CTA報告 217: 最尤法を用いるCTA 小口径望遠鏡の角度分解能の向上の検証

名大ISEE^A, 名大KMI^B バンソンヒョン^A 奥村曉^{A,B}, 田島宏康^{A,B},髙橋光成^A 他 CTA SST プロジェクト

1

Cherenkov Telescope Array (CTA)

Gabriel Pérez Diaz, IAC / Marc-André Besel CTAO





- 小口径望遠鏡は5 TeVから
 300 TeVのエネルギーで感度
 が良い
- 70 台を広く設置すること

で、大きな有効面積

CTA 小口径望遠鏡によるチェレンコフ像



- 焦点面カメラは32個のモジュール
- 一個のモジュールで 8 × 8 画素で構成、1 画素 → 0.16 deg
- チェレンコフ光は、タイル状に並んだ光検出器が 32 × 64 = 2048画素

で光電子に変換し、2次元分布のチェレンコフ像として撮影される





- 重みづけは経験的で必ずしも軸の決定精度を正しく反映してない
 - 3台以上の望遠鏡の観測 → 複数の交点
 - ・ 光量となす角で交点を重みあげて平均 → γ-ray 到来方向
- 到来方向の推定誤差が自動的に求められない。
- 以上の課題を解決するため、最尤法を導入する

最尤法によるガンマ線シャワー再構成



• 尤度関数 →
$$L_{\text{total}} = \prod_{i} \prod_{j} L_{i}(Q_{ij}; \Lambda_{i})$$

 $\Lambda_i = f_i(E, X, \Theta)$:形状パラメター,*i*:telescope #,*j*:pixel number, Q:光量

与えた単独のガンマ線のエネルギー(E)と位置(X)、到来方向(Θ)に対して
 それぞれの望遠鏡で像の形状と向きが決まる

→ その像で計算した尤度関数が最大になる E,X,Θ を個々の像に正しく重みを反映して求め、その推定誤差まで求める

研究の手順

- ガンマ線シャワーを最尤法で正しく再構成するために、像ごとに、誤差を適切に推定できる必要がある
 - 像がはみ出すときも、適切に最尤法が機能するか検証した。
- 最尤法のモデルに2次元ガウス分布を用いて像の軸の決定精度と推定誤差を評価した
 - 最尤法のモデルと像の形が合致する時
 - ガンマ線によるチェレンコフ像を模した2次元ガウス分布の像を生成する
 Toy モンテカルロシミュレーション(Toy MC)のデータを用いた
 - 最尤法のモデルと像の形が合致しないガンマ線像の適用
 - ガンマ線シャワーのフルモンテカルロシミュレーション(Full MC)の
 データを用いた



- 高エネルギーガンマ線では、視野外への像のはみ出しが発生
 - シャワーが長いため
 - 光量が多く、遠方の事象もトリガーできる
- 小口径望遠鏡でははみ出し像が支配的
- Toy MCを用いてはみ出しの影響を評価した

Energy [TeV]

トイモンテカルシミュレーション

視野内に観測した総光電子量の平均が 500 光電 89% はみ出し割合 子 → 平均的に5 TeVに相当





- 2次元ガウスのモデル像の位置と向きをランダムに多数生成した
- $\Delta \psi$ は真の軸と計算した軸の間の角度である
- 2次元ガウシアン像でカメラ視野外にある割合をはみ出し割合と呼ぶ

トイモンテカルロでの軸の決定精度



- σ₆₈は Δψ 分布の68%を含む領域の半値であり、ガウス分布であれば標準偏差と等しくなる
- 最尤法ではベーシック手法と比較して角度決定精度の劣化をおさえられる

トイモンテカルロでの軸の推定誤差



- $\psi_{\text{MLE\,error}}$ は最尤法で像ごとに推定した軸の誤差であり、 平均的に $\sigma(\Delta \psi)$ と等しくなると期待されるため、 $\sigma(\Delta \psi)$ を $\psi_{\text{MLE\,error}}$ 割ると標準偏差が1であるガウス分布状になる
- 2次元ガウス同士で最尤法フィットをすると、はみ出し割合が 90 %まで軸の誤差が 正しく推定されていることが確認できた

フルモンテカルロシミュレーション(Full MC simulation)

 空気シャワーとチェレンコフ光を発生させ(CORSIKA)、光学系とトリガーシ ミュレーション(sim_telarray)でガンマ線チェレンコフ像を生成

Power law index	Energy range
-2.0	0.1 – 300 TeV

 ガンマ線像に2次元ガウス分布のモデルで最尤法を適用することによって像の軸の 決定精度とその推定誤差がどのようになるかを確認した

Full simulationでのガンマ線像の軸の決定精度



- ガンマ線エネルギーが およそ20 TeV以上では、はみ出し割合が 10 % 以上の場合、最尤法による軸の決定精度が約 20 % 向上した
- ToyMCに比べて向上は小さい
- 最尤法の $\Delta \psi$ 分布はガウス分布状にならない

Full simulationでのガンマ線像の軸の推定誤差



- 軸の推定誤差2倍以上過小評価する
- ガンマ線像に適合しない2次元ガウスモデルフィットが、系統的な問題を生じた
- ガンマ線像に適合するモデルを採用すれば、誤差評価の改善が見込まれる
- 同時に、軸の決定精度のさらなる向上も見込まれる

まとめ

- 最尤法を導入することで、個々のガンマ線シャワー像のパラメータに決定精度
 を反映してガンマ線シャワー再構成ができる
 - ガンマ線の到来方向やエネルギーの誤差を推定できる
- はみ出し像で、最尤法が誤差を正しく推定できるか確認した
 - 最尤法のモデルと像の形が合致するトイMCでは、はみ出し像に対して推定 誤差がよく計算でき、軸の決定精度も2から6倍向上した
 - フルMC(モデルと像形状が不一致)では、軸の決定精度はおよそ 20%向上したものの、形状の差により誤差が正しく推定できない