

論文の内容の要旨

On the X-ray spectral variability in the Fe-K band of active galactic nuclei

(活動銀河核の鉄KバンドにおけるX線スペクトルの変動性について)

水本 岬希

活動銀河核は、銀河中心の非常に小さな領域にもかかわらず、銀河全体あるいはそれを大きく超えるほどの光度を持つ。活動銀河核の中心には太陽質量の 10^{6-9} 倍もの質量を持つ超巨大ブラックホールが存在しており、中心ブラックホールに対してガス降着が起こることで強いエネルギー放出が行われていると考えられている。活動銀河核には、べき型のX線スペクトルを放射する放射領域、紫外-軟X線光子を放射する降着円盤、そしてエネルギースペクトル内に吸収構造や輝線構造をつくる様々な雲 (cloud) などの構成成分が存在する。

中心ブラックホール近傍から放射されたX線光子は周囲の物質と相互作用する。主な作用は光電吸収であり、確率的に蛍光輝線を伴う。そのうち、宇宙組成とK殻蛍光収率の大きさから、鉄K輝線 (6.4 keV) が最も顕著に現れる。また、物質中の電子との相互作用である Thomson 散乱も競合的に働く。冷たく静止した物質で散乱が起こった場合には細い輝線が作られるが、多くの活動銀河核では5-8 keVあたりに「広がった鉄K輝線のようなスペクトル構造」が観測される。この広がった鉄輝線構造の起源に関して、散乱物質がブラックホールの近くにあるか (R_g スケール; R_g は重力半径) 遠くにあるか ($100 R_g$ スケール) で、これまで大きく二つのシナリオが考えられてきたが、スペクトル構造だけではどちらが尤もらしいか決着をつけることができなかった。

そこで、両者の縮退を解くために、鉄Kバンドにおける時間変動が調べられてきた。今日では、「root-mean-square (rms) スペクトル」と「時間遅れ」という2つの点で、鉄Kバンドは特徴的な時間変動を有することが知られている。まず、変動率のエネルギー依存性を示す rms スペクトルには、5-7 keV 付近で凹みが見られる。これは、鉄Kバンドが他のバンドと比べて低い変動率を有するこ

とを意味しており、その低下率は50%に及ぶ時もある。次に、鉄 K バンドの X 線光子は、周囲のエネルギーバンドの光子よりも遅れて観測される。これは、反射成分が直接成分よりも長い光路を通るためであると解釈されている。観測される時間遅れは (1) $c/100 R_g$ 程度のフーリエ周波数 (c は光速) において、(2) 数 R_g/c 程度の遅れを持ち、(3) 5–8 keV の広いエネルギーバンドで見られるという特徴を持つ。これらの時間変動に関する特徴は、ブラックホール近傍の物質の分布や構造を反映していると考えられており、広がった鉄 K 輝線構造の由来を理解する上で重要な鍵となる。

散乱がブラックホールのごく近傍の円盤反射で支配的に起こるというシナリオが、「円盤反射シナリオ」である。このシナリオでは、ほぼ最大限のスピンの持つカーブラックホールにおいて、非常に小さな X 線放射源 (lamp post) が降着円盤の最内縁を照らすことで、蛍光鉄 K 輝線が強い重力赤方偏移を受けて広がって放射される。時間変動に関しては、反射成分の変動が直接成分の変動に比べて小さいために rms の凹みが作られ、lamp post から円盤までの距離が数 R_g 程度であることから時間遅れが説明される。このシナリオは、時間変動に関するそれぞれの特徴を個別かつ半定量的に説明することが可能であったが、一つの計算コードで両者を同時かつ定量的に説明した例はこれまでなかった。そこで本論文ではまず、円盤反射シナリオに沿って、観測される rms の凹みと時間遅れを同時に説明することが可能かどうかを調べた。具体的には、ray-tracing 法を用いて一般相対論的時空の下で光子の経路を計算し、数値シミュレーションを行った。得られた結果を、rms の凹みと時間遅れが特に顕著に見えている IRAS 13224–3809 と比較したところ、観測される rms の大きな凹みを説明するには、太陽組成の 10 倍以上の鉄が必要となることがわかった。一方、時間遅れは太陽組成程度の鉄で説明することができ、太陽組成の 10 倍の鉄では観測と矛盾することがわかった。加えて、このモデルでは、観測される時間遅れのフラックス依存性を説明することができないことも判明した。このことから私は、円盤反射シナリオで活動銀河核の特徴的なスペクトル変動を説明することは難しいと結論づけた。

次に、ブラックホールから $100 R_g$ 程度離れた cloud によって観測を説明しようとする「cloud 反射シナリオ」の計算を行った。このシナリオでは、観測される広がった鉄輝線のようなスペクトル構造は実は輝線ではなく、cloud が作る吸収端や吸収線によって見かけ上そのように見えていると解釈されている。また、cloud の時間変動によって深い rms の凹みが説明できることはすでに知られていた。そこで、cloud で反射が起こるとどのような時間遅れが観測されるかを計算した。まず、中心から $100 R_g$ の位置に、アウトフローしている部分球殻状の cloud を置き、そこで跳ね返った光子がどのような時間遅れを持つかをモンテカルロ法によるシミュレーションで求めた。結果として、この cloud によって観測されるラグの特徴を全て説明することができた。この結果は以下のように解釈される。(1) 吸収体の典型的な位置を R とすると、時間遅れは c/R Hz 以下のフーリエ周波数で観測される。このことから、 $R \lesssim 100 R_g$ であることがわかる。(2) また、鉄 K バンドにおいても、時間遅れを持

つ反射成分よりも時間遅れを持たない直接成分の方が強く、反射成分の時間遅れは2桁程度も薄められてしまう。そのため、 $100 R_g$ の位置に散乱体が存在していたとしても、観測される時間遅れは数 R_g/c 程度にまで弱まる。(3) さらに、散乱体がアウトフローしている場合、手前にある散乱体に跳ね返った鉄輝線は青方偏移、奥にある散乱体に跳ね返った鉄輝線は赤方偏移を起こすため、結果的に5–8 keV の広いエネルギーバンドで時間遅れが観測される。 $R \lesssim 100 R_g$ に位置するアウトフローする散乱体として物理的に尤もらしいものとして、円盤風が挙げられる。円盤風は、電離したガスが輻射圧を受けて数十 R_g あたりから吹き出す現象であり、多くの活動銀河核で観測されている。そこで次に、密度、電離度、速度の距離依存性を考慮した現実的な円盤風モデルを用いて時間遅れの計算を行った。結果として、上述の IRAS 13224–3809 に加え、時間遅れが顕著に観測されている Ark 564 と 1H 0707–495 においても、cloud 反射シナリオによって時間遅れを定量的に再現することに成功した。また、円盤風の密度揺らぎによって作られた粒状の冷たい吸収体が X 線放射領域を部分的に覆い隠していると考え、スペクトル構造および rms の凹みも同時に矛盾なく説明できることがわかった。

最終的に得られた活動銀河核近傍領域の描像は以下の通りである (図 1)。中心ブラックホール付近に広がった X 線放射領域が存在し、その周りに降着円盤が作られている。数十 R_g あたりから吹き出す円盤風が、エネルギースペクトル内の青方偏移した吸収線とともに、「時間遅れ」を作る。500 R_g を超えたあたりで、円盤風の密度揺らぎにより粒状の冷たい吸収体作られる。この冷たい吸収体によって X 線放射領域の一部が覆い隠されることで、X 線スペクトルに鉄 K 吸収端が現れ、「広がった鉄 K 輝線のようなスペクトル構造」を作る。冷たい吸収体が X 線放射領域を覆い隠す割合が変動することで、5–8 keV 付近で「rms の凹み」が生み出される。このようにして私は、活動銀河核の鉄 K バンドにおける X 線スペクトルの変動性に関して、cloud 反射シナリオに沿って、観測される特徴を全て説明する自己矛盾のない物理描像を描き出すことに成功した (表 1)。

表 1: 広がった鉄 K 輝線構造を説明する 2 つのシナリオに対する、本論文前の状況と本論文で得られた結論

本論文前

| | スペクトル | rms の凹み | 時間遅れ |
|--------------|-------|----------|----------|
| 円盤反射シナリオ | ○ | △ (半定量的) | △ (半定量的) |
| cloud 反射シナリオ | ○ | ○ | ? |



本論文の結論

| | | スペクトル | rms の凹み | 時間遅れ |
|--------------|----------------|-------|---------|------|
| 円盤反射シナリオ | (太陽組成程度の鉄) | × | × | ○ |
| 円盤反射シナリオ | (太陽組成の 10 倍の鉄) | ○ | ○ | × |
| cloud 反射シナリオ | (太陽組成程度の鉄) | ○ | ○ | ○ |

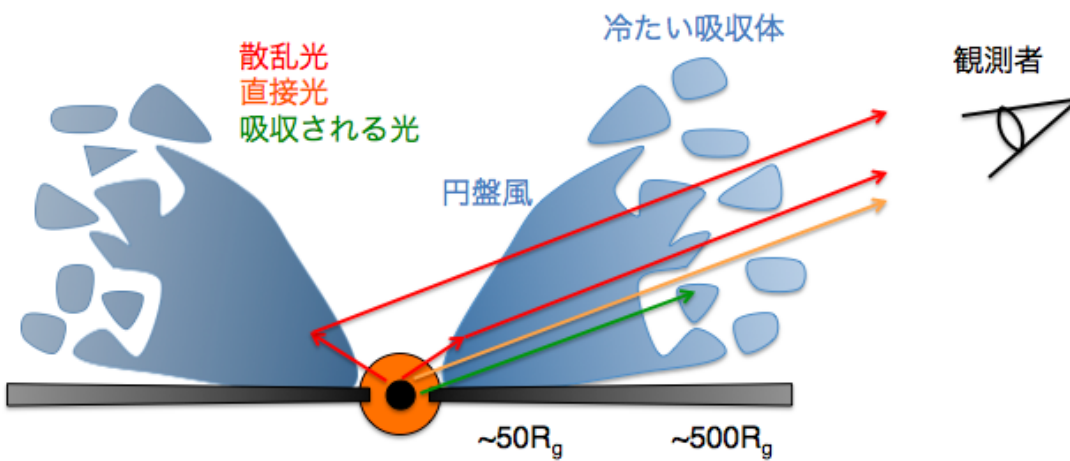


図 1: 最終的に得られた活動銀河核の物理描像。オレンジの円領域は $10 R_g$ 程度に広がった X 線の放射源を、赤、オレンジ、緑の矢印はそれぞれ、円盤風で散乱されて時間遅れを作る光子、直接観測される光子、冷たい吸収体によって吸収されてしまう光子を示している。