

小型電子線形加速器を用いた超高エネルギー宇宙線望遠鏡の絶対エネルギー較正 ABSOLUTE ENERGY CALIBRATION OF ULTRA-HIGH ENERGY COSMIC TELESCOPE WITH A PORTABLE ELECTRON LINEAR ACCELERATOR

芝田達伸^{*A)}、福島正己^{A)}、佐川宏行^{A)}、Byung Gu Cheon^{B)}、Bok Kyun Shin^{B)}、
Gordon B. Thomson^{C)}、John H. Matthews^{C)}、Karen Langely^{C)}、Masoud Beitollahi^{C)}、
for the Telescope Array Collaboration
Tatsunobu Shibata^{*A)}、Masaki Fukushima^{A)}、Hiroyuki Sagawa^{A)}、Byung Gu Cheon^{B)}、Bok Kyun Shin^{B)}、
Gordon B. Thomson^{C)}、John H. Matthews^{C)}、Karen Langely^{C)}、Masoud Beitollahi^{C)}
for the Telescope Array Collaboration

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

^{B)}Department of Physics, Hanyang University

^{C)}University of Utah, Physics Department

Abstract

Telescope Array experiment (TA) which observes the ultra-high energy cosmic rays (UHECRs) 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 which typical beam intensity is $40 \text{ MeV} \times 10^9 \text{ e- per pulse}$. The ELS is installed at 100 m from the FD. We operated the ELS every about four months, and took data for energy calibration. The most important beam study is measurement of beam charge of each pulse. In this article, we will report about the beam charge measurement study and first results of FD absolute energy calibration with the ELS.

1. 超高エネルギー宇宙線

宇宙線は地球に飛来する粒子や電磁波の総称である。粒子成分の約90%は陽子であり、他にHe、C、N、O、Fe等の原子核や1%程度の電子、陽電子も存在する。昨年世界初のPeV領域の宇宙線ニュートリノも発見された^[19]。これまでに観測された宇宙粒子線の最大エネルギーは 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を起源とし、超新星爆発による衝撃波によって加速されると予想しているが、地球までの伝播中に銀河系内磁場により大きく偏向されるため起源天体の直接探索は難しい。 10^{18} eV 以上¹は超高エネルギー宇宙線(Ultra High Energy Cosmic Rays; UHECRs)と呼ぶ。起源は銀河系外の活動銀河核、ガンマ線バースト、銀河団等が挙げられるが観測的証拠はない。UHECRsの核種、加速機構も不明である。

10^{20} eV のUHECRsの到来頻度は約1個/ $\text{km}^2/100$ 年であるため観測には広大な面積を必要とする。現在稼働中の大規模UHECRs観測実験が幾つかある。1つは筆者が参加する日米露韓白の共同実験であるTelescope Array実験(TA)^{[3][4]}であり、北米・ユタ州にて2008年から観測が開始された。TAは2種類の異なる検出器を使用したハイブリッド観測実験である。検出器の一つは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^[6]。SDはUHECRsにより大気中で発生する巨大カスケードシャワー中の電子、陽電子、 γ 線と μ 粒子を検出する。もう1つの検出器は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^[7]。もう1つの大規模実験は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)^[14]である²。

2つの実験により非常に重要な進展があった。UHECRsが陽子である場合、宇宙背景放射との衝突による π 中間子生成の際のエネルギー損失のため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($\sim 10^{19.7} \text{ eV}$)。そしてTA、PAO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をそれぞれ 5.5σ ^[5]、 $>20\sigma$ ^[15]の有意度で観測しカットオフの存在が確立した。但しこれがGZK効果による結果なのか加速限界なのかは結論は出ていない。その原因の一つとしてUHECRsの核種特定の不確定さがある。TAはUHECRsの核種は $10^{18.2} \sim 10^{19.7} \text{ eV}$ の領域では陽子と矛盾がなかった^[13]。一方PAOは $\sim 10^{18.5} \text{ eV}$ 以下は陽子、それ以上では重元素に遷移する結果であった^[17]。またYaktsuk実験も $\sim 10^{19.0} \text{ eV}$ 以上では重元素に遷移する結果であった^[20]。UHECRsの核種問題は早急解決が必要な重要問題である。

解決すべき別の問題がエネルギースケールである。TAとPAのエネルギー決定精度の系統誤差は約20%であったが、エネルギースケールには約20%の差が生じていた^[18]。この差を理解し正しいエネルギースケールを導く必要がある。この問題について2013年7月にブラジルで行われた宇宙線国際会議にてPAOより新しい結果が発表された^[16]。エネルギースケールの大幅な見直しが行われ、空気シャワー再構成の修正、検出器の光学特性の修正、大気蛍光収量の変更によりエネルギースケールを+15.6%変更し、系統誤差を14%に改善させた。TA

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

¹銀河系内・系外銀河起源の宇宙線の境目となる正確なエネルギーはまだ良く理解されていない

²他にもYakutsk実験(観測エネルギー領域は $10^{15} \sim 10^{20} \text{ eV}$)がある。

にとって今後のエネルギースケール見直し、系統誤差改善の緊急性と重要性が増した。

2. 小型電子線形加速器 (ELS)

TAの絶対エネルギー較正は2009年にTAサイトにインストールされ³、2010年9月から運転が開始された小型電子線形加速器 (Electron Light Source; ELS)^[21]を用いて行う。UHECRs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UHECRsのエネルギーを計算する。カスケードシャワーに含まれる電子のエネルギーは数10 MeVから約1 GeV(ピークは約100 MeV付近)であるため絶対エネルギー較正に数10 MeV程度の電子が使用できる。FDの前方100 mの距離に設置されたELSから空気中に出力40 MeV $\times 10^9$ e⁻/pulseの鉛直上向きビーム(パルス幅は1 μ sec)を0.5 Hzの繰り返しで射出し発生する大気蛍光を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UHECRs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できる。ELSはend-to-endなエネルギー較正装置である。但し近距離であるため大気透明度の較正はできない。これについては可搬型レーザー^[8]や飛行型LED光源^[9]による較正が行われている。

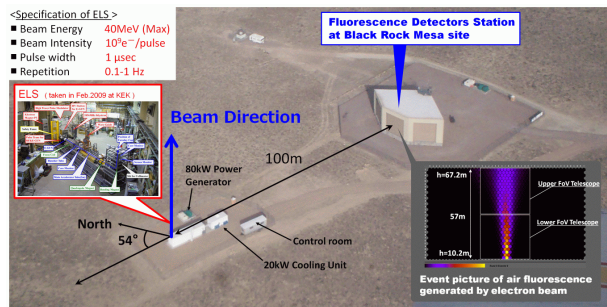


Figure 1: The photograph of the ELS in TA-site. The right figure shows the air shower of the electron beam which were detected with the FD.

2.1 ELSの運転状況

ELSは運転開始後約1年間は故障が相次ぎ継続運転できない状況が続いたが2011年11月以降は大きな故障もなく約4ヶ月に一度の頻度で運転を継続している。但し2012年7月は外気温が40度を越えた事が原因で冷却装置のチラが停止する問題が生じた。電力供給している80kW発電機は頻りに停止し2013年3月には故障によって動作不能となった。その時は急遽レンタル発電機(75kW)を用いた。2013年6月には30kW発電機に交換して使用したが電力不足のために再び同じレンタル発電機を使用した。

³位置は北緯 39.18886 度、西経 112.7126 度

3. 出力ビーム電荷量測定

ELSを用いた絶対エネルギー較正にとっては空中に放出されるパルス毎のビーム電荷量の測定精度が最も重要となる。ELSではビーム電荷測定にコアモニター(CM)とファラデーカップ(FC)を用いている。CMはビーム破壊無しで使用できるが、電子ビームの定格ピーク電流値である0.16 mA入力時のCMからの出力電圧(終端抵抗は50 Ω)は0.3 mVであり、更にサイラトロンノイズの除去を行うために超低雑音増幅器とメインアンプの2台を用いて電圧を約2,000倍に増幅してオシロスコープで波形を記録している。電荷量に相当する測定量として記録された電圧波形の時間積分値を用いた。FCはビーム捕獲により電荷量を測定するため空中射出中の測定はできない。そこで空中射出中のパルス毎の電荷量はFCの絶対電荷量で較正したCMの値を用いる。FCについては絶対電荷量測定精度向上のためこれまで何度も改善を続けてきた。FCの改善については2012年のPASJにて記述されている^[22]。以下に2013年3月に製作した新FC(FC5)について記述する。

3.1 新ファラデーカップ(FC5)を用いたCM較正

FC5はこれまでと同様全く同じ構造のFCを2台用意し、各出力をエレクトロメータ(Keithly製6514、以下Q-meter)とオシロスコープ(Textronix製TDS3014BまたはTDS3014C、以下Scope)に接続した。CM較正での重要点はQ-meter、Scopeそれぞれで測定された絶対電荷量が等しい事を確認する事である。

FC5は純チタン製真空チャンパー型FCである。真空内に直径60 mm、深さ60 mmの銅製円柱(ビームダンプ)がテフロンによって周辺から電氣的に絶縁されている。ビーム入射面である真空チャンパー底面の厚さ150 μ mである。真空チャンパー全体は更に銅製の円筒内に収納され、やはりテフロンを用いて電氣的に絶縁している。FC5は三重同軸管型の真空型FCである。図2にFC5をCMからなるビーム電荷量測定系を示す。FC5は水平方向に対して独立に可動する2つの電動スライダー上に設置されているためX-Yスキャナー式になっており、ビームプロファイルを作成する事ができる。ま

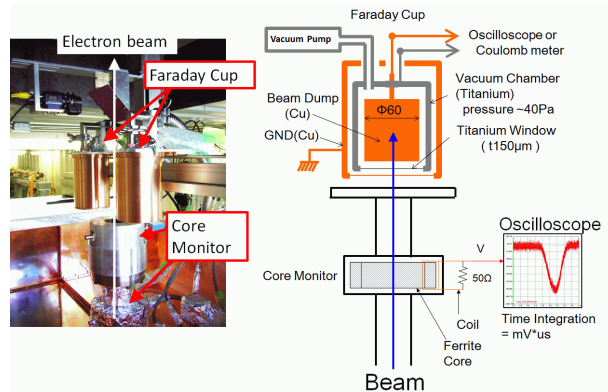


Figure 2: The photograph and scheme of the new faraday cups and core monitor system.

た外部からの電磁波ノイズ軽減や共通の安定した接地を目的にした幾つかの工夫を加えた。電荷量測定に用いる

Q-meter, Scope, CM用の増幅器、通信用スイッチングハブを一つの銅製の箱に収納し、銅箱は完全に隙間なく蓋をした。銅箱にGND用端子台を設置して全ての電子機器のGNDを繋ぎ、銅箱から1本のGND線を加速器架台に接地させた。銅箱内の電子機器への電源供給はノイズカットトランス(電研製)を通した。FC5とCMの出力同軸ケーブルは銅箱に繋がる1本の銅管を通して銅箱内の測定機器に接続した。

2013年3月に行ったCM較正の結果を図3に示す。ビーム電荷量測定は2つのFC5に対してQ-meter, Scopeの2通り接続、計4通りの測定を行った。結果、特定の片方のFC5にQ-meterを繋いだ場合以外の測定結果は $\pm 2\%$ で一致した。2011年7月に測定したCM単体較正の結果とも2%以内で一致した。この結果の再現性もあった。一致しなかった測定について様々な条件で調べた結果、 $150\mu\text{m}$ 厚の真空チャンバーの底板中心部に付着していたシリコンが原因である事が分かった。

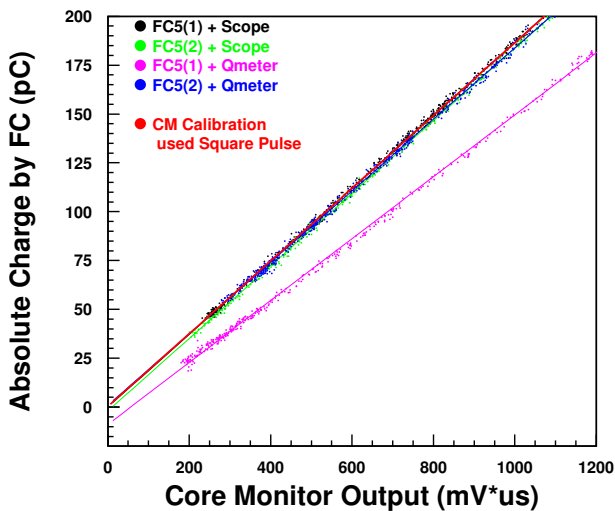


Figure 3: The results of CM calibration with the FC5 in 2013 March. All of data set except FC1+Q-meter agreed.

4月に真空チャンバーの改修を行い、6月再びELS運転と電荷量測定を行った。その結果FC5の個体差が完全に無くなった。但しQ-meterとScopeでの測定結果に約3%の差が見られた(最大約7%、常にQ-meterの方が電荷量大きい)。図4にCM較正結果、図5にQ-meterとScopeの結果の差を示す。

隙間の無い銅箱内のQ-meterやScopeの温度上昇が影響して差が発生する傾向は見られたが完全な再現性は無かった。Q-meterの表面温度は銅箱扉閉時は最大 45°C だった。 45°C の時のQ-meterの測定精度は $\pm 2\%$ (160 pC時)である。温度上昇を防ぐために銅箱の扉を常開にし、前方からファンを当てて銅箱内の冷却を行った。冷却後の温度は約 30°C となりQ-meterとScopeの差は約3%で安定した。またQ-meterを同じKeithley製の6517Aに交換して測定を行った。その結果交換前とは1.7%の差で一致し、更にScopeとの差は交換前と同じ3%であった事でQ-meterの型による差はないと判断した。またScopeもTDS3014BからTDS3014Cに交換したが結果は全く同じであった。更にFC5とScope間に使用されているケーブルを交換する等のチェックを行った所全

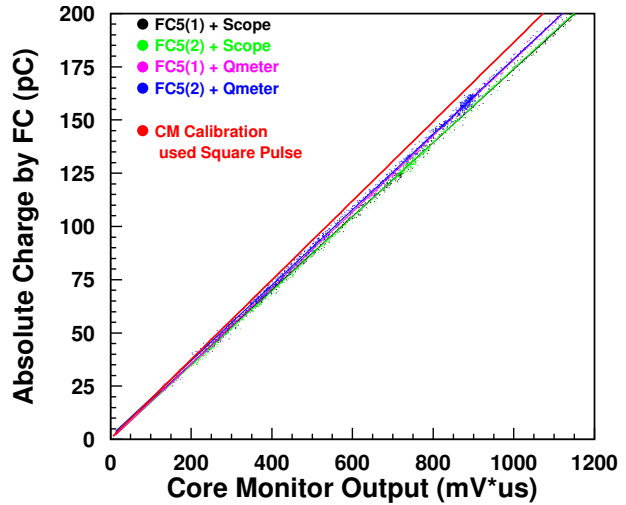


Figure 4: The results of CM calibration with the FC5 in 2013 June. There is no difference between FC5(1) and FC5(2). The Q-meter and Scope have 2.4% difference. The difference from CM self-calibration were 4~5% due to beam transparency.

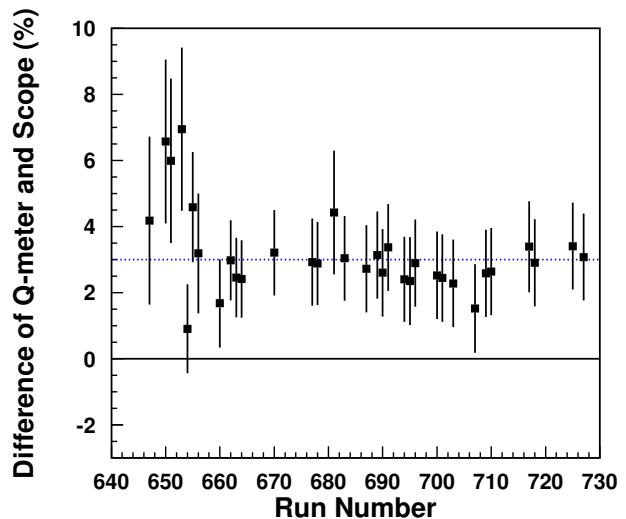


Figure 5: The differences between Q-meter and Scope of each ELS run number. The differences were $\sim 3\%$ after run 660.

てで結果が再現した。3%差の原因としてはQ-meterとScopeでの測定精度の問題が挙げられるが現在調査中である。空中射出時のビーム電荷量が3%程度の精度で決定できるようになった事は大きな成果である。

4. FD絶対エネルギー較正

4.1 絶対エネルギー較正について

FDの絶対エネルギー較正のシーケンスを図6に示す。エネルギー較正の基本的方法は電子、 γ 線が空気中に与えるエネルギー損失量から最終的にFDの観測量であるFADC値に変換するまでの全過程をモンテカルロシミュレーション(MC)で計算し、得られたFADC値が実験値(DATA)を再現するかどうかを検証する事で

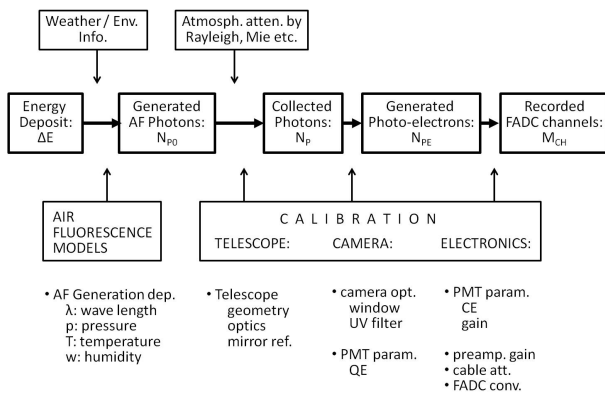


Figure 6: Sequence of air fluorescence generation and detection.

ある。40 MeV 電子の空気シャワー生成とエネルギー損失量 (ΔE) の計算は GEANT4.9 を用いた。 ΔE と大気中の温度、気圧、湿度から大気蛍光収量 (AirFluorescence Yield; AFY) の式を用いて光子数に変換する (N_{p0})。光子は大気中でレイリー・ミー散乱により減衰しながら FD の鏡で反射し、光学フィルターを通して光電子増倍管 (PMT) に入射する。検出される光子数 (N_p) は PMT 内で光電子数に変換され (N_{pe})、最終的に FADC 値の時間積分値 (M_{ch}) を計算する。 N_{p0} の計算から M_{ch} の計算までのシミュレーションは TA が使用する公式の FD シミュレーション (TA-JAVA) に ELS 解析用の修正を加えたツールを用いた。

GEANT4 で生成する一次電子のエネルギーは ELS で使用する 90° 偏向電磁石の磁場から計算された値を用いた。出力時の電子ビームの横方向運動量は考慮せず全て垂直上向きである。大気条件は ELS サイトに設置した気象センサー (VAISALA 製 WXT-520) によって測定された温度、気圧、湿度を用いた。大気中での減衰は LIDAR システムを用いて測定された散乱係数を用いた^[10]。100 m の近距離では減衰率 $\sim 2\%$ であった。TA-JAVA に入力する FD 較正值は全て UHECRs のシャワー解析に用いられる値と同じである。AFY の詳細は後述するが過去の実験値を用いた。FD の主な較正值は鏡の反射率、紫外光透過型フィルターの透過率、PMT の量子効率と収集効率、PMT のゲインである。鏡の反射率は数か月毎に測定している。フィルターの透過率はレーザーで測定した値を用いた。PMT の量子効率や収集効率、ゲインは窒素レーザーを用いた CRAYS によって測定した値を用いた^[11]。観測中は YAP と Xe フラッシャーを用いて 1-2 時間毎に PMT の相対ゲインを測定している^[12]。ELS が設置されている TA サイトの FD-BRM サイトには FD が 12 台 (縦に 2 台 \times 横に 6 列) 設置されている。ELS はこの内の 1 列分の 2 台の FD の真正面に接地されているので電子ビームによって生成される空気シャワーはこの 2 台の FD のみで観測し、エネルギー較正も 2 台の FD を用いて行う。1 つの FD には PMT が 256 本あり、合計 512 本を用いる^[7]。

4.2 大気蛍光収量 (AFY) 測定

今回絶対エネルギー較正として AFY 測定を行った。TA で AFY は FLASH 実験^[26] と Kakimoto 実験^[25] の

測定値を使用している (FK model)。PAO は Nagano 実験^[23] と AirFly 実験^[24] の測定値を用いる。AFY のモデルが統一されていないため、2012 年の UHECR シンポジウムにて AFY の標準モデルが提案された^[27] (SM model)。そこで FK-model、SM model を用いた MC をそれぞれ作成して DATA と比較し、AFY モデルの検証を行った。但しこの検証には FD 較正值が正しいという仮定が必要になり、結果には FD 較正值の系統誤差が含まれる。今回用いる FK-model と SM model について簡単にまとめる。

- **FK model:** AFY の波長スペクトルは FLASH 実験の 300-420 nm の測定値を用いた^[26]。絶対光子数は Kakimoto 実験の 300-400 nm の波長領域の総光子数^[25] を FLASH 実験のスペクトル領域に合わせてスケールされた値を用いる絶対光子数は ($Y_{FK}^{300-420nm}$)。FK model には温度、大気密度依存性 (空気中での衝突消光効果) が含まれるが湿度依存性 (水蒸気による衝突消光効果) は含まれない。
- **SM model:** 波長スペクトルには AirFly 実験の 296-428 nm の測定値を用いる^[24]。消光効果を決めるパラメータは複数の実験で得た値の加重平均値を用いた^[27]。但し波長 337 nm の絶対光子数は 2013 年 7 月の時点で未決定である。そこで 2013 年に発表された AirFly 実験の最新実験値を用いた^[28] (Y_{SM}^{337nm})。

温度 293 K、気圧 1013 hPa、相対湿度 0% の大気条件でのそれぞれの AFY を表記する。

$$Y_{FK}^{337-420nm} = 16.4 \text{ [photons/MeV]} \quad (1)$$

$$Y_{FK}^{337nm} = 4.29 \text{ [photons/MeV]} \quad (2)$$

$$Y_{SM}^{337nm} = 5.61 \text{ [photons/MeV]} \quad (3)$$

AFY の測定は 1 パルス毎の出力ビーム電荷量と 512 本の PMT で検出された総 FADC 値との比例係数 (a) を DATA と MC でそれぞれ求め、その比 (DATA/MC) を $Y_{FK}^{337-420nm}$ または Y_{SM}^{337nm} に掛ける事で AFY の測定を導く事ができる。即ち、

$$R^{FK,SM} = a^{data} / a^{mc,baseonFK,SM} \quad (4)$$

$$Y_{FK,SM}^{measured} = R_{FK,SM} \times Y_{FK,SM} \quad (5)$$

AFY の測定には 2012 年 7 月 (3,600shots)、11 月 (10,000shots)、2013 年 3 月 (9,000shots) に取得した DATA を用いた。3 期の運転によって -17°C から $+20^\circ\text{C}$ の範囲でデータを得る事ができた。図 7 に 2013 年 3 月に取得した DATA と MC の比較結果を表す。ここで X 軸はパルス毎のビーム電荷量 (pC)、Y 軸は積分 FADC 値に相当する光子数である。⁴ 点が DATA、実線が MC の結果である。FK model を使用した場合の線形関係が DATA と MC で異なっている事が分かる。図 8 に各温度毎の ATA/MC を示す。実線は測定点の加重平均値である。最後にビームロス起因の低エネルギー γ 線によるバックグラウンドの寄与、空気中で放射されるビーム起因のチェレンコフ光の寄与、FC5 に入射した真のビー

⁴FADC 値を CRAYS で得た 337 nm の光子数と FADC 値の変換因子 (~ 0.5 FADC/photon) で割った値

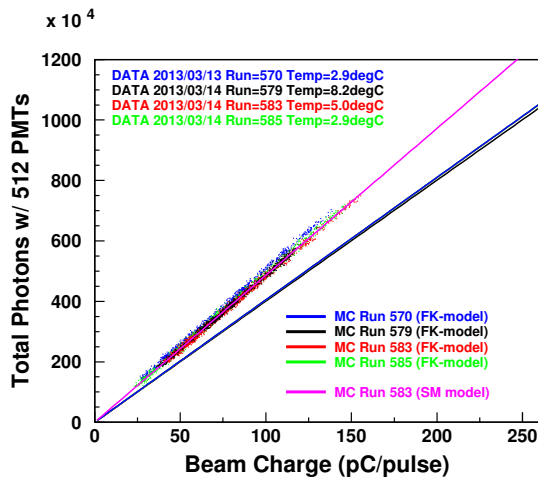


Figure 7: The correlation of total photon numbers and beam charge of each pulse.

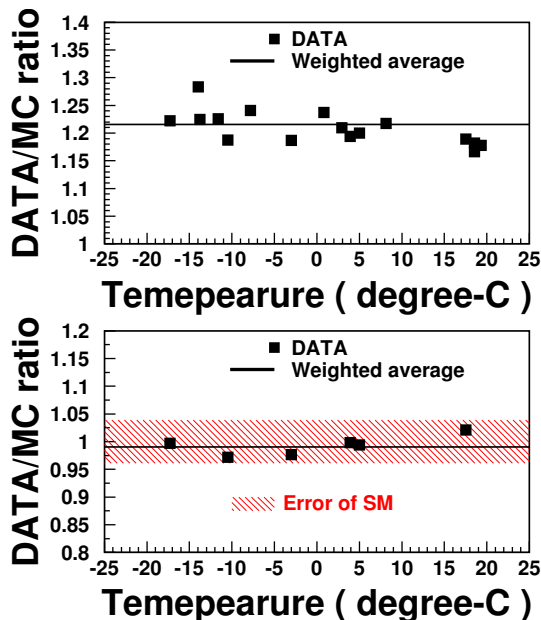


Figure 8: The ration of DATA/MC which X-axis is temepearure. FK model result is shown in uuper, and SM model result is shown in lower.

△電荷量に対する FC5 からの漏れ電荷量の補正の合計を-3%として加重平均値への補正因子とした。得られた最終結果と統計誤差、系統誤差を記述する。

$$R_{FK} = 1.18 \pm 0.01(\text{stat}) \pm 0.18(\text{sys}) \quad (6)$$

$$R_{SM} = 0.96 \pm 0.01(\text{stat}) \pm 0.15(\text{sys}) \quad (7)$$

AFY の測定値は式 5 から求める事ができる。TA が使用している FK model では DATA と MC の間に約 20% のずれが生じた。AirFly 実験の最新値と用いた SM model を使用した場合に DATA を良く一致した。系統誤差は ±15% と見積もった。内訳は、FD 較正定数に 10%、FC によるビーム電荷量測定精度に <11%、空気シャワー構造比較と FD の光学特性に 5% である。今後の課題は系統誤差の改善と上述した補正項目をシミュレーションに

導入する事である。ビーム電荷量測定精度は FC5 を用いた事により大幅な改善がなされた。今後精度の良い電荷量測定時の DATA を用いる事で系統誤差の改善が可能である。

5. まとめ

UHECRs は複数の大規模実験によって大きな進歩と共にエネルギースケール、核種等の早期解決を要する重要な問題も残っている。ELS は TA の絶対エネルギースケールを決定する end-to-end の較正装置である。ELS の重要課題であるビーム電荷量測定精度も FC5 や測定機器の環境改善により再現性のある安定した 3% を得た。3 期分の DATA を用いた FD 絶対エネルギー較正を行った。解析は AFY モデルを TA の公式モデルである FK model、2012 年に提案された SM model を用いて DATA/MC 比から AFY の収量値を求めた。結果、FK model を仮定した場合は DATA と MC の差は 18% であり、SM model の場合は 4% であった。今後は精度の良い DATA を用いた解析を行い系統誤差の改善を行う。

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.Kawai et al.,Nucl.Phys.B-proc. Suppl.,175-176(2008)221
- [4] H.Kawai et al.,J.of the Phys.Soc.of Japan Suppl.A,78(2009)108
- [5] D.Ivanov, B.T.Stokes et al.,ApJ,768,L1(2013)
- [6] T.Nonaka et al., Nucl.Instr.and.Meth.A,689(2012)87
- [7] H.Tokuno et al., Nucl.Instr.and.Meth.A,676(2012)54
- [8] K.Yamazaki et al.,Proc.ICRC-2013,Rio De Janeiro,Brazil
- [9] K.Machida et al.,Proc.ICRC-2013,Rio De Janeiro,Brazil
- [10] T.Tomita et al.,Nucl.Instr.and.Meth.A,654(2011)653
- [11] S.Kawana et al.,Nucl.Instr.and.Meth.A,681(2012)
- [12] B.K.Shin et al.,Proc.ICRC2013,Rio De Janeiro,Brazil
- [13] Y.Tsunesada et al.,Proc.ICRC-2013,Rio De Janeiro,Brazil
- [14] J.Abraham et al., Nucl.Instr.and.Meth.A,523(2004)50
- [15] M.Bertaina, Presentation in 1st UHECR. in Nagoya, 2010
- [16] V.Verzi for the PAO Proc.ICRC2013,Rio De Janeiro,Brazil
- [17] V.D.Souza and E.-J.Ahn for the PAO Proc.ICRC2013,Rio De Janeiro,Brazil
- [18] B.R.Dawson et al., Proc.UHECR2012,CERN,Geneva
- [19] IceCube Collaboration, Phys.Rev.Lett.111,021103(2013)
- [20] L.G.Dedenko et al.,J.of Physic.Conf.Seri.,409(2013)01206
- [21] T.Shibata et al.,Nucl.Instr.and.Meth.A,597(2008)61
- [22] T.Shibata et al., Proc. of 9th PASJ,2012
- [23] M.Nagano et al., Astrophys.J.20(2003)293
- [24] B.Buonomo et al., Astrophys.J.28(2007)41
- [25] F.Kakimoto et al.,NIMA,372(1996)527
- [26] R.Abbasi et al.,Astrophys.J.29(2008)77
- [27] B.Keihauer et al.,Proc.UHECR2012,CERN,Geneva,arXiv:1210.1319
- [28] M.Ave et al.,Astropart.Phys.42(2013)90.