降着円盤のX線観測

井上 一 (JAXA宇宙科学研究所)

ブラックホール連星(磁場の弱い中性子星連星)の強度・スペクトル状態

- High Soft State
- Low Hard State
- Very High State
- Standard disk \leftrightarrow Slim disk \mathcal{O} Limit cycles
- Jet activities
- 降着円盤最外縁部の降着リング
 - X線連星に見られる超軌道周期
 - 降着円盤最外縁部における降着リングとその歳差運動
 - X線照射による降着リング内の熱的不安定

活動銀河中心核

- ブラックホール連星との類似性
- ●活動中心核を取り巻く環境の統一理解
- 広がった鉄輝線(disk line)構造の起源
- X線吸収の短時間変動
- Broad Line Regionの降着リングとの類似性

<u>X-rays</u>

photon energy : $100 \text{ eV} \sim 100 \text{ keV}$ wave length : $0.1 \text{ Å} \sim 100 \text{ Å}$



1962 ロッシ・グループ(MIT)のロケット実験による宇宙X線源の発見

- ・点源(Sco X-1)の発見
- ・Cosmic X-ray Background (CXB)の発見



FIG. 1. Number of counts versus azimuth angle. The numbers represent counts accumulated in 350 seconds in each 6° angular interval.

(Giacconi et al. 1962)

世界の主なX線天文衛星と日本のX線天文衛星

U.S.	Europe	Japan	私の履歴
Uhuru (1970)	ANS (1974) Ariel-V (1974)		
SAS-3 (1975)			大学院
Einstein (1978)	. , ,	CORSA(1976 打上げ失敗)	
HEAO-1 (1979)		Hakucho (1979)	
	EXOSAT (1983)	Tenma (1983)	► X線天文衛星の 開発・運用と
	GRANAT (1989)	Ginga (1987)	そのデータ解
	ROSAT (1990)		かて ・ 角毛 米尺
RXTE (1995)	Beppo SAX (1996)	ASCA (1993)	
Chandra (1999)	XMM-Newton (1999)	ASTRO-E(2000 打上げ失敗)	
		Suzaku (2005)	
		MAXI (2009)	管理的仕事
		Hitomi (2016)	 大学教育・研究 好きな研究

Discoveries of rapid time variations in bright X-ray sources with UHURU

Sub-second variations from Cyg X-1: Oda et al. 1971, Ap.J.L. 166, L1 Counts / 0.096 s



FIG. 3.—Counts accumulated in 0.096 seconds in several passes on Cyg X-1 on 1971 March 6. The data in the three scans a, b, and c were obtained at the UT times shown. Expected statistical fluctuations are shown in a few instances. Cyg X-1 was essentially in the center of the field of view during each pass. Dashed line represents the triangular response of the detector normalized to the total observed counts.

A requirement of a collapsed object such as

a neutron star or a black hole was pointed out.

This time variation is now known to be aperiodic.



Discovery of the 5.6 day orbital period and the mass function of the Cyg X-1 system.

Webster & Murdin, 1972, Nature, 235, 37 Bolton, 1972, Nature, 235, 271



FIG. 4.—Radial-velocity phase diagram of HDE 226868. Symbols distinguish radial velocity sources as follows: •, this paper, and Webster and Murdin 1972; •, Bolton 1972a, b; \blacktriangle , Brucato and Kristian 1972; \bigtriangleup , Brucato and Zappala 1974; \bigcirc , Smith *et al.* 1973. Vertical bars labeled 1, 2, 3, 4, 5 are placed at the phases of the X-ray events calculated as in table 1. The bars are centered on the conjunction velocity whose uncertainty (95. confidence limits) is represented by the height of the bars. M is the phase of X-ray maximum (Sanford *et al.* 1974).

Mass estimation of the compact star e.g. Gies & Bolton, 1986, Ap.J. 304, 371.

$$M_{\chi} > 5 M_{sun}$$

significantly larger than the neutron star limit



(from Mason et al. 1974, Ap.J.L. 192, L65)



Fig. 10—Solutions for the masses of the visible (M_{opl}) and unseen (M_x) stars for several values of the fill-out factor ρ (solid lines) and synchronism parameter Ω (short dashes). Also shown are lines of constant distance in kiloparsecs (long dashes) and the limit established by the lack of X-ray eclipses (short-long dashes; marked E). The acceptable solutions are found in the shaded region.

○ ブラックホール連星(磁場の弱い中性子星連星)の強度・スペクトル状態

- High Soft State
- Low Hard State
- Very High State
- Standard disk \leftrightarrow Slim disk \mathcal{O} Limit cycles
- Jet activities
- 降着円盤最外縁部の降着リング
 - X線連星に見られる超軌道周期
 - 降着円盤最外縁部における降着リングとその歳差運動
 - X線照射による降着リング内の熱的不安定

活動銀河中心核

- ブラックホール連星との類似性
- ●活動中心核を取り巻く環境の統一理解
- 広がった鉄輝線(disk line)構造の起源
- X線吸収の短時間変動
- Broad Line Regionの降着リングとの類似性

Discovery of the high-low transition of Cyg X-1

(Tananbaum et al. 1972, Ap.J. 177, L5)



FIG. 1.—The X-ray intensity of Cyg X-1 in three energy ranges between 2 and 20 keV and the radio fluxes at two frequencies are plotted against the day of 1970.

High Soft State と Low Hard State



Fig. 1. Suzaku spectra of Cyg X-1 in the response-removed νF_{ν} form. The black one was obtained in the high/soft state on 2010 December 16. The red one was taken in the low/hard state on 2005 October 5, which is the same as used in Paper I. (Color online)

(Yamada et al. 2013)

High Soft State (HSS)

Low Hard State (LHS)







D: 天体までの距離

「てんま」による中性子星連星のX線スペクトルの観測

Mitsuda et al. (1984)

中性子星連星

ここでは磁場の弱い中性子星のX線連星の意味で使う (低質量X線連星:LMXBと呼ばれることも多い。)



明るい4つの中性子星連星の

10-30分ごとのX線強度変動





Fig. 5. The results of the spectral fitting by a combination of the blackbody and the "multicolor" spectra. Two free parameters, the bolometric fluxes of the soft and hard components, and the reduced χ^2 values are plotted against time. In the fits, the shape of the both components and the value of $N_{\rm H}$ are fixed to those values obtained from the average spectra of both components obtained from the pairs for each source, except for a few data points of GX 5–1, where a slightly lower temperature of the blackbody is used (see text).

For this hypothesis, an observed spectrum f(E) can be expressed by

$$f(E) = f_s(E) + f_h(E)$$
, (1)

強度変動に伴うスペクトル変化を スペクトルー定のソフト成分 スペクトルー定のハード成分 に分離



Fig. 2. (a) Two pulse-height spectra of one of the paris for Sco X-1. They were observed with an interval of about 60 min.

(b) The flux ratio as a function of energy for the two spectra in figure 2a.

where $f_h(E)$ and $f_s(E)$ are the hard component spectrum and the soft component spectrum, respectively.

Let us suppose the hard componet increased by a factor β . Then,

$$f_{\rm h}(E) = \frac{1}{\beta - 1} \left[f_2(E) - f_1(E) \right], \tag{2}$$

$$f_s(E) = \frac{1}{\beta - 1} \left[\beta f_1(E) - f_2(E) \right],$$
 (3)

where $f_1(E)$ and $f_2(E)$ are the spectra before and after the increase. Thus, $f_h(E)$ is obtained from the difference of the two spectra as shown in the last subsection. $f_*(E)$ can be derived as the difference between the two spectra after normalizing $f_*(E)$ to $f_*(E)$ in the range above 10 keV. Figure 3b shows $f_*(E)$ so-obtained for the pair of Sco X-1 spectra shown in figure 2a.



Fig. 3. (a) The difference of the two spectra of Sco X-1 shown in figure 2a. The best-fit blackbody spectrum convolved with the counter response function is shown by the histogram.

(b) The soft component of Sco X-1 derived from the pair in figure 2a. The histogram shows the best-fit "multicolor" spectrum convolved with the counter response function.

分離された2スペクトル成分の自然な解釈



Fig. 4. Examples of the spectrum in the pairs for Sco X-1, $4U \,1608 - 522$, GX 349 + 2, and GX 5 - 1 (cross), and the decomposed soft (crossed circle) and hard components (rhomb). The best-fit model spectra of the two components are shown by the histograms.

(1) 降着円盤からの多温度黒体放射





「てんま」によるブラックホール連星GX 339-4のX線スペクトルの観測



FIG. 2.—The X-ray spectra of GX 339-4 obtained with the *Tenma* GSPC, on 1983 May 9 (a), May 11 (b) and May 14 (c). The histograms show spectral model components, convolved with the detector response, to be compared with the observed data (*crosses*). The models include a disk-blackbody model (see text) representing the soft component (denoted DBB in b); a power-law component representing the hard tail (denoted PL); an iron emission line with its energy and intensity free parameters (denoted Line in b); K-edge absorption at 8.8 keV due to helium-like iron atoms (indicated by arrows); and neutral absorption. The best-fit model parameters are summarized in Table 2.

TABLE 2

IMPROVED MODEL FITTING TO THE THREE SPECTRA OF FIGURE 2^a

	Spectrum			
PARAMETER	а	b	С	
Disk-blackbody:				
$r_{in} (\cos i)^{1/2} (km)^{b}$	20.8 ± 0.4	20.7 ± 0.4	20.5 ± 0.5	
$T_{in}(\text{keV})$	0.769 ± 0.005	0.774 + 0.005	0.773 + 0.006	
Power law:		_		
Scale $(10^{-2} \text{ photons s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ keV}^{-1})$	0.3 ± 0.4	11 ± 4	28 ± 10	
Photon index	-0.9 ± 0.5	-1.9 + 0.2	-2.1 ± 0.2	
Emission Line ^c :	-	_		
Line energy (keV)	6.45 ± 0.15	6.59 ± 0.10	6.69 ± 0.10	
Line flux $(10^{-4} \text{ photons s}^{-1} \text{ cm}^{-2})$	4.6 ± 2.2	3.6 ± 2.2	5.9 + 3.0	
Equivalent width (eV)	49 ± 25	31 ± 18	42 + 21	
$N_{\rm Fe}^{+24} (10^{19} {\rm cm}^{-2})^{\rm d}$	0.7 ± 0.6	2.1 ± 0.7	2.1 + 0.6	
$N_{\rm H}(10^{21}{\rm cm}^{-2})$	9.5 ± 2.5	8.9 ± 2.5	7.1 ± 2.6	
Reduced χ^{2c}	1.63	1.71	1.53	







Makishima et al. (1986) は、ブラック ホール連星のある状態のX線スペクト ルが2成分で説明できることを発見。

(1) 降着円盤からの多温度黒体放射

(2)中性子星連星で見られた単一温度 黒体放射成分にかわって、ベキ型の 成分が見られる。

中性子星連星で見られた境界層から の黒体放射が見られないことは、降 着円盤最内縁に硬い表面がないこと を示唆。

中心天体はブラックホールで あると考えて矛盾がない。

「ぎんが」による、いくつものブラックホールX線新星の発見

数10日の時定数を持つ類似の減衰曲線





X線光度の減衰に伴うスペクトル変化



Tanaka & Shibazaki (1996)

「ぎんが」によるブラックホール連星の観測



$$F(E_X) \approx \frac{8\pi r_{in}^2 \cos \theta}{3D^2} \int_{T_{out}}^{T_{in}} \left(\frac{T}{T_{in}}\right)^{-11/8} B(E_X, T) \frac{dT}{T_{in}} \qquad r_{in}, T_{in} : 最内縁半径、最内縁温度 \\ \theta: 円盤に対する視線の傾き角 \\ D: 天体までの距離$$

いずれのX線源においても、X線強度(降着流量)が大きく変わって も、降着円盤の最内縁半径は、時間的にほとんど一定。

「降着円盤が、ブラックホールのまわりの最小安定円軌道まで進入 している」と考えて矛盾がない。 High Soft StateにおけるCyg X-1の定常な標準円盤成分と変動するSteep power law成分

Churazov et al. (2001)

High Soft Stateにおける16 s time scaleでの強度変動は、変動しない非常にsoftな成分と 変動するhardな成分からなっていることで説明できる。



Figure 1. (a) Left: The dependence of the count rate in the soft band (<3.3 keV) on the count rate in the hard band (>9.4 keV). Each data point represents a 16 s averaged count rate (*RXTE* observations on 1996 June 4 and 16). (b) Right: Spectra of 'constant' [open circles – A(E)] and 'variable' [solid circles – B(E)] components, derived from the linear fits of the correlation between count rate in different channels. Normalization of the 'variable' component B(E) is arbitrary. For comparison the light grey curve shows the spectrum of a multicolour black-body emission with a characteristic temperature of 0.5 keV. The two upper spectra (solid squares) were averaged over the periods of time when the count rate above 9 keV was high and low respectively. The dark grey lines show that these spectra can be reasonably well (within 10–15 per cent) approximated by a model M(E) = A(E) + IB(E) consisting of the stable and variable spectral components where *I* (the normalization of the variable component) is the only free parameter.

High Soft StateにおけるCyg X-1のPower Spectral Density



Figure 2. Power density spectrum of Cygnus X-1 during 1996 June soft state (6–13 keV band, *RXTE* data). At lower energies the shape of the PDS is the same, but the normalization is lower, because of the dominant contribution of the stable soft component to the observed X-ray flux.

Normalized Power Spectral Density

$$NPSD_{k} = \frac{\left[a_{k}^{2} + b_{k}^{2} - (1/n)\sigma^{2}\right]T}{(\bar{x} - B)^{2}},$$
$$a_{k} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} x_{j} \cos\left(\frac{2\pi k j}{n}\right),$$
$$b_{k} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} x_{j} \sin\left(\frac{2\pi k j}{n}\right), \quad k = 0, \dots, n/2$$

Miyamoto et al. (1994)

 $x_j: n 個続くデータ・ビンのj 個目のカウント数$ $<math>\bar{x}: n 個のデータの平均カウント数$ B: ビンあたりのバックグランドカウント数 $\sigma^2: 統計誤差のパワー$

 $T: 全観測時間 (n\Delta T: \Delta T は 1 ビンの時間幅)$ 変動の振動数<math>fは、 $f = \frac{k}{T}$

PSDは、単位振動数当たりの振幅の二乗を表すので、振動数fにおけるPSDを P_f で表すと、その振動数付近の変動の振幅の二乗は、近似的に fP_f で表される。



HSSにおけるCyg X-1のpower law成分は 10⁻³~10 Hzの振動数範囲で、およそ 10%の振幅の振動をしている。

Shot noise model

Cyg X-1で見つかったchaoticな強度変動の説明のためにTerrell (1972)が最初に導入。

時間スケールτのshot noiseが、平均間隔λでランダムに起こると考える。

 $f < f_0: f^0$ white noiseと呼ばれる。 振幅のピークは f_0 付近にある。 $f > f_0: f^{-2}$ red noiseと呼ばれる。

f⁻¹ noiseを説明するには、いろいろな時間スケールの、同じ振幅の、ランダム変動を 重ねなければならない。 MAXIによるCyg X-1の長期観測

Sugimoto et al. (2016)

High Soft StateとLow Hard Stateを繰り返し起こしている。



Sugimoto et al. (2016)

HSS、LHSそれぞれの10⁻⁴~10⁻⁸ HzのPSDを求めた。

Fig. 2. Hardness–intensity diagram (top panel) and the histogram of the 4–10 keV vs. 2–4 keV HR (bottom panel). Blue and red data points specify the LHS and the HSS, respectively, while black points were taken during transitions.

Hardness Ratio (4-10 keV / 2-4 keV)



降着円盤での角運動量輸送に伴うゆらぎ



X線発生領域に流入してくる M の時間変動を見ていると考えられる。

Lyubarskii (1997)

降着円盤での角運動量輸送を規定する α パラメーターに揺らぎを導入。 降着率の変動のpower spectral density of f^1 になることを示した。

Shakura & Sunyaev (1973)

落下速度 $v_r = \alpha \left(\frac{h}{r}\right)^2 v_{\phi}$ aがゆらげば、それに比例して 降着率 $\dot{M} = 2\pi r \Sigma v_r$ ゆ \dot{M} もゆらぐ。 (r: 円盤の中心からの距離、2h: 円盤の厚み、 v_{ϕ} : 円盤回転速度、Σ: 降着物質柱密度)

角運動量が撹拌される範囲がh程度だとすると、円盤の各場所 ごとに、~ $\frac{h}{v_r}$ のtime scaleの \dot{M} の変動がのる。 α のゆらぎがどこも P_f $\propto f^{-1}$ 同じなら、どのtime scale (f)の \dot{M} の変動も振幅は同じになる。

「降着円盤での角運動量輸送に伴うゆらぎ」でf⁻¹ noiseを説明するなら







変動の時間スケールは数10分

中性子星近傍での動力学時間スケールはサブミリ秒



ー層の流れでは、上流より下流の方が 変動が大きいことになる。







Figure 2 Changes in the shape of X-ray spectrum with luminosity. (a) The spectra of the neutronstar LMXB 1068-522 (Mitsuda et al 1989, Yoshida et al 1993). (b) The spectra of the blackhole LMXB GS/GRS 1124-684 (Ebisawa et al 1994), in which the *Ginga* observation dates are indicated. These spectra have been corrected for the detector response (Tanaka 1992b, 1994).

Tanaka & Shibazaki (1996)

中性子星連星X1608-522のX線光度減少に伴うスペクトルのハード化

Mitsuda et al. (1989)

Tenma observations



Fig. 1. X-ray spectral hardness ratio (6–10 keV to 2–6 keV) as a function of X-ray intensity for all the 1983 and 1984 observations of X1608–522. Each data point corresponds to the average over a 20- to 30-min observation. The data points from the 1983 and 1984 observations were respectively divided into 3 and 10 groups, a-c and A-K, as indicated in the figure.



Fig. 2. Examples of the pulse-height spectra of X1608-522. The average spectra for group b of 1983 data, and groups A and F of 1984 are shown respectively.





モデル

disk blackbody spectrum (標準降着円盤成分)

Comptonized blackbody spectrum (中性子星表面付近からの黒体放射が、それを囲む 高温プラズマ電子により逆コンプトン散乱を受けたもの)



Fig. 3. Examples of the decompositions of pulse-height spectra with Model 1. The observed pulse-height spectra of groups A and F are plotted with crosses. The best-fit model functions of the two spectral components and their sum, which are convolved with the detector response function, are shown with step functions. Data points in the energy range 5.7-7.7 keV were excluded in the fits.



+

Nishimura et al. (1986)





Fitting results



Fig. 4. The best-fit values of Model 1. The color temperature at the inner edge of the optically thick accretion disk, T_{in} , the blackbody temperature, T_b , and the Compton y-parameter are plotted as functions of the bolometric energy flux. The two temperatures decrease gradually as the flux decreases, whereas the Compton y-parameter increases sharply at around $7 \times 10^{-9} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$.

Comptonizationで、**hot electrons**から**photons**に 輸送されるエネルギーの割合

E: photonのもとのエネルギー

 $\Delta E: Comptonization で photon が 得たエネルギー$



「てんま」によるX1608-522からのX線バーストのスペクトル観測

Low hard stateで、中心星を高温プラズマが取り囲んでいることの観測的証明

Nakamura et al. (1989)





Fig. 2. Persistent spectra of X1608-52. Typical spectra from Periods I-IV are plotted with crosses, filled circles, filled triangles, and open diamonds, respectively.

X線バースト

中性子星表面で降着物質が起こすヘリウム・フラッシュ

中性子星全面からの黒体放射を観測しているとして矛盾ない



Fig. 3-4.

黒体放射スペクトルのバーストスペクトルへのフィット結果



Table 2. Results of the blackbody fitting (χ^2 -value; 24 d.o.f.).

Period —	Temperature range (keV)							
	2.3–2.5	2.1–2.3	1.9–2.1	1.7–1.9	1.5–1.7	1.3–1.5	1.1-1.3	
Ι	. 13.63	32.89	17.99	39.37	16.01	36.80	19.21	
II	. 27.73	22.37	21.04	39.65	27.10	28.01	33.05	
III	. —	16.17	38.41	33.51	44.61	123.42	62.78	
IV	. 18.28	16.43	36.74	<u>93.43</u>	172.31	253.80	<u>92.74</u>	

Note: Underlined values exceed the limit for the significance level of 1%, hence the fit is not acceptable.

(c) (d) (a) 10 102 10² 101 keV-1 10¹ 10 Counts s⁻¹ keV⁻ 101 Counts s⁻¹ keV⁻¹ Counts s⁻¹ keV⁻¹ Counts s 10 ł 10 10^{0} 100 10 10 10-10-10 10 10 10 Energy (keV) Energy (keV) Energy (keV) Energy (keV) (g) (e) (f) 10 10 10 10 10¹ Counts s⁻¹ keV⁻ Counts s⁻¹ keV⁻¹ Counts s⁻¹ keV⁻ 10 10 100 10-10 10 10-10-10-10 10 10 Energy (keV) Energy (keV) Energy (keV)

Fig. 5. The average spectra (crosses) in the seven temperature ranges (see text and also table 2) and the best-fit blackbody spectra (histograms) for the Period IV bursts.

I→II→III→IV とLHSに 向かっていくにつれて、 バーストの減衰部分で 黒体放射スペクトルが 合わなくなっていく。

III,IVのバーストでは、 フラックスが下がるに つれて、**ハードテール** が顕著になってくる。

model spectrumをblackbody spectrumからComptonized blackbody spectrumに置き換え



Fig. 6. The best-fit Comptonized blackbody spectra (histograms) in comparison with the average spectra (crosses) in seven temperature ranges (see text) for the Period IV bursts.
Comptonized blackbody spectrumのフィット結果



「LHSでは中心天体を高温プラズマが取り囲んでいる。」と考えて矛盾がない。



ブラックホール連星



в

Tanaka & Shibazaki (1996)

X線強度があるレベルより下がると、 power law成分が顕著になる。

「すざく」によるIntermediate stateからLow hard stateにかけてのCyg X-1の観測



Fig. 2. (a) The 1.5–12 keV count-rate history of Cyg X-1 (gray), taken with the RXTE/ASM from 2005 July to 2010 January, which are scaled down to 25%. The 0.5–10 keV flux of the XIS and the 15–20 keV count rate of PIN are superposed in red and black, respectively. The bottom panel shows the hardness ratios of the 15–20 keV count rates of PIN to the 0.5–10 keV XIS fluxes ($\times 10^9$) (red dots), superposed on the 5–12 keV to 1.5–3 keV hardness of the ASM (gray). (b) The 6–10 keV to 3–6 keV hardness ratio of the XIS plotted against the 3–10 keV intensity derived from the XIS normalized by the Eddington luminosity. All data are not corrected for the absorption. (Color online)

```
Makishima et al. (2008)
Torii et al. (2011)
Yamada et al. (2013)
```

「すざく」によるLow Hard StateのCyg X-1のスペクトル解析

Hardness ratio



Fig. 1. Scatter plot between the 1.5-12.0 keV count rate and the 5.0-12.0 keV vs 1.5-3.0 keV hardness ratio of Cyg X-1, obtained with the RXTE ASM over a period of 1996 December to 2010 September. Each gray dot is an integration over one day. Black points indicate epochs of the 25 Suzaku observations.

Torii et al. (2011)

"compPS" modelによるフィット

"compPS" model

(Poutanen & Svensson 1996)

modelling the unsaturated inverse Comptonization process, taking into account relativistic effects and reflection by cold matter.





Flux (10⁻⁸ erg cm⁻² s⁻¹)

2

0.9

(a)

(b)

÷

Fig. 6. Same HXD spectra of Cyg X-1 as in figure 3, presented in the deconvolved vFv form. The best-fit model and the fit residuals are also shown, where the Compton component and the reflection component are displayed separately.

Fluxの減少とともにComptonization degree, yがy≈1に向けて増加。

Fig. 7. Compton (CompPS) parameters from the 25 observations of Cyg X-1, plotted against CASM. (a) The 10-400 keV HXD model flux, (b) y, (c) $T_{\rm e}$, (d) τ , and (e) $\Omega/2\pi$. The three representatives are shown in red.

20

30

ASM count rate (cts s^{-1})

40

50

10

0



Two temperature thick diskによる Comptonizationの考えを支持する観測事実

energy gain rate of electrons per volume

$$\dot{q}^{(+)} \sim \frac{3}{2} n k T_{\rm i} / t_{\rm ie} \propto T_{\rm e}^{-3/2} n^2$$
 (1)

ion - electron collision time

 $t_{ie} \propto Te^{\Box\Box} / n ~~{
m when}~ T_{
m e} > rac{m_{
m e}}{m_{
m p}}~ T_{
m i}$ energy loss rate of electrons per volume

$$\dot{q}^{(-)} \sim \frac{4kT_{\rm e}}{m_{\rm e}c^2} n_{\rm ph} \varepsilon c \ n\sigma_{\rm T}$$
 (2)

 $n_{
m ph}$: photon number density

'HOT ONS/CM2/SEC/KE'

 ε : photon mean energy photon energy flow in the disk

$$\frac{n_{\rm ph}\varepsilon c}{{\rm Max}(1,\tau)} \sim F_{\rm X} \tag{3}$$

 $\tau \sim n\sigma_{\rm T}h$

h : thick diskの厚み photon energy flux from the disk surface

 $F_{\rm X} \sim \dot{q}^{(-)} h \tag{4}$

From (2), (3) and (4),

$$y = \frac{4kTe}{m_ec^2} \operatorname{Max}(\tau, \tau^2) \sim 1$$

$$from (1) and (2),$$

$$q^{(+)} = \dot{q}^{(-)}$$

$$T_e \propto \left\{ \begin{array}{c} n^{\Box} & \tau < 1 \\ n^{-2} & \tau > 1 \end{array} \right\}$$

$$T_e \propto \left\{ \begin{array}{c} F_X^{\Box} & 7 & \tau < 1 \\ F_X^{-2/5} & \tau > 1 \end{array} \right\}$$

$$GS2023+338 \text{ Ginga}$$

$$Mir-Kvant$$

$$F_X$$

$$F_X$$

$$GS2023+38 \text{ Ginga}$$

$$from (1) and (2),$$

$$T_e \propto \left\{ \begin{array}{c} F_X^{\Box} & 7 & \tau < 1 \\ F_X^{-2/5} & \tau > 1 \end{array} \right\}$$

「すざく」によるIntermediate stateからLow hard stateにかけてのCyg X-1の観測



Fig. 2. (a) The 1.5–12 keV count-rate history of Cyg X-1 (gray), taken with the RXTE/ASM from 2005 July to 2010 January, which are scaled down to 25%. The 0.5–10 keV flux of the XIS and the 15–20 keV count rate of PIN are superposed in red and black, respectively. The bottom panel shows the hardness ratios of the 15–20 keV count rates of PIN to the 0.5–10 keV XIS fluxes ($\times 10^9$) (red dots), superposed on the 5–12 keV to 1.5–3 keV hardness of the ASM (gray). (b) The 6–10 keV to 3–6 keV hardness ratio of the XIS plotted against the 3–10 keV intensity derived from the XIS normalized by the Eddington luminosity. All data are not corrected for the absorption. (Color online)

```
Makishima et al. (2008)
Torii et al. (2011)
Yamada et al. (2013) → スペクトル変動の詳細な解析
```

Cyg X-1-LHSスペクトル中の後退した標準降着円盤からの成分の存在

Yamada et al. (2013)

1-2 s time scaleでの強度変動の明るい時のスペクトルと暗い時のスペクトルを比較



The estimated disk component is shown in blue, with their 90% errors in dotted lines. (Color online)

変動しない成分はmulti-color blackbody spectrumで再現できる

Fig. 9. Relation between the 0.5-10 keV flux and (a) the disk temperature, (b) the inner disk radius, and (c) the disk luminosity, listed in table 4. The result of Paper I for Obs. 1 is shown by pink squares. (Color online)

そのthin diskの最内縁半径はX線強度の減少とともに大きくなっているように見える

Low Hard StateにおけるCyg X-1のPower Spectral Density **⇒** Truncated thin disk

RXTE Pottschmidt et al. (2003) 10⁰ PSD [(rms/mean)² Hz⁻¹] 10^{-3} 10 10^{-10} $f \times PSD [(rms/mean)^2]$ 10.01 10Residuals [0] 10^{-2} 10⁰ 10^{1} 10^{2} 10^{-1} Frequency [Hz]

外側から侵入してきたthin disk が、どこかでtruncateされて、 thick diskになる。 Churazov et al. (2001)



外側からの**thick flow**のPSDが($\dot{M}_{ ext{thick}}/\dot{M}_{ ext{total}}$)²だけ薄 まって見えている。

Low Hard StateにおけるCyg X-1のPower Spectral Density **⇒** Truncated thin disk

RXTE Pottschmidt et al. (2003)





MAXI Sugimoto et al. (2016)



LHSの低周波数領域でのPSDは、HSSの低エネルギー側のPSDとほぼ同じ。

LHSの低周波数領域のPSDには、外側のthin diskが持ち込んでいる M 変動が見えている。



強度変動に伴うスペクトル変化の観測から得られたHSSからLHSへの状態遷移の描像

High Soft Stateでは、再内縁半径付近まで侵入していた標 準降着円盤が、Intermedium stateを経て、Low Hard Stateに 移行していくのに伴って、外側に後退していき、ある半 径から内側にComptonizationを起こす高温で希薄な幾何学 的に厚い降着流が出現すると考えられる。



Fig. 13. Conceivable accretion flows (left) and spectral composition in vF_{ν} form (right) in the hard intermediate state (top) and the dim low/hard state (bottom). Some gross representative values on luminosities and radii are overlaid on the flow pictures. The disk, hard Compton, soft Compton, and variable soft component are indicated by blue, red, green, and cyan, respectively. Fe-K lines and reflection components, which presumably come from the disk, are not depicted just for simplicity. (Color online)



HSS, IS, LHSすべてに共通に存在するように見える。

(ここでは、以降、Soft power law componentと呼ぶ。)



Soft Power Law成分は外側からのthick flowに連動しているように見える。 しかし、内側のthick diskからのHard Compton成分とは独立のように見える。 Soft Power Law成分は、Very High State / Intermediate Stateで、顕著に見られる。



「ぎんが」によるブラックホール連星におけるVery High Stateの存在の発見



X線スペクトル





Black hole binaries in Very High State



Miyamoto et al. (1993)



遅れが見える周波数は、 PSDのbreak周波数付近を ピークにそれより低い周 波数領域に見えている。

外側からのthin diskが持ち 込んだ変動がthick (slim) diskになるところで増幅さ れて硬X線で見えると考え ると自然に説明できる。

FIG. 3.—The phase lags. Top: GS 1124-68 (1991 January 22); bottom: GX 339-4 (substate C + D [1988 September 5]). Positive values of the phase lag correspond to hard X-ray lags.





High Soft State → Very High Stateで、外側からのthin disk (Standard disk)が遷移するのはslim disk





降着円盤における角運動量輸送の揺らぎの議論によれば、その振幅の二乗は円盤の厚みに比例

「降着円盤での角運動量輸送に伴うゆらぎ」でf⁻¹ noiseを説明するなら





Limit cycle between the slim disk and the standard disk





Spectral change in the high-low transition of GRS 1915+105 (Belloni et al. 1997)









The Rapid Burster : Neutron star binary

- · Discovered by SAS-3 (Lewin et al. 1976)
- · Recurrent transient
 - \cdot every 6 8 months
 - \cdot 3 4 weeks activity



• Type I bursts **Neutron star** system

$E - \Delta t$ Relation



An approximately linear relation between the burst size and the time interval to the following burst



Time Scale Invariant Duty-Ratio



The duty ratio (τ / Δt) is kept constant against a large time-scale change

Time Scale Invariant Burst Structure

Each type II burst exhibits a complex structure in the decay part, comprising successive peaks.



The time scale of the structure is dependent on the burst duration, τ . The longer the burst duration, the slower in the excursion of the decay structure.

The decay structure seems to be <u>time scale</u> <u>invariant</u> and to be expressed by a single function F (t / τ).

(Tawara et al. 1985)



Time Scale Invariant Profiles of the Type II Bursts from the Rapid Burster

Presence of a hidden timer, whose fundamental frequency can change from burst to burst.

The timer frequency should be given at the onset of the burst and would control all the burst properties, burst duration burst profiles

time to the following burst.



An Interesting Difference between GRS 1915+105 and the Rapid Burster

Both show time scale invariant high-low transitions.

But,





The high state follows the low state.

The low state follows the high state.

	slim disk		standard disk		slim disk		standard dis	k
	Ņ	>	М	accretion rate	Ņ	>	Ň	
${\dot Q}^{(+)}_{ m vis}$	= Q (⁽⁻⁾ adv >> Q	2 ⁽⁻⁾ rad	$\dot{Q}^{(+)}_{vis}$ = $\dot{Q}^{(-)}_{rad}$	energy balance in the disk	$\dot{Q}^{(+)}_{vis} = \dot{Q}^{(-)}_{adv}$	>> $\dot{Q}^{(-)}_{rad}$	$\dot{Q}^{(+)}_{vis} = \dot{Q}^{(-)}$	-) rad
	L _{disk}	<	L _{disk}	luminosity from the disk	L _{disk}	<	L _{disk}	
L _{boundary} = 0				luminosity from the boundary	$L_{ m boundary}$	>>	$L_{boundary}$	
	$L_{\rm SLM} = L_{\rm disk}$	<	$L_{\rm STD} = L_{\rm disk}$	total luminosity	$L_{\rm SLM} = L_{\rm disk} + L_{\rm box}$	undary > L _s	$_{\rm STD} = L_{\rm disk} + L_{\rm bou}$	ındary

State transitions and jet activities

Unified model for jets in black hole binaries

Fender et al. (2004)



Impulsive jet ejections associated with disk-state changes



Future studies are expected.

ブラックホール連星(磁場の弱い中性子星連星)の強度・スペクトル状態

- High Soft State
- Low Hard State
- Very High State
- Standard disk \leftrightarrow Slim disk \mathcal{O} Limit cycles
- Jet activities
- 降着円盤最外縁部の降着リング
 - X線連星に見られる超軌道周期
 - 降着円盤最外縁部における降着リングとその歳差運動
 - X線照射による降着リング内の熱的不安定

活動銀河中心核

- ブラックホール連星との類似性
- ●活動中心核を取り巻く環境の統一理解
- 広がった鉄輝線(disk line)構造の起源
- X線吸収の短時間変動
- Broad Line Regionの降着リングとの類似性

X線連星における長時間変動と2層流

PSD of Cyg X-1 in the Hard Soft State (Sugimoto et al. 2016)


X線連星の示す超軌道周期

x線連星の中には、連星周期の10~100倍の超軌道周期を持ったx線強度変動を示すものがある。

	binary period	super-orbital period	object character	
Her X-1	1.7 d	35 d	X-ray pulsar	
LMC X-4	1.4 d	30 d	X-ray pulsar	
SMC X-	1 3.9 d	55 d	X-ray pulsar	
SS433	13.1 d	162.5 d	jet object	
Cyg X-1	5.6 d	294 d	black hole binary	

MAXIによる観測データを超軌道周期で折りたたんだX線光度曲線



降着リング歳差運動モデルによる超軌道周期X線光度曲線の再現

Inoue (2019)

「超軌道周期x線強度変動は、降着リングの歳差運動により、x線源への視線上の散乱の光学的厚みが周期的に変化することによる」と考える。



Assumption on the observed X-ray flux, F

 $F = F_{\rm D} + F_{\rm S}$

- $F_{\rm D}$: directly observed component suffering from a periodic molulation
- $F_{\rm S}$: scattered component by the ring with a constant flux



モデル・フィットの結果



source	i (fixed)	θ	$N_{\rm e}$	x_0/R	δ_0	$\phi_0/2\pi$	F_0	$F_{\rm C}$	reduced χ^2
SMC X-1	62	$18 \ _{-6}^{+6}$	$2.4 \ ^{+4.8}_{-0.8}$	$0.20 \ ^{+0.02}_{-0.02}$	-	-	$0.100 \ {}^{+0.001}_{-0.002}$	-	0.98 (DOF = 19)
LMC X-4	59	$23 \ ^{+7}_{-12}$	$3.4 {}^{+4.7}_{-1.3}$	$0.26 \ ^{+0.05}_{-0.04}$	$0.10 \ ^{+0.03}_{-0.05}$	$-0.03 \begin{array}{c} +0.01 \\ -0.07 \end{array}$	$0.028 \ ^{+0.025}_{-0.002}$	$0.0044 \begin{array}{c} +0.0004 \\ -0.0011 \end{array}$	1.24 (DOF = 16)
	80	$40 \ ^{+12}_{-4}$	$3.7 \ ^{+1.8}_{-0.5}$	$0.44 \ ^{+0.03}_{-0.03}$	$0.24 \ ^{+0.10}_{-0.07}$	$-0.08 \ ^{+0.02}_{-0.02}$	$1.2 \ ^{+0.5}_{-0.5}$	$0.008 \stackrel{+0.002}{_{-0.002}}$	0.97 (DOF = 16)
Her X-1	83	$30 \ ^{+7}_{-4}$	$3.5 \ ^{+1.1}_{-0.3}$	$0.37 \ ^{+0.03}_{-0.06}$	$0.19 \ ^{+0.11}_{-0.04}$	$-0.08 \ ^{+0.02}_{-0.01}$	$1.5 \ ^{+0.9}_{-0.9}$	$0.006 \ ^{+0.004}_{-0.002}$	1.02 (DOF = 16)
	86	$26 \ ^{+2}_{-8}$	$5.2 \ ^{+0.4}_{-2.3}$	$0.26 \ ^{+0.01}_{-0.08}$	$0.26 \ ^{+0.03}_{-0.14}$	$-0.10 \begin{array}{c} +0.07 \\ -0.01 \end{array}$	$2.3 \ ^{+1.3}_{-1.9}$	$0.010 \ {}^{+0.002}_{-0.006}$	1.26 (DOF = 16)
(unit)	degree	degree	$10^{24} {\rm ~cm^{-2}}$				counts $\rm cm^{-2} \ s^{-1}$	counts $\rm cm^{-2} \ s^{-1}$	

Her X-1とLMC X-4には、リングの厚み、 x_0 と N_e が連動した小さな変動の導入が必要。 (δ_0 と φ_0 が、その変動幅の割合と位相角を表す。) 降着円盤の再外縁の降着リング

伴星から流入した物質は、持ち込む角運動量により、中性 子星のまわりにリングを形成する。

すべての物質が同じ単位質量当たりの角運動量を持っている とすると、リング-チューブの断面は、チューブ中心に向け た重力成分と反対向きの圧力勾配がつりあった状態になる。



0



最適パラメーターから求めたリング-チューブの物理量

	Her X-1	LMC X-4	SMC X-1		
Number density at the center of the tube, <i>n</i> ₀	6.6 x 10 ¹³	1.4 x 10 ¹⁴	5.6 x 10 ¹³	cm ⁻³	
Scale height of the ring matter, x_0	5.3 x 10 ¹⁰	2.4 x 10 ¹⁰	4.3 x 10 ¹⁰	cm	
Typical optical depth of the tube, $\tau = \sigma_T n_0 x_0$	2.3	2.3	1.6	for Thomson s	cattering
Total ring mass, M _R	1.7 x 10 ²⁴	5.0 x 10 ²³	1.7 x 10 ²⁴	g	
Temperature of the ring matter, T	1.0×10^{6}	7.9 x 10 ⁵	1.7 x 10 ⁵	К	76

それぞれの連星系におけるリングのサイズ



リング-チューブの温度

伴星からの流れで、エネルギーが保存されると仮定した時の予想リング温度:T_c



観測データから求めたリング温度:To

超軌道周期・連星周期 \rightarrow R モデルフィット \rightarrow x_0/R 静水圧平衡式 \rightarrow T_0

	Her X-1	LMC X-4	SMC X-1	
T _C	1.0 x 10 ⁶	1.5 x 10 ⁶	0.6 x 10 ⁶	Κ
To	1.0 x 10 ⁶	0.8 x 10 ⁶	0.2 x 10 ⁶	К

ほとんど、冷却を受けずに太いリング-チューブが形成されている。



降着リングに対する、X線照射による熱入力の重要性

モデルフィット結果から求められたX線光度と降着率

	Her X-1	LMC X-4	SMC X-1	
Average X-ray luminosity, L	1.1 x 10 ³⁸	1.3 x 10 ³⁸	6.2 x 10 ³⁸	erg s ⁻¹
Average accretion rate, M	5.5 x 10 ¹⁷	6.1 x 10 ¹⁷	3.9 x 10 ¹⁸	g s⁻¹
2つの重要な時間スケール				
Ring mass accumulation time, $t_A = M_R / \dot{M}$	3.0 x 10 ⁶	8.2 x 10 ⁵	3.6 x 10 ⁵	S
Radiative cooling time, $t_{\rm C} \approx 3$ kT/(n ₀ Λ) (Λ = 1 x 10 ⁻²² erg cm ³ s ⁻¹ is assumed.)	6.3 x 10 ⁻²	2.3 x 10 ⁻²	1.3 x 10 ⁻²	S

t_A >> t_c 単純な放射冷却の時間スケールより何桁も長い時間スケールで、10⁶ Kの降着物 質が、冷却してしまうことなくリング内に蓄積されている。

<u>モデルフィット結果から求められたイオン化パラメーター、と、の数値</u>

$\xi = L / (n_0 R^2) $	3.5 x 10 ¹	1.1 x 10 ²	2.5 x 10 ²	erg cm s ⁻¹
------------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	------------------------

これらのξ値は、「リング内では、放射冷却とバランスする **X線照射** による熱入力が存在し、その結果、10⁶秒もの長い時間、物質が蓄積 されている」ことを支持する。

イオン化パラメーター:ξ

X線照射をうける物質の熱的状態を示すパラメーター



L:X線源光度 n:X線照射を受ける物質粒子の数密度 r:X線照射を受ける物質のX線源からの距離

物質がX線照射によって受ける単位体積当たり単位時間当たりの熱入力

 $\dot{q}^{(+)} \sim F n \, \sigma \sim rac{L}{4\pi r^2} n \, \sigma$

F:X線源からの距離rの場所でのX線フラックス σ:X線照射を受ける物質粒子の吸収断面積

物質の単位体積当たり単位時間当たりの熱放射

 $\dot{q}^{(-)} \sim n^2 \Lambda$

Λ:冷却関数





X線照射のもとでのリングの特性(1)



簡単化した議論





Inoue (2012)によれば,リング軸の傾きが大きくなるとリング半径 R は 大きくなる。その時、上の関係式より、η>1であれば、リング温度 T は減少する。従って、その熱エネルギーの減少の方が、重力エネル ギーの増加より大きい状況にあるならば、歳差運動をする方がエネル ギー的に安定となる。



Inoue (2012)の議論

Let us consider a case in which the angular momentum axis of the ring tilts from the intrinsic axis by angle, θ .



Then, $L = L_0 \cos^{-1}\theta$.

(Subscript 0 indicates parameters without tilt) This angular momentum vector should precesses around the original axis owing to the tidal force from the companion star.

The total angular momentum of the ring, L, is given by $L = M_R R^2 \Omega \propto R^{1/2}, (M_R: \text{the ring mass})$ where $\Omega = \frac{(GM_X)^{1/2}}{R^{3/2}} \propto R^{-3/2}.$

 $R = R_0 \cos^{-2}\theta$

When the tilt angle θ gets larger, the ring radius R increases.



rotational energy

 $E_{K} = (1/2) M_{R} R^{2} \Omega^{2}$

= $M_R(GM_X/2R_0) \cos^2 \theta$

gravitational energy

 $E_G = -M_R(GM_X/R_0) \cos^2 \theta$



When the tilt angle θ gets larger, the ring temperature T decreases.



• thermal and effective potential energy for the hydrostatic balance in the meridian cross section of the ring-tube $E_{T} = (5/2) (M_{R}/\mu m_{H}) kT$ $= M_{R}(GM_{X}/2R_{0}) \alpha \cos^{16/5} \theta$ $\alpha = (5kT_{0}/2\mu m_{H}) / (GM_{X}/2R_{0})$

When the tilt angle θ gets larger, the ring thermal energy decreases.

The energetics of the gas ring-tube as a function of the tilt angle

rotational energy

 $\mathrm{E_{K}}$ = (1/2) $\mathrm{M_{R}} \ \mathrm{R^{2}} \ \Omega^{2}$

- = $M_R(GM_X/2R_0) \cos^2 \theta$
- gravitational energy

 $E_G = -2 E_K$

- thermal and effective potential energy
 - $E_{T} = (5/2) (M_{R}/\mu m_{H}) kT$ = $M_{R}(GM_{X}/2R_{0}) \alpha_{0} \cos^{16/5} \theta$ [$\alpha_{0} = (5kT_{0}/2\mu m_{H}) / (GM_{X}/2R_{0})$]
- <u>total energy of the ring</u> $E = E_{K} + E_{G} + E_{T} + (\text{minute terms on }\theta)$ $\approx M_{R}(GM_{X}/2R_{0}) (-\cos^{2}\theta + \alpha_{0}\cos^{16/5}\theta)$ \square $\cos \theta_{\min} = [5/(8\alpha_{0})]^{5/6}$

 $E / [M_R(GM_X/2R_0)]$ 0.0 $\alpha_0 = 1.0$ -0.1 - $\alpha_0 = 0.833$ -0.2 --0.3 - $\alpha_0 = 0.625$ -0.4 - α_0 = 0.5 -0.5 10 20 30 40 50 60 70 80 90 0 θ (deg)

When the ring-tube has enough thermal energy ($\alpha_0 > 5/8$), the total energy has the minimum at a certain tilt angle.

Preccessions of gas rings around compact stars are possible to take place from the energetics point of view.

今や、X線照射がある状況を考える必要がある。

<u>X線照射のもとでも安定な歳差運動</u>

簡単化した議論





 $T \propto R^{2\eta/(1-\eta)}$

Inoue (2012)によれば, リング軸の傾きが大きくなるとリング半径 R は 大きくなる。その時、上の関係式より、η>1であれば、リング温度 T は減少する。従って、その熱エネルギーの減少の方が、重力エネル ギーの増加より大きい状況にあるならば、歳差運動をする方がエネル ギー的に安定となる。



X線照射のもとでのリングの特性(2)

熱的不安定性

ξ-T図におけるη=1の線は、圧力一定の線に対応している。従って、η>1の領域では、密度が少し高くなった部分は冷却が効いて温度が下がり、密度はますます密度は上がっていく。逆に密度が少し低くなった部分はX線照射で温度が上がり、密度はますます低くなることが起こる。

このような**熱的不安定性**がリング内に生じると、かな りの割合の物質の温度が下がり、リング-チューブの 中心に向けて降下していく流れ(冷却流)が生じると 考えられる。





➡

その冷却流は、リング内の回転運動に直交した方向に 生じるので、そこには乱流が生じ、効率のよい角運動 量輸送が起こると考えられる。その結果、内側から外 側に角運動量が輸送されて、内側には降着円盤が、外 側には外向きの円盤が伸展することが予想される。



降着リングの定常状態

降着円盤伸展のtime scale ~ viscous time scale, t_V ~ 降着リングの物質堆積のtime scale $t_V \approx \frac{h}{v_r} \approx \alpha^{-1} \left(\frac{h}{R}\right)^{-1} \frac{R}{v_{\varphi}} = 2 \times 10^6 \left(\frac{\alpha}{0.1}\right)^{-1} \left(\frac{h/R}{0.01}\right)^{-1} \left(\frac{R}{10^{11}}\right)^{3/2} \left(\frac{M_x}{1.4Msun}\right)^{-1/2} s$ 超軌道周期光度曲線フィット結果から求めた降着リング物質堆積のtime scale $\frac{\text{Her X-1}}{\text{Ring mass accumulation time, } t_A = M_R/\dot{M}} = 3.0 \times 10^6 8.2 \times 10^5 3.6 \times 10^5 s$

X線照射の結果、リング内に熱的不安定を起こす程度に物質がたまって定常状態を形成

二層流形成のシナリオ



Cyg X-1のMAXI観測データの差分変動解析

Inoue (2016, unpublished)

MAXI

宇宙ステーションの軌道周期~1/16日ごとに天体のX線強度をモニター MAXIアーカイブデータ $\frac{1}{16}$ 日ごとの下の4バンドのX線強度が記録されている。 Low energy バンド:2-4 keVのX線強度 Medium energy バンド: 4 - 10 keVのX線強度 以下、X線強度をMで表す。 High energy バンド: 10 - 20 keVのX線強度 以下、X線強度をHで表す。 全バンド: 2 - 20 keVのX線強度

以下、X線強度をLで表す。

High Soft Stateのデータを解析



Spectral components Disk blackbody component : DB Power law component : PL $L = L_{DB} + L_{PI}$

差分変動量の計算 もとのデータ列 {X_{0,i}:i=0~N-1} 1 binの時間幅 t_B = ¹/₁₆ d となりあう2 binの平均, X₁, と差分, ΔX₁, を計算 X_{1,i} = (X_{0,2i} + X_{0,2i+1})/2 ΔX_{1,i} = (X_{0,2i} - X_{0,2i+1})/2



2 binまとめしたデータ列{ $X_{1,i}$ }について、また、となりあう2 binの平均, X_2 , と差分, ΔX_2 , を計算 順次、データ列{ $X_{j,k}$ }について、となりあう2 binの平均, X_{j+1} , と差分, ΔX_{j+1} , を計算

2 binずつまとめていった、 $\frac{1}{8}$ d, $\frac{1}{4}$ d, $\frac{1}{2}$ d, 1 d, 2 d, 4 d, 8 d, 16 dの9つの2-bin-time-widthについて { $\Delta L_{m,n}$ }, { $\Delta M_{m,n}$ }, { $\Delta H_{m,n}$ }を計算。そして、それぞれのm (2-bin-time-width)について、

 $\Delta L_{m,n} \ge \Delta M_{m,n}$ 、 $\Delta M_{m,n} \ge \Delta H_{m,n}$ の比例係数を最小二乗法により計算した。





ブラックホール連星(磁場の弱い中性子星連星)の強度・スペクトル状態

- High Soft State
- Low Hard State
- Very High State
- Standard disk \leftrightarrow Slim disk \mathcal{O} Limit cycles
- Jet activities
- 降着円盤最外縁部の降着リング
 - X線連星に見られる超軌道周期
 - 降着円盤最外縁部における降着リングとその歳差運動
 - X線照射による降着リング内の熱的不安定

○ 活動銀河中心核

- ブラックホール連星との類似性
- ●活動中心核を取り巻く環境の統一理解
- 広がった鉄輝線(disk line)構造の起源
- X線吸収の短時間変動
- Broad Line Regionの降着リングとの類似性

活動銀河中心核(AGN)

銀河中心にある大質量ブラックホールへの降着現象

ブラックホールX線連星との類似性

<u>X線スペクトル</u>

a power law \propto E^{- Γ} (a few ~ several 10 keV 領域)

多くのAGNのphoton index : $\Gamma \sim 1.5 \sim 2.0$



similar to the hard power law component of black hole binaries in the Low Hard State



Suzaku Obs. of Type I Seyfert NGC 3227 (Noda et al. 2014)



強度変動の相似性

変動のtime scaleだけが違っている



変動の時間スケール x ブラックホール質量

Normalized PSD x Frequency

Hayashida et al. (1998)



最短変動時間スケール: Δt_{\min} 最短変動発生距離:r_{min} 物質落下速度: ν, シュワルツシルド半径: $R_{\rm S} = \frac{2GM_{\rm BH}}{c^2}$ $V_{\rm r} \propto (\frac{GM_{\rm BH}}{r_{\rm min}})^{1/2} \propto (\frac{r_{\rm min}}{R_{\rm s}})^{-1/2} \frac{R_{\rm s}}{c}$ $\Delta t_{\min} \propto \frac{r_{\min}}{v_{\pi}} \propto (\frac{r_{\min}}{R_{c}})^{3/2} \frac{R_{s}}{c}$ $\frac{r_{\min}}{R_{s}}$ がどの系でも共通なら、 $f_{
m max} \propto \Delta t_{
m min}^{-1} \propto M_{
m BH}^{-1}$

Unified Model of Seyfert 1 and 2 galaxies

Optical Observations

Seyfert 1 : Broad lines + Narrow lines Seyfert 2: Narrow lines

Antonucci and Miller (1985) discovered a faint polarized broad line in the archetypical Seyfert 2 galaxy NGC 1068.



X-Ray Observations of Seyfert galaxies

NGC5548 Ginga observations of 16 Seyfert galaxies. 100 counts s⁻¹ keV ⁻¹ The source to source spectral Mkn 3 100 variety could be reproduced 10-1 7 by changing a single parameter: s⁻¹ keV the viewing angle to the AGN 10-1 10-2 within a dusty torus. sounts 10 5 50 (Awaki et al. 1991) ENERGY (keV) 10-2 Light absorption 5 10 50 ENERGY (keV) NGC 1068 (Koyama et al. 1989) Heavy absorption 0.1 Counts s⁻¹ keV ⁻ Complete obscuration 0.01 (reflected X-rays only) 0.001 10 Energy (keV)

Common presence of a fluorescent iron line + a reflected component in X-ray spectra of Seyfert galaxies

A composite X-ray spectrum from 12 Ginga Obs. of 8 AGNs



FIG. 1 Simple power-law fit to the Ginga-12 spectrum, together with a residual plot of the data minus model results.



(Pounds et al. 1990; see also Matsuoka et al. 1990)

X-rays reflected from Compton thick (N_H > 10^{24} cm⁻²), extended ($\Omega \sim 2\pi$) cold matter



Center energies & equivalent widths of the fluorescent Fe-K line







Figure 2. The X-ray spectrum of an obscured AGN is shown, for different column densities of the absorber. The absorbing matter is assumed to form a geometrically thick torus, according to unification models.

Fe-K line emitters (X-ray reflector) Center energy \rightarrow cold material (so as for iron to be low ionized) E.W. vs N_H \rightarrow Extended out of line of sight solid angle as viewed from the nucleus ~ (0.3 ~ 1) x 2 π Reverberation measurement of the Fe K line emitting region

NGC 4151



 4×10^{-3}

3×10-3

 2×10^{-3}

6×10-4

 $Flux~(8{-}10~keV) \label{eq:Flux} (photon~s^{-1}~cm^{-2})$

The innermost radius of the torus

Other evidences of Fe-K line variability

Detections of significant Fe-K line variability for a pair of observations separated by 1000 - 2000 days: Cen A, IC4329A & NGC3516 158 days: NGC3516 (Fukazawa et al. 2016)

No report on significant Fe-K line variability on time scales no longer than several days from a number of observations of several sources.

These are consistent with the view that X-ray reflection by torus is the main origin of the narrow Fe-K line.

Reverberation measurements of the innermost radius of the dust torus in 17 Seyfert galaxies (Koshida et al. 2014)



Figure 13. Radii of the innermost dust torus and the broad emission-line region (BLR) plotted against the V-band luminosity. Filled circles (colored red in the online version) represent the K-band reverberation radii of our results (obtained by the CCF analysis assuming $\alpha_v = 0$ for the subtraction of the accretion-disk component in the K-band flux); open squares (colored purple in the online version) represent the K-band interferometric radii obtained from Kishimoto et al. (2011) and Weigelt et al. (2012), and crosses (colored blue in the online version) represent the reverberation radii of broad Balmer emission lines obtained from Bentz et al. (2009a). Solid and dashed lines (colored red in the online version) represent the best-fit regression lines for the K-band reverberation radii for the data obtained by the CCF analysis assuming $\alpha_{\nu} = 0$ and $\alpha_{\nu} = 1/3$, respectively, and the dot-dashed line (colored blue in the online version) represents the best-fit regression line for the Balmer-line reverberation radii reported by Bentz et al. (2009a). Dots (colored green in the online version) represent the radii of the location of the hot-dust clouds obtained from the spectral energy distribution (SED) fitting of type 1 active galactic nuclei (AGNs) reported by Mor & Netzer (2012).

Discovery of a very broad line-like ("disk-line") feature in the X-ray spectrum of MCG-6-30-15

ASCA discovered a very broad line-like feature in the X-ray spectrum of the Seyfert galaxy, MCG-6-30-15, which is considered to be a fluorescent iron K-line from the accretion disk close to the central black hole. (Tanaka et al. 1995)





The "disk-line" model (2-component model)



 N_1 , N_2 : Normalization factors of the two components.

- P (E): Power law spectrum from the central X-ray source.
- R(E) : Attenuation factor by reflector

I_{Disk}(E) : Disk line

(Interstellar and circumstellar absorption terms are omitted for simplicity.)

Discovery of a narrow line component



Introduction of the 3-component model to reproduce X-ray spectra of MCG-6-30-15 observed with Suzaku (Miyakawa, Ebisawa & Inoue 2012)

$$F(E) = \underline{N_1}P(E) + \underline{N_2}W(E) P(E) + I_{Disk}(E) + \underline{N_3} R(E) P(E) + I_{Torus}(E)$$

direct reflected or component absorbed component in the inner region reflected component by the dust torus $(\Omega / 2\pi \sim 0.2,$ constant in time)

 N_1 , N_2 , N_3 : Normalization factors of the three components.

P (E): Power law spectrum from the central X-ray source.

W(E) : Attenuation factor by warm reflector or absorber

R(E) : Attenuation factor by cold matter

I_{Disk}(E) : Disk line model (Laor 1991)

I_{Torus}(e) : Narrow line at 6.4 keV

(Interstellar and circumstellar absorption terms are omitted for simplicity.)

The 3-component model $F(E) = N_1 P(E) + N_2 W(E) P(E) + [I_{Disk}(E)] + N_3 R(E) P(E) + I_{Torus}(E)$ **Reproduces the observed spectrum in** MCG-6-30-15 Tanaka et al. 1995 1-40 keV quite well without disk line. 0.1 data and folded model Counts s⁻¹ keV⁻¹ 0.1 0.01 Direct Comp. The 2nd Comp. 0.01 10-3 10-3 The 3rd Comp.-10-4 × -5 10 20 2 5 Energy (keV) 5 10 Even if a "disk line" model is included, Energy (keV)

no prominent broad "disk-line" is needed.

```
r_{in} \sim 200 r_g (> 10 r_g)
Equivalent width \sim 40 \text{ eV}
```

normalized counts s⁻¹ keV⁻¹

 $\Delta S \, \chi^2$

(by applying the "disk-line" model by Laor (1991))

Temporal and spectral analyses of the Suzaku data with the 3-component model (Miyakawa et al. 2012)



Fig. 3. 0.2–12 keV XIS light curve of the 2006 observation. The count-rate intervals with which the intensity-sliced spectra were made are also indicated. (from Miyakawa et al. 2009)

Erratic X-ray intensity variation on a time scale of $\sim 10^5$ sec
Analyses of the time-sliced spectra in 1-40 keV

The 3-component model was fitted to a sequence of X-ray spectrum every 20 ksec.

 $F(E) = N_1 P(E) + N_2 W(E) P(E) + N_3 R(E) P(E) + I_{Fe}(E)$

 N_1 and N_2 are treated as time-variable, while the other parameters are made the same for all the spectra. (Circumstellar absorption terms are omitted here.)





The difference variation function analyses with the variable partial covering model

The variable partial covering model

(Inoue, Miyakawa & Ebisawa, 2012)

$$F(E) = N [(1 - \alpha) + \alpha W(E)] P(E) + N_3 R(E) P(E) + I_{Fe}(E)$$

Two variables:

N: a normalization factor of the power law spectrum α : a covering fraction of the partial absorber

The difference variation function analyses



Relative variation amplitude of model parameters as a function of the time-bin size



Physical considerations of the partial absorber

Typical time-scale of the variation of $\boldsymbol{\alpha}$ (the covering fraction of the absorber)

Time-scale-dependence of the variation amplitude of $\boldsymbol{\alpha}$



Velocity of the partial absorber $v \sim 10^9 \text{ cm s}^{-1}$ (Typical Keplerian velocity in the BLR) Width of the absorber $h \sim v \, \delta t \sim 10^{14} \text{ cm}$



Partial absorbers

probably are broad emission line clouds (BELC) or their envelopes.

Presence of two variation-time-scales

Time variation of the normalization factor, N



$\delta t \sim 10^3 s$: another component than that of α

~probably intrinsic time variation of the central X-ray source

~ dynamical time scale of 10 times Schwarzshild radius of the central black hole with ~ $3 \times 10^6 M_{sun}$ (Hu et al. 2016)

Variable partial covering with warm absorbers seem to be observed commonly from type 1 AGNs.

MCG-6-30-15 Miyakawa et al. 20121H0707-405 Mizumoto et al. 201420 Seyfert galaxies Iso et al. 2016





Rapid variation of absorption in time scales as short as hours in type 2 AGNs

NGC 7582 (Bianchi et al. 2009)

Table 1 Log for the 2007 XMM-Newton and the Four Suzaku Observations

Obs ^a	Obs ID ^b	Date ^c	Δt^{d}	PN ^e	XIS0 ^f	PIN
XMM07	0405380701	2007 Apr 30		15		
S1	702052010	2007 May 1	<1		24	20
S2	702052020	2007 May 28	27		29	25
S3	702052030	2007 Nov 09	165		29	23
S4	702052040	2007 Nov 16	7		32	24





Figure 3. NGC 7582: column density of the inner absorber in the four *Suzaku* observations (circles) and the latest *XMM-Newton* one (triangle). Time bins on the abscissa are 10 days long.

a constant soft thin thermal emission + a constant reflecte

a constant power law with variable absorption + a constant reflected component

Number of reports on similar events is growing.

NGC 4388 (Elvis et al. 2004) NGC 1365 (Risaliti et al. 2005) NGC 4151 (Puccetti et al. 2007) UGC 4203 (Risaliti et al. 2010)



A phenomenological view of the broad line region from recent X-ray observations



Four circumnuclear regions in AGNs needed from latest X-ray observations

- 1) Variable partial covering warm absorbers / X-ray blockers **Broad Line Region**
- 2) Compton thick X-ray reflectors / fluorescent Fe-K line emitters **Inner Dusty Torus** Large solid angle viewed from the nucleus without heavy absorption by BLR But often transparent to X-rays passing through the BLR
- 3) Optical absorbers / X-ray absorbers with $N_{\rm H} \sim 10^{22}$ cm⁻² **Dusty Torus** Optical absorption $\rightarrow N_{\rm H} \sim 10^{22} \, \text{cm}^{-2}$ (based on the Galactic A_v/N_H ratio)

4) Thin thermal emitter / X-ray heated warm absorbers

Narrow Line Region



X線連星における降着リングの考察から類推したAGNの系



降着円盤のX線観測

ブラックホール連星(磁場の弱い中性子星連星)の強度・スペクトル状態

- High Soft StateにおけるX線スペクトル変動
 - Disk blackbody component Standard disk $n b \sigma$ multi-color blackbody spectrum
- Hig Soft StateのPower spectral density解析
 広い周波数領域にまたがった*f*⁻¹ noiseの起源
 降着円盤外縁部からの2層流
- Low Hard Stateへの遷移時のX線スペクトル変化

Hard Compton component Two temperature thick disk + Comtonization

● Low Hard Stateのスペクトル成分とPower spectral density解析

Standard disk \mathcal{O} truncation \rightarrow Two temperature thick disk

- Very High StateのX線スペクトル、Power specral densityの特徴
 - Soft power law component
 - Standard disk \mathcal{O} truncation \rightarrow Slim disk
- Standard disk \leftrightarrow Slim disk \mathcal{O} Limit cycles
- Jet acitivities

降着円盤最外縁部の降着リング

- X線連星に見られる超軌道周期
- 降着円盤最外縁部における降着リングの歳差運動
- X線照射による降着リング内の熱的不安定

活動銀河中心核

- ブラックホール連星との類似性
- 活動中心核を取り巻く環境の統一理解
- ●広がった鉄輝線(disk line)構造の起源
- X線吸収の短時間変動
- Broad Line Regionの降着リングとの類似性