CTA報告177:
CTA大口径望遠鏡初号機のカメラ較正

日本物理学会2021年秋季大会

2021年3月13日

小林志鳳[A]，阿部日向[A]，稲田知大[A]，猪目祐介[A]，岩村由樹[A]，大石理子[A]，大岡秀行[A]，大谷恵生[A]，岡知彦[B]，岡崎奈緒[A]，奥村曉[C, D]，折戸玲子[E]，片桐秀明[F]，櫛田淳子[G]，窪秀利[B]，郡司修一[H]，齋藤隆之[A]，榊直人[A]，櫻井駿介[A]，Marcel Strzys[A, I]，砂田裕志[J]，Anatolii Zenin[C]，高橋満里[A]，高橋光成[A]，立石大[J]，田中真伸[K]，千川道幸[A]，手嶋政廣[A, I]，寺田幸功[J]，門叶冬樹[H]，中森健之[H]，生天目康之[G]，西嶋恭司[G]，野上優人[F]，野崎誠也[B]，野田浩司[A]，野村亮介[A]，Daniela Hadasch[A]，原田善規[G]，深見哲志[A]，Ievgen Vovk[A, I]，Daniel Mazin[A, I]，山本常夏[L]，吉越貴紀[A]，吉田龍生[F]，他CTA-Japanコンソーシアム

東大宇宙線研[A]，京大理[B]，名大 ISEE[C]，名大 KMI[D]，徳島大理工[E]，茨城大理[F]，東海大理[G]，山形大理[H]，マックスプランク物理[I]，埼玉大理[J]，KEK 素核研[K]，甲南大理工[L]

Cherenkov Telescope Array, CTA

現在建設中の新たな**ガンマ線天文台**

- 大中小の望遠鏡を展開
- 現行の望遠鏡と比べて
  - **10倍の感度向上**
  - 10倍広いエネルギー帯域
    20 GeV - 300 TeV
- 角度分解能 ~0.05度@ 1 TeV
- エネルギー分解能 ~7%@ 1 TeV

大口径望遠鏡(Large Size Telescope, LST)

LST初号機

焦点面カメラ

- 広い反射鏡と高感度かつ高速読み出しのカメラ
- **低エネルギー側 (20GeV - 3 TeV)の観測に重要。**
- 高速回転 (<20秒)により突発天体の観測も可能。

LSTカメラの電荷較正の必要性

ガンマ線由来の電磁シャワーは
チェレンコフ光を放射

チェレンコフ光をPMTで電荷に変換して検出

チェレンコフ光の明るさは入射ガンマ線のエネルギーにおおよそ比例する。

ガンマ線のエネルギー再構成にはチェレンコフ光量の推定が肝心。

→ カメラの電荷較正(変換係数の見積もり)が重要。

LSTの電荷分解能に対する要求値は10%

Fファクター法による較正

較正用光源から得られる読み出し電荷の分布を使い、
その光源から検出される光電子数を推定。

検出光電子数

$$\overline{N_{\mathrm{p.e.}}} = \frac{\overline{Q}^2}{\sigma_Q^2} F^2$$

変換係数

$$C = \frac{\overline{Q}}{\overline{N_{\mathrm{p.e.}}}}$$

電荷分布 (現地で測定)

$$\overline{Q} = C\overline{N_{\mathrm{p.e.}}}$$

$$\sigma_Q^2 = C^2\overline{N_{\mathrm{p.e.}}}$$

ポアソン統計

Fファクター(PMTに固有)

Fファクターは事前に
実験室で測定

$F^2 \sim 1.2$

日本物理学会2015年秋季大会
高橋光成
その他 CTA-Japanコンソーシアム

観測中であっても変換係数の変化をモニターすることが可能

本研究の動機

本研究の目的

LST初号機カメラの電荷較正の安定性を確かめる。

この目的のため、以下の項目について調査した。

1. **時間安定性**

   長時間(約3時間)の較正データを取得

2. **背景光レベルに対する安定性**

   背景光レベルが変動する状況で較正データを取得

3. **望遠鏡の向きに対する安定性**

   望遠鏡の天頂角と方位角を変えて較正データを取得

較正結果の時間変化

3時間の較正用データで時間安定性を調査(1849 PMTの平均をプロット)

読み出し電荷 $\overline{Q}$

Fファクター法による推定光電子数 $\overline{N}_{p.e.}$

変換係数 (C = $\overline{Q}$ / $\overline{N}_{p.e.}$)

読み出し電荷と推定光電子数との間に線形性を確認。

検出光電子数は~2%ほど変動しているが,

変換係数は光電子数とは独立で、時間に対して安定

であることを確認できた。

変換係数の時間安定性の詳細

PMT 1849本の平均、10^4イベント(~10秒) 毎に較正

標準偏差 **0.05%**

統計誤差 **0.04%**

変動は0.1%より小さく、統計誤差とおおよそ一致。

1 PMT、10^5イベント(~100秒) 毎に較正

標準偏差 **0.55%**

統計誤差 **0.48%**

１PMTでも変動は１%より小さく、揺らぎは統計誤差程度。

背景光レベルに対する安定性

背景光レベルが変動する状況で較正用データを取得。
(LSTでは5倍の背景光レベルでも観測できることが要求されている。)

変換係数の背景光レベル依存性をフィット。
通常時からの変換係数の変化を見積もった。

- **5倍**の背景光 →**1%未満の変化**

- **10倍**の背景光 → **2%以内の変化**

2020年9月9日(青色)のデータは
背景光レベルの範囲が狭く、誤差が大きい。

背景光は較正に大きく影響しない。

ただし、変換係数の背景光依存性の原因については今後調査が必要。

- 背景光レベルや背景光に晒された時間による実際のPMTゲイン変化？
- 温度など背景光以外の系統的要因？

望遠鏡の向きに対する安定性

望遠鏡を異なる方向に向けて較正用データを取得。

変換係数が**望遠鏡の回転と同期して小さな (~0.5%) 変動を示した。**

全く問題にはならない

- 変動は小さい (~0.5%)
- 実際のPMTゲインの変化なら、Fファクター法で追跡できる。

変動の原因を明らかにするため、地磁気との相関を調査した。

変換係数と磁場の相関

望遠鏡サイトの地磁気からPMT内の磁場の成分を計算。

変換係数と
PMT内部の磁場に
相関を確認！
磁場によるPMTゲインの
変化を示唆。

LST初号機カメラをFファクター法で較正すれば
磁場によるわずか ~0.5%の変動を検出可能。
カメラの安定性と較正精度の高さを示している。

まとめ

- ガンマ線のエネルギーはチェレンコフ光の明るさから推定でき、精度の良い推定にはカメラの電荷較正が重要である。(LSTの電荷分解能に対する要求値は10%)
- 本研究では、LST初号機カメラの電荷較正の安定性を調査した。
- 3時間の較正データから、**変換係数は時間に対して安定であり、１PMTだけを見ても変動は１%よりも小さい**ことが確かめられた。
- 背景光レベルによる変換係数の変化は、**5倍の背景光で1%以内、10倍の背景光で2%以内であり、大きな問題にはならない。**ただし、背景光依存性の原因については今後調査が必要。
- **変換係数がPMT内の地磁気成分と相関して~0.5%変動することを確かめた。**これは、**LST初号機カメラの電荷較正の安定性と精度の高さを示す。**
- 以上の結果より、**LST初号機カメラの電荷較正が安定して働いており、時間(3時間)、夜光レベル、望遠鏡の向きは較正結果に大きく影響しないことが確かめられた**。