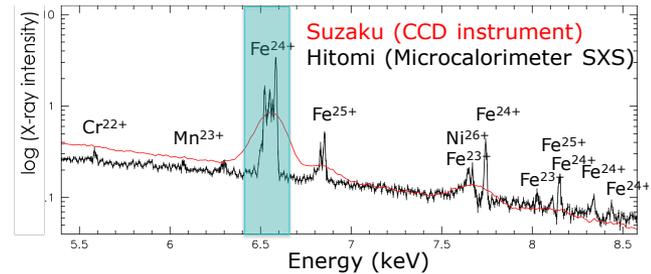


ブラックホール連星の状態遷移と時間変動

山田真也 (首都大学東京)

ブラックホールX線観測+ すざく衛星、ASTRO-H衛星、超電導X線検出器など。
(今年から天文月報の編集委員してます。どしどし投稿ください。)

ASTRO-H 衛星の
打ち上げ前オペレーション



スイス PSI 加速器
K中間子精密分光実験

松元先生のお弟子さんとの交流 (1)



2010年3月
@ハーバードスミソニアン宇宙物理学研究所



Thin accretion disks are stabilized by a strong magnetic field

Aleksander Sądowski^{1,2*}

¹ MIT Kavli Institute for Astrophysics and Space Research 77 Massachusetts Ave, Cambridge, MA 02139, USA
² Einstein Fellow

27 January 2016

ABSTRACT

By studying three-dimensional, radiative, global simulations of sub-Eddington, geometrically thin black hole accretion flows we show that thin disks which are dominated by magnetic pressure are stable against thermal instabilities. Such disks are thicker than predicted by the standard model and show significant amount of dissipation inside the marginally stable orbit. Radiation released in this region, however, does not escape to infinity but is advected into the black hole. We find that the resulting accretion efficiency ($5.5 \pm 0.5\%$ for the simulated $0.8M_{\text{BH}}$ disk) is very close to the predicted by the standard model (5.7%).

Key words: accretion, accretion discs – black hole physics – relativistic processes – methods: numerical

1 INTRODUCTION

Most of the Galactic black hole (BH) X-ray binaries cycle through outbursts and quiescent states as a result of evolution of the accretion rate by ionization instability in the outer disk regions (Lasota 2001; Coriat et al. 2012). During the outbursts they show luminosities of the order of $1 - 30\%$ of the Eddington luminosity, L_{Edd} (Maccaione 2003; McClintock & Remillard 2006). According to the standard disk theory (Shakura & Sunyaev 1973), such luminosities correspond to the radiation-pressure dominated, radiatively efficient disk state. X-ray binaries can remain in such a configuration for months, i.e., for the time much longer than the relevant dynamical, thermal, or even viscous timescales. However, radiation-pressure dominated thin disks are known to be viscously (Lightman & Eardley 1974) and thermally (Shakura & Sunyaev 1976) unstable. If such instabilities operate, one should expect global limit cycle behavior (Lasota & Pelat 1991; Szuszkiewicz & Miller 1998), instead of the observed quasi-steady high/soft state of most BH X-ray binaries. The disagreement strongly suggests that our understanding of the physics of thin disk accretion is not satisfactory.

Accretion flows are known to be turbulent. Because of this fact the value of analytical modeling is limited and numerical simulations are required for better understanding them. Recently, significant progress has been made through development of sophisticated magnetohydrodynamic (MHD) and radiation MHD (RMHD) codes capable of simulating accretion flows both in the shearing box approximation and in the global context. The application of the latter has so far been limited to studying geometrically thin accretion disks (e.g., Obsage & Mineshige 2011; Sądowski et al. 2014b; McKinney et al. 2014; Jiang et al. 2014) which are

known (the optically thick ones) to be stabilized by advection-related cooling (Abramowicz et al. 1988). The only insight into the physics of geometrically thin, radiation-pressure dominated and presumably unstable accretion flows has come so far from shearing box simulations. Most recently, Jiang, Stone, & Davis (2013) studied such systems (with zero net magnetic flux) using a sophisticated radiation MHD algorithm and have shown that they are indeed unstable, in disagreement with most of the observed systems.

What does stabilize the astrophysical thin disks? A wide range of ideas has been proposed, including stabilization by stochastic variability (Janik & Misra 2012), intrinsic delay between heating and cooling (Hirose et al. 2009; Ciesielski et al. 2012), and magnetic fields. The latter seem to be most promising as magnetic fields are intrinsically involved in every accretion event (they make the disks turbulent), and probably are also crucial in explaining the observed nature of state transitions (Begelman & Armitage 2014).

Begelman & Pringle (2007) claimed that optically thick, geometrically thin accretion disks with strong toroidal magnetic field are stable against thermal and viscous instabilities. The authors based on the assumption that the field strength for a thin disk saturates at the level derived by Pessah & Psaltis (2005), i.e., when the Alfvén speed roughly equals the geometric mean of the Keplerian speed and the speed of sound in gas. We do not find this condition satisfied in the simulated thin disks presented in this work. Oda et al. (2009) discussed the stabilizing effect of strong toroidal magnetic field on thermal stability of optically thin and thick accretion disks using analytical approach and an ad hoc, although physically motivated, prescription for the radial distribution of the magnetic flux. Our work essentially validates their assumptions and conclusions. Recently, Li & Begelman (2014) have shown that magnetic fields may help stabilize the disk also through magnetically driven outflows which decrease the disk temperature and thus help the disk become more stable at a given accretion rate.

In this work we show that indeed, magnetically supported thin

Alfvén speed roughly equals the geometric mean of the Keplerian speed and the speed of sound in gas. We do not find this condition satisfied in the simulated thin disks presented in this work. Oda et al. (2009) discussed the stabilizing effect of strong toroidal magnetic field on thermal stability of optically thin and thick accretion disks using analytical approach and an ad hoc, although physically motivated, prescription for the radial distribution of the magnetic flux. Our work essentially validates their assumptions and conclusions. Recently, Li & Begelman (2014) have shown that magnetic fields may help stabilize the disk also through magnetically driven outflows which decrease the disk temperature and thus help the disk

その後、小田さんとは、ASTRO-Hの開発時に、筑波宇宙センサー内でばったり再会。追跡ネットワークにて衛星通信に従事。衛星間通信の議論でまさかの再会。JAXAでも研究者魂を発揮されてました。

* E-mail: asadowski@mit.edu (AS)

¹ Which may be responsible for some of the variability patterns of the outbursts in the X-ray binary set – GRS 1915+105 and IGR J17091-3624.

松元先生のお弟子さんとの交流 (2)

今年度、ビットマイスター社との共同で pluto (<http://plutocode.ph.unito.it>) の解析をしてみました。
(同期の川島くん、天文台の高橋(博)さんのご協力により)



TOP

サービス▼

企業情報▼

採用情報

お問い合わせ

ビットマイスターの「研究開発ITサービス」

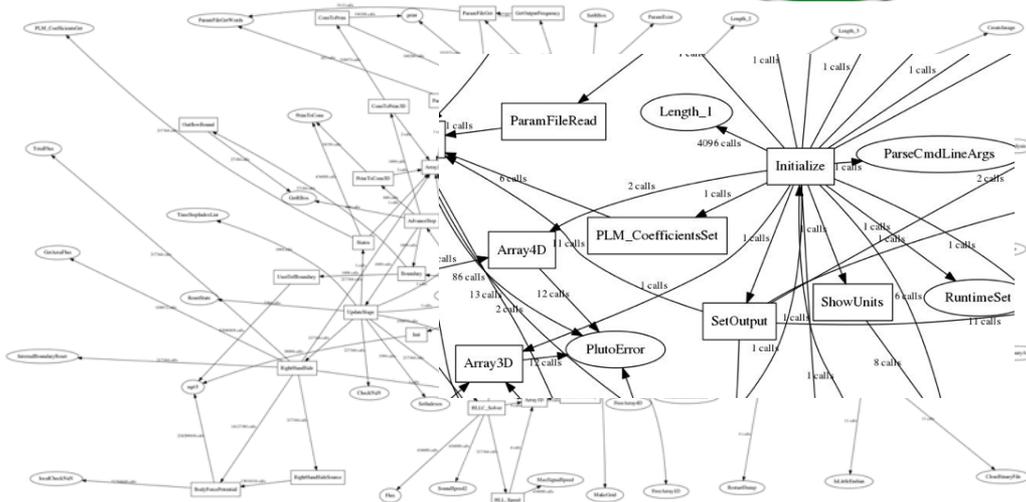
ビットマイスターは、ソフトウェア開発の企画・構想から設計・実装だけでなく、完成後のプロモーション支援までを含めたトータルサービスをお客様に提供しています。研究者の皆様の実験システム開発や成果発表に特化した「研究開発推進プロセス」に加え、企業の皆様のビジネス効率化やネットワーク化などの様々なご要望にも、最適なソフトウェア・ソリューションでお応えします。

また、一般的な受託開発での設計・実装作業のご依頼や、展示会などでのプロモーションに関するご相談にも対応いたします。

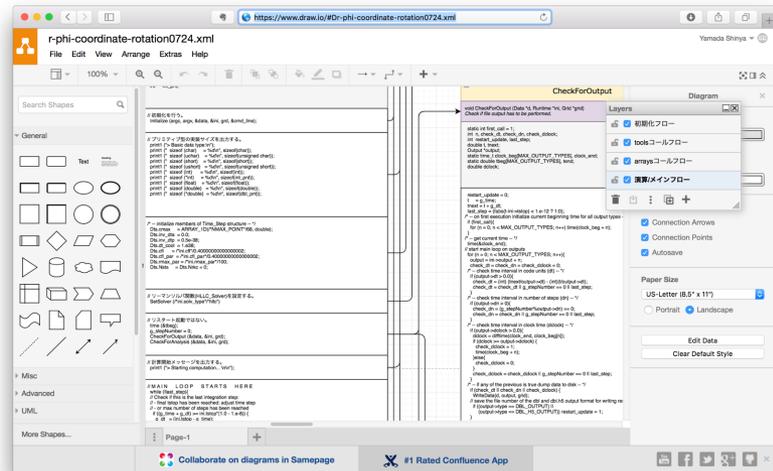
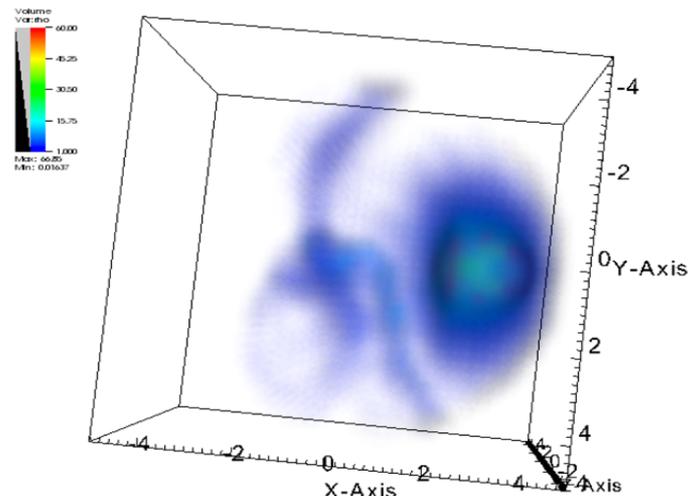
「やりたいことはあるが、何から始めればいいのかわからない」という場合でも、まずは当社にご相談ください。当社の技術者が、ソフトウェア開発の専門家として様々な角度からアドバイスをを行い、お客様のアイデアを実現に繋げます。



詳細 > <http://www.bitmeister.jp>



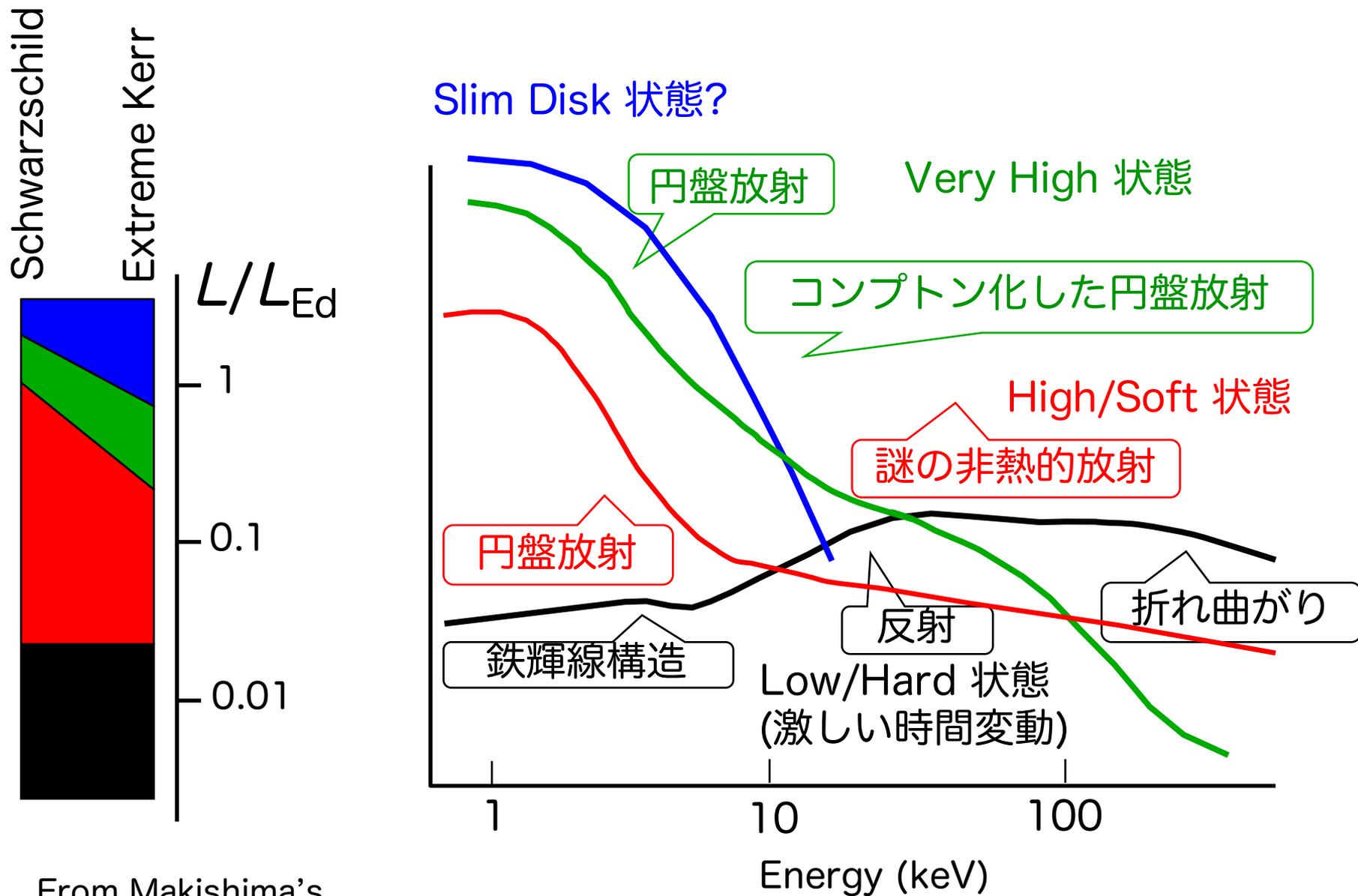
DB: data.0196.vtk



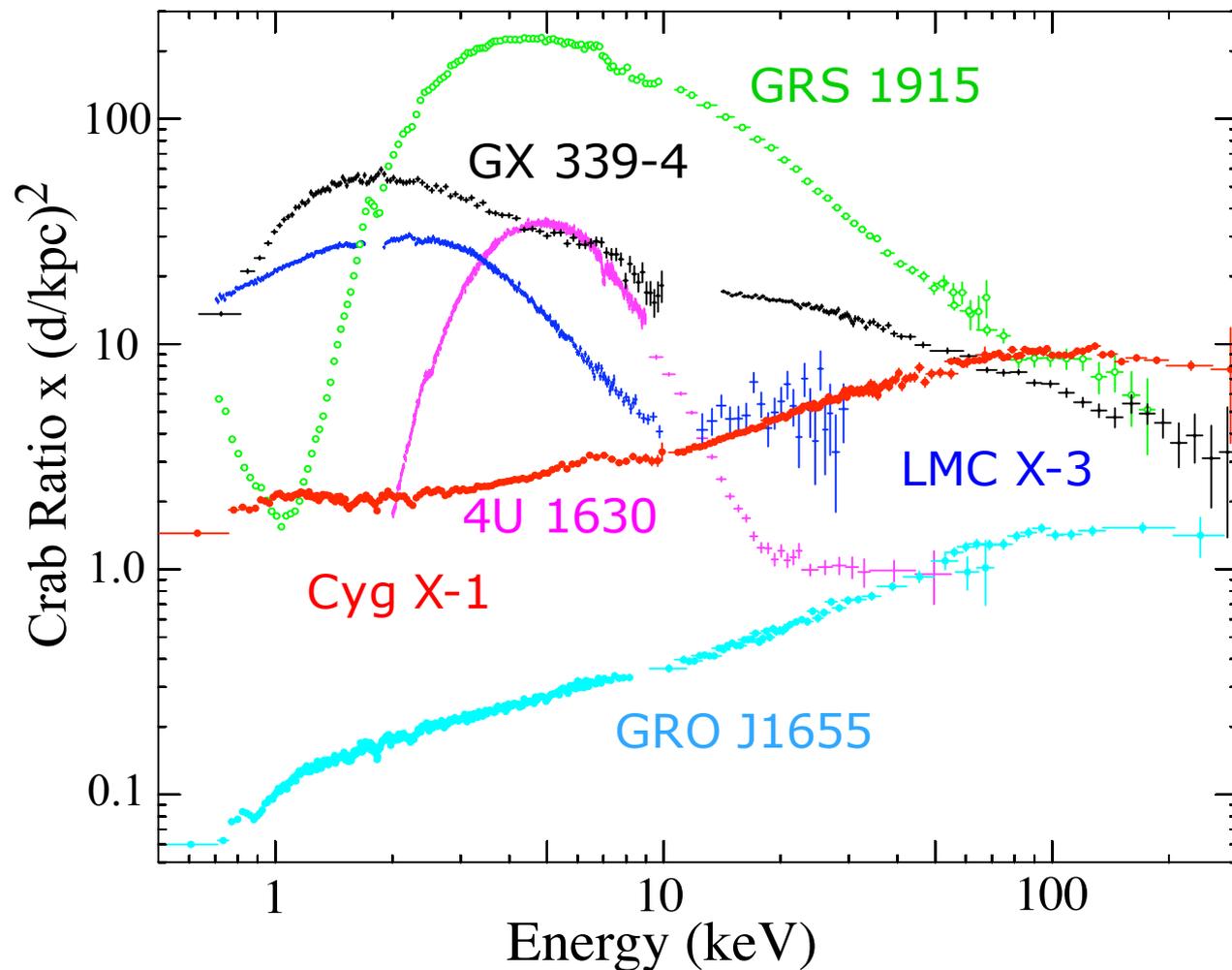
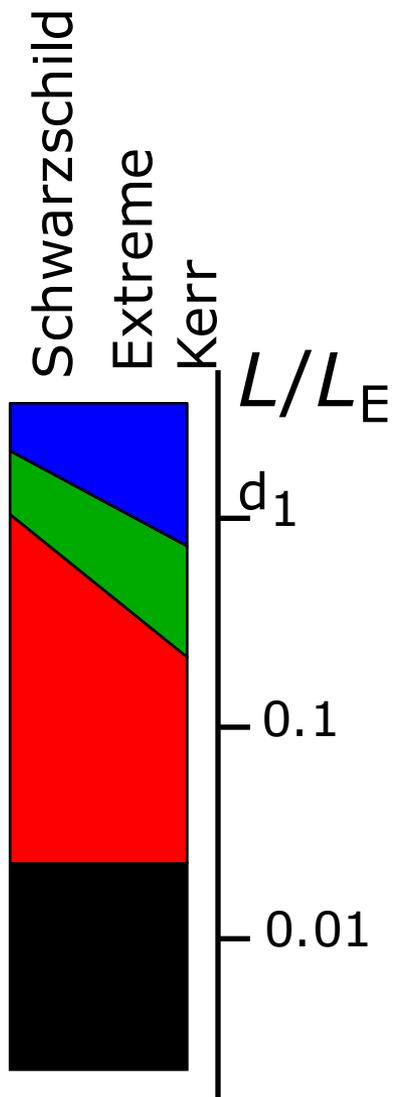
概要

- ブラックホール連星の状態遷移
 - X線のスペクトル状態のおさらい
 - ハード状態の円盤とコロナの共存状態
 - かなり暗いハード状態の特異性
 - Cyg X-1 の最もソフトな状態
- X線の激しい強度変動
- 星風と状態遷移の関係

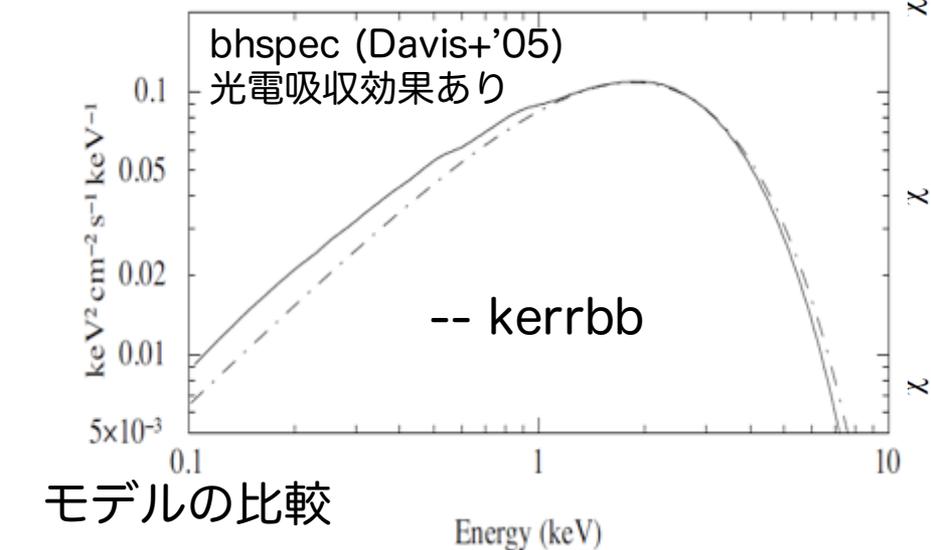
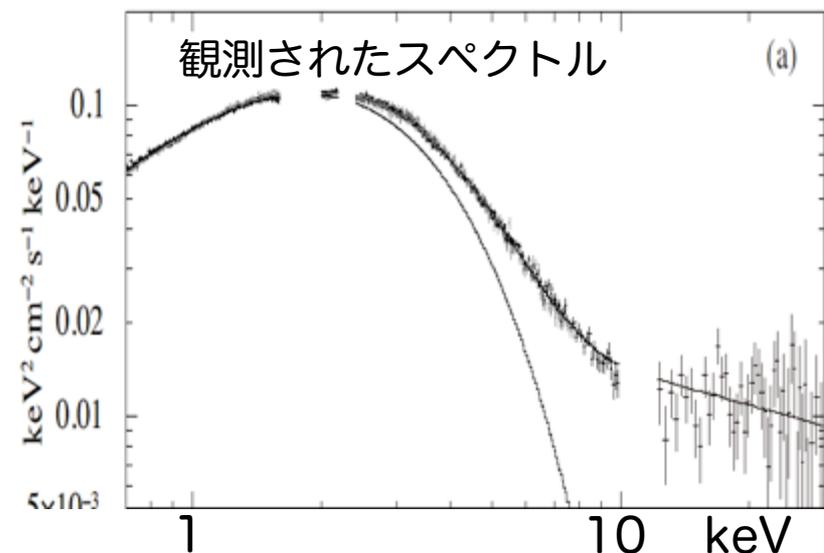
BH連星の4つのX線スペクトルの状態



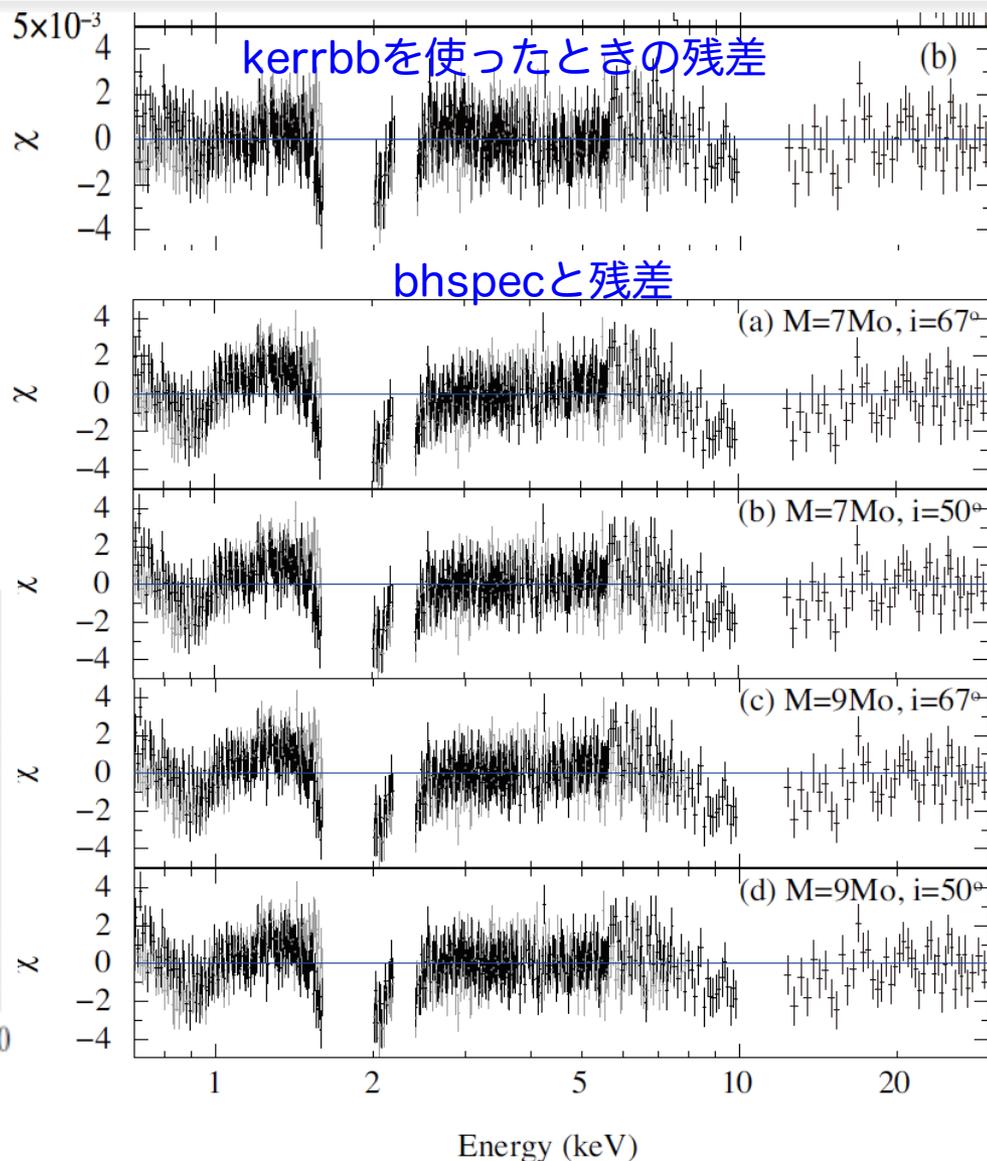
すざくのスペクトルの例



(ソフト状態の話) 「すぎく」 LMC X-3 (久保田+10)



モデルの比較



円盤大気的光電吸収効果が見えない。Still unknown atomic or accretion physics?

降着円盤の磁場を測定できるか？

- [Find Similar Abstracts](#) (with [default settings below](#))
- [Full Refereed Journal Article \(PDF/Postscript\)](#)
- [Full Refereed Scanned Article \(GIF\)](#)
- [References in the article](#)
- [Citations to the Article \(7\)](#) ([Citation History](#))
- [Refereed Citations to the Article](#)
- [SIMBAD Objects \(1\)](#)
- [Also-Read Articles](#) ([Reads History](#))
- [Translate This Page](#)

磁場が高くなると、摂動ではなくなるので、非線形の効果が入る。
これは教科書的な計算をただけのもので、引用数が少ないらしい。

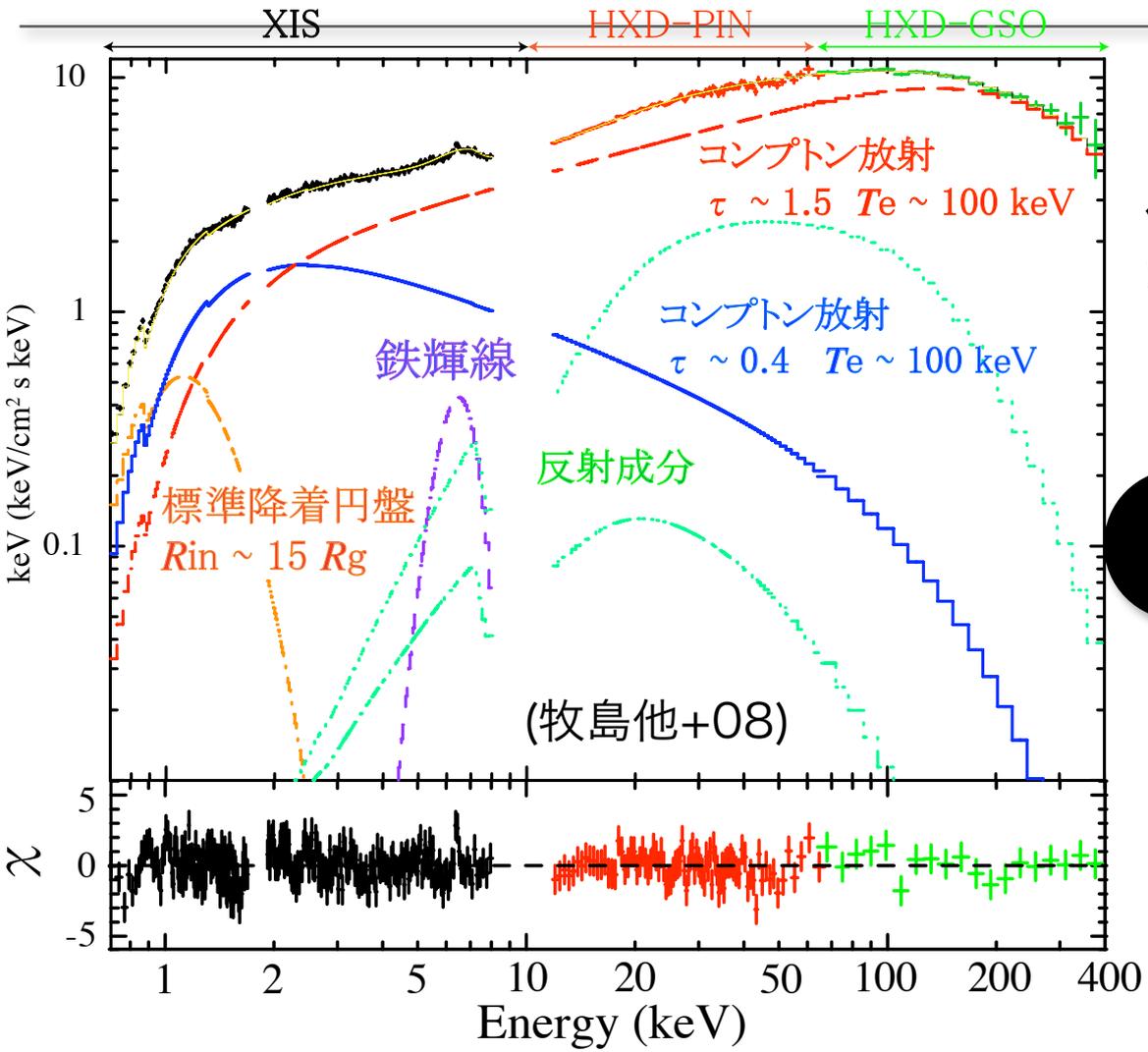
Title: On the Zeeman splitting of X-ray lines by neutron-star magnetic fields
Authors: [Sarazin, C. L.](#); [Bahcall, J. N.](#)
Affiliation: AA(Institute for Advanced Study, Princeton, N.J.), AB(Institute for Advanced Study, Princeton, N.J.)
Publication: Astrophysical Journal, Part 2 - Letters to the Editor, vol. 216, Sept. 1, 1977, p. L67-L70. ([ApJL Homepage](#))
Publication Date: 09/1977
Category: Astrophysics
Origin: [STI](#)
NASA/STI Neutron Stars, Pulsars, Stellar Magnetic Fields, X Ray Spectra, Zeeman Effect, Emission Spectra, Field Streng
Keywords: Ray Sources
DOI: [10.1086/182511](#)
Bibliographic Code: [1977ApJ...216L..67S](#)

10^8 gauss で ~ 1 eV 程度のエネルギーの分裂
X線カロリメータのエネルギー分解能は数eV なので、
中心決定精度は数eV/sqrt(光子数) ~ 0.1 eV は可能。(Tatsuno et al. 2016)

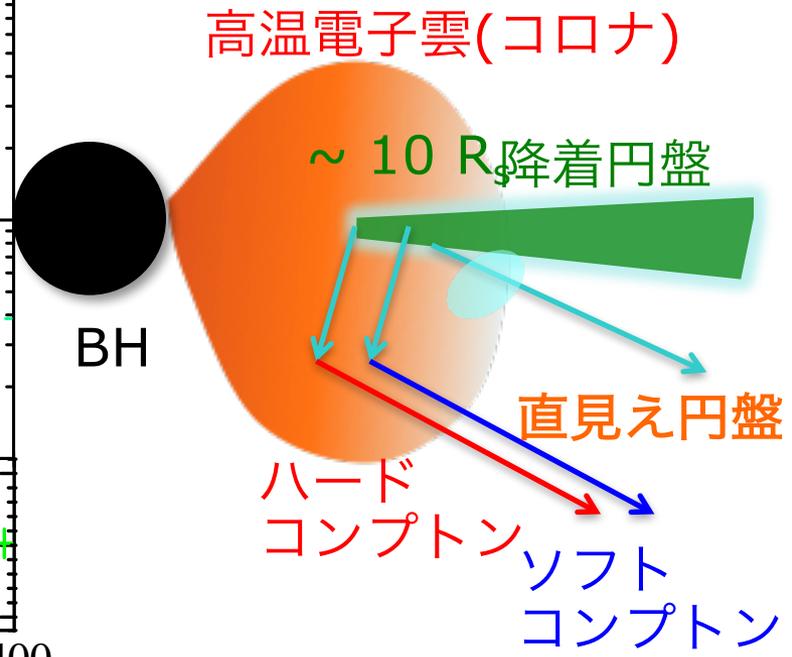
BH近傍だとドップラーなどで広がるので、近傍の放射を時間変動から仕分けしてスペクトル分解するなど、解析に工夫は必要。

BH or NS近傍で He/H like 程度に高階に電離した Fe によるゼーマン効果を、輝線や、吸収線でみることは本当にできないか？

(ハード状態) 「すざく」 によるCyg X-1の第1観測の結果

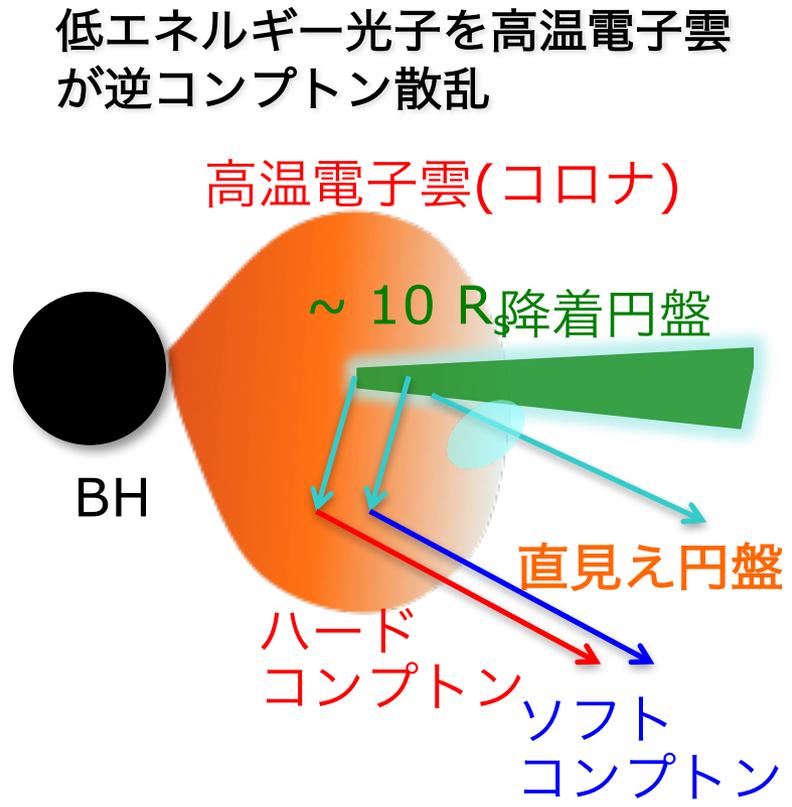
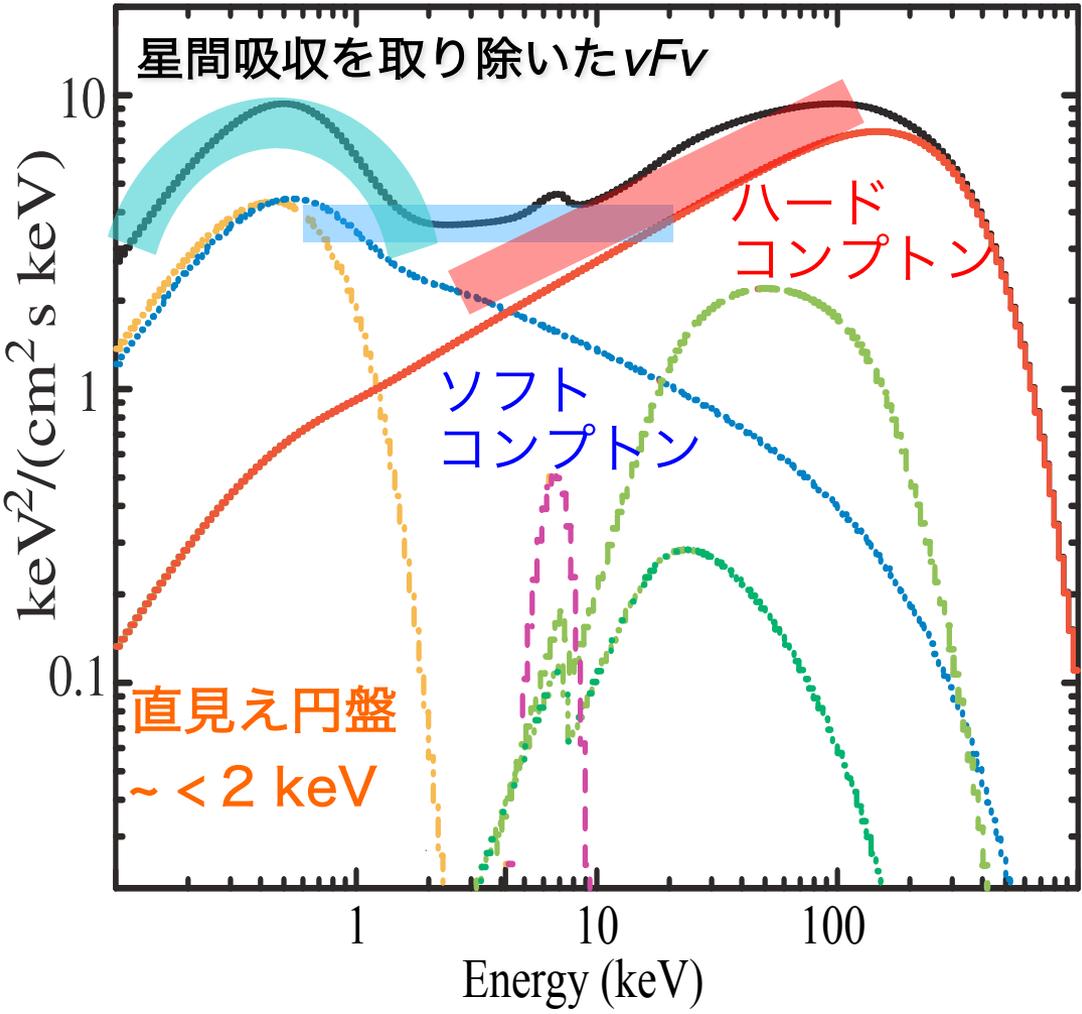


低エネルギー光子を高温電子雲が逆コンプトン散乱



「直見え円盤 + ソフト&ハードコンプトン」モデルでデータの再現に成功。
円盤(<2keV)に対し、ソフトコンプトン(~5 keV) まで卓越。

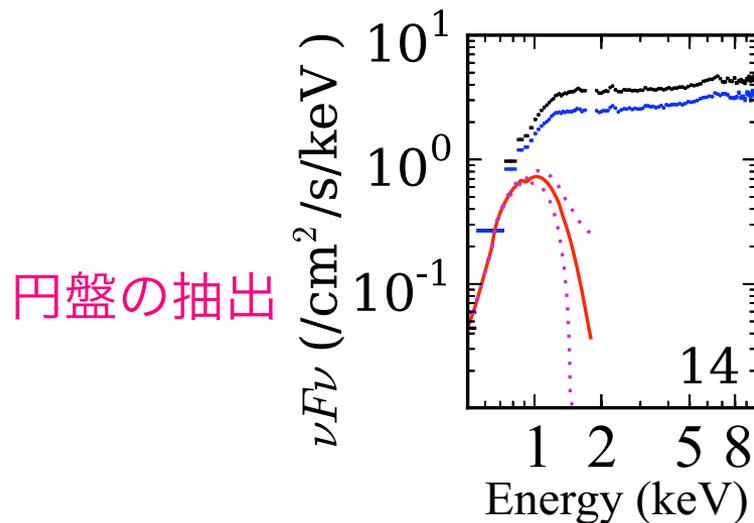
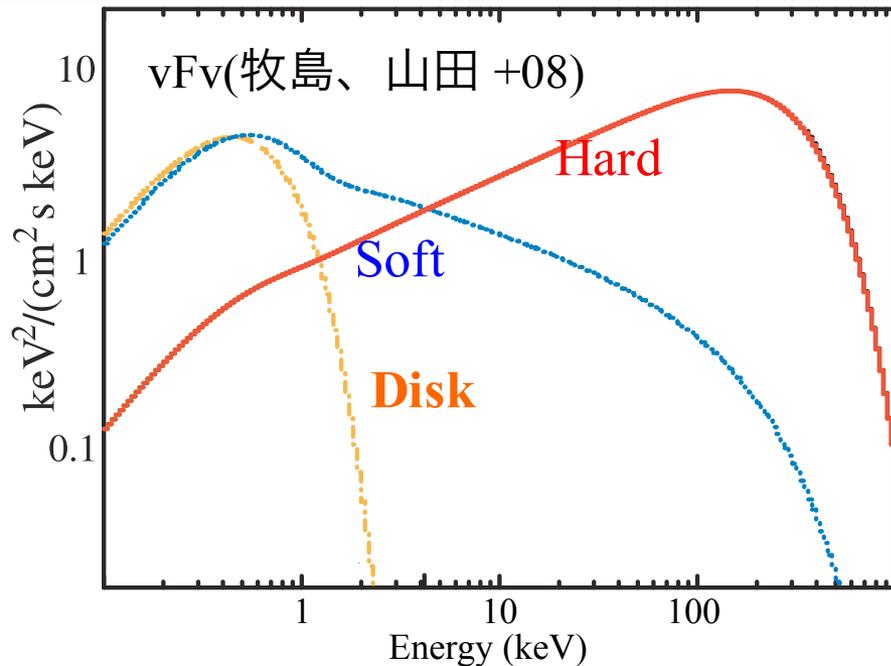
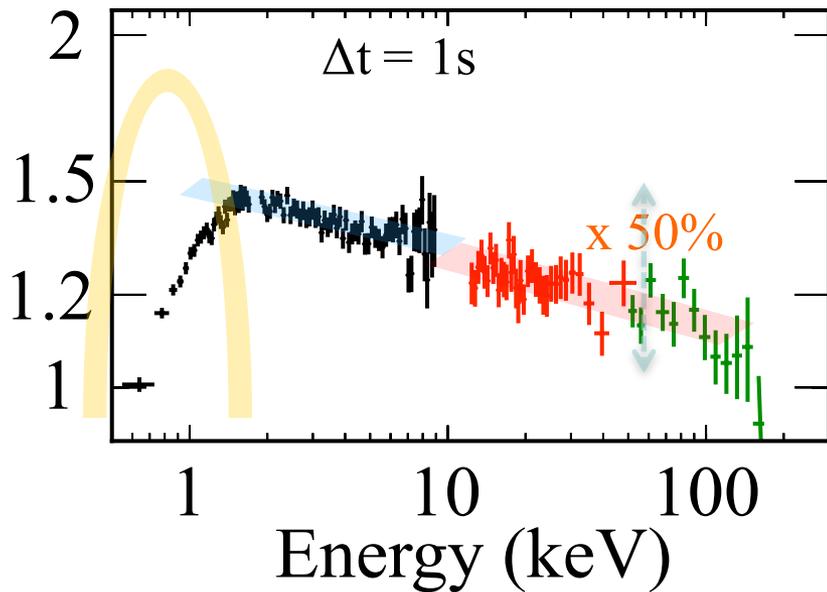
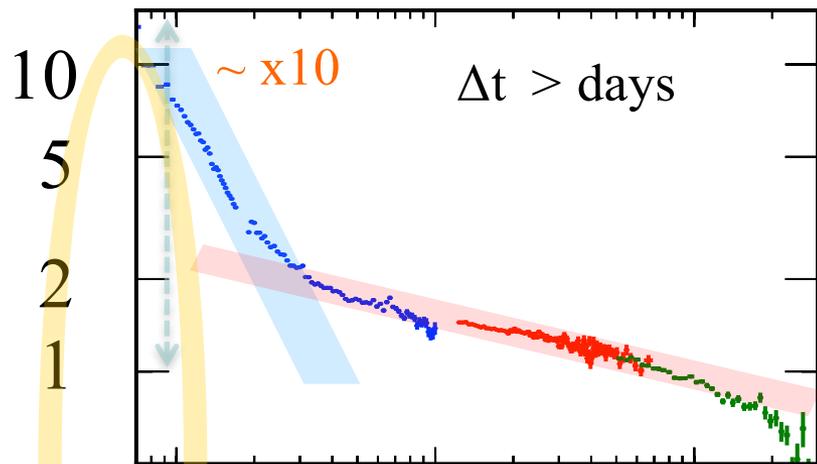
(ハード状態) 「すざく」 によるCyg X-1の第1観測の結果



「直見え円盤 + ソフト&ハードコンプトン」モデルでデータの再現に成功。
円盤($< 2 \text{ keV}$)に対し、ソフトコンプトン($\sim 5 \text{ keV}$)まで卓越。

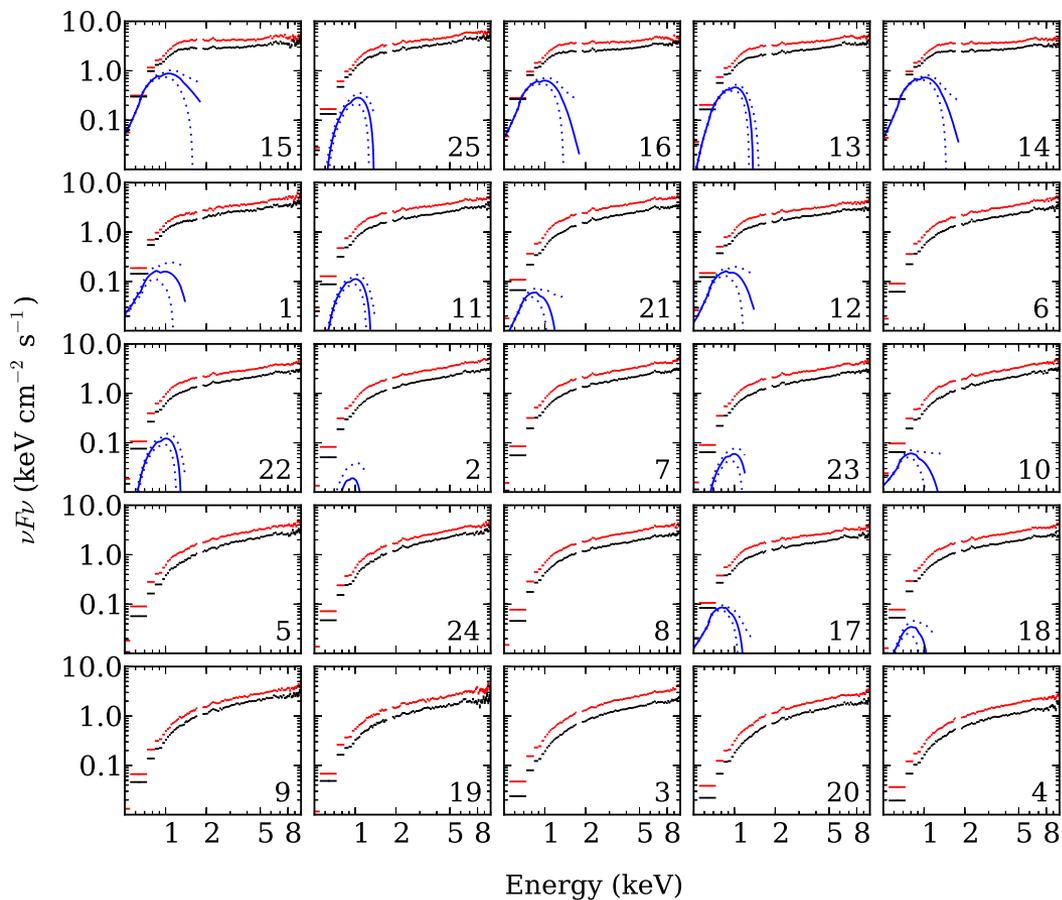
(ハード状態)冷たい円盤と、非一様なコロナの存在 (山田'13)

数日と数秒の変動率の比較



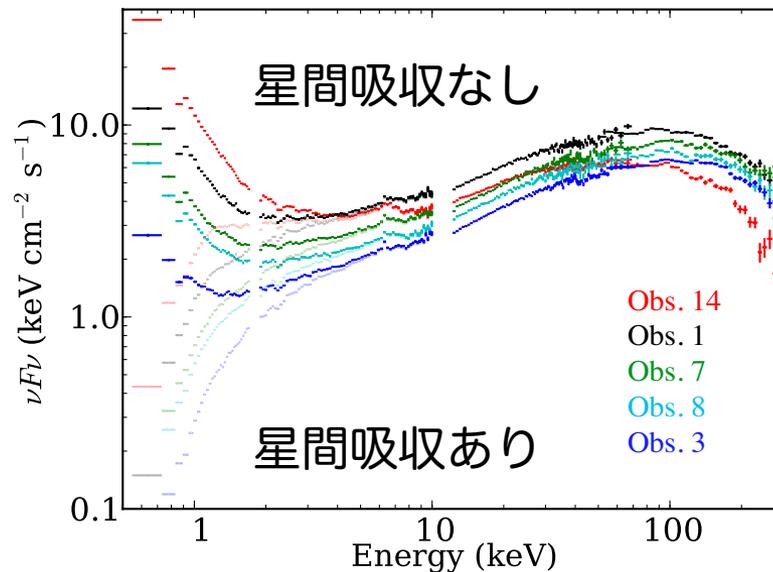
(ハード状態)冷たい円盤と、非一様なコロナの存在 (山田'13)

時期の異なるハード状態を25回観測



明るい時ほど、円盤が良く見える。

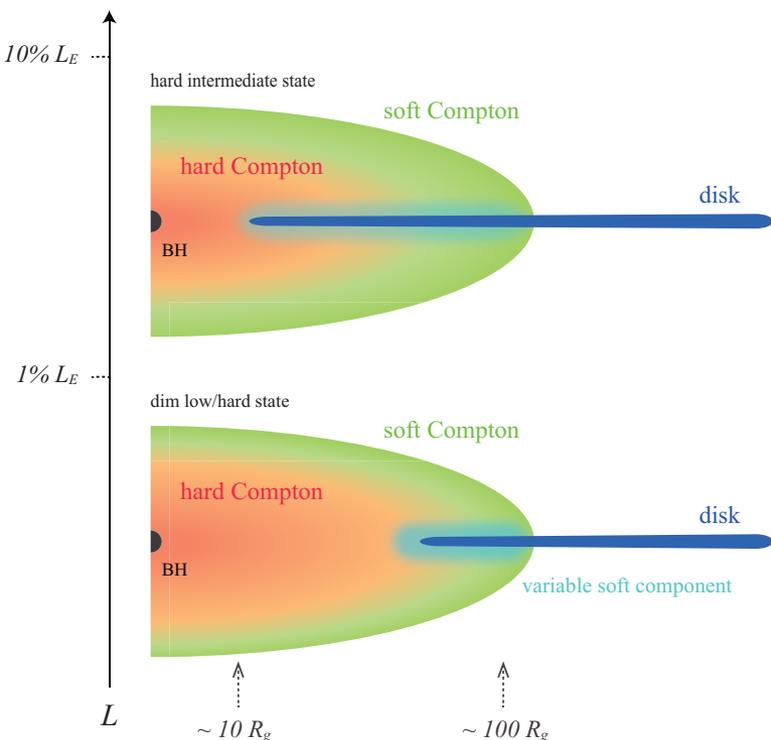
5観測のスペクトルの例



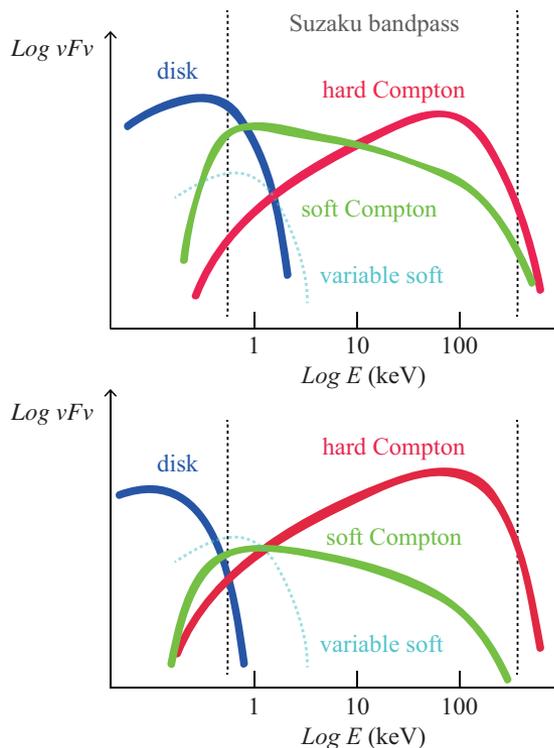
低エネルギー側には、単純な Powerlaw では表現できない excess が存在。ハード状態でも、円盤成分は見えていて、暗くなると、より低温の円盤になる。

(ハード状態) L_{edd} の1%を境に変動の様子が異なる。 (山田'13)

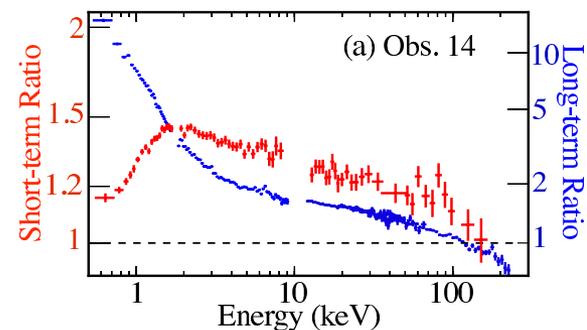
想像図



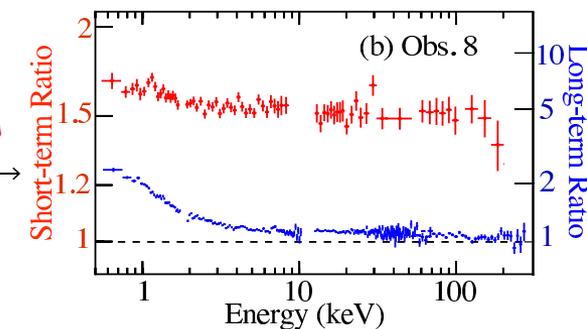
スペクトルのイメージ



数日と数秒の変動率



明るいハード状態



暗いハード状態

エディントン光度の ~ 1%を超えると、コロナがより非一様に変化？

(ハード状態)様々なBHBのハード状態の光度と、予想ジェット光度の関係

エディントン光度の ~ 1%を下回ると、
ジェット光度(予想値)と全光度が同じくらい。

エディントン光度をものすごく下回ると、
ジェット光度(予想値)が卓越 (A0620-00のみ)

エディントン光度の ~ 1%を超えると、
ジェット光度(予想値)が、全光度の約10%程度

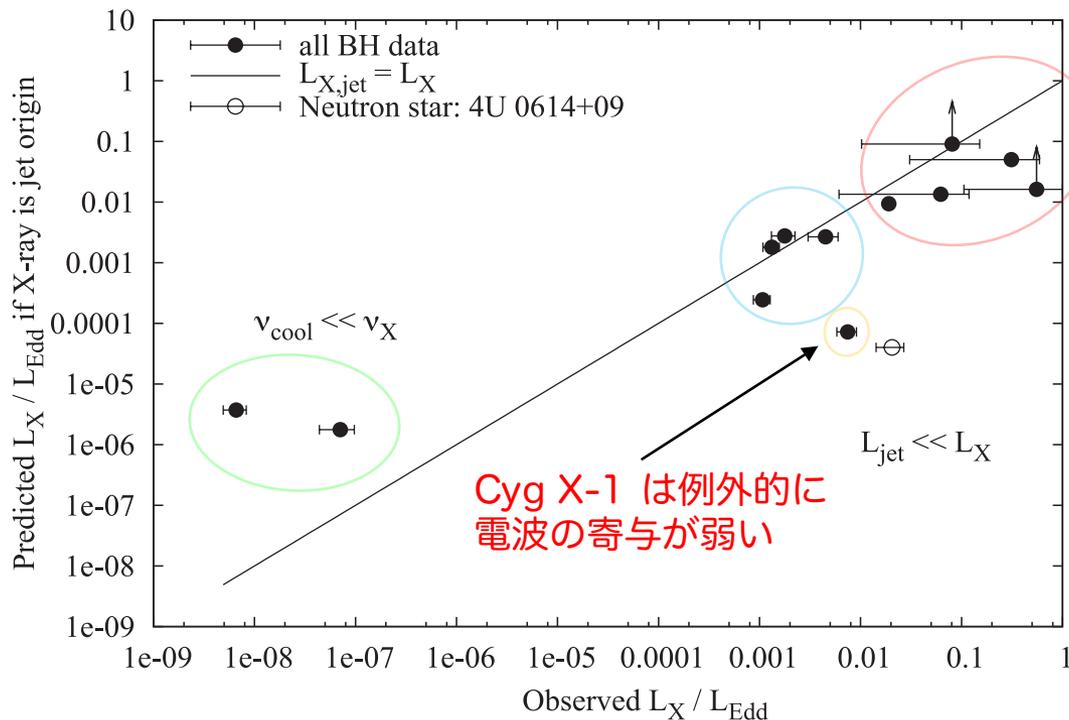
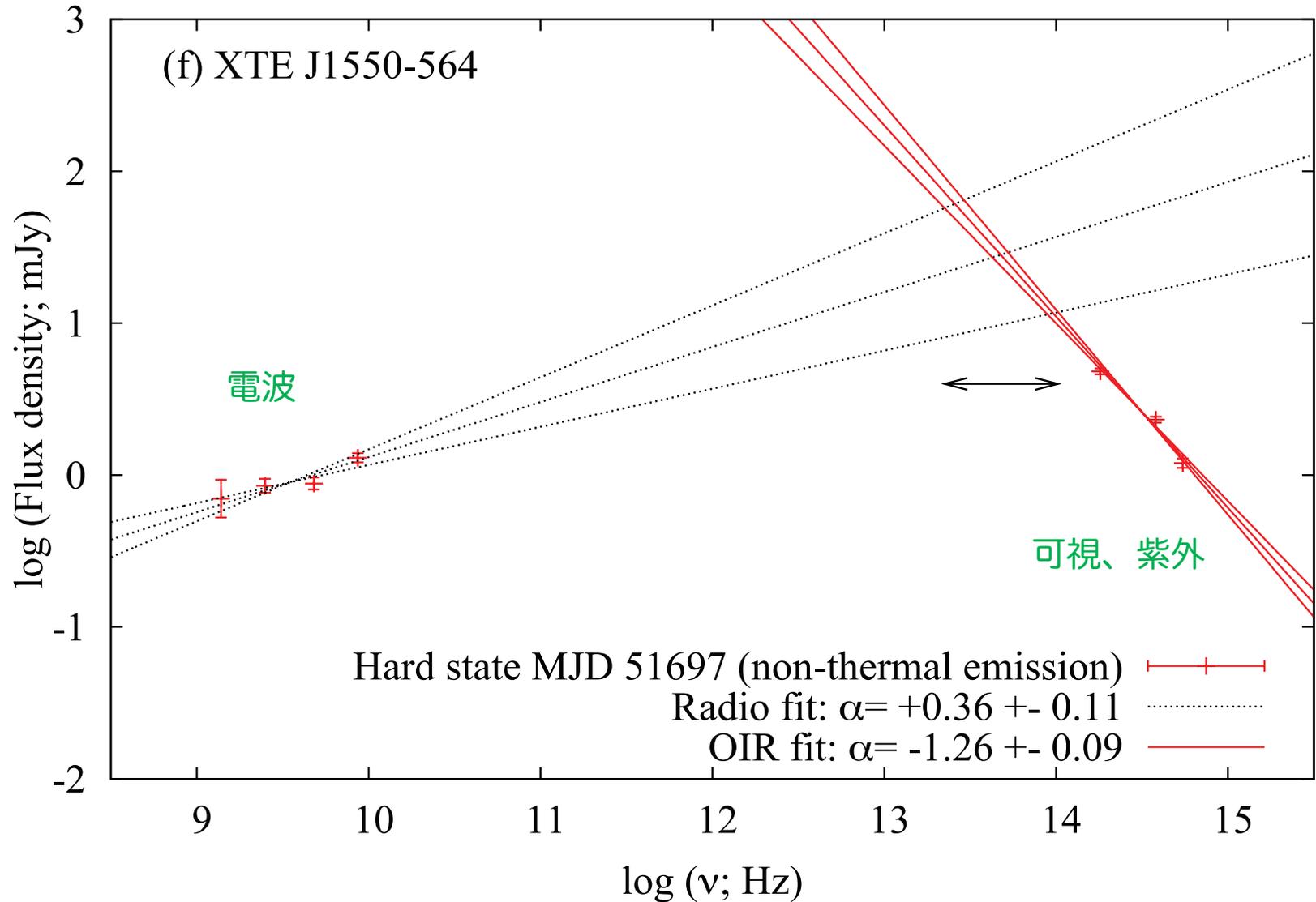


Figure 5. Predicted X-ray luminosity of the jet, if the synchrotron power law extends from the observed jet break to X-ray energies (we adopt $F_\nu \propto \nu^{-0.8}$) versus the observed X-ray luminosity.

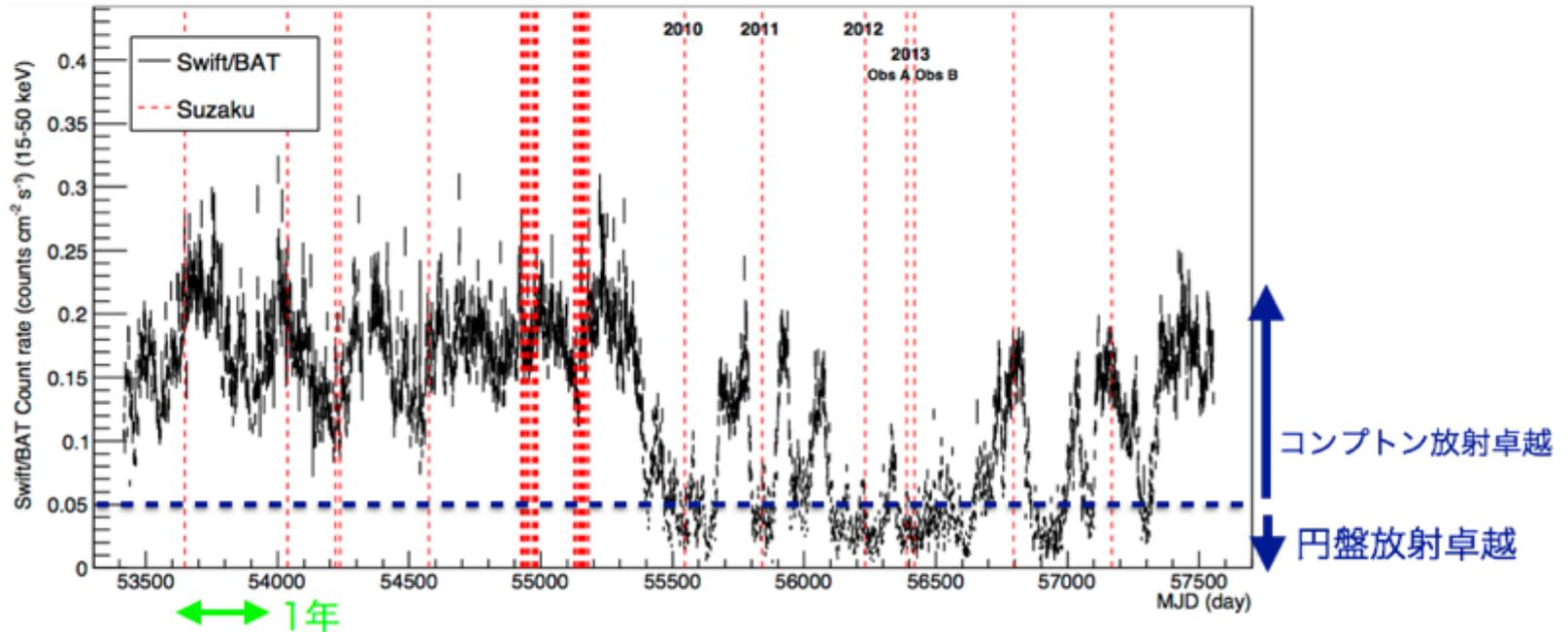
エディントン光度の ~ 1%以下で、
ジェット成分が寄与する可能性あり

(注)ジェット成分の推定の元データ



[河野@広島大 D論より] Cyg X-1 の最もソフトな状態

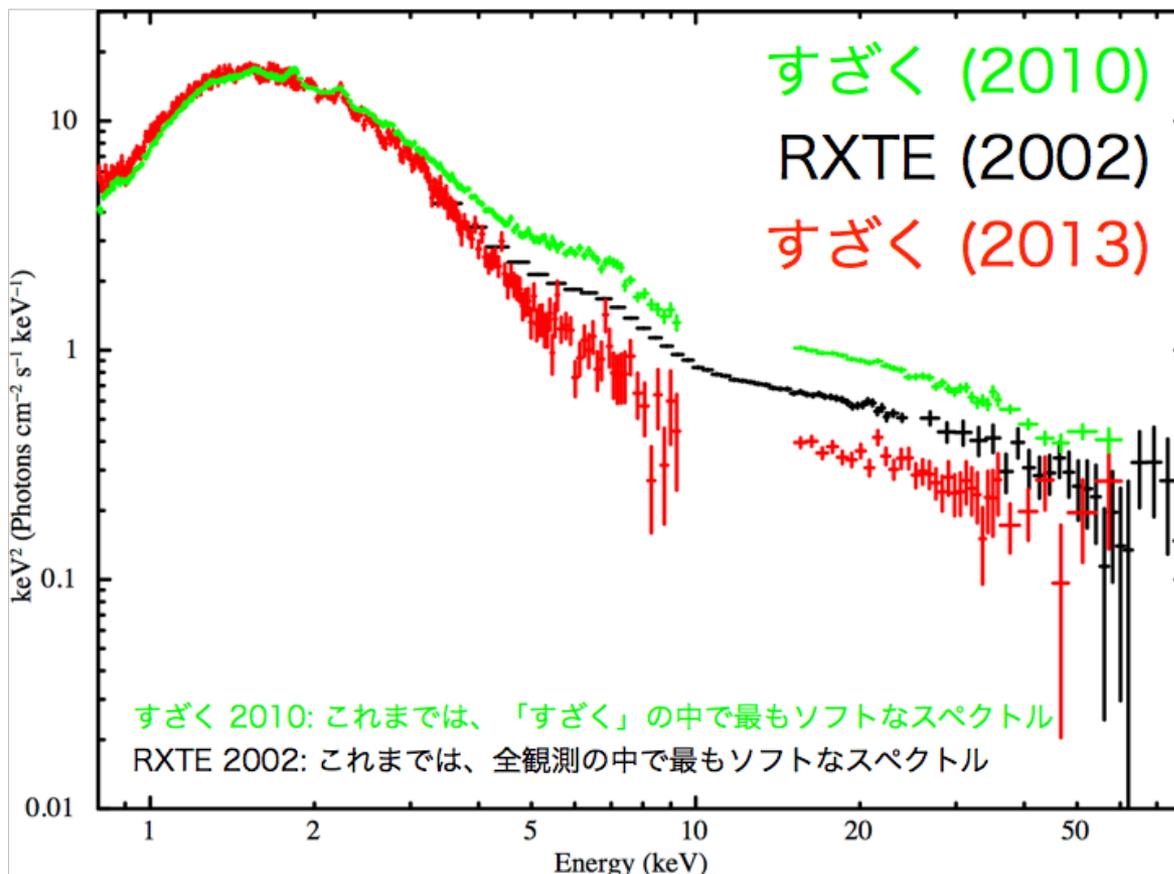
「すざく」によるCyg X-1の観測



「すざく」が観測した円盤放射卓越状態のCyg X-1のは5回
2010, 2011, 2012は出版されており、2010が最もソフトなスペクトルを示す

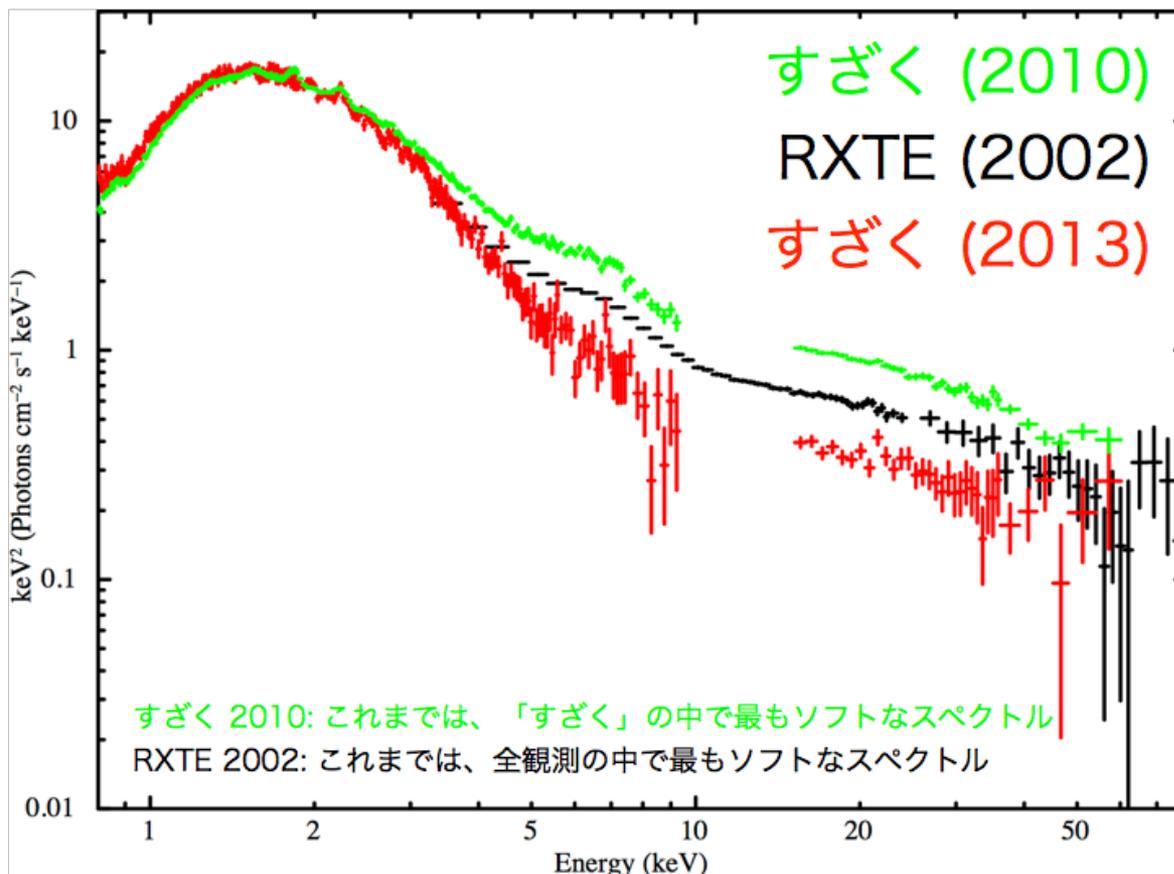
**「すざく」が観測したCyg X-1について
全観測の中から最もソフトなスペクトルを探す**

Cyg X-1のソフトなスペクトルの比較



**すざく (2013)はこれまで観測された中で最もソフト
→スピンを求める為に最適なデータを取得**

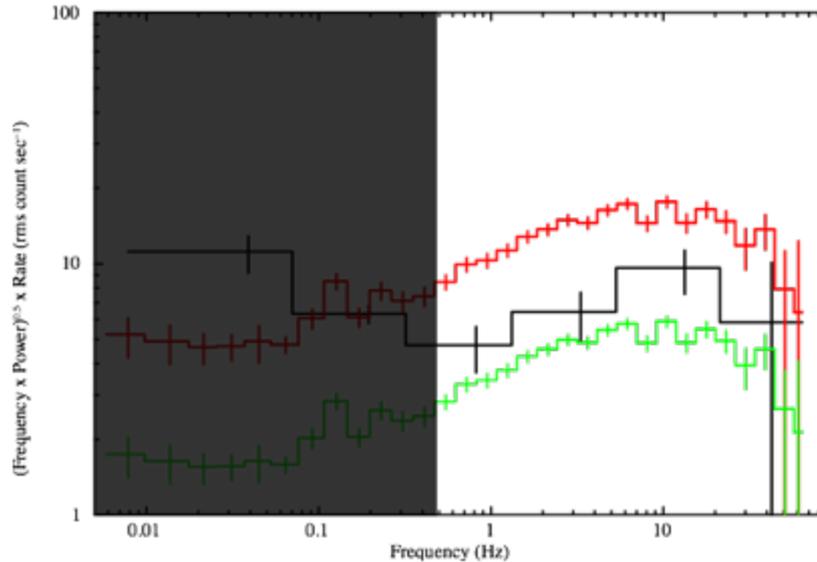
Cyg X-1のソフトなスペクトルの比較



**すざく (2013)はこれまで観測された中で最もソフト
→スピンを求める為に最適なデータを取得**

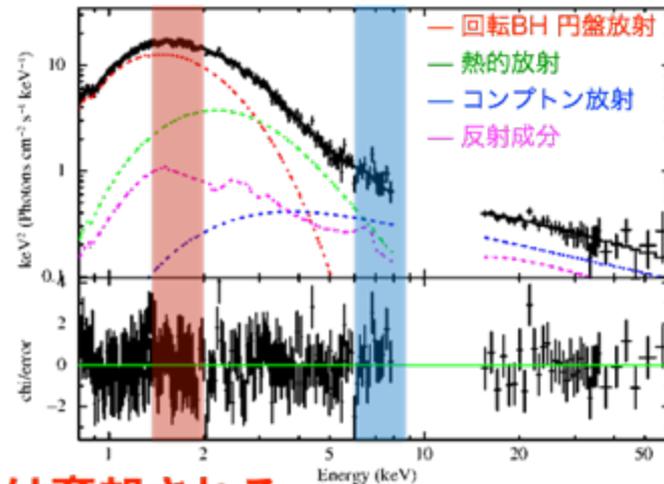
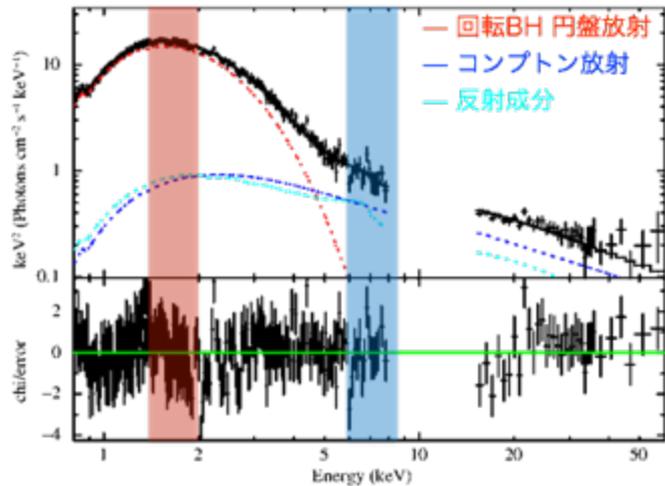
[河野@広島大 D論2016年より] Cyg X-1 の最もソフトな状態

タイミング解析によるモデルの制限



1.5 - 2.0 keV
6.0 - 10.0 keV Standard model (12%)
6.0 - 10.0 keV +thermal model (4%)

○速い成分の割合
standard model: 12%
+thermal model: 4%
non-relativistic model: 4%



Standard model は棄却される

[河野@広島大 D論2016年より] Cyg X-1 の最もソフトな状態

(河野くんのD論より)

「すざく」が観測した2013年のデータは、Cyg X-1の観測の中で、最もソフトなスペクトルであり、最も良くBHスピンの制限を与えることが出来る。

スペクトル解析の結果、 5σ 以上の有意度で、追加の熱的成分が必要。タイミング解析とも無矛盾にモデルを説明できる。

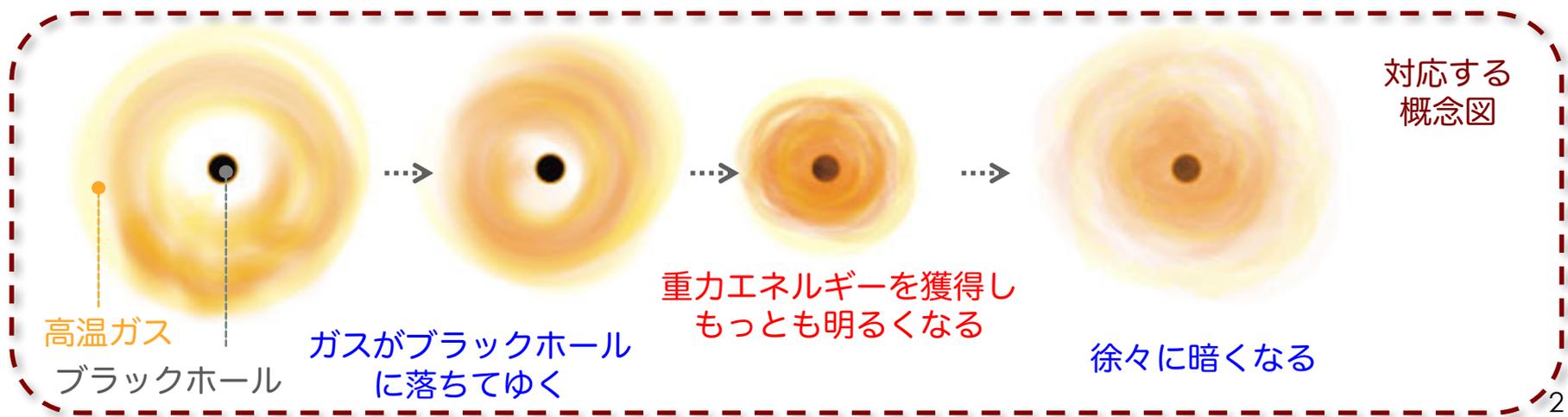
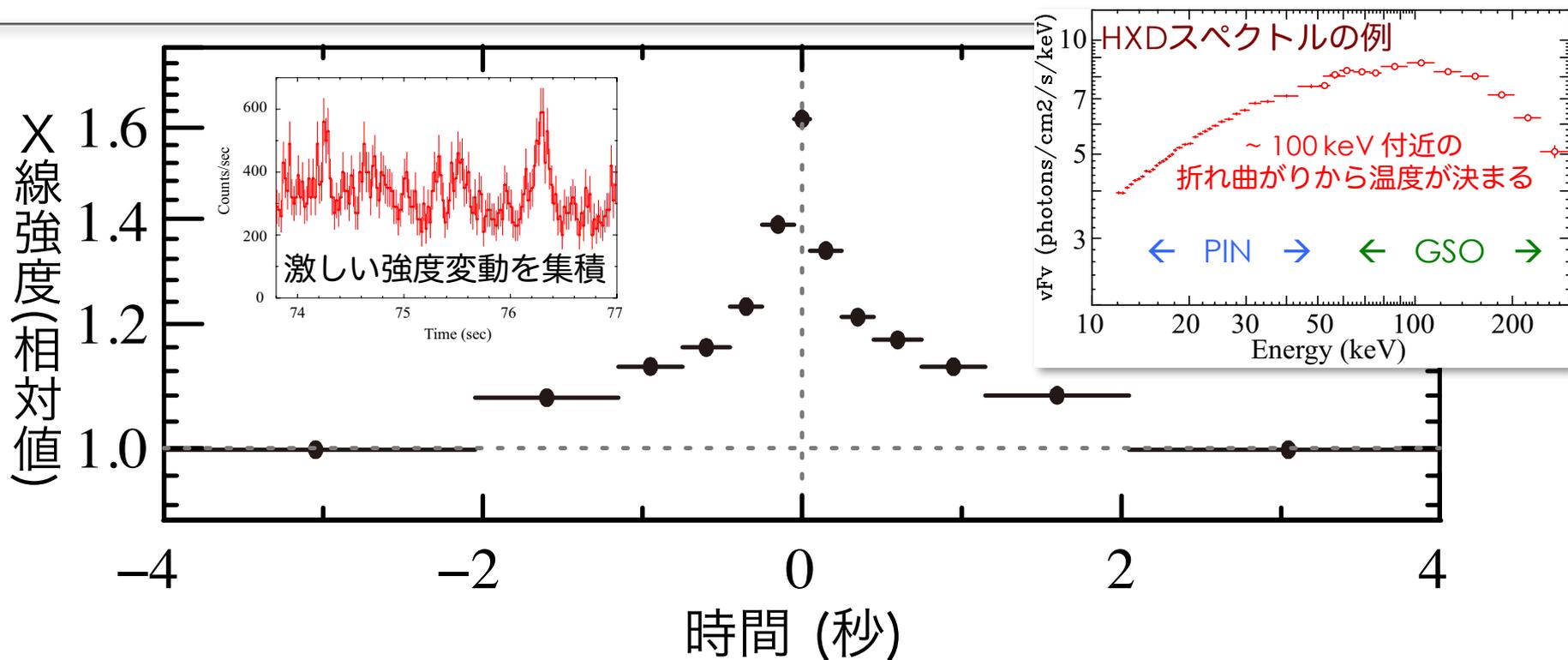
観測至上最もソフトな Cyg X-1でも、円盤卓越状態とコンプトン放射卓越状態の間にあることが分かった。今回の結果では、BHスピンは ~ 0.8 以下と推定した。

要するに、Cyg X-1 の最もソフトなスペクトルを得たが、まだ完璧な disk dominated なスペクトルではなく、その不定性を踏まえると、必ずしも maximum spinning とは言えない。

(=X線のスペクトルで、スピンの決まった、と書いてあっても、信用しすぎないでください。)

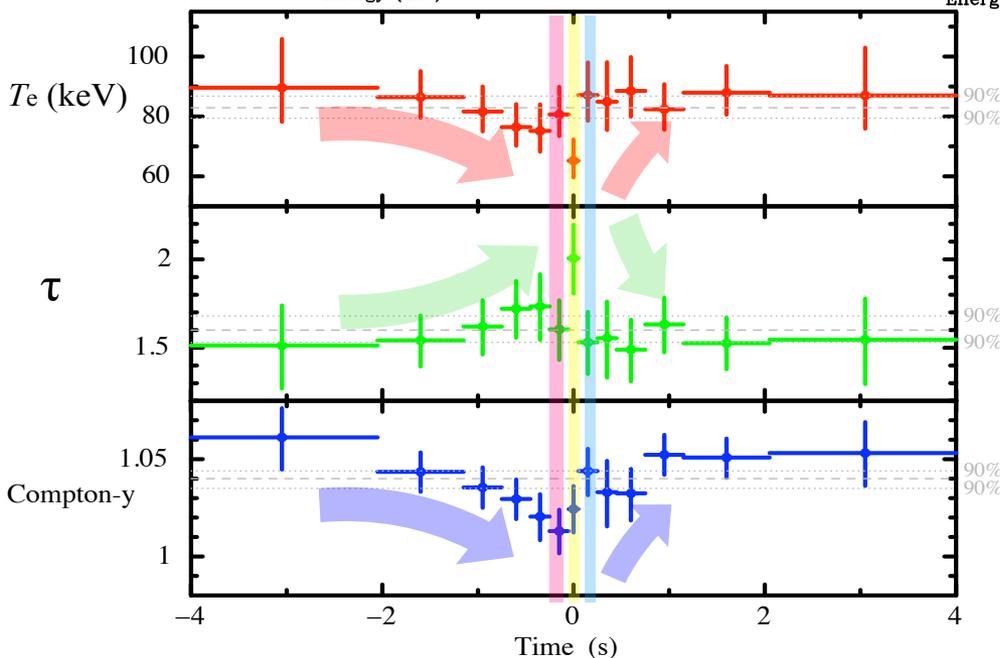
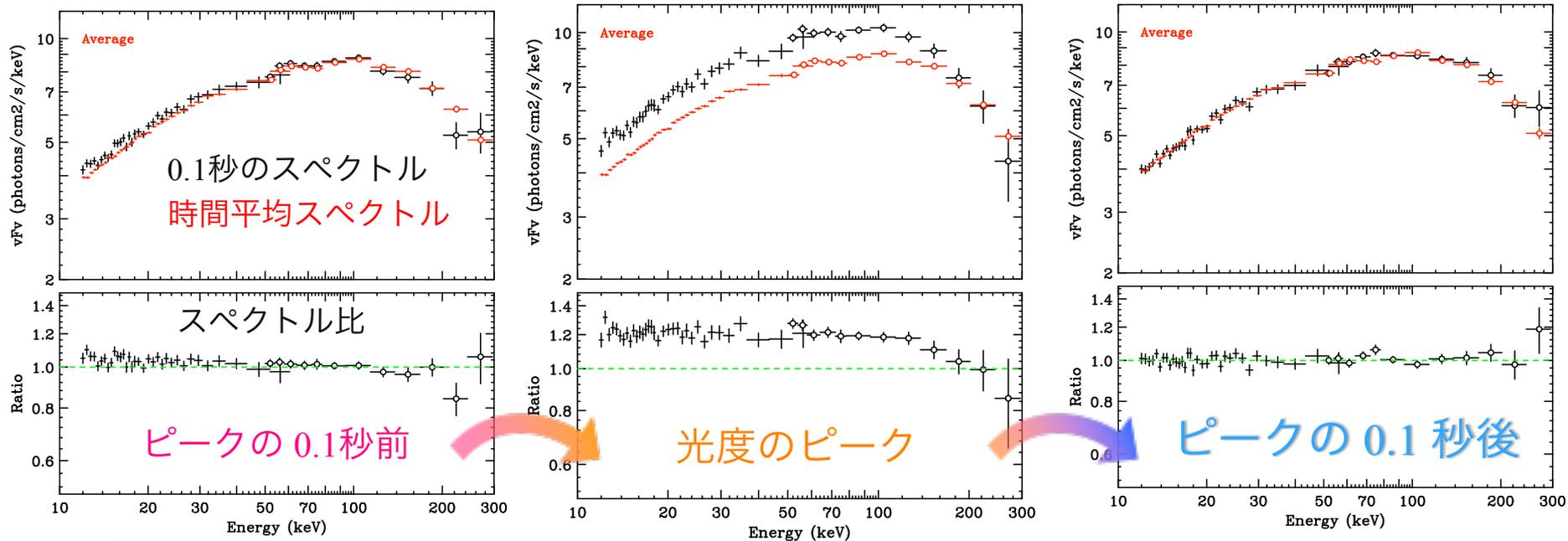
(ハード状態) 硬X線帯域のショット解析

(山田、根来、嶺重他 et al. 2013)



(ハード状態) 硬X線帯域のショット解析

(山田、根来、嶺重他 et al. 2013)



明るくなると、
スペクトルがソフト化、温度が下がる。

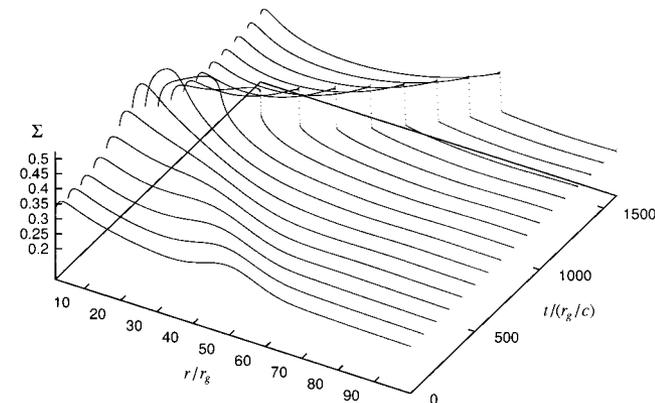
完全に明るくなった直後に、
スペクトルは元に戻り、温度も上昇する。

質量降着とともに、
磁気リコネクションのような突発的な
現象が起こっているのであろう。

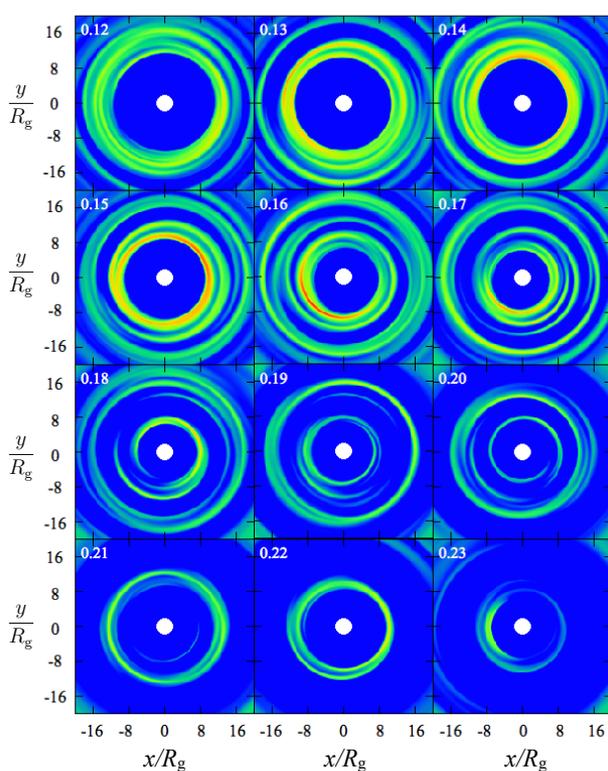
(ハード状態) ショットの観測結果に対応する理論計算

萬元、竹内、嶺重、松元、根来 (1996)

3D-GRRMHD シミュレーション
ガスが間欠的にリング状で落下
(森山、嶺重、高橋(博) 2017)



normalized emissivity j ($a/M=0$ case)



- first gas cloud is formed
- first gas cloud falls to the black hole
- second gas cloud is formed and falls
- arc-shaped (ring) clouds are **intermittently formed** twice

一次元の時間発展を考えなおして、観測と比較するのは今でも面白いだろう。
渡會さん、川口さん、と一緒に再現を試み中。

ハード状態で、disk が ~ 数10Rs で Truncated している場合でも、同様に間欠的な質量落下が起こり、それがショットのようなランダムなミニフレアを起こしているのではないか？

(森山君の首都大セミナーより)

[政井研 谷治君M論より] High Mass BHB の状態遷移

(ヘリウムフロントの計算の方針)

光電離領域は、入力パラメータ(L_X , E_f) を使って、BH-星の間の密度からヘリウムフロントを計算し(伴星に近いほど密度が高いため、BHから単調減少の性質)、イタレーションにより安定する場所を求める。

基礎方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0,$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v} + P) + \rho \nabla \Psi = 0,$$

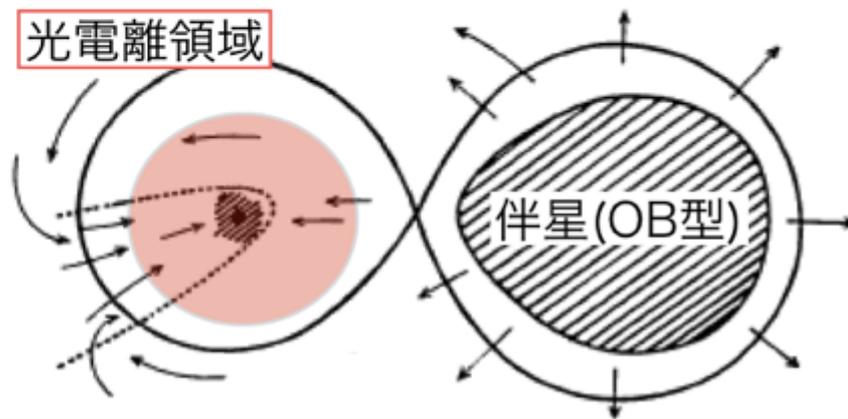
$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot [(E + P)\mathbf{v}] + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \Psi = 0,$$

$$E = P/(\gamma - 1) + \frac{1}{2} \rho v^2,$$

$$\Psi = \Psi_{BH} - \Psi_{\text{accel}},$$

$$P = \frac{\rho k_B T}{\mu m_p}$$

光電離領域



Masai (1984)より:

ソフト状態; (低エネルギー光子多数)

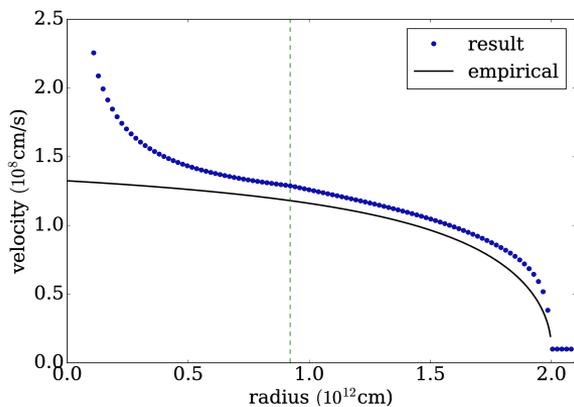
$$R_{\text{He}} = 1.56 \times 10^{12} \left(\frac{n}{10^{11} [\text{cm}^{-3}]} \right)^{-2/3} \left(\frac{L_X}{10^{37} [\text{erg}]} \right)^{1/3} \left(\frac{E_f}{2 [\text{keV}]} \right)^{-1/3} [\text{cm}]$$

ハード状態; (高エネルギー光子多数)

$$R_{\text{He}} = 5.15 \times 10^{11} \left(\frac{n}{10^{11} [\text{cm}^{-3}]} \right)^{-3/5} \left(\frac{L_X}{10^{37} [\text{erg}]} \right)^{2/5} \left(\frac{E_f}{100 [\text{keV}]} \right)^{-2/5} [\text{cm}]$$

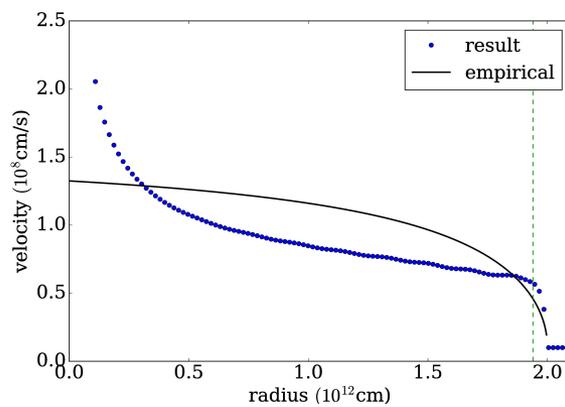
[政井研 谷治君M論より] High Mass BHB の状態遷移

Cyg X-1
Low/Hard



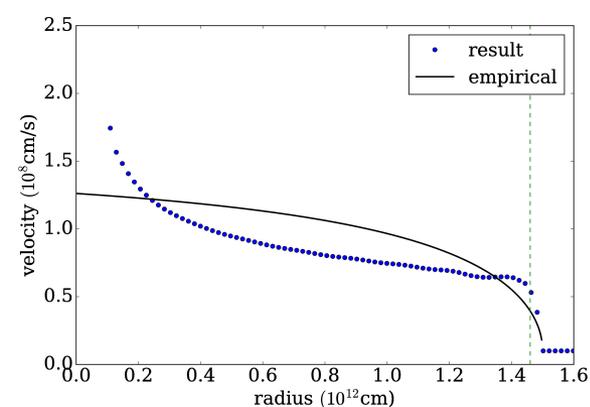
(b)

Cyg X-1
High/Soft

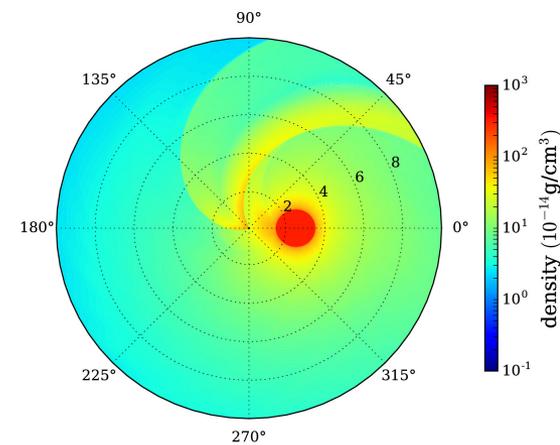
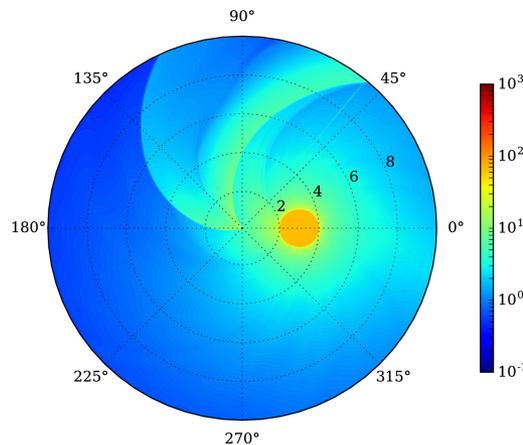
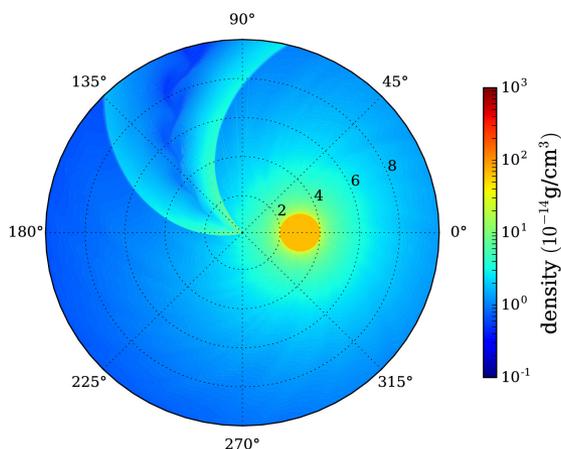


(b)

LMC X-1
High/Soft

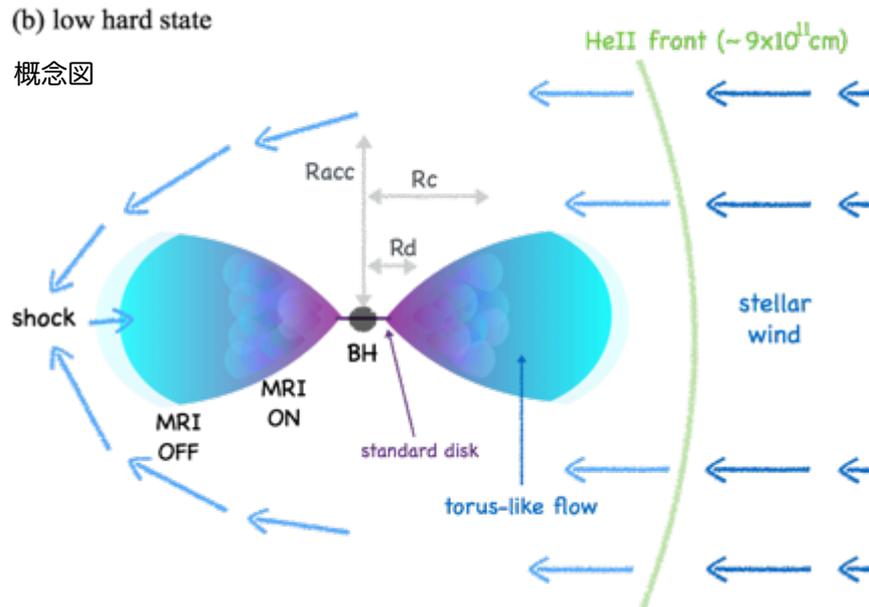
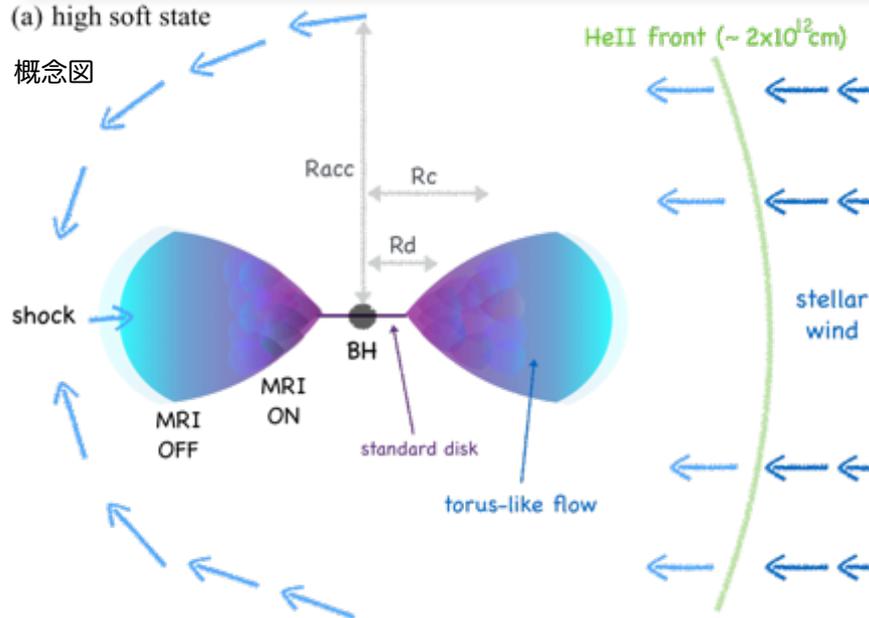


(b)



流体計算だけだと、質量補足率が観測から推定した質量降着率よりも大きく、光学的厚みも1より十分に小さくなる。 → 磁場の必要性 (谷治、山田、政井 et al. submitted)

[政井研 谷治君M論より] High Mass BHB の状態遷移



MRI開始の条件

(Pessah & Psaltis 2005; Begelman & Pringle 2007)

$$v_{A\phi}^2 < c_s v_K,$$

や、

$$\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} = \frac{L_2}{L_1} \sim \frac{z_1 R}{z_2^2} \sim 0.7 y^{0.3} \alpha^{0.9} \dot{m}_1^{-0.7}$$

(Begelman et al. 2015)

から、スケーリングを考えると、
(詳細は割愛)

Cyg X-1

(観測的に)遷移に必要な光度変化: $\Delta L/L \sim 4$

$\rightarrow \delta B < B$

状態遷移が起きやすい

(ただし $\delta B \ll B$ の時, 遷移せず安定)

LMC X-1

(観測的に遷移に)必要な光度変化: $\Delta L/L \sim 10$

$\rightarrow \delta B > B$

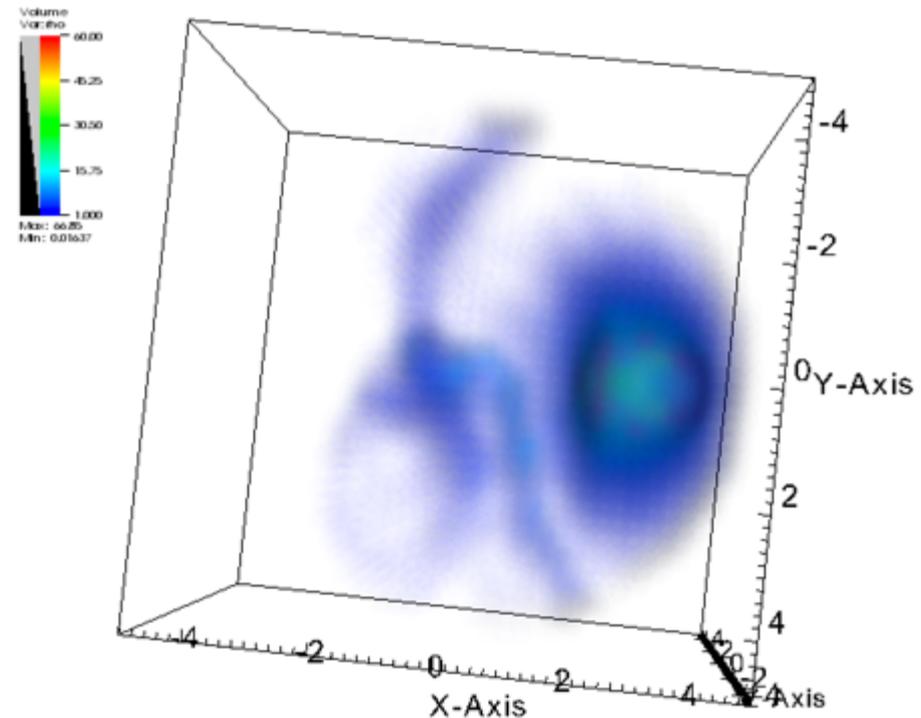
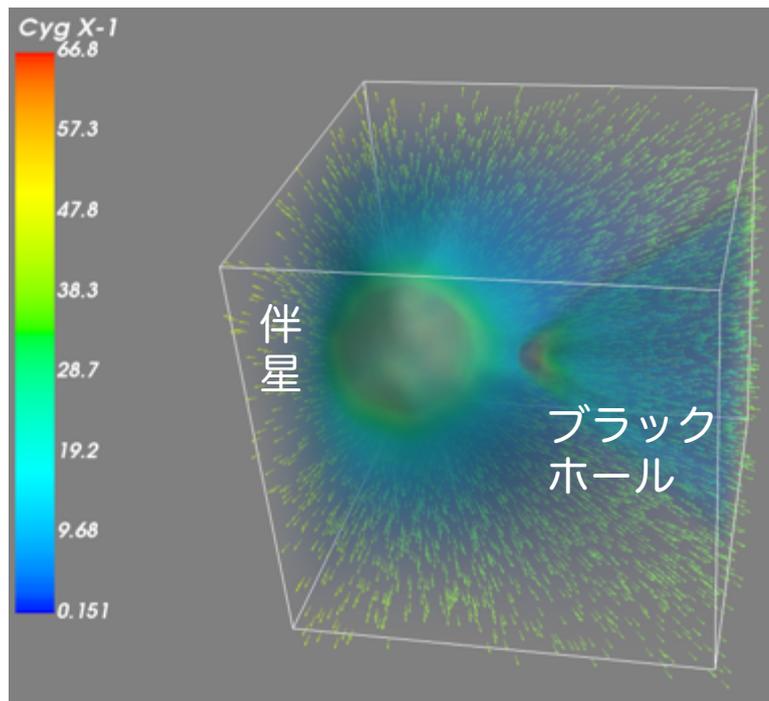
状態遷移が起きにくい

(ずっとソフト状態)

星の磁場を想定。
(円盤外縁で数ガウスとの報告あり。Karitskaya et al. 2010)

[政井研 谷治君M論より] High Mass BHB の状態遷移

解析的にX線による光電離を入れて、回転座標系で流体の計算まではとりあえずできた。



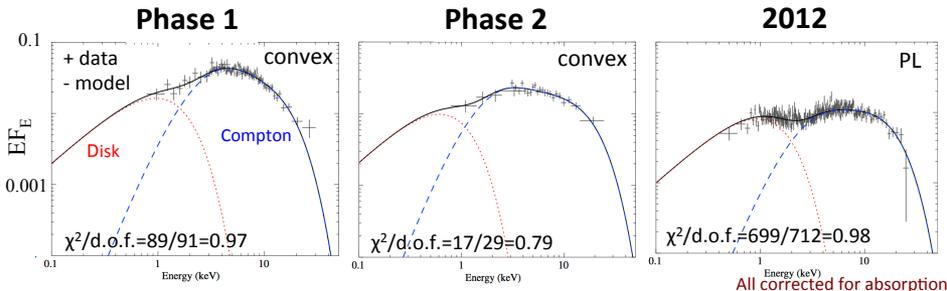
pluto (<http://plutocode.ph.unito.it>) を用いた流体のシミュレーション。
(川島くん、天文台の高橋(博)さんのサポートいただいています。)

磁場を入れたシミュレーションをはじめたところです。
(観測的に Cyg X-1 は円盤外縁で、星からの磁場が数ガウス、という報告あり。)

観測と理論の連携の好例

志達さん(京大上田研→理研)のULXの研究より。

Comparison of the Three Epochs



Disk

$$R_{in} = 1.2^{+0.9}_{-0.6} \times 10^3 \text{ km}^*$$

$$T_{in} = 0.40 \pm 0.07 \text{ keV}$$

Compton

$$T_{seed} = 2 \times T_{in} \text{ (fixed)}$$

$$T_e = 3.3^{+1.3}_{-0.5} \text{ keV}$$

$$\tau = 4.2^{+1.0}_{-1.4}$$

$$L_x = 3.1 \times 10^{40} \text{ erg/s}$$

Disk

$$R_{in} = < 4^{+4}_{-2} \times 10^3 \text{ km}^*$$

$$T_{in} = 0.3 \pm 0.1 \text{ keV}$$

Compton

$$T_{seed} = 2 \times T_{in} \text{ (fixed)}$$

$$T_e = 3.9^{+2.0}_{-0.7} \text{ keV}$$

$$\tau = 4.2^{+1.0}_{-1.3}$$

$$L_x = 2.0 \times 10^{40} \text{ erg/s}$$

Disk

$$R_{in} = 9^{+4}_{-6} \times 10^2 \text{ km}^*$$

$$T_{in} = 0.40 \pm 0.05 \text{ keV}$$

Compton

$$T_{seed} = (2.0 \pm 0.1) \times T_{in}$$

$$T_e = 3.7^{+0.6}_{-0.4} \text{ keV}$$

$$\tau = 5.1^{+0.7}_{-0.8}$$

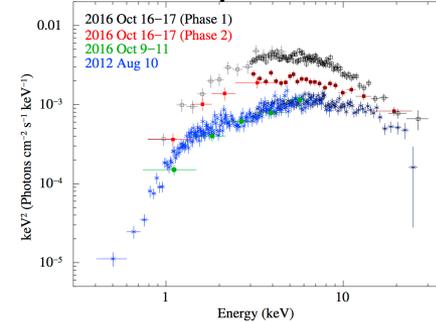
$$L_x = 1.0 \times 10^{40} \text{ erg/s}$$

(*inclination angle = 0° is assumed.)

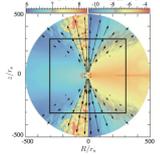
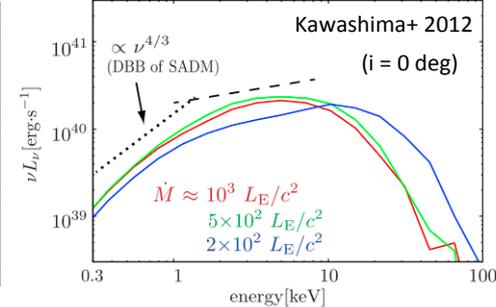
The difference in spectral profile can be explained by small variations of τ and T_e of Comptonization

Interpretation

Observed spectral evolution



spectra from simulation



- Compton thick part of outflow: $R < \sim 10 R_s$ (Kawashima+ 2012, Kitaki+ in prep)
- Our measurement: $R_{in} = \sim 10^3 \text{ km}$ consistent with $R = \sim 10 R_s$ if $M_{BH} = \sim 20 M_{sun}$

観測データそのものは、数年前にアーカイブ。誰でも触れる状態。
数値計算の結果をベースに、データを見つめ直すことで、新しい解釈が生まれた。

観測と理論は、血は繋がっているけども、遠い親戚のような関係。
年に数回は顔を合わせるのを永く続けるのが良いのかもしれません。

まとめ

- ソフト状態の円盤モデルの制限は未だに難しい。(カロリメータで、円盤大気モデルがより厳しく制限できるかもしれないが。)
- ハード状態は、単一の熱的コンプトン放射では再現できない。円盤成分も存在するし、2成分以上のコンプトン放射が必要になる。
- ハード状態の暗い時(Ledd の1%以下)は、ジェット成分の寄与のせいか、あかるいハード状態とは挙動が異なる。
- ハード状態で、激しい時間変動に伴って、スペクトルが変化するのを説明するには、磁場が必要と思われる。
- HMXBの BHB の状態遷移は、BHからの輻射と磁場も考慮するとうまく説明できるかもしれない。

松元先生
還暦おめでとうございます。

