

CTA報告 231

小口径望遠鏡での時間展開を用いた
ガンマ線シャワーの推定の検証

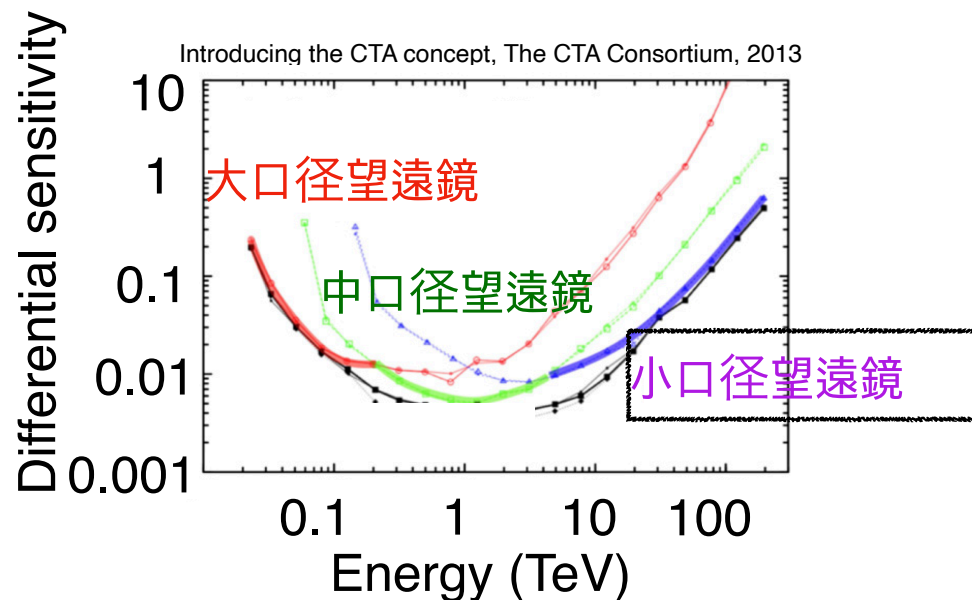
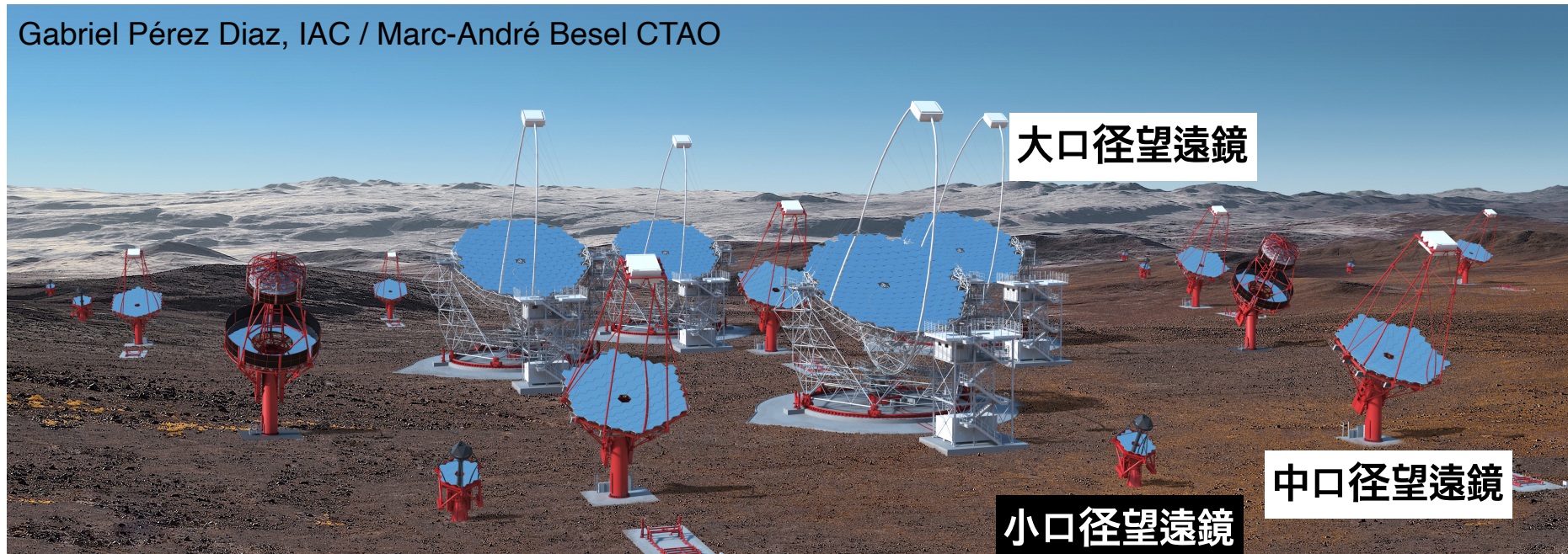
バンソンヒョン^A

名大ISEE^A, 名大KMIB^B

奥村暁^{A,B}, 田島宏康^{A,B}, 高橋光成^A

Cherenkov Telescope Array (CTA)

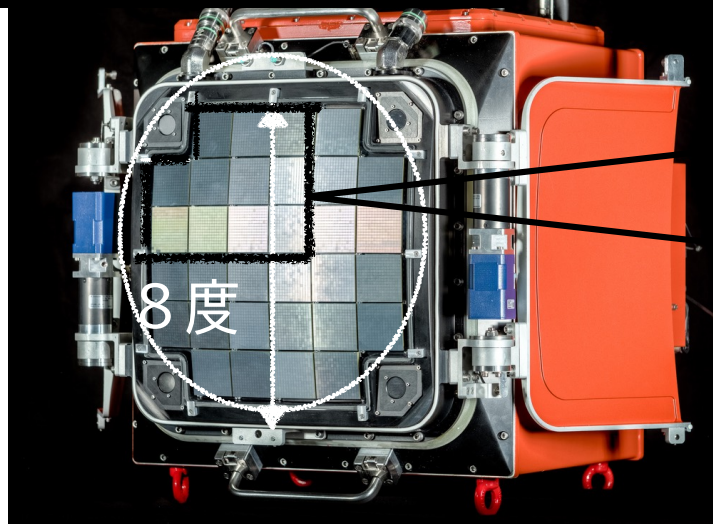
Gabriel Pérez Diaz, IAC / Marc-André Besel CTAO



- 小口径望遠鏡は 5 ~ 300 TeV のエネルギーで感度がよく、70 台を広く設置することで、大きな有効面積をもつのが特徴

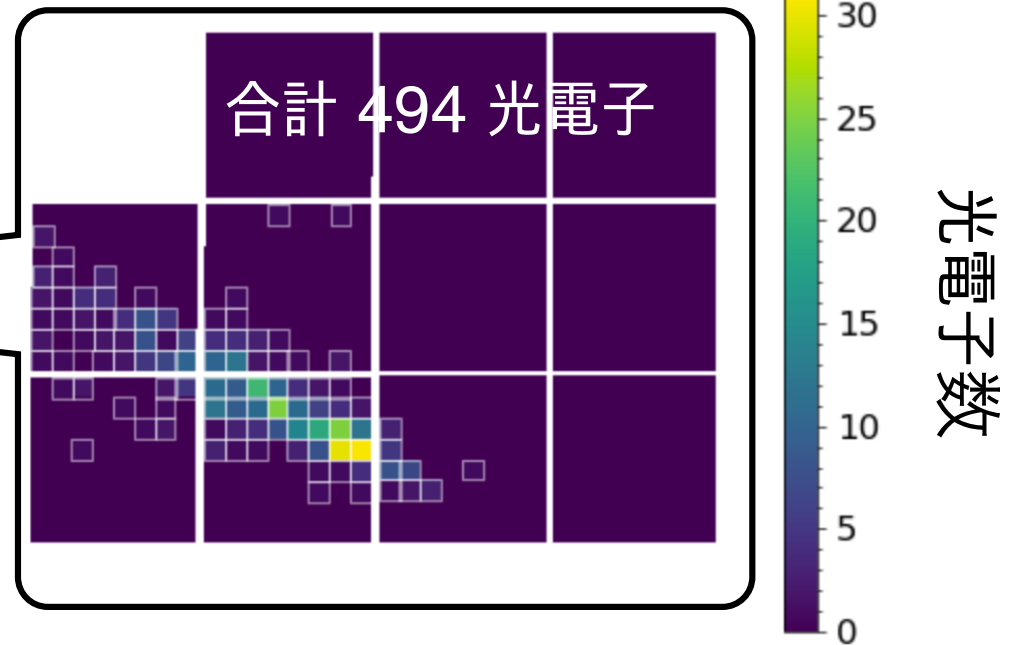
CTA 小口径望遠鏡によるチェレンコフ像

小口径望遠鏡焦点面
カメラプロトタイプ



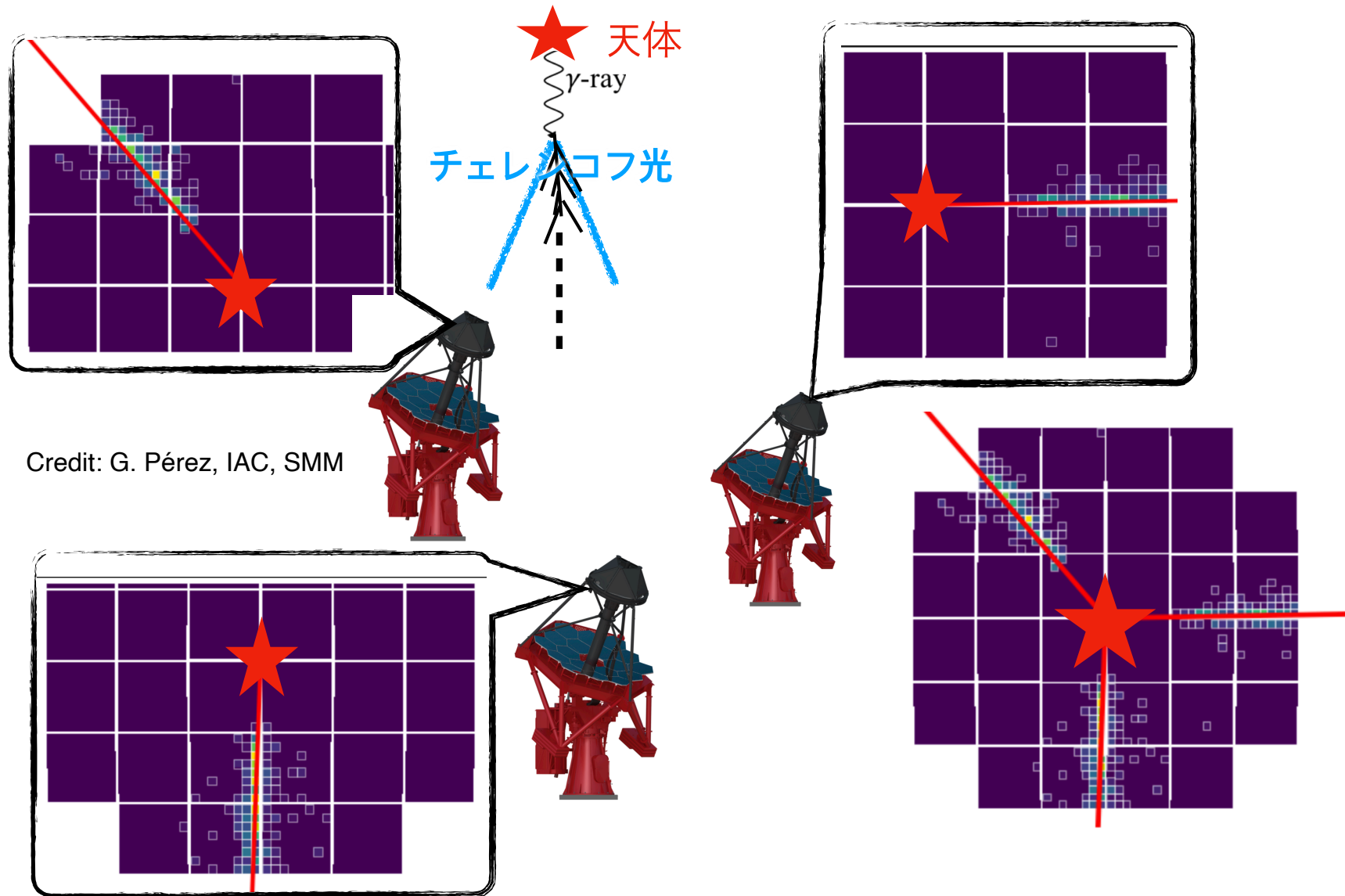
画像提供:Christian Föhr

12 TeV モンテカルロチェレンコフ像

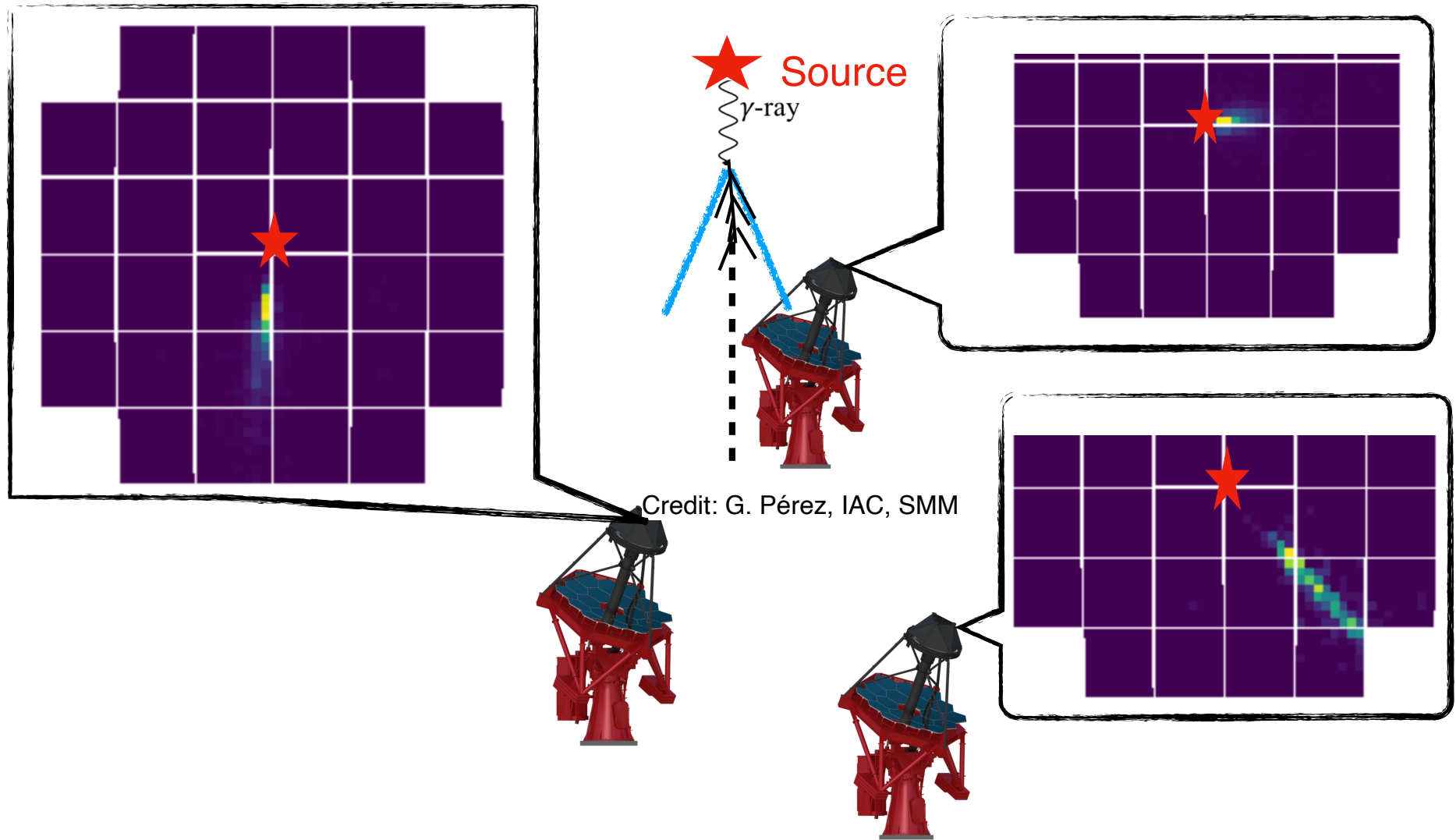


- 焦点面カメラは
 - 8 × 8 画素の SiPM を32 個のモジュール並べ、2048画素で構成
 - 1 画素 → 0.16 deg
- 焦点面カメラに入射したチェレンコフ光は光電子に変換され2次元分布のチェレンコフ像として撮影される

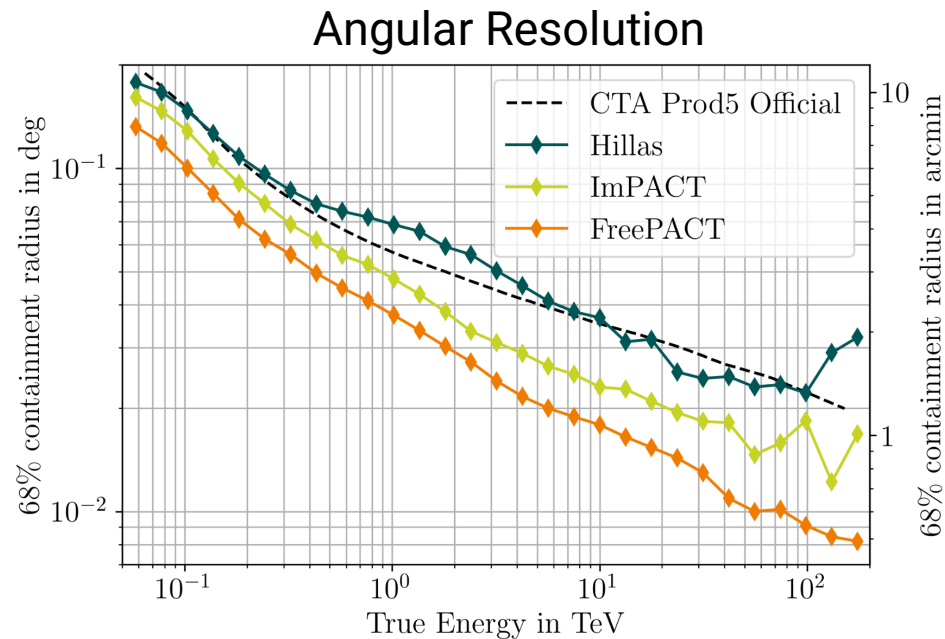
ガンマ線到来方向決定 (Hillas method)



ガンマ線到来方向決定 (ImPACT、FreePACT)



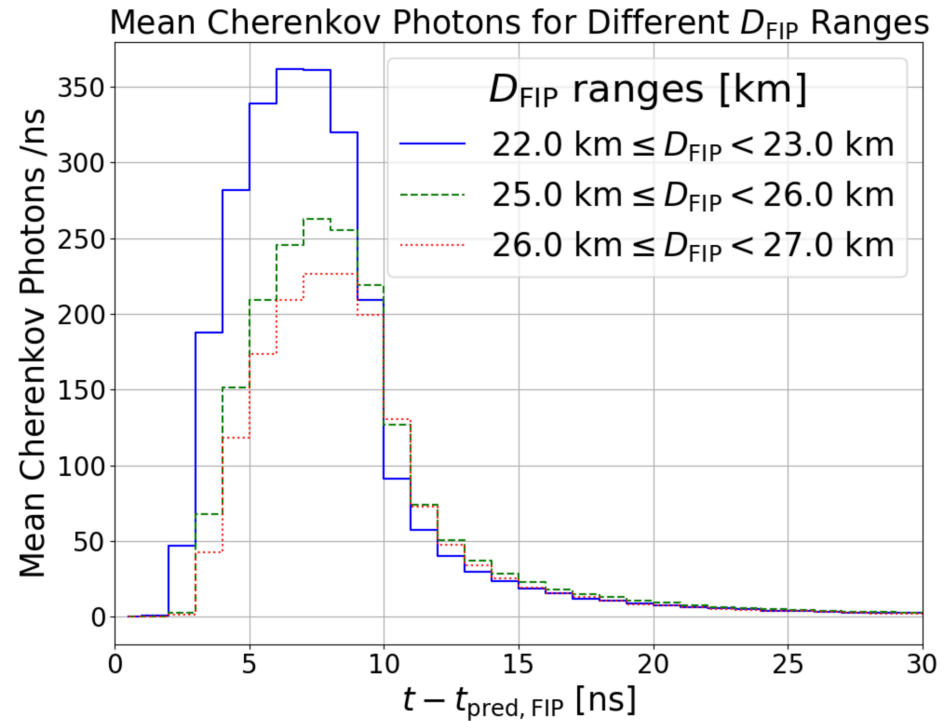
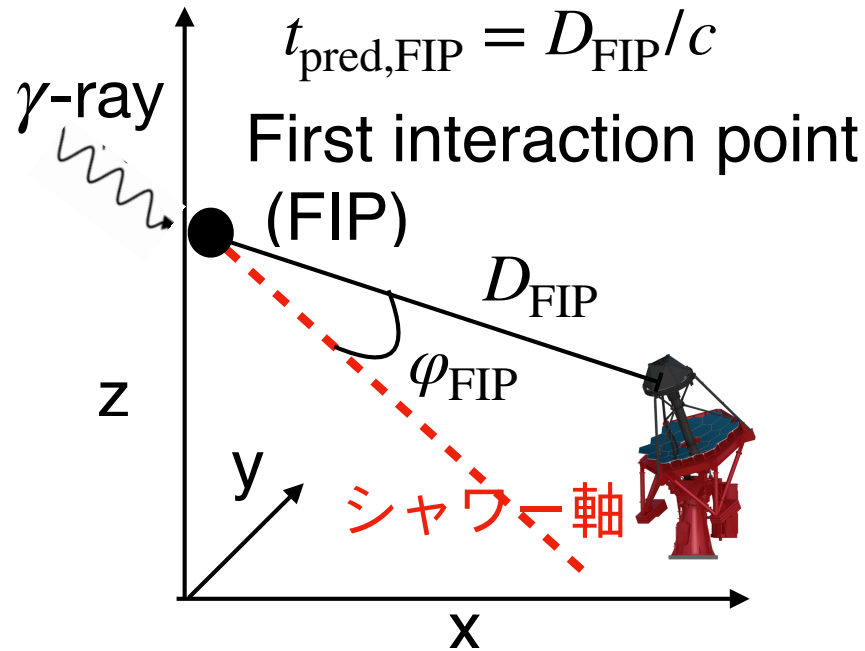
ガンマ線到来方向決定 (ImPACT、FreePACT)



Georg Schwefer, Robert Parsons, Jim Hinton, 'Boosting the Resolution of the Cherenkov Telescope Array with Hybrid Machine Learning-Likelihood Event Reconstruction,' CTAO Symposium (Poster), 2024.

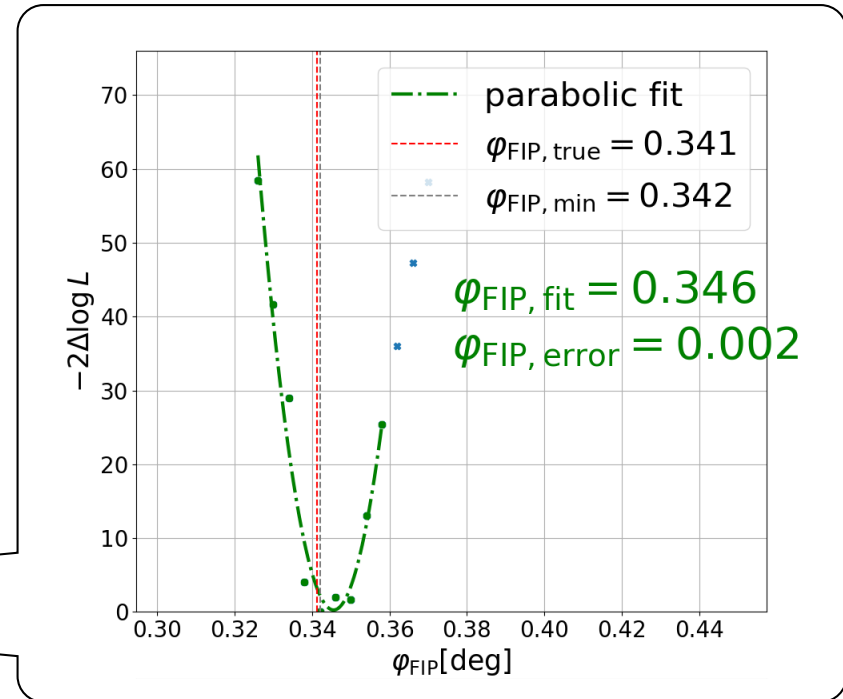
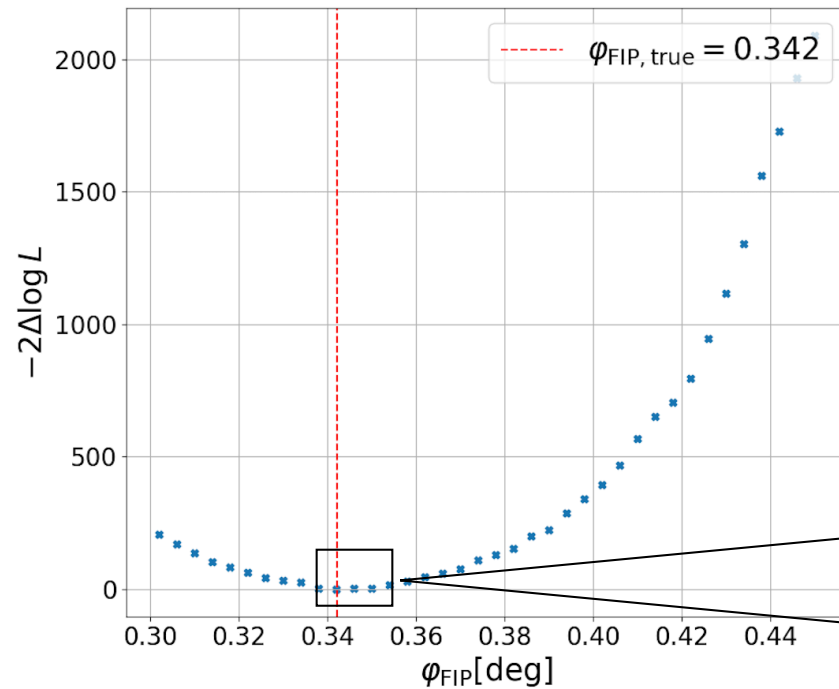
- 角度分解能向上
 - 0.018 deg @ 10 TeV,
0.01 deg @ 100 TeV
- **ImPACTとFreePACTは間接的に (時間で静止した像のみで、) シャワーの発展考慮している**

時間情報からガンマ線到来方向決定



- ガンマ線の到来方向、最初相互点、望遠鏡の位置から
→ φ_{FIP} 、 D_{FIP} が決まる
- 光電子の数の時間発展が φ_{FIP} 、 D_{FIP} によって形状が変わる
- 観測のデータとのその形状を比べれば、ガンマ線の位置を取り戻すことができる

光電子の数の時間発展のモデル評価手法

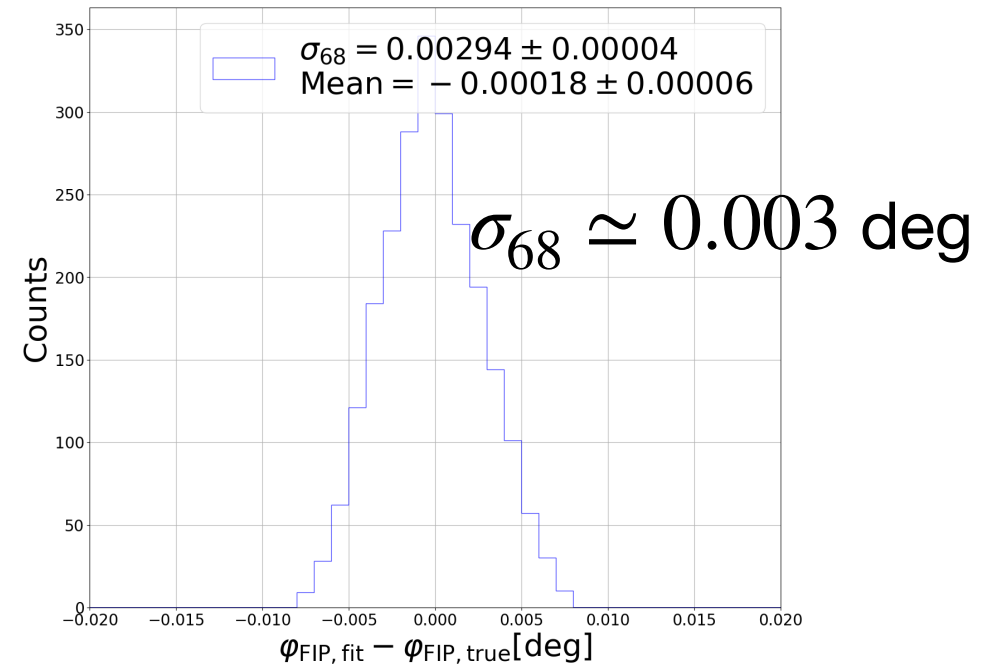
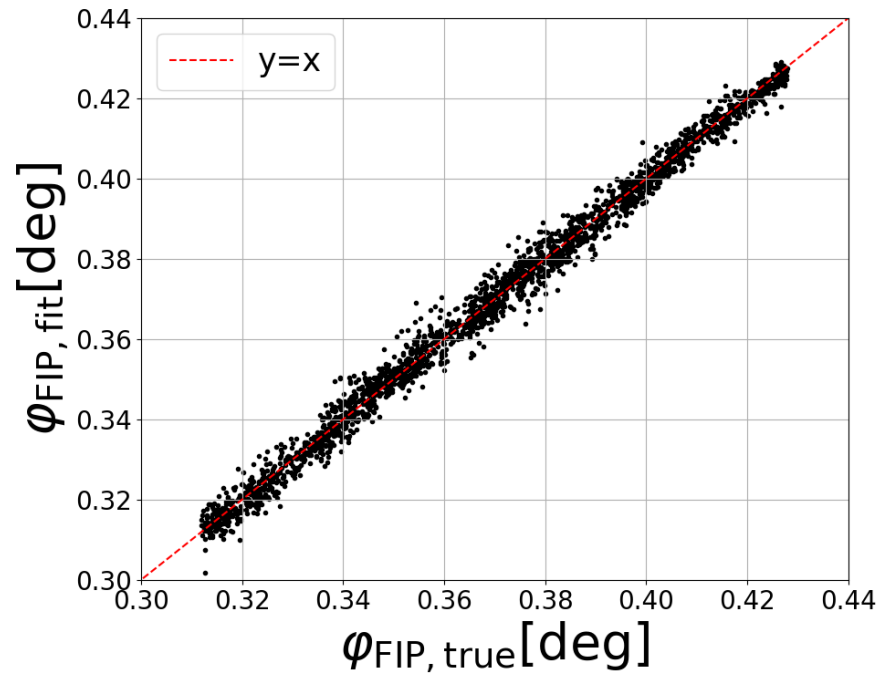


- データとモデル関数から尤度関数を書く
- $\phi_{\text{FIP, fit}}$ → 最小点周辺の尤度値に対する放物線フィット
- $\phi_{\text{FIP, error}}$ → $-2\Delta\log L = 1$ の場合の放物線関数の半値幅

テンプレートの作り方と研究の手順

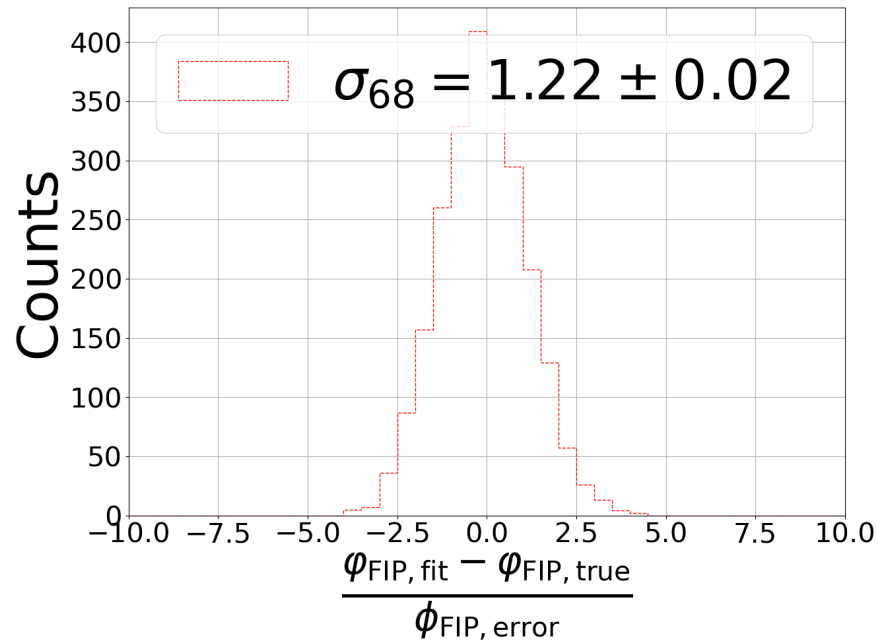
- 10 TeV ガンマ線の小口径望遠鏡のモンテカルロシミュレーションから生成
- 角度 (φ_{FIP}) と距離 (D_{FIP}) をビンで区切り、2次元のテンプレートを作成した
 - テンプレートごとの補完は行わない
 - その代わりに、尤度関数の極小値から放物線フィット
- 本講演の目的のための検証は以下の流れで行う
 - 推定した角度と距離のバイアスとその分解能が報告
 - 推定値と推定誤差の整合性を確認

推定した角度 (φ_{FIP}) のバイアスと分解能



- $\varphi_{\text{FIP, fit}}$ のバイアスが、平均値の3シグマの範囲内に収まる
- その分解能が σ_{68} として $0.003 \text{ deg @ } 10 \text{ TeV}$

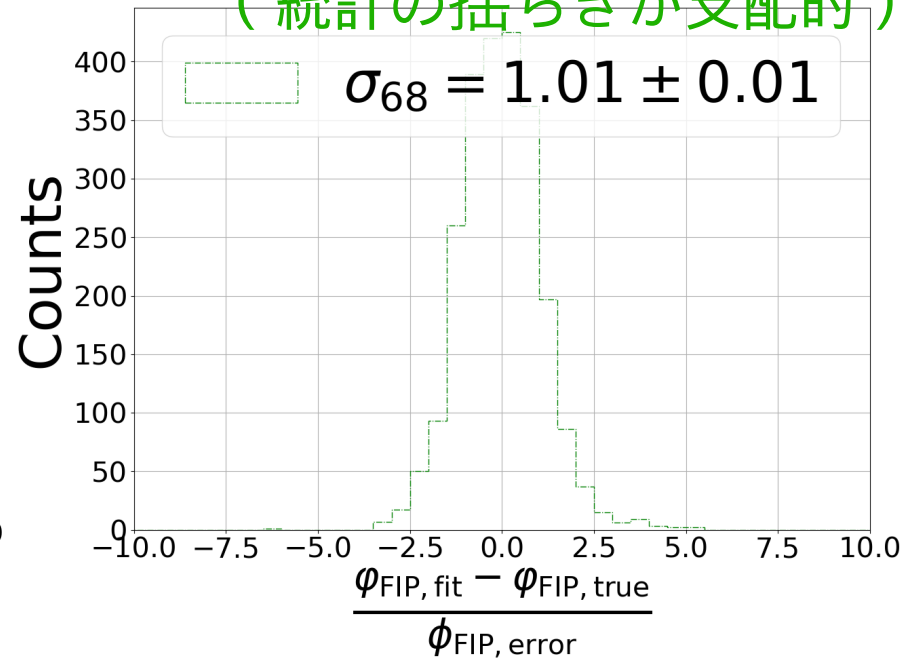
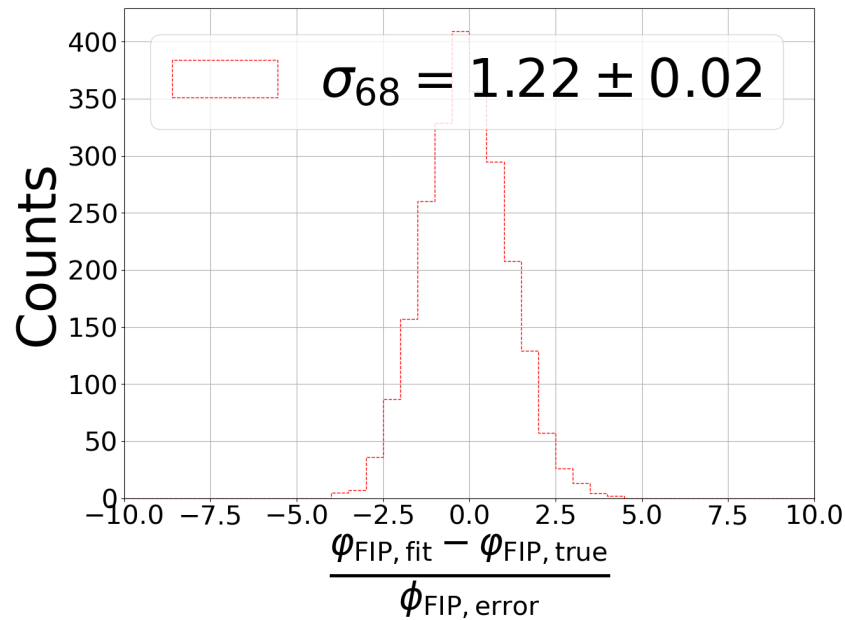
角度 (φ_{FIP}) の推定値と推定誤差の整合性



- $\varphi_{\text{FIP error}}$ はデータごとに推定した誤差であり、平均的に $\sigma(\varphi_{\text{FIP, fit}} - \varphi_{\text{FIP, true}})$ と等しくなると期待されるため、 $\varphi_{\text{FIP error}}$ 割ると標準偏差が 1 になる
- 小口径望遠鏡の鏡サイズでは系統誤差がある

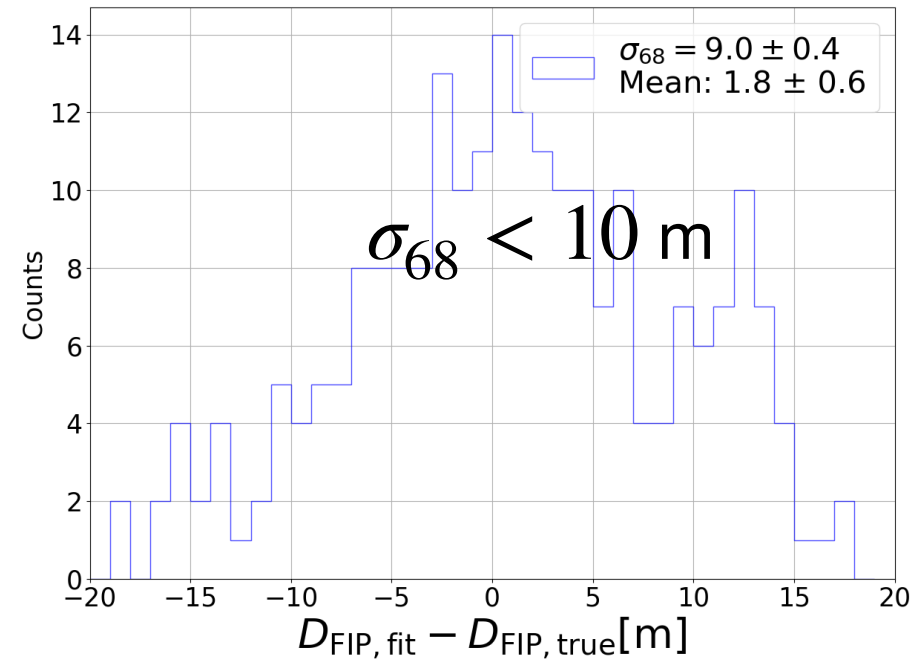
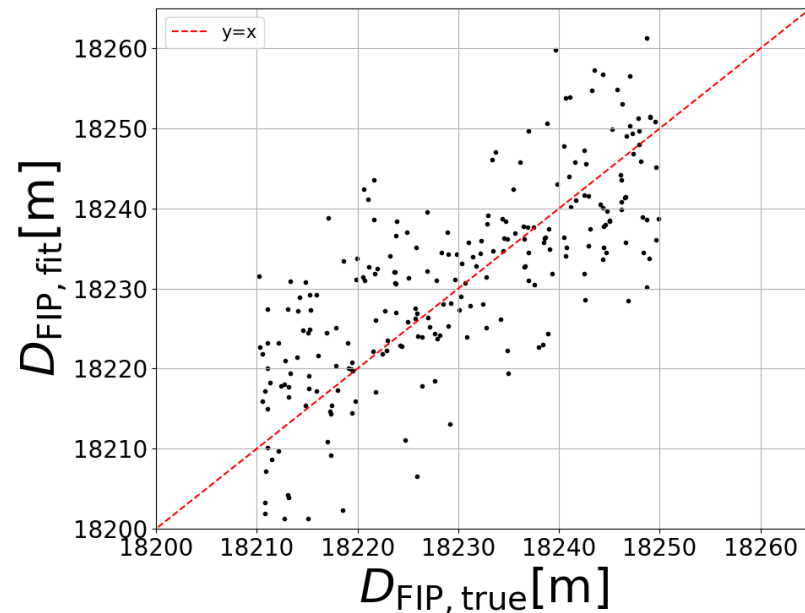
角度 (φ_{FIP}) の推定値と推定誤差の整合性

光量を減らす場合
(統計の揺らぎが支配的)



- 私の手法から推定値と推定エラーは正しいのか
- 光量を減らし、統計的なゆらぎが支配的になるようにして
 - 推定値と推定誤差が整合性があることを確認した
 - 私の手法で、正しく角度の推定することができた

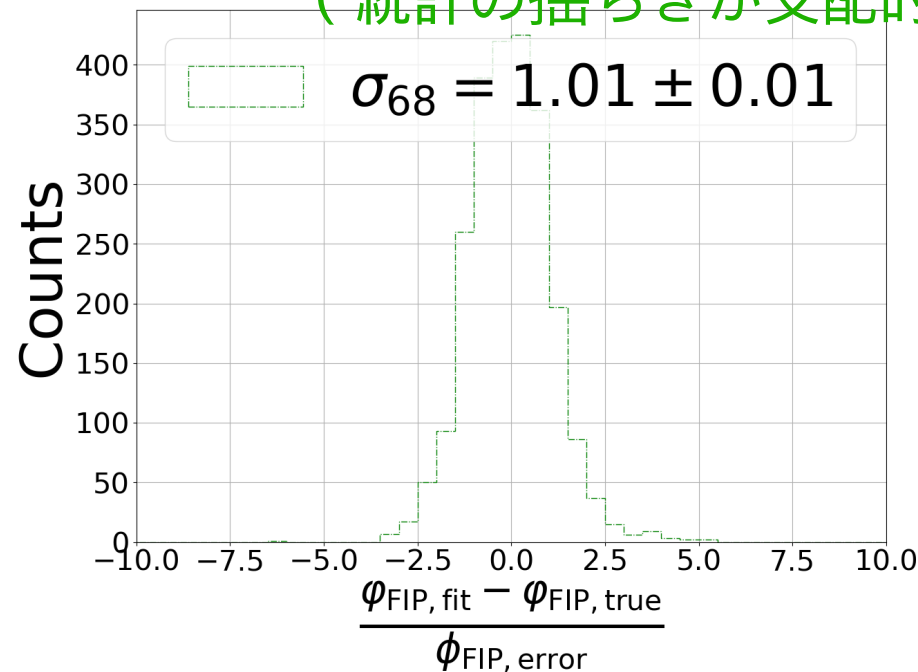
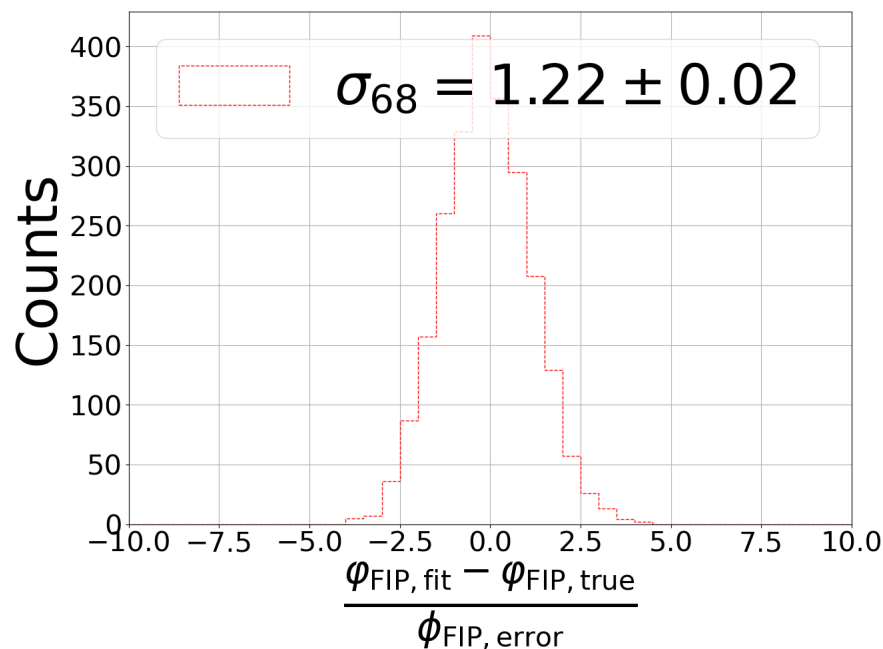
距離 (D_{FIP}) のバイアスと分解能



- $D_{\text{FIP, fit}}$ のバイアスが、平均値の3シグマの範囲内に収まる
- その分解能が σ_{68} として 10 m 以下 @ 10 TeV

距離 (D_{FIP}) の推定値と推定誤差の整合性

光量を減らす場合
(統計の揺らぎが支配的)



- 小口径望遠鏡の鏡サイズでは系統誤差がある
- 統計的な揺らぎが支配的にすると、 $\sigma_{68} \simeq 1$
 - 私の手法で、正しく距離の推定することができた

まとめ

- ガンマ線の到来方向、最初相互点、望遠鏡の位置から
 - φ_{FIP} (角度)、 D_{FIP} (距離) が決まる
- 角度、距離によって、光量の数の時間発展の形状が変化
- 角度、距離を推定することで、ガンマ線の位置を取り戻すことができる
- 私の手法から角度と距離の推定値の検証
 - 角度の精度 → 0.0003 deg (10 TeV)
 - 距離の精度 → 10 m 以下 (10 TeV)
 - 推定値と推定誤差の整合性を確認した