

# ブラックホール天体の X 線エネルギー スペクトル中に広がった鉄輝線の ように見える構造の解釈について



海老沢 研・宮川 雄大・井上 一

〈宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1〉

e-mail: ebisawa@isas.jaxa.jp

活動的銀河中心核や銀河系内のブラックホール連星の X 線エネルギースペクトル中に、一般相対論の効果で重力赤方偏移を受けて低エネルギー側に裾を引いた鉄輝線のように見える、特徴的なスペクトル構造が存在する。この問題の歴史的経緯と背景をレビューし、その構造を説明するために今まで提案されてきたモデルを紹介する。また、そのような鉄輝線構造をもつ代表的な天体であるセイファート I 型銀河 MCG-6-30-15 のデータを詳細に再解析し、そのスペクトル変化を最小限のパラメーターで説明する新たなモデルを構築したので、それを報告する。私たちのモデルは、高速で回転するブラックホールのごく近傍から期待されるような、極端に広がった鉄輝線の存在とは相容れない。一部の研究者が強く主張する、ブラックホールのごく近傍からの相対論的に歪められた強い鉄輝線の存在は、観測的には証明されていない。

## 1. はじめに

やや長いタイトルを付けたが、本稿で私たちが述べようとしていることを正確に伝えるようになってしまう。天文月報の多くの読者が、活動的銀河中心核や銀河系内のブラックホール連星の X 線スペクトル中に一般相対論効果によって強く重力赤方偏移した鉄輝線が観測されていて、それがブラックホールの存在の証拠である、という説を一度は耳にしたことがあるのではなかろうか？そのようなスペクトル構造をもつ代表的な天体がセイファート I 型銀河 MCG-6-30-15 であり、「あすか」衛星による広がった鉄輝線の報告が<sup>1)</sup>、ブラックホールの存在の証拠として注目を集めた。また、すざく衛星のスペクトルに対して相対論的に広がった鉄輝線モデルを当てはめ、その歪み具合がシュバルツシルトブラックホールで期待されるものよりもはるかに大きいため、MCG-6-30-15

中のブラックホールは限界近く高速回転しているカーブラックホールであるという説もある<sup>2)</sup>。

本当にブラックホール極近傍の強重力場の証拠が、X 観測観測によって発見されたのだろうか？それが事実であるかどうかは、X 線天文学だけではなく、天文学、物理学全体にとってたいへん重要な問題である。それゆえに、すでに天文月報 2010 年 3 月号に小嶋氏が理論的な立場から、3 月号と 6 月号にそれぞれ牧島・山田氏と根来氏が観測的な立場からレビューし、各自の見解を述べている。だめ押しになるかもしれないが、本稿ではさらにそれらの記事とは違った観点からこの問題の歴史的経緯と背景を紹介するとともに、最近、私たちが、MCG-6-30-15 のデータを詳細に再解析して得た結果の概要を報告する<sup>3) 4)</sup>。私たちは、最小限のパラメーターで 1-40 keV という広いエネルギー範囲にわたるスペクトル変化を説明する、新たなスペクトルモデルを提案する。私たちのモ

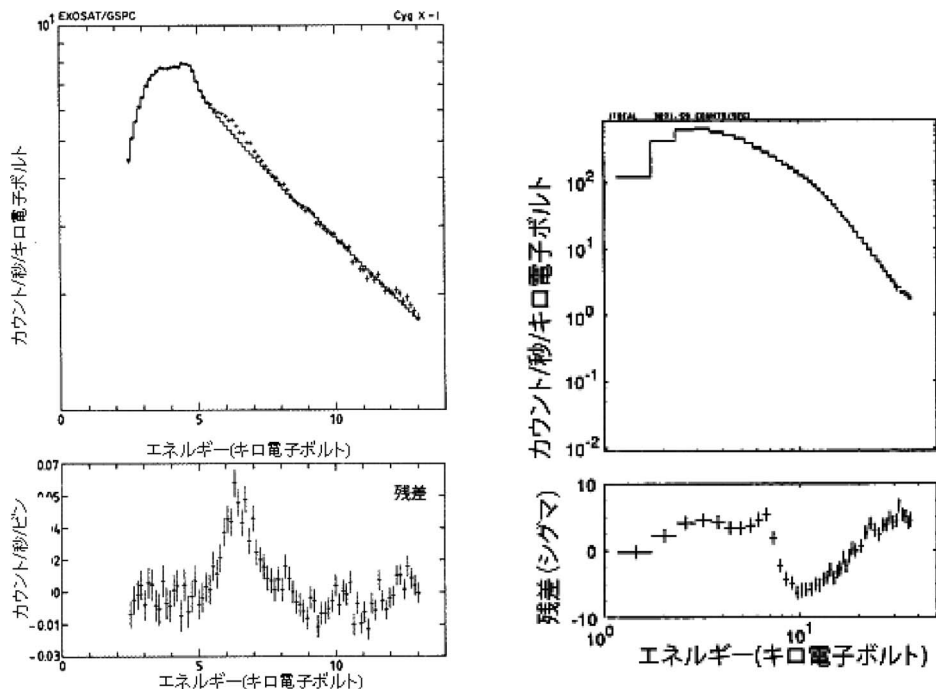


図1 EXOSAT 衛星<sup>6)</sup> (左) と「ぎんが」衛星<sup>10)</sup> (右) が観測したブラックホール連星系白鳥座 X-1 のエネルギースペクトル。べき関数によるフィットとその残差を示している。上段はどちらも検出器の応答関数込みのカウントスペクトルであることに注意。

デルは、相対論的効果によって著しく広がった鉄輝線は必要としない。特に、一部の著者が主張するような、限界近い速度で回転するカーブラックホールのごく近傍から期待される極端に歪んだ強い輝線の存在とは相容れない。私たちのモデルの妥当性が証明されるには、今後何年にもわたって幾多の観測的検証を経なくては行けないが、少なくとも現時点では、以下の主張は妥当であろう；ブラックホールのごく近傍から出ていると言われる相対論効果によって大きく歪んだ鉄輝線の存在は観測的に立証されておらず、そのモデルによって得られたブラックホールや降着円盤のパラメーターは信頼できない。

## 2. 歴史的経緯

X線天文学は1962年に誕生したが、鉄のK輝線（電離度に応じて、6.4–7.0 keV）付近のエネルギースペクトルが正確に測れるようになったの

は、1980年代からである。1984年に打ち上げられた日本の「てんま」、ヨーロッパのEXOSATはそれぞれ、それ以前の比例計数管（鉄輝線エネルギー帯で $\Delta E/E \approx 20\%$ ）に比してエネルギー分解能に優れた蛍光比例計数管（ $\Delta E/E \approx 7\%$ ）を積み、多くの天体の鉄輝線構造を明らかにした。これによって、中性（6.4 keV）、ヘリウム様電離（6.7 keV）、水素様電離（7.0 keV）の鉄輝線が区別できるようになった。今から思えばプリミティブだが、これが鉄輝線を使ったX線分光学の始まりと言っても良いだろう。

図1（左）に、EXOSATによるブラックホール連星系白鳥座 X-1 のエネルギースペクトルを示す<sup>6)</sup>。べき関数によるフィットと、その残差を示している。明らかに鉄輝線あたりに構造があるが、単純な細い輝線では表せない。広がった輝線だとすると、中心エネルギーは中性の鉄から期待される値より低く、6.2 keVとなる。その解釈は次

節に述べるとして、初期の観測結果の紹介を続けよう。1987年に打ち上げられた「ぎんが」衛星に搭載された大面積比例計数管は、エネルギー分解能は蛍光比例計数管に劣るが、その優れた感度、広いエネルギー範囲 (1.2–37 keV) と精密な機器校正のおかげで、多くの活動的銀河中心核やブラックホール連星系の鉄輝線周辺のスペクトル構造を明らかにした<sup>\*1</sup>。特に、それらの天体に普遍的に、鉄の *K* 吸収端よりも高エネルギー側に浅く広がった吸収端構造を発見した<sup>7)–12)</sup>。

図1の右側に、「ぎんが」衛星による白鳥座 X-1のエネルギースペクトルをべき関数でフィットした結果と残差を示す<sup>10)</sup>。左右の図を比較するとよくわかるように、べき関数からの残差として局所的なスペクトル構造を見た場合、どのようなべきを仮定するかで、その構造は広がった輝線のようにも吸収端のようにも見える。正しいべきを決めるためには、できるだけ広いエネルギー範囲で観測する必要がある。実際、「ぎんが」のスペクトルを、エネルギー範囲を EXOSAT に合わせて 12 keV 以下に限定してべき関数でフィットすると、あたかも 6.2 keV に広がった輝線が存在するようになってしまうのである<sup>13), 14)</sup>。MCG-6-30-15 も含め、ブラックホール天体の X 線スペクトル中に普遍的に存在する特徴的な鉄輝線/吸収端構造は、1980年代後半に「ぎんが」が初めて発見したものであり、その起源についての論争が20年以上も続いているわけである<sup>\*2</sup>。

### 3. 広がった鉄輝線構造の解釈

これらのスペクトル構造は、光学的に厚い物質

による X 線の再放出に起因するものであることは間違いない。中性の鉄の *K* 吸収端の断面積は  $\sim 3.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  であり、水素に対する鉄の組成比は  $\sim 3 \times 10^{-5}$  である。よって、水素柱密度にして  $\sim 10^{24} \text{ cm}^{-2}$  にて鉄の *K* 吸収端は光学的に厚くなる。そのような物質に鉄吸収端エネルギー (電離度に応じて 7.1 keV から 9.3 keV) よりも高エネルギーの X 線光子が入射すると、それは *K* 殻で光電吸収を受け、それに引き続いてある割合 (蛍光収率; 中性の場合は 0.34) で、6.4–7.0 keV の蛍光輝線が発せられる。

また、物質は水素柱密度  $\sim 1.5 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$  を超えるとトムソン散乱に対して光学的に厚くなるので、入射した X 線の一部は反射される。よって、そのように光学的に厚い物質 (たとえば降着円盤) が X 線放射源の近くにある場合、私たちは、放射源からの直接成分と、反射体からの蛍光鉄輝線、吸収端、反射成分の重ね合わせを見ることになる<sup>15), 16)</sup>。「ぎんが」衛星がブラックホール天体の X 線エネルギースペクトル中に発見した浅くて広い吸収構造は、このモデルでほぼ説明できる<sup>7)–12), 17)</sup> (図2, 3(左))。

また、視線上に光学的に厚い物質があった場合には、吸収端と吸収線が観測されるが、鉄輝線と反射成分は視線上から散乱されるので、ほとんど観測されない。吸収物質が視線の一部だけを隠している「部分吸収」の場合にも直接成分と吸収成分の重ね合わせで、幅の広い吸収端構造を作ることができる。実際、「ぎんが」による MCG-6-30-15 のエネルギースペクトルは、部分吸収モデルでも説明することができた<sup>8)</sup> (図3(右))。

\*1 実際、「ぎんが」衛星では約 1 keV から 30 keV までの幅の広いエネルギー範囲で光子統計の良いデータが得られるので、モデルから約 1% 以上のずれがあればそれを検出できる。一方、後の「あすか」、XMM-Newton、Chandra に搭載された X 線望遠鏡と CCD 検出器の組み合わせでは、エネルギー範囲が 10 keV 以下に限られ光子統計にも劣るので、モデルから約 5% 以下のずれがあっても検出することは難しい。鉄輝線付近の広がったスペクトル構造に対しては、「ぎんが」のほうが、「あすか」、XMM、Chandra よりも高感度だったのである。

\*2 筆者の一人 (海老沢) は、この話題を、数年前に天文月報で連載していた「あの論争はいま？」のテーマとして提案したことがあるが、まだ論争の真っ最中でありレビュー記事を掲載するには時期尚早、というのが当時の編集委員会の回答であった。しかし、まだ論争は続いているわけだが…。

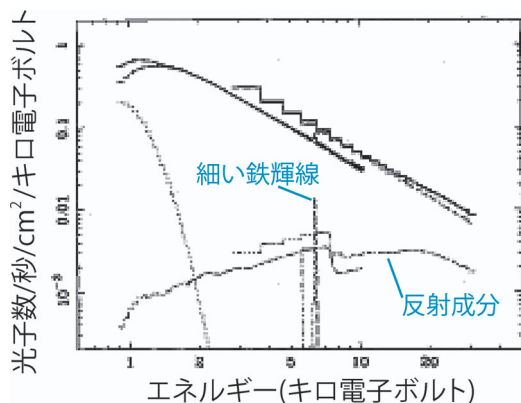


図2 「ぎんが」衛星 (3–30 keV) とあすか衛星 (0.9–10 keV) が観測した Cyg X-1 のスペクトルを、直接成分、ディスク反射成分と細い鉄輝線で同時フィットした例<sup>17)</sup> (Reproduced by permission of the AAS). 検出器の応答関数を戻した光子スペクトルを示している。さらに 2 keV 以下にソフトエクセス成分が存在するが、それはここでの議論に関係ない。

もし、X線反射が降着円盤の内縁付近、ブラックホール近傍で起きているとすると、蛍光輝線のプロファイルは一般相対論効果である重力赤方偏移と特殊相対論効果であるドップラービーミングの影響を受けて非対称になり、低エネルギー側に裾をひいて歪む<sup>18)–20)</sup>。それはブラックホール周辺の時空構造を反映するので、シュワルツシルド時空とカー時空の場合でラインプロファイルは異なる。仮にそのような輝線のプロファイルが測定できれば、原理的には輝線放射領域のパラメーター(降着円盤の内縁半径、放射領域の最大半径、反射効率の半径依存性)やブラックホールのスピンの制限が付けられる。このように、降着円盤内縁から放出される相対論効果によって歪められた鉄輝線を、ここでは慣例にならって「ディスクライン」モデルと呼ぶことにする。ディスクラインについての詳細な説明は、小島氏、牧島氏、根来氏の記

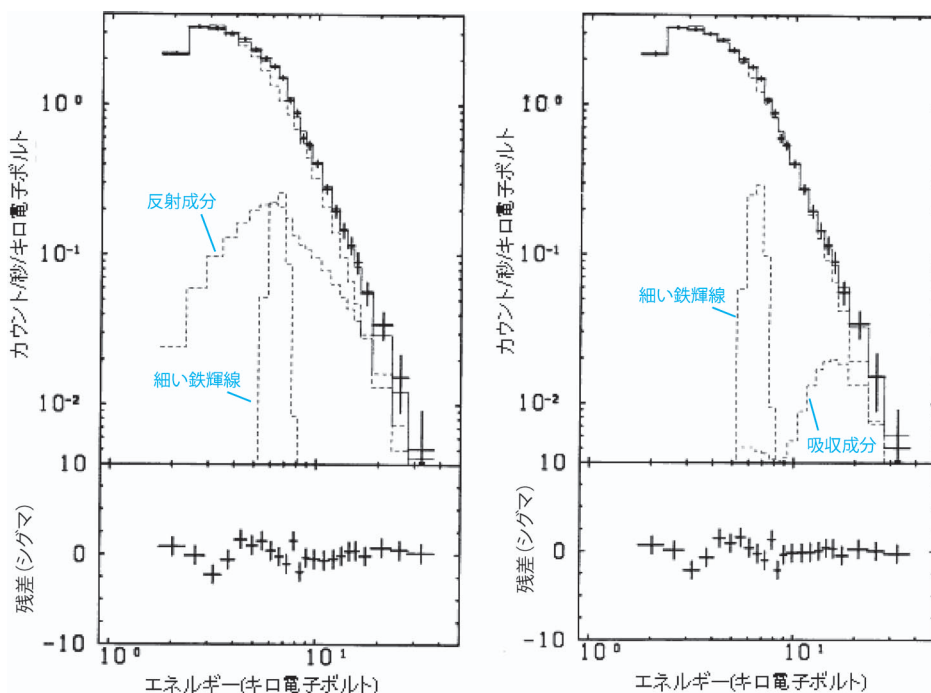


図3 「ぎんが」衛星が観測したセイファート銀河 MCG-6-30-15 のスペクトルを、細い鉄輝線に加えて反射モデル(左)と部分吸収モデル(右)でフィットした結果と残差<sup>8)</sup> (Reproduced by permission of the AAS). どちらのモデルでも同様にスペクトルを説明することができる。低エネルギー側に裾を引いた「ディスクライン」は使っていない。図1と同じく、上段は検出器の応答関数込みのカウンツスペクトル。



ですすでに述べられているので、ここでは省略する。

「ぎんが」衛星はエネルギー分解能が悪いので、放出された鉄輝線が十分細いのか、あるいは(相対論効果もしくは別の効果で)もともと広がっているのか、区別がつかなかった。輝線のプロファイルを調べるには、エネルギー分解能  $\Delta E/E \approx 2\%$  をもつ CCD が必要で、それは「あすか」衛星で初めて可能になった。「あすか」衛星による MCG-6-30-15 の長時間観測は、鉄輝線構造は広がっていて、まさにディスクラインモデルが予言するようなプロファイルをもっていることを明らかにしたり。

ただし、すでに述べたように、幅の広い輝線構造は、光学的に厚い物質による反射構造あるいは吸収構造と結びついていて、さらにそれらの電離状態まで考えると、その正確なモデル化は容易ではない。「あすか」衛星が観測した鉄輝線構造にシュワルツシルド時空で期待されるディスクラインモデルを当てはめて、その放射領域は 3 から 10 シュワルツシルド半径であると報告されているが<sup>1)</sup>、そこでは反射成分や光電離の影響を考慮していないので、その値は信頼できない。後に、XMM-Newton や「すざく」衛星が観測した MCG-6-30-15 のディスクラインについて、それがシュワルツシルドブラックホールから期待されるもの(=ディスクの内縁半径は 3 シュワルツシルド半径)よりも低エネルギー側まで裾を引いているため、ディスクの内縁半径はより小さく、MCG-6-30-15 中のブラックホールは限界近く回転しているカーブラックホールだという説もある<sup>2), 21)</sup>。これらについても、すでに述べたように、広がった輝線構造はその土台にある連続成分のモデルに大きく依存するので、これによって得られたブラックホールのパラメーターは信頼できない。

MCG-6-30-15 以外にも、今までに多くの活動的銀河中心核や銀河系内ブラックホール連星系、さ

らには中性子星連星系についても、それらの鉄輝線構造をディスクラインモデルでスペクトルフィットした結果が発表されている。しかし、これらの結果は、あくまでも観測されたスペクトルの「形」を、無数にありうるモデルのうちの「ある特定の関数型」で合わせたときのモデルパラメーターを報告しているのであって、そのような鉄輝線構造の説明としてディスクラインモデルが唯一の解というわけではない。

#### 4. 鉄輝線の時間変動

X 線天文学においては、観測装置の応答関数が対角行列とはほど遠いため<sup>3)</sup>、観測スペクトルを説明する入射スペクトルモデルがユニークに決まらず、このように物理的に全く異なる描像が並列してなかなか決着がつかないということがよくある。幸い、多くの X 線天体は短時間で変動するので、このような場合には時間変動を調べ、スペクトル変化の特徴から物理的実体に迫る、というのが標準的な研究手法である。実際、「あすか」、XMM-Newton の観測から、MCG-6-30-15 の広がった鉄輝線構造は、以下に述べるような特徴的な時間変動を示すことがわかった<sup>22), 23)</sup>：(1) エネルギースペクトルを私たちに直接到達する成分とディスクに反射してから観測される成分に分離すると、反射成分は変動せずに直接成分だけが変動しているように見える。(2) 反射成分は鉄輝線を伴うので、広がった輝線に対応するエネルギー範囲では、他のエネルギー範囲に比べ、変動率が有為小さい。

MCG-6-30-15 の場合、もしも広がった鉄輝線が比較的ブラックホール近傍のディスク反射によって発生しているとしたら(しかし「ごく近傍ではない」); 以下の light-bending モデルの議論を参照)、反射成分と鉄輝線は連続成分に追従して変

<sup>3)</sup> ASTRO-H 搭載のマイクロカロリメーターは、0.4–12 keV のエネルギー範囲で対角に近い応答行列をもつため、X 線天文学で初めて入射スペクトルをほぼそのまま測定することができる。

動するはずであるが、それがなぜか観測されていないのである。また、Matsumoto ら<sup>23)</sup>は、「あすか」衛星の観測データから、鉄輝線付近の変動の少なさが、反射成分が変動せず、直接成分だけが変動しているとした場合に期待されるものよりもさらに小さくなる場合があることを報告した。どんな反射成分やディスクラインの形をもってきても、それでは直接成分の時間変動を打ち消すことまではできない。すでに述べたように、観測されたスペクトルの形を説明するモデルは多数ありうるが、時間変動解析から得られたこの結果は十分に「固い (robust)」ものだと言っても良いだろう。

これを説明するために、Inoue and Matsumoto<sup>24)</sup>は、広がった鉄輝線のように見える構造は実は鉄輝線ではなく、よりフラックスの高く、もともと時間変動の少ない連続成分の低エネルギー側が電離吸収体によって「削られた」残りであると考えた。そして、その仮定の下で電離吸収体の変動を考えると、鉄ライン付近の時間変動の異常な小ささを説明できることを数学的に示した。ただし、実際にどのようなジオメトリーで、どの物理パラメーターが変化しているのか、具体的、物理的なピクチャーを示すまでには至らなかった。

一方、鉄ライン周辺と反射成分の時間変動の少なさをブラックホールのごく近傍（約1シュワルツシルド半径以下）の一般相対論効果によって説明するのが、一部の著者が強く主張する light-bending モデルである<sup>25)</sup>。これについても、詳細な説明は根来氏の記事にゆずるが、ブラックホールのごく近傍にディスクを上から局所的に照らす光源が存在し、その光源がディスクに近づいたり遠ざかったりすることによって、直接われわれに到達する成分とディスクに当たって反射する成分の割合が変わり、直接成分の強度は変動するが、反射成分は一般相対論効果で光が曲がることによって、ほとんど変動しないように見える、というものである。このような現象が起きるためにはすべての反射は約1シュワルツシルド半径以下で起き

なくてはならず、必然的にブラックホールはカーブブラックホールになる。また、反射成分が直接成分に比して圧倒的に大きくなり、鉄輝線も非常に強くなる。

Miniutti らは、「すざく」衛星の観測した MCG-6-30-15 のエネルギースペクトルが、実際に light-bending モデルが予言するように、非常に強い反射成分と低エネルギー側に長い裾を引いたディスクラインモデルで説明できることを示した<sup>2)</sup>。しかし、この論文の中では低エネルギー側の電離吸収の効果を考慮していないので、そこで得られたパラメーターをそのまま信頼することは危険である。また、彼らが light-bending モデルで鉄輝線と反射成分の時間変動の少なさを説明するのに用いた計算と、「すざく」のスペクトルをフィットするのに用いたモデルは別のものであることに注意する必要がある。

私たちも、Miniutti らとは独立に計算した light bending モデル<sup>26)</sup>を用い、それが「すざく」衛星が測定した変動率のエネルギー依存性をほぼ再現可能であることを確認した<sup>27)</sup>。ただし、その計算によると、局所的な光源からの X 線は約1シュワルツシルド半径より外に「漏れない」ことが必要で（もし漏れたら反射成分と直接成分が相関するので観測と矛盾する）、光源はディスクに対して上下ではなく動径方向に動く、という特異な状況が必要である。さらに、私たちはその light bending モデルで直接エネルギースペクトルを計算して、「すざく」のエネルギースペクトルを再現することを試みているが、いまだ成功していない<sup>28)</sup>。ましてや、後に述べる、「すざく」が発見した特徴的なスペクトル変動（図4, 5）を light-bending モデルで説明することには、まだ誰も成功していない。light-bending モデルは面白いアイデアであり、MCG-6-30-15 から観測された鉄輝線と反射成分の時間変動の少なさを定性的には説明するが、より詳細なスペクトル変動を定量的に説明するには至っていないと言って良いだろう。

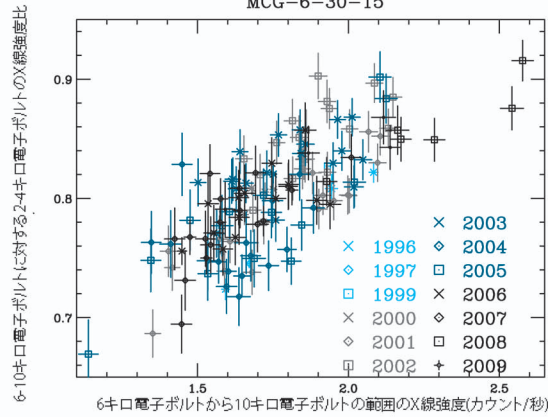
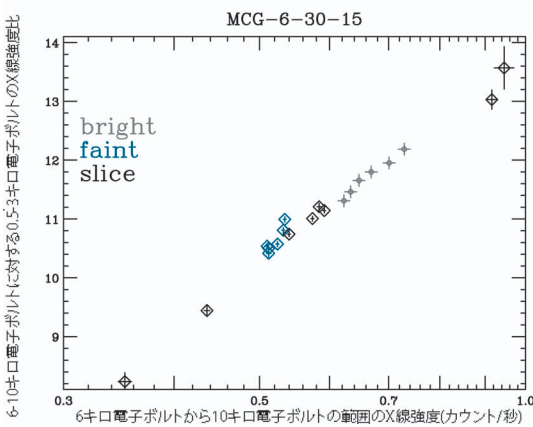


図4 「すざく」衛星(左)とRXTE衛星(右)が観測したセファート銀河MCG-6-30-15の6-10 keV強度とスペクトルソフトネスとの相関。さまざまな異なる条件、タイムスケールでスペクトルを抽出しても、X線強度が決まればスペクトルソフトネス(10 keV以下のスペクトルの傾き)はほぼ一意的に決まる。

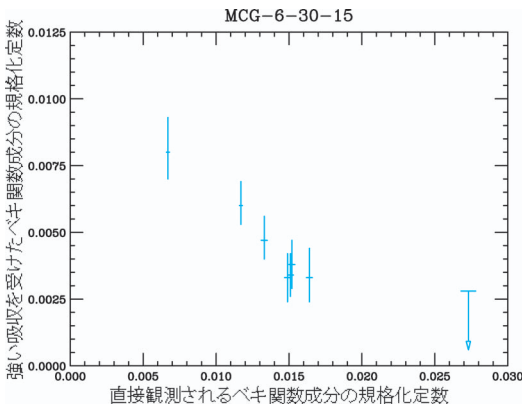


図5 強度別にスライスしたスペクトルを、直接成分と電離した厚い吸収物質による吸収成分を用いてフィットしたときの、直接成分の規格化定数と吸収成分の規格化定数の関係。

## 5. 電離吸収体モデル

Chandraに搭載されたHigh Energy Transmuting Grating Spectrometer (HETGS)は、感度ではCCDに劣るが、CCDよりも高いエネルギー分解能( $\Delta E/E \approx 0.5\%$ )で、鉄輝線構造を明らかにした。特に、MCG-6-30-15のエネルギースペクトル中に細くて弱い6.4 keVの鉄輝線が存在すること、静止エネルギーで6.7 keV、7.0 keVに吸収線が存在することを確認した。前者は少なくとも一部の反

射はブラックホールから遠く離れたところで起きていることを示しており、後者は高度に光電離した吸収体が視線上に存在することを明確に示す重要な結果である。XMM搭載の回折格子は鉄輝線領域は観測できないが、 $\sim 2$  keVよりも低エネルギー側でエネルギー分解能に優れた観測が可能である。Chandra, XMMの観測から、MCG-6-30-15のスペクトル中に、さまざまな重元素の多様な電離度に対応する吸収線が見つかった。広がったスペクトル構造とは異なり、「細い」輝線や吸収線の存在はモデルによらない固い観測事実であり、MCG-6-30-15の視線上に、電離度の異なる複数の電離吸収体が存在することは疑いが無い。以下に説明するように、電離吸収体は連続成分の形にも影響を与えるので、Chandra, XMM以前の、電離吸収体の効果を考慮せずにディスクラインだけをスペクトル解析に用いて得られた結果は信頼できない。

Millerらは、電離度の異なる五つの電離吸収体と部分吸収、ディスク反射を考慮に入れたスペクトルモデルを提案し、これを用いると広がった鉄輝線なしで、「すざく」、Chandra, XMMの観測スペクトルを説明できることを示した<sup>29)</sup>。しかし、そのモデルは自由パラメーターが多く複雑で、本

質的にどのパラメーターの物理的变化によって、観測されるスペクトル変化が生じているのかを理解することが困難である。そのため、ディスクラインの存在を主張するグループは、最低限の電離吸収体の存在は認めるが、それを考慮してもまだ広がった相対論的に広がった鉄輝線構造は存在する<sup>30)</sup>、というような反論をしている。さらにそれに対する反論論文も応酬されているが<sup>31)</sup>、水掛論争のような気がしないでもない。

## 6. 私たちのモデル—Variable Partial Covering モデル

このような状況において、私たちは謙虚にデータを眺め、できるだけ少ないパラメーターでスペクトル変化を記述できるモデルを構築することを目的として、MCG-6-30-15の「すざく」、Chandra, RXTEによる観測データの詳細な解析を行った<sup>32-5)</sup>。「すざく」は1–40 keVにわたる広いエネルギー範囲、Chandraは鉄輝線における優れたエネルギー分解能、RXTEは10年以上にわたる長期間観測と、それぞれ相補的な特長をもっているため、それらを最大限活かすことを念頭に置いて研究を行った。

まず、特定のスペクトルモデルを仮定せずに、すざく、RXTEのデータを用いて10 keV以下のエネルギースペクトル変化を調べ、6–10 keVのフラックスとそれに対する0.5–3 keV（または2–4 keV）のフラックスの比（ソフトネスレシオ）が、さまざまなタイムスケールできれいに相関していることを見つけた（図4）。同様の傾向は過去に報告されてはいるが、10年以上にわたってその相関関係が継続し、フラックスから一意的にソフトネス（見かけ上のスロープ）が再現されることを明らかにしたのは初めてである。その説明として、(1) 実際に放射されるスペクトルのべきが変化している、(2) 視線上に存在する電離吸収体の電離度が変化している、(3) 視線上の電離吸収体の柱密度が変化している、という三つの可能性があり

うるが、「すざく」、RXTEのスペクトルモデルフィットだけからではその三つは区別できない。そこで、ChandraのHETGSを用いて、Mg, Si, Feなどの吸収線の観測から、強度に応じて電離度が変化しているかどうかを調べた。まず、MgのHe様、H様イオンとFeのHe様、H様イオンからの吸収線が同時に観測されているが、それらは同じ電離状態のもとでは存在できないので、最低でも二つの異なる電離度をもつ吸収体が必要であることがわかる。また、Feの吸収線の等価幅は強度によって変わらないことから高電離吸収体の電離度は変化しないと考えられる。一方、Mgについては、明るいときにはH様イオンからの、暗いときには逆にHe様イオンからの吸収線の等価幅がより強くなることから、明るくなると低電離吸収体の電離度が上昇する、あるいはその柱密度が下がることで平均の電離度は上がっているということがわかった。

次に、スペクトルモデルを仮定して、時間平均したスペクトルの形を説明するとともに、さまざまなタイムスケールにおけるスペクトル変化と強度によるスペクトル変化を調べた。まず、観測事実から以下のスペクトル成分の存在は間違いない：(1) 遠方からの細くて弱い中性鉄輝線（6.4 keV、等価幅～20 eV）と、それに対応する冷たいディスクまたはトラスからの弱い反射連続成分（立体角～0.6 $\pi$ 程度）。(2) 電離度の異なる電離吸収体。そのうち、高電離成分の電離度と柱密度は一定で、低電離成分の電離度、または柱密度だけが変化している。(3) 私たちに直接到達するべき関数成分。べきは一定で、規格化定数（強度）だけが変化している。(4) 強い鉄吸収端構造をもつ、ディスク反射成分または吸収成分。

(4) に関して、ディスク反射成分と電離した厚い吸収体による吸収成分はよく似たスペクトルの形を示すが、ここでは、MCG-6-30-15の強度が変化したときの、それらの成分の強度（規格化定数）と直接成分の強度の関係に注目した。ある関数形



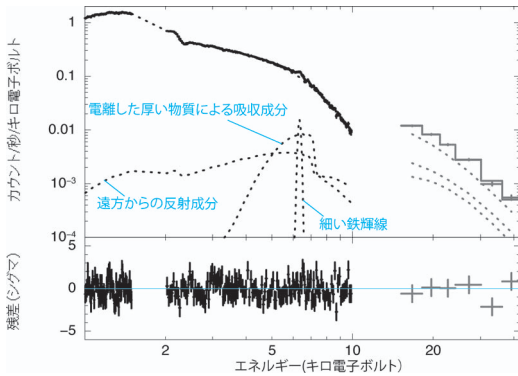


図6 「すざく」衛星の平均スペクトルを、筆者らが提案するモデルでフィットした結果. 細い鉄輝線は必要だが、相対論的に歪んだ幅の広い輝線は入れていない、その代わりに、電離した厚い物質を通ってきた吸収スペクトルの鉄吸収端構造が、幅の広い鉄輝線のように見える。

でディスク反射成分あるいは吸収成分を近似し、強度ごとにスライスしたスペクトルをフィットして、その規格化定数と直接成分の規格化定数の関係を見てみると、見事な逆相関が現れた(図5)。これは、ブラックホールが放射するX線光度はあまり大きく変化はせず、それがわれわれの視線を遮る物体によって隠される割合が変化している(ブラックホールが「見え隠れしている」と考えるとよく説明できる。つまり、図5は、(4)の成分はディスク反射よりも部分吸収によるものと考えることが妥当であることを示唆している。

これは、Matsuokaら<sup>8)</sup>が「ぎんが」のスペクトルを説明する際に考えた部分吸収モデル(図3の右側)に近いが、そこで使われた中性の吸収体ではより高精度の「すざく」スペクトルの形を合わせることはできなかった。私たちは光電離した吸収体を用いた。結局、私たちのモデルは以下の3種類の電離吸収体を必要とする：(a) Mg, Siなどの吸収線を担う低電離吸収体 ( $N_H \sim 3.7 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ ,  $\log \xi \sim 1.5$  でどちらかだけが変化), (b) Feの吸収線を担う高電離吸収体 ( $N_H \sim 2.4 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ ,  $\log \xi \sim 3.4$  でどちらも一定), (c) 強い鉄吸収端を担う、厚い電離部分吸収体 ( $N_H \sim 1.6 \times 10^{24}$

$\text{cm}^{-2}$ ,  $\log \xi \sim 1.6$  でどちらも一定)。電離した光学的に厚い物質の鉄吸収端はまさに広がったディスクラインのような形状をもっている(図6)。よって、このモデルで連続成分のスペクトルを合わせると、極端に低エネルギー側に裾を引いた「ディスクライン」は必要なくなる。

上記のモデルで、1–40 keVのスペクトル変化は、直接成分の規格化定数、部分吸収成分の規格化定数、低電離吸収体の電離度または柱密度という三つのパラメーターの変化だけで説明できる。ここで図4, 5が示すとおり、観測されたスペクトル変化を特徴づける二つの相関関係があることに注意しよう。三つのパラメーターの間に二つの相関が存在するという事は、スペクトル変化を主に担う、一つの独立パラメーターが存在するということになる。筆者らの部分吸収モデルにおいて、それはブラックホールからのX線のうちどれだけの割合が吸収体によって隠されるか、という「カバリングファクター」である。

直接成分の規格化定数を  $N_1$ 、吸収成分のそれを  $N_2$  として、全強度  $N = N_1 + N_2$  とカバリングファクター  $C \equiv N_2/N$  を導入しよう。筆者らは、スペクトルパラメーターの変化の時間スケール依存性を調べるために、いろいろな時間ビンで隣り合う二つのビンからスペクトルを作成し、それで得られたすべての明るいスペクトル、暗いスペクトルをそれぞれ重ね合わせて比較する、という新たな解析手法を開発した<sup>9)</sup>。このようにして得られた明るいスペクトルと暗いスペクトルを比較し、エネルギーごとの変化の割合を計算すると、まさにその時間スケールに対応するスペクトル変化がよくわかる。例として、図7に時間ビン20,000秒で作成した明るいスペクトルと暗いスペクトルを比べたときのスペクトル変化の割合(観測)と、筆者らのスペクトルモデルでカバリングファクターだけを変化させたときに期待されるスペクトル変化の割合(モデル)を示した。第4節で説明した「広がったように見える鉄輝線」周辺の変動

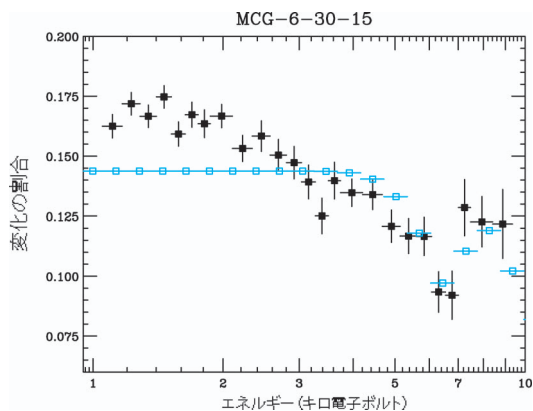


図7 隣り合う 20,000 秒のピンごとにスペクトルを作成し、明るいほうのスペクトルを足し合わせたものと暗いほうのスペクトルを足し合わせたものを比較したときのスペクトル変化の割合（観測；黒）と、筆者らのモデルでカバリングファクターだけを变化させたときに期待されるスペクトル変化の割合（モデル；青）。

率の減少がよく再現できていることがわかるだろう。Inoue and Matsumoto<sup>24)</sup> が提案したように、広がった鉄輝線構造の変動率の少なさは、ブラックホールからの X 線が電離吸収体によって隠される割合の変化によって、うまく説明できるのである。

このモデルでは、観測された強度変動とそれに伴うスペクトル変化は主にカバリングファクターの変化によって説明される。図8に、フレアのように強度が最も明るくなった時期（図5で右下の離れた点）を除いて強度別にスライスした7つのスペクトルについて、カバリングファクターだけを变化させて同時フィットした例を示す。強度が明るいほうから暗くなるにつれてカバリングファクターは単調に増加しているが、他のパラメーターはすべてのスペクトルについて共通である。1 keV から 40 keV という広いエネルギー範囲にわたる、一見複雑なスペクトル変化がたった一つのパラメーターでここまでうまく記述できることは驚きで、それがこのモデルの物理的妥当性を示しているものだと、筆者らは考えている。

具体的に筆者らが考えているのは図9のような

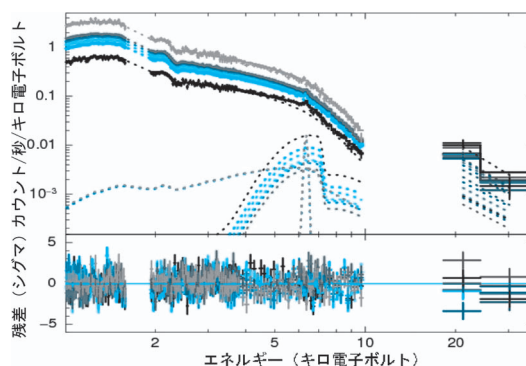


図8 MCG-6-30-15の強度別にスライスした7つのスペクトル（フレアの時期を除く）を、カバリングファクターの変化だけで同時フィットした結果。

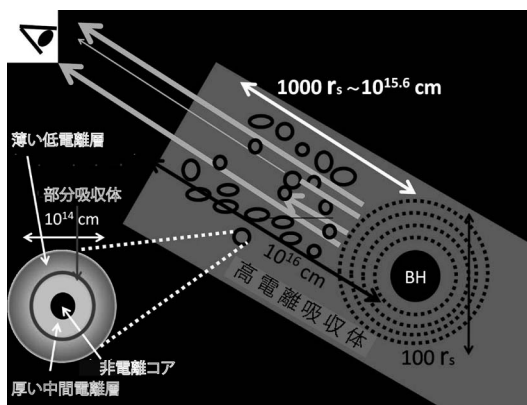


図9 筆者らが提案する MCG-6-30-15 のモデル。広がった X 線源の前を、内部構造をもつたくさんの電離吸収体（クラウド）が横切り、そのカバリングファクターの変化が、観測される強度変化とスペクトル変化を主に説明する。

状況である。ブラックホールを取り囲んでやや広がり、あまり変動していない X 線源の視線上にたくさんの吸収体が存在し、それらが X 線源を覆い隠すカバリングファクターの変化が、観測される主な強度変化とスペクトル変化を説明する。それらの部分吸収体は変動していない高電離吸収体（上記の b に対応）の中にある。筆者らは吸収体を成す塊（クラウド）は、(1) 非電離で完全に opaque な（X 線を全く通さない）コアと、(2) 電離が進んでトムソン散乱に体する光学的厚みがほぼ 1 である中間層（上記の電離部分吸収体 c に対

応)と、(3) その外側のより光学的に薄い層(上記の低電離吸収体  $a$  に対応)からなっていると考える。このような内部構造をもっている吸収体の変動しない高電離吸収体の中にあるので、それが X 線源を覆い隠す割合が変化すると、見かけ上の電離度が変化する。私たちは、それらの吸収体は、可視光で観測されている Broad Line Region (BLR) のクラウドに対応しているのではないかと考えている。実際、X 線時間変動から筆者らが見積もった部分吸収体のパラメーターと、報告されている BLR クラウドのパラメーターはだいたい一致している<sup>3),4)</sup>。

最後に、筆者らのモデルに無理矢理ディスクラインモデルを入れてみても矛盾しないかどうか、検証してみた。ディスクの内縁半径をパラメーターとしてディスクラインを追加すると、それが 4.5 シュワルツシルド半径よりも大きい限りは統計的に許容されることがわかった。実際、等価幅 40 eV 程度の広めの鉄輝線を加えてやるとモデルフィットはやや改善する。それが、たとえば数十倍のシュワルツシルド半径におけるディスク反射に由来する可能性は否定できない。いずれにしろ、筆者らのモデルは、 $\sim 1$  シュワルツシルド半径以下の領域から期待される、低エネルギー側に極端に裾を引いたディスクラインモデルの存在とは相容れない。

## 7. 終わりに

今回、筆者らは代表的なディスクライン天体である MCG-6-30-15 について集中的にデータ解析を行い、観測されたスペクトル変化を最小限のパラメーターで説明できる新たなモデルを提案した。このモデルが他の「広がった鉄輝線のように見えるスペクトル構造」をもつ活動的銀河中心核や銀河系内ブラックホール連星にどこまで適用可能かを調べることは、今後の重要な課題である。また、筆者らのモデルでは広がった鉄輝線のように見える構造を、電離した厚い物質が作る鉄吸収

端として説明したが、そのような吸収物質が本当に存在するかどうかは、ASTRO-H 搭載のマイクロカロリメーターを用いた精密な分光観測によって検証可能だと考えている。

さて、残りのスペースで、物理的考察とは異なるが、今回の研究を通じて筆者の一人(海老沢)が得た感想を述べさせていただきたい。私は、長年、X 線天文学のデータ処理、解析システムの開発に従事してきた。長く滞在した NASA/GSFC では、衛星の成果を最大化するためには、できるだけ多くの研究者に対して門戸を広げることが重要で、優れたデータ解析システムは使うのが単に“easy”というだけでは駄目で、“very easy”でなくてはならない、という意識が開発者のあいだに浸透していた。その GSFC で開発された“xspec”と呼ばれるパッケージが X 線スペクトル解析の標準ツールであるが、それにマニュアルどおりの標準解析で得られた観測スペクトルとレスポンスを入れてディスクラインモデルでフィットすると、ブラックホールのスピンパラメーターなりが簡単に得られてしまう。観測的な証拠が不十分であるにもかかわらず、ディスクラインの「発見」論文がいままで次々と出版されてきた背景には、このように X 線データ解析が very easy になってしまったことの弊害があるのではないかと感じることもある。その一方で、今回筆者らが「すざく」、RXTE、Chandra のアーカイブデータを使って全く別のモデルを提案したように、X 線天文学においてはほぼすべてのデータがきちんと整備され公開されているので、誰もがフェアな土俵の上で科学的な議論を行うことができるようになっているのはたいへんすばらしいことだとも思う。

さあ、今から数年後、ASTRO-H で見た MCG-6-30-15 や他のディスクライン天体の観測が出そろった後、「あの論争は今？」とディスクラインを巡る顛末を振り返って見たとき、いったい何が起きているだろうか？ ディスクラインの存在が事実だとしたらそれがあまりにもセンセーショナル

であるがゆえに、十分な観測的証拠がないにもかかわらず、プレスリリース等によってその「発見」を広く宣伝しすぎてしまったと言うようなことはなかっただろうか？ ディスクラインを強く主張しているのが高名でアグレッシブな研究者であるため、ついその方向になびいたり、あるいは反論するのにおじけづいたりしてしまったと言うことはなかっただろうか？ そんな人間の思惑とは全く関係なく、ブラックホールはただそこに存在し、X線を放射し続けている。われわれは先入観なしに謙虚にデータと向き合い、一步ずつ自然の姿を明らかにしていく過程を楽しみたいものである。

## 謝辞

この問題に関して、いつも議論に付き合ってくださった愛媛大学の寺島雄一氏と、宮川博士論文を厳しく査読し、鋭いコメントをくださった東京大学の牧島一夫氏、京都大学の上田佳宏氏に感謝します。

## 参考文献

- 1) Tanaka Y. et al., 1995, *Nature* 375, 659
- 2) Miniutti G. et al., 2007, *PASJ* 59, S315
- 3) 宮川雄大, 2010, 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻博士論文
- 4) Miyakawa T., Ebisawa K., Inoue H., 2010, *PASJ*, to be submitted
- 5) Inoue H., Miyakawa T., Ebisawa K., 2010, *PASJ*, to be submitted
- 6) Barr P., et al., 1985, *MNRAS* 216, 65
- 7) Inoue H., The 23rd ESLAB Symposium on Two Topics in X-ray Astronomy, Vol. 2, p. 783–787 ESTEC
- 8) Matsuoka M., et al., 1990, *ApJ* 361, 440
- 9) Pounds K. A., et al., 1990, *Nature* 344, 132
- 10) Ebisawa K., 1991, 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻博士論文, ISAS Research Note 483
- 11) Ueda Y., Ebisawa K., Done C., 1993, *PASJ* 46, 107
- 12) Ebisawa K., et al., 1994, *PASJ* 46, 375
- 13) Tanaka Y., 1991, in “Iron Line Diagnostics in X-Ray Sources,” *Lecture Notes in Physics*, Vol. 385, p. 98
- 14) Ebisawa K., 1999, in “Disk Instabilities in Close Binary Systems. 25 Years of the Disk-Instability Model,” *Frontiers Science Series No. 26*. Universal Academy Press, Inc., p. 203

- 15) Titarchuk L. G., 1987, *Astrophysics* 26, 57
- 16) Lightman A. P., White T. R., 1988, *ApJ* L57
- 17) Ebisawa K., et al., 1996, 467, 419
- 18) Fabian A. C., et al., 1989, *MNRAS* 238, 729
- 19) Laor, A. 1991, *ApJ* 376, L90
- 20) Kojima Y., 1991, *MNRAS* 250, 629
- 21) Wilms J., et al. 2001, *MNRAS* 328, L27
- 22) Reynolds C. S., 2000, *ApJ* 533, 811
- 23) Matsumoto C., et al., 2003, *PASJ* 55, 615
- 24) Inoue H., Matsumoto C., 2003, *PASJ* 55, 625
- 25) Miniutti G., Fabian A. C., 2004, *MNRAS* 349, 1435
- 26) Niedźwiecki A., Życki P. T., 2008, *MNRAS* 386, 759
- 27) Niedźwiecki A., Miyakawa T., 2010, *A&A* 509, 22
- 28) Życki P. T., Ebisawa K., Niedźwiecki A., Miyakawa T., 2010, *PASJ*, submitted
- 29) Miller L., Turner T. J., Reeves J. N., 2008, *A&A* 483, 437
- 30) Reynolds C. S., et al., 2009, *MNRAS* 397, L21
- 31) Miller L., Turner T. J., Reeves J. N., 2009, *MNRAS* 399, L69

## On the Interpretation of the Seemingly Broad Iron Emission Lines Observed in the X-ray Energy Spectra of Black Hole Objects

Ken EBISAWA, MIYAKAWA, and Hajime INOUE

*Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)/ Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210, Japan*

Abstract: X-ray energy spectra of Active Galactic Nuclei and Galactic black hole binaries commonly indicate a characteristic spectral feature which looks like a gravitationally red-shifted and distorted iron emission line. We review history and background of this problem, and scrutinize some models so far proposed to explain such a spectral feature. We have reanalyzed archival data of the Seyfert I galaxy MCG-6-30-15, which is an archetypal object with such a relativistically distorted iron line feature. Consequently, we propose a new model which can explain the observed spectral variation with minimum numbers of free parameters. Our model rejects presence of the extremely broadened iron emission line which would be expected from very vicinity of an extreme Kerr black hole. We conclude that presence of the relativistically distorted iron emission lines from the very vicinity of the black holes is not observationally established.