

# ブレーザーMrk 421の多波長・時系列 データから探る放射領域の変動

山田悠梨香 (広島大学)

共同研究者: 植村誠、深沢泰司、大野雅功、今里郁弥(広島大学)、  
伊藤亮介(東京工業大学)

## ブレイザー (Blazar)

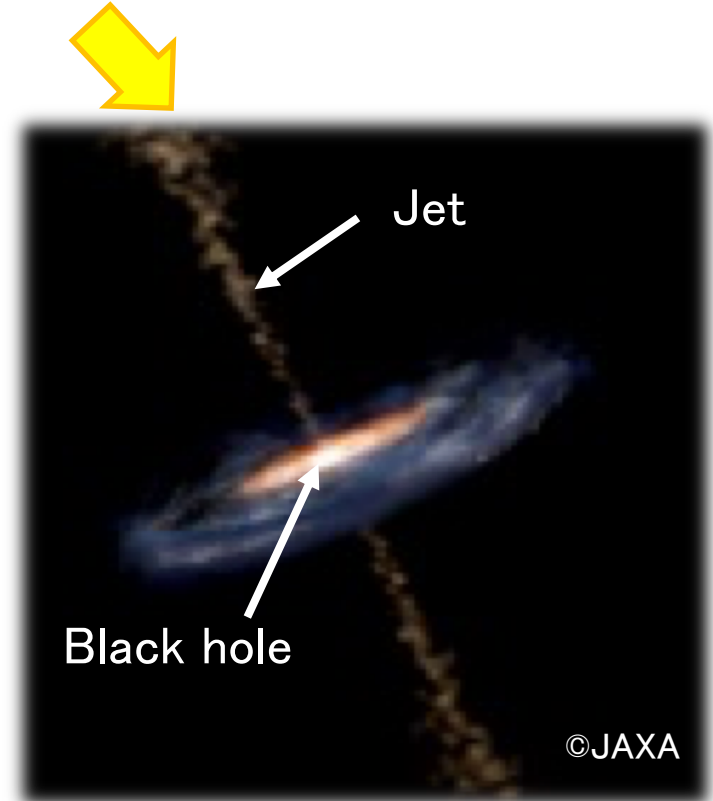
活動銀河核(AGN)の一種で、  
ジェットを真正面から見ている天体

光度も他のAGNに比べて  
高く、ジェットからの放射が  
卓越している

ジェットの発生機構や加速機構を  
探るために適した天体

多波長研究が盛んに行われており、エネルギースペクトル(Spectral Energy Distribution ; SED)をモデル化することで、磁場や電子のエネルギー分布などのジェット放射領域の物理量を調べることができる

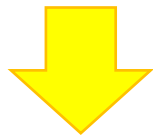
ブレイザー



# The purpose of this study

2/12

ジェットのモデルパラメータは7~9つあるが、パラメータ間の相関が強いため全ては独立で決まらない。

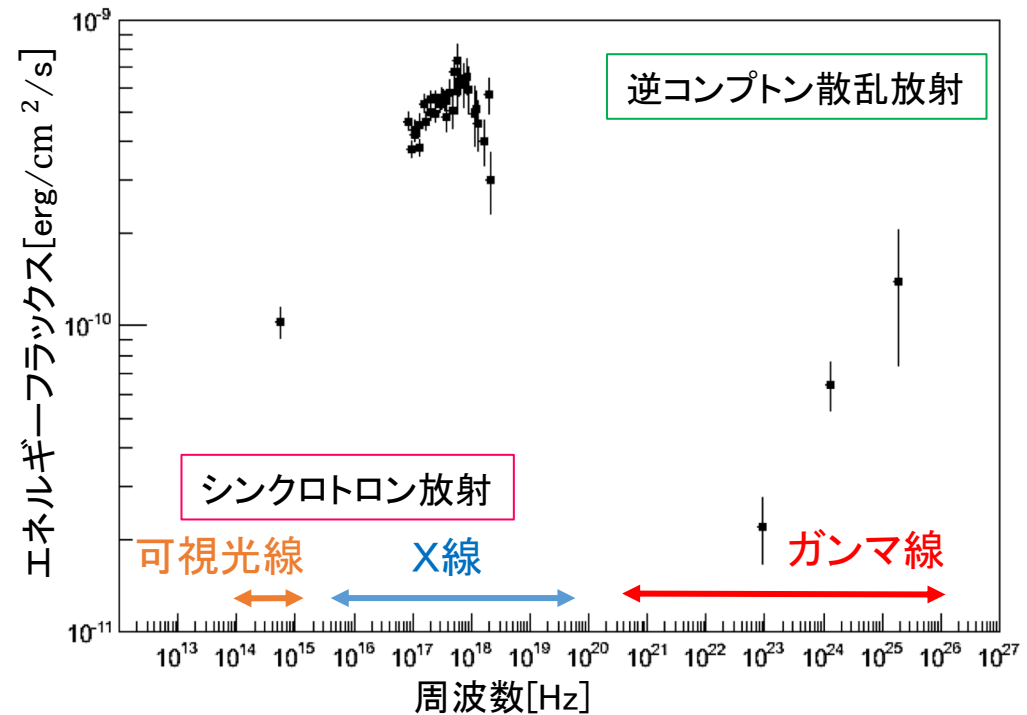


パラメータの縮退構造を調べ、どのパラメータに制約を与える必要があるか明らかにした上で、パラメータの時間変動の議論をする必要がある。



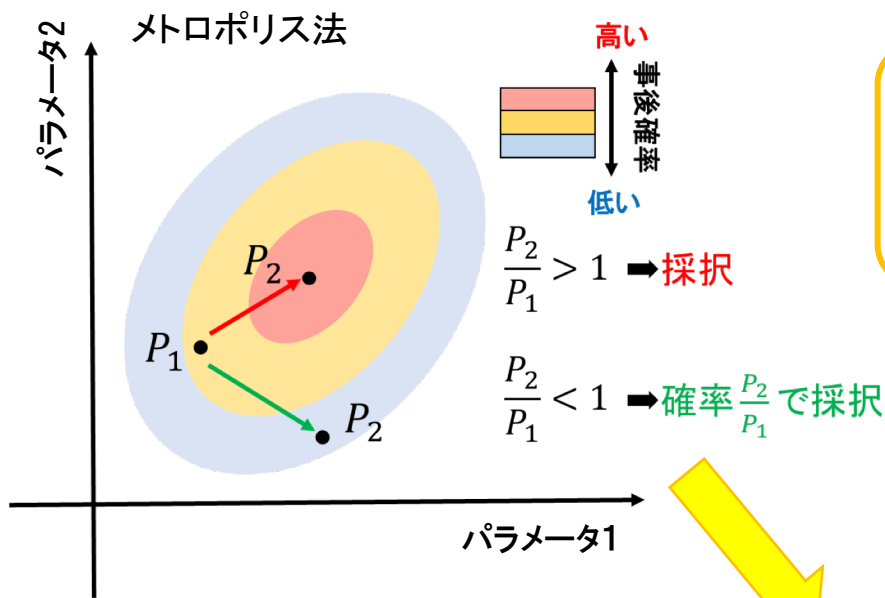
## 本研究の目的

マルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)によるジェットの物理量推定法を開発し、最適解とその不定性を推定する



Mrk 421のSED (MJD 55252)

乱数を用いてパラメータの確率分布を推定する手法 → モデルの最適化が可能



ベイズの公式

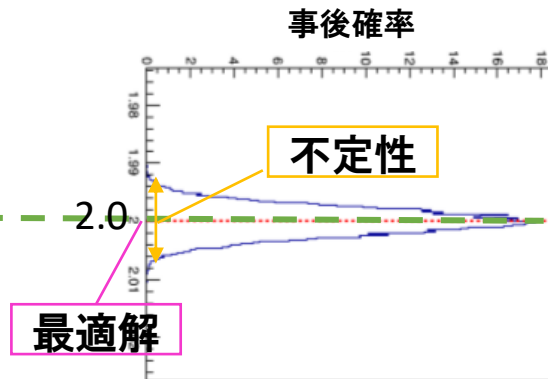
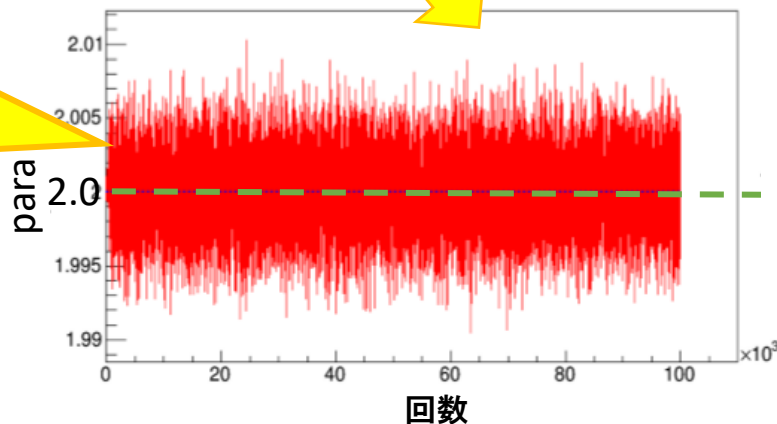
$$P(x|y) = \frac{L(y|x)p(x)}{Z} \quad Z = \sum_x L(y|x)p(x)$$

事後分布  $P \propto$  尤度関数  $L \times$  事前分布  $p$

ベイズとMCMCのメリット

- ①事前分布を置くことができる
- ②局所解と大局解のどちらも分かる

トレース図  
(ステップ数に対するパラメータの推移を表す)



## Synchrotron Self -Compton (SSC) model

シンクロトロン放射によって光子を放出している高エネルギー電子が、シンクロトロン放射光と逆コンプトン散乱を起こし、光子を高エネルギーまで叩きあげる放射モデル

シンクロトロン  
放射成分

$$f_{\epsilon}^{\text{syn}} = \frac{\sqrt{3}\delta_D^4 \epsilon' e^3 B}{4\pi h d_L^2} \int_1^{\infty} d\gamma' N_e'(\gamma') R(x)$$

逆コンプトン散乱  
放射成分

$$f_{\epsilon_s}^{\text{SSC}} = \frac{9}{16} \frac{(1+z)^2 \sigma_T \epsilon_s'^2}{\pi \delta_D^2 c^2 T_{v,\min}^2} \int_0^{\infty} d\epsilon' \frac{f_{\epsilon}^{\text{syn}}}{\epsilon'^3} \times \int_{\gamma_1'}^{\gamma_2'} d\gamma' \frac{N_e'(\gamma')}{\gamma'^2} F_C(q, \Gamma)$$

Finke et al. 2008

parameters

$z$  : 赤方偏移

$B$  : 磁場

$\delta_D$  : ドップラー因子

$T$  : タイムスケール

$K_e$  : 電子norm

$\gamma_b$  : break energy

$p_0$  : 電子スペクトル因子

$p_1$  : 電子スペクトル因子

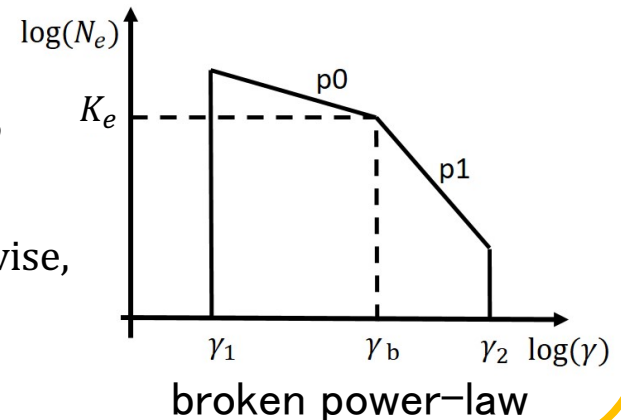
$\gamma_1$  : ローレンツ因子(最小値)

$\gamma_2$  : ローレンツ因子(最大値)

### 電子のエネルギー分布

ローレンツファクター $\gamma$ における電子密度

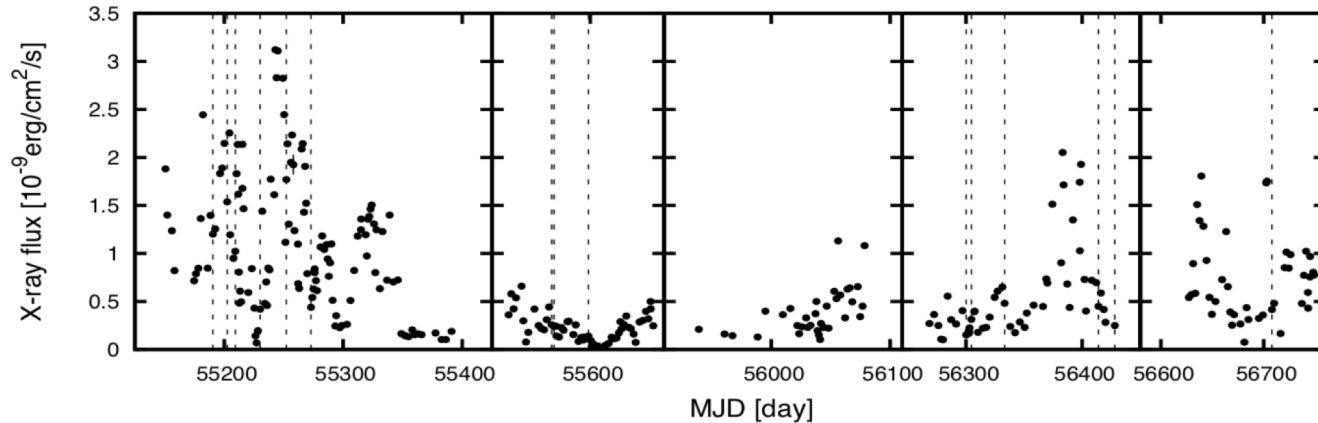
$$N_e(\gamma) = K_e \times \begin{cases} \left(\frac{\gamma}{\gamma_b}\right)^{-p_0} & \gamma < \gamma_b \\ \left(\frac{\gamma}{\gamma_b}\right)^{-p_1} & \text{otherwise,} \end{cases}$$



# Mrk 421の変動機構の研究

5/12

Mrk 421・・・可視光やX線で明るいブレーザーであり、そのSEDはSSCモデルでよく説明される

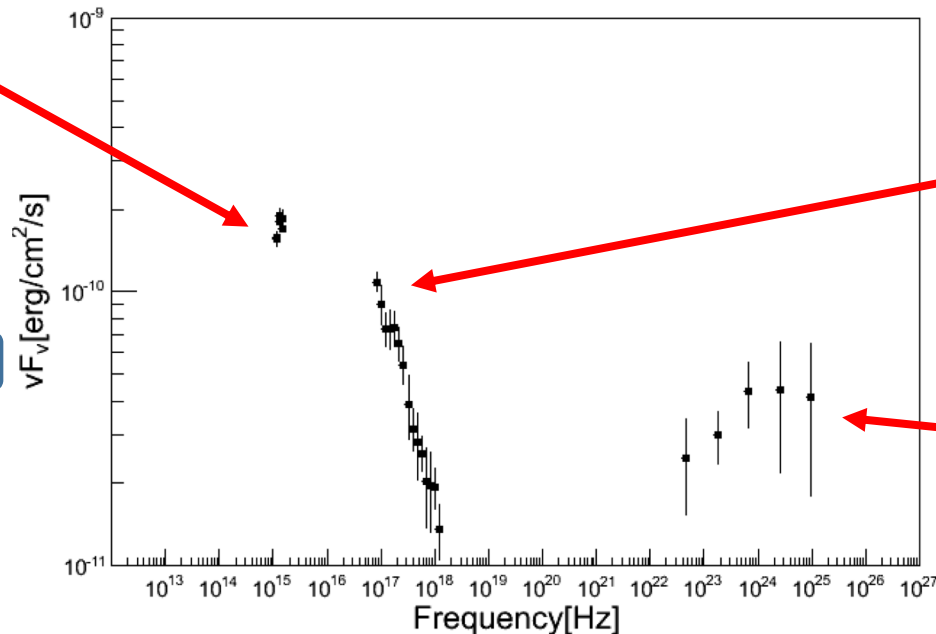


15期間分のSEDの  
モデルパラメータ  
推定を行った

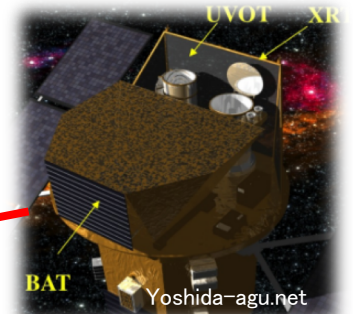


©広島大学宇宙科学センター

かなた望遠鏡



Mrk 421 (MJD 5598) SED



BAT  
Yoshida-agu.net

Swift衛星

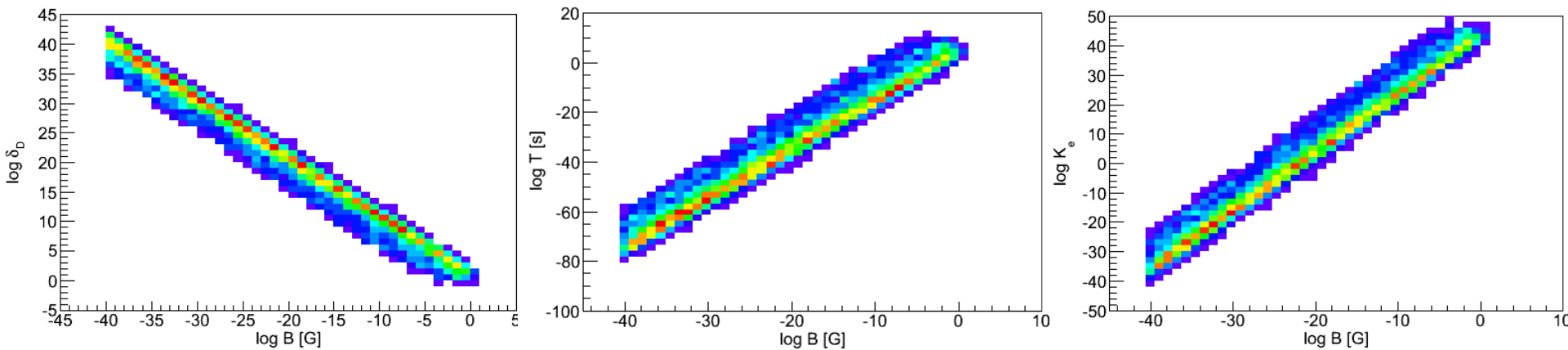


Fermi.gsfc.nasa.gov

Fermi衛星

# Mrk 421のSEDモデルパラメータ推定

6/12



4つのパラメータ( $B, \delta_D, T, K_e$ )の事後分布

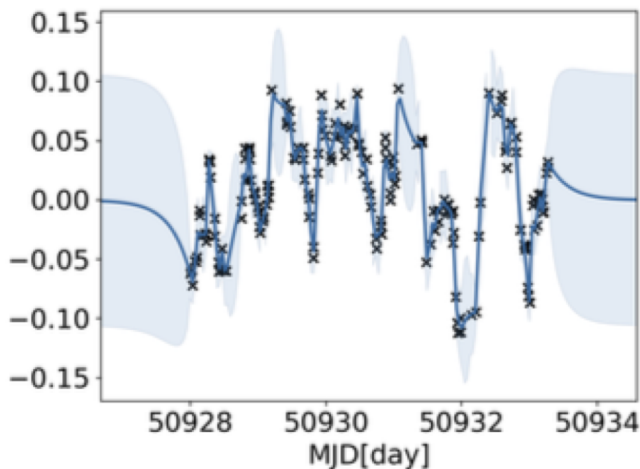
$B, \delta_D, T, K_e$ が強く相関しているため、どれか1つを制限しないと決まらない

↓  
ライトカーブから、 $T$ を見積もることができる

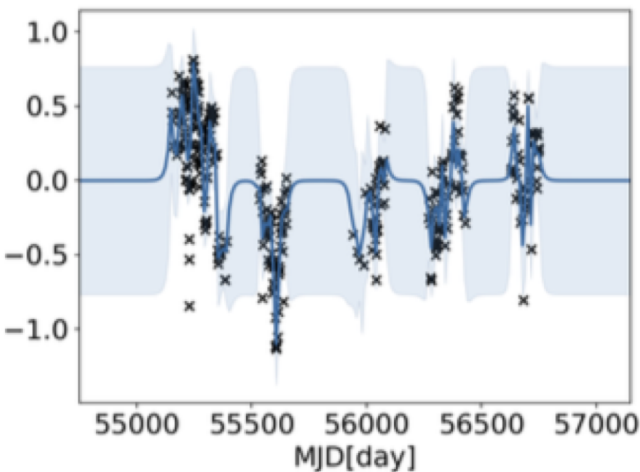
- ・AGNには2つの特徴的な時間スケールがあることが提案されている (Arevalo et al. 2006; McHardy et al. 2007; Kelly et al. 2011)
- ・Sobolewska, et al. (2014) は、ブレーザーの変動性は、 $\leq \sim 1\text{day}$ と  $\geq \sim 100\text{day}$ の2つの時間スケールを持つモデルによって表されると報告

# Mrk 421のSEDモデルパラメータ推定 7/12

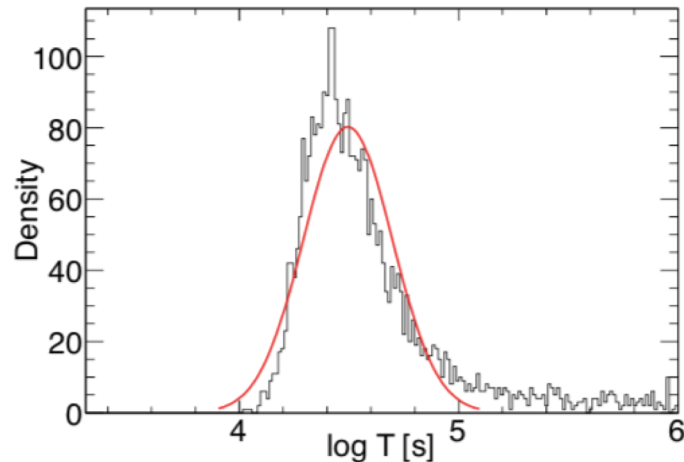
- ・OU過程を用いて、 $T$ を推定する
- ・Swift/XRTの長期間変動(dt=1day)と、あすかによる短期間変動(dt=480 s)の2つのライトカーブを使用



ライトカーブ(あすか)

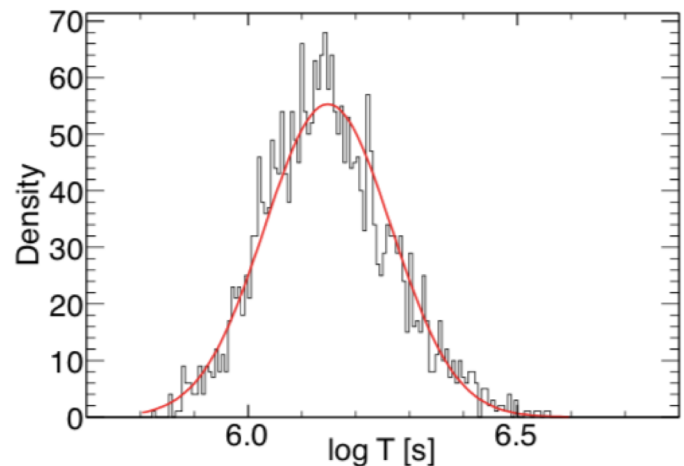


ライトカーブ(Swift/XRT)



ライトカーブ(あすか)から見積もった $T$ の事後分布

短期間変動  
0.36day  
 $\log T = 4.5 \pm 0.2$  [s]



ライトカーブ(Swift/XRT)から見積もった $T$ の事後分布

長期間変動  
15day  
 $\log T = 6.1 \pm 0.1$  [s]



# Mrk 421のSEDモデルパラメータ推定

8/12

SEDのパラメータ推定において $T$ に事前分布を仮定する

$$p(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_T^2}} \exp\left(-\frac{(\log T - \log T_{mean})^2}{2\sigma_T^2}\right)$$

短期間変動

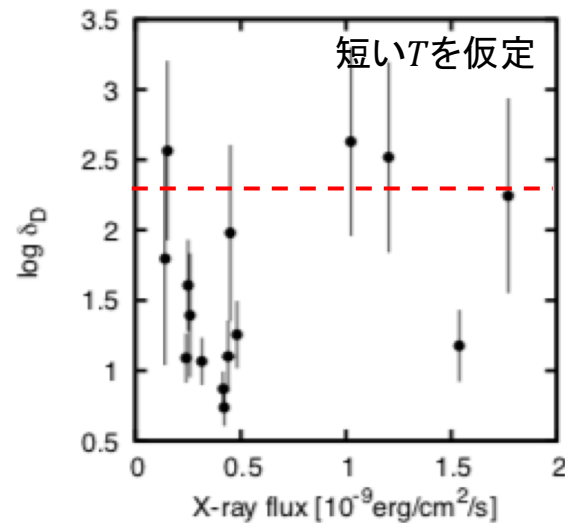
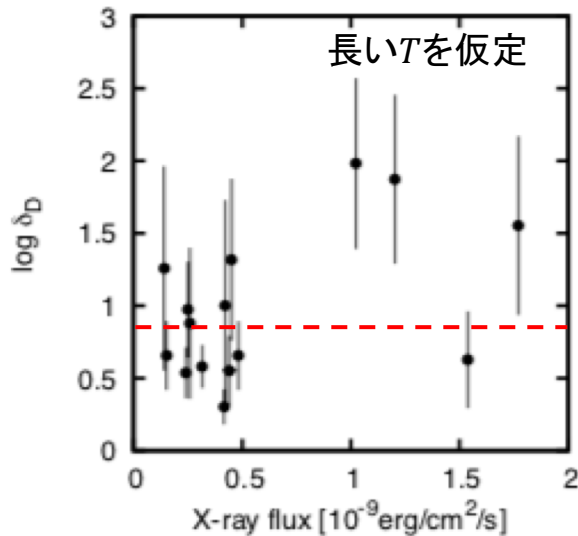
$$\log T_{mean} = 4.5$$

$$\log \sigma_T = 0.2$$

長期間変動

$$\log T_{mean} = 6.1$$

$$\log \sigma_T = 0.1$$



$\delta_D$ とX-rayの関係

X線で暗い時期に  
 $\log \delta_D \sim 0.8$

X線で明るい時期に  
 $\log \delta_D \sim 2.5$

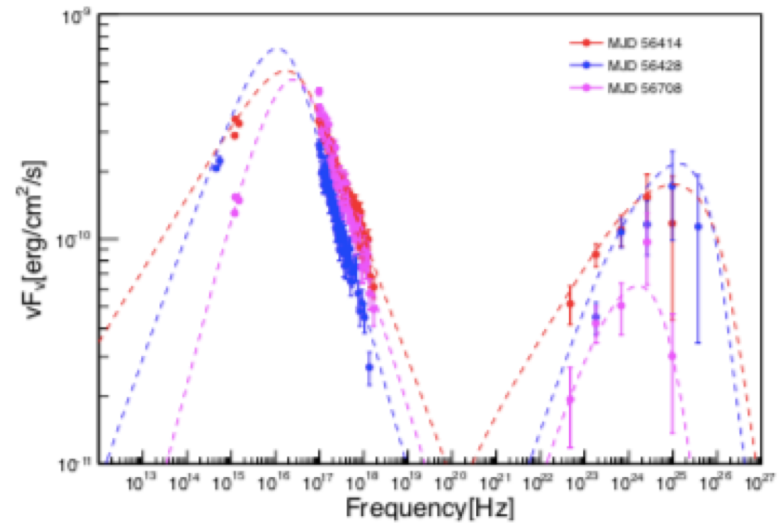
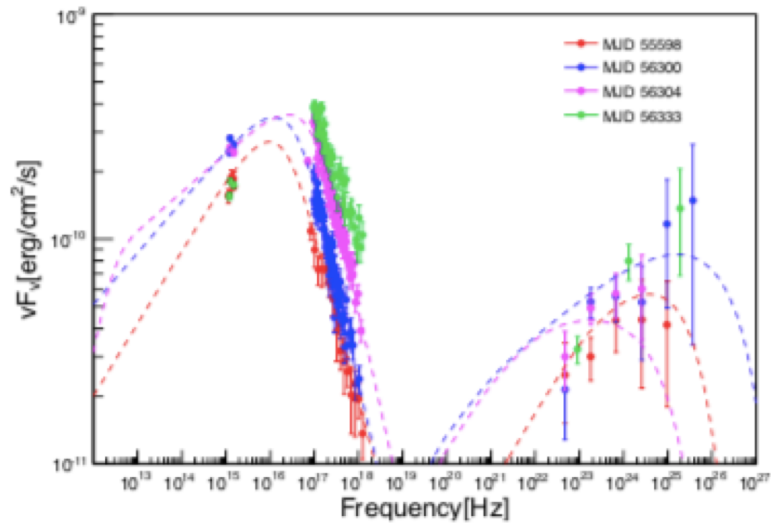
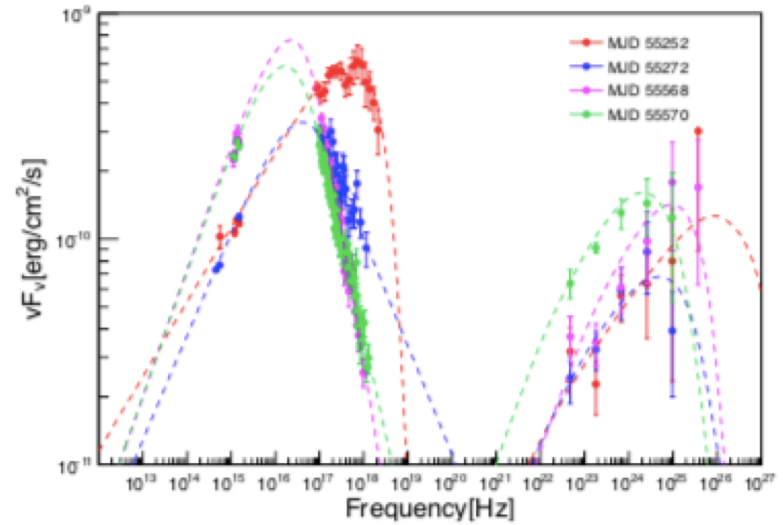
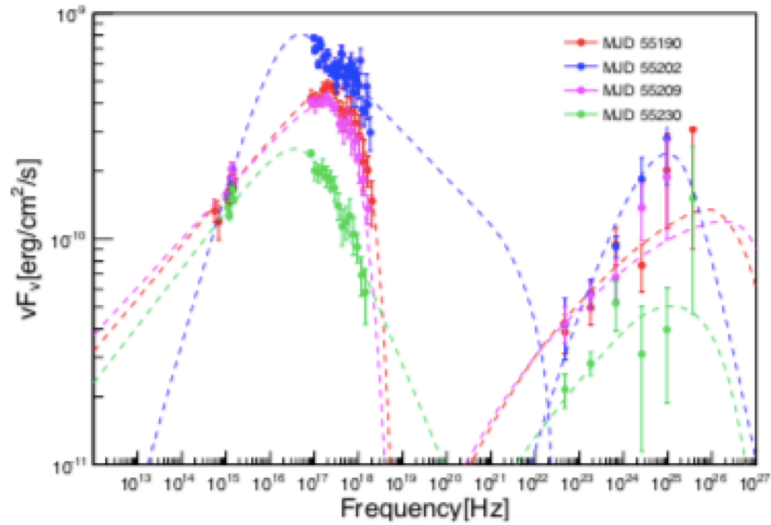
X-rayの明るさによって、 $T$ が変動していることが示唆される



本研究では先行研究  
Abdo et al. (2011)より  
 $\delta_D = 20$ に固定する

# Mrk 421のSEDモデルパラメータ推定

9/12

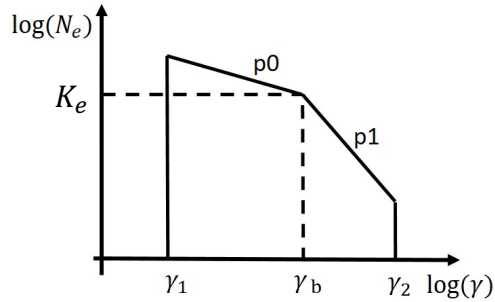


Mrk 421のエネルギースペクトルと推定したモデル

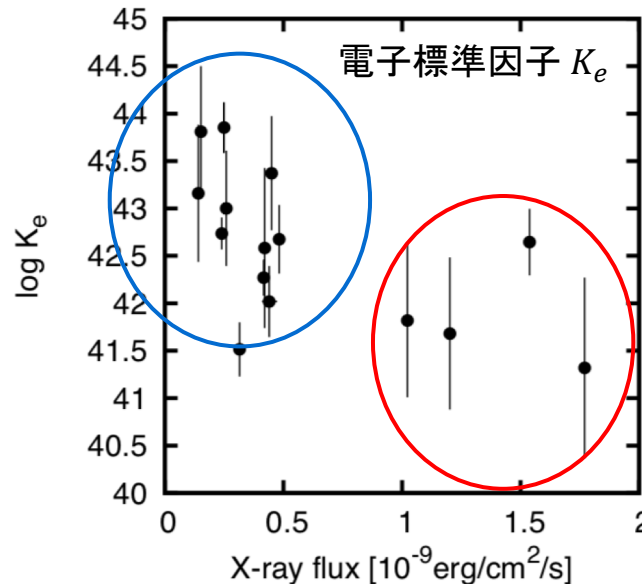
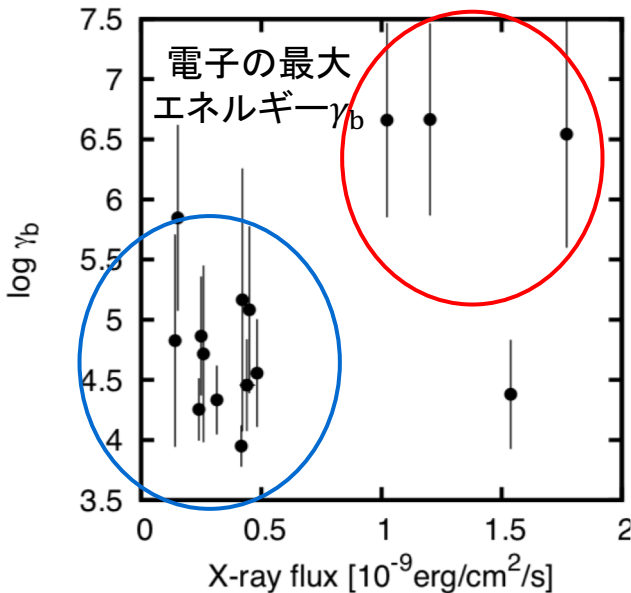
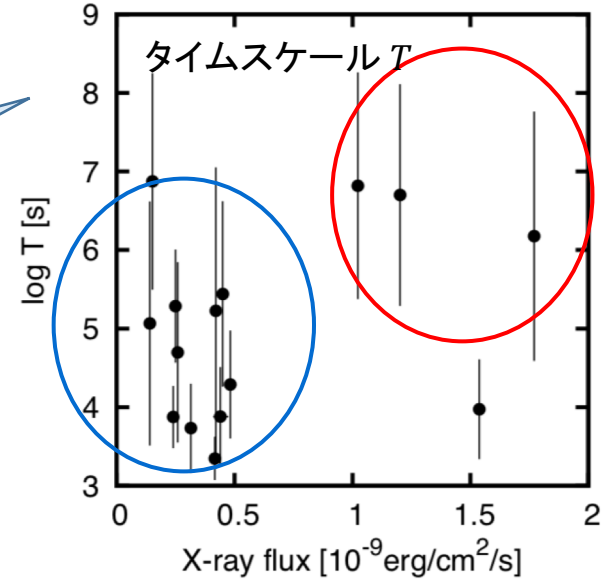
# SEDモデルパラメータの変動

6つのパラメータ ( $B, T, K_e, \gamma_b, p_0, p_1$ ) が不定性を含めて有意に変動

電子のエネルギー分布



$T$ の平均が  
 明るい時期...  $\log T [s] = 6.5$   
 暗い時期...  $\log T [s] = 4.7$   
 →OU過程で見積もった値と近い  
 →X線が明るい時  $T$  が大きくなる



X線が明るいフレアが起きた時、電子の持つエネルギーが大きくなり、数も増えることが示唆

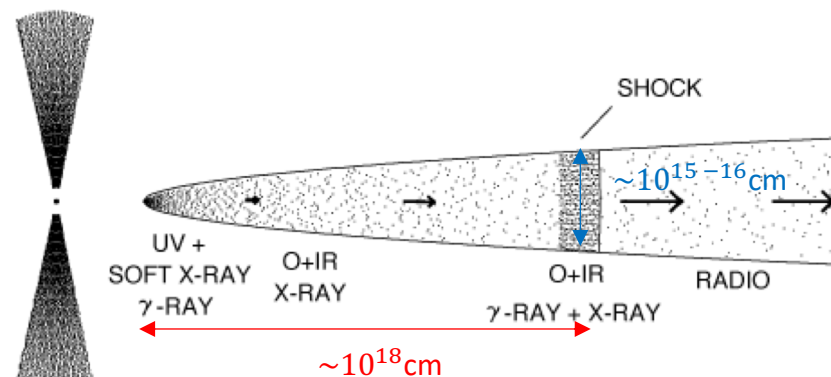
# SEDモデルパラメータの変動

11/12

タイムスケール  $T$  が大きくなると、放射領域のサイズも大きくなる

放射領域のサイズ  $R$

$$R = \frac{cT\delta_D}{1+z}$$



heasarc.gsfc.nasa.gov

Model for AGN Inner Jet

暗い時期 ...  $\log T = 4.7 \rightarrow R = 2.9 \times 10^{16}$  cm

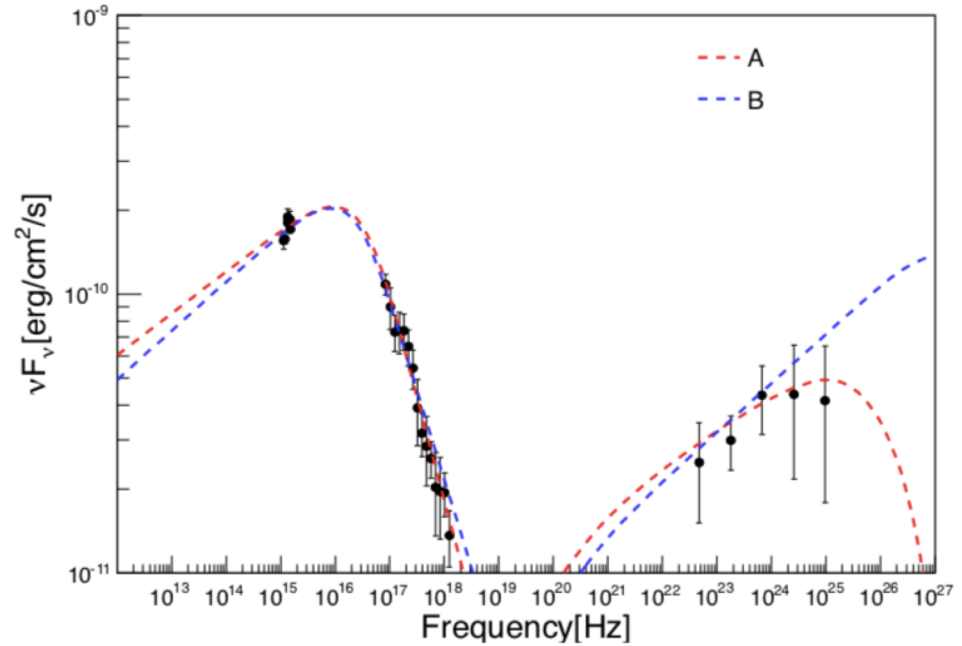
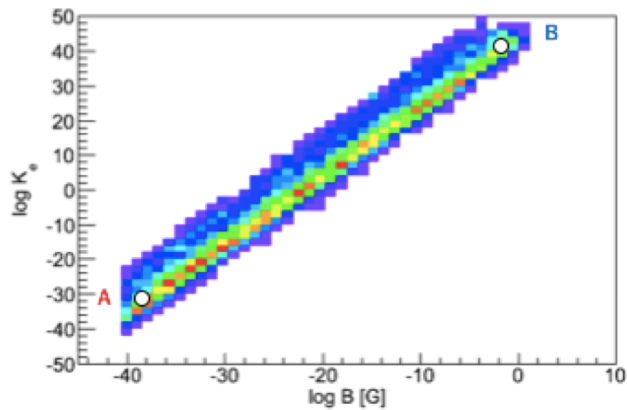
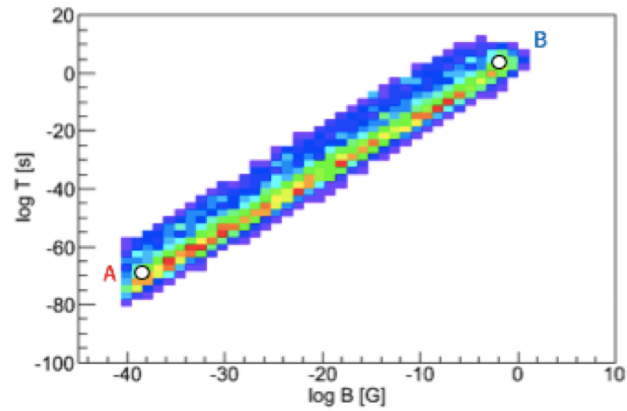
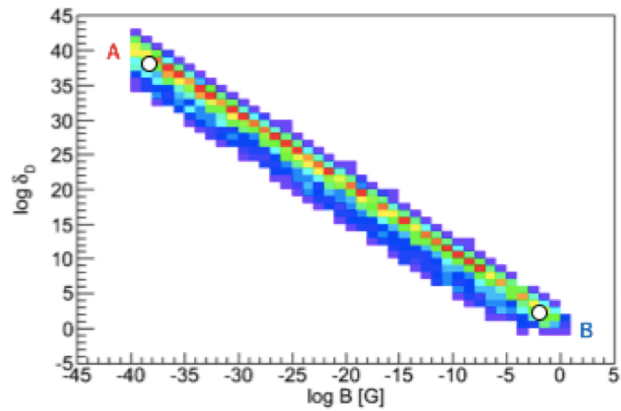
明るい時期 ...  $\log T = 6.5 \rightarrow R = 1.8 \times 10^{18}$  cm



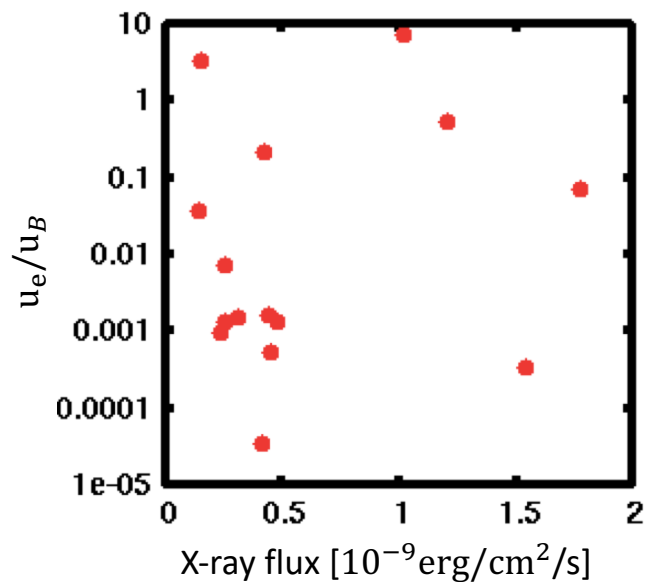
X線で明るいフレアが起きた時に、

- ・放射領域が大きくなる
- ・ $10^{18}$  cm はJet全体が光っているのか？
- one-zone SSCモデルが合っていないのか？

- MCMCを用いたジェットの放射領域の物理量を推定する方法を開発し、最適解と不定性を求めることに成功。
- $B, \delta_D, T, K_e$ のうち1つに制約を与えて、パラメータ推定を行う必要がある。
- X線で明るいフレアが起きた時に、放射領域、電子の持つエネルギーが大きくなることが示唆された。



TeVガンマ線領域周辺の逆コンプトン放射線の  
高エネルギーデータがあれば、制約がつく  
可能性あり



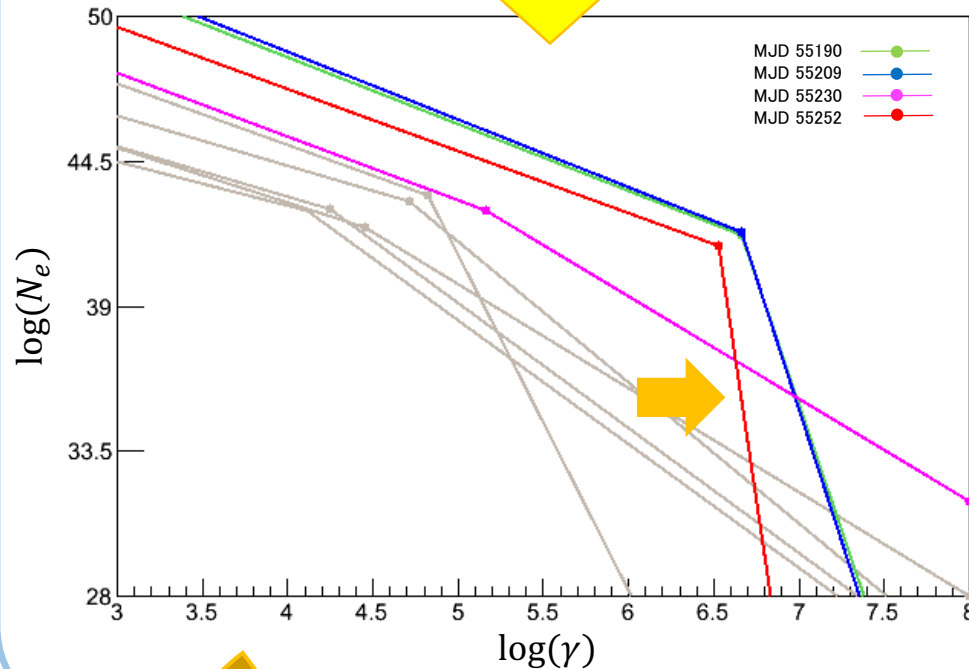
推定結果を用いて計算すると、 $u_B$ が優勢だが、その議論についてはこれから。

# SEDモデルパラメータの変動

9/12

X-ray fluxと break energy( $\gamma_b$ )が**正の相関**  
電子norm ( $K_e$ )が**負の相関**

Time scale ( $T$ )が**正の相関**



放射領域のサイズ  $R$

$$R = \frac{cT\delta_D^4}{1+z}$$

タイムスケール  $T$  が大きくなると、  
放射領域のサイズも大きくなる

各時期の電子のエネルギー分布

X線で明るいフレアが起きた時に、

- ・放射領域が大きくなる
- ・電子の持つエネルギーが大きくなり、数も増える