

# ブラックホール降着円盤からの X 線放射の理論モデル



川 中 宣 太

〈高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・理論研究系 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1〉

e-mail: norita.kawanaka@kek.jp

活動銀河核や X 線連星系といった天体は、ブラックホールに周辺のガスが落ち込み降着円盤を形成することによって、重力エネルギーを輻射エネルギーに変換して輝いていると考えられている。この機構を観測から理解するうえで重要となるのが、ブラックホール近傍からやってくると考えられる X 線の観測である。この X 線のスペクトルやその時間変動を知ることによって、ブラックホール近傍の強い重力場における時空構造、降着円盤の構造、輻射機構に関する情報を得ることができるだろう。理論的にはこの X 線はブラックホール降着円盤とそれを取り囲む希薄で高温のガス（コロナ）の組み合わせによって生成されると考えられている。本稿では円盤コロナモデルとそこから予言される X 線放射の特徴について、過去の重要な観測的研究と併せて概説する。

## 1. ブラックホール天文学の夜明け

周囲にあるものを何でも吸い込み光すらも抜け出せないという天体、ブラックホールについては、理論的には 1917 年に Schwarzschild によって Einstein 方程式の真空解の一つとして数学的に発見されて以来、Chandrasekhar や Oppenheimer らによって重い星の最終状態として盛んに研究が重ねられてきた。一方、天文学においてブラックホールという概念が現実的なものとして取り上げられるようになったその歴史は、Schwarzschild の発見から長い年月を経た 1960 年に謎の大光度の電波源 3C273 が発見されたことに始まる。スペクトル中に見える水素輝線の赤方偏移から、この天体は宇宙論的距離にあることが示唆され、そのことから実際には  $\sim 10^{46} \text{ erg s}^{-1}$  という莫大な光度で輝いていることがわかった。このような電波源はその後も相次いで発見され、クェーサーと名づけられたがその正体は謎のままであった。さらに驚くべきことにこのクェーサーはわずか 1-2 日

の間に激しい光度変化を示していた。この時間スケールに光速を掛けて放射領域のサイズを見積もると、せいぜい太陽系と同じぐらいの大きさ ( $\sim 200 \text{ AU}$ ) からあの大量の輻射が放出されていることになる。このようにコンパクトな領域から銀河の何百倍もの大きな輻射エネルギーを出すためには、通常の星のような核融合反応では到底足りない。1969 年 Lynden-Bell はこのクェーサーが輝く物理メカニズムとしてブラックホール降着円盤モデルを提唱した<sup>1)</sup>。このモデルは、太陽の  $10^{6-9}$  倍の質量をもつ超巨大ブラックホールにガスが落ち込むことによってその重力エネルギーを解放し、輻射のエネルギーに変換して輝くというシナリオに基づいている。核融合反応が静止質量の 0.7% しかエネルギーを変換できないのに対し、このブラックホール降着円盤の機構においては（回転していないブラックホールの場合）原理的にエネルギー変換効率を 6% にまで上げることができる。すなわち、宇宙においては原子力発電（核融合反応）よりも水力発電（重力エネルギーの

解放)のほうがずっと効率の良いエネルギー生成機構となっているのである。また、われわれの銀河系内におけるブラックホールの存在が観測の論文で初めて言及されたのは、X線衛星 *Uhuru* による白鳥座 X-1 (Cyg X-1) の観測結果について、やはりその奇妙な時間変動の様子を元に小田 稔が論文で「ブラックホールではないか」と書いた1971年のことであった<sup>2)</sup>。この天体に関しては、実は連星系をなしていて伴星からブラックホールのようなコンパクト天体にガスが降着することで明るく輝いているという理論的解釈がなされており、ここでもやはりガスが形作る降着円盤が放射源として考えられている。この *Cyg X-1* の観測は日本のX線天文学を大きく発展させるきっかけとなったが、この頃からブラックホールは宇宙に実在する天文学の対象としてその市民権を得ていくことになる。

現在、クェーサーは明るく輝く銀河中心核（以下、活動銀河核）の一種として、また、*Cyg X-1* のような天体はほかにもわれわれの銀河系内に数多く存在するX線連星のうちの一つとして分類され、スケールは違えど両者についてブラックホールとそれを取り巻く降着円盤という描像が適用されている。次節以降ではそのモデルについて「少し」詳細に説明する。

## 2. ブラックホール降着円盤

ブラックホール降着円盤の標準モデルは1973年に *Shakura* と *Sunyaev* によって、X線連星の観測的特徴を説明するというコンテキストで提唱された<sup>3)</sup>。このモデルでは、ブラックホールとその周りを回転しながらゆっくり定常的に落ちていくガス円盤を考える。ガスがブラックホールに落ち込むためには角運動量を外側へ輸送するプロセスが必要だが、彼らはこれを円盤内で起こっている乱流による粘性が担っていると考え、それによる角運動量輸送の効率を現象論的なパラメーターで表現することにより、円盤における角運動量保存

の式を立てた。この乱流の起源については当時ははっきりしたことはわかっていなかったものの、1991年に *Balbus* と *Hawley* によって円盤中の磁気回転不安定性が発見されてからは、これによって生み出される乱流が粘性を担っていると信じられるようになった<sup>4)</sup>。このことは近年発展しつつある大規模磁気流体シミュレーションにより確かめられつつある。

この乱流粘性には角運動量を外側に輸送するだけでなく、円盤中において運動エネルギーを熱エネルギーに変換するという役割もある。*Shakura* と *Sunyaev* はこれにより温められた円盤ガスがその表面から熱的な放射（黒体放射）をすることにより、エネルギーバランスが成り立っていると仮定し、円盤ガスのエネルギー保存の式を作った。これに加えて質量保存の式、回転軸方向の静水圧平衡の式と上に述べた角運動量保存の式とを連立させることにより、円盤の構造およびそこから放射の様子がわかることになる。それによると、円盤はその上の動径座標を  $r$  としたときに  $r^{-3/4}$  に比例した温度分布をもつことがわかり、それに従った黒体放射が円盤表面の各点から出るとすると、さまざまな温度の黒体放射の重ね合わせからなる、こぶ型の放射スペクトルが理論的に予言される。

このモデルにより、紫外線領域においてピークをもつ活動銀河核のスペクトルや、ハイ/ソフト状態と呼ばれる軟X線で明るく光っている状態にあるX線連星の、可視光から軟X線までのスペクトルは非常によく説明ができることがわかっている。このことは両システムにおいてブラックホールの周りに熱的な放射を出すような光学的に厚い降着円盤が存在することを示唆している。

## 3. 円盤コロナモデル

標準モデルはこのようにある部分においては観測事実をよく説明することができたが、スペクトル全体を眺めてみると実はこれだけでは不十分で

あることもわかる。活動銀河核や X 線連星系は上に述べたような熱的な放射だけでなく、硬 X 線領域まで延びるようなべき型の放射を出していることが観測から知られている。また、X 線連星系においては上に述べたハイ/ソフト状態のほかにロー/ハード状態と呼ばれるべき型の X 線放射が卓越した状態をとることもあり、こういった放射の特徴はもはや光学的に厚い円盤のみを仮定する標準モデルでは説明できず、何らかの新しいアイデアが必要となってくる。

このべき型 X 線放射を説明する放射メカニズムとして最も自然と考えられるのが逆コンプトン散乱である。このモデルにおいては、何らかのプロセスによって生成されているソフトな「種光子」が高温・低密度のプラズマ中にある電子によってコンプトン散乱されることによってエネルギーを与えられ、ハードな X 線光子となって観測されると考える。スペクトルのカットオフエネルギーから、散乱する電子の温度は  $10^9$  K 程度と推定される。逆コンプトン散乱モデルにおいては、この高温プラズマの加熱機構と、種光子の源、さらにそれらがどのように空間的に分布しているかが重要な点となる。

第一の点についてはひとまず置いておくとし、第二・第三の点については次の 2 種類のモデル

が提示されている。まず降着流の外側が光学的に厚い円盤となり、中心付近で光学的に薄い高温降着流が存在しているとする hot inner torus モデル (図 1 左)、そしてもう一つは中心付近まで延びている標準モデルの円盤とそれを取り囲むような光学的に薄い高温のプラズマ (コロナ) の二相が共存しているとする円盤コロナモデル (図 1 右) である。

まず hot inner torus モデルにおいては、種となる光子は降着流中でのシンクロトロン放射によって供給されると考える。またその構造については、ブラックホールへの質量降着率が非常に小さい場合に考えられる ADAF (Advection Dominated Accretion Flow) と呼ばれる円盤解がそれを記述するものとして知られている。質量降着率が低いと中心天体近傍においては放射や逆コンプトン散乱による冷却時間よりも質量降着にかかる時間のほうが短くなるため、降着流は高温を保ったまま中心天体に落ちていくと考えられる。このモデルは最初に一丸<sup>5)</sup>や Narayan-Yi<sup>6)</sup>らにより Cyg X-1 のロー/ハード状態のスペクトルを説明するために提唱され、以降さまざまな研究において詳細にその構造や放射の特徴が調べられてきた。一方円盤コロナモデルについては、種光子は標準円盤から放射されるプランク分布の光子であるとし、

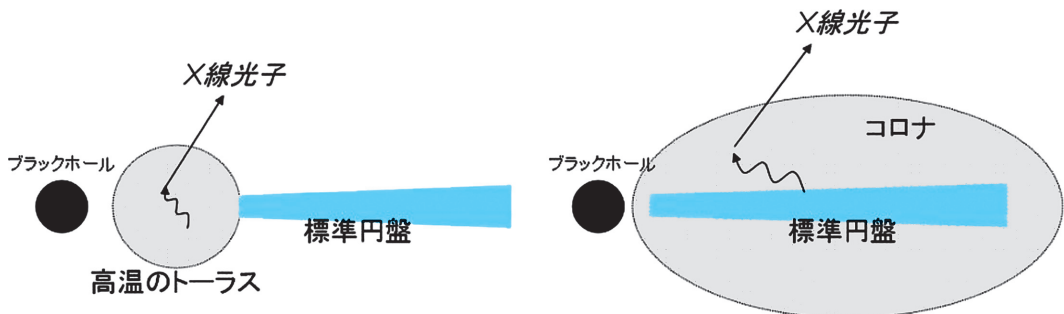


図1 ブラックホール降着流での X 線生成に関する 2 種類のモデル。左は中心付近で光学的に薄く高温で分厚いトーラスが形成され、その中で生まれたシンクロトロン放射が種光子となって逆コンプトン散乱で X 線を作る。一方、右は中心付近まで光学的に厚く幾何学的に薄い円盤が延びているが、上下を希薄で高温のコロナに挟まれており、円盤からの熱的光子が種となってコロナ中の逆コンプトン散乱で X 線が生まれる。

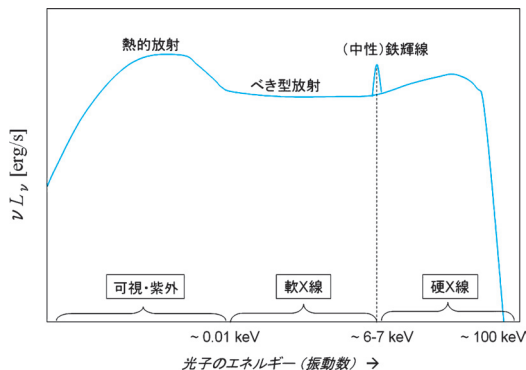


図2 典型的な活動銀河核の可視～硬X線のスペクトル。

Liang-Price<sup>7)</sup>らによってその光子たちがコロナ中で逆コンプトン散乱を受けて形成されるスペクトルが調べられている。こちらのモデルはコロナが高温を保てる機構については明らかにされないものの、円盤からの種光子の供給が効率良く行われるという点で都合が良い。

観測されている活動銀河核やX線連星からの放射がいずれのモデルで説明できるかは、その明るさやスペクトルの詳細な形状によって異なる。たとえば、われわれの銀河の中心にある巨大ブラックホール天体 Sgr A\* などに代表される低光度の活動銀河核や一部のX線連星のスペクトルは、ADAFモデルでフィットができる。しかし、典型的な明るさの活動銀河核や一部のX線連星においては単純な高温降着流のモデルでは説明できない。以下、活動銀河核のスペクトルを例にとってその根拠を説明する。

図2は典型的な活動銀河核のスペクトルとその成分を示したものである。まず上にも述べた可視・紫外域に見える熱的な成分とべき的なX線放射が見て取れるが、それ以外に興味深い特徴として、6-7 keV付近に見える強い輝線がある。この輝線は、比較的低温で光学的に厚いガス塊がX線の照射を受けた際に、ガス塊中の鉄の原子または低電離のイオンから放射される蛍光輝線であると考えられている。さらにこの輝線について興味

深い事実がわかったのは、1993年に打ち上げられたX線衛星「あすか」が翌年に活動銀河核の一つMCG-6-30-15の長時間観測を行ったときであった。そこから得られたX線スペクトルにもやはり蛍光鉄輝線が確認できたのだが、さらに詳しく調べてみるとその輝線の形状は4 keVから7 keV程度にまで大きく広がっており、かつ左右非対称なプロファイルをなしていることがわかった<sup>8)</sup>。

このプロファイルは次節で詳説するように、輝線が高速回転している光学的に厚いガス塊（すなわち標準的な降着円盤）から放射されているために、強いドップラーシフトを受けるなどの相対論的效果から作られたものと解釈することができる。ところが輝線が高速回転しているガスから放射されているということは、言い換えると中心ブラックホールの近傍にまで光学的に厚い円盤が存在しているということであり、このような状況はADAFモデルでは説明できないということが言える。一方、円盤コロナモデルはこの問題をクリアしているだけでなく、X線光源であるところの高温ガスすなわちコロナが光学的に厚い円盤を覆うように存在しているため、それだけ円盤からの強い輝線放射が期待できる。こうして、円盤コロナモデルは典型的な明るさをもち強い鉄輝線を示している活動銀河核やX線連星のX線放射機構として信じられていくこととなった。

円盤コロナの最もシンプルなジオメトリーは、コロナが円盤をサンドイッチしているような状況であり、その性質はHaardt-Maraschiによって詳細に調べられた<sup>9), 10)</sup>。彼らはまず、質量降着によって解放される重力エネルギーのうちコロナの加熱に使われる割合をパラメーター $f$ とにおいて、円盤コロナ系のエネルギー保存とそこからの放射線を考察した。その結果、熱的放射とべき型のX線がほぼ同量のエネルギーを持つような典型的なブラックホール天体の放射スペクトルは、 $f \approx 1$ のとき、すなわち解放された重力エネルギーのほとんどが円盤ではなくコロナの加熱に費やさ

れているとすると説明できることを示した。

しかし、このコロナを加熱して高温に保つメカニズムについては、太陽コロナと同様ははっきりしたことはわかっておらず、現在でも多くの研究者が解決に向けて研究に取り組んでいる。

#### 4. 相対論的鉄輝線プロファイルについて

前節で X 線スペクトル中の蛍光鉄輝線が円盤コロナモデルの決め手となったことを説明したが、ここではその鉄輝線のプロファイルがいかにして形成されるかについて簡単に説明する。より細かい解説は参考文献 11 を参照されたい。

まずブラックホールから比較的遠方（ブラックホールの半径の数十倍程度）において、非相対論的な速度で回転している円盤から輝線が出ている状況を考える。このとき単純なドップラー効果により、観測者側に近づいてくる部分から出る輝線は本来の振動数よりも高い側にずれて見える（青方偏移）。逆に観測者から遠ざかる部分もあるの

で、そこから出る輝線は振動数が低くなって見えるはずである（赤方偏移）。すると輝線プロファイルは図 3 中央上段①のように高振動数（高エネルギー）側と低振動数（低エネルギー）側とに 2 本の角をもったものになることがわかる。

次に、ブラックホールに近い領域（ブラックホール半径の 10 倍程度）で相対論的な速度で回転している円盤を考える。ここから出る輝線は単純なドップラー効果だけではなく、ビーミング効果および横ドップラー効果という特殊相対論の影響を受ける。ビーミング効果とは高速で運動している物体からの放射が進行方向の限られた立体角内に集中する現象であり、これによって上に述べたプロファイルは高エネルギー側の角がより強く、それに比べて低エネルギー側の角が弱くなるという変更を受ける。一方、横ドップラー効果は「時計はゆっくり進んでいるように見える」という有名な特殊相対論の帰結から理解できる効果で、輝線の振動数は低いほうにずれて観測される。こうしてできる輝線プロファイルは図 3 中央

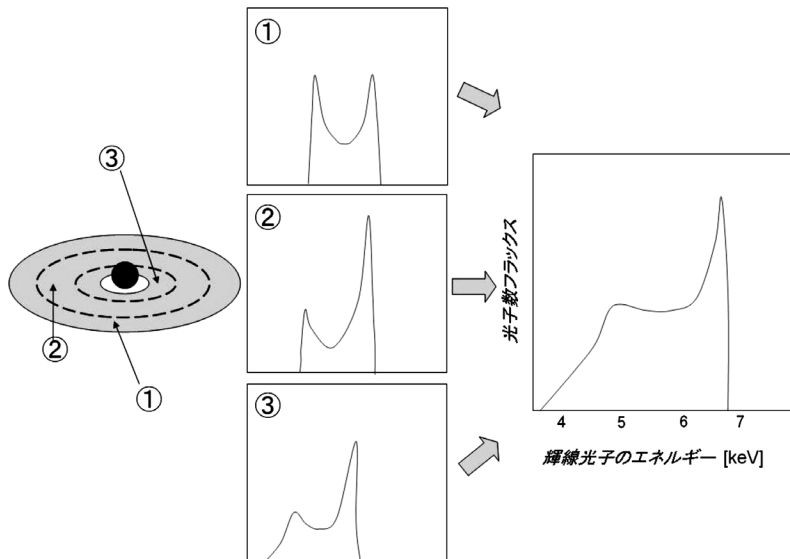


図 3 ブラックホール周りの回転する降着円盤から放射される鉄輝線のプロファイルが歪む様子を示した図。ブラックホールからの距離によって輝線の拡がり方が異なり、それらを円盤上で積分してやることによって、実際に観測されるであろうプロファイルが計算できる。

中段②のように左右非対称で中心がやや低エネルギー側にずれたものになる。

さらにブラックホールに近い領域（ブラックホール半径の数倍程度）では、上記の効果に加えて一般相対論の効果が現れてくる。ブラックホールのホライズン近傍のような強い重力場中で放射される光子は赤方偏移を受けて観測される（重力赤方偏移）。したがって輝線プロファイルは先ほどの場合に比べてさらに低エネルギー側に延びる（図3中央下段③）。また、重力場中では光の経路は曲げられるので、輝線プロファイルを求める際にはその効果も考慮しなければならない。

こういった相対論的な効果をすべて考慮に入れ、降着円盤全体から放射される鉄輝線がどのように観測されるかを計算すると、1994年に観測されたような低エネルギー側に裾野をもつ左右非対称に広がったプロファイル（図3右）が、実は理論的に予言できることがわかる。これは言い換えると、鉄輝線プロファイルを詳細に調べることによってブラックホール近傍の重力場の様子や降着流のダイナミクスに制限がつけられる可能性があるということである。たとえば、プロファイルの低エネルギー側のテイルは重力赤方偏移の効果が一番よく現れる部分だが、そのことからもし低いほうにテイルが大きく延びていればそれだけ円盤の内縁がブラックホールの近傍にまで迫っているということがわかるし、またテイル成分が比較的強く現れていれば、鉄輝線放射の強度分布が中心集中しているだろうという推測ができる。

特に円盤の内縁半径については次のような議論がしばしば用いられる。粒子がブラックホールの周りで安定な円軌道を描くことができる半径には、ブラックホールのスピンのによって決められる下限があり、スピンの大きければ大きいほどその下限は小さくなる。この半径が円盤の内縁半径を決めていると考えると、鉄輝線プロファイルのテイルの延び具合から中心ブラックホールのスピンの制限がつけられるはずである。事実、この理屈

に基づいてブラックホール候補天体の鉄輝線プロファイルから、ブラックホールのスピンを評価する研究がこれまでにいくつもなされている。特にMCG-6-30-15については「あすか」以降もXMM-Newtonや「すざく」などによって繰り返し観測され、そのすべてにおいて大きく広がった鉄輝線プロファイルの存在が確認されている。興味深いことに、これらの解析結果はすべてMCG-6-30-15の中心にあるブラックホールは高速回転している( $a > 0.9$ )ということを示唆している（たとえば参考文献12, 13など）。しかし、ここで注意しなければならないのは、輝線プロファイルを正確に見積もるために観測されているスペクトルから連続線成分（一般にはべき型）を正しく引き去ることが必要だということである。もし連続線成分のべきや高さを見誤ればそれだけで輝線プロファイルの推定も大きく変わり、したがって上に述べた理屈で求めたスピンは実際と大きく違う値になる可能性もある。このように、ブラックホール近傍の物理状態に関する情報をX線スペクトルから得るためには、鉄輝線と連続線成分の両方を正しく説明できるようなモデルを立てることがまず必要であると考えられる。

また、MCG-6-30-15の鉄輝線放射に関する観測的特徴でもう一つ注目されているのが、その奇妙な時間変動の様子である。「あすか」以降のいくつかの観測によると、この天体のX線スペクトルの時間変動は、(1)非常に大きく強度が変動するべき型の連続成分(2)強度のほとんど変動しない、鉄輝線放射を含む円盤からの反射成分の二つに分けられるという。ナイーブに考えれば(1)は円盤を照らして鉄輝線を生じさせる役割を担っているため、その強度が変われば当然(2)の成分もそれに伴った時間変動をしていなければならない。にもかかわらずこのように2成分で変動の様子が異なるということは、X線源による円盤照射の過程において単純なモデルが適用できないことを示唆しているのかもしれない。この様子は「す

ざく」による最新の観測においてさらに広いエネルギー帯域で確かめられている<sup>13)</sup>。現在これを説明するモデルとして、X線源が円盤を照射する光の経路がブラックホールの重力によって曲げられる効果によるとするもの<sup>14)</sup>、X線源と反射体の分布の非一様性が原因とするもの<sup>15)</sup>などがあるが、そのいずれかを判別できるような決定的な観測結果はいまだになく、議論が続いているところである。

## 5. X線照射モデルと鉄輝線プロフィール

ここで前々節のトピックであった円盤コロナモデルに話を戻す。すでに述べたように円盤コロナモデルにおいては、ブラックホール候補天体でのX線光子は円盤からのソフトな光子がコロナ中の電子によって逆コンプトン散乱されることによって生成されるとしている。この散乱後の光子のうち降着円盤系から脱出したものが、べき型の連続成分として観測者に届くわけだが、それとは別に散乱されたのち円盤のほうに舞い戻ってくるX線光子も存在するはずである。これが円盤から鉄輝線を生じさせる電離光子であると考えるのが自然かつ現実的だろう。すなわち、円盤上の鉄輝線強度分布を理論的に与えるためにはコロナからX線光子がどのように円盤に照射されるかを計算すれば良い、と言える。これにより、ブラックホール降着流からの相対論的鉄輝線プロフィールを理論的に予測することができるはずである。

しかしながらコロナの形成・加熱プロセスにはまだ謎が多く、したがってその分布や照射の仕方にも不定性が残されているため、鉄輝線プロフィールを理論的に説明する際には、X線光源として円盤の上空に浮かぶ点源やリングなどといった理想化されたものを仮定して議論をすることが多い。Reynolds-Begelmanはブラックホール周りの最内安定円軌道より内側に円盤が延びているような状況下での鉄輝線プロフィールを、点状のX

線光源モデルを用いて計算し、「あすか」の観測で得られたMCG-6-30-15の鉄輝線プロフィールは、中心ブラックホールが回転していないとしても矛盾なく説明できるという可能性を示した<sup>16)</sup>。この議論が成立すれば、単純に鉄輝線プロフィールからブラックホールのスピニングが推定できるとするロジックそのものが使えないことになる。ただ、ブラックホールのごく近傍においては円盤の電離度が非常に高くなるために、X線照射に対して蛍光輝線が効率良く出ないとする主張もあり<sup>17), 18)</sup>、現在も議論が続いている。鉄輝線の拡がり方からブラックホール周辺の時空構造を探れるようにするためにも、最内安定円軌道内での降着流の様子に関して今後さらなる理論的研究が必要と言えるだろう。

また、XMM-NewtonによるMCG-6-30-15の観測から、鉄輝線放射の円盤上の強度分布は非常に中心付近に集中していることが要求されるという解析結果が出されており<sup>12)</sup>、これを根拠に鉄輝線放射を引き起こす過程においてブラックホールからの回転エネルギーの引き抜き（たとえばBlandford-Znajek過程<sup>19)</sup>）が起こっている可能性が議論されている。しかし、引き抜かれたエネルギーがいかにしてコロナのようなX線源に受け渡さ

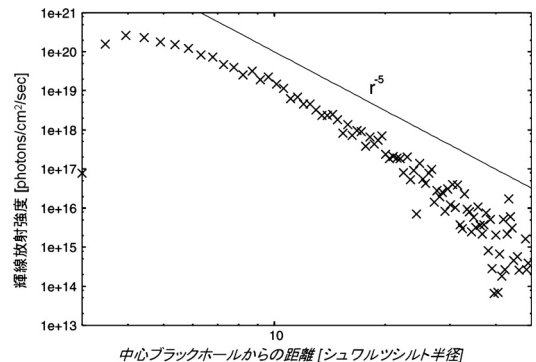


図4 円盤上の鉄輝線放射強度分布 (×印)。比較のために $r^{-5}$ のべき則を示す直線を並べている。この傾向はブラックホールの質量や円盤の質量降着率によってほとんど変わらない。

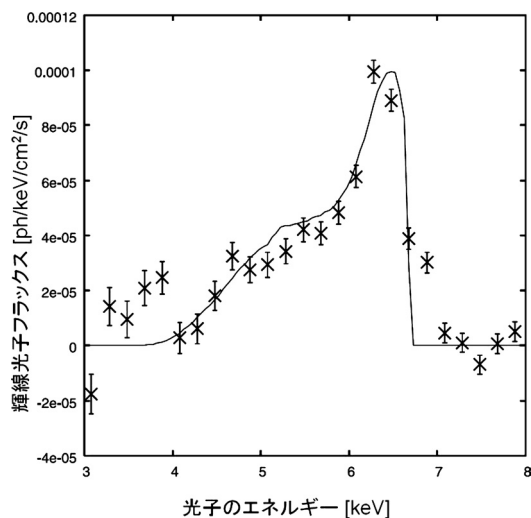


図5 2001年のXMM-NewtonによるMCG-6-30-15の観測結果から得られた鉄輝線プロフィールと、理論計算で求められたベストフィットの輝線プロフィール。後者については観測者の視線と円盤の回転軸の間の角度が $30.9^\circ$ になっている。

れるかについての具体的な過程は明らかにされていない。

このように、円盤上の鉄輝線強度分布に関しては観測からその特徴をある程度制限するといった例はいくつかあるものの、現実的なX線源としての円盤コロナのモデルを用いて理論的に輝線プロフィールを予測し、観測と比較するというアプローチの理論研究は非常に少ないのが現状である。

筆者らの研究はその数少ない中の一つである<sup>20)</sup>。ここでの計算においては円盤上の鉄輝線放射の様子を基礎物理に則った円盤コロナモデルに基づいて調べ、それから導かれる相対論的鉄輝線プロフィールがどのようなものになるかを求めた。採用したのはLiuらによる磁気リコネクション加熱コロナモデルである。このモデルは、(1) コロナにおける加熱が円盤から浮上した磁気ループのリコネクションによって行われる (2) コロナと円盤の境界層においてはコロナから円盤への

熱伝導とそれに伴った円盤ガスの蒸発が起こっている、などといった仮定に基づいて構築されたものであり、事実このコロナモデルを母体にして計算した連続線スペクトルは、観測の基本的特徴を再現することが確かめられている<sup>21), 22)</sup>。

このコロナモデルから予言される鉄輝線放射の様子を調べるために、筆者らはモデルで与えられたコロナの密度・温度分布を用いて、コロナ中の光子の伝播をモンテカルロシミュレーションにより計算した。その結果、円盤上の各点に異なる強度・スペクトルでX線がコロナから照射されるかが求められ、円盤状の鉄輝線強度分布を図4のように求めることができた。それによると、鉄輝線は $r^{-5}$  ( $r$ は動径座標)に比例する形で中心付近で多く生成されていることが見て取れる。さらにここから求められる輝線プロフィールを相対論的効果をすべて含めて計算し、MCG-6-30-15の観測結果と比較すると、低エネルギー側のテイルの強さなどを非常によく説明できることがわかった(図5)。上に述べたように、テイルの強さは輝線強度分布の中心集中の度合いによって決まるが、今回の結果は理論的に求めた強度分布が観測で要求されているものとよく一致していることを示している。

ここで紹介した筆者らの研究においては、輝線生成に至るまでの放射プロセスを円盤コロナの生成・加熱モデルに基づいて追ひ、円盤のどの領域からどれだけの鉄輝線が放射されるかを理論的に求めている。この計算結果においては、モデルに従って求められたコロナの密度・温度分布が強く反映されている。実際、密度(正確には散乱に対する光学的厚み)が大きいとそれだけ光子が散乱されやすく、また温度が高いと1回の散乱で光子が鉄を電離するのに十分なエネルギーを獲得しやすくなる、といった効果があるため、コロナのローカルな密度と温度はそこからのX線を受ける円盤からの鉄輝線生成確率に大きく影響する。このことは、何か円盤コロナモデルを立てる際に



は、観測の結果から要求されている輝線強度分布を再現できるような密度・温度分布が達成されるか否かに注意しなければならないことを意味している。今回筆者らが用いたモデルはその点をクリアしていることが、この研究で示されたことになる。

## 6. 円盤コロナモデルに残された課題

ここまでの議論は全て時間定常モデルに基づいたものであった。しかし、実際の観測においては活動銀河核にしろ X 線連星にしろその X 線光度やスペクトルは明らかに大きな時間変動を示している。この時間変動を説明できるようなブラックホール質量降着のモデルを構築することも、理論家に残されている仕事の一つである。特に典型的な明るさで幅の広い鉄輝線放射を示している活動銀河核においては、少なくとも時間平均スペクトルについてすでに詳説したように円盤コロナモデルが一定の成功を収めており、次なる課題として時間依存性を許すモデルを作ることが要求されている。

ブラックホール降着流の時間発展を記述するうえで最も有用なのは、やはり何ととっても数値シミュレーションである。近年ブラックホール候補天体におけるジェット生成や光度の準周期的振動といった現象の仕組みを解明する目的で、降着流の大域的な磁気流体シミュレーションが多くの研究者によってなされている。筆者らは加藤成晃らによって計算された、低密度で放射冷却の効かないブラックホール磁気降着流から、どのような放射スペクトルおよび時間変動が現れるかを調べた<sup>23)</sup>。この計算においては、赤道面に光学的に厚く幾何学的に薄い標準円盤を仮定し、その周辺をシミュレーションによって得られた希薄な降着流がコロナとして取り巻いている状況を考えており、円盤から放射される熱的な種光子がコロナで逆コンプトン散乱を受けて X 線放射を形成する様子を追っている。この結果は X 線放射のべき

やカットオフエネルギーといった大まかな観測的特徴を再現できている。また数十パーセント程度の X 線光度の変動やスペクトルの変化も見えており、これはコロナ中の磁気流体现象に起因する密度のゆらぎが元になっていると考えられる。現在の段階では円盤・コロナ間の相互作用（熱伝導・質量交換等）は考慮しておらず、今後より精密な観測との比較の議論を進めるためにもこういった物理過程をシミュレーションに取り入れた計算が必要であろう。

数値シミュレーションで明らかになる降着流のダイナミクスと、実際に天体において観測される放射スペクトルの間の対応を探る、といった理論研究は円盤コロナの問題のみならず、本稿では詳説しなかったがいくつかの天体で確認されている強いジェットやアウトフローの形成とそこからの放射、超臨界降着流と超光度 X 線源 (ULX) の対応、X 線連星におけるハイ/ソフト状態とロー/ハード状態の間の遷移といったテーマについても共通して重要な課題であり、いずれにおいてもいまだに解明には至っていない。「あすか」による相対論的鉄輝線プロファイルの発見以降、XMM-Newton, Chandra, 「すざく」といった X 線観測衛星により、ブラックホール天体のスペクトルのさまざまな特性が加速度的に明らかになってきており、また IXO (XEUS and Constellation-X) や Astro-H (NeXT) のような将来計画もこれまでに比べてエネルギー分解能・時間分解能においてより精密な観測データを提供してくれるものと期待を集めている。われわれ理論家としてはこれら観測技術の進歩に遅れをとることなく、得られたデータからブラックホールの質量・スピンや降着流の構造についてどこまで制限をつけることができるかを探るため、数値シミュレーションを用いたダイナミクスの解明と詳細なスペクトル計算とを統合した研究を展開していくことが必要と言える。

謝 辞

本稿の中で紹介したは筆者らの研究は、今年受理された筆者の学位論文を元に行っている。論文の執筆をはじめ大学院5年間を通じて粘り強く指導して下さった嶺重 慎教授に心から感謝の念を表す。また研究をまとめるうえで何度も議論にお付き合いいただき、有益な助言をして下さった長滝重博准教授、岩澤一司氏、川口俊宏助教、大須賀 健氏、渡会兼也氏、加藤成晃氏、高橋 芳太氏、川畑亮二氏にこの場を借りて厚くお礼を申し上げる。また、本稿執筆の機会を与えて下さり、遅々として進まなかった筆者の執筆作業を叱咤激励して下さった戸谷友則准教授に深く感謝する。本稿の元になった研究は日本学術振興会の援助を得て行われている。また研究における数値計算には京都大学基礎物理学研究所の大型計算機 Altix3700 を使用している。

参 考 文 献

- 1) Lynden-Bell D., 1969, Nature 223, 690
- 2) Oda M., Gorenstein P., Gursky H., Kellogg E., Schreier E., Tananbaum H., Giacconi R., 1971, ApJ 166, L1
- 3) Shakura N. I., Sunyaev R. A., 1973, A&A 24, 337
- 4) Balbus S. A., Hawley J. F., 1991, ApJ 376, 214
- 5) Ichimaru S., 1977, ApJ 214, 840
- 6) Narayan R., Yi I., 1994, ApJ 428, L13
- 7) Liang E. P. T., Price R. H., 1977, ApJ 218, 247
- 8) Tanaka Y., Nandra K., Fabian A. C., Inoue H., Otani C., Kunieda H., Makino F., Matsuoka M., 1995, Nature 375, 659
- 9) Haardt F., Maraschi L., 1991, ApJ 380, L51
- 10) Haardt F., Maraschi L., 1993, ApJ 413, 507
- 11) Reynolds C. S., Nowak M. A., 2003, Phys. Rep. 377, 389

- 12) Wilms J., Reynolds C. S., Begelman M. C., Reeves J., Molendi R., Staubert R., Kendziorra E., 2001, MNRAS 328, L27
- 13) Miniutti G., et al., 2007, PASJ 59, 315
- 14) Miniutti G., Fabian A. C., 2004, MNRAS 349, 1435
- 15) Merloni A., Malzac J., Fabian A. C., Ross R. R., 2006, MNRAS 370, 1699
- 16) Reynolds C. S., Begelman M. C., 1997, ApJ 488, 109
- 17) Young A. J., Ross R. R., Fabian A. C., 1998, MNRAS 300, L11
- 18) Reynolds C. S., Fabian A. C., 2008, ApJ 675, 1048
- 19) Blandford R. D., Znajek R. L., 1977, MNRAS 179, 433
- 20) Kawanaka N., Mineshige S., Iwasawa K., 2005, ApJ 635, 167
- 21) Liu B. F., Mineshige S., Shibata K., 2002, ApJ 572, L173
- 22) Liu B. F., Mineshige S., Ohsuga K., 2003, ApJ 587, 571
- 23) Kawanaka N., Kato Y., Mineshige S., 2008, PASJ 60, 399

**Theoretical Modelling of X-ray Emissions from Black Hole Accretion Disks**

Norita KAWANAKA

*Theory Division, Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK (High Energy Accelerator Research Organization), 1-1 Oho, Tsukuba 305-0801, Japan*  
 e-mail: norita.kawanaka@kek.jp

Abstract: Active galactic nuclei and X-ray binaries are considered to be energized by black hole accretion disks. X-ray spectra of accreting black holes have been the most important probes of the physics working at the region close to the black hole, such as the space-time structure, the dynamics of accretion flows, radiative processes, and so on. We discuss the physics of the accreting black hole system including the cold disk and hot corona, and the X-ray emission features predicted such systems.