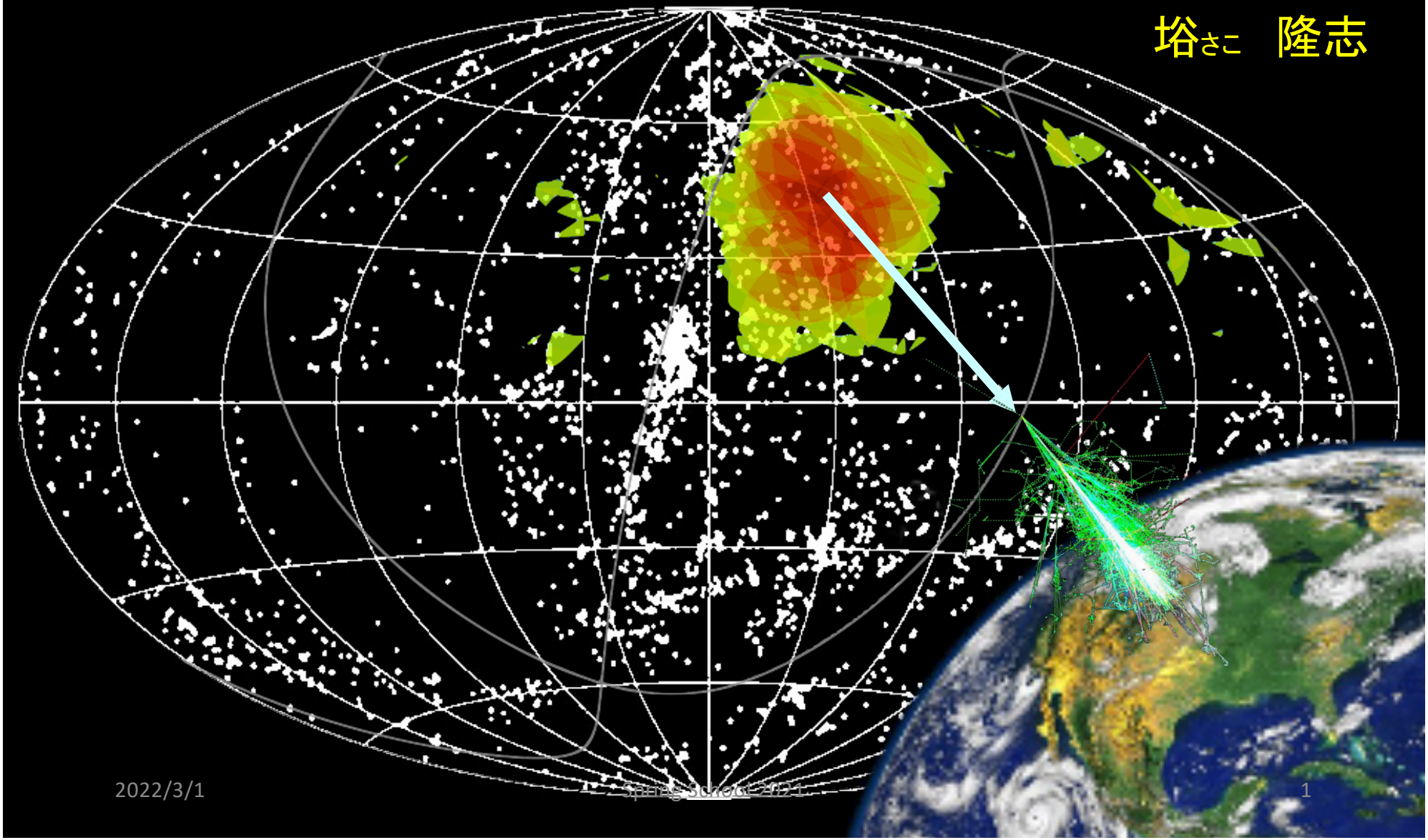
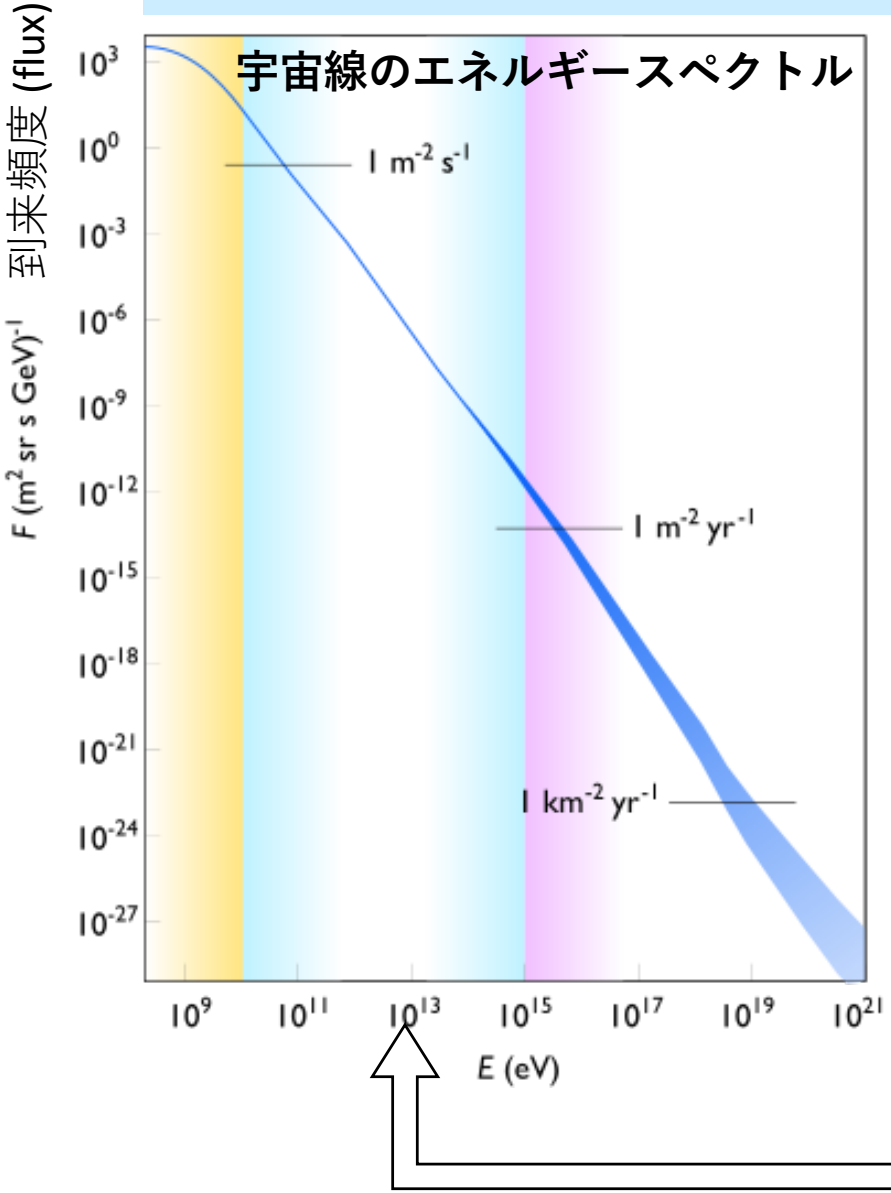
スプリングスクール　最先端研究II

最高エネルギー宇宙線

塩さこ　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原子核
- 陽子（水素原子核）、He原子核、各種原子核

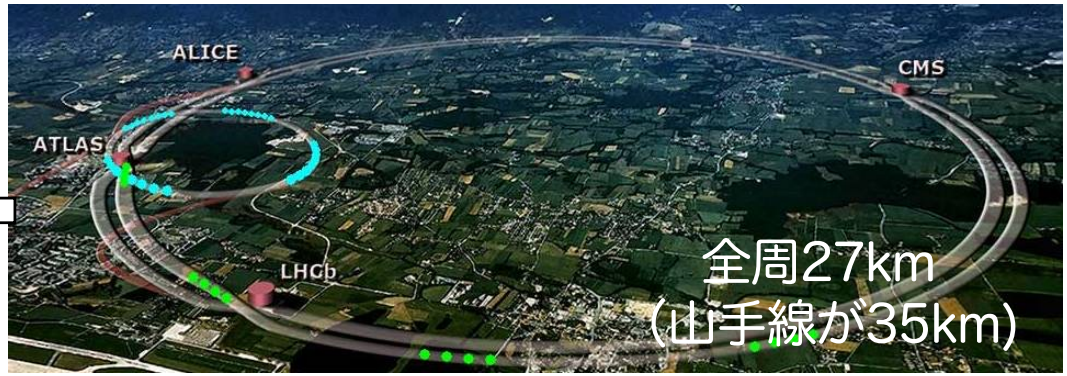
Classicalな宇宙線

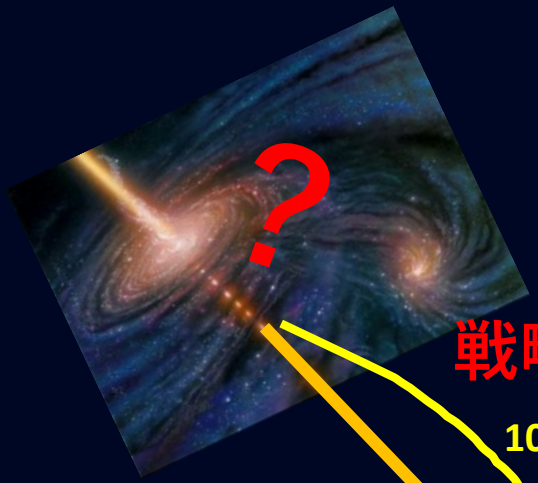
[広義]
- 電子、陽電子、ガンマ線、ニュートリノ
- ダークマター、重力波

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)に1個 [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)





なぜ起源がわからない？

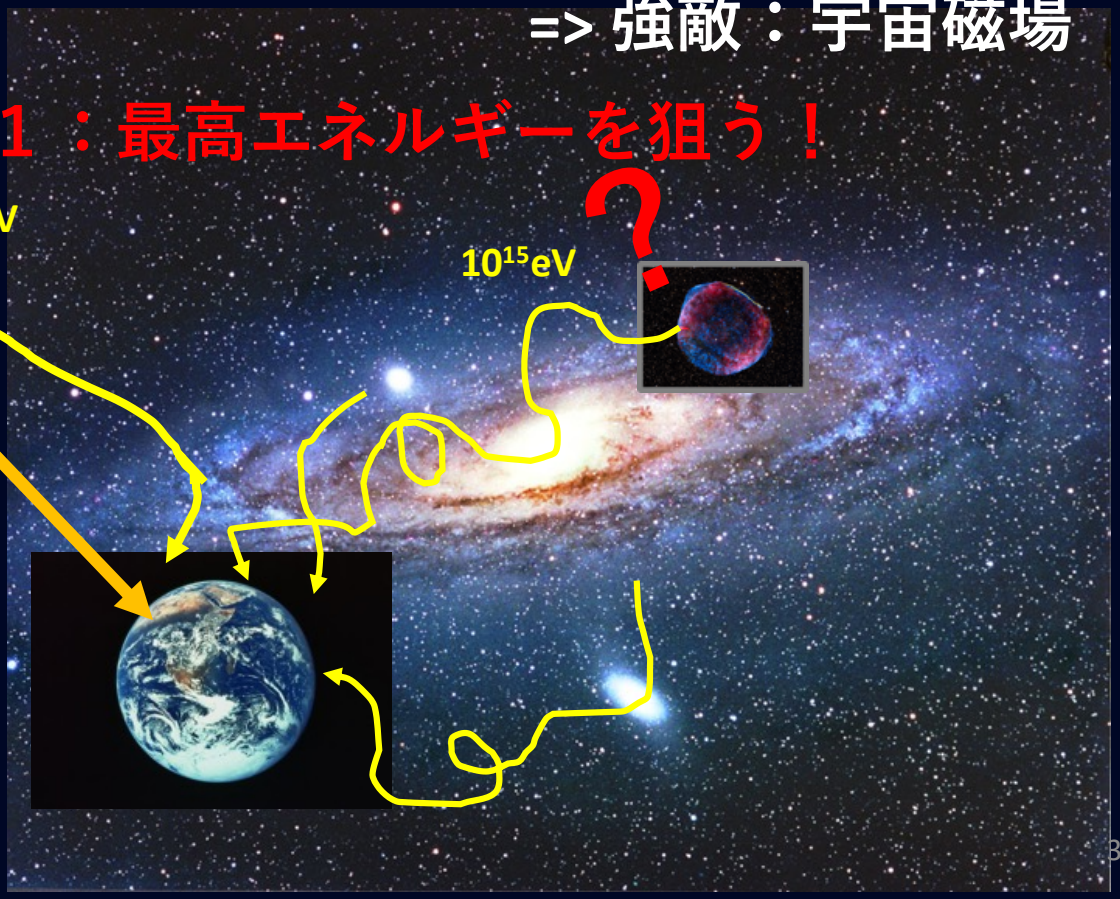
=> 強敵：宇宙磁場

戦略１：最高エネルギーを狙う！

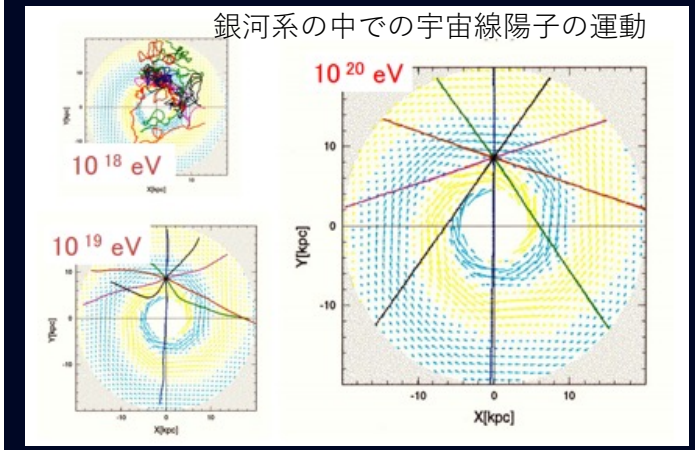
10^{19}eV

10^{20}eV

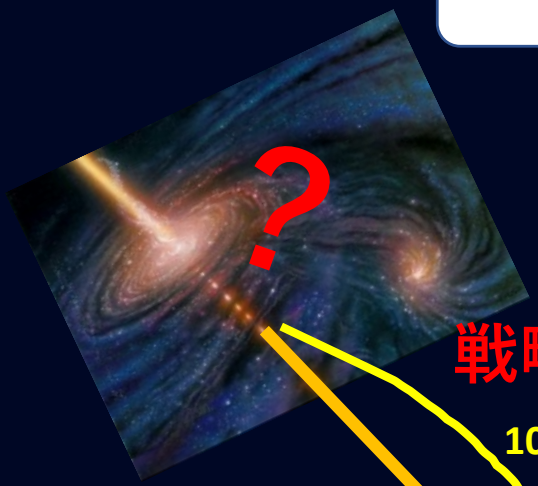
10^{15}eV



銀河系の中での宇宙線陽子の運動



「最高エネルギー宇宙線」グループ・さこ



なぜ起源がわからない？

=> 強敵：宇宙磁場

戦略１：最高エネルギーを狙う！

10^{19}eV

10^{20}eV

10^{15}eV

?

10^{15}eV CR

π^0

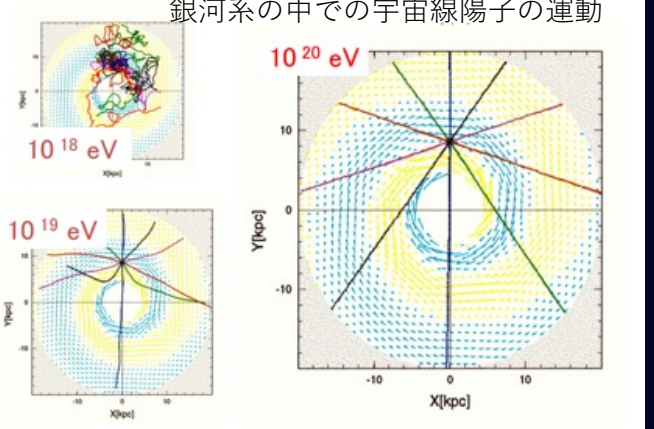
γ

Interstellar Matter

10^{14}eV γ

戦略２：ガンマ線を狙う！

銀河系の中での宇宙線陽子の運動



「高エネルギーガンマ線天文学」グループ・吉越先生

「超高エネルギー宇宙線」グループ・瀧田先生

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

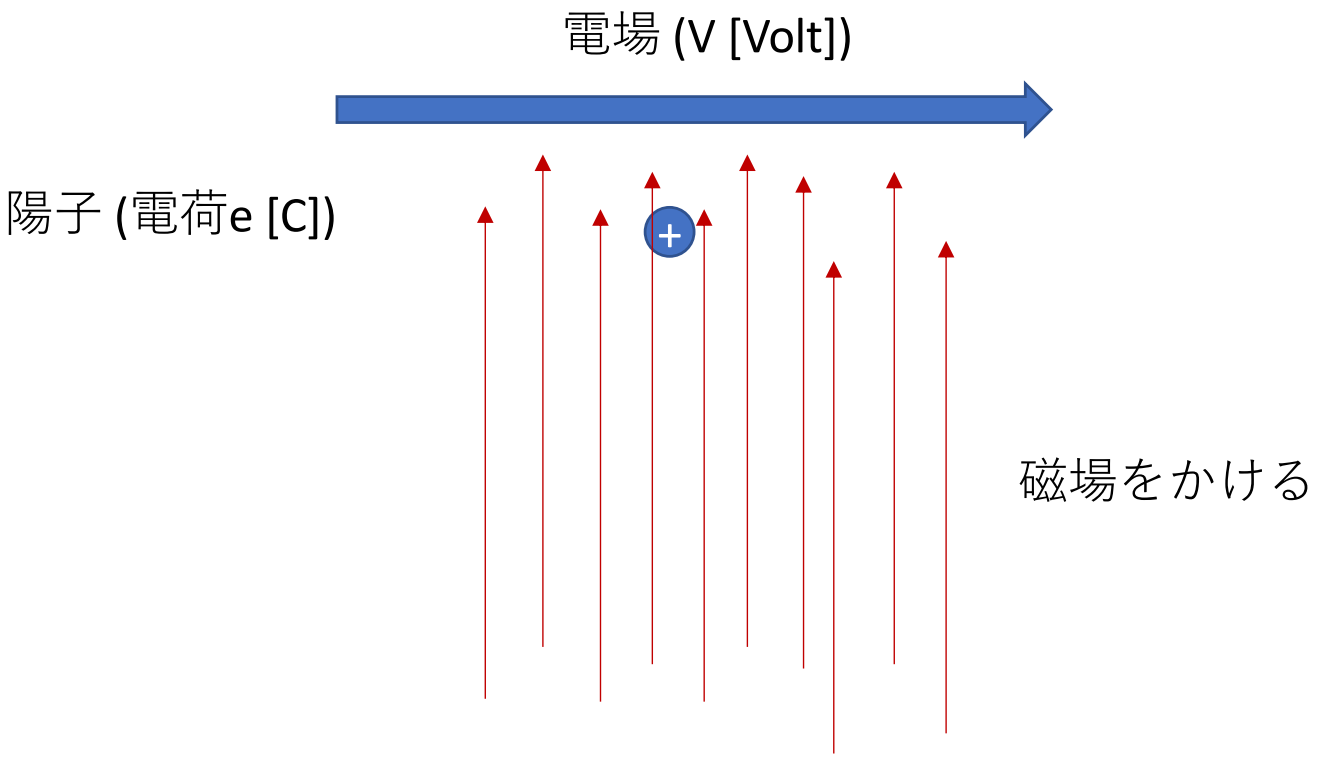
電場 (V [Volt])



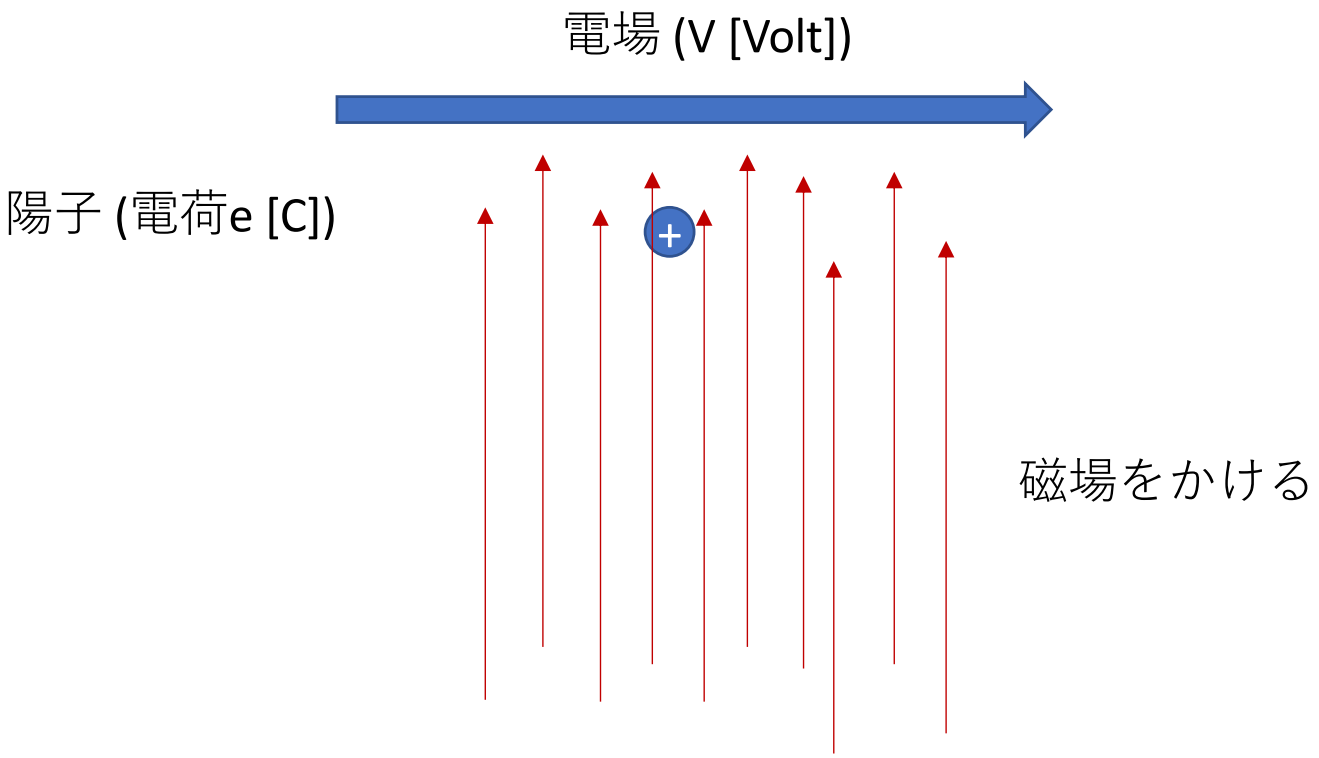
陽子 (電荷e [C])

E=eV [eV]に加速

粒子を加速するには



粒子を加速するには

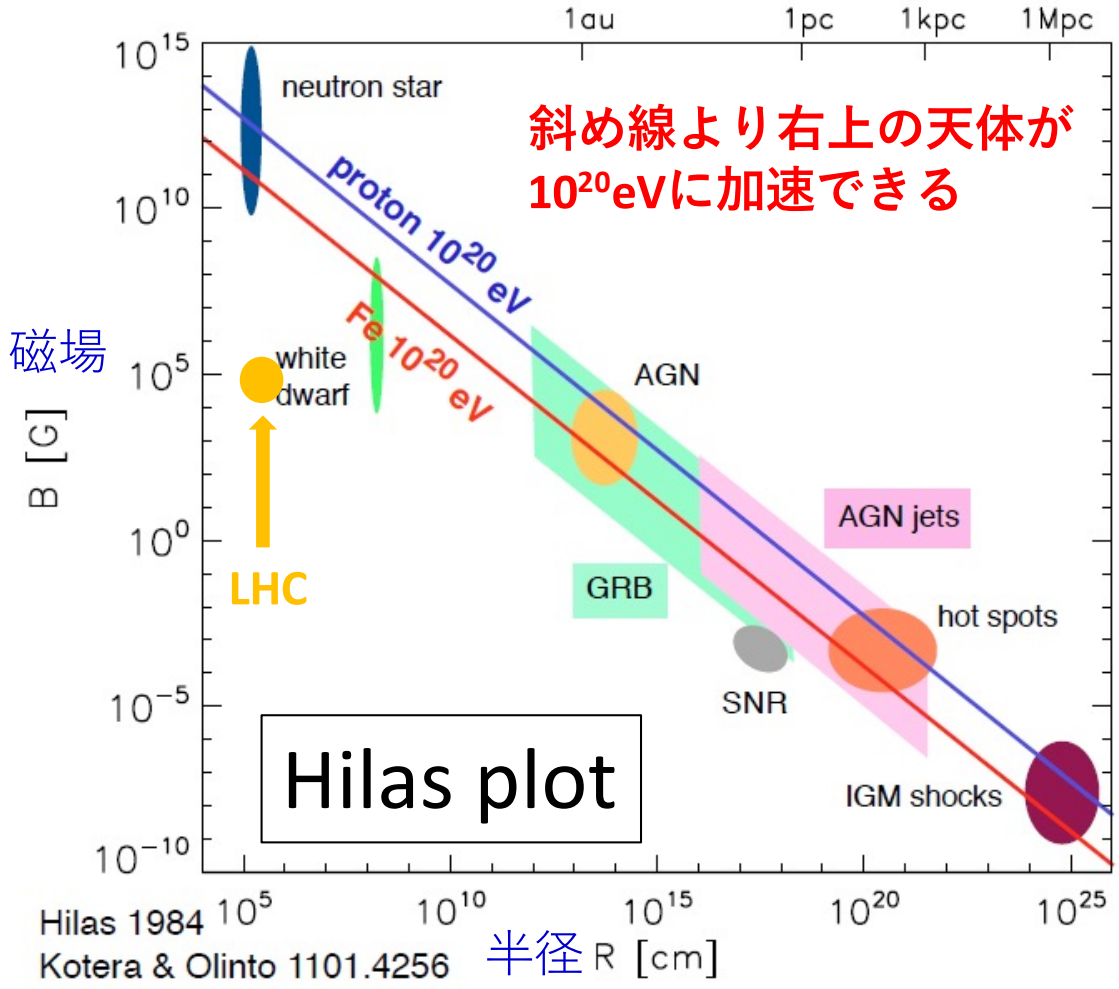


天体（加速器）で加速できる（正確には「閉じ込められる」）

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

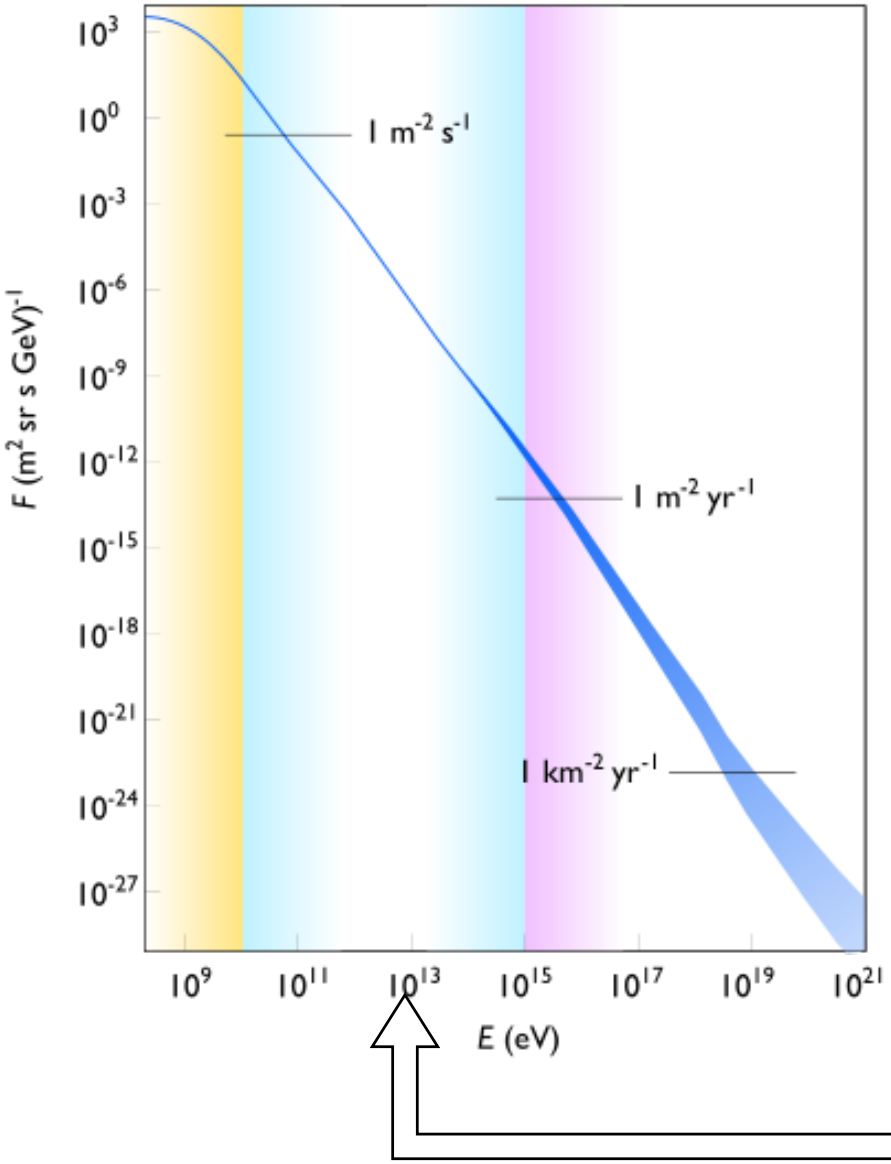
宇宙最強爆発
$E_{GRB} \sim 10^{51}$ergs

宇宙最強磁場
$B \sim 10^{15}$ G

宇宙最大重力束縛天体
r_{vir} ~ a few Mpc

- 宇宙の極限的天体現象と関係
- 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
= 1.6x10^{-19} J (ジュール)

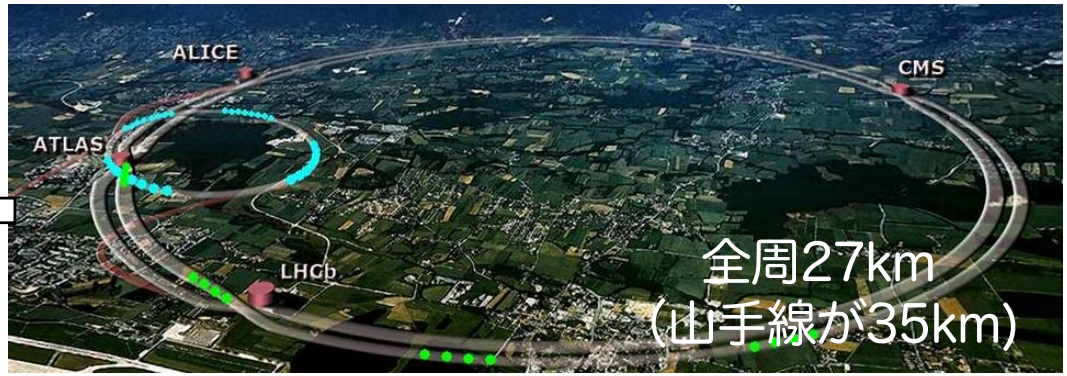
[狭義]宇宙から降り注ぐ高エネルギー原子核
- 陽子（水素原子核）、He原子核、各種原子核

[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

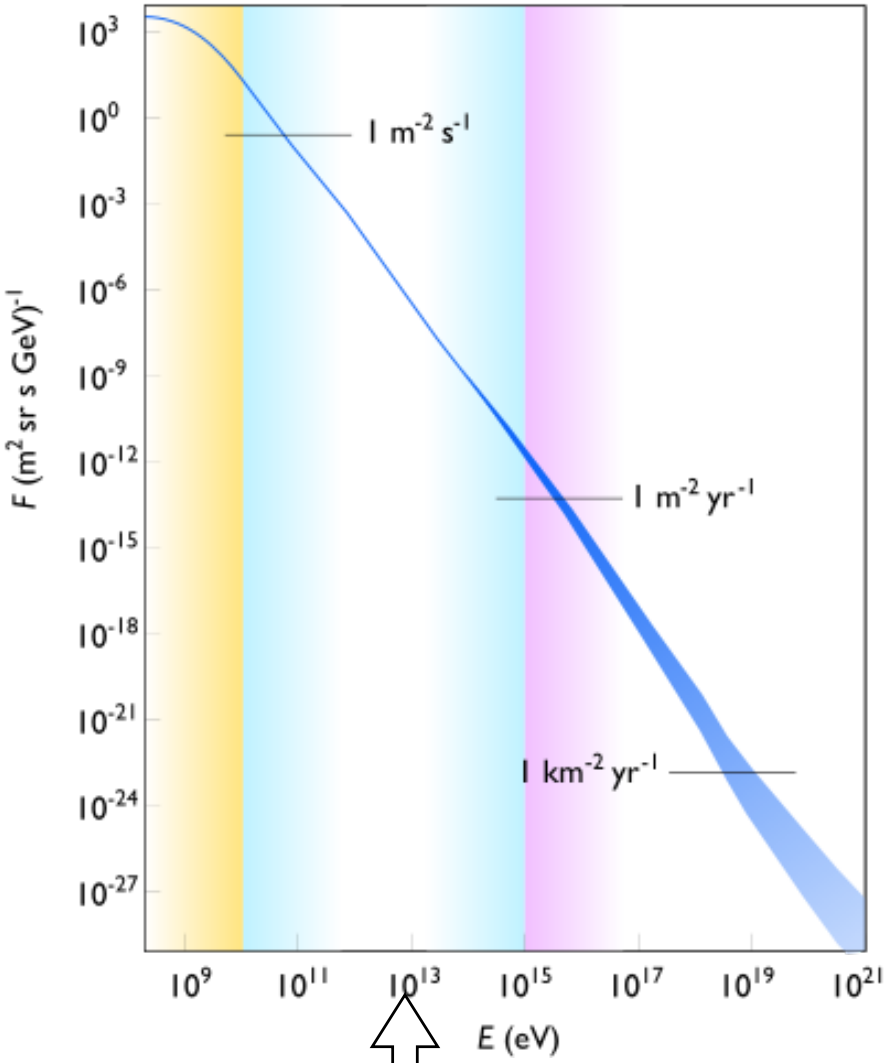
様々なエネルギーの宇宙線がやってくる
- 大体 1秒間に指先(1cm^2)に1個 [注：大気の外]
- エネルギーが一桁増えると、頻度は約 1/1000
- 10^{20}eVの宇宙線が来ている(100km^{2}に年に一個)
- 人口加速器の最高エネルギーは 7x10^{12}eV

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？」



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)

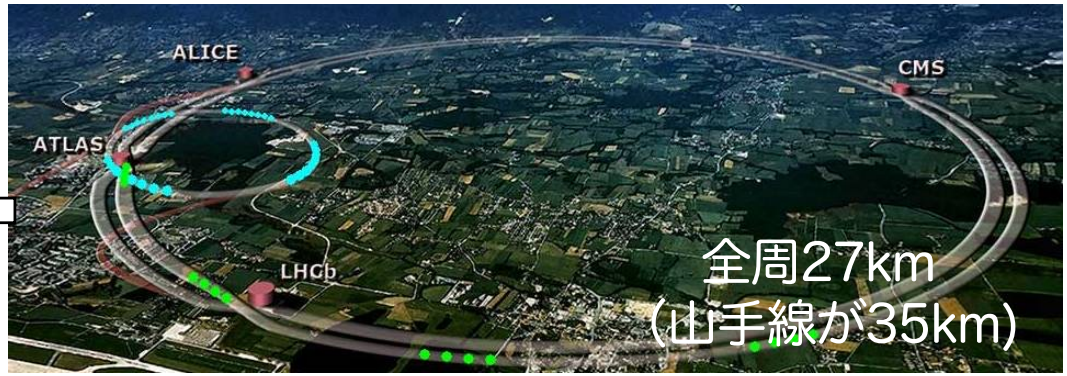
[狭義]宇宙から降り注ぐ高エネルギー原子核
- 陽子（水素原子核）、He原子核、各種原子核

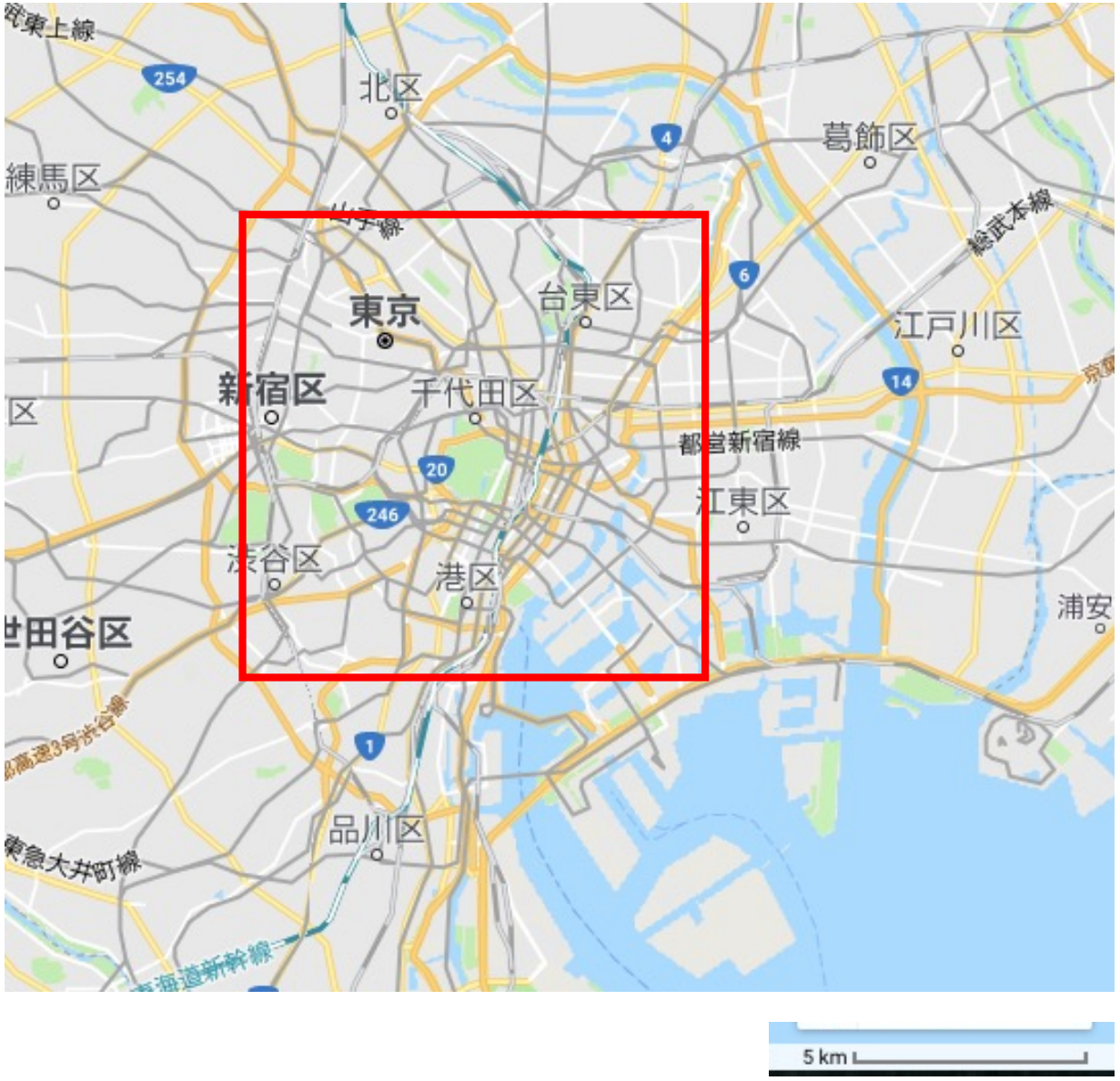
[広義]
- 電子、陽電子、ガンマ線、ニュートリノ
- ダークマター、重力波

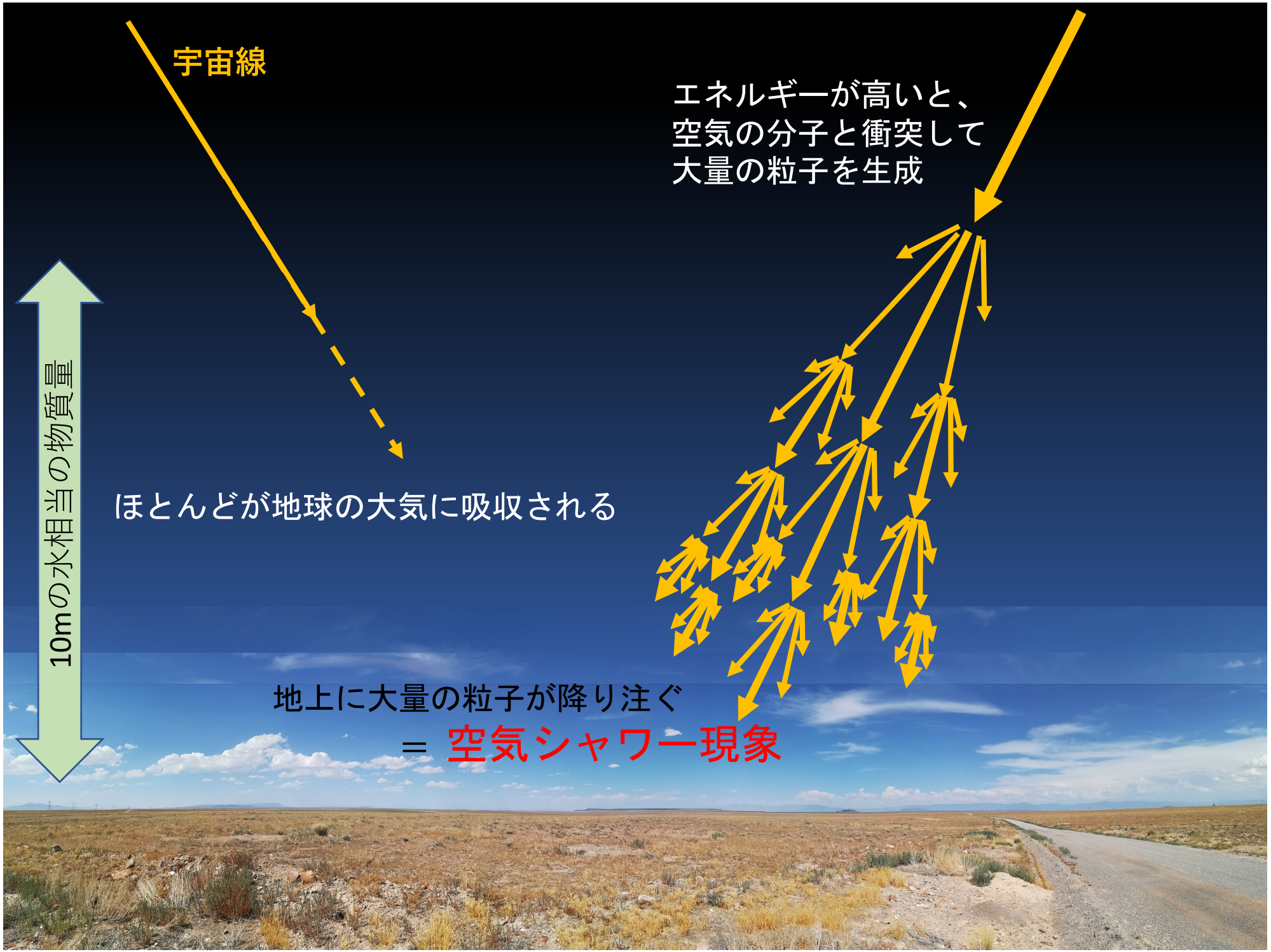
様々なエネルギーの宇宙線がやってくる
- 大体 1秒間に指先($1cm^2$)を1回貫通 [注：大気の外]
- エネルギーが一桁増えると、頻度は約 1/1000
- 10^{20}eVの宇宙線が来ている($100km^2$に年に一個)
- 人口加速器の最高エネルギーは 7×10^{12}eV

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

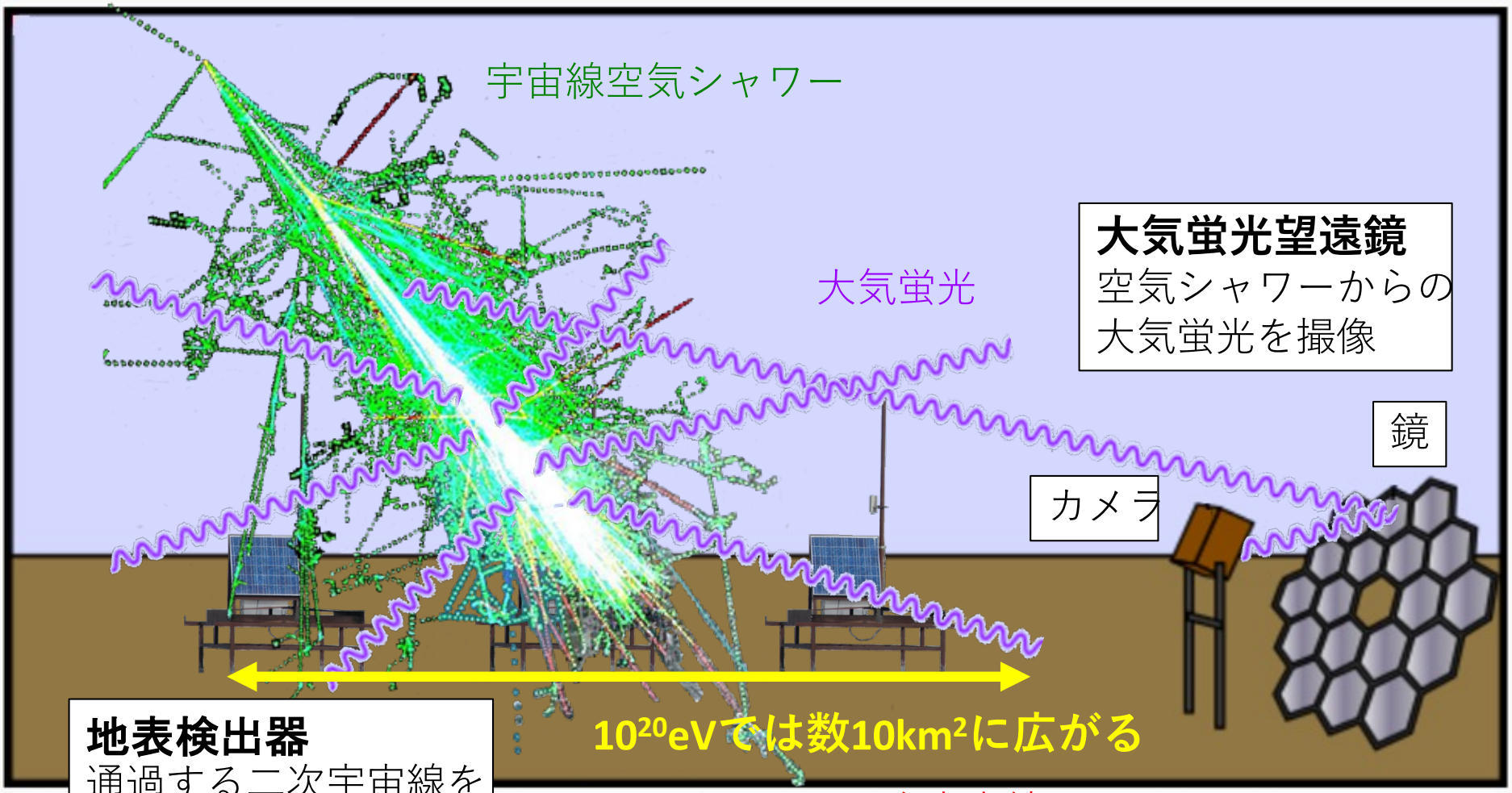
世界最大の粒子加速器 LHC
(CERN, スイス,フランス国境)




北区
葛飾区
練馬区
東京
台東区
江戸川区
新宿区
千代田区
都営新宿線
江東区
渋谷区
港区
品川区
浦安
5 km


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



一次宇宙線の
エネルギー・到来方向・組成を測定



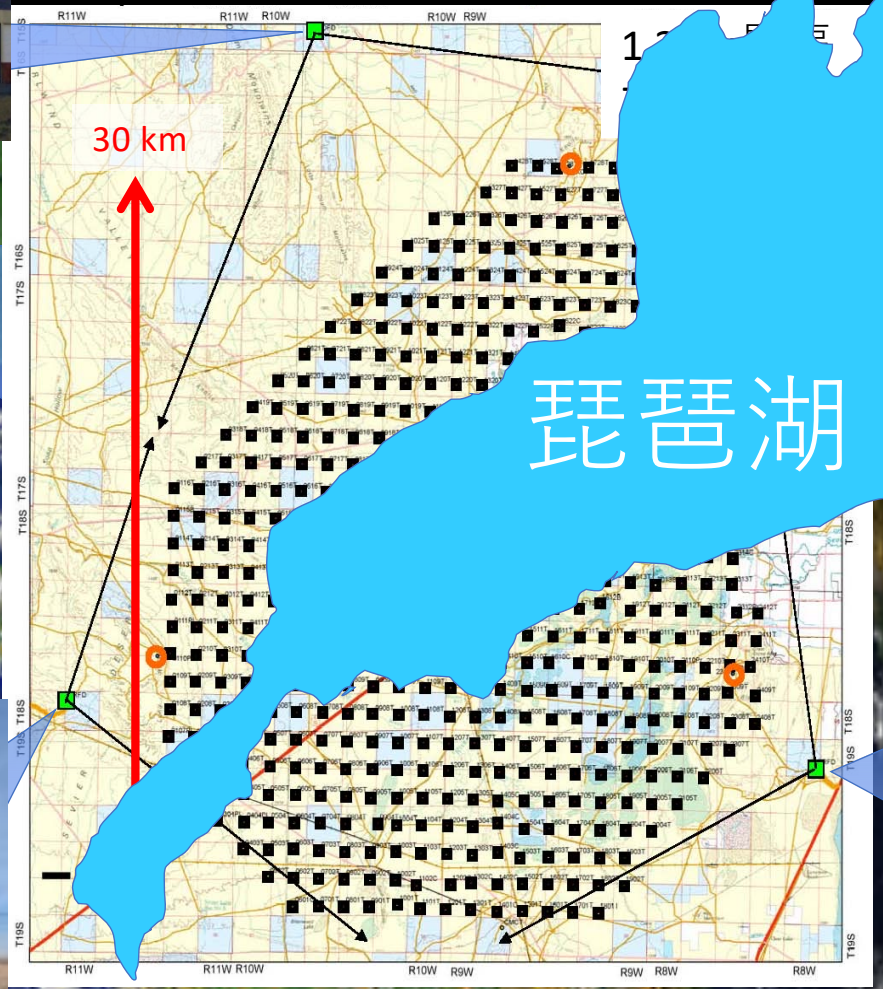
日米韓国ロシアベルギーチェコ6カ国
130名 (日本約70名)

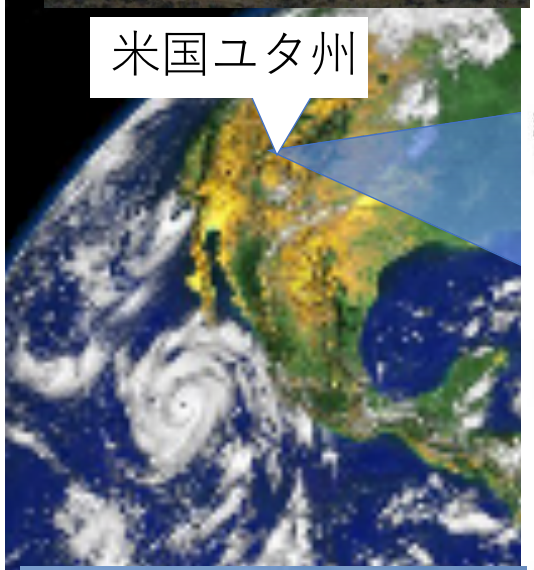
テレスコープアレイ(TA)

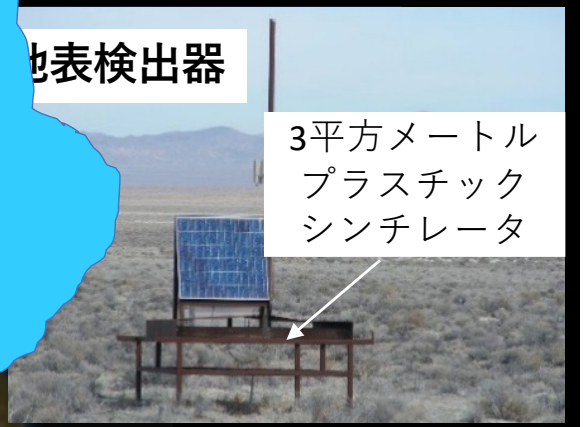


標高1400 m

2008年5月より
ハイブリッド観測開始





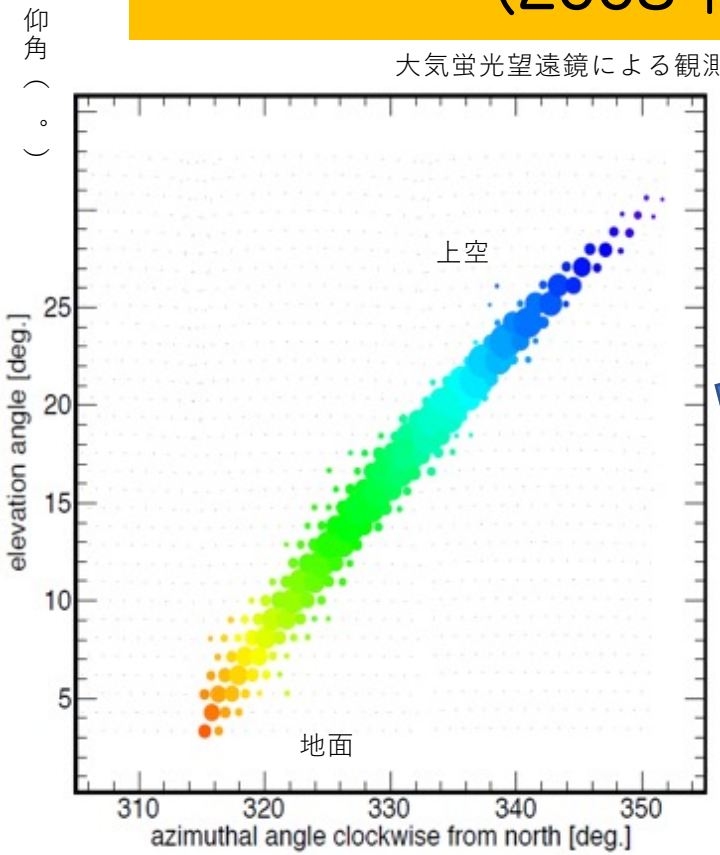






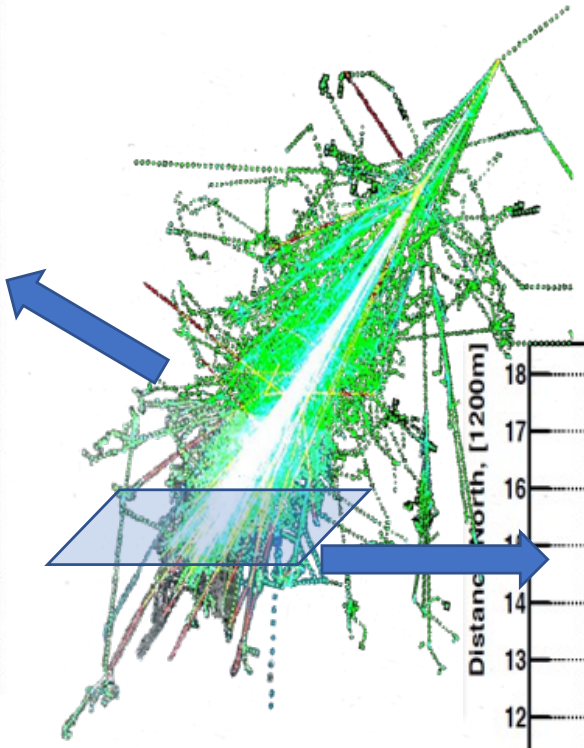
大気蛍光望遠鏡と地表検出器による空気シャワー同時観測例
(2008年10月26日5時51分50秒UTC)

大気蛍光望遠鏡による観測

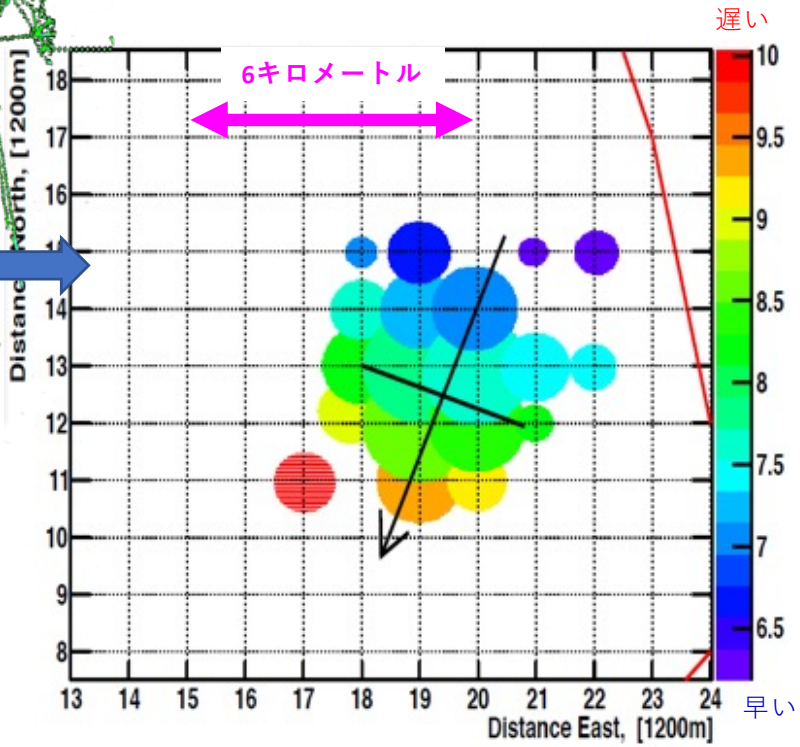


方位角（°）

暗くて速い流れ
星のような像

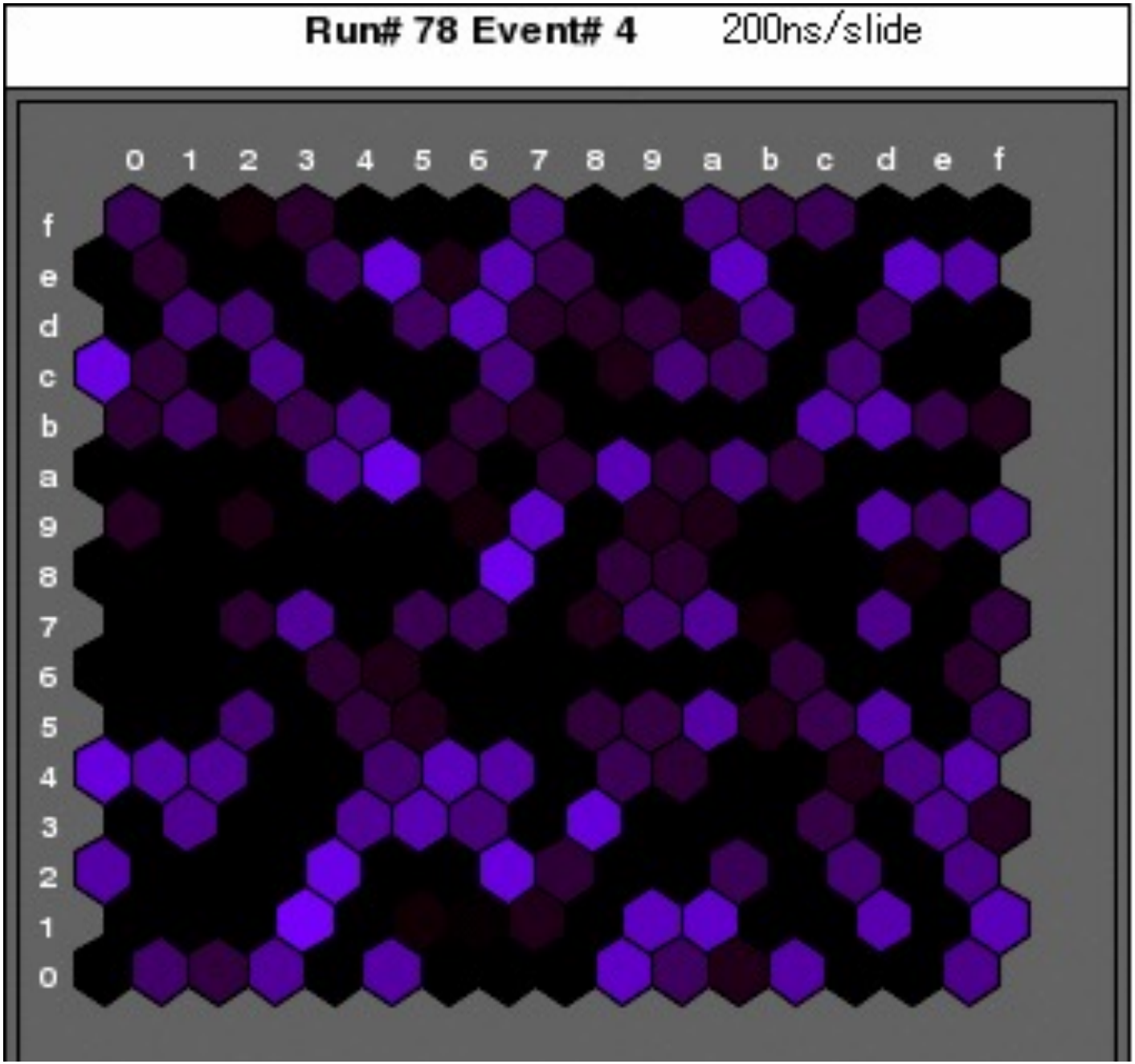


地表での
シャワーの断面



地表検出器による観測

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



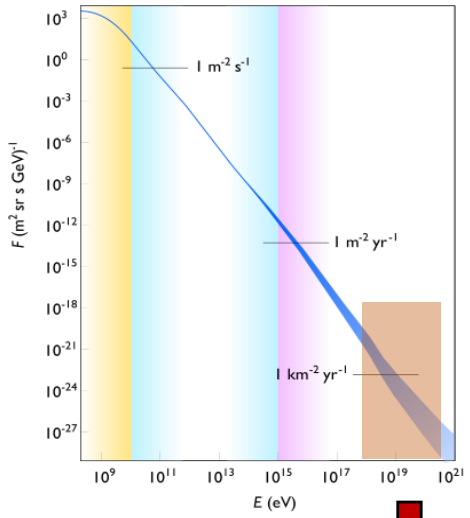
TAの重要な成果

- 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

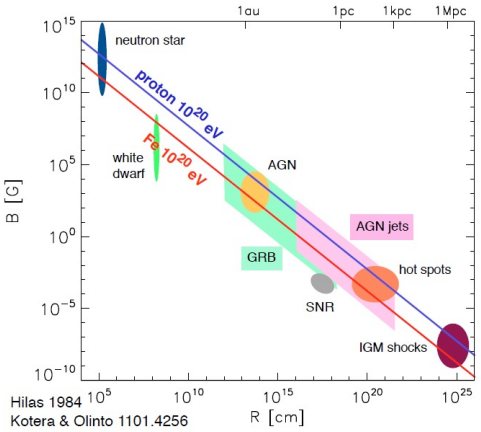
TAの重要な成果

- 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

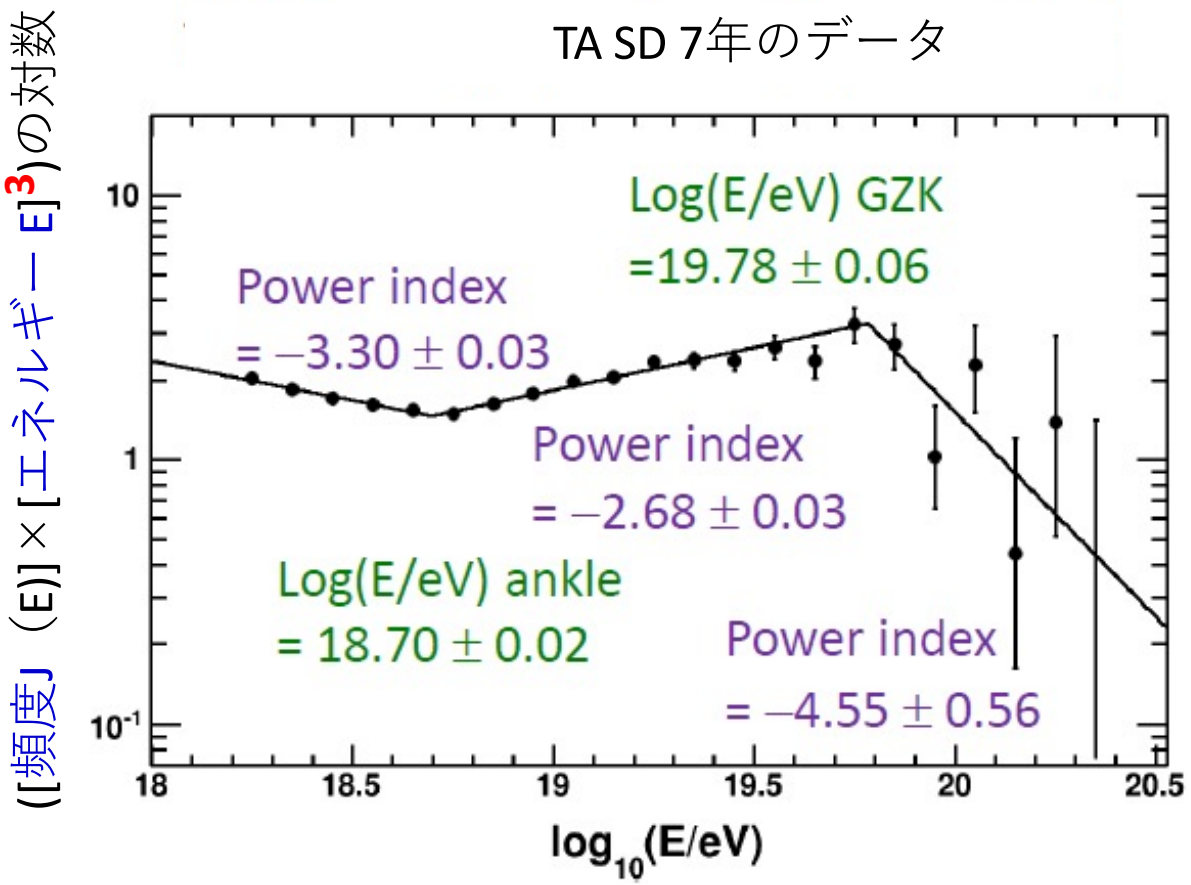
TAのエネルギースペクトル



頻度Jに E^3をかけて
傾きの変化を強調



TA SD 7年のデータ

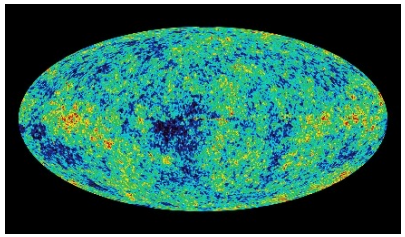


（エネルギー E）の対数

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

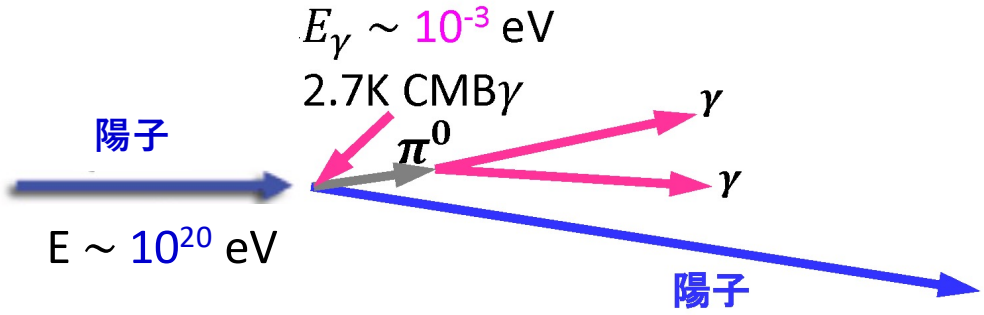
宇宙線のエネルギーに限界はあるか

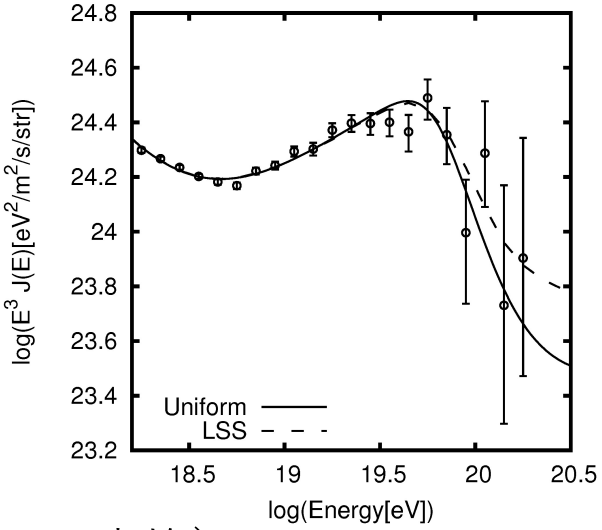
- 1964年　宇宙背景放射 (CMB) の発見



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（~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

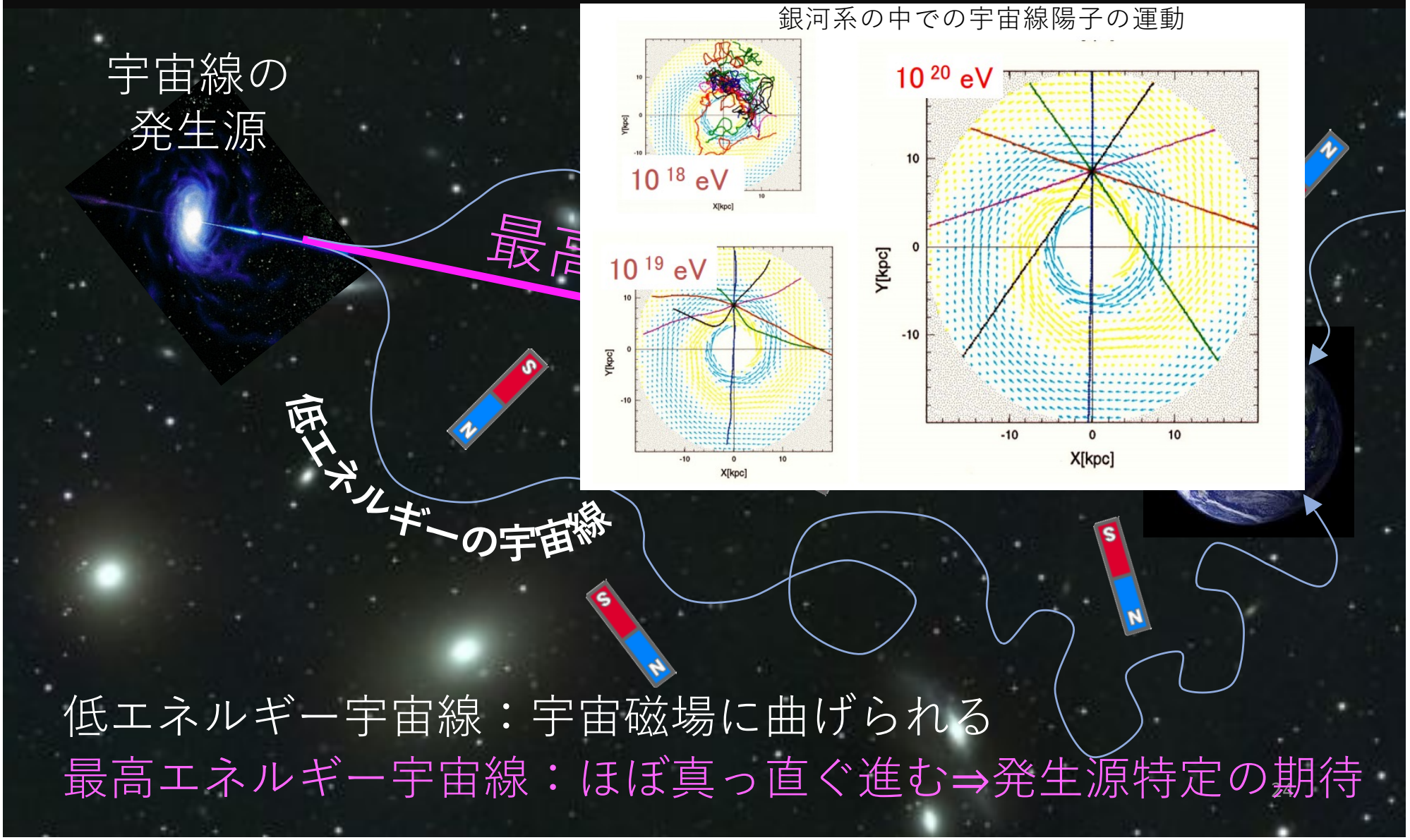
- 陽子静止エネルギーの10^{11}倍（1000億のローレンツ変換）
- 2.7Kの光子が宇宙線には100MeVのガンマ線に見える
- プランクスケールに最も近い最高エネルギーでの特殊相対性理論の検証
- >10^{20}eV宇宙線+GZK過程でTAの結果は説明できる

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



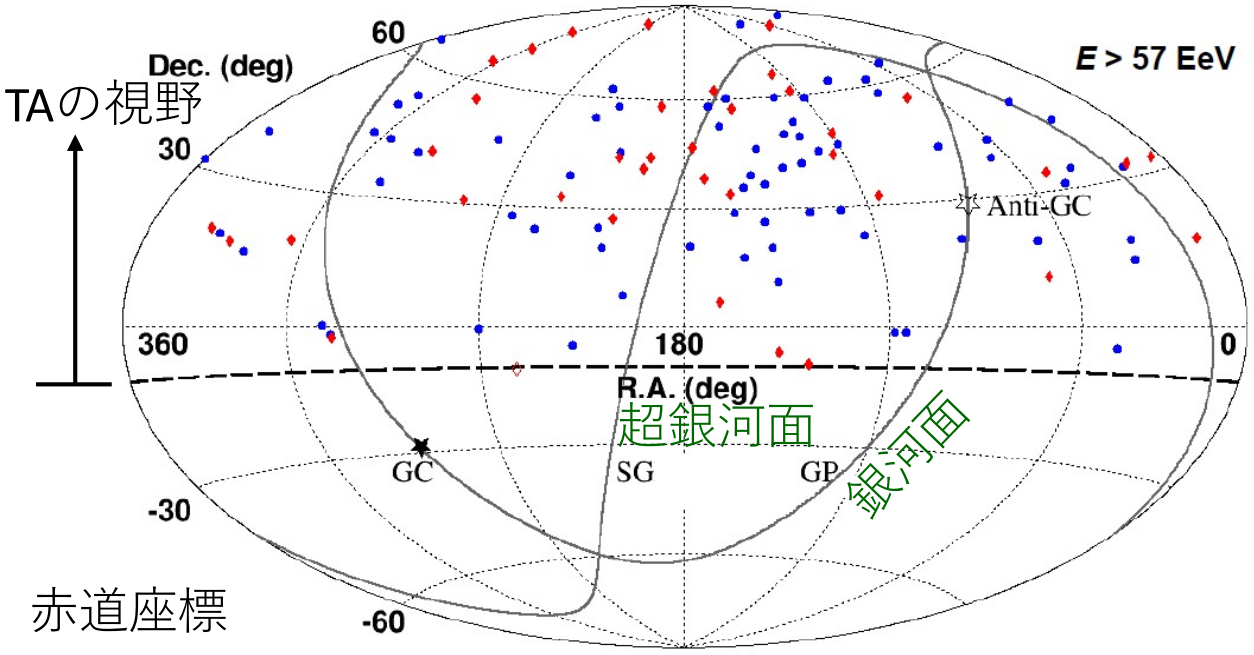
低エネルギー宇宙線：宇宙磁場に曲げられる

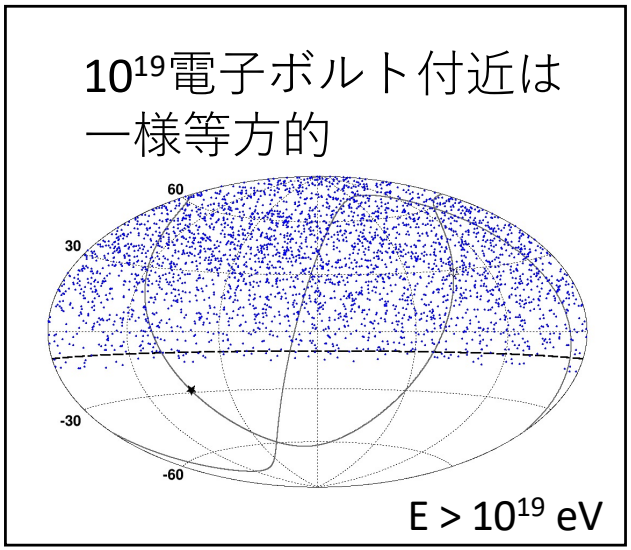
最高エネルギー宇宙線：ほぼ真っ直ぐ進む⇒発生源特定の期待

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
- 5.7x10^{19} 電子ボルト以上: 109事象

青：2014年7月
プレスリリース

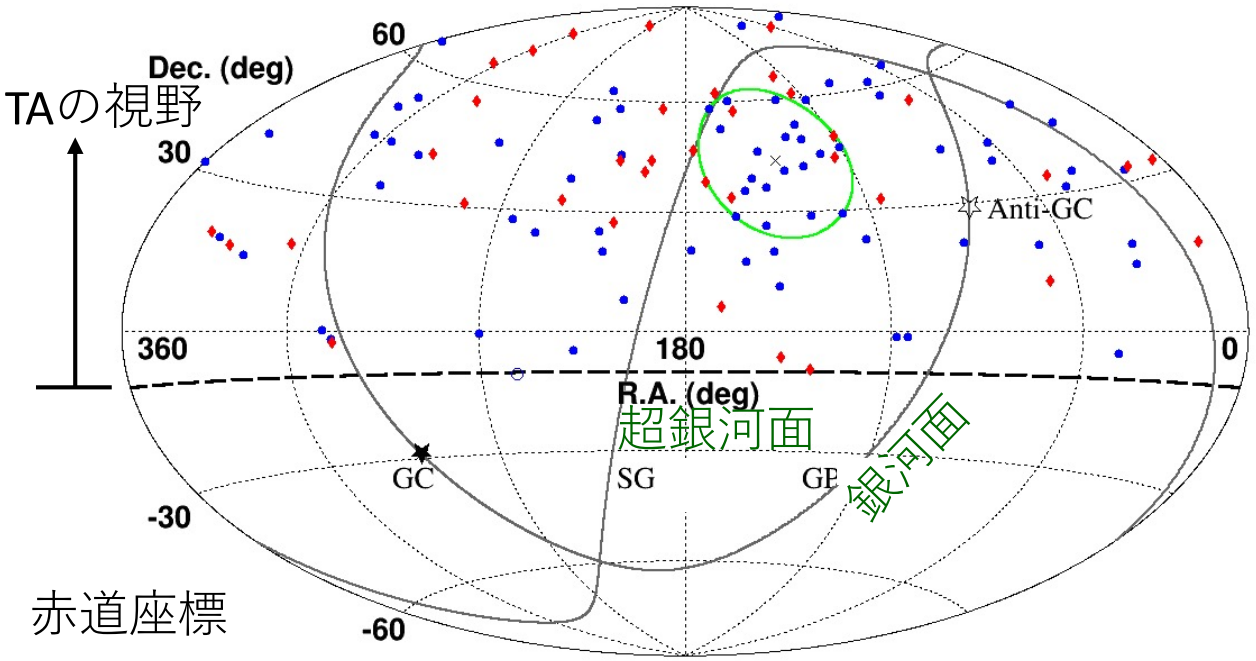


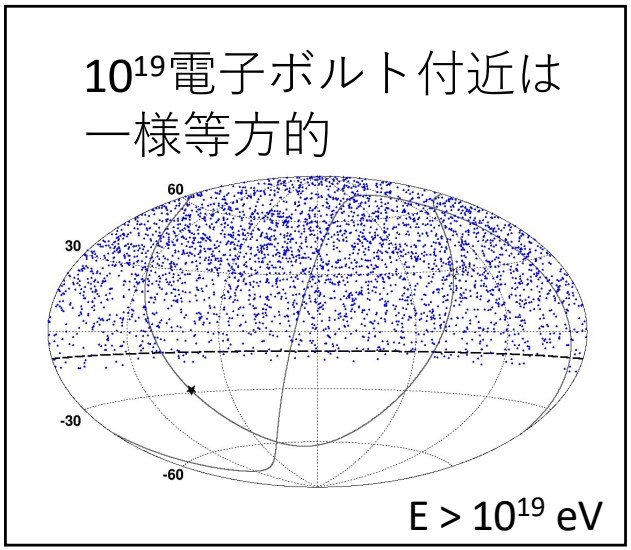


最高エネルギー宇宙線の到来方向の分布

- 2008年5月～2015年5月（7年間）のデータ
- 5.7x10^{19} 電子ボルト以上: 109事象

青：2014年7月
プレスリリース

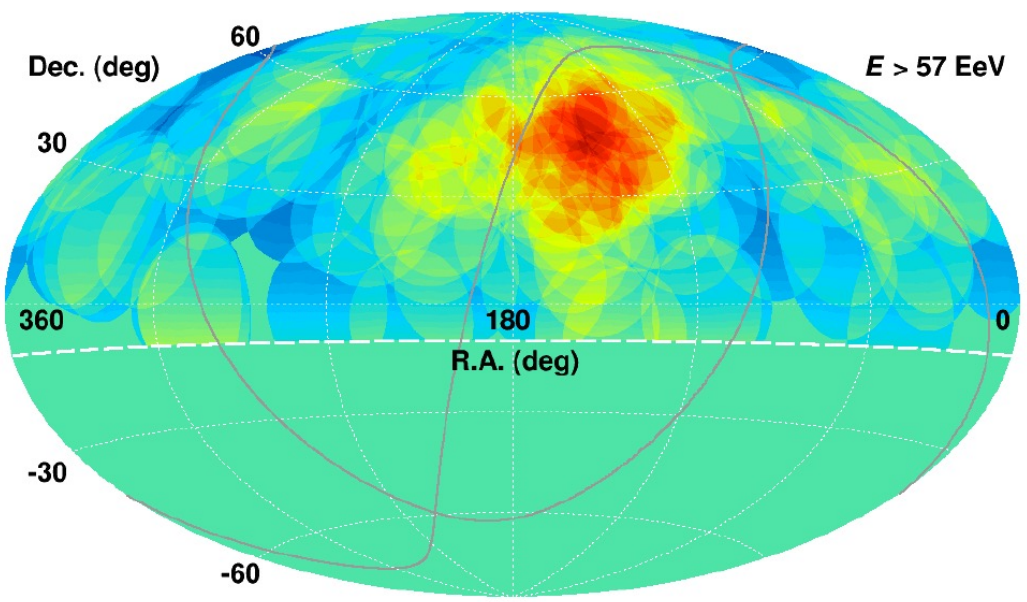




- 緑の半径20度の円内
  - 等方的到来分布の期待数：6.9　↔　観測数：24

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

異方性有意度マップ



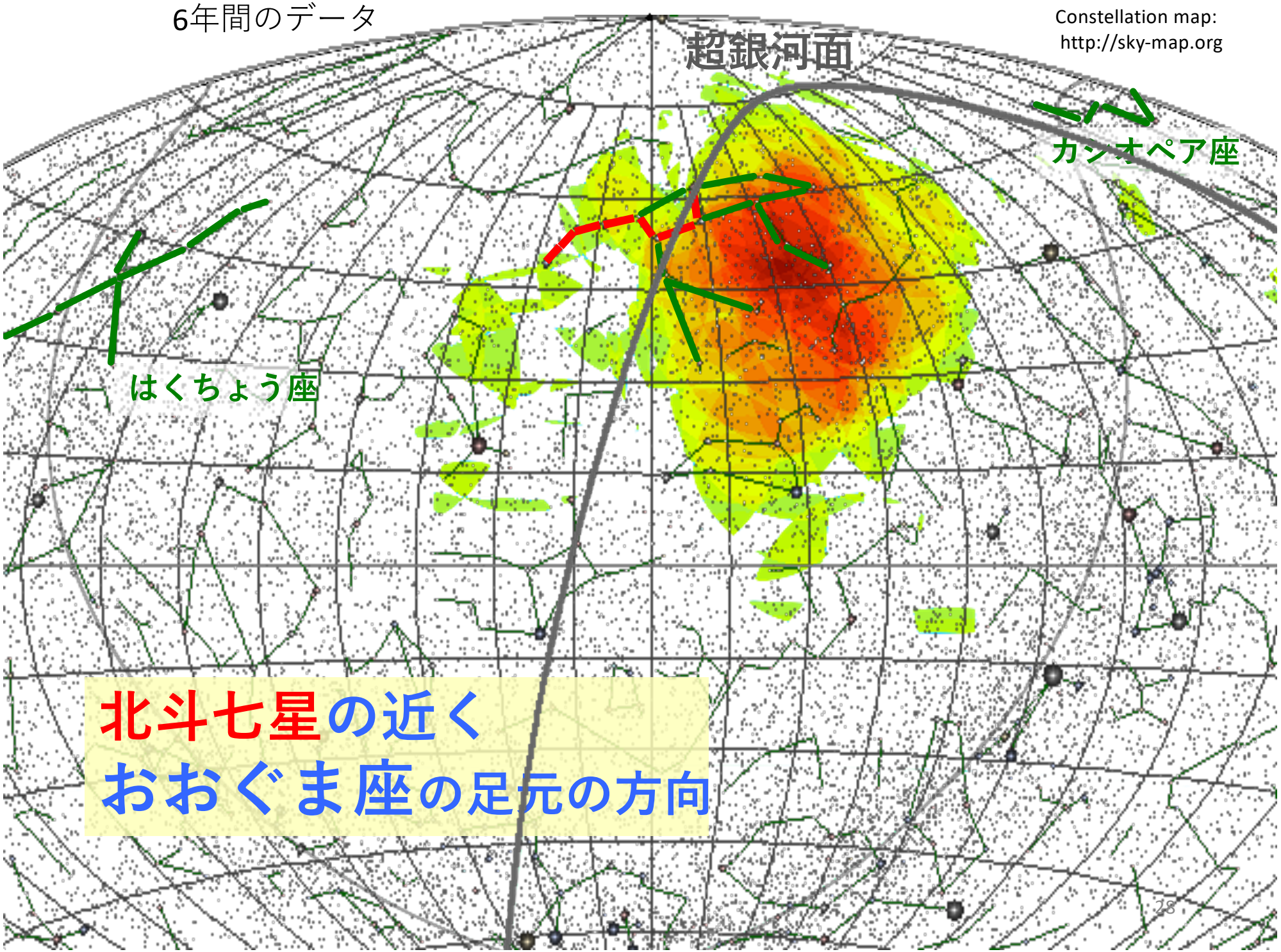
最大有意度
5.07σ

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

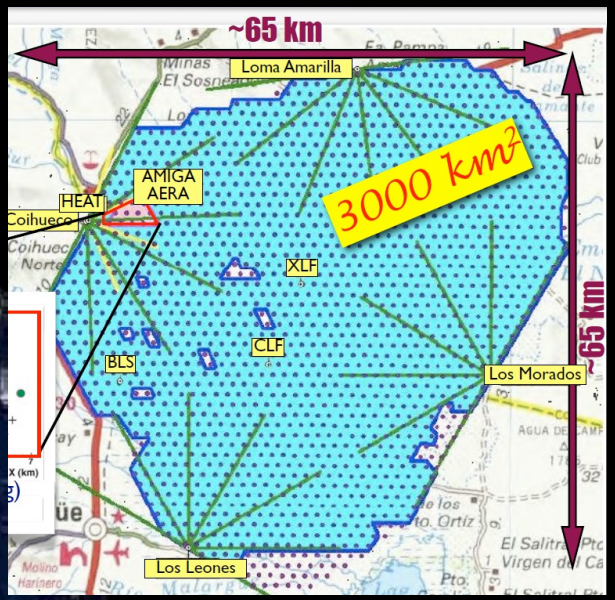

6年間のデータ
Constellation map:
http://sky-map.org
超銀河面
カシオペア座
はくちょう座
北斗七星の近く
おおぐま座の足元の方向

南北半球からの宇宙線観測

Telescope Array

Utah, USA

680 km² 地表検出器
3箇所に大気蛍光望遠鏡



Pierre Auger

Observatory

Mendoza, Argentina

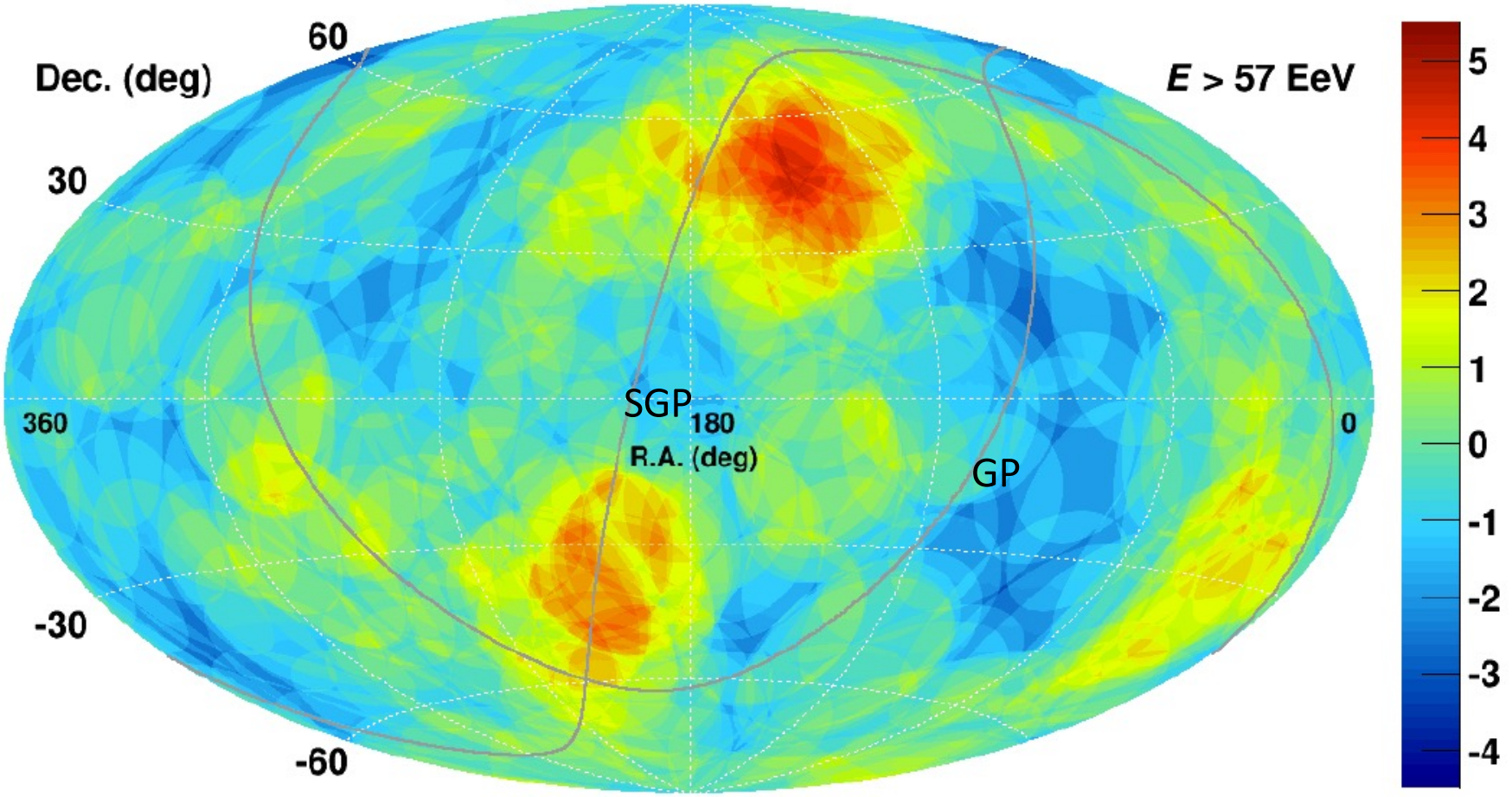
3000 km² 地表検出器
4箇所に大気蛍光望遠鏡





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

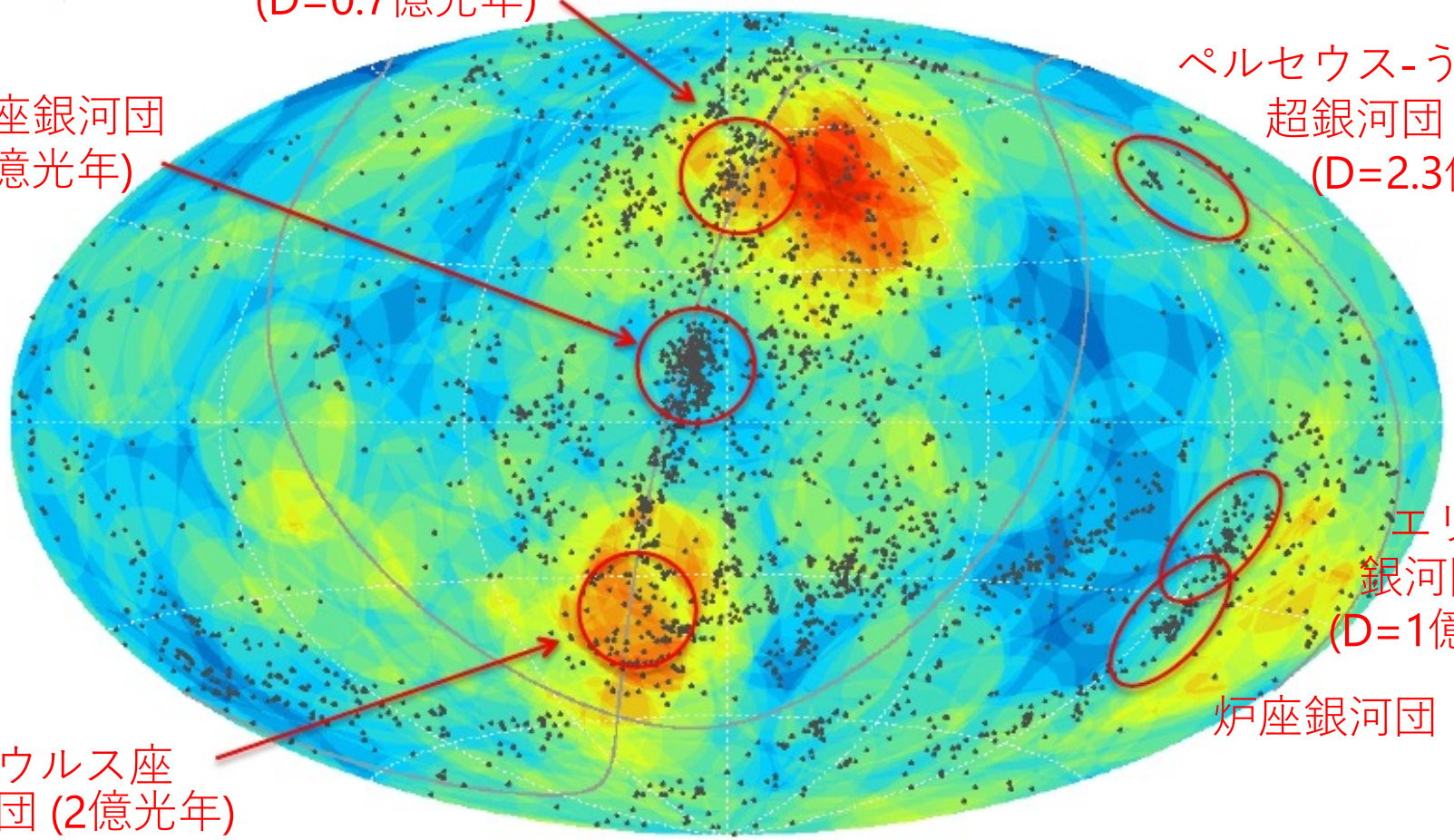


TA　（北天）　7年間 109事象：TAホットスポット　　5.1σ

Auger （南天）10年間 157事象：Auger ウォームスポット ~3.6σ

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）

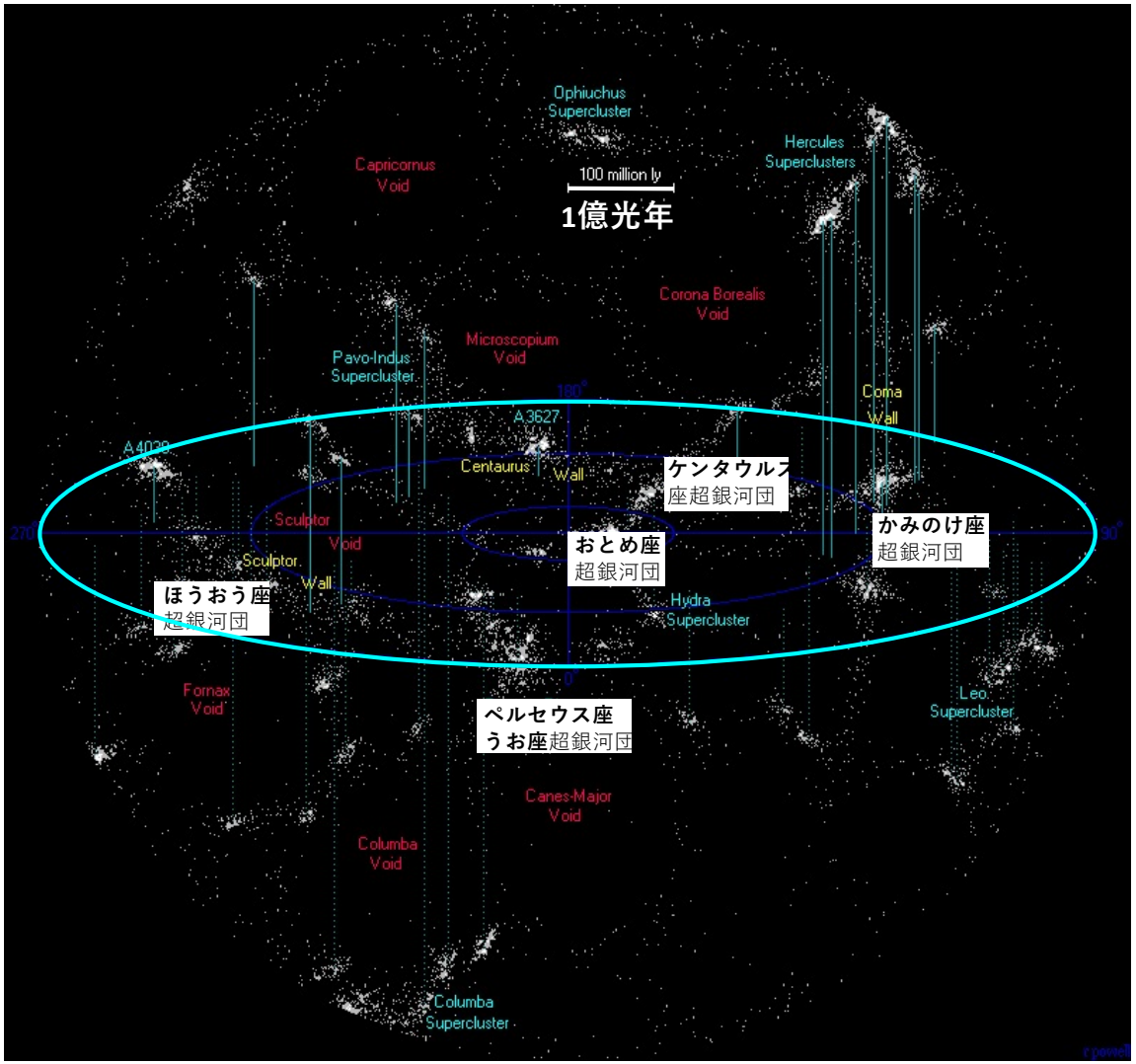


Huchra, et al, ApJ, (2012)

(黒点・) : 2MASS カタログの銀河 (D<~1.5億光年)

近傍銀河との相関はある？ない？ => TA拡張計画進行中

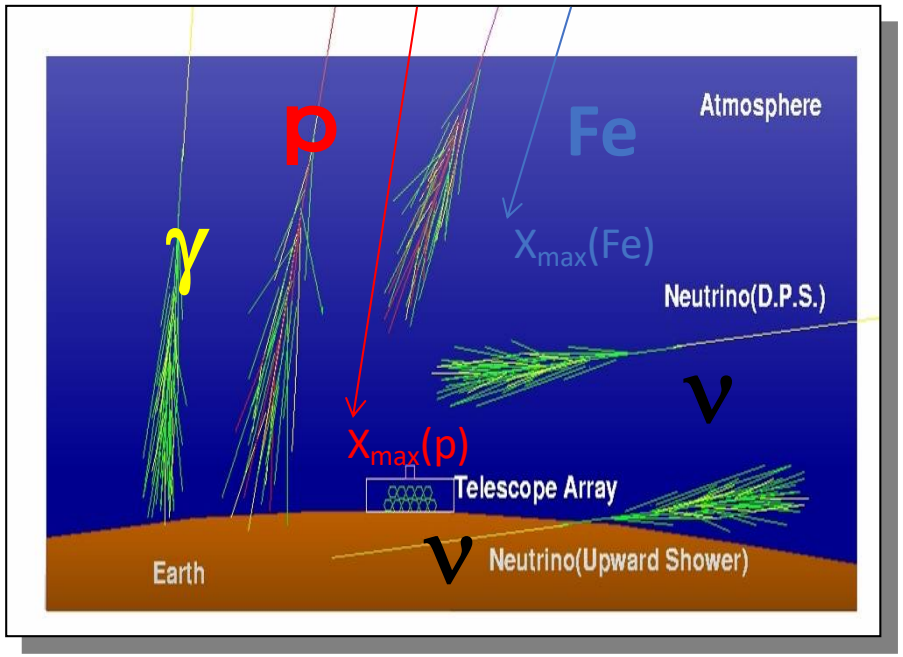
超銀河面


Ophiuchus
Supercluster
Capricornus
Void
100 million ly
1億光年
Hercules
Superclusters
Corona Borealis
Void
Microscopium
Void
Pavo-Indus
Supercluster
Coma
Wall
A3627
A4038
Centaurus
Wall
ケンタウルス
座超銀河団
Sculptor
Void
おとめ座
超銀河団
かみのけ座
超銀河団
Sculptor
Wall
ほうおう座
超銀河団
Hydra
Supercluster
Fornax
Void
ペルセウス座
うお座超銀河団
Leo
Supercluster
Canes Major
Void
Columba
Void
Columba
Supercluster

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

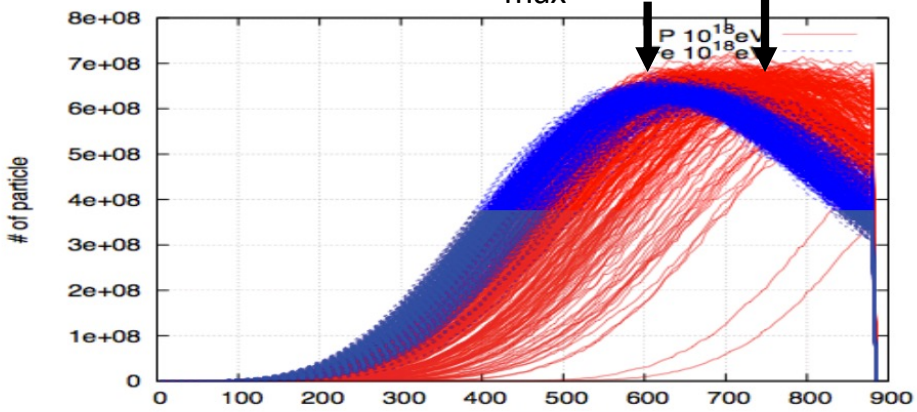
空気シャワー最大発達深さによる粒子種の同定



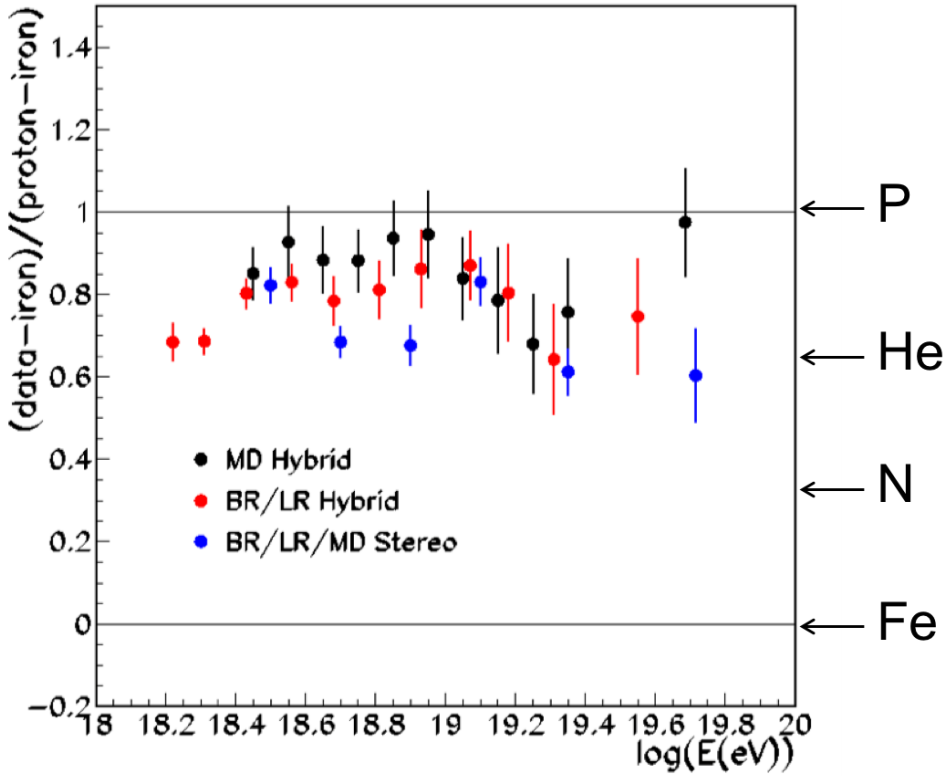
粒子によって大気中に突っ込む深さが違う
深い順に、ニュートリノ、ガンマ線、陽子、鉄…

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

最大発達深さX_{max} 鉄 陽子



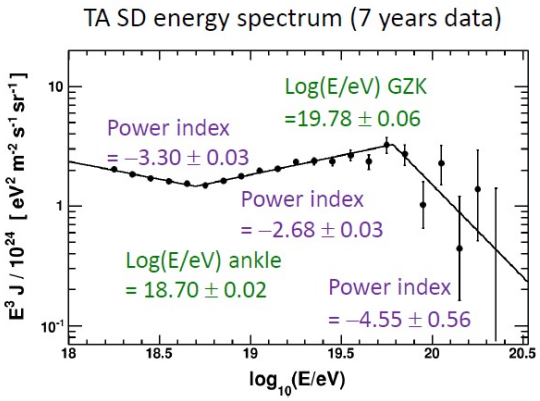
大気の深さ (g/cm²)

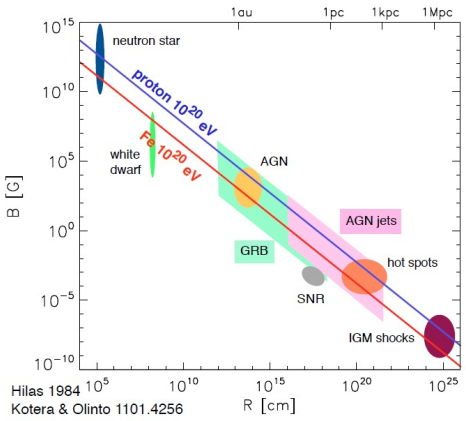


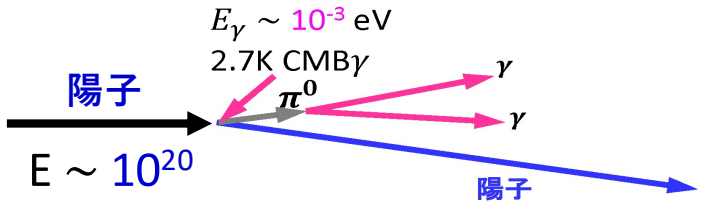
陽子もしくは軽い原子核!! 起源天体の環境と伝搬過程の情報

なんで10^{20}eVなんだろう？

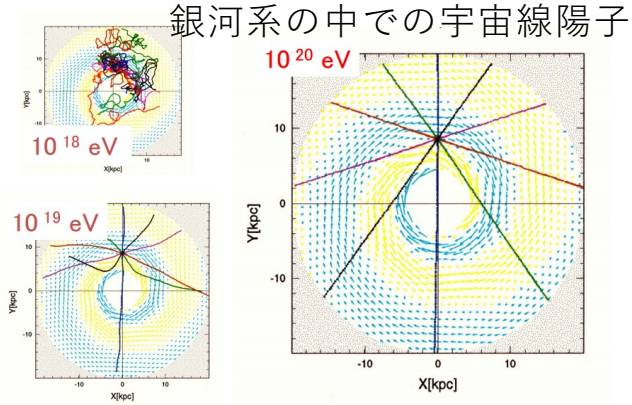
- 観測されている最高エネルギー（技術的最先端）
- 既知の天体の加速限界エネルギー(Hilas plot)
- GZK効果（CMBとの衝突）が現れるエネルギー
- 宇宙磁場内を直進できるエネルギー







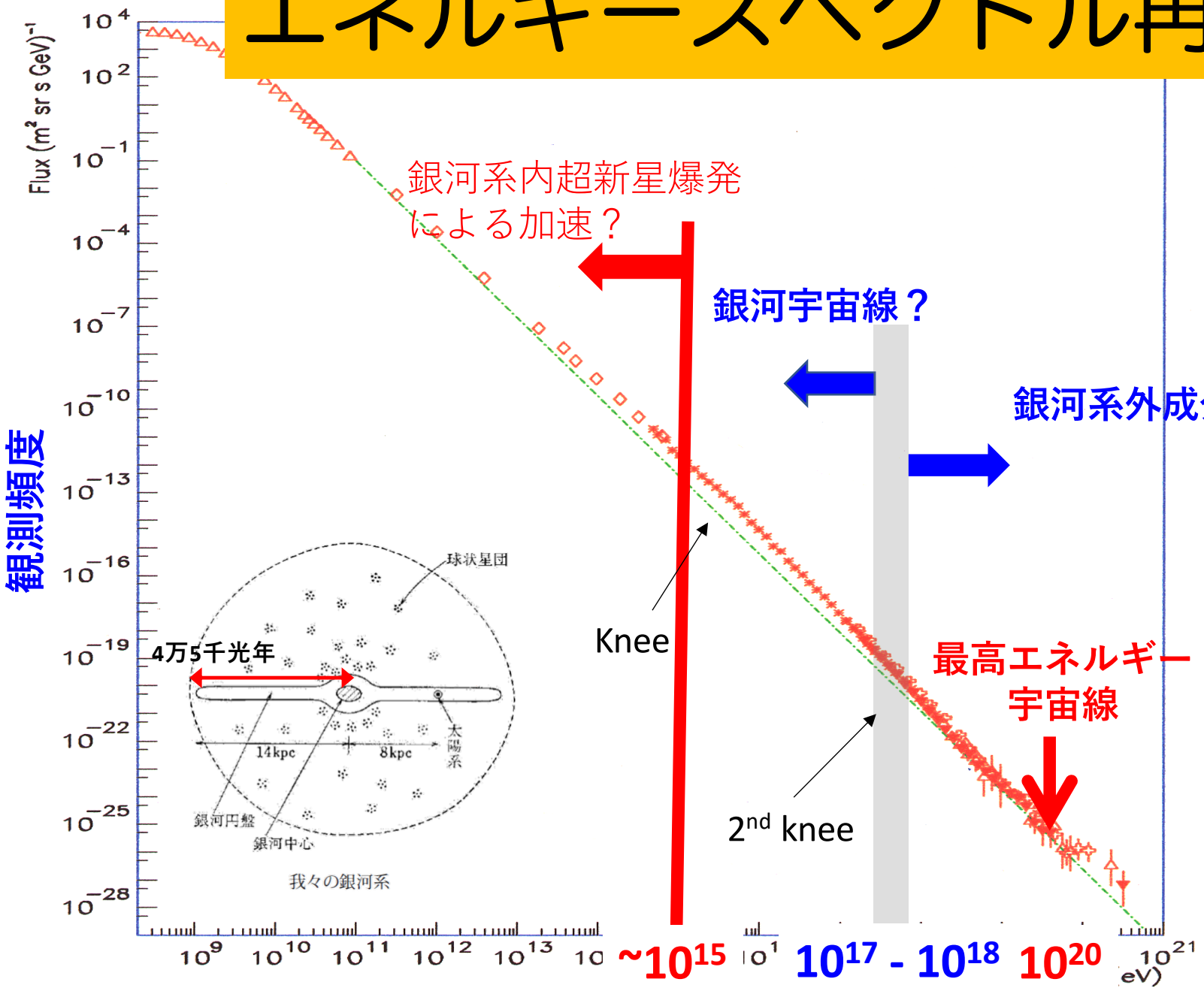
銀河系の中での宇宙線陽子の運動



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）

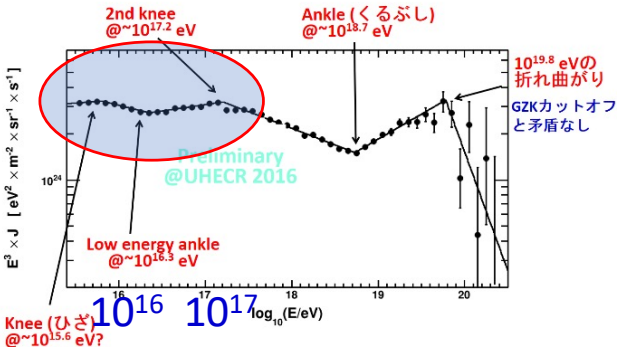
エネルギースペクトル再考



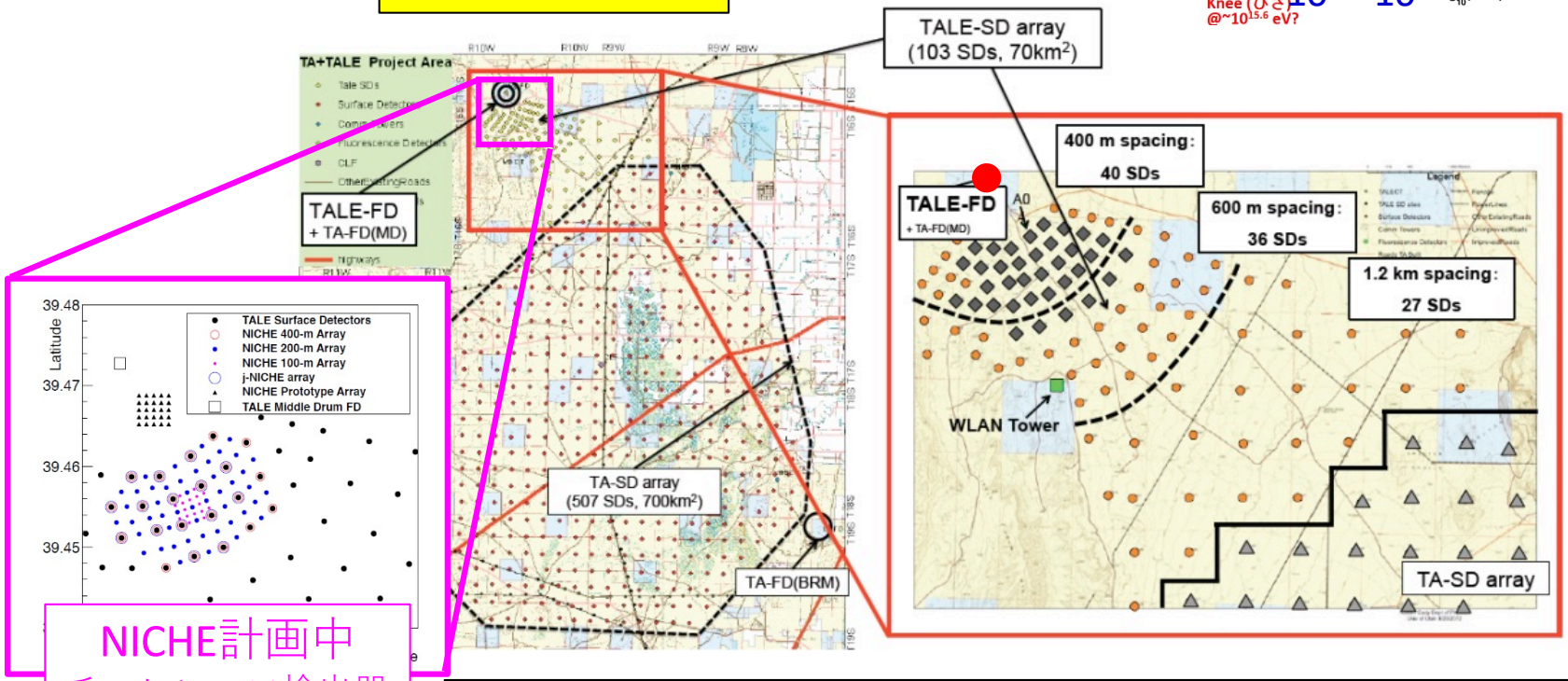
TA低エネルギー拡張（TALE)

- 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

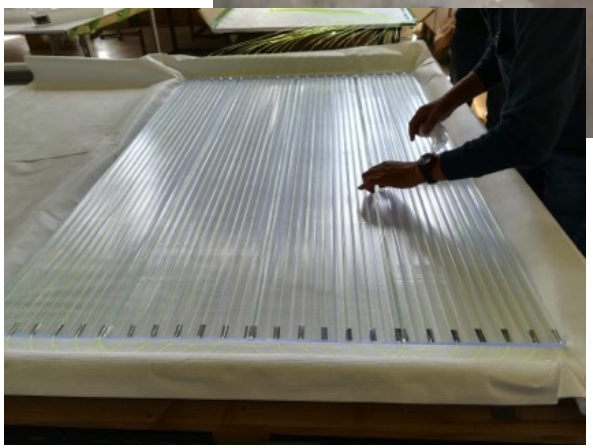
さらに低エネルギーを目指すTALE infillを2022年度に設置予定

TALE infill 検出器製作







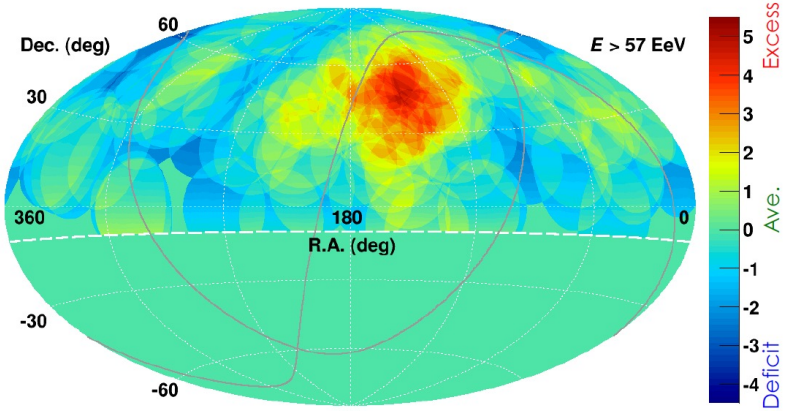


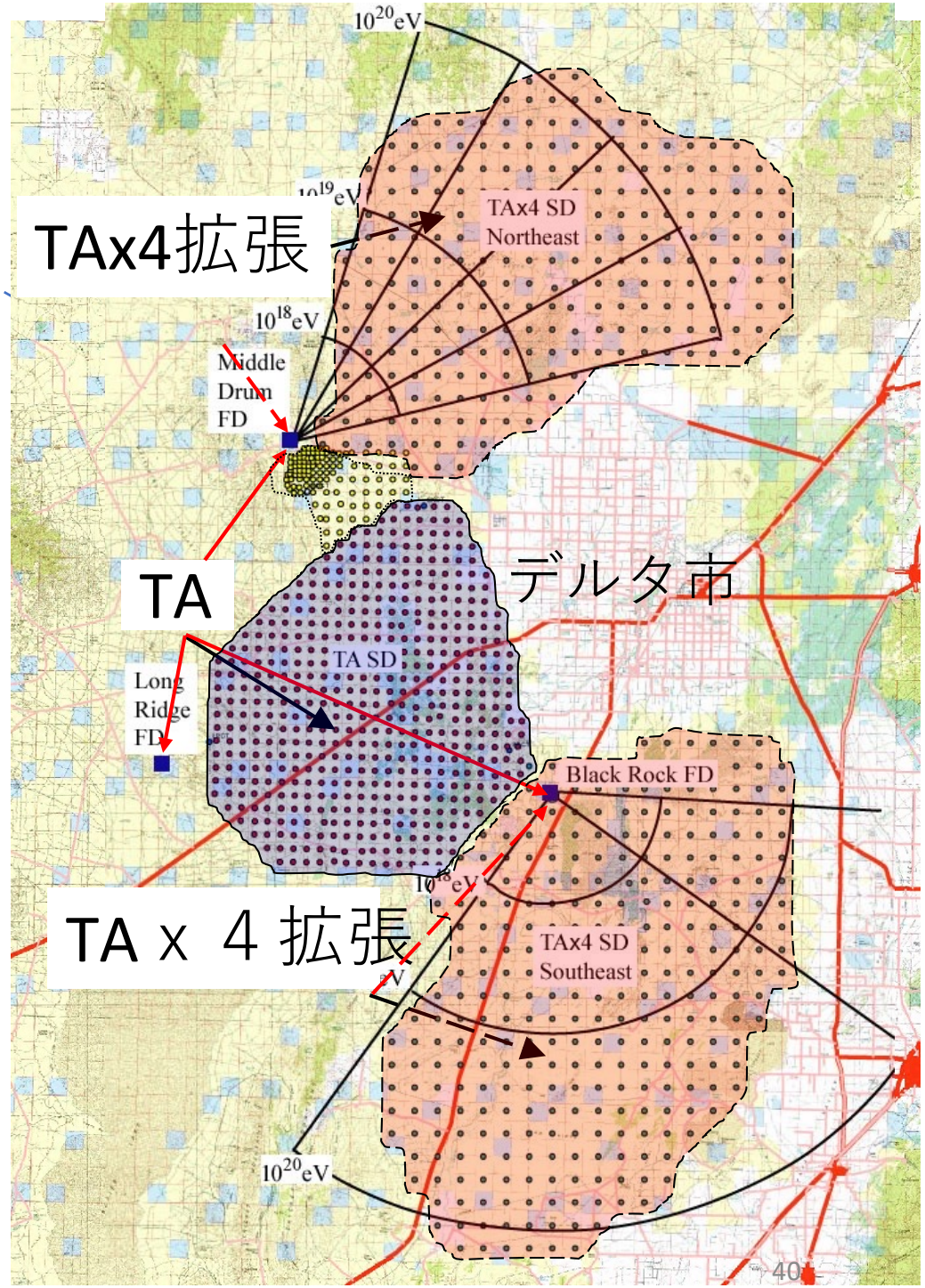


2021年10-11月に山梨県の宇宙線研究所明野観測所に全国の共同研究者が順番に集まって50台の新しいSDを製作しました。2022年度にTAサイトに設置予定。

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

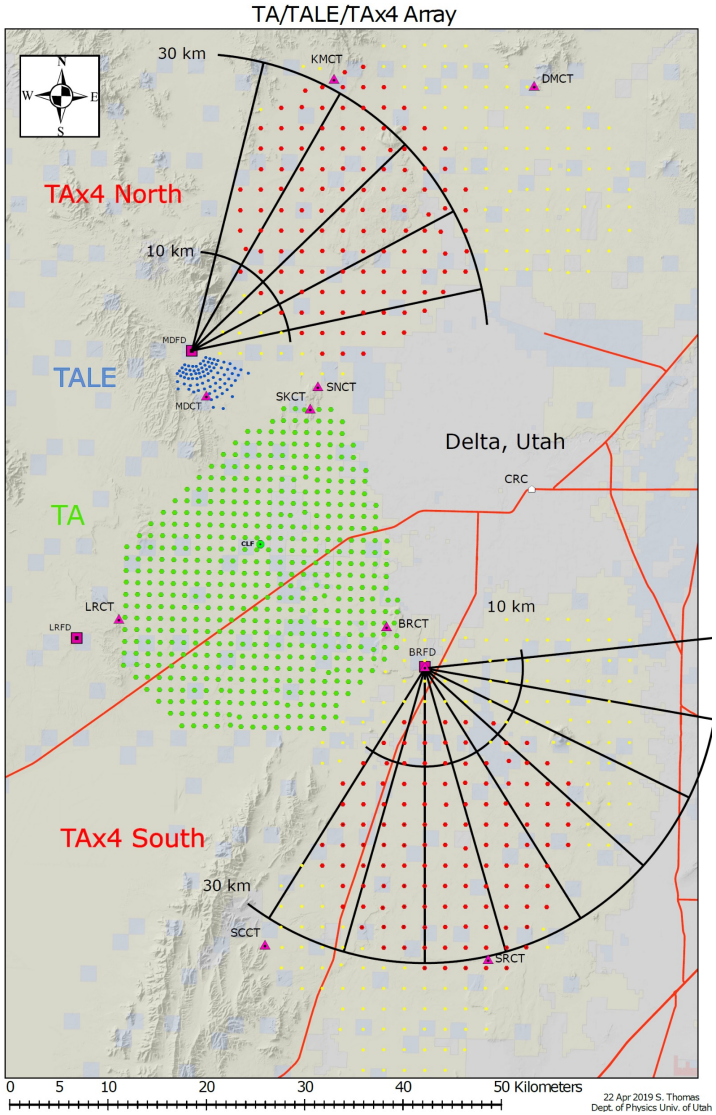


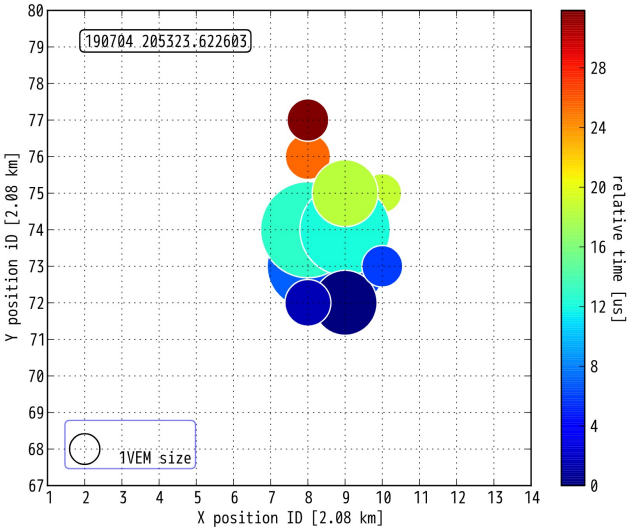


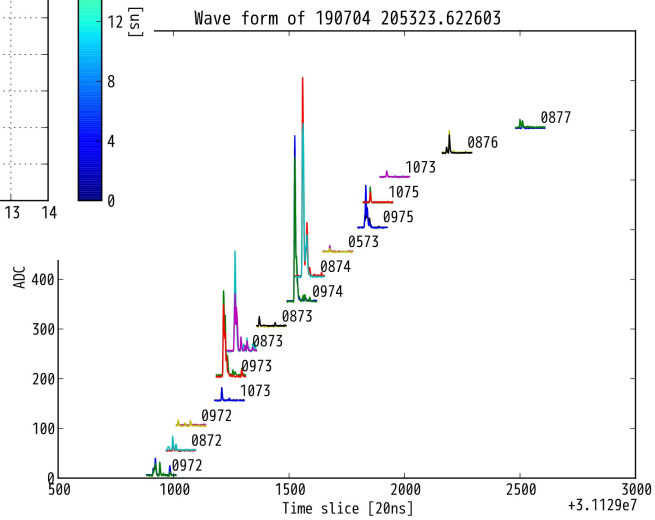
TAx4 の設置



TAx4による空気シャワーデータ





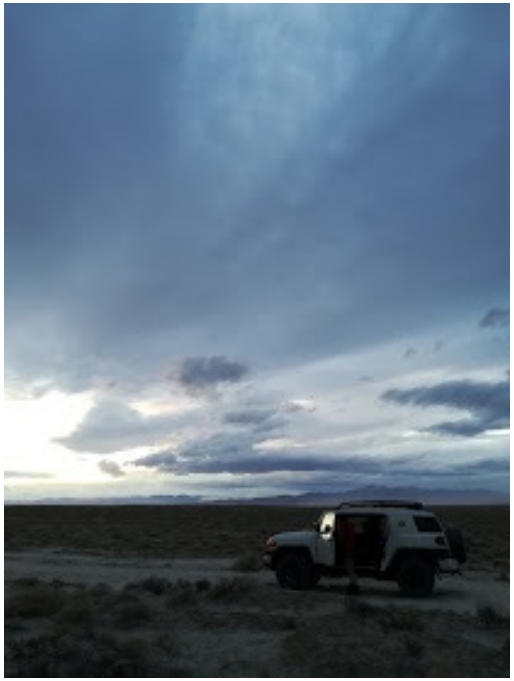


- 予定の半分の設置完了 (257 SDs)
- 安定したデータ収集継続
  - 宇宙線事象の蓄積
  - 解析進行中











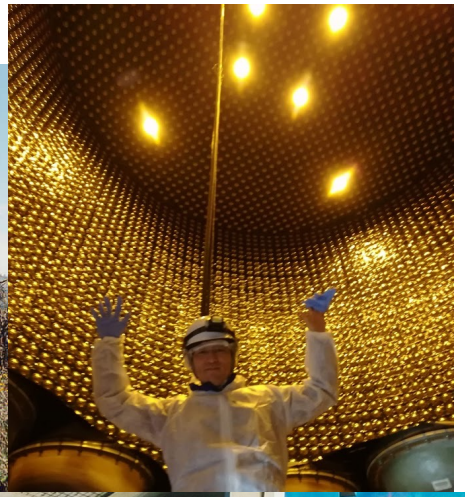




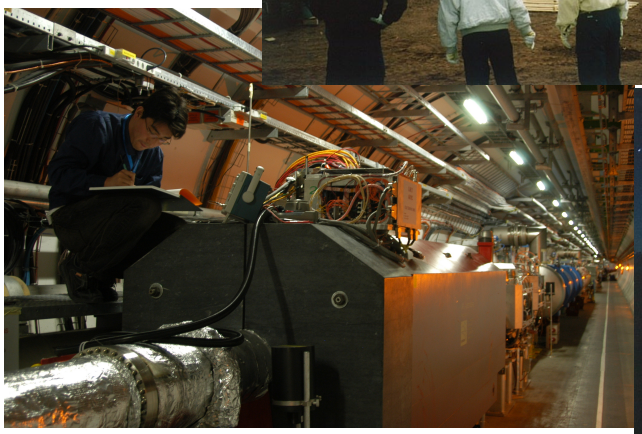
ユタでの生活

宇宙線研究者の生活









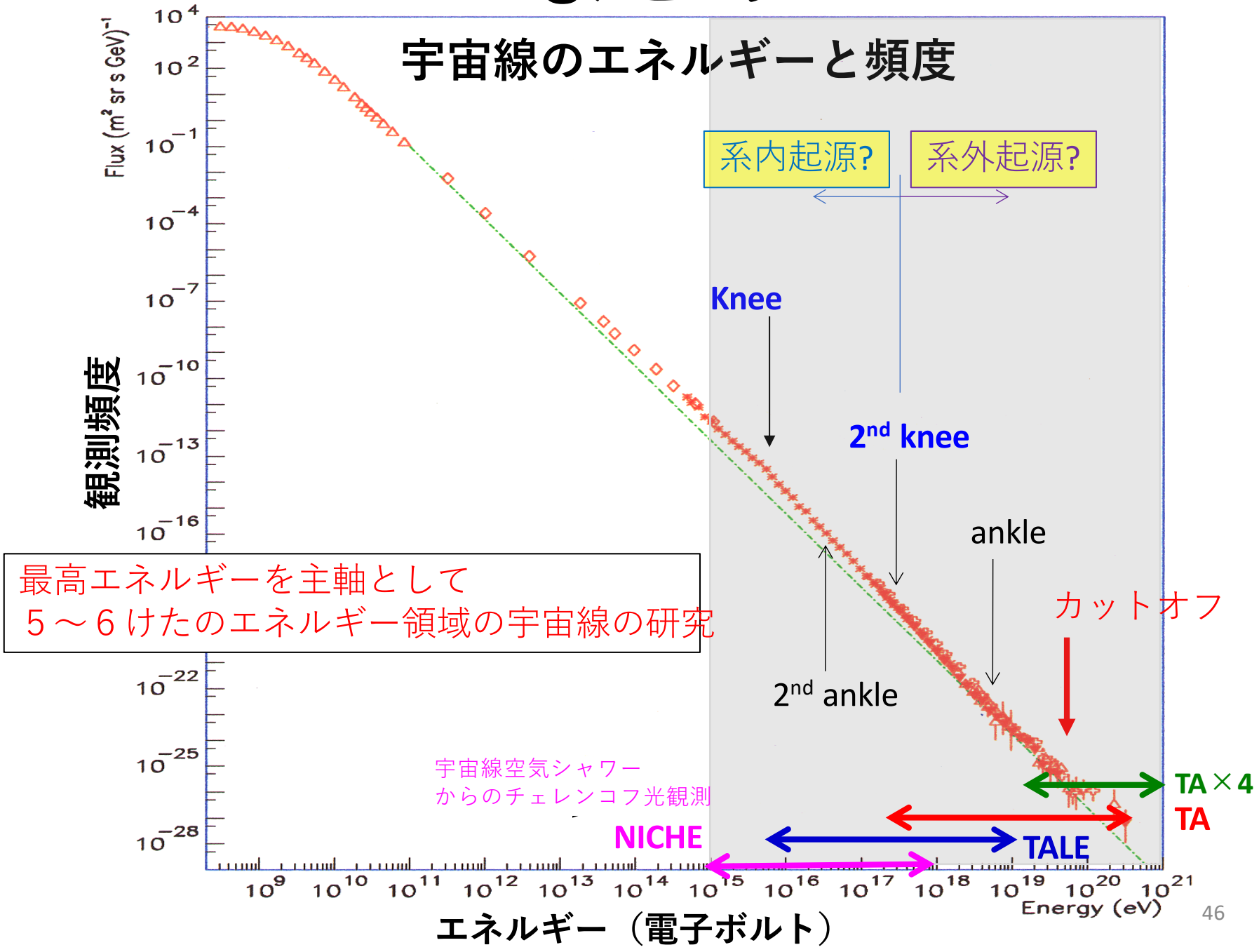
まとめ

- 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極限環境宇宙現象を探る手段である
- 到来頻度の低い高エネルギー宇宙線を観測するには地球大気を検出器にした「空気シャワー」を利用する
- 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実験が発見した到来方向の集中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実験が始まっている
- 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TALEも進めている

宇宙線研究は地球環境を観測装置にして宇宙の極限現象に挑み続ける

～砂漠・高山・地下・南極・海底・・・～

まとめ


宇宙線のエネルギーと頻度
系内起源?
系外起源?
Knee
2nd knee
ankle
2nd ankle
カットオフ
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
TALE
TA
TA×4
観測頻度
Flux (m² sr s GeV)⁻¹
エネルギー（電子ボルト）
Energy (eV)

TALEサイトへの装置の設置





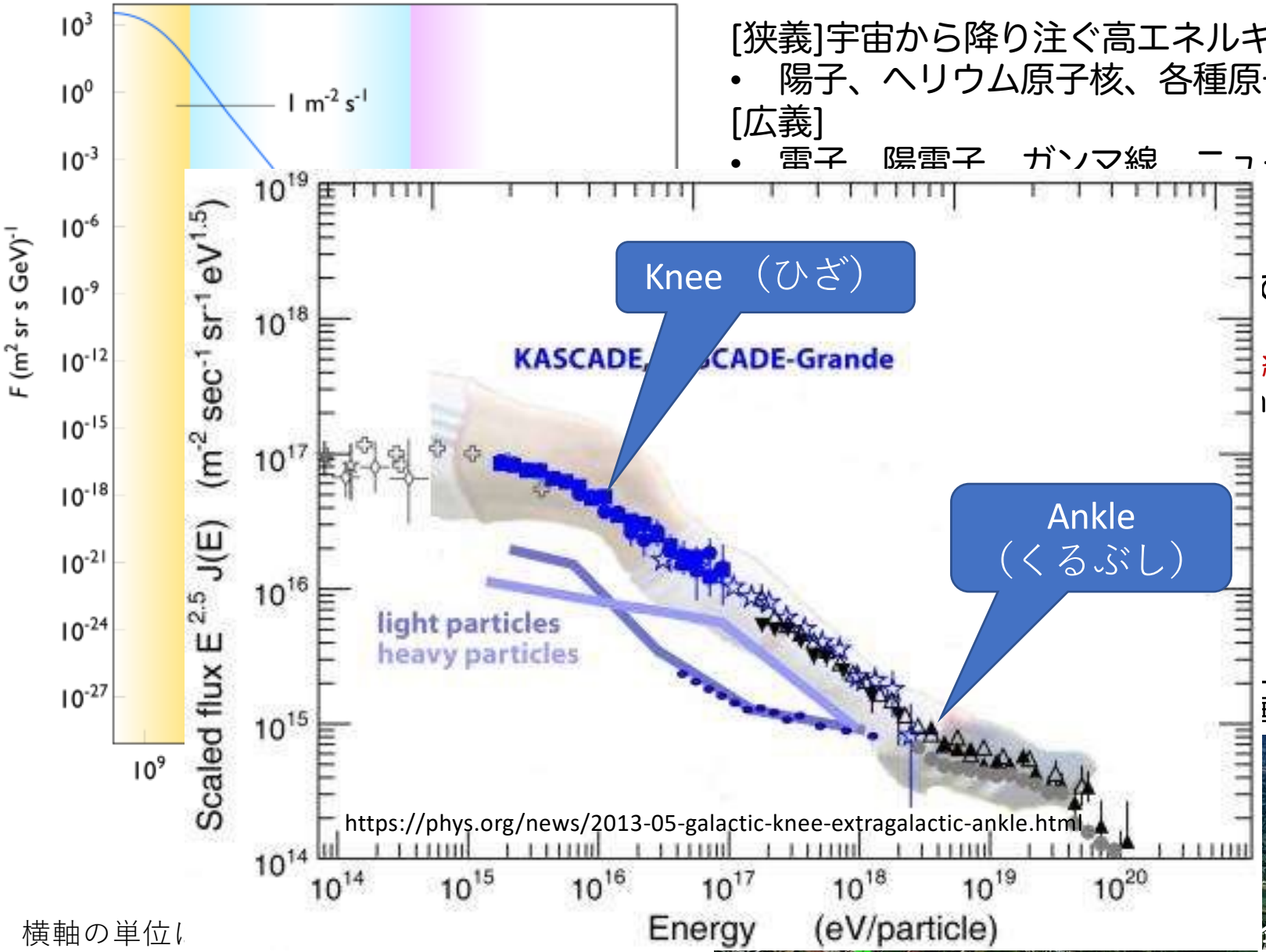




1ページで学ぶ「宇宙線とは？」

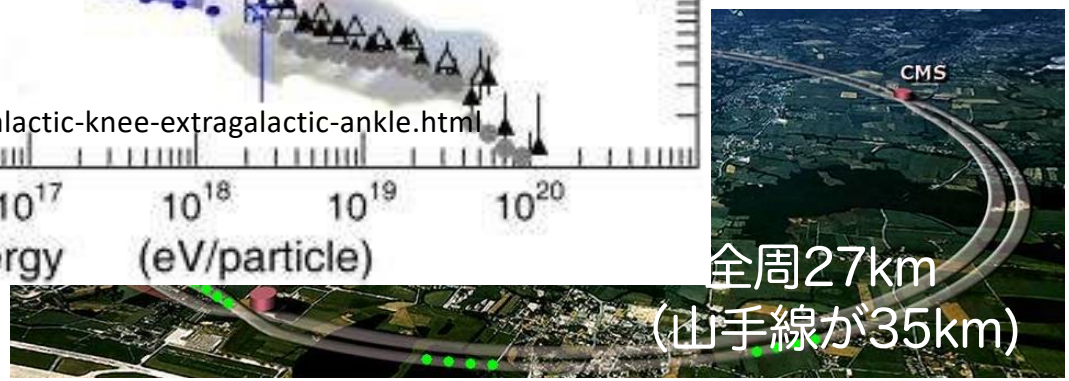
[狭義]宇宙から降り注ぐ高エネルギー放射線
- 陽子、ヘリウム原子核、各種原子核

[広義]
- 電子　陽電子　ガンマ線　ニュートリノ



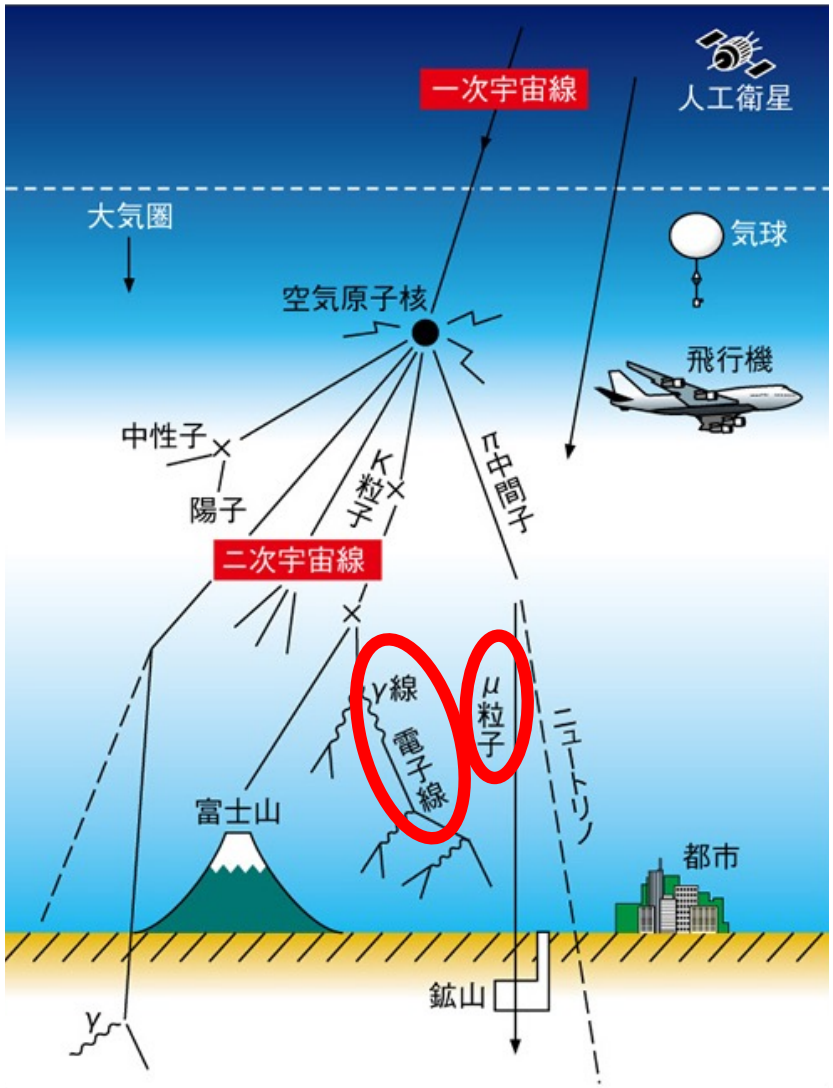
てくる
[注：大気の外]
約 1/1000
m^2に年に一個)
10^{12}eV

.HC
国境)

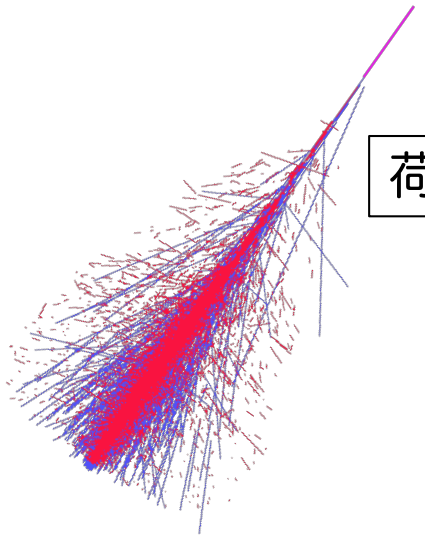


横軸の単位は
1eV = 電子を1Vで加速した場合のエネルギー
= 1.6×10^{-19} J (ジュール)

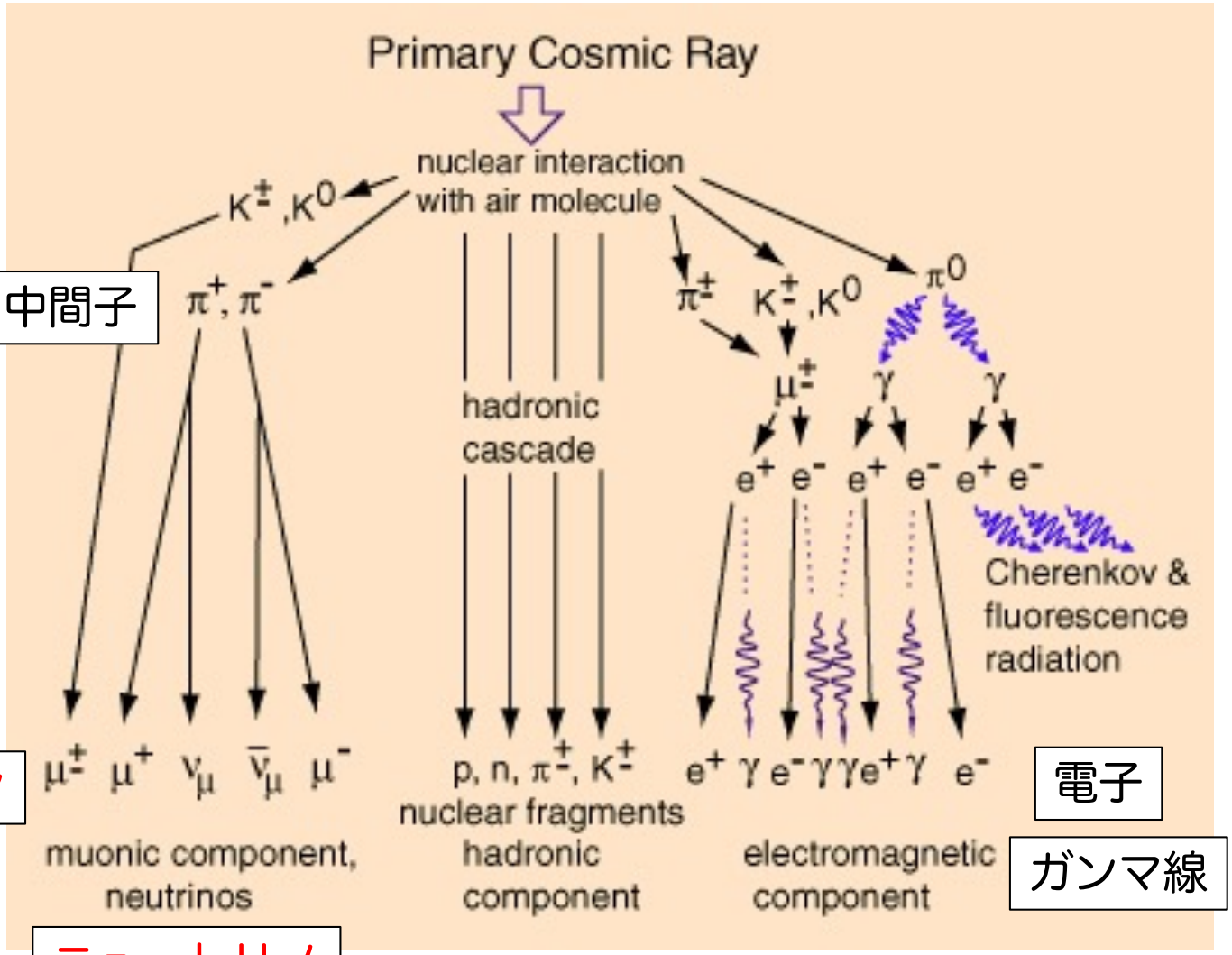
超高エネルギー宇宙線と空気シャワー



空気シャワー



荷電π中間子



ミューオン

電子

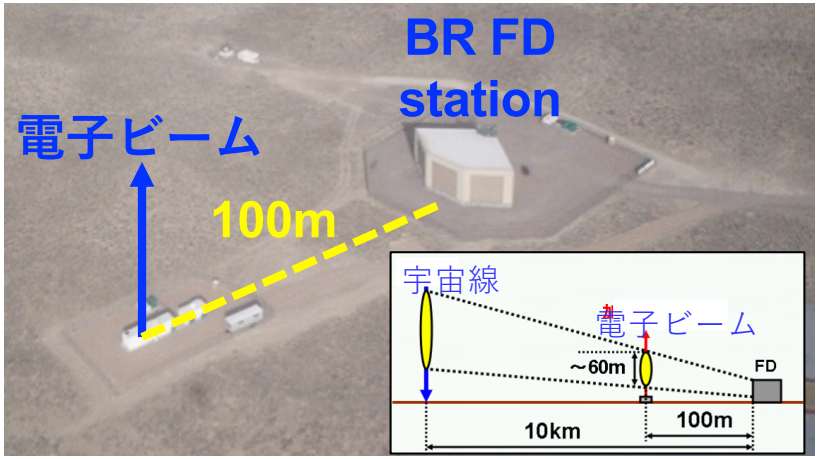
ガンマ線

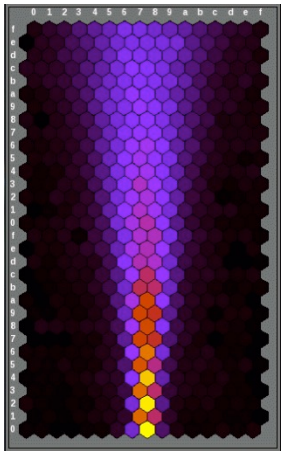
ニュートリノ

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

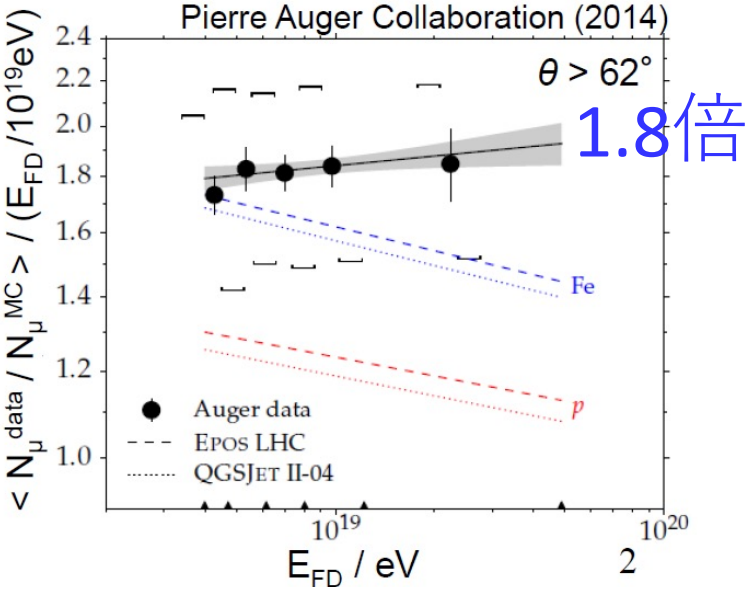
- MC データ
  - シャワー生成
    - Geantシミュレーション
  - FD シミュレーション・再構成
    - TA オフラインソフトウェア

・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



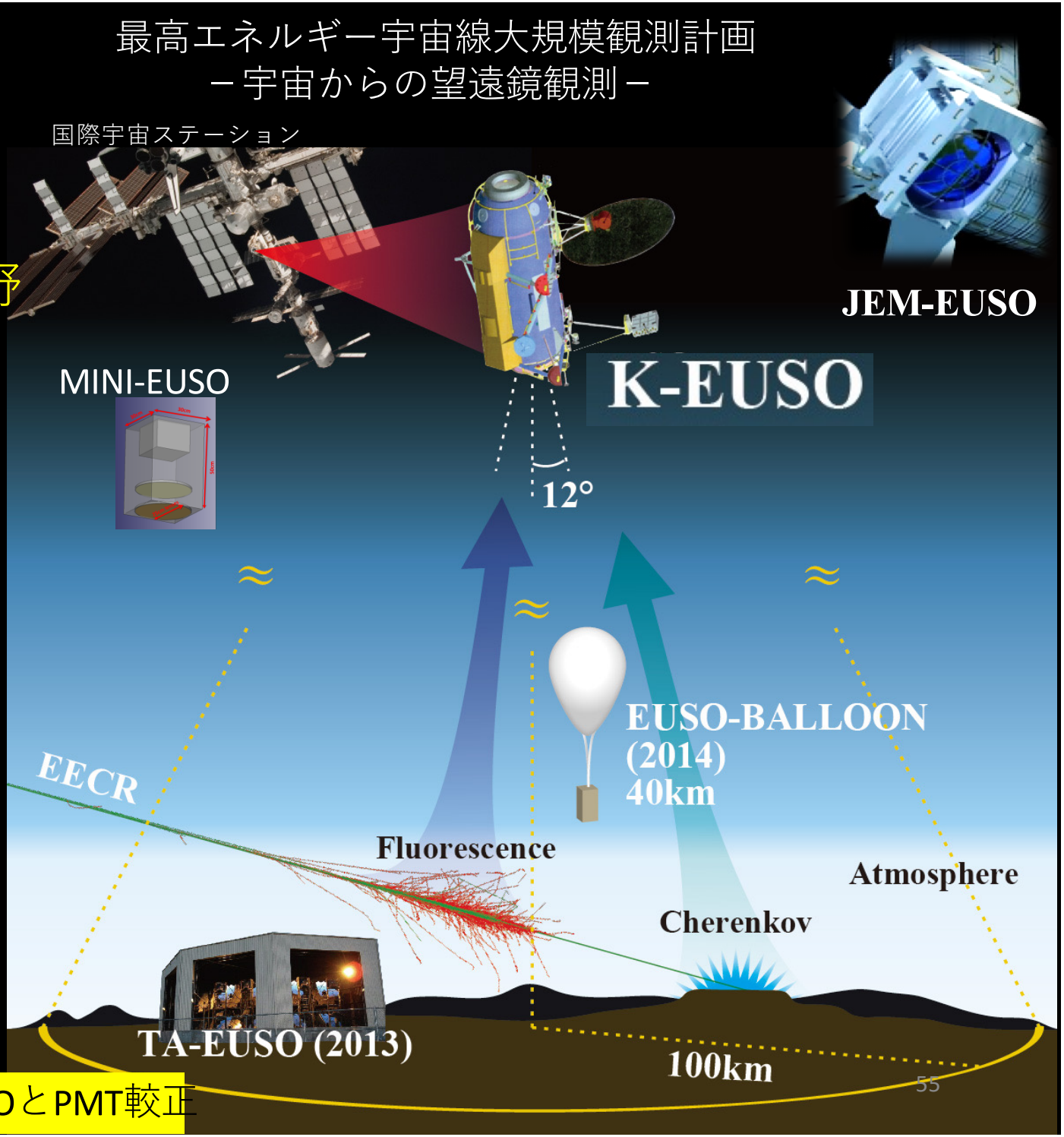
TAの空気シャワー事象と同期したAuger水タンクの信号取得！

The EUSO program

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－

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+)**



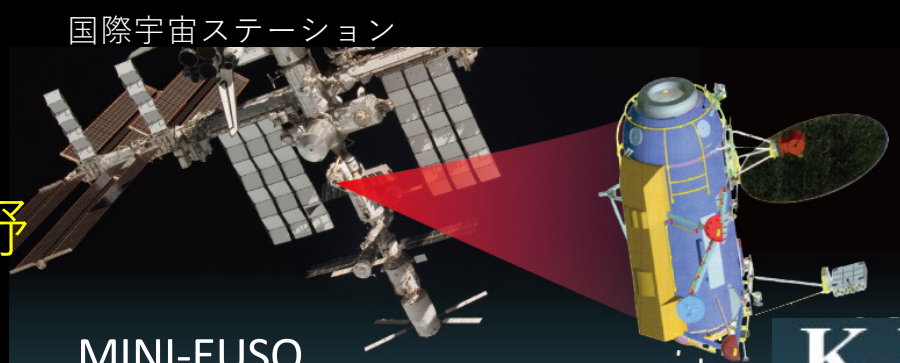
宇宙線研も参加：TA-EUSOとPMT較正

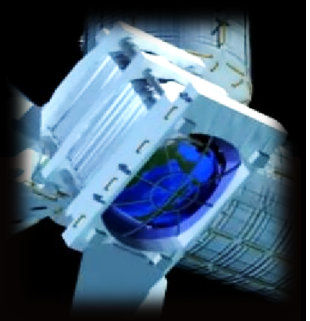
The EUSO program

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－

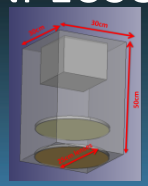
大統計(TAx4の2倍)
全天ほぼ一様な視野

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+)**

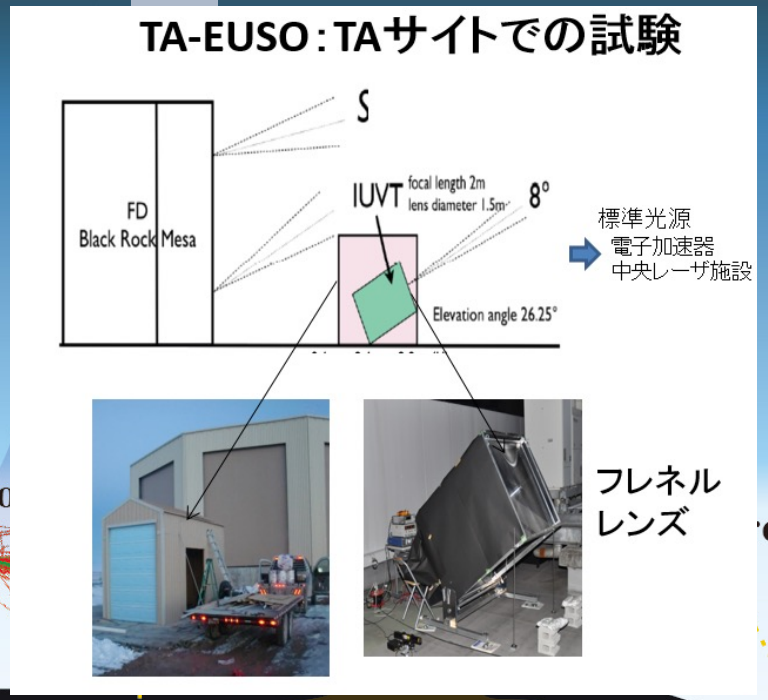




MINI-EUSO



K-EUSO



EECR

Fluo

TA-EUSO (2013)

100km

宇宙線研も参加：TA-EUSOとPMT較正

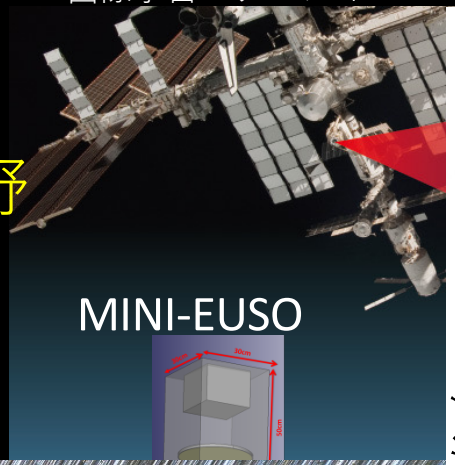
The EUSO program

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－

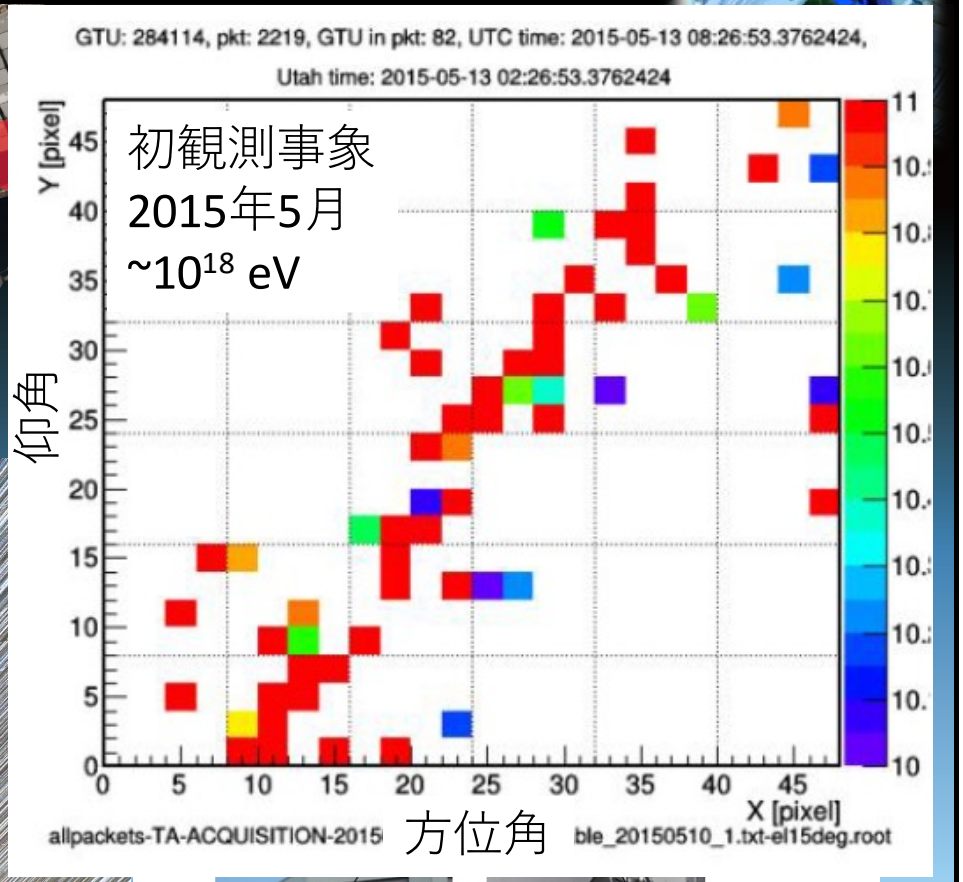
大統計(TAx4の2倍)
全天ほぼ一様な視野

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

国際宇宙ステーション



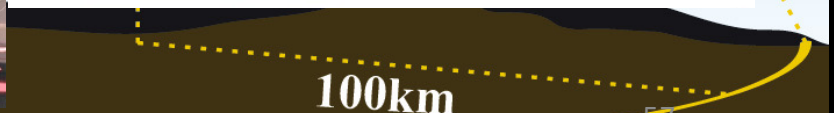








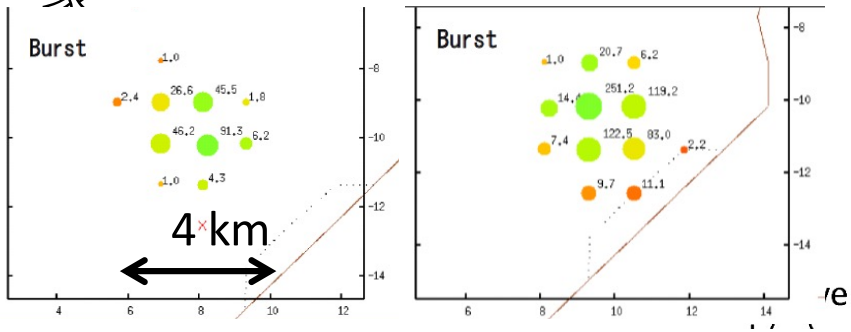
フレネル
レンズ



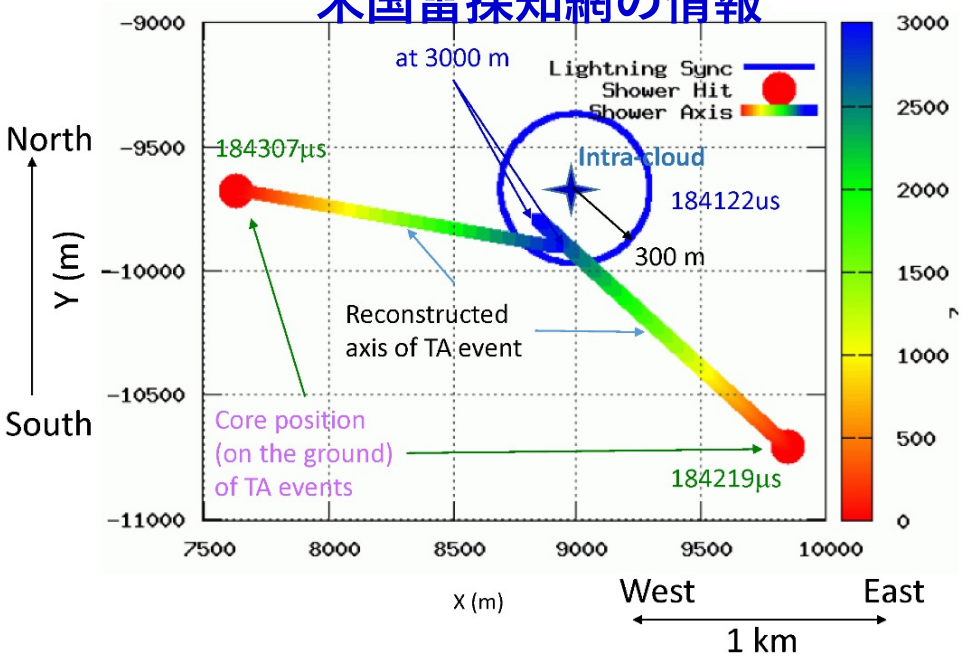
宇宙線研も参加：TA-EUSOとPMT較正

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



米国雷探知網の情報



- 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

