

# 恒星質量ブラックホールの回転を測る

牧島 一夫<sup>1,2</sup>・山田 真也<sup>1</sup>

〈<sup>1</sup> 東京大学理学系研究科 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

〈<sup>2</sup> 理化学研究所宇宙放射線研究室 〒352-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

e-mail: maxima@phys.s.u-tokyo.ac.jp

降着円盤からの X 線を利用して、質量降着する恒星質量ブラックホールの角運動量（回転）を測定する試みが展開されている。その方法の一つは、降着円盤の内縁半径を推定し、それをブラックホールに最も近い安定円軌道の半径とみなす方法である。それとは独立に、X 線スペクトル中に現れる広がった鉄輝線のプロファイルを測定し、それが相対論的効果で広がっていると考えると、時空構造を導く方法も盛んに用いられつつある。しかし現時点で、これらの方法の答えは必ずしも一致せず、議論が続いている。慎重なデータ解析や、新しい観測装置による進展に期待したい。

## 1. はじめに

ブラックホール (BH) には毛が 3 本しかないと言われる。質量、角運動量、電荷である。いま電荷は 0 として進む。角運動量ゼロの BH は、アインシュタイン方程式に対する球対称なシュバルツシルト解に対応する。角運動量が有限だと、軸対称なカー解となり、BH は「回転している」だけの「スピンをもつ」だけのと呼ばれる。そのような BH では、遠方からまっすぐ落下させたはずの粒子が BH に近づくにつれらせん軌道を描いたり、奇妙な性質の「エルゴ領域」が出現するなど、理論的に興味深い<sup>1)</sup>。

BH 質量を  $M$ 、角運動量を  $J$ 、重力定数を  $G$  とすれば、

$$R_g = GM/c^2 = 1.5 (M/M_\odot) \text{ km} \quad (1)$$

が重力半径と呼ばれる量となる。この半径に質量  $M$  を置き速度  $c$  で回転したとすると、角運動量は  $J_0 = R_g Mc = GM^2/c$  となり、それをを用いると、規格化された角運動量が

$$a^* = J/J_0 \quad (2)$$

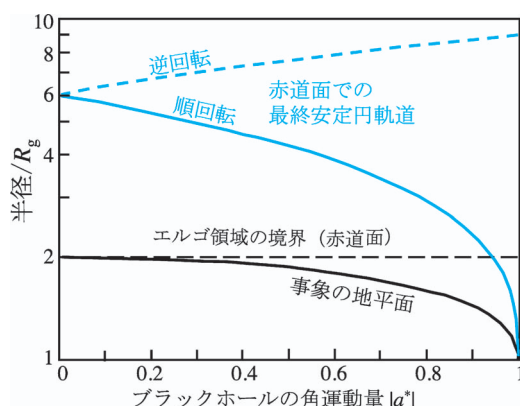


図1 規格化された角運動量の関数として示した、事象の地平面の半径（黒）、および赤道面における最終安定円軌道の半径（青）。文献2より。

と定義できる。  $-1 \leq a^* \leq 1$  が許され、  $a^* = 0$  がシュバルツシルト BH、  $a^* = \pm 1$  が極限回転 BH となる。図1に示すように、事象の地平面の半径は  $a^*$  に依存し、  $a^* = 0$  ならそれは半径  $2R_g$ （シュバルツシルト半径と呼ぶ）に、  $a^* = \pm 1$  なら  $R_g$  に現れる。以下、  $a^* \geq 0$  のみ考える。

実在する  $M = 5 \sim 15 M_\odot$  の「恒星質量 BH」は、大質量星の重力崩壊で作られると考えられる。大質量星は一般に大きな角運動量をもつから、作ら

れる恒星質量 BH も角運動量をもつだろう<sup>3)</sup>。そうした BH が恒星と近接連星をなし、ブラックホール連星を形成すれば、恒星のガスが角運動量をもって BH に降着し事象の地平面へ吸い込まれるため、(円盤が BH 対し順回転であれば) BH の回転はさらに強まるだろう<sup>4)</sup>。一方、多くの銀河の中心に見られる巨大 BH は、中質量の BH どうし合体を繰り返して成長したと考え、やはり大きなスピンをもつはずである。つまり実在する BH も大なり小なり、回転していると考えられる。

そこで BH の回転を実測してみたいが、一般相対論の効くシュバルツシルト時空を、ニュートン的な重力場と区別することさえ、観測的には簡単ではない。まして回転となると、極限回転 BH の場合でさえ、半径  $r \sim R_g$  まで肉薄しない限り、その時空構造をシュバルツシルト BH のものと区別することは難しい。この難題に X 線観測から挑戦する手段として、降着円盤の内縁半径を用いる方法、X 線輝線の形を用いる方法、QPO (準周期的振動) を利用する方法などがある。ここでは始めの二つの方法とその現状を紹介したい。

### 1. 円盤の内縁半径を測る

ニュートン力学では、点源の作る球対称な重力場の中では、いかなる半径  $r$  でも安定な円運動 (ケプラー回転) が可能だが、一般相対論では、 $r$  がある限界より  $R_g$  に近づくと、安定な円軌道が消失する。この限界を最終安定円軌道 (ISCO, Inner most Stable Circular Orbit) と呼ぶ。赤道面内の運動における ISCO 半径は図 1 に示すように、BH の角運動量  $a^*$  に強く依存し、 $a^* \sim 1$  だと、順回転するテスト粒子は、座標系も回転しているので自分があまり速く回転していると認識せず、 $a^* \sim 0$  の場合より  $R_g$  に近づける。

BH にガスが降着する場合、ある条件では、幾何学的に薄く光学的に厚い「標準降着円盤」が形成され、各半径では円盤はほぼ安定な円軌道を描くと考えられる。そうした円盤の最内縁半径  $R_{in}$

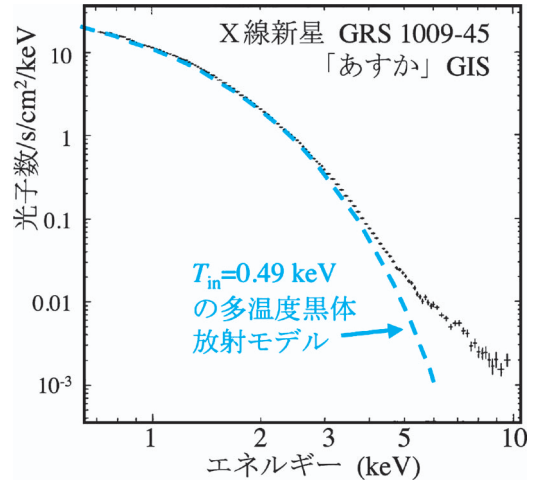


図2 「あすか」GIS 検出器で観測した X 線新星 GRS 1009-45 のスペクトルを、MCD モデルと比較したもの<sup>6)</sup>。星間吸収および装置の応答は、取り除いてある。>4 keV では、ハードテール成分が現れている。

は、ほぼ ISCO に一致すると考えられるので、標準降着円盤が形成されている天体で  $R_{in}$  が測定できれば、ISCO 半径がわかり、図 1 により  $a^*$  が推定できることになる。

恒星質量 BH と恒星とからなる連星系、すなわちブラックホール連星 (BHB) では、降着円盤は温度  $\sim 10^7$  K に達し、X 線を放射する。円盤の各半径で、重力ポテンシャルの深さに応じた温度の黒体放射が出るなら、観測されるスペクトルは、それらを一定の重みで加算した「多温度黒体 (MCD, Multi-Color Disk) 放射」になるだろう。図 2 に示すように、この考えは 1980 年代の半ばより、実際に検証されてきた<sup>5)-8)</sup>。さらに円盤の最内縁半径  $r = R_{in}$  での円盤温度を  $T_{in}$ 、円盤の傾斜角を  $i$ 、天体の距離を  $D$  とすれば、円盤のからの X 線フラックス  $f_X$  は、シュテファン=ボルツマンの法則に似た、

$$f_X \propto R_{in}^2 T_{in}^4 \cos i / D^2 \quad (3)$$

なる形で与えられるので、図 2 の横方向の合い具合から  $T_{in}$  が、縦方向の情報から  $f_X$  が決まり、 $i$  と

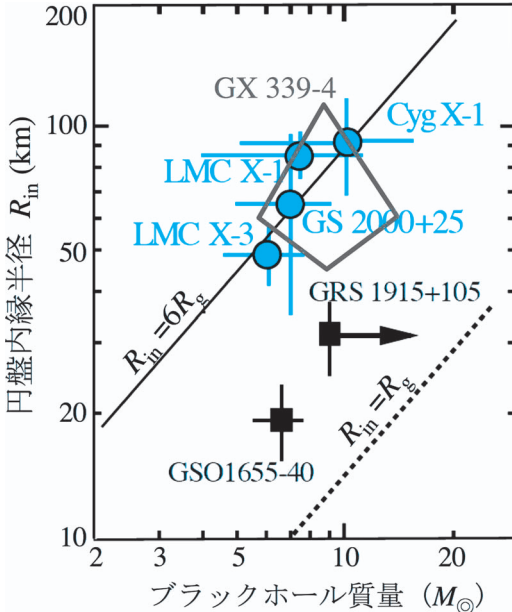


図3 X線および光学観測から(3)式を通じて推定された円盤内縁半径を、光学的に求めたブラックホール質量と比較した結果。文献8を改変。

$D$  が適当にわかれば、 $R_{in}$  が推定できる。さらに主星の光学観測などから、BHの質量  $M$  (よって  $R_g$ ) が推定できれば、 $R_{in}/R_g$  比が決まり、図1から  $a^*$  が求まることになる。

原理は以上のように簡単だが、この方法を使うには、 $D$ ,  $M$ ,  $i$  を光学観測などから知っておかねばならない。さらにMCD放射モデルは、一般相対論を考慮せず、円盤の色温度と有効温度が異なる可能性も無視しており、 $r=R_{in}$  で円盤の粘性によるトルクが0になるべきという、自然な仮定も満たしていない。よって推定された  $R_{in}$  は桁では正しくても、2-3倍の不定性を含んでいても不思議ではない。そこでわれわれは、上記の手続きで求めた  $R_{in}$  に簡単な考察による補正因子を掛けたうえで、観測的に較正を試みた<sup>6), 8)</sup>。図3は7個のBHBについて、X線観測で求めた  $f_x$  と  $T_{in}$ 、および光学観測から推定された  $D$  と  $i$  を用い、(3)式から  $R_{in}$  を求めて、上途の補正因子をかけた上で、それを光学観測で推定されたBH質量

と比較したものである。誤差は大きいですが、青で示す四つの天体はいずれも  $R_{in}=6R_g$  という、角運動量の小さいBHの性質(図1)を満たす。他方、マイクロセーサーとして名高い、黒で示す二つの天体は、 $R_{in}/R_g$  比が有意に小さく、大きな  $a^*$  が示唆される。GX 339-4 は §4 で論じる。

もちろん図3で、 $R_{in}$  の推定値が系統的に大き過ぎ、それを修正すると、実は青い四つの天体も下方に(たとえばファクター2)ずれ、大きな回転をもつという可能性も、ゼロではない。しかしその場合、GRO 1655-40の  $R_{in}/R_g$  比は小さくなり過ぎ、極限回転BHとしても説明できない。よって、(3)式の手法は大間違いではなく、かつ、四つの天体は極端に回転してはいない(たとえば  $a^* < 0.5$ ) と考えるのが自然であろう。

## 2. 鉄輝線のプロファイルを測る

同じ  $a^*$  をもつBHは、質量が違ってても、 $R_g$  で規格化すれば、同じ時空構造をもつはずである。このことを活用すると、降着円盤で発生する重元素(とくに鉄)の蛍光輝線の詳しいプロファイルから、 $a^*$  を推定できる。この方法は1980年代末から、Fabian, 小嶋<sup>9)</sup>らにより研究されてきた。詳細は別稿に譲るが、要はもともと狭い鉄の輝線が、円盤の回転による縦ドップラー効果で青側と赤側に分裂し、横ドップラー効果で全体に赤側にずれ、ビーミング効果で左右非対称になるとともに、重力赤方偏移によりさらに赤方にずれ、結果として図4のように、大きく広がって左右非対称になる効果である。 $a^*$  の違いが明確に現れており(各半径での時空構造の違いよりも  $R_{in}$  の違いが効く)、これが測定できれば、BHのスピンの測定できることになる。

このような鉄輝線プロファイルは、「あすか」によるセイファート銀河MCG-6-30-15の観測を皮切りとして<sup>10)</sup>、多くのセイファート銀河から報告されてきた。さらに同様な輝線構造が、多くのBHBからも報告され始めた<sup>11)</sup>。ある場合には、鉄

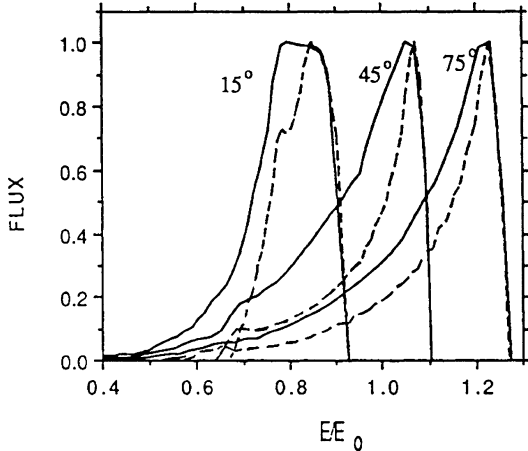


図4 降着円盤から期待される重元素輝線のプロファイルを三つの傾斜角につき計算したものの<sup>9)</sup>。横軸は、静止系エネルギーで規格化した光子エネルギー。点線は回転しないBH、実線は極限回転BHの場合。

輝線はちょうど図4の実線のように、静止系のエネルギー(6.4–6.9 keV)から4 keV付近にまで裾を引いており、結果として $a^* \sim 0.9$ という極限回転に近い値が何例も報告されてきた。しかし恒星質量BHの場合、4–7 keVというエネルギー範囲には、①降着円盤からの光学的に厚い熱的放射(の高エネルギー端)、②円盤光子が高温コロナで熱的逆コンプトン散乱を受けて作られる硬い「べき関数」成分、③その硬X線が円盤を照らし、蛍光過程により作り出す鉄輝線、④それと同じ場所でコンプトン過程などで生じる「反射」成分、の四つが複雑に交錯し、その中で③の裾の形を信頼度よく決める必要がある。当然、連続成分の形には不定性があり、それがデータを超過する(残差が負)なら、モデルが悪いと判断できるが、正の残差が現れた場合、連続成分のモデル化が不適当なのか、鉄輝線が真に広がっているのか、判断は難しく、容易に誤認が起こりうるのである。

論より証拠で、簡単な模擬実験を行ってみよう。図5aは、BHBの「Very High」状態と呼ばれる高光度の状態を模擬した $\nu F_\nu$ スペクトルで、上記①～③成分を含む(④は省略)。①は簡単のため

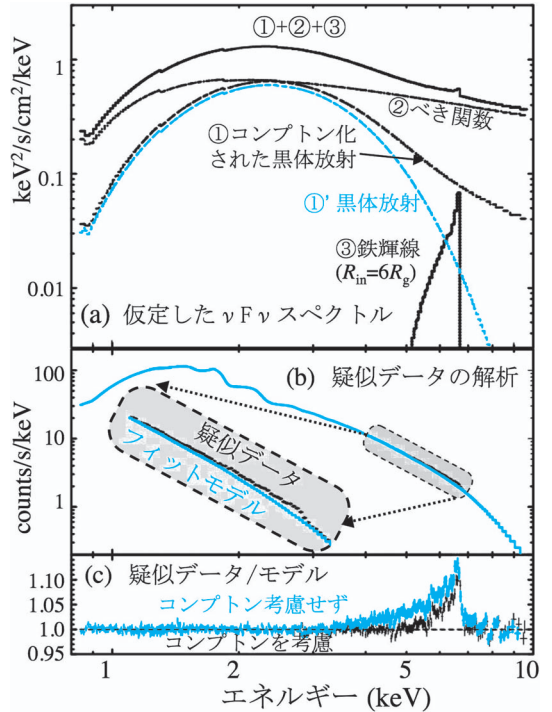


図5 鉄輝線の形状測定の模擬実験。(a)は円盤のコンプトン化を含めて仮定した、モデルの $\nu F_\nu$ スペクトル。(b)は(a)から「すざく」XISの応答関数を用いて作った模擬データを、円盤のコンプトン化を考慮せず、かつ4–7 keVを隠してフィットした結果。鉄輝線の付近を拡大図に示す。(c)の青は、(b)でのデータとモデルの比。黒は、正しく円盤のコンプトン化を取り込んだモデルでフィットした場合。

黒体放射で代用し、温度10 keVの電子雲による光学厚み0.4のコンプトン化を食わせた。これはVery High状態では、円盤の放射はコロナの隙間から透けて見える、という観測示唆に基づいており<sup>12)</sup>、これにより、高エネルギー側に「シッポ」が生じている。②は光子指数2.4を仮定、③は $i = 30^\circ$ と $a^* = 0$ ( $R_{in} = 6R_g$ ; 図4の破線)を仮定した。

こうして作った模擬データを、円盤放射のコンプトン化を考慮せず(①の代わりに図の①'を用い)、かつ4–7 keVの範囲を使わずフィットすると、図5(b)(c)となった。鉄輝線は4 keV付近まで裾を引くが、これはもとの輝線成分③に含まれ

ていた光子ではなく、①の「シッポ」が化けたものである。すなわち非回転BHから出発したのに、強く回転するBHに行き着いてしまった。もちろん、コンプトン化された黒体放射①を用いて同じフィットを行えば図5cの黒線のように、仮定どおり、中庸に広がった輝線が再現できる。こうした模擬実験を踏まえて考えると、速いBH回転を測定したとする Miller<sup>11)</sup> などの結果も、鵜呑みにするのは危険である。

#### 4. ブラックホール連星 GX 339-4 の場合

では§2と§3の方法を同じ天体に適用すると、答えは一致するだろうか。BHBの代表である Cyg X-1 では、円盤内縁半径の方法は図3のように、回転が小さいことを言っており、同様に「すざく」で0.5–300 keVという広帯域で連続成分をしっかりと決め、鉄輝線のプロファイルを測定したところ、状態こそ違おうが、 $R_{in} \sim 15R_g$  となった<sup>13)</sup>。円盤が  $6R_g$  より内側に入っていないという意味で、答えは合っている。さらに広がった鉄輝線を次々に報告している Miller らも、Cyg X-1 に関しては  $a^* \sim 0.05$  と報告しており<sup>14)</sup>、話は一致する。しかし幸福な一致はここまでで、他の天体では、激しい不一致と論争が生じている。その代表的な天体が、GX 339-4 と呼ばれる BHB である。

GX 339-4 は低質量星を主星にもつ、軌道周期1.7日のブラックホール連星で、Cyg X-1 に次いで古くから研究されてきた。「てんま」衛星のデータでMCDモデルが検証されるとともに、X線データから  $R_{in}$  を求め<sup>5)</sup>、そこからBH質量を推定する手法の手始めとなった、記念すべき天体である。距離は  $\sim 8$  kpc と推定され、BH質量は  $> 6 M_{\odot}$  とわかっているのみだが、一般に  $\sim 15 M_{\odot}$  より重い恒星質量BHは考えにくい。これらの制限と「てんま」の測定結果を合わせたものが、図3の灰色の菱形であり、大きな角運動量をもつとは考えにくい。

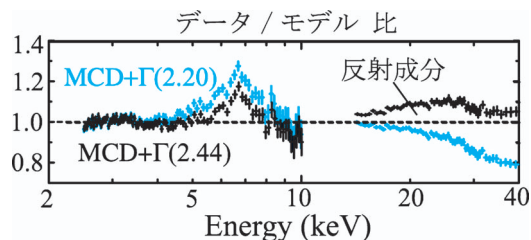


図6 「すざく」によるGX 339-4の観測データを、MCDとべき関数からなるモデルで割ったもの。10 keV以下はXIS装置のデータで、パイラップを避けるため、中心2'以内を捨てている。10 keV以上はHXD-PIN装置のデータ。青は、べき関数の光子指数を2.20に、黒は2.44に固定した場合を示す<sup>16)</sup>。

他方 Miller らは、XMM-Newton などで測定に続き、「すざく」のデータからも  $a^* = 0.89 \pm 0.04$  という結果を報告した<sup>15)</sup>。そこでわれわれは急ぎ「すざく」データを再解析したところ<sup>16)</sup>、Miller らはXISデータのパイラップを無視して解析していることがわかった。パイラップとは、X線強度が大きいとき、データ読み出し時間内に、ある確率でCCDの1ピクセルに複数のX線光子が入り、それらのエネルギーを加算した1個の光子がきたと誤認してしまう現象である。これにより、連続成分の形が歪み、§3で論じたように、それを差し引いて得られる鉄輝線の形も大きく影響を受ける。

われわれは、パイラップの激しいXIS画像データの中心部を捨てて解析し、図6のような結果を得た。MCD成分に光子指数2.2のべき関数を加えたものを連続成分として採用すると、確かに青で示すように、大きく広がった鉄輝線が現れる。しかしこの連続成分は、「すざく」の強みの一つとして高エネルギー側を受けもつ、硬X線検出器(HXD)のデータを超過してしまい、反射成分の加わる余地さえ残らない。そこで光子指数を2.44にすると(図6黒)、HXDのデータとも合い、鉄輝線の幅はずっと狭くなる。これはHXDのデータを用いることで、連続成分の縮退をある

程度まで解くことができるという例になっており、鉄輝線の定量化には広帯域の測定が不可欠であることを示している。

詳細に解析を詰めた結果、鉄輝線のプロファイルは、パイルアップなどの装置特性のほか、§3に示したような連続成分の扱いに大きく影響されることがわかり、Millerらとは異なり、データは  $R_{in} = (5-14) R_g$  を好むという結論に達した<sup>16)</sup>。これは「てんま」データから MCD 解析で得られた図3の結果と矛盾せず、ともに角運動量は小さいことを示唆している。

## 5. おわりに

近年の「すざく」などの観測から、BHBの鉄輝線は多くの場合、X線CCDのエネルギー分解能(〜1%)で見て有意に広がっており<sup>13)</sup>、ブラックホールの近傍(とくに降着円盤の内縁部分)で生成された蛍光光子を含むことは確実であろう。しかし、鉄輝線の赤側の広がり非常に大きく、したがってBHは大きな角運動量をもつとする報告<sup>11), 14), 15)</sup>は、解析方法の妥当性を含め、慎重に評価し直す必要がある。これは活動銀河核についても言えることで、連続成分の決め方が縮退し、それにより鉄輝線のプロファイルが影響されることは、BHBの場合と同様である。

このように、恒星質量ブラックホールの角運動量は、観測的にはまだ測定できるとは言い難く、その測定方法もまだ発展途上である。今後は、円盤内縁法と鉄輝線プロファイル法の合わせ技を用いたり、QPOの性質や電波ジェットの出やすさなど異なる観点からの評価も含め、総合的に進めることが必要だろう。「すざく」後継機のASTRO-Hにも、大きな期待がかかる。

本稿の作成にあたり、高橋芳太氏(理化学研究所)に有益な示唆をいただいた。感謝の意を表し

たい。

## 参考文献

- 1) 佐藤勝彦, 「一般相対論」(岩波書店, 1996), 第7章
- 2) Bardeen J. M., Press W. H., Teukolsky S. A., 1972, ApJ 178, 347
- 3) Sekiguchi Y., Shibata M., 2004, Phys. Rev. D 70, 4005
- 4) Thorne K. S., 1974, ApJ 191, 507
- 5) Makishima K., et al., 1986, ApJ 308, 635
- 6) Kubota A., et al., 1998, PASJ 50, 667
- 7) 小山勝二, 嶺重慎編著「ブラックホールと高エネルギー現象」(現代の天文学第8巻, 日本評論社, 2007)
- 8) Makishima K., et al., 2000, ApJ 535, 632
- 9) Kojima Y., 1991, MNRAS 250, 629
- 10) Tanaka Y., et al., 1995, Nature 375, 659
- 11) Miller J. M., 2007, ARA&A 45, 441
- 12) Kubota A., Makishima K., 2004, ApJ 601, 428
- 13) Makishima K., et al., 2008, PASJ 60, 585
- 14) Miller J. M., et al., 2009, ApJ 697, 900
- 15) Miller J. M., et al., 2008, ApJL 679, L113
- 16) Yamada S., et al., ApJL, 2009, 707, L109

## Measuring Angular Momenta of Stellar-Mass Black Holes

Kazuo MAKISHIMA<sup>1,2</sup> and Shin'ya YAMADA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

<sup>2</sup> Cosmic Radiation Laboratory, RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Abstract: Attempts are made to estimate angular momenta of accreting stellar-mass black holes via their X-ray observations. One method identifies the X-ray measured innermost radii of their accretion disks with their last stable orbits. Another way is to model, in terms of relativistic effects, the profiles of their iron fluorescence lines at about 7 keV. However, these two methods do not necessarily give consistent results at present. We need to employ different methods in a consistent way.