



Multi-Frequency Study of the Jet Activity in Blazars

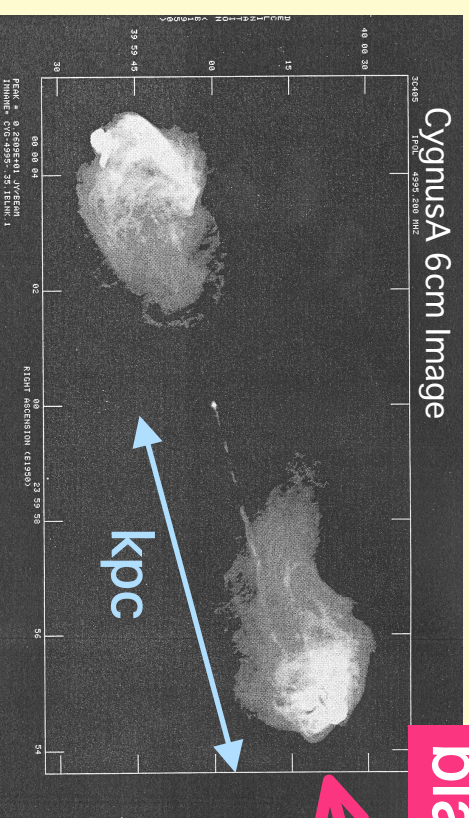
Chiharu Tanihata

Department of Physics,
University of Tokyo

Motivation

宇宙ジェット
相対論的速度 ($\gamma \sim 10^6$)までの粒子加速の現場

- 最終目的
 - ジェット生成機構
 - 加速機構
- 観測天体
 - ジェットを持つ活動銀河中心核 (AGN)
 - 特にブレイザー:ピーミング効果により加速粒子からの放射が卓越



blazar



Perley 1984

内容

レーザーの時間変動を道具として、ジェット内部をさぐる

時間変動の観測 ・ 定量化

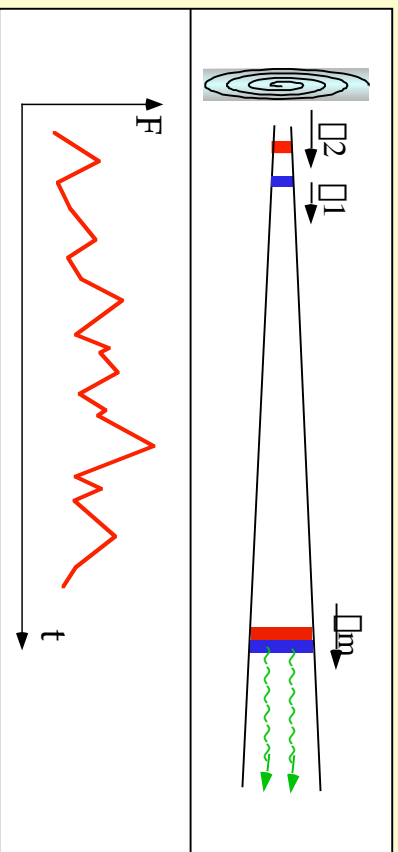
- ASCA衛星を用いたX線長期連続観測

時間変動の解析

- 時間変動は“フレア”の重ね合わせ
- フレアの立ち上がり、立ち下がり時間はジオメトリに支配される

時間変動の再現

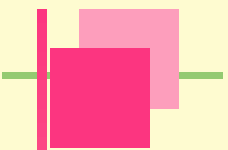
- 内部衝撃波を考慮



結論

- レーザーの時間変動のメカニズム中心から高速に近い速度で吹き出すジェットが
 - 間欠的
 - わずかな初期速度のゆらぎ
- それから導かれる中心領域の物理量

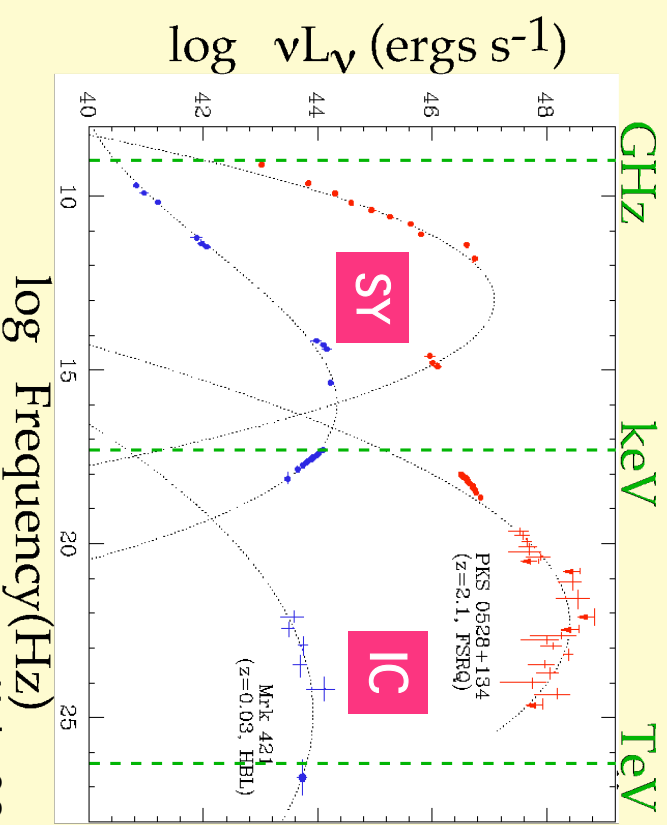
レーザーの観測 (導入1)



放射機構

- >100MeVの γ 線検出 CGRO EGRET (1991-2000) ~60天体
- 電波~X, γ 線による多波長観測
 - 低エネルギー
 - シンクロトロン放射 (SY)
 - ピーク位置
 - 最高エネルギーに加速された電子の指標
 - 高エネルギー
 - 逆コンプトン散乱(IC)

Hartman 1999 ApJS 123, 89



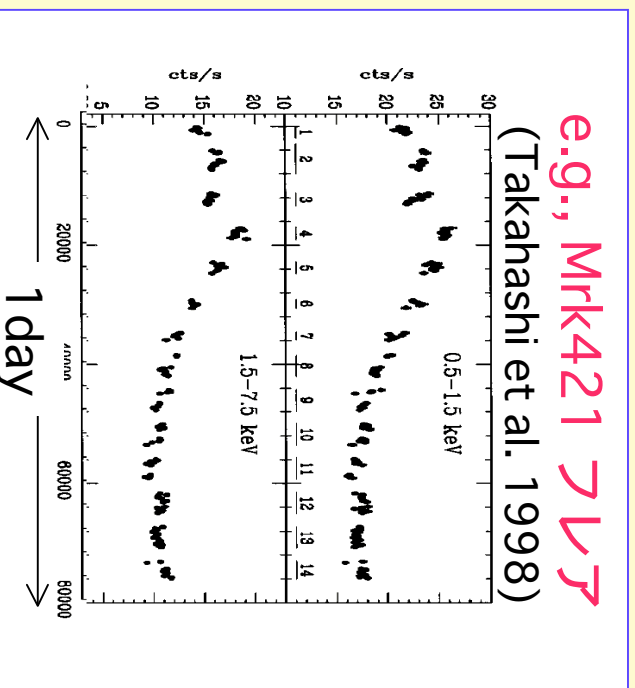
Kubo98
phd thesis

- TeVレーザー
 - X, TeV: 最も高エネルギーの電子からの放射
- 本研究の対象

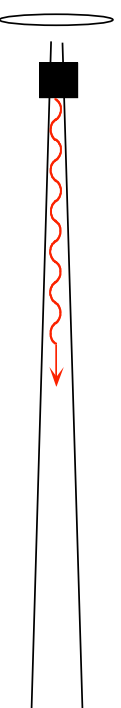
ブレイザーの時間変動の観測(導入2)

- 一日以下のタイムスケールの変動
⇒放射領域の大きさの制限($R < \sqrt{c \Delta t}$)
- optical, X-ray と γ -ray (Sy と IC) の光度に相関
⇒同じ領域から放射

ASCA衛星が大きな貢献



- 理論モデルの研究 (e.g. Kirk 1997, Kusunose 2000, Kataoka 2000)
- 殆どが定常(平衡)状態を仮定
 - 時間発展を含めたものも、単一の領域からの継続的放射を仮定



グライダーの時間変動 (導入3)

- TeVグライダー

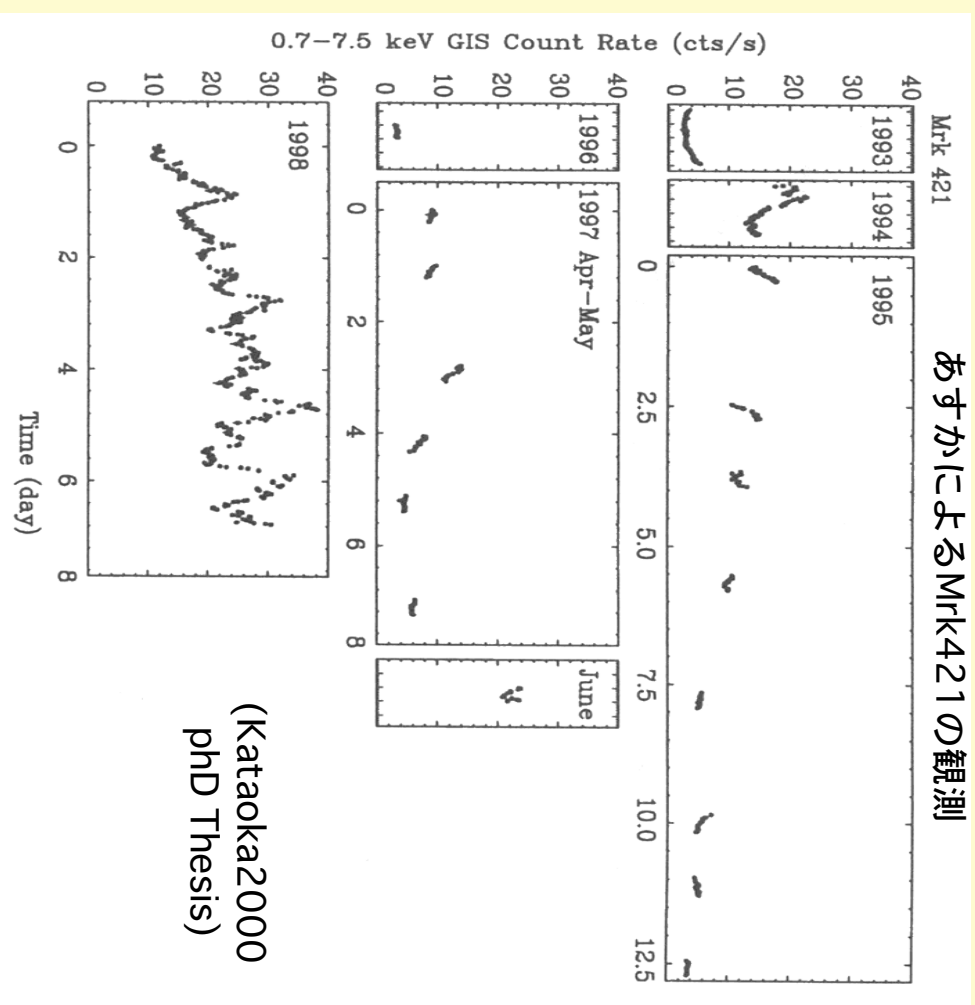
- Mrk421の観測

- 1998: 300ks

(Takahashi et al. 2000)

観測の定量的な理解はまだ
されていない

- Mrk501
- PKS2155-304



毎日フレアがおきるような
特徴的なライトカーブ
→ 説明するモデルなし



内容

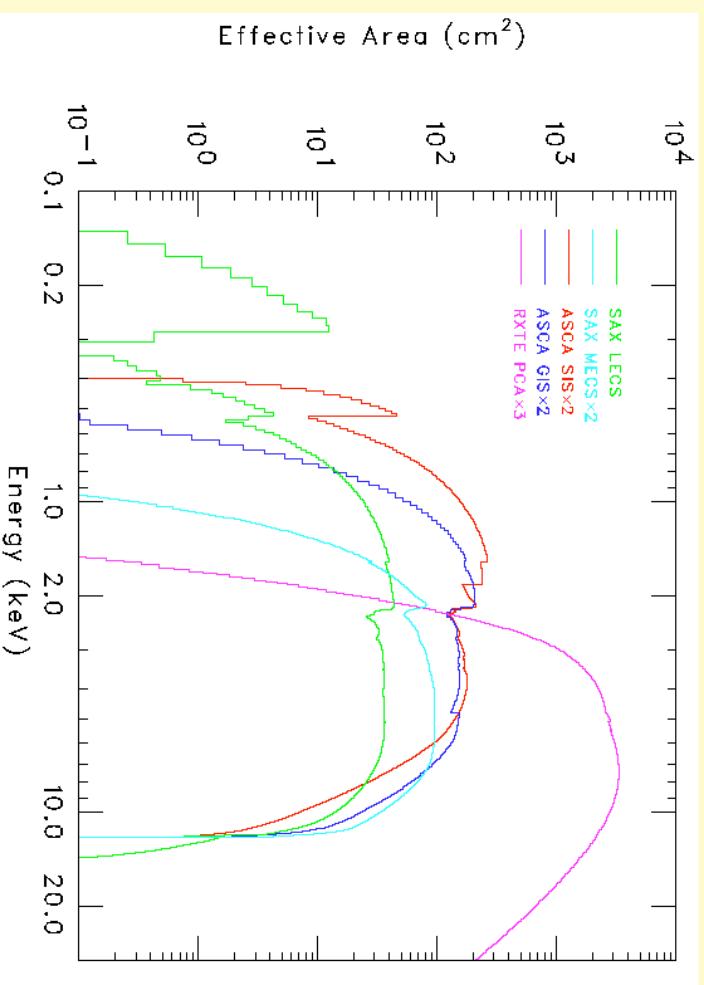
- 観測
 - ライトカーブ
 - ASCAによるTeVブレイザーの長期連続観測 (7-10 days)
 - スペクトルの時間変動
 - Mrk421
 - (Mrk501)
 - (多波長スペクトル ; X線とTeV線の相関)
 - (TeVブレイザー候補天体の観測)
 - 時間変動についての議論
 - フレアの立ち上がり、立ち下がりを決める物理量
 - 観測されている特徴的なライトカーブ、及びスペクトルを生み出すメカニズム
 - (データとジェットに関する示唆)
- まとめ

X線観測機器

- ASCA (1993-)
 - SIS (Solid-state Imaging Spectrometer)
 - GIS (Gas Imaging Spectrometer)

- RXTE (1995-)
 - PCA (Proportional Counter Array)

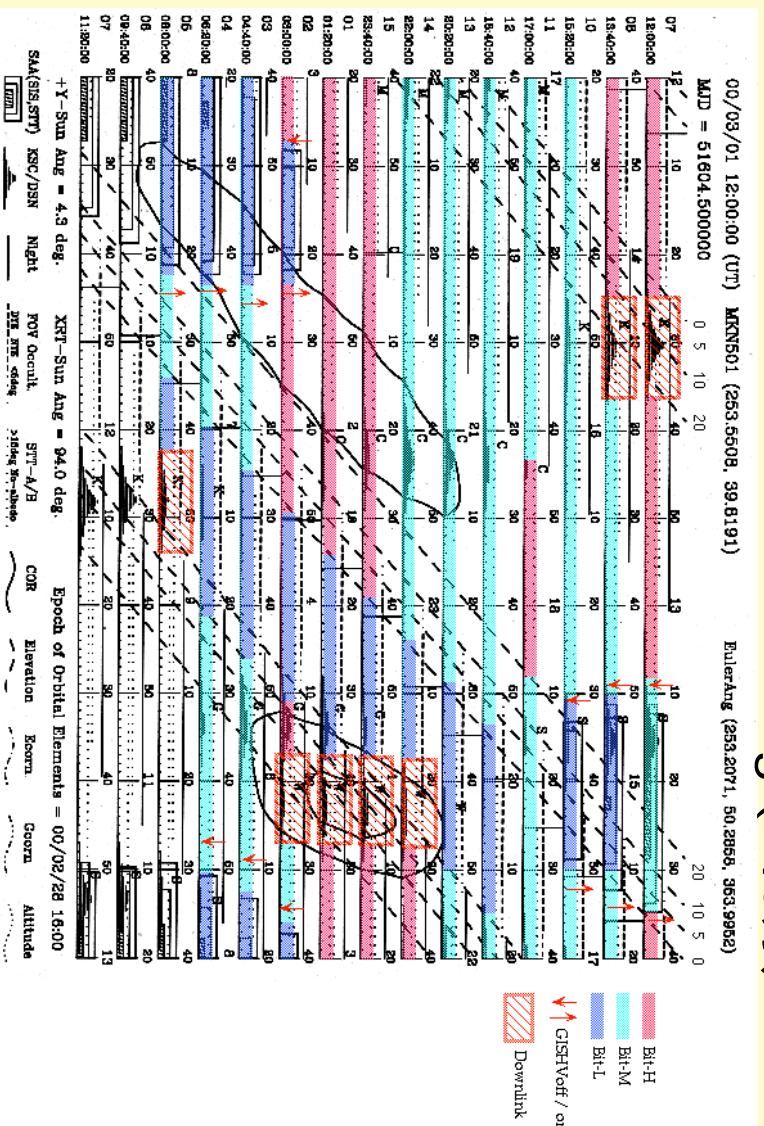
- SAX (1996-)
 - LECS (Low Energy Concentrator Spectrometer)
 - MECS (Medium ")



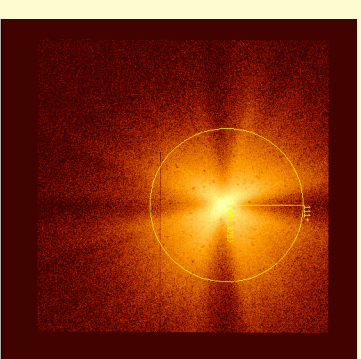
ASCA衛星を用いた長期観測

- 1998/4 : Mrk421 ($z=0.031$) 300ks (7 day)
- 2000/3 : Mrk501 ($z=0.034$) 400ks (10day)
- 2000/5 : PKS2155-304 ($z=0.117$) 400ks (10day)

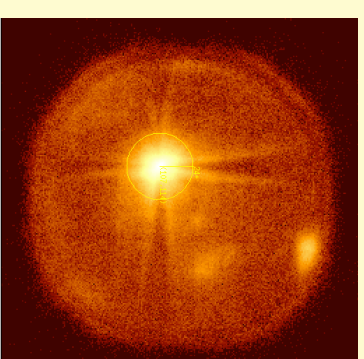
Mrk501 Observation Planning (1日分)



Mrk501 image



SISO



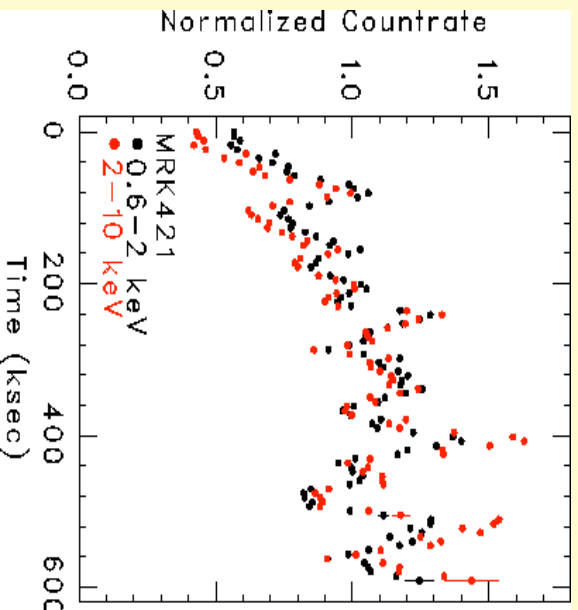
GIS2

Background < 2%

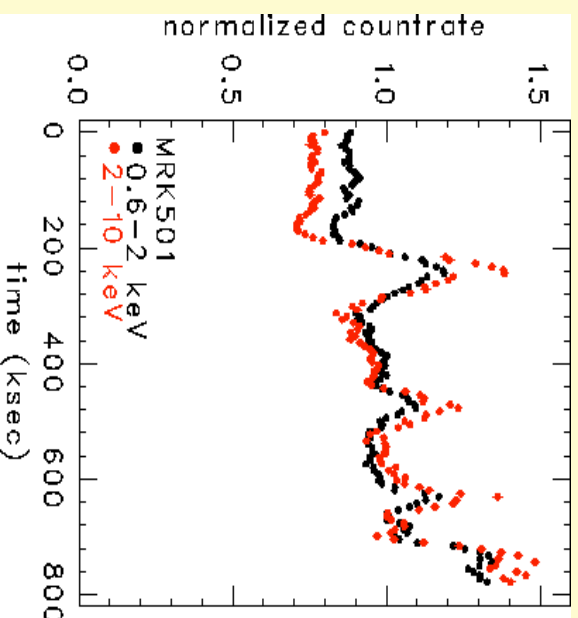
X線ライトカーブ

Tanihata et al. 2001
ApJ 563, 569

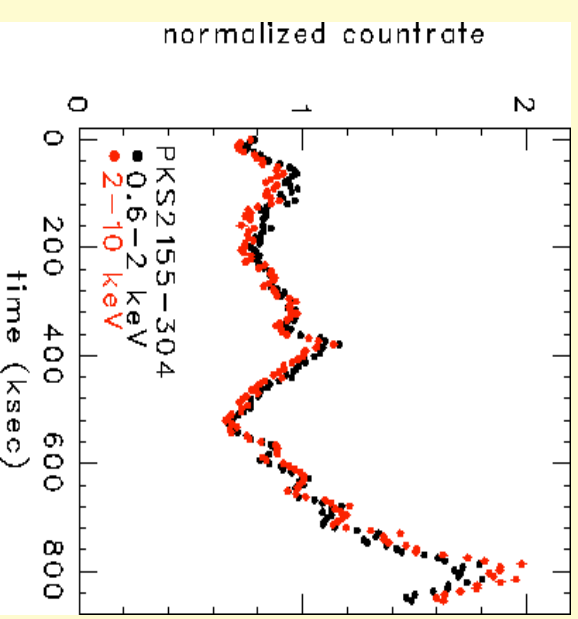
Mrk421 (Apr98)



Mrk501 (Mar2000)

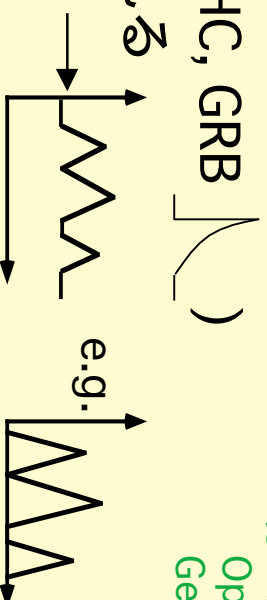


PKS2155-304 (May00)



TeVブレイザーに共通の性質を初めて実際に示すことに成功

- フレアは日々連続的におきる
- フレアの立ち上がり、下がりが対称的 (c.f. solar flares, BHC, GRB)
- ペデスタルがみられる



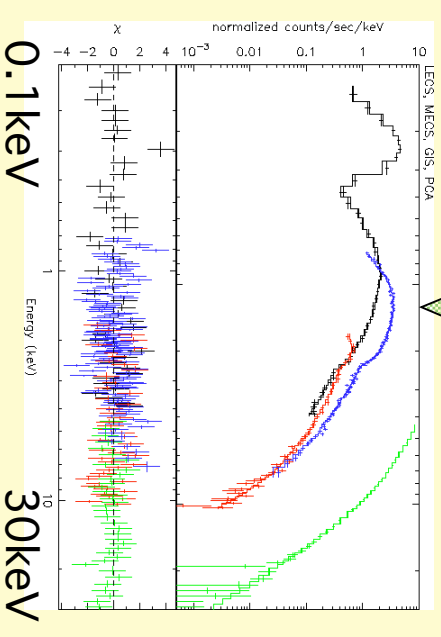
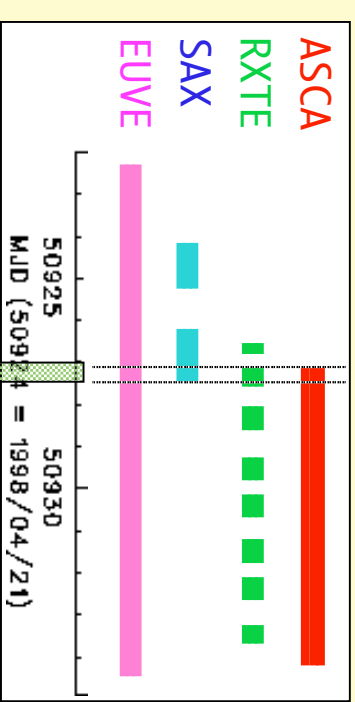
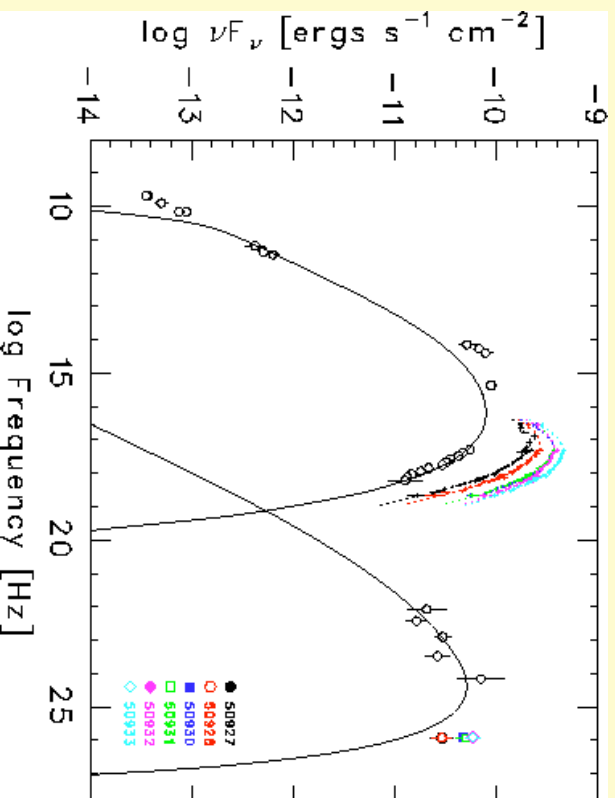
※今のところ高エネルギー電子からの放射の
これほど連続なライトカーブが観測できるの
はX線だけ。

Optical, TeV γ ray: 夜だけ。天候による
GeV γ ray: 統計が足りない

X線スペクトル

Mrk421 (Multi-frequency campaign)

- 0.1-30keVに渡る過去にない高精度なスペクトルの決定
- シンクロトロンピーク位置の決定 (短い積分時間で)



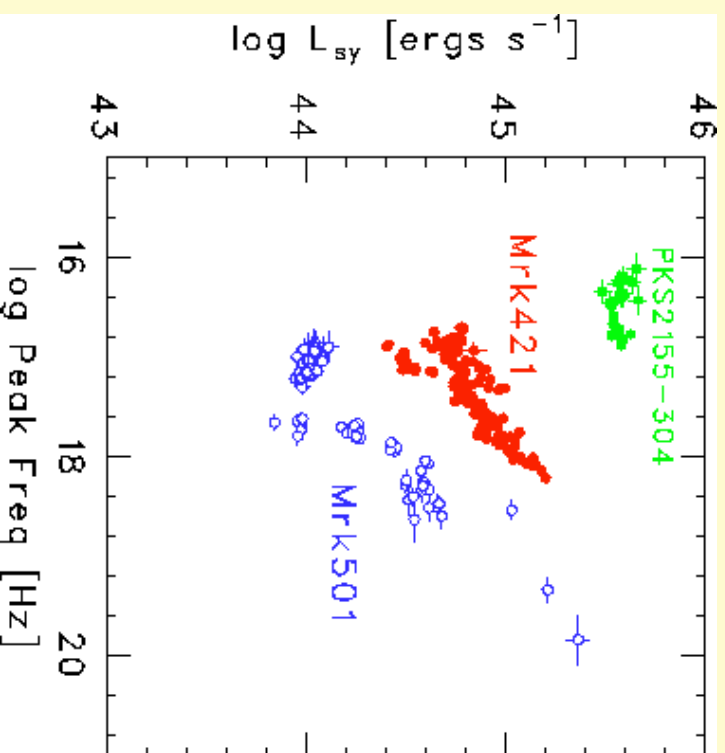
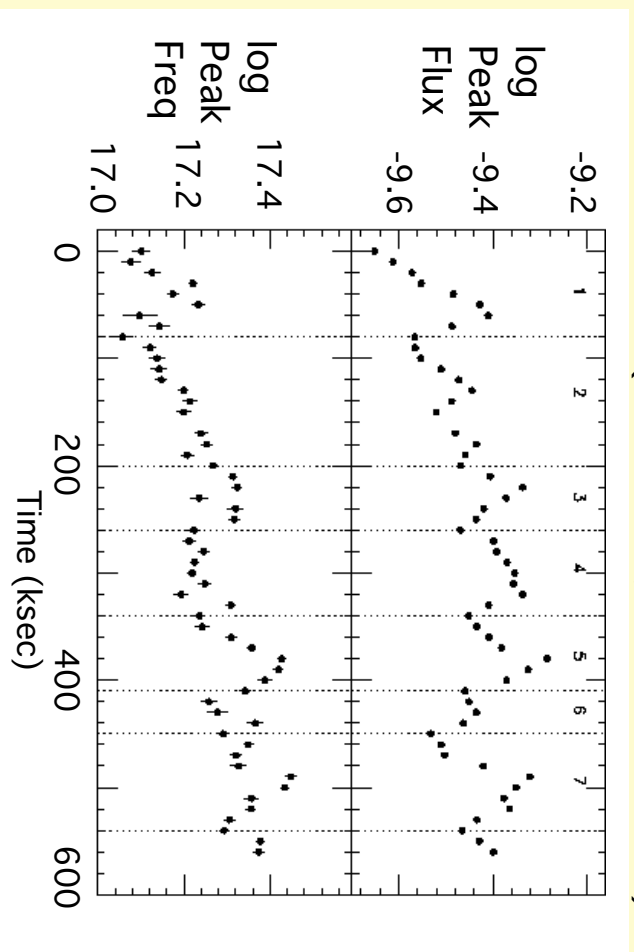
二次関数であう

$$F(E) = a(E - E_p)^2 + F_p$$

(電子分布を反映)

ピーク光度とピークエネルギーの関係

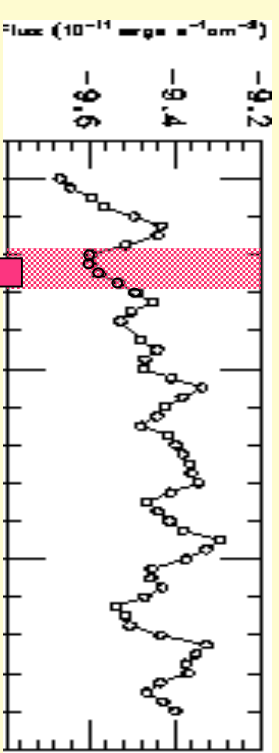
ピークの変動 (Mrk421 ; ASCA+EUVE)



- 全体の傾向 (特にMrk421, Mrk501)
光度大 \leftrightarrow ピークエネルギー高
(ただし、フレアごとにはばらつきがある)
- 明るい天体 (L_{sy} 大) ほどピークエネルギーが低い

フレア時のスペクトル変化

Mrk421



高エネルギー側から増光するフレアを観測

(Mrk501でも顕著)

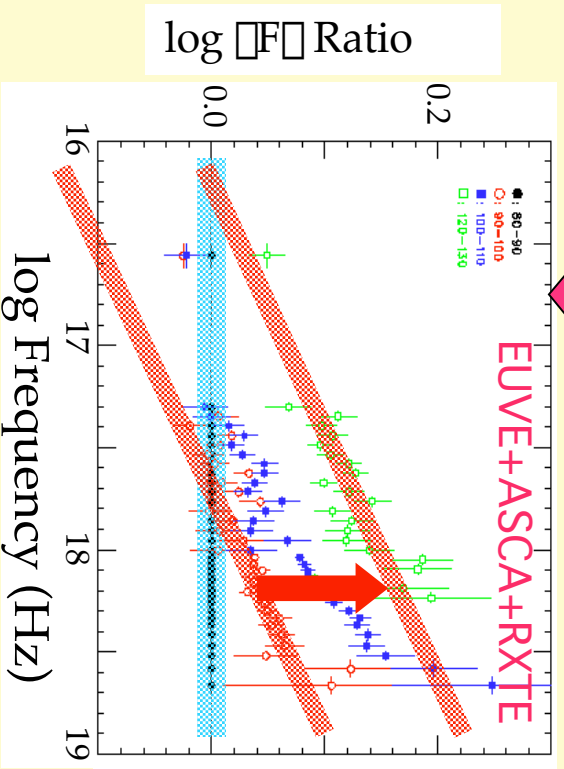
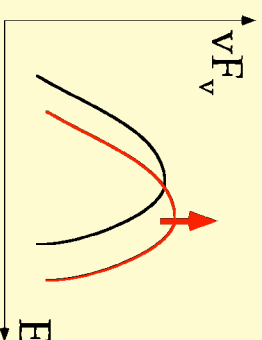
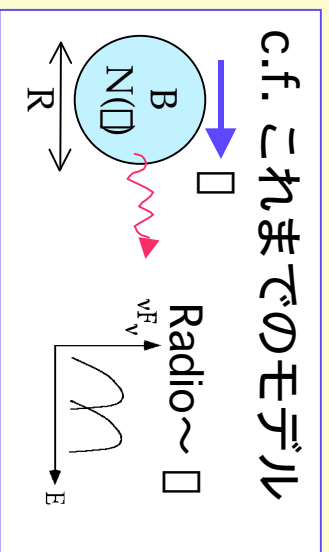
矛盾

- 加速 ⇒ 低エネルギー側から増光
- 冷却 ⇒ 高エネルギー側から減光

一つの電子分布では説明できない。

フレア = 新しいハードな (i.e.ピークエネルギーの高い) 成分の出現・消滅

c.f. これまでのモデル



特徴的なタイムスケール

Kataoka et al. 2001
ApJ, 560, 659
Tanihata et al. 2001
ApJ 563, 569

時間変動の定量化

Structure Function

(e.g. Simonetti et al.
1985, ApJ, 296, 46)

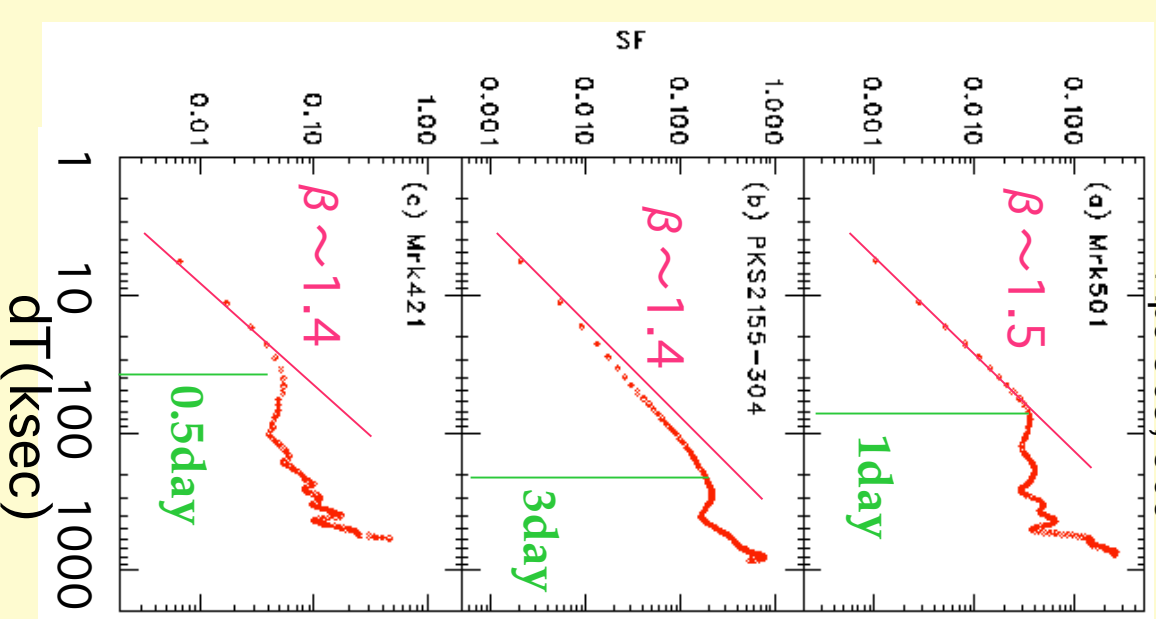
$$SF_f^1(k) = \frac{1}{N^1(k)} \sum [f(i+k) - f(i)]^2$$

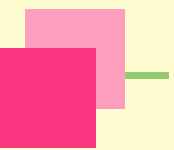
Slope (power-law index β)

- $\beta \sim 0$ for white noise
- $\beta \sim 1$ for red noise (2 in PSD)

- ~ 1 dayでの折れ曲がりの存在
→ 特徴的なタイムスケール T_{chr}
- T_{chr} 以下の急なべき
→ 早い時間変動の抑制

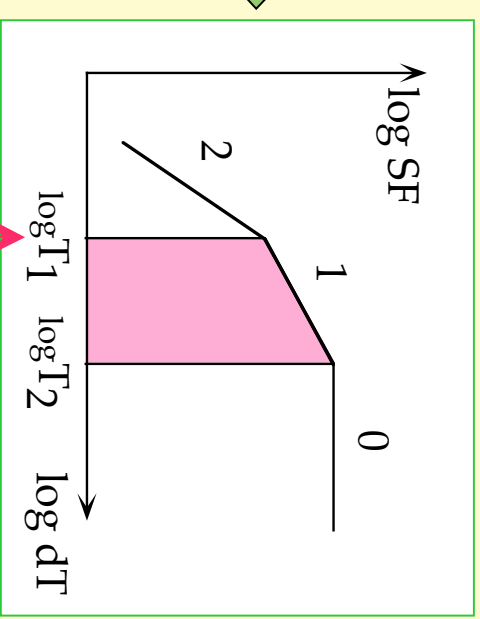
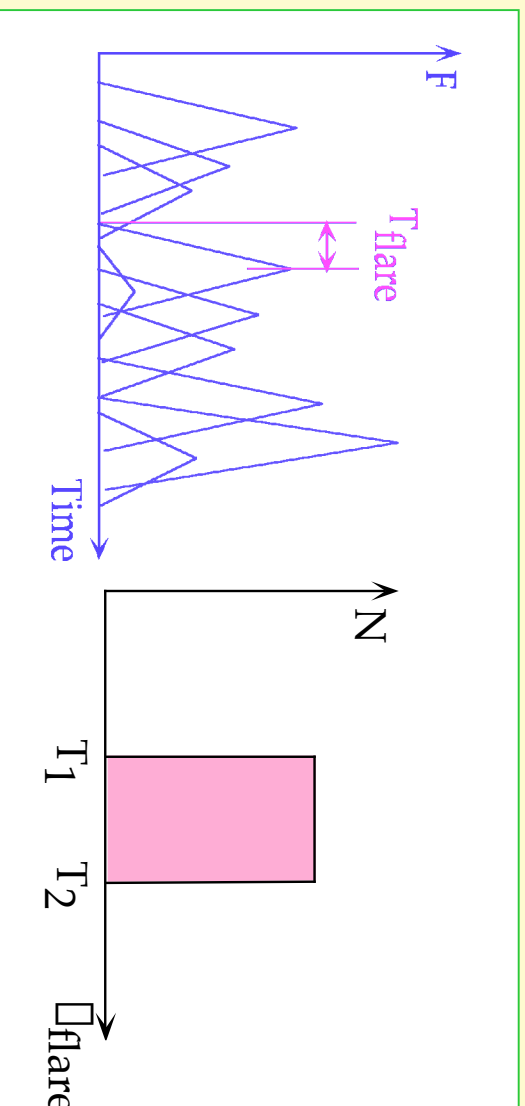
長期連続観測により初めて実証





Structure Functionの T_{chr} とべきの意味

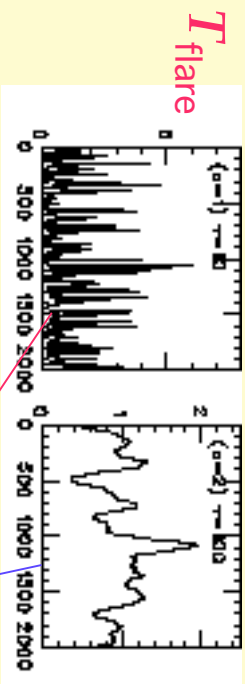
- パラメータ T_{flare} , R , T_{rise} , T_{decay} , T_{flare} の範囲、の依存性をシミュレート
 - フレアはポアソン分布にしたがってランダムに発生する (平均レート R)
 - ライトカーブ=フレアの重ね合わせ



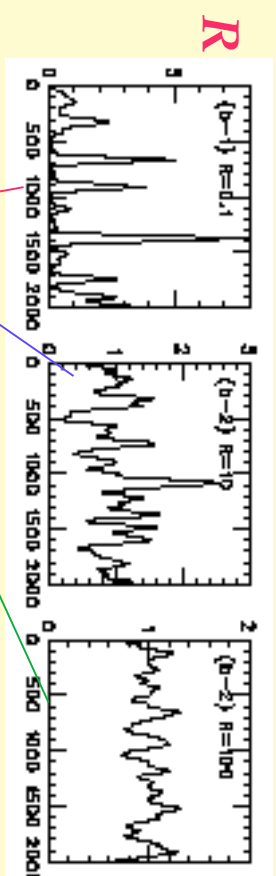
「個々のフレアの時定数 $\rightarrow T_{chr}$ 」
が一般的に成り立つ事を示した

T_{chr}
最小の T_{flare} を反映。

実際のシミュレーション

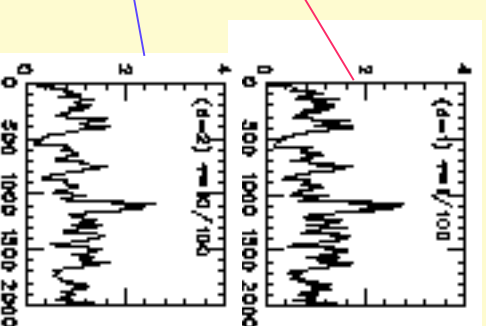
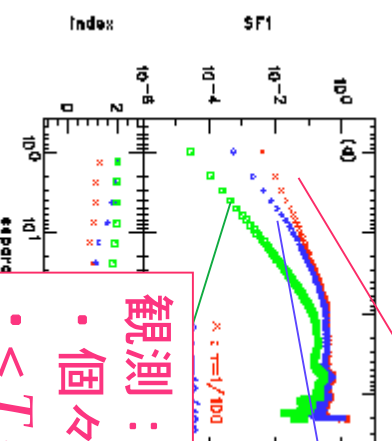
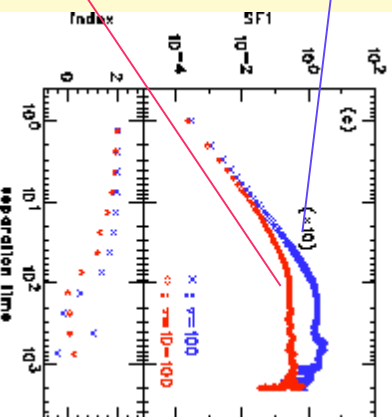
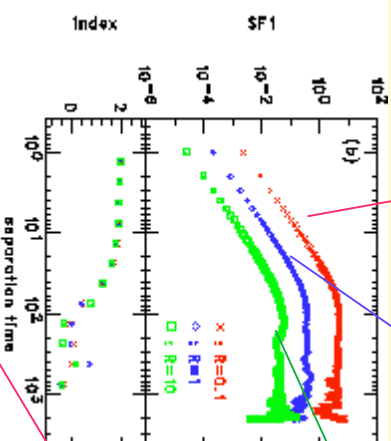
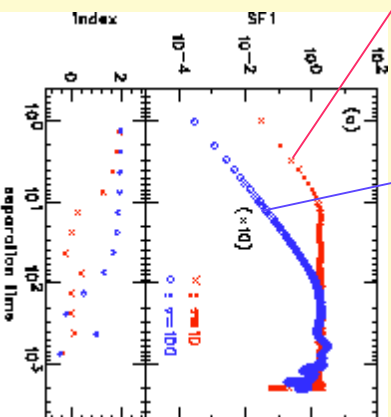
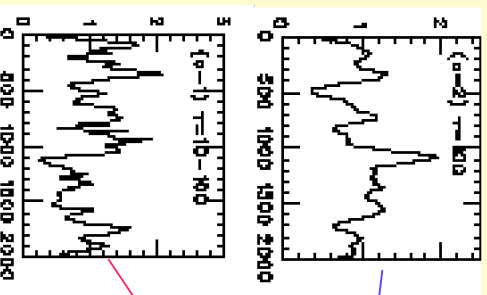


T_{flare}



R

T_{flare}
with a range



T_{rise}
 T_{decay}

- 観測： T_{chr}
- 個々のフラアの T_{flare}
 - $< T_{\text{chr}}$ の変動が少ない

T_{chr} をきめる変動時間

- 考えられる変動のタイムスケール
 - 加速 (T_{acc})
 - 冷却 (T_{cool})
 - 領域への入射 (T_{inj})
 - 領域の通過 (T_{crs})

} T_{dyn}

- T_{chr} の存在
- T_{chr} 以下の時間変動の抑制
- フレアの対称性
- $T_{cool}, T_{acc} \ll T_{chr}$ (§ 6.2.1)

	T_{chr}	T_{cool}
Mrk421	40 ks	5ks
Mrk501	80 ks	6ks
PKS2155	200 ks	3ks



TeVレーザーでは

T_{chr} はジオメトリに支配された変動時間 (T_{dyn}) を反映

時間変動パターンの議論

観測結果

- 1 $T_{\text{cycle}} \sim T_{\text{flare}}$
- 2 Structure Function (T_{chr})
- 3 ペデスタルがある
- 4 フレア成分はピークエネルギーが高い

シエルの衝突という観点から時間変動を生み出すメカニズムを初めて説明する

- 内部衝撃波
- 間欠的な流れ (シエル)
- 初期速度の違うシエルが衝突 → 衝撃波

Rees 1978 MNRAS

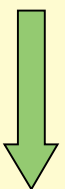
Spada et al. 2001 MNRAS

Sikora et al. 2001 ApJ

詳細な計算

実際に観測とあわせたものはない

(そもそもくらべる観測がなかった)



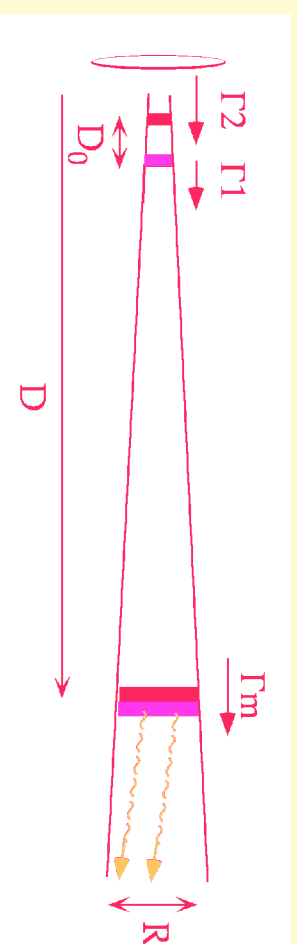
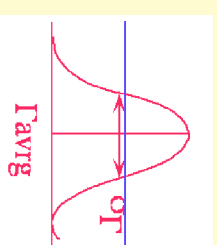
観測と比較をすることを主目的とし、
 T_{ev} プレーザーに特定した簡単化した
モデルをつくり、
観測を再現できるかをしらべる。
またそれから導かれる物理量を示す

モデル

- ジェット内でのシエルの衝突をシミュレーション
 - シエルのローレンツ因子(γ)にゆらぎをつけて中心から放射
 - ある平均レート($\sim D_0/c$) でポアソン分布に従ってランダム発生
 - $D_2 > D_1$ の時、距離 D で衝突し→フレア
 - フレアの重ね合わせ→ライトカーブ

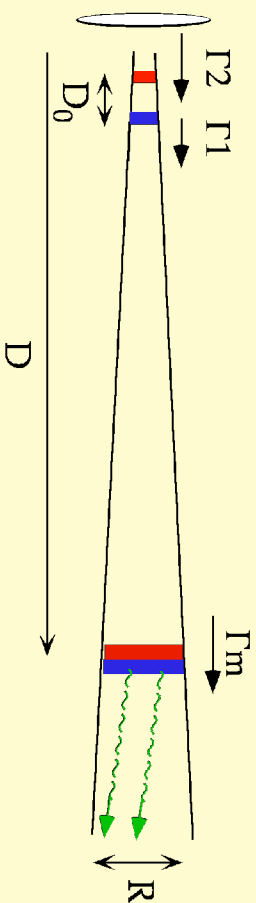
- 仮定

- 初期速度の広がり：ガウス分布
- 1回目の衝突のみ
- $l \sim D_0$ (l :シエルの厚さ,
 D_0 :シエル間の距離)
- $M_1 = M_2$



- パラメータ (γ_{avg} , γ , D_0)

モデルの式



REF e.g.
 Spada et al., 2001 MNRAS
 Kobayashi et al. 1997, ApJ
 Ghisellini 2001, Blazar
 demographics & physics

$$\Gamma_m = \sqrt{\Gamma_1 \Gamma_2}$$

$$D = \frac{2\Gamma_1^2 \Gamma_2^2}{\Gamma_2^2 \Gamma_1^2} D_0 = \frac{\Gamma_m^2}{\Gamma_1^2 / \Gamma_2^2} D_0$$

Efficiency

$$\eta = \frac{(\Gamma_1 \Gamma_2 \Gamma_m) M_1 c^2 + (\Gamma_2 \Gamma_1 \Gamma_m) M_2 c^2}{\Gamma_1 M_1 c^2 + \Gamma_2 M_2 c^2}$$

($\Gamma_2 = 2\Gamma_1$ で $\sim 10\%$)

Time Scales

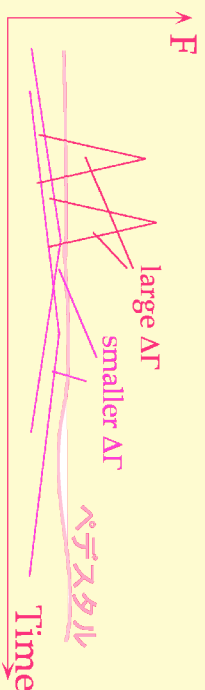
$$T_{ang} = \frac{R}{c \Gamma_m}$$

$$T_{CRS} = \frac{l}{c(\Gamma_2 \Gamma_1 \Gamma_{rs}) \Gamma_m^2} \Gamma_{flare}$$

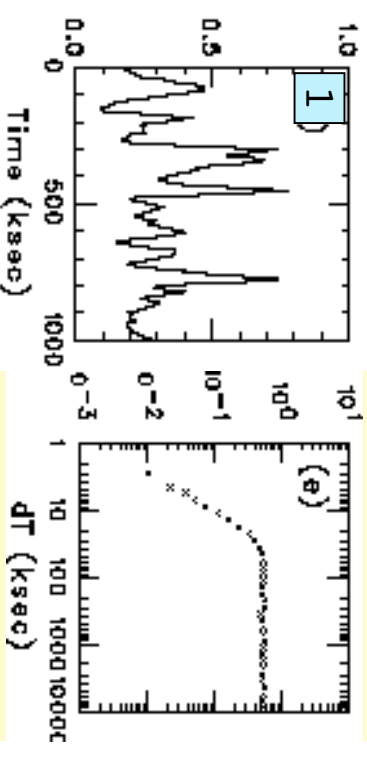
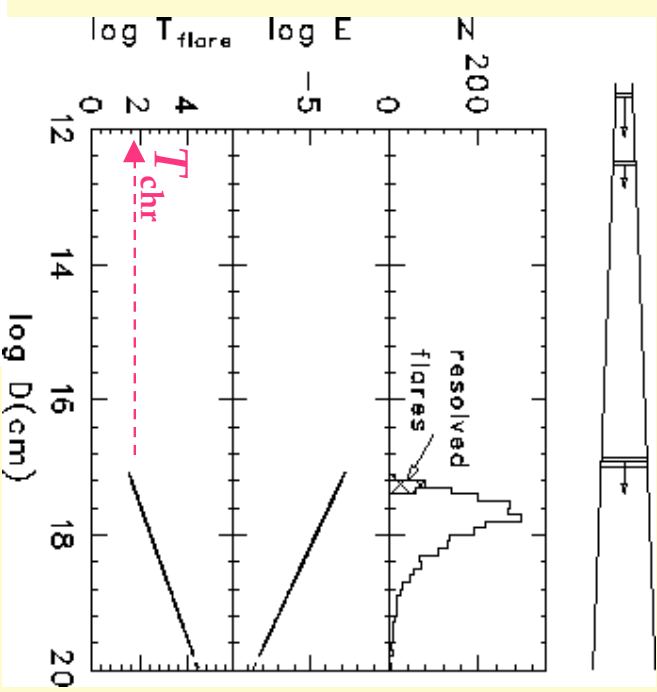
$$T_{shots} \sim \frac{D_0}{c}$$

結果

- 観測されるフレア
 - \square が最も大きい衝突(手前)だけ見える
 - ($E_{\text{dissipate}}$ 大、 T_{flare} 小)
 - このフレアが T_{chr} を決める。
 - ($< T_{\text{chr}}$ の T_{flare} は存在しない。観測された構造関数の形を説明 2)
- ペDESTAL
 - \square の小さい衝突(遠く)による振幅が小さく長いフレアの重ね合わせ 3
- フレアとなる衝突は \square_s が大きくより高エネルギーに加速される (§ 7.5) 4



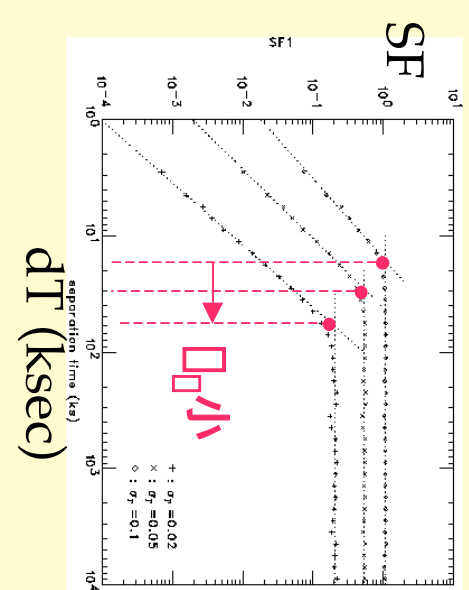
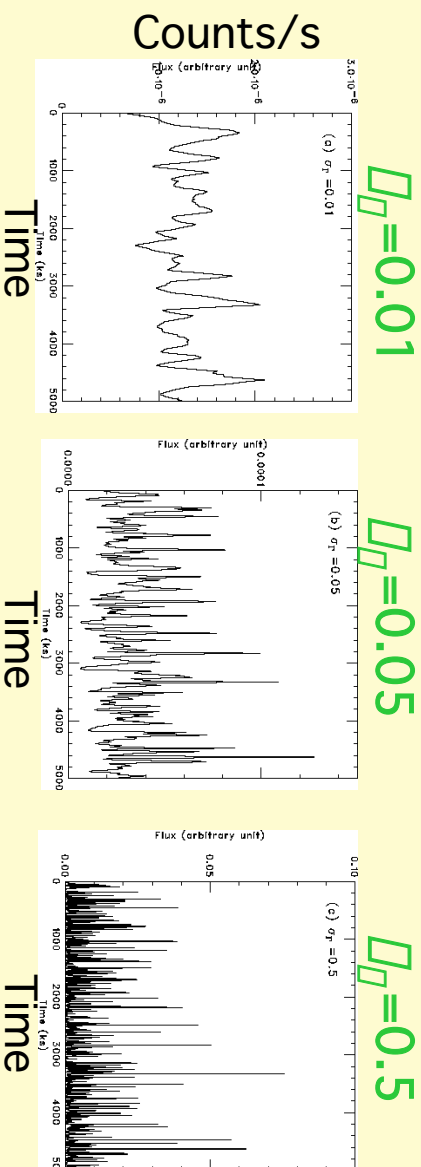
$$\begin{aligned} D_{\text{avg}} &= 10 \\ \square_s &= 0.05 \\ D_0 &= 3 \times 10^{13} \text{ cm} \end{aligned}$$



時間変動の性質をNaturalに説明する

観測量とそれから求まる物理量

初期速度分布の広がり(Δv): 小さくないといけない



観測量

- フレアの振幅/ペダスタル(R_{f_0})

- T_{chr}

⇒ $\Delta v / \Delta_{avrg}$, D_0 が求まる

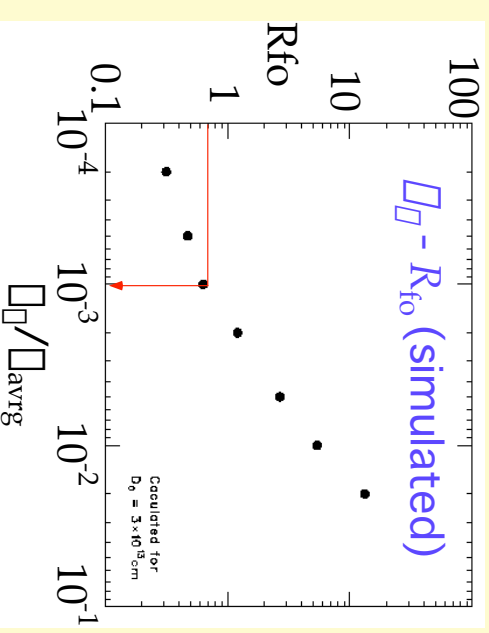
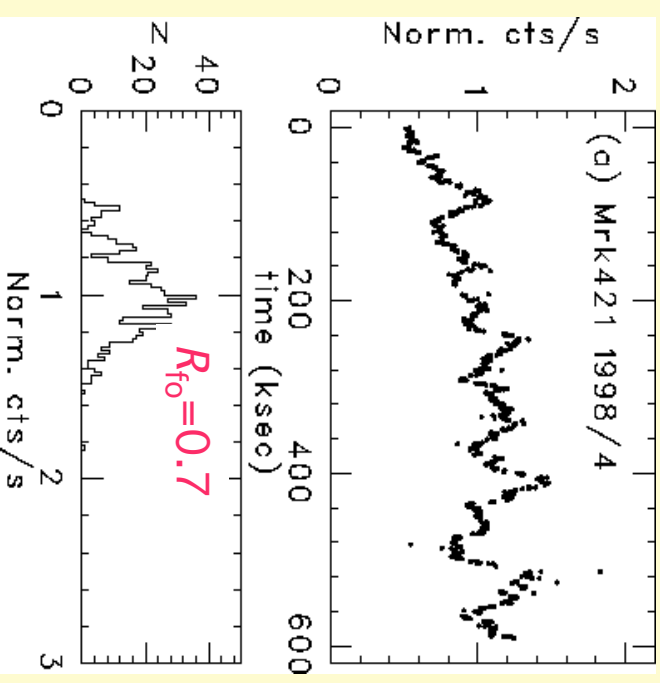
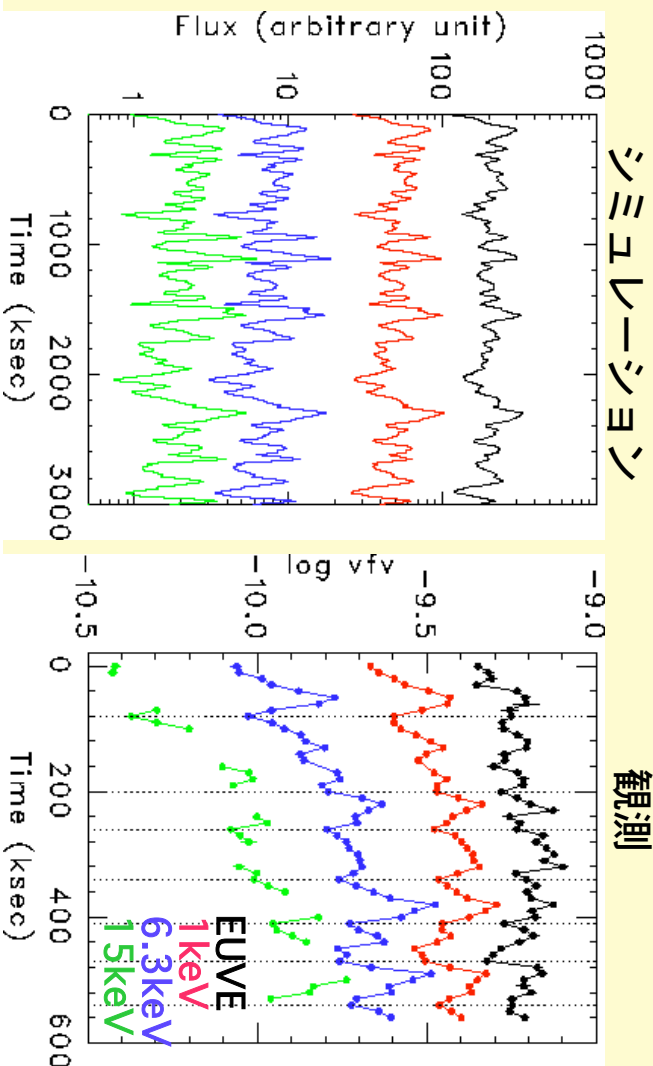
(Δ_{avrg} は違う方法から見積もり可能)

e.g. Mrk421: $\Delta v \sim 15$

Mrk421への応用

- $R_{f_0} = 0.7, T_{chr} = 40 \text{ ks}$
 $\Rightarrow D_0 = 1 \times 10^{13} \text{ cm}$
 $\square_{\square} = 0.015, \square = 15 \text{ (assumed)}$
 $(\square_{\square} / \square = 0.001)$

- ライトカーブ、エネルギー依存性の再現





時間変動の議論のまとめ

- $T_{\text{chr}}=T_{\text{flare}}$ はジオメトリに支配される変動時間
- 時間変動の性質を再現
 - 内部衝撃波： \square_{I} が小さいという制限のみで、変動のメカニズムを **ジェット**の根元〜放射まで、極めて自然に再現できる。
- ジェット内の活動性を反映するの物理量の見積もり (Mrk421の場合)
 - シェルの大きさ： $\sim 10^{13}$ cm
 - 噴出頻度： ~ 5 分に1度
 - 衝突位置：中心核から $\sim 10^{17}$ cm
- 効率
 - \square_{I} が小さい \rightarrow $\square_{\text{I}}, \square_{\text{S}}$ が小さい
 - 観測を再現するためには加速に使われるエネルギーはシェルの持つエネルギーの0.01%以下になる (§7.4.3)
- 外部衝撃波も可能であるが、衝突位置の特定、などの細かい工夫が必要。 (§7.6)



結論

■ 観測

- 過去にない長期連続観測を初めて行った
- TeVガンマ線に共通する時間変動の性質を示した
 - ライトカーブ: $T_{\text{cycle}} \sim T_{\text{flare}}$ 、 T_{chr} の存在(SF)
 - スペクトル: フレア時は加速限界が高い

■ 時間変動の解析から

- $T_{\text{chr}} = T_{\text{flare}}$; T_{flare} はジオメトリに支配される変動時間
 - フレアは電子分布の継続的な変化でなく、新しい成分の増光・減光
- ## ■ 時間変動の性質を再現 (変動を初めてフレアのシリーズをしてとらえる)
- 中心部分からジェットが間欠的に吹き出され、シエルが衝突してフレアができる。その吹き出し速度のゆらぎが小さいという条件で、変動のメカニズムをジェットの根元〜放射まで、極めて自然に再現できる。