

CTA報告59: CTA モンテカルロシミュレーション

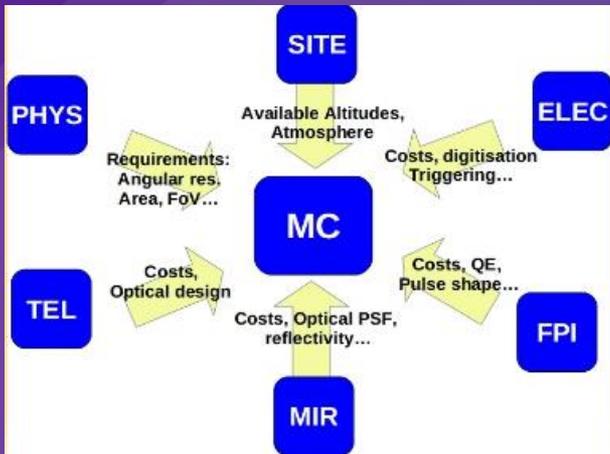
大石理子, 井川大地^A, 大竹峻平^B, 櫛田淳子^A, 郡司修一^B,
榊直人^C, 中森健之^B, 西嶋恭司^A, 増田周^D, 吉越貴紀
他 CTA-Japan Consortium

東大宇宙線研, 東海大理^A, 山形大理^B, KIT^C, 京大理^D

Outline

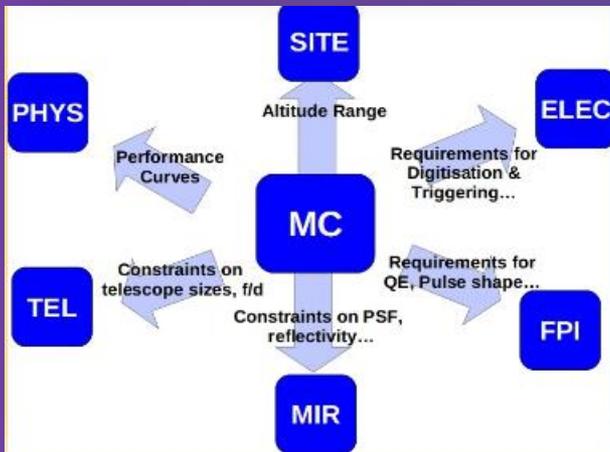
- MC WPの位置付けとCTA-Japan MC WPの活動内容
- CTA-LSTによるGRB観測
- Divergent pointing mode 導入検討の経緯
- LST4台のシミュレーションデータ生成と解析手法
- 観測時間(T), 平均的flux(F), 位置不定性(σ)に対するソース検出効率
- LAT検出の明るいGRBをサンプルとしたDivergent pointing modeの有効性の粗評価

MC-WPの位置付けとCTA-Japan MC WPの活動内容



- 空気シャワー発達・検出器応答の記述を含むシミュレーションを用い、望遠鏡配置の最適化・ハードウェアパラメータの最適化・各種天体に対する観測モードと解析手法の有効性評価などを行う
- 他のWPとの連携・情報交換が重要

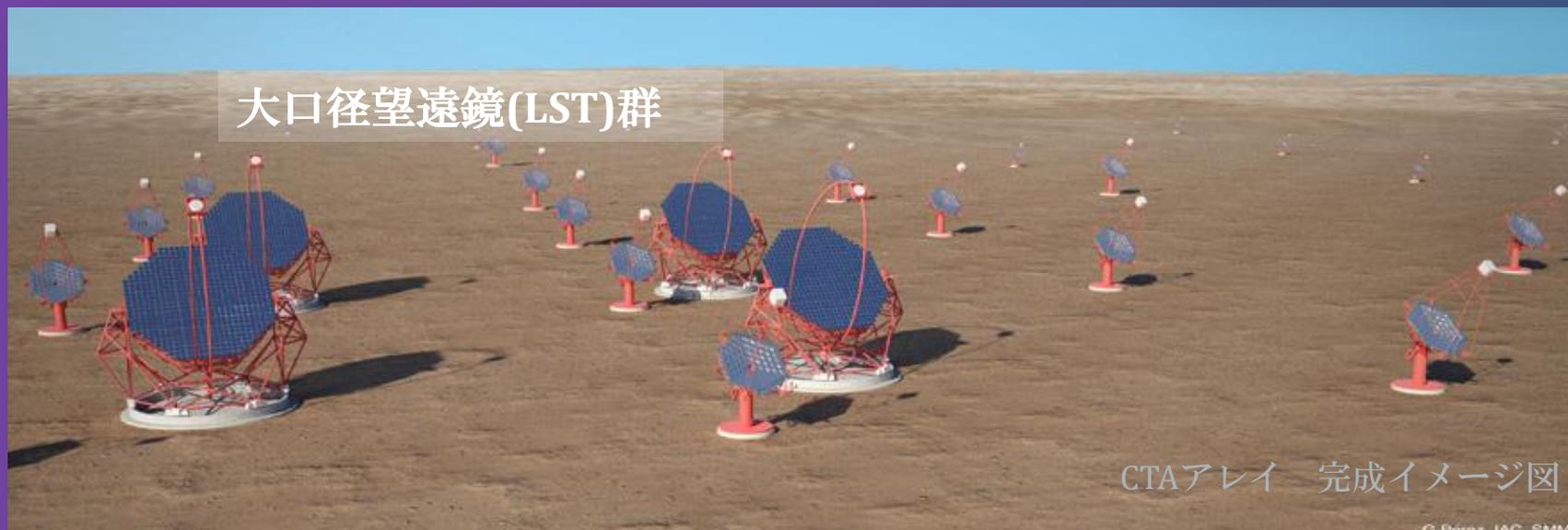
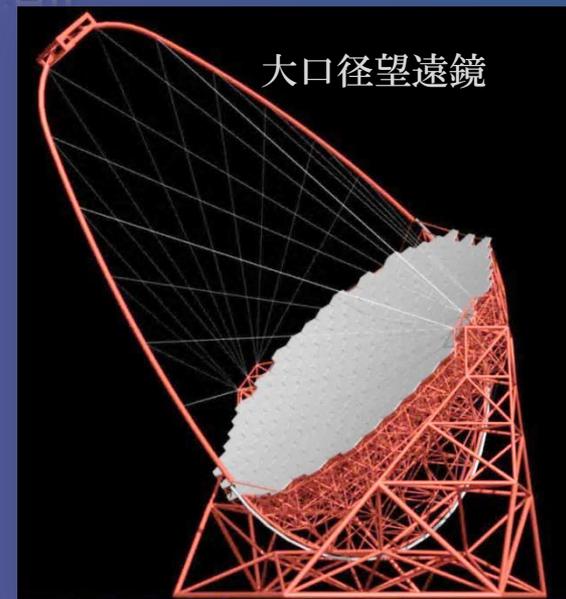
CTA-Japan MC WPの活動



- LST4台によるGRB観測用広視野観測モード (Divergent pointing mode)の有効性評価
- ハードウェアの実測性能値を取り入れたシミュレーション (トリガーレートに与える影響の検証など)

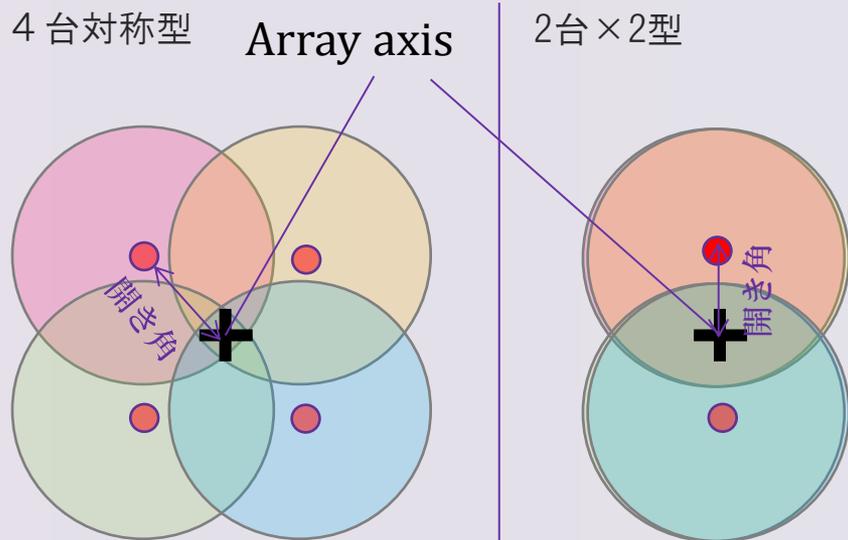
CTA-LSTによるGRB観測

- **LST** (大口径望遠鏡) : CTAの3種類の望遠鏡の中で最も低エネルギー側 (**20 GeV – 1 TeV**)に感度を持つ
→ GRBは重要な標的天体
- 口径: **23 m** 台数: **4** 台
視野: **4.5** 度 (全角)
導入速度 **180 deg./20 sec** を予定
(詳細は前講演)



Divergent pointing mode導入検討の経緯

- 大気チェレンコフ望遠鏡 (IACT) でのGRB観測は、より視野の広い飛行体検出器からGRBの座標情報を受けとり、速やかに遠鏡視野に導入することで実現する。
- *Fermi* 衛星のGBM検出器を想定すると、衛星から与えられる座標の位置誤差はLSTの視野（半角 $2^{\circ}.25$ ）に比べて無視できない大きさを持つ（人間が介在した位置解析で $\sigma=3^{\circ}.8\pm 0^{\circ}.5$ 程度の位置誤差 (Briggs et al., 2009)があり、アラート時の位置誤差はさらに大きい）。



各望遠鏡の視野の位置関係

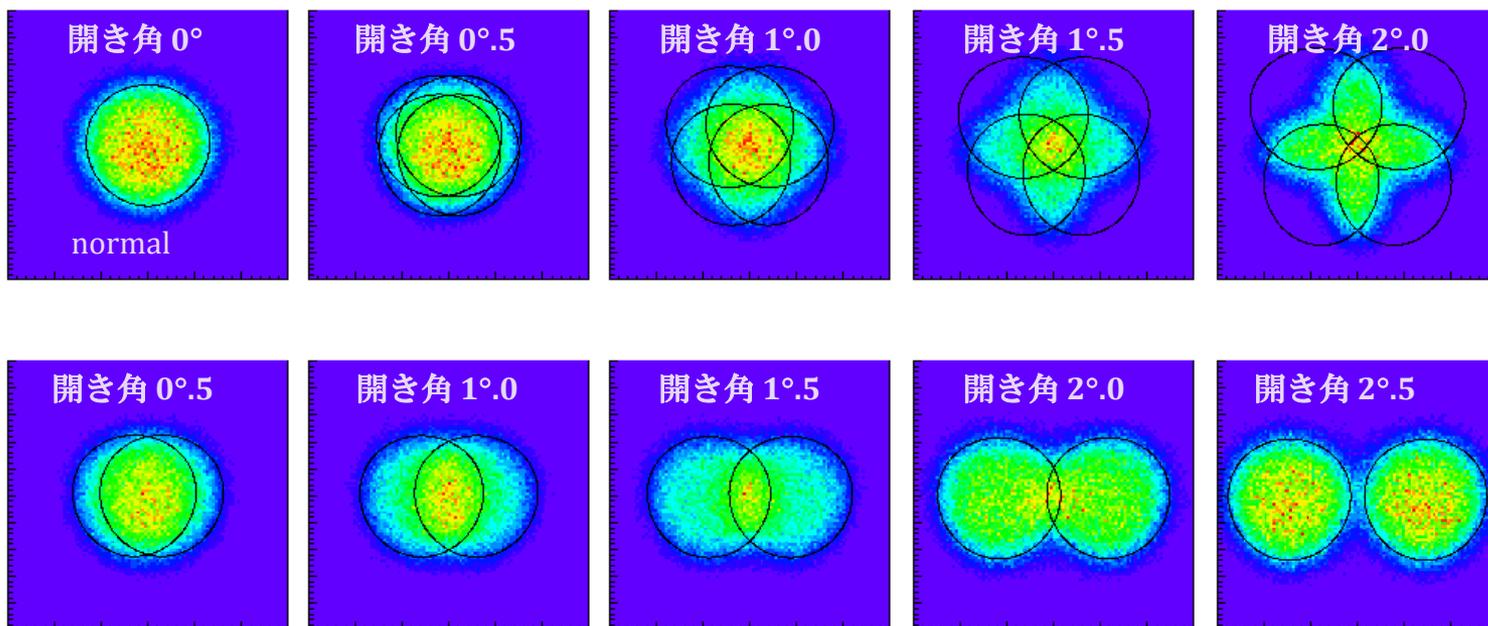
- IACT自身の観測でGRBの位置を決め直し高効率の観測を行うため、複数の手法 (scanning mode・divergent pointing modeなど) が提案・実行されている。MCシミュレーションを用いて、複数の観測モード間のGRB検出効率の違いを定量評価することが可能（本講演ではDivergent pointingのみ扱う）。

LST4台のシミュレーションデータ 生成と解析手法

- CORSIKAベースのシミュレーションプログラムを用い、LST 4 台での Divergent pointing mode 評価用データ群を生成

| パラメータ種 | 設定内容 |
|---------|---|
| 望遠鏡配置 | LST4台 100m間隔正方形 |
| 生成粒子 | γ , p, e- |
| 生成イベント数 | γ : 8×10^8 p,e: 4×10^8 |

| パラメータ種 | 設定内容 |
|----------------------------|---|
| 開き角範囲 ($0^\circ.5$ 刻み) | $0^\circ.0 - 2^\circ.0$ (4台対称) $0^\circ.5 - 2^\circ.5$ (2台x 2) |
| 到来方向分布 | 天頂角 20° 中心, $0^\circ - 8^\circ$ (半角) 等方分布 |



生成した γ 線イベントのうち、最低2台がトリガーされたものの到来方向分布

上段：4台対称
下段：2台×2

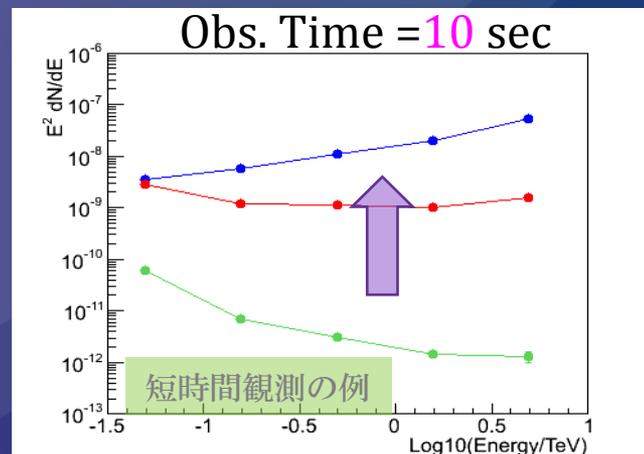
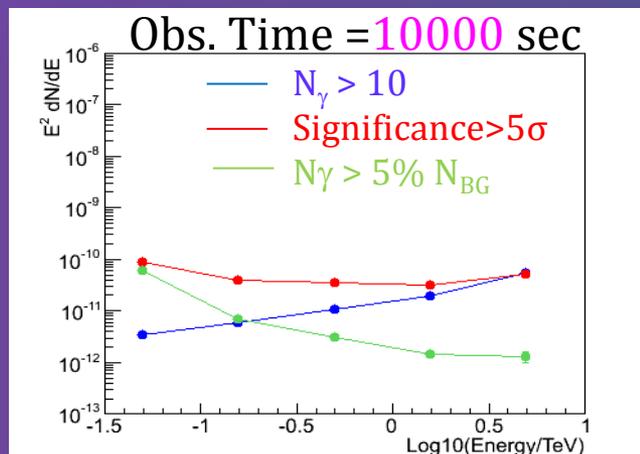
解析条件の最適化と観測時間

- HESS-styleの解析ツール
- エネルギービンごとに最良の解析パラメータを探索（本解析では1桁2bin, Divergent pointing modeの有効性評価には31.6-100GeVのエネルギービンのみを使用）
- 感度曲線は以下の3つの条件から決まる

• $N_\gamma > 10$ • **Significance $> 5\sigma$** • $N_\gamma > 5\% N_{BG}$

- 定常ソースと比較したときにGRBの特徴的な点は、放射継続時間が短いことである。上の3条件に対応するフラックス感度の時間依存性は各々 T^{-1} , $T^{-1/2}$, T^0 であり、どの条件が支配的であるかは観測時間に依存する。極端に短時間の観測ではガンマ線のacceptanceが高い”緩い”カットが好まれる。

感度曲線を決める3要素の大小関係（同一のデータセットで観測時間を変更、解析パラメータは全エネルギービンで固定）



2次元感度マップとソース存在確率分布を考慮した検出確率の導入

- 到来方向に対するAcceptance分布が360° 回転対称でないため2次元感度マップを導入+ 観測時間の仮定 T で
→ 感度マップ $S(x,y,T)$ が求められる
- 視野内 (x,y) に位置し、 T の間の平均的Fluxが F である点源は、 $F > S(x,y,T)$ であれば検出される

ローカルな
検出確率

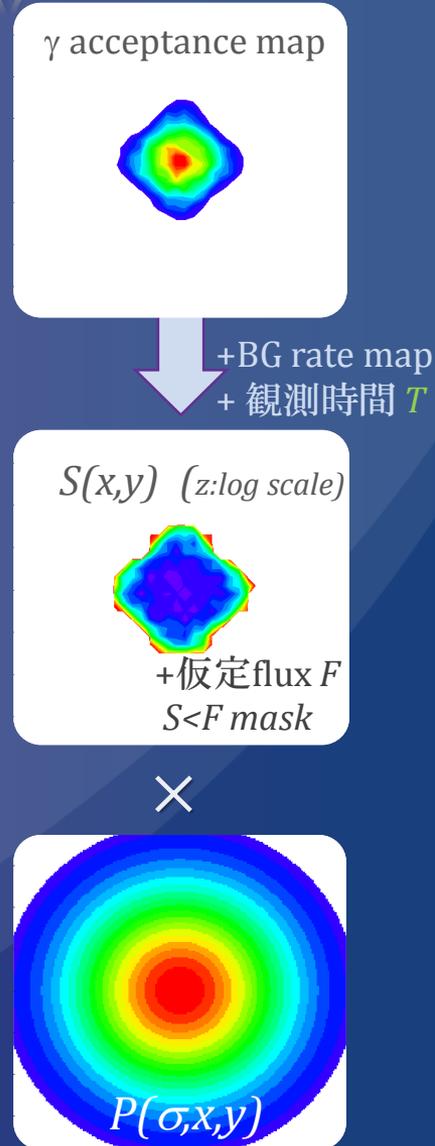
$$D(x, y, T, F) = \begin{cases} 1, & F \geq S(x, y, T) \\ 0, & F < S(x, y, T) \end{cases}$$

- ソースは2次元正規分布に従う存在確率分布を持つとする (アラート時点の位置不定性を反映)

$$P(\sigma, x, y) \rightarrow \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$

ソースの位置不定性を考慮した検出確率の期待値は：

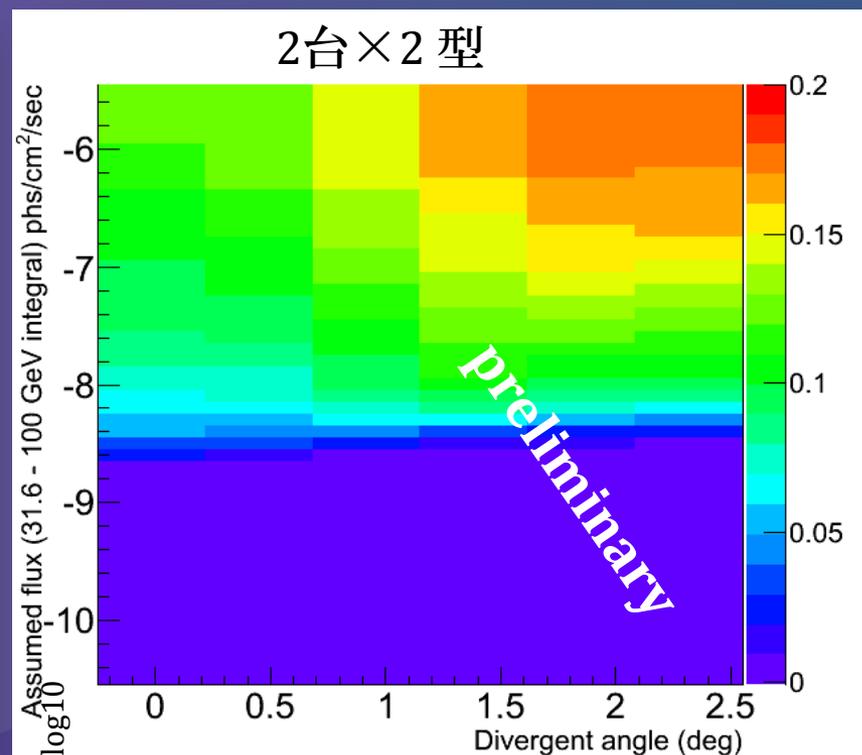
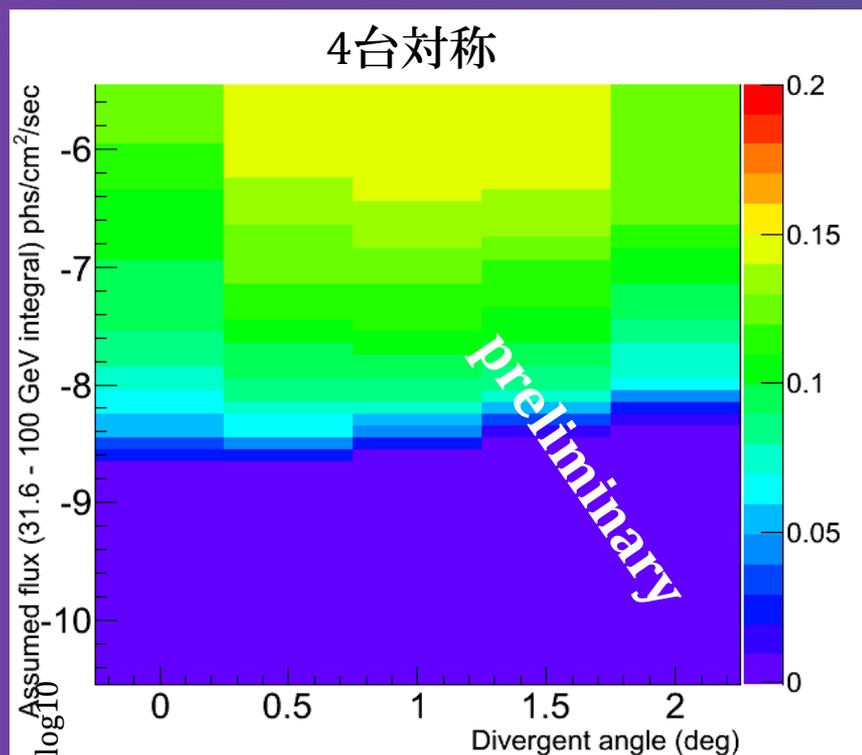
$$D_{exp}(T, \sigma, F) = \iint P(\sigma, x, y) D(x, y, T, F) dx dy$$



観測時間(T)・仮定フラックス(F)・ソース位置誤差(σ)と検出確率

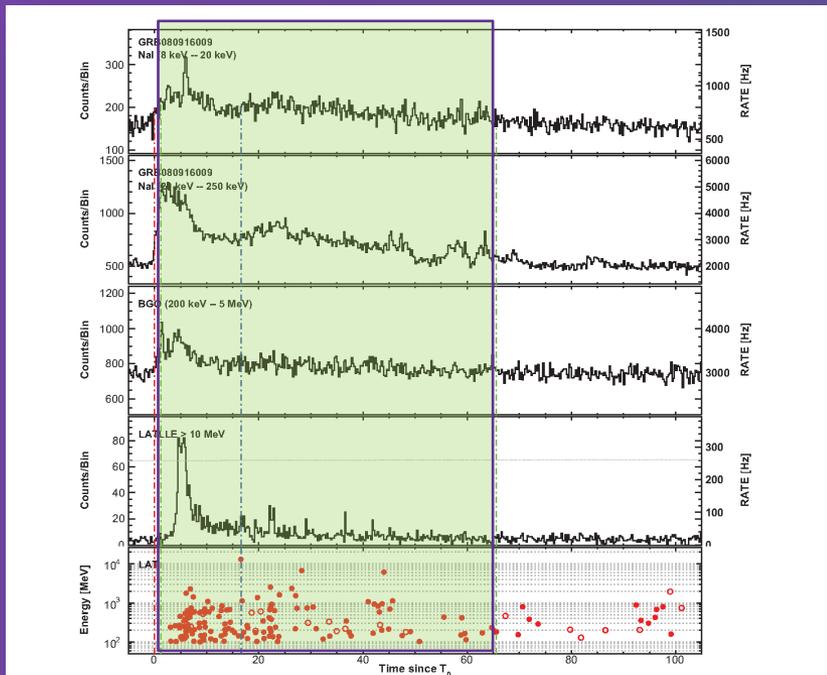
- 今回のシミュレーションデータにより 任意の(T, F, σ)の組について各観測モードに対しGRBの検出確率(期待値)を求められる
- 同一の(T, F, σ)の条件下で モード間の検出確率の大小を比較することで有効性評価が可能

例: $T=30\text{sec}$, $\sigma=5.4\text{ deg}$ の場合 x軸:開き角 y軸:仮定flux F z軸:検出確率期待値



LAT検出の明るいGRBをサンプルとしたを Divergent pointingの有効性の粗評価(1)

- CTAでのDivergent pointing modeの有効性評価をするためのGRBの(T, E, σ)の設定が必要 ← 過去の観測例からサンプル抽出
- “The First Fermi LAT Gamma-Ray Burst Catalog” (Ackermann et al., 2013) では35個のGRBが検出されているが、そのうち特に明るい(hyper-fluient)なものの一つGRB 080916Cを例としてピックアップ



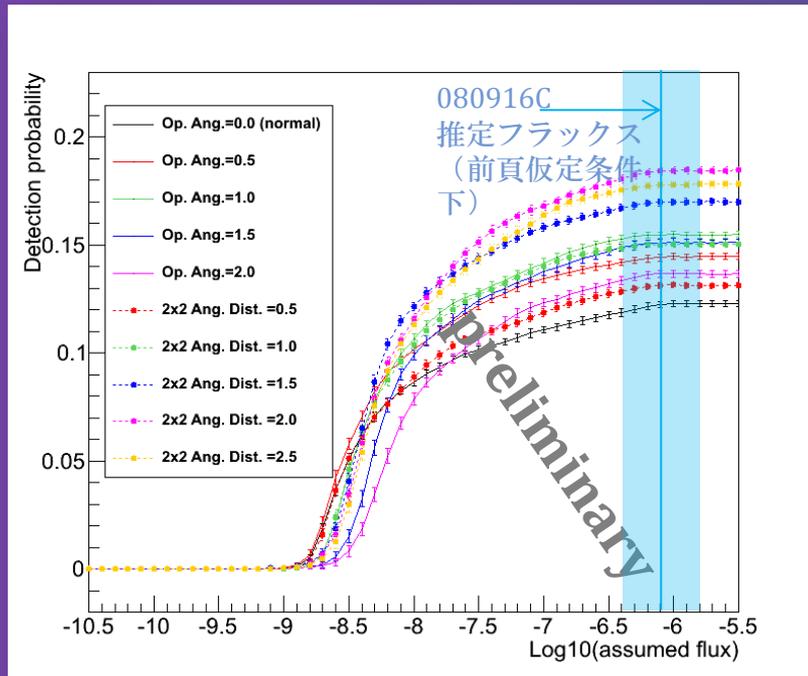
080916C light curve (arXiv:1303.2908)

ここで行うのはごく粗い見積もり：

- *Flux* : GBM T05 - GBM T95の時間幅の中でGBM-LAT Joint FitしたスペクトルをCTA領域まで外挿
- *T* : GBMT95 - GBMT05 (実際の観測では追尾するまでの時間ロスがあるがここでは考慮しない)
- σ : Fermi GCN log中, GBM Flight Positionの“GRB_ERROR”の値を使用

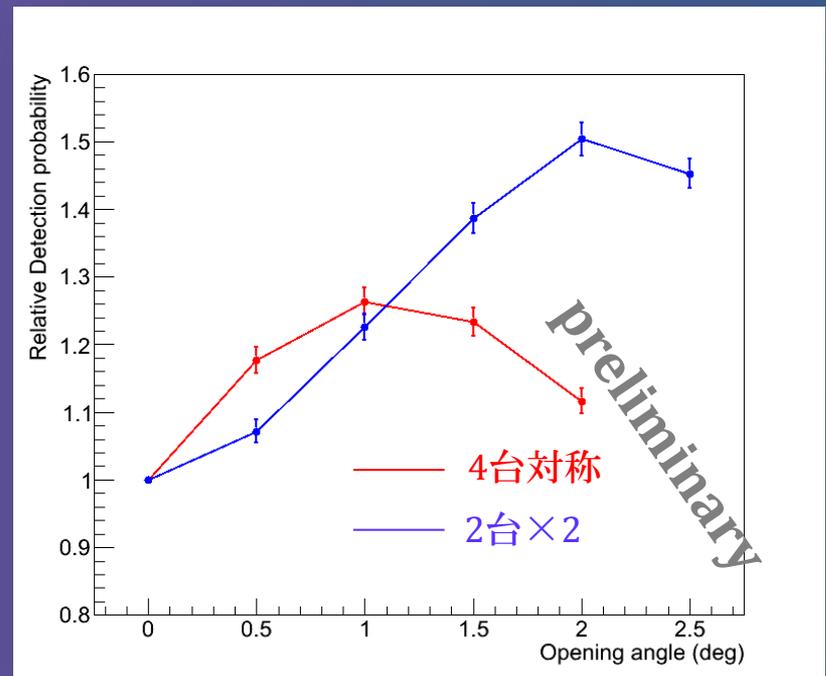
LAT検出の明るいGRBをサンプルとしたを Divergent pointing の有効性の粗い評価(2)

Divergent pointing mode 各開き角ごとの
検出確率：
仮定フラックスへの依存性



横軸：31.6 – 100 GeVの領域での推定積分
フラックス
縦軸：検出確率（期待値）

Divergent pointing mode 各開き角ごとの
検出確率：
normal mode=1としたときの相対比率



横軸：Divergent mode開き角
縦軸：normal modeの検出確率を1と定義
したときの相対確率

Summary

- CTA-Japan MC WPでは、CORSIKAベースのシミュレーションを用い
 - ー 特定の天体用の新観測モードの有効性評価
 - ー ハードウェアの性能値がトリガーレートなどの値に与える影響の定量的評価などを行っている。
- LSTでのGRB観測用に提案された広視野モード：Divergent pointing modeについて、4台の視野を対称的にそらした場合・同一視野の2台を2セット使用する場合のデータ生成・解析を行い、各モードに対して任意の観測時間(T)・その間の平均的フラックス(F)・位置不確定性(σ)に対応する検出確率が評価できるようになった。
- LATで検出された特に明るいGRBのパラメータセットをサンプルとして用いた場合では、Divergent pointing modeの導入により検出効率は実際に改善される。
- 今後は、より詳細なGRBのパラメータ分布の取り込み、scanning modeの効率との比較などを行う見込みである。