

論文内容の要旨

論文題目:

X-ray Spectral Study of the Seyfert 1 Galaxy

MCG-6-30-15

(セイファート1型銀河 MCG-6-30-15 の X線スペクトル変動の研究)

氏名 宮川 雄大

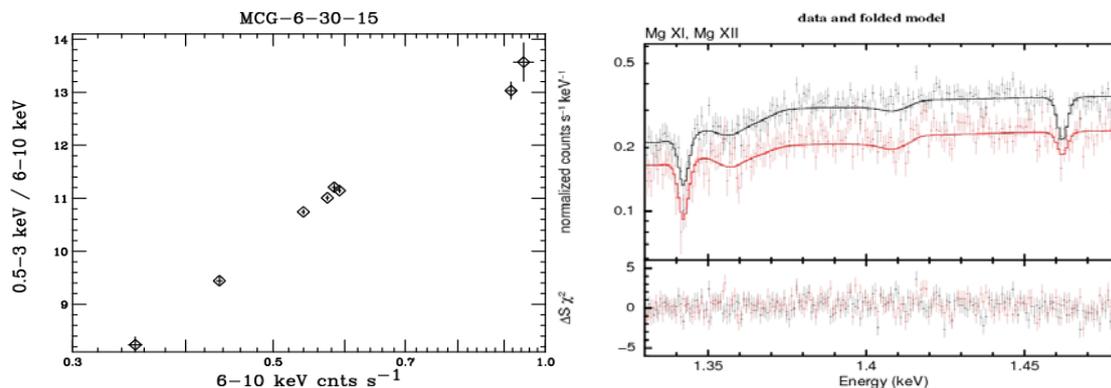
1. MCG-6-30-15 を研究する目的

「ディスクライン」とは、X線エネルギースペクトルにおいて、降着円盤の内縁付近から放射される鉄輝線がブラックホール(BH)周辺の強い重力赤方偏移によって低エネルギー側まで裾をひいているように見えるラインの通称である。

仮に、ディスクラインがセイファート1型銀河や銀河系内BH連星に本当に存在していれば、BHの回りの非常に強い重力場を測定する千載一遇の好機となる。よって、BH天文学の分野において、ディスクラインは本当に存在するのか、広がって見える鉄輝線は重力赤方偏移によるものなのか、報告されている鉄輝線のエネルギー帯での変動率の低下は一般相対論的なlight bending効果によるものなのかどうか、ということが最重要課題として挙げられる。しかし、連続成分のスペクトルモデルによって鉄輝線の形状は大きく変わってしまい、連続成分のスペクトル自身が完全に理解されていないため、それらの天体についてディスクラインが本当に存在するのかどうか、未だに議論を呼んでいる。

我々は、代表的なディスクライン天体であるMCG-6-30-15に焦点を絞り、ディスクライン構造の検証を行った。既に述べたように、ディスクラインの構造に迫るためには連続成分のモデルを正しく評価することが不可欠である。本研究の目的は、モデル依存しないアプローチから高エネルギー範囲にわたるスペクトル変化を明らかにした上で、そのスペクトル変化をできるだけ少ないパラメーターの変化で説明できる連続成分の物理的モデルを見つけ、それを用いてディスクラインの必然性に迫ることである。これを達成するために、我々は、鉄エネルギー付近における高いエネルギー分解能と40 keVまで感度をもつ「すざく」衛星を用いて、データ解析を行った。加えて、X線回折格子によって「すざく」よりも高いエネルギー分解能をもつChandra衛星を用いてスペクトル吸収線構造を調べた。更に、より長いタイムスケールでのスペクトル変化を調べるためにRXTE衛星の膨大なアーカイバルデータを用いた。このようにして、様々なX線天文衛星の特徴を最大限に生かして研

究を行った。



<図 1: (左図) 強度とハードネスの相関。(右図) Mg XI と Mg XII の強度変化。 >

2. 10 keV 以下での X 線強度とハードネスの関係

「すざく」衛星で 2006 年 1 月に観測された露光時間 約 339 ksec のデータを用いて、スペクトルハードネス(6-10 keV と 0.5-3 keV のカウントレートの比)と X 線強度(6-10 keV のカウントレート)の関係を調べた。なお、0.5-3 keV は電離吸収の影響が強い帯域である。図 1 の左図が X 線強度とハードネスの相関を表しており、10 keV 以下で明るくなるほど、スペクトルが傾いていることを明らかにした。同様の解析を、RXTE 衛星によって観測された同天体の 1996-2009 年までの 1341 data set に対しても行い、「すざく」衛星で観測した時期よりも長いタイムスケールでも、同じスペクトル変化が存在することを明らかにした。

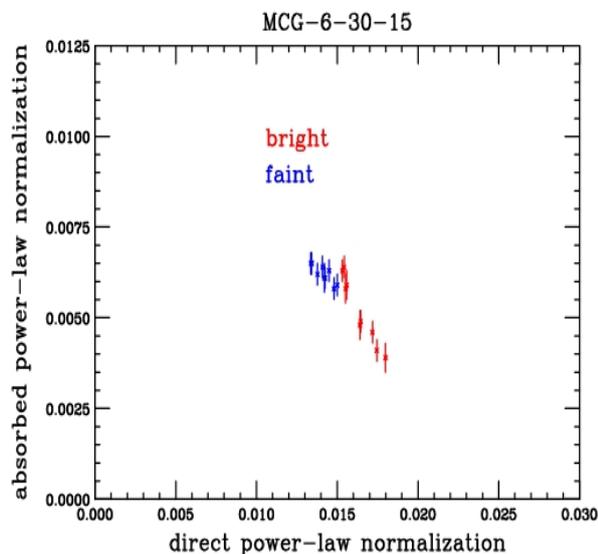
3. X 線による吸収線の観測

Chandra 衛星で 2004 年の 5 月に観測された露光時間約 522 ksec のデータ解析を行った。その結果、X 線強度に応じて Mg と Si の吸収線の深さが変化していることを明らかにした。図 1 の右図に解析結果の一例として X 線強度の変化に応じた Mg XI と Mg XII の吸収線の強度変化を示す。このことから、10 keV 以下のスペクトル変動は主に電離吸収体の電離度の変化によるものであることを示した。実際、上で示した「すざく」のスペクトル変化が、電離吸収体の電離度の変化で良く説明できることを確認した。

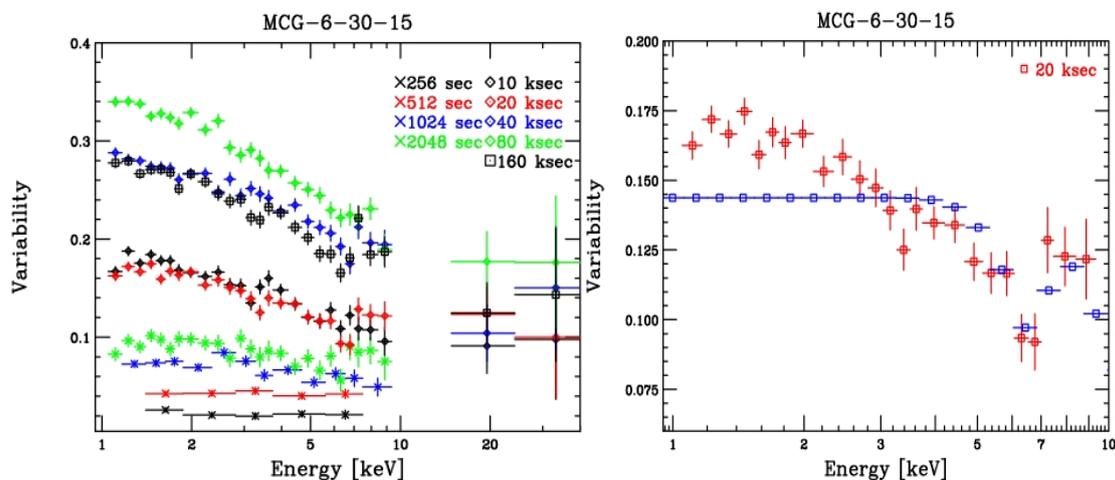
4. 「すざく」衛星と Chandra 衛星データを用いたスペクトル変動解析

まず、我々は Chandra/HETGS のデータを解析することで遠方からの鉄輝線の等価幅を 20 eV 程度と評価し、既に報告されていた Young et al. (2005)の結果を確認した。その上で、George and Fabian (1991)の結果を踏まえて、細かい鉄輝線から期待される 0.6π 程度の立体角を持つ反射体を導入した。それだけでは 10 keV 以上で卓越するスペクトル成分を説明できないため、電離した物質による強い吸収を受けた成分($N_H \sim 10^{24} \text{ cm}^{-2}$)を仮定したモデルを考えた。このモデルを用いて「すざく」衛星と Chandra 衛星のスペクトルについて解析を行った結果、極端に広がった鉄輝線(いわゆるディスクラインモデル)を入れなくても、エネルギースペクトルを良く説明できることが分かった。このモデルを様々なタイムスケールでの明るい状態のスペクトルと暗い状態のスペクトル、および強度毎にスライスしたスペクトルについて当てはめたところ、観測されたすべてのスペクトル変化を、power-law

の直接成分の強度と強い吸収を受けた成分の強度、低電離吸収体の電離度の3つのパラメーターの変化だけで説明できることを明らかにした。また、この時、直接成分の強度と吸収成分の強度の間に強い逆相関があることを発見した(図2)。この逆相関関係は、中心からの X 線が電離した物質により部分吸収されていることを強く示唆している。その一方で、power-law の直接成分の強度と電離度にははっきりと相関関係が見られた。この時、高電離吸収体の電離度($\log \xi \sim 3.4$, $N_H \sim 2 \times 10^{23} \text{cm}^{-2}$)および power-law モデルの冪は一定に保たれた状態になっている。次に、モデル依存しない変動解析を用いて各パラメーターの変動率のエネルギー依存性を調べた結果、時間スケールが伸びるにつれて変動率が徐々に傾くことを明らかにした(図3の左図)。

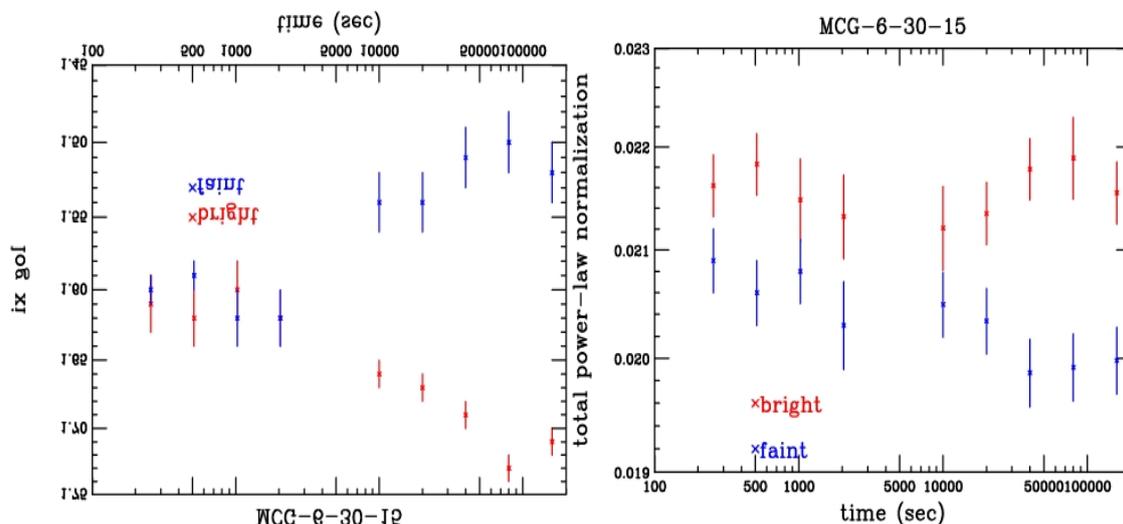


<図2 直接成分と吸収成分の強度の逆相関関係>



<図3(左図)9つの時間スケールでの変動率のエネルギー依存性(右図)1—10 keVにおける20 ksecの変動率と covering factor だけが変動すると考えたシミュレーション値の比較>
 また、この時、鉄輝線のエネルギー帯付近での変動率の低下を、全体に対する吸収成分の割合(covering factor)の変化だけで説明できることを明らかにした。図3の右図は、観測された20 ksecでの変動率のエネルギー依存性と、covering factor の変化から期待される変動率のエネルギー依存性を比較した図である。広がった鉄の K 殻吸収端構造が良く再現されていることがわかる。3 keV 以下で有意な超過が見られるのは、低電離側の電離吸収体の電離度の変化によるものであり、低エネルギーになるほどそれは有意になる。次に、スペクトルパラメータ変化の時間スケール依存性について調べてみると、covering factor と低電離吸収体の電離度はどちらも2 ksec程度まで一定で、変動し始めるタイムスケールが10

ksec 程度であり、80 ksec 程度でピークを持つことを明らかにした。このうち低電離吸収体の電離度の時間変化を図 4 の左図に示す。一方、power-law の強度は 512 sec 程度に変動率にピークをもつ成分に加えて、やはり 10 ksec 程度から変動を始め、80 ksec 程度にピークをもつ変動をもつ成分が存在することも分かった(図 4 の右図)。前者はブラックホールの X 線光度変動によるものと理解できるが、後者を原理的に独立である部分吸収体と X 線光度の連携によるものと考え難い。むしろ、80 ksec 程度のタイムスケールでは X 線光度はほとんど変動していないが、そのタイムスケールで変動する部分吸収体が、部分吸収を引き起こすとともに X 線の一部を完全に遮蔽すると考えると説明がつく。実際に、広がった X 線源の視線上に非常に多くの分裂した電離吸収体が介在している状況を見ると、X 線の遮蔽や部分吸収が、吸収体の様々な不透過度に依存して同時に起こると考えることは自然である。



<図 4(左図) 低電離側の電離吸収体の電離度の時間スケール変化
(右図) power-law の全強度の時間スケール変化>

これらの結果から、我々は、MCG-6-30-15 の X 線スペクトル変化は、広がった X 線源の視線上で遮断する光電離された吸収ガスによって主に生じているという”absorbing cloud envelope”モデルを提案する。それぞれの吸収ガスには、厚みのある冷たい核 (いわゆる X 線を遮蔽する成分) があり、その周りを中間層(Thomson 光学的厚みが 1 程度、 $\log \xi \sim 1.6$) が取り囲み、さらに中間層の外側には光学的に薄く、電離度が変化する外皮(エンベロープ)($\log \xi \sim 1.2-3$, $N_H \sim 3.7 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$)が広がっている。中間層と外皮がそれぞれ我々のスペクトルモデルにおける部分吸収体と低電離の電離吸収体に対応している。高電離吸収体が吸収ガス全体を囲んでいて、その電離度は変化しない。

以上をまとめると、我々は、ディスクライン天体として有名なセイファート 1 型銀河 MCG-6-30-15 のデータ解析を行い、様々な時間スケールにおけるスペクトル変化を説明するモデルを構築し、ディスクライン構造に迫った。その結果、ディスクラインを導入しなくても、観測されたスペクトルの形状とその変化を自然に説明できることができた。