



宇宙最大規模の爆発現象に伴う電磁波放射メカニズム解明の研究

山崎 了, 石川 隼光, 石垣 さくら, 加藤 紗那, 長沢 瑛, 大林 花織 (青山学院大), 梅田 隆行 (北海道大)

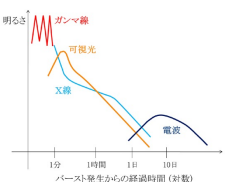
本研究では、ガンマ線バースト (GRB) およびX線フラッシュ (XRF) の起源解明を目指し、残光放射の多波長観測データに対する理論モデルのベイズ推定解析を進めている。パラメータ推定には Clustered Nested Sampling 法を実装した公開コード MultiNest を用い、高次元パラメータ空間を効率的に探索する。昨年度は、青山学院大学の GCC+Open MPI 環境で運用していた計算コードを、北海道大学スーパーコンピュータ Grand Chariot 2 の Intel oneAPI 環境へ移植し、動作確認と性能評価を行った。その結果、小規模テストにおいて青学16並列で約800秒を要した計算が、Grand Chariot 2では16並列で約460秒、512並列で約50秒まで短縮されることを確認した。今後はXRF 071031、GRB 080603A、XRF 240801Bなどに対し、事前分布を変えた多数の計算を実施し、GRB/XRFの観測的多様性と相対論的ジェットの物理に制限を与える。

1. ガンマ線バースト (GRB)

- 遠方宇宙で起こる。電磁波の明るさは宇宙一の爆発現象:
 - 1年に1000回くらい発生。
 - いつ、どこで発生するかわからない。
 - 数10秒間で地球100個程度の静止エネルギーを解放。
- GRB本体の放射はパラディエタ (パラバ):
 - 継続時間、時間変動、スペクトル、...

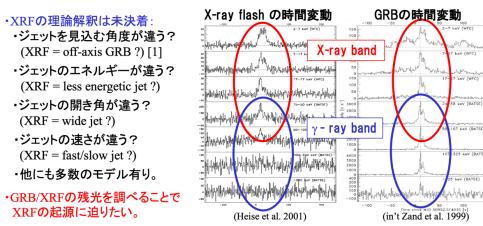


- GRBの残光:
 - 発生直後から、1日~1年後まで、電波~可視光~X線~ガンマ線にわたり観測される (右下图)。
- 起源は不明 - 宇宙物理学の未解明問題:
 - 特別な超新星 (重い星の重力崩壊) ？
 - 連星中性子星の合体？
- GRB本体と残光の放射メカニズムは不明:
 - 相対論的速さ (光速の99.99%以上) で広がるジェット (右上想像図) の放射か？

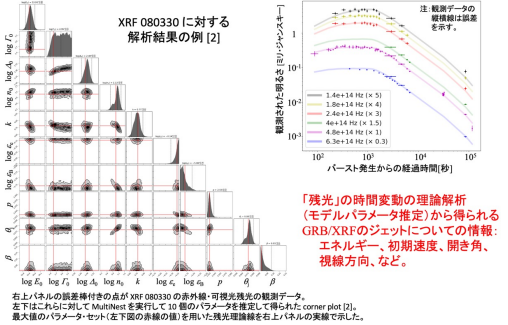


2. ガンマ線バースト (GRB) と X線フラッシュ (XRF)

- X線フラッシュ (X-ray flash, XRF):
 - GRBに比べて、典型的な光子のエネルギーが低い (X線帯域)。
 - 継続時間は10~100秒。GRBと同じで、いつ、どこで発生するかわからない。
- GRBとXRFの発生頻度は同程度。観測量も連続的に分布:
 - GRBとXRFは同一起源か？ 統一的に説明できるのか？
 - 何が異なるかとXRFになるのか？

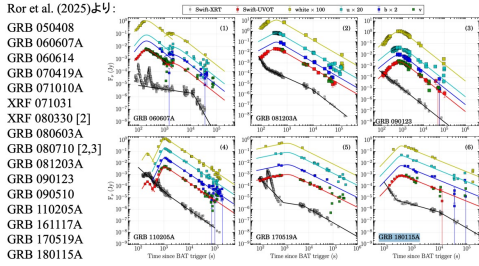


3. GRB・XRFの残光の理論的解釈



4. 遅い (~10^3秒) 無彩色ピークを持つイベント

Off-axis jet model of XRF (Yamazaki et al. 2002 [1] など)。XRF発生から比較的遅い時刻 (~10^3秒後以降) に、残光が波長に依存せず極大となることを予言。→ XRF/GRB残光の解釈がXRFの起源解明のカギ。

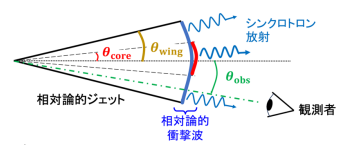


5. 本研究の背景と目的, 2025年の研究内容

- XRF観測は20年間程は進展せず (~2024)。
 - Swift/BAT (15~150 keV)。
 - Fermi/GBM (8~4000 keV)。
 - XRFの検出数が少なく、研究は停滞していた。
- X線帯域に高感度をもつ新しい観測衛星の登場 (2024-) :
 - Einstein Probe/WXM (0.4~5 keV)。
 - SVOM/ECLAIRs (4~150 keV)。
 - 新たなXRFが検出されつつある。
- 本研究の最終目標: XRF (やGRB) の残光を迅速に多数調べ、その起源に迫る。
 - ベイズ推定を用いたモデルパラメータ推定。
 - Clustered Nested Sampling でパラメータ空間を効率的に探索。
 - python公開コード「MultiNest」を用いる。
 - GRB/XRFの観測的多様性を統一的に説明する理論モデルを完成させる。
- 2025年度の研究内容: 計算コードを北大のスーパーコンピュータ Grand Chariot 2に移植。
 - 青学のGCC+Open MPI環境からIntel oneAPI環境への移植および動作確認を行った。
 - 模擬データを用いてGrand Chariot 2での実効性・並列化効率の測定を行った。

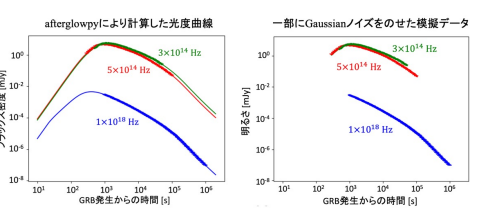
6. GRB残光のモデル計算とパラメータ

残光計算コード「afterglowpy」(Ryan et al. 2020) 相対論的ジェットからのシンクロトロン放射による多波長残光の光度曲線を高速で計算。



- 主なモデルパラメータ:
- 爆発エネルギー E_0 [erg]
 - ジェットの初期ローレンツ因子 Γ_0
 - 外部物質密度 n_0 [cm⁻³]
 - ジェットの開き角 θ_{wing} [rad]
 - ジェットのコア角 θ_{core} [rad]
 - 視線角度 θ_{obs} [rad]
 - 電子への数の分配率 f_e
 - 電子へのエネルギー分配率 ϵ_e
 - 磁場へのエネルギー分配率 ϵ_B
 - 電子のエネルギー分布の冪指数 p

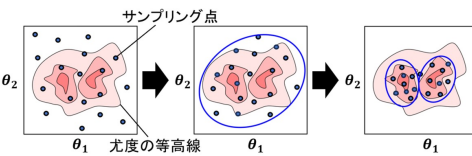
7. 模擬データの作成



採用したモデルパラメータ:

- $\log E_0$ [erg] = 53
- $\log \Gamma_0$ = 2
- $\log n_0$ [cm⁻³] = 0
- $\theta_{wing} = 0.1$ rad
- $\theta_{core} = 0.1$ rad
- $\theta_{obs} = 0.05$ rad
- $p = 2.2$
- $\log f_e = 0$
- $\log \epsilon_e = -1$
- $\log \epsilon_B = -2$

8. Clustered Nested Sampling



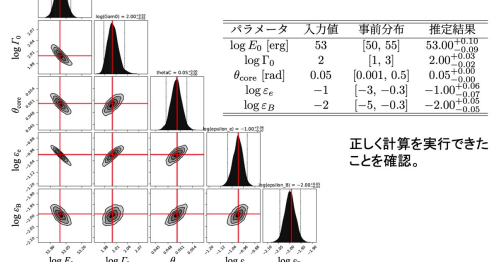
公開コード「MultiNest」(Forez et al. 2009 [5])

Clustered Nested Sampling: サンプル領域を高尤度領域に狭めるアルゴリズム。→ 低尤度領域の無駄な計算量を削減できる。

サンプリングの並列化によって欠点を補う。青学の計算機では16コアで計算してきた。どのくらいの並列数まで (計算時間) × (コア数) となるか？

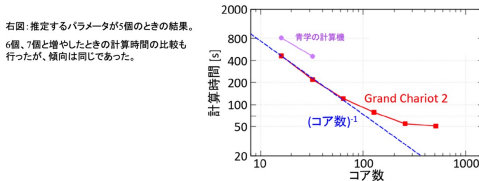
9. Result

10個のモデルパラメータのうち、5個を模擬データ作成時の入力値に固定し、残り5個をパラメータ推定。



10. Result: 計算時間の比較

青学の計算機、北大Grand Chario 2でコア数を変えたときの計算時間の比較



- 計算機依存性:
 - 計算時間: 青学の計算機 (16コア) に比べて Grand Chariot 2 (16コア) で ~1/2。
 - Grand Chariot 2での、コア数依存性:
 - 計算時間: 16並列と比べて512並列で ~1/10。
- 計算時間: 青学の計算機 (16コア) と比べて Grand Chariot 2 (512コア) で ~1/20。

11. MultiNestの性能評価に対する考察

- 古いMPIのテキストをベースにしたと思われる記述が多数
 - MPI_Send+MPI_Recvによるマスタープロセスへのデータ収集
 - ノリア同期の多用
- Nest構造が深く、アルゴリズムの解釈が困難
 - マスタープロセスのみが行う処理 (尤度の判定やデータ出力) が多い
 - 乱数に依存したロードインバランスが発生
- 今後の方針
 - MPI_Send+MPI_Recvを本来の処理 (MPI_Gather, MPI_Reduce) へ書き換え
 - 非同期通信への変更によるロードインバランスの改善の検討

12. まとめと今後の課題

- 2025年度:
 - 北大Grand Chario 2での計算環境を構築し、afterglowpyとMultiNestを実装。動作確認を完了。
 - 並列化効率・計算時間を測定。
 - 青学の計算機の使用時よりも計算時間を ~1/20に短縮されることを確認。
 - これまで20日くらいかかっていた計算が1日程度で終了できそう。
- 2026年度:
 - afterglowpyだけでなく、モデルの異なる別の残光コード magflow [6] も実装。
 - 実際のイベント (XRF 071031, GRB 080603A, GRB260310A etc.) についてパラメータ推定を行う。

References:

- [1] Yamazaki et al. 2002, *Astrophys. J. Lett.*, 571, L31.
- [2] Obayashi, Yamazaki et al. 2026, arXiv:2603.1118.
- [3] Obayashi, Yamazaki et al. 2024, *J. High-Energy Astrophys.*, 41, 1.
- [4] Ryan et al. 2020, *Astrophys. J.*, 896, 166.
- [5] Forez et al. 2009, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 398, 1601
- [6] Kusafuka, Obayashi, Yamazaki et al. 2025, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 544, 3115.