

活動銀河核 Mrk 766 における部分吸収体と 超高速円盤風の検証

指導教員： 松下恭子 小林翔悟

論文著者： 理学部第一部 物理学科

学籍番号 1218103

望月雄友

概要

本研究ではブラックホールの周辺物質を知るために部分吸収体の物理を調べることを目的として研究を行った。対象天体としては明るさが短い時間で変化し、その原因が先行研究によって部分吸収体であると示唆されていた、活動銀河核 Mrk 766 を選択した。この天体を XMM-NewtonX 線天文衛星によって解析し、電離した部分吸収体を考慮してスペクトルフィッティングを行った。

その結果、2005 年 5 月 23 日からの 8 日間の連続観測データは X 線光度が一定であることから部分吸収体が視線中を横切ることによって明るさが時間変動していることを示唆できた。また、部分吸収体を電離度と部分吸収率と赤方偏移から議論することで、連続観測データの一部の部分吸収体は超高速円盤風起源の塊状ガスである可能性を示唆できた。

目次

第 1 章	序論	1
第 2 章	解説	3
2.1	活動銀河核	3
2.2	X 線検出器	4
2.3	XMM-NewtonX 線天文衛星	5
第 3 章	手法	9
3.1	研究対象天体	9
3.2	使用した衛星と検出器	9
3.3	解析方法	9
3.4	使用した xspec のモデル。	10
第 4 章	結果	13
第 5 章	議論	17
5.1	部分吸収体の可能性の検証	17
5.2	部分吸収体の物理	18
5.3	部分吸収体の起源	19
第 6 章	結論	21
	参考文献	29

目次

2.1	活動銀河中心核の中心拡大概略図	3
2.2	活動銀河核 Mrk 766 の Hubble 天文衛星による可視光画像	4
2.3	XMM-NewtonX 線天文衛星	5
2.4	MOS-CCD と PN-CCD の有効面積。横軸がエネルギー [keV]、縦軸が有効面積 [cm ²] を示している。	6
2.5	左図は MOS-CCD の量子効率、右図は PN-CCD の量子効率を横軸をエネルギー [keV] として示した。	6
2.6	MOS-CCD と PN-CCD のエネルギー分解能。横軸がエネルギー [keV]、縦軸が半値幅 FWHM [eV] を示す。左図は MOS のエネルギー分解能を表しており、黒の実線が1つの受光素子の event と2つの受光素子の event の和になっている。右図は PN のエネルギー分解能を示しており、赤の実線が1つの受光素子の event と2つの受光素子の event の和になっている。そのためこの2つを比較すると PN-CCD の方がエネルギー分解能が良いことがわかる。	7
3.1	電離度と Fe の電離の関係。	11
4.1	本研究で解析した 活動銀河核 Mrk 766 の 8 つの観測データのスペクトル。	13
4.2	zpowerlw+zgauss+zgauss のモデルでデータ 5 のスペクトルをフィッティングした結果。	14
4.3	zpowerlw*zxipcf+zgauss+zgauss のモデルでフィッティングした本研究の最終結果	15
5.1	データ 1-6 の zpowerlw の α と K。	17
5.2	データ 2-6 の部分吸収率の時間変化。	18
5.3	データ 2-6 の電離度と赤方偏移。	18
6.1	データ 1 の X 線イメージ画像。赤の円領域は source の領域を示し、緑の円領域は background の領域を示す。カラーバーは光子数/s を示す。	25
6.2	データ 1 の epatplot による pile up の解析。	26
6.3	データ 1-6 の zpowerlw+zgauss+zgauss のフィッティング結果。	27

表目次

3.1	XMM-Newton 衛星の観測データ。	9
3.2	zpowerlw の自由パラメータ。	10
3.3	zgauss の自由パラメータ。	10
3.4	電離度のパラメータ。	11
3.5	zxipcf の自由パラメータ。	11
4.1	本研究の解析データ。	14
4.2	zpowerlw*zxipcf+zgauss+zgauss のモデルのフィッティングで求めたパラメータ。	15
5.1	本研究のデータ 3-6 の部分吸収体と塊状ガスのシミュレーションとの比較。	19

第 1 章

序論

活動銀河核の中心には超巨大ブラックホールが存在しており、物質が降着することで X 線で明るく輝く。一方で降着円盤からは輻射圧によって物質が噴き出していることがシミュレーションによって示唆されている。このようにブラックホールによって物質が輸送されていくことは分かっているが、その物質の組成や物理量については分かっていない。これらの物質を調べるために活動銀河核を X 線で観測することが重要である。

本研究では、活動銀河核 Mrk 766 を研究対象として選択した。この天体は明るさが短い時間で変化し、その原因が先行研究によって部分的に視線中を覆うガスである、部分吸収体であると示唆されていた。しかし先行研究では中性の部分吸収体を仮定しており、部分吸収体の物理については議論されてこなかった。そのため本研究では電離した部分吸収体を考えるために電離部分吸収モデルである `zxipcf` を使用したスペクトルフィッティングによって、部分吸収体の物理と起源を解明することを目的として研究を行った。

第2章

解説

2.1 活動銀河核

2.1.1 活動銀河核と X 線放射原理

活動銀河核は銀河の中心に質量が約 $10^6 - 10^8 M_{\odot}$ の超巨大ブラックホールが存在し、幅広い波長で明るく輝く天体である。また、中心の超巨大ブラックホールに物質が角運動量をもちながら降着することで、降着円盤という円盤を形成する。そして降着状態に応じて、高温プラズマ (コロナ) を形成する天体である。

特にこの天体の 2-11.5 keV のエネルギー帯域では、主に 3 つの放射が卓越する。1 つ目は荷電粒子が減速することで放射される熱制動放射。2 つ目は磁力線の周りを荷電粒子が光速に近い速度でサイクロトロン運動をする時に放射されるシンクロトロン放射。3 つ目は主に高温コロナの中で電子が光子に衝突することで光子のエネルギーが叩き上げられる逆コンプトン効果による放射である。これらの放射はエネルギーのべき乗関数になることが分かっている。

また宇宙空間では Fe までの重元素は星の核融合反応によって作られ、星の一生の終わりの爆発である超新星爆発によって宇宙空間に拡散される。一方で Fe より重い元素は中性子星連星合体などの現象で作られるため、存在量が少なく輝線や吸収線はあまり見えないと考えられる。したがって、輝線や吸収線は存在している元素の中で最も重い Fe 元素が強く見える。例えば中性鉄に X 線が照射され、K 核の電子が自由電子となり、L 核から K 核に電子が遷移することで生じる蛍光鉄輝線 $FeK\alpha$ 線は 6.4 keV に見え、同様に He 様 $FeK\alpha$ 線は 6.7 keV に見える。

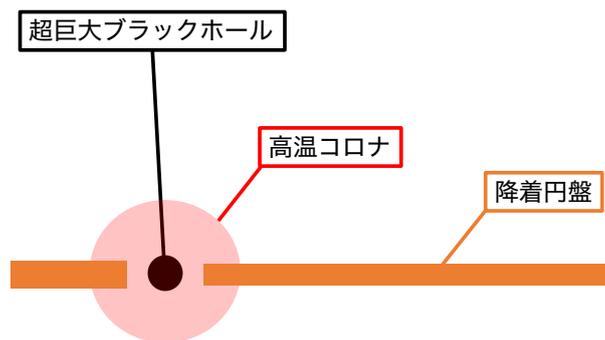


図 2.1 活動銀河中心核の中心拡大概略図

2.1.2 超高速円盤風

活動銀河核は物質を重力によって降着する降着円盤と、物質を輻射圧によって放出する円盤風が存在する。この円盤風の中でも、光速の数% - 数 10 % の速度で物質を放出する円盤風を超高速円盤風という。円盤風が視線中に観測さ

れると、吸収線はドップラー効果によって、青方偏移する。

また、[5]により中心ブラックホール質量が $10^8 M_{\odot}$ の円盤風の磁気流体シミュレーションを行った結果、 r_s をブラックホールのシュバルツシルト半径としたとき、約 $250r_s$ 以上になるとブラックホール質量によらず約 $10r_s$ の大きさの塊状のガスがレイリーテイラー不安定性により形成されることを示唆している。

2.1.3 部分吸収体

活動銀河核からの X 線放射を X 線を吸収するガスが視線中を部分的に視線中を覆う吸収体のことを部分吸収体という。この部分吸収体は X 線を吸収するだけでなく、放射や散乱を起こしており、これによる影響を受けた X 線を実際に観測している。

2.1.4 活動銀河核 Mrk 766

活動銀河核 Mrk 766 は質量が $(1 - 6) \times 10^6 M_{\odot}$ ([2])、宇宙論的赤方偏移が 0.01271 ([1]) の活動銀河核である。この天体は [4] より、2005 年 5 月 23 日から 2005 年 5 月 31 日までの観測で 2-10 keV のエネルギー帯で明るさが約 100 秒未満の時間変動していることがわかっている。この時間変動の原因について、今まで 8 日間の連続観測データのスペクトル変動の解析から部分吸収体の存在を裏付けた。そして、この先行研究に基づき、実際に [3] より、中性の部分吸収体によってスペクトル変動を説明した。これらの先行研究によって、活動銀河核 Mrk 766 のスペクトルの時間変動は部分吸収体によって説明できることが示唆された。

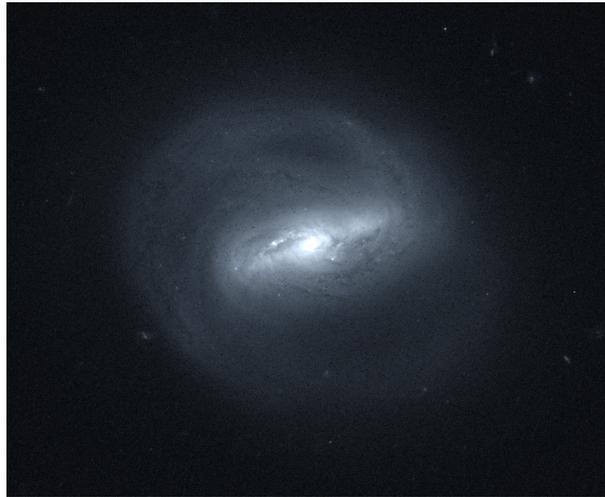


図 2.2 活動銀河核 Mrk 766 の Hubble 天文衛星による可視光画像

2.2 X 線検出器

2.2.1 CCD

CCD(電荷結合素子)とは光の強弱を受光素子が電荷に変換するセンサーである。受光素子には一般に p 型半導体と n 型半導体が結合した pn 結合が用いられている。この受光素子に光子が当たることで、半導体内部で光電効果が生じ、電子と正孔が生じる。受光素子が逆バイアスの構造をしているため、電荷が蓄積されていく仕組みである。この蓄積された電荷を CCD 転送路によって、電荷がバケツリレーのように移動することで電気信号として認識する。これらによって、受光素子にきた光子の数とエネルギーを見積もることができる。

明るい天体の場合、光子を読み出している最中に次の光子が来てしまい、光子を少なく認識してしまうことがある。これを pile up という。この時は一般に X 線のエネルギーが高くなってしまう。そのため、pile up しているか確認をする必要がある。

また、光電効果によって厳密には電子雲が半導体内部に生じる。これは光子が高エネルギーになるほど広がっていき、CCD の素子をまたがって広がっていく。

2.2.2 有効面積

有効面積とは検出器があるエネルギーに対して、1 個あたりの光子をどのくらいの面積で観測しているかを示している。これが大きいと、光子数が少ない暗い天体であっても、優れたスペクトルを得ることができる。また、軟 X 線側には検出器の物質由来の光電吸収が生じることがあり、検出器の系統誤差として考慮する必要がある。

2.2.3 その他の系統誤差

検出器には量子効率による系統誤差がある。これは 0 以上 1 以下で表され、1 に近づくほど量子的な誤差が小さく、そのエネルギー帯ではよく観測できることを示している。また、望遠鏡の反射率も重要であり、これらを解析時には考慮する必要がある。

2.3 XMM-NewtonX 線天文衛星

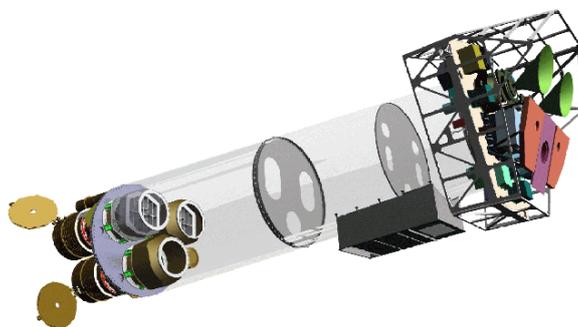


図 2.3 XMM-NewtonX 線天文衛星

https://xmm-tools.cosmos.esa.int/external/xmm_user_support/documentation/uhb/overview.html

XMM-NewtonX 線天文衛星は欧州宇宙機構が 1999 年に打ち上げた X 線天文衛星である。これは 3 台の X 線反射鏡を装備し、それぞれの焦点に X 線 CCD カメラが置かれている。

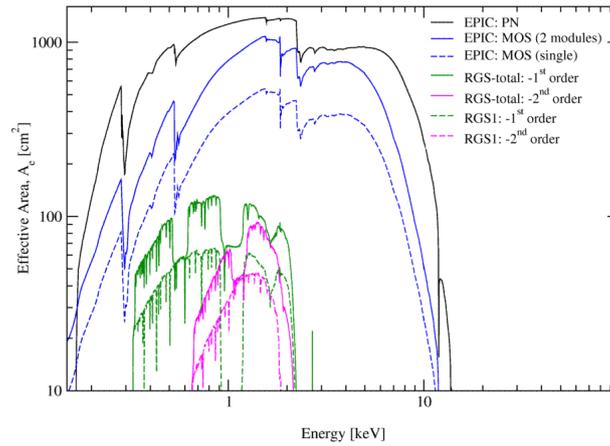


図 2.4 MOS-CCD と PN-CCD の有効面積。横軸がエネルギー [keV]、縦軸が有効面積 [cm²] を示している。

https://xmm-tools.cosmos.esa.int/external/xmm_user_support/documentation/uhb/effareaonaxis.html

[//xmm-tools.cosmos.esa.int/external/xmm_user_support/documentation/uhb/effareaonaxis.html](https://xmm-tools.cosmos.esa.int/external/xmm_user_support/documentation/uhb/effareaonaxis.html)

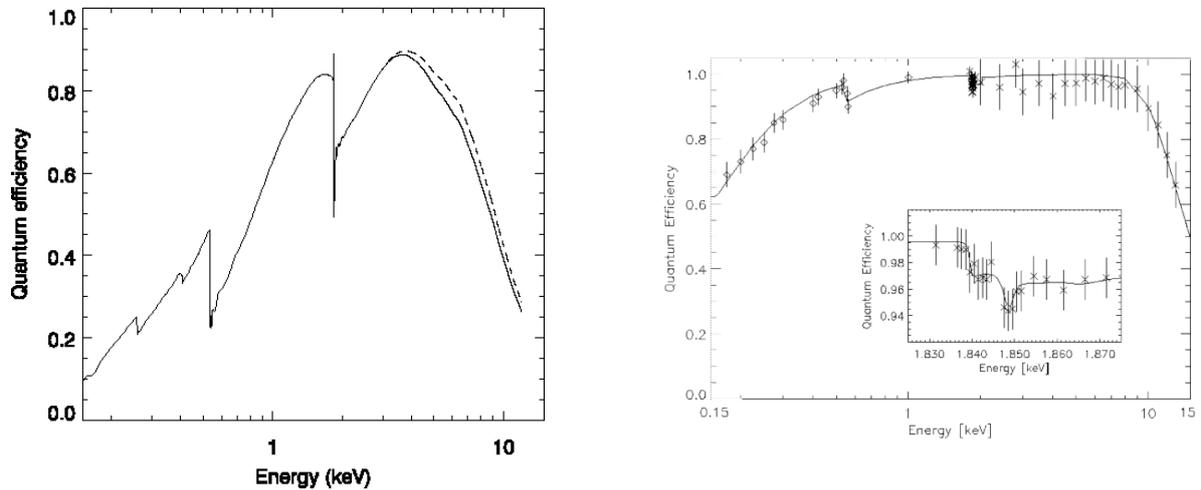


図 2.5 左図は MOS-CCD の量子効率、右図は PN-CCD の量子効率を横軸をエネルギー [keV] として示した。

https://xmm-tools.cosmos.esa.int/external/xmm_user_support/documentation/uhb/epicqe.html

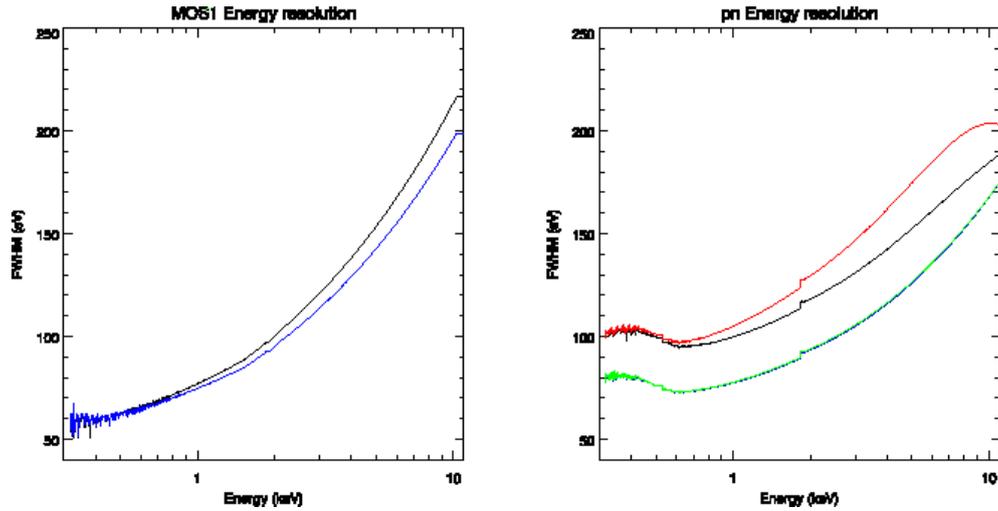


図 2.6 MOS-CCD と PN-CCD のエネルギー分解能。横軸がエネルギー [keV]、縦軸が半値幅 FWHM [eV] を示す。左図は MOS のエネルギー分解能を表しており、黒の実線が 1 つの受光素子の event と 2 つの受光素子の event の和になっている。右図は PN のエネルギー分解能を示しており、赤の実線が 1 つの受光素子の event と 2 つの受光素子の event の和になっている。そのためこの 2 つを比較すると PN-CCD の方がエネルギー分解能が良いことがわかる。

[https:](https://xmm-tools.cosmos.esa.int/external/xmm_user_support/documentation/uhb/epic_specres.html)

[//xmm-tools.cosmos.esa.int/external/xmm_user_support/documentation/uhb/epic_specres.html](https://xmm-tools.cosmos.esa.int/external/xmm_user_support/documentation/uhb/epic_specres.html)

1keV での 3 台の合計有効面積は 1400cm^2 であり、空間分解能は 6 arcsec である。3 台の内の 2 台は MOS-CCD という前面から X 線検出する CCD 検出器が装備され、1 台は PN-CCD という背面から X 線を検出する CCD 検出器である。PN-CCD は前面照射型の MOS-CCD よりも速い読み出しと高い検出効率、すなわち量子効率が非常に良いという特徴がある。またエネルギー分解能は特に PN-CCD は低エネルギー側の量子効率の良さから 100eV (MOS-CCD は 50eV) の高い分解能を誇る。有効面積が MOS-CCD より大きいことも特徴である。

第3章

手法

3.1 研究対象天体

部分吸収体の物理を知るために、本研究では視線中の部分吸収体が示唆されている 活動銀河核 Mrk 766 を研究対象天体とした。

3.2 使用した衛星と検出器

本研究では最も明るさが時間変動している 2-11.5 keV までのスペクトルを解析するため XMM-NewtonX 線天文衛星を使用し、検出器は MOS-CCD より有効面積が大きく量子効率の良さから PN-CCD によって観測したデータを用いた。この時に解析に利用した観測データを以下の表にまとめた。

表 3.1 XMM-Newton 衛星の観測データ。

	OBSID	START	DURATION [s]
1	0109141301	2001/5/20	129906
2	0304030101	2005/5/23	95510
3	0304030301	2005/5/25	98910
4	0304030401	2005/5/27	98918
5	0304030501	2005/5/29	95514
6	0304030601	2005/5/31	98918
7	0304030701	2005/6/3	35017
8	0763790401	2015/7/5	28211

3.3 解析方法

本研究の解析では version6.29 の heasoft の中で version19.1.0 の sas という解析ソフトウェアを使用した。またスペクトル解析には version12.12.0 の xspec を用いた。

- Heasarc から 8 つのデータをダウンロードした。
- sas の epchain を用いて生データを解析できるようにデータを処理した。
- 天体のイメージ画像から 40 arcsec の円領域として source 領域と background 領域をとった。このとき pile up が起こっていないことを確認した。

- background が突発的に明るくなる flare を除去するために、高エネルギーの光子が少ない場合 (10-12 keV の PATTERN=0) を除去した。
- これらから解析するデータを処理し、1つのビンのなかに最低でも 100 個の光子が入るようにビンまとめを行った。
- xspec を用いて χ^2 検定を用いてスペクトルフィッティングを行った。

3.4 使用した xspec のモデル。

3.4.1 zpowerlw

zpowerlw は以下の式のようにエネルギーのべき関数で与えられるモデルである。

$$A(E) = K\{E(1+z)\}^{-\alpha} \quad (3.1)$$

表 3.2 zpowerlw の自由パラメータ。

α	べきを表す定数
z	天体の宇宙論的赤方偏移
K	1 keV の強度を表す定数

3.4.2 zgauss

zgauss は以下の式のガウシアンモデルである。

$$A(E) = K \frac{1}{(1+z)\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\{E(1+z) - E_s\}^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3.2)$$

表 3.3 zgauss の自由パラメータ。

E_s	ガウシアン of 極大値のエネルギー [keV]
σ	分散
z	天体の宇宙論的赤方偏移
K	ガウシアン of 強度を表す定数

3.4.3 zxipcf

zxipcf は電離したガスの中の粒子が 200 km/s の速度の時に作る吸収線を xstar というソフトウェアで計算したモデルである。このモデルでは以下の電離度 ξ をフィッティングから推定することができる。

$$\xi \equiv \frac{L_X}{n_e r^2} \quad (3.3)$$

電離度を求めることでどの Fe 元素が吸収線を作っているかを以下の関係から推定することができる。

表 3.4 電離度のパラメータ。

L_X	X 線光度 [erg/s]
n_e	電子の数密度 [/cm ³]
r	中心ブラックホールから電離ガスまでの距離 [cm]

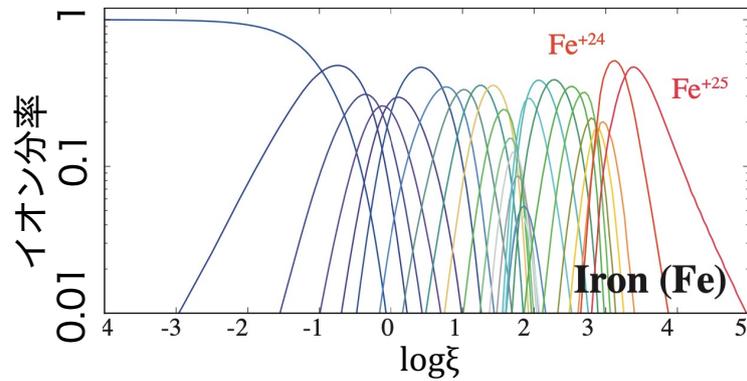


図 3.1 電離度と Fe の電離の関係。

この電離度を含む以下の表のパラメータによって、電離した部分吸収体による吸収線を考えることができ、部分吸収体の物理について考察することができる。

表 3.5 zxcipcf の自由パラメータ。

N_H	水素の柱密度 [10^{22} cm ²]
$\log \xi$	電離度の対数
C_f	どのくらい視線中を覆っているかを表す部分吸収率
z	部分吸収体の赤方偏移

第4章

結果

本研究で解析した活動銀河核 Mrk 766 のスペクトルは以下のようになった。

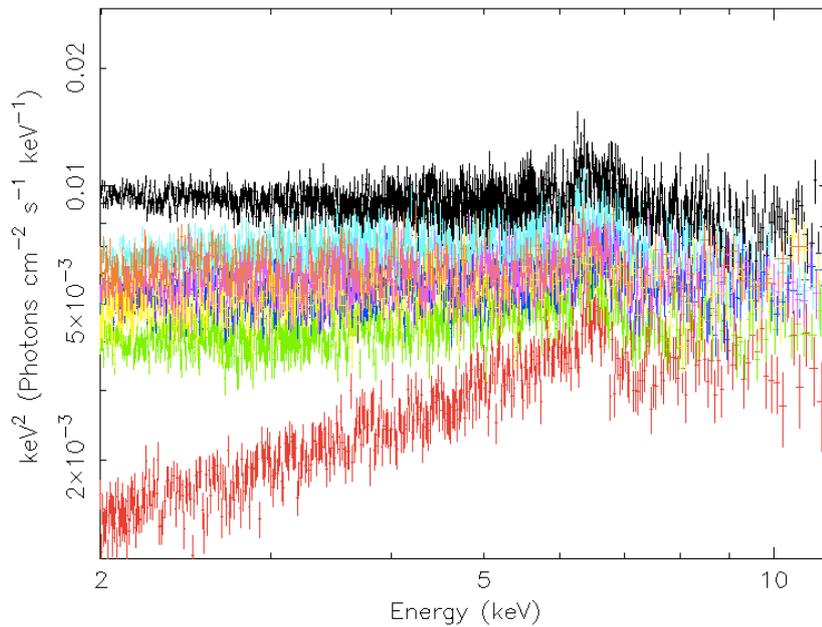
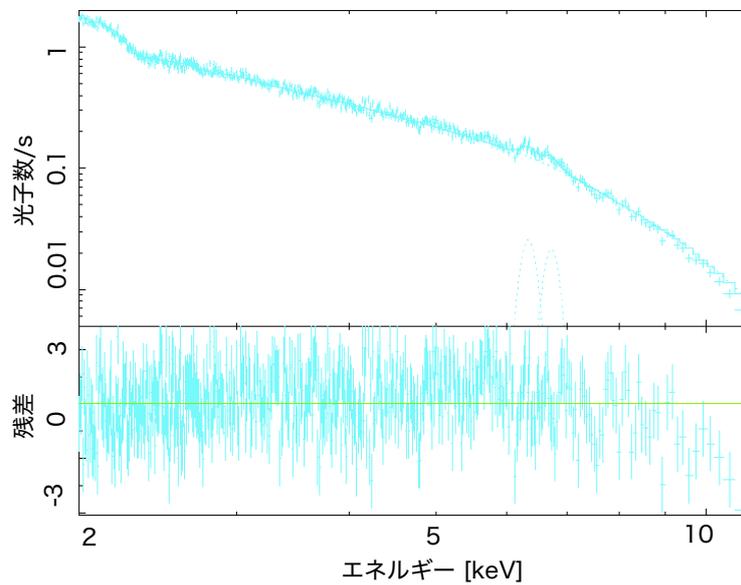


図 4.1 本研究で解析した 活動銀河核 Mrk 766 の 8 つの観測データのスペクトル。

エネルギーの積分が天体の X 線フラックスに対応しており、明るさが時間変動していることがスペクトルからもわかる。次に、これらのスペクトルのフィッティングを行った。2-11.5 keV はエネルギーのべき乗関数になることから `zpowerlw` を導入し、6.4 keV と 6.7 keV の鉄輝線をフィッティングするために、`zgauss` を 2 つ導入しスペクトルフィッティングを行った。このとき、`zgauss` の σ は 0.1 に固定した。例として最も吸収線が見えたデータ 5 のスペクトルは以下のようになった。

表 4.1 本研究の解析データ。

	Color	OBSID	START	DURATION [s]	EXPOSURE [s]
1	Black	0109141301	2001/5/20	129906	88243
2	Red	0304030101	2005/5/23	95510	65193
3	Green	0304030301	2005/5/25	98910	68938
4	Blue	0304030401	2005/5/27	98918	65767
5	Cyan	0304030501	2005/5/29	95514	64526
6	Magenta	0304030601	2005/5/31	98918	60698
7	Yellow	0304030701	2005/6/3	35017	20089
8	Orange	0763790401	2015/7/5	28211	19534

図 4.2 $zpowerlw+zgauss+zgauss$ のモデルでデータ 5 のスペクトルをフィッティングした結果。

残差はデータとモデルの差を分散で割ったものであり、信頼度を表す。このデータでは特に約 7.7 keV に吸収線が有意に見えていることが確認された。本来、このエネルギー帯に有意な吸収線はなく、何らかの吸収線が青方偏移することで吸収線が高エネルギー側にずれていることが示唆される。この吸収線を説明するために $zxcipcf$ を導入し、吸収線が見えるデータ 1-6 の合計 6 つのスペクトルについてフィッティングを行った。

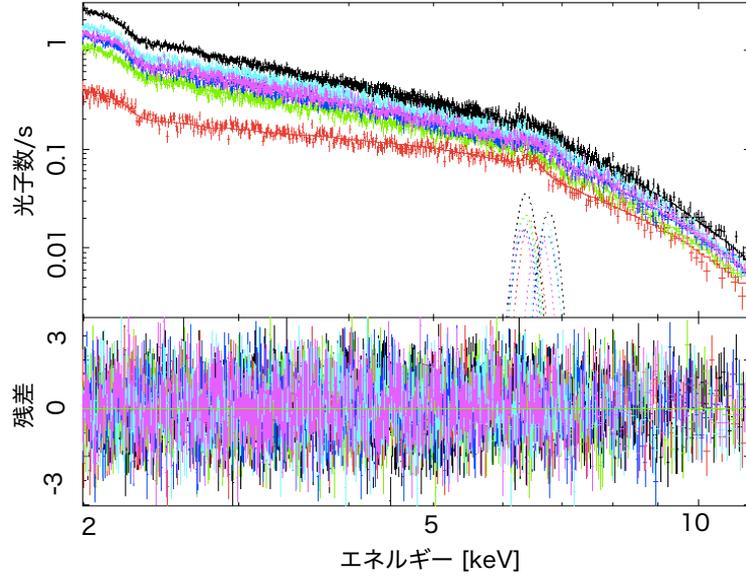


図 4.3 $\text{zpowerlw}^*\text{zxcipcf}+\text{zgauss}+\text{zgauss}$ のモデルでフィッティングした本研究の最終結果

この解析では $\chi^2/\text{自由度} = 4405/4161$ となった。以下の表では zpowerlw と zxcipcf について、フィッティング後の自由パラメータと 90 % の信頼でのパラメータ誤差をまとめた。

表 4.2 $\text{zpowerlw}^*\text{zxcipcf}+\text{zgauss}+\text{zgauss}$ のモデルのフィッティングで求めたパラメータ。

	データ 1	データ 2	データ 3
zpowerlw			
α	$2.33704^{+0.06143}_{-0.06270}$	$2.16146^{+0.11865}_{-0.11716}$	$2.04999^{+0.05335}_{-0.05166}$
K	$1.93240^{+0.28640}_{-0.25543} \times 10^{-2}$	$6.58889^{+1.85431}_{-1.48324} \times 10^{-3}$	$6.24956^{+0.84185}_{-0.735585} \times 10^{-3}$
zxcipcf			
N_{H}	$17.8311^{+7.2351}_{-2.9578}$	$15.5864^{+1.2181}_{-1.2473}$	$38.9078^{+8.0399}_{-6.6354}$
$\log \xi$	$2.20894^{+0.15633}_{-0.16258}$	$1.09052^{+0.18846}_{-0.50063}$	$3.12476^{+0.10877}_{-0.11690}$
C_{f}	$0.396727^{+0.063166}_{-0.073758}$	$0.767009^{+0.032302}_{-0.044082}$	$0.649940^{+0.128719}_{-0.118703}$
z	$-0.156598^{+0.014483}_{-0.008897}$	$4.45509^{+1.50324}_{-1.62037} \times 10^{-2}$	$-7.95222^{+1.11963}_{-1.15118} \times 10^{-2}$
	データ 4	データ 5	データ 6
zpowerlw			
α	$2.05260^{+0.04522}_{-0.04732}$	$2.17652^{+0.09204}_{-0.04472}$	$2.07446^{+0.08390}_{-0.05458}$
K	$7.00453^{+0.90038}_{-0.83056} \times 10^{-3}$	$1.07112^{+0.22496}_{-0.11630} \times 10^{-2}$	$7.43289^{+1.08133}_{-0.99020} \times 10^{-3}$
zxcipcf			
N_{H}	$32.2195^{+10.4397}_{-13.7198}$	$25.9606^{+4.7236}_{-13.5253}$	$34.7712^{+11.5844}_{-19.5708}$
$\log \xi$	$3.17472^{+0.15963}_{-0.18235}$	$2.71667^{+0.19589}_{-0.37950}$	$2.74097^{+0.32878}_{-0.55223}$
C_{f}	$0.487281^{+0.147444}_{-0.138755}$	$0.349911^{+0.087568}_{-0.067369}$	$0.237829^{+0.122389}_{-0.078718}$
z	$-0.106447^{+0.009796}_{-0.006453}$	$-0.134924^{+0.005717}_{-0.006221}$	$-9.96277^{+0.79692}_{-0.62946} \times 10^{-2}$

第5章

議論

5.1 部分吸収体の可能性の検証

明るさの時間変動を電離した部分吸収体によるものであるかを本研究のスペクトルフィッティングから検証する。以下は $zpowerlw$ の α と K についての図である。

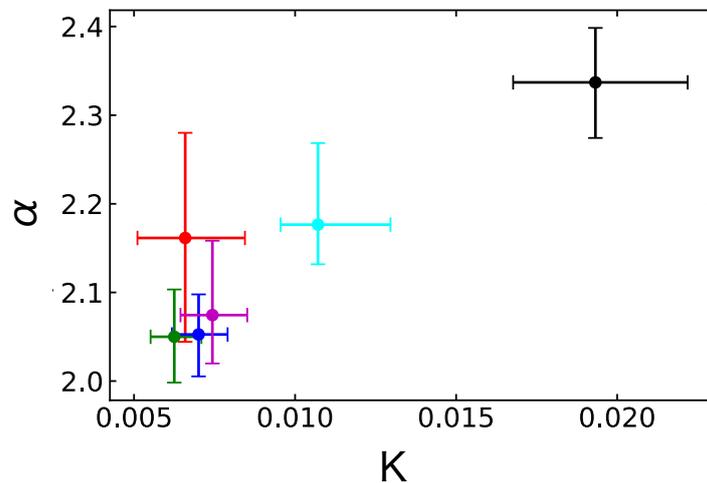


図 5.1 データ 1-6 の $zpowerlw$ の α と K 。

α と K が観測データによって変化していないときは、活動銀河核のコロナからの X 線放射が一定であると考えることができる。この図からデータ 2-6 は X 線放射があまり変化していないことがわかる。これはデータ 2-6 が 8 日間の連続観測データであることから矛盾がなさそうである。次にデータ 2-6 についての部分吸収率の時間変化を以下の図に表した。

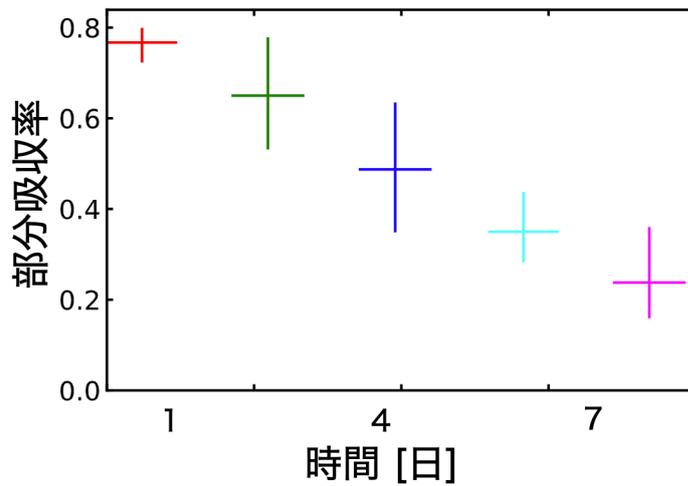


図 5.2 データ 2-6 の部分吸収率の時間変化。

この結果から部分吸収率が時間とともに線形に変化していることがわかる。よって活動銀河核の高温コロナからの X 線放射が一定である、すなわち L_X が一定であるデータ 2-6 についての明るさの時間変化は、部分吸収体によるものである可能性が示唆することができる。

5.2 部分吸収体の物理

部分吸収体が示唆できるデータ 2-6 の部分吸収体の物理を議論する。以下は電離度の対数と赤方偏移を表した図である。

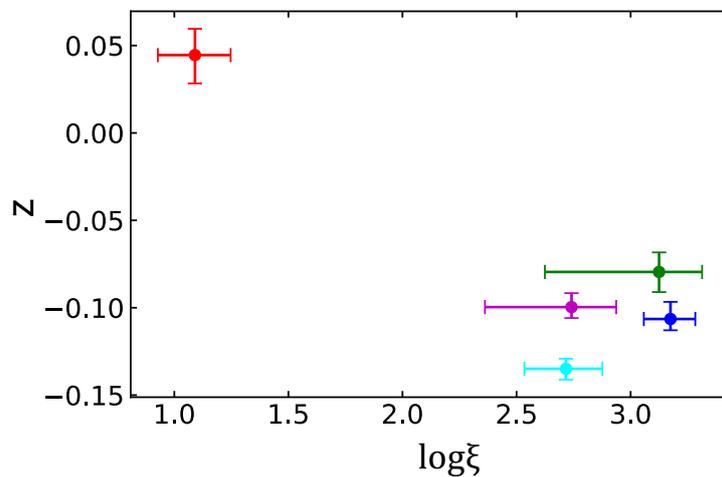


図 5.3 データ 2-6 の電離度と赤方偏移。

この結果からデータ 2 とデータ 3-6 のグループに分けると、データ 2 は部分吸収体の電離度が比較的小さく Fe^{+8-10} が含まれており、動径方向の速度成分が中心ブラックホール方向にもっていることがわかる。しかし、データ 2 は吸収線が微弱なため、今後精査していく必要がある。一方で後者のグループの部分吸収体は電離度が比較的大きく Fe^{+18-20} が含まれており、動径方向の速度成分が視線方向にもつことがわかる。

さらに、 L_X が一定であることから電離度は

$$\xi = \frac{L_X}{n_e r^2} \propto r^{-2} \quad (5.1)$$

のように、距離の 2 乗に反比例する成分が効いてくることがわかる。これらから後者のグループの部分吸収体は比較的中心ブラックホールに近いことが示唆される。

5.3 部分吸収体の起源

データ 3-6 の部分吸収体の特徴をまとめると、電離度が比較的大きく、中心ブラックホールに近い領域から光速の約 4-14 % の速度をもち、視線方向に運動していることがわかった。また、活動銀河核 Mrk 766 は光度が大きいため放射が卓越し、超高速円盤風が生じている可能性は十分あり得ることが予想された。そこで、部分吸収体の特徴を超高速円盤風のシミュレーションの特徴と比較したものを以下の表にまとめた。

表 5.1 本研究のデータ 3-6 の部分吸収体と塊状ガスのシミュレーションとの比較。

	本研究のデータ 3-6 の部分吸収体	塊状ガスのシミュレーション
ξ	2.4-3.5	~3
視線方向の速度	光速の約 4-14 %	光速の数%-数 10 %

これらの比較からデータ 3-6 の部分吸収体は超高速円盤風起源の塊状ガスである可能性が示唆された。

第6章

結論

電離した部分吸収体を考えてスペクトルフィッティングを行った結果、データ 2-6 の連続観測データは L_X が一定であることから部分吸収体が視線中を横切ることで明るさが時間変動していることを示唆できた。この部分吸収体の物理を電離度と部分吸収率と赤方偏移から議論することで、特にデータ 3-6 の部分吸収体は電離度が比較的大きく、中心ブラックホールに近い領域から光速の約 4-14 % の速度をもち、視線方向に運動していることがわかった。これらの特徴は超高速円盤風のシミュレーションの塊状ガスと特徴が似ており、部分吸収体の起源が超高速円盤風起源の塊状ガスである可能性を示唆できた。

今後の課題として、超高速円盤風が本当に見えているのかを大量の模擬スペクトルを作り、フィッティングすることで検証することが必要である。さらに、本研究での `zxipcf` とは別に、ガス中の速度が異なるいくつかのモデルを作成し、部分吸収体の物理に迫りたい。また視線外からの部分吸収体による散乱を考慮するため、モンテカルロ・シミュレーションによる部分吸収体の空間分布の推定も進めていく予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、松下恭子先生、小林翔悟先生には研究のご助言を大変多くいただきました。本当にありがとうございました。また、発表資料の作り方から論文の書き方などについても指導してくださり、お二人に深く御礼申し上げます。今後ともどうぞよろしくお願いいたします。

つぎに、ISAS/JAXA にて、技術指導をしていただいた海老沢研先生、水本岬希先生には、本研究テーマの発案と週1回のミーティングによる指導をいただきました。また、申請書についてもご指導いただき大変感謝しております。来年度からもよろしくお願いいたします。

最後に、海老沢研究室の皆様、ISAS/JAXA の方々には研究を始めるためのパソコンのセットアップや、机やイスにいたるまで、手伝っていただき本当にありがとうございました。また、研究の進捗状況を聞いてくださったり、わからないことを質問したときには、丁寧に答えて下さりました。わたしは、研究を始めたばかりで不安がありましたが、海老沢研究室の皆様、ISAS/JAXA の方々のおかげで、居心地がよく、研究生活を有意義に過ごすことができました。来年度からもよろしくお願いいたします。

付録 A

A-1 活動銀河核 Mrk 766 の X 線イメージ画像

source と background を決めるために XMM-NewtonX 線天文衛星によって解析した X 線イメージ画像は以下の図のようになった。

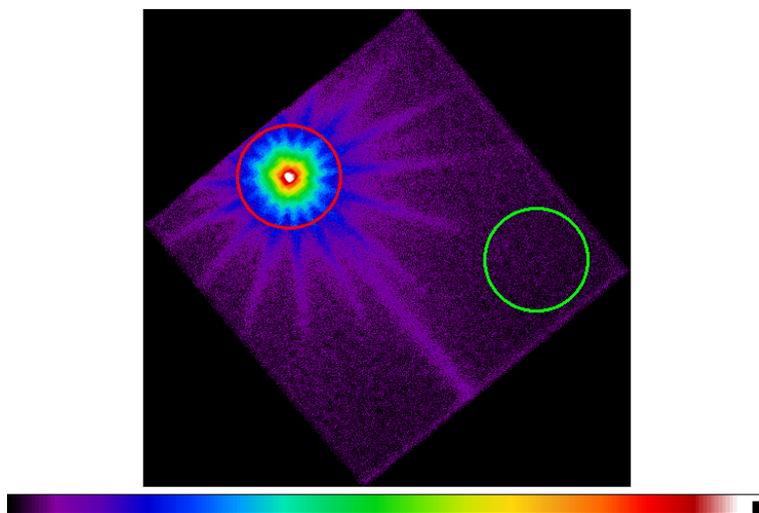


図 6.1 データ 1 の X 線イメージ画像。赤の円領域は source の領域を示し、緑の円領域は background の領域を示す。カラーバーは光子数/s を示す。

A-2 pile up について

pile up について調べるために、sas ソフトウェアの epatplot による解析を行った。

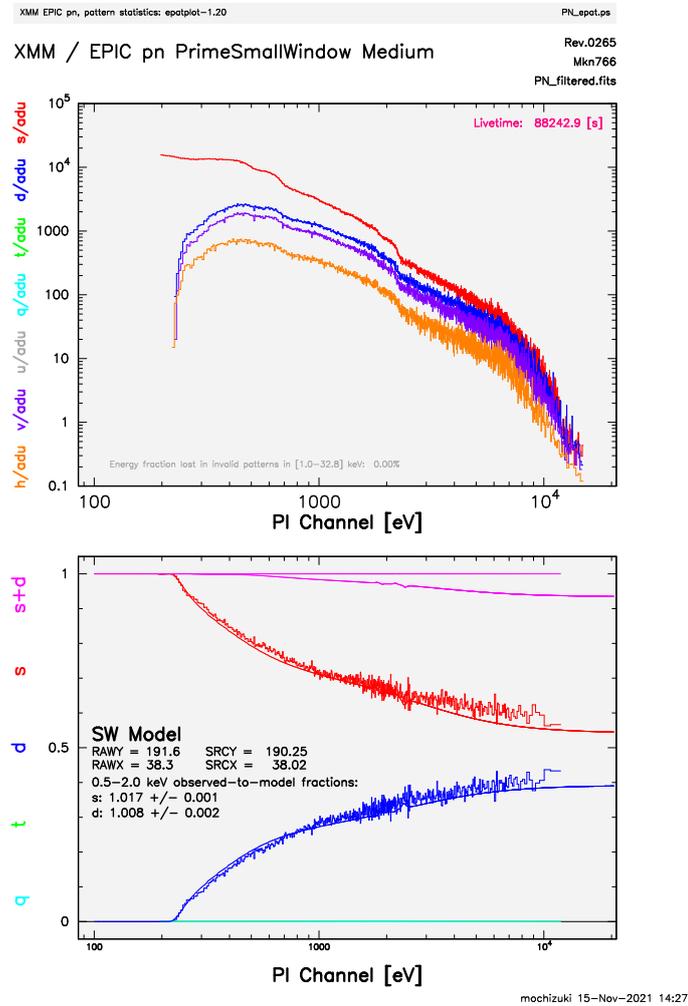


図 6.2 データ 1 の epatplot による pile up の解析。

s,d,t,q はそれぞれ CCD の電子雲の広がり方が単一ピクセルか、2つのピクセルを覆っているか、3つのピクセルを覆っているか、4つのピクセルを覆っているかを表す。pile up が起きていなければ、X線が高エネルギーになるにつれて、電子雲が広がる。しかし、pile up が起ると、下の図の高エネルギー側で実線のモデルよりも急激にsが減少し、dが増加することが確認できる。これは CCD が電子を読み出す前に光子が受光素子に貯まっていくことで生じる。本研究では全てのデータについて調べ、pile up が起きていないことを確認した。

A-3 zpowerlw+zgauss+zgauss のフィッティング

データ 5 を含む、吸収線が見えたデータ 1-6 についての zpowerlw+zgauss+zgauss のフィッティング結果は以下の図となった。

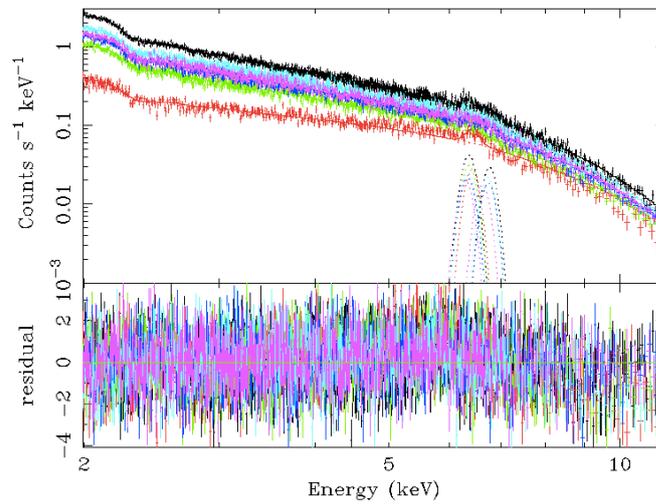


図 6.3 データ 1-6 の zpowerlw+zgauss+zgauss のフィッティング結果。

本研究では約 7 keV 以上に本来存在しない吸収線が存在することを解析から明らかにした。

参考文献

- [1] J. K. Adelman-McCarthy and et al. VizieR Online Data Catalog: The SDSS Photometric Catalog, Release 8 (Adelman-McCarthy+, 2011). *VizieR Online Data Catalog*, p. II/306, September 2011.
- [2] Misty C. Bentz, Jonelle L. Walsh, Aaron J. Barth, Nairn Baliber, Vardha Nicola Bennert, Gabriela Canalizo, Alexei V. Filippenko, Mohan Ganeshalingam, Elinor L. Gates, Jenny E. Greene, Marton G. Hidas, Kyle D. Hiner, Nicholas Lee, Weidong Li, Matthew A. Malkan, Takeo Minezaki, Yu Sakata, Frank J.D. Serduke, Jeffrey M. Silverman, Thea N. Steele, Daniel Stern, Rachel A. Street, Carol E. Thornton, Tommaso Treu, Xiaofeng Wang, Jong Hak Woo, and Yuzuru Yoshii. The lick agn monitoring project: Broad-line region radii and black hole masses from reverberation mapping of $h \beta$. *Astrophysical Journal*, Vol. 705, pp. 199–217, 11 2009.
- [3] D. J. K. Buisson, M. L. Parker, E. Kara, R. V. Vasudevan, A. M. Lohfink, C. Pinto, A. C. Fabian, D. R. Ballantyne, S. E. Boggs, F. E. Christensen W. W. Craig, D. Farrah, C. J. Hailey, F. A. Harrison, C. Ricci, D. Stern, D. J. Walton, and W. W. Zhang. Nustar observations of mrk 766: distinguishing reflection from absorption. 7 2018.
- [4] G. Risaliti, E. Nardini, M. Salvati, M. Elvis, G. Fabbiano, R. Maiolino, P. Pietrini, and G. Torricelli-Ciamponi. X-ray absorption by broad-line region clouds in mrk 766. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 410, pp. 1027–1035, 1 2011.
- [5] Shun Takeuchi, Ken Ohsuga, and Shin Mineshige. Clumpy outflows from supercritical accretion flow, 2013.