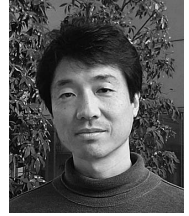


活動銀河核の鉄輝線の解釈の変遷

根 来 均

〈日本大学 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8〉

e-mail: negoro@phys.cst.nihon-u.ac.jp



活動銀河核の X 線スペクトルに見られる鉄の輝線の形状から、ブラックホール周辺の強い重力場におけるさまざまな相対論効果の検証を行うことができる。そのような研究が日本の「あすか」衛星による活動銀河核 MCG-6-30-15 の観測以来、英のフェビアン (A. Fabian) を中心に盛んに行われてきた。しかし、観測される広がった鉄輝線らしき構造が本当に相対論効果を受けたものかいまだにはっきりとしない。ここでは相対論効果によって広がった鉄輝線の観測および理論的研究の変遷と問題点について記す。

1. はじめに

ブラックホールは、科学分野の中で一般に最も関心が高いテーマの一つであることがさまざまなアンケートでも示されている。また実際、大学でブラックホールに関する研究をやっています、というだけで、高校から出張授業の依頼がくることも少なくない。ブラックホールのすぐ近くでは、時間の進み具合が遅くなったり、空間が曲がったり引きずられたりするなど、全く SF チックな話（しかし相対性理論によって示されていること）を聞いたりすると、その理屈はわからなくても興味をもつ人は多いであろう。実際、私自身もそのようなきっかけでブラックホールの研究を始めた一人である。

そのような非日常的な現場を実際に確認しようとする試みが、本誌 3 月号からの特集のテーマである X 線観測による「ディスクライン (“Disk Line”）」(降着円盤からの鉄輝線放射) に関する研究である。どこまでブラックホールの本質に迫れるかはまた最後に記すとして、2010 年 3 月号の巻頭言でも記したように、X 線観測は、現在のところブラックホールから最も近くの極めて強い重力場の情報を得る最良の手段であることは間違いない。

すでに 3 月号で牧島一夫氏により恒星質量ブラックホールでの広がった鉄輝線解釈に対する注意が記されており、また、小嶋康史氏によって理論上の問題点も指摘されている。それらと重複するところもあるが、ここでは、主にセイファート銀河 MCG-6-30-15 をはじめとする超巨大ブラックホールと言われる活動銀河核の（より優れた検出器を搭載するたびによりはっきりと見えてきた）鉄輝線を含む X 線スペクトルの特徴と、その結果を解釈しようとする理論的研究の変遷について記す。

なお本テーマは、相対論効果の検証という内容自体に難しさがあるだけでなく、次から次へと発表される観測結果とその解釈の複雑さ（曖昧さ）、そして、それ以外にもさまざまな意味で難しい事柄を含んでいる。単純なモデルから始まって、紆余曲折してさまざまな物理過程を考慮したより制限された状況へと理解が進んでいることを感じていただければ幸いである。

2. 黎明期

相対論効果による鉄輝線の広がりに着目した研究は、1989 年の EXOSAT 衛星による観測までさかのぼる。EXOSAT 衛星によって観測されたブ

ブラックホール候補星白鳥座 X-1 からの鉄の輝線がわずかに広がって、低いエネルギー側にシフトして観測された。その形状は、散乱により光子のエネルギーが変化するコンプトン散乱によるものとも考えられたが、英ケンブリッジ大のアンディ・フェビアン (Andy Fabian) らはブラックホールの周りの降着円盤からの鉄輝線が相対論効果によりエネルギーが変化したものとの解釈を示した¹⁾。

当時の X 線検出器のほとんどは比例計数管であり、中性の鉄から放射される 6.4 keV の輝線と高階電離した鉄からの 6.7 keV の輝線が合わさったものと、非常に広がった 1 本の輝線との区別もままならない時代であったため、そのモデルを観測的に検証することはできなかった。しかし、その後もフェビアンらは来るべき日に備え、観測されるであろうブラックホール降着円盤からの広がった鉄輝線の計算を行っていた²⁾。

3. 1次近似：シュバルツシルド・ブラックホールの時代

その研究の成果は、1994 年の「あすか」衛星によるセイファート 1 型銀河 MCG-6-30-15 の観測によってようやく実を結ぶ。高いエネルギー分解能をもった CCD 検出器によって得られたエネルギースペクトルには、低エネルギー側に酸素による吸収構造があるものの、連続成分が直接観測されていると考えられるエネルギーバンド(多くの場合 2-4 keV と 8-10 keV) でのエネルギースペクトルをべき型のスペクトルでえいっと決めると、4-7 keV のエネルギー領域に、それまでの理論計算から示された形状と瓜二つの非対称な二つ山構造をした鉄輝線*1 (らしき構造) が検出された³⁾ (図 1)。

さらに驚いたことに、その広がったスペクトル

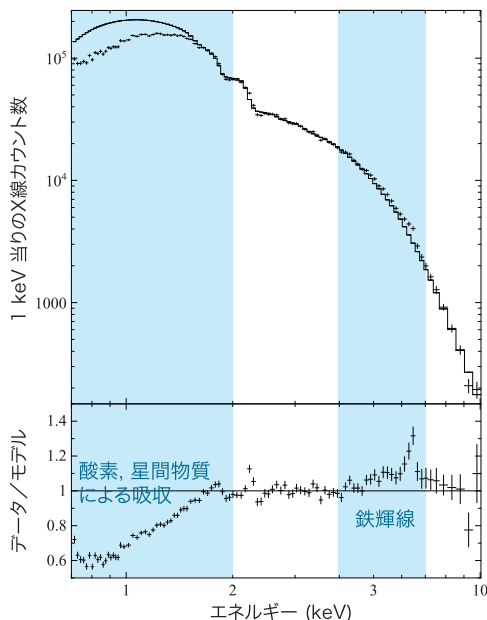


図 1 ASCA/SIS によって得られた MCG-6-30-15 のエネルギースペクトル。データの値と、2-4 keV と 7-10 keV の領域をべき関数でフィットしたときのモデルの値 (上図の実線) の比を下図に示した。

構造を後述する「ディスクライン (Disk Line)」モデルでフィッティングすると、降着円盤が安定して存在する内縁の半径がブラックホール半径 r_s の 3 倍という、回転していないブラックホール (シュヴァルツシルド・ブラックホール) の最内縁半径の教科書どおりの値が得られたのである。その結果は、Nature 誌に掲載され、「あすか」の最大の成果の一つとなった。そして、ブラックホール研究の主流は、「あすか」衛星による鉄輝線の観測となったのである。しかし、フェビアン自身、ここまで単純なモデルでここまで観測結果と一致するとは思っていなかったのではないかと筆者は思っている。

ここで、これから記す内容の理解に少しでも役立つように、非対称な輝線の原因とディスクライ

*1 広がった輝線は原理的には鉄以外でも観測されうるが、他の元素の輝線や吸収線のエネルギーは接近し過ぎて、それぞれを判別することが非常に困難である。そのため、周辺のエネルギーに他の元素の影響が極めて少ない (ライマン系列の) 鉄の輝線に限って主に研究が行われている。

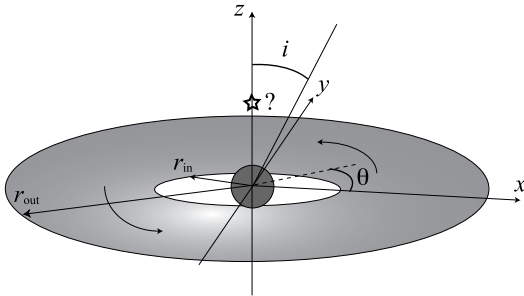


図2 ディスクラインモデルのパラメーター. $x-z$ 面上の角度 i の上方向から観測している場合を示す.

ンモデルについて復習を兼ねて少し定量的に説明しておく. 観測データと比較するときに用いられるディスクラインモデルには, 基本的に五つのパラメーターがあり, 降着円盤の鉄輝線が放射される領域の内縁と外縁の半径 r_{in} と r_{out} , 半径 r のべき状で表されると仮定した単位面積あたりの鉄の放射量 $\varepsilon=r^{-q}$ の q , 降着円盤の傾斜角 i , そして強度 I である (図2参照).

鉄輝線が広がる原因は, ブラックホール周りのガスの運動による古典的な(縦)ドップラー効果と, 特殊相対論効果で横ドップラー効果と呼ばれる運動そのものによる時間の遅れによる効果, そして, 一般相対論効果である重力赤方偏移による効果のそれぞれの積の形で表される^{4),5)}. 円盤の回転運動により観測者から遠ざかっていくところ ($\theta=90$ 度) ではこれらすべての効果は波長が長い(赤い)ほうにずれるように働き(図3上図), 逆に近づいてくるところ ($\theta=270$ 度) では縦ドップラーによる波長が短くなる効果と残り二つの長くなる効果が相殺しあうように働く(図3下図).

これらのディスクラインモデルのパラメーターのうち, 降着円盤の最内縁半径の決定に直接関係してくるパラメーターは r_{in} と i であり, 先述の三つの相対論効果の積が最も強く効く, 高速に遠ざかる運動をしている内縁付近の領域でどれだけ赤いほうにずれるか(エネルギースペクトルでどこまで低いエネルギーまで裾を引いているか)がそ

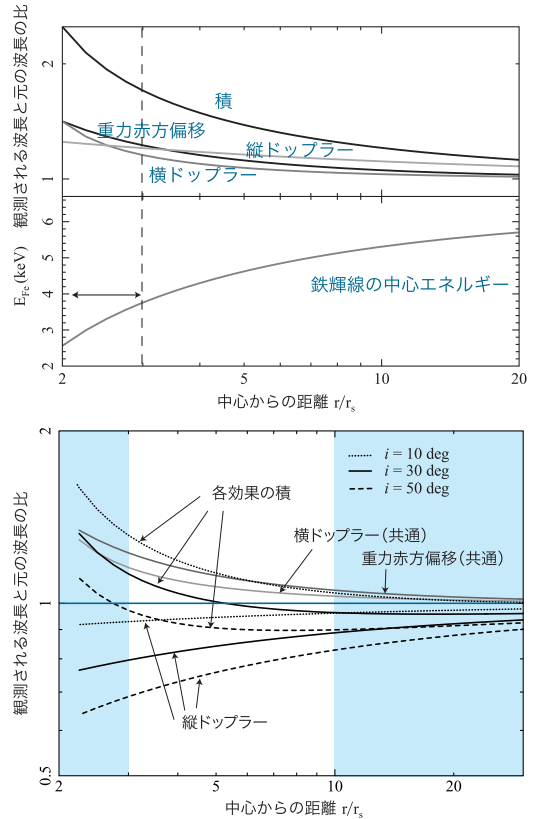


図3 図2での y 軸上 $\theta=90$ 度(上図)と 270 度(下図)で, 各要因によって波長が変化する度合い(比)を動径方向に対してプロットした. 上図では, $i=30$ 度のときのみ示し, そのときの鉄輝線のエネルギーの変化も示した. 厳密な計算のものではないため, r が小さい所ほど不正確になるため注意が必要.

の決定要因となる.

世界の多くの研究者が, さまざまな活動銀河核のデータから次から次へと広がった鉄輝線の検出を報告したが, このモデルには, それまでの降着円盤理論をほとんど無視した多くの仮定が含まれていた. その一つが光源の任意性であり, ディスクラインモデルに内在する問題を理解する鍵と思われる.

「鉄輝線」とここでも書いているが, 正確には蛍光 X 線 (Fluorescence Line) のことである. X 線が物質に入射すると, 光電吸収されて鉄原子の最

内殻の電子をはじき飛ばし、その空いた準位に外側の電子が落ちて埋めるときに 6.4 keV のエネルギーをもった 2 次的な X 線が放出される。よって、一般的なブラックホール降着円盤モデルで示される降着円盤からの放射だけではなく、何らかの別の光源を必要とする。

当時、輝線を出す元となる放射源は特に限定されておらず、観測で示された結果は内側ほど鉄の放射効率が低いことから*2、後に示されるようにブラックホール上空に重力に反してお天道様のよう輝く謎の物体の存在²⁾を強く示唆する結果でもあった(図2参照)。

しかし観測例が増えるにつれ、(論文の著者たちの認識は別として)いくつかの問題が散見され始めた。多くの AGN のディスクラインのパラメーターを調べると、それぞれはよく似た形状をしており、セイファート 1 型も 2 型も降着円盤の傾斜角 i が 30 度付近に集中する傾向を示した^{7), 8)}。また、連続成分に対する鉄輝線の量(等価幅)も計算で求められるものよりはるかに大きな場合もあった⁹⁾。そして、よりシリアスな問題と筆者には思われたのが鉄輝線の時間変動の問題である。当時の単純なモデルでは、鉄輝線の形状は連続成分の変化とともに時間変化することが期待されたが、実際は連続成分が変動しても、6.4 keV を中心とする細い輝線はあまり時間変化しておらず、中心から離れた遠方からの寄与である可能性が観測から示された^{10), 11)}。

4. 2 次近似：超高速回転するカー・ブラックホールの時代

「あすか」に続き、CCD 検出器を搭載した Chan-

dra 衛星と XMM-Newton 衛星の観測が 2000 年前後から始まり、MCG-6-30-15 の広がった鉄輝線とされていた構造にはやはり細い輝線が含まれていたことが判明した¹²⁾。ちなみに、降着円盤の傾斜角 i が 30 度付近に多く見られたのは、図 3 下図に示したように、この中性の鉄をドップラーブーストによって増光したディスクラインの一部と見なしたため、傾斜角 i は各効果が相殺する約 30 度となり、またそれに従い 4 keV まで広がっているように見えることから図 3 上図に示すように $r_{in} \sim 3 r_s$ となったと考えられる。

しかし、独立した細い輝線が確認されたことによって、さらにエキゾチックな結果が発表される^{12), 13)}。残された成分を見ると、これまでの結果よりさらに低エネルギー領域まで広がって輝線が見えるようになった。この結果は、先ほどの議論からわかるように、重力赤方偏移とドップラーが強く効くブラックホールのより近くまで降着円盤の内縁が安定して存在することを示唆する*3。

そもそも回転(自転)していないほうが不自然なので回転しているブラックホール、カーホールの存在自体は別段驚くべきことではない。しかし、観測で確認しようとしているのは、安定した軌道がどこまでブラックホール近くの内側まで存在しているのか、ということであり、これはとりもなおさず、物理学的には一般相対論効果である空間自体がブラックホールの回転により引きずられる効果(慣性系の引きずり効果“frame dragging effect”)の検証につながる重要な事柄である。古典力学の範疇で考えると、ある天体の周りを回る物体の運動は両者の質量と回っている物体の角運動量だけで決まるが、一般相対論では中心の天体

*2 ディスクラインモデルで仮定しているような、光学的に厚く幾何学的に薄い降着円盤モデル場合、ディスク自体の放射量は、 r の大きなところでは $q=3$ だが、内縁付近の最も多くのエネルギーが解放される領域では角運動量とともにエネルギーが外部に運ばれるため $q \sim 0$ となる。しかし、冷たい降着円盤の上空にある太陽のコロナのような高温ガスが放射源の場合、観測に合う動径方向依存性をもつ可能性も示されている⁶⁾。

*3 この「安定して存在」の意味は、安定した円運動する円盤の存在、という意味である。ブラックホールのすぐ近くからの放射(赤方偏移)が確認されても、移流円盤のようになだれ込むような場合¹⁴⁾は等価原理の検証にはなっても慣性系の引きずり効果の検証にはなっていない。観測からはそれらを区別できないのが現状である。

の回転までが周辺の物体の運動に影響を及ぼすことが示されている。

そして、たいへん興味深いことに、観測されるスペクトルを（カー・ブラックホール用の）ディスクラインモデルでフィッティングしたところ、ブラックホールが回転できる限界近くの速さで回転している（規格化された角運動量 $a^* \sim 1$ の）極限回転ブラックホール (Extreme Kerr Black-Hole) と呼ばれる状態である可能性が出てきた。

話は少し逸れるが、ブラックホールの回転（スピン）を求めることが、現在の多くの研究者の目標となっている。その手法にはさまざまなものがあるが、概して、高速回転しているとするインパクトのある結果 ($a^* > 0.9$) が多い。しかし、2010年2月号の加藤正二氏の記事にあるような QPO の周波数に着目した観測との比較からは、それほど速くは回転しておらず ($a^* \sim 0.4-0.5$)、ブラックホールの回転エネルギーが抜き取られてきたことを示唆するたいへん興味深い結果が得られている¹⁵⁾。

ここでは、観測されるスペクトルを、「あすか」時代のべき関数に加え、細い鉄輝線も加えており、2次近似からの残差をディスク成分として扱っている。しかし、それは必ずしも観測の精度が高まったことを意味するものではなかった。Newton や Chandra、「あすか」が観測できるエネルギーバンドは、10 keV 以下であり、ここまで輝線が広がっているとすると連続成分との区別が付きにくくなる。そして実際、NGC 3516 の結果に代表されるように、連続成分のべきの値（フォトンインデックス）がセイファート銀河で通常観測される 1.7-2 よりはるかにフラットである 1.2 にもかわからず、残りを（非常に広がった）輝線と

見なしている¹⁶⁾。

この頃になると、本来考慮すべき、鉄輝線よりエネルギーの高いところにある相対論効果によってなまされた鉄の吸収端も考慮されるようになるが、こうなるとますます客観的に連続成分が決められなくなる。ディスクラインモデルは、降着円盤で再放射される鉄輝線放射に相対論効果を取り入れたということ以外、物理的根拠をもたない自由度の高いパラメーターをもち、ある程度どのように広がった構造にでも臨機応変に対応できることは常に認識しておく必要がある¹⁴⁾。

5. 3次, 4次近似: 本当に広がった鉄輝線は存在するのか?

ディスク成分を正しく見積もるためには、連続成分をいかに正しく見積もるかが最大のポイントとなる。そこで、広いエネルギー帯をもち、ディスクラインが議論できるほどのエネルギー分解能をもつ、最初の衛星「すざく」の2005年の打ち上げを待つこととなる。（その最新の成果については、2010年3月号の牧島氏と次号の海老沢研氏の記事を参照されたい。）

一方、「すざく」の打ち上げより前の2003年に、同じ「あすか」のMCG-6-30-15のデータを用いて、輝線ではなく電離したガスによる吸収により、エネルギーバンドごとに異なる時間変動やディスクラインごときスペクトルの形状を説明する全く異なった解釈が示された¹⁷⁾。また図4に示すように、NGC 3516においても、より高エネルギーまで観測している Beppo-SAX のデータとフラットなスペクトルを示す「あすか」のデータから、高いエネルギー側ではべきに変化はほとんどなく、低エネルギー側でべき成分が吸収されてい

*4 このようなフリーハンドとも言えるモデルが否定されないのは、降着円盤を含むブラックホール近傍の性質にまだに理解できていない部分を残していることとも強く関係している。「完全」にはわかっていない以上、観測結果を適当にパラメーター化して、それを説明する理論を構築する、というのも自然科学の正しい研究スタイルの一つではある。問題は、それまでの理論の完全度と残された自由度の大小関係であるのだが、これは個人によって見解が異なるであろう。

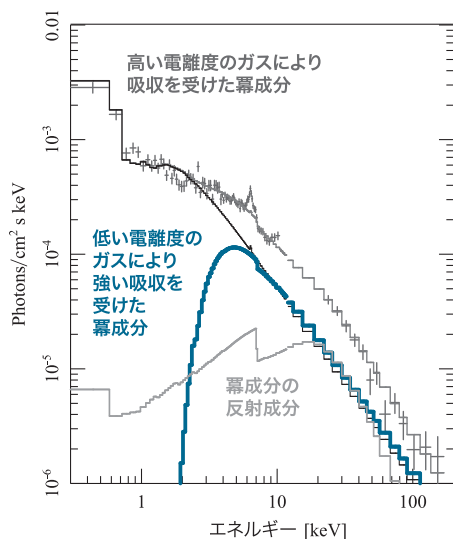


図4 ASCA (10 keV 以下) と Beppo-SAX (10 keV 以上) のデータを用いて、NGC 3516 の暗いときのスペクトルを2種類の吸収と反射成分でフィッティングさせたときの様子¹⁸⁾。

ることがわかり、それによりディスク成分もそれまで議論されていたより（たとえあっても）少ない寄与でしかないこともわかった¹⁸⁾。同様な結果が、Chandra, Newton, Beppo-SAX のデータを用いても得られている¹⁹⁾。

これまでのべき成分と細い鉄輝線成分に加え、鉄の吸収線に吸収端、そして、部分吸収を含む複数の種類の吸収体による成分など、スペクトルの3, 4, 5, ... 次近似ともいうべき状況は、さらに問題を複雑化しているように思われるかもしれない。しかし、Chandra や Newton に搭載されたグレーティング検出器による結果に加え、「すざく」のXISによる吸収構造の有意な検出から、それらを見捨てることはできなくなった。そして、電離ガスによる吸収と再放射過程を扱ったモデル（例えば、XSTAR）が正しい限り、どんな構造でも合わせることができる、というものでもない。

そして、本丸である MCG-6-30-15 の鉄輝線スペクトルに関して、多くの研究者がこのような吸収による影響を活発に議論し始めたのは実は最近である。英オックスフォード大のランス・ミラー

(Lance Miller) らによって、また「すざく」のデータを用いて国内でも（本特集の海老沢氏の記事参照）、4-6 keV 辺りの広がった構造が広がった鉄輝線によるものでなく吸収体による連続成分の一部としての解釈が示されている²⁰⁾。

しかし、同じ「すざく」の MCG-6-30-15 のデータからは、フェビアンらは相変わらず広がった鉄輝線の存在を主張し²¹⁾、NGC 3516 に関しても、多くの吸収構造を入れても広がった鉄輝線を考慮したほうがスペクトルはよりよく合う²²⁾という結論になっている。

6. 時間変動：解決の鍵になるか？ より複雑な相対論の世界へ

上記のように異なる複数のスペクトルモデルで統計的には合う場合、それぞれの成分の時間変動を調べることによりその真偽を判別できる場合が多い。鉄輝線に関しても、これまでさまざまな点から調べられてきた。一部のフレア時などの例外⁹⁾を除いて、輝線もしくは反射成分と見なされる成分は、直接光と見なしている成分より、変動が少ないとする結果が出ている^{11), 21)}。この結果は、吸収モデルでは、元の連続成分はあまり変動しておらず、(遮る)吸収量が変動しているとも解釈できる。

「すざく」のフェビアンらの MCG-6-30-15 の結果は、降着円盤の内側ほど鉄の放射量がこれまで以上に多いことを示している。内側ほど重力エネルギーが多く解放され不安定なために、強度の時間変化は大きく、変動のタイムスケールは短いことが予想されるので、鉄を含む反射成分の変動が少ないというのは、その生成のプロセスを考えると一見矛盾しているように思われる。

それらの矛盾と思われる結果に対して、フェビアンらはさらに興味深い回答を用意した²³⁾。光源がブラックホールのすぐ近く、かつ、降着円盤から適度に離れたところにある場合、ブラックホールによる空間の歪みのために光の進路が曲げられ

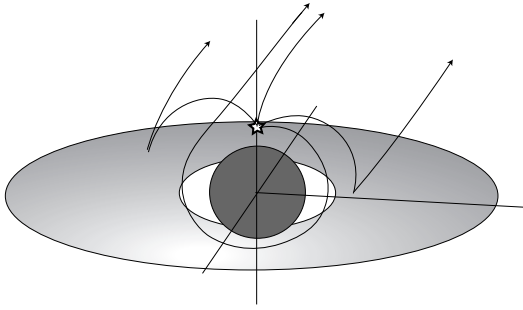


図5 ブラックホール上空に存在する放射源とそこから出た光がさまざま経路をたどって観測者に到達する様子を示す。

(ライトベンディング効果, “light bending effect”), 放射された光の多くは進路を曲げられて余計な経路をとって, 降着円盤に一度吸収されて再放射されることにより, 時間変動がなまされるというのである (図5)。

彼らの論文では, 別の問題であった放射体から見込まれる反射体の立体角 (同様に輝線の等価幅) が極めて大きくなる (2π の3-4倍以上になる) という問題については定量的に議論しているが, 肝心の時間変動の説明は定量性に欠ける。再放射過程に要する時間は, 熱的タイムスケールで見積もられ, ケプラータイムスケールと同程度と見積もることができる。光源の時間変化 (つまり連続成分の時間変化) がそのようなタイムスケールと同じであれば, 反射成分の時間変化も多少はなまされるであろうが, それより長い場合 (例えば降着円盤で物質が動径方向に移動する (ドリフト) タイムスケールや揺らぎが拡散するタイムスケールではほとんど連続成分に追従するはずである。よって, セイファート銀河での時間変動の原因が特定されない限り必ずしも矛盾しているとはいえない。

ただし, 国際学会で見受けられる, われわれのほうに向かう前に, ライトベンディング効果によりブラックホールの周りを何度も光が周回して届くために時間変動がなまされる, という魅力的なアイデアはそのようなパスを通る立体角の大きさ

を考えると⁴⁾プレゼンテーション効果はあっても実際は効果的ではないであろう。また立体角の議論でも降着円盤自体からの放射は相変わらず考慮されていない。また狭輝線セイファート銀河 1H 0707-495 で示された反射による連続成分からの時間の遅れも示されたタイムラグを説明する一つの可能性を示したに過ぎない²⁴⁾。よって, 最近のどの結果も決め手には至っていない。

一方, その光源自体はというと, すでに本誌1月号の高橋氏の記事の図5にあるような状況が提案されており, 現状ではそのような状況が唯一の観測を矛盾なく説明する光源の位置であり, またエネルギー源のように思われる。光源に関する研究は, 降着円盤からの放射なども考慮して大いに研究を進めてもらいたいところである。

7. まとめに代えて: どこまでブラックホールに迫れるのか?

以上のように, 鉄輝線によるブラックホール近くの研究は, さまざまな相対論効果を取り入れたエキゾチックな, そして解決が困難な複雑なテーマとなってきている。観測される構造が, 広がった鉄輝線によるものなのか, 吸収体による擬似的なものであるのか, 研究者の間では合意に至っていない。時間を含めて, 4, 5次近似した残りの最後の上澄み部分に, 相対論効果を受けた本当の鉄輝線の姿が見えてくるのか, 結論を得るにはまだしばらく時間がかかりそうである。

一方, 「すざく」で重点的に観測するキープロジェクト公募観測には, NGC 3516 を含むいくつかの活動銀河核の長期観測がアメリカからの提案で進んでおり, その結果が待たれる。またより長期の変動に対しては, 天体は限られるが昨年8月から国際宇宙ステーションに搭載された全天X線監視装置 MAXI (<http://maxi.riken.jp>) によって長期のトレンドをモニターし, 極端に明るいと暗いときで「すざく」などにより精密測定をする, というのは吸収の寄与などを理解するうえ

で有効な研究手段となりえる。

鉄輝線の研究を通じたフェビアン豊富なアイデアは流石としか言いようがない。そして、多少一面的などころはあるにせよ、自らのアイデアを観測データを用いて示している。一方、そのようなアイデアを出す本人でない観測者は、できる限り客観的にデータを見て理論モデルの妥当性や、新たな客観的観測事実を示すべきではないか？もう少し丁寧に、また違う角度からデータを見たら、また解釈すれば、別の事実がわかってくることはここに記した鉄輝線小史が示している。さまざまな検証作業を進めない限り、いつまでも本質には迫れないであろう。

一方、鉄輝線を通じた研究は、今のところ、ブラックホールから少し離れた（実はそれほど強くない）重力場での相対論効果の検証にはなりえても、「光さえも吸い込んでしまう」といったブラックホール（事象の地平面）の存在自体の直接検証にはなっていない。今後は、フェビアンを超えて、ブラックホールの直接検証につながる研究に発展していくことも期待する。

謝 辞

本稿を書くにあたって、MAXI が首尾よく打ち上がったために私自身大変忙しく、何かと躊躇するものもあった。しかし、すべてが相対論効果で説明できるような発表も多い。それ故、現状の問題を専門外の人にも知ってもらったほうがよいと本稿を書くことを勧めてくださった方々に感謝する。また、学会での特別セッションの開催を含め、鉄輝線を通じたブラックホール研究という問題に、今一度、目を向けさせてくださった三好 真氏と高橋真聡氏に心から感謝するとともに、予定より遅れて出版となったことに対しお詫び申し上げる。

参 考 文 献

- 1) Fabian A., et al., 1989, MNRAS 238, 729
- 2) George L. M., et al., 1989, Proc. 23rd ESLAB Symp. (ESA SP-296), 945
- 3) Tanaka Y., et al., 1995, Nature 375, 659
- 4) Luminet J., 1979, A&A 75, 228
- 5) Kato S., Fukue J., Mineshige S., 2008, "Black-Hole Accretion Disks" (Kyoto Univ. Press, Kyoto)
- 6) Kawanaka N., Mineshige S., Iwasawa K., 2005, ApJ 635, 167
- 7) Nandra K., et al., 1997, ApJ 477, 602
- 8) Turner J., et al., 1998, ApJ 493, 91; Weaver K., Reynolds C., 1998, ApJ 503, L39
- 9) Iwasawa K., et al., 1996, MNRAS 282, 1038, cf., Weaver K., Yaqoob Y., 1998, ApJ 502, L139
- 10) Negoro H., et al., 2000, AdSpR 25, 481
- 11) Matsumoto C., et al., 2003, PASJ 55, 615
- 12) Wilms J., et al., 2001, MNRAS 328, L27
- 13) Fabian A., et al., 2002, MNRAS 335, L1
- 14) Fukue J., 2000, PASJ 52, 829
- 15) Kato Y., et al., MNRAS 403, L74
- 16) Turner T., et al., 2002, ApJ 574, L123
- 17) Inoue H., Matsumoto C., 2003, PASJ 55, 625
- 18) Nogami K., Negoro H., Hong H., Mihara H., 2004, NuPhS, 132, 209; 野上杏子, 2004, 博士論文 (日本大学)
- 19) Turner T., et al., 2005, ApJ 618, 155
- 20) Miller L., Turner T. J., Reeves J. N., 2008, A&A 483, 437
- 21) Miniutti G., et al., 2007, PASJ 59, S315
- 22) Markowitz A., et al., 2008, PASJ 60, S277
- 23) Miniutti G., Fabian A. C., 2004, MNRAS 349, 1435
- 24) Fabian A. C., et al., 2009, Nature 459, 540

History and Problems of Broad Iron-Line Studies in AGNs

Hitoshi NEGORO

Department of Physics, CST, Nihon University, 1-8 Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8308, Japan

Abstract: Various relativistic effects around the black hole can be investigated through broad iron line profiles obtained from X-ray observations of AGNs. Andy Fabian in UK and his colleagues have shown that observed X-ray properties around the iron-line energy can be understood with such effects. The solution, however, is not unique. Here are presented history and remaining problems in the broad iron line interpretation.