

# A PORTABLE ELECTRON LINEAR ACCELERATOR FOR ABSOLUTE ENERGY CALIBRATION OF ULTRA-HIGH ENERGY COSMIC RAY TELESCOPE

Tatsunobu Shibata\*<sup>A)</sup>, Yosuke Iino<sup>B)</sup>, Daisuke Ikeda<sup>A)</sup>, Mitsuo Ikeda<sup>C)</sup>,  
Atsushi Enomoto<sup>C)</sup>, Satoshi Ohsawa<sup>C)</sup>, Kazuhisa Kakihara<sup>C)</sup>, Yoshimi Kondo<sup>A)</sup>,  
Hiroyuki Sagawa<sup>A)</sup>, Masanori Sato<sup>C)</sup>, Tetsuo Shidara<sup>C)</sup>, Takashi Sugimura<sup>C)</sup>,  
Masaki Fukushima<sup>A)</sup>, Shigeki Fukuda<sup>C)</sup>, Kazuro Furukawa<sup>C)</sup>, Mitsuhiro Yoshida<sup>C)</sup>,  
Masoud Beitollahi<sup>D)</sup>, Karen Langely<sup>C)</sup>, John H. Matthews<sup>C)</sup>, Stan B. Thomas<sup>C)</sup>, Gordon B. Thomson<sup>C)</sup>,  
for the Telescope Array Collaboration

<sup>A)</sup>Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo  
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, Japan, 277-8582

<sup>B)</sup>Toyama Co.,Ltd.

13-16 Hibarigaoka-4, Zama, Kanagawa, Japan, 228-0003

<sup>C)</sup>High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 305-0801

<sup>D)</sup>University of Utah, Physics Department

115 South 1400 East, Salt Lake City, Utah, US, 84112-0830

## Abstract

Telescope Array experiment (TA) which observes ultra-high energy cosmic ray was started from 2008 at Utah State in U.S. We will calibrate the absolute energy scale of fluorescence detector with a portable electron linear accelerator (ELS) of beam intensity is  $40 \text{ MeV} \times 10^9 \text{ e-}$  per pulse. The ELS was developed in KEK, Japan, and was installed at the TA site in March 2009. In September 2010, we began operation of ELS, and FD observed the fluorescence photons from the air shower which was generated by the electron beam. In this article, we will report about the status of ELS operation, and data analysis.

## 超高エネルギー宇宙線観測用望遠鏡較正用小型電子線形加速器の運転

### 1. 超高エネルギー宇宙線 (UHECR)

宇宙線は地球に飛来する粒子や電磁波の総称である。その約90%が陽子であり、他にもヘリウムや鉄などの原子核や電子、陽電子が観測されている。宇宙線のエネルギーは10 MeV程度から $10^{20}$  eVに達する。 $10^{18}$  eV程度までの宇宙線は銀河系内の超新星残骸が発生起源であると考えられている。一方 $10^{18}$  eV以上は超高エネルギー宇宙線 (Ultra High Energy Cosmic Rays; UHECR) と呼ばれており、銀河系外の活動銀河核、ガンマ線バーストが起源であると考えられているが証拠は未だ得られていない。またUHECRの核種や加速機構、地球に到達可能なエネルギーの理論的上限 (GZK カットオフ<sup>[1][2]</sup>) などの基本的かつ重要な特性も未だ不明である。

### 2. UHECR 観測の最新結果と課題

テレスコープアレイ実験 (Telescope Array; TA)<sup>[3]</sup> は北米ユタ州のミラード郡に建設されたUHECR観測用宇宙線望遠鏡である。TA実験では二種類の検出器を使用したハイブリッド観測実験である。一つ目は507台の地表検出器 (Surface Detectors ; SD) と呼ばれるシンチレーションカウンターである。SDはUHECRが大気中で引き起こす巨大カスケードシャワー中の電子・陽電子、ガ

ンマ線の検出を行う。二つ目は38台の大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detectors ; FD) という紫外線領域の大気シンチレーション光 (大気蛍光) を検出する反射望遠鏡である。TAは2008年5月から常時観測が開始された。UHECR観測実験は他にも2004年から南米・アルゼンチンで観測が開始されたPierre Auger実験 (PAO)<sup>[4]</sup> がある。2010年国際シンポジウムUHECR2010にてTAとPAOの最新結果が発表された<sup>[7]</sup>。中でも重要な結果はUHECRのエネルギーフラックスである。エネルギーフラックスはAGASA<sup>[5]</sup>とHiRes<sup>[6]</sup>の結果で矛盾が生じるという大きな問題があった。しかしTA<sup>[8]</sup>、PAO<sup>[9]</sup>ともにGZKカットオフの領域でフラックスに制限があるという結果が得られた。有意度は、TAは $3.5\sigma$ 、PAOでは $20\sigma$ 以上であった。この結果はHiResの最終結果<sup>[10]</sup>とも矛盾せず、GZK領域でのエネルギーフラックスのカットオフの存在はほぼ確立した。但しこれがGZKカットオフであるかは未解決である。ここで重要な課題はUHECRのエネルギー決定精度の改善である。UHECRのエネルギーはTA、PAOともにFDを用いて測定される。しかし測定精度には大きな系統誤差が含まれ、TA、PAOそれぞれ19%<sup>[8]</sup>、22%<sup>[9]</sup>である。TAでの主な系統誤差の要素は大気蛍光発光量 (12%)、大気透明度 (10%)、検出器 (11%) である<sup>[8]</sup>。

\* shibata@icrr.u-tokyo.ac.jp

### 3. 小型電子線形加速器 (ELS)

UHECRは大気中に突入すると空気分子との相互作用によって巨大カスケードシャワーが発生する。このカスケードシャワーに含まれる電子が空気中の窒素分子を励起させる事で大気蛍光が放出される。この大気蛍光をFDで検出し、検出時間情報を用いて再構成されたシャワー軸に沿った光子数分布からUHECRのエネルギーを計算する事ができる。大気蛍光光子数は空気中での電子の電離損失によるエネルギー損失量に比例する。またカスケードシャワーに含まれる電子のエネルギーのピークは約100 MeV付近にあり、数10 MeVから約1 GeVの範囲内で分布している。この事から絶対エネルギー較正を行うために100 MeV程度の電子線が使用できる事がわかる。

#### 3.1 ELSの基本構造と構築

TAではFDの新しいエネルギー較正法としてFDから100 mの近距離に設置された電子加速器から空気中に上向き電子ビームを射出し、発生する大気蛍光を直接FDで観測する方法が提案された。電子ビームの出力エネルギーは既知であるため空気中での相互作用をシミュレーションで再現する事が可能であり、FDでの観測量(FADC値)との直接の対応関係が分かる。これによりUHECRのエネルギーを再構成するために必要な較正定数を一括して較正する事が可能となる。但し100 mの近距離であるため大気透明度の較正はできない。これについてはレーザーシステムによる較正が行われている。絶対エネルギー較正用の小型線形加速器は(Electron Light Source; ELS)と呼ばれ、2005年度からKEKとの共同研究として開発が始まり、電子陽電子入射器棟にて構築された<sup>[11]</sup>。

電子ビームの定格出力はエネルギー  $40 \text{ MeV} \times 10^9 \text{ e}^-/\text{pulse} \times 0.5 \text{ Hz}$  である。ELSは最大40 MW出力のSバンドRFシステム、-100 keVパルス型熱電子銃、プリバンチャー・バンチャー管、2-m加速管からなる加速ユニットと集束用電磁石とビームの向きを水平方向から鉛直方向に変える90度偏向電磁石、そしてコリメータ用スリット、そしてビームモニター用にコアモニター、スクリーンモニター、ファラデーカップから構成される。また冷却水装置として流量110 L/minの冷却ユニットを製作した<sup>[13][14]</sup>。ELSは2008年2月完成しその後12月末までビーム試験を行い、性能評価を行った<sup>[12][14]</sup>。ビーム試験後の2009年2月末から3月末にかけてELSはKEKからTAの観測サイトである北米ユタ州に輸送され、1つのFDステーションから100 m離れた地点に設置された。

#### 3.2 ELSの運転準備と安全対策

ELSのRFシステムと加速ユニットは40-ftコンテナに、冷却水ユニットは20-ftに収納して設置された。また制御室用コンテナとELS用出力80 kW発電機も設置された。TA観測サイトに移設された後、2009年4月から2010年5月末にかけて電力供給、冷却水配管の整備と凍結対策、コンテナの外気温に対する断熱対策等を行った<sup>[15][16]</sup>。またELSの遠隔操作と監視のためのネットワークの整備等も行った。

ELSは放射線発生装置であるため、ELSはユタ大学

管理による放射線安全管理体制を整えた。放射線安全オフィス(Radiation Safety Officer; RSO)とユーザー責任者(Responsible User; RU)が組織された。またELSはOn-site RSOとOn-site RUがそれぞれ最低1名以上、合計2名以上によってのみ運転可能にしている。ELSのRSO, RUを担当する人は全員ユタ大学で放射線従事者登録を行い、ELS用の特別講習を受講するように取り決められた。放射線防護として加速ユニットとRFシステムを収納したELSコンテナの側面を厚さ60 cm、高さ3.6 mのコンクリートブロックで覆った。そしてELSサイト全体を囲ったフェンス内を放射線管理区域に指定し、ビーム運転中の立ち入りを禁止した。繰り返し0.5 Hzでのビーム運転時のフェンス境界部での放射線レベルがKEKの放射線管理センターによって計算され、最大0.11  $\mu\text{Sv/h}$ 程度であると見積もられた。フェンスのゲート、コンテナの全てのドアにインターロックが取り付けられた。またビーム運転時、高電圧を印加する直前に30秒間の警告音をコンテナ内外に流しその間は高電圧のオンはシステムにした。更にインターネットからの遠隔操作を防ぐために制御室に設置したビームトリガースイッチの一つに機械的なスイッチを取り付けた。図1に完成したELSサイトの写真を示す。

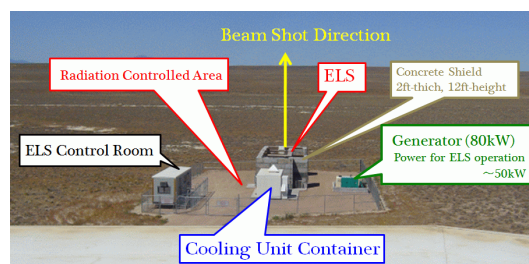


図1: TAの観測サイトに建設されたELS

#### 3.3 ELSのビーム運転

2010年6月からELSの立ち上げ作業が始まった。6月中にRFシステムと電子銃の単体試験を行い、最大27 MWの出力RFを確認し、-100 keVの電子ビームを確認した<sup>[15][16]</sup>。加速ビーム試験は2010年9月初旬から始まった。最初は水平ビームライン上でのビーム加速を行い、スクリーンモニターによって電子ビームを確認した。図2に水平ビームラインにインストールされたコアモニターで測定されたビーム波形とクライストロンへの入力電流パルス波形、クライストロンからの出力RF波形を示す。水平ビームライン上での加速試験後は偏向ビームをファラデーカップによって確認した。取出しビームのエネルギーは偏向電磁石の磁場から計算され、そのエネルギーは41.1 MeVであった。偏向ビームの確認後空中射出に成功し、同時にFDでの観測にも成功した。図3に空気中に射出された電子ビームによって生成された大気蛍光をFDで検出した撮像図を示す。また加速ビームのチューニングパラメータを表1に示す。出力RFのピーク電力や加速管への入力RFの位相、集束電磁石の磁場については2008年にKEKで行ったビーム試験で最終的に得られたパラメータと殆ど同じだった。

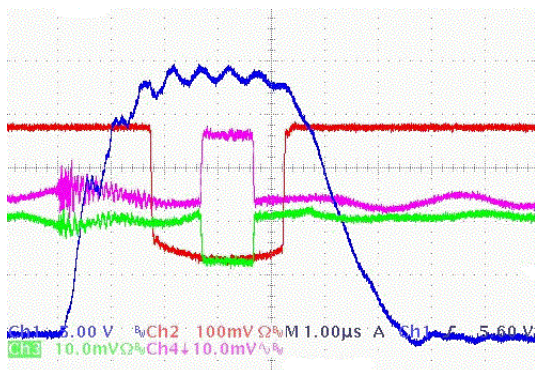


図 2: コアモニターで測定された電子ビームのパルス波形。波形記録はオシロスコープを用いた。紫線と緑線の波形が電子ビームの波形。コアモニターは 2-m 加速管の入力部 (緑) と偏向電磁石の入力前 (紫) に設置されている。青線はクライストロンへの入力電流パルス、赤線はクライストロンからの出力 RF パルス波形。

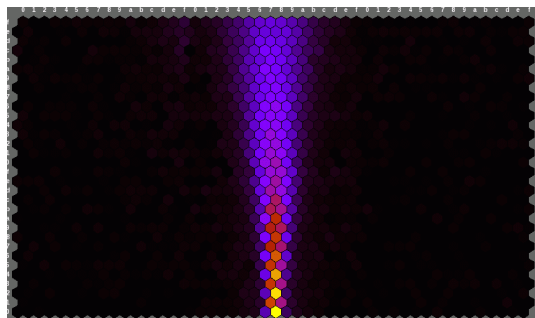


図 3: 2010 年 9 月 3 日に FD で観測された ELS からの加速電子ビームによって生成された発光現象

### 3.4 ELS の運転状況とトラブル

2010 年 9 月以降は 12 月、2011 年 1 月、3 月にビーム運転を行った。2010 年 12 月はビーム調整とビームパラメータの測定を行い、スクリーンモニターを用いたビームプロファイルの確認を行った。2011 年 3 月の運転では二度目の空中射出を行った。但しビームの運転の際に多くの機器が故障するというトラブルが発生したため途中でビーム運転を中止する事が多かった。その結果、2010 年 9 月から 2011 年 8 月までのビームの総運転時間は約 27 時間だった。空中射出時間は約 2 時間だった。但しこの時間に RF エージングの時間は含まれない。

次に 2010 年 9 月以降に発生した主なトラブルについて記述する。2011 年 1 月、RF システム用の大電力パルスモジュール (PFN 回路) への入力高電圧ケーブルに外部被膜から芯線まで届く直径 1 mm 程度の傷ができ、そこから空中放電するというトラブルが発生した。発生直後は損傷部を含むケーブルをカットする事で運転を再開したが、1ヶ月半後に新しいケーブルに交換した。ケーブル損傷は約 50 cm 離れた所に設置されている電子銃用高圧ステーションに -100 kV の高電圧が印加された際に入力高電圧ケーブル間で発生した放電によるものと考えている。念のため入力高電圧ケーブルは保護用のホースに通す事で再発防止の対策を取った。2011 年 3 月 RF システムで使用している DC メータと呼ばれる

表 1: ビームのチューニングパラメータ

repetition	0.5 Hz
RF system	
charging High voltage	37 kV
input current into klystron	234 A
input voltage into klystron	-256 kV
input rf power	400 W
output power from klystron	20 MW
Electron gun	
heater current	1.5 A
bias voltage	80 V
gride pulse voltage	-100 V
gride pulse width	1 $\mu$ s
Output Energy and Charge	
estimated output Energy	41.1 MeV

サイクロトロン電源への外部トリガー生成モジュールと PFN 回路内の過電流モニターが搭載されたユニットが故障し、サイクロトロン電源への外部トリガーが出力されなくなった。故障した DC メータはその後修理によって回復したが、2011 年 6 月新たにサイクロトロン電源に搭載されているサイクロトロントリガーモジュール (E2V 製 MA2458) も故障していた事が判明した。同時に二つの故障が発覚したため、故障の原因はトリガー回路の芯線に過電流が突入したためと推測される。

## 4. 絶対エネルギー較正の現状

### 4.1 データ解析の方針

ELS の解析方針について記述する。ELS は FD の絶対エネルギー較正を行う事が主な目的である。絶対エネルギー較正は電子ビームの空気中での相互作用と検出器の応答をモンテカルロシミュレーションによって再現し、FD の観測量である FADC 値と観測によって得られた FADC 値の比較によって行う。電子ビームによる空気中での相互作用については GEANT4 を用いて計算した。検出器シミュレーションは TA が独自に開発したシミュレーションソフトを使用した。本報告では電子ビーム空中射出の観測データとシミュレーションを用いた解析の現状についてまとめる。

### 4.2 データセット

本解析では 2010 年 9 月 5 日 (UTC) に取得された観測データを使用した。この日空中射出された 672 ショットの内 FD で検出された 612 ショットをデータ解析に使用した。また ELS が設置されている観測サイトには 12 台の FD が設置されているが、解析に使用するのは ELS を正面に向く 2 台の FD のデータのみである。

### 4.3 モンテカルロシミュレーション (MC)

GEANT4 では ELS の基本的構造は全て構築され、電子を真空ダクトの中からビーム窓を通して空気中に射出する事ができる。今回は垂直ビームラインの真空中を出発点にする垂直上向きの電子を生成した。2010 年

9月5日の電子ビームによる空気シャワーを再現するためにビームエネルギー、ビーム射出位置と空気の温度、気圧、湿度を入力パラメータとした。射出ビームエネルギー値として41.1 MeVを用いた。ビーム射出位置はGPSと測量によって測定されたELSを正面向くFDからの相対位置を用いた。温湿度と気圧はFDに設置した気象センサーによって測定された値を用いた。GEANT4では大気蛍光発光に寄与する全電離損失を計算し、空気中でのエネルギー損失量として出力させた。得られたエネルギー損失量と位置の情報は検出器シミュレーションに入力された。検出器シミュレーションではエネルギー損失量から大気蛍光への変換、発光点からFDを構成する反射鏡、PMTカメラの感面までの光子のレイトレース、PMTでの検出光子からFADC値への変換を行い、最終的な出力データは各PMTのFADC値である。

#### 4.4 解析の現状

今回の解析ではFADC値の絶対値同士の比較は行わず、2台のFDで測定された全FADC値で規格化した量を用いて、ELSが生成する空気シャワーの発達をデータとMCと比較した。空気シャワーの縦方向と横方向発達の比較を行った結果を図4、5に示す。この図よりデータとMCの結果は良く一致している事がわかる。但し縦方向分布のY-PMT=1,3の結果については一致が悪い事が確認できる。同じように横方向分布のY-PMT=1の結果も中心のピンが一致していない。これはFDのカメラ感面上でのスポットサイズがMCとデータで一致していない事が原因と考えている。今後の解析ではFADC値の絶対値の比較を行う予定である。

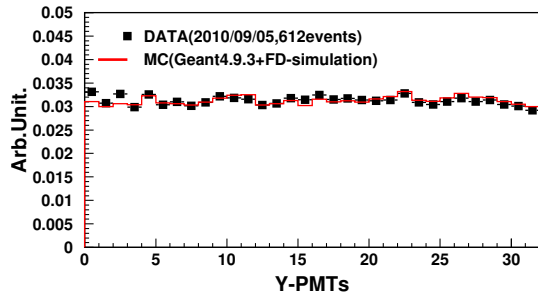


図4: 空気シャワーの縦方向発達のデータとMCの比較図。横軸は鉛直方向に沿ったPMTの列番号(Y-PMT)、縦軸は水平方向に沿った16本のPMTで検出されたFADC値の合計を2台のカメラで検出された全FADC値割った値である。

## 5. まとめ

テレスコプアレイ実験は北米・ユタ州にて宇宙線望遠鏡を用いて $10^{18}$  eV以上のUHECRを観測する実験である。しかし最も重要なUHECRのエネルギー決定精度には20%以上の大きな系統誤差が含まれる。Electon Light Source(ELS)は大気蛍光望遠鏡(FD)の絶対エネルギー較正を行うために開発された小型電子線形加速器である。ELSはKEKで開発され、2009年3月TAサイトに移設された。その後2010年9月に電子ビームの空中発射とFDでの観測に成功した。2010年9月から2011年8月までの総ビーム運転時間は約27時間であ

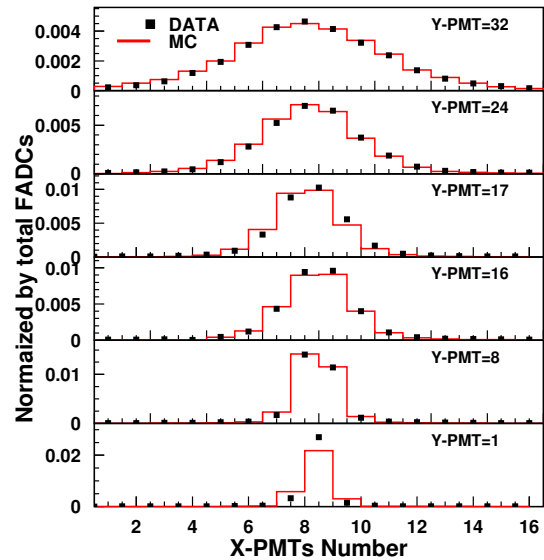


図5: 空気シャワーの横方向発達のデータとMCの比較図。横軸は水平方向に沿ったPMTの列番号(X-PMT)、縦軸は水平方向に沿った各PMTで検出されたFADC値の合計を2台のカメラで検出された全FADC値割った値である。ここでは32列あるY-PMTの内6列分を表示した。

り、空中射出時間は約2時間であった。2010年9月に取得されたデータとモンテカルロシミュレーションを比較し、空気シャワーの縦方向と横方向発達の形状について両者が良く一致している事を確認した。今後はFADC値の直接比較を行い絶対エネルギー較正を行う。

## 参考文献

- [1] K.Greisen, Phys. Rev. D16 (1966) 748
- [2] G.T.Zatsepin and V.A.Kuz'min, J.Exp.Theo.Pyss.Lett,4,78 (1966),ZhETF Pis'ma, 4 (1966) 114-117
- [3] H.Sagawa et al., Proceedings of the 31st ICRC,2009
- [4] J.Abraham et al., Nucl.Instr.and.Meth.A, 523, 50 (2004)
- [5] M.Takeda et al., Astropart.Phys, 19, 447 (2003)
- [6] R.U.Abbasi et al., Phys.Rev.Lett. 100 : 101101 (2008)
- [7] <http://uhecr2010.icrr.u-tokyo.ac.jp/>
- [8] H.Sagawa et al., Proc. 1st UHECR. in Nagoya, 2010
- [9] M.Bertaina, Presentation in 1st UHECR. in Nagoya, 2010
- [10] C.C.H.Jui, Presentation in 1st UHECR. in Nagoya, 2010
- [11] T.Shibata et al., Nucl.Instr.and.Meth.A, 597, 61 (2008)
- [12] T.Shibata et al., Proceedings of the 31st ICRC,2009
- [13] D.Ikeda et al., Proceedings of 4th PASJ 2007
- [14] T.Shibata et al., Proceedings of 6th PASJ,2009
- [15] T.Shibata et al., Proceedings of 7th PASJ,2010
- [16] T.Shibata et al., Proceedings of 1st UHECR2010