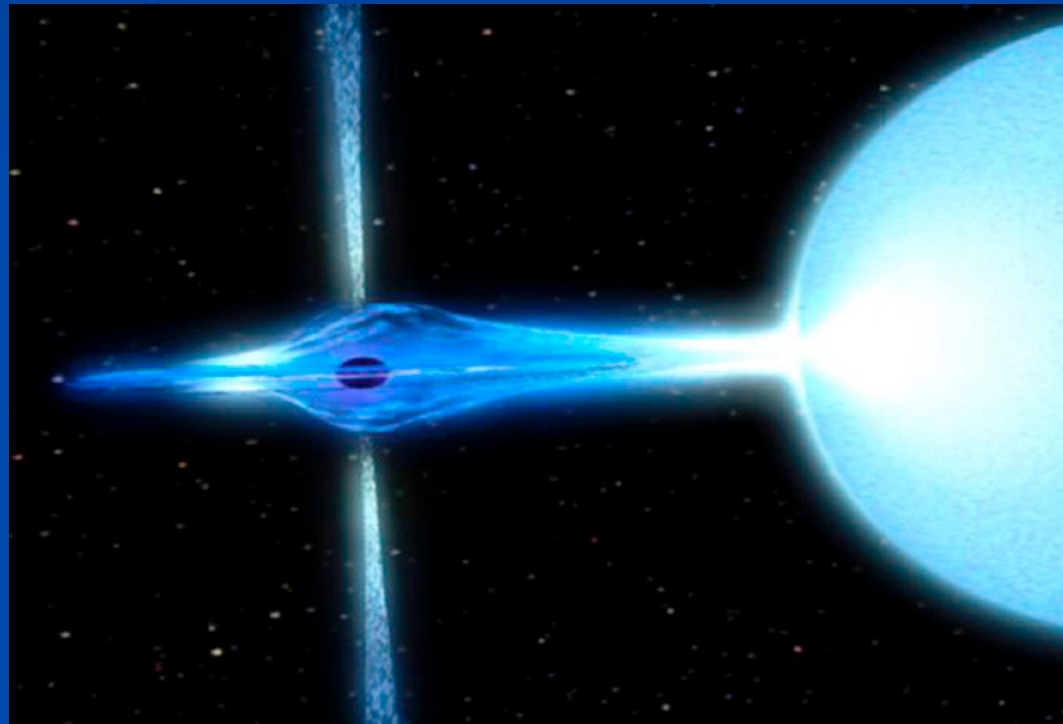


マイクロクエーサー からのジェット



上田佳宏（京大宇宙物理）

Introduction

ブラックホール降着流研究の意義

- 相対論的ジェットの起源
 - 莫大なエネルギー解放 > 円盤からの電磁波放射
 - エネルギー源＝重力エネルギーだが変換プロセスは謎
- 質量降着率に依存した降着モードの理解
 - 放射、移流、アウトフローへのエネルギー配分
- 質量スケールで規格化できる普遍の物理の探査
 - 恒星質量ブラックホールとAGN
- 宇宙物理学全体の重要問題（井上進トーク）
宇宙降着史、宇宙構造形成の理解に不可欠

マイクロクエーサー

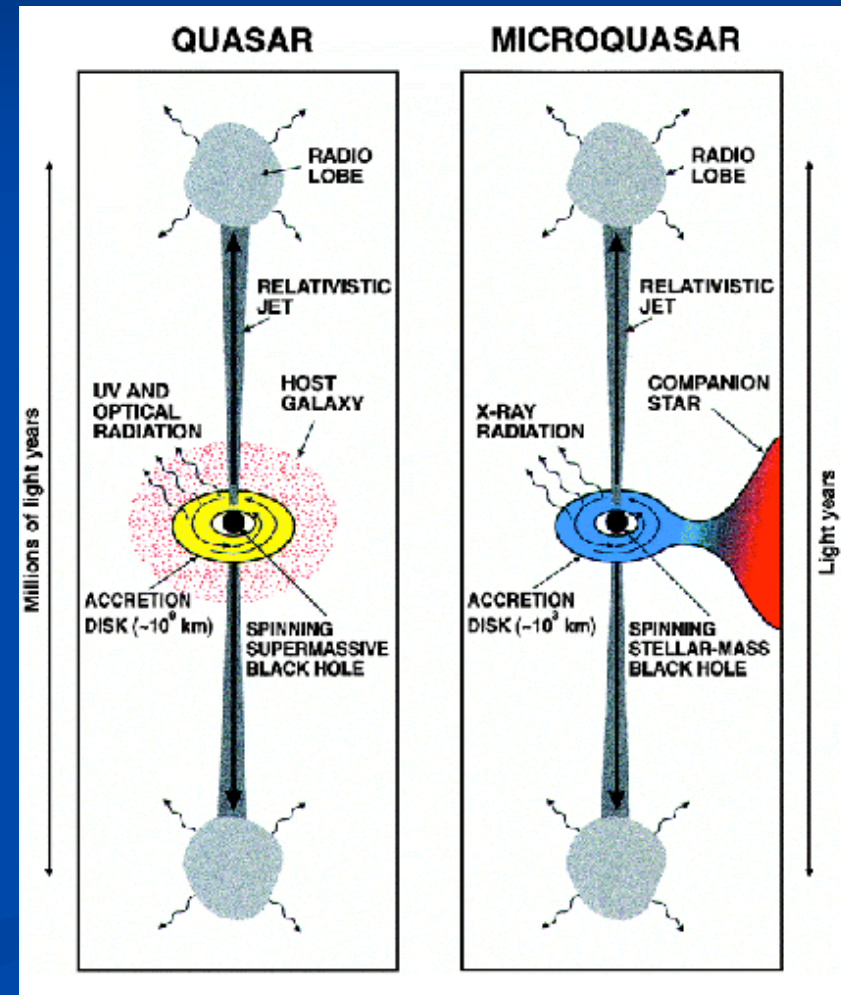
(狭義: 超光速ジェットを示すブラックホール連星)

マイクロクエーサー($M_x \sim 10 M_\odot$):
クエーサー ($10^6\text{--}9 M_\odot$) の縮小版

Ideal targets to study disk-jet connection

disk $\leftarrow$ X-ray
jet $\leftarrow$ radio~optical

AGN	vs	MicroQSO
$M \sim 10^8 M_\odot$		$\sim 10 M_\odot$
$r \sim \text{pc}$		$\sim 10^{11} \text{ cm}$ ($\Delta t \sim \text{sec}$)
$r \sim \text{kpc}$		$\sim 10^{14} \text{ cm}$ ($\Delta t \sim \text{hour}$, $\theta \sim \text{mas}$)

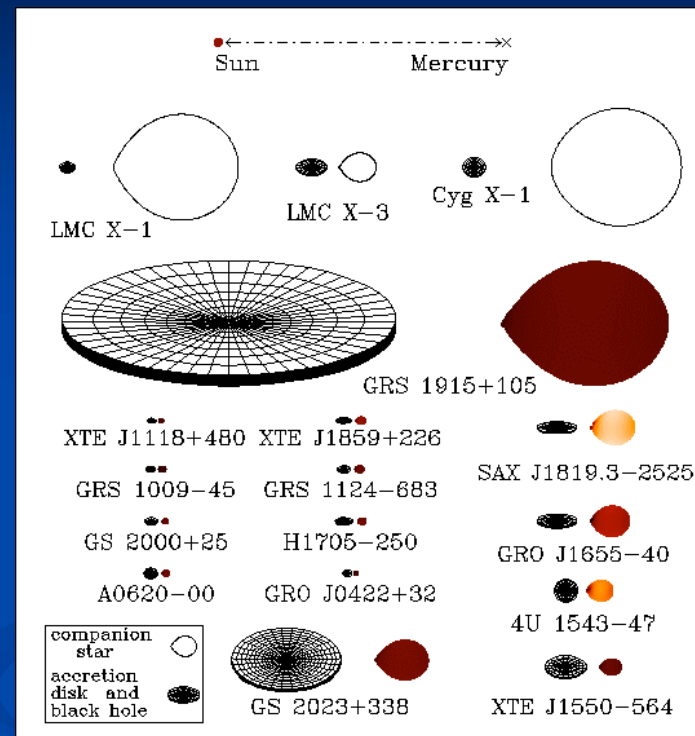


Mirabel & Dodriguez (1998)

マイクロクエーサーの例

ブラックホール連星	ジェット速度
SS 433	$V=0.26c$
GRS 1915+105	$V = 0.92-0.98c$
GRO J1655-40	$V = 0.92c$
XTE J1550-564	$V_{app} > 2c$
1E1740.7-2942	$V \sim 0.27c$
Cyg X-1	$V > 0.3c$

All BHCs in the Low/Hard State



C: J. Orosz

中性子星連星

Cir X-1 $V_{app} > 15c$

Sco X-1 $V \sim 0.5c$

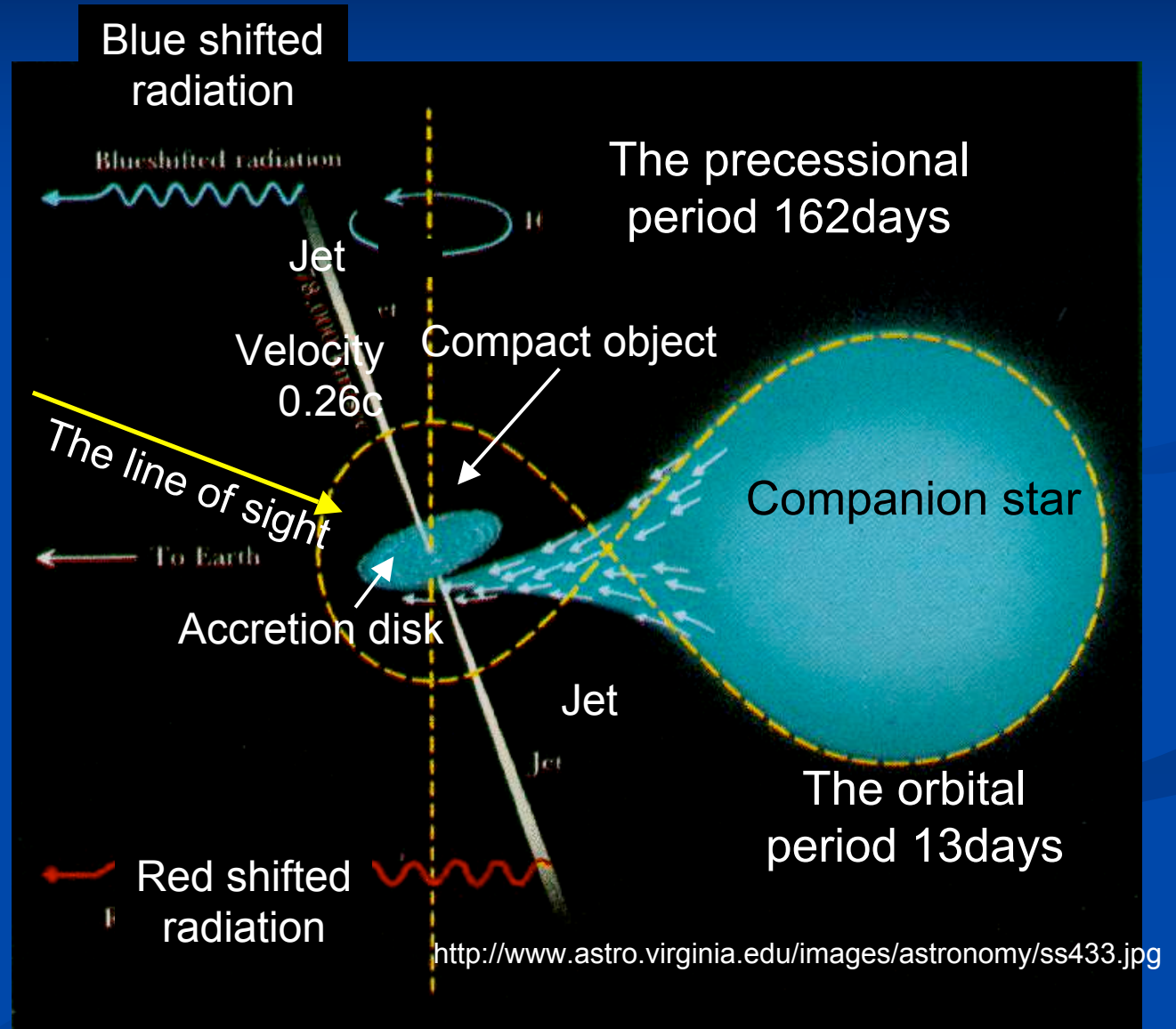
Z-sources

ブラックホールか中性子星か未決着

Cyg X-3 $V=0.3c$

SS 433: いつまでも特異天体？

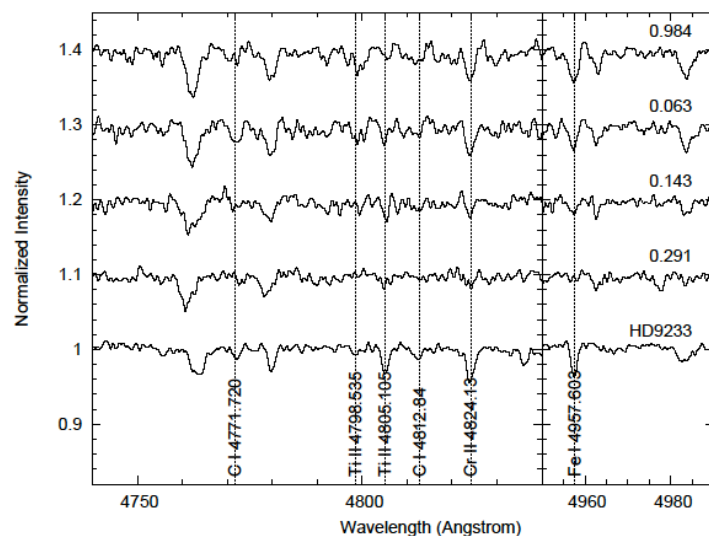
- e-p ジェット
($v \sim 0.26c$)
- Inner disk obscured
- Super critical accretion (jet kinetic power $\sim 10^{40}$ erg/s)
- コンパクト星は未同定(BH or NS)



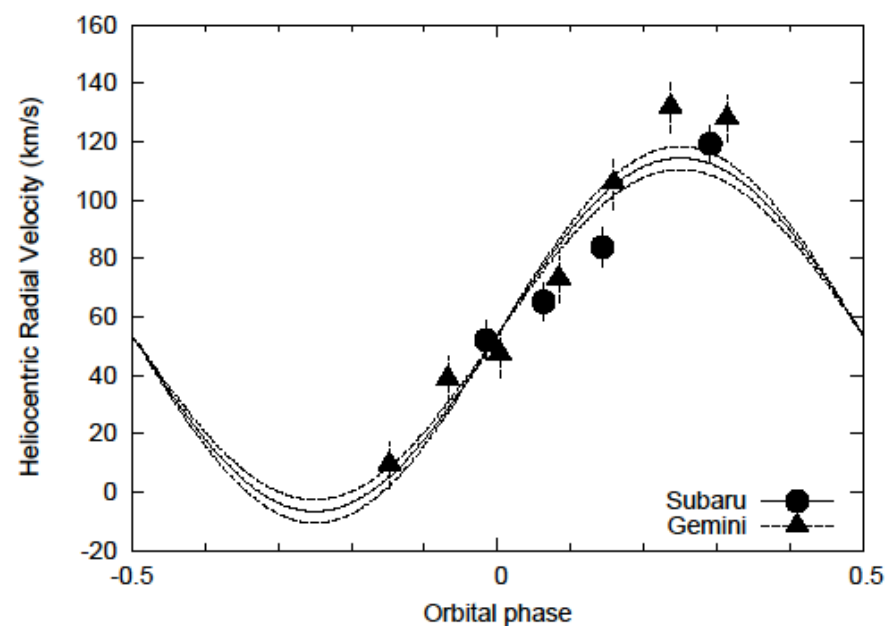
Subaru Observations of the mass donor star in SS 433

Kubota, YU+ (in prep)

Subaru Normalized Spectra



Radial Velocity Curve
(Subaru + Gemini)



Identification of the compact star in SS 433

Kubota, YU+ (in prep)

- $K_o = 60.5 \pm 4.0$ km/s (our work)
- $K_x = 168 \pm 18$ km/s (Fabrika & Bychokova 1990, Gies et al. 2002)
- $M_o = 12.6 (+4.2 -3.4) M_o$
- $M_x = 4.5 (+1.3 -1.1) M_o$

SS 433のコンパクト星はブラックホール！

GRS 1915+105

GRANAT衛星により発見
(Castro-Tirado+ 1992)

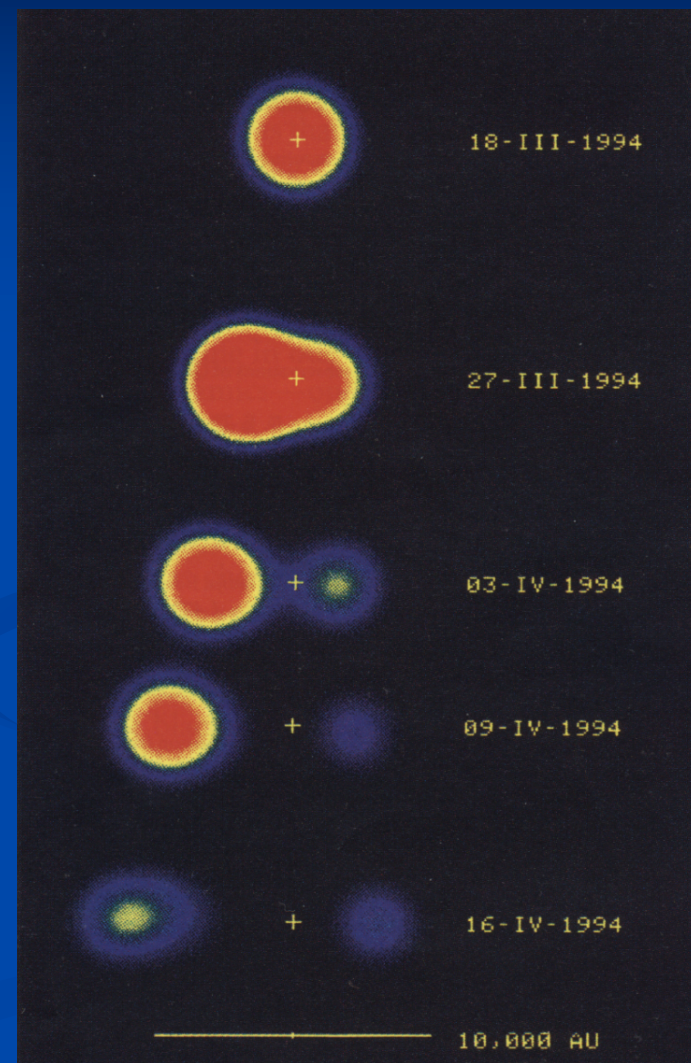
最初に発見された系内「超光速」運動
真のジェット速度 = $0.92-0.98 c$
傾斜角 70°

(Mirabel & Rodriguez 1994
Fender+ 1999)

質量関数

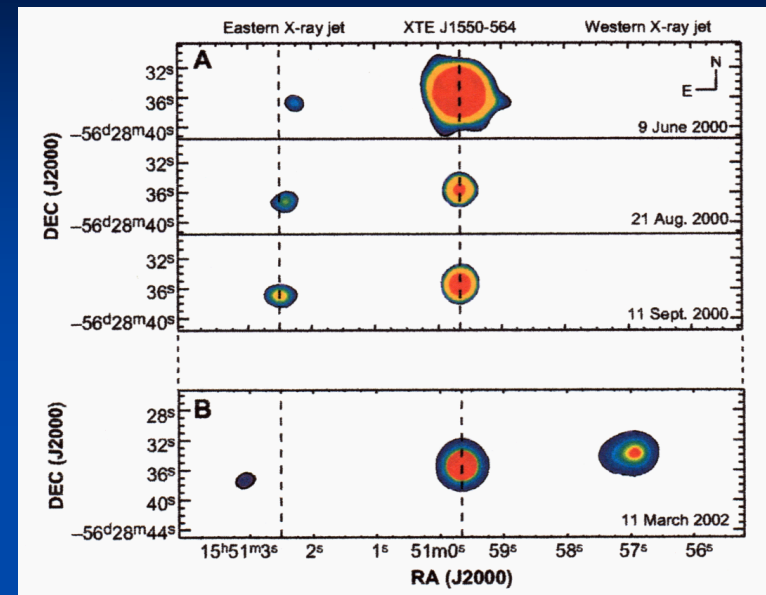
$$M_x = 14 \pm 4 M_\odot \text{ (Greiner+ 2001)}$$

→ ブラックホール



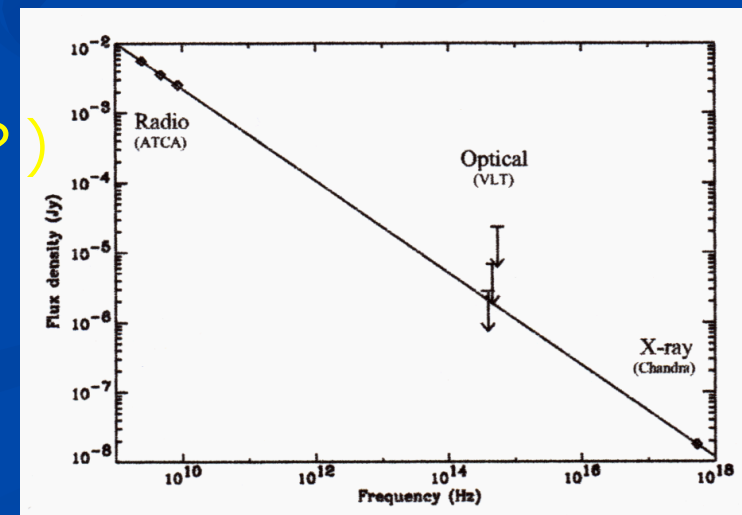
X線でも光る超光速ジェット XTE J1550-564

- 1998年9月20日
短い (<1日) 巨大X線フレア
(Sobczak+ 2000)
- 1998年9月24日
超光速運動する電波ジェット
(Hannikainen+ 2001)
- $M_X = 10.5 \pm 1.0 M_{\text{solar}}$
(Orosz+, 2002)



(Corbel + 2002)

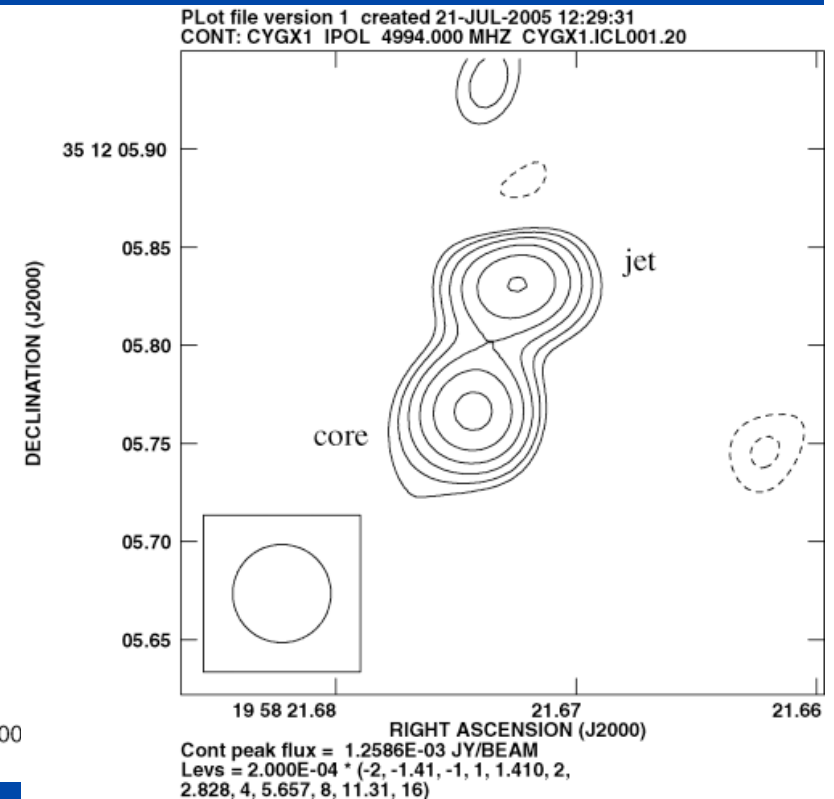
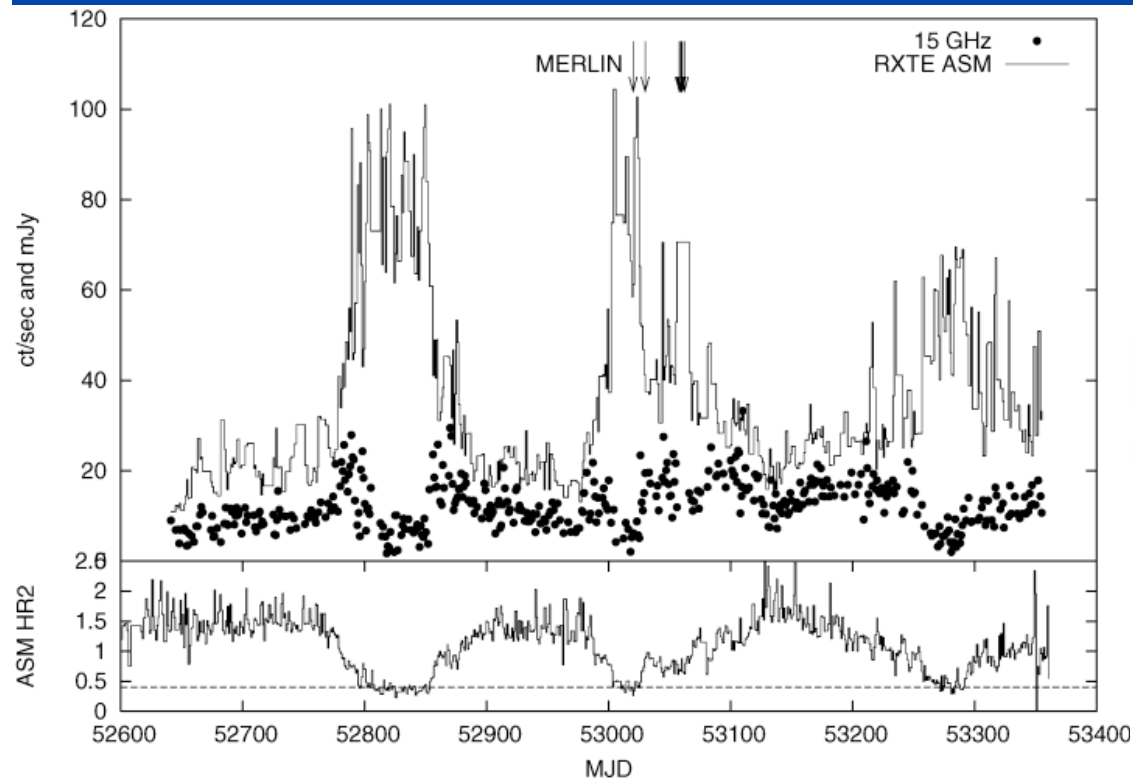
- ジェットは減速
- X線までシンクロトロンとすると (?)
→ 電子は10 TeVまで加速



Transient Jet from Cyg X-1

- Relativistic Jets are common phenomena in stellar mass BH
- Timing of ejection not clear

Fender+ 2006

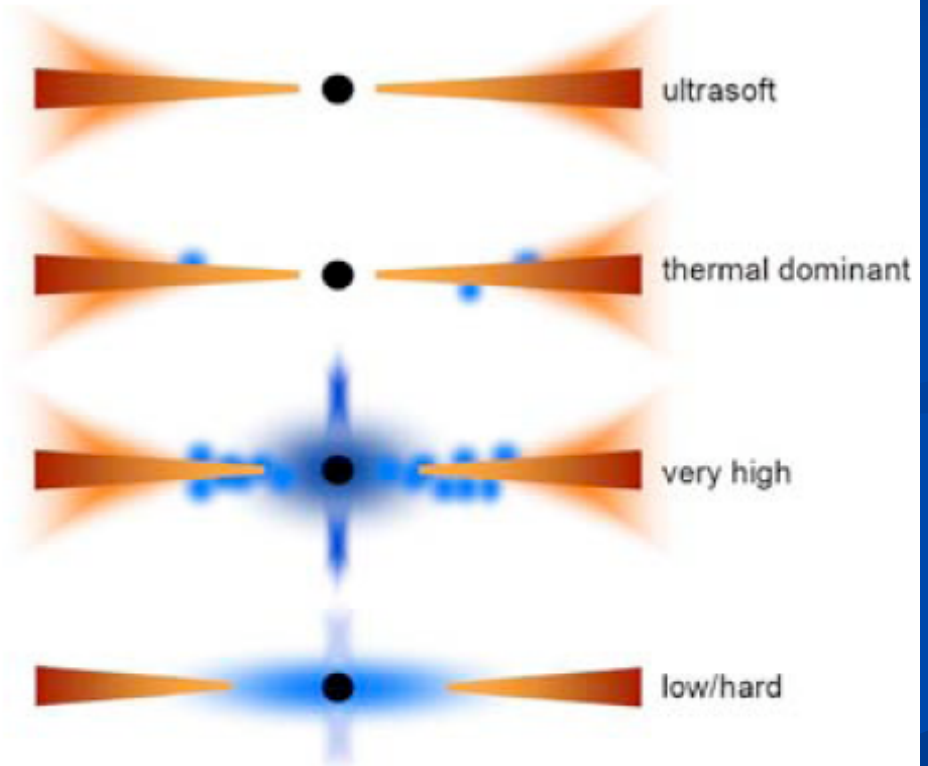
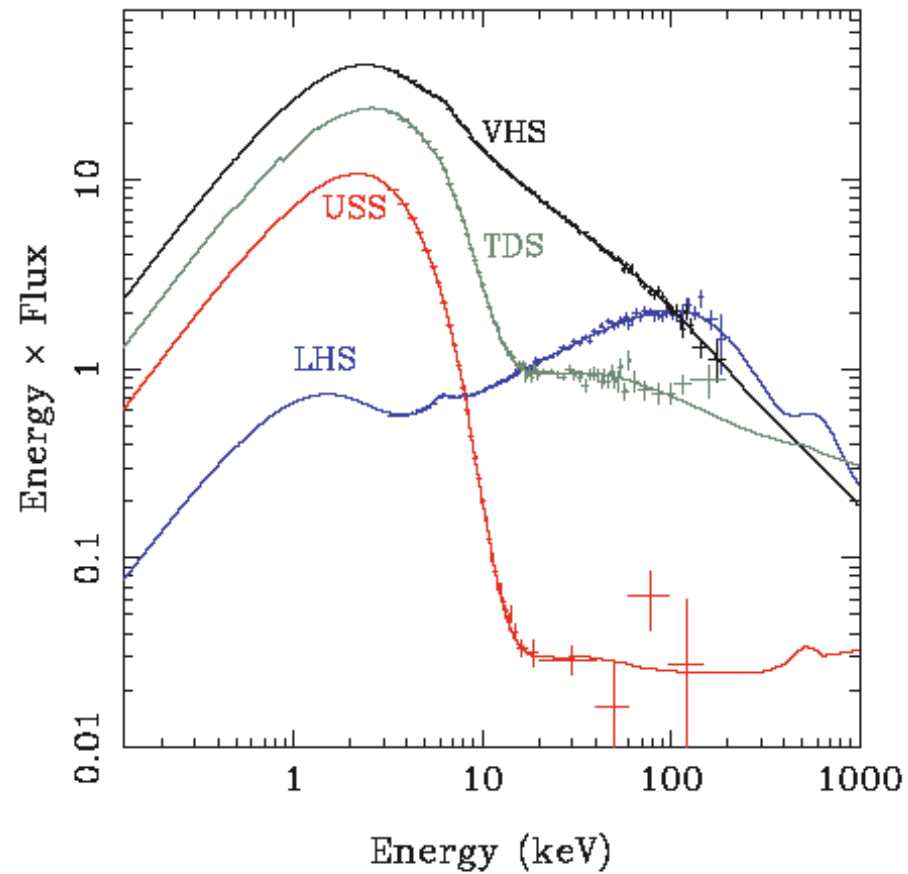


ブラックホール降着円盤の 状態 (state)

BHBの状態変化

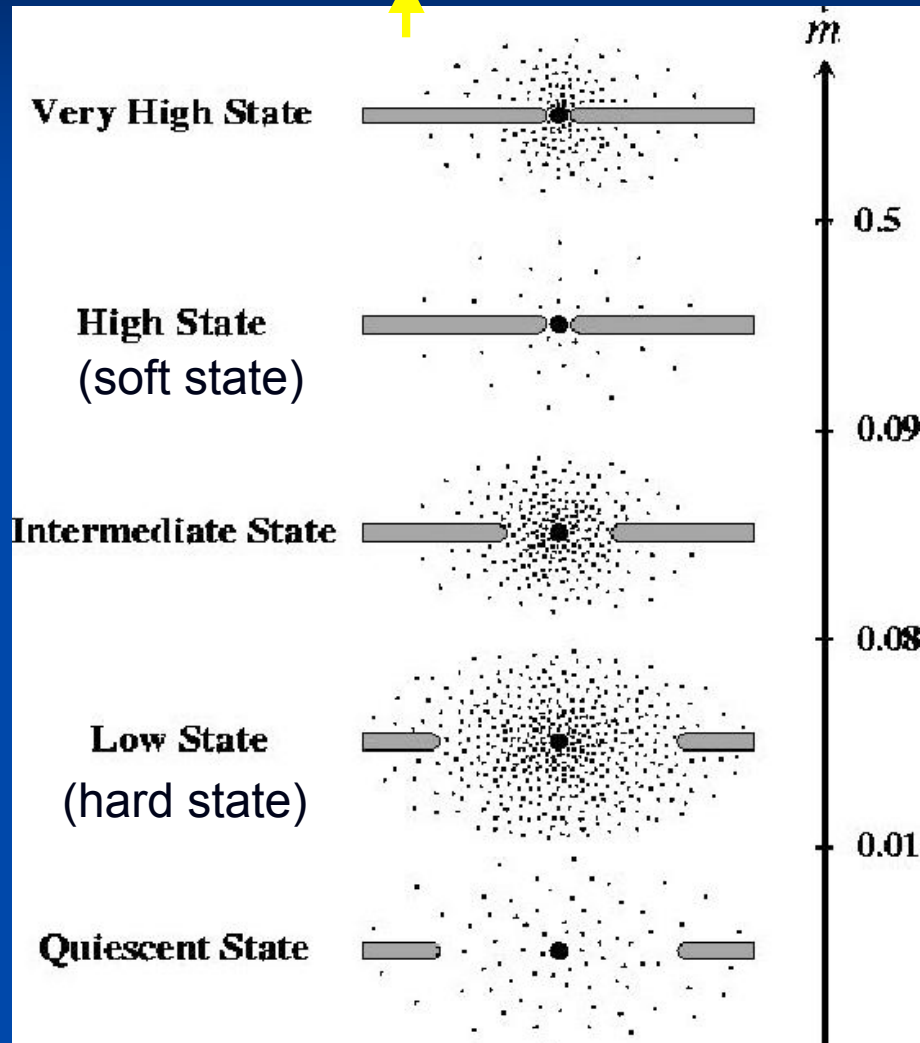
GRO J1655-40

Done+ 2007



State as a function of accretion rate

Slim disc (opt. thick ADAF) at $\dot{m} \gg 1$



When accretion rate is high

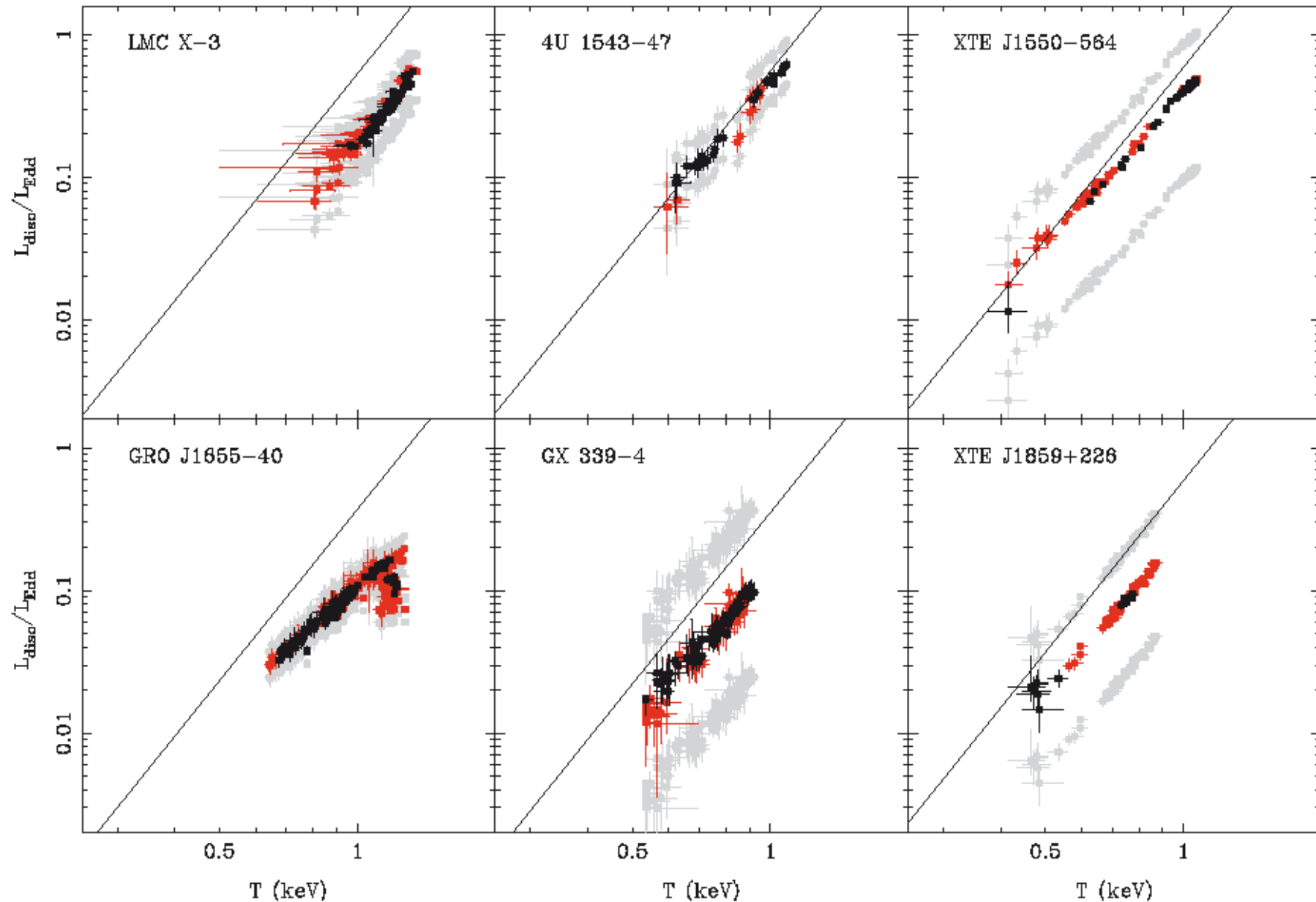
- optically thick disc (standard disc) extends to the innermost stable orbit
- strong soft X-rays (blackbody like)

When accretion rate is low

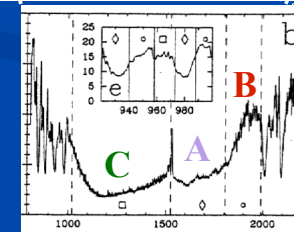
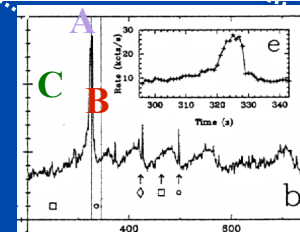
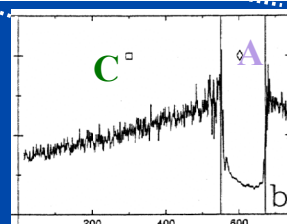
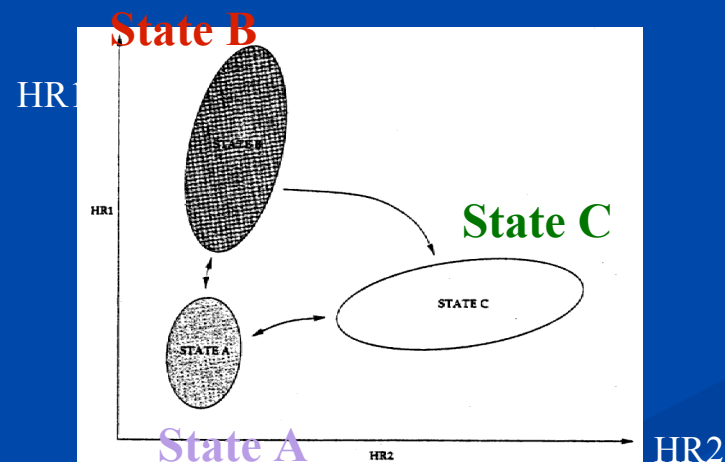
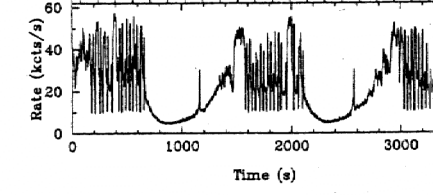
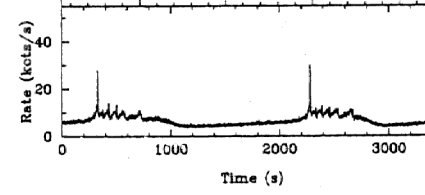
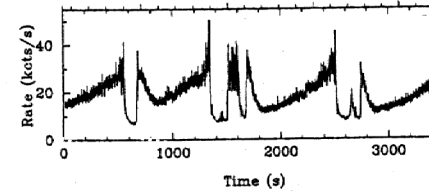
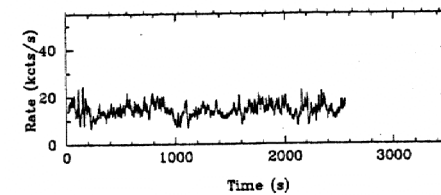
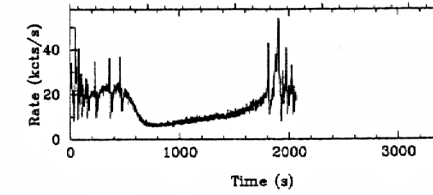
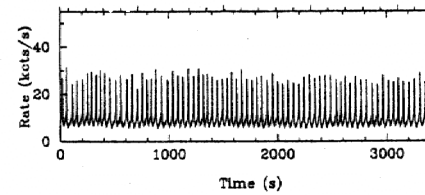
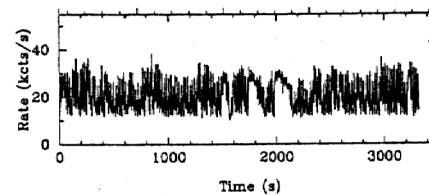
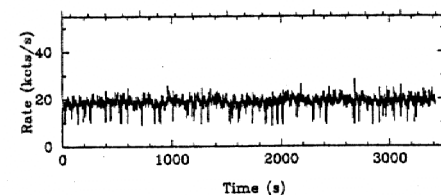
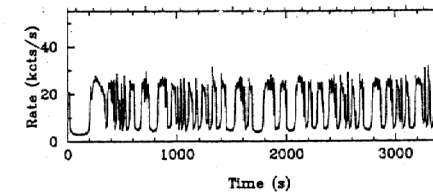
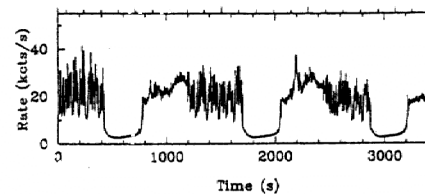
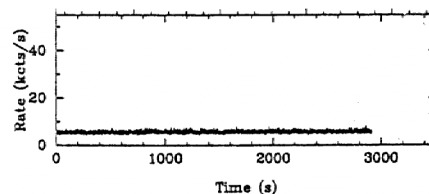
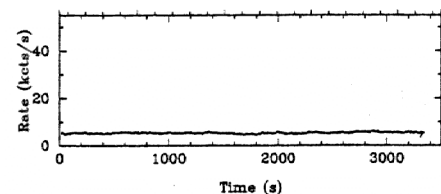
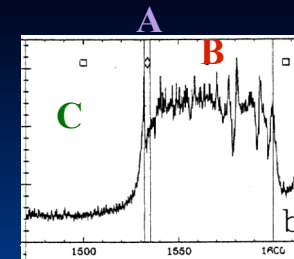
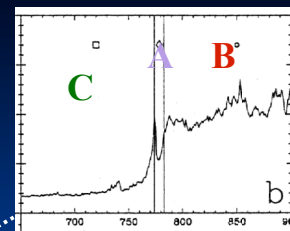
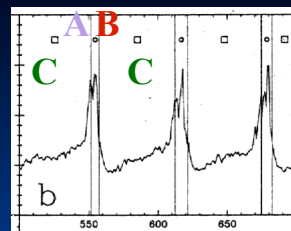
- ADAF: hot corona
- strong hard X-ray emission via Comptonisation (power law)

Disk Component ($L \propto T_{\text{in}}^4$)

Done+ 2007



GRS 1915+105 のX線変動 (Belloni+ 2000)

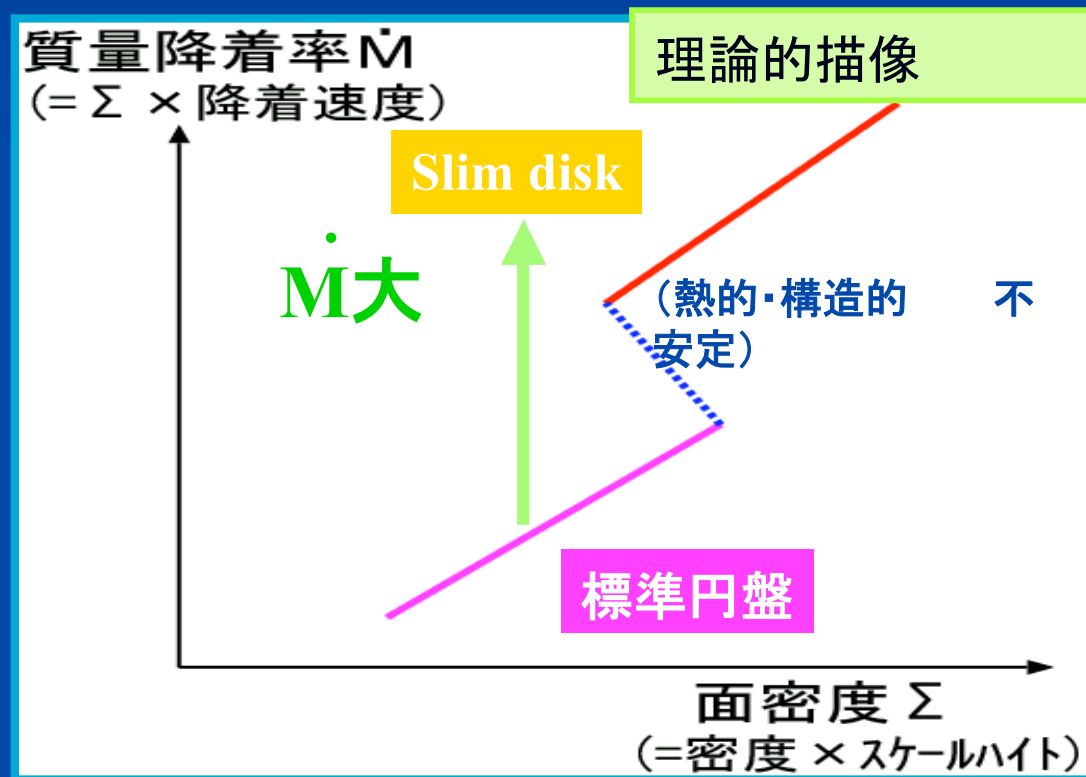


時間変動は3基本状態間の遷移

高質量降着率下での降着円盤の理論 標準円盤 とスリム円盤 の遷移

State C: 標準円盤 + strong Comptonization ?

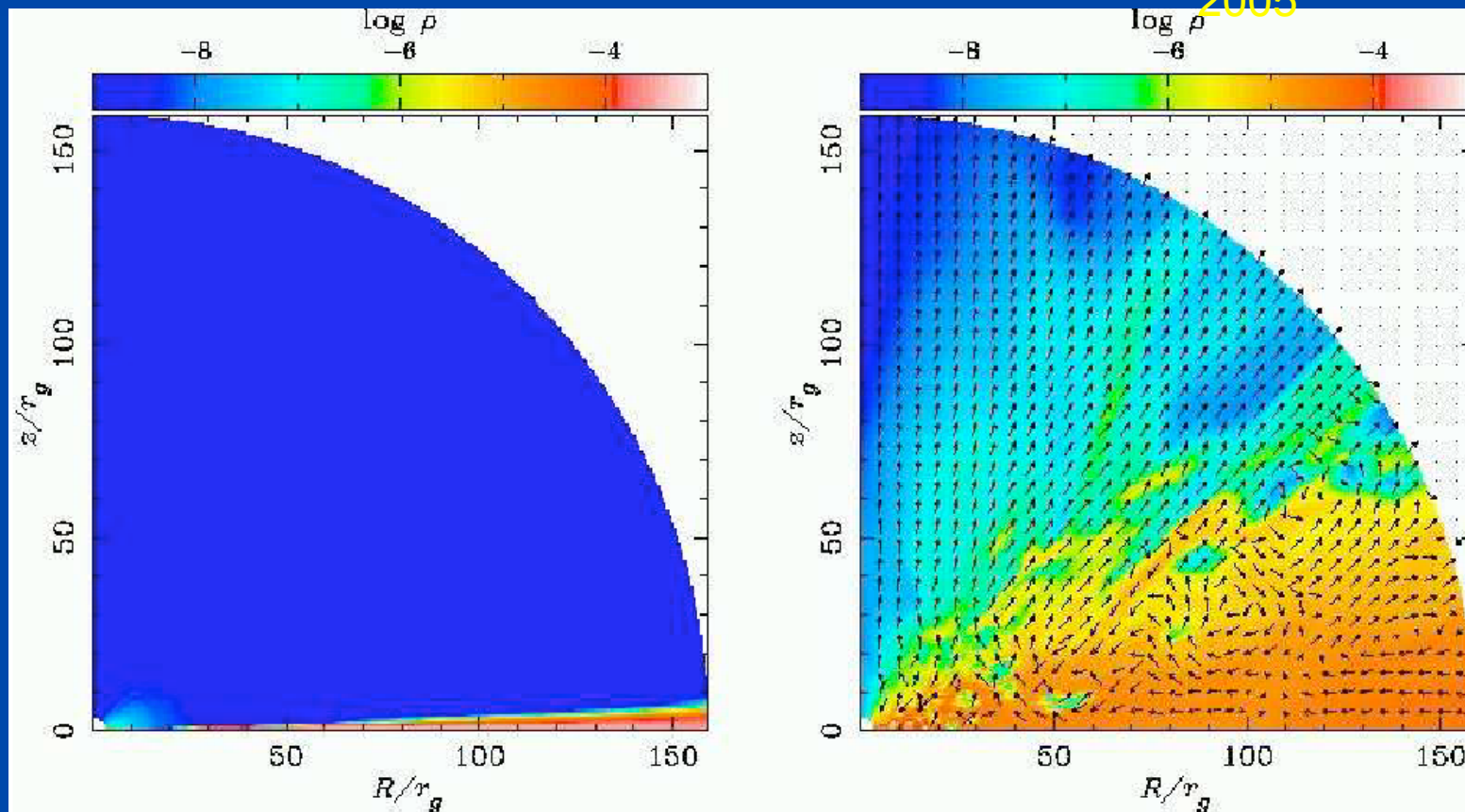
State A/B: 最内縁まで伸びた標準円盤? or スリム円盤?



観測 vs 理論

- 2次元放射流体シミュレーションとの比較
- Limit cycleはよく再現している

Ohsga
2005



BHBジェットの種類

Jets from microquasars

(* the numbers are for the case of GRS 1915+105)



1. Large flare with superluminal motion

- $S \sim 1$ Jy (optically thin)
- time scale: rise ~ 1 day, decay: months
- $P_{\text{jet}} > 5 \times 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$



2. Repeated flare in the “oscillation” state (so far only from GRS 1915+105)

- $S = 10\text{-}300$ mJy
- time scale = 20 minutes $\sim$ hours
- $P_{\text{jet}} > 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$



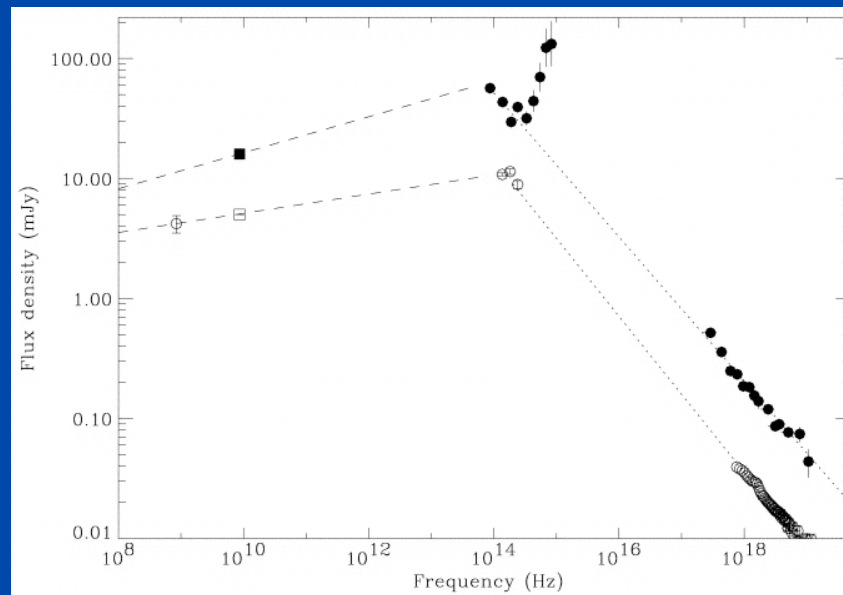
3. Compact jet in the low/hard state or very high state

- $S = 1\text{-}50$ mJy (optically thick)
- Persistent
- X-ray spectra: strong Comptonization by hot corona:
Radiatively Inefficient Accretion Flow + Truncated accretion disc?

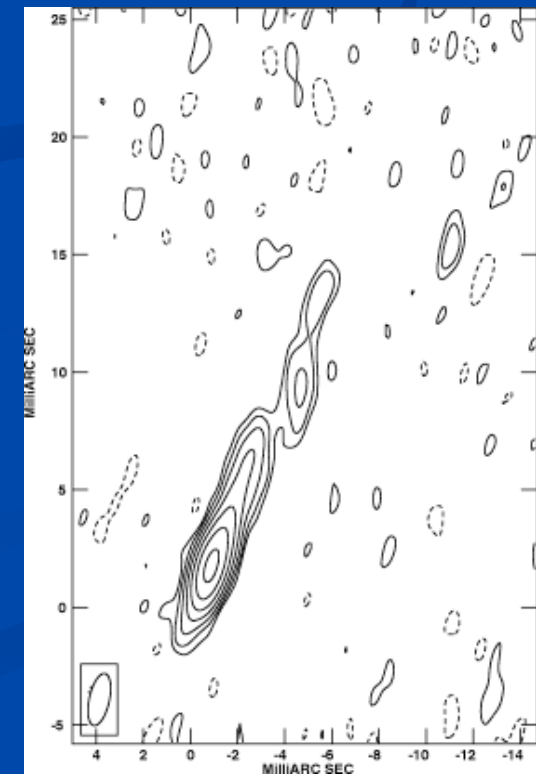
Low/Hard stateでのコンパクトジェット

- Low/Hard Stateのブラックホールから検出(恒常的に存在)
High/Soft Stateでは消滅
- フラットスペクトル(近赤外まで)
→光学的に厚いシンクロトン放射

GX339-4 (Corbel & Fender 2002)

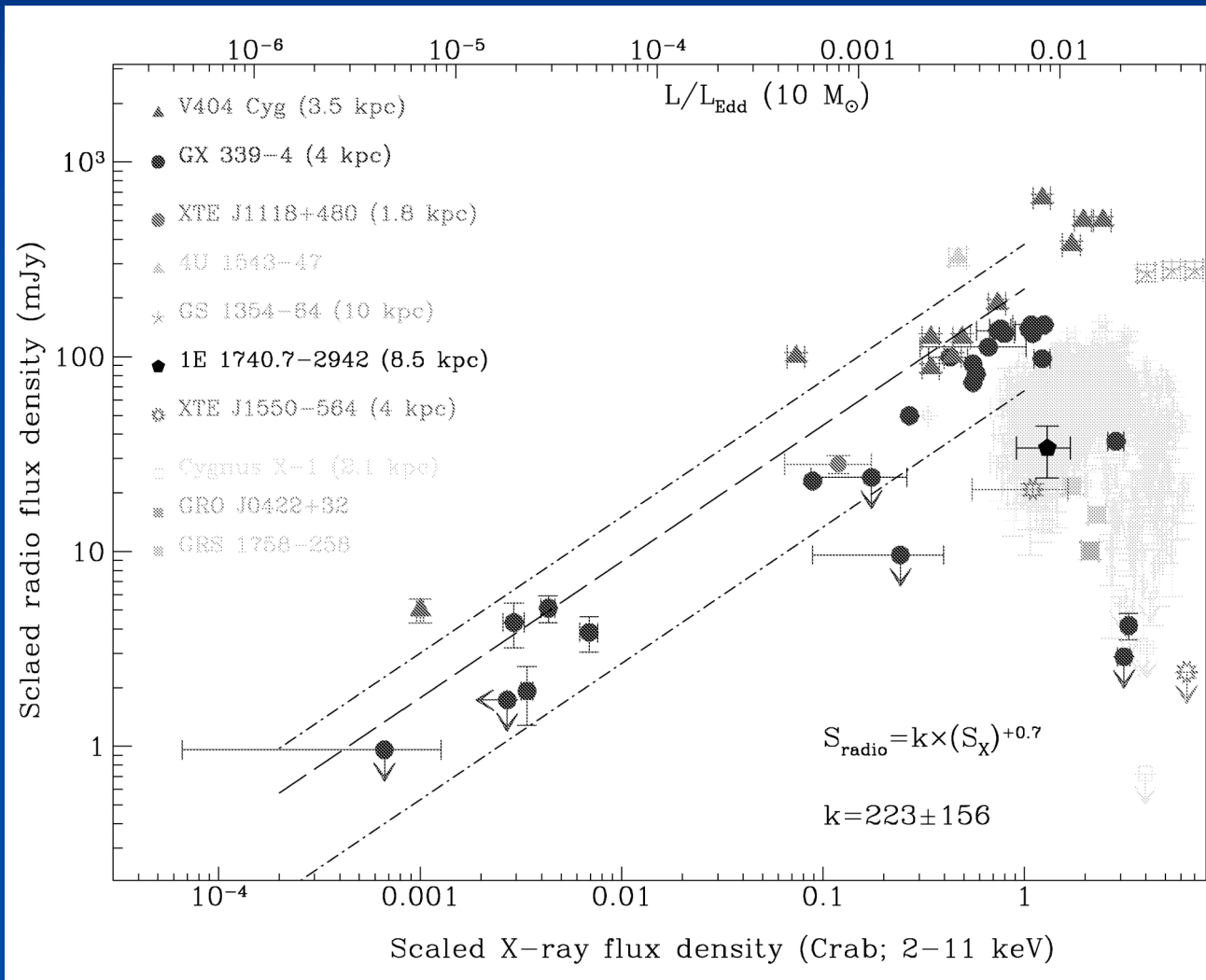


Cyg X-1 (Stirling+)



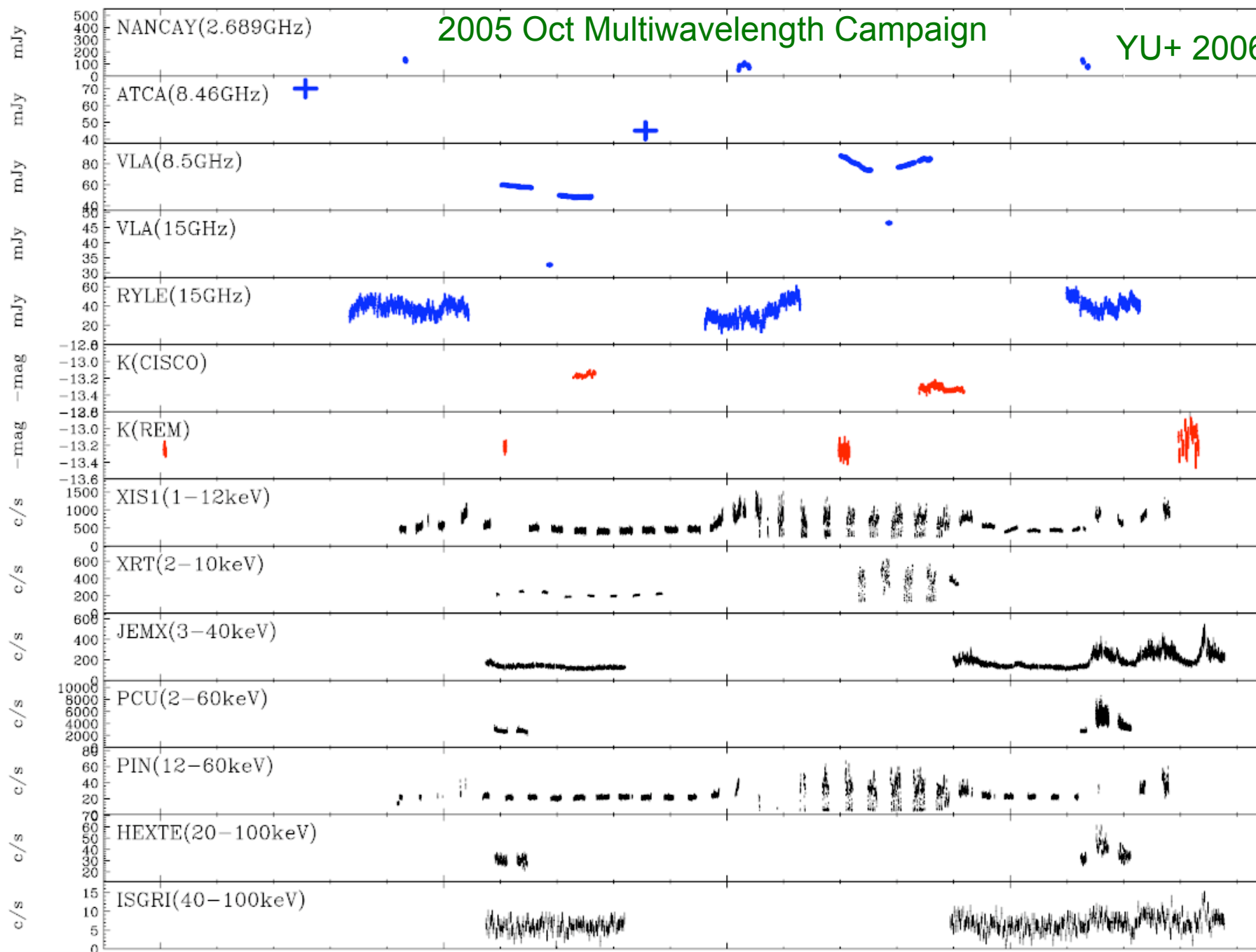
$L_{\text{radio}} - L_x$ relation in LHS

Gallo+ 2003



2005 Oct Multiwavelength Campaign

YU+ 2006



Hours since 16 Oct 05 (UT)

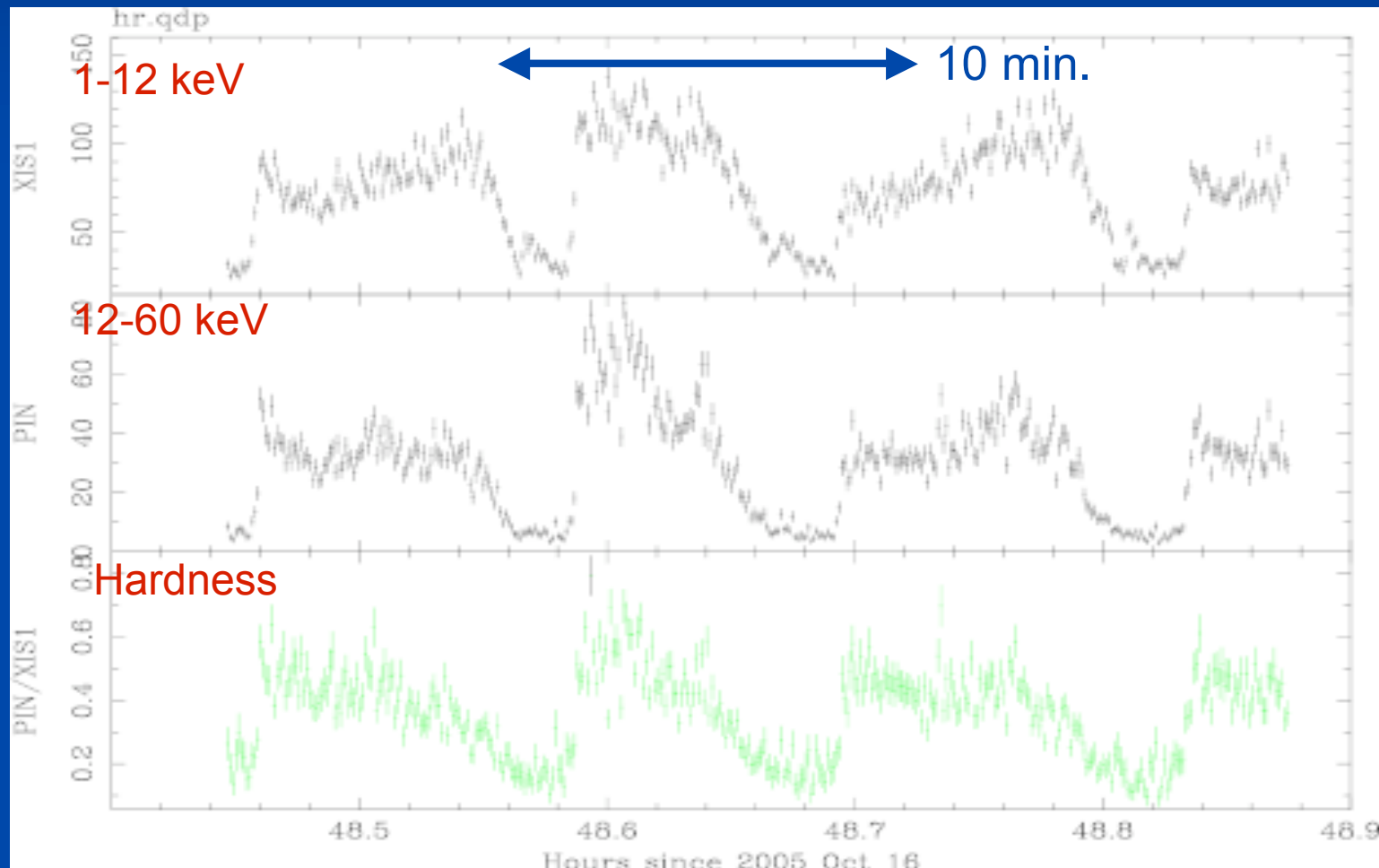
20

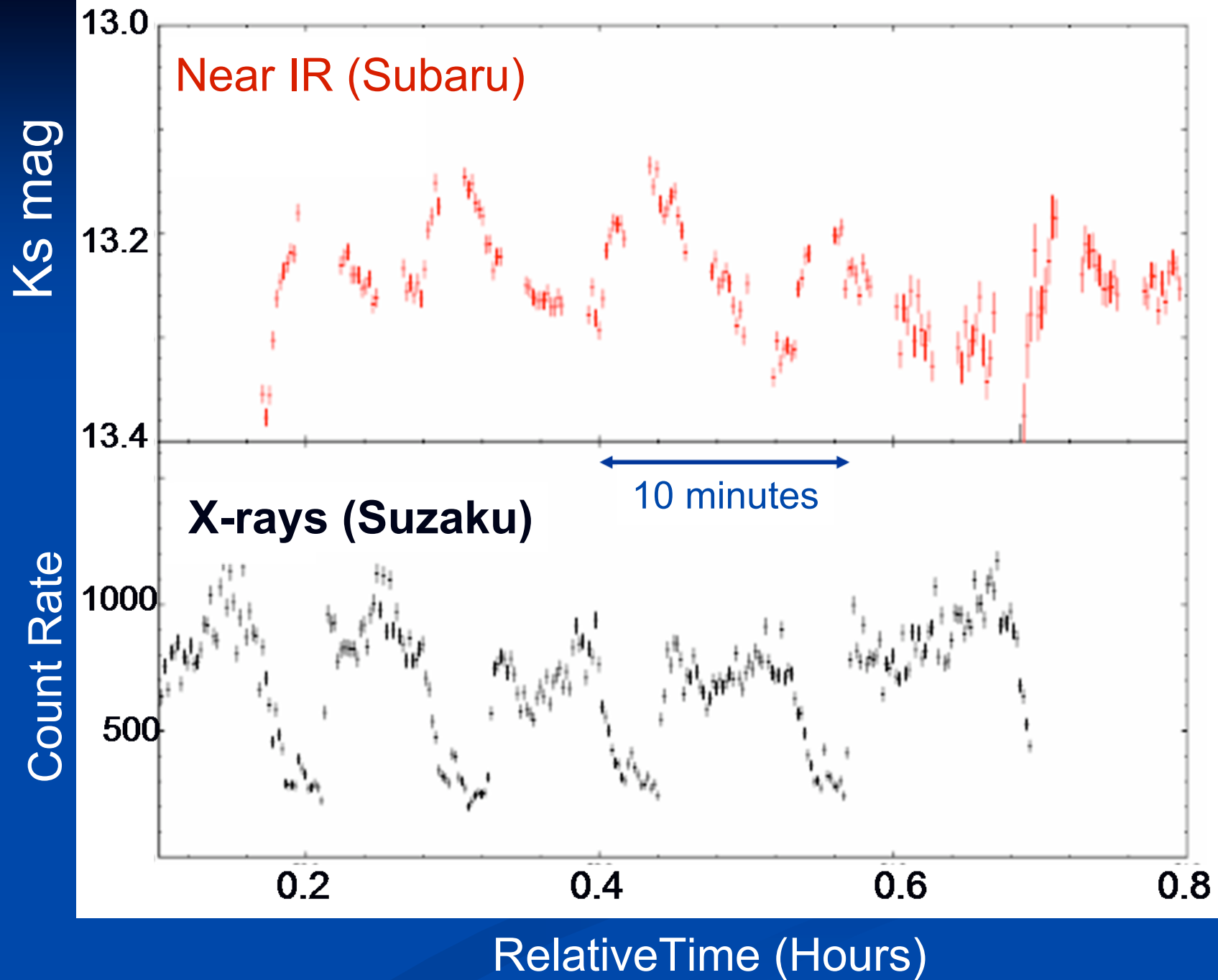
40

60

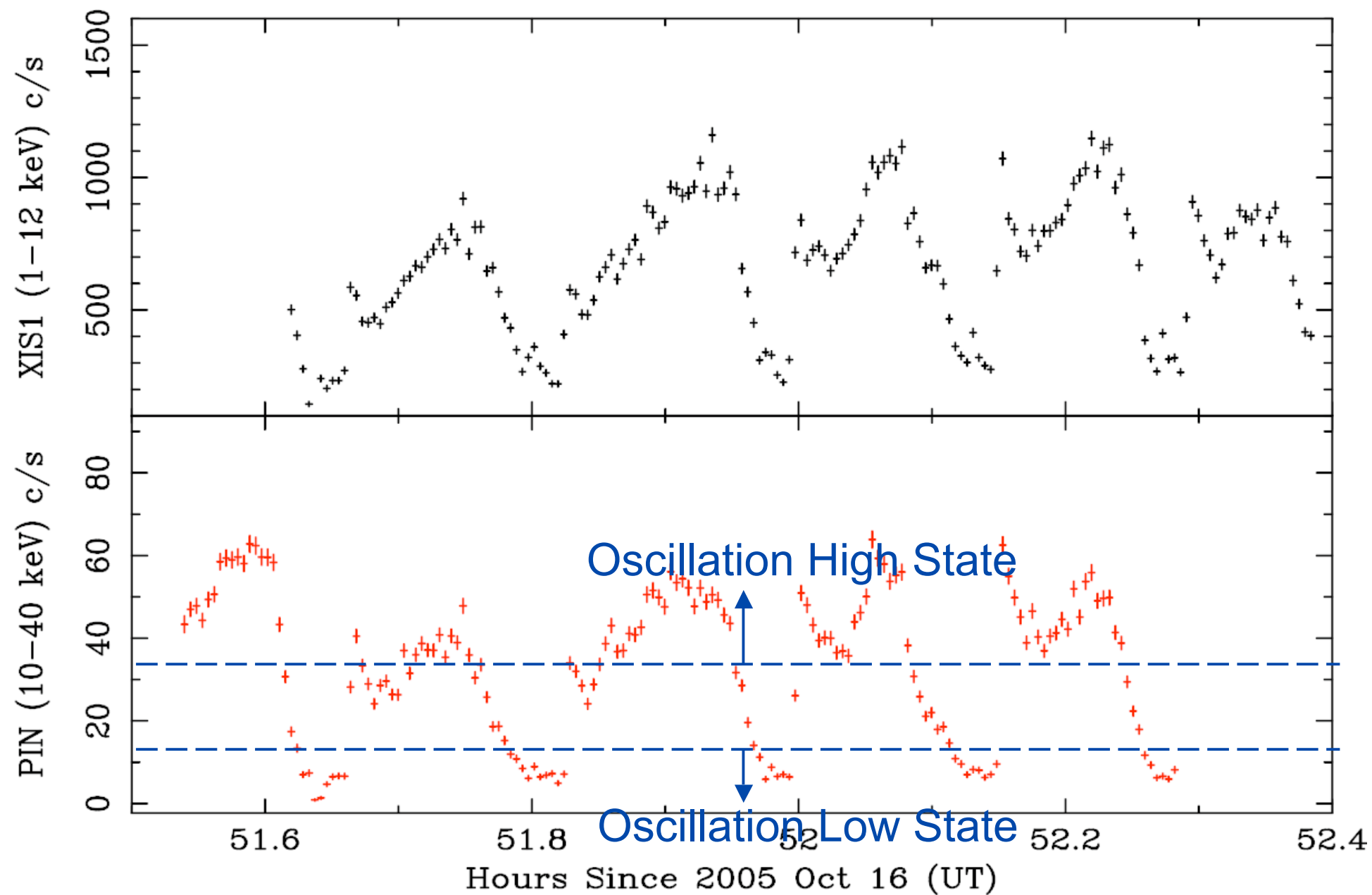
X-ray State (Oscillation)

- Class θ (State C $\rightarrow$ State A (soft dip) $\rightarrow$ State C)

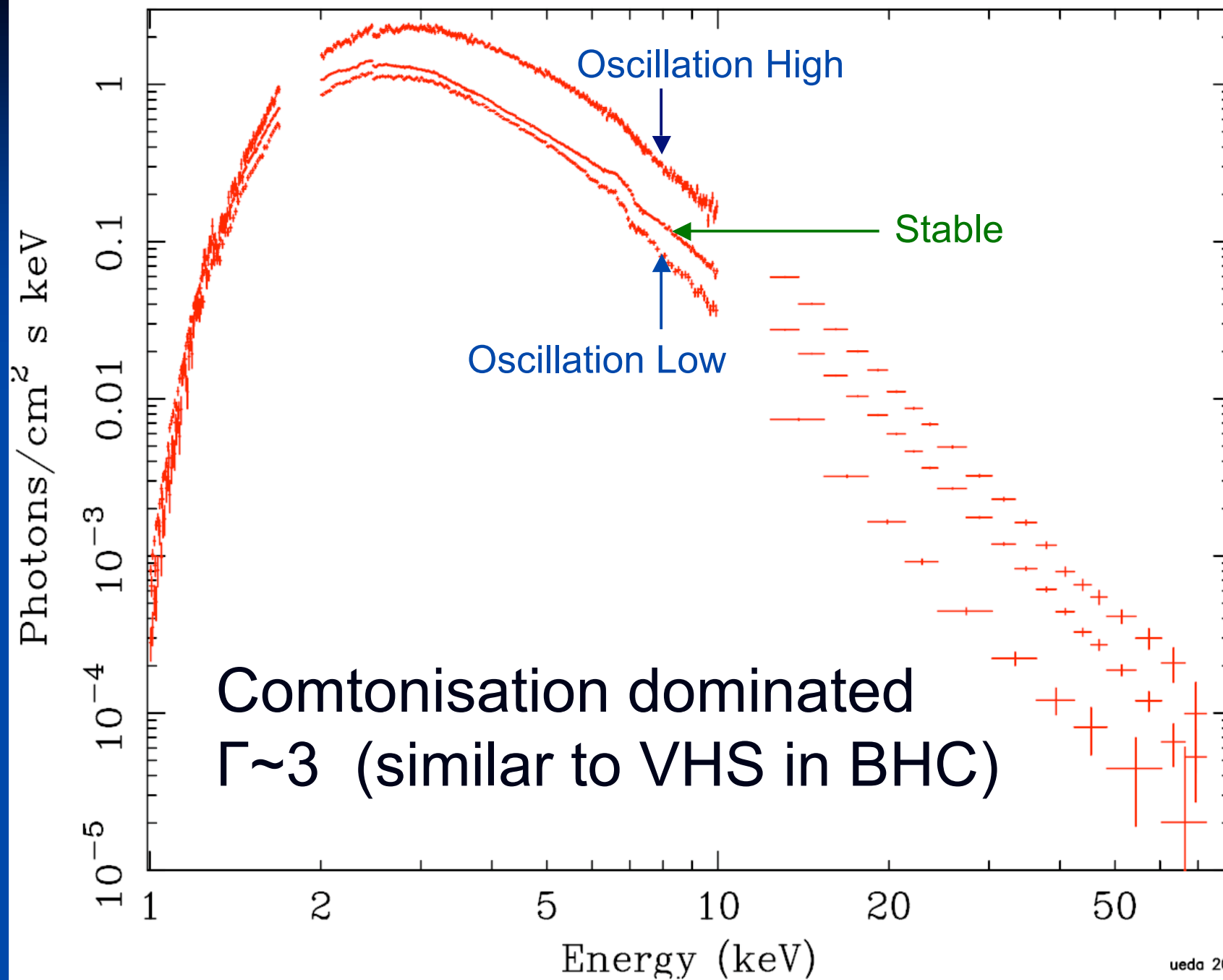




GRS 1915+105 (Suzaku Team, Preliminary)



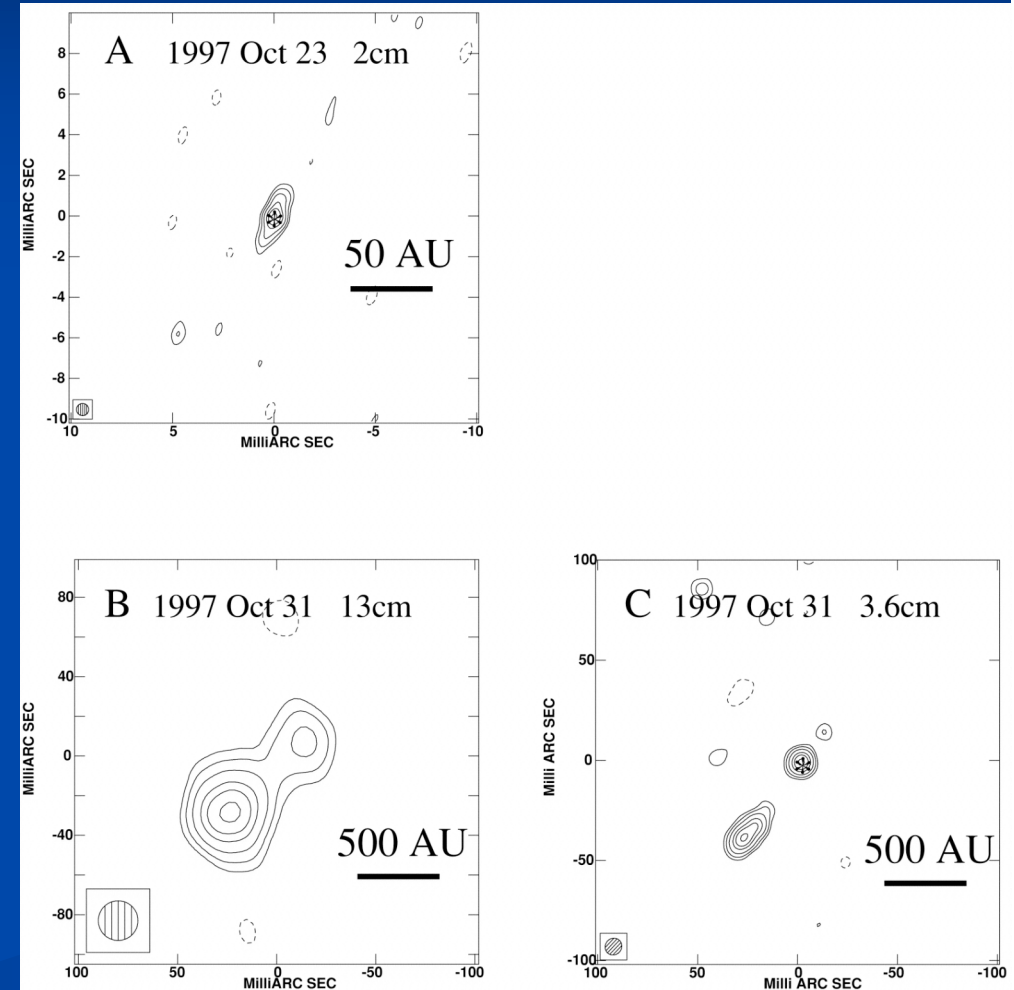
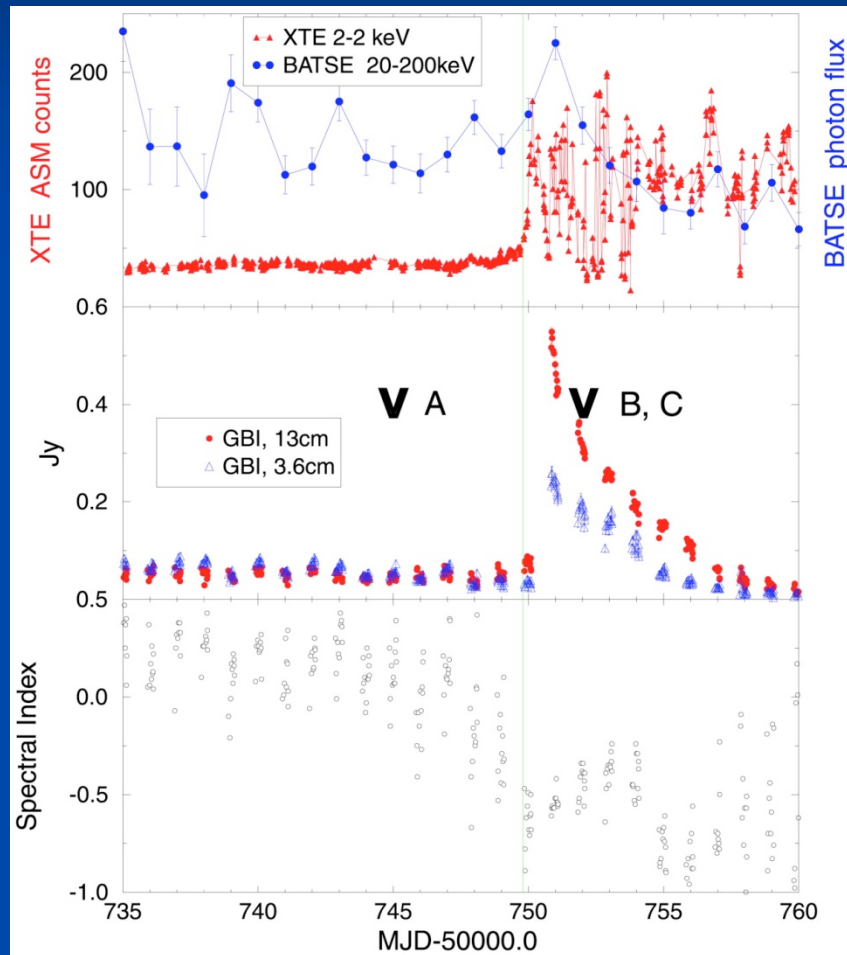
all.qdp



「すざく」「すばる」同時観測の主要結果

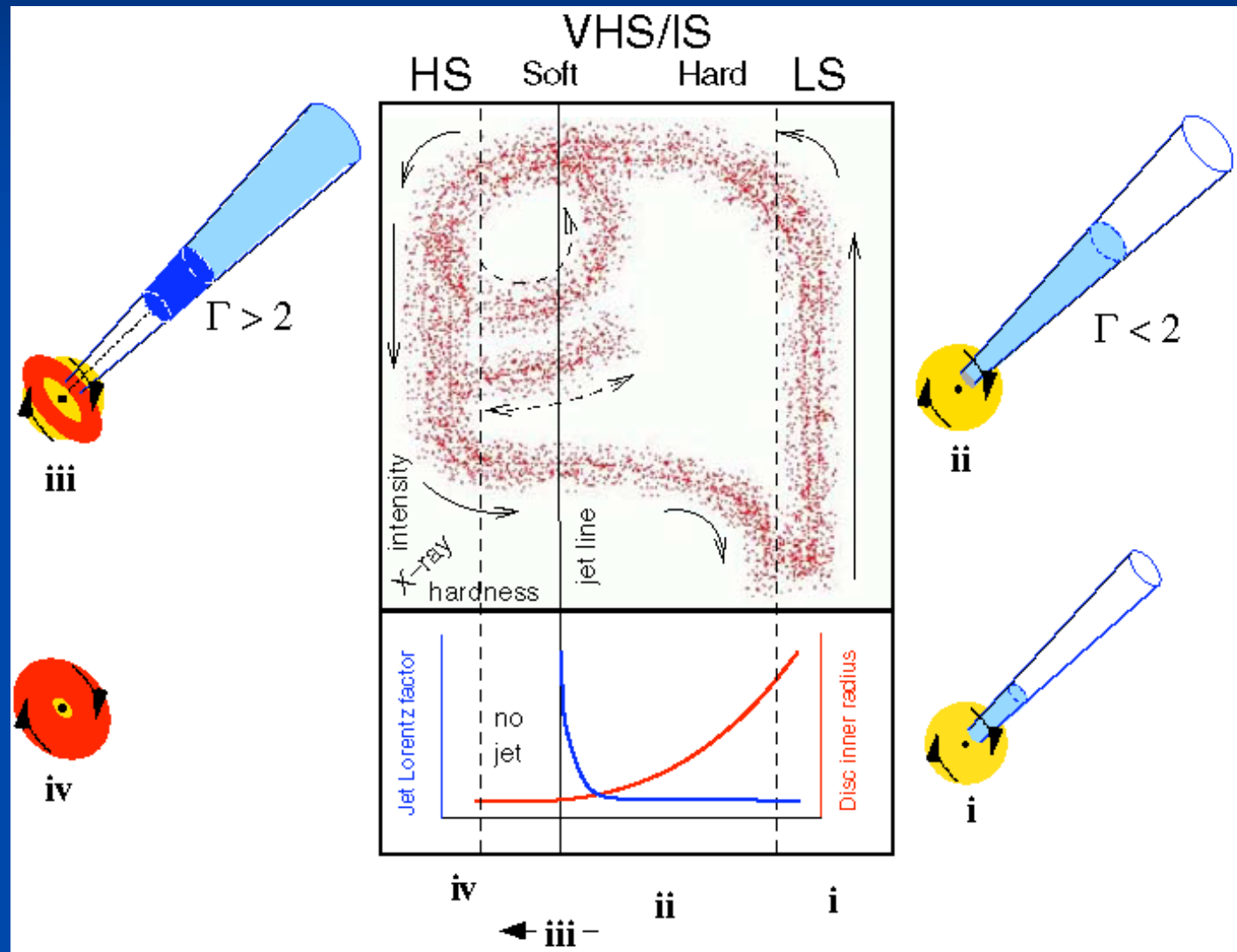
- K で ~ 0.1 mag程度のフレアを検出
 - K で数秒以下の時間変動
 - サイズ $< 1e11$ cm; ジェットの根元?
 - X線と赤外線は反相関: 赤外線フレアはX線のソフトディップの開始とほぼ同期する
- もし赤外線フレアがジェット起源とすると
(cf. Arai+ 2009 soft stateの赤外線は別起源)
- State C(ハード)からState A(ソフト)への状態遷移がジェット放出をトリガーする
 - コンプトン電子雲そのものがジェットとして放出?
 - いつでもコンプトンが効いている(単純なslim/standard disk 遷移ではない!)

Large Jet from GRS1915+105



Unified Model for BHB jets (?)

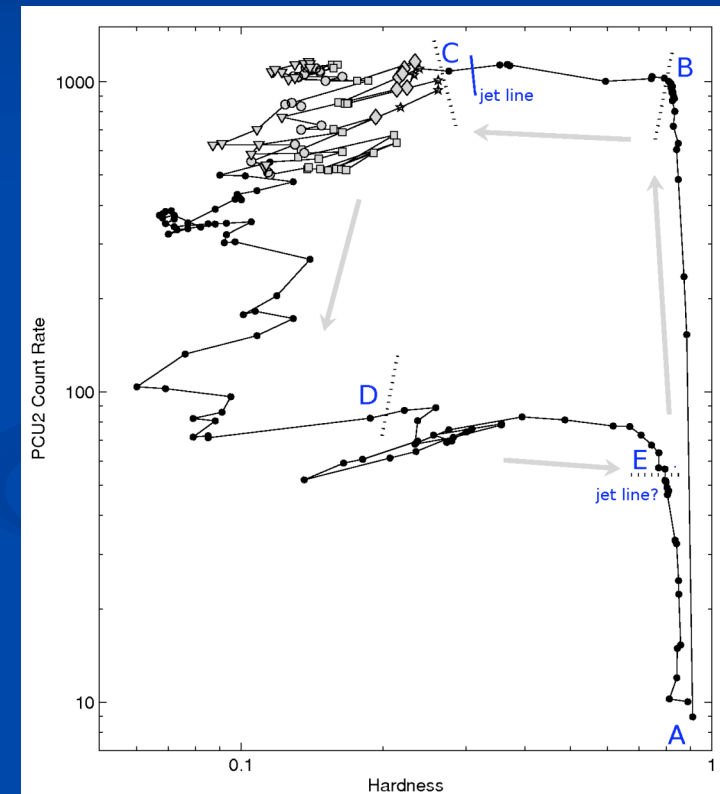
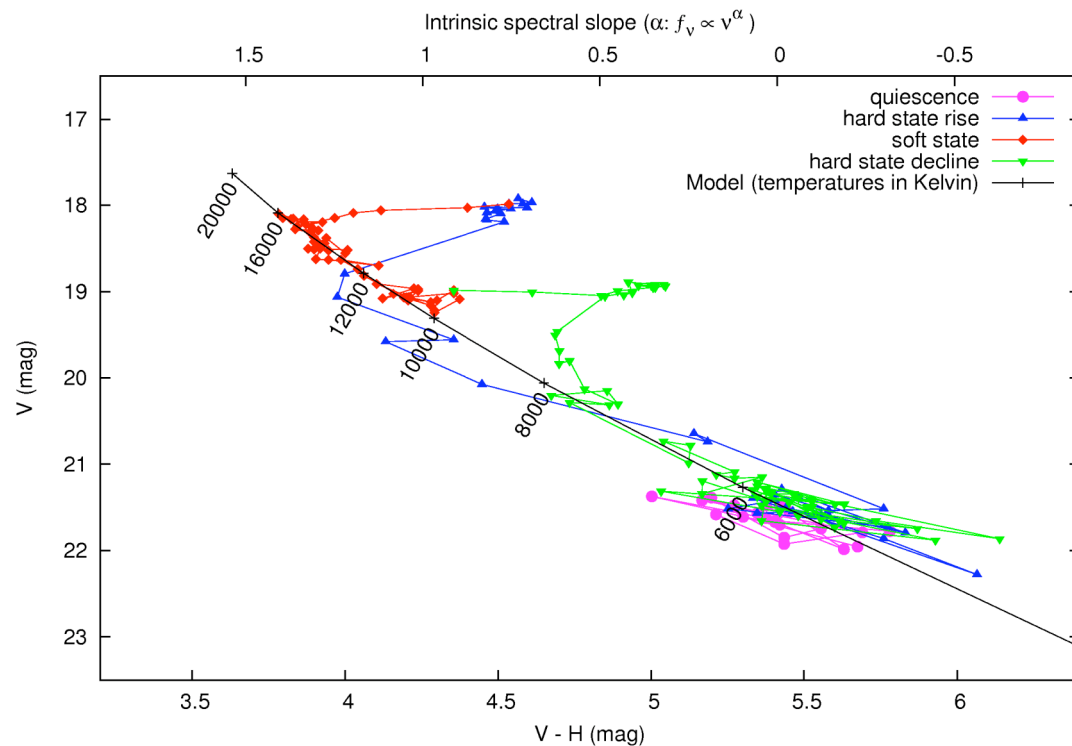
Fender+ 2004



Jet lineはどこにある？

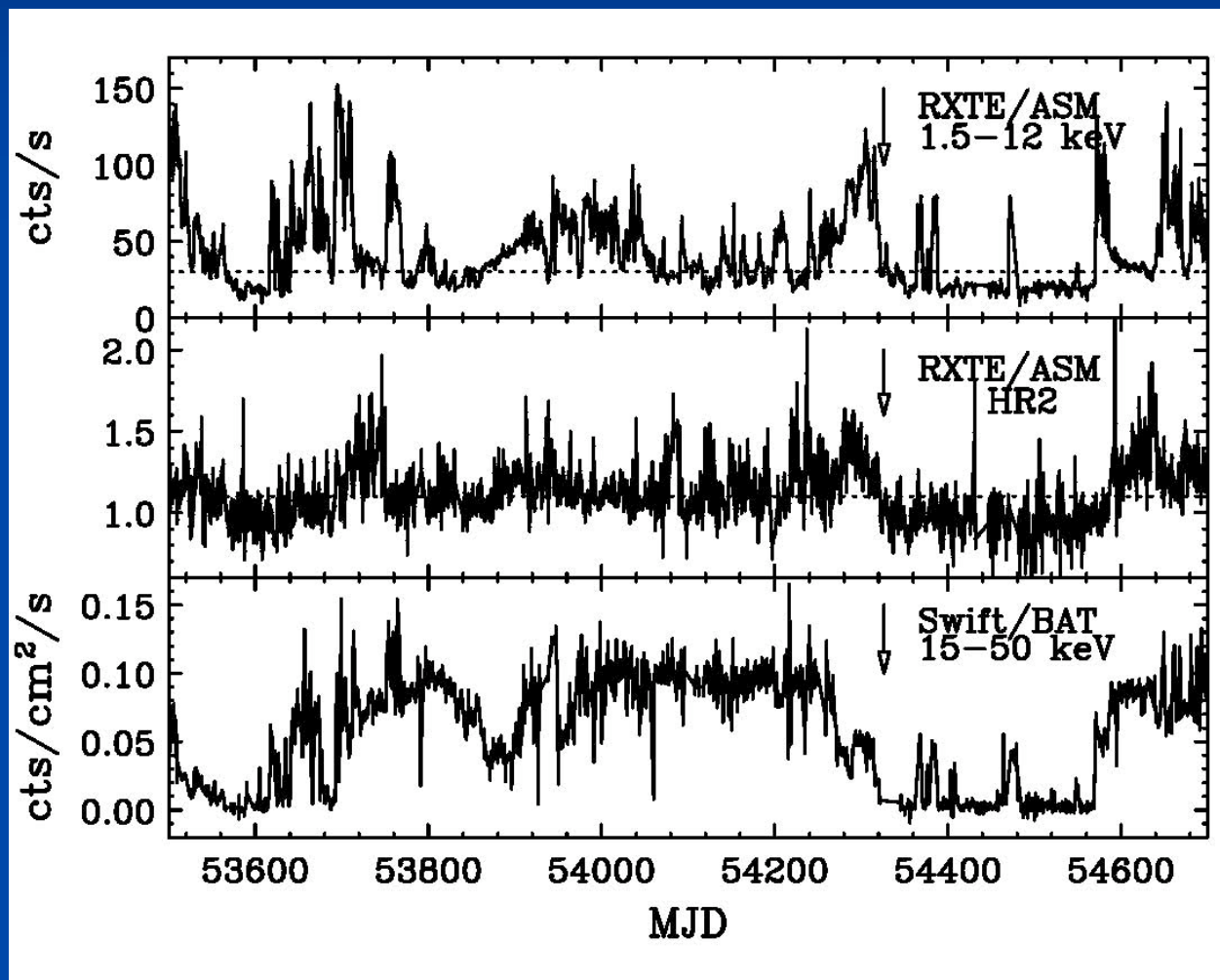
GX 339-4

Russel+ 2008



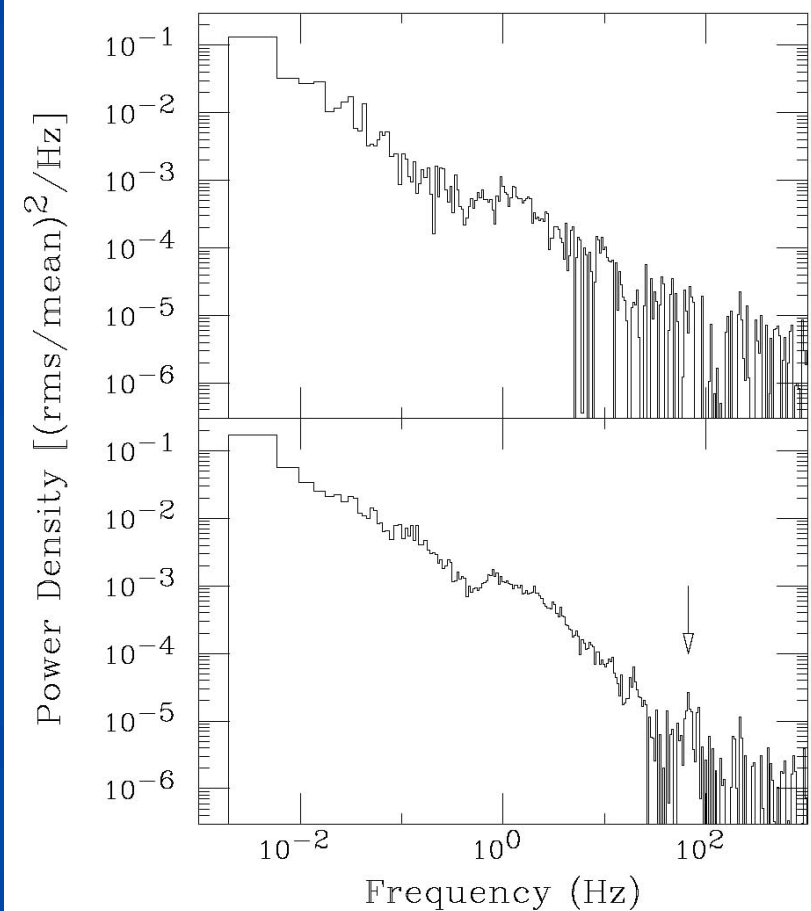
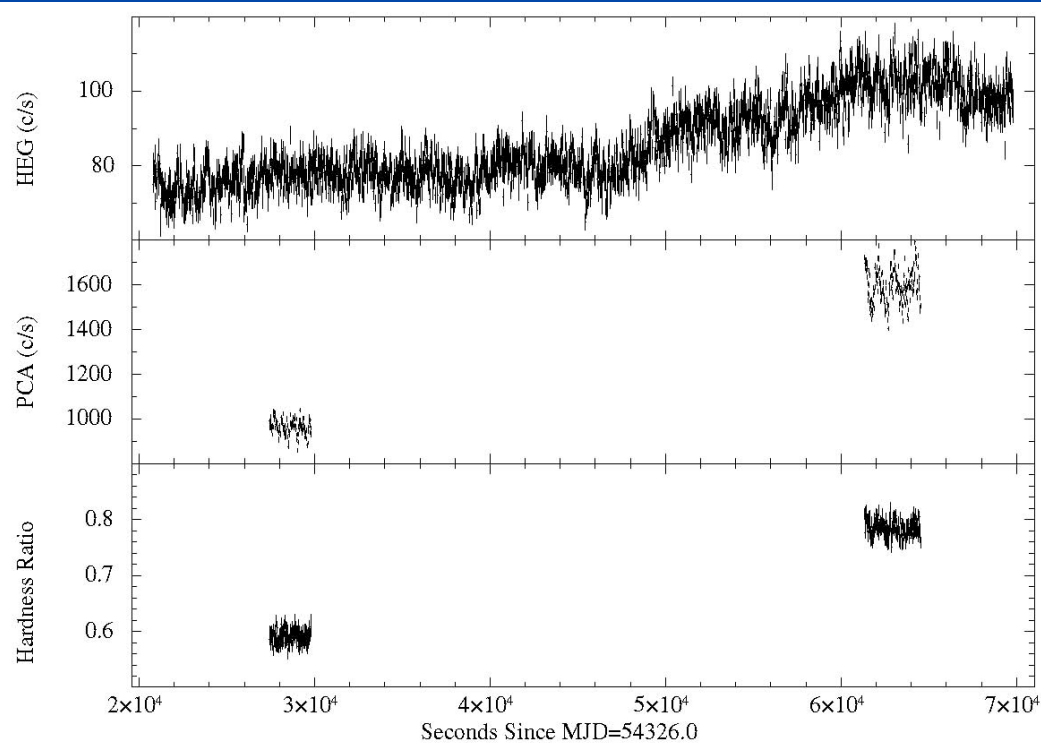
GRS 1915+105

2007 Aug ついに“soft state”に



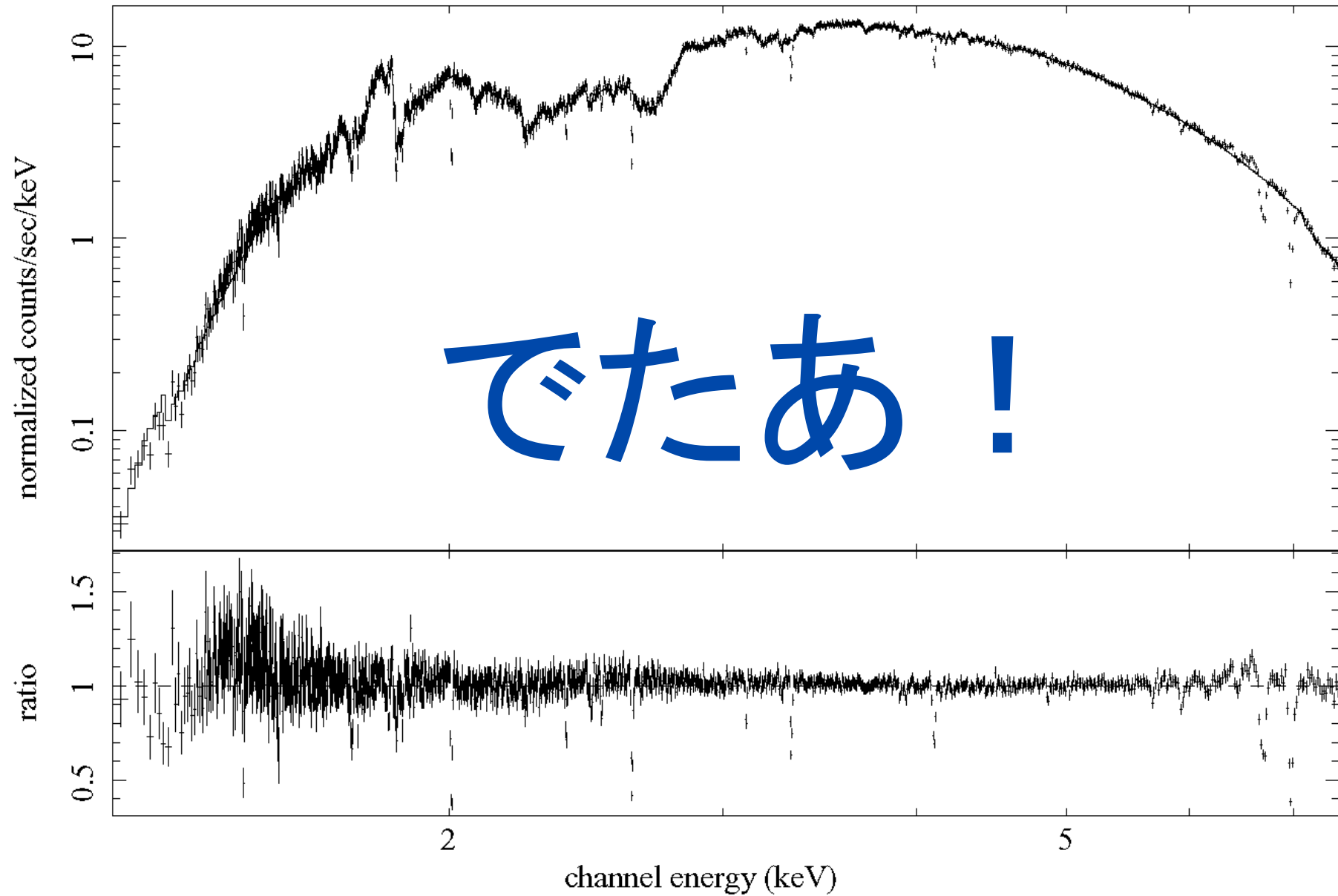
Chandra HETGS ToO + RXTE

- ゆるやかな時間変動(後半に増光)
- 67 Hz QPO



data and folded model

/home/ueda/grs1915-chandra/ana/acis_HEG_pm1_pilecor_sys3_min20.pha



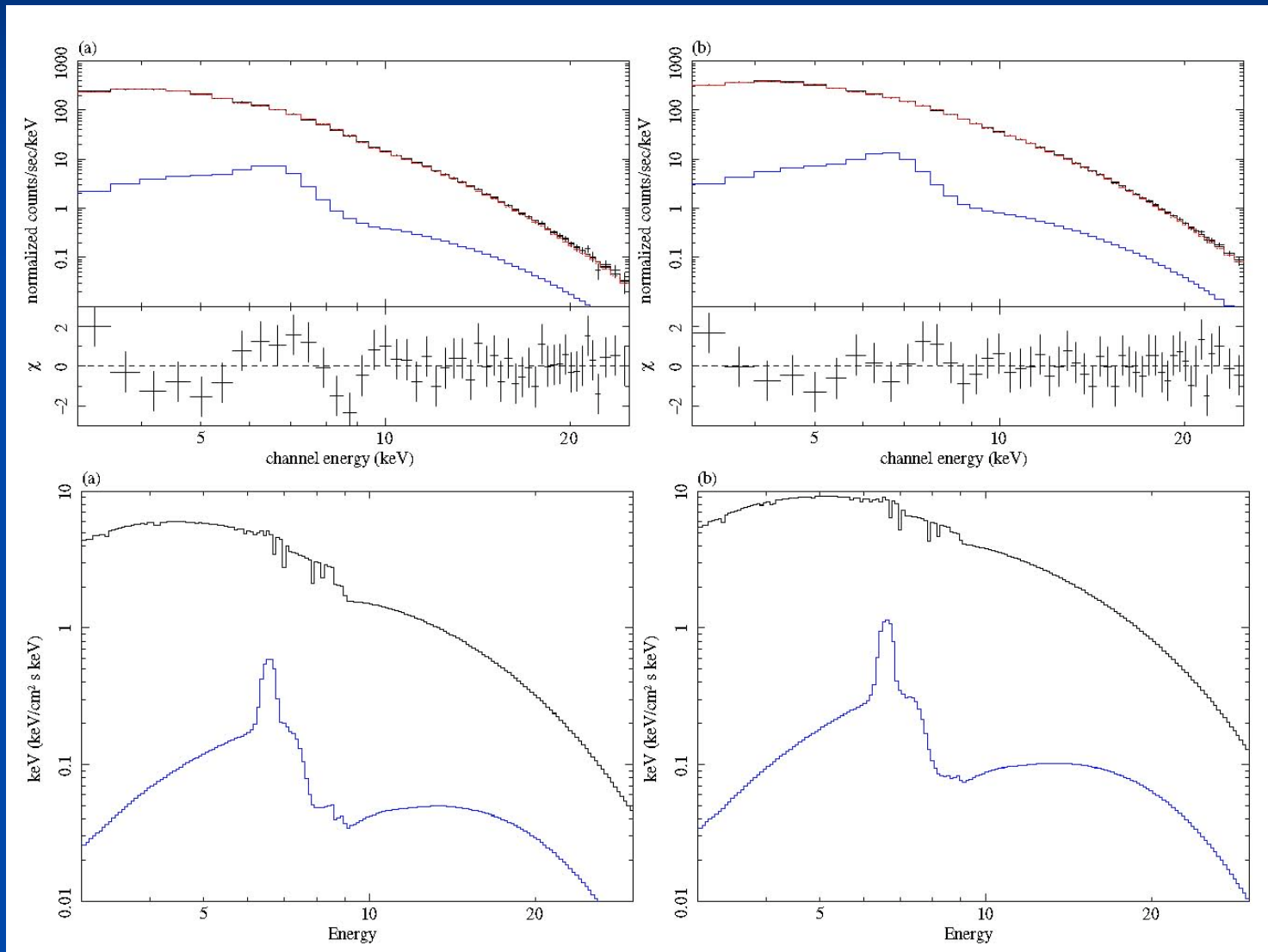
円盤風の性質

- Outflow → disk wind origin
 - Si XVI : $v \sim 150$ km/s, $\sigma \sim 70$ km/s
 - Fe XXVI: $v \sim 500$ km/s, $\sigma \sim 200$ km/s
 - 視線方向に構造あり
- Location $r \sim 10^5 r_g$
 - thermal and/or radiation driven wind
 - ionization parameter $\xi \propto r^{0-0.5}$
- Mass outflow rate $> \sim$ accretion rate

$$\begin{aligned}\dot{M}_{\text{out}} &= \Omega_{\text{wind}} r^2 n m_p v_{\text{wind}} \\ &\approx (4 - 6) \times 10^{19} \left(\frac{\Omega_{\text{wind}}/4\pi}{0.4} \right) \left(\frac{v_{\text{wind}}}{500 \text{ km s}^{-1}} \right) \text{ g s}^{-1}.\end{aligned}$$

“soft state”の連続成分の起源

低温コンプトン($T_e \sim 4$ keV, $\tau \sim 5$)



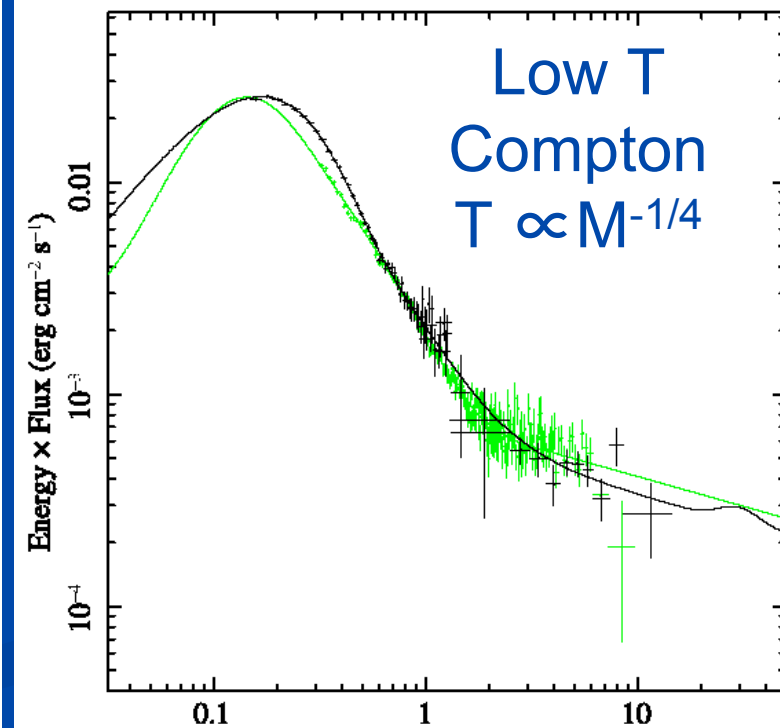
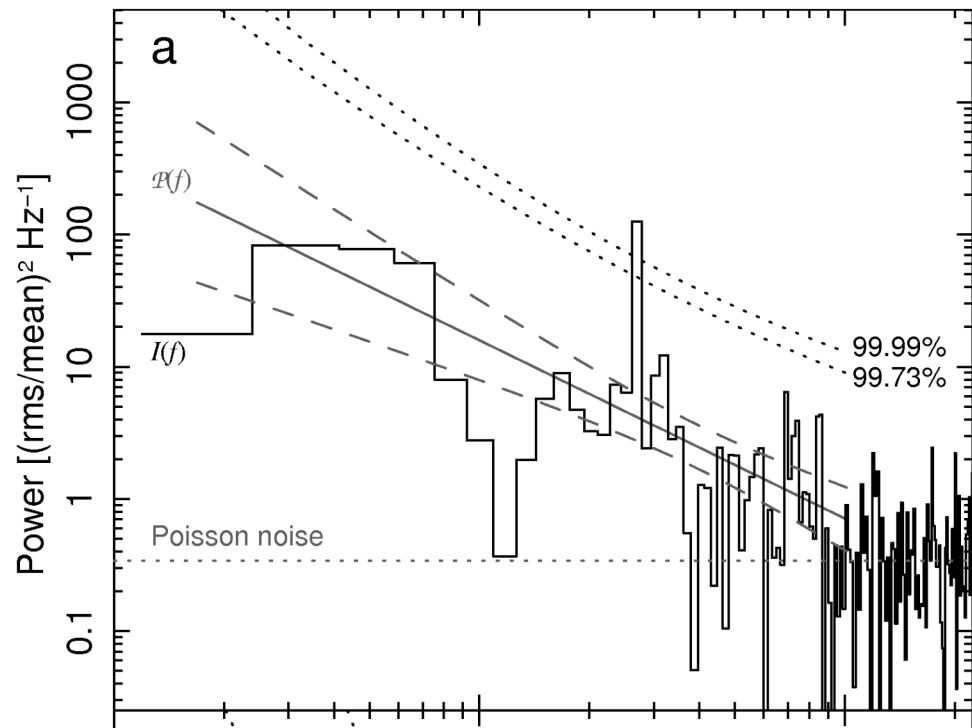
NLS1との類似

REJ: $M \sim 3 \times 10^6 M_\odot$, 1 hour QPO

GRS: $M \sim 14 M_\odot$, 67 Hz QPO

Gierlinski+2008

Middleton+ 2009



まとめ

- BH降着流の完全理解の道はまだまだ
- マイクロクエーサーの多波長同時観測は「降着流とジェットに関連」に切り込む鍵を握っている
- **これからは突発天体の多波長観測の黄金期**
 - 高エネルギー観測の新展開
 - 「すざく」、GLAST、MAXI、Astro-H
 - **速報(タイミング)、広域スペクトル＋精密X線分光**
→降着円盤ダイナミクスの完全理解へ
 - 機動性の高い国内望遠鏡とのリンク
 - ジェットでの加速を探るためには、シンクロトン自己吸収に透明な、可視・近赤外バンドでの観測が最も重要
 - 多波長同時観測対象を普通のBHCへ拡張