

GENJI プログラム:

γ線ブレイザー NRAO 530と3C454.3のモニター観測結果

秋山和徳(東大/国立天文台)、紀基樹、秦和弘(総研大/国立天文台)、他GENJIプログラムメンバー

Abstract

ブレイザーは多くの天体でγ線放射が検出されてきた。その放射を担う高エネルギー荷電粒子の粒子加速機構を理解する上で加速領域の所在は重要な問題であるが、この領域とVLBI観測で見えるジェットの本元(VLBIコア)の関係は分かっていない。これを明らかにするためにはVLBIを用いてVLBIコアのフラックスの変動とγ線の変動の関係を系統的に調査することで、γ線放射領域がVLBIコア内の光学的に厚い領域に埋もれているか否か、あるいはジェットが多層構造を持っていて違う領域から放射されているかなどを検証する事が重要である。

このような背景のもと始まったVERAを用いたγ線を放射する活動銀河核の高頻度ジェットモニタープログラム「GENJIプログラム(講演 S10b)」では既にいくつかのモニター天体でγ線フレア前後のモニターに成功している。2010/10/31~11/2にGeV γ線のフレアが確認された^[1]NRAO 530および、2010/11/16にGeV γ線フレアが確認された^[2]3C 454.3はその天体の一つである。NRAO 530に対してはフレア後の2010/11/11、3C 454.3に対してはフレア前の2010/11/5から22 GHz帯において1~2週間おきの密なモニターを行っている。NRAO 530に関してはコアフラックスの増光が検出されγ線フレアとの相関が確認できたが、3C 454.3では有意な変動は検出できなかった。しかし他波長のデータをあわせた議論から3C 454.3のコアは22 GHz帯ではoptically thickであり、また多波長でのライトカーブへのモデルフィットからフレア後の振る舞いは断熱冷却で説明するのは困難であることが分かった。

GENJIとは

GENJIプログラムは国立天文台が所有するVERAを用いて、γ線AGNに対して約2週間に1回の高頻度でモニター観測を行い下記のテーマに取り組んでいる。

- (i) VLBIコアフラックスとガンマ線フラックスの変動の関係の系統的調査
- (ii) ジェットの downstream領域あるいは空間的に広がった成分のフレア有無の調査(e.g. M87におけるHST1)
- (iii) ジェットの固有速度と、γ線放射から期待されるローレンツ因子の関係

--> ガンマ線源の所在とVLBIコアの本質の解明

<p>変動が同期</p> <p>解釈</p> <ul style="list-style-type: none"> VLBIコアの中にγ線放射領域があり、γ線放射領域が光学的に薄い <p>Sub-mm or Space VLBIによってγ線放射領域の撮像が期待される</p>	<p>相関はあるが、電波にdelayが見られる</p> <p>解釈① ジェットの光学的厚み</p> <p>γ線放射領域 電波コア</p> <p>厚い ← 薄い</p> <p>光学的厚み</p> <p>解釈② γ線放射領域の光学的厚み</p> <p>γ線 電波</p> <p>厚い ← 薄い</p> <p>光学的厚み 時間</p> <p>VLBIコアの中にγ線放射領域があるが、γ線放射領域が光学的に厚い</p> <p>放射領域自体が光学的に薄くなる事で電波で増光が見える。</p> <p>光学的厚みによってはSub-mm VLBIでγ線放射領域の撮像が期待できる。</p>
<p>変動が無相関</p> <p>解釈</p> <p>電波とγ線の放射領域が空間的に異なる</p> <p>→ たとえばJetの多層構造など</p>	

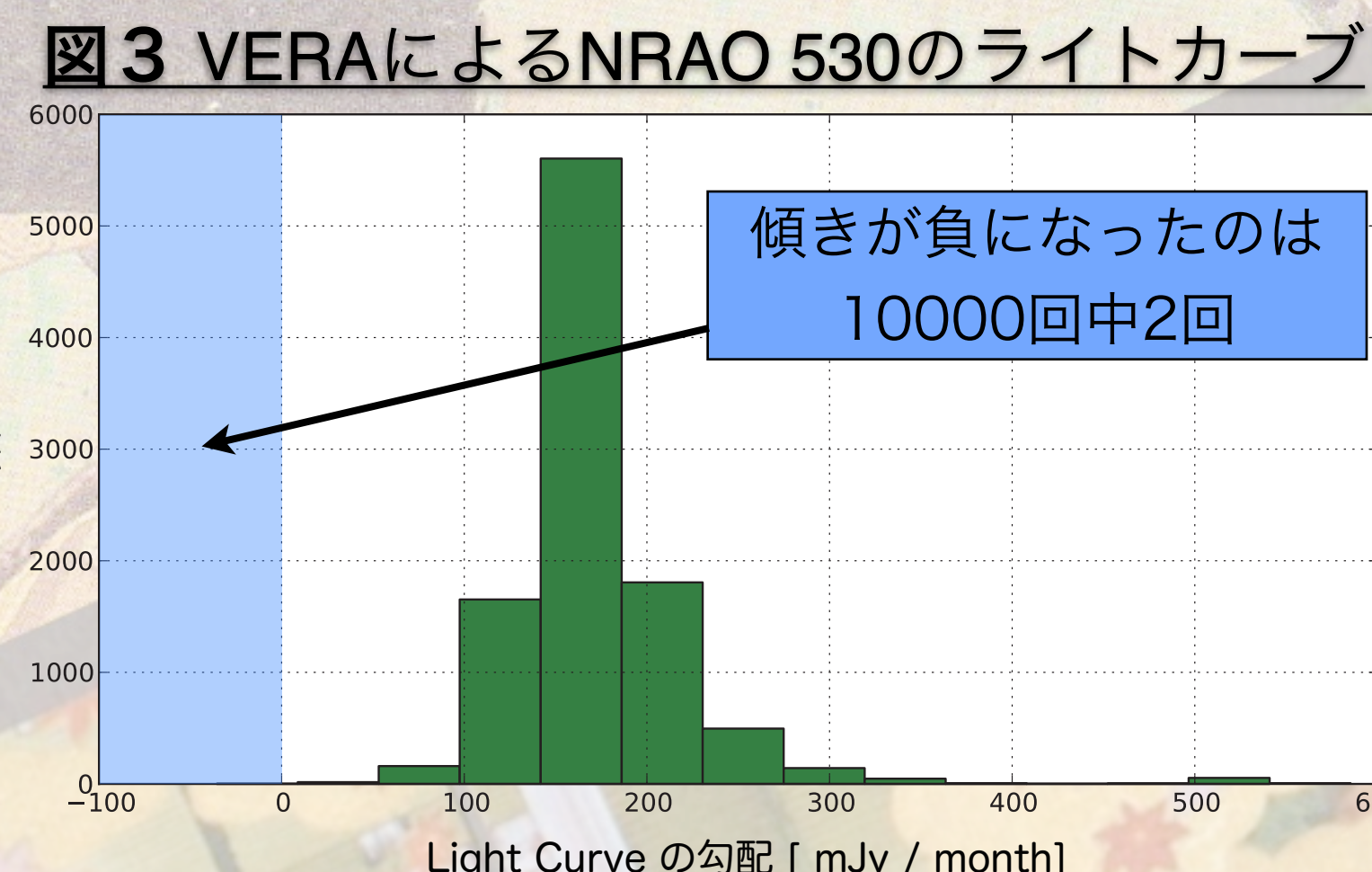
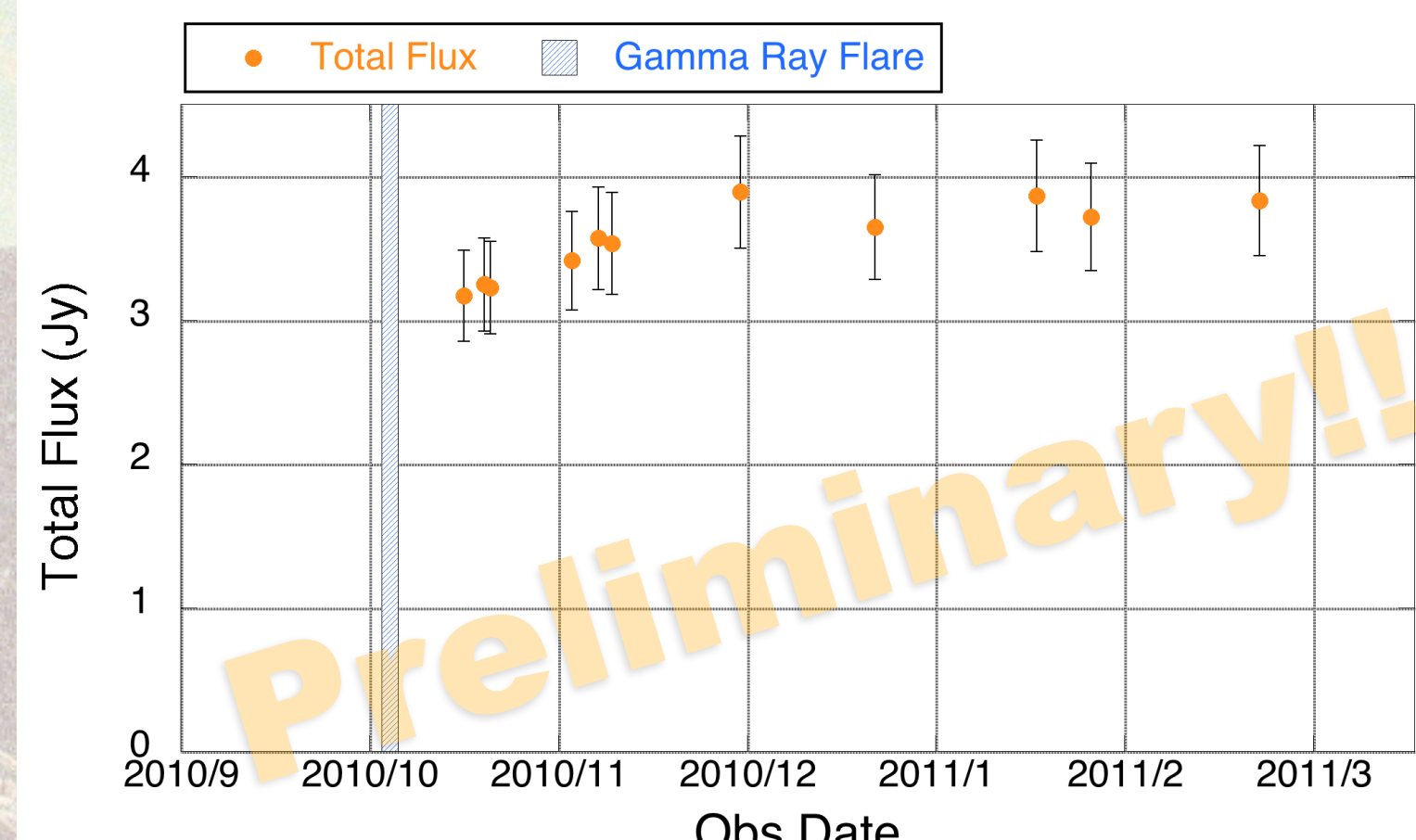
Observation

観測装置: VERA (右図) 空間分解能: ~1 mas @ 22 GHz
 周波数: 22 GHz バンド幅: 192 MHz (16 MHz x 12 IF)

- NRAO 530 (FSRQ; z~0.902; 7.82 pc/mas; c ~ 39 μas/yr)
 観測 epoch: 2010/11/11 ~ 2011/03/09 (11 epoch)
 モニター間隔: ~11.8日 (最大: 25日、最小: 1日)
- 3C 454.3 (FSRQ; z~0.859; 7.70 pc/mas; c ~ 40 μas/yr)
 観測 epoch: 2010/11/10 ~ 2011/02/27 (6 epoch)
 モニター間隔: ~21.8日 (最大: 50日、最小: 2日)



NRAO 530 のGeV γ線フレア後のモニター観測結果



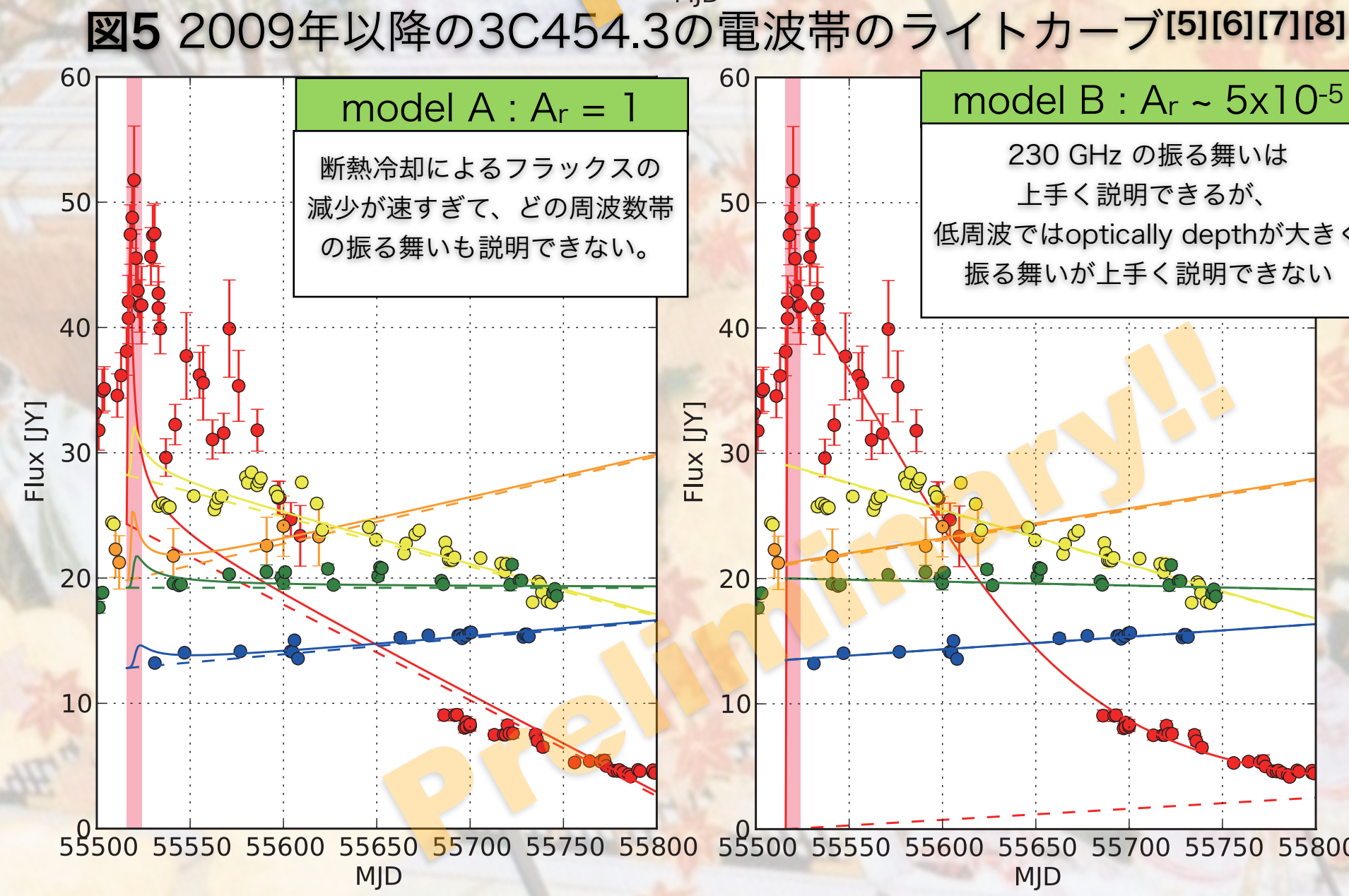
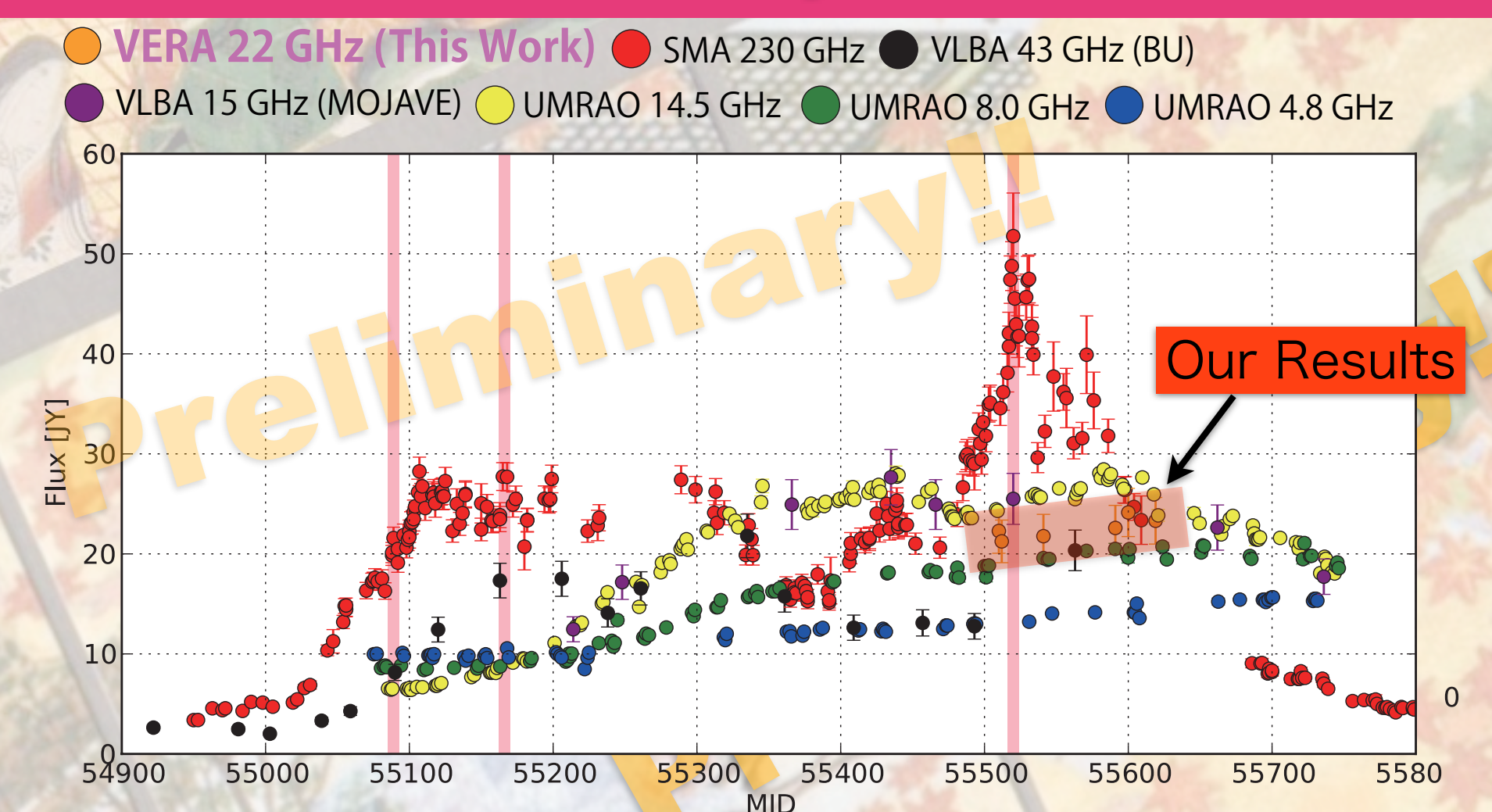
Result

- Fermi/LATによって検出されたγ線フレア^[2]直後から電波コアが増光している傾向が見えている事が分かった(図2および図3)。
- 見えている増光の傾向が有意であるかを調べるために、観測データを重複を許してランダムにリサンプリングし、最小二乗法で1次式をフィットし傾きを求める作業を繰り返し行い(Bootstrap法)、傾きのパラメータを調べた(図4)。その結果、Bootstrap検定に基づくと99.9%の信頼水準で電波コアは増光している事が分かった。

Discussion

- 静穏時のNRAO 530の22 GHzにおけるコアスペクトルはoptically thickであるため^[4]、電波帯のシンクロトロン電子がγ線放射粒子と同時に加速されたとすれば、コアの増光時期がγ線フレアの時期に近いことは22 GHzの電波コアとγ線放射領域の粒子加速領域が空間的に近い(< 12 光日)ことを示唆している。
- コアスペクトルは30 GHz帯付近でピークを迎え^[4] mm波では光学的に薄くなる。そのためmm波帯よりも高周波の領域では電波コアを見通すことができる。従って将来のmm及びSub-mm VLBIといった高周波VLBIによる高分解能観測によって高エネルギー粒子加速領域の直接撮像が期待される。

3C 454.3 のGeV γ線フレア前後のモニター観測結果



Result

Fermi/LATによって検出されたγ線フレア^[2]前後では電波コアフラックスに有意な変化を検出できなかった(図5)。

Discussion 1. 3C 454.3 の22 GHzの電波コアとγ線放射領域の関係

γ線フレアとほぼ同時に230 GHz帯でフレアが起こった一方で、我々が観測した22 GHz帯やそれ以下の低周波帯では増光が遅れており、3C 454.3のコアは、22 GHz帯ではまたoptically thick であると言える。

2011年のGeV フレアでは、230 GHz帯においてはまさに高エネルギー粒子加速領域が見えていた事になる。

Discussion 2. 電波フラックスのフレア後の振る舞いは断熱冷却モデルで説明ができるか?

多周波での電波帯のフレア後の減光が何に起因するものなのかを調べるため、断熱冷却モデル^[9]を用いてモデルフィッティングを行った。このモデルでは加速粒子の注入はone-shot的で放射領域の断熱膨張のみで冷却が進む。右枠にある通り、フラックスの時間変化は放射領域の初期サイズ R'_1 、ドップラーファクター δ 、膨張速度 v と電子のエネルギー指数 p で決まる。そこで初期サイズ、ドップラーファクターをγ線の観測から決まった制限値 (3×10^{15} cm, 16)、及び相対論的粒子の音速 ($\sim c/3$) を用いて規格化した A_r と p を変数にモデルフィッティングを行った。

model A $A_r = 1$ で固定して p を求めたとき (図6左) --> $p \sim \text{several} \times 10$

断熱冷却による冷却タイムスケールが早く、振る舞いが説明できない。
 またモデルフィットから求めた p は10を越えており、不自然である。

model B A_r を固定せずと A_r と p を求めたとき (図6右) --> $p \sim 3, A_r \sim 5 \times 10^{-5}$

mm波のライトカーブの振る舞いはよく説明しているが低周波帯ではoptically thick過ぎて14.5 GHz等で見えているターンオーバーは説明ができない。さらに A_r の値が小さいため、γ線のライトカーブから見積もられた放射領域のサイズを大きくする、ドップラーファクターを小さくする、あるいは膨張速度を音速よりも小さくするといった描像が必要になる。

モデル概要 [9]

$$S_\nu(\nu, t) = S_0 \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^{2.5} R_r^3 \frac{1 - \exp(-\tau_0 (\nu/\nu_0)^{-(p+4)/2} R_r^{-(2p+3)})}{1 - \exp(-\tau_0)}$$

$$R_r = \frac{1 + A(t - t_0)/(1+z)}{1 - A(t_{\text{flare}} - t_0)/(1+z)}$$

$$e^{\tau_0} - (3p/2 + 1)\tau_0 - 1 = 0$$

$$A = v' \delta / R'_1$$

$$= A_r c \delta_{\text{min}} / 3 R'_{\text{app}} = 5.3 \times 10^{-5} A_r$$

R'_1 : flare時のsource-frameでの放射領域のサイズ、flareの時間
 δ : ドップラーファクター p : 電子のエネルギー指数
 v' : source-frameでの放射領域の膨張速度
 t_0, t_{flare} : ある周波数 ν_0 においてライトカーブがピークになった時間、光学的厚み及びピークフラックス

断熱冷却モデルでフレア後の振る舞いを説明するのは難しい?

Reference

- [1] Atel #3002
- [2] Atel #3041
- [3] Abdo et al, 2011, ApJ, 733, L26
- [4] Ru-Sen Lu, 2010, Ph.D Thesis
- [5] SMA Calibrator List
- [6] UMR AO Database
- [7] MOJAVE Program
- [8] Boston University, Blazer Group
- [9] Van Der Laan, 1966, Nature, 211, 1131