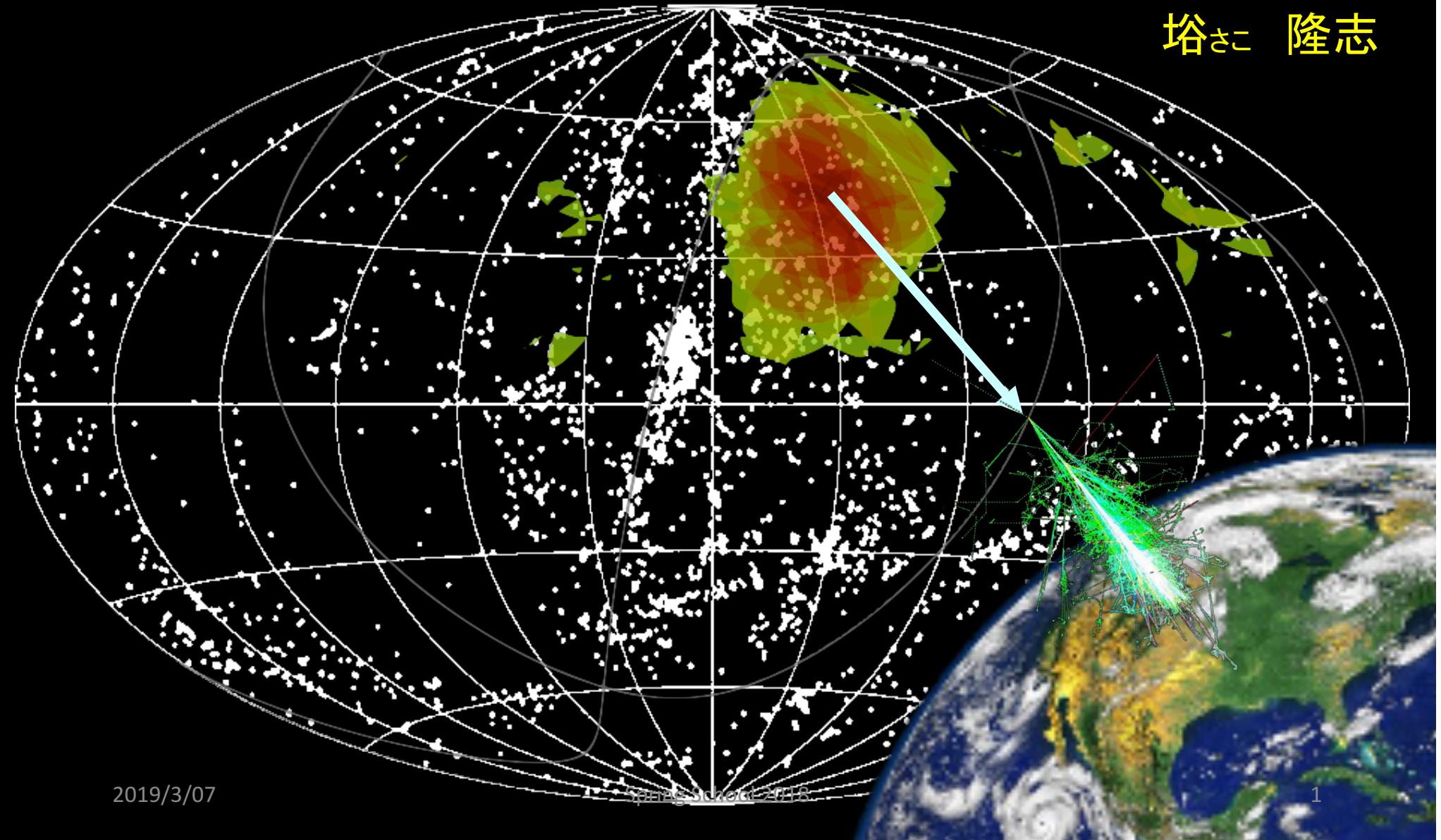
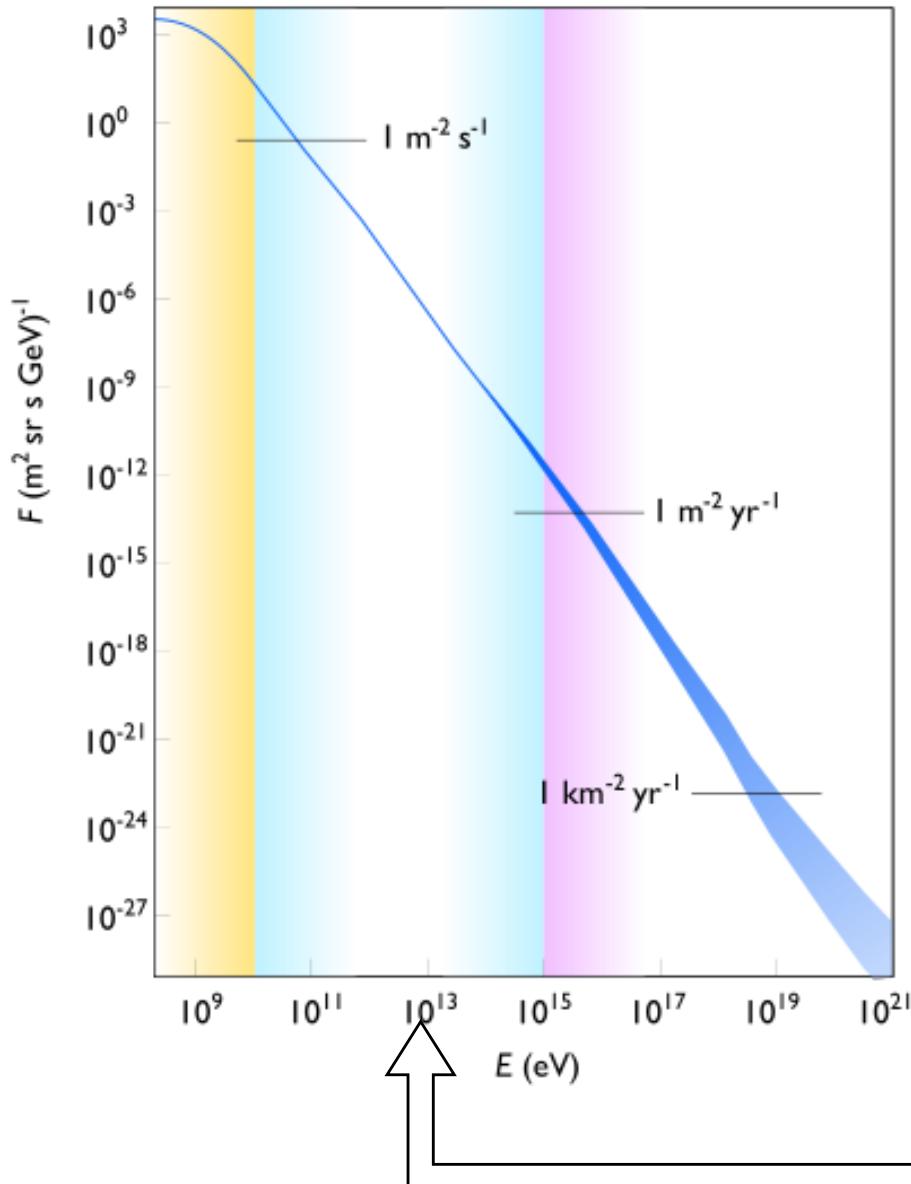


最高エネルギー宇宙線

塙さこ 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
= 1.6×10^{-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

マルチメッセンジャー天文学

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(1cm²)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} eVの宇宙線が来ている(100km²に年に一個)
- 人口加速器の最高エネルギーは 7×10^{12} eV

宇宙加速器はどこにある？

- 謎？？
- 宇宙の極限天体・現象が関わるはず

世界最大の粒子加速器 LHC
(CERN, スイス, フランス国境)



全周27km
(山手線が35km)

粒子を加速するには

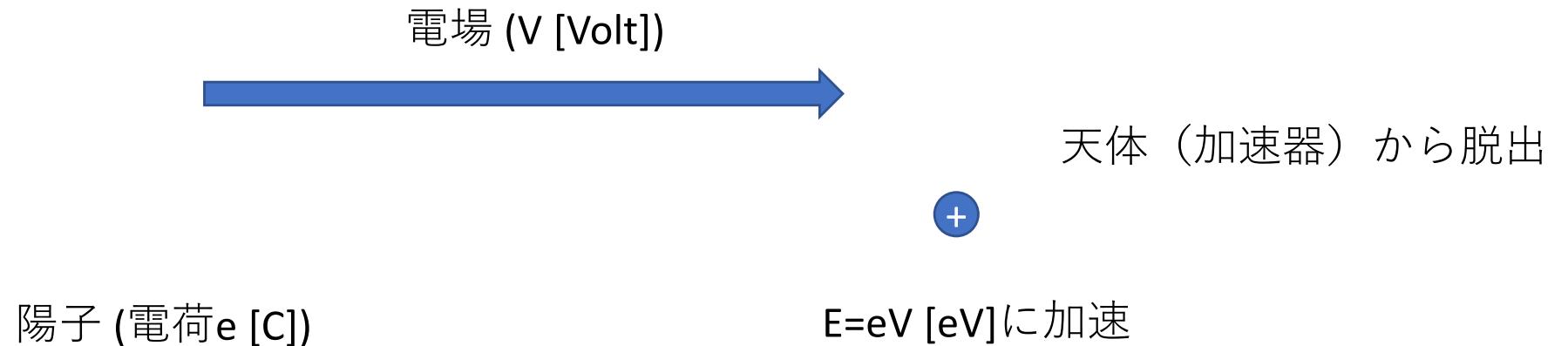
電場 (V [Volt])



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

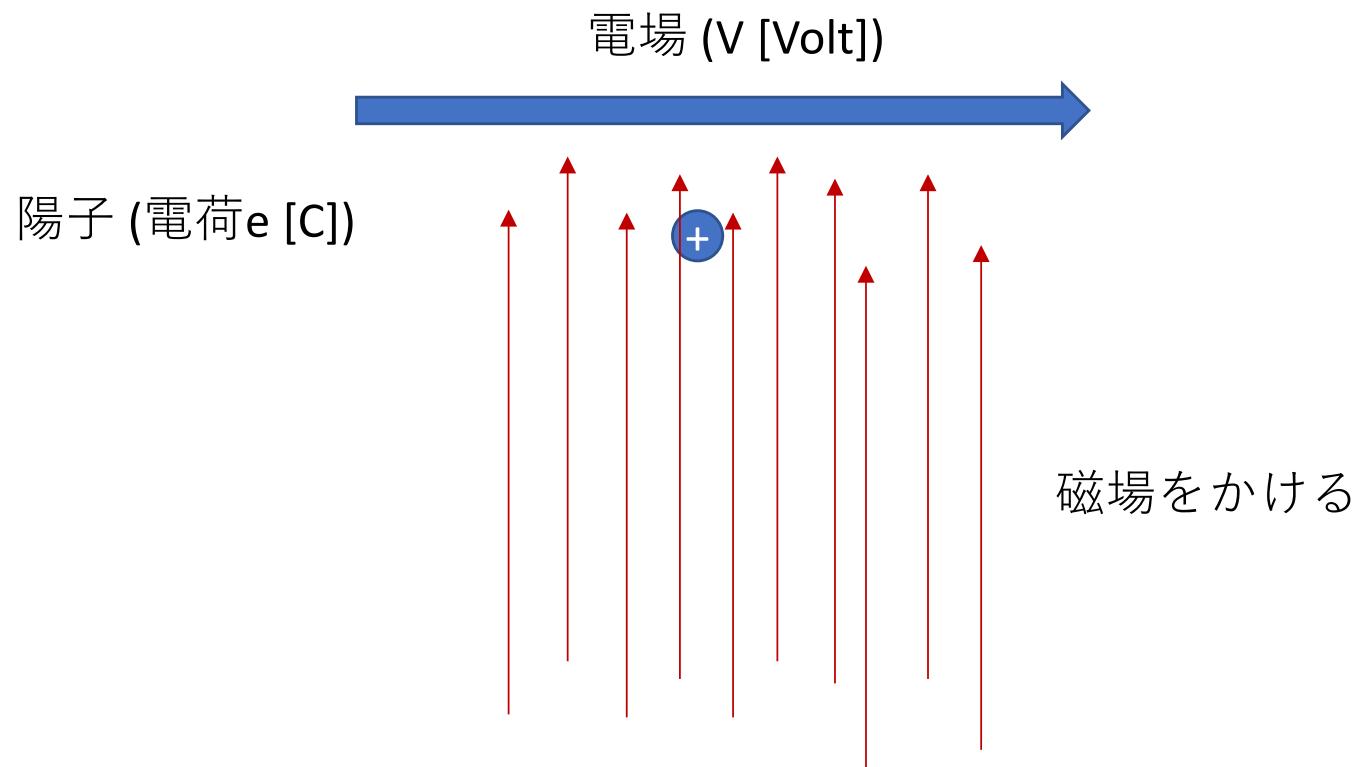
電場 (V [Volt])



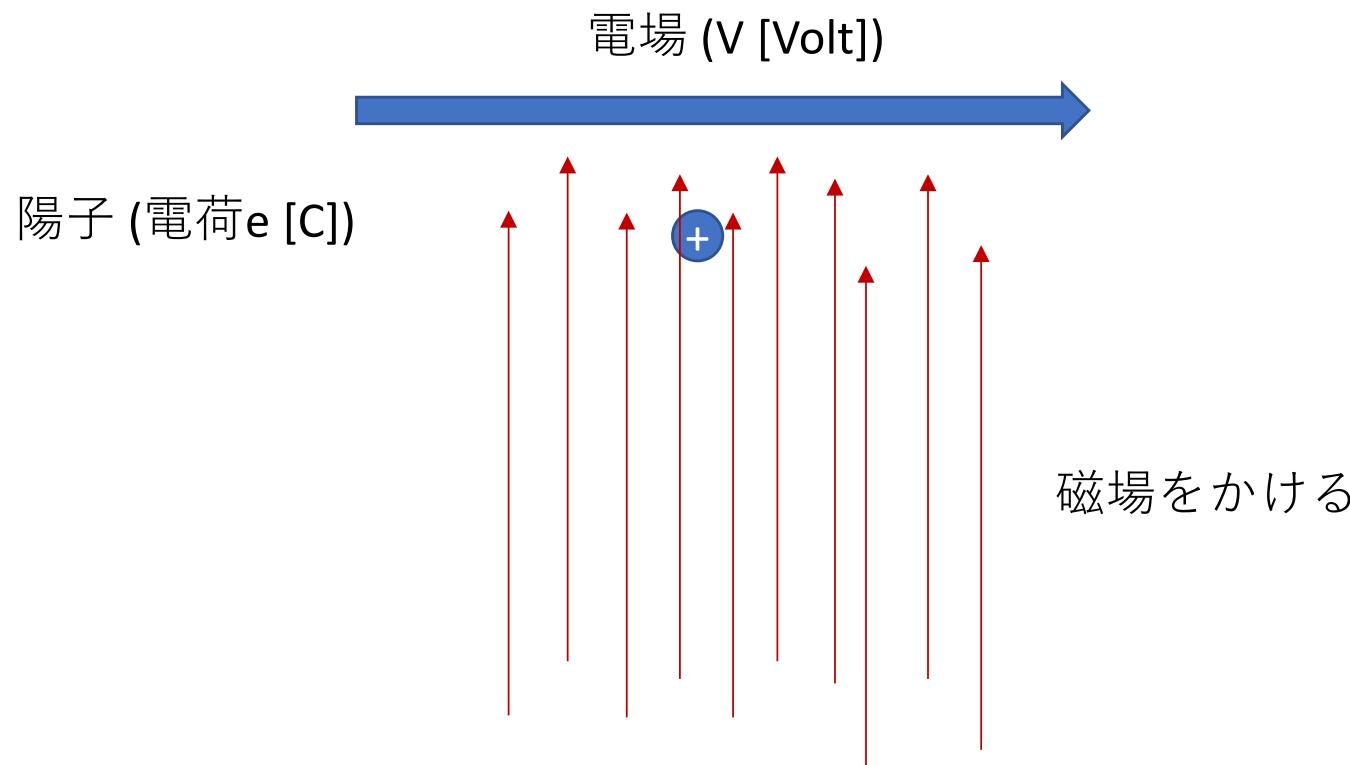
陽子 (電荷e [C])

$E=eV$ [eV]に加速

粒子を加速するには



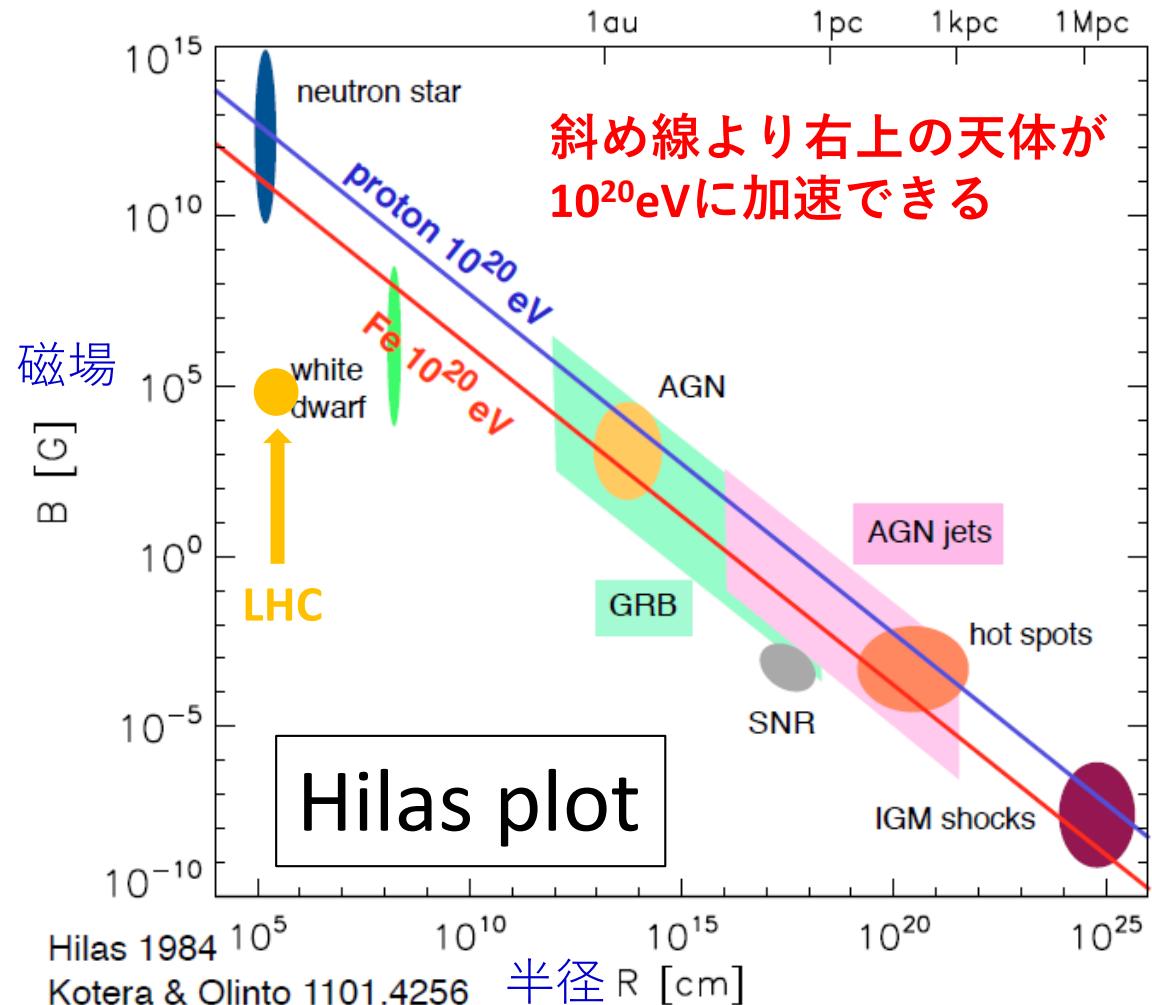
粒子を加速するには



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
 $M_{BH} \sim 10^{6-9} M_{\odot}$

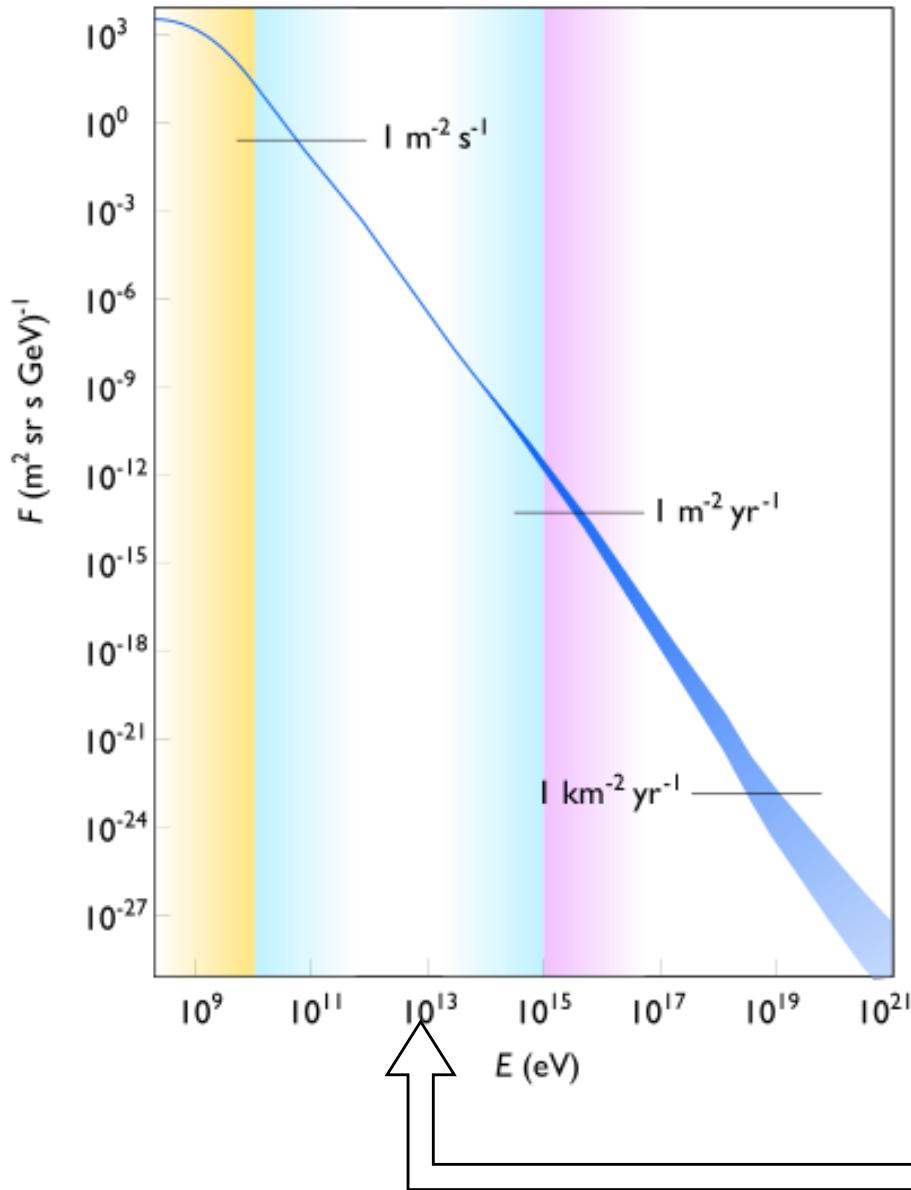
宇宙最強爆発
 $E_{GRB} \sim 10^{51} \text{ ergs}$

宇宙最強磁場
 $B \sim 10^{15} \text{ G}$

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

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
= 1.6×10^{-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(1cm²)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} eVの宇宙線が来ている(100km²に年に一個)
- ・ 人口加速器の最高エネルギーは 7×10^{12} eV

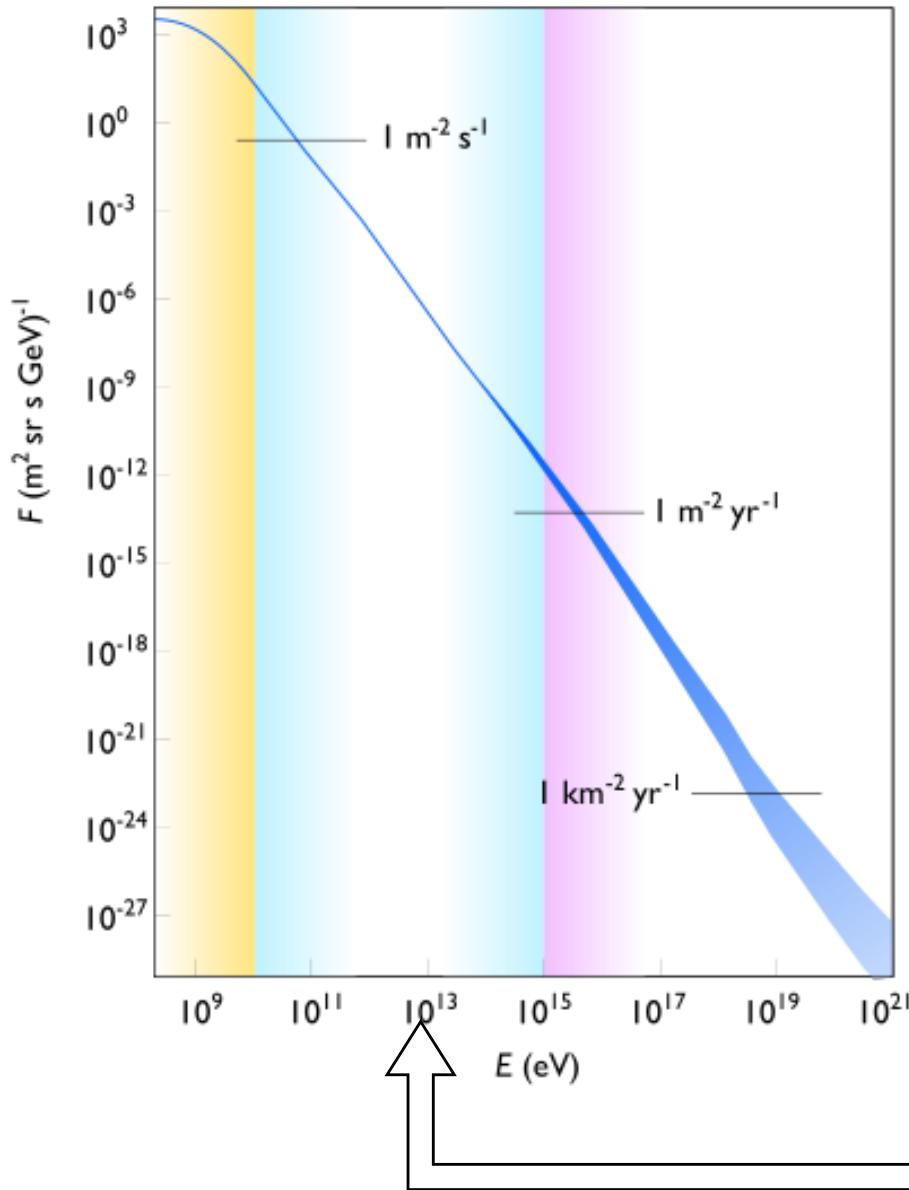
宇宙線はどこから来るのか？

- ・ 謎？？
- ・ 宇宙の極限天体・現象が関わるはず

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？」



[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

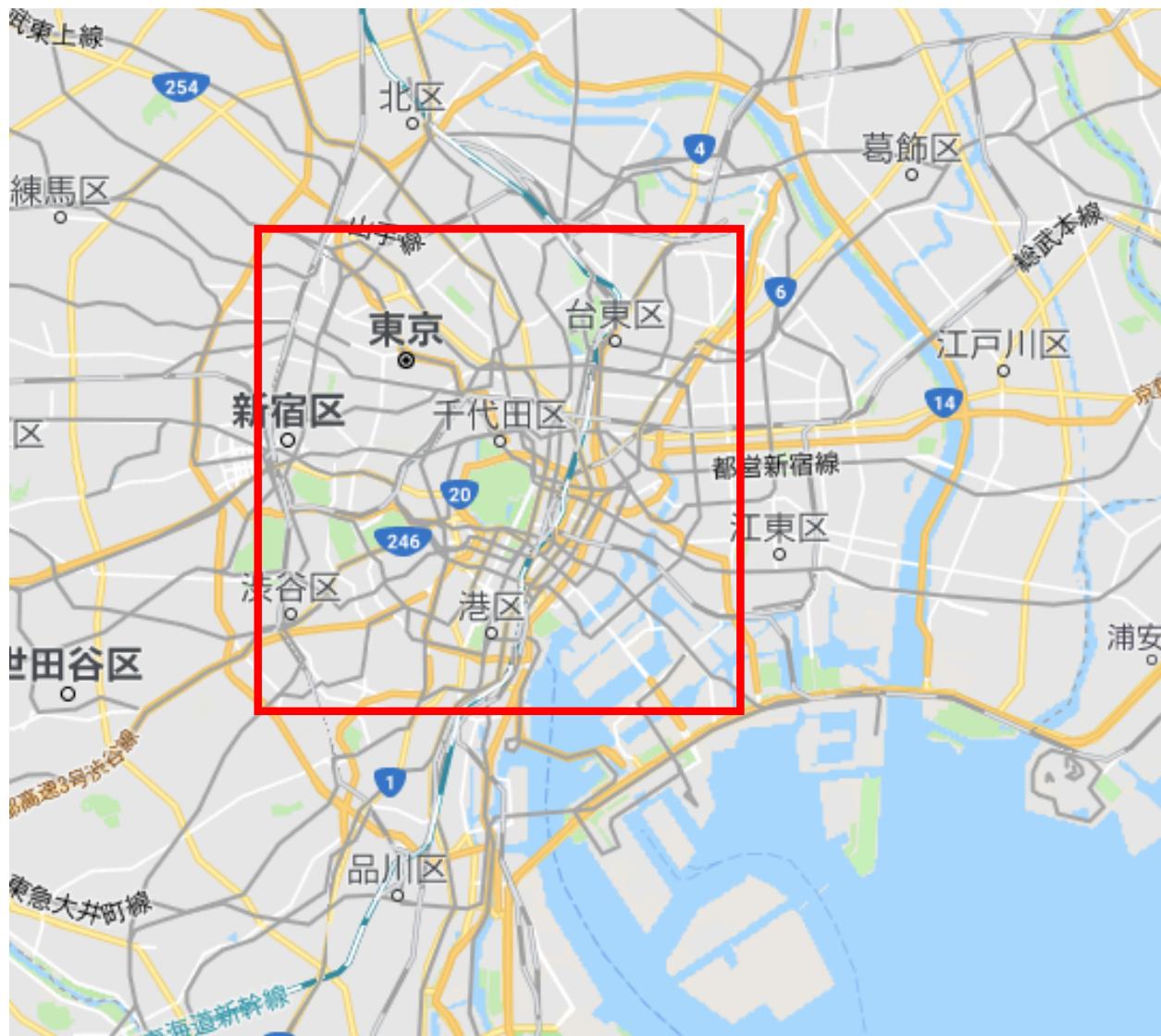
- ・ 大体 1秒間に指先(1cm^2)を1回貫通 [注：大気の外]
- ・ エネルギーが一桁増えると、頻度は約 1/1000
- ・ 10^{20}eV の宇宙線が来ている(100km²に年に一個)
- ・ 人口加速器の最高エネルギーは $7 \times 10^{12}\text{eV}$

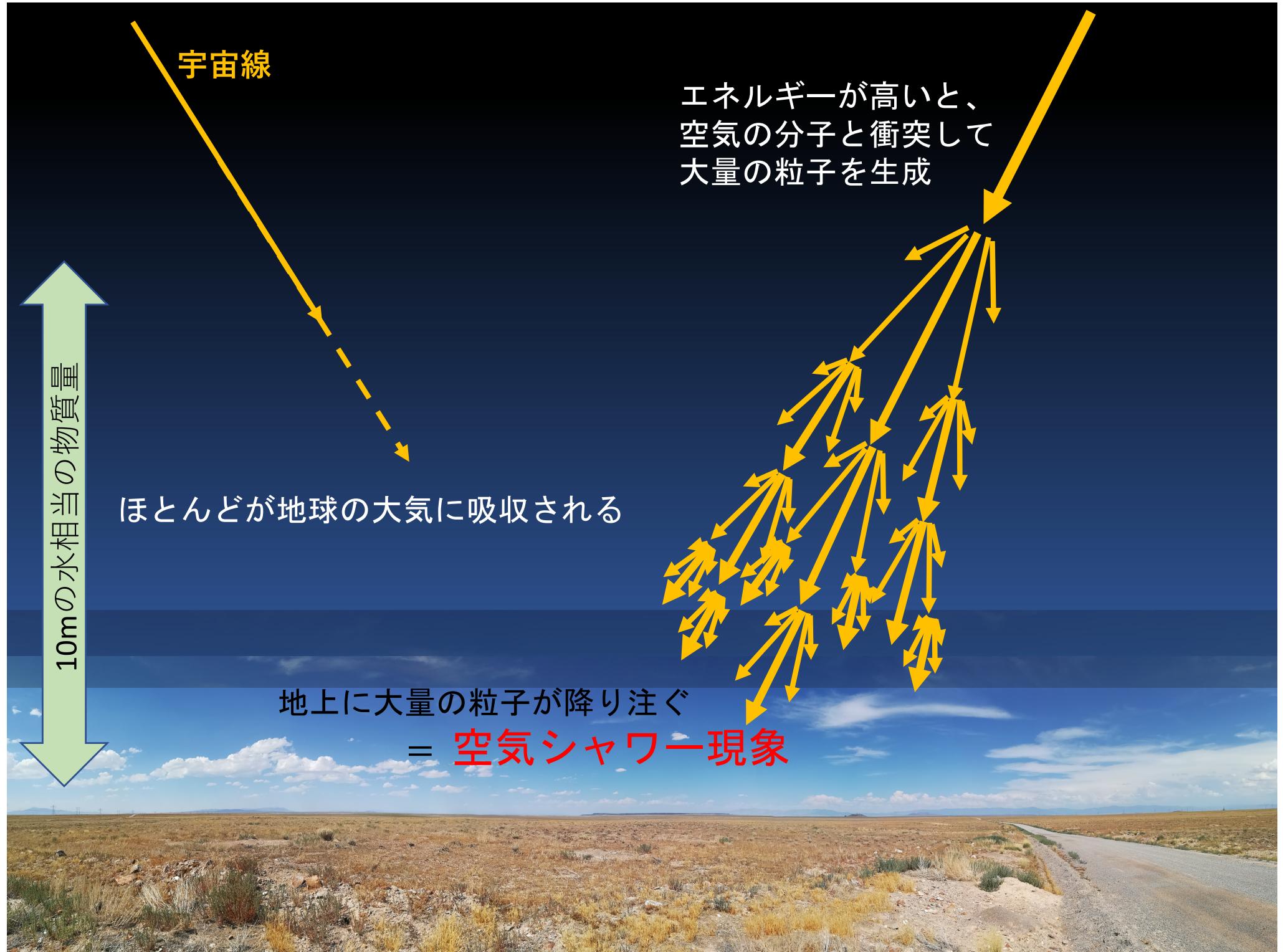
宇宙線はどこから来るのか？

- ・ 謎？？
- ・ 宇宙の極限天体・現象が関わるはず

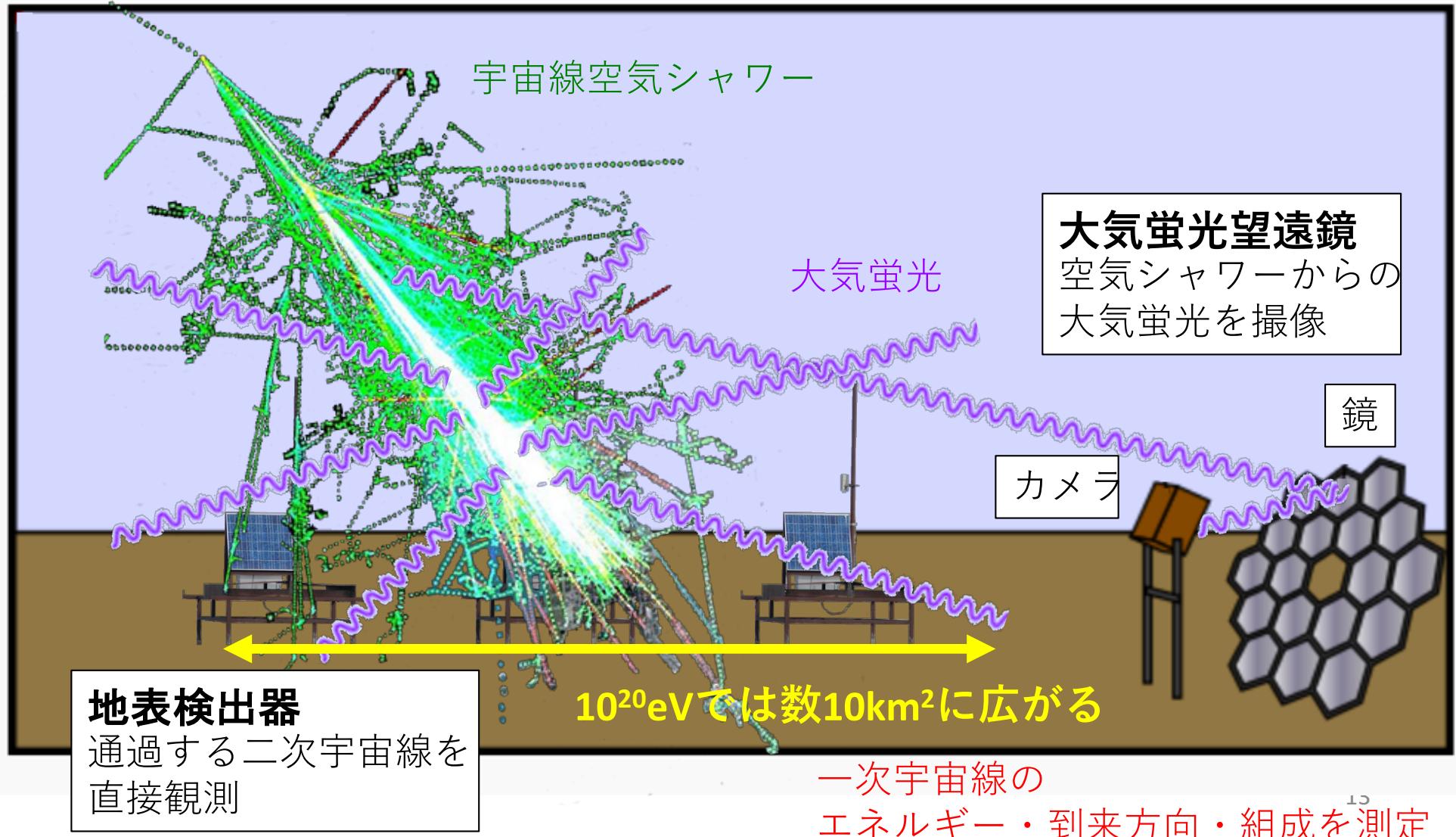
世界最大の粒子加速器 LHC
(CERN, スイス, フランス国境)







地表検出器と大気蛍光望遠鏡





日米韓国ロシアベルギー・チェコ6カ国
130名(日本約70名)

30 km

テレスコープアレイ(TA)



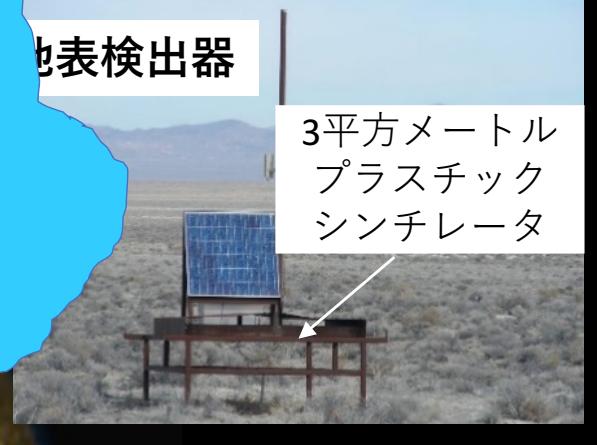
大気蛍光望遠鏡

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



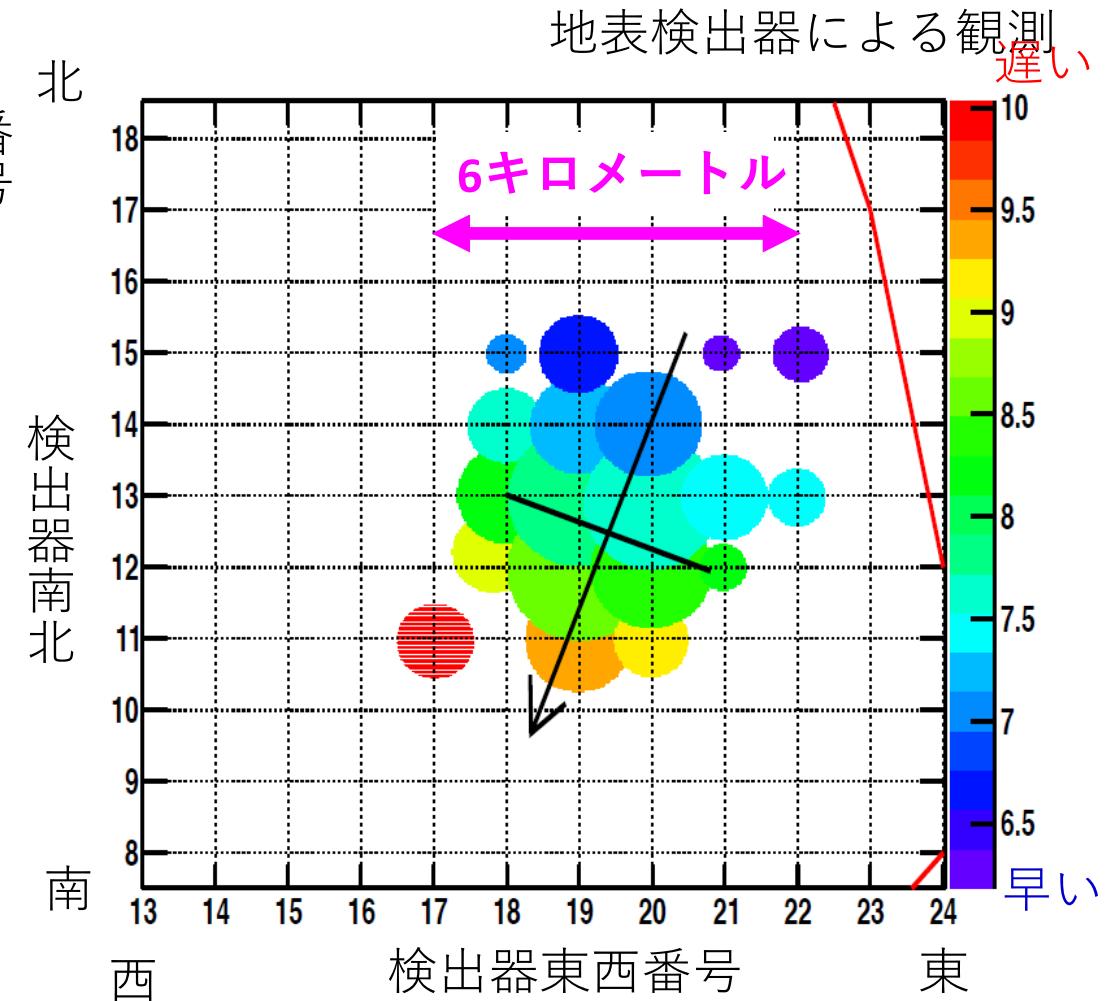
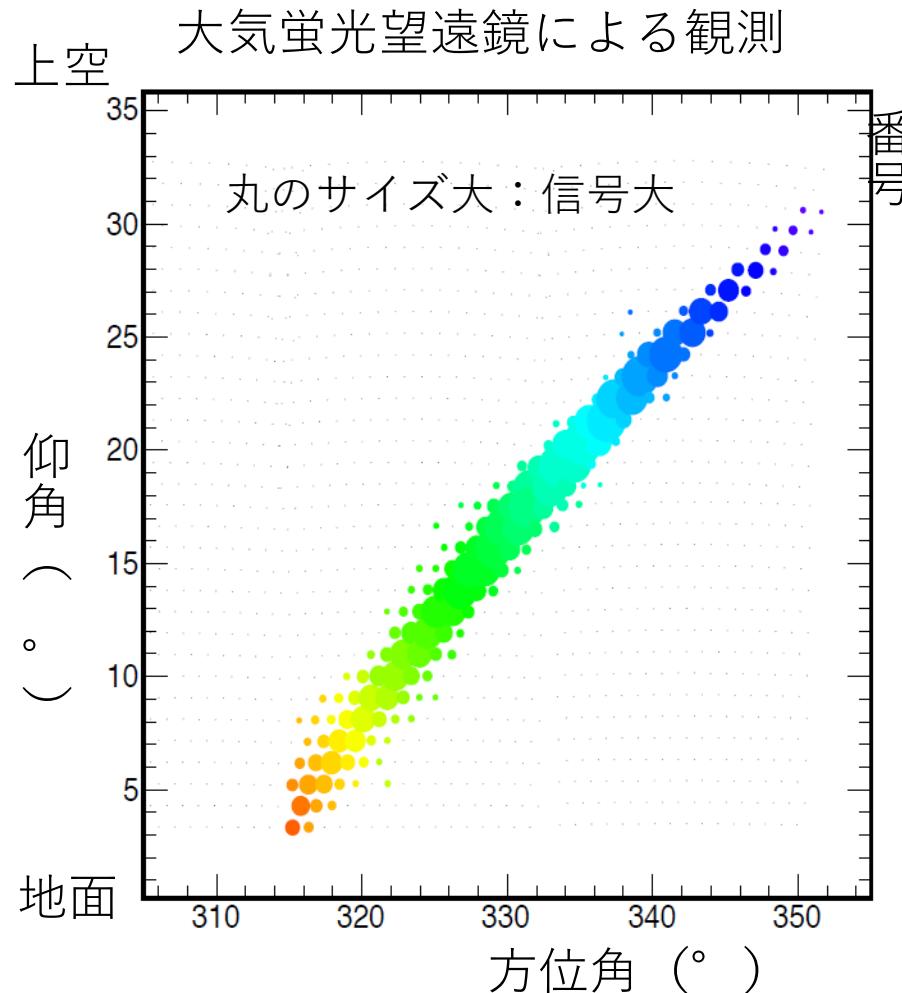
3平方メートル
プラスチック
シンチレータ



大気蛍光望遠鏡

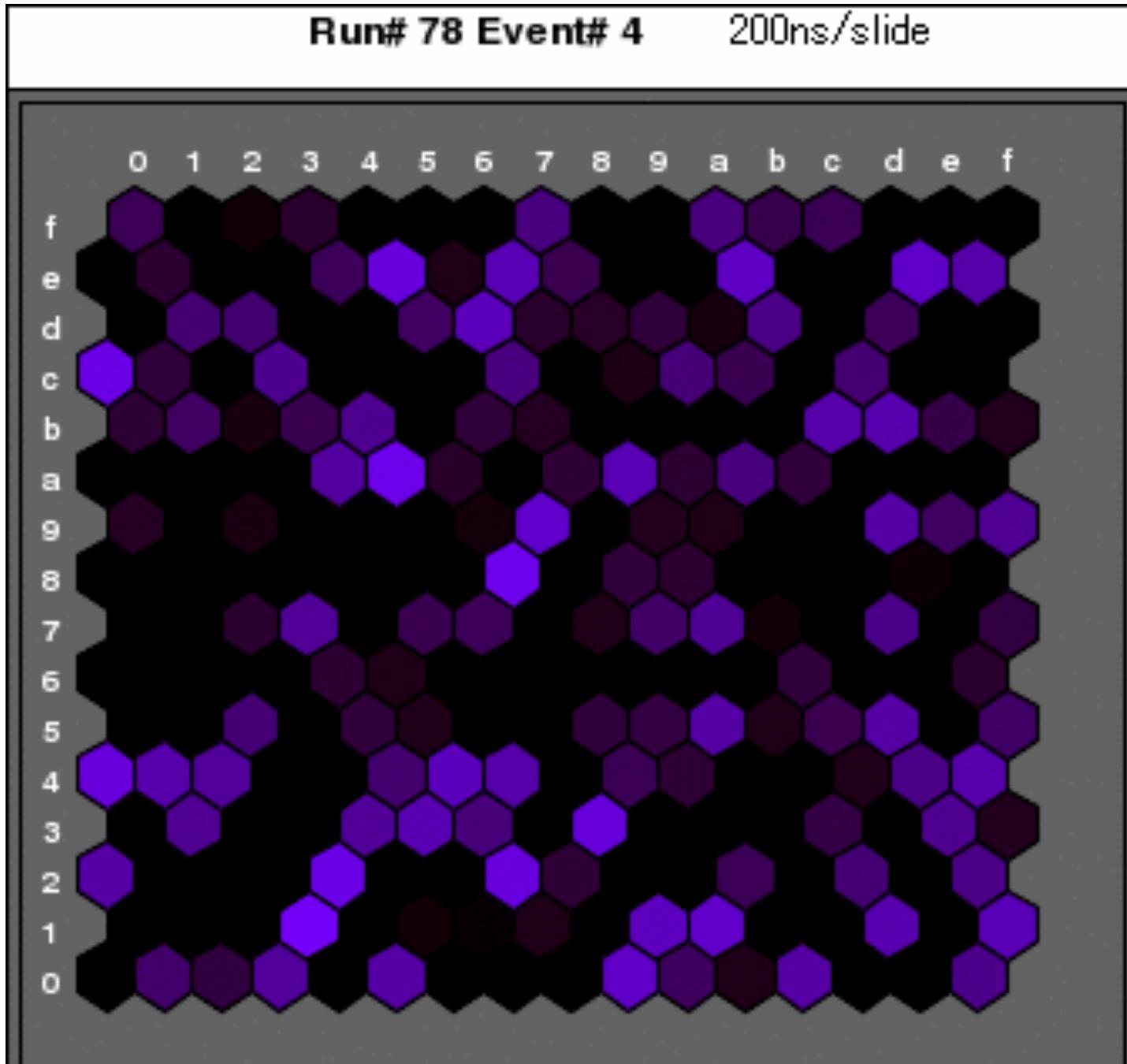


大気蛍光望遠鏡と地表検出器による 空気シャワー同時観測例 (2008年10月26日5時51分50秒UTC)



2×10^{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=2x10⁻⁷秒/スライド)



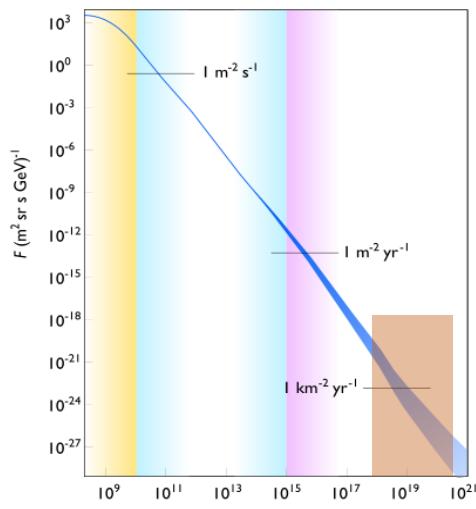
TAの重要な成果

- 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

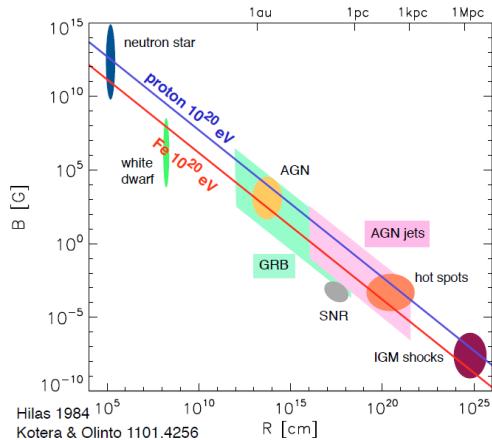
TAの重要な成果

- 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

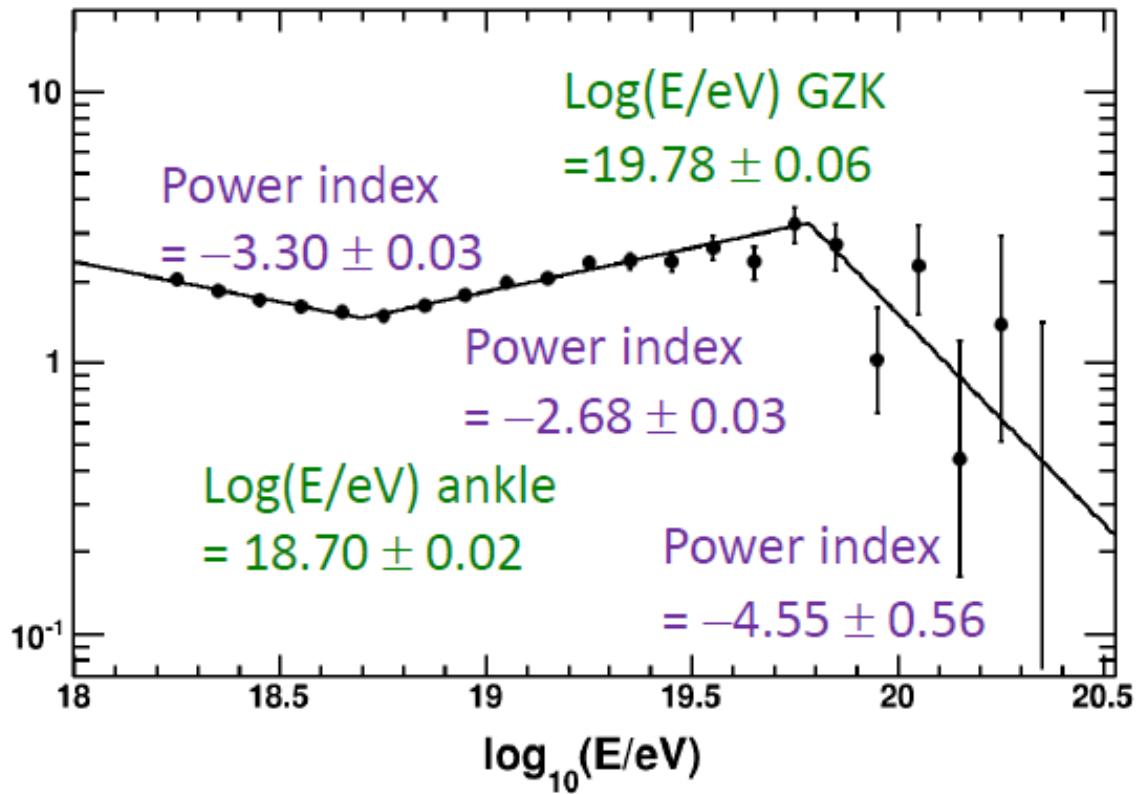
TAのエネルギースペクトル



頻度Jに E^3 をかけて
傾きの変化を強調



$([頻度] (E)) \times [エネルギー E]^3$ の対数

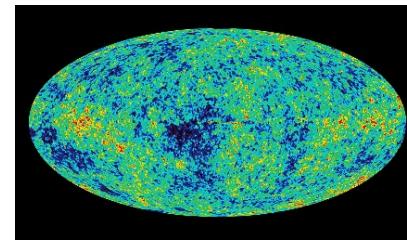


(エネルギー E) の対数

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

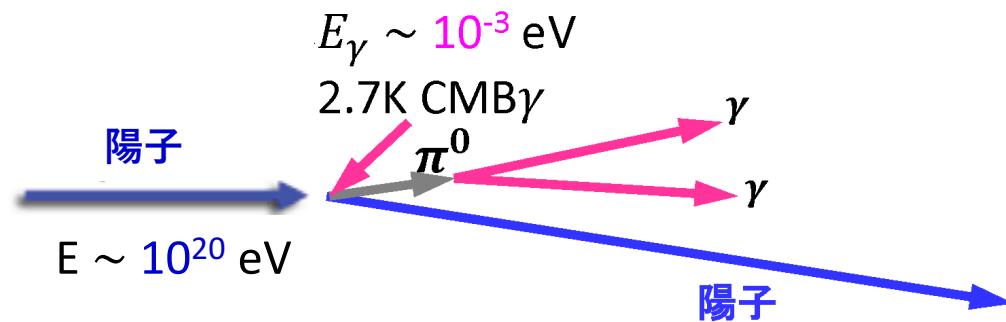
宇宙線のエネルギーに限界はあるか

- 1964年 宇宙背景放射 (CMB) の発見

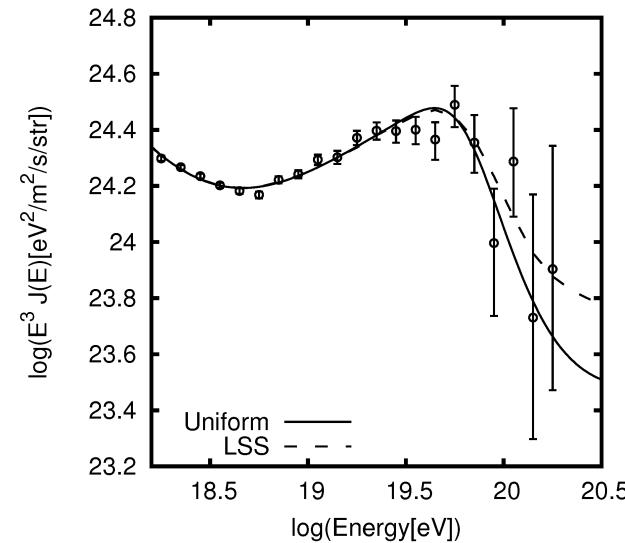


この画像は後の
WMAPによる観測

- 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



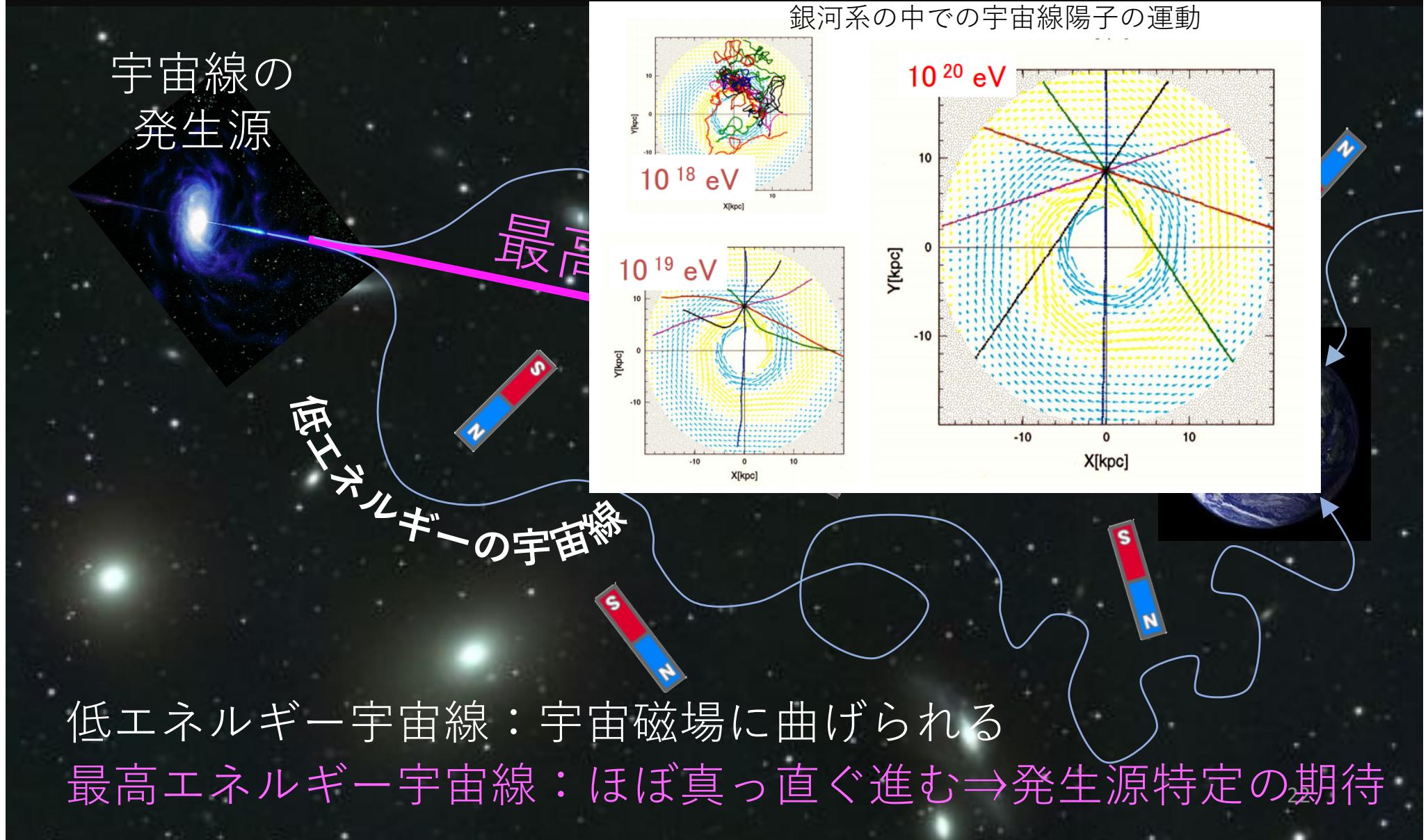
- 陽子静止エネルギーの 10^{11} 倍 (1000億のローレンツ変換)
- 2.7Kの光子が宇宙線には 100MeV のガンマ線に見える
- プランクスケールに最も近い最高エネルギーでの特殊相対性理論の検証
- $>10^{20}$ eV 宇宙線 + GZK 過程で TA の結果は説明できる

加速限界 = 10^{20} eV との判定が今後の課題

TAの重要な成果

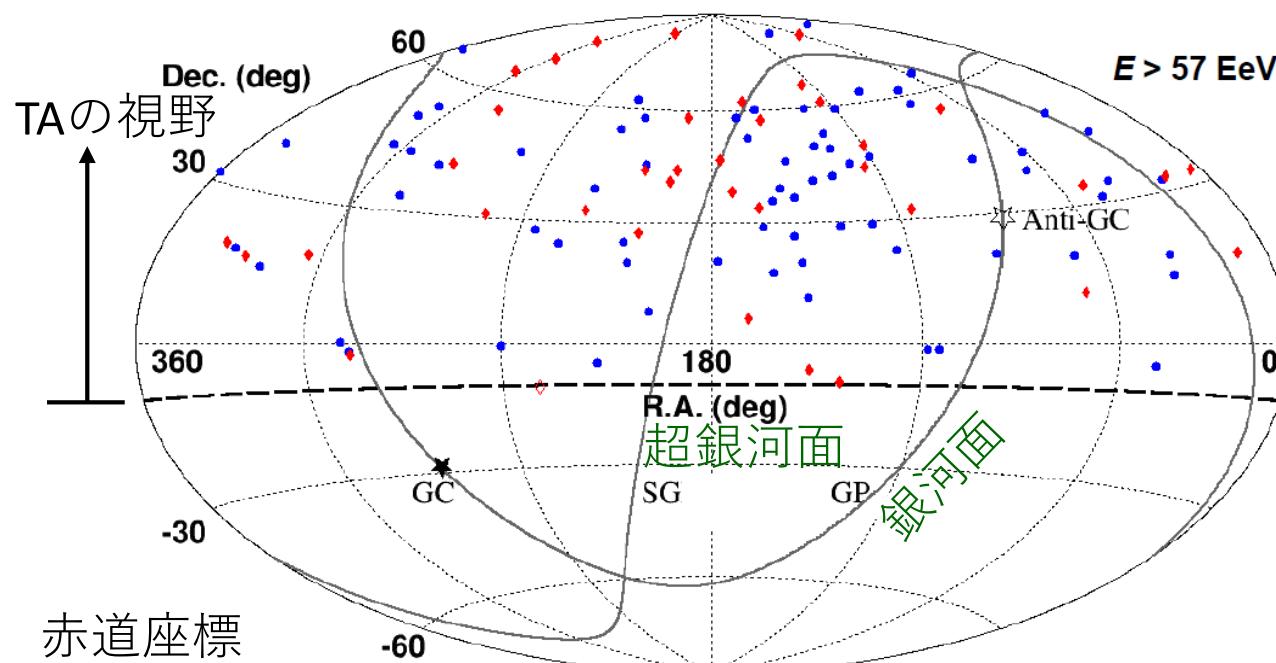
- 最高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトル
- 最高エネルギー宇宙線の到来方向
- 最高エネルギー宇宙線の粒子種

最高エネルギー宇宙線の到来方向と発生源



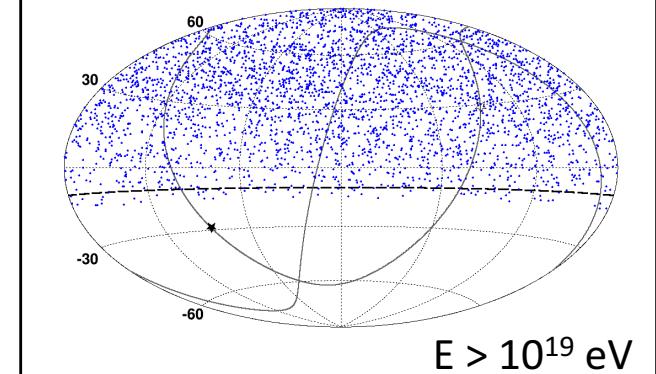
最高エネルギー宇宙線の到来方向の分布

- 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



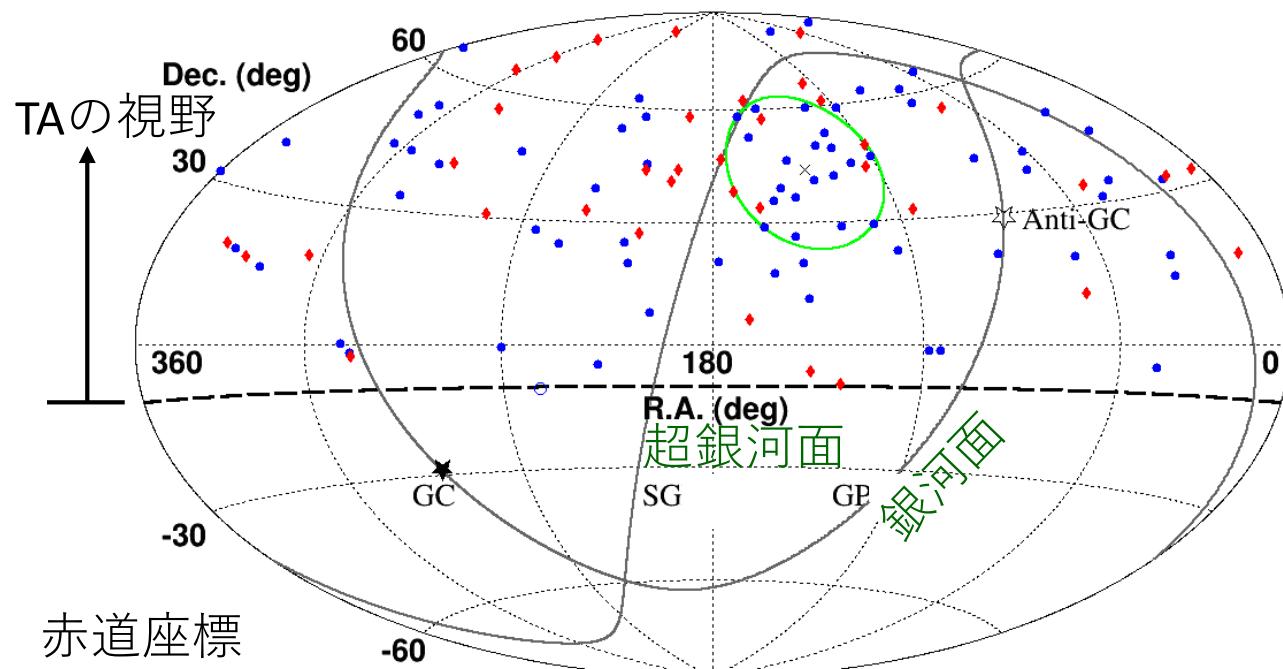
青: 2014年7月
プレスリリース

10^{19} 電子ボルト付近は
一様等方的

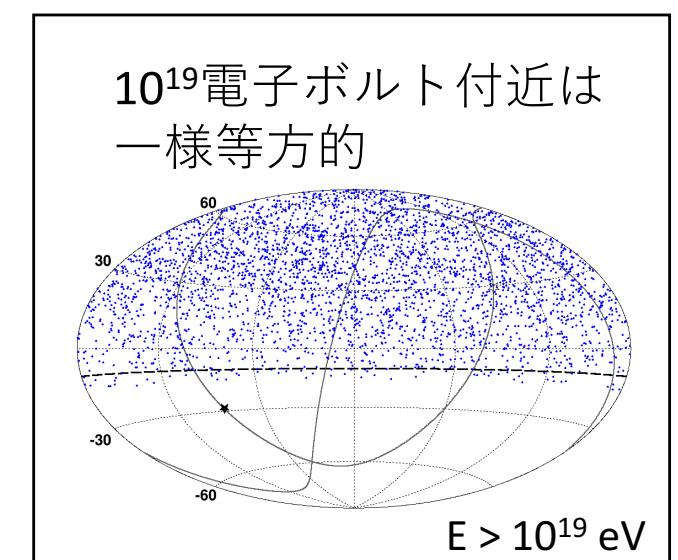


最高エネルギー宇宙線の到来方向の分布

- 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

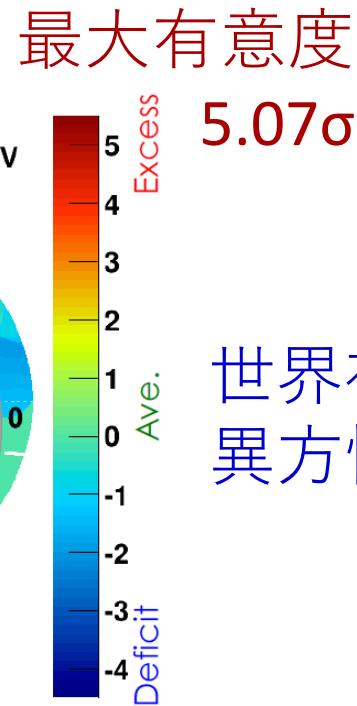
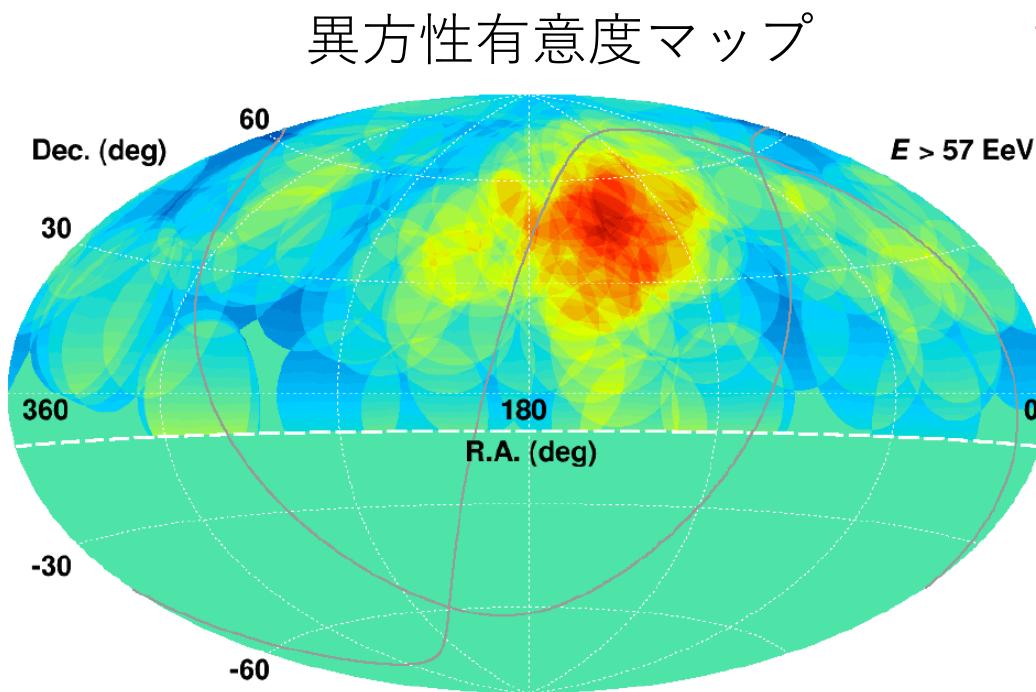


青：2014年7月
プレスリリース



- 緑の半径20度の円内
 - 等方的到來分布の期待数: 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



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

(3.4σ)

- 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
- 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

はくちょう座

カシオペア座

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

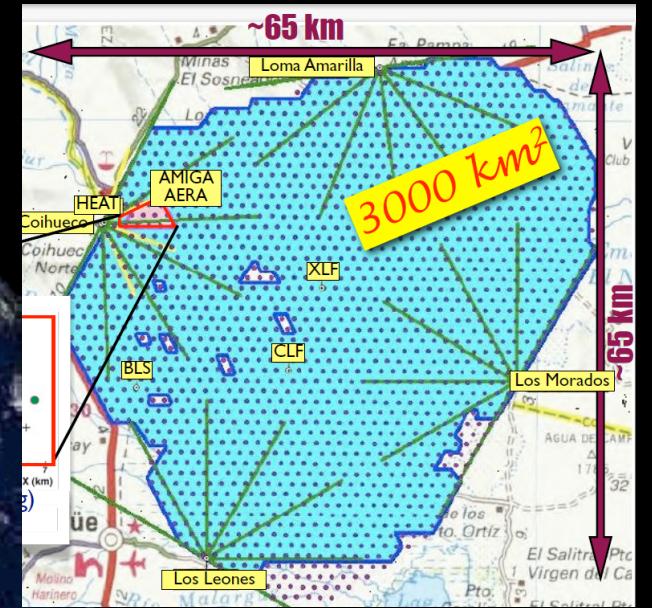
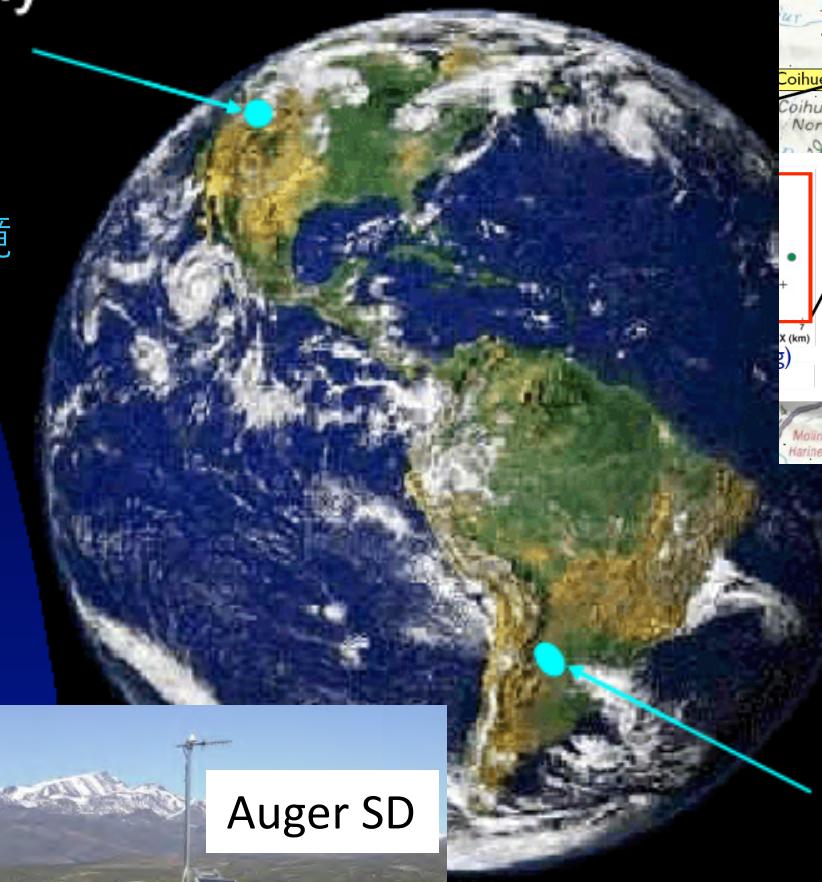
680 km² 地表検出器
3箇所に大気蛍光望遠鏡



Auger FD



Auger SD

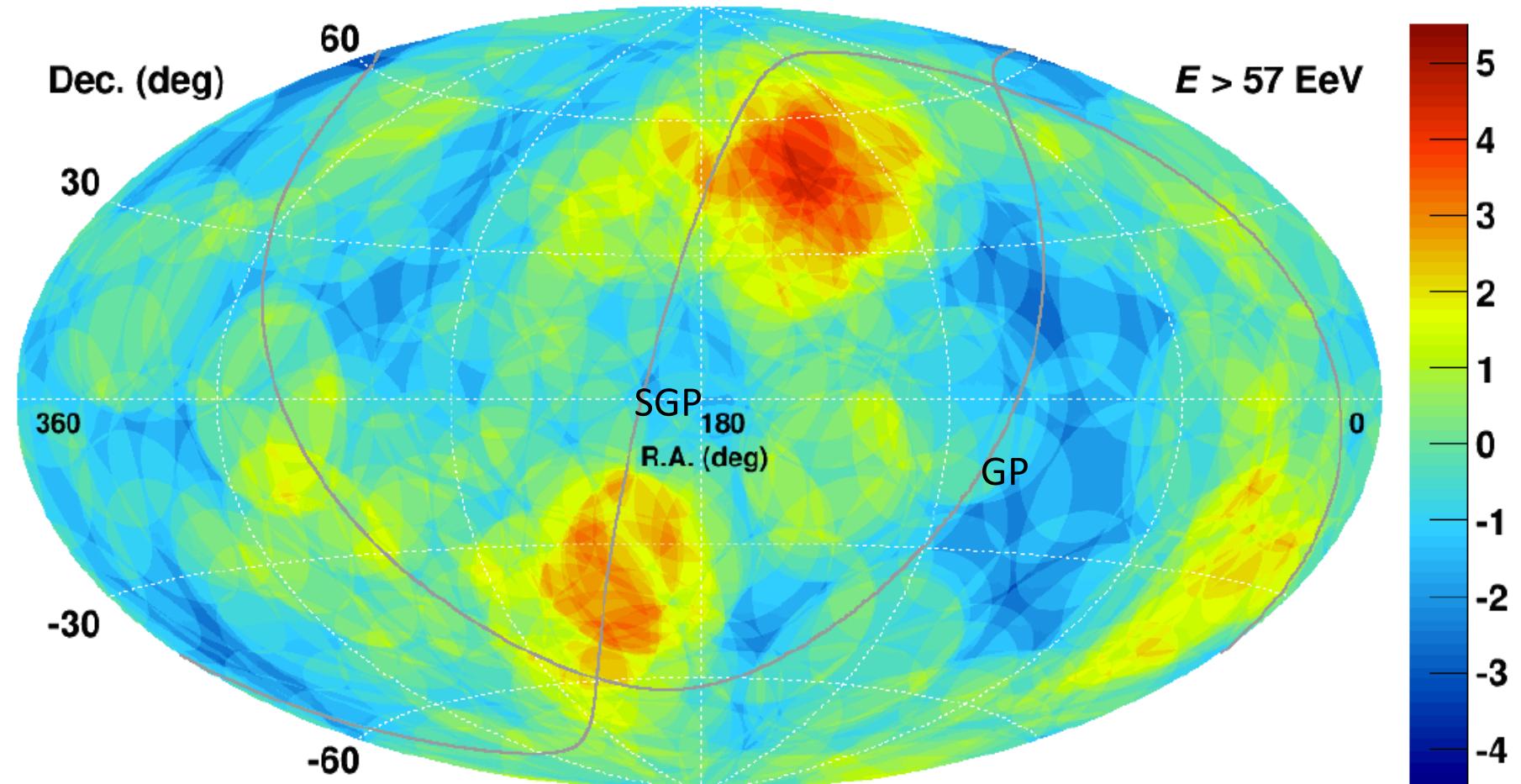


Pierre Auger
Observatory
Mendoza, Argentina

3000 km² 地表検出器
4箇所に大気蛍光望遠鏡

TAとAugerのデータを合わせた有意度マップ

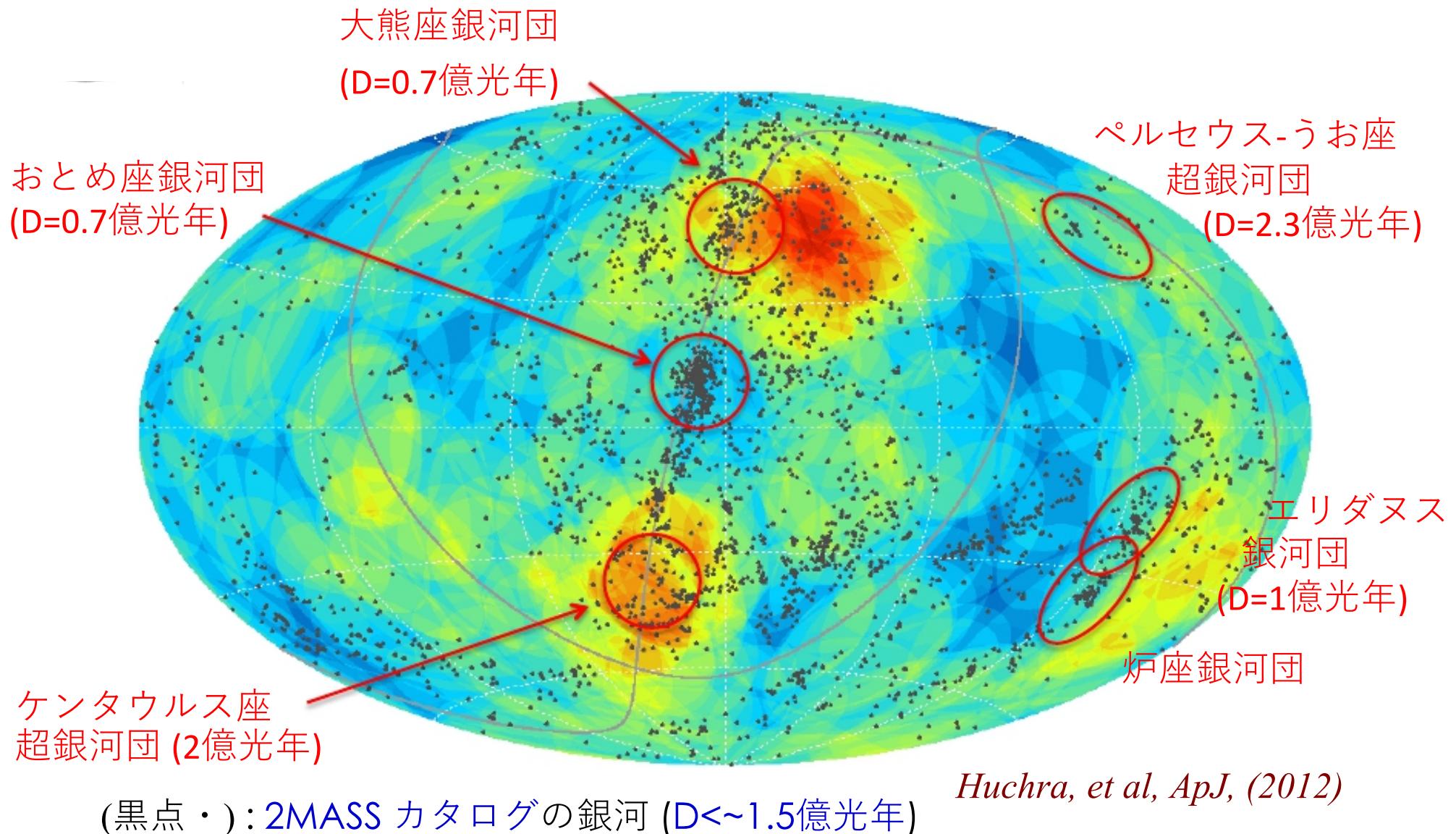
20度の半径の円の中の観測数が期待数より多いかどうかの有意度



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 $\sim 3.6\sigma$

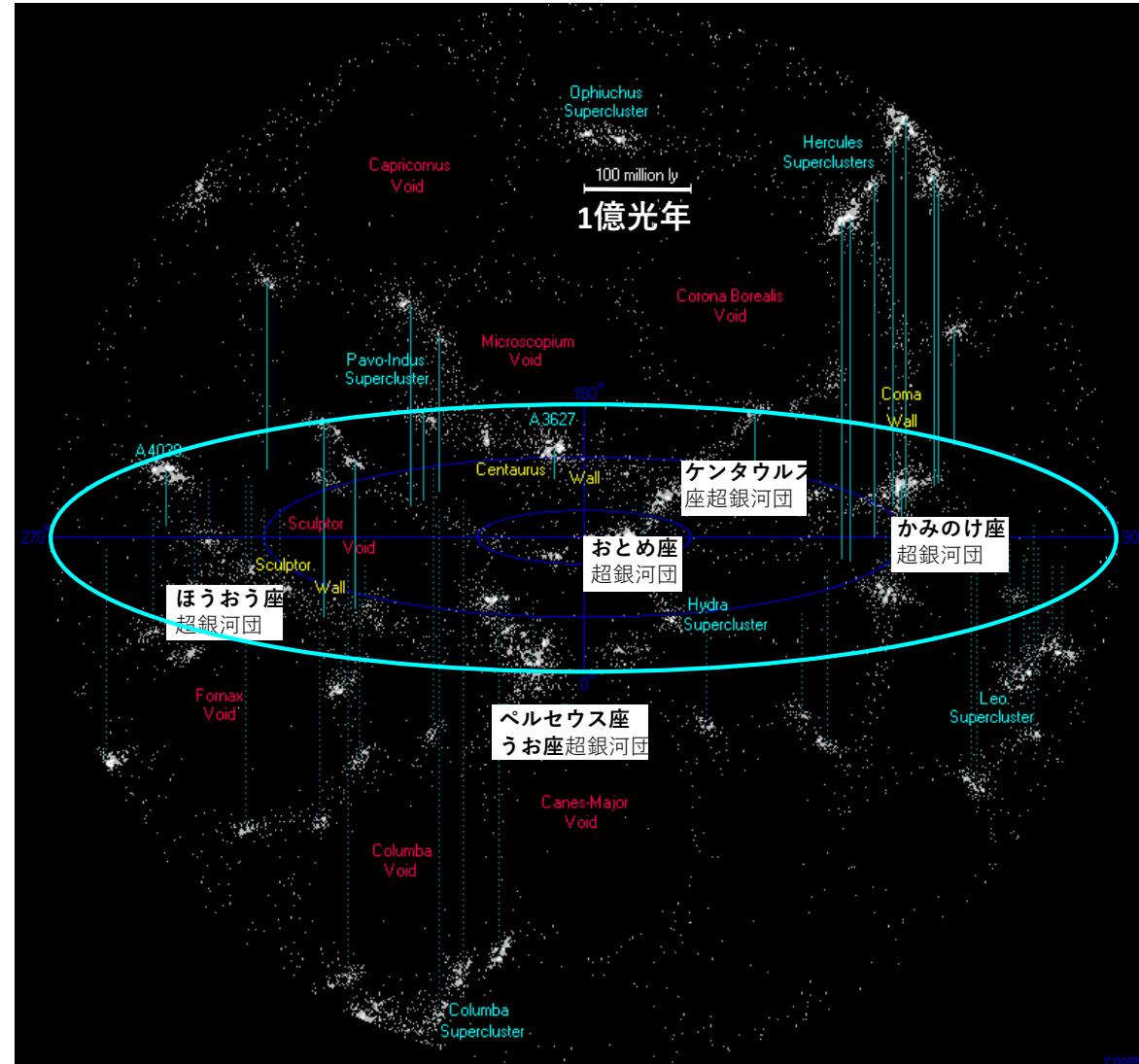
→ 南米アルゼンチンにある最高エネルギー宇宙線観測所

TAとAugerの有意度マップと近傍の銀河（団）



近傍銀河との相関はある？ない？ => TA拡張計画進行中

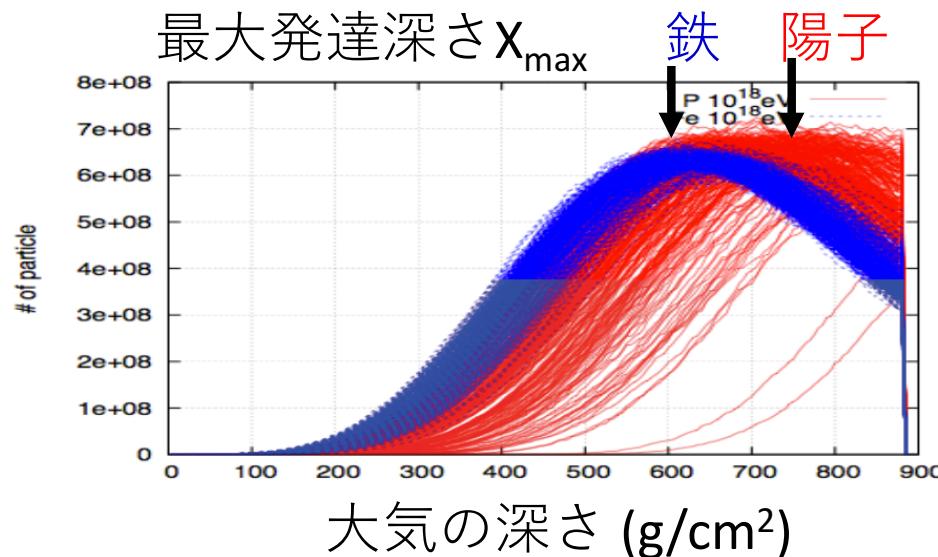
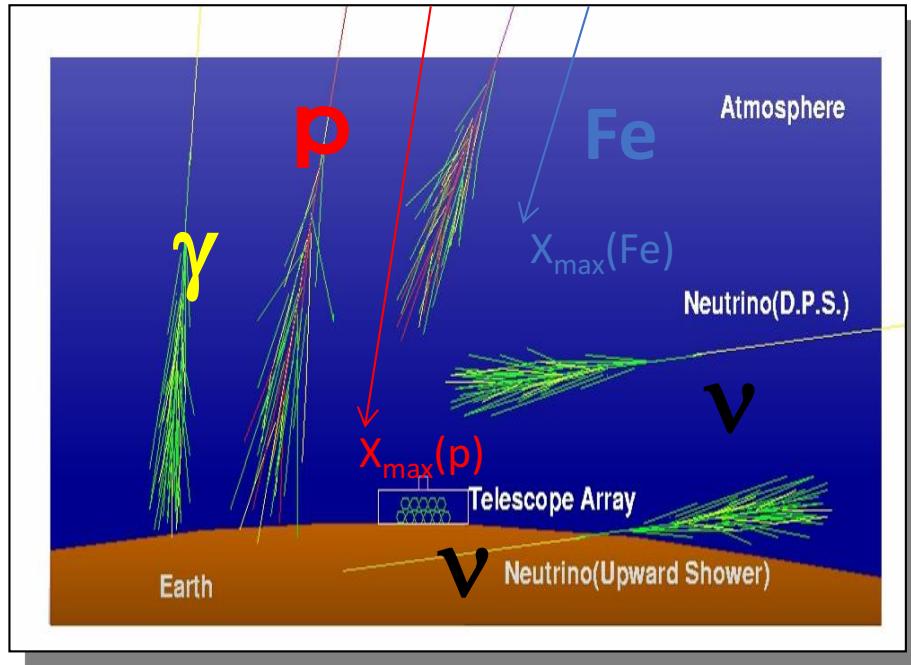
超銀河面



TAの重要な成果

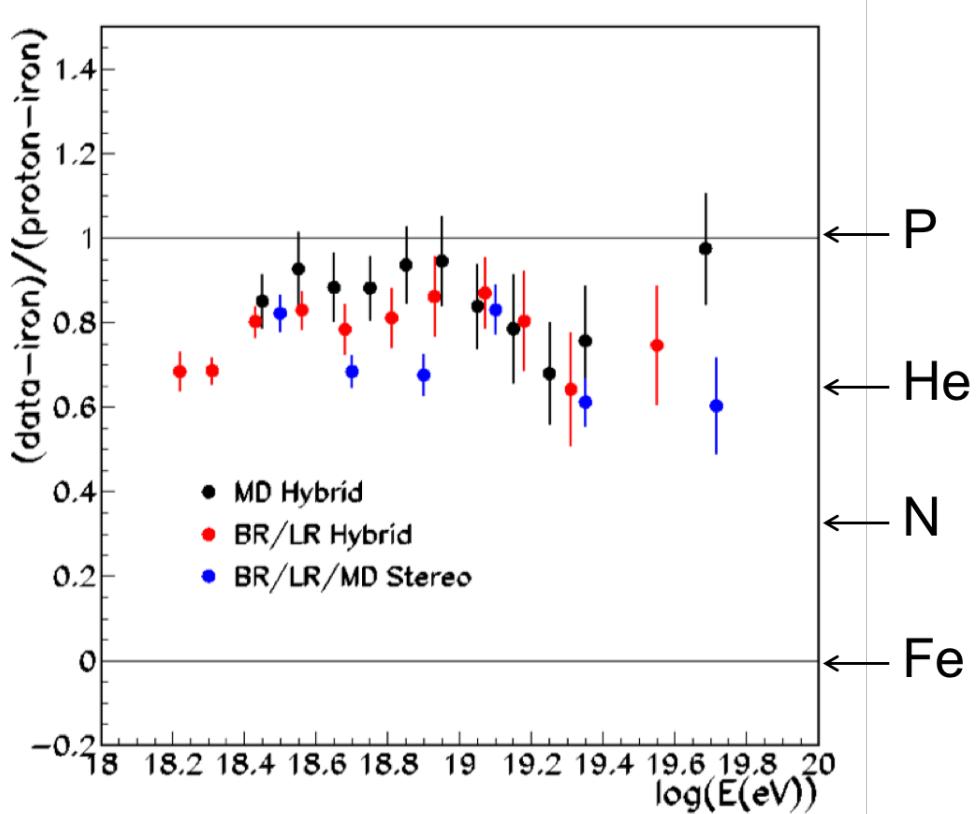
- 最高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトル
- 最高エネルギー宇宙線の到来方向
- 最高エネルギー宇宙線の粒子種

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…

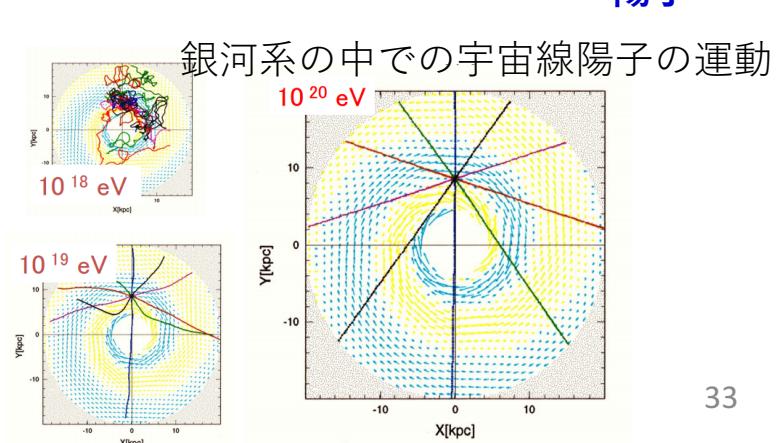
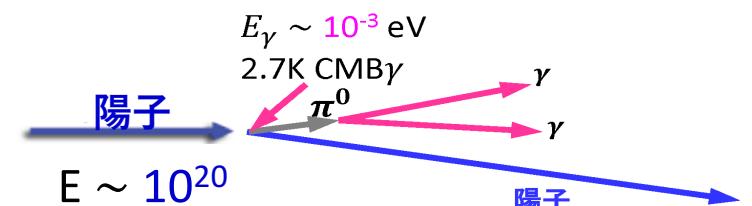
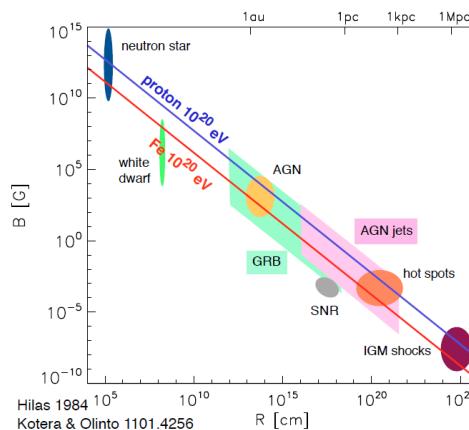
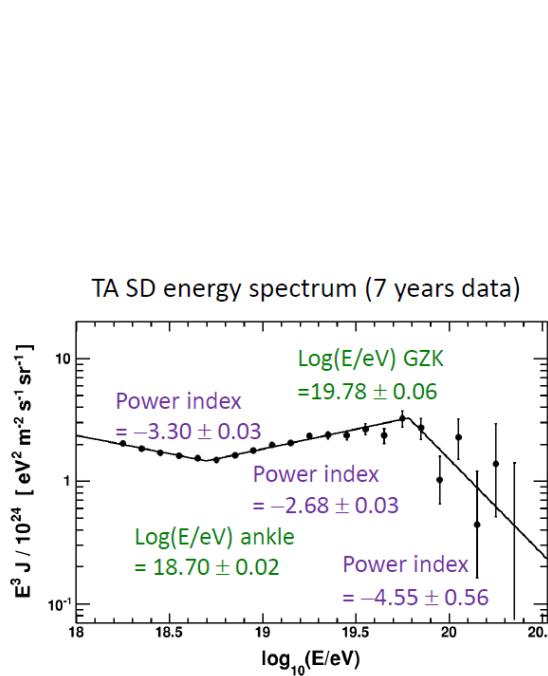
どの程度深く突っ込んだかは大気蛍光望遠鏡
で観測できる



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？

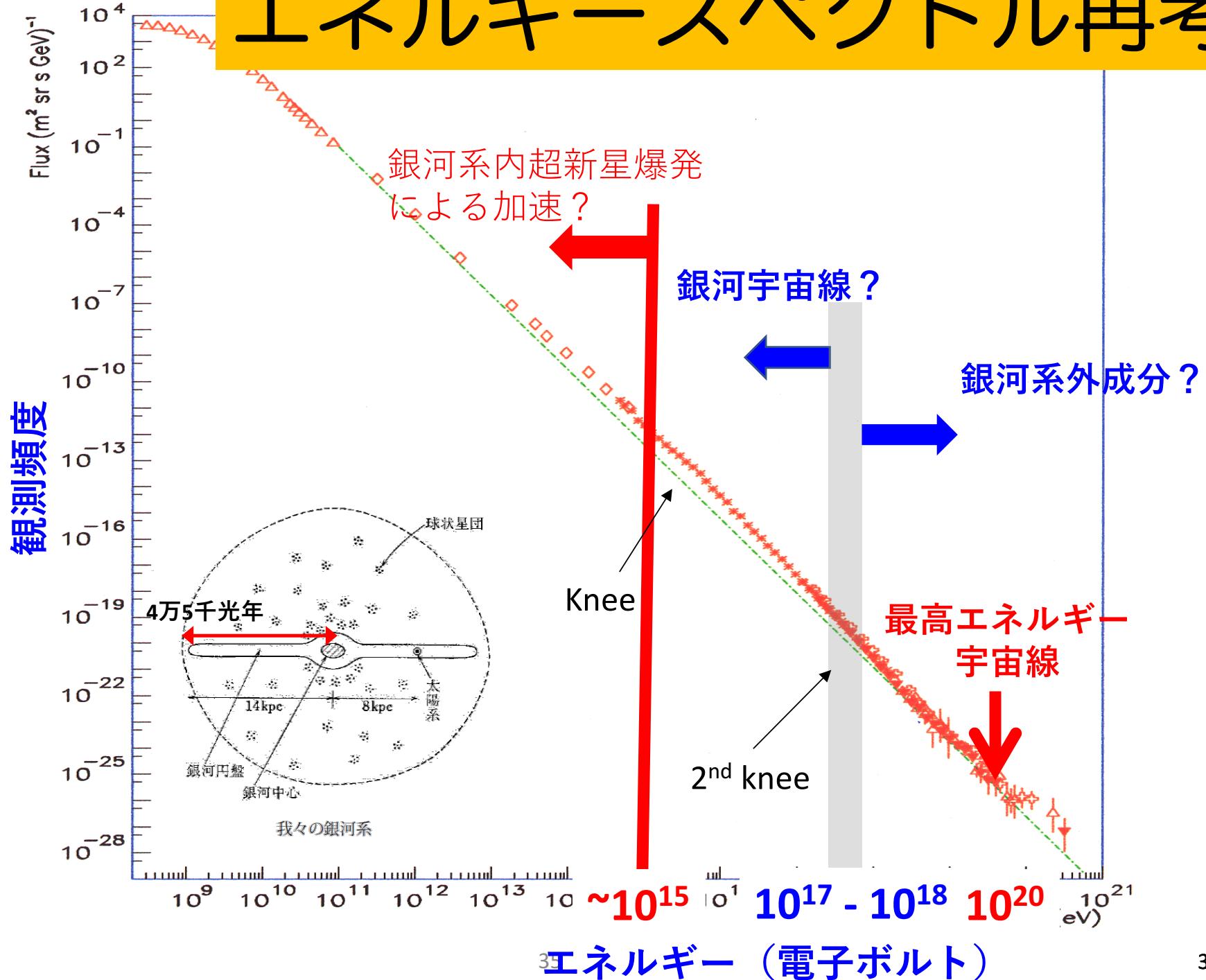
- 観測されている最高エネルギー（技術的最先端）
- 既知の天体の加速限界エネルギー(Hillas plot)
- GZK効果（CMBとの衝突）が現れるエネルギー
- 宇宙磁場内を直進できるエネルギー



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)

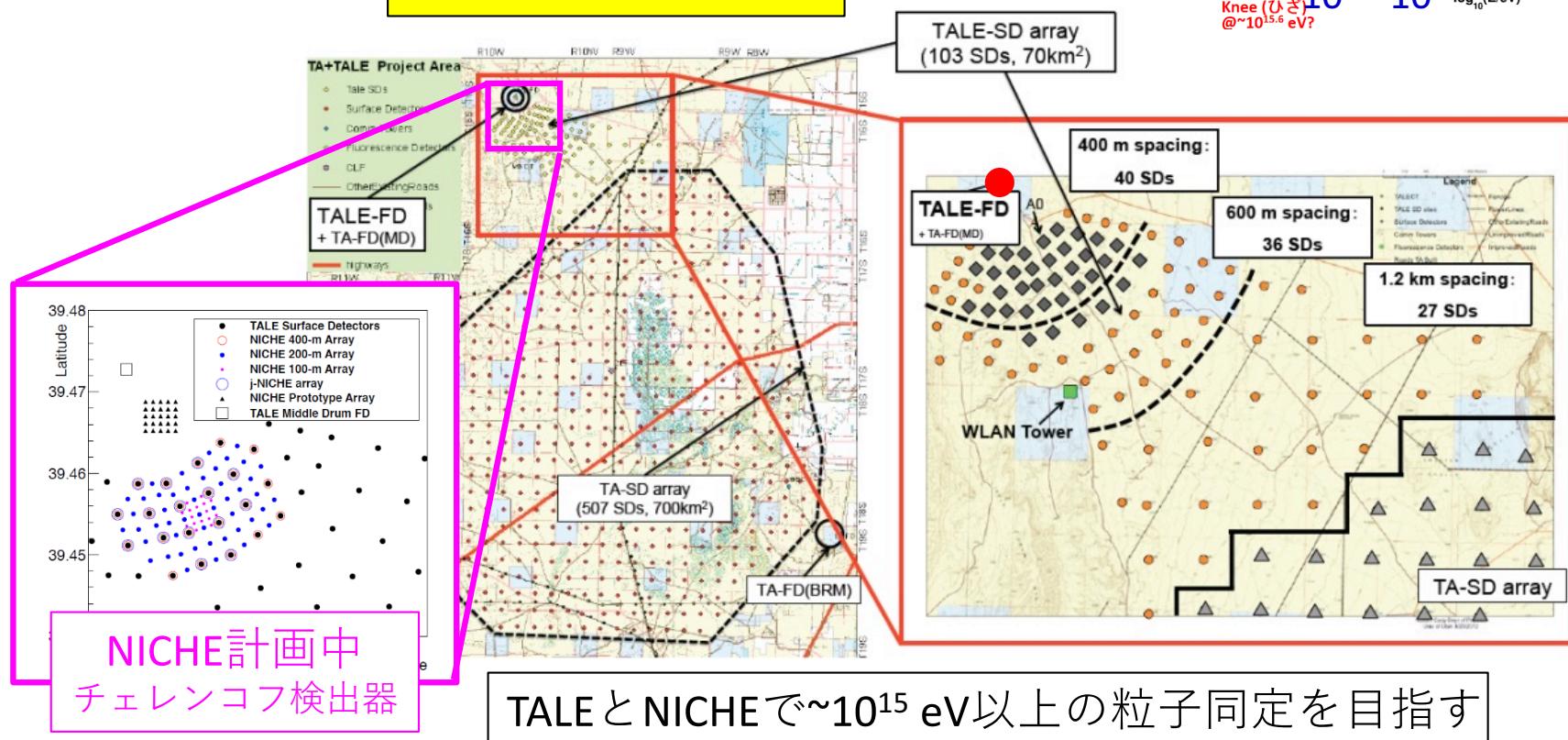
エネルギースペクトル再考



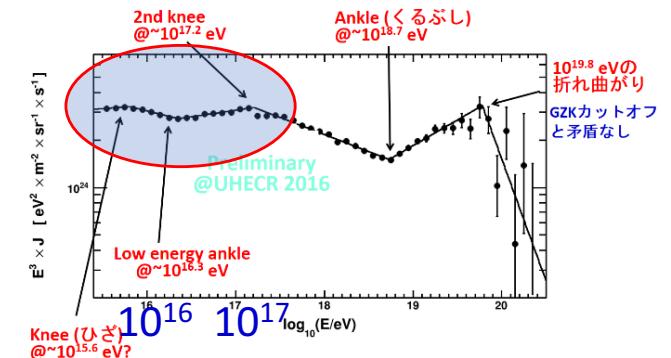
TA低エネルギー拡張 (TALE)

- 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

定常観測開始！！



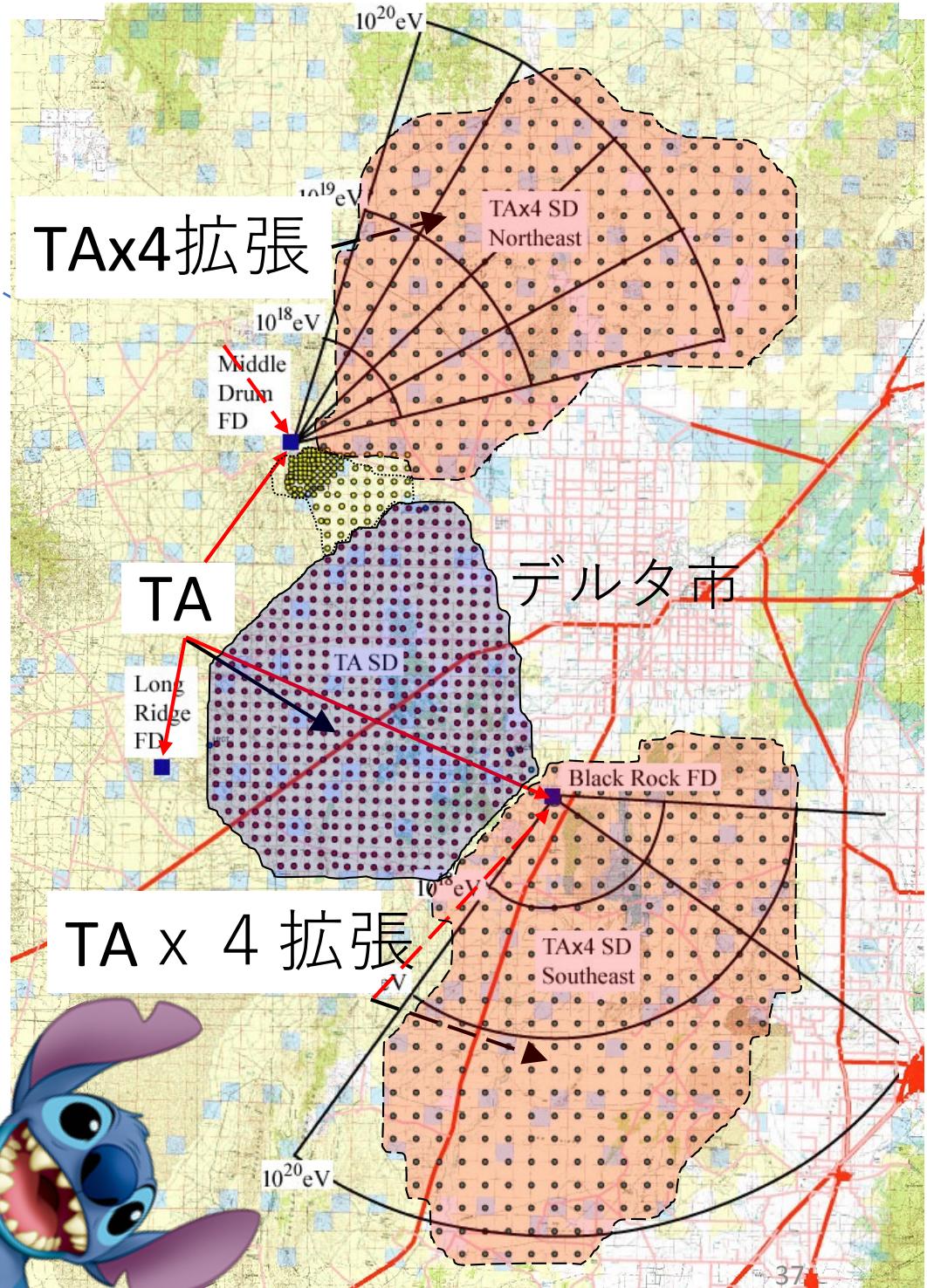
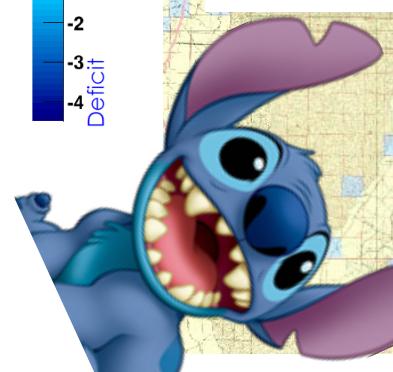
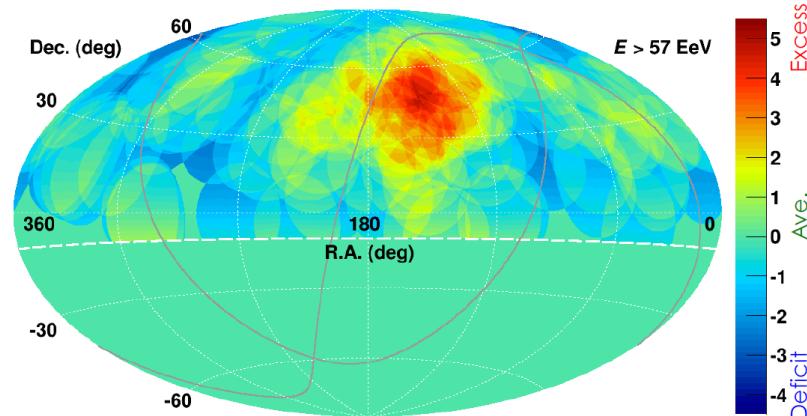
TAのエネルギースペクトル (平均)



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
- 2018年度に設置で準備進行中
- 追加2台の望遠鏡も米国担当で建設中
- 短期間でホットスポットを検証



TAx4 2月から「ついに」設置開始



乞うご期待！
参加者求む！



ユタでの生活

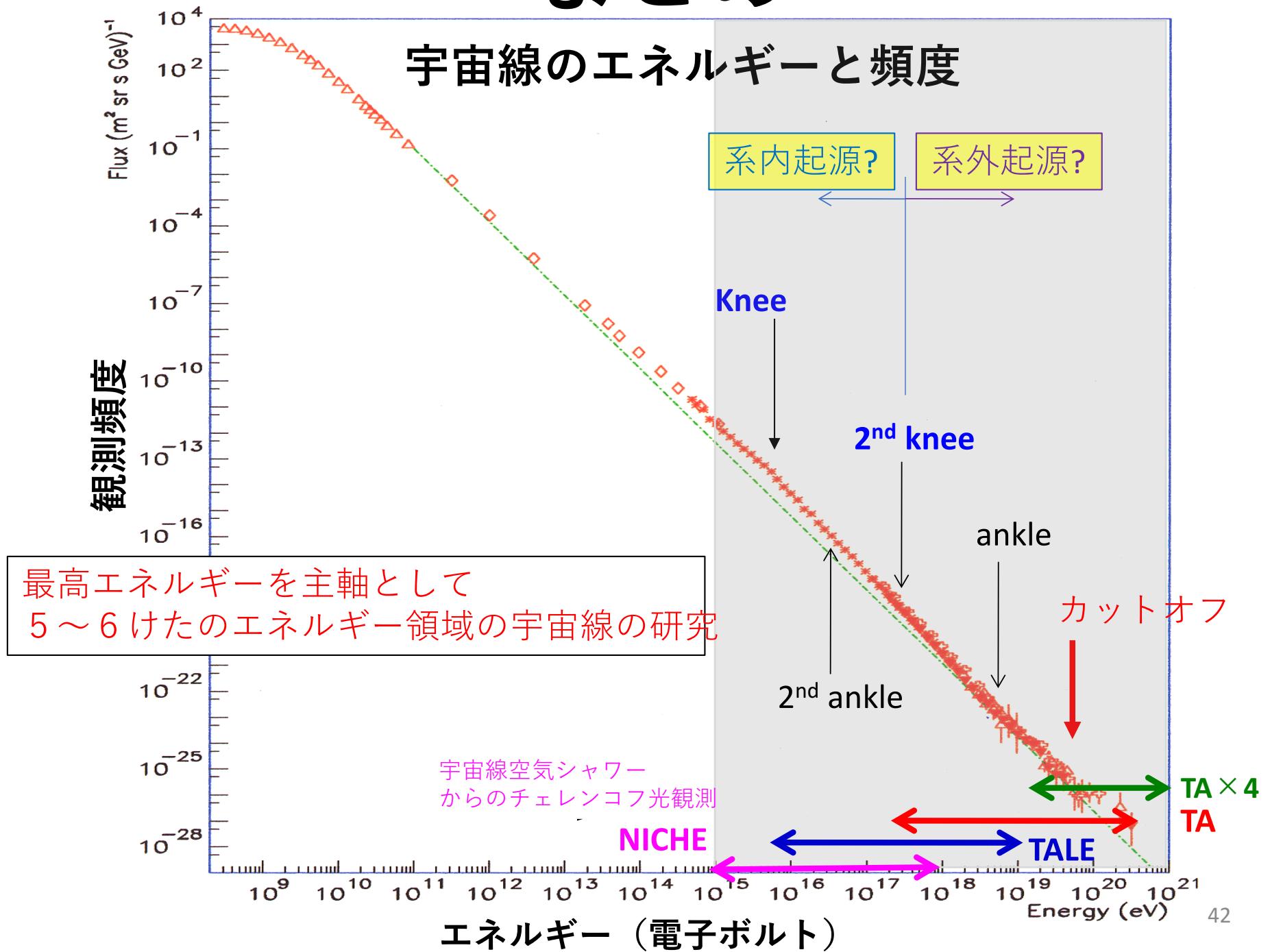
宇宙線研究者の生活



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

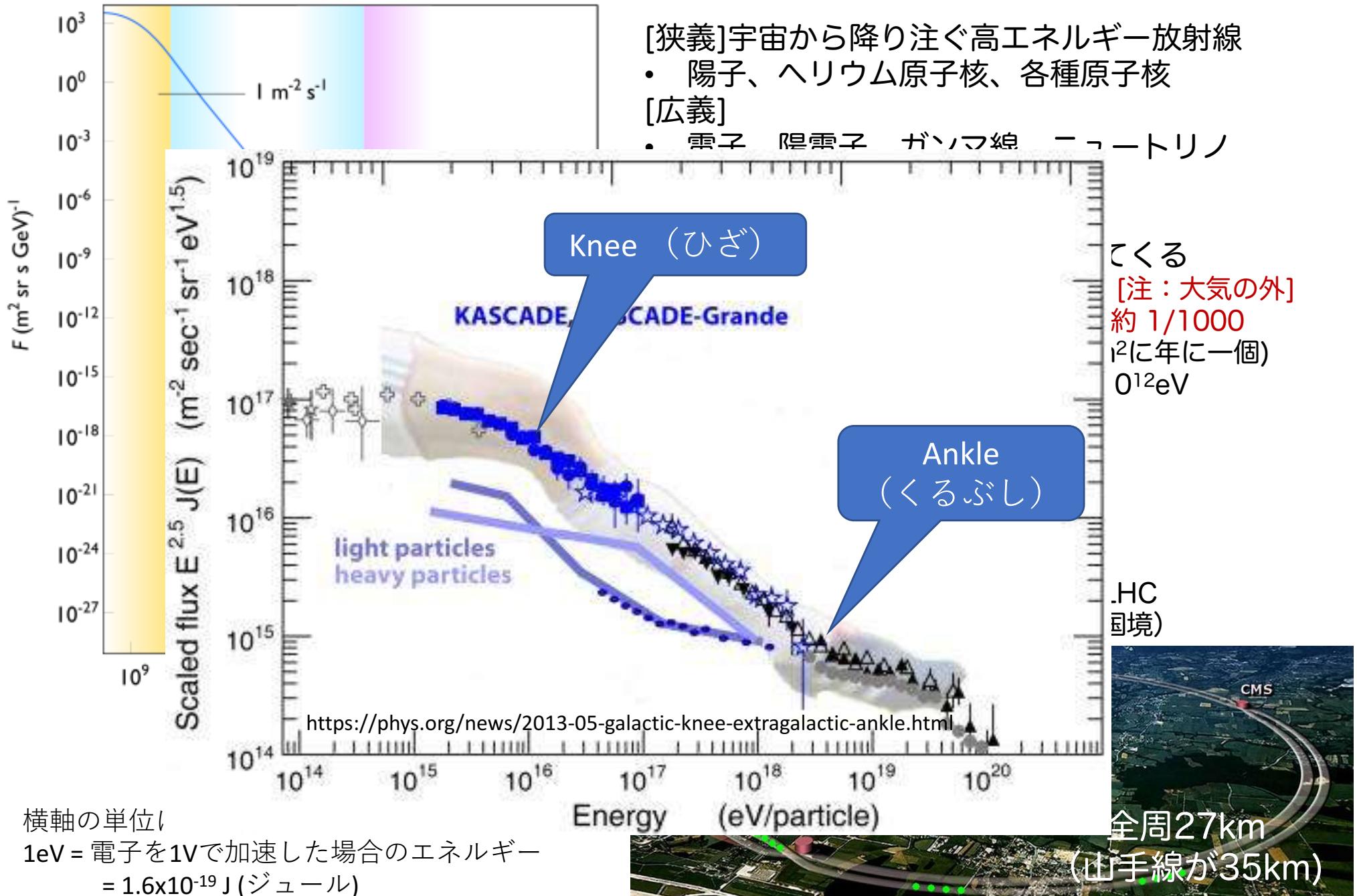
まとめ



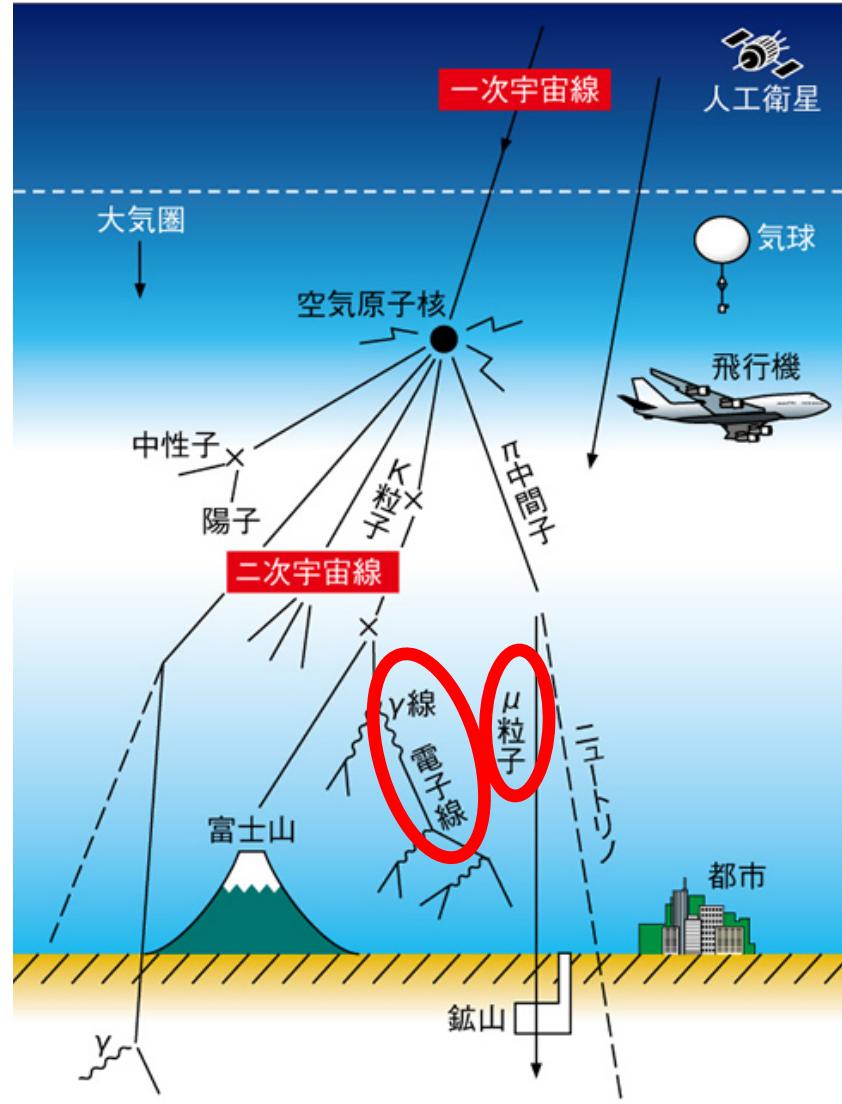
TALEサイトへの装置の設置



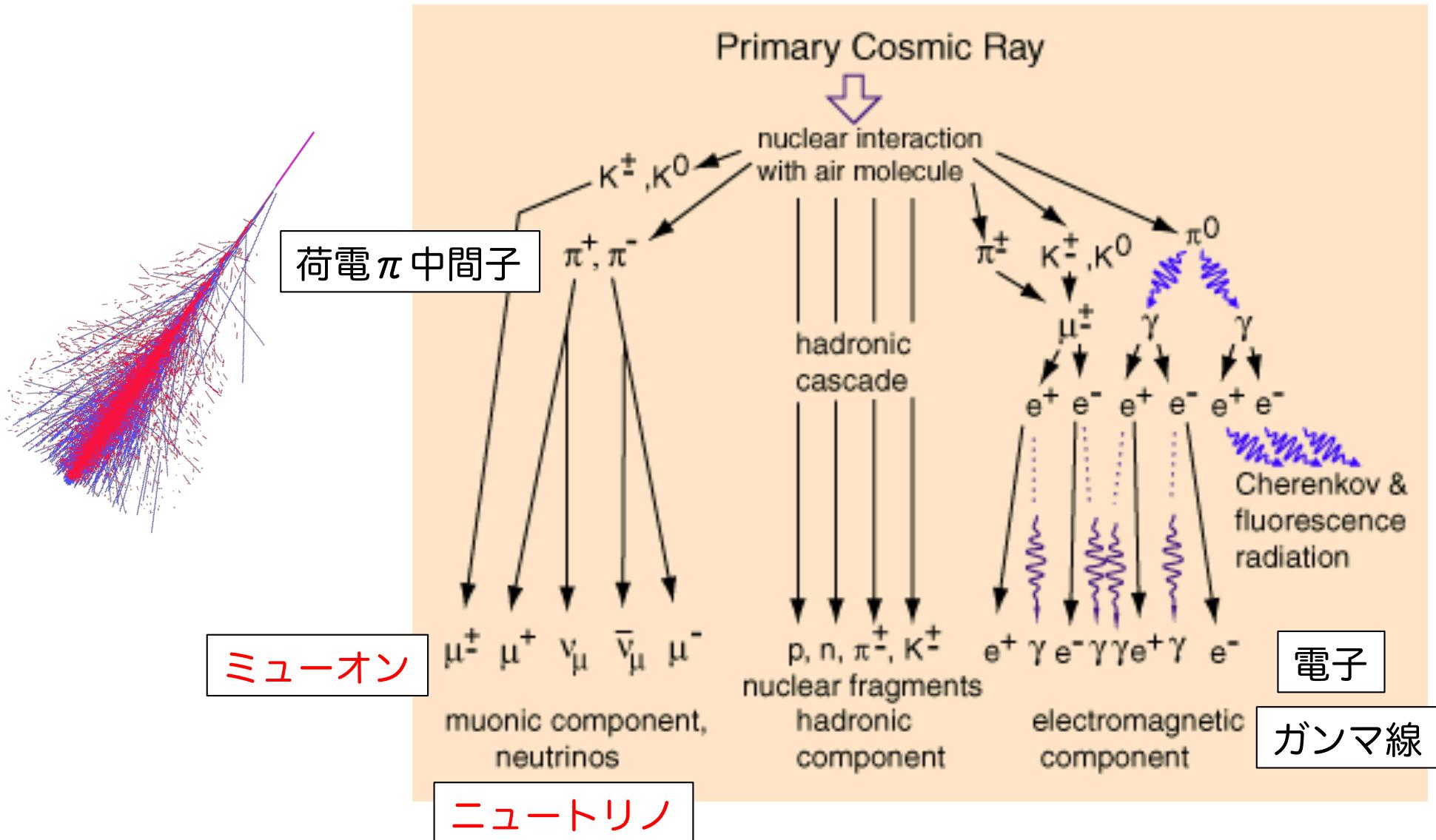
1ページで学ぶ「宇宙線とは？」



超高エネルギー宇宙線と空気シャワー



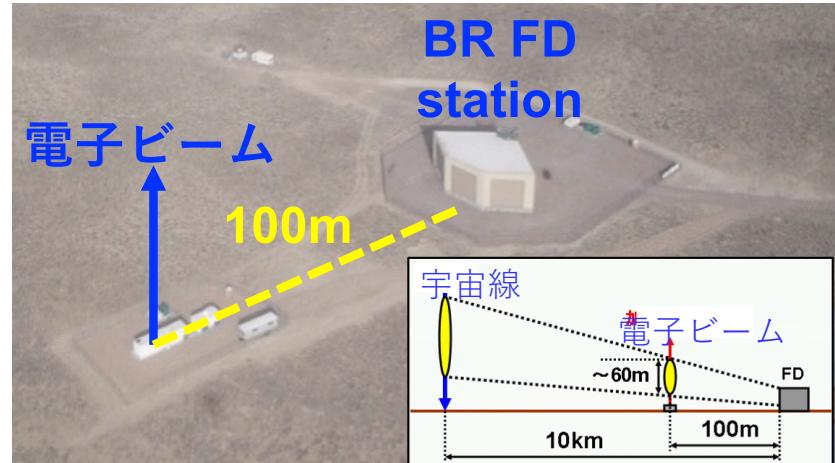
空気シャワー



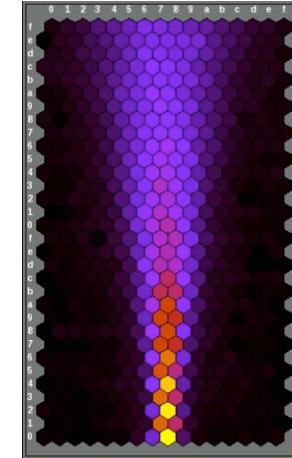
TAサイトでの関連研究

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



- 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



FDで撮像された
データのイメージ

- 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

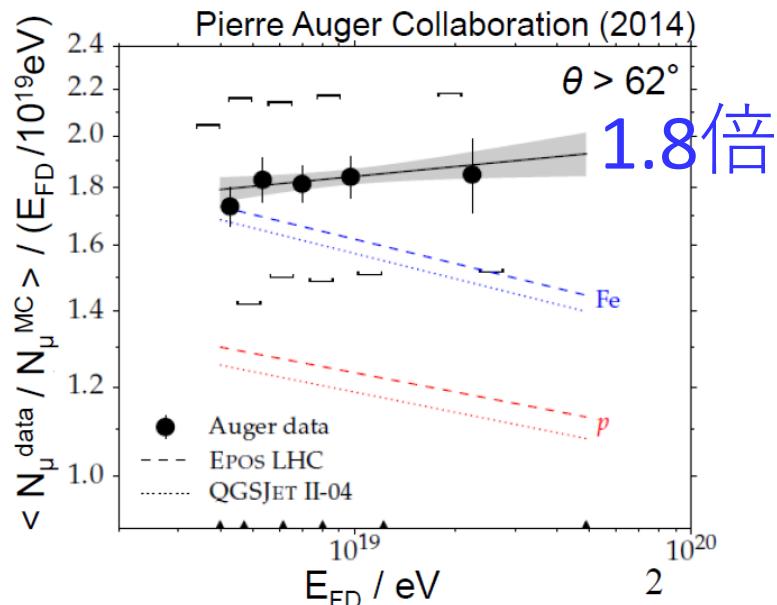


- MC データ
 - シャワー生成
 - Geantシミュレーション
 - FD シミュレーション・再構成
 - TA オフラインソフトウェア

- 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ーオン数過剰を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！

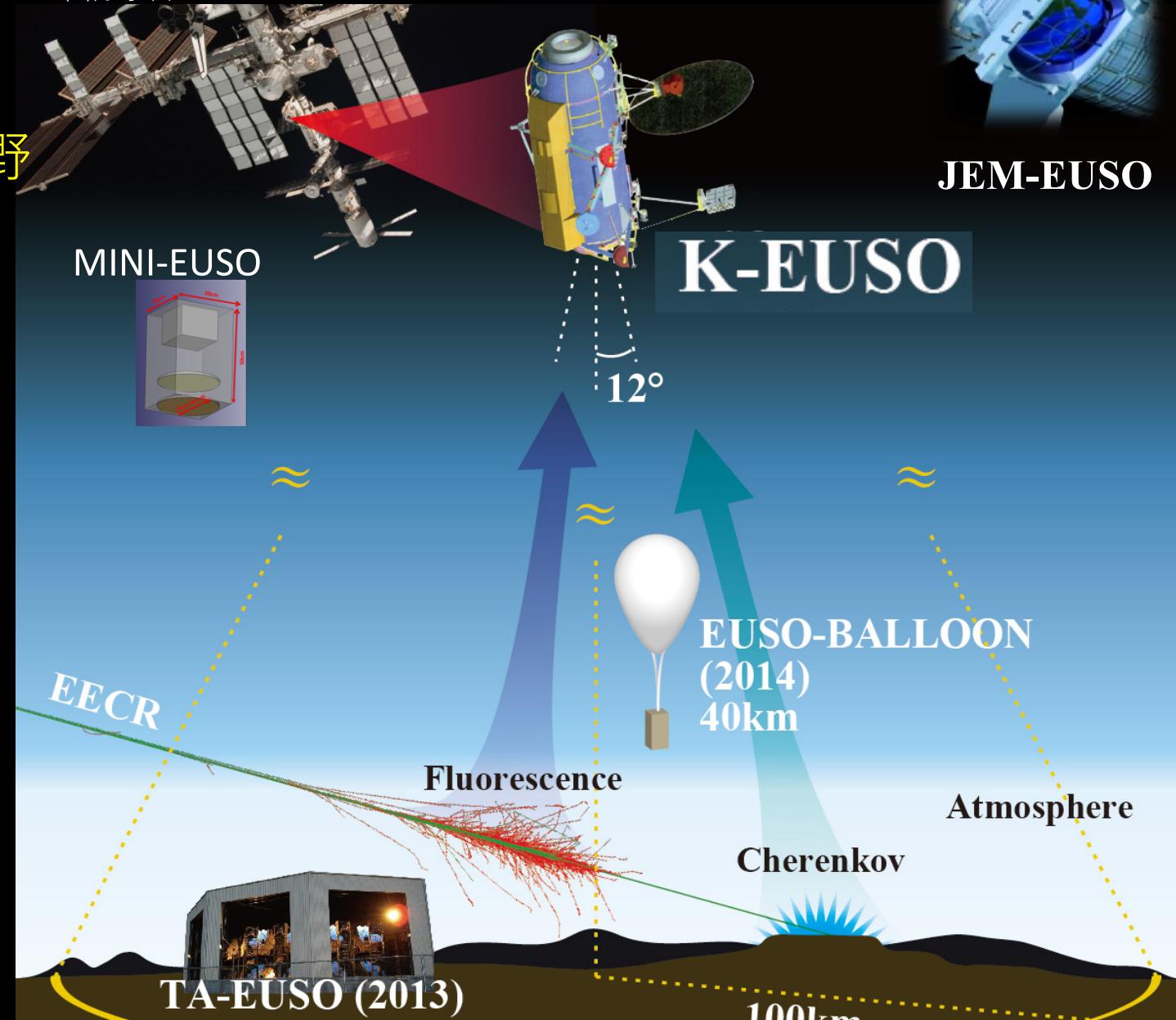
The EUSO program

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



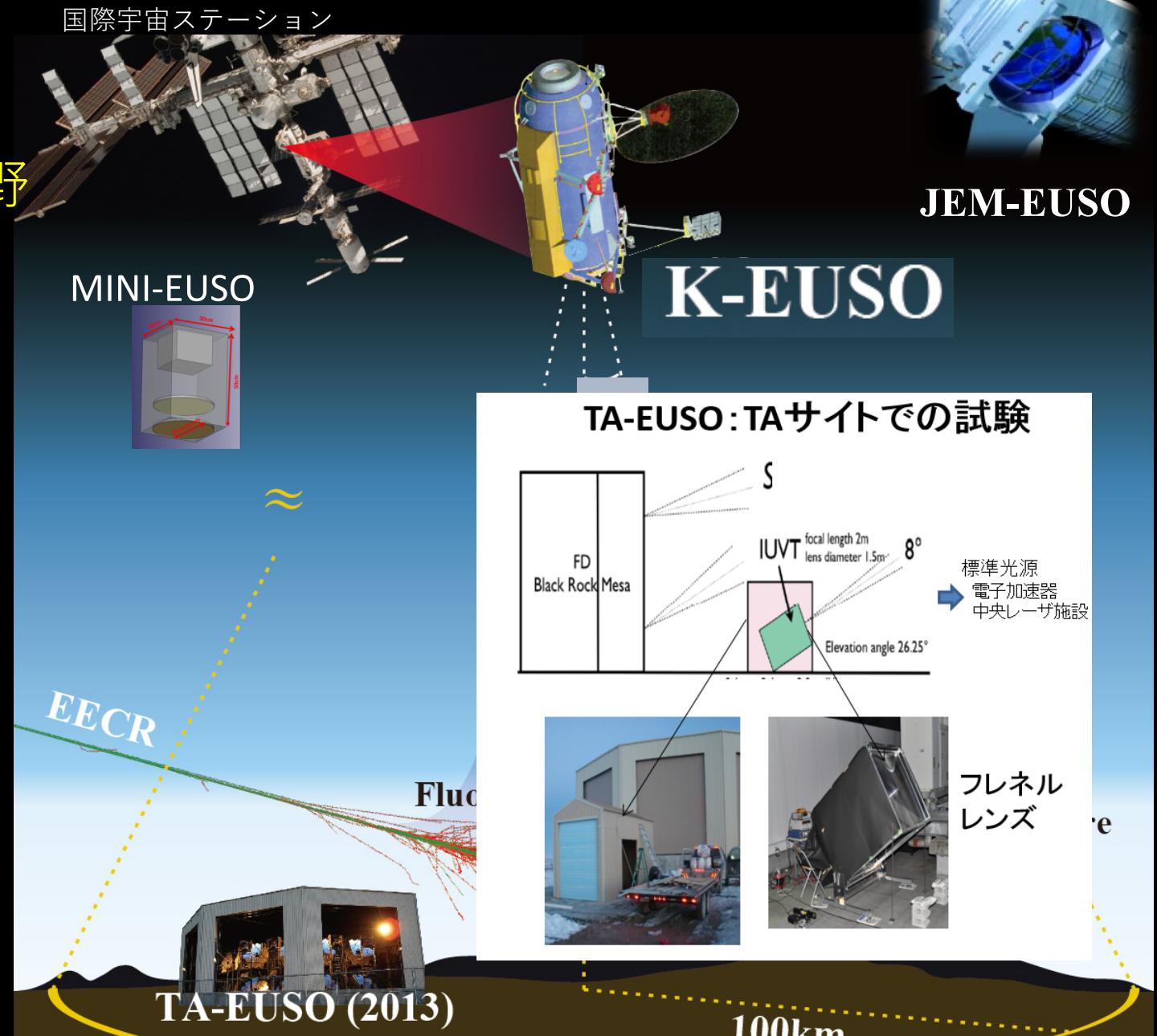
宇宙線研も参加：TA-EUSOとPMT較正

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 -



宇宙線研も参加：TA-EUSOとPMT較正

The EUSO program

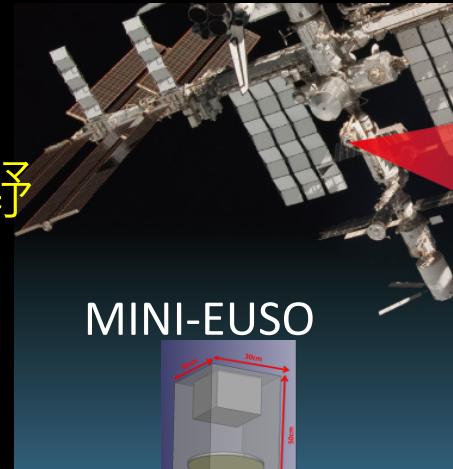
大統計(TAx4の2倍)
全天ほぼ一様な視野

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

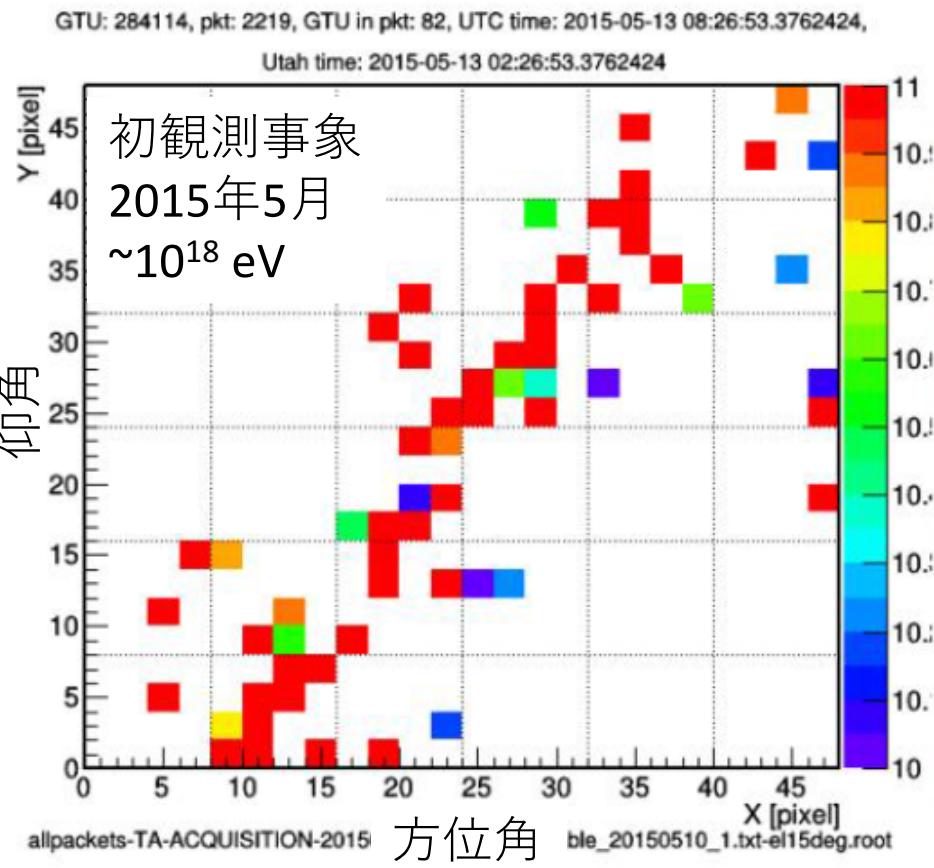
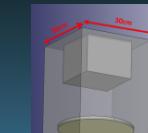


最高エネルギー宇宙線大規模観測計画 - 宇宙からの望遠鏡観測 -

国際宇宙ステーション



MINI-EUSO



フレネル
レンズ

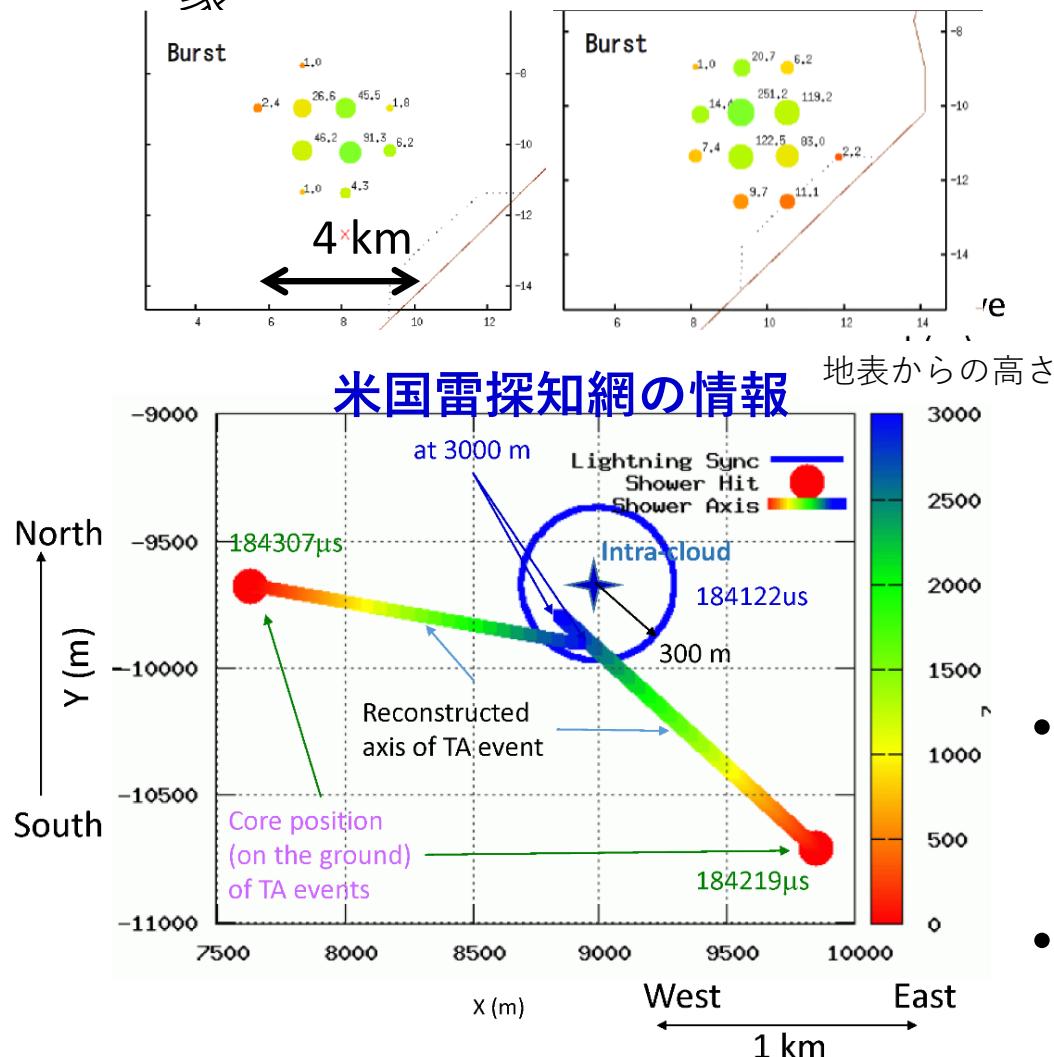
宇宙線研も参加：TA-EUSOとPMT較正

100km

53

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

