

---

CTAO 報告 237  
チェレンコフ光量の時間発展を用いた  
ガンマ線シャワーの再構築  
バンソンヒョンA  
名大ISEE<sup>A</sup>, 名大KMI<sup>B</sup>  
奥村暁A,B, 田島宏康A,B, 高橋光成A

---

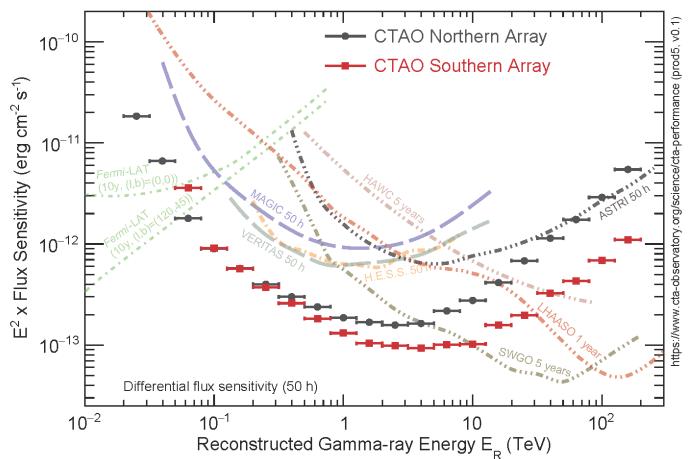
Sunghyun Bang

# Cherenkov Telescope Array (CTA)

Gabriel Pérez Diaz (IAC)/Marc-André Besel (CTAO)/ESO/ N. Risinger (skysurvey.org)

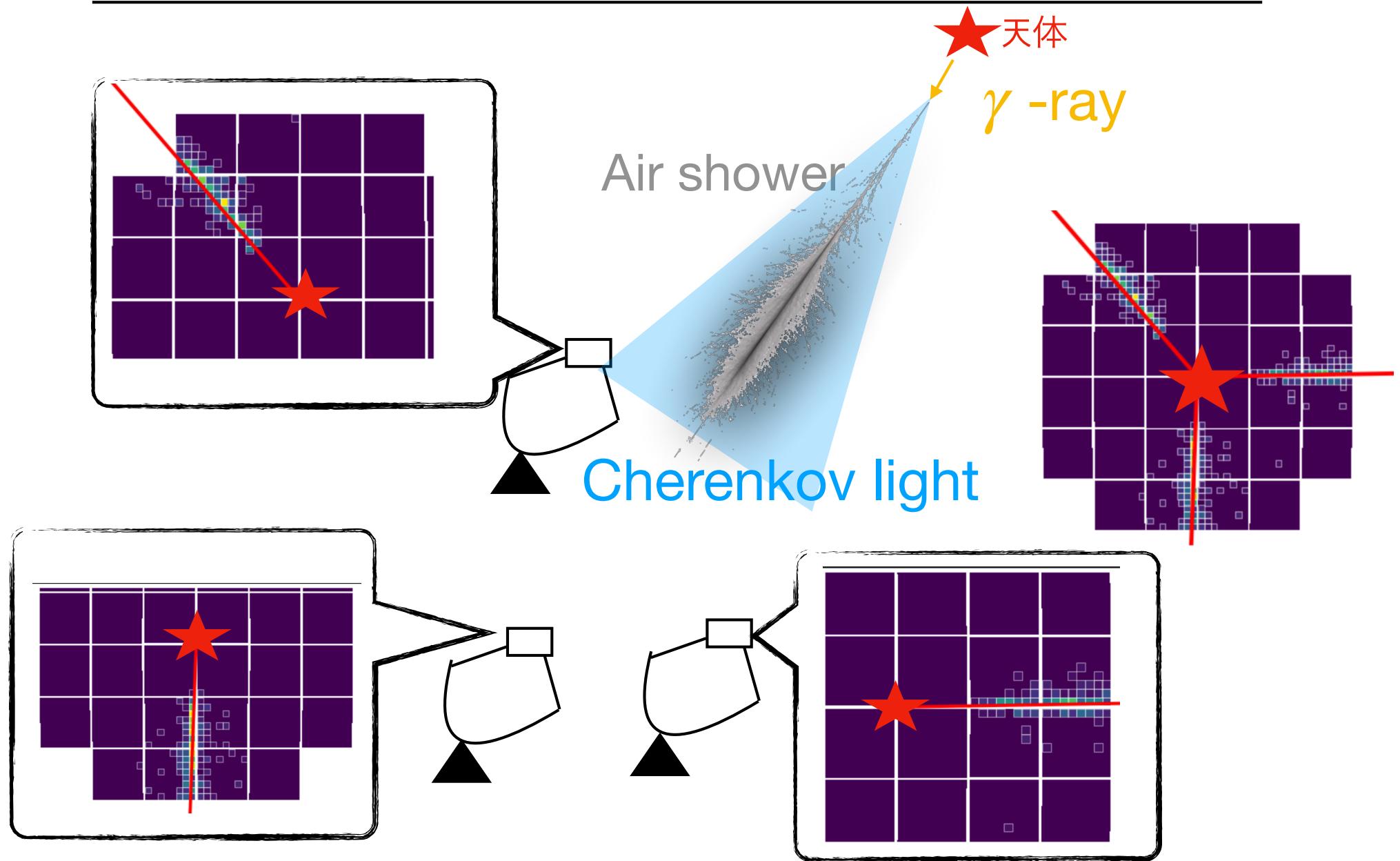


<https://www.ctao.org/for-scientists/performance/>



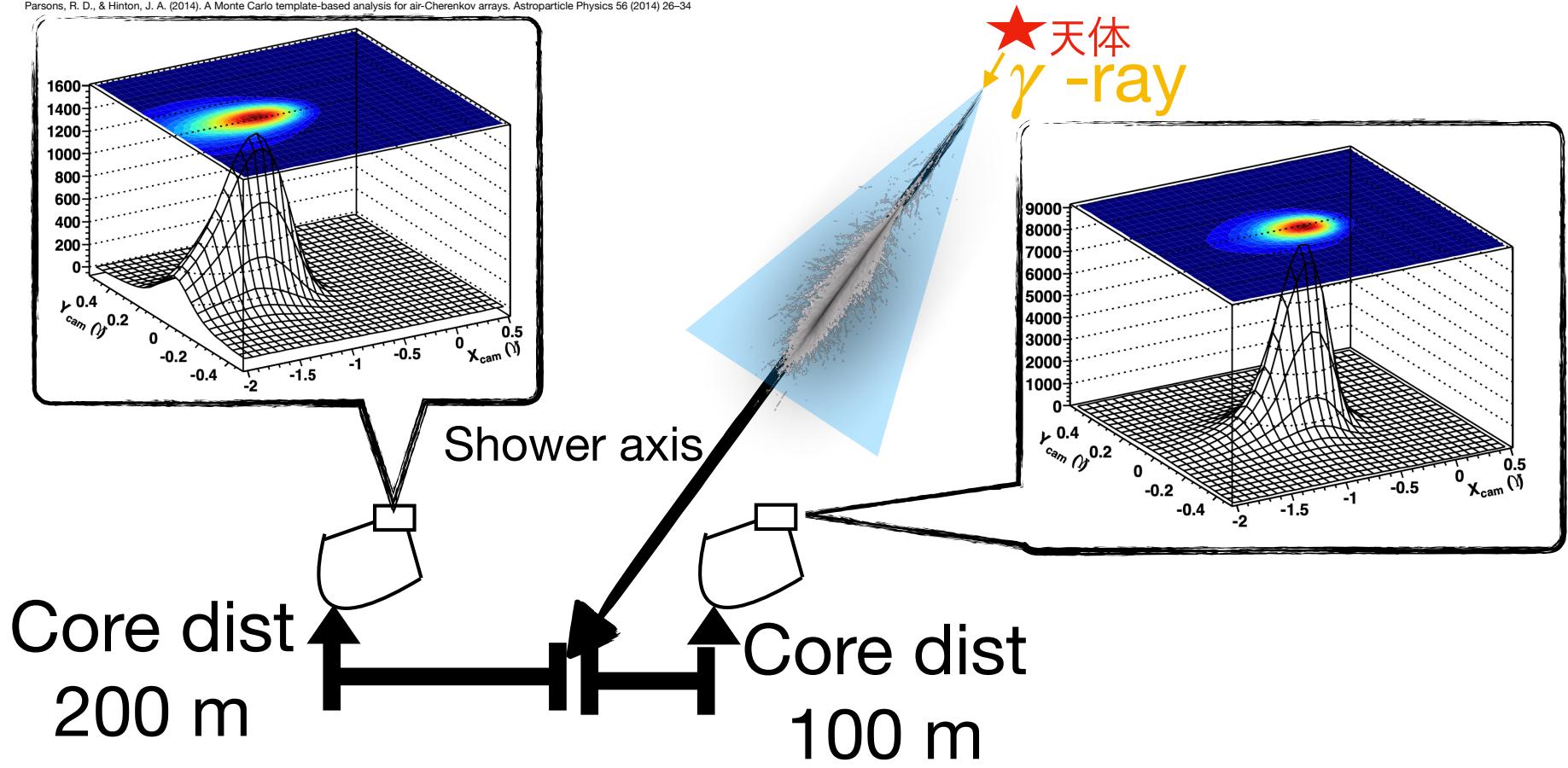
- 70 台を広く設置 (半径  $\simeq 1\text{km}$ )
- 20 GeV ~ 300 TeV 高感度
- 角度分解能  $\simeq 0.03^\circ$  at 10 TeV

# ガンマ線到来方向決定 (Hillas method)



# ガンマ線到来方向決定 ( Image template method )

Parsons, R. D., & Hinton, J. A. (2014). A Monte Carlo template-based analysis for air-Cherenkov arrays. Astroparticle Physics 56 (2014) 26–34

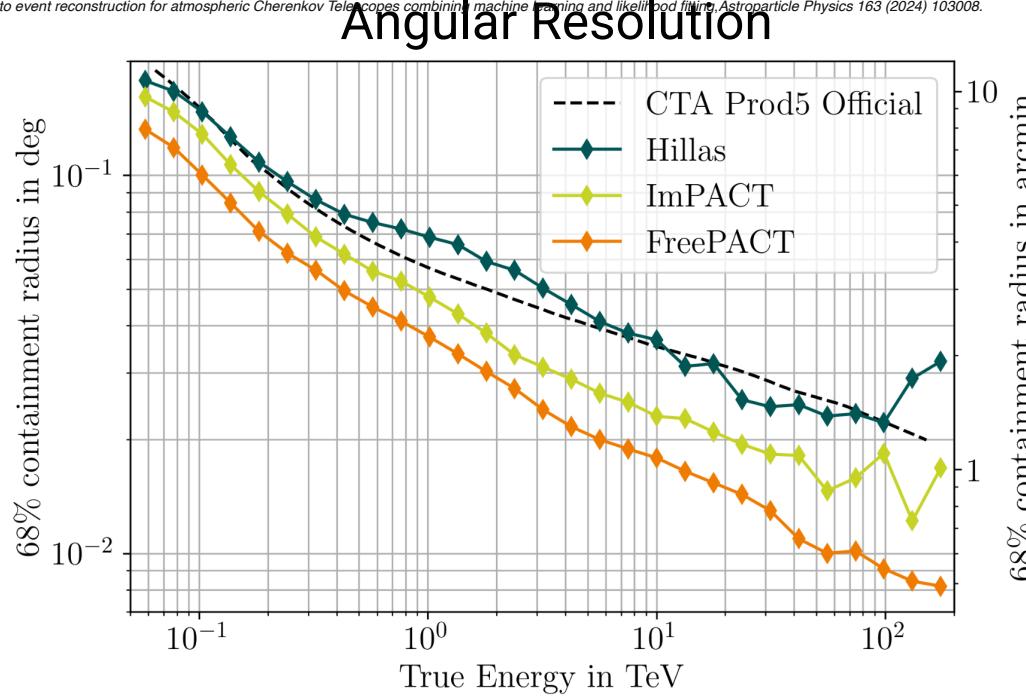


- 各望遠鏡は同じシャワーを観測するが、シャワー軸との距離 (Core dist) によって像の形が変わる。
- その像の形状の差をモデル化し、シャワー軸を精密に推定する

# ガンマ線到来方向決定 ( Image template method )

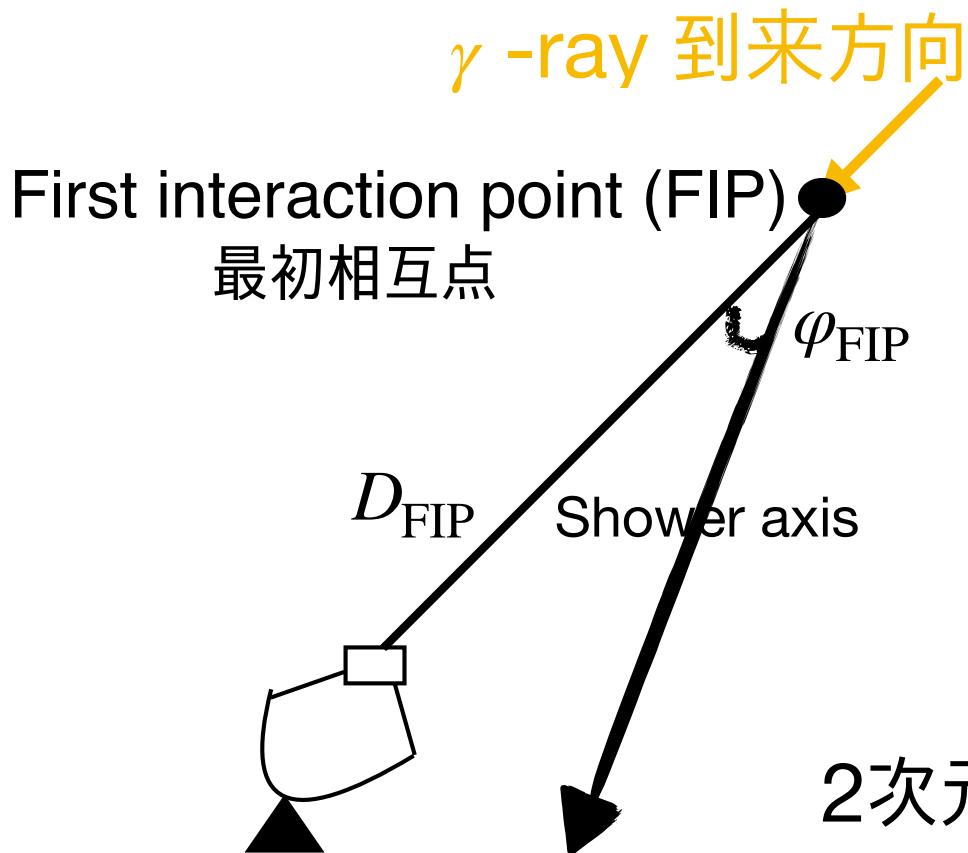
G. Schwefer, R. Parsons, J. Hinton,

A hybrid approach to event reconstruction for atmospheric Cherenkov Telescopes combining machine learning and likelihood fitting, Astroparticle Physics 163 (2024) 103008.

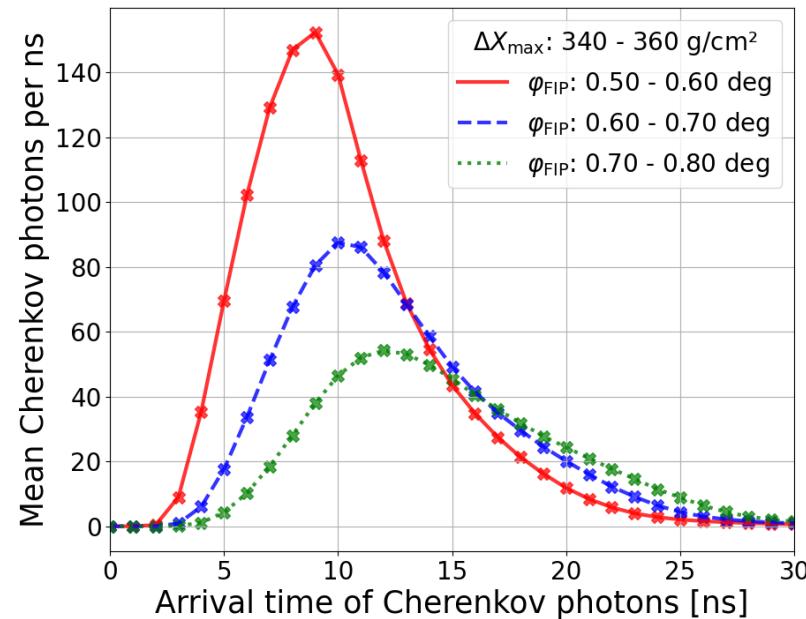


- 角度分解能向上
  - 0.018 deg @ 10 TeV, 0.01 deg @ 100 TeV
- しかし、ImPACTとFreePACTは間接的に（時間で積分した像のみで、）シャワーの発展考慮している

# シャワー発展へのモデルの新たなアプローチ



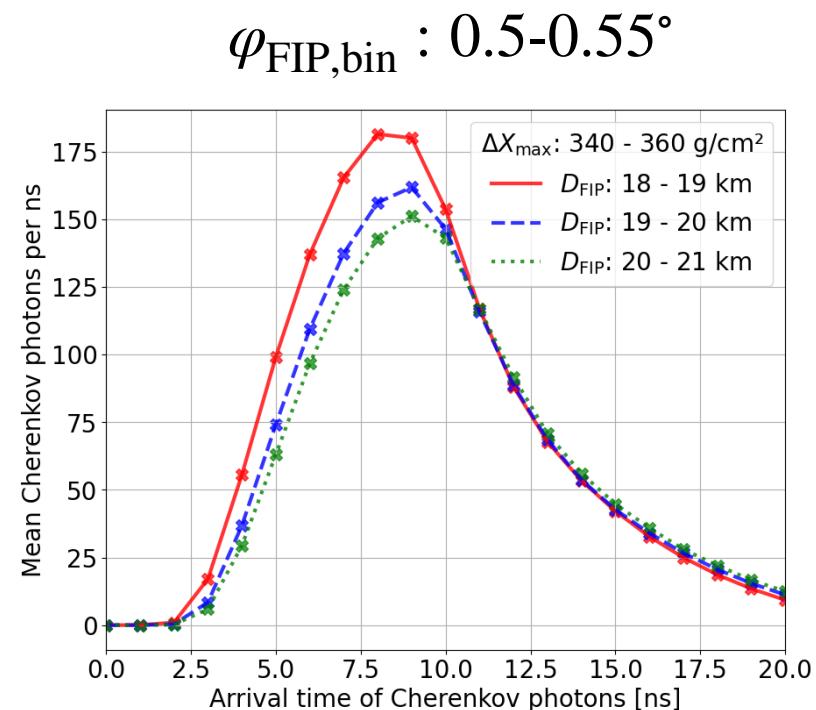
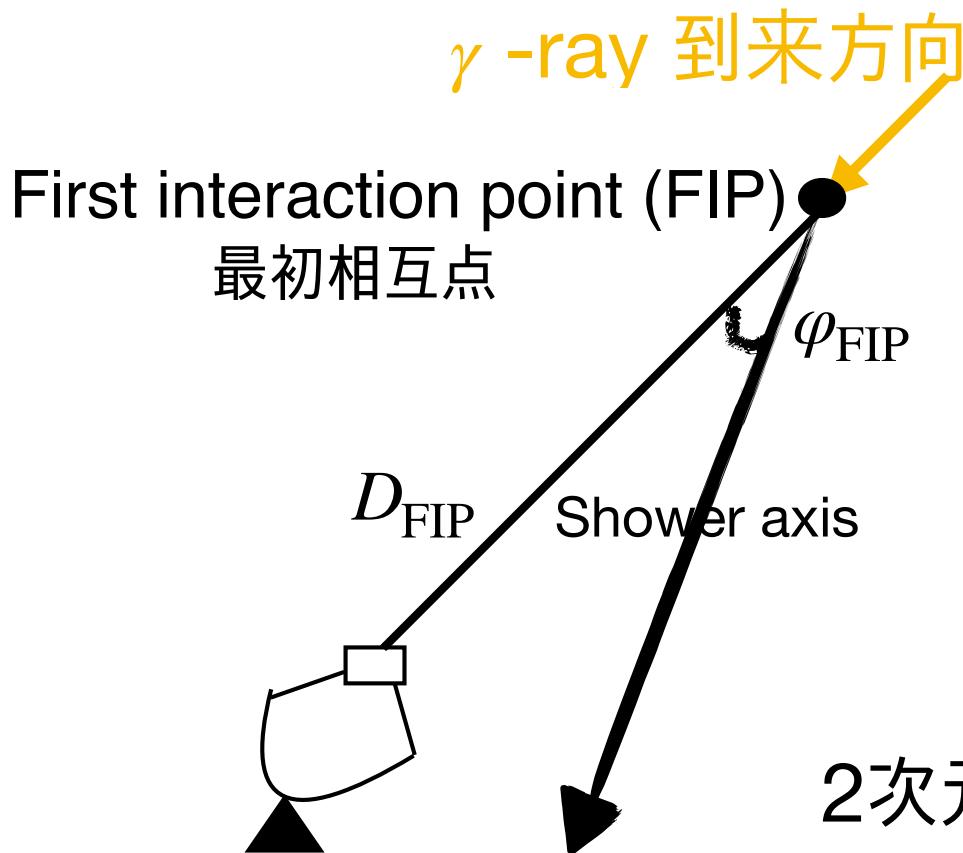
$D_{\text{FIP,bin}} : 19-20 \text{ km}$



2次元 image → 1 次元時間軸に

- 時間軸で記述すれば、シャワー発展を直接把握できる可能性がある
- シャワー構造を正確にモデル化すれば、角度分解能が向上する
- シャワーの発展は  $\varphi_{\text{FIP}}$  と  $D_{\text{FIP}}$  でモデル化

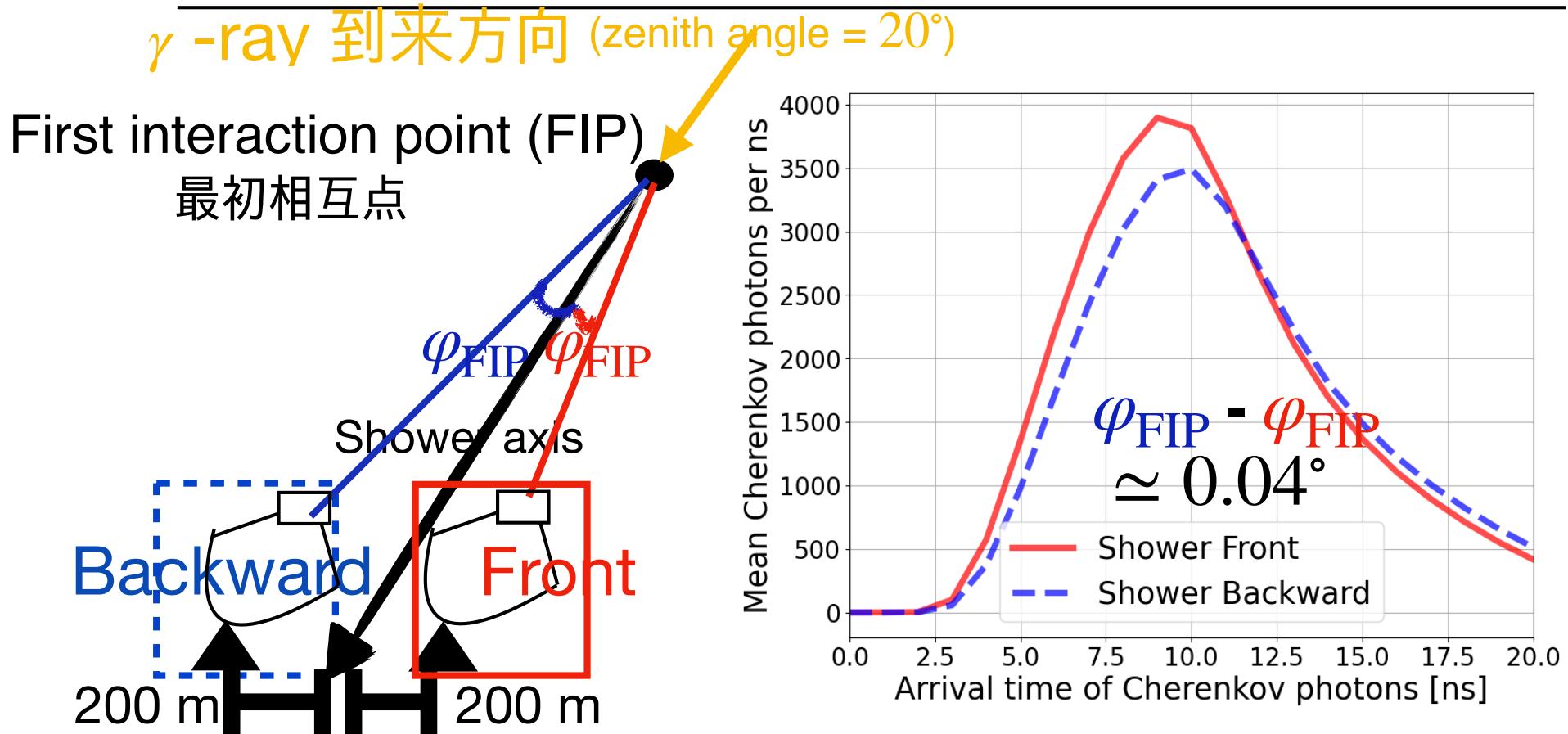
# シャワー発展へのモデルの新たなアプローチ



2次元 image → 1次元時間軸に

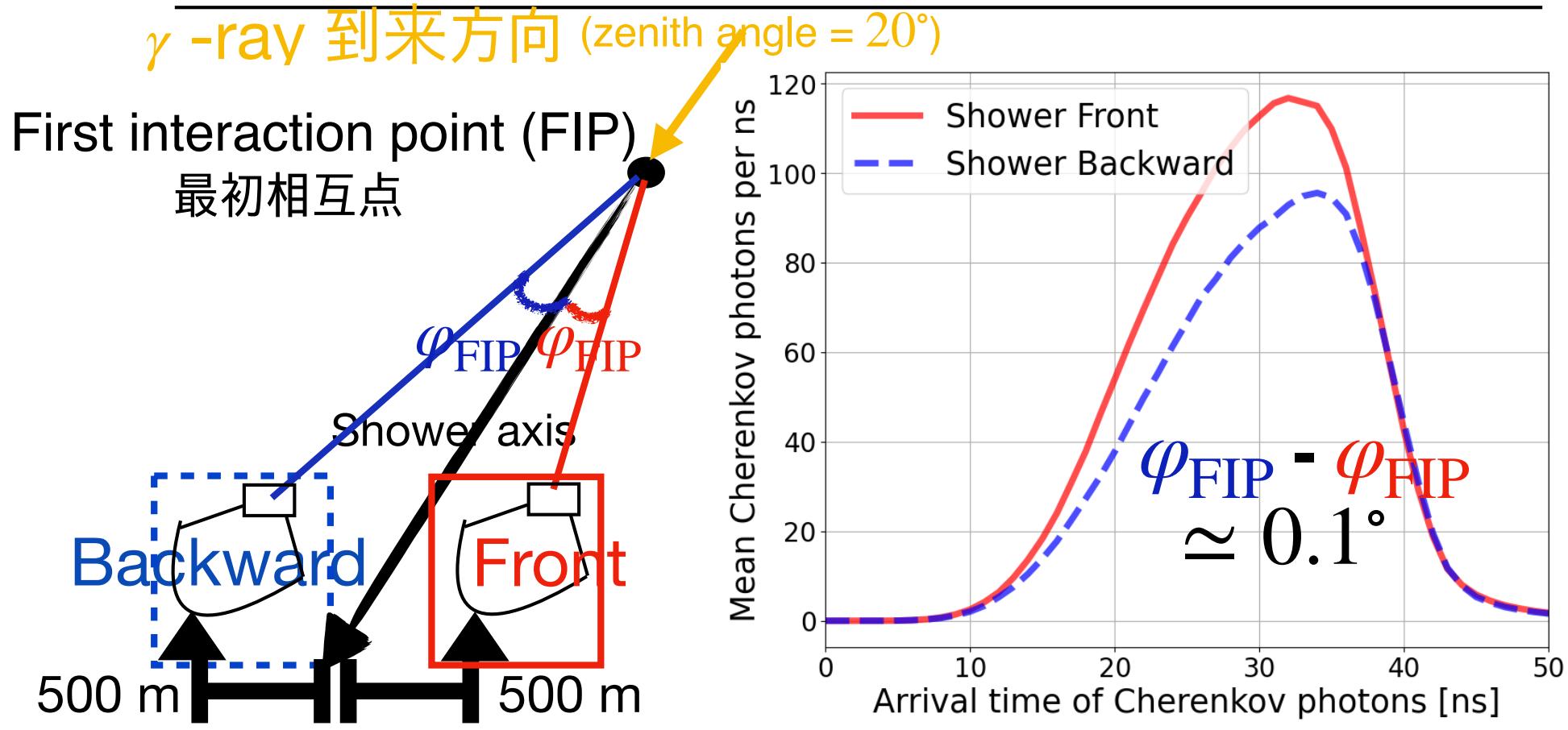
- ・ 時間軸で記述すれば、シャワー発展を直接把握できる可能性がある
- ・ シャワー構造を正確にモデル化すれば、角度分解能が向上する
- ・ シャワーの発展は  $\varphi_{\text{FIP}}$  と  $D_{\text{FIP}}$  でモデル化

# シャワー発展へのモデルの新たなアプローチ



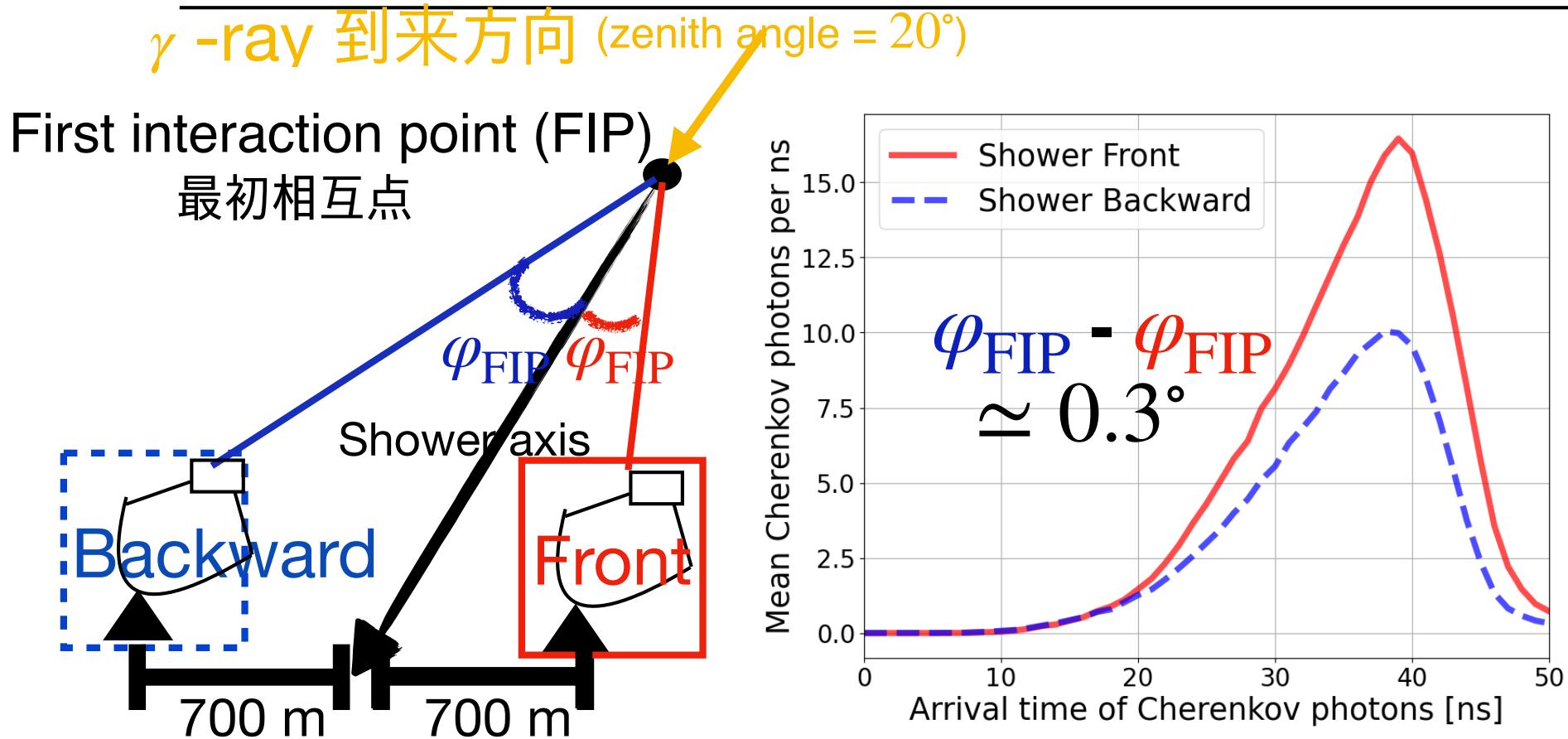
- 時間軸で見ると、同じ core dist でも前方と後方でシャワーの発展の違いが明確になる

# シャワー発展へのモデルの新たなアプローチ



- 時間軸で見ると、同じ core dist でも前方と後方でシャワーの発展の違いが明確になる

# シャワー発展へのモデルの新たなアプローチ



- 時間軸で見ると、同じ core dist でも前方と後方でシャワーの発展の違いが明確になる

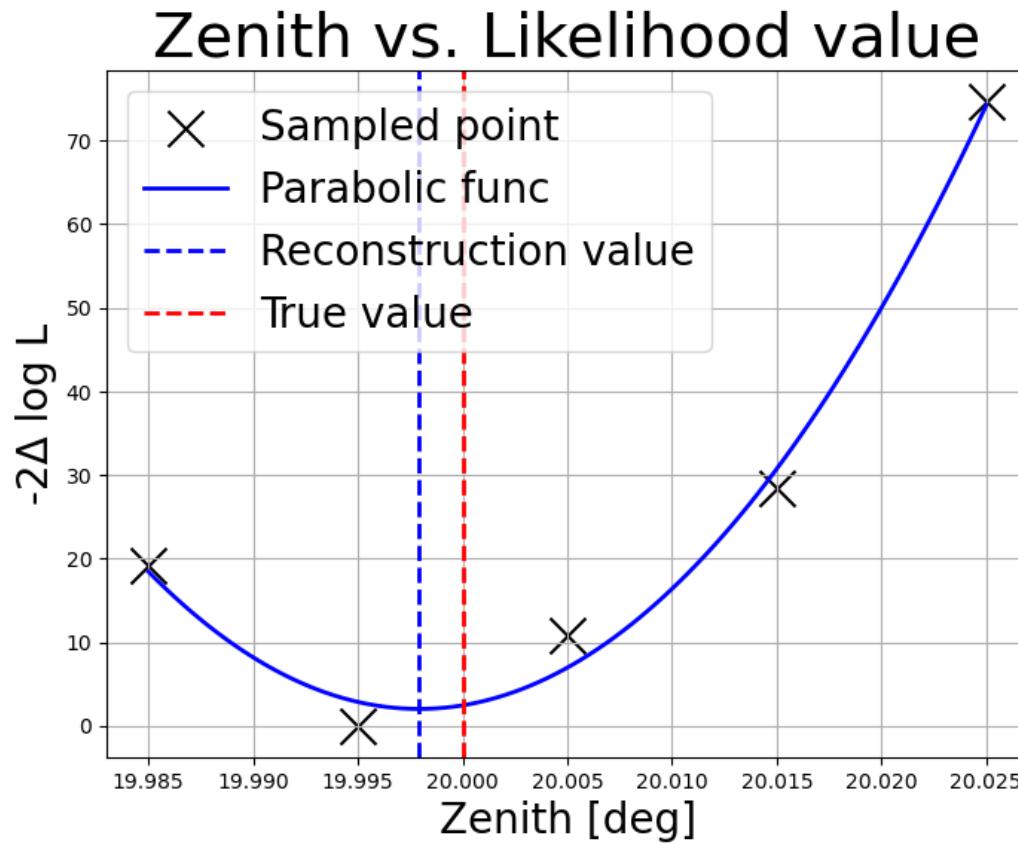
# 研究の手順

---

- モンテカルロシミュレーションからテンプレート作成
  - 10 TeV のガンマ線を生成し、時間軸で  $\varphi_{\text{FIP}}$  と  $D_{\text{FIP}}$  を変数したテンプレートを構築
- テンプレートを用いた尤度計算
  - シャワーパラメータをサンプリングし対応する  $\varphi_{\text{FIP}}$  と  $D_{\text{FIP}}$  を計算
  - 観測データとテンプレートを比較し、ポアソン尤度を計算。
$$L = \prod_{\text{time,tel}} \text{Poisson}(\text{Obs}_{\text{tel,time}} ; \text{template}_{\text{tel,time}}(\text{角度と距離}))$$
  - これにより、シャワーパラメータ空間上の離散的な尤度値が計算
- シャワーパラメータの再構築
  - 尤度値を多次元パラボリック関数でモデル化し、シャワーパラメータを推定。
- 本講演の内容
  - 10 TeV ガンマ線の、最初相互点、到来方向の分解能を報告する。

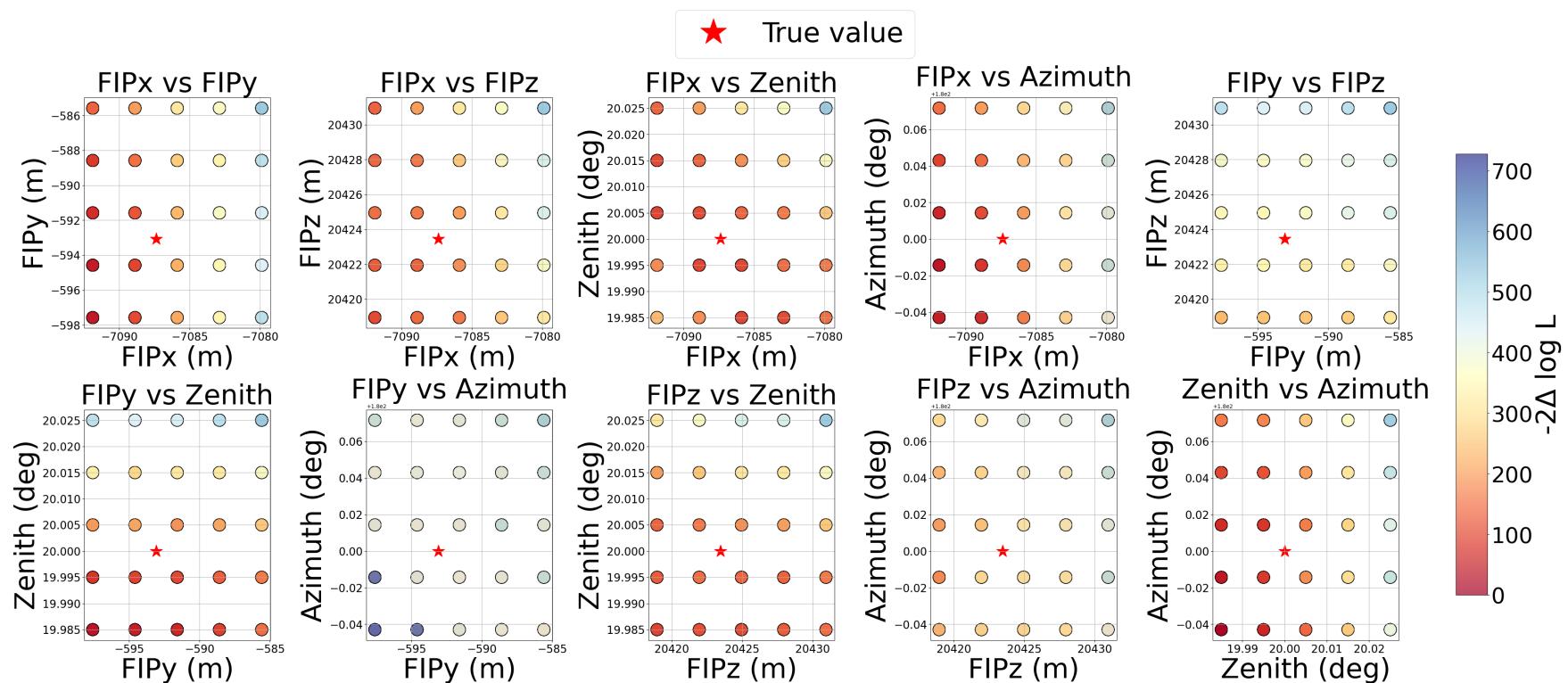
# シャワーパラメータの再構築: 1次元の場合

---



- 等間隔に Zenith をサンプリングし、対応するテンプレートから離散的尤度を計算
- Zenithと尤度をパラボリック関数からパラメータと誤差を再構築

# サンプリングから多次元パラボリックモデルへ

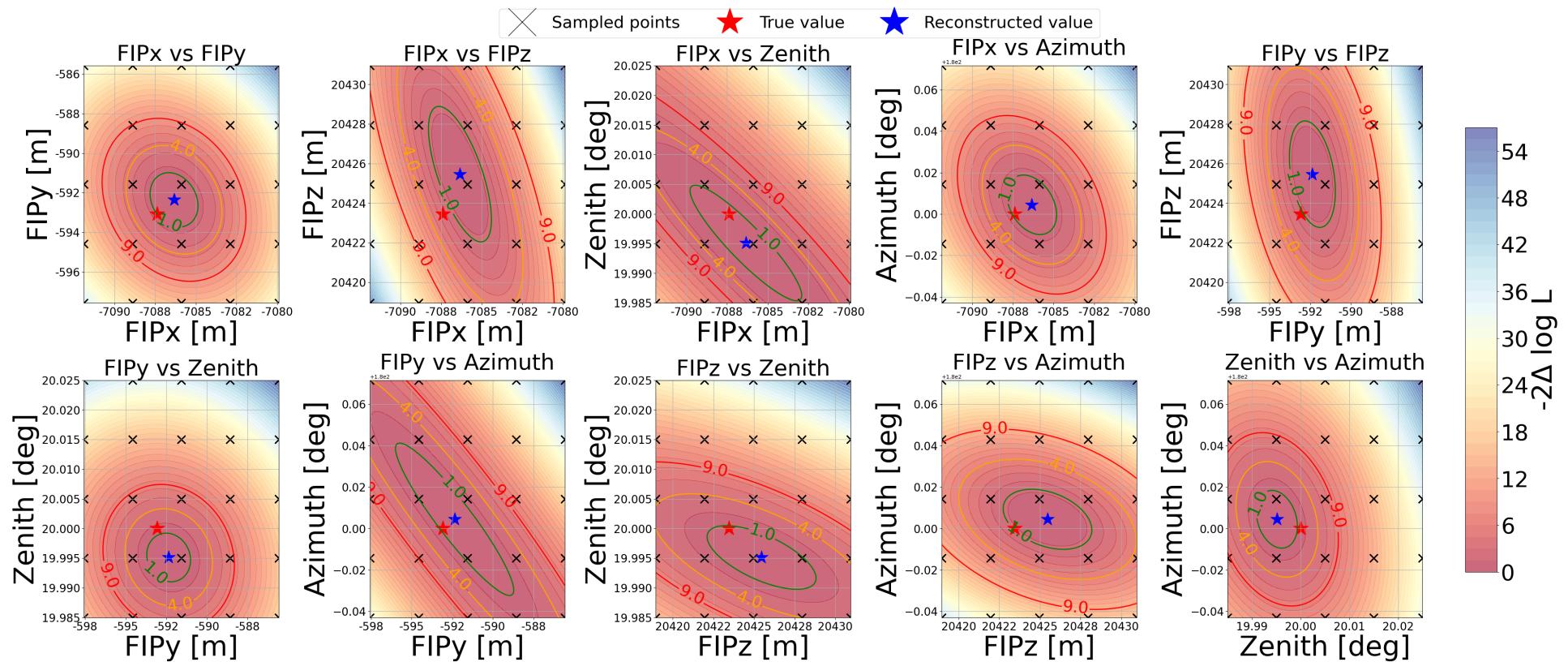


$$-2\Delta \log L = (\vec{X} - \mu)^\top \Sigma^{-1} (\vec{X} - \mu), L : \text{Likelihood value}$$

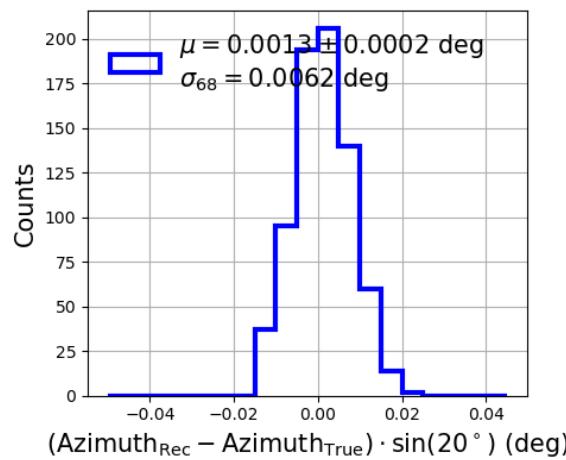
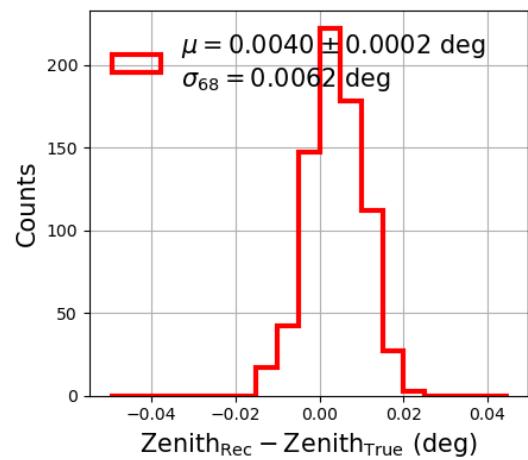
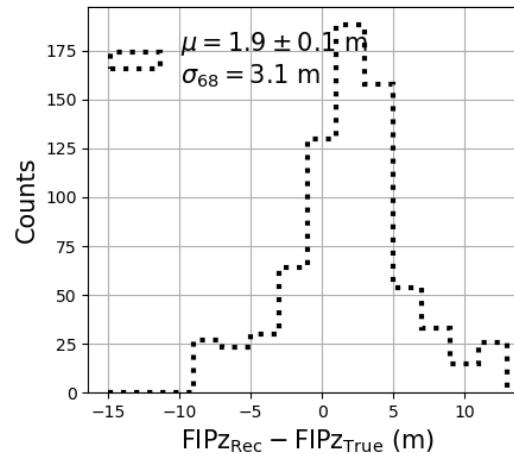
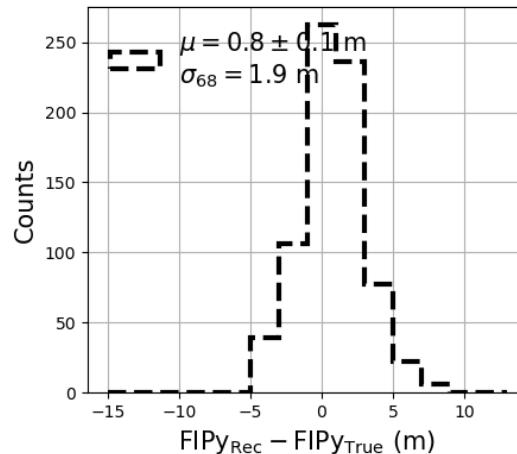
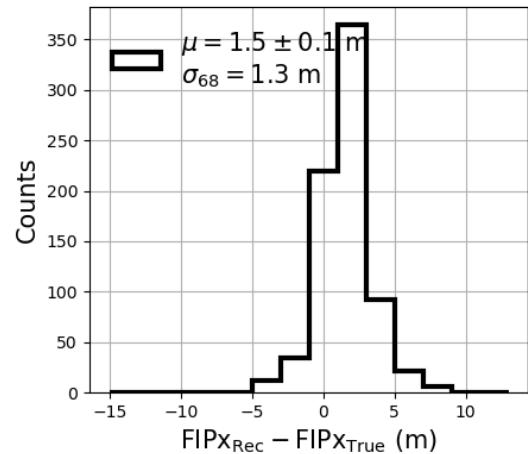
$$\vec{X} = \begin{bmatrix} \text{FIP}_x \\ \text{FIP}_y \\ \text{FIP}_z \\ \text{zenith} \\ \text{azimuth} \end{bmatrix}, \mu_j = \frac{\sum_i L_i X_{i,j}}{\sum_i L_i}$$

$$\Sigma = \frac{\sum_i L_i (\vec{X}_i)(\vec{X}_i)^\top}{\sum_i L_i}$$

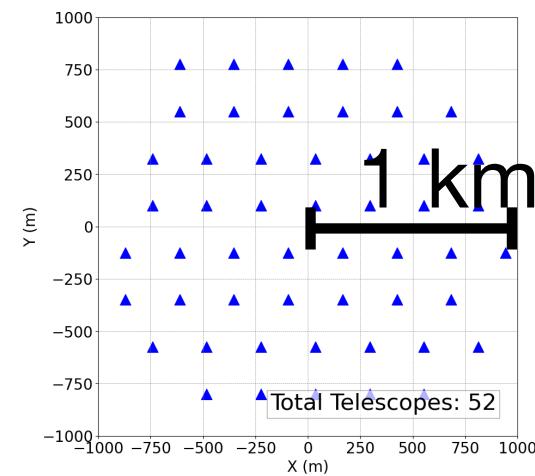
# 多次元パラボリックモデルによるシャワーパラメータ再構成



# 最初相互点の分解能と、角度分解能



Angular resolution  
 $\simeq 0.006^\circ$



Geometry effective area  
 $= 1.69 \text{ km}^2$

# まとめ

---

- 従来手法 Image template method はシャワーの発展を間接的に記述している可能性がある
- 時間軸でシャワーを記述は、より直接的にその発展を捉えられる
- その結果、シャワーの発展を正確にモデル化し、シャワーパラメータを高精度で推定可能
- 本手法による角度分解能の結果:
  - 角度分解能  $\simeq 0.006^\circ$  ( 10 TeV )
- 今後の展望 :
- エラーの評価、 $\Delta X_{\max}$  まで、推定する
- 他のエネルギー領域まで角度分解能を評価
- エネルギー分解能の評価も