

Absolute Energy Calibration of Ultra-High Energy Cosmic Telescope with a Portable Electron Linear Accelerator

Tatsunobu Shibata^{*A)}, Yosuke Iino^{B)}, Daisuke Ikeda^{A)}, Mitsuo Ikeda^{C)},
Atsushi Enomoto^{C)}, Satoshi Ohsawa^{C)}, Kazuhisa Kakihara^{C)}, Yoshimi Kondo^{A)},
Hiroyuki Sagawa^{A)}, Masanori Sato^{C)}, Tetsuo Shidara^{C)}, Takashi Sugimura^{C)},
Masaki Fukushima^{A)}, Shigeki Fukuda^{C)}, Kazuro Furukawa^{C)}, Mitsuhiro Yoshida^{C)},
Masoud Beitollahi^{D)}, Karen Langely^{D)}, John H. Matthews^{D)}, Stan B. Thomas^{D)}, Gordon B. Thomson^{D)},
Byung Gu Cheon^{E)}, Bok Kyun Shin^{E)}

for the Telescope Array Collaboration

^{A)}Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo

5-1-5 Kashiwano-ha, Kashiwa, Chiba, Japan, 277-8582

^{B)}Toyama Co.,Ltd.

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

^{C)}High Energy Accelerator Research Organization

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

^{D)}University of Utah, Physics Department

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

^{E)}Department of Physics, Hanyang University

222 Wangsimni-ro Seongdong-gu Seoul, 133-791, Korea

Abstract

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

小型電子線形加速器を用いた超高エネルギー宇宙線観測用望遠鏡較正

1. 超高エネルギー宇宙線と最新の観測結果

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が、荷電粒子の場合は銀河系内磁場により大きく偏向されるため発生源の直接観測は困難である。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こちらも証拠は未だ得られていない。またUHECRの核種や加速機構も不明である。

10^{19} eV のUHECRの到来頻度は約1個/ $\text{km}^2/100$ 年であるため観測には非常に広大な面積を必要とし、現在2つの大型実験がUHECRの観測を行っている。1つは2005年から観測が開始された日米露韓の共同実験であるテレスコープアレイ実験(Telescope Array; TA)^[3]であり、北米・ユタ州に建設された宇宙線望遠鏡である。またTA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。1つは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。もう1つは38台の大気蛍光望遠鏡(Fluorescence Detectors; FD)と呼ばれる紫外線領域の大気シンチレーション光(大気蛍光)を検出する光学望遠鏡である。もう1つの大型実験は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)^[4]である。この2つの実験から近年非常に重要な観測結果が発表された^{[1][13]}。UHECRの核種が陽子である場合、宇宙背景放射との衝突による π 中間子生成のためにエネルギー損失が起こり、結果的に地球に到達可能なエネルギーの上限(GZKカットオフ^{[1][2]})が存在する。TA^[8]、PAO^[9]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。最新結果での有意度はTAは 3.9σ 、PAOでは 20σ 以上である。この結果はHiResの最終結果^[10]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効果による結果なのか加速限界なのかは不明である。UHECRの核種特定については特に大きな問題が発生している。TAではUHECRの成分は純陽子である

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

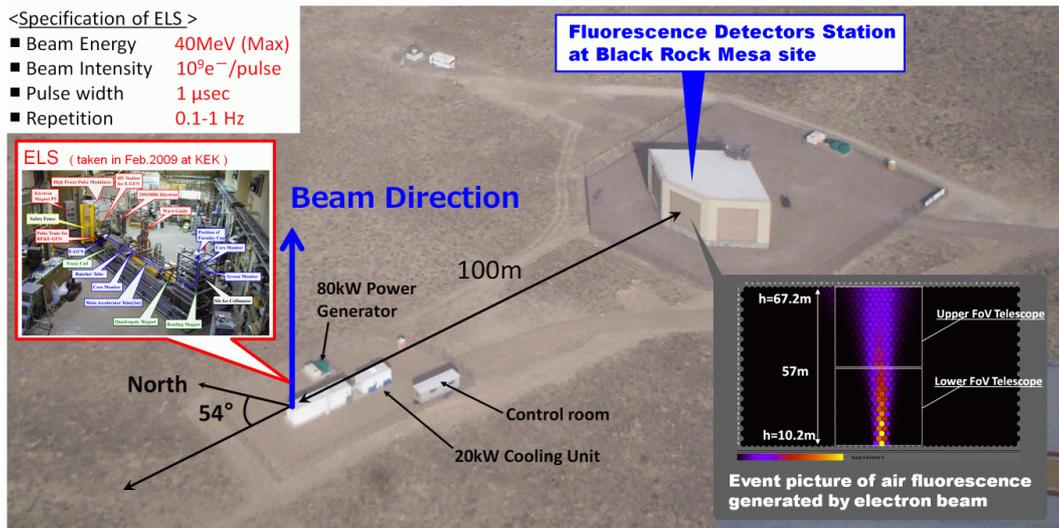


図 1: ELS と FD ステーションを上空から撮影した写真。完成した直後の ELS(KEK にて) と ELS の基本スペック表をまとめる。また FD で観測した電子ビームによる大気蛍光発光現象の撮像図を示す。

可能性が高いという結果を出している。一方 PAO はエネルギーが大きくなるにつれて純陽子から鉄に遷移している結果を出している。現在この結果の食い違いの解決には至っていない。

更に TA と PAO の間にはエネルギースケールの不一致問題がある。UHECR のエネルギースペクトルには 20% 以上の大きな不一致がある^{[11][13][12]}。TA、PAO のエネルギースケールに対する系統誤差は 21%, 22% であるため誤差の範囲で一致しているとも言えるが、系統誤差を軽減し、エネルギー測定精度を向上させる事が非常に重要な課題でもある。TA が考案し現在稼働中の小型線形加速器はエネルギースケールの較正を行うための新しい装置である^[14]。

2. 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。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。このため絶対エネルギー較正を行うために 100 MeV 程度の電子が使用できる。TA では FD から 100 m の距離に設置された小型電子加速器 (Electron Light Source; ELS) から空気中に出力 $40 \text{ MeV} \times 10^{10} e^-/pulse$ の鉛直上向きビームを 0.5 Hz の繰り返しで射出し、発生する大気蛍光を直接 FD で観測する。電子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トし、FD での検出光子数を計算する事ができる。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による較正が行われている。ELS は 2005 年から 2008 年にかけて開発され^[17]、2009 年北米の TA サイトに移設された(図 1)^[18]。その後電力供給、ELS の遠隔制御・監視、そして放射線防護と管理体制が整え、2010 年 9 月に運転が開始された^[20]。

3. ELS の運転状況

2011 年 3 月に RF システムの DC メータとサイクロン電源に搭載されているサイクロントリガモジュール (E2V 製 MA2458) が故障した^[20]。DC メータは修理で回復したが、MA2458 の方は新しい型番 (E2V 製 MA2709A) に交換する必要があった。MA2709A への交換は 2011 年 11 月初旬に完了し、ELS の運転が再開された。

2012 年 8 月の時点で 2011 年 11 月、2012 年 3 月、7 月の三期間それぞれ約 2 週間の運転を行った。この期間の総ビーム運転時間は約 148 時間であった。各期間に於いて前半の 1 週間は昼間に運転を行い主にビームスタディを行った。後半の 1 週間は夜間の FD 観測時間中の運転を行い、ビーム電荷量測定や空中射出を行い、FD の絶対エネルギー較正のためのデータ収集を行った。2011 年 11 月以降は大きな故障もなく、運転中のビーム状態も非常に安定している。

ELS は北米・ユタ州の砂漠地帯に設置された海上コンテナの中に収納された状態で運転している。夏場の昼間は外気温が 40 度以上、冬場の夜間は外気温がマイナス 30 度近くになる。2012 年の 7 月の運転を行った事で春から初夏以外の季節の運転を経験する事ができた。冬場の運転については低温対策として冷却水に不凍液を使用した事^[19] もあり特に大きな問題はなかった。一方、2012 年の 7 月の昼間の運転中外気温が 40 度を越えた時、冷却ユニットのチラ が非常停止した。原因は使用可能な外気温の上限である 40 度を越えた事によるインターロックであったため、40 度を越える時間帯の運転は不可能である事が判明した。この問題に対しては

外気温が充分低下する夕方以降に運転するという方針で対応した。夜間の運転に特に大きな問題は生じなかった。次回の運転は今秋を予定している。

4. ビームモニターの改善

FDの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FD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の観測量である検出光子数と観測によって得られた検出光子数の比較によって行う。シミュレーションを生成する際に重要な入力ビームパラメータとしてビームの射出位置、出力エネルギー、方向、サイズ、電荷量がある。

4.1 スクリーンモニター

射出位置は^[20]にも記載したように測量値を用いている。出力エネルギーは偏向電磁石(BM)をスペクトロメータとしても使用しているためBMの磁場から得る事が出来る。ビーム方向、サイズは複数のスクリーンモニター(SM)を用いて測定する事になるが、2011年11月まではBM前後に1台ずつの計2台のみを使用していた。しかし使用している撮像カメラではビーム電荷量が小さい事もあり、撮影が充分にできず、ビームの存在を確認する程度に留まっていた。また空中射出された直後のビームの正確な位置はSMがないために不明であった。そこでまず空中射出直後に新しいSMを導入した。SMは遠隔操作によって水平と垂直移動が可能であり、高さによって変化する位置とサイズをモニターする。蛍光板は10cm×10cm×1mmサイズのアルミナ蛍光板を使用した。カメラは高感度モノクロCCDカメラ(Watec製WAT-902H2 ULTIMATE)を使用した。図2に2011年

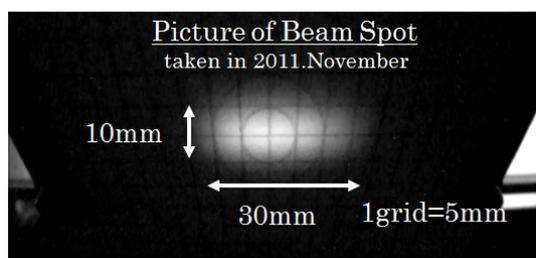


図2: 2011年11月に導入した新SMによって撮影されたビームスポット。円の中央がビーム軸中心。

11月に撮影したビームスポットを示す。電子ビームの傾きはスポットの位置とBM直前に直径10mmの固定コリメータの中心を通過している事から計算できる。更に2012年7月には2台の撮像カメラを望遠レンズ付高感度CCDカメラに置き換え、カメラの位置も可能な限りスクリーンに近づける事でビームスポットの撮影を大幅に改善した。図3に2012年7月に撮影したビームスポットを示す。

4.2 ビーム電荷量測定

ビーム電荷量測定はFDの絶対エネルギー較正に於いてエネルギースケールにリニアに依存してくる最も重要な量である。よってビーム電荷量測定は高い精度が要求される。ELSではビーム電荷量はコアモニター(CT)とファラデーカップ(FC)の2つを用いて独立に測定し

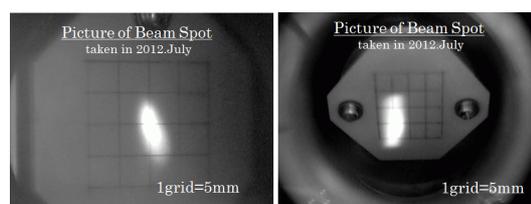


図3: 2012年7月に交換した望遠レンズ付高感度CCDカメラによって撮影したビームスポット

ている。オシロスコープで記録したCTの出力波形を時間積分した値が入力電荷量に対して線形関係にあると考えられるため相対電荷量と定義した。一方FCで捕獲した電子はエレクトロメータを用いて絶対電荷量測定が可能であるがビームダンプでもあるため、空中射出中はCTの値から絶対電荷量を計算する必要がある。そこでCTとFCでの測定量の相関を測定する事でCTの較正を行う事がELSでのビーム電荷量測定になる。KEKで行ったビーム試験ではビーム電荷量測定精度は±4%であると評価した^[18]。

しかし2010年9月以降に行ったビーム電荷量測定では不正確な測定結果が得られた。FCのGNDに対する絶縁のために使用しているガラスエポキシが160pCの精密測定には抵抗率が不充分であるために発生した漏れ電流が主な原因であると考えられた。試験的対策として2011年11月にφ60mm×100mmサイズの銅製の円柱をFC(FC2)として使用した。絶縁物の材質にはテフロンを使用した。また新しい試みとしてFC2からの信号を直接オシロスコープで記録する事で絶対電荷量は波形の時間積分から計算し、更にこれまで測定されなかったビームの時間構造の記録も行った。FC2は1台であるため電荷量測定の際エレクトロメータとオシロスコープへの接続変更は手動で行った。ここで新たに正極性のオフセット電流が観測された。電子ビームとの距離が短い程大きくなる事からビーム起因の電波的ノイズが電磁シールドのないFC2に影響を与えている事が原因であると推測した。また接続を手動で変更するためにビーム運転を止めなければならない事も運転上の欠点であった。

2012年3月はこの欠点を補うためにまず同じサイズのFCを2つ用意した(FC3)。2つのFC3の一方はオシロスコープ、もう一方はエレクトロメータに接続されている。またFC3は遠隔操作可能な電動スライドによってビーム窓の上を水平にスライドできるようにした。しかし電波的ノイズの対策が不十分であったために、試験的にFC3の電磁シールド材にアルミホイルを使用した。ここでアルミホイルとFC3との間にガーゼを挟んでお互いを絶縁させた。その結果、図4のように2つのFC3それぞれで得られたCTとの相関が良く一致した。次の章ではこの時に行った空中射出によって得られたFDでの観測データを用いた絶対エネルギー較正の解析状況について述べる。2012年7月には3月の結果を踏まえて新しいFC(FC4, 図5)を導入した。FC4芯は電磁シールドである2重の銅製の円筒の中心に収納する構造で、出力端子は三重同軸である。絶縁物の材質にはセラミックス(マコール)を使用した。電荷量測定の結果、CTとの相関関係がエレクトロメータとオシロスコープでの

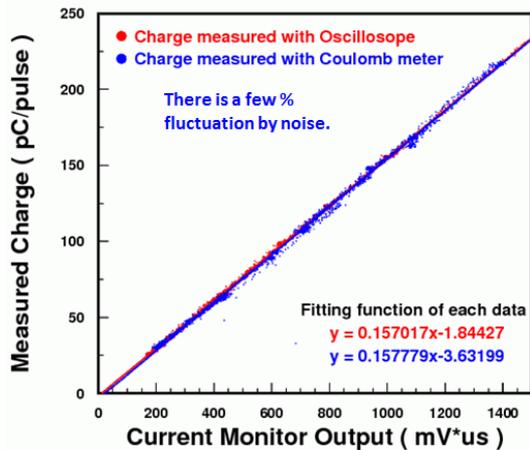


図 4: 2012 年 3 月に取得した CT で測定された相対電荷量と FC3 で測定された絶対電荷量の相関関係

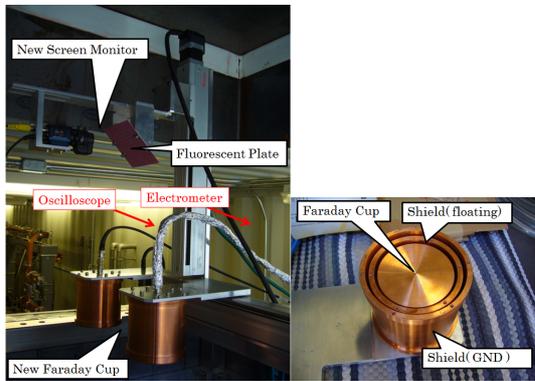


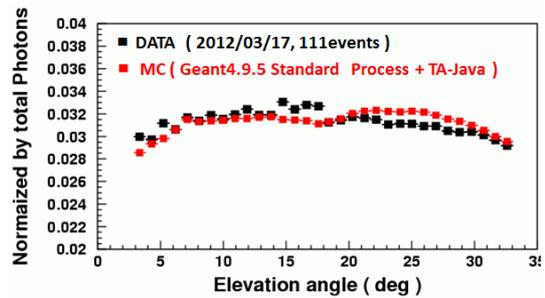
図 5: 新 SM と 2012 年 7 月に導入した FC4 の写真

測定で一致しなかった。FC4 芯と電磁シールドの間には約 2 mm の空間がある。この空間に絶縁物を挟む事で改善が見られた事から、原因は FC4 芯と電磁シールドの間に発生したイオンの侵入か、FC4 芯と電磁シールドの間に漏れ電流が存在する事と推測した。次回の運転ではこの点を改善し電荷測定を行う必要がある。

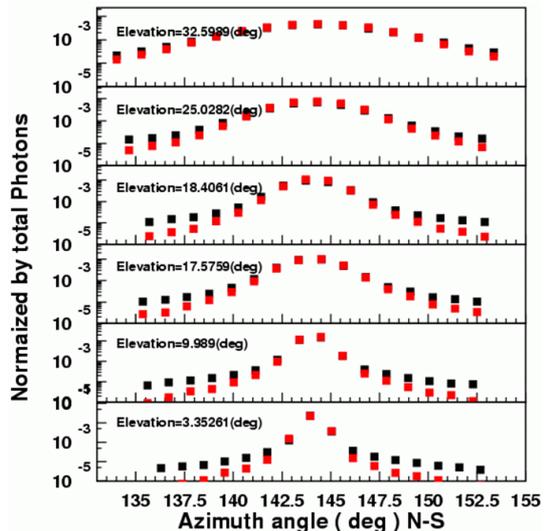
5. FD エネルギー較正の解析状況

ここでは 2012 年 3 月 17 日の空中射出によって取得したデータを用いた絶対エネルギー較正の解析状況についてまとめる。空中射出中は出力ビーム電荷量はある程度安定させた状態を保持させ、途中で電荷量を変化させて再び射出する方法で行った。1 回目の 111 パルスのビーム電荷量の平均値は 68 pC/pulse、次の 32 パルスの平均値は 101 pC/pulse であった。電子ビームによる空気シャワーを視野内で観測できる FD は ELS を正面に向く上下に並ぶ 2 台だけであるためデータ解析もこの 2 台のみを使用した。シミュレーションではまず空気シャワー生成には GEANT4.9.5 を用いた。次に大気蛍光発光過程から FD の光子検出までの過程は TA の公式検出器シミュレータ (TA-Java) を用いた。ここで示す実データとシミュレーションの比較結果は検出光子数の直接比較ではなく、2 台の FD での検出光子数の総数で規格化した量を用いた相対比較のみに留める。理由はサンプル

数がまだ不十分であるため、7 月に取得したデータ解析も含めた結果として発表するためである。



(a) 空気シャワーの縦方向発達。横軸は仰角。黒点が実データ、赤点がシミュレーション。2 つの FD の視野の境界は仰角 18° である



(b) 空気シャワーの横方向広がり。横軸は方位角。黒点が実データ、赤点がシミュレーション。下 3 つの分布が下視野の FD、上 3 つの分布が上視野の FD の結果である

図 6: 2012 年 3 月に取得した実データとシミュレーションの比較結果

図 6 に空気シャワーの縦方向発達と横方向広がりとの結果の相対比較を示す。実データは 111 パルス分のデータのみを使用した。また図 7 に FD で観測された信号の時間構造を示す。FC3 とオシロスコープで記録したビーム波形をシミュレーションにも使用した。全ての図でシミュレーションと実データは全体的には良く一致しているが、縦方向発達では上下の FD ではずれ方に相違点がある。横方向広がりではテイルの部分に ELS からのビームバックグラウンドガンマによる寄与と思われる不一致な箇所があり、細かい考察が必要である事を示す。

最後に図 8 にシミュレーションで得られたビーム電荷量と FD での検出光子数の比例関係を示す。FD での検出光子数はビーム電荷量に対して比例している事が分かる。7 月取得のデータも用いた絶対値の比較結果の発表を今秋を目標に解析を進めて行く予定である。

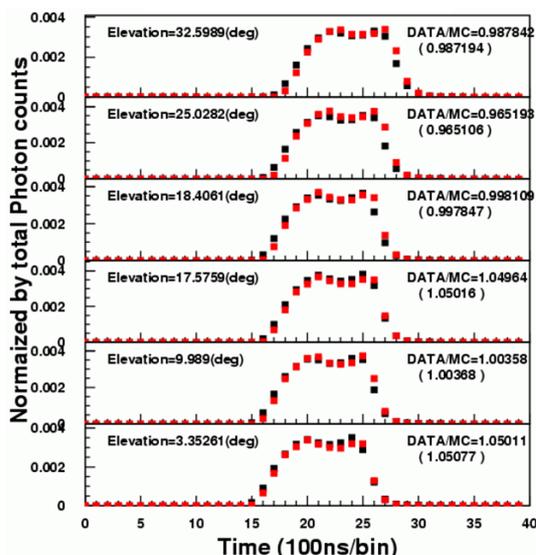


図 7: 検出光子の時間構造

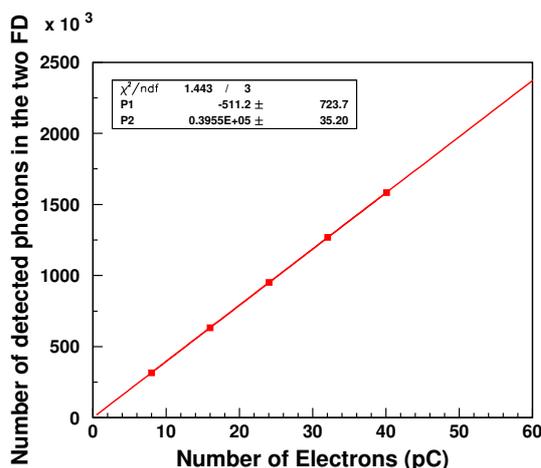


図 8: シミュレーションで得られたビーム電荷量 (電子数) と FD での検出光子数の比例関係

6. ELS を用いた新研究

ELS は将来の UHECR 観測実験のための基礎研究としても活用されつつある。現在の UHECR の主な観測方法は SD で荷電粒子やガンマ線を検出する方法と FD によって大気蛍光を検出する方法があるが、一方で空気シャワーから発生される電波を検出する方法もある。しかし最初の電波検出は 1965 年に成功し、その後多くのグループで 20-80 MHz 帯域の電波検出に成功したにも関わらず未だに実用化には至っていない。電波発生機構として電子のチェレンコフ輻射、地磁気によるシンクロトロン輻射、制動輻射や地磁気によって正負の荷電粒子が分極した際に発する双極子放射といった様々な過程が考えられている。更に送信機からの電波を空気シャワー中に生ずるイオンの塊で反射させる事で空気シャワーを観測する方法も提案されている。ELS の電子ビームからも電波が発生すると考えられているため、空中射出中に ELS 周辺で行う電波観測は将来の UHECR の観測の研究として非常に興味深い。

そして 2012 年 3 月にヨーロッパの CROME 実験グループが空中射出される電子ビームからの数 GHz 帯域の電波観測を初めて行った。また今秋 2 回目の観測も計画中である。TA グループでも現在 ELS から約 30 km 離れた地点から TA サイトに向かって周波数 50 MHz の電波を常時送信し、その反射波を測定している。2012 年 3 月と 7 月に ELS からの電子ビームによる空気シャワーからの反射波の検出を行った。更に TA グループの大阪市立大学を中心に行っている数 GHz 帯域の電波検出も試みられた。今後 ELS 運転時には可能な限り電波観測実験も行う予定である。

7. まとめ

Electron Light Source (ELS) は TA サイトで 2010 年 9 月から運転が開始された海上コンテナに収納された小型電子線形加速器である。2010 年 3 月の故障によって 11 月まで停止したが、それ以降は三期間の運転を行い、ビーム電荷量測定の改善やビーム位置モニターの改善等を行い、FD の絶対エネルギー較正用のデータ収集を順調に行い、2012 年 3 月のデータを用いたエネルギー較正の解析を行った。結果については現在考察中であり最終結果は 7 月に新しく収集したデータを用いた解析も含めて発表する予定である。また ELS は空気シャワーから発生する電波の研究に於いても他に類のない電波源として既に観測が進んでいる。次回の運転は今秋を予定しており、電波観測も引き続き行う。

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] <http://uhecr2010.icrr.u-tokyo.ac.jp/>
- [12] <https://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=152124>
- [13] <http://icrc2011.ihep.ac.cn/>
- [14] T.Shibata et al., Nucl.Instr.and.Meth.A, 597, 61 (2008)
- [15] T.Shibata et al., Proceedings of the 31st ICRC,2009
- [16] T.Shibata et al., Proceedings of the 32nd ICRC,2011
- [17] D.Ikeda et al., Proceedings of 4th PASJ 2007
- [18] T.Shibata et al., Proceedings of 6th PASJ,2009
- [19] T.Shibata et al., Proceedings of 7th PASJ,2010
- [20] T.Shibata et al., Proceedings of 8th PASJ,2011
- [21] T.Shibata et al., Proceedings of 1st UHECR2010
- [22] T.Shibata et al., Proceedings of 1st UHECR2012