

The measurement of the highest-energy cosmic ray energy spectrum with the extended surface detector array of the Telescope Array experiment

#### (TA 実験拡張地表検出器アレイによる 最高エネルギー宇宙線エネルギースペクトルの測定)

- 2024年3月博士課程修了 (東京大学理学系研究科物理学専攻,宇宙線研究所)
- 現在: Institute of Physics, Academia Sinica

#### 藤末 紘三(ふじすえ こうぞう)





1912年: V. Hessの気球実験 (宇宙線の発見) 1960年代: E > 10<sup>18</sup> eV **の宇宙線 (UHECR)** 初観測 推定 E > 10<sup>20</sup> eV 以上のUHECRも観測

発見から60年以上たった現在もその起源は未だ不明









1912年: V. Hessの気球実験 (宇宙線の発見) 1960年代: E > 10<sup>18</sup> eV の宇宙線 (UHECR) 初観測 推定 E > 10<sup>20</sup> eV 以上のUHECRも観測

発見から60年以上たった現在もその起源は未だ不明
・ 観測的な難しさの一つ: low flux

Telescope Array (TA) 実験: Obs. area ~700 km<sup>2</sup>, started obs. in 2008









HECR

UHECRの観測: 空気シャワー観測

UHECRが大気原子核とぶつかり 生成される空気シャワーを地上で観測

https://www.hisparc.nl/oud/fileadmin/HiSPARC/ werk van stydenten/UHECRs-thesis-JDHaverhoek.pdf



SD array

- ・UHECRによる空気シャワー観測の2つの手法:
  - ・地表検出器 (Surface detector, SD)アレイ
  - •大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence detector, FD)
- ・SD: 空気シャワー粒子の**横方向分布**を観測
  - $\bigcirc$  duty cycle ~ 100%
  - × エネルギー推定がシミュレーション依存
  - × 縦方向発達を直接観測できない (質量組成に直接感度を持たない)
- ・FD: 空気シャワーの縦方向発達を大気蛍光で観測
  - カロリーメトリックにエネルギー推定できる
  - 空気シャワー最大発達から質量組成を 推定できる
  - × バックグラウンドのない、晴れた月・雲のない夜 の時のみ観測できる → duty cycle ~ 10%

SDとFDで相補的にUHECR観測

& SD-FD同時観測も可能

→高精度測定 + FDを用いたSDの較正



#### Telescope Array (TA) 実験

- ・アメリカ、ユタ州の砂漠(高度1,400 m) に位置する北半球最大の 空気シャワー観測施設
- ・507 **SD**s (1.2 km spacing) 観測面積: ~ **700 km**<sup>2</sup>
- 3 FD stations
   SDアレイに観測視野が重なる
   → SD-FD同時観測が可能
- ・2008年に観測開始



背景

#### TA×4実験のモチベーション: 到来方向異方性 (TA hotspot)



- TA 実験は5年間の観測で、
   E > 5.7×10<sup>19</sup> eVにおける
   中スケールの異方性の兆候(3.4σ)
   を観測 (TA hotspot)
  - ・UHECR起源解明に向けた 手がかり
- → TA hotspotの存在の確証と その起源を知るため、 さらなる統計が必要 → 観測面積の拡張 (TA×4実験)

#### **背景** TA×4実験のモチベーション:最近の話題(1) TA/Augerエネルギースペクトルの違い



背景





#### 背景 TA×4実験のモチベーション: 最近の話題 (2) E > 10<sup>20</sup> eV の宇宙線観測・解析



E>10<sup>20</sup> eV の宇宙線到来方向分布に 明かな異方性はない

10

→最高エネルギー宇宙線の 重い質量組成を示唆?

TA collaboration, PRL 133 (2024) 041001

 $E = 244 \pm 29$  (stat.)  $^{+51}_{-76}$  (sys.) EeVO宇宙線観測 (Amaterasu particle) TA collaboration, Science 382, 903-907 (2023)

鉄を想定してbacktrackしても 到来方向近傍に有力な起源天体なし

• transient? M. Unger & G. Farrar, ApJL 962, 1 L5 (2024) G. Farrar, arXiv:2405.12004

ultra-heavy UHECR?

B. Zhang et al., arXiv:2405.17409

TA実験は10<sup>20</sup> eV以上の 宇宙線イベントを~30イベント観測

### 背景 TA×4実験

TA×4 実験: 最終的には観測面積をTA実験の4倍にする計画

- ・2019年、最終目標の約半分(257台)のSDを建設、観測開始

   <u>
   **この拡張したアレイをここでは TA×4 SD array と呼ぶ** <u>
   (拡張部分は TA×1.5 の面積)
   </u>

  </u>
  - ・最高エネルギー観測に特化するため、検出器間隔が TA実験より広い (TA SD array: 1.2 km, TA×4 SD array: 2.08 km)





#### TAX4SD $ilde{}$ $ilde{}$





The Telescope Array Collaboration, NIM A 1019, 165726 (2021)

- ・基本的なデザインはTA SDと同じ
  - ・2層のプラスチックシンチレーター (厚み: 1.2 cm)
     で空気シャワー粒子を検出
    - ・両層のコインシデンスで波形を記録
  - ・各層で光ファイバーによりPMTにシンチレーション光 を集光
  - ・50 MHz (= 20 ns / time-bin)の FADCでPMT信号をデジタル化

TAX4 SD array トリガーシステム



サブアレイ毎のトリガーシステム

イベント再構成

## ① <u>SDのヒットタイミング</u> → 到来方向 (天頂角, 方位角)、シャワーコア位置決定 (空気シャワー面の関数形は TA SD arrayと同じ)



イベント再構成

#### ②横方向粒子数分布 → \$800 (シャワー軸から800 mでの粒子数密度)

③ エネルギー推定





天頂角

 $\theta = 49^{\circ}$ 

 $\theta$  [deg]

エネルギースケール

- ・SDのエネルギー推定はハドロン相互作用モデル依存
- ・<u>FDは大気蛍光からカロリーメトリックにエネルギー推定</u> (ハドロン相互作用モデルへの依存が小さい)
- ・<u>SD-FD同時観測イベントを用いて</u>、 E<sup>QGSJET II-03,p</sup>/f = E<sub>FD</sub> なるスケールを求める → TA SDの場合、 f = 1.27
- ・TA×4 SDでは異なるハドロン相互作用モデルを使用: QGSJET II-**04**   $\rightarrow$  TA×4 SDのエネルギースケール  $f_{TA\times4SD}^{QGSJET II-04,p}$ を決める必要あり しかし、高いエネルギー閾値 + 観測期間の短さよりSD-FD同時観測イベントが少なく、

TASDとは異なる方法で求めることが必要

・本研究では、新たにエネルギースケール f<sup>QGSJET II-04,p</sup>を決定する手法を開発: TA SDの測定したエネルギースペクトルを基にエネルギースケールを決定



エネルギースケール - TA×4 SDの場合-

- ・TA SDエネルギースペクトラム: E<sub>FD</sub>
- ・MCで計算するトリガー効率: Egen(シミュレーション内の空気シャワー生成時のエネルギー)

 $E_{FD} = E_{TA \times SD}^{QGSJET II - 04, p} / f_{TA \times 4SD}^{QGSJET II - 04, p} = E_{gen} / f_{TA \times 4SD}^{QGSJET II - 04, p}$ 

$$N_{MC}(f) = \int \frac{dN(E_{FD})}{dE} × A\Omega T × ε(E_{ger}) dE_{gen} \leftarrow TA SDスペクトルを基C$$
  
計算したイベント数はエネルギースケール f 依存  

$$= \int \frac{dN(E_{gen}/f)}{dE} × A\Omega T × ε(E_{gen}) dE_{gen}$$





N<sub>MC</sub>(f)を実際に観測されたイベント数(N<sub>Data</sub>)と比較 → 両者が一番よく一致するスケールを f<sup>QGSJET II-04,p</sup> を決定

17

 $f_{TA \times 4 SD}^{QGSJET II-04,p}$ =1.36±0.05

イベント選択条件

#### エネルギースケール決定,および以降の 解析で用いるイベント選択条件

- ・ $N_{SD}(フィットに使われたSD数) \ge 5$
- ・再構成フィットの  $\chi^2$ /ndof  $\leq 4$
- ・ $\sigma_{dir}$ (到来方向の不確かさ)  $\leq 6^{\circ}$
- ·  $\sigma_{s800}/S800 \le 0.5$
- ・D<sub>border</sub>(アレイの端からの距離) ≥ **400** m ・天頂角 θ ≤ **55**°

(使用するパラメーターは TA SD arrayと同じ)

この手法で決定したエネルギースケールは イベント選別条件に依存しない



18

## 稼働率とApertureの関係



TA×4SD アレイはSD稼働状態が時間変動する+トリガーシステムの変更あり

CRCタウンミーティング - 2025年3月@宇宙線研

19

トリガーシステムの変化



### 稼働率とApertureの関係



各EpochにおけるAperture

SDの稼働状態&トリガーシステムによってApertureは大きく異なる → MC simulation が アレイ状態の時間変動も含めて観測データを再現する ことを確かめる必要あり

### Data/MC比較 稼働率、トリガーシステム毎に比較: Epoch-1



21

### Data/MC比較 稼働率、トリガーシステム毎に比較: Epoch-2



### Data/MC比較 稼働率、トリガーシステム毎に比較: Epoch-3 + Epoch-4



### Data/MC比較 稼働率、トリガーシステム毎に比較: Epoch-3+Epoch-4



### 最高エネルギー宇宙線エネルギースペクトル

 $F(E_i)$ 

 $= C_i \times -$ 

• TA×4 SD は エネルギー分解能がTA SDより悪い (E > 5.7 × 10<sup>19</sup> eV で TA SD: 13%, TA×4 SD: 28%)
 → Input スペクトルの関数形のみを仮定する Forward-folding手法 を導入

 $N_{rec}^{Data}(E_i)$ 

 $OT \vee c(F_{\rm c}) \vee \Lambda F$ 

・折れ曲がりなしのpower lawモデル(SPL)と折れ曲がりありのpower lawモデル (1-BPL) を比較

<u>これまでの TA SD array の計算手法</u>

・HiRes実験の測定したエネルギースペクトルを基に bin-to-bin migration の効果(*c<sub>i</sub>*)を計算 <u>今回の計算手法 (Forward-folding 手法</u>)

 ・宇宙線エネルギースペクトルの関数形のみ仮定 (パラメーターはフリー)
 → 実データに対してbest-fitのパラメーターを決定

・Best-fit のエネルギースペクトルを基に bin-to-bin migration の効果(*c<sub>i</sub>*)を計算



Effective exposure (MCで計算)



TA×4 SD (3yrs)

・ 折れ曲がりのあるモデルの方が 折れ曲がりなしのモデルより preferされる

TA×4 SD arrayの測定した 宇宙線エネルギースペクトルは TA SDの過去の測定と無矛盾



CRCタウンミーティング - 2025年3月@宇宙線研

26



最高エネルギー宇宙線 エネルギースペクトル

#### TA SD + TA×4 SD combined spectrum

TA×4 SD (3yrs) + TA SD (14 yrs)



### TA hotpot の将来観測予想





E > 5.7 × 10<sup>19</sup> eV の最高エネルギー宇宙線の観測レートを 増大することを目的に TA×4実験がスタート

- ・2019年にTA実験拡張地表検出器アレイ (TA×4 SD array) の 最終目標の半分が拡張, 観測開始
- ・統計を増やすことで TAホットスポットやTA / Auger の 宇宙線スペクトルの違いを理解





(1) TA×4 SD解析



KF for TA collab., JPS meeting Sep. 2024

# (2) DNNによるTA SD波形情報を用いた宇宙線イベント再構成



A. Prosekin, KF, A. Fedynitch, and H. Sagawa for TA collab., UHECR2024





etc.

H. Dembinski, R. Engel, A. Fedynitch, and KF, UHECR2024