

X線で探る活動銀河核の中心領域

大谷 知行

〈理化学研究所 宇宙放射線研究室 〒351-01 埼玉県和光市広沢2-1〉

e-mail: otani@postman.riken.go.jp

活動銀河核の中心領域には、巨大ブラックホールとそれをとりまく円盤（降着円盤）の系が存在すると考えられている。この系の最も中心に近い領域からは強いX線放射が生じている。従って、活動銀河核をX線で観測することで中心核の最も内側で起こっている現象をかいま見ることができる。ここでは、X線天文衛星「あすか」によって得られた活動銀河核の中心領域の観測結果について述べる。

1. 巨大ブラックホールの巢—AGN

宇宙には無数の銀河が存在する。このうち、少なくとも数%の銀河の中心領域は、電波からX線・ガンマ線にわたって非常に大きなエネルギー放射をしている。この中心核を持つ銀河を「活動銀河」といい、その中心核を「活動銀河中心核 (Active Galactic Nuclei; AGN)」と呼ぶ。活動銀河を指してAGNと呼ぶこともある。AGNの放射エネルギー量は典型的には $10^{42-47} \text{erg s}^{-1}$ である。太陽の放射量が $3.85 \times 10^{33} \text{erg s}^{-1}$ であるから、AGNの放射は太陽の10億~100兆個分に相当する。

AGNの放射は一般に数百秒から数年という時間スケールで強度変動を起こす。この変動時間から、放射領域の大きさはおよそ太陽系程度の小さな領域であることがわかる。いうなれば、太陽系の中に太陽を10億個以上も詰め込んだようなとてつもないことがAGNでは起こっている。

では、このエネルギー放射の中心にはどのような天体があるのだろうか？ 無数の星をこのような小さな領域に安定に詰め込むのはまず不可能である。また、短時間に大きな変動を示すことから、中心領域は単一の系だと考えられる。このような

ことから、中心には太陽の100万倍から10億倍もの質量を有する巨大ブラックホールが存在するというのが定説になっている。

では、エネルギー源はいったい何なのか？ ご存知のように、太陽のような恒星は核融合のエネルギーで輝いている。しかし、AGNの放射エネルギーをまかなうには核融合では役不足である。AGNでは巨大ブラックホールに物質が落ちる時の位置エネルギー（重力エネルギー）がエネルギー源と考えられている。例えば、核融合で水素原子からヘリウムができる際に生じるエネルギーは、静止質量のわずか0.7%に相当するにすぎない。しかし、ブラックホールに物質が落ち込んでいく際には最大で40%にもなりうるのだ。

しかし、いくら重力エネルギーの効率が高いといっても、AGNの莫大なエネルギーを捻出するには大量の物質が必要である。この物質の補給という役割を果たすのが降着円盤である。降着円盤は巨大ブラックホールを取り巻くように形成されていると考えられている。物質は円盤内で粘性によって角運動量を失い、重力エネルギーを失いながら中心へ落ちていく。このように、AGNの莫大な放射には、巨大ブラックホールと燃料となる降着円盤が関係している。AGNとは、「巨大ブラッ

クホールと降着円盤からなる系を銀河の中心にもつ天体」といってもよい。

2. 中心領域の観測

AGN で最も興味深い研究テーマの一つは、巨大ブラックホールのごく近傍、あるいは降着円盤の内縁近傍でどのような現象が起こっているかを探ることであろう。そこには、我々が日常では経験できないような様々な現象が起こっているに違いない。では、中心領域はどうやって観測すればよいのだろうか？ ブラックホール（脱出速度が光速になる半径であるシュバルツシルト半径以内）からは光さえも出てくることができない。しかし、その周辺部は強い重力場に基づく莫大なエネルギー解放によって明るく輝いている。従って、この輝きをとらえるならば、ブラックホールのごく近傍で起こる現象を垣間みることができるだろう。

この目的には X 線観測が有効である。というのは、AGN で最も速い時間変動は X 線域で検出されており、X 線放射は中心核の最も奥深くで起こる現象を直接反映していると考えられるからである。

しかし、一口に AGN といっても、クエーサー、BL Lac 型天体、電波銀河、セイファート銀河など多種多様である。このうち、どのタイプの AGN を X 線でみればよいだろうか？ 中心を詳しく調べるためには、我々の銀河系の近くにある明るい AGN で、中心まで見通せているものの方がよい。この条件を満たすのが、1 型セイファート銀河 (Seyfert-1 galaxy) である。また、1 型セイファート銀河はクエーサーなど他の AGN の雛型であり、これを調べることで遠方のクエーサーなど他の AGN の中心領域で起こる現象もうかがい知ることができる。

以下では、日本の X 線天文衛星「あすか」を用いた 1 型セイファート銀河の観測結果の最新の結果について述べてみたい。

3. 1 型セイファート銀河の X 線スペクトル

さて、本題に入る前に、1 型セイファート銀河の X 線スペクトル (0.1-数 10 keV ; keV はキロ電子ボルト) について少し触れておこう。これは、主に以下のような成分からなる。

- (1) ベキ型の連続光成分。光子スペクトルに対するベキ指数 Γ は 1.5-2 程度。放射には熱的電子が関連しているという可能性が有力視されている。
- (2) (1)が光学的に厚い物質によって反射された成分。6-7 keV の鉄輝線、7-8 keV の K 殻吸収端、10 keV 以上のコンプトン反射成分からなる。反射を起こす物質は降着円盤と考えられている。
- (3) 軟 X 線超過成分。通常は(1)より弱い。降着円盤内縁部からの熱的輻射が起源と考えられる。
- (4) 高電離吸収物質 (Warm Absorber) 中の 6-7 階電離の酸素イオンによる吸収端構造。中心核から比較的離れた位置にある光電離ガスが起源だと考えられている。

中心領域に関係するのは(1)-(3)であるが、X 線観測から中心領域を探るときには、鉄の K 殻特性 X 線と軟 X 線超過成分が特に有効な手がかりを提供する。これらは素性が比較的是っきりしており、観測もしやすいスペクトル構造だからである。

鉄輝線は、中心核の周辺物質が X 線照射されてイオン化した際に、物質のイオン化状態に応じた特定のエネルギーに出る。ブラックホール近傍の非常に小さな領域で生じた(1)の成分が降着円盤を強く照らし、その結果として鉄輝線が生じているというのが通説である。この鉄輝線が降着円盤による反射の成分ならば、輝線の形や強度は円盤上での物質の運動やイオン化状態を反映するだろう。

一方、軟 X 線超過成分は光学的に厚い降着円盤

で生じる熱的放射であると予想されており、その高い温度から、ブラックホールに非常に近い領域で放射されていると考えられている。

4. ブラックホールと降着円盤の存在

前述したように、物質は降着円盤という構造を経て中心ブラックホールへ落ち込んでいく。しかし、傍証は数多く存在するものの、AGNの中心に巨大ブラックホールと降着円盤の系が存在することを直接示す証拠はこれまでほとんどなかった。この謎を解く鍵は鉄のK殻輝線構造にある。輝線がもし降着円盤で生じているのなら、円盤の回転運動やブラックホールの強い重力場によって輝線の形が変形を受けるからである^{1),2)}。この輝線形状は日本のX線天文衛星「あすか」によって初めて観測可能になった。

我々はMCG-6-30-15, Fairall-9, NGC 4051を「あすか」で観測した³⁾。この結果、半値幅にして1 keV程度に広がった輝線形状の検出に成功した(図1)。輝線構造は単に広がっているだけでなく、奇妙なひしゃげ方を示している。加えて、輝線の中心エネルギーが赤方偏移している、輝線の高エネルギー側での強度が相対的に強く低エネルギー側で緩やかに強度が減少する、高エネルギー側でカットオフを示す、といった特徴を持つ。これらの構造こそ、まさにブラックホール回りの降着円盤で生じる輝線から期待されていた構造であり、ブラックホールと降着円盤の存在を明確に示す強力な証拠となったのである⁴⁾。

輝線の特徴をもう少し詳しく見てみよう。中心のブラックホールの回りをケプラー回転する幾何学的に薄い降着円盤で生じる輝線を考えると、降着円盤上で我々に向かってくる領域で生じた成分は、ドップラー効果による青方偏移と重力赤方偏移の効果が相殺して輝線の青い側(高エネルギー側)に集中した形状を示す。ドップラー効果と重力赤方偏移によるエネルギー変化量は半径に対する依存性が互いに異なり、円盤の傾斜角(降着円

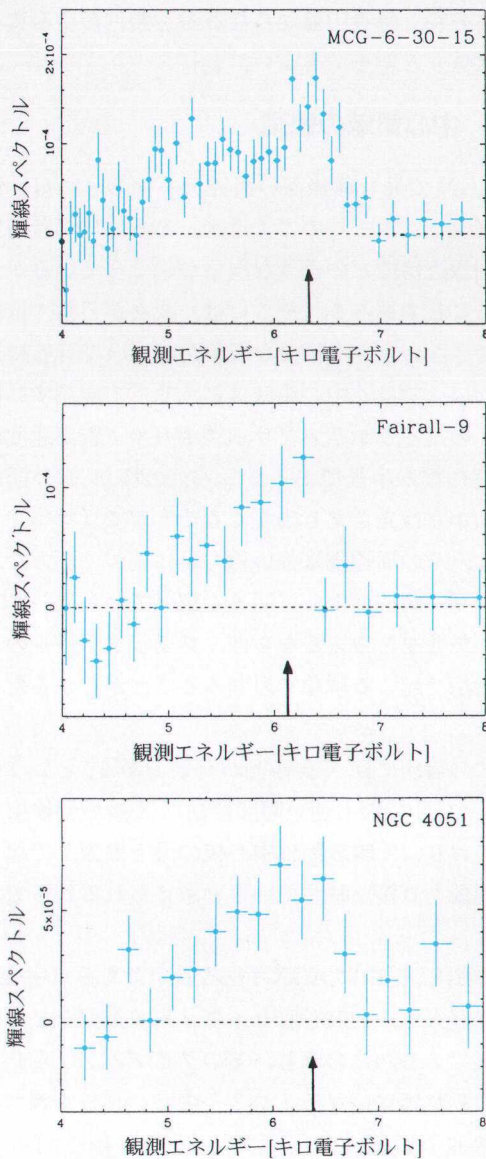


図1 「あすか」によって観測された1型セイファート銀河MCG-6-30-15, Fairall-9, NGC4051の鉄輝線プロファイル。矢印は各天体の静止系で6.4 keVに相当するエネルギーを示す。

盤軸と我々の視線方向とがなす角)で決まる一定のエネルギーより青い成分は出ない。これが輝線の青い側で見られるカットオフとなる。一方、降着円盤上で我々から遠ざかる運動をする領域で生

じた輝線は、ドップラー効果による赤方偏移と重力赤方偏移とで、輝線の赤い側に幅の広いすそを形成する。このすそは輝線放射領域が中心に近いほど低エネルギー側に伸びる。つまり、低エネルギー側までのびた輝線形状は、輝線が中心ブラックホールのごく近傍で起こっていることを示している。

この輝線構造は輝線放射領域に関する様々なパラメータに依存して変化するので、輝線構造からそれらのパラメータを導き出すことができる。実際のデータ解析では、降着円盤からの輝線構造のモデルで観測スペクトルをフィッティングすることでパラメータ導出を行なうのだが、その基本概念は次のようになる。

まず、輝線幅は、輝線放射領域の広がりにもよるが、主にドップラー効果で広がる。観測された輝線幅が FWHM=1-2 keV (ドップラー速度にして光速の 15-30%) であることから、円盤軸と我々の視線方向のなす角(傾斜角)を i 、輝線放射領域の典型的な半径を R として、 $R \sim 5-10 (\Delta E/E)^{-2} (\sin i / \sin 30^\circ)^2 R_s$ となる。ここで、 $R_s = 2GM/c^2$ は中心ブラックホールのシュバルツシルト半径である。一方、輝線エネルギーの赤方偏移は重力赤方偏移で期待されるものである。(中心に落ち込んでいく物質がドップラー効果で赤方偏移を起こすと考えると、輝線強度が説明できないことに注意されたい。) これからも、 $R \sim 5-10 (\Delta E/E)^{-1} R_s$ という値が導かれる。即ち、輝線の広がりや赤方偏移は、輝線放射の大部分が中心近傍の $10R_s$ 程度というブラックホールに近い場所で生じていることを意味し、回転していないブラックホール(シュバルツシルト・ブラックホール)の限界安定軌道である $3R_s$ 近くまで降着円盤が存在していることを示す。

また、上で述べたように、輝線の青い側に見られるカットオフのエネルギーは、傾斜角と輝線のもともとのエネルギーとに大きく左右される。輝線のもともとのエネルギーにはイオン化状態に

じたエネルギー変化の分だけ不定性はあるものの、上記の3天体では30度以下という制限が得られる。今後、他波長の観測などから円盤の傾斜角がより正確に求められれば、輝線のもともとのエネルギーがわかり、輝線放射領域のイオン化状態を正確に求めることが可能となる。

5. 軟 X 線超過 - Narrow-Line Seyfert-1 galaxies

さて、次に軟 X 線超過構造から中心核に迫ってみよう。ここで特に注目したい天体は、1 型セイファート銀河の亜流である「Narrow-Line Seyfert-1 galaxy」(以下 NLS1 と略す) である。日本語に訳すならば「狭輝線 1 型セイファート銀河」とでも書くのだろうか。要は光学域の許容線幅が禁制線幅と同程度しかない 1 型セイファート銀河である。光以外の波長でみると、電波は弱い、極紫外から軟 X 線域にかけては強い放射を示すことが知られている。

NLS1 については、最近になって重要な結果が

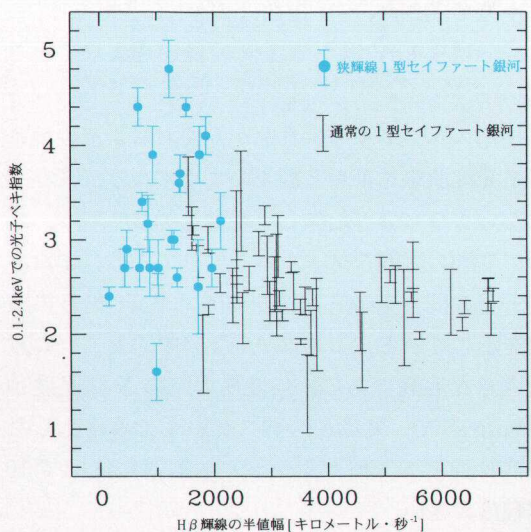


図2 1 型セイファート銀河と NLS1 の軟 X 線域におけるベキ指数と光学許容線幅 ($H\beta$) の関係 (Boller ら⁵⁾ による)。

軟 X 線でみつかった。Boller ら⁵⁾は 31 個の NLS 1 をドイツの軟 X 線天文衛星 ROSAT で観測し、NLS 1 が通常の 1 型セイファート銀河に比べて急な X 線スペクトルを示すことを発見した(図 2)。このことは NLS 1 が著しく強い軟 X 線放射を示す天体であることを意味する。また、NLS 1 には速くて激しい強度変動を起こすものが多い。

我々は 1994 年 7 月に、ROSAT の観測で最も激しい変動が観測されている NLS 1 の一つである IRAS 13224-3809 を「あすか」で 2 日間観測した^{3),6)}。平均的な X 線スペクトルは、非常に強い軟 X 線放射と弱いベキ型の硬 X 線放射で特徴づけられる(図 3)。軟 X 線放射は 1 keV 付近で急激に落ち込むような形をしており、ベキ型や熱制動放射ではなくむしろ黒体放射的である。このことは軟 X 線超過が降着円盤内縁近傍からの黒体放射であるという従来の見方と一致する。しかし、1 keV 付近には深いヘコミのような構造が残る。この構造は、吸収端のように鋭い構造であるが、黒体放射成分に指数関数的なカットオフをかけたスペクトルでも表すことができる。硬 X 線放射はベキ型で表され、ベキ指数は $\Gamma=1.5-2$ である。この成分は 1 keV 以下では軟 X 線超過よりぐっと弱い。

平均スペクトルの折れ曲がりをおおよその境にして光度曲線を書くと図 4 のようになる。スパイクがいくつも立った激しい変動を示している。最短の変動の時間スケールは 500 秒である。また、約一日の間に IRAS 13224-3809 は約 50 倍もの変動を示している。これは AGN の中でもとびぬけて大きな変動である。強度最大時の X 線光度は $10^{44} \text{erg s}^{-1}$ で、変動の時間スケールで規格化した光度は通常の 1 型セイファート銀河に比べて 10 倍程度大きい。

また、図 4 の 2 つの光度曲線を見るとわかるように、軟 X 線成分と硬 X 線成分の相関性は非常に良い。つまり、軟 X 線成分が強い時には硬 X 線

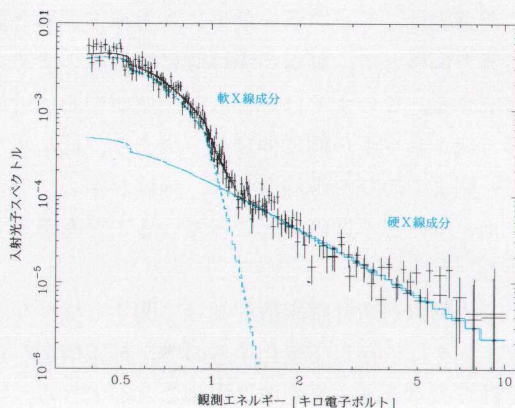


図 3 IRAS 13224-3809 の平均入射スペクトル。十字がデータ点を表す。

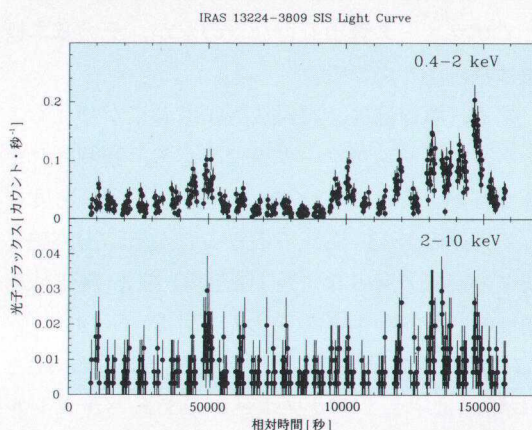


図 4 NLS1 のひとつ IRAS13224-3809 の光度曲線 (2 日)。上段が 0.4-2keV、下段が 2-10keV のカウントフラックスである。最も強度が弱くなった時のカウントフラックスは 0.004cts s^{-1} である。

成分も強い。この傾向は強度毎に分けたスペクトルからも確かめらる。これをより定量的に調べるために 2 つの光度曲線の相互相関係数をとったのが図 5 である。500 秒以内で両者は同時に変動している。このように、軟 X 線と硬 X 線の放射は互いに密接に関連している。

以上の結果をもとに、まず中心ブラックホールについて考えてみよう。放射エネルギーと変動時間からは、ブラックホールの周辺で静止質量が放射エネルギーへ変換される効率の下限值が概算できる。これは、以下のような原理による⁷⁾。

輻射への変換効率が一定ならば、降着物質が多

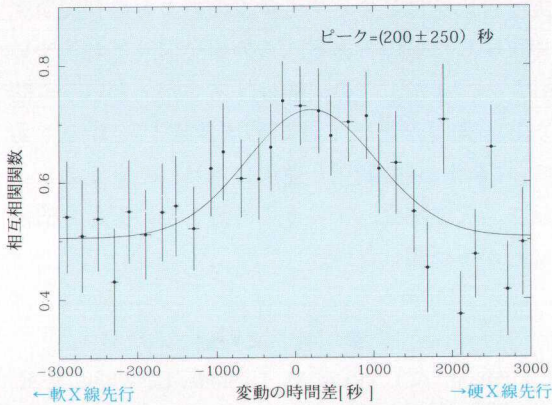


図5 IRAS 13224-3809のソフト成分とハード成分の相互相関関数。左が軟X線成分先行、右が硬X線成分先行に対応する。

いほど放射は大きくなる。その一方で、放射は変動時間から導かれる小さな領域で生じるので、変動が速くて光度が大きいという条件を満たすには、小さな領域へたくさんの物質を詰め込む必要がある。ところが、あまりたくさんの物質を詰め込みすぎると密度が高くなるため、領域の外にでるまでに光子がたどる行路が電子散乱によって長くなり、速い変動を起こせなくなってしまう。これを避けるには変換効率をある程度以上上げないといけないわけである。

IRAS 13224-3809の場合、この方法で見積もられる効率はおよそ15%になる。この値は、シュバルツシルト・ブラックホールの効率の上限値(～6%)を大きく超えている。従って、中心ブラックホールが高速回転している(カー・ブラックホール)可能性がある。カー・ブラックホールでは安定軌道の半径がシュバルツシルト・ブラックホールに比べて小さくなりうるので、高い効率が実現できるのである。

ただ、別の可能性がないわけではない。IRAS 13224-3809の場合、最大光度は大きいものの、平均光度はさほど大きくない。したがって、生じた重力エネルギーを一時的にどこか(例えば、磁場)へ蓄えておき、ある程度エネルギーがたまってから一挙に放射へ変換するような機構があれ

ば、平均的な変換効率は低くてすみ、シュバルツシルト・ブラックホールでも説明可能である。

次に、軟X線放射成分がどのような物理過程で出ているかを考えてみよう。この軟X線放射過程については、黒体放射であるという可能性の他に、光学的に薄い物質からの熱制動放射ではないかと考えている研究者もいるようだが、この可能性は否定される。熱制動放射を仮定した場合の放射測度(emission measure)と変動時間から得られる放射領域の最大値を用いると、電子散乱に対して光学的に極めて厚くなってしまふのである。このことは、スペクトルの形と合わせて、軟X線超過が黒体放射であるとの説を強く支持する。

しかし、軟X線放射の温度が黒体放射だとするとおかしいことが起こる。観測された黒体放射を出す領域の大きさを計算してみると、期待されるブラックホールの半径よりも小さくなってしまふ。つまり、軟X線放射はフィラメントや点のように非常に狭い領域で生じていることになってしまふ。

この結果に関しては、今のところ明確な解釈は得られていない。しかし、降着円盤上に生じた衝撃波で放射が生じていれば、フィラメント状の領域からの放射が可能かもしれない。あるいは、太陽フレアで見られるような磁気リコネクションで加速されたプラズマが降着円盤面を点状に暖めているのかもしれない。いずれにしろ、この問題の解決の鍵を握るのは、軟X線放射と硬X線放射との相関ではないかと我々は考えている。軟X線放射は、狭い軟X線放射領域をもちつつ、ベキ型の硬X線成分をも実現するようなものでなくてはならない。

6. 今後の展望

以上のように、AGNの中心奥深い場所で起こる現象が「あすか」によるX線観測によって少しずつ明らかになってきた。ブラックホールや降着円盤はどうやら本当にありそうだ。だが、AGNの

中心領域の研究はまだまだ予断を許さない。

まず、一口に AGN といっても、様々なタイプのものが存在する。セイファート銀河という一つのクラスの中心領域を考えるだけでも、普通の 1 型セイファート銀河や NLS 1, そして、ここでは述べななかったが、中心の活動性が低い低光度 AGN などがある。このような中心核の多様性の本質は何なのだろうか？

また、鉄輝線放射領域が中心付近の数 $10R_s$ という狭い領域に集中しているという事実は、NGC 5548 という著名な 1 型セイファート銀河の X 線-紫外-可視同時観測から得られた「紫外-可視放射は、降着円盤に照射された X 線放射の再放射によるものである」という結論⁹⁾と矛盾するように見える。紫外-可視放射の同時変動はどうやって説明できるのだろうか？

NLS 1 に関してはまだまだ観測が十分でないが、2~3 年の期間に 70 倍と 400 倍という大きな振幅の変動を示す天体が 1 例ずつ報告されている^{9),10)}。これらの変動が IRAS 13224-3809 でみられた日程度の短時間変動なのか、年程度のゆっくりとした変動なのかはわかっていないが、ある割合の NLS 1 は突発的な変動を示す(トランジェントな?)AGN であると思われる。系内ブラックホール候補天体との類似から、NLS 1 はハイ・ステートの AGN である、という見方もささやかれているが、それを検証するには、多くの NLS 1 で X 線観測を行ない、変動の一般的特徴を明らかにしていく必要がある。

ここで述べた以外にも、AGN の中心領域をめぐる研究にはまだまだ問題が山積している。新しい結果が得られることによって問題が増えてしまった、といっても過言ではない。しかし、転ずればそれは、やりがいのあるテーマが沢山あるということである。問題点は未解明の神秘への入口であり、それを切り開くことに研究の楽しさがあるわけだ。

最後に、この研究は、紀伊恒男、榎野文命、井

上一各氏をはじめとする多くの方々との共同研究で実現したものである。この場を借りてお礼をいたい。また、この研究は「あすか」という素晴らしい衛星があつてはじめて実現したものである。「あすか」の開発と運用に携わった多くのスタッフ、大学院生、メーカーの皆さんの努力と情熱に心から感謝したい。

参 考 文 献

- 1) Fabian, A. C., Rees, M. J., Stella, L., White, N. E., 1989, MNRAS 238, 729
- 2) 井上 一, 1995, 天文月報第 88 卷 11 号, p 478
- 3) Otani, C., 1995, 博士論文, 東京大学
- 4) Tanaka, Y., et al., 1995, Nature 375, 659
- 5) Boller, Th., Brandt, W. N., Fink, H. H., 1995, A & Ap, in press
- 6) Otani, C., Kii, T., Miya, K., 1995, in 'Rotogenstrahlung from the Universe', in press
- 7) Fabian, A. C., Rees, M., 1979, in X-ray Astronomy, eds Baity W. A., Peterson L. E. (Cambridge Univ. Press, Cambridge) p. 381
- 8) Clavel, J., et al., 1992, ApJ 393, 113
- 9) Brandt, W. N., Pounds, K. A., Fink, H. H., 1995, MNRAS 273, L47
- 10) Grupe, D., et al., 1995, A & Ap 300, 21

The Central Region of Active Galactic Nuclei Observed in X-ray Band

Chiko OTANI

Cosmic Radiation Laboratory, The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN)

2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-01

Abstract: There is a supermassive blackhole with an rotating accretion disk at the center of the Active Galactic Nucleus. The intense X-ray emission radiated at the center gives us the information on the phenomena near a blackhole. Here we present a view of the central region of the Active Galactic Nuclei from the recent X-ray observations of Seyfert 1 galaxies with the ASCA satellite.