



# ブレーザー天体1ES1959+650における X線とGeVガンマ線の フラックスの長期相関の評価

2025年2月14日

櫻井 丈児

# motivation

## 宇宙における高エネルギーガンマ線の発生メカニズムと高エネルギーニュートリノとの関係の解明

### ブレーザー

活動銀河核 (AGN) の一種であり地球に向かってジェットがほぼ直線的に向いている天体

- 電波から100GeVを超える高エネルギーガンマ線までの広範囲な波長において変動を示す

### SSC(Synchrotron Self-Compton)モデル

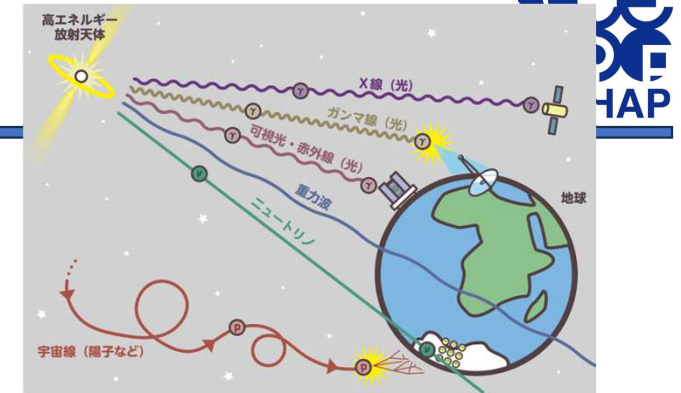
高エネルギー電子が放射するX線が、さらに他の電子と相互作用して高エネルギーガンマ線を散乱する

### Hadronicモデル

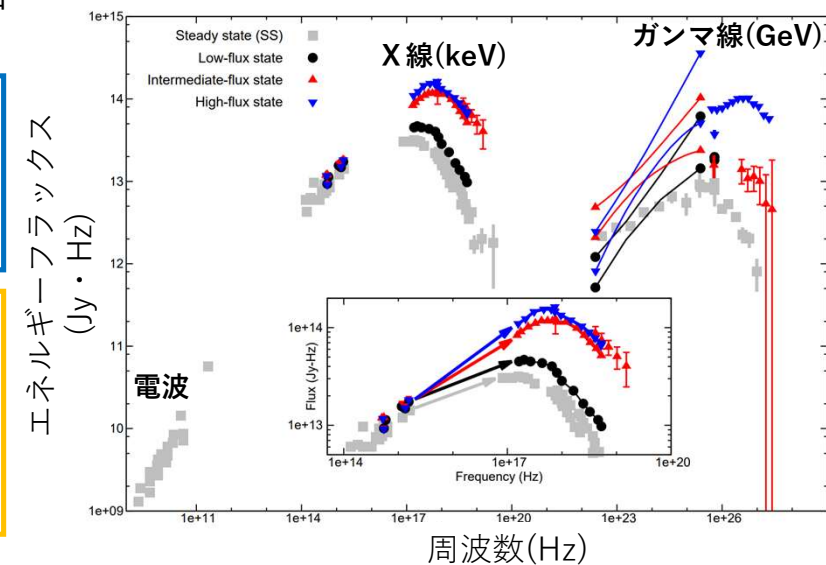
高エネルギー陽子と光子が相互作用し、高エネルギーガンマ線と高エネルギーニュートリノを生成する

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

➡ ブレーザー天体を調べることで高エネルギーガンマ線の発生メカニズムを考える



Mrk421のSED(Spectral Energy Distribution)



credit: B. Banerjee et al.(2019)

# 本研究に用いたブレーザー天体

- 高エネルギーガンマ線が観測されている
- 比較的近くに位置していてフレアしていないときでも観測できる  
→フレア時の挙動が分かりやすい

- Mrk421
- Mrk501
- 1ES1959+650

## Mrk421/Mrk501

- X線とガンマ線で頻繁にフレアを起こす
- SED (Spectral Energy Distribution)は 2つのピーク を持つ

→SSCモデルによって説明されている

B. Banerjee et al.(2019), Mankuzhiyil et al(2012)

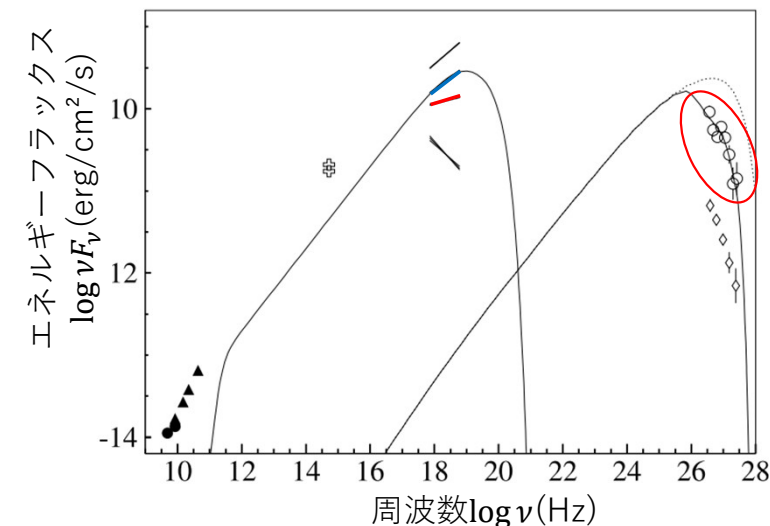
## 1ES1959+650

- SSCモデルで説明可能なX線とガンマ線の同時フレアが観測されている
- 大きなX線のフラックスの増加を伴わずにガンマ線のフラックスが急増するOrphan flareが観測された

→ **Hadronicモデルによるものである可能性があり、ニュートリノとの関連が示唆されている** Böttcher(2004)

- 過去に1ES1959+650の方向からのニュートリノイベントが観測されている

1ES1959+650のSED



credit: H. Krawczynski (2003)

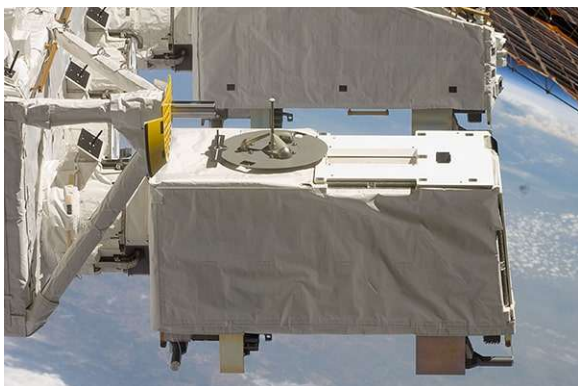
# 研究の目的

- ▶ 数か月の観測による短期間で起きた激しいフレア現象に焦点が当てられてきた
  - ・ブレーザーは短期変動だけでなく長期変動もしている可能性がある
  - ・緩やかな変動や周期的な変動が見逃されている可能性がある

➡ **長期的な変動を調べることで新たな変動パターンや放射メカニズムを探ることが出来る**

**目的**  
**1ES1959+650のX線とGeVガンマ線の約16年分のフラックスの長期相関を評価する**

X線観測装置MAXI (2~20 keV)

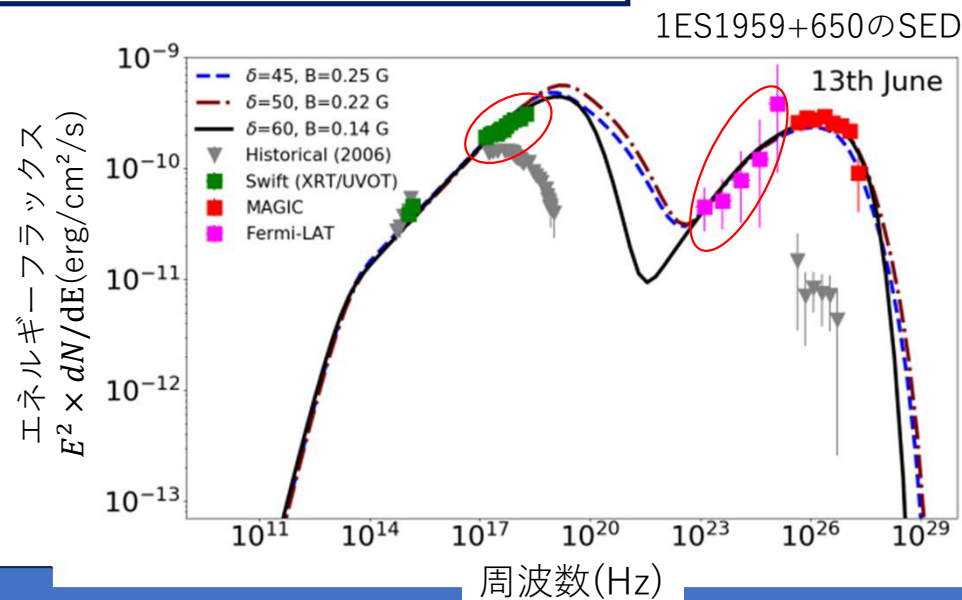


credit: JAXA

ガンマ線検出器LAT(20 MeV~300 GeV)



credit: NASA



credit: Astronomy & Astrophysics manuscript(2020)

# X線とガンマ線の光度曲線

## 光度曲線

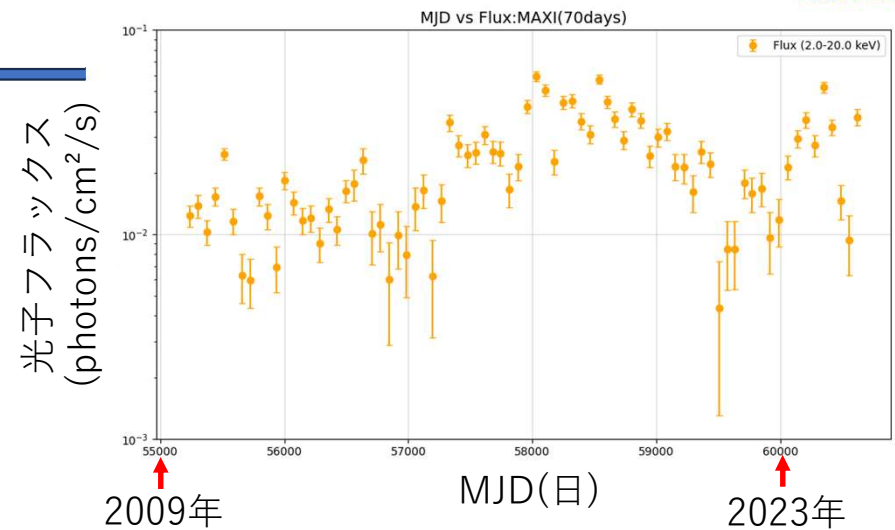
エネルギー強度の時間変化を表した曲線

### ➤ 光子フラックス

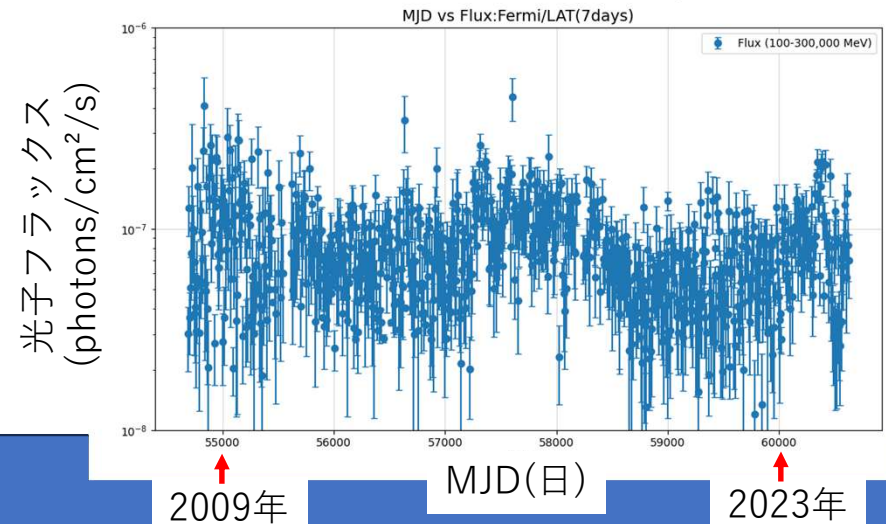
- ・ 単位面積、単位時間あたりに観測された光子数
- ・ フレアが起きると光子数が増えるため放射強度を示している

相関を計算するためにLATのデータをMAXIと同じ70日ビンにそろえる

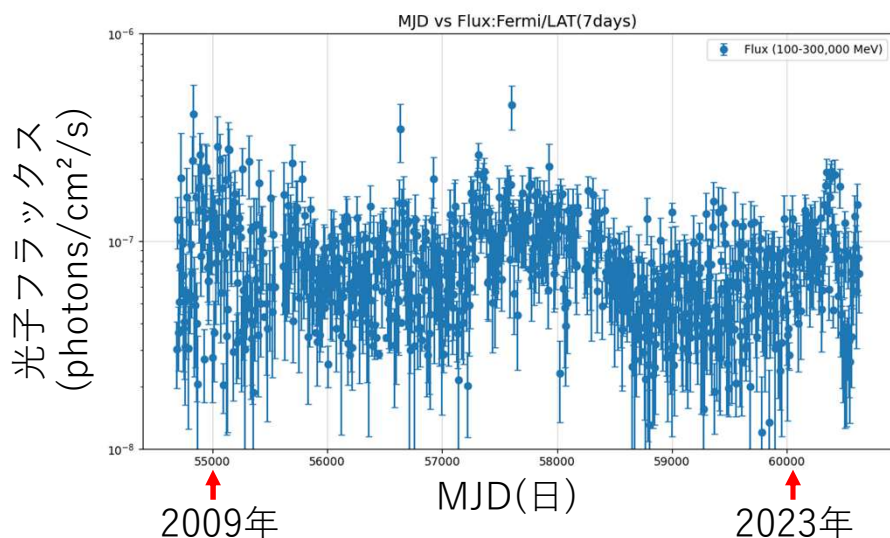
X線(2~20 keV, 70日ビン)



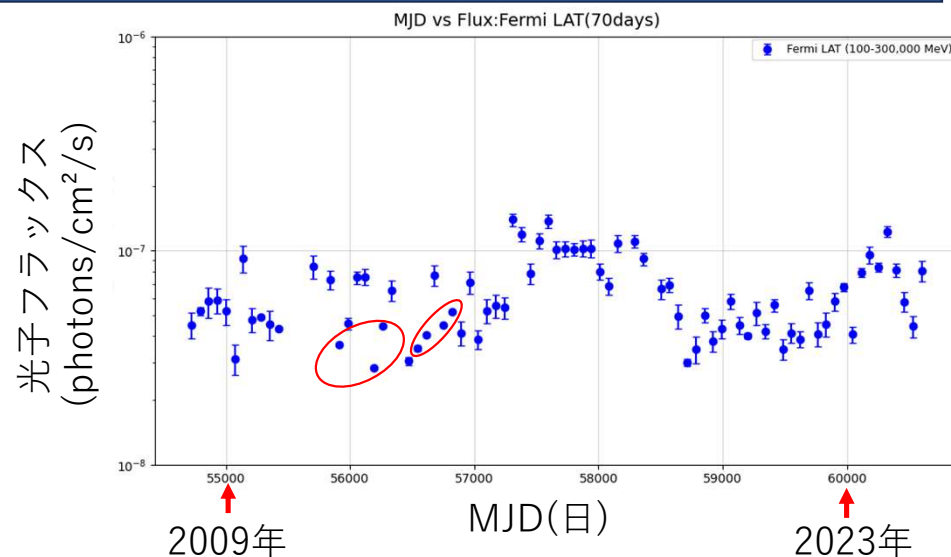
ガンマ線(100 MeV~300 GeV, 7日ビン)



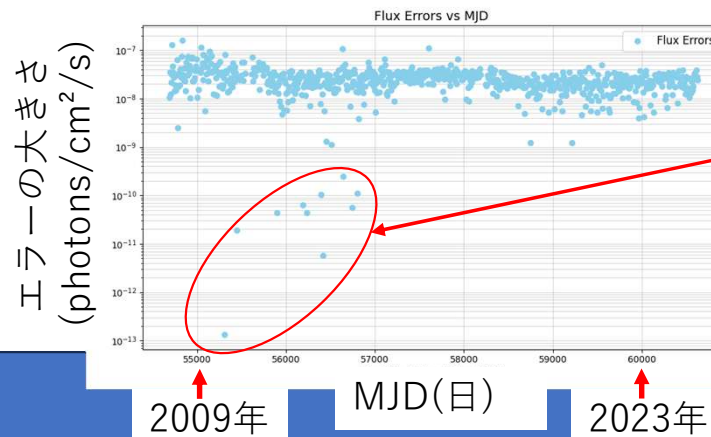
# LATデータのビンニング



7日ビン  
→70日ビン



7日ビンの光度曲線のエラーの大きさを示した図



エラーの値が  
 $10^{-9}$  photon/cm<sup>2</sup>/s  
以下のプロットをデータ  
から除いた後に70日ビン  
にまとめる

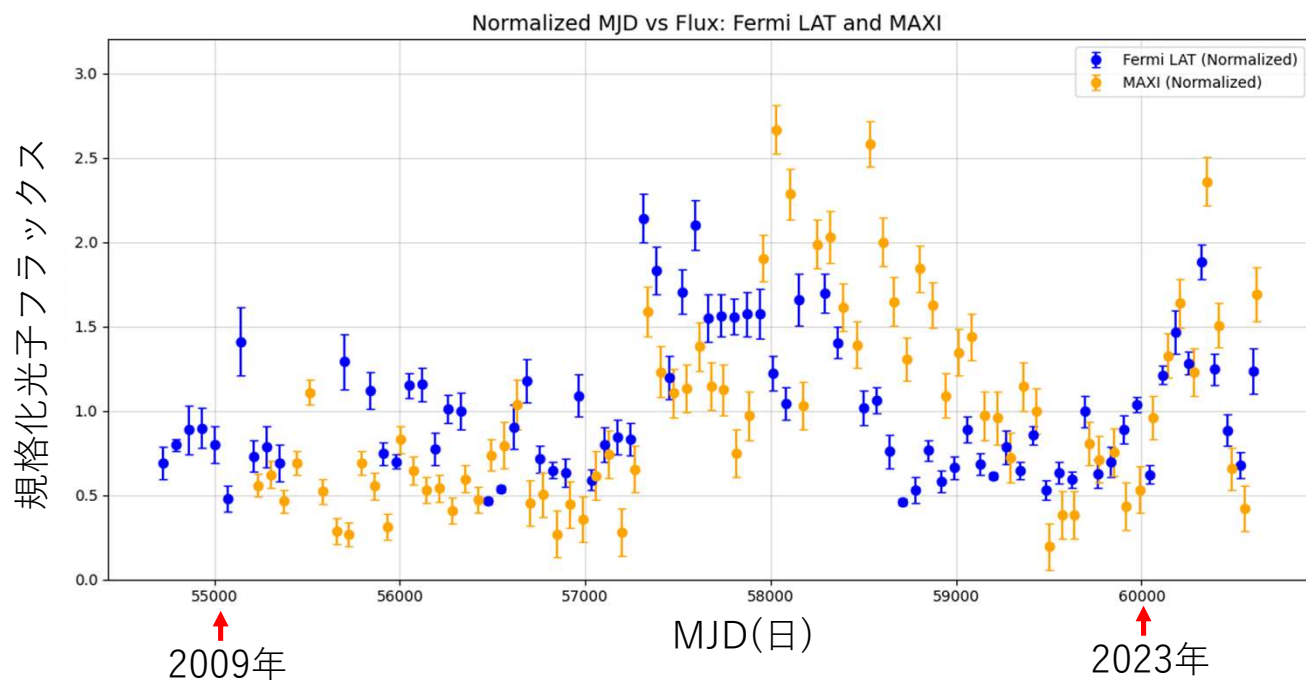
$$\bar{F} = \frac{\sum_i w_i F_i}{\sum_i w_i} \quad \sigma_{\bar{F}} = \sqrt{\frac{1}{\sum_i w_i}} \quad w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$$

$F$  : 7日ビンでのフラックスの値  
 $\sigma_i$  : 7日ビンでのエラーの値

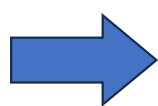
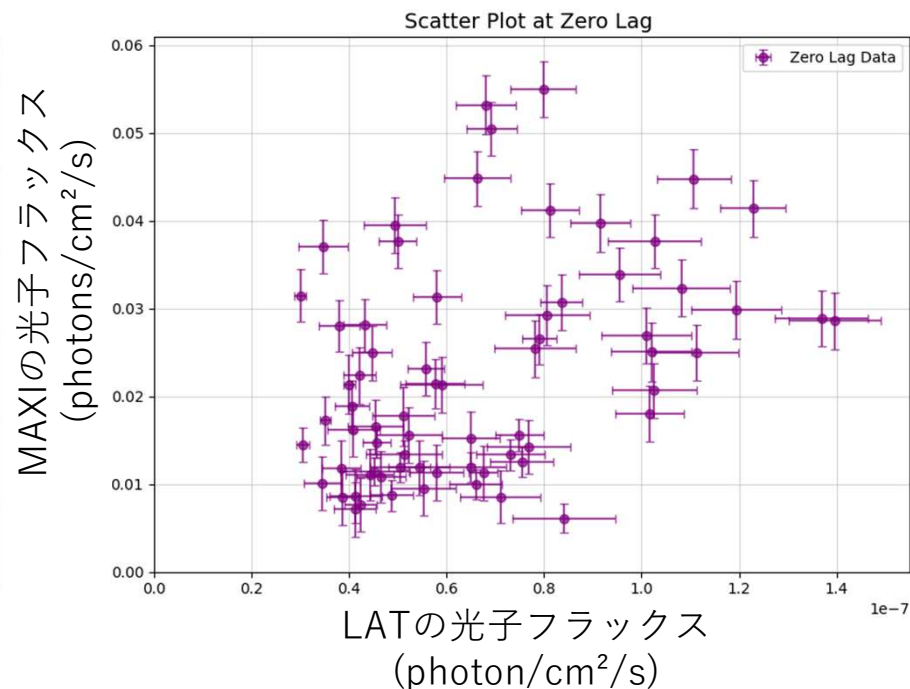
7日ビンの時点でのエラーの値が過度に  
小さい点に寄ってしまう

# MAXIとフィルタリング後のLATのフラックス

それぞれのフラックスを平均値で割ったプロット



フラックスの散布図



X線のフレアがガンマ線より遅れて起きているように見える  
→時間差での相関を調べる

# 相関の計算

MAXIのMJDからLATのMJDを引いた値をラグと定義

## CCF(Cross-Correlation Function) 等間隔のビンのラグに対する相関を 求めるための関数

### 計算方法

➤ 
$$CCF = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(\gamma_i - \bar{\gamma})}{N \cdot \sigma_X \cdot \sigma_\gamma}$$

$X_i, \gamma_i$ : フラックスの値  
 $\bar{X}, \bar{\gamma}$ : フラックスの平均値  
 $N$ : ペア数  
 $\sigma_X, \sigma_\gamma$ : 標準偏差

→ フラックスの中央値で計算しているため  
エラーの大きさが考慮されていない

- ビンのずれが0, ±1, ±2...のときのCCFを求める

## DCF(Discrete Correlation Function) 不規則なデータのラグに対する相関を 求めるための関数

計算方法 Edelson, R. & Krolik, J.(1988)

- $UDCF_{ij}$ を以下の式によって求める

$$UDCF_{ij} = \frac{(X_i - \bar{X})(\gamma_i - \bar{\gamma})}{\sqrt{\sigma_X^2 - e_{X_i}^2} \sqrt{\sigma_\gamma^2 - e_{\gamma_i}^2}}$$

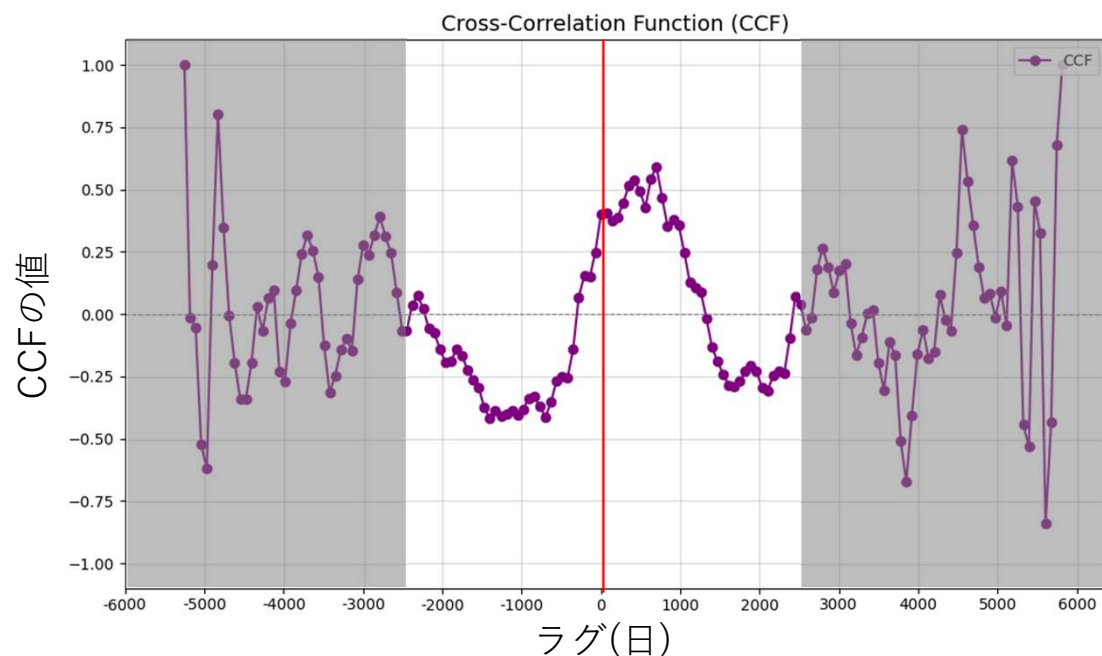
$e_{X_i}, e_{\gamma_i}$ : フラックスのエラーの値

- ラグが±70日、±140日、±210日...までの  
 $UCDF_{ij}$ の平均を取る

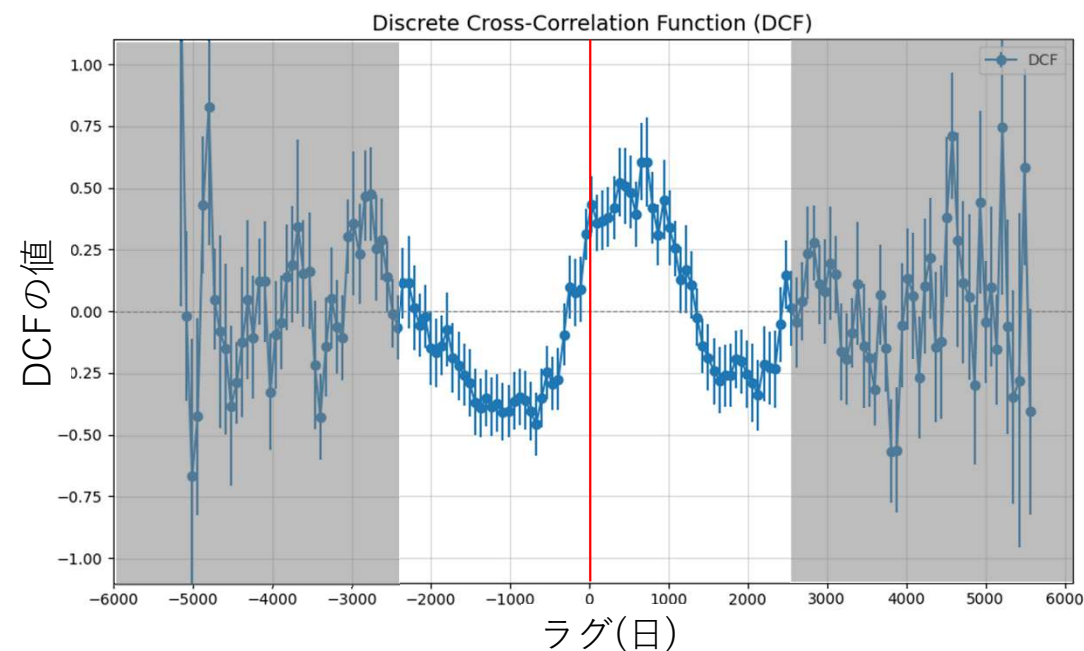
$$DCF(\tau) = \frac{1}{N} \sum UDCF_{ij} \quad N: \text{ペアの数}$$

# CCFとDCFの結果

## CCF



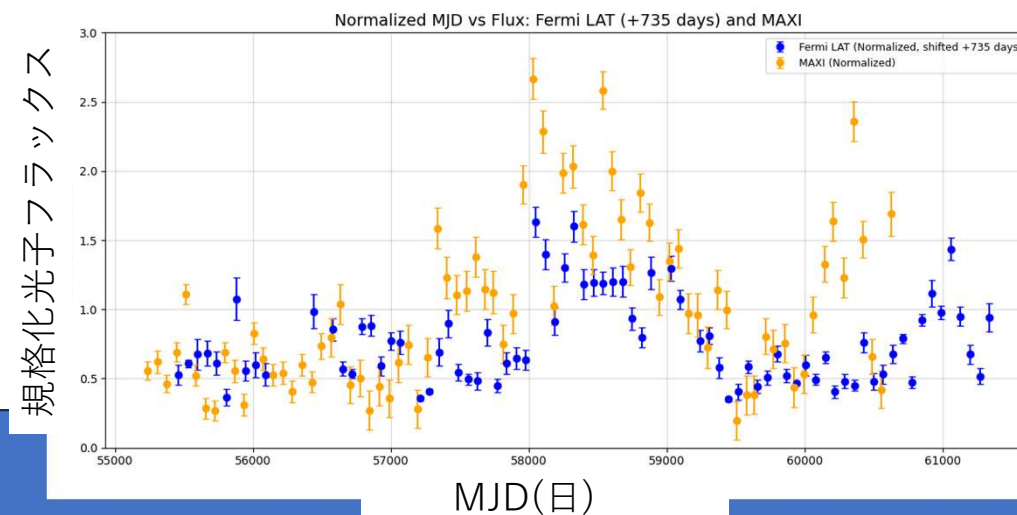
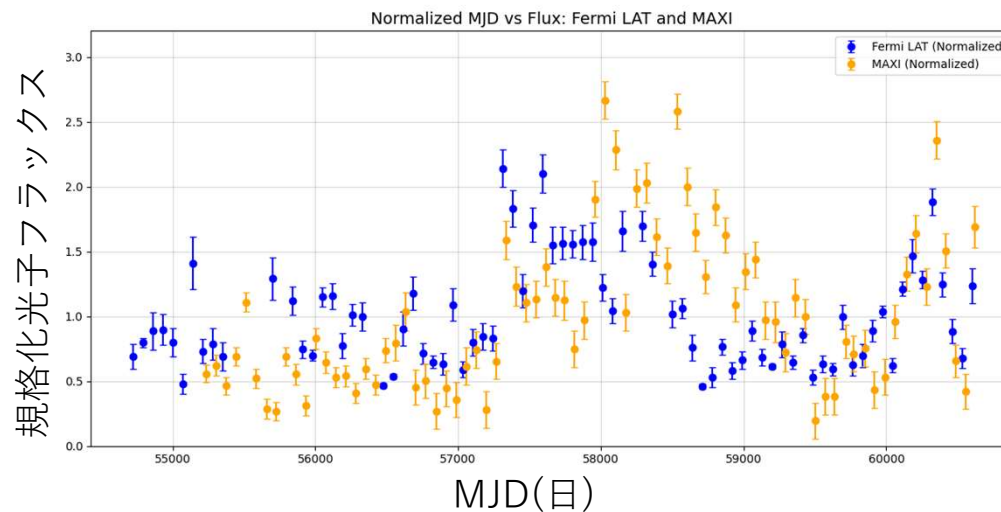
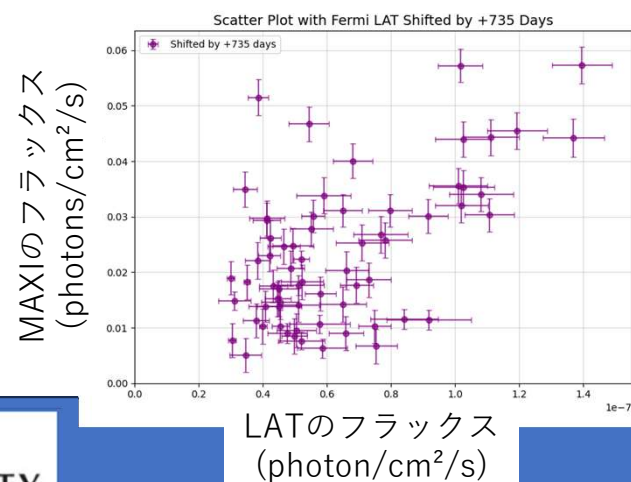
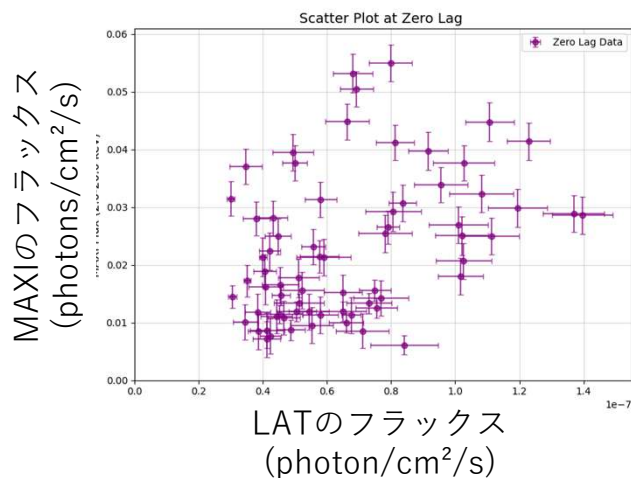
## DCF



- 端の部分ではペア数が少ないため相関のばらつきがある
- 正のピークの両脇に負のピークが形成される特徴がある
- グラフの中央部分の正のピークに注目する
- どちらの結果も相関が最大となるのはラグが735日 (DCFは $0.604 \pm 0.180$ )

# プロットのシフト

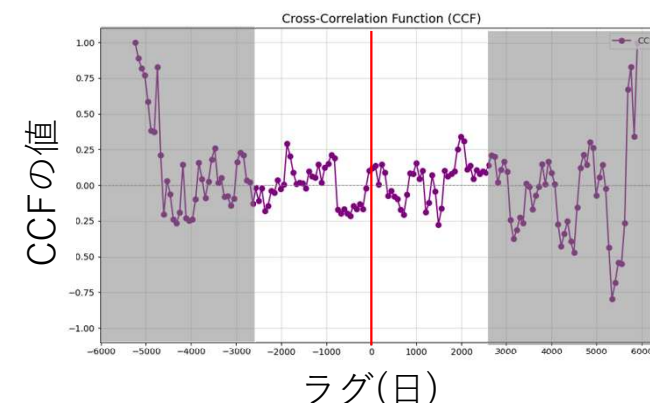
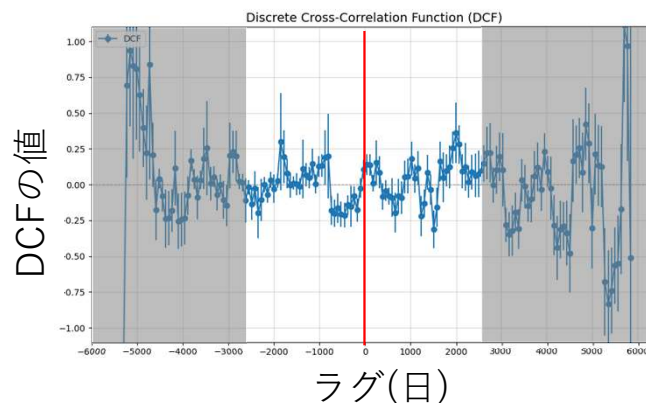
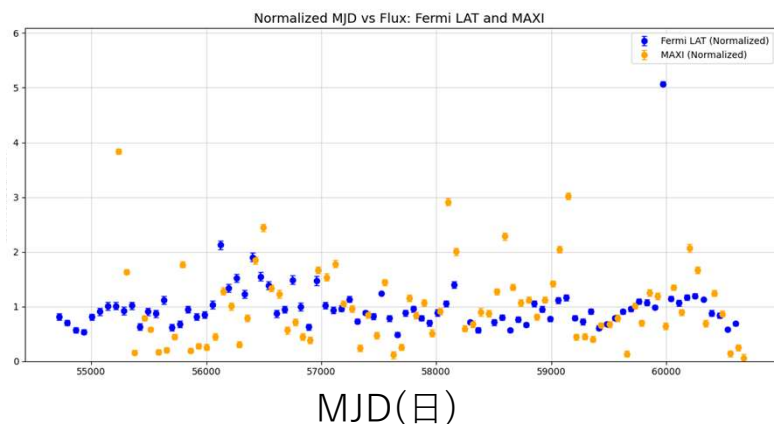
## LATのプロットを+735日



# Mrk421,501の光度曲線とDCF,CCF

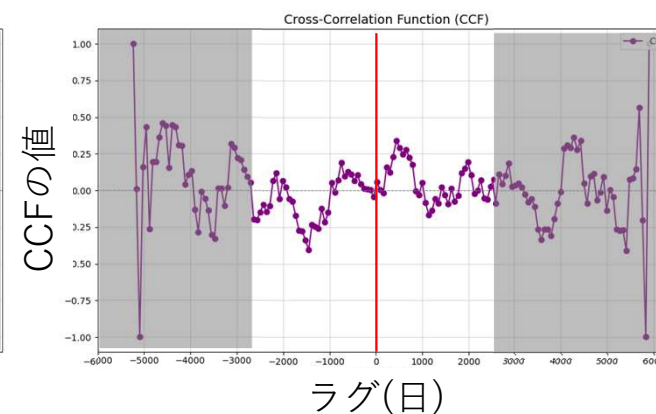
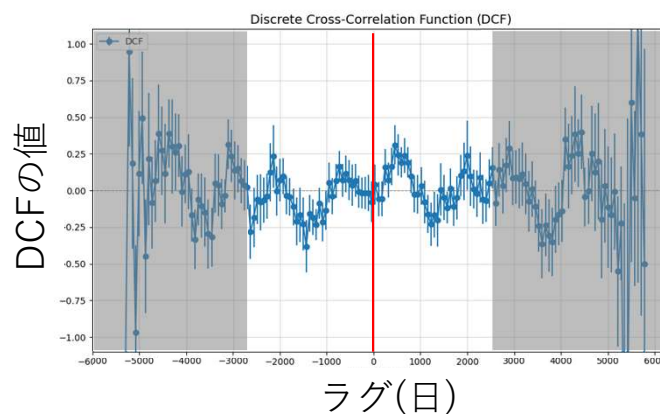
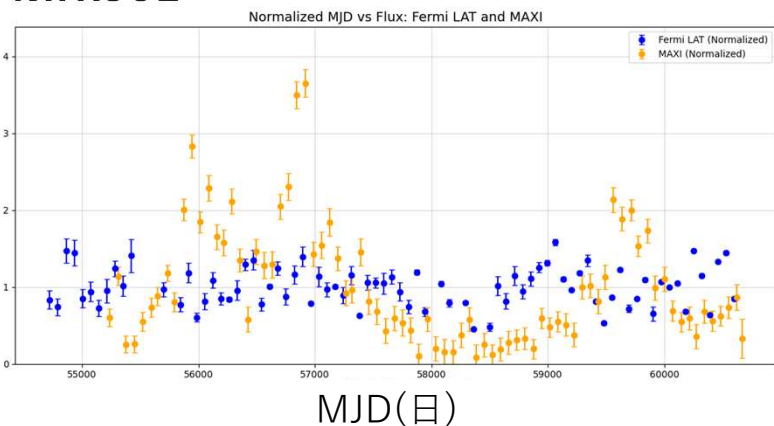
## Mrk421

規格化光子フラックス



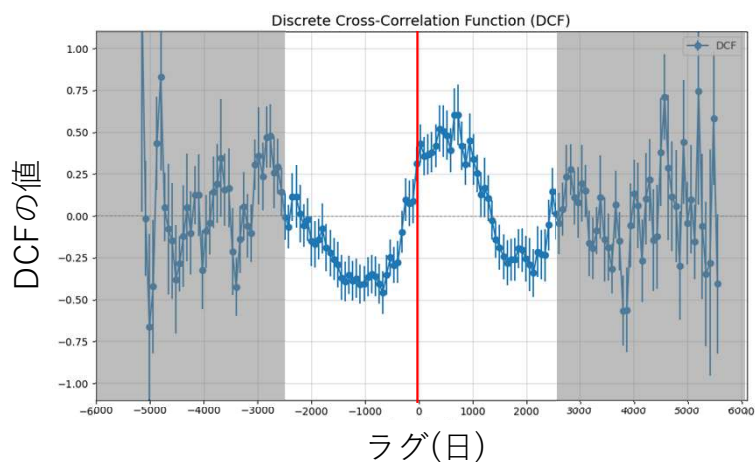
## Mrk501

規格化光子フラックス

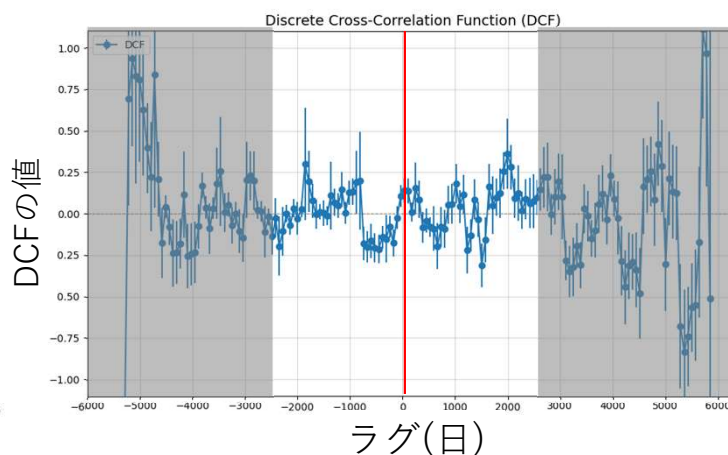


# 1ES1959+650とMrk421,501の比較

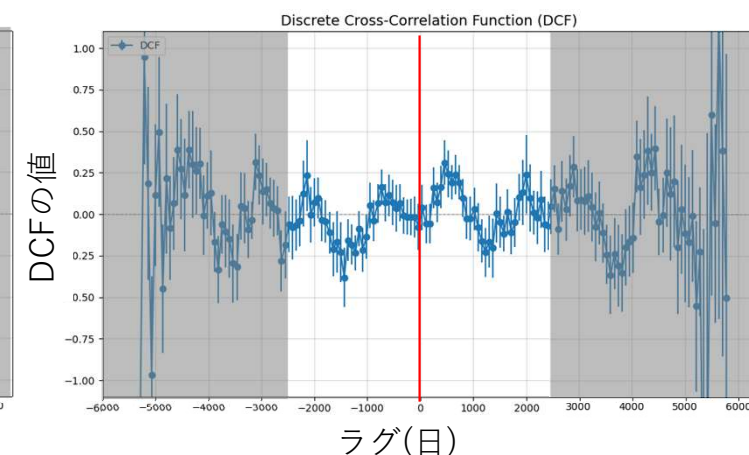
1ES1959+650



Mrk421



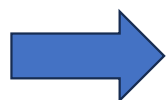
Mrk501



- DCFの最大値が1ES1959+650の $0.604 \pm 0.180$ に対しMrk421は $0.140 \pm 0.073$ 、Mrk501は $0.311 \pm 0.136$ である
- 1ES1959+650のラグが正の値であるためガンマ線のフレアがX線のフレアより先行している
- 長期間で見るとMrk421,Mrk501にはX線とガンマ線の0ラグでの目立った相関は見られない

ガンマ線のフレアがX線のフレアより先に起きている

- 過去にもガンマ線のフレアがX線より先行した例はあるがラグは数時間～数日程度であり735日のラグは大きすぎる
  - ブレーザー外の光子によってガンマ線が生成される  
(Ghisellini & Tavecchio (2008))  
→ エネルギーを失った電子がX線を放射
  - エネルギーの低い電子がジェット内で再び加速される  
(Lewis, Becker, Finke (2016))  
→ Hadronicモデルによって生成された電子が加速されてX線を放射
- 放射領域が異なることによる時間の遅れ(Aharonian et al. (2009))



- 700日のラグが生じる条件を調べる
- ガンマ線がX線より先行するようなモデルを深く調べる
- 他のブレーザー天体の挙動と比較する
- ニュートリノ観測データと見比べながら放射原理を検討する

- Mrk421, Mrk501, 1ES1959+650はSSCモデルで説明されているX線と高エネルギーガンマ線のフレアが観測されている
- 一方で1ES1959+650ではSSCモデルでは説明できないOrphan flareが起きておりニュートリノ生成と関連している可能性がある
- 長期間のフラックスに注目すると1ES1959+650はX線とガンマ線の間には他のブレーザーに比べて強い相関が見られた
- 長期相関があることやガンマ線のフレアがX線のフレアより先行していることの原因や放射原理を解明することが今後の課題  
→放射原理によっては高エネルギーニュートリノと関連する可能性がある