

日本天文学会 2025年秋季年会

多波長モニターおよびスペクトル解析による ブレーザーTON599の変動メカニズム推定

赤井 嵩宙 (広島大学) ,

深澤泰司, 今澤遼, 川端弘治, 中岡竜也, 橋爪大樹, 枋原淑慧 (広島大学)

2025.09.11 @海峡メッセ下関

◆放射理論：レプトンモデル

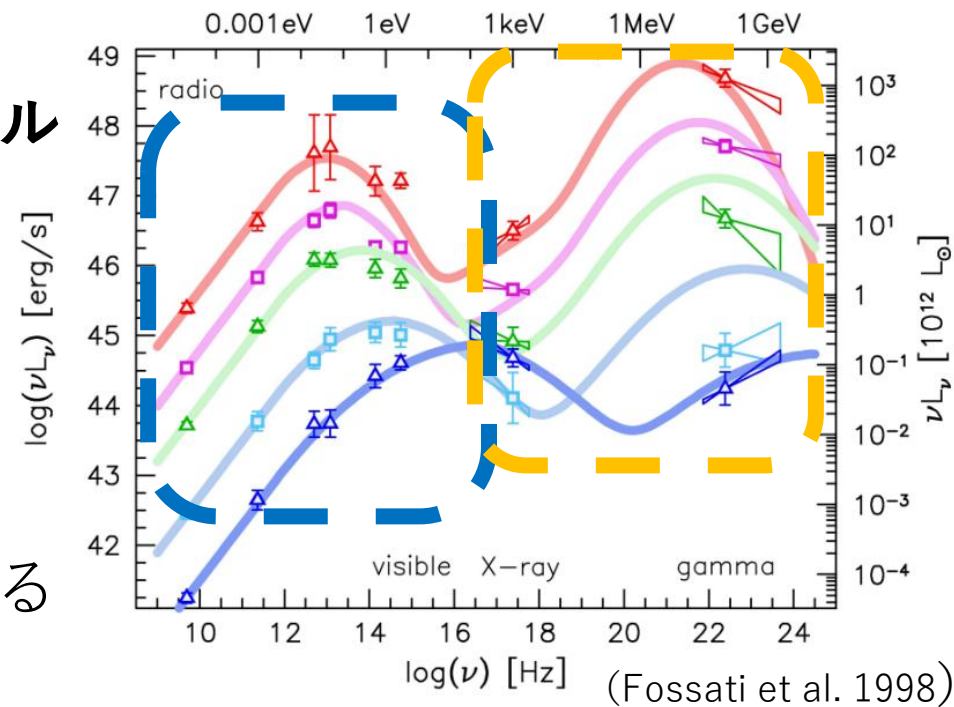
- 電波～X線：

シンクロトロン放射

- X線以上：

逆コンプトン散乱

⇒ともに**電子**が放射に関わる



- ✓ 単純な1ゾーンレプトンモデルでは可視光とガンマ線放射は**同一の電子集団に起因**

⇒両者の対応した変動が予測される。

(e.g., Böttcher 2007)

実際の観測では・・・

他波長に対応する変動のない“**オーファンフレア**”がいくつも観測されている

➤ ハドロンモデル, マルチゾーンモデルなどによって説明

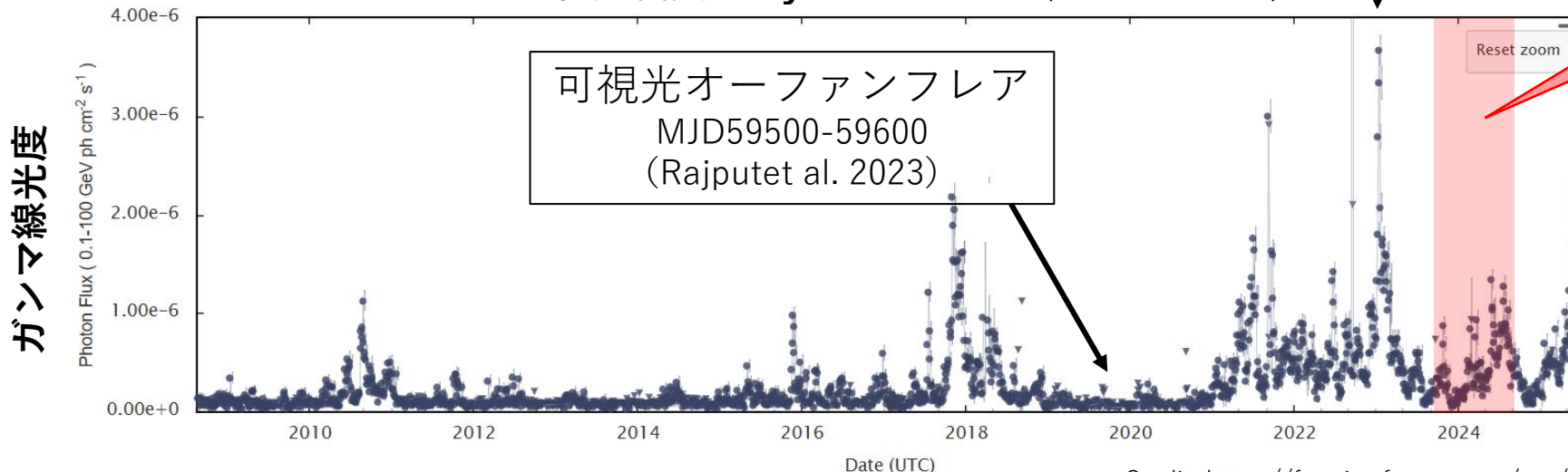
◆観測天体 : TON599 (4C +29.45 / 4FGL J1159.5+2914)

- Type : FSRQ, LSP
- Red shift : $z = 0.725$

2023年過去最大の
ガンマ線フレア

本研究での
データ使用期間

3日ごとのガンマ線光度変動 by Fermi-LAT (0.1-100GeV)



期間 2008年8月～2025年6月

Credit : https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/LightCurveRepository/source.html?source_name=4FGL_J1159.5+2914

2021年以降ガンマ線で活発な状態が続く

⇒ 活動期の可視光-ガンマ線観測によって複雑な変動のメカニズムを解明

- 電波～ガンマ線で激しい変動を起こすことで知られる。
- 特定の波長のみのフレア（オーファンフレア）など、**単純な1ゾーンレプトンモデルでは説明の難しい現象**も報告される。

◆ガンマ線：Fermiガンマ線望宇宙遠鏡

- 観測装置：Large Area Telescope (LAT)
- エネルギー：100 MeV – 500 GeV
- 解析：Fermitools



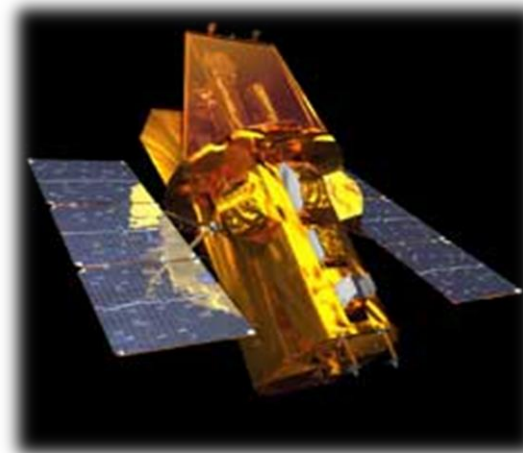
Fermi衛星 Credit : NASA

◆可視光/近赤外線：かなた望遠鏡

- 装置/検出器：HONIR
- バンド：R, J

◆X線：Swift衛星 (SEDモデリングに使用)

- 観測装置：X-ray Telescope (XRT)
- 解析：XSPEC



Swift衛星 Credit : NASA



広島大学 かなた望遠鏡

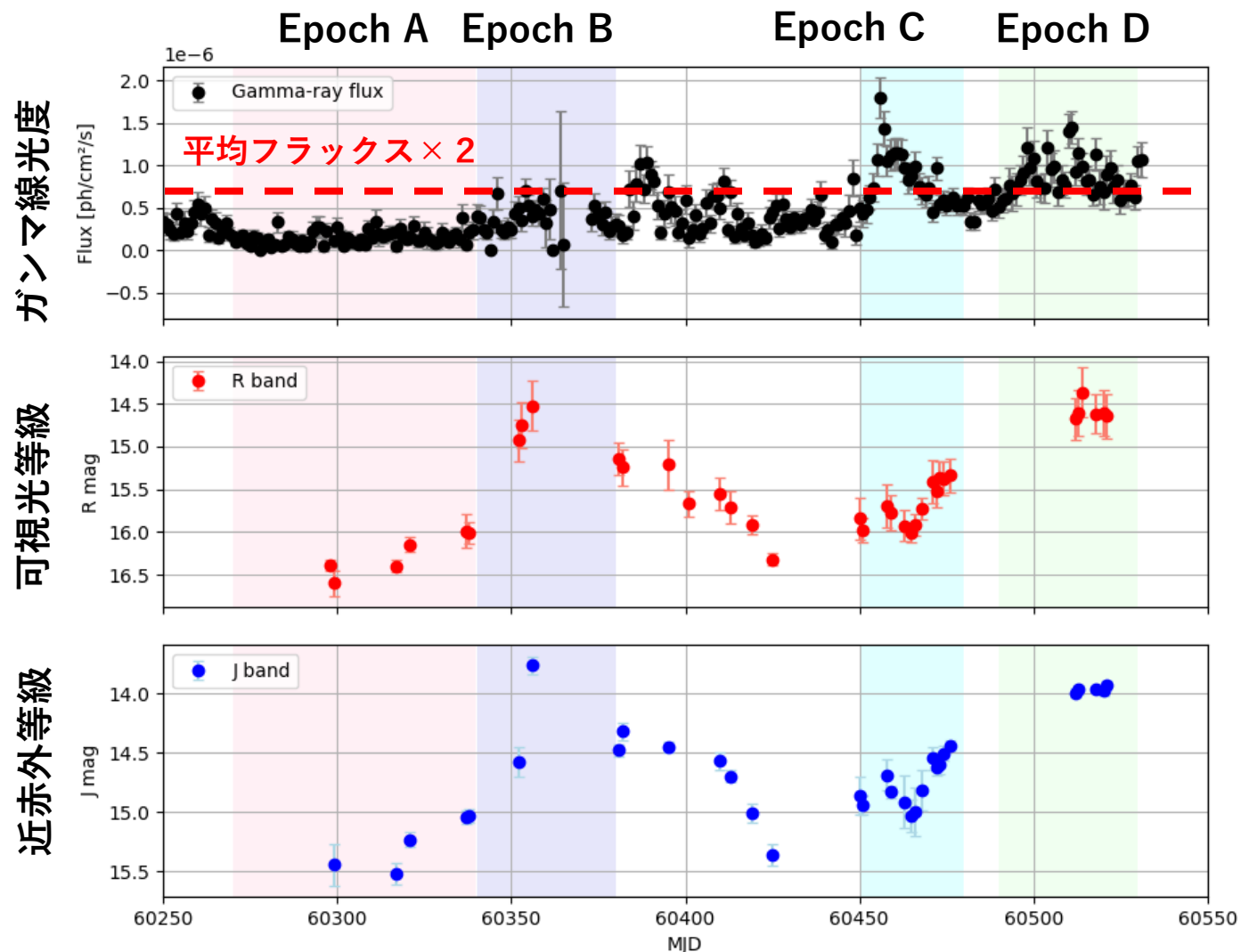
ガンマ線では観測期間の終盤 (MJD 6450-) に2度のフラックスの増加.
可視光/近赤外線では, 期間内に2度の増光 (MJD 60350, 60520).

⇒レプトンモデルでの予測に反して

異なる変動パターンを観測

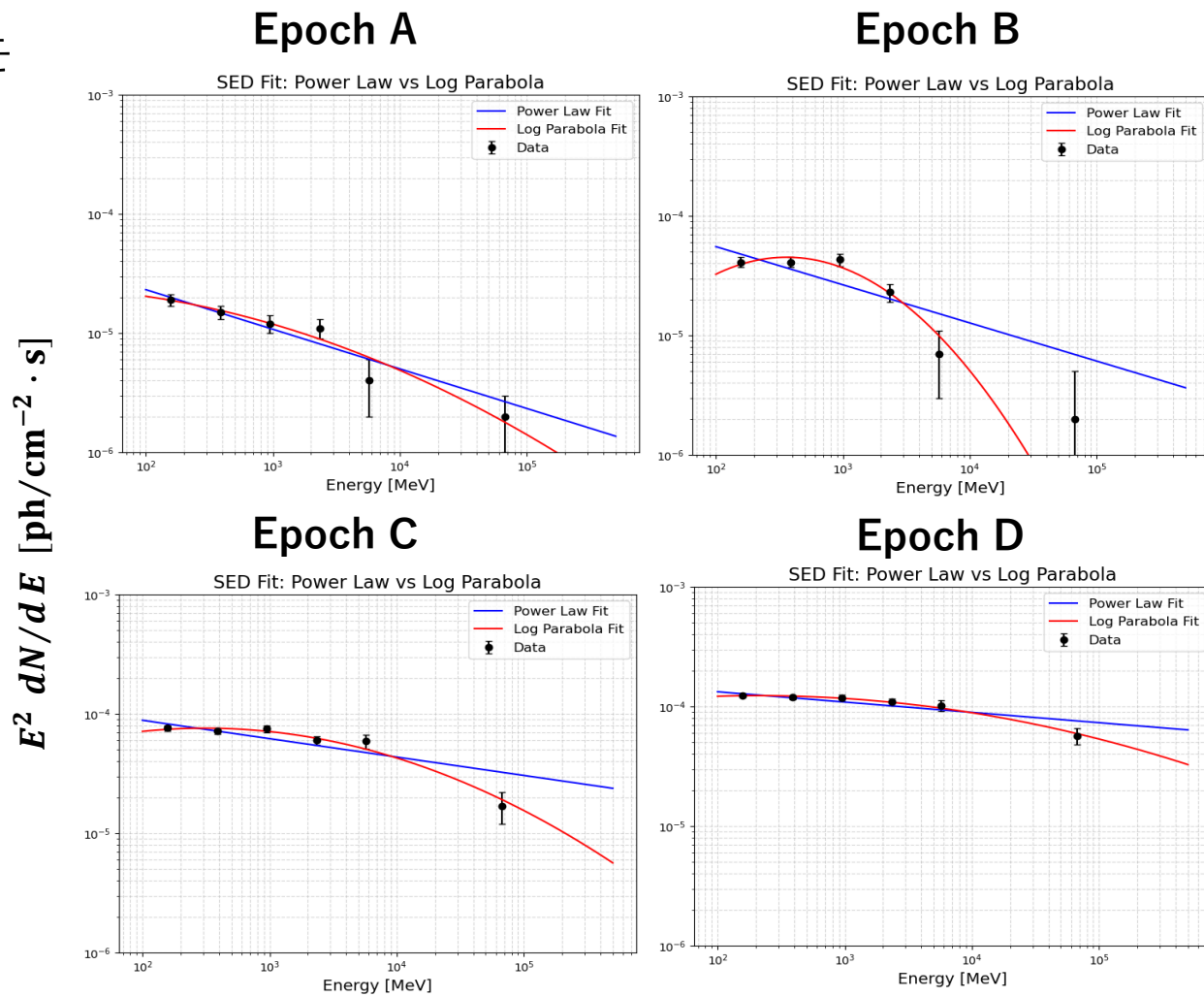
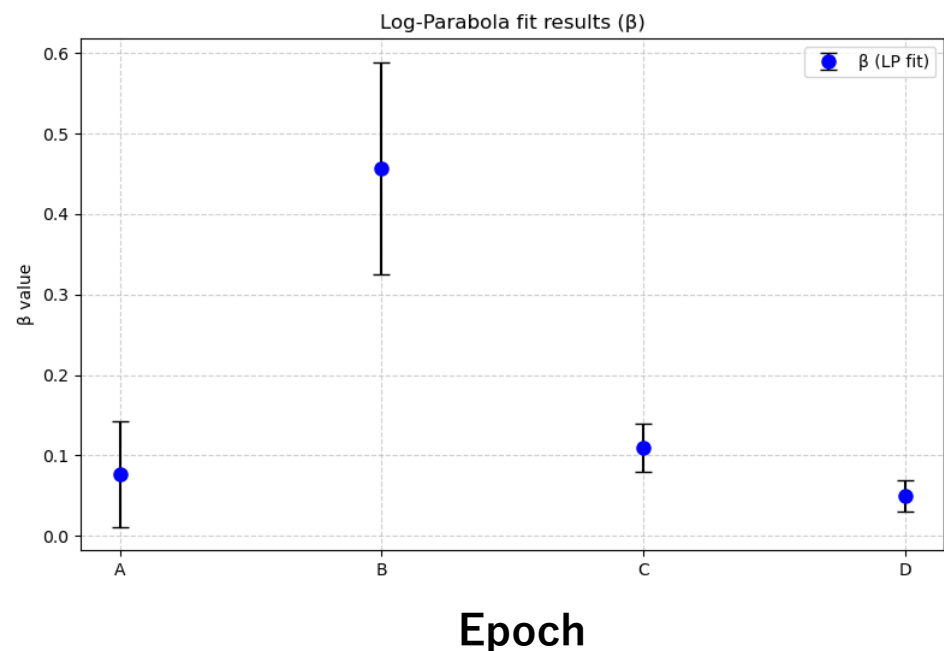
ガンマ線・可視光線の変動特徴に基づき、4つのEpochに分類

- ◆ Epoch A : 静穏期
- ◆ Epoch B : 可視光/近赤外線オーファンフレア期
- ◆ Epoch C : 急峻なガンマ線増光
- ◆ Epoch D : 全波長増光期



- ガンマ線 : 2023年10月 - 2024年8月
- 可視光/近赤外線 : 2023年11月 - 2024年8月

- ガンマ線スペクトルを単純なべき乗のPower Lawモデルと曲線的なLog Parabolaモデルで再現
- ✓ LPモデルの β はスペクトルの“**曲率**”のパラメータ



➤ 可視光オーファンフレア時に一時的な物理環境の変化

青線 : Power Law : $\frac{dN}{dE} = N_0 \left(\frac{E}{E_0}\right)^{\Gamma}$ 赤線 : Log Parabola : $\frac{dN}{dE} = N_0 \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-\alpha - \beta \log(E/E_0)}$

- ◆ 1ゾーンレプトンモデルでSEDを再現
 - Sync, SSC, ECプロセスでSEDをモデル化
 - 相対論的電子分布はBroken Power Law※で与える
- Sync, SSC, DT-ECプロセスで良好にフィット

SEDフィッティング結果

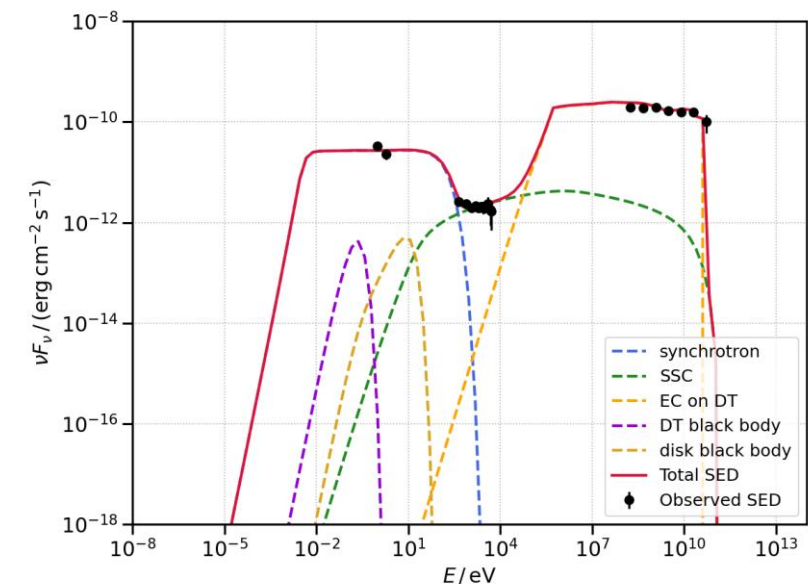
Parameter	Epoch A	Epoch B	Epoch C	Epoch D
$N_0 [\times 10^3 \text{ cm}^{-3}]$	0.98 ± 0.10	1.01 ± 0.09	1.10 ± 0.11	1.28 ± 0.09
$B [\text{G}]$	1.27 ± 0.05	2.04 ± 0.07	1.37 ± 0.04	1.43 ± 0.06
Γ	21.33 ± 0.32	27.23 ± 0.40	29.80 ± 0.35	32.59 ± 0.44

- Epoch B (可視光オーファンフレア)
 - 磁場強度最大 (静音期比1.6倍)
- Epoch D (全波長増光期)
 - 電子密度, バルクローレンツファクター最大

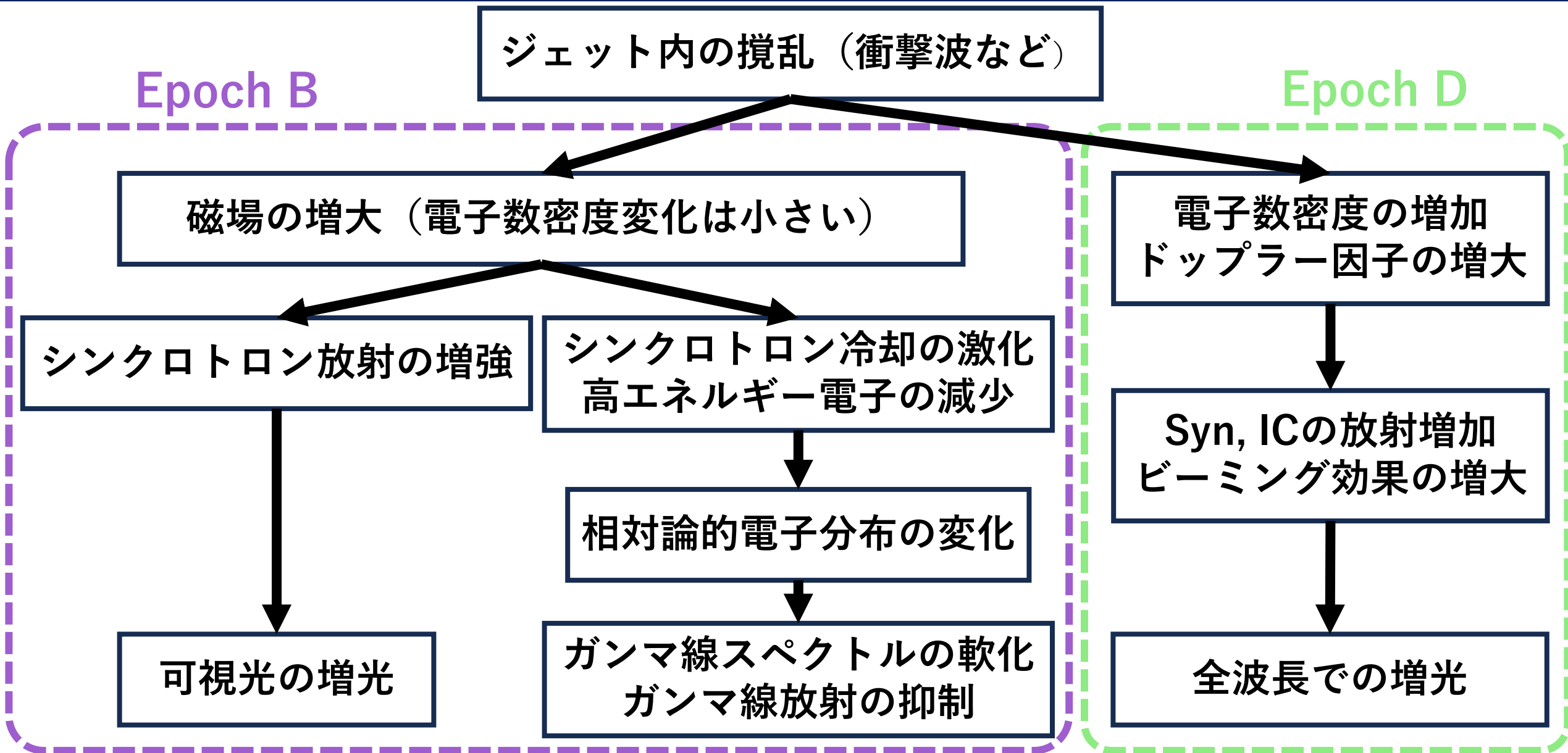
※Broken Power Law

$$N(\gamma)d\gamma = \begin{cases} N_0\gamma^{-p_1}d\gamma, & \gamma_{\min} < \gamma < \gamma_{\text{break}} \\ N_0\gamma_{\text{break}}^{p_2-p_1}\gamma^{-p_2}d\gamma, & \gamma_{\text{break}} < \gamma < \gamma_{\max} \end{cases}$$

広帯域SEDモデリング (Epoch D)



Discussion: 1ゾーンモデルでの変動の物理シナリオ (Epoch B, D)



◆結果：可視光・ガンマ線で異なるライトカーブ

1. 可視光オーファンフレア，ガンマ線の急峻な増光，全波長増光を検出
2. 可視光オーファンフレア期にガンマ線スペクトル形状が変化（曲率 β が増加）

◆解釈

- 可視光オーファンフレア：磁場の増大によるシンクロトロンの増強と電子分布の変化によるガンマ線の抑制・変形
- 全波長増光：電子密度の増加とドップラー因子の増大によるビーミング効果の増大

◆今後

- より詳細なメカニズムの検討
- 他の期間のフレア，他のブレーザーの解析も進める

予備スライド: 偏光も含めた観測結果

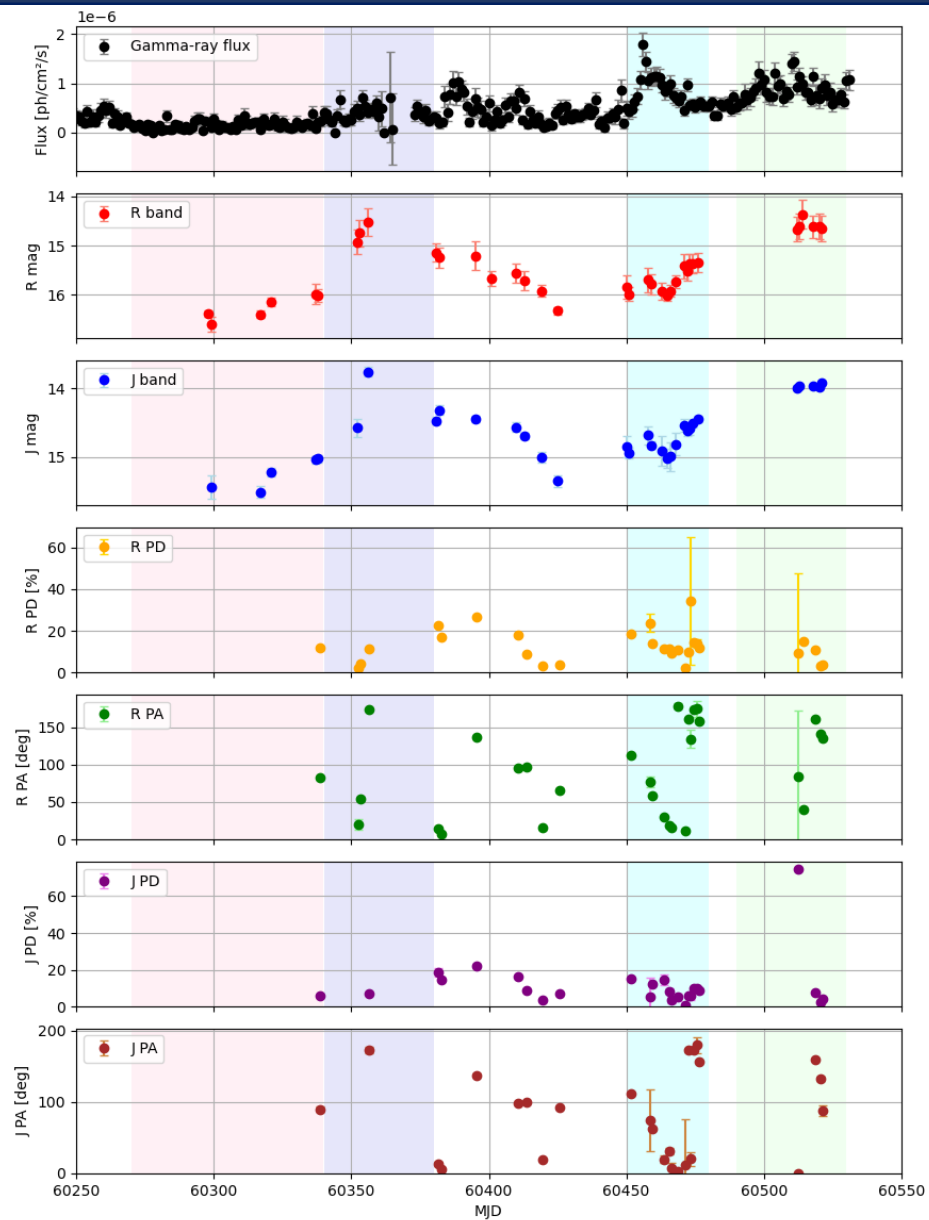


Table 1: Epoch ごとのガンマ線スペクトルフィットパラメータ

Epochs	PL		LP			TS_{curve}
	Γ_p	L_{PL}	α	β	L_{LP}	
A	0.311 ± 0.049	71.900	0.311 ± 0.056	0.077 ± 0.066	72.687	1.576
B	0.319 ± 0.046	58.018	0.404 ± 0.083	0.457 ± 0.132	67.464	18.893
C	0.154 ± 0.022	56.819	0.112 ± 0.026	0.110 ± 0.030	66.153	18.669
D	0.086 ± 0.017	61.609	0.069 ± 0.017	0.050 ± 0.019	65.508	7.798

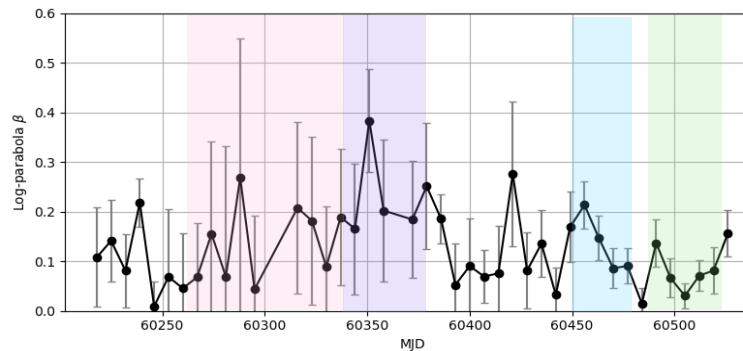
◆内部衝撃波モデル

- プラズマ塊の衝突, 衝撃波面でのフェルミ加速により相対論的電子の数密度の増加
- 衝撃波面でプラズマが圧縮されて磁場が増強
- 粒子の注入・加速によって相対論的電子の密度が十分に増加 ⇒ 全波長での増光
- 磁場増加が (電子密度増加, 高エネルギー加速より) 支配的な場合 ⇒ オーファンフレアの発生

どのような場合に起こりうるか

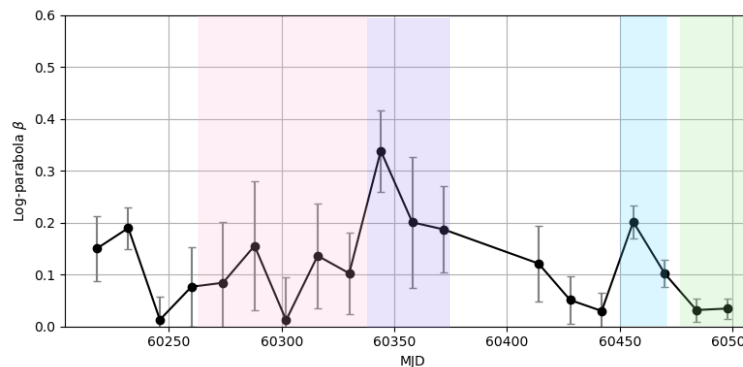
- 粒子の効率的な注入が無い場合
- 高エネルギー電子の放射領域外への拡散 (Zirakashvili & Aharonian 2007)

◆ ビン間隔：7日

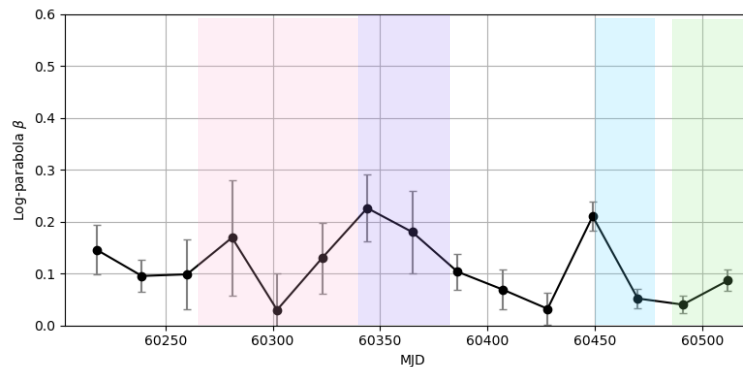


◆ ビン間隔：14日

β 値



◆ ビン間隔：21日



Epoch A Epoch B Epoch C Epoch D