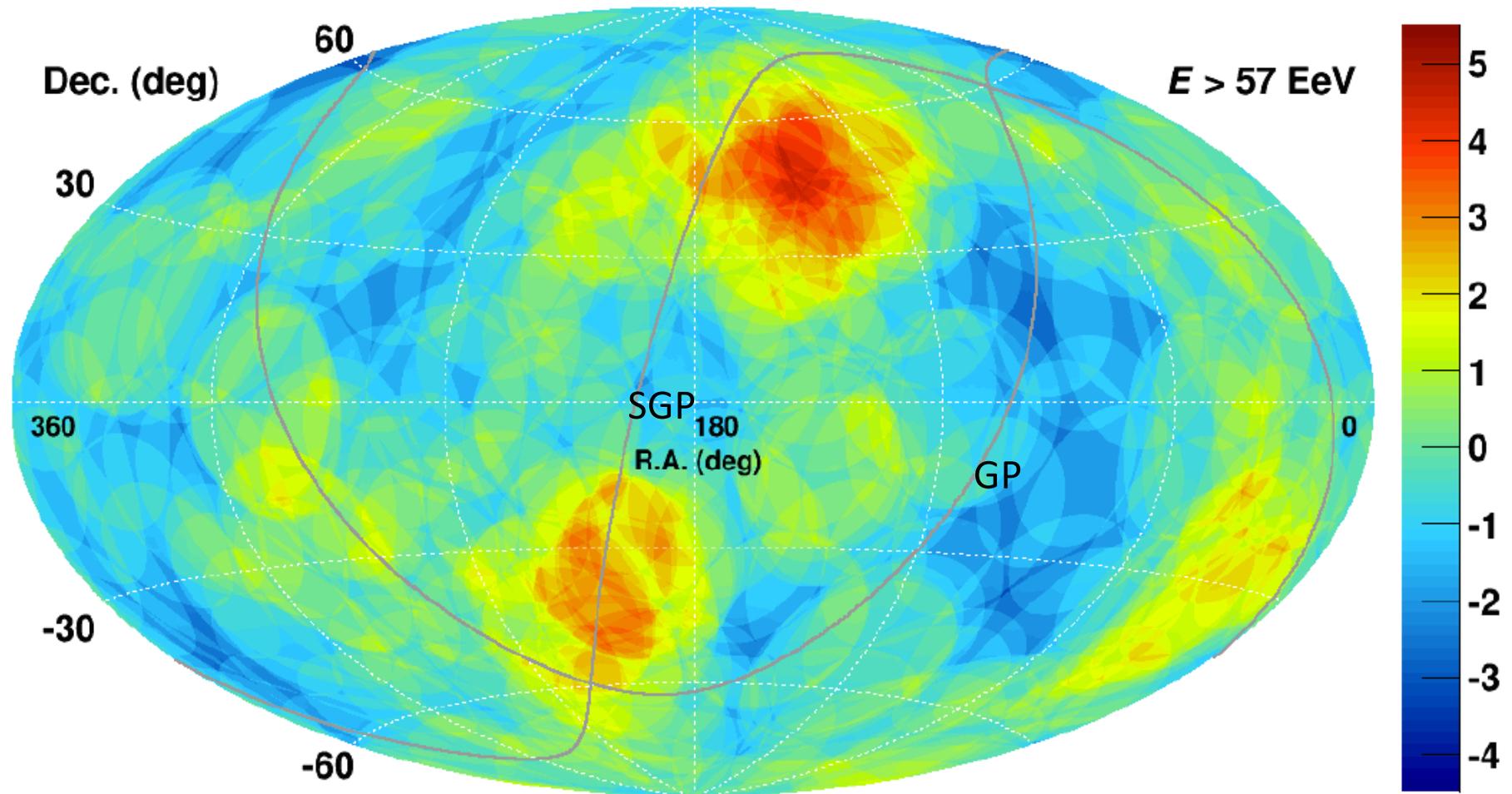
Auger FD



Auger SD

# TAとAugerのデータを合わせた有意度マップ

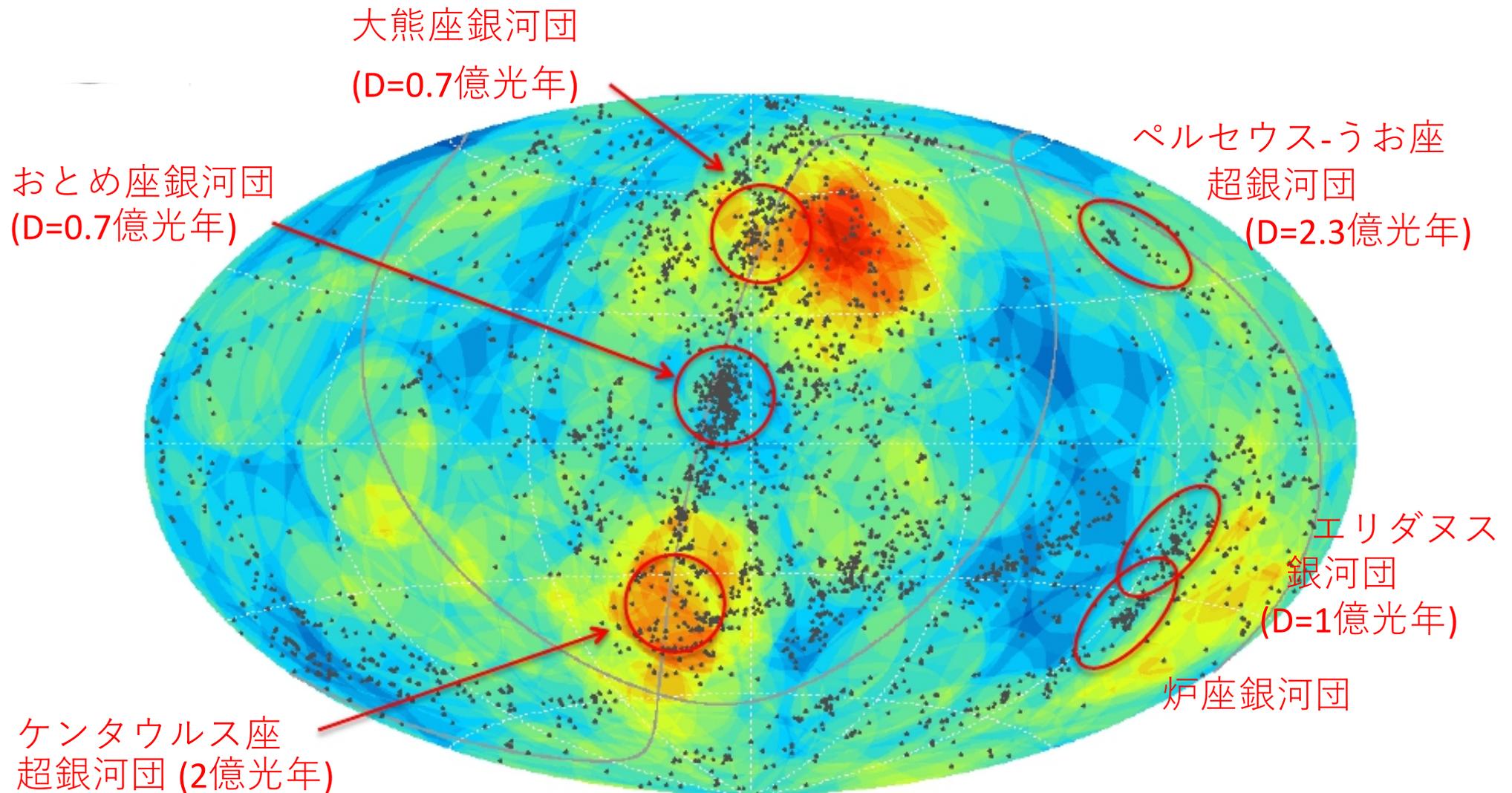
20度の半径の円の中の観測数が期待数より多いかどうかの有意度



TA (北天) 7年間 109事象 : TAホットスポット  $5.1\sigma$   
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）

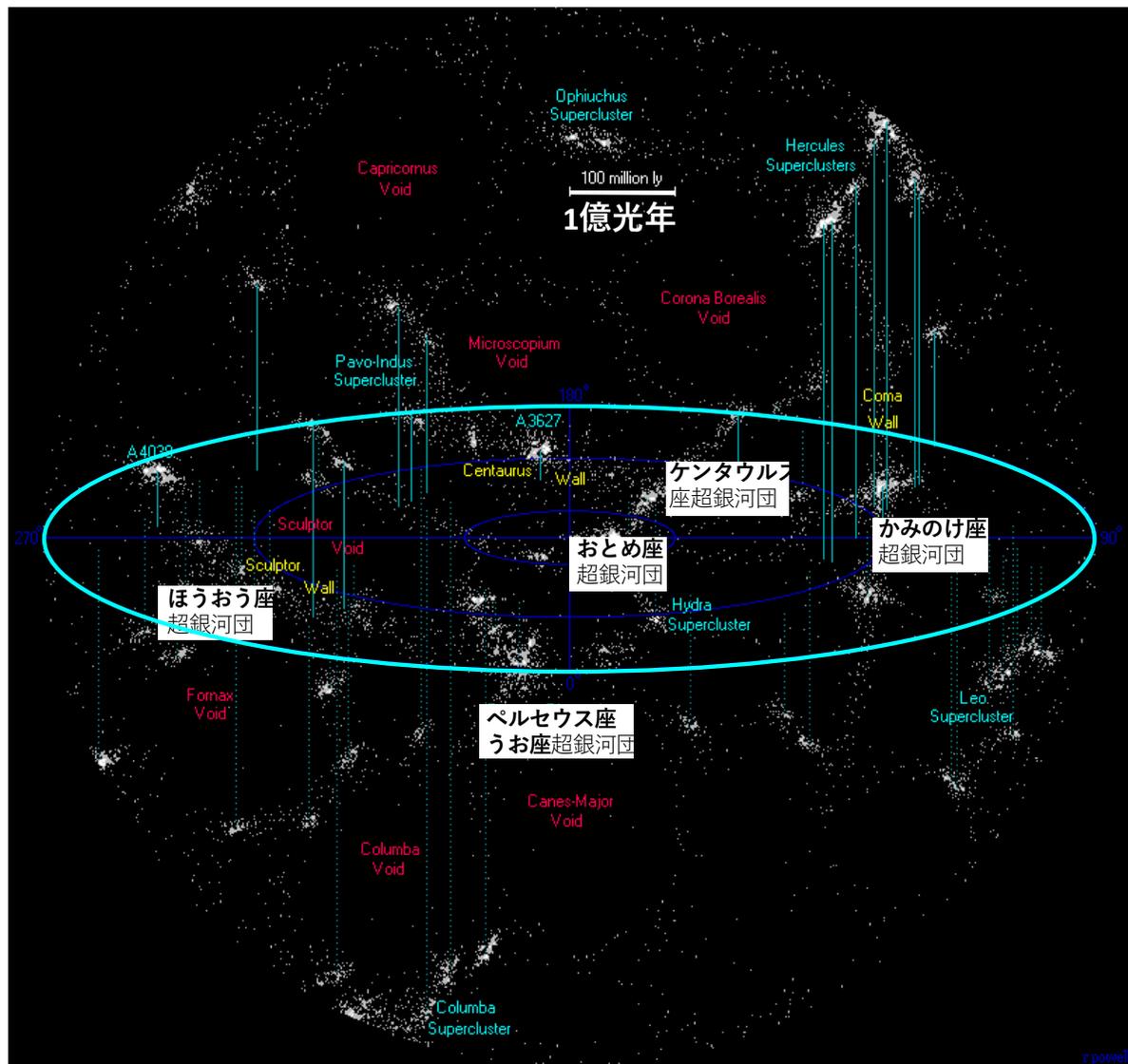


(黒点・): 2MASS カタログの銀河 (D<~1.5億光年)

*Huchra, et al, ApJ, (2012)*

近傍銀河との相関はある？ない？ => TA拡張計画進行中

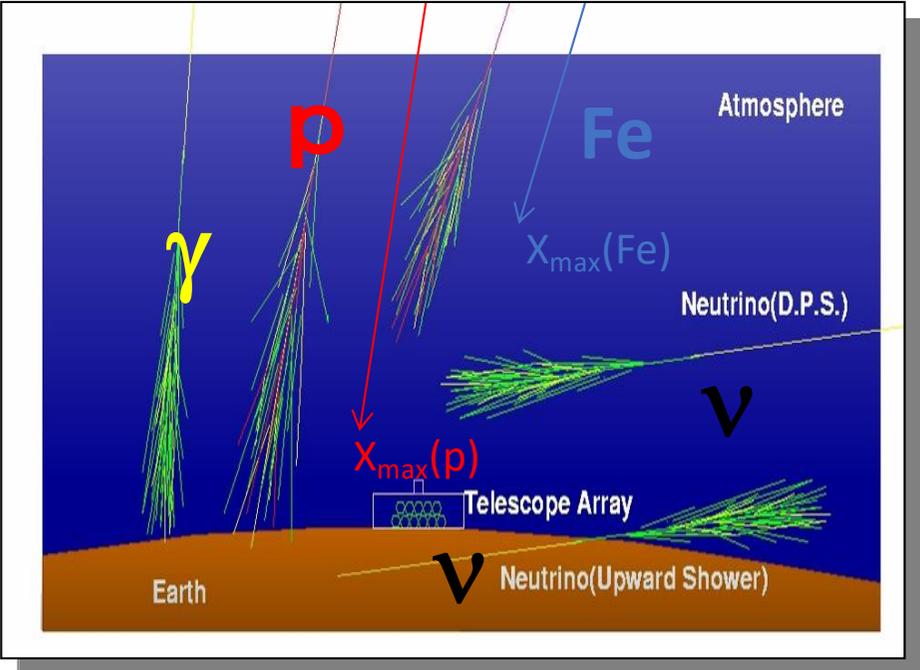
# 超銀河面



# TAの重要な成果

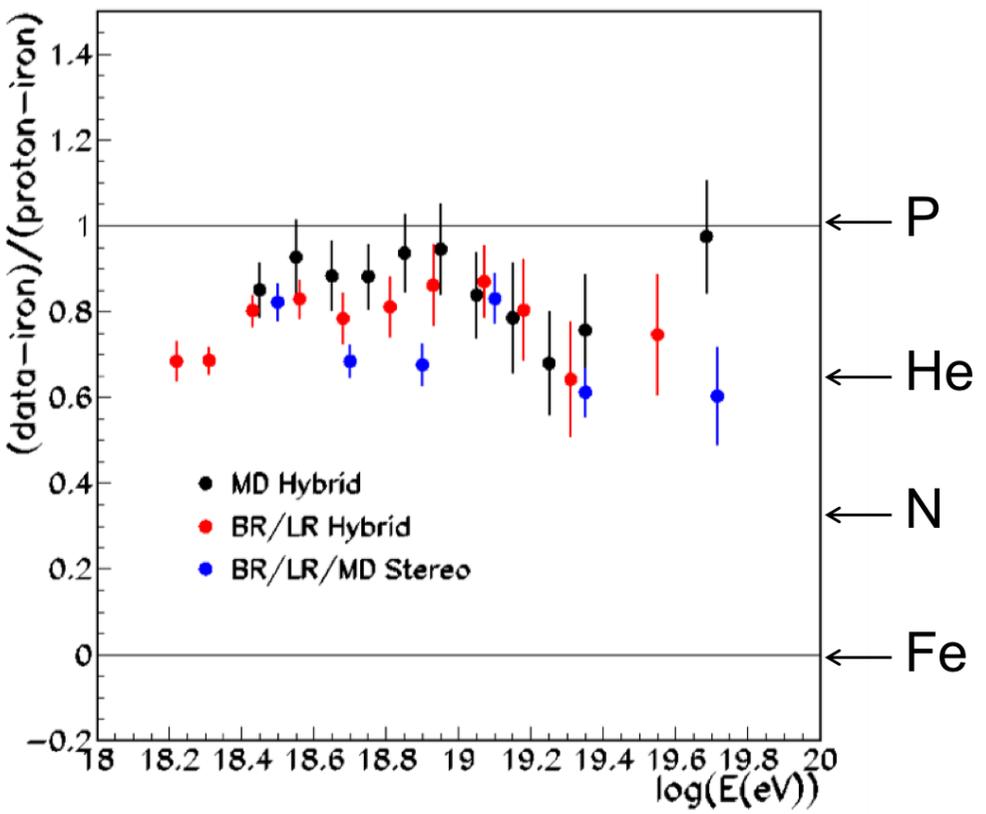
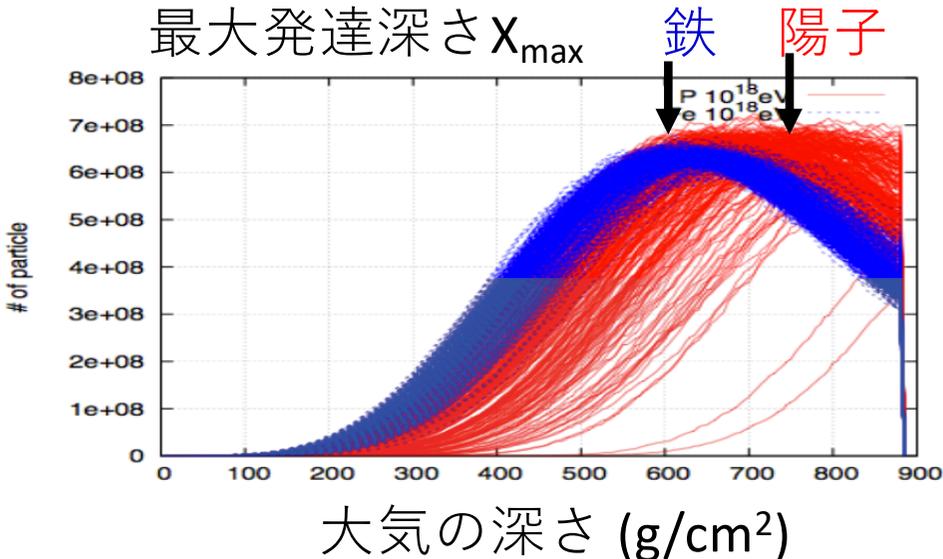
- 最高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトル
- 最高エネルギー宇宙線の到来方向
- 最高エネルギー宇宙線の粒子種

# 空気シャワー最大発達深さによる粒子種の同定



粒子によって大気中に突っ込む深さが違う  
 深い順に、ニュートリノ、ガンマ線、陽子、鉄…

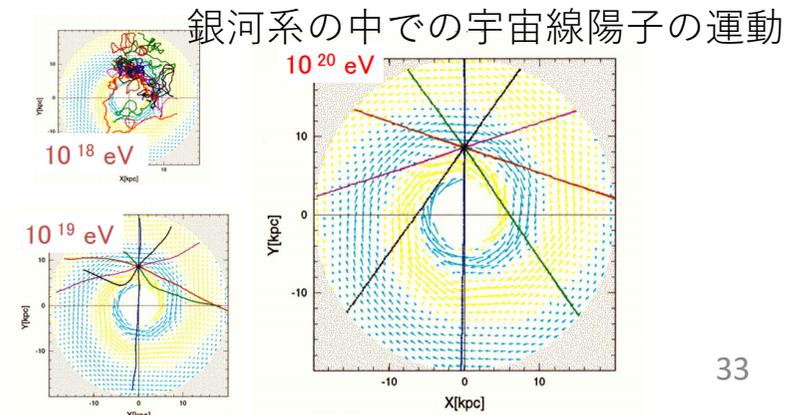
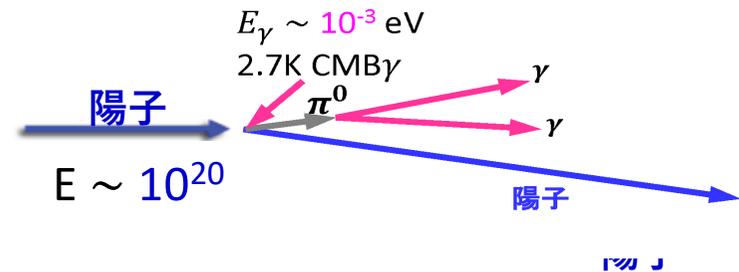
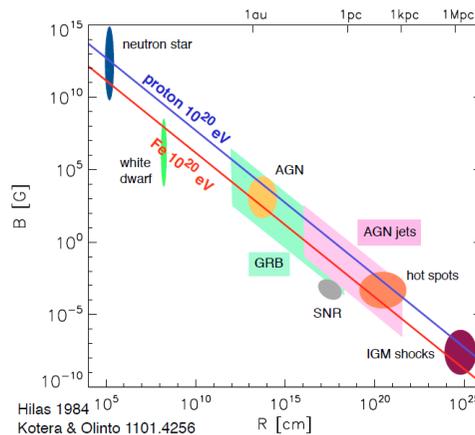
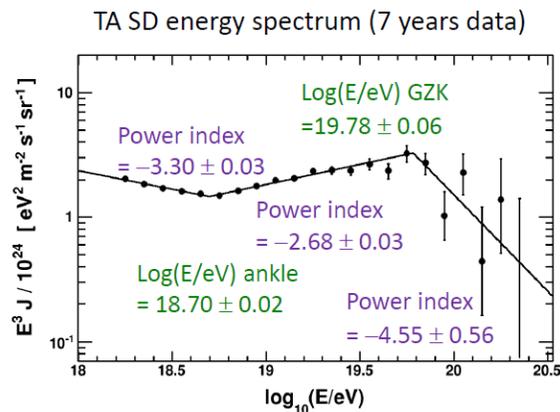
どの程度深く突っ込んだかは大気蛍光望遠鏡で観測できる



陽子もしくは軽い原子核!! 起源天体の環境と伝搬過程の情報

# なんで $10^{20}$ eVなんだろう？

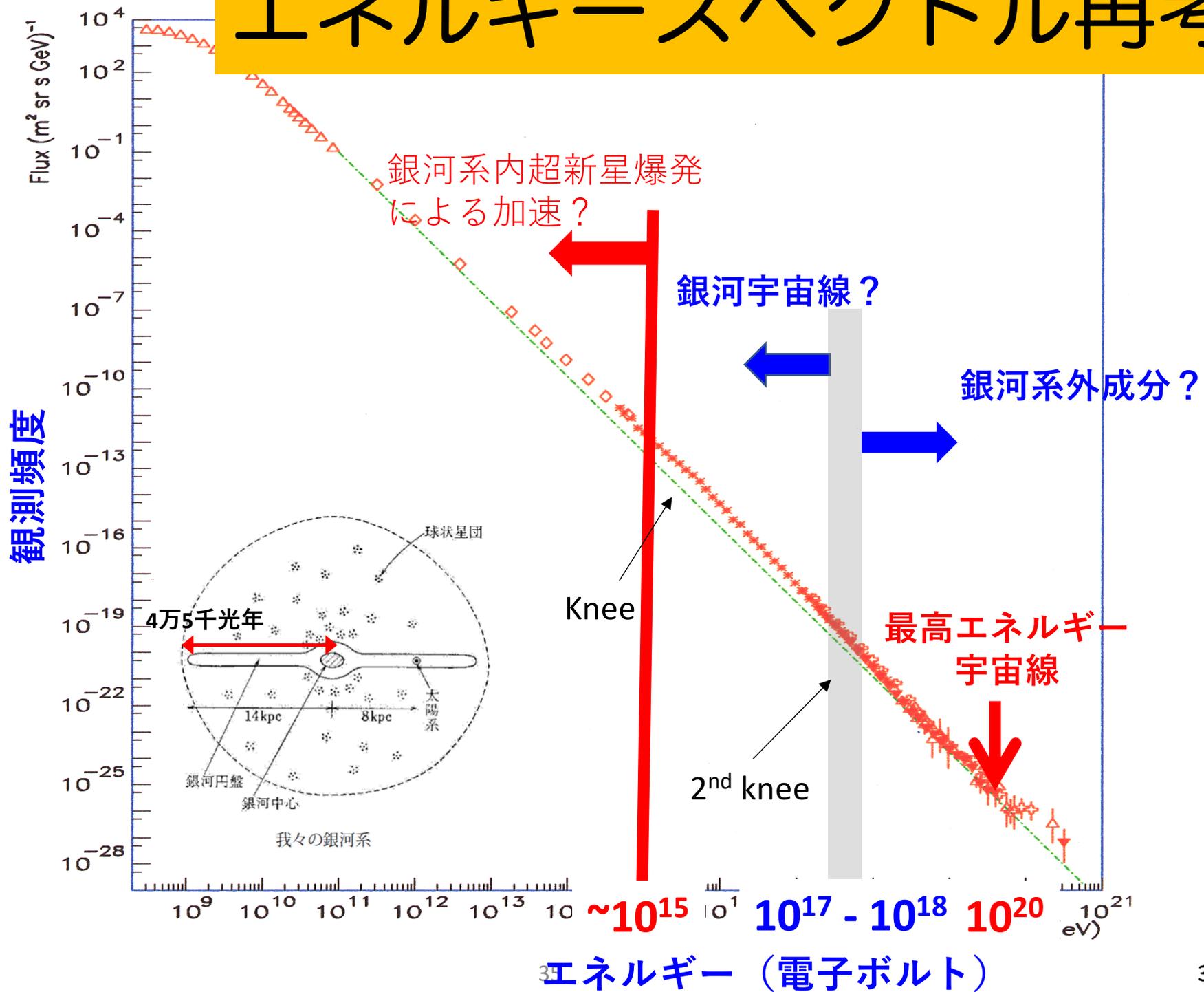
- 観測されている最高エネルギー（技術的最先端）
- 既知の天体の加速限界エネルギー(Hillas plot)
- GZK効果（CMBとの衝突）が現れるエネルギー
- 宇宙磁場内を直進できるエネルギー



# TAのふたつの拡張計画

- 低エネルギーへの拡張 (TALE)
- 最高エネルギーの面積拡張 (TAx4)

# エネルギースペクトル再考

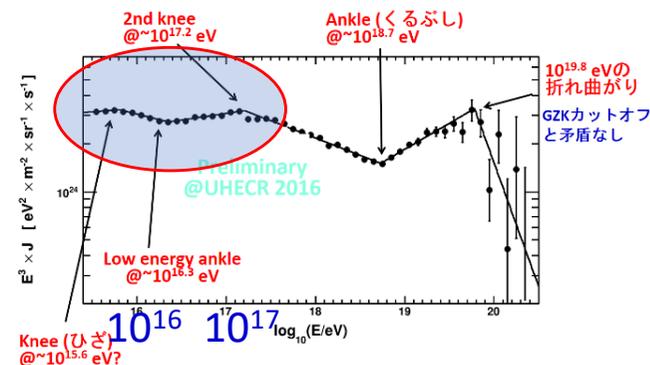


# TA低エネルギー拡張 (TALE)

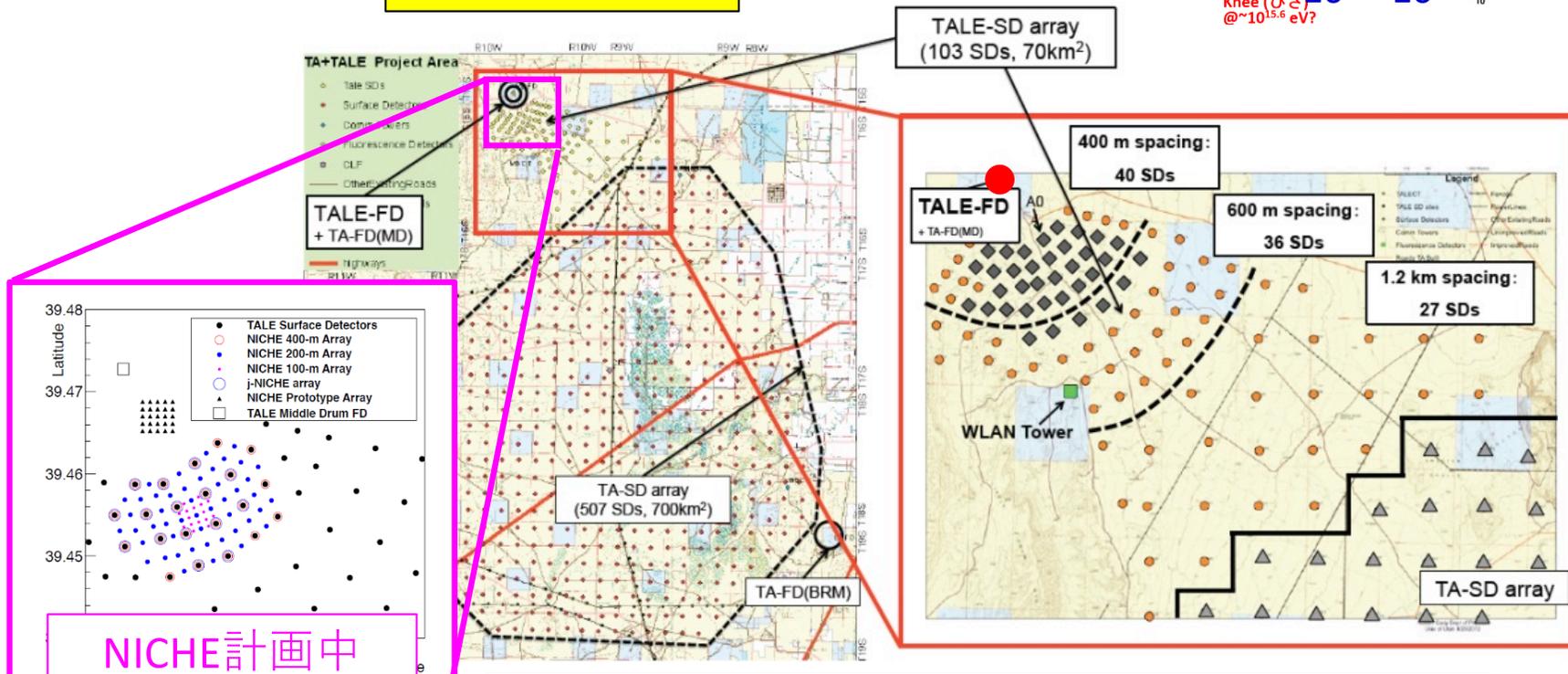
銀河系宇宙線から銀河系外宇宙線への遷移を観測

- TALE望遠鏡(FD)：1ステーション稼働中
- TALE地表検出器(SD)：
  - TAと同じシンチレータ検出器を約100台使用
  - 地表検出器をくわえた望遠鏡データ ⇒ 精度よく粒子同定
  - スペクトルの折れ曲がりと粒子の変化の関係を研究

TAのエネルギースペクトル (平均)



定常観測中!



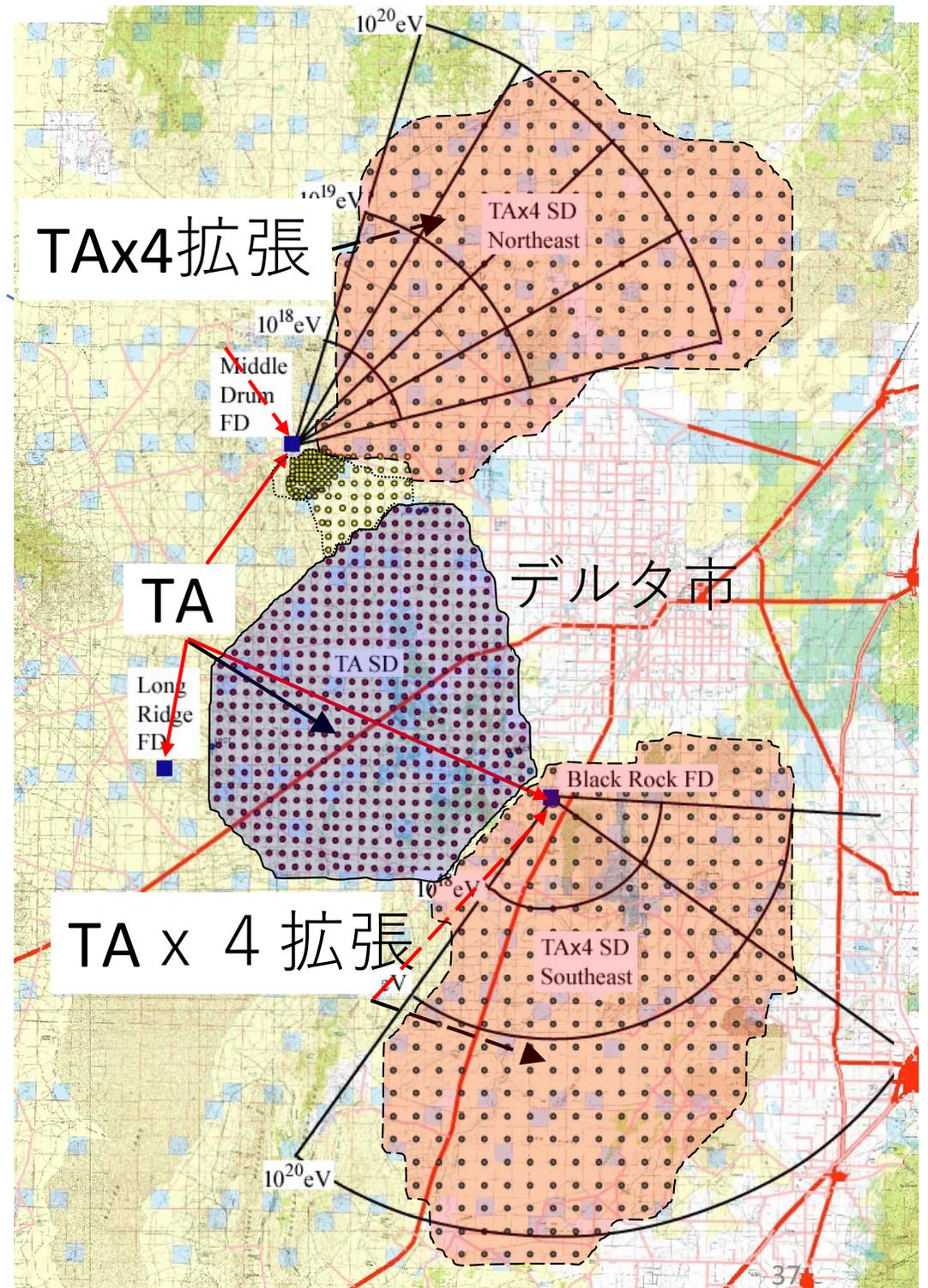
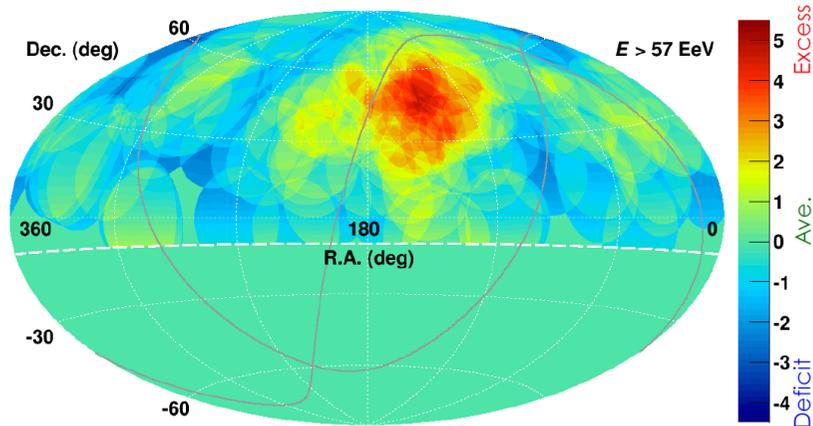
NICHE計画中  
チェレンコフ検出器

TALEとNICHEで~10<sup>15</sup> eV以上の粒子同定を目指す

# TA 拡張計画TAx4

## TAx4: 高エネルギー拡張計画

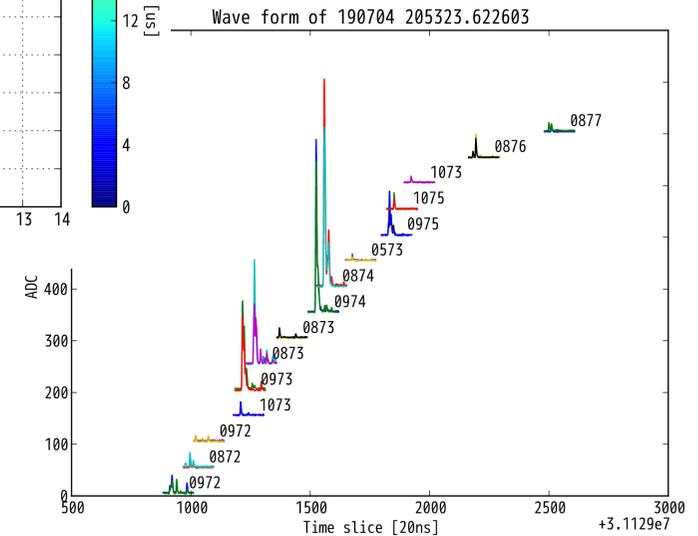
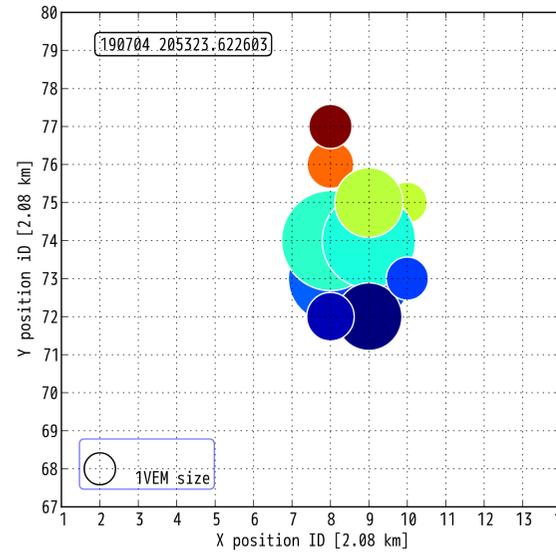
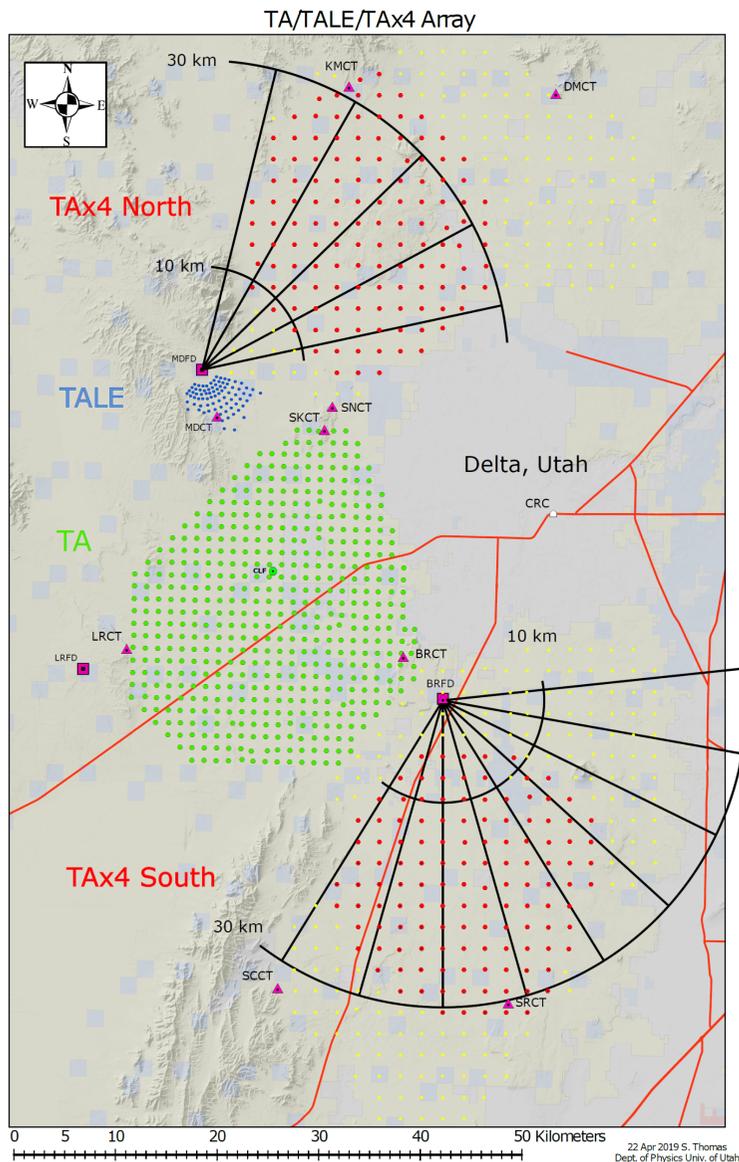
- 面積を広げる (今のTAの4倍)
- 2.08km 間隔の地表検出器
- 2019年度 2月に2.5倍分までに設置
- 追加2台の望遠鏡も米国担当で建設
- 観測データ蓄積中
- 短期間でホットスポットを検証



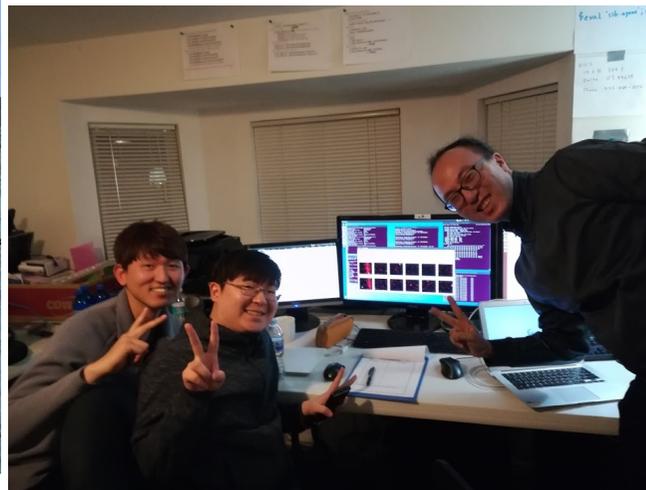
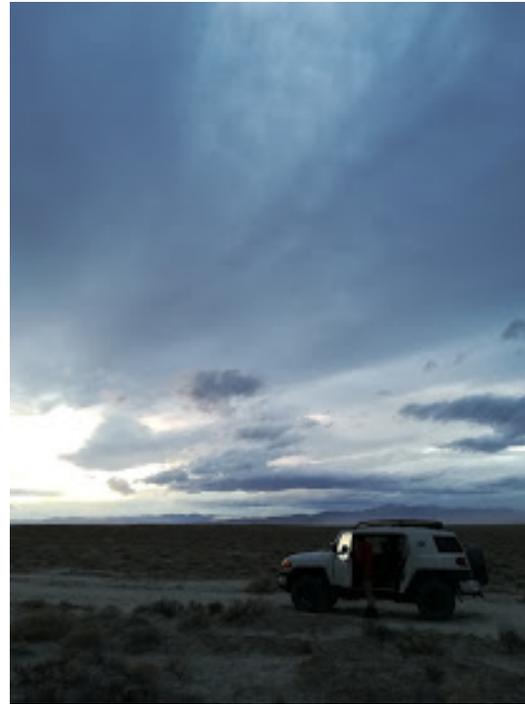
# TAx4 の設置



# TAx4による空気シャワーデータ



- 予定の半分の設置完了 (257 SDs)
- 安定したデータ収集継続
  - 宇宙線事象の蓄積
  - 解析進行中



## ユタでの生活

# 宇宙線研究者の生活

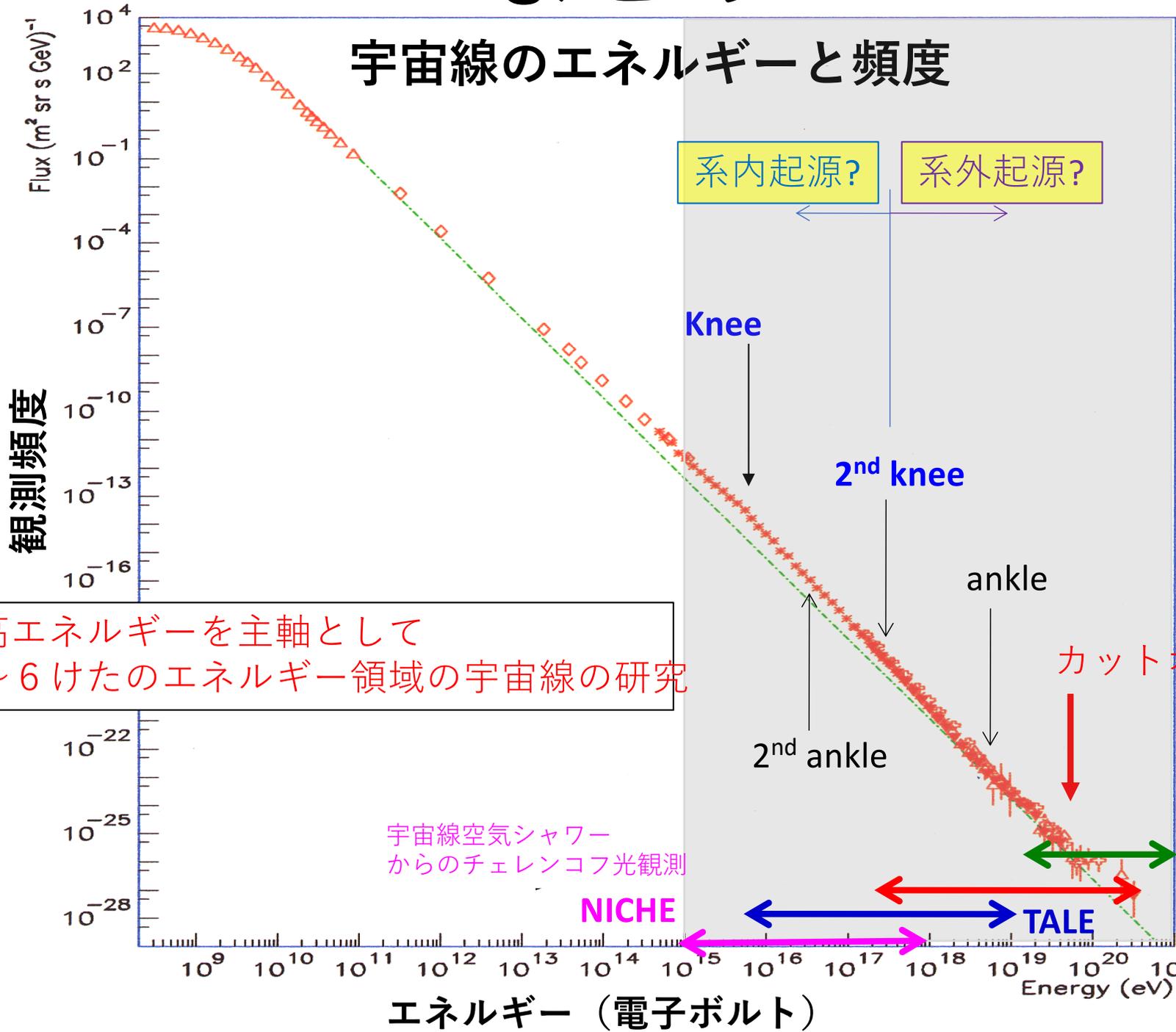


# まとめ

- 最高エネルギー宇宙線は、地上加速器で到達できない高エネルギーの宇宙現象を探る手段である
- テレスコープアレイ(TA)実験は、最高エネルギー宇宙線の観測で国際協力をしながら世界をリードしている
  - エネルギー、粒子種、到来方向、の観測から宇宙線の起源に迫る
- TA実験が発見したホットスポットが注目を集めている
- ホットスポットの信号を確実にするためのTAx4実験の設置が進んでいる
- 銀河系内から銀河系外の遷移を明らかにするために、低エネルギー宇宙線の観測も進めている

# まとめ

## 宇宙線のエネルギーと頻度



最高エネルギーを主軸として  
5～6けたのエネルギー領域の宇宙線の研究

宇宙線空気シャワー  
からのチェレンコフ光観測

NICHE

TA × 4  
TA

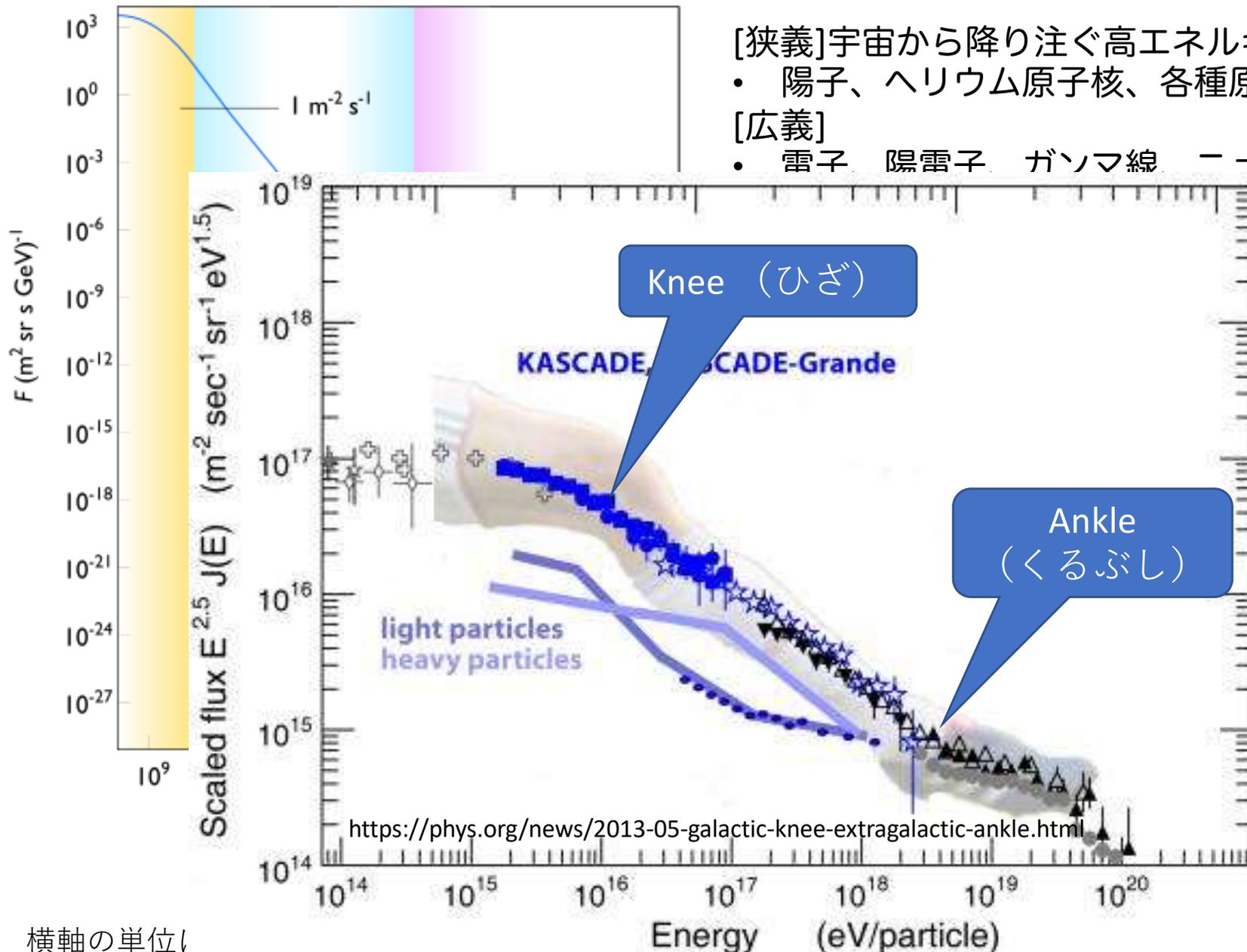
TALE



# TALEサイトへの装置の設置



# 1ページで学ぶ「宇宙線とは？」



- [狭義]宇宙から降り注ぐ高エネルギー放射線
  - 陽子、ヘリウム原子核、各種原子核
- [広義]
  - 電子 陽電子 ガンマ線 ニュートリノ

てくる  
 [注：大気の外]  
 約 1/1000  
 $10^{12}$ に年到一个)  
 $10^{12} eV$

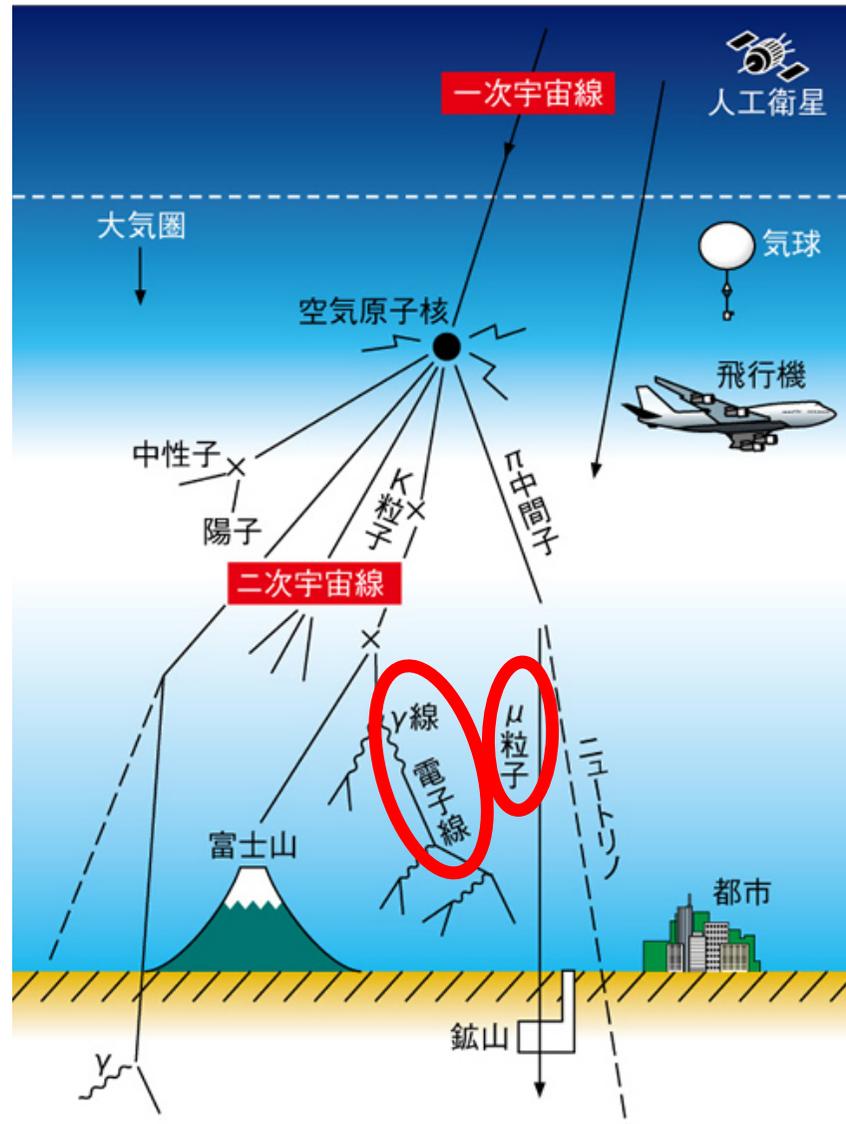
.HC  
 国境)



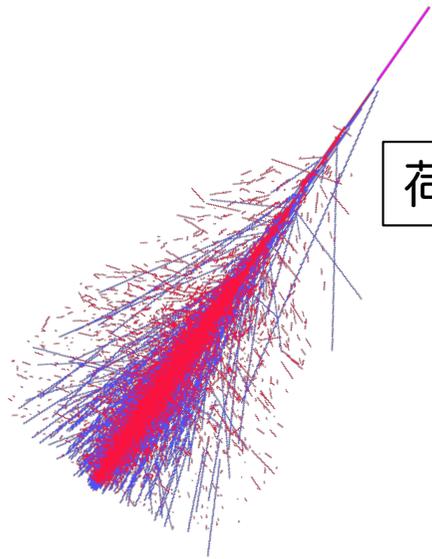
横軸の単位は  
 $1eV =$  電子を1Vで加速した場合のエネルギー  
 $= 1.6 \times 10^{-19} J$  (ジュール)

<https://phys.org/news/2013-05-galactic-knee-extragalactic-ankle.html>

# 超高エネルギー宇宙線と空気シャワー



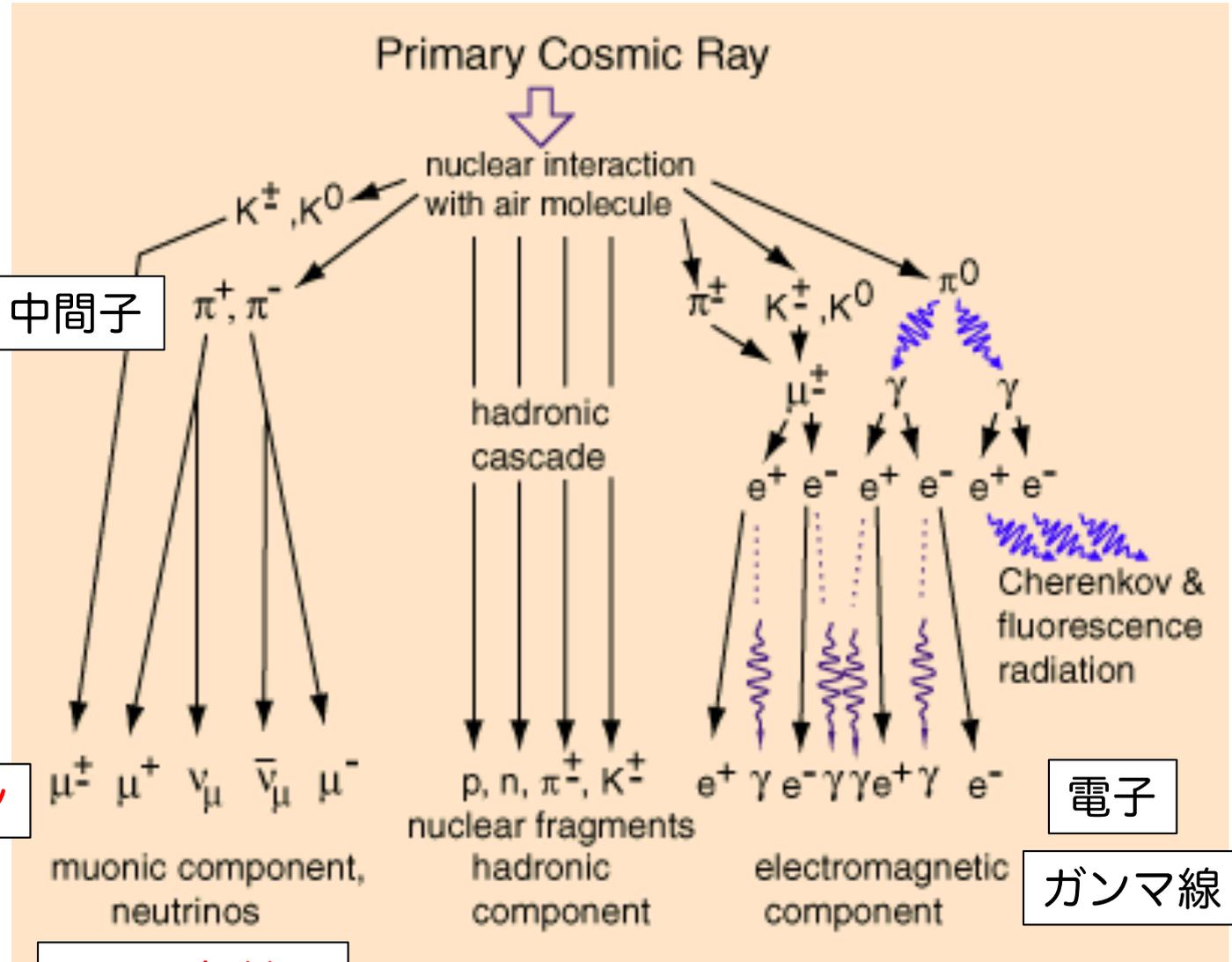
# 空気シャワー



荷電π中間子

ミューオン

ニュートリノ



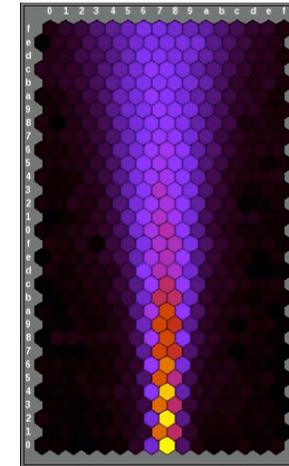
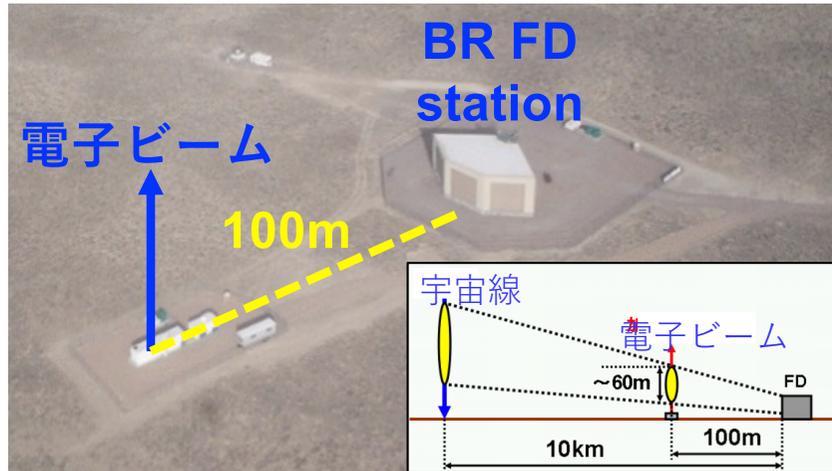
電子

ガンマ線

# TAサイトでの関連研究

# 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

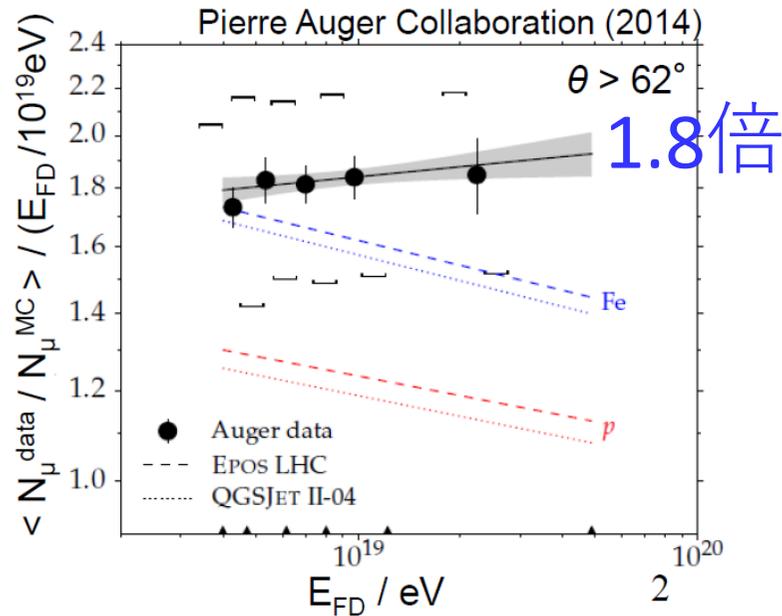
- シャワー生成
  - Geantシミュレーション
- FDシミュレーション・再構成
  - TA オフラインソフトウェア

## • もう一つの利用

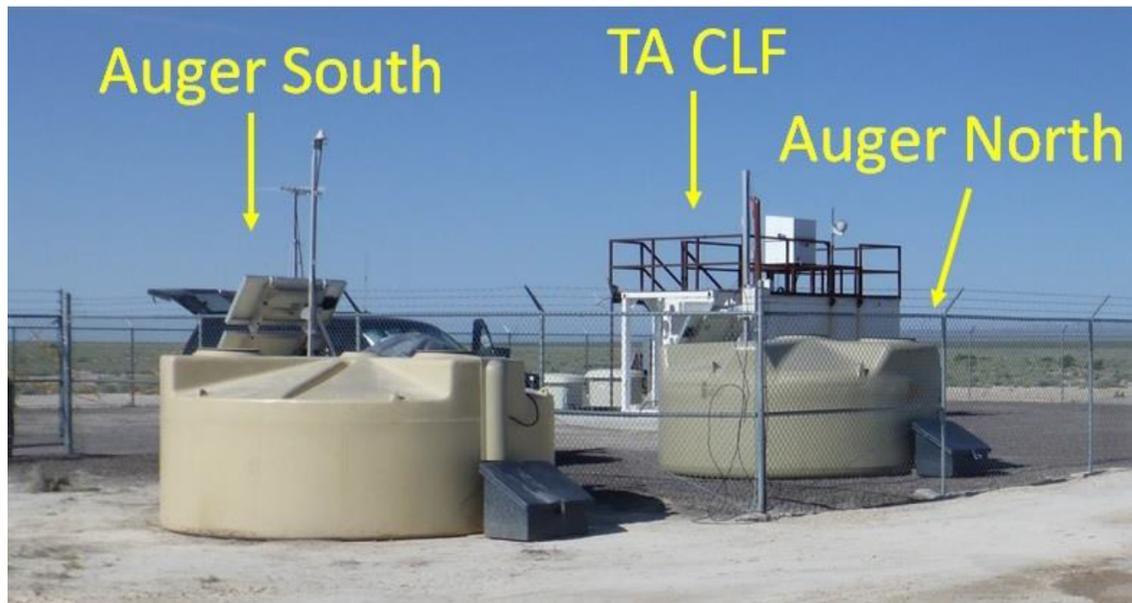
- 宇宙線の電波観測の開発研究

# 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
  - ミューオンに感度
- 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！

# The EUSO

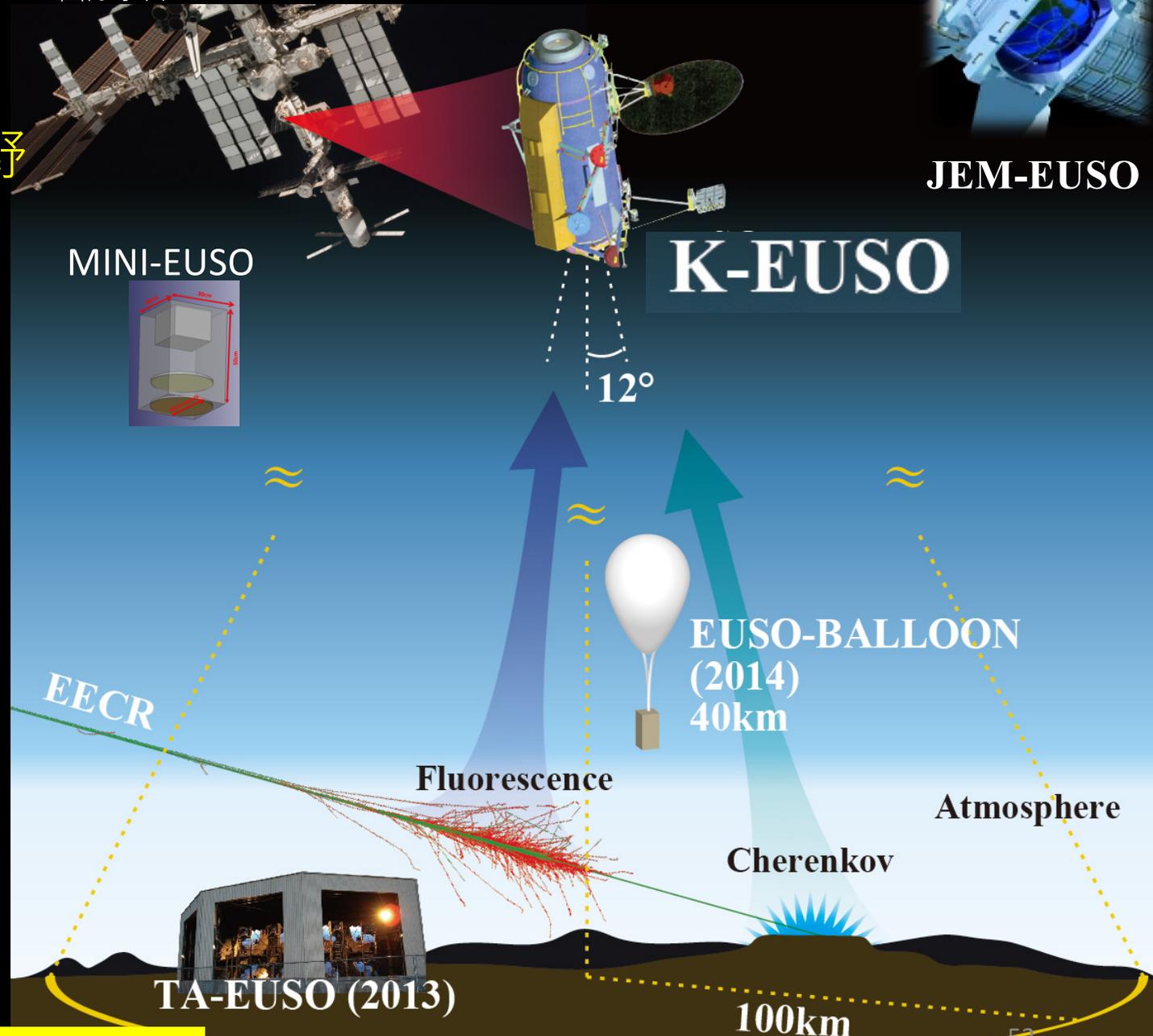
## program

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+)

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



宇宙線研も参加：TA-EUSOとPMT較正

# The EUSO

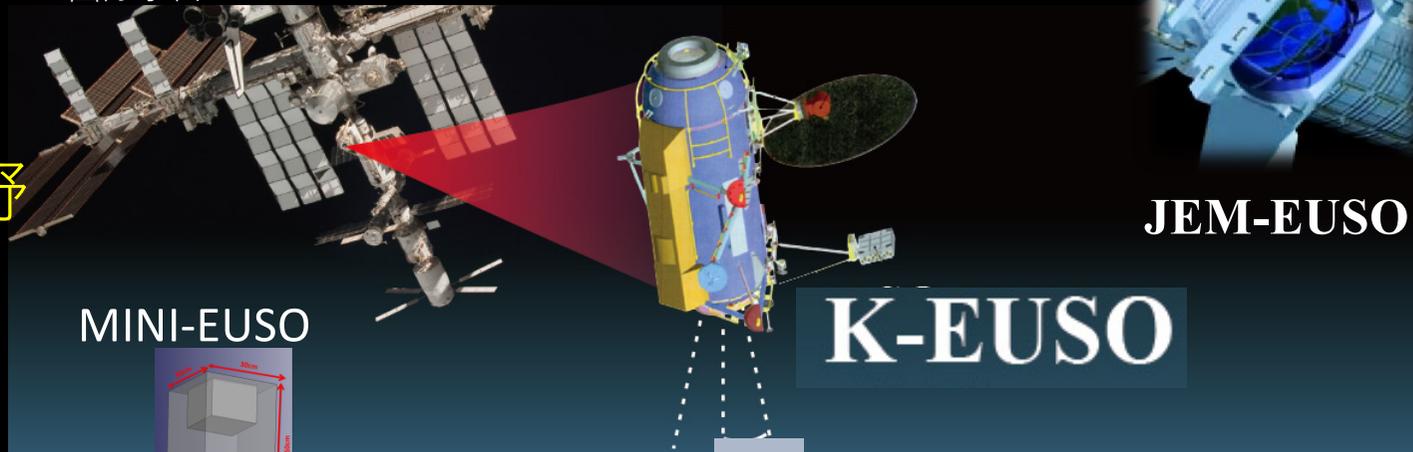
## program

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+)

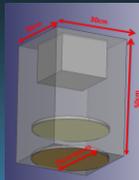
最高エネルギー宇宙線大規模観測計画  
- 宇宙からの望遠鏡観測 -

国際宇宙ステーション



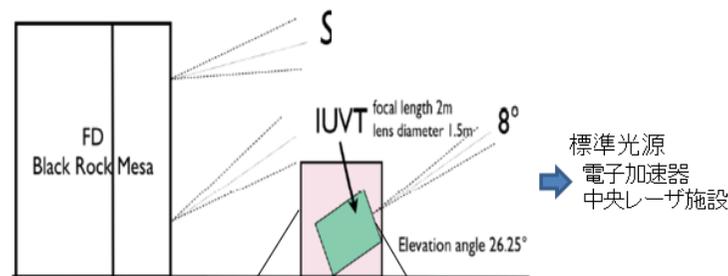
JEM-EUSO

MINI-EUSO

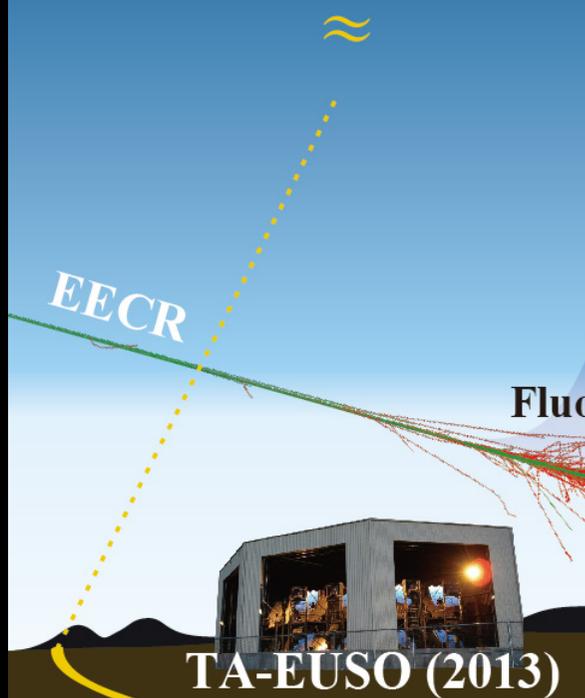


K-EUSO

TA-EUSO: TAサイトでの試験



フレネル  
レンズ



TA-EUSO (2013)

100km

宇宙線研も参加：TA-EUSOとPMT較正

# The EUSO

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 —

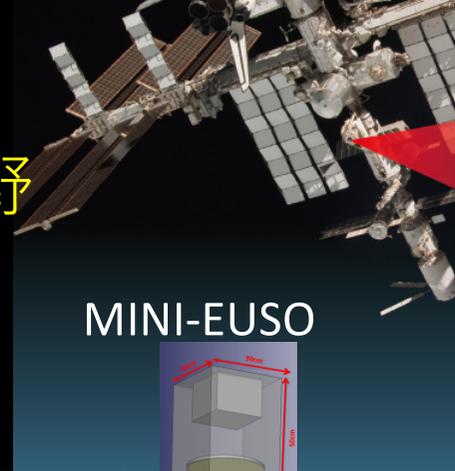


## program

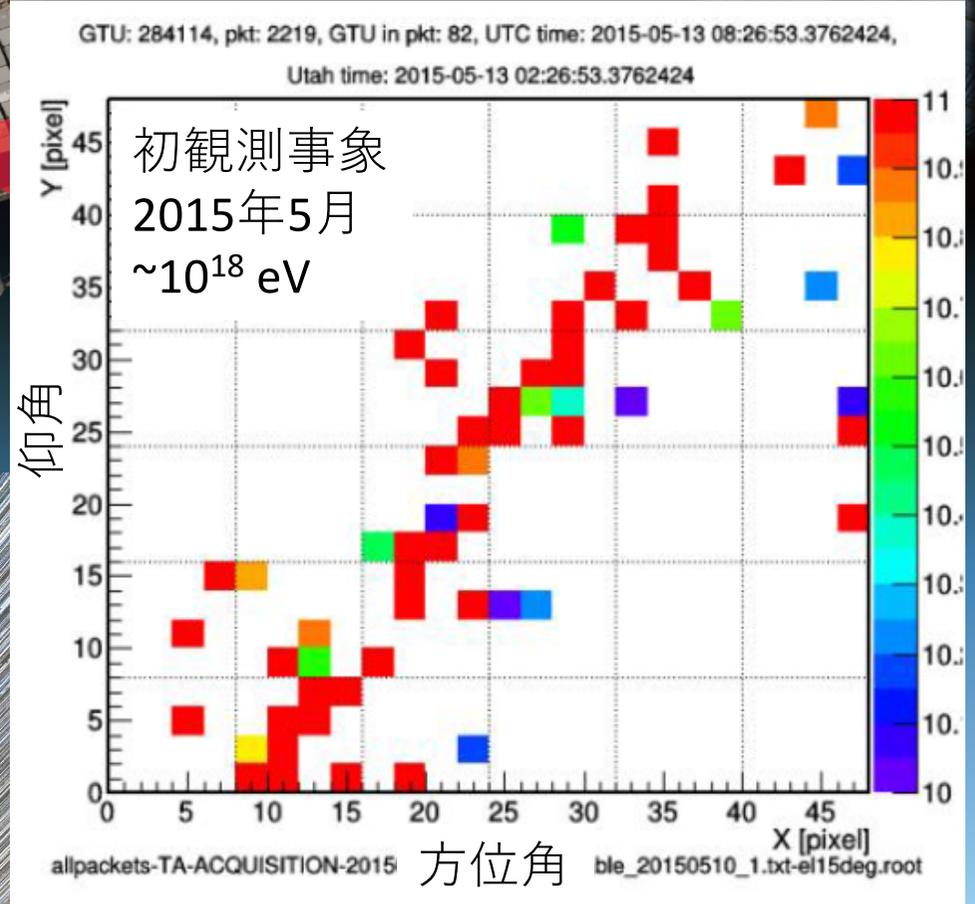
大統計(TAx4の2倍)  
全天ほぼ一様な視野

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

国際宇宙ステーション



MINI-EUSO



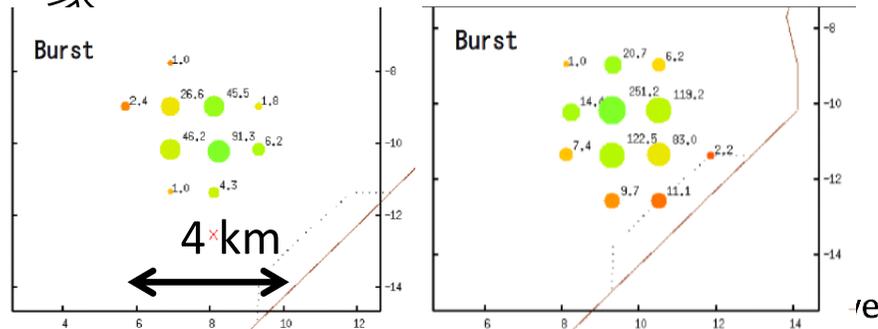
フレネル  
レンズ

宇宙線研も参加：TA-EUSOとPMT較正

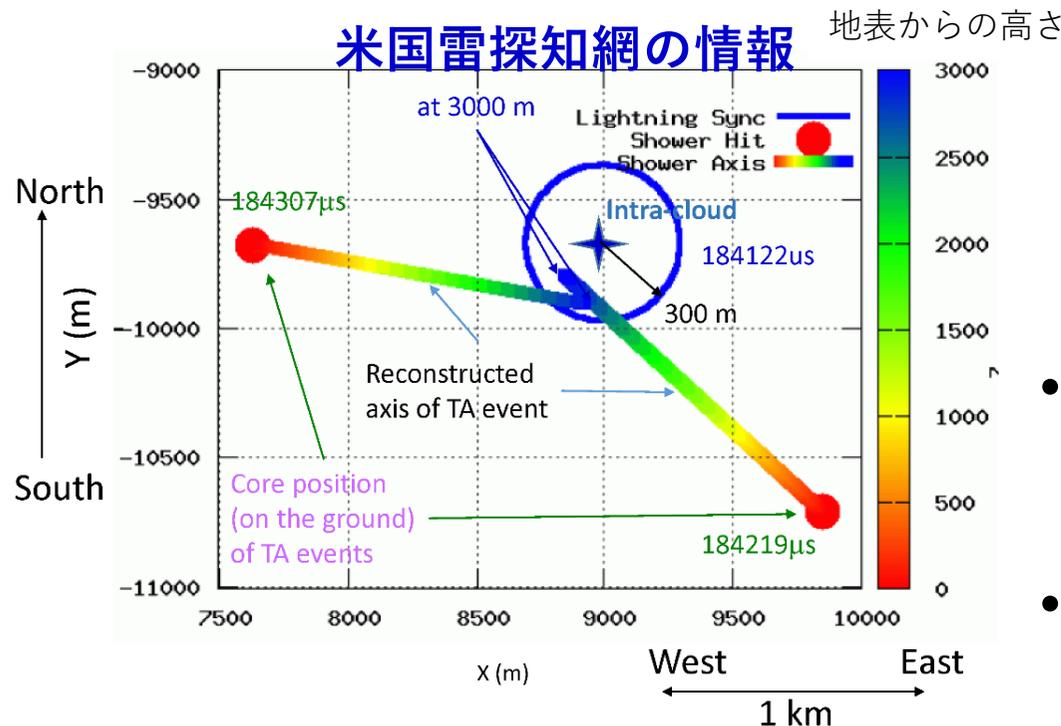
100km

# 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

# 望遠鏡サイト

