

宇宙 X 線背景放射と隠された活動銀河中心核

— 「あすか」衛星によるサーベイから得られた結果を中心として—

秋山正幸

〈国立天文台ハワイ観測所 Subaru Telescope, NAOJ, 650 North A'ohoku Place, Hilo, HI, 96720〉
e-mail: akiyama@subaru.naoj.org

上田佳宏

〈宇宙科学研究所 〒229-8510 相模原市由野台〉
e-mail: ueda@astro.isas.ac.jp

太田耕司

〈京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉
e-mail: ohta@kusastro.kyoto-u.ac.jp

「あすか」衛星によるハード X 線帯域 (2–10 keV) でのサーベイの可視同定観測から得られた結果について、「チャンドラ」「XMM ニュートン」X 線衛星による結果とあわせてレビューする。「あすか」衛星によるサーベイからは 100 個以上の活動銀河中心核 (AGN) が発見された。中心核が隠された 2 型 QSO (クエーサー) は、2 型セイファート銀河と 1 型セイファート銀河の存在数比から予測されるほどは多数は存在しなかった。このことは吸収を受けた AGN の割合が中心核の光度が大きくなるに従い減少していることを示唆している。QSO とセイファート銀河では中心核付近の吸収物質の構造が異なることを反映しているのかもしれない。

1. これまでに見つかった QSO は 氷山の一角？ —宇宙 X 線背景放射からの示唆

宇宙 X 線背景放射とは X 線波長域で見える全天からの一様光成分のことである。1962 年にはじめてその存在が明らかにされて以来¹⁾、その起源を解明することは X 線天文学の重要な課題の 1 つとなっている。その後の観測から、マイクロ波における 3 K 宇宙背景放射とは違い、宇宙 X 線背景放射は個々の X 線源の重ね合わせが分解されずに見えている事がわかってきた。最近の「チャンドラ」X 線衛星を用いた高い空間分解能の非常に深い観測によってハード X 線 (光子のエネルギーで 2–10 keV のエネルギー帯域) の宇宙背景放射の 80 から

90 % が点源に分解された²⁾。これらの点源の大部分は活動銀河中心核 (Active Galactic Nucleus, 以下 AGN) であると考えられている。実際、「ローサット」X 線衛星によって 0.5–2 keV のソフト X 線帯で検出された X 線点源の 80 % は可視波長域での同定観測により AGN であることがわかっている³⁾。X 線背景放射への寄与は、銀河団、楕円銀河、星形成銀河に付随する高温ガスや銀河系内の星からの分もあるが、X 線のエネルギーが高くなるほど AGN の占める割合が多くなり、最も主要な成分となっている。

これまでの経緯から AGN の中でも中心核光度の小さいものはセイファート銀河、中心核光度の大きいものは QSO (クエーサー) と呼ばれる。この分類の大まかな境界はハード X 線光度 (2–10 keV)

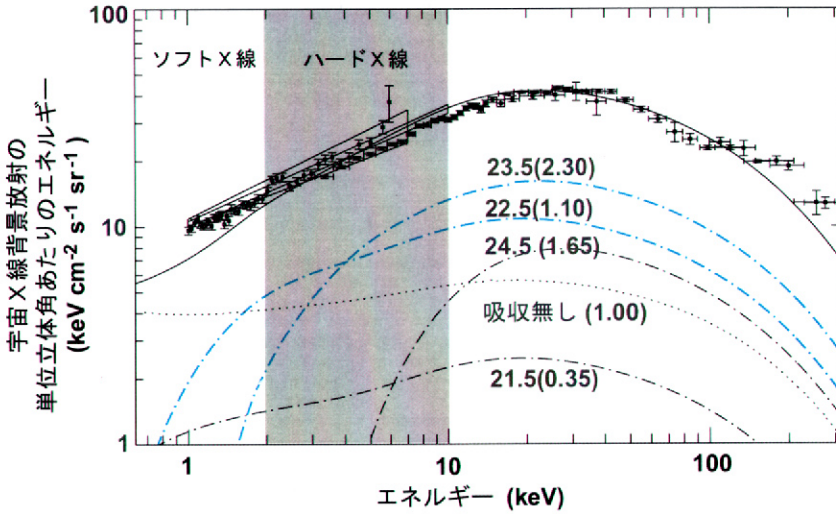


図1 宇宙X線背景放射のスペクトル（データ点）とモデル（実線）の比較⁴⁾。モデルによるいろいろな吸収量のAGNの寄与の内訳はその下に点線と一点鎖線で示されている。それぞれの線の上の数字は水素柱密度の対数で、X線での吸収量を示している。また、それぞれの吸収量のAGNの存在数比が括弧内に示されている。「吸収無し」は吸収を受けていないAGNからの寄与を表しており、存在数比はその個数で規格化されている。

で $10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ に相当する。セイファート銀河には2つの型があり、1型のセイファート銀河と呼ばれるものは、可視波長域の許容輝線において 3000 km s^{-1} 以上の速度幅を持つ幅の広い輝線と 1000 km s^{-1} 以下の速度幅の狭い輝線を示す。一方、2型のセイファート銀河は速度幅の狭い輝線のみを示す。この型の違いは、銀河の中心核付近のガス雲が高速運動している領域（ここから線幅の広い輝線が出てくる）とそれを取り巻いてドーナツ状に分布する星間ガスとダスト（ダストトラスと呼ばれている）が存在していると考えると統一的に解釈できる。すなわち、1型はドーナツの穴の方向から直接中心核を見ているもの、2型はドーナツの側面の方向から見ていて、中心核への視線上にダストトラスがあり中心核が「隠されている」もの、と考えることができる。この解釈は、「セイファート銀河の統一モデル」と呼ばれ、現在広く受け入れられている考え方である。

宇宙X線背景放射のスペクトルはAGNの大部分が、

隠された2型AGNであることを示唆している。このことを図1を用いて説明しよう。図1は宇宙X線背景放射の観測スペクトル（データ点）とそのモデルスペクトルの一例である⁴⁾。モデルは、吸収を受けていない1型AGNからの寄与（点線）と、いろいろな量の吸収を受けた2型AGNからの寄与（一点鎖線）の内訳と、これらを全部

考慮して足し合わせたもの（実線）を示している。（宇宙論的な距離に存在するAGNの寄与も考慮して足し合わせた。）「吸収無し」と示された点線（1型AGNからの寄与を足し合わせたスペクトル）は、ほぼ平らなスペクトルを持ち、宇宙X線背景放射のスペクトルの形とは全く異なることが見てとれる。このことは、1型AGNだけでは、宇宙X線背景放射の起源を説明することができないことを示している。では2型のAGNはどうであろうか？ 図1では吸収を受けたAGNからの寄与が一点鎖線で示されており、その吸収量を水素の柱密度の対数で表示してある。例えば、視線上で $10^{23.5} \text{ cm}^{-2}$ の水素柱密度をもつセイファート銀河の典型的なスペクトルを考えると、可視域ではガスに付随するダストによる減光が著しく、2型セイファート銀河に分類される。X線領域では、ガスに含まれる重元素による光電吸収によってソフトX線が選択的に吸収され、相対的にソフトX線の強度が弱くハードX線で強いスペクトル（よく「硬い」と表現される。可視域でのダストによる減光と違い「青く」なる。）として観測される。



その結果、図1にあるように、20から30 keV 附近にピークを持つスペクトルとなる。これは、宇宙X線背景放射のスペクトルの形と非常によく似ていることがみてとれる。つまり、2型AGNが宇宙X線背景放射に大きく寄与していることが強く示唆されるのである。

図1には、いろいろな吸収量を持つAGNからの背景放射への寄与と同時に、それぞれの吸収量を持つAGNの存在数比のモデルも示されている(括弧内の数字)。存在数比は「吸収を受けていない」1型AGNの個数で規格化されている。たとえば $10^{23.5} \text{ cm}^{-2}$ の水素柱密度を持つAGNは吸収を受けていないAGNの2.3倍存在することが必要である。可視域で2型と分類されるAGNの吸収量は、水素柱密度で $10^{22.5} \text{ cm}^{-2}$ 程度以上なので、このモデルによればAGNのうち約80%が2型AGNであるとすると宇宙X線背景放射のスペクトルがうまく説明できるということを示している。AGNの大部分が吸収を受けているという要請は、宇宙X線背景放射のスペクトルを吸収を受けたAGNの混ぜ合わせで説明しようとする限りモデルにはほとんど依存しない。

では、本当に、2型AGNは1型AGNの4倍も存在するのだろうか？ 近傍宇宙における銀河赤方偏移サーベイで見つかったセイファート銀河のうち80%は幅の狭い輝線のみを示す2型セイファート銀河である⁵⁾。つまり光度の小さいAGNでは2型AGNの割合は宇宙X線背景放射に必要とされる割合と一致している。一方でAGNでも光度の大きいQSOになると、これまで見つかったQSOはほぼすべて幅の広い輝線を示す、1型セイファートに対応する1型QSOである。2型QSOと言える天体はほとんど見つからない。上に引用した宇宙X線背景放射の起源のモデルはこれまでに見つかった1型QSOの4倍以上が隠された2型QSOとして宇宙に存在することを予測する。つまり、これまでのQSOサーベイで見えてきた種族はQSO全体の氷山の一角でしかない可能性がある。

2. ハードX線による2型QSOの発見

「あすか」以前のQSOサーベイは、主に紫外波長域で明るい天体を探す、幅の広い輝線を対物プリズムで探す、ソフトX線源を探す、といった方法で行われてきたが、これらの方法では2型QSOを捉えることは難しい。たとえば、宇宙X線背景放射のモデルでもっとも寄与が大きいとされる 10^{23} cm^{-2} 程度の水素柱密度の吸収を受けたAGNは、ソフトX線では2桁以上の減光を受けることになり、捉えることは難しい(図1)。実際、ソフトX線のサーベイで見つかったAGNのほとんどは1型AGNである³⁾。また、この水素柱密度は銀河系のガスダスト比を用いて換算すると可視域でのダストによる減光量で50等に相等し、中心核からの紫外線や幅の広い輝線も完全に吸収されてしまうはずである。2型セイファート銀河から推測すると、2型QSOでも可視域の連続光は母銀河からの寄与がほとんどで、AGNの幅の狭い輝線のみが見えると考えられる。さらに中心核が減光しているために同じ程度の活動性を持つ1型QSOに比べれば可視波長域では暗く、見つけることは困難であると予想される。

ハードX線を用いた探査は隠されたAGNを検出する上で有効である。「あすか」、「チャンドラ」、「XMMニュートン」衛星で観測できる2-10 keVのハードX線を用いれば中心核への吸収量が 10^{23} cm^{-2} のAGNも捉えることができる。宇宙X線背景放射のエネルギー分布のピークは30 keVあたりにあるが、図1に示したモデルに基づくならば10 keV以上の宇宙X線背景放射に寄与している天体の大部分が2-10 keVのサーベイだけで捉えられることが予測される。従って、このバンドでのサーベイで見つかった天体で、宇宙X線背景放射の起源について制限が付けられると考えられる。

宇宙X線背景放射を個々のX線源に分解し、2型QSOの存在数を明らかにするために、我々は「あすか」を用いたAGNサーベイをいくつか進めてきた。

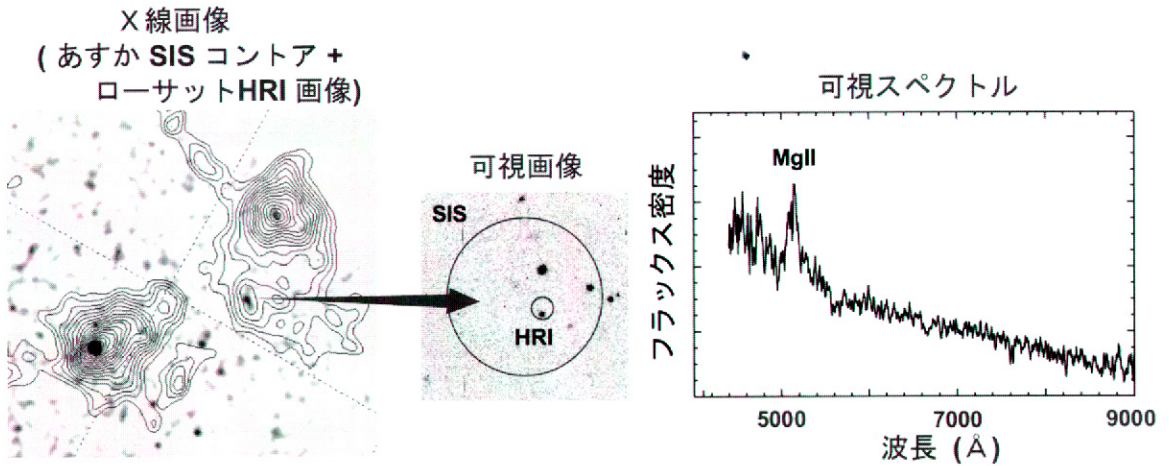


図2 可視同定過程の一例(「あすか」広域探査(LSS)で見つかった赤方偏移が0.8の1型QSO)。(左)「あすか」によるX線での強度分布(コントア, SIS(2–7keV))と「ローサット」衛星による強度分布(グレースケール, HRI(0.5–2keV))を重ねたもの。(中央)「あすか」X線源のエラーサークル内の可視画像。小さい円は「ローサット」HRIによるエラーサークル。HRIのデータによりより確実に可視対応天体が特定された例。(右)ハワイ大学2.2m望遠鏡で得られた可視スペクトル。可視スペクトルによって赤方偏移(距離)と正体(1型QSO)が分かる。距離がわかると、このAGNの中心核光度、中心核への吸収量といった物理量が推定できる。

X線でのサーベイ観測から点源を検出し、X線源の位置に対して可視撮像観測を行って可視対応天体の候補をリストアップし、可視分光観測によって対応天体を同定するというものである。図2に可視同定過程の一例を示した。可視対応天体を同定する上で問題となるのは、「あすか」の検出限界付近でのX線源の位置決定精度である。位置精度は1分角程度(図2のSISと示された円)で、そのエラーサークルの中には可視域でいくつかの天体が見えることである。この問題を解決し、可視対応天体の不定性を無くすために、いくつかの工夫と努力を行った。たとえば、重要なX線源に対しては、空間分解能の高い「ローサット」に搭載されたHRIという観測装置(「チャンドラ」が打ちあがってからはその搭載観測装置であるACIS)を用いて個別のX線源の追観測を行いX線源の位置不定性を非常に小さくした。

可視同定プロジェクトは、X線研究者と可視研究者の協力のもと、「あすか」性能確認観測で

1993年に行われたやまねこ座領域での深探査(ディープサーベイ)の可視同定から始まった。このX線サーベイのハードX線での検出限界は「あすか」以前の100倍も深い。可視同定観測は「あすか」搭載の観測機器であるSIS(X線CCDカメラ)のハードバンド(2–10 keV)で検出されたX線源を対象に行った。可視撮像観測には木曾のシュミット望遠鏡を用い、1995年にはキットピーク天文台2 m望遠鏡を用いて可視分光観測を行った。その結果、数個のX線源が可視同定された。そのうちの1個、相対的にエネルギーの高いバンドで強度の大きな「硬い」スペクトルを持つX線源、が赤方偏移(z)0.9にある幅の狭い輝線のみを示すAGNに同定された。「硬い」X線スペクトルと幅の狭い可視域輝線という特徴は近傍宇宙の2型セイファート銀河に似ている。が、ハードX線で見た中心核光度は $7 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ にも達し、2型QSOと呼べるものであった。これはハードX線を用いて発見された2型QSOの第1号となった⁶⁾。

3. 2型 QSO は多数存在するのか？

3.1 「あすか」による大規模サーベイ

2型 QSO の存在数を定量的に見積もるには、ディープサーベイで得られたサンプルでは数が少ない。またディープサーベイの検出限界は「あすか」のコンフュージョンリミット^{*1}に近いので、X線源の検出の不定性が大きい。そこで、われわれはディープサーベイよりも5倍程度浅い検出限界で、しかし視野としては76倍広い5.4平方度の連続した天空をサーベイする「あすか」広域探査 (Large Sky Survey; 以下「あすか」LSS) を行い、その可視同定を進めた。1993年から1995年にかけて「あすか」によって行われた観測で、ハードX線バンド (2–10 keV) で34個のX線源が検出された⁷⁾。これらのX線源の平均スペクトルは1型 QSO のものより有意に硬く、宇宙X線背景放射のスペクトルに近いものであった。これは宇宙X線背景放射のスペクトルを硬くしている種族が十分に十分な大きさのサンプルとして捉えられたことを意味している⁸⁾。

こうして検出されたX線源について、パロマー天文台スカイサーベイプレート (POSS プレート) のデータを用いて可視対応天体の候補をリストアップした。これらの候補天体を、マウナケア山頂にあるハワイ大学2.2 m 望遠鏡を中心に、カラーアルト天文台やキットピーク天文台の4 m 望遠鏡等を用いて分光観測を行った。これにより33個のX線源の正体が特定された^{9), *2}。図3 (左) に「あすか」LSS のX線源のX線フラックスと可視対応天体の等級の分布を示しておいた (青四角)。ハードX線での検出限界は「あすか」以前のHEAO 1衛星によるサーベイの100倍深く、可視対応天体は最も暗いもので22等に達した。

見つかったAGNの赤方偏移とハードX線光度の分布を図3 (右) に載せた (青四角)。赤方偏移が0.4までのセイファート銀河と赤方偏移が2までのQSOがあわせて30個同定された。赤方偏移0.4以下の領域では1型セイファート銀河8個と2型セイファート銀河5個が発見された。水素柱密度で 10^{23} cm^{-2} 程度以上の吸収を受けたAGNは2–10 keVというハードX線を用いても光子を十分に集めることが難しくなること、 10^{23} cm^{-2} 程度の吸収までで考えれば1型と2型は同数程度存在することが予測されていること、を考慮すれば、宇宙X線背景放射のスペクトルのモデルや、近傍宇宙で見ついている1型セイファート銀河と2型セイファート銀河の存在数の比と矛盾しない結果であった。一方、赤方偏移が0.5以上では1型QSOが15個発見されたのに対し、2型QSOはまったくなかった。結局、硬いX線スペクトルを持つX線源、即ち2型QSO候補は、赤方偏移が0.4までの光度の小さい2型セイファート銀河に同定され^{9), 10)}、「あすか」LSSでは2型QSOと呼べるだけの高光度を持つ大きな吸収を受けたAGNは見つからなかった。この結果は、宇宙X線背景放射の硬いスペクトルには2型セイファート銀河の寄与が大きいこと、2型QSOは存在するとしても1型QSOの4倍も存在するというわけではない、ということを示唆している。

2型QSOの存在数についてより強い制限をつけるために、われわれは同じ方法論を適用して、サンプルを拡大することを考えた。残念ながら連続領域のサーベイデータは「あすか」LSSのものが最大でそれ以上大きなサンプルは作れない。そこで、「あすか」の通常の観測で得られたアーカイブデータからその観測で対象となったX線源を抜き取り、その周りの領域を用いてX線源をサーベイすることにした

*1 点源といえども観測光学系によって多少の広がりができてしまう。これを point spread function (PSF) という。サーベイが深くなると、検出できる点源の表面数密度が上がり、PSFで広がった点源同士が重なり合ってしまう。これによって観測の深さの限界が決まる場合にコンフュージョンリミットという。

*2 残りの1個は後の「チャンドラ」による追求観測では検出されず、フェイクソースであった可能性がある。

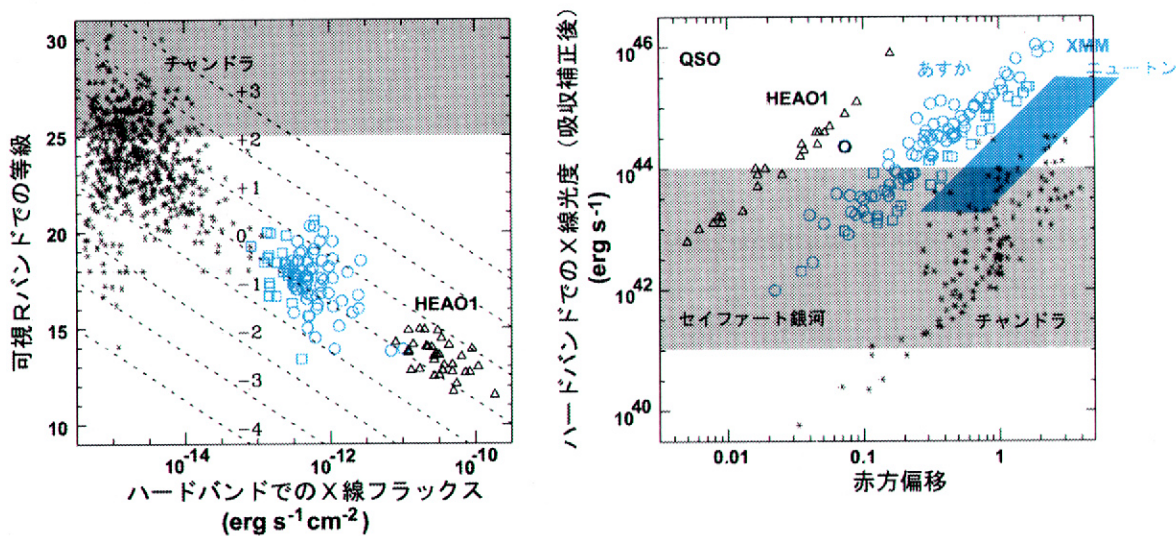


図3 ハードX線セレクトのAGNサンプルの比較。(左) ハードバンド(2-10 keV) フラックスと可視等級の関係。「あすか」(青四角: 「あすか」LSS, 青丸: 「あすか」MSS), HEAO 1 (三角), 「チャンドラ」(星印: 「チャンドラ」ディープフィールドノースとサウス)のサンプル。点線はハードX線, 可視のフラックス比一定の線を示す。上から $\log f_x/f_r = +3, +2, +1, 0, -1, -2, -3, -4$ 。灰色の領域は8-10 mクラス望遠鏡では分光できないRバンドで25等より暗い領域を示している。(右) 同じサンプルの赤方偏移, 光度の分布。記号は同じ。X線光度については中心核への吸収の影響を補正した後の値を載せている。「チャンドラ」のサンプルについては分光で赤方偏移のわかっている天体のみ示している。灰色の領域はセイファート銀河の光度を示している。それより光度の大きいものはQSOである。青色の領域はすばるXMMディープサーベイで見つかるAGNの分布の予想。

(「あすか」中間感度探査 (Medium Sensitive Survey) ; 「あすか」MSS¹¹⁾). 1993年から1996年の間に得られた368視野の「あすか」GIS (ガス蛍光比例計数管) データから作られたX線カタログの中から2-10 keVバンドで十分なカウント数で検出されている87個のX線源をピックアップした。総サーベイ領域は70平方度にも達する。可視同定観測は「あすか」LSSと同じくPOSSプレートをを用いて候補天体をリストアップし, 2000年から2002年にかけてキットピーク2 m望遠鏡, ハワイ大学2.2 m望遠鏡を中心に可視分光観測を行った。暗い可視天体に対してはすばる望遠鏡の微光天体撮像分光観測装置 (FOCAS) を用いた分光観測も行った。この結果, 可視波長域で幅の狭い輝線のみを示し, X線波長域で大きな吸収量, 大きな光度を示す2型QSOが2個新たに発見された¹²⁾。また, 87個すべてのX線源

の正体は明らかになり, うち79個はAGNを起源とするものであった (その他は銀河団, 銀河系内の星であった)。これらのAGNも図3に載せておいた (青丸)。

「あすか」LSSと「あすか」MSSで得られたAGNサンプルの光度, 吸収量の分布を赤方偏移0.6で分けて図4に載せる。赤方偏移0.6以下では吸収の大きい天体のほとんどは幅の広いH β 輝線を示さず (図中バツ印), 2型セイファート銀河に似た性質を持つ。一方, 赤方偏移0.6以上では, 吸収の大きいAGNのほとんどは可視波長域で暗いAGNで (図中黒点付), 同じ (真の) X線光度を持つ1型QSOに比べて2型QSOが可視で暗く見つけることが困難であるという予想どおりの結果が得られている。発見された数を比較すると, サンプルを拡大しても, やはり2型QSOは1型QSOと同数程度も存在しないようである。

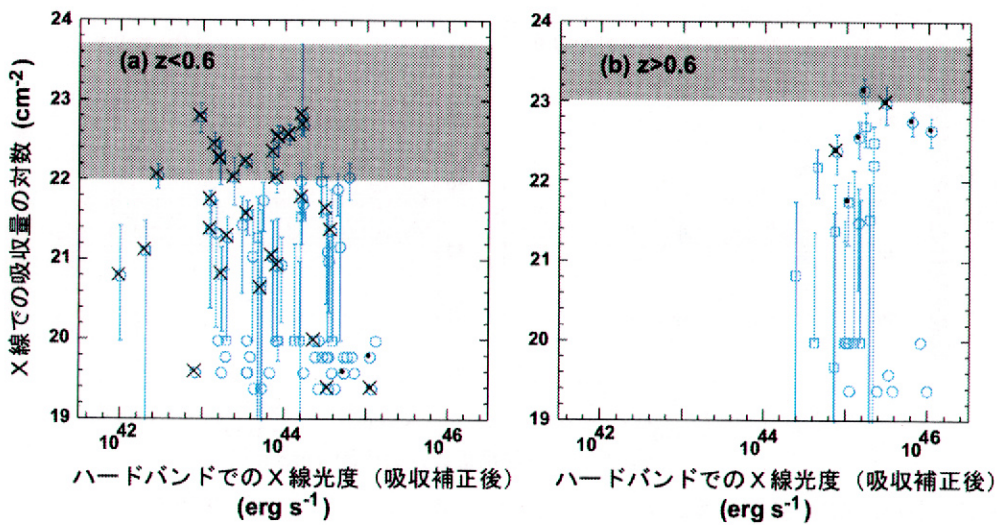


図4 「あすか」LSS (青四角), 「あすか」MSS (青丸) でみつけた AGN の X 線吸収量とハード X 線 (2–10 keV) 光度の関係。X 線光度は中心核への吸収の影響を補正した後の値。(a, 左) 赤方偏移 0.6 以下のサンプル。幅の広い H β 輝線を示さない AGN にはバツ印をつけてある。(b, 右) 赤方偏移 0.6 以上のサンプル。幅の広い輝線を示さない AGN にはバツ印をつけている。両方の図とも X 線可視光度比の大きい AGN (同じ X 線フラックスに対して可視で暗いもの) には黒点をつけてある。灰色の領域にあるサンプルを X 線で吸収された AGN として、図 5 では扱っている。

さらに、我々は非常に大きな吸収を受けた AGN を選択的に捉えることを目指して、「あすか」で見つかった X 線源の中でも非常に硬い X 線スペクトルを持つより暗い X 線源をピックアップして、「チャンドラ」による追求観測を行った。高い空間分解能によって、可視対応天体は不定性なく決定された。対応天体に対して可視分光観測を行うと、やはり非常に硬いスペクトルを持つ X 線源は、比較的赤方偏移の小さい (0.5 以下の) 2 型セイファート銀河であった¹³⁾。やはり、宇宙 X 線背景放射のスペクトルを「硬く」しているのは、遠方の 2 型 QSO ではなく、比較的近い 2 型セイファート銀河であることを示唆していると考えられる。

3.2 吸収を受けた AGN の割合

ここでは、これまでに大まかに見えてきた 2 型 QSO が少ないという傾向を、吸収を受けた AGN の割合の光度依存性として定量的に見てみたい。サンプルとしては「あすか」LSS, 「あすか」MSS に

ロックマン=ホールと呼ばれる銀河系の吸収の非常に小さい領域で行われた「あすか」ディープサーベイの結果を合わせている。吸収を受けた AGN の割合の光度依存性をグラフにして図 5 に載せた。図 5 (a) では赤方偏移が 0.6 以下の領域で、X 線での吸収量が 10^{22}cm^{-2} より大きい AGN の割合 (青四角) と可視波長域で幅の広い H β 輝線を示さない AGN の割合 (青丸) を載せた。図 5 (b) では赤方偏移が 0.6 以上の領域で、X 線の吸収量が 10^{23}cm^{-2} より大きい AGN の割合を青四角で載せた。(この赤方偏移では観測した可視スペクトルの範囲に H β 線が入らない。) 図 5 (a) を見ると、吸収を受けた AGN の「見かけの」割合は光度が大きくなるにしたがって減少する傾向にあることがわかる。H β 輝線を基準にした場合でも光度が大きくなるにつれ割合が減る傾向が見られる。つまり、X 線光度で $10^{44} \text{erg s}^{-1}$ 以下のセイファート銀河で得られている 2 型セイファート銀河と 1 型セイファート銀河の比率は、より光度の大きい QSO にはそのまま

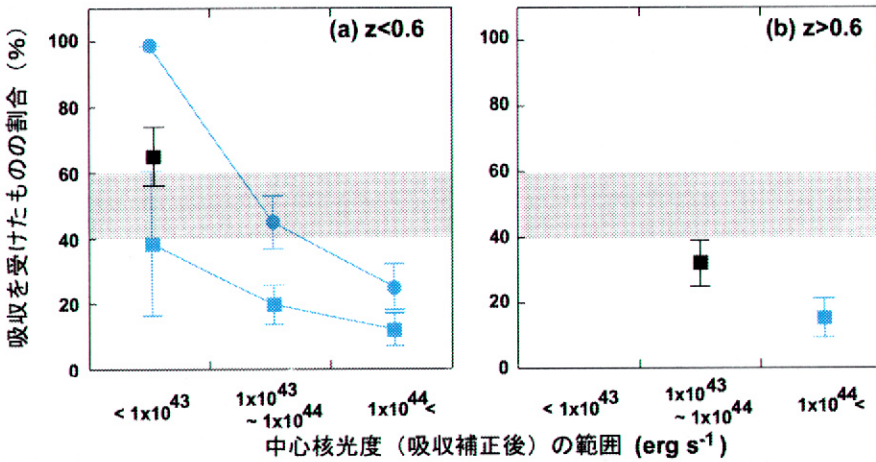


図5 吸収を受けたAGNの割合の光度依存性。X線光度は中心核への吸収の影響を補正した後の値。青四角はあすかサンプルのX線スペクトルに基づいた割合、青丸は可視スペクトルに基づいた割合。黒四角はチャンドラディープフィールドノースのサンプルから求めた割合。灰色の領域は近傍のセイファート銀河の中心核に対する吸収量の分布から予想される吸収を受けたものの割合。ハードX線でも 10^{23}cm^{-2} より大きい吸収を受けたものは捉えにくくなるので、観測される割合は80%にならないことに注意。

適用できず、QSOでは2型QSOの割合はセイファート銀河で見られるほど大きくはないと考えられる。

2型AGNの割合が光度に依存するという結果は、単純に解釈すれば光度が大きくなると中心核の周りにあるダストトーラスの開口角が大きくなると見ることができる。これは光度が大きくなると、中心核からの光の放射によって、内側のダストトーラスが破壊される、といったことを示唆しているのかもしれない。ダストトーラスの厚さ構造が超新星爆発によるエネルギー流入で支えられているとするモデルでも、中心ブラックホールの質量が大きく光度が大きいと開口角が大きくなることが予想されている¹⁴⁾。原因はともあれ、統一モデルの単純な外挿は正しくない可能性があるということである。AGN統一モデルのより広いパラメータ範囲での検証が必要である。

隠されたAGNの存在数についてはあすかによるサーベイ観測によってようやく大まかな傾向（光度が大きくなると吸収を受けているAGNの割合が減る）を定量的な議論へと進めることが始まったばかりである。図5であげた「見かけ」割合を「実際

」割合にするには、検出限界が中心核への吸収量に依存すること（例えば、 10^{24}cm^{-2} 以上の柱密度の吸収を持つAGNに対する検出限界は非常に浅い）、さらにその依存性が赤方偏移によって変化すること（例えば、 10^{24}cm^{-2} の吸収を受けた赤方偏移が1のAGNは、観測者から見れば 10^{23}cm^{-2} 程度の吸収を受けている程度の硬さにはしか見えない）を補正しなければならない。この効果を考慮して、吸収を受けたAGNと吸収を受けていないAGNの光度関数を定量化し比較することは現在進行中である。

3.3 新たな問題提起

「あすか」で発見された光度が大きいAGN(QSO)の中には、X線では隠されているが可視光では幅の広い輝線を示すAGNが見つかった。たとえば、先述のやまねこ座のディープサーベイで発見された2型QSOはチャンドラ衛星を用いて10万秒にわたる観測が行われ、より詳細なスペクトルデータが得られた。このデータから中心核はX線で見たときに $2 \times 10^{23}\text{cm}^{-2}$ の柱密度の吸収を受けて

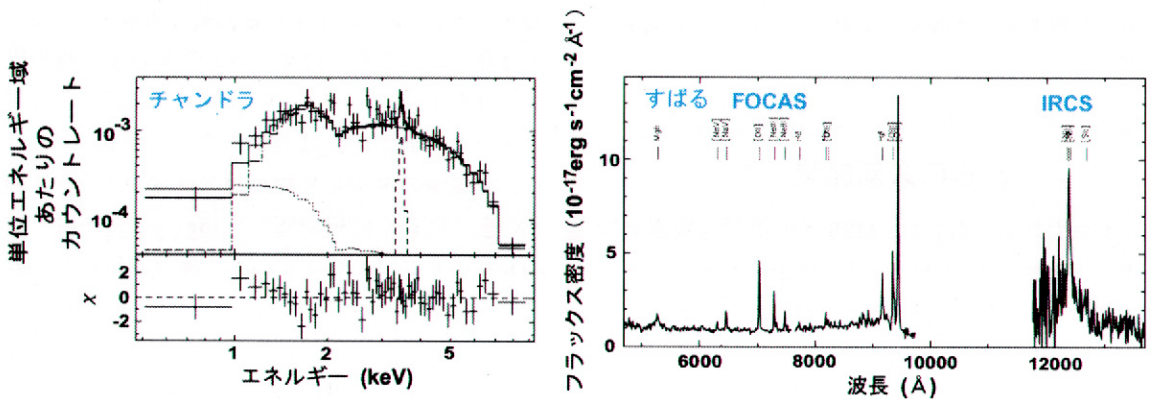


図6 (左) 2型 QSO, AXJ08494 + 4454 のチャンドラ衛星による X 線スペクトル. 柱密度 $2 \times 10^{23} \text{cm}^{-2}$ の吸収を受けたべき乗則でよくフィットされる. (右) すばる望遠鏡による可視 (FOCAS による) 近赤外 (IRCS による) 波長域のスペクトル. 近赤外波長域に赤方偏移した $\text{H}\alpha$ 輝線に強い幅の広い (10000km s^{-1}) 成分が発見された.

いることがわかった (図6左)¹⁵⁾. 一方, よりよい可視近赤外スペクトルを得るために, すばる望遠鏡の可視分光器 FOCAS, 近赤外線分光器 IRCS を用いた観測も行った¹⁵⁾. IRCS による観測では $\text{H}\alpha$ 線に幅の広い輝線が検出された (図6右). (これにより, この2型 QSO 「候補」は厳密な意味での2型ではなく正確には1.9型ということになった.) 可視波長域での減光量は, 幅の広い $\text{H}\alpha$ 輝線の検出と, 可視近赤外での連続光のエネルギー分布から, Vバンドで1から3等程度と推定される. この減光量は X 線での吸収量から予想される減光量130等よりはるかに小さい. こういった食い違いはこの天体に独特のことではない. 「あすか」MSS で見つかった最も遠い2型 QSO 候補も X 線での吸収量は $1 \times 10^{23} \text{cm}^{-2}$ 程度であるのに対して可視波長域の減光量は3等程度であると見積もられている. また赤方偏移が0.6より大きい領域に見つかった QSO では X 線から求まる吸収量が 10^{23}cm^{-2} 近いにもかかわらず幅の広い輝線を示すものがあった (図4 (b)で吸収量が大きくバツ印のついていないもの). このことは QSO における, X 線での吸収量と可視での吸収量が, 銀河系のガスダスト比を仮定した計算とは2桁も違っていることを示してい

る. このような食い違いは近傍のセイファート銀河においてもいくつか報告があるが, 特に光度の大きな QSO では普通起こっていることのようにである. この違いが QSO の中心核付近の構造に起因するとすれば, X 線は可視光よりもより狭い領域から出ていてその領域だけが大きな吸収を受けているとして解釈できる. 或は, QSO の中心核付近でのガスダスト比が, 中心からの輻射によってダストが蒸発するなどの原因で, 銀河系のものとは全く異なっていると考えることも出来る.

「あすか」LSS, 「あすか」MSS で見つかった, X 線で吸収を受けているが可視で幅の広い輝線を示す QSO に対する「XMM ニュートン」による X 線スペクトル観測プロジェクトは現在進行中で, この結果が出れば X 線での「硬さ」がどの程度の量の吸収によるのかをより精度よく決定できるはずである. 一方で可視近赤外波長域では, キットピーク 2 m 望遠鏡を用いた近赤外測光観測を行い, 可視近赤外波長域でのスペクトルエネルギー分布からダスト吸収量を見積もることも行っている. さらに $\text{H}\alpha$, $\text{H}\beta$ の幅広い輝線の近赤外分光観測 (赤外線波長域へと赤方偏移している) もすばる望遠鏡に提案しており, X 線での吸収量と可視波



長域でのダスト吸収量の比較が他の QSO においてもより精度よく検討できるようになるだろうと考えている。

4. 「チャンドラ」, 「XMM ニュートン」からの最新結果

われわれが「あすか」MSS の可視同定観測をスタートし始めた 1999 年, 「あすか」と同じハード X 線バンドでより高い空間分解能で撮像できる「チャンドラ」が 7 月に, より広い有効面積をもつ「XMM ニュートン」が 12 月に相次いで打ち上げられた。これらの衛星を用いたディープサーベイはすぐに実行され, 特に「チャンドラ」ではハッブルディープフィールドの領域でこれまでに 200 万秒 (単純計算で 23 日間!) にも及ぶ観測が行われた (チャンドラ = ディープフィールド = ノース (CDFN)). これによりハード X 線バンドの X 線宇宙背景放射のほとんどが分解された (ちなみに「あすか」では 30% 程度). 可視同定観測もケック望遠鏡を筆頭に世界の 8-10 m 級望遠鏡を導入して進められており, CDFN ではすでに 200 個近い X 線源が分光によって同定されている¹⁶⁾.

これらのディープサーベイによって「あすか」で見つかったよりも遠方の 2 型 QSO 候補も発見されつつある¹⁷⁾. 非常に遠方の 2 型 QSO 候補が各ディープサーベイの視野に 1 個ずつ程度見つかることから, 2 型 QSO は 1 型 QSO と少なくとも同程度の数が存在するという推定もある¹⁷⁾. 一方で, 2 型 QSO は, モデルが予測するほどは多数は存在しないと言う結果もある. 例えば「チャンドラ」や「XMM ニュートン」でこれまでに赤方偏移の制限が付いた AGN の赤方偏移分布は赤方偏移で 0.5 から 0.7 あたりにピークを持っている¹⁸⁾. この分布は宇宙 X 線背景放射のモデルから予測されるよりも近傍に偏っており, このことは遠方の 2 型 QSO よりも近傍の 2 型セイファート銀河の寄与が予想より大きいことを支持している.

「チャンドラ」や「XMM ニュートン」のディ-

プサーベイのサンプルの X 線源の正体を「あすか」のサーベイのように完全に分光的に明らかにすることは難しい. これらのサーベイの X 線での検出限界は「あすか」でのサーベイの 100 倍も深く, 可視対応天体は典型的には 100 倍暗い (図 3 (左)). 特に, X 線源の中でも X 線可視光度比が大きいもの (X 線で明るく可視で暗い, $\log f_X / f_R > +2$) は CDFN のサンプルでは 8-10 m 級望遠鏡の分光観測限界 (R バンドで 25 等) よりも暗い. 「あすか」LSS, 「あすか」MSS で見つかった AGN のうちで赤方偏移が大きく, 大きな吸収を受けた 2 型 QSO の多くは X 線可視光度比の大きい天体であったことから考えると, CDFN のサンプルの X 線可視光度比の大きい天体も 2 型 QSO の重要な候補であると考えられる. 測光データから推定された赤方偏移は 1 から 3 程度であり, 光度的にはちょうどセイファート銀河と QSO の境界あたりに相当すると推定されている. 分光的にその正体を明らかにするには次世代 30 m 級望遠鏡の登場を待たなくてはならないだろう.

CDFN で見えてきたサンプルを「あすか」サーベイで得られたサンプルと比べるとどのような違いがあるだろうか. 図 3 に「チャンドラ」で見つかった X 線源の X 線フラックスと可視等級の関係と赤方偏移と光度の関係を載せた. CDFN で見つかった X 線源のフラックスは, 「あすか」で見つかった X 線源のフラックスの 100 分の 1 程度である. 一方, 「あすか」サーベイの領域は「あすか」LSS, 「あすか」MSS の合計で 70 平方度におよび CDFN の約 1000 倍広い. そのため, 「あすか」で見えてきた AGN と CDFN で見えてきた AGN の赤方偏移, 光度分布は全く異なっている. 「あすか」では赤方偏移 0.1 から 2 あたりの QSO が見えているのに対して, CDFN では同じ赤方偏移領域のセイファート銀河やそれよりも低光度の AGN が主に見えている (図 3 (右)). 「あすか」のサンプルと CDFN のサンプルを組み合わせることによってうまく AGN の光度の大きいものから小さいものまでカバーして,

吸収を受けた AGN の割合を議論することができる。上で触れた CDFN のサンプルでも分光観測が届かない天体は「あすか」のサンプルよりも遠方の天体と考えられ、「あすか」がカバーしている比較的赤方偏移の小さい領域については CDFN の分光的な可視同定もかなり完全性が高いことが期待される。よって、それらの未同定の天体が吸収を受けた AGN の割合に与える不定性は小さいと考えられる。CDFN のサンプルから得られた吸収を受けた AGN の割合を図 5 に黒四角で載せておいた。予想通り、より光度の小さい AGN をカバーしている CDFN のサンプルは「あすか」のサンプルよりも吸収を受けた AGN の割合が高い。特に、赤方偏移 0.6 以下では、「あすか」の最も光度の大きい範囲での割合は CDFN の最も光度の小さい範囲での割合に比べて有意に小さく、「あすか」で見えていた傾向と矛盾しない。

5. 将来の展望

5.1 遠方での 2 型 QSO の存在数

ここまでの、吸収を受けた AGN の割合の推定は赤方偏移で 1 程度までの領域に限られており、特に赤方偏移に依存した変化は見られていない。より遠方まで見たときに隠された AGN の割合に違いがあるのだろうか。たとえば、宇宙年齢をさかのぼれば、銀河の形成期に近づき、その中心核付近はより多量のガスが存在する状態にあると考えられる。また多量のガスに包まれた状態から QSO 活動が始まり、中心核からの輻射によって晴れ上がるというような QSO の進化を想定すると赤方偏移をさかのぼると隠された AGN の割合が増えることが予想される。遠方の宇宙における隠された AGN の割合を調べるには「あすか」によるサーベイよりも深く、かつ広い視野のサーベイを行うことが重要である。

すばる望遠鏡の観測所プロジェクトと「XMM ニュートン」の衛星チーム時間の連携によって開始されたすばる XMM ディープサーベイ (SXDS) は、

「あすか」と CDFN の間の深さで 1.3 平方度の領域をサーベイしようというものである。「XMM ニュートン」による 7 視野のディープサーベイ観測はほぼ終了しており、2–10keV のハードバンドにおいて 800 個程度の X 線源が検出されている。この可視同定観測を進めることにより、赤方偏移が 1 から 5 付近で、CDFN に比べてより明るい QSO が多数発見されると考えている (図 3 (右) の青色の領域)。この結果を「あすか」サーベイから得られた結果と比較することにより、隠された QSO の割合の赤方偏移依存性を議論することができるようになるだろう。こういった広い視野のサーベイで見つかる X 線源の分光観測を進めるには、広い視野を持った多天体分光器が必要になる。すばる望遠鏡第 2 期観測装置として 2004 年のファーストライトを目指して製作中の主焦点ファイバー多天体分光器 (FMOS) はこのようなターゲットに大いに威力を発揮するであろう。

5.2 銀河中心ブラックホールの成長過程の解明

すべての銀河はその球状成分 (渦巻銀河のバルジ、楕円銀河の全体) の質量の 0.3% 程度の質量、すなわち太陽質量の 100 万倍から 10 億倍程度、の大質量ブラックホールを中心に持つことが示唆されており、ブラックホールの総質量密度は近傍宇宙において 1 Mpc^3 あたり 10^5 太陽質量程度と見積もられている¹⁹⁾。宇宙 X 線背景放射はこの大質量ブラックホールが銀河中心で成長する際に放射される X 線を宇宙年齢方向に積分して見ていると考えることが出来る²⁰⁾。たとえば、物質がブラックホールへ降着する際の輻射エネルギーへの変換効率を仮定すれば、「チャンドラ」で見つかった個々の AGN の光度から質量降着率をおおまかに推定することができる。この質量降着率をさまざまな光度、赤方偏移の天体に対して足し合わせてやると、近傍宇宙での銀河中心のブラックホールの質量密度が説明できる程度の桁になる。つまり銀河中心



の大質量ブラックホールの成長過程の大部分はハードX線を放射するAGNという形でとらえられるということを示唆している。すなわち、宇宙X線背景放射は銀河中心におけるブラックホール形成からのX線の総和であるというわけである。

宇宙X線背景放射の起源を解明し、銀河中心ブラックホールの成長過程を解明するには、他の波長、特に赤外、サブミリ波長域での情報も重要になってくる。見つかったAGNの中心ブラックホールの質量、中心ブラックホールへの質量降着率を求めるには、そのAGNのX線、可視、赤外、電波の領域でのエネルギー分布とそのモデルが必要になる。このような推定は、見つかったハードX線でのAGN光度関数の進化を物理的に解釈する上で必須となるであろう。SXDSの領域においてはすでにVLAを用いた電波サーベイ、JCMT/SCUBAを用いたサブミリ波サーベイも進行中であり、UKIRT/WFCAMを用いた近赤外線、SIRTIFを用いた遠赤外線サーベイも計画されている。これらの情報をあわせることにより、ハードX線で見つかったAGNのスペクトルエネルギー分布についても情報が得られるだろう。

あすかによる探査プロジェクトは多くのX線、可視波長域の研究者の共同で進められてきました。特に高橋忠幸氏（宇宙科学研究所）、山田亨氏（国立天文台）はプロジェクト初期から多大な貢献をされました。深く感謝致します。

参考文献

- 1) Giacconi R., Gursky H., Paolini F. R., Rossi B. B., 1962, Phys. Rev. Lett. 9, 439
- 2) Brandt W. N., et al., 2001, AJ 122, 2810
- 3) Lehmann I., et al., 2001, A&A 371, 833
- 4) Comastri A., Setti G., Zamorani G., Hasinger G., 1995, A&A 296, 1
- 5) Huchra J., Burg R., 1992, ApJ 393, 90
- 6) Ohta K., Yamada T., Nakanishi K., Ogasaka Y., Kii T., Hayashida K., 1996, ApJ 458, L57
- 7) Ueda Y., Takahashi T., Inoue H., et al., 1999, ApJ 518, 656
- 8) Ueda Y., Takahashi T., Inoue H., et al., 1998, Nature 391, 866
- 9) Akiyama M., Ohta K., Yamada T., et al., 2000, ApJ 532, 700
- 10) Akiyama M., Ohta K., Yamada T., et al., 1998, ApJ 500, 173
- 11) Ueda Y., Ishisaki Y., Takahashi T., Makishima K., Ohashi T., 2001, ApJS 133, 1
- 12) Akiyama M., Ueda Y., Ohta K., Takahashi T., Yamada T., 2002, ApJS, submitted
- 13) Watanabe S., Akiyama M., Ueda Y., Ohta K., Mushotzky R., Takahashi T., Yamada T., 2002, PASJ 54, 683
- 14) Wada K., Norman C. A., 2002, ApJ 566, L21
- 15) Akiyama M., Ueda Y., Ohta K., 2002, ApJ 567, 42
- 16) Barger A. J., Cowie L. L., Brandt W. N., et al., 2002, AJ 124, 1839
- 17) Stern D., Moran E. C., Coil A. L., et al., 2002, ApJ 568, 71
- 18) Hasinger G., 2002, Proc. Symp. "New Visions of the X-ray Universe in the XMM-Newton and Chandra Era", astro-ph/0202430
- 19) Merritt D., Ferrarese L., 2001, MNRAS 320, L30
- 20) Barger A. J., Cowie L. L., Bautz, M.W., et al., 2001, AJ 122, 2177

Cosmic X-ray Background Radiation and Obscured Active Galactic Nuclei

- Based on Results from ASCA Surveys -

Masayuki AKIYAMA

Subaru Telescope, NAOJ

650 North A'ohoku Place, Hilo, HI, 96720

Yoshihiro UEDA

Institute of Space and Astronautical Science

Sagamihara, Kanagawa, 229-8510

Kouji OHTA

Department of Astronomy, Kyoto University

Kyoto, 606-8502

Abstract: Results from optical identifications of 2 -10 keV hard X-ray surveys with the ASCA satellite are reviewed along with results from the *Chandra* and the *XMM-Newton* deep surveys. More than 100 Active Galactic Nuclei (AGNs) have been found with ASCA. The number density of obscured type-2 QSOs is not so large as expected from the type-2 to type-1 Seyfert galaxy number ratio. The result suggests that the fraction of absorbed AGNs decreases with increasing luminosity. It may reflect the fact that structure of absorbing matter around QSO nuclei is different from that of Seyfert galaxies.