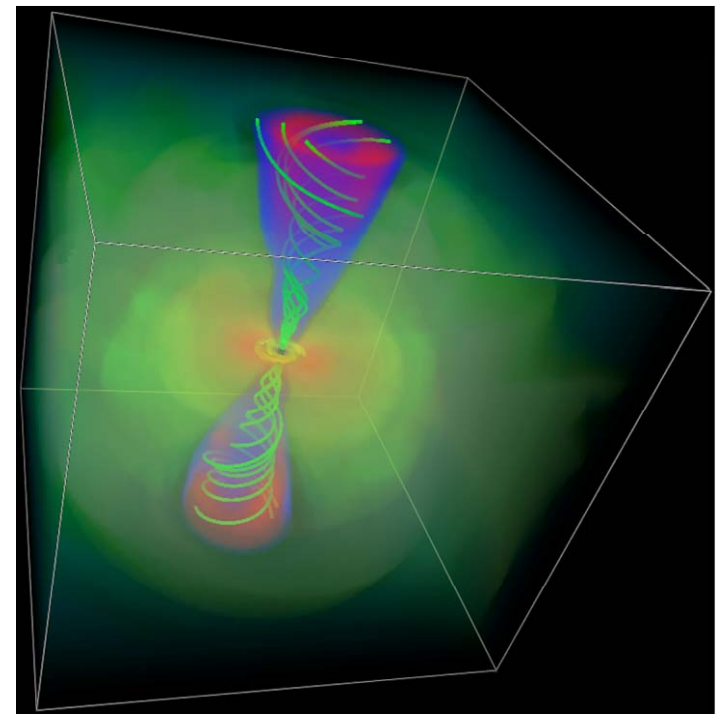
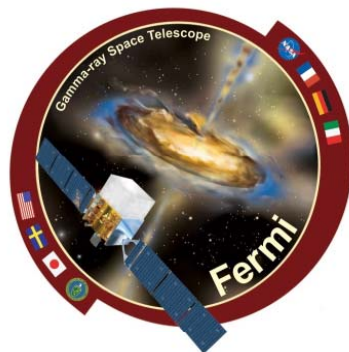


高エネルギージェット天体の 偏光分光観測

深沢泰司、川端弘治、植村誠、吉田道利、田中康之、伊藤亮介、高木勝俊
(広大理、宇宙科学センター)、笹田真人(京大理)



高エネルギージェット天体

X線ガンマ線で明るいジェットを伴う系外突発天体

ブレーザーなどの系外ジェット天体
(電波銀河などのRadio-loud銀河も含む)

ガンマ線バースト

系内ジェット天体？

突発天体を重要天体にするなら、偏光(分光)モニターは非常に有効

大型望遠鏡では、できない。

世界の他の中型望遠鏡に対してユニーク
かなた望遠鏡の例

フェルミ衛星(今後5年以上)、CTA-TeV(3年後)、CALET(数年後)
などによる高エネルギー天体のガンマ線観測が続く

偏光装置の開発 ... 広島大学の協力できるか???

高エネルギージェット天体の可視偏光観測の重要性

磁場の情報を引き出す

複数成分の分離

各成分の偏光度や偏光角の違いを利用

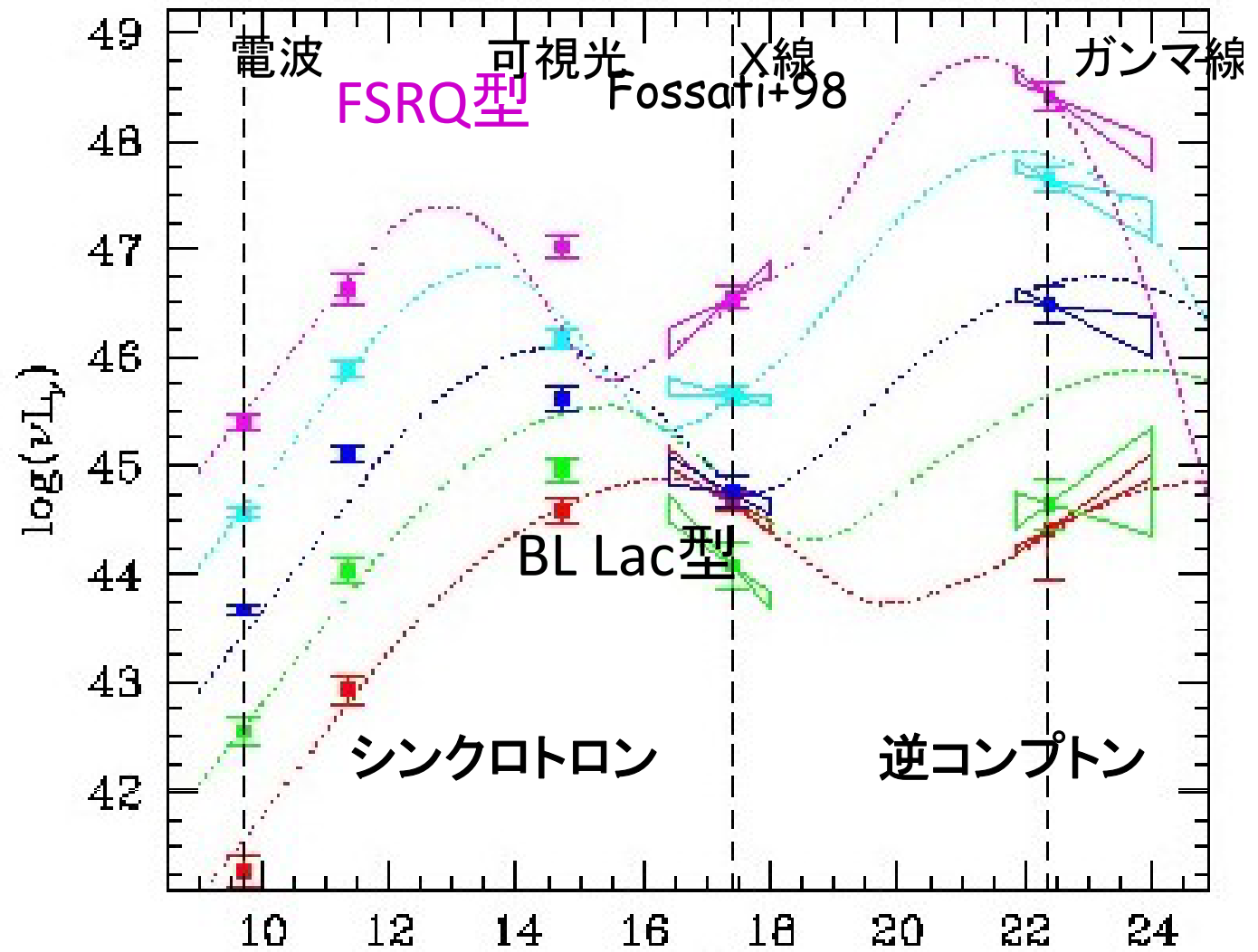
高エネルギー成分の放射機構の情報

BLAZAR

電波からガンマ線までジェット放射（シンクロトロン、逆コンプトン）が明るい

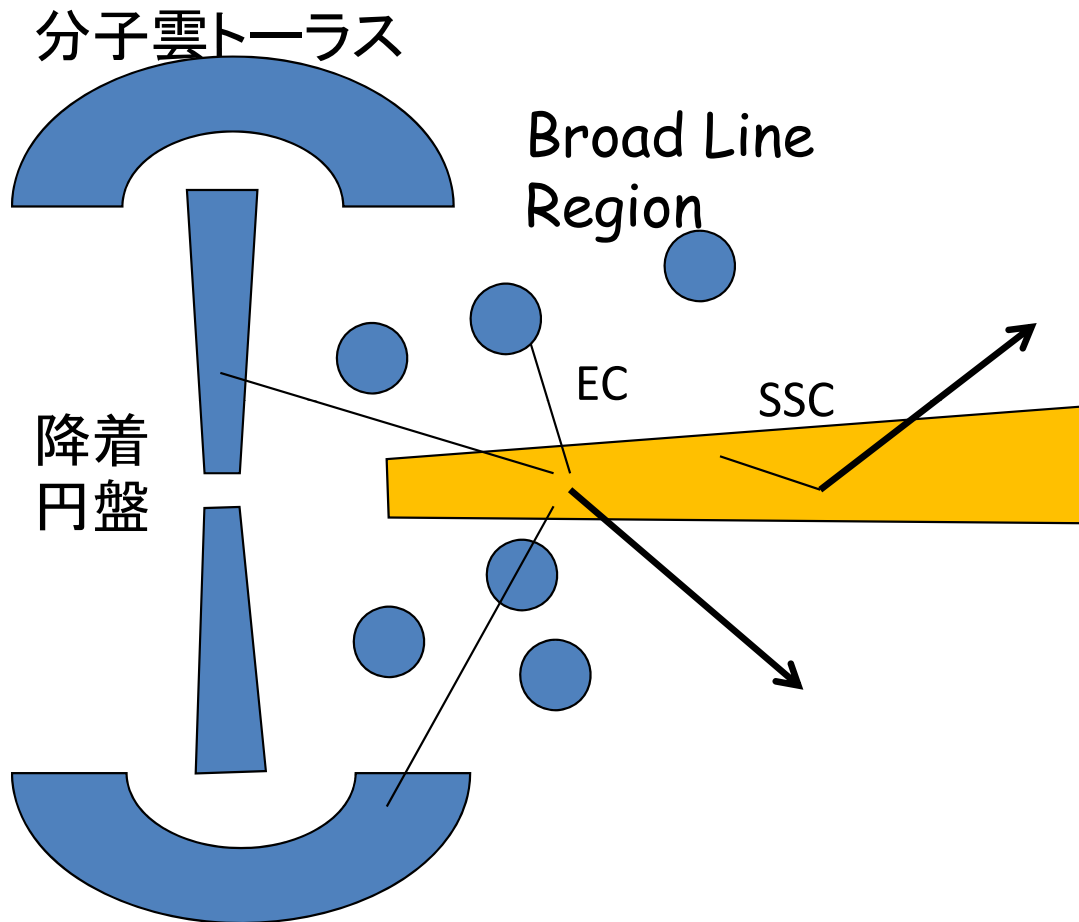
フェルミ衛星により、ガンマ線で数年間の連続モニター中
電波、可視光領域で強い偏光。高エネルギー側も偏光の可能性。

多波長偏光観測にふさわしい天体



BLAZARの放射モデル

Leptonic model 電子陽電子が放射源



Synchrotron Self-Compton

ジェット中の電子がシンクロトロン放射した光子を、そばの電子が逆コンプトン散乱

BL Lac, FSRQ

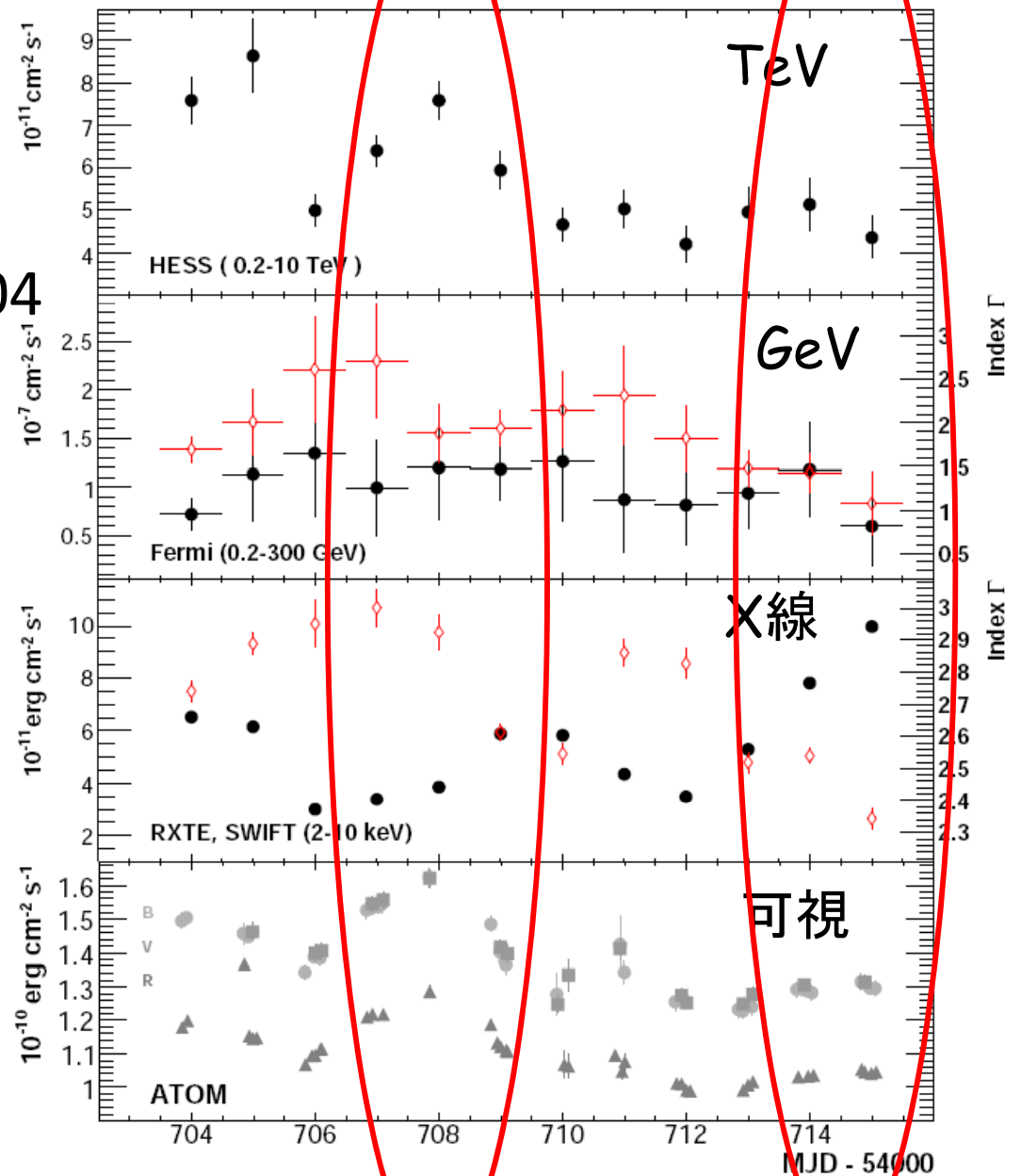
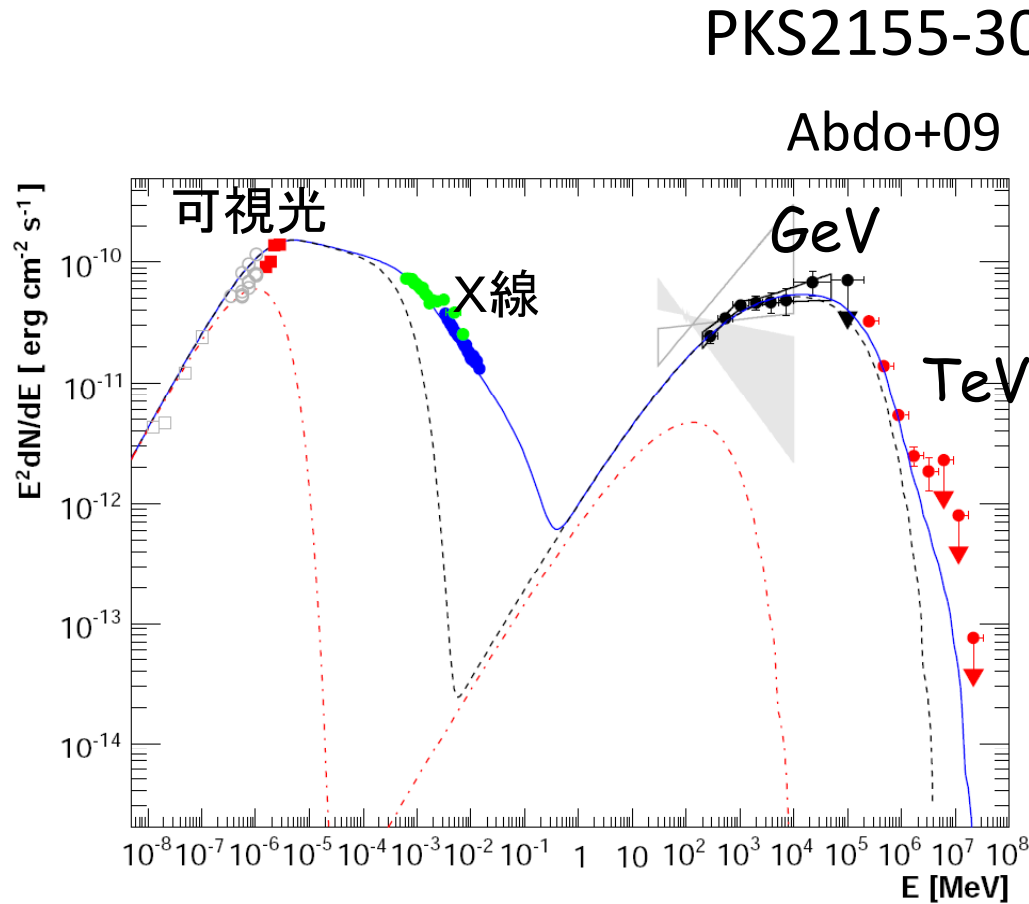
External Compton

別の場所(降着円盤、broad line Region、分子雲トーラス)から来た光子を、ジェットの電子が逆コンプトン

FSRQ

降着円盤(紫外線)、broad line region(可視から紫外)、分子雲トーラス(遠赤外線)が明るい

フェルミ衛星を中心とした多波長測光モニター観測が盛んに行われている



X線とTeV、可視光とGeVが相関していない時期がある。
可視とTeVが相関している時期がある。

One-zone の描像では合わない(複数の放射成分)

かなた望遠鏡によるブレーザー集中観測

全部で42天体

2008年5月～2009年秋

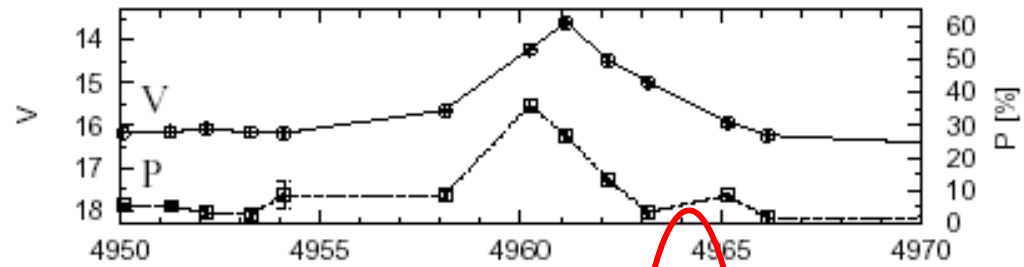
Fermiでも見えている天体

詳細は、Ikejiri+11

1ES 0323+022	MisV 1436	PKS 1222+216
1ES 0647+250	Mrk 421	PKS 1502+106
1ES 0806+524	Mrk 501	PKS 1510-089
1ES 1959+650	OJ 287	PKS 1749+096
1ES 2344+514	OJ 49	PKS 2155-304
3C 371	ON 231	QSO 0454-234
3C 454.3	ON 325	QSO 0948+002
3C 66A	OQ 530	QSO 1239+044
3C 273	PG 1553+113	RX J1542.8+612
3C 279	PKS 0048-097	S2 0109+22
AO 0235+164	PKS 0215+015	S4 0954+65
BL Lac	PKS 0422+004	S5 0716+7143
H 1722+119	PKS 0754+100	S5 1803+78
4C 14.23		

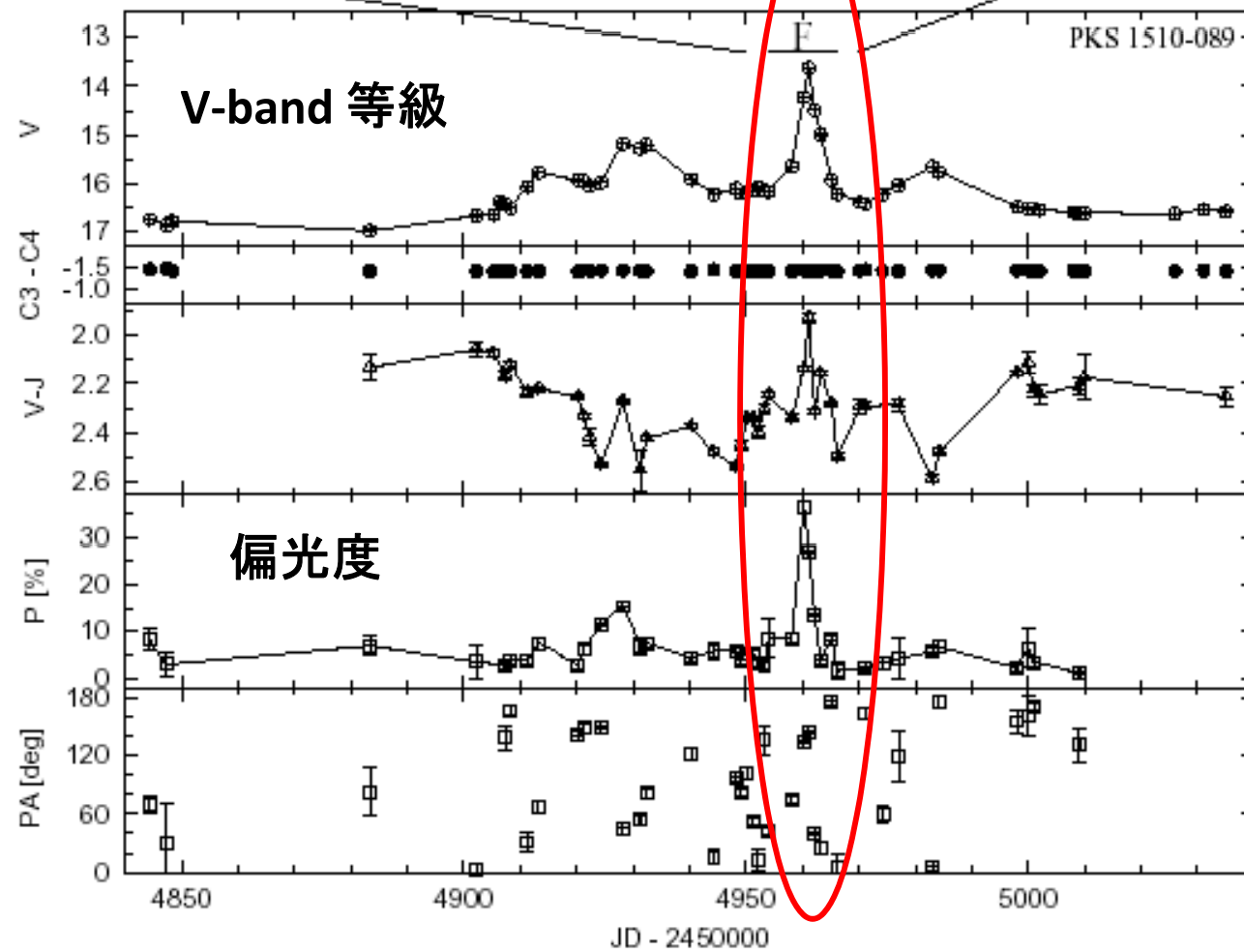
3EG 1052+571
QSO 0324+341

フレア時に、偏光度が非常に高くなる(40-50%)場合もある



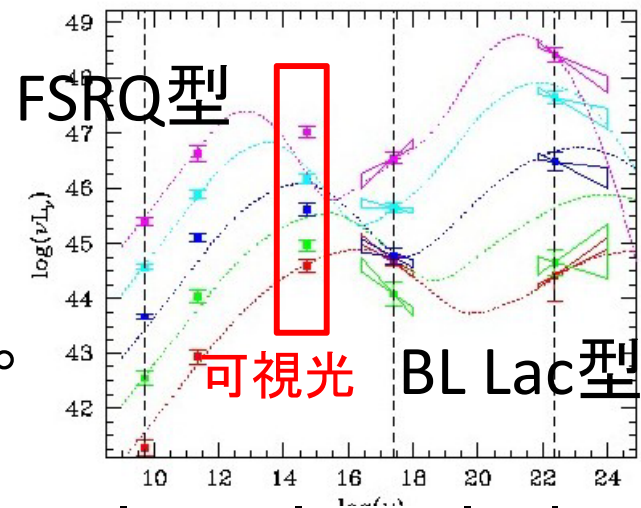
PKS1510-089

Sasada+11

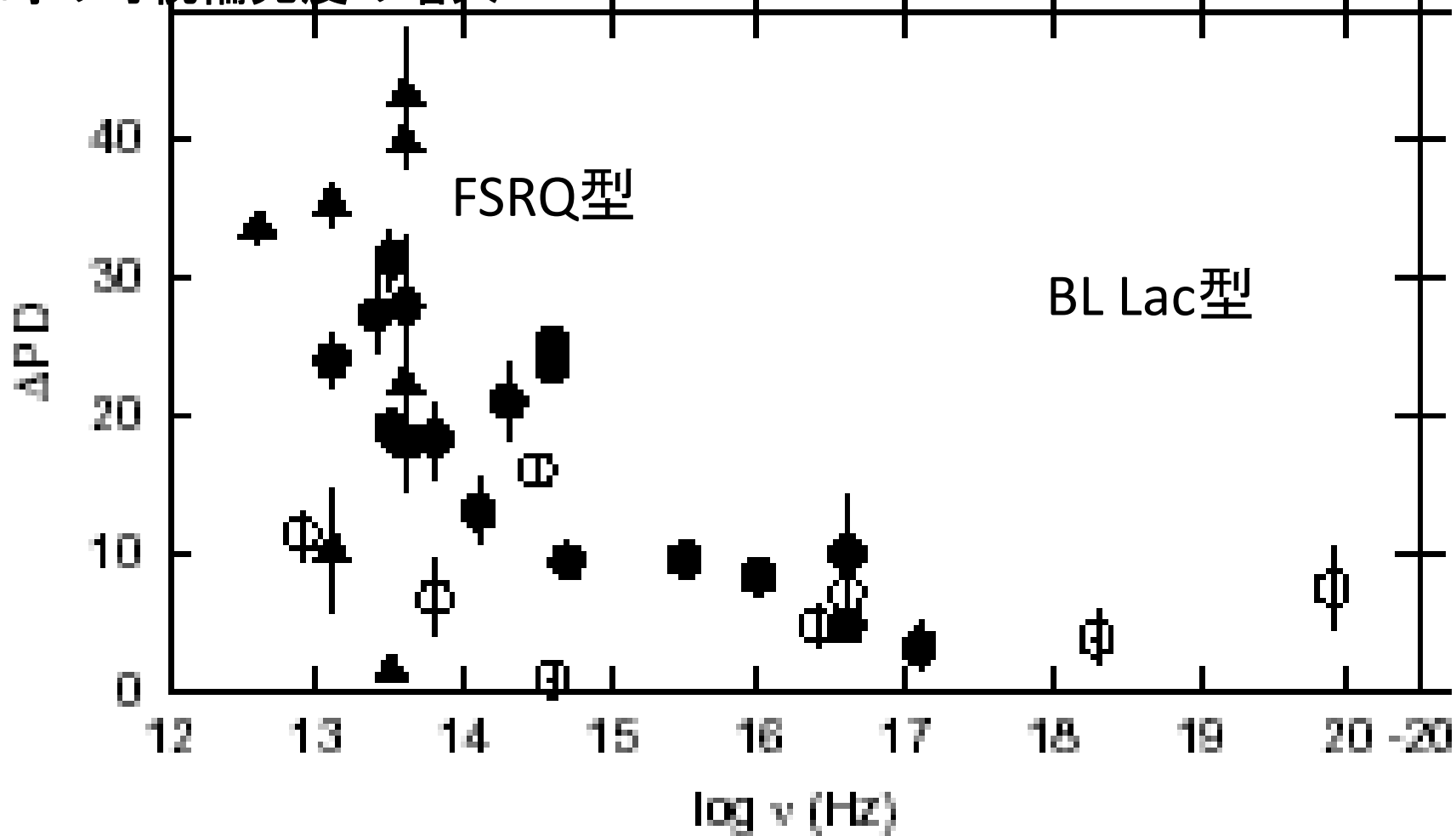


フレア時の可視偏光度は、FSRQ型の方が高い
(シンクロトロンピーク付近)

BL Lac型は、X線で高い偏光度の可能性。



フレア時の可視偏光度の増大



シンクロトロンピーク周波数

偏光の変動の振る舞い

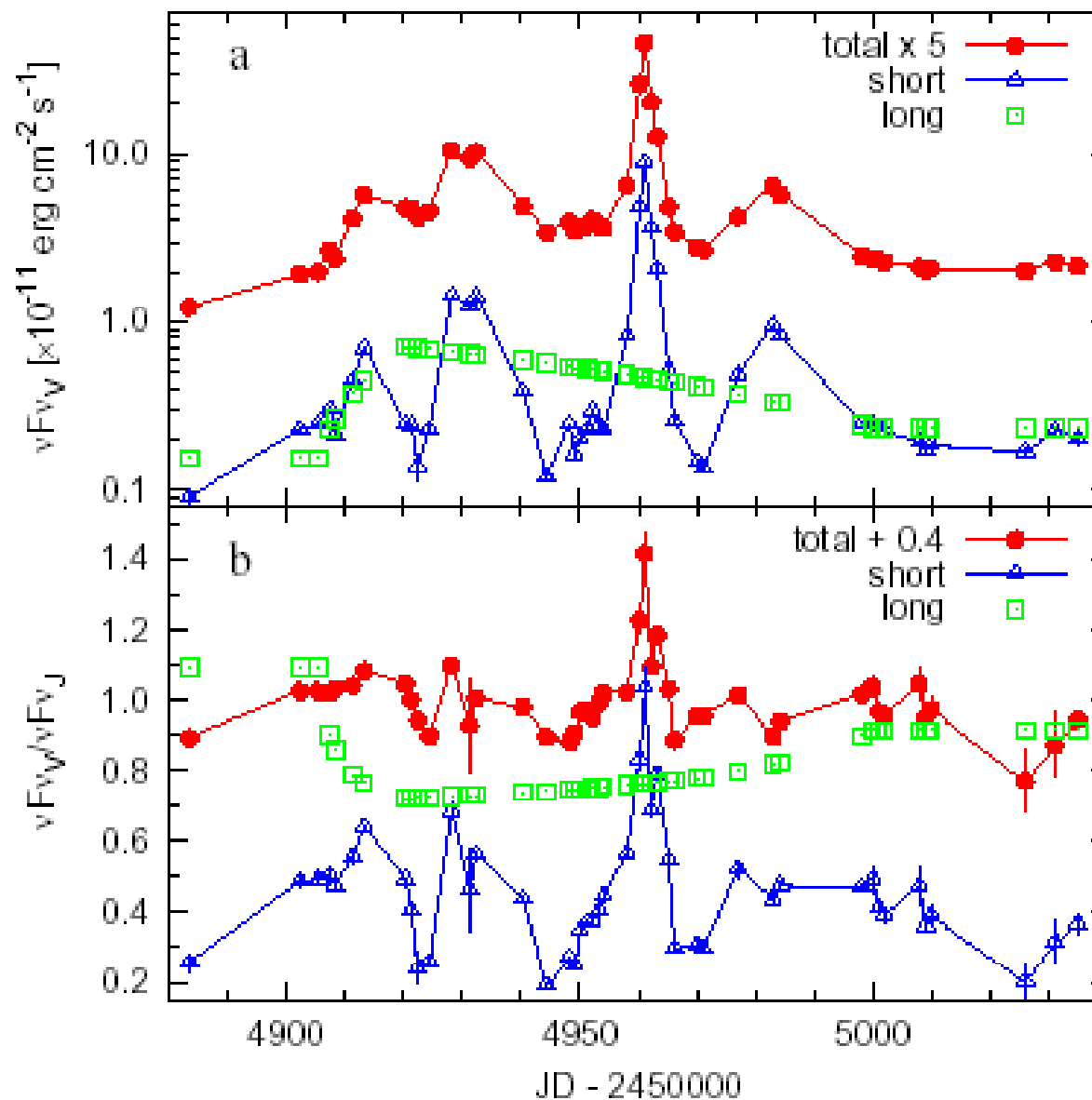
短期変動と長期変動の2成分が少なくとも存在

PKS1510-089

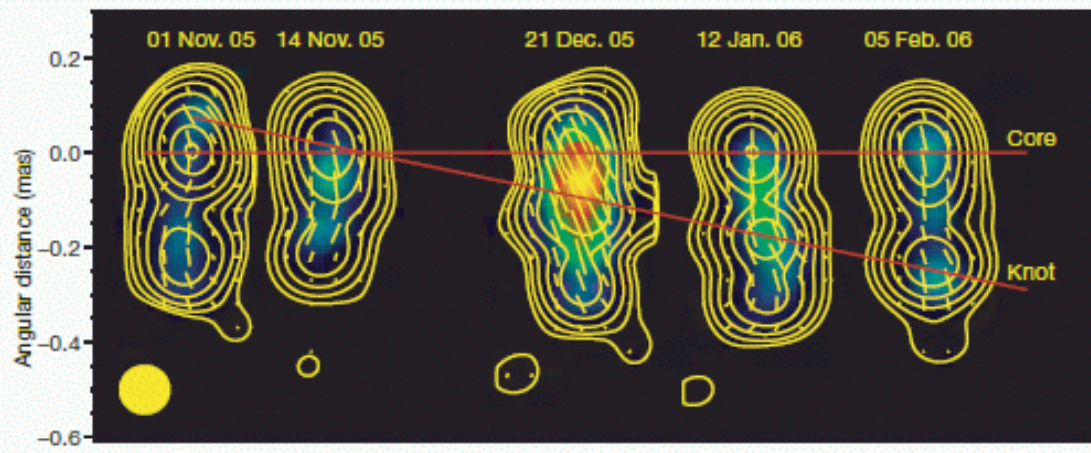
Sasada+08
Uemura+10
Ikejiri+11
Sasada+11
Itoh+13
Sakimoto+13

偏光フラックス

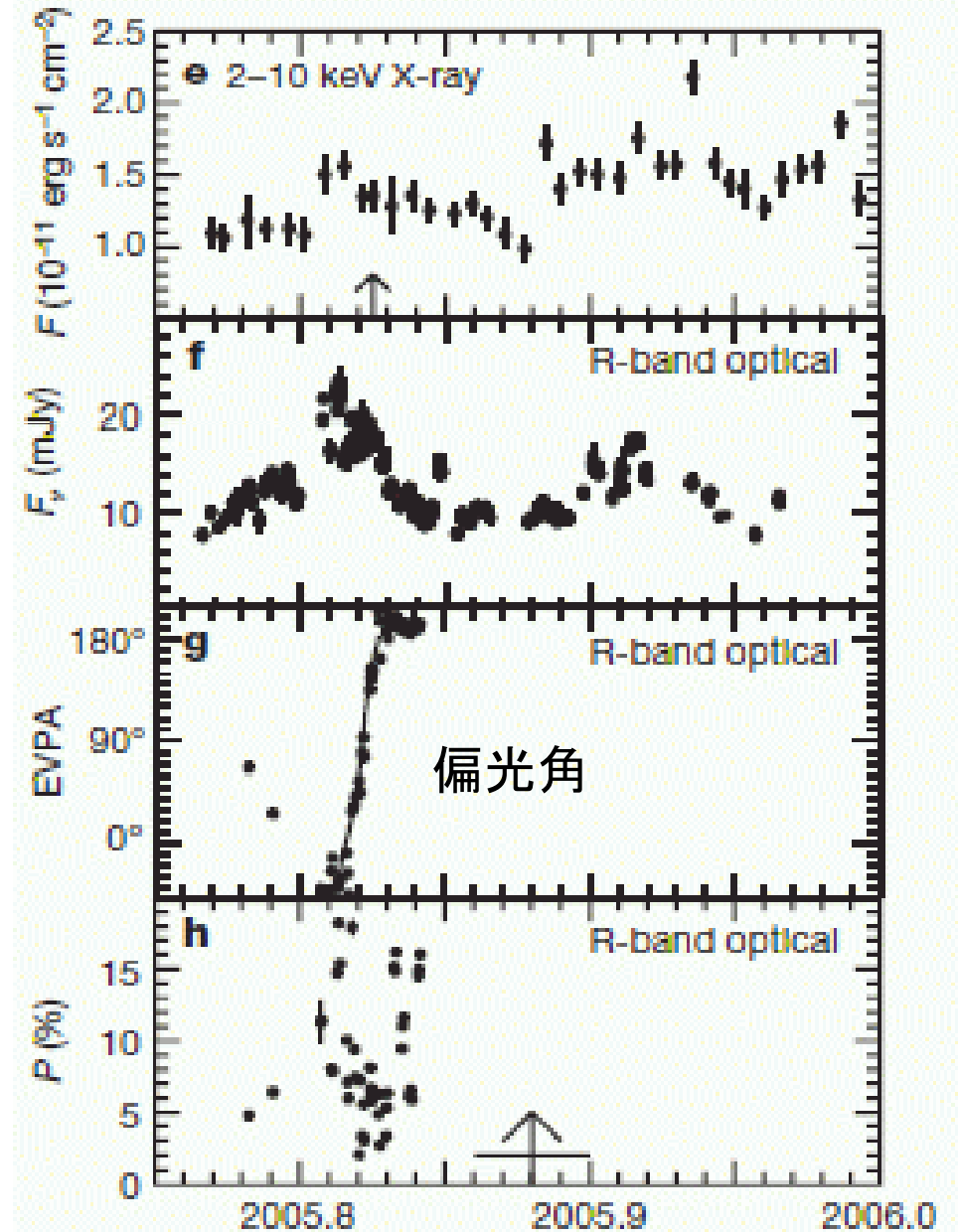
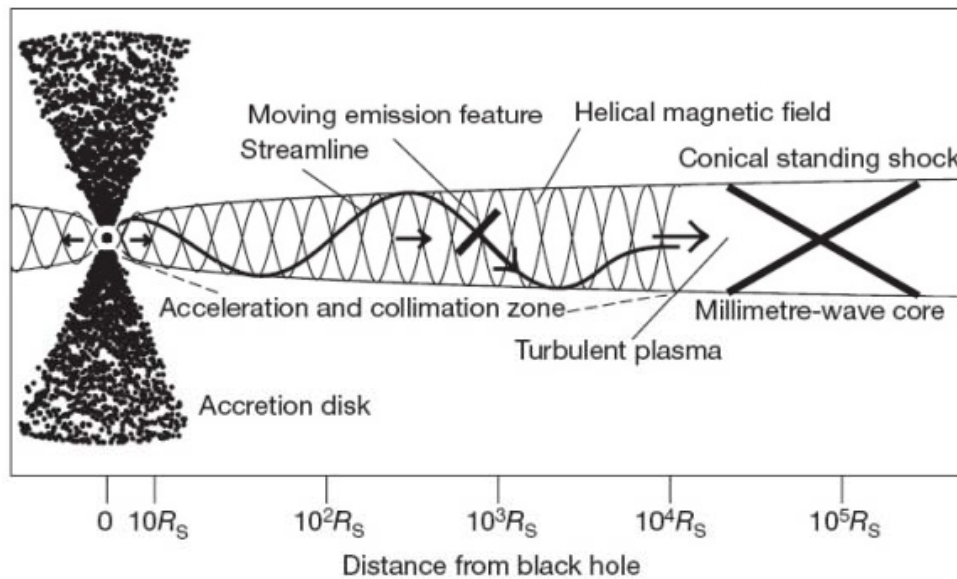
色

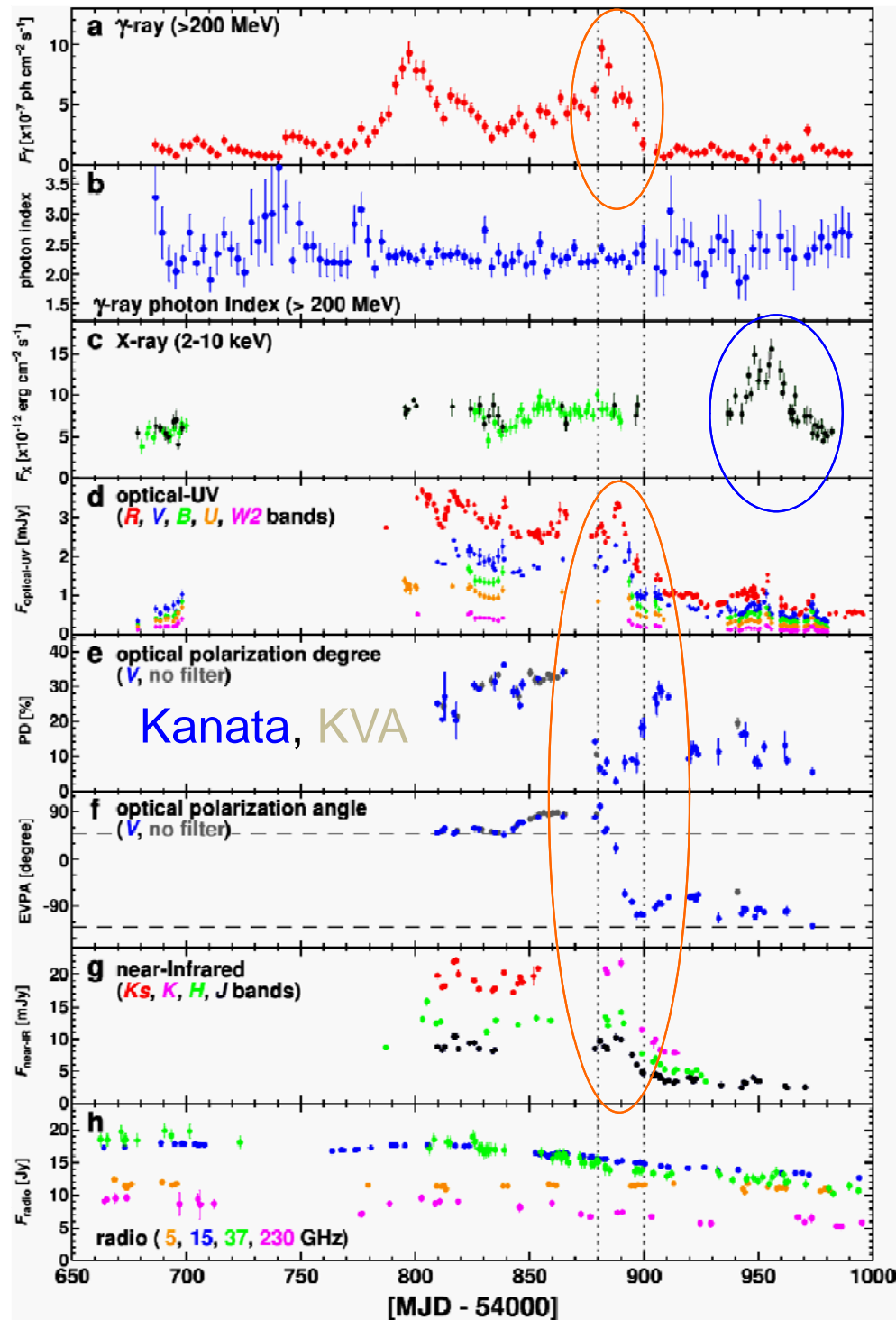


TeVフレア、可視偏光回転、電波ノットの放出が同時期に観測された



Marscher+08





γ-ray (LAT)

γ-ray photon index (LAT)

X-ray

optical-UV

optical polarization degree (PD)

optical polarization angle (EVPA)

Near-Infrared

Radio

ガンマ線フレアとともに、可視偏光面の角度が回転 (20日で208度回転)

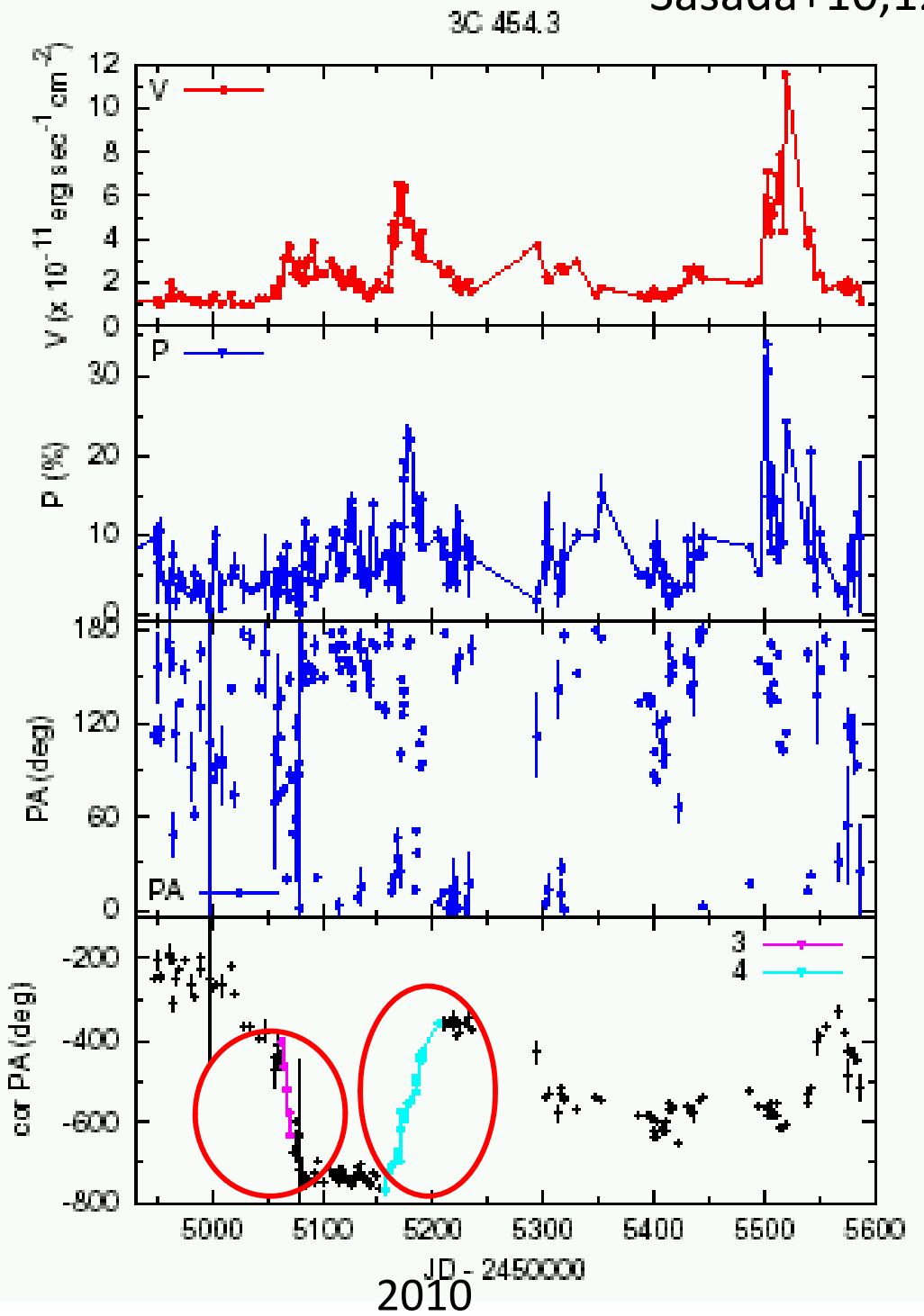
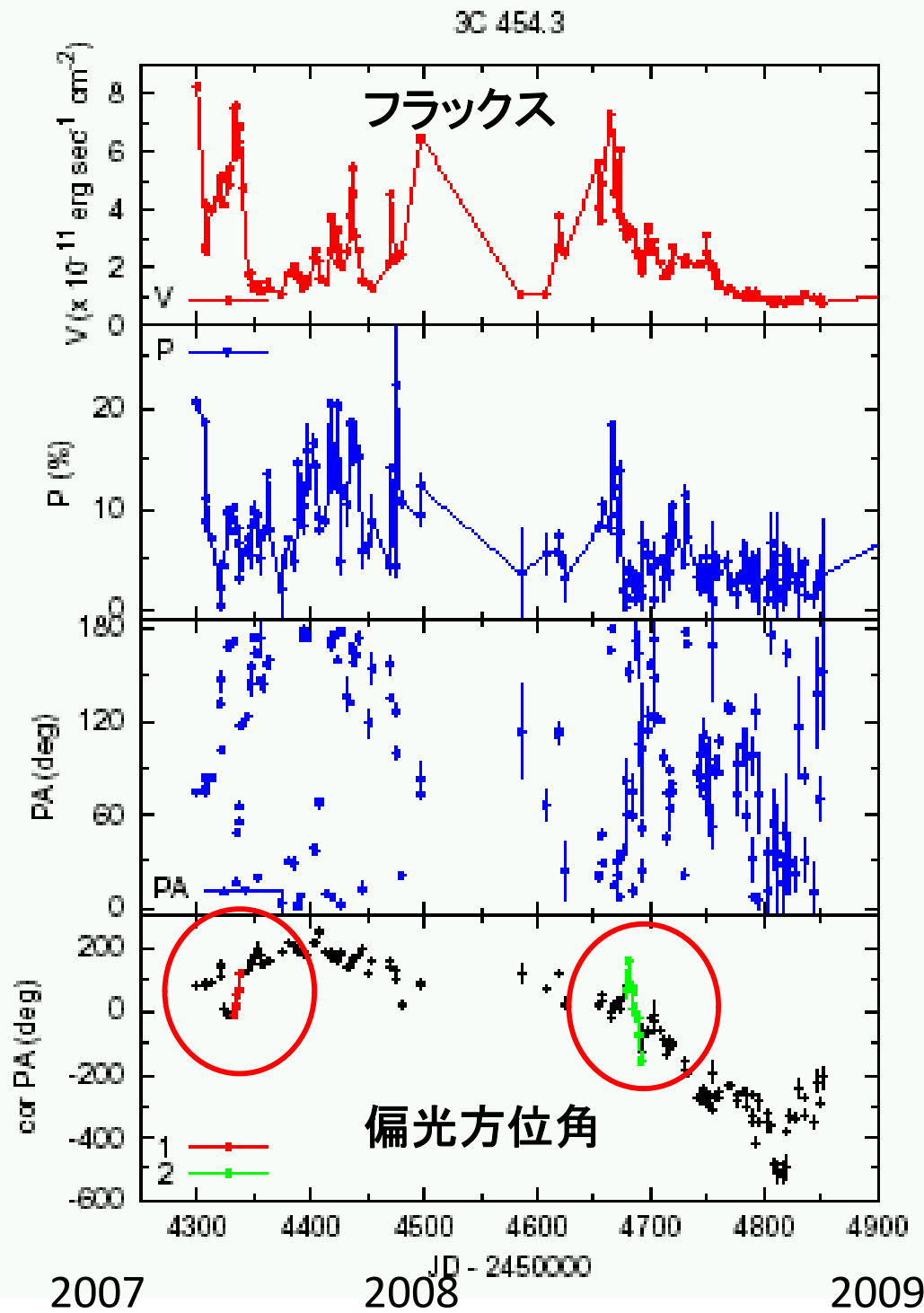
放射領域D~
 10^{19} cm

広島大学かなた望遠鏡

電波は変動が見られない→シンクロtron自己吸収→放射領域のサイズは、
 $R_b < 5 \times 10^{16}$ cm

3C454.3 偏光面の回転現象が複数回(回転向きも一定でない)

Sasada+10,12

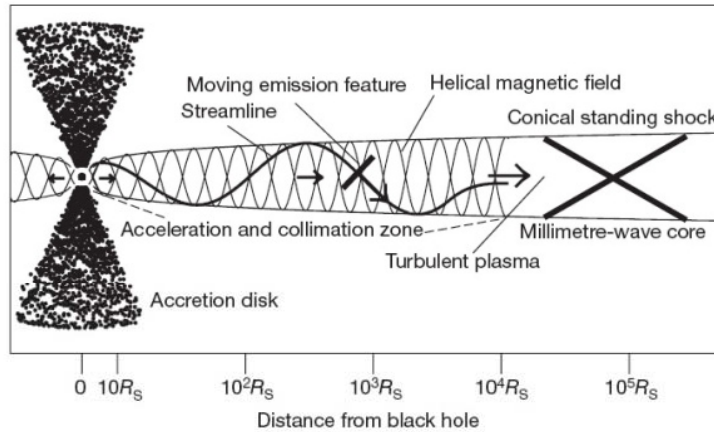


フレアに伴うブレーザーの可視偏光の回転は、最近検出され始めた

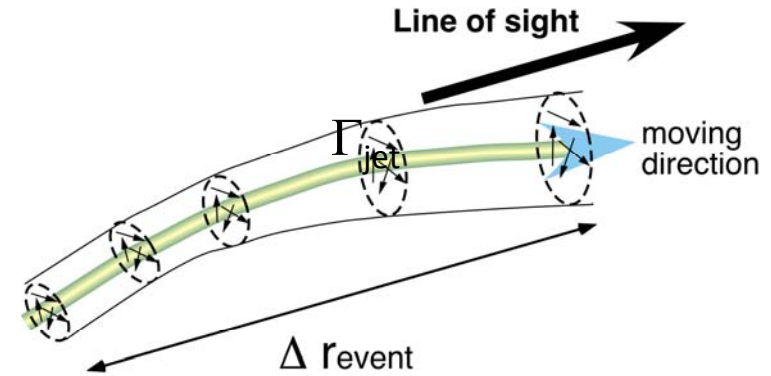
(広島大学かなた望遠鏡でも、いくつか)
 ジェットの構造に対して制限を与える

Marscher+08,10; Sasada+09

1. helical magnetic field model
 (Marscher et al. 2008)



2. bend jet model



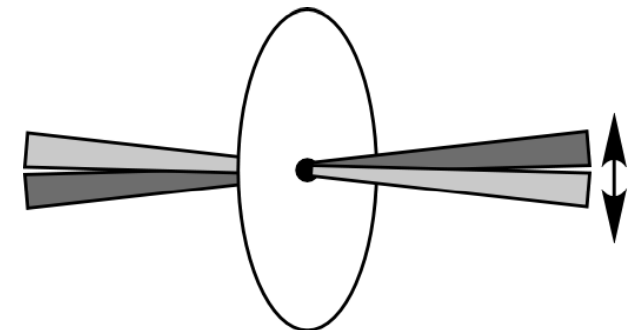
ガンマ線放射領域の位置は：

$$\Delta r_{\text{event}} \sim 10^{19} \left(\Delta t_{\text{event}} / 20 \text{ days} \right) \left(\Gamma_{\text{jet}} / 15 \right)^2 10^5 \text{ cm}$$

シュワルツシルド半径

3. "flow-through" (jet wobbling) scenario

ジェットのビーミング効果が入らないので、ゆっくりと変動
 放射領域の位置: $r_{\text{event}} \sim cD t_{\text{event}} \sim 10^3$ シュワルツシルド半
 径



シナリオ1と3は、常に同じ方向の偏光面回転を予測するが、3C279では過去に逆方向の回転が観測されている(Larionov+08).3C454.3でも観測されている(Sasada+10)。

偏光度を連続的に追える天体は限られている。
明るい天体で、大きなフレアは、数が限られる(可視だと季節外の場合も)。

現状では、比較的近い天体に限られている。

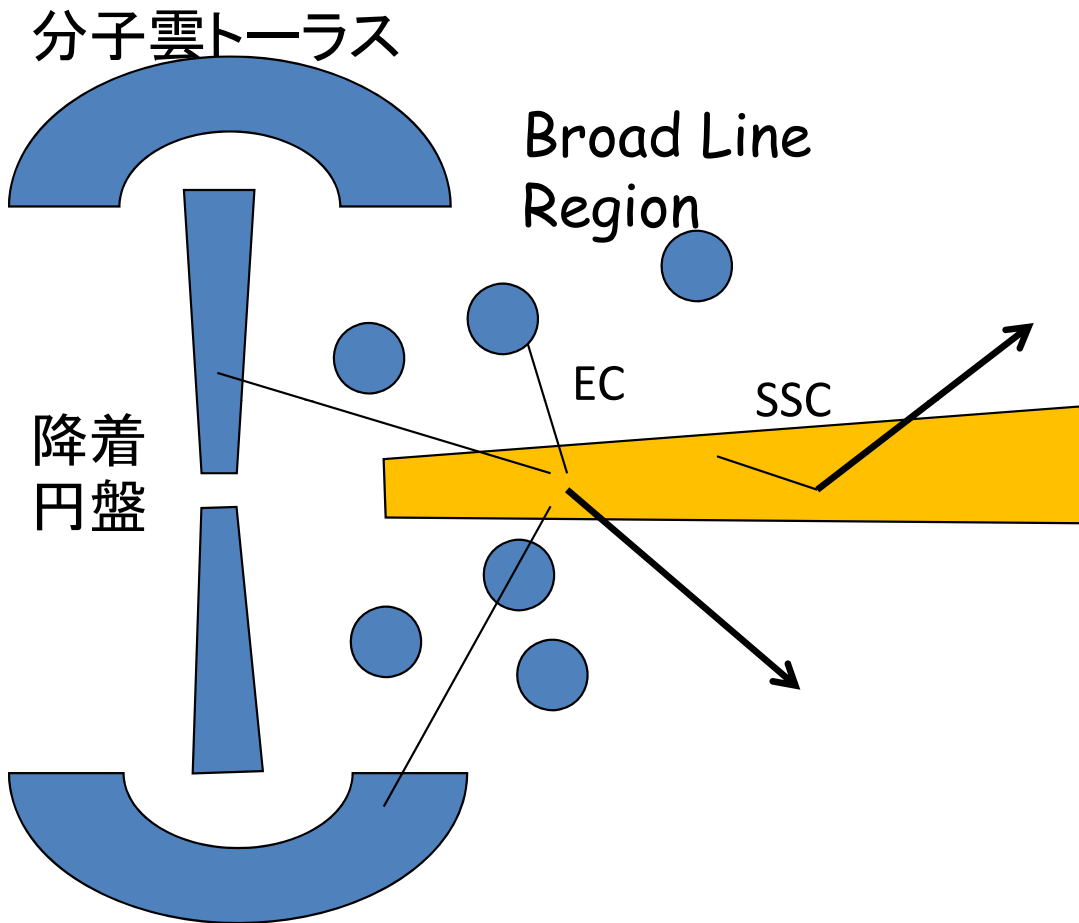
CTAによるTeVガンマ線観測が始まる

暗いTeVブレーザーが多数見つかる

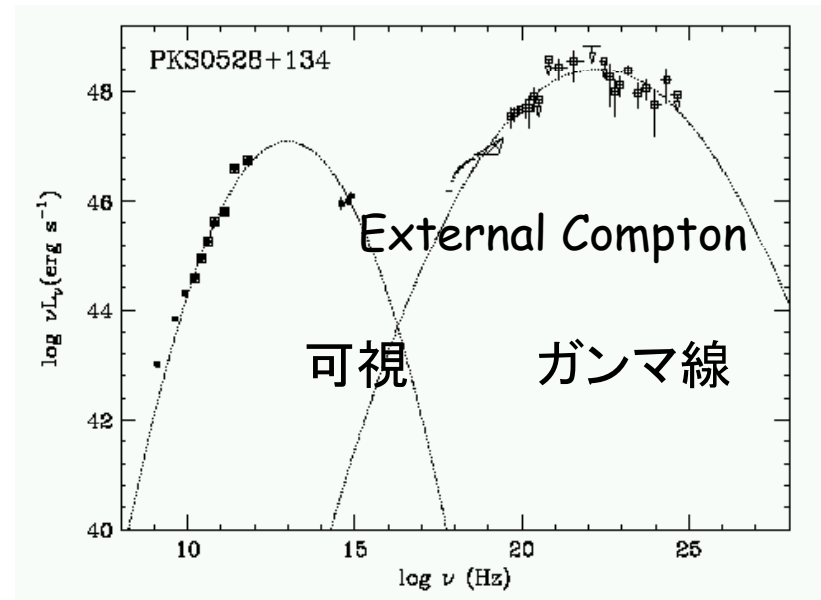
TeVブレーザー(HBL)は、可視域では暗めで低い偏光度
精度良い観測が必要(母銀河光の混入にも注意)

近赤外分光モニター観測により、BLR光子を種とした逆コンプトン
散乱をプローブ

(フェルミ衛星との同期観測)



ガンマ線放射起源は複雑
種光子の情報が必要
プロトン放射の可能性も



External Compton

別の場所(降着円盤、broad line Region、分子雲トーラス)から来た光子を、ジェットの電子が逆コンプトン

FSRQ

降着円盤(紫外線)、broad line region(可視から紫外)、分子雲トーラス(遠赤外線)が明るい

Spectroscopy with HOWPol

Spectroscopic monitoring of broad lines

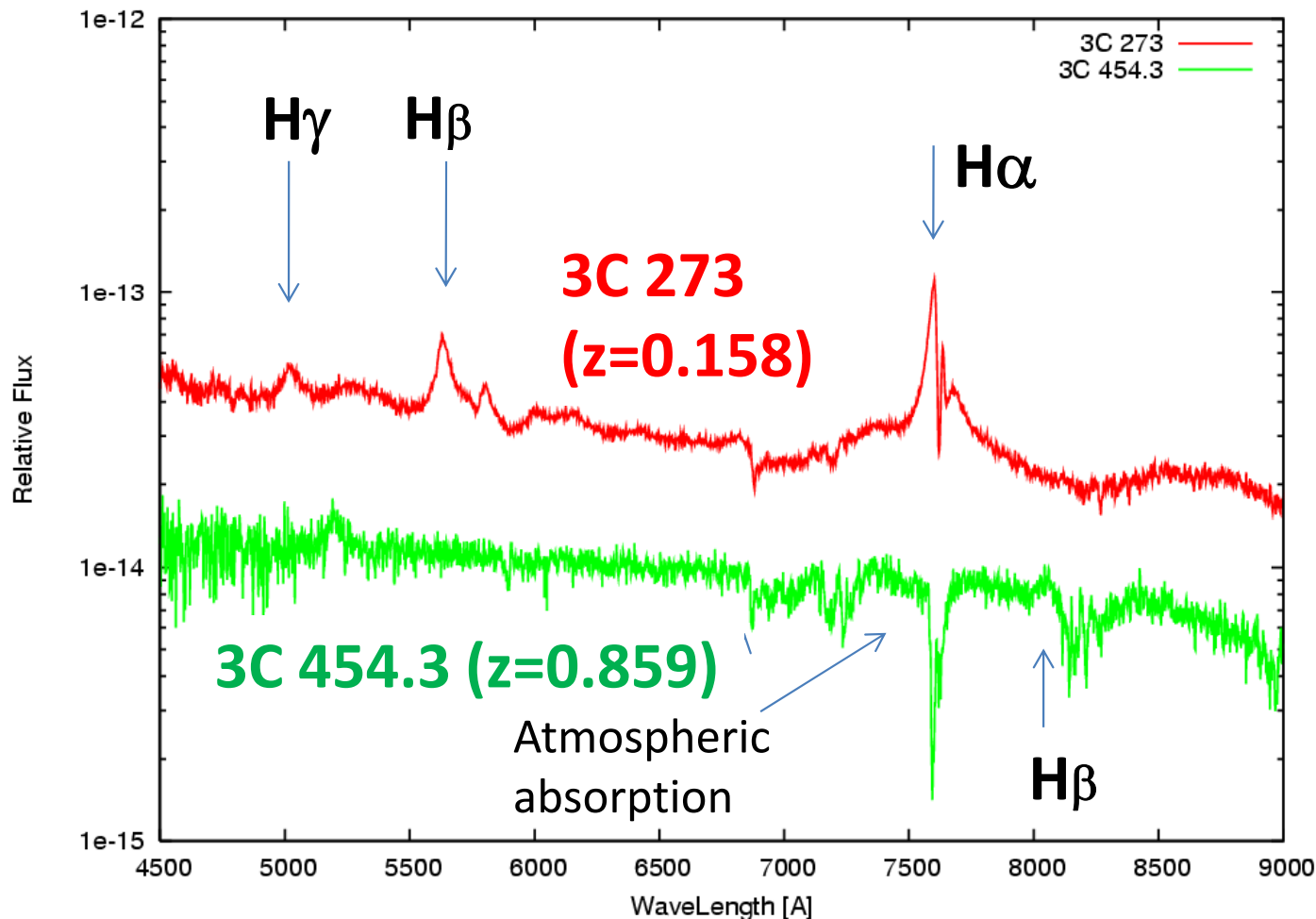
e.g. 3C 273, 3C 454.3

1,200 [s] exposure

多くのFSRQは、 $z > 0.5$

近赤外線分光が重要

Itoh



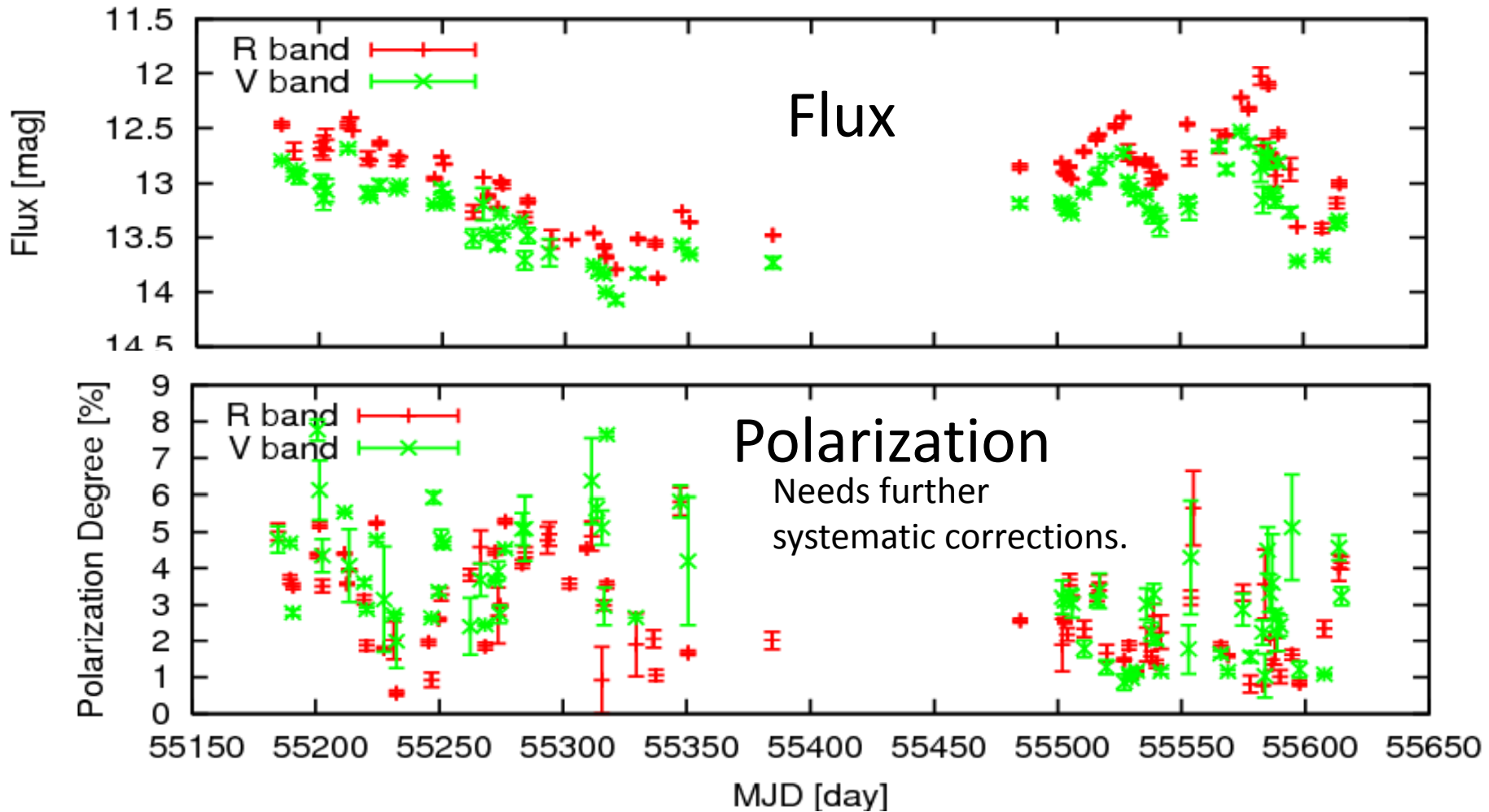
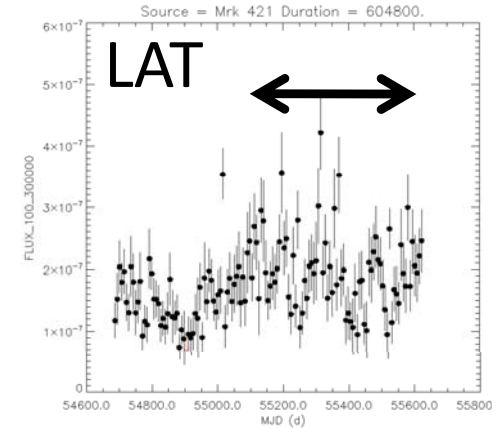
Preliminary

Mrk 421 HOWPol

David P. requested.

最も明るいTeVブレーザーの1つ

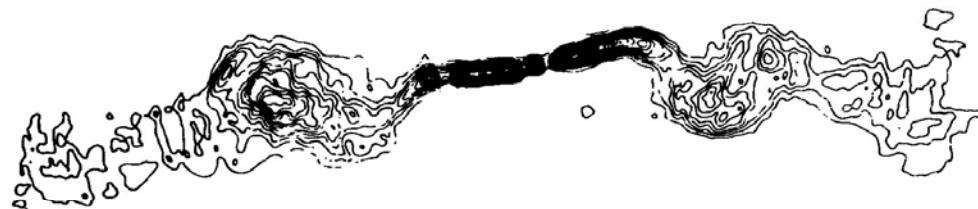
Itoh TeVブレーザーは、偏光度が低い



新しい部類のガンマ線AGN:電波銀河

Blazarの母集団

ジェットを斜めから見ているので、ビーミング効果が弱く、明るくない



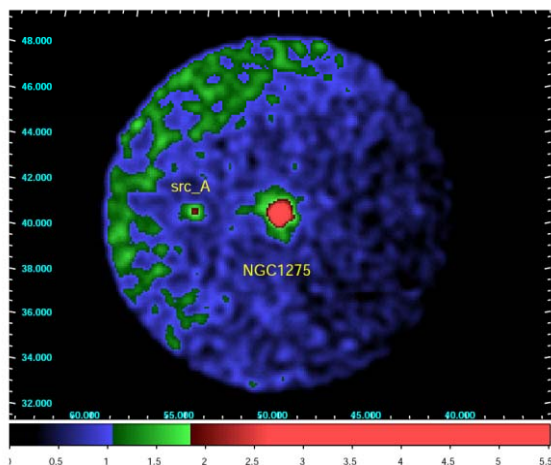
EGRET: Cen A と2, 3の電波銀河からのGeVガンマ線放射の兆候
3EG catalog: Hartman et al. (1999) 他に、3C111 and NGC6251?
see also Sreekumar et al. (1999)

2000年代に入り、M87からTeVガンマ線が検出された

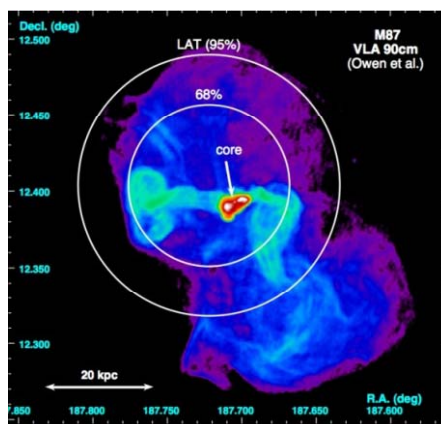
ジェットをいろいろな角度から見ることにより、ジェットの構造の情報を得られる(Blazarはビーミングで、ジェット中心部のみ見見え)

フェルミでは、数か月で代表的な3つの電波銀河が検出された

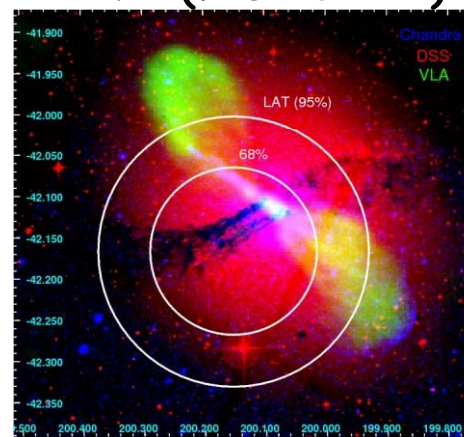
NGC1275(Per A)



M87(Vir A)



Cen A(NGC5128)



円は、エラーサークル

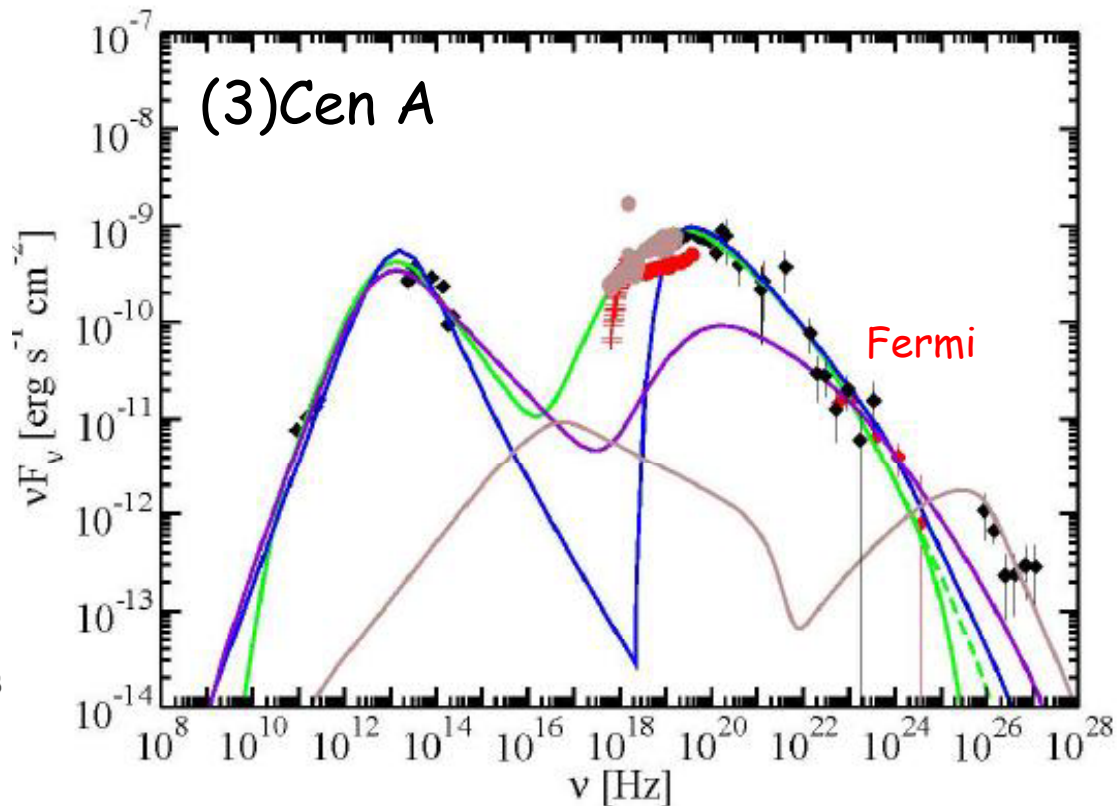
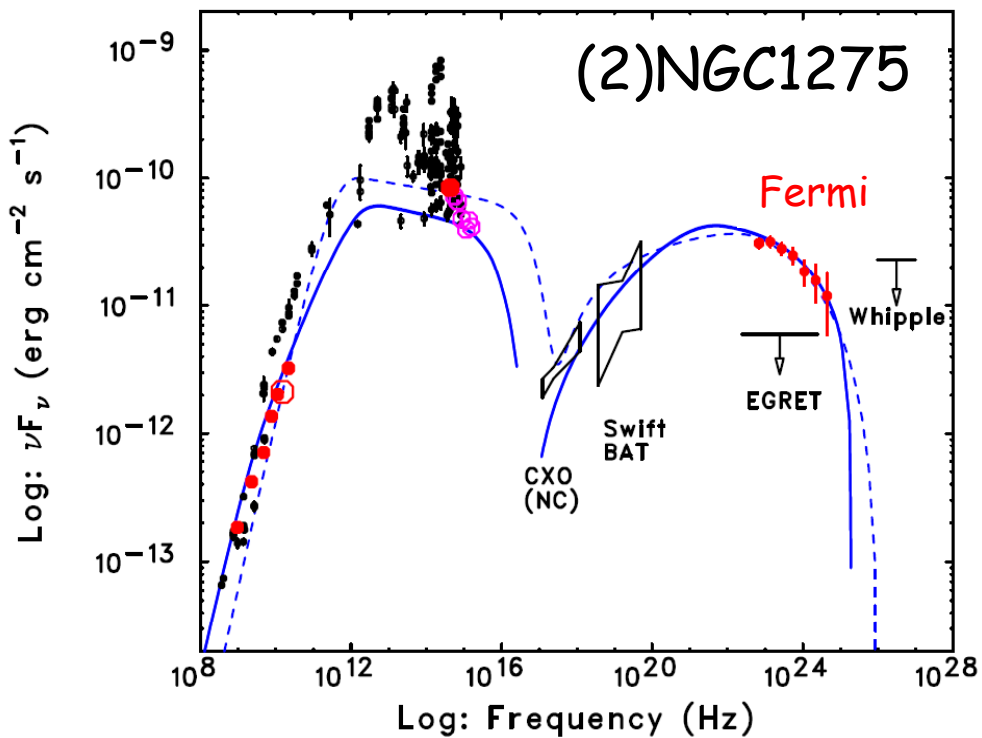
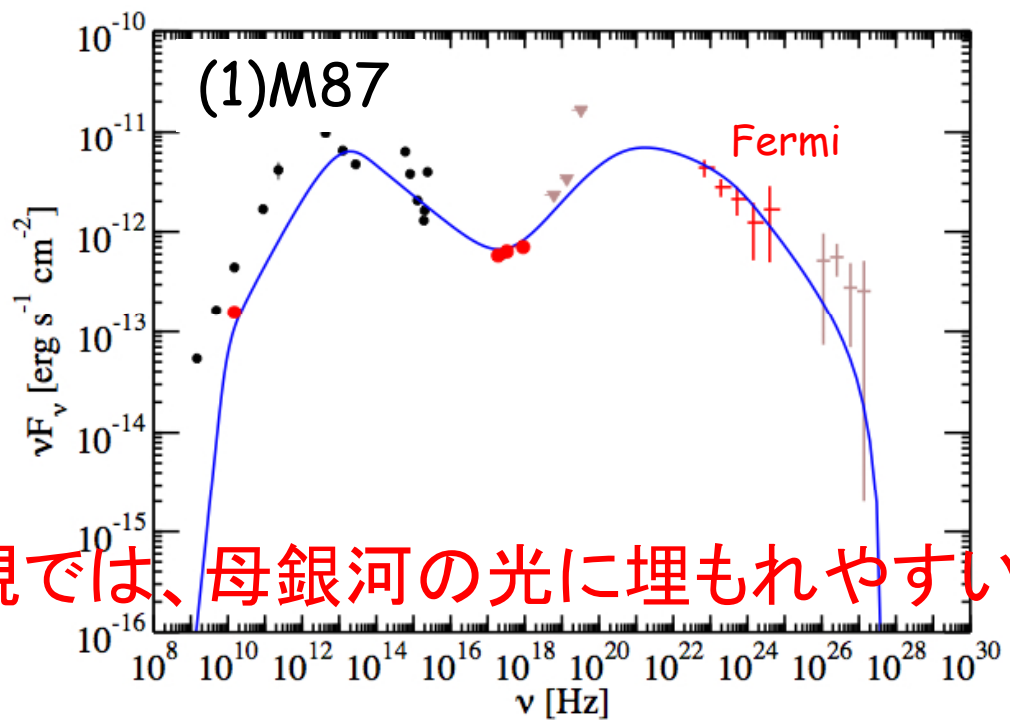
多波長スペクトル

SSCモデルで、だいたい再現できる
 ただし、可視光からX線は、ジェット
 放射がはっきり捉えられていない

	(1)	(2)	(3)
δ	2-3	1.8-5	1-5
B	0.06	0.05-0.2	0.2-2G
θ	10	20-30	20-30度

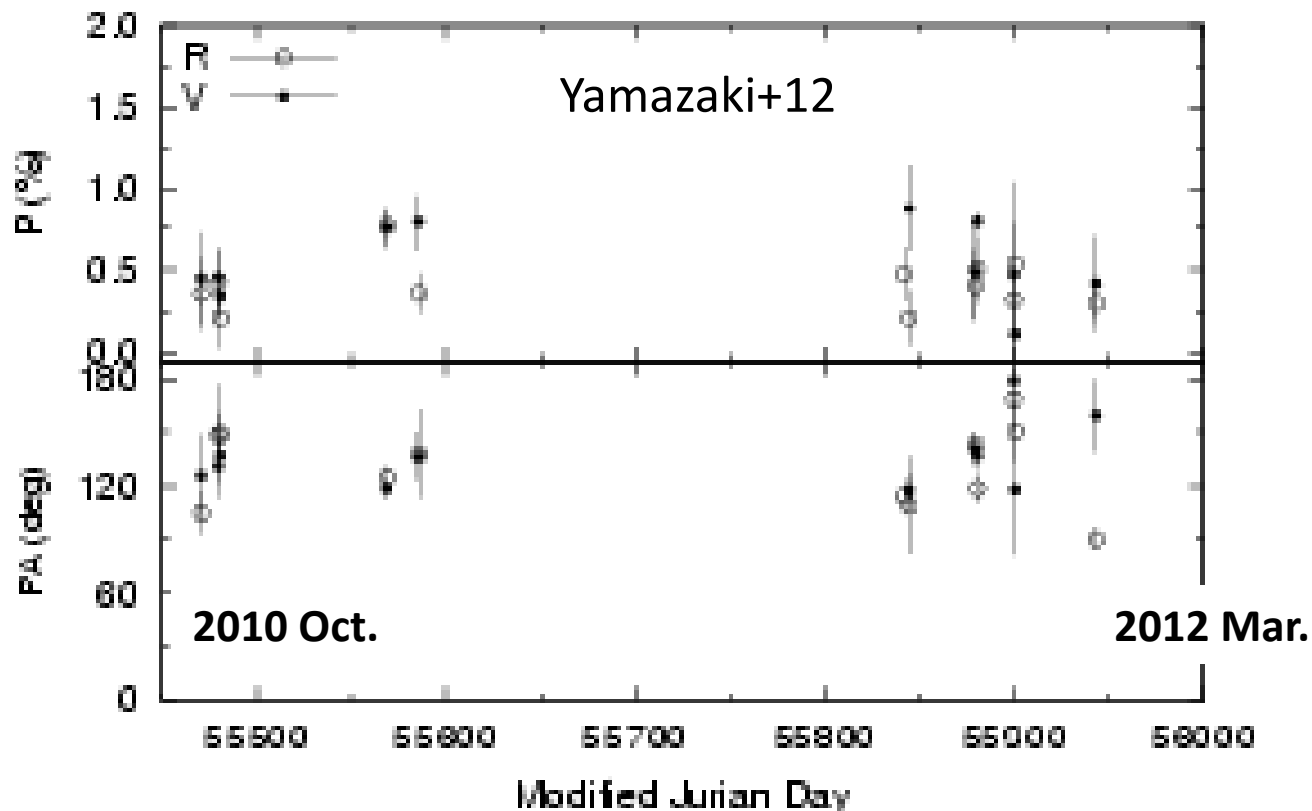
可視では、母銀河の光に埋もれやすい

ジェットの角度 θ が大きめ、 $\Gamma \sim \delta$ も小さめ？



KANATA optical/NIR observations

偏光分光観測が重要



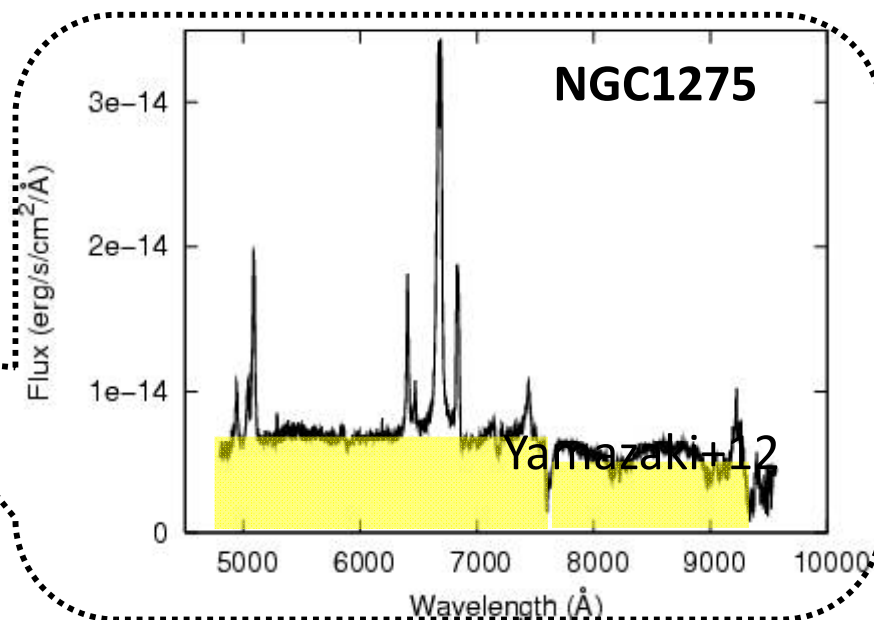
- Polarization <2%
- Interstellar polarization is estimated to be 1.47%
- Systematic error is 0.3%

⇒ Upper limit 1.5%

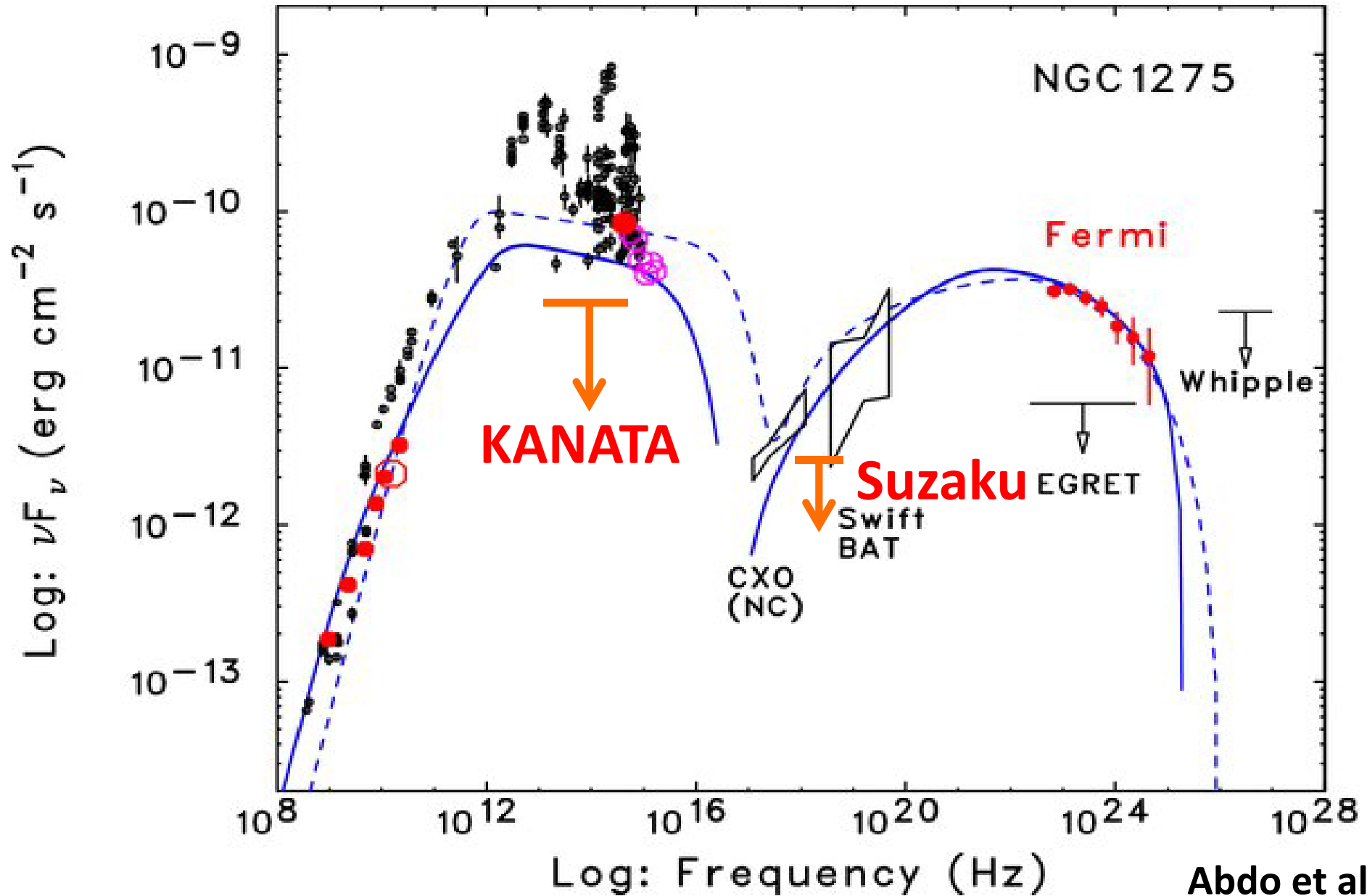
観測日

- Spectroscopic observations
2010 Aug. ~ 2011 Feb.

Variability of the continuum is <15%.



偏光分光観測が重要



Abdo et al. 2009

新しい部類のガンマ線AGN:

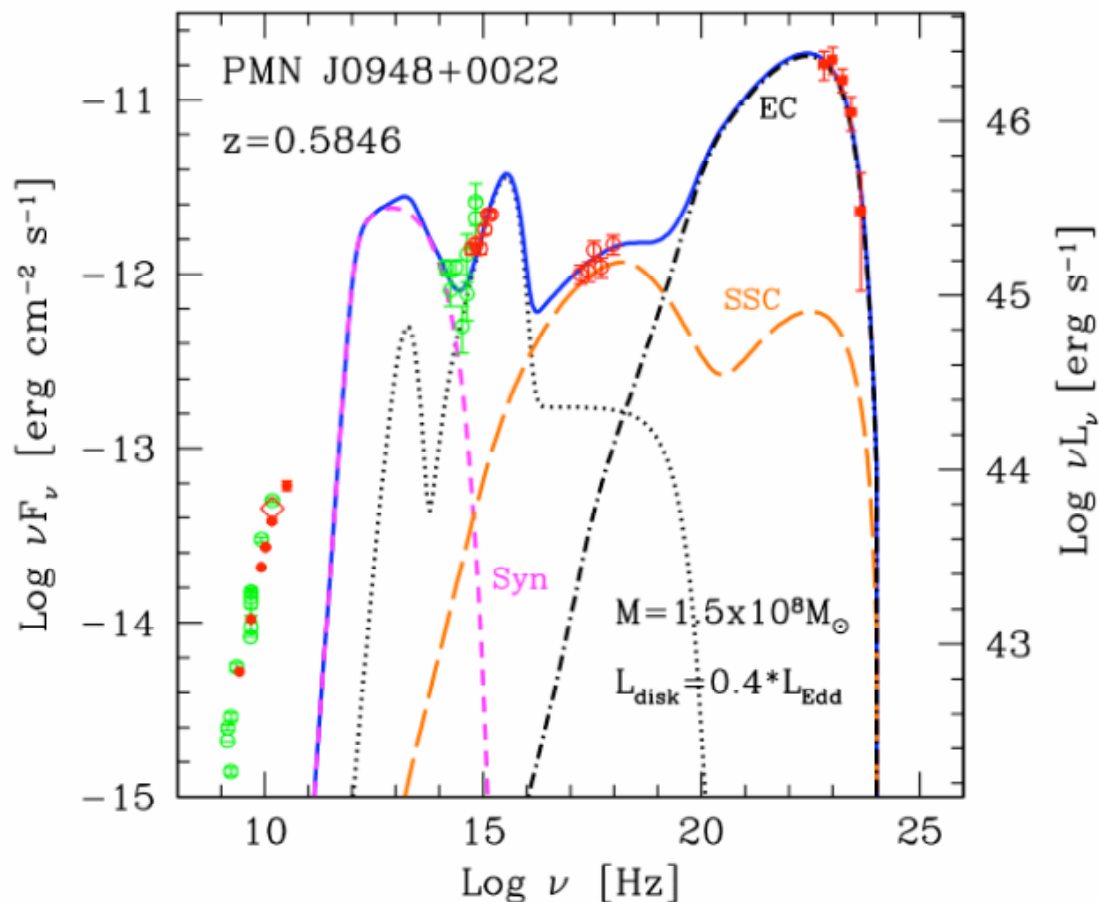
Narrow-Line Radio-loud Seyfert galaxy (NLSy1)

PMN J0948+0022 ガンマ線光度 $\sim 10^{48}$ erg s $^{-1}$

- 小さいBH質量 ($10^{6.7}-10^{8.2} M_{\odot}$) でとても高い降着率 ($\sim 90\%$ Eddington)
(Blazarや電波銀河は、 $10^7-10^{10} M_{\odot}$.)
- Blazarや電波銀河と異なり、渦巻銀河に含まれる
- 電波の構造は非常にコンパクト(ジェットやローブが不明)

多波長スペクトルは、Blazarと同じく、SSC+ECモデルで合う。
ジェットのパワーは、FSRQ型とBL Lac型の間程度

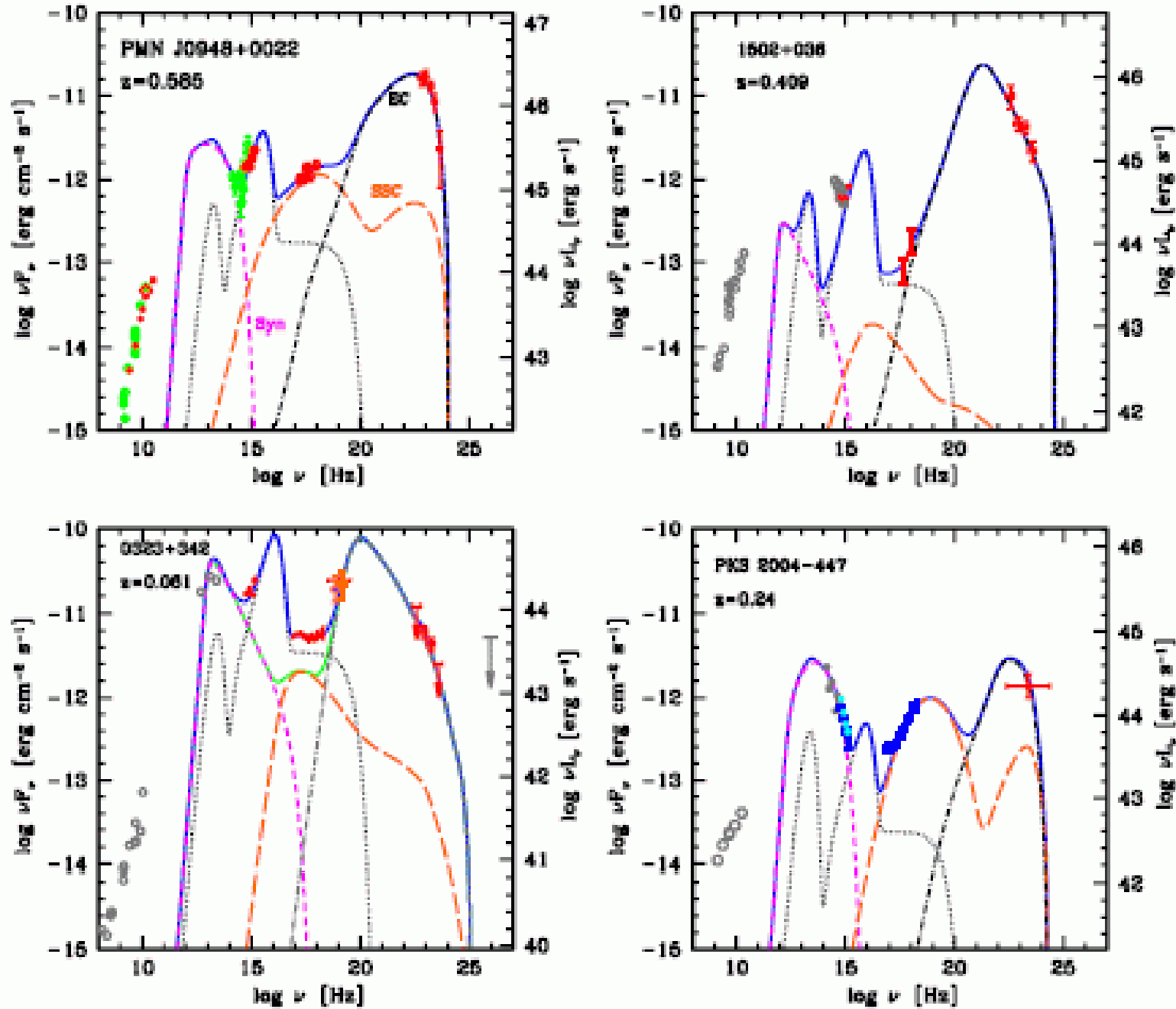
降着円盤とジェットの関係を探るために重要な天体



フェルミで検出されたNLSy1の多波長スペクトル

ブレーザーに比べてdisk放射が強く、放射スペクトルも複雑

可視放射を区別するにいい偏光観測が非常に有効



かなた望遠鏡によるNL RL Sy1の系統的な偏光観測

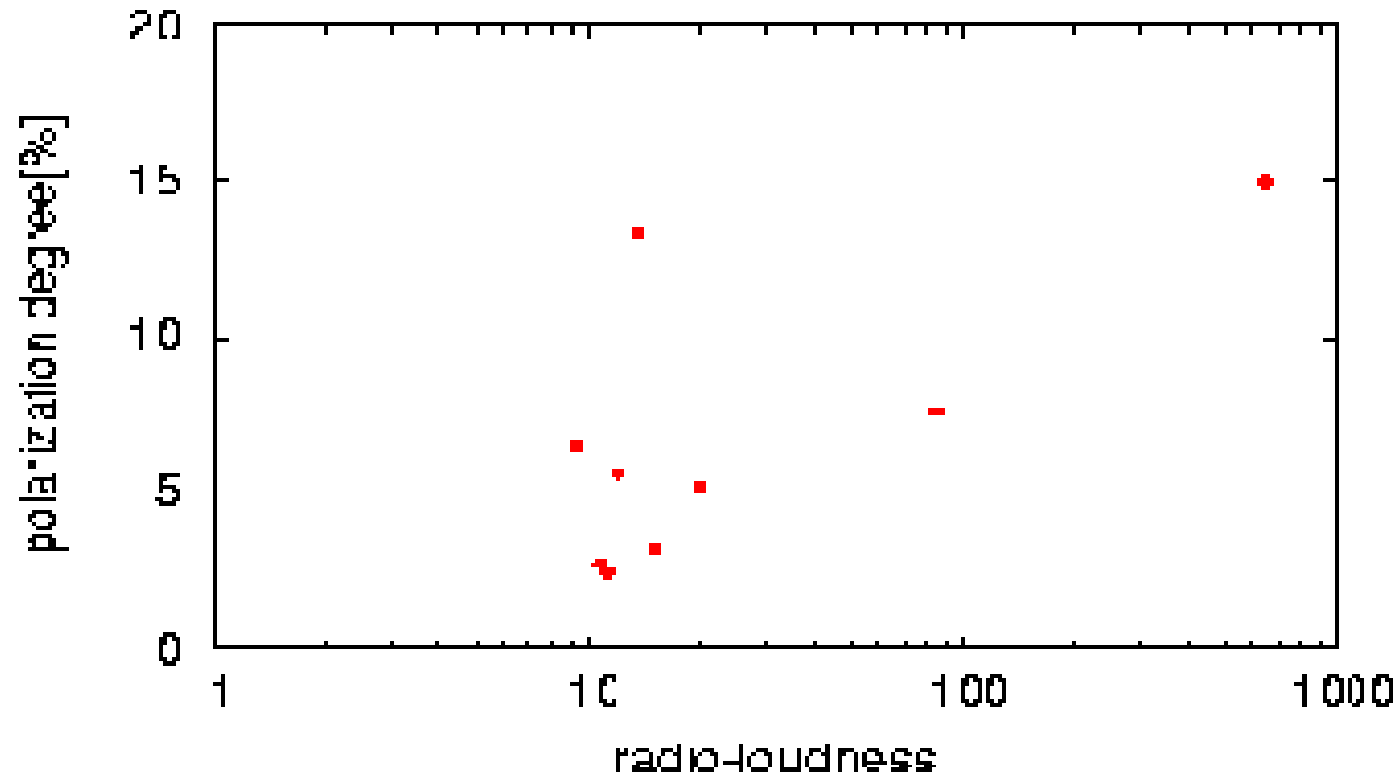
偏光度が高い傾向にある。

偏光度5%前後のものは、不定性大きい。

もっと暗い天体まで精度良くサーベイしたい。

偏光度(%)

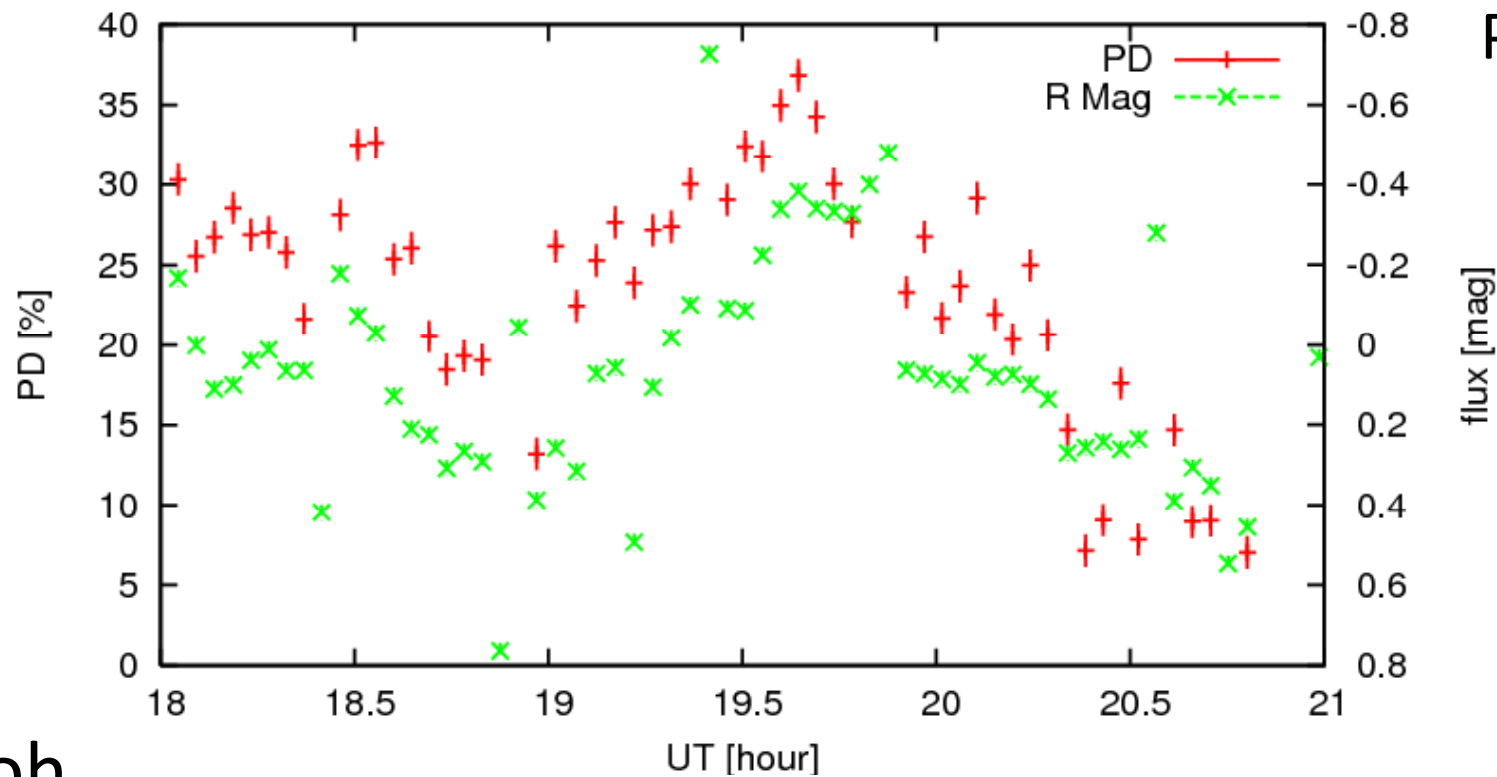
polarization degree-radio loudness



かなた望遠鏡で
偏光測定できるものは、
限られる

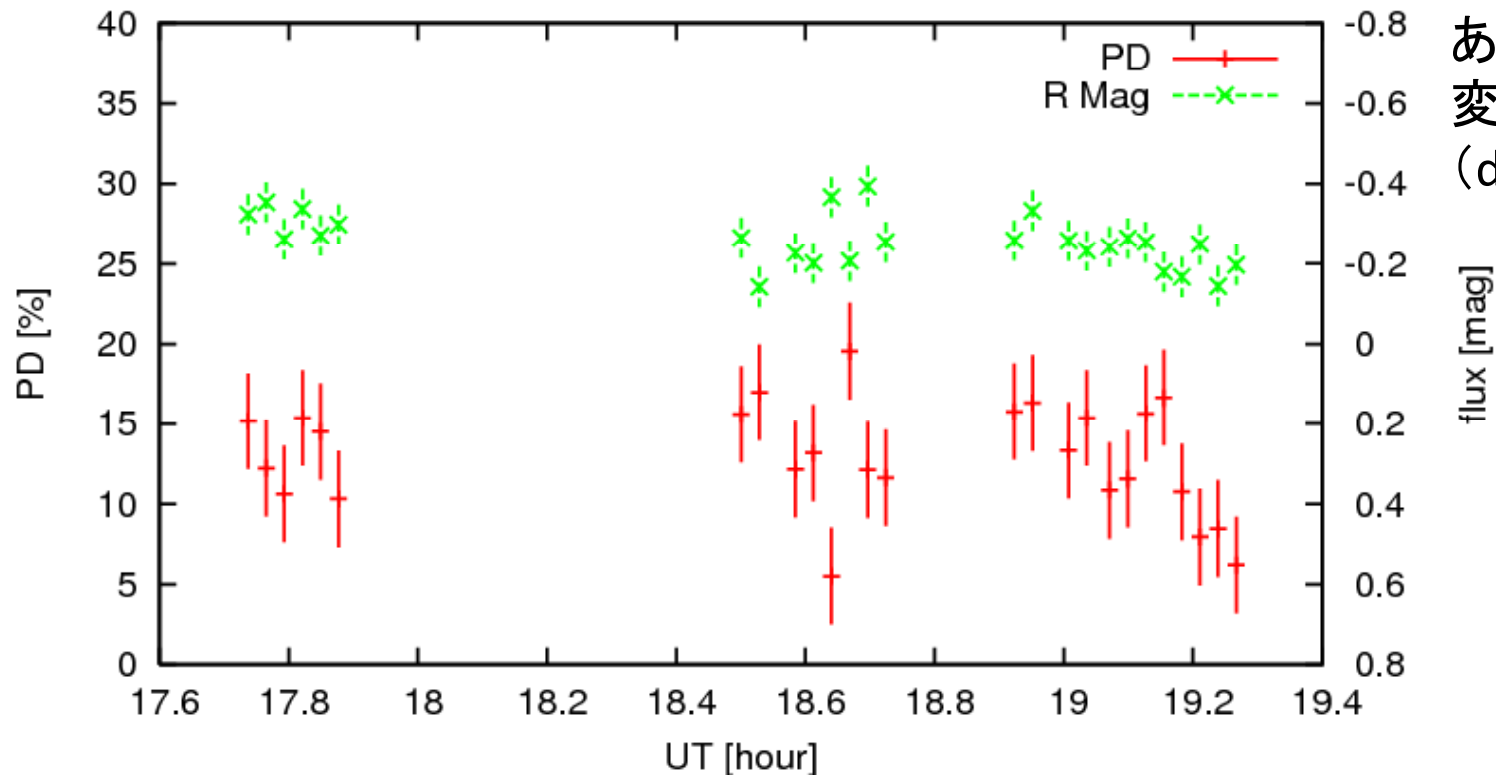
(電波flux/可視flux)

PWN 0948+0022



ある日は、1時間
で偏光度も激しく
変動
(ジェット放射卓越)

Itoh



ある日は、ほとんど
変動なし
(disk放射卓越?)

2m以下の望遠鏡だと、こうした電波銀河やNL RL Sy1などの偏光観測は限られる

偏光分光観測が必要

大型望遠鏡では、突発フレア対応やモニター観測できない

CTA TeV観測で、さらに新たな種族の暗いジェット天体が見つかる可能性がある

多波長スペクトルと正体の理解には、可視偏光が重要

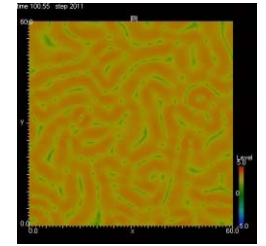
GRB残光の偏光メカニズムと磁場

GRBのジェットの内蔵構造をプローブする重要な手段

シンクロトロン放射： 種磁場の生成

Cf. 當真氏講演

- ✓ プラズマ不安定性 (Weibel instability) によるランダム磁場生成・増大 (フィラメント状の構造へ) (Medvedev & Loeb 1999など)
- ✓ フィールド磁場の流体力学的不安定性による増強 (Sironi & Goodman 07; Inoue+ 11など)



Kato & Takabe 11

コヒーレントな磁場を持つ独立なパッチの集合 Gruzinov & Waxman (1999)

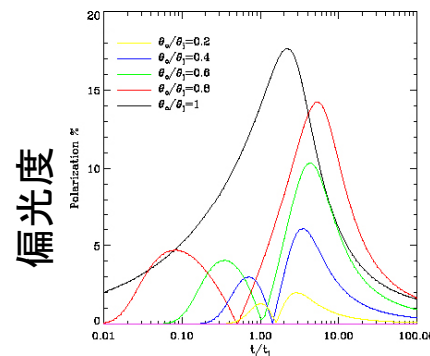
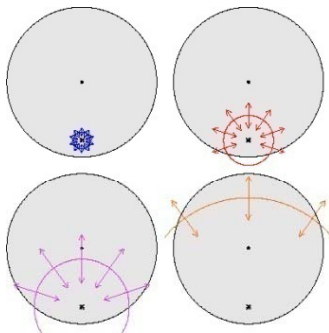


Local rest frame での磁場 coherent length $l \sim c\tau$ (τ : shockからの固有時間)

- Coherentなパッチの数 ~ 50
- 偏光度 $\sim 60\% / \sqrt{50} \sim 8.5\%$

完全にはキャンセルアウトしない数%の偏光

ランダム磁場の圧縮 + 視線からわずかに反れたジェットのビーミング効果 (Sari 1999; Rossi+ 2004など)



爆発からの時刻

視線から反れるほど偏光大
ジェットブレーク前後で方位角が90° 変化

数個のGRBで爆発から0.2~1日後で1-4%の偏光 0.2日より早期のデータは殆ど無かった

GRB 091208B

Normalな残光の特性

Uehara+12

Gamma-ray prompt emission

T_{90} (15-350keV) = 14.9 ± 3.7 sec (GCN Rep. 266.1)

T_0 と T_0+8 sec の間に2つのピーク(前者の方が暗くてソフト)

時間平均スペクトルは単純指数則 指数 1.74 ± 0.11

$E_{\gamma,iso} > 2 \times 10^{52}$ erg (15-150keV)

X-ray afterglow

光度曲線にバンプやミニフレア (3-10keV)

1.6×10^{-10} erg/cm²/sec at T_0+156 sec

光度曲線は broken power-law で表される

$T_0+3.1 \times 10^5$ sec にジェットブレーク?

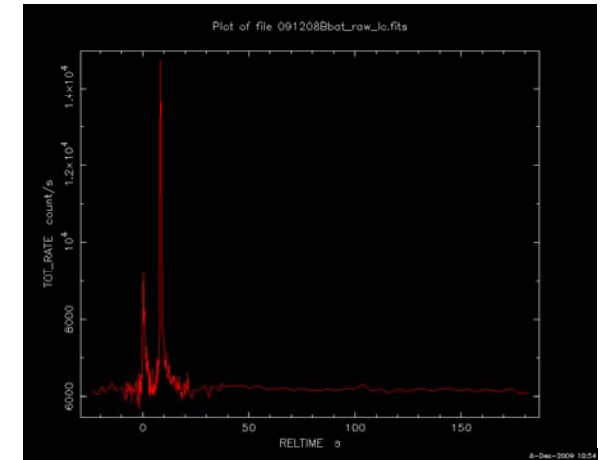
ブレーク前 $\alpha=1.1$ 後 $\alpha=2.3$

$N_H = (2.9 \pm 0.5) \times 10^{21}$ cm⁻² from best-fit spectrum

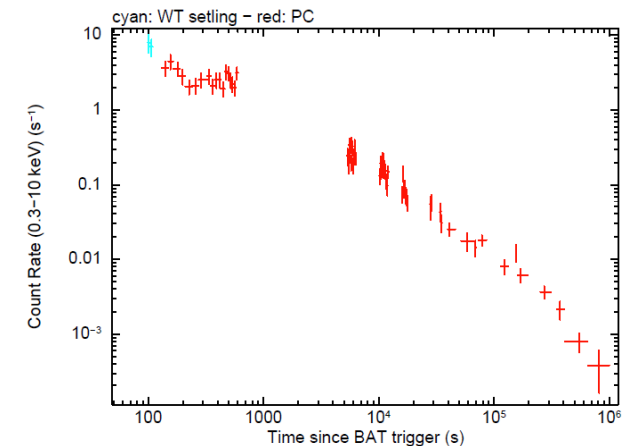
Optical afterglow

$R=16.1$ mag at T_0+77 sec (Nakajima+ 09)

Spectroscopic $z = 1.063$ (Perley+ 09)

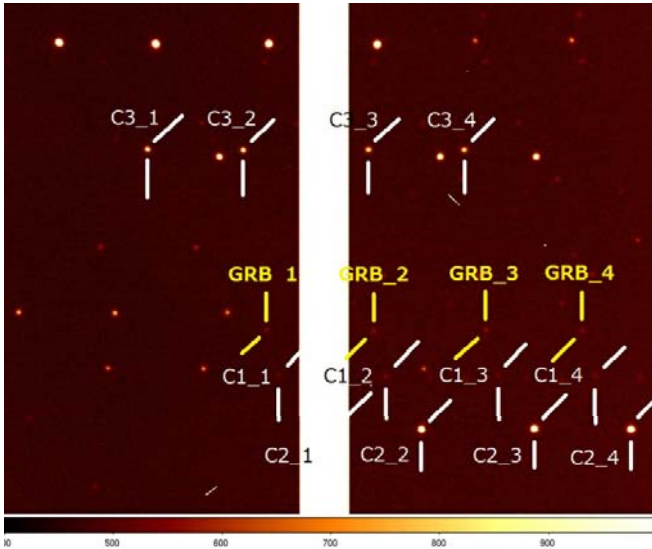


Swift/BAT光度曲線



Swift/XRT光度曲線

GRB 091208B: HOWPoI観測



GCN Notice at 09:50:23 (T_0+25 秒)

Exposure started at 09:52:27 (T_0+149 秒)

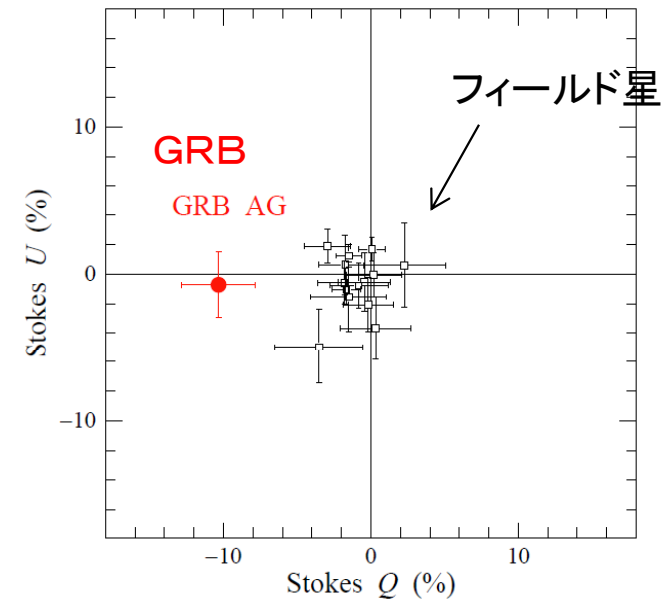
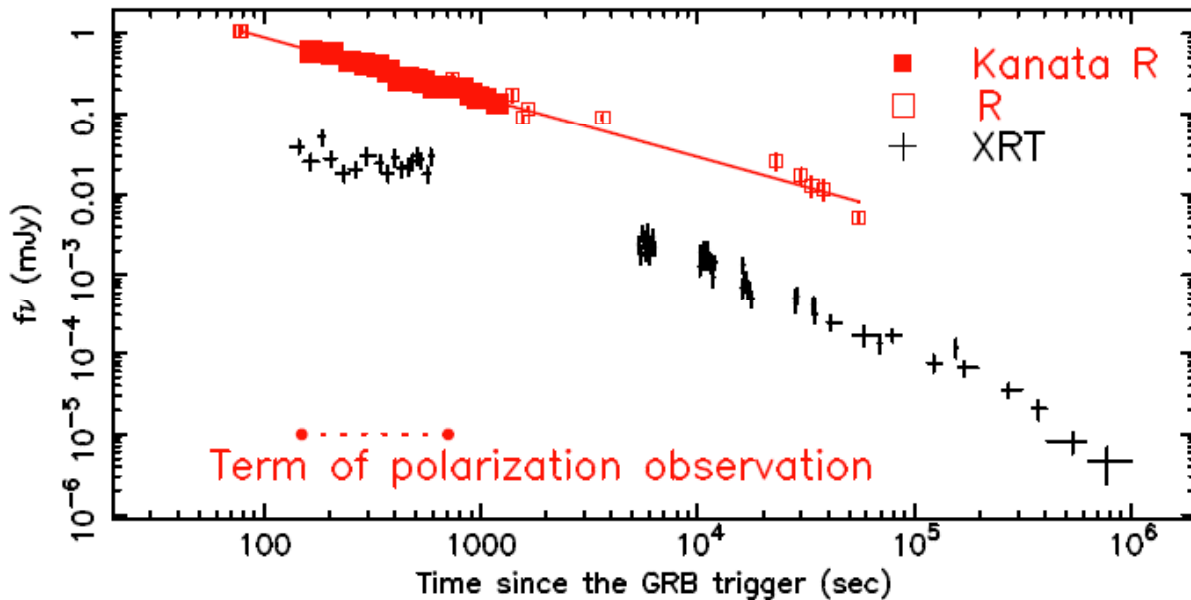
最も早い観測開始例

(1000秒以内の観測報告例としては3例目)

Cf. Mundell+ 2007, Science; Steele+ 2009, Nature

$P = 10.4\% \pm 2.5\%$ ($t = 149 - 706$ s)

※器械偏光補正精度 $\Delta p \sim 0.4\%$ 、
星間偏光(天の川銀河 $<0.5\%$)



Uehara, Toma, KSK et al. (2012)

早期残光偏光観測 (10^4秒) サマリー

- **GRB 060418** (Mundell+ 07; 観測開始 T_0+203 s; $z=1.489$) Liverpool
2m/RINGO
ノーマルな残光 (external forward shock)
無偏光 (upper-limit $p < 8$ %)
- **GRB 090102** (Steele+ 09; 観測開始 T_0+161 s; $z=1.547$)
急減光期 (emission from external reverse shock)
 $p=10\% \pm 1\%$
- **GRB 091208B** (Uehara+ 12; 観測開始 T_0+149 s; $z=1.063$)
ノーマルな残光 (external forward shock)
 $p \sim 10\% \pm 3\%$
- **GRB 111228A** (This study; 観測開始 T_0+243 s; $z=0.714$)
ノーマルな残光 ? ただし進化ゆっくり (可視光ピーク $\sim T_0+10^3$ s その後 $\alpha=-0.6$)
 $p \sim 17\% \pm 4\%$ (増光期) $\rightarrow 10\% \pm 1\%$ 付近; 方位角 おおよそ 90° 回転
- **GRB 121011A** (This study; 観測開始 T_0+92 s; z 不明)
ノーマルな残光? (可視光ピーク $\sim T_0+650$ s 前後で $\alpha = +1 \rightarrow -1$)
無偏光 (upper-limit $p < 4$ %)

Kanata1.5m/HOWPol

もっと暗くなるまで偏光観測したい

偏光の変化の測定をすることにより、ジェット構造を制限

偏光測定精度を向上したい

偏光が弱いものについて、上限値ではない値を求めたい。

X線でもプロンプト放射の偏光観測が進みつつある

残光の可視偏光とともに相補的