

隠された活動銀河中心核と X 線宇宙背景放射

— 「あすか」衛星によるサーベイから得られた結果 —

秋山 正幸 (国立天文台ハワイ観測所、NAOJプロジェクト研究員)

上田 佳宏 (宇宙化学研究所、助手)

太田 耕司 (京都大学宇宙物理学教室、助教授)

Ver. 2002/08/12

The results from optical identifications of 2–10 keV hard X-ray surveys with *ASCA* satellite are reviewed along with results from *Chandra* deep surveys. The bright AGN sample obtained with *ASCA* is still unique for studies of luminous AGN even in the *Chandra XMM-Newton* era. More than 100 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.

あすか衛星による 2-10keV ハード X 線波長域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、チャンドラ衛星による結果と比べながらレビューする。あすか衛星によるサーベイから得られた明るい AGN のサンプルは、チャンドラ、XMM ニュートン衛星で大規模サーベイが行われるようになった今でも、特に光度の大きい AGN の研究においてユニークなサンプルである。あすか衛星によるサーベイによって 100 個以上の AGN が発見された。中心核が隠された 2 型 QSO 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い。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。

1 銀河中心ブラックホールの成長過程は隠されている

1.1 X 線宇宙背景放射と銀河中心ブラックホールの成長過程

X 線宇宙背景放射とは X 線波長域で見える天空の一樣光成分のことである。1962 年にはじめ

て捉えられて以来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 つとなってきた。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、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た。最近の「チャンドラ」衛星を用いた高い空間分解能の非常に深い撮像観測によって 2-10keV ハード X 線の宇宙背

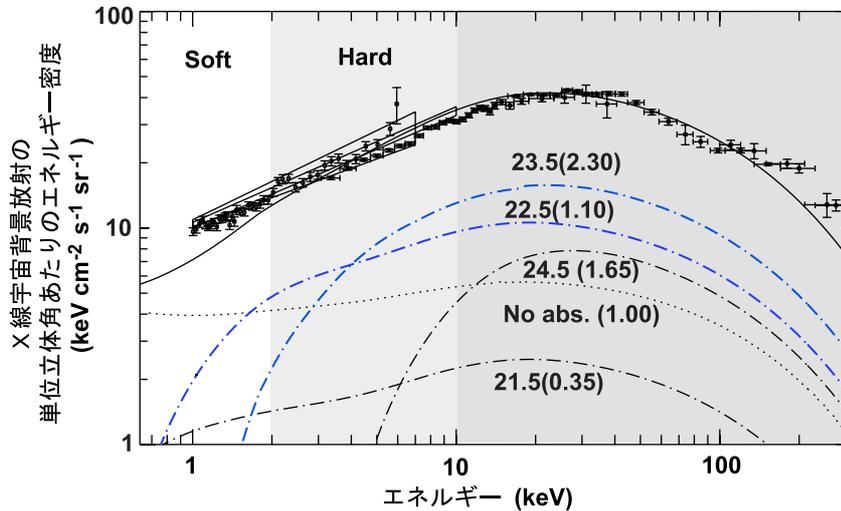


図 1: X線宇宙背景放射のスペクトルの観測データ(データ点)とモデル(実線)の比較⁷⁾。いろいろな吸収量のAGNの寄与の内訳はその下に点線と点破線で示されている。それぞれの線の上の数字は水素柱密度の対数であらわしたX線での吸収量を示しており、それぞれの吸収量のAGNの存在数比が括弧内に示されている。No abs. は吸収を受けていないAGNからの寄与を表しており、存在数比はこの吸収を受けていないAGNの個数で規格化されている。

景放射の80から90%が点源に分解された²⁾。

これらの見つかった点源の大部分は活動銀河中心核(以下AGN)から来ていると考えられている。たとえば、「ローサット」衛星によって発見された0.5-2keVのソフトX線のX線源の80%は可視波長域の同定観測によりAGNを起源としていることがわかっている³⁾。また以下で紹介する「あすか」衛星の探査で見つかった2-10keVハードバンドのX線源でも90%はAGN起源であると可視同定されている⁴⁾。銀河団、楕円銀河、星形成銀河に付随するホットガスや銀河系内の星の寄与もあるが、特にX線のエネルギーが高くなるほどAGNが支配的になる。つまり、X線宇宙背景放射はさまざまな光度、タイプ、レッドシフトのAGNからのX線放射を重ね合わせたものである。

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0.1から0.3%程度の質量、太陽質量の1億から100億倍の質量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、その総質量密度は近傍宇宙において $10^5 M_{\odot} \text{ Mpc}^{-3}$ と見積もられている⁵⁾。X線宇宙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過程を宇宙年齢方向に積分したものと見ることが出来る⁶⁾。「チャンドラ」で見つかった個々のAGNの光度は、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、質量降着率へと換算することができる。この質量降着率をさまざまな光度、レッドシフト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オーダーになる。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という形で捕らえられるということを示唆している。赤外線宇宙背景放射が銀河の形成過程で生じる星形成からの光の総和であるのに対し、X線宇宙背景放射は銀河中心でできるブラックホール形成からの光の総和である。

1.2 隠された2型QSOの寄与

X線宇宙背景放射のスペクトルは大質量ブラックホールの形成の大部分が隠されたAGNで起こっていることを示唆する。2-10keVハードバンドにおいて吸収を受けていない1型AGNのX線スペクトルは1次近似としてフォトンインデックス、 Γ^1 が1.7のパワーローでよく記述される。これに対しX線宇宙背景放射のスペクトルは Γ が1.4のパワーローでよく記述され、1型AGNのものよりもソフトX線で弱く、ハードX線で強い(“硬い”と表現する)。図1にX線宇宙背景放射の観測されたスペクトル(データ点)とそのモデルの一例を載せた⁷⁾。吸収を受けていないAGN(No abs.で示された点線)からの光を足し合わせたスペクトルはX線宇宙背景放射の強度が説明できず、スペクトルの形も合っていないことがわかる。このギャップは吸収を受けハードなX線スペクトルを持つAGNがX線宇宙背景放射に大きく寄与していることで生じると考えられている。図1の実線で示したのが、吸収を受けたAGNをあわせたX線宇宙背景放射のモデルスペクトルである。モデルスペクトルへの寄与の内訳はその下の点破線で示されていて、それぞれの線の上の数字は対数水素柱密度であらわしたX線での吸収量を示しており、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。存在数比は吸収を受けていないAGNの個数で規格化されている。このモデルによればAGNのうち80%程度が大きな吸収を受けたAGNであるとするX線宇宙背景放射のスペクトルがうまく説明できる。吸収を受けたAGNの混ぜ合わせでX線宇宙背景放射を説明しようとする限り、銀河中心ブラックホールへの降着過程の80%は吸収を受けた隠されたAGNで起こっているという要請はそれほどモデルに依存しない。

では、吸収を受け、隠されたAGNは隠されていないAGNの4倍も存在するのだろうか? 中心核光度の小さい、ハードX線光度で 10^{44} erg s⁻¹

以下のAGNであるセイファート銀河には2つの型のセイファート銀河がある。1型のセイファート銀河は可視波長域のスペクトルにおいて、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。一方で2型のセイファート銀河は後者の速度幅の狭い輝線のみを示す。これら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を取り巻くようにドーナツ状に星間ガスが存在しているとすると統一的に解釈できる。現在の解釈の主流(セイファート銀河の統一モデル)では1型と2型は視線方向が違うだけで、1型は直接中心核を見ているもの、2型は中心核付近の視線方向に星間ガスがある場合であると考えられている。近傍宇宙における銀河レッドシフトサーベイで見つかったセイファート銀河のうち80%は中心核領域が隠された2型セイファート銀河であった⁸⁾。つまり光度の小さいAGNでは隠されたAGNの割合はX線宇宙背景放射に必要な割合と一致している。

一方でAGNでも光度の大きい、ハードX線光度で 10^{44} erg s⁻¹以上の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、吸収を受けていない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X線宇宙背景放射の起源のモデルから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が予測される。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ことを示唆する。一方で、隠されたAGNの割合はAGNの中心核光度に依存しており、光度が大きい領域ではその割合が小さい、つまり隠された2型QSOはほとんど存在しないという可能性もある。X線宇宙背景放射に対して、隠された2型QSOがたくさん存在して大きく寄与しているのか、隠された2型セイファート銀河の寄与がモデルの予測よりも大きいのかは、銀河中心のブラックホールの成長がどのようなAGNにおいて起こっているか、を考える上で重要である。

¹ $f_{\nu}/\nu \propto \nu^{-\Gamma} = \nu^{-(1+\alpha)}$

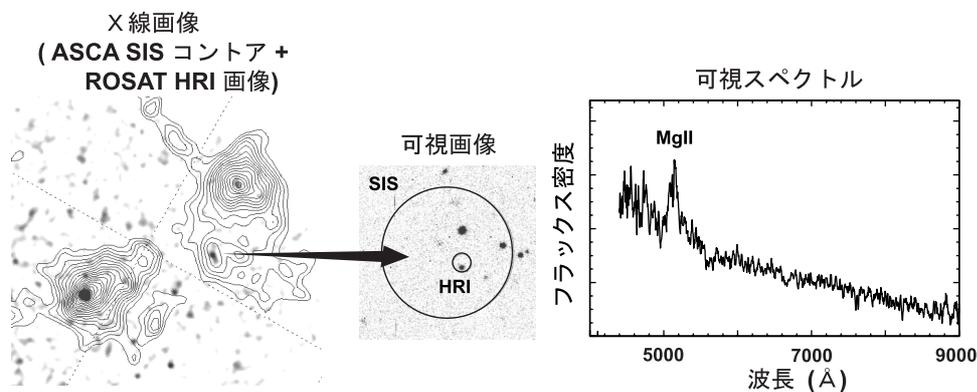


図 2: 可視同定過程の一例(あすか LSS で見つかったレッドシフトが 0.8 の 1 型 QSO)。 (a) 「あすか」 SIS のコントアと「ローサット」 HRI による画像を重ねたもの。 (b) あすかソースのエラーサークルの可視画像。小さい円は HRI によるエラーサークル。 HRI のデータにより可視対応天体が特定された。 (c) ハワイ大学 2 m 望遠鏡で得られた可視スペクトル。可視スペクトルによりレッドシフトが決定することで、AGN の中心核光度、中心核への吸収量という物理量が推定できる。

2 隠された 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、これらの方法では隠された 2 型 QSO を捉えることは難しい。X 線宇宙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 の場合、ソフト X 線では捉えることができない(図 1)。この水素柱密度は可視域の減光量で 50 等にも達し、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。2 型セイファート銀河から推測すると、可視域では連続光は母銀河に支配され、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 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。

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 2-10keV 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。X 線宇宙背景放射のエネルギー分布のピークは 30keV あたりにあるが、図 1 に示したモデルに基づくならば 10keV 以上の X 線宇宙背景放射に寄与している天体の大部分が 10keV 以下のサーベイだけで捉えられることが予測される。10keV 以下のサーベイで見つかった天体を延長すれば、ほぼすべてのエネルギー域の X 線宇宙背景放射の起源について明らかにし、銀河中心ブラックホールの成長過程をトレースすることができる。

X 線宇宙背景放射を分解し、隠された 2 型 QSO の存在数を明らかにするために、われわれは「あすか」を用いた AGN サーベイ計画を進めてきた。図 2 に可視同定過程の一例を示した。X 線でのサーベイ観測データから点源を検出し、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可視対応天体を特定した。可視対応天体を特定する上で問題となるのは、「あすか」の X 線源の位置決定精度が 1 分程度で、それぞれの X 線源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。特に重要な X 線源に対して

は空間分解能の高い「ローサット」HR I(「チャンドラ」が打ちあがってからは「チャンドラ」A X I S)を用いて個別のX線源の追観測を行い、X線源の位置を特定することも行った。

可視同定プロジェクトは1993年に「あすか」性能評価観測で行われたやまねこ座領域でのディープサーベイのX線源から始まった。このサーベイのハードX線での検出限界は「あすか」以前の100倍深く、6個のX線源がS I S(X線CCDカメラ)のハードバンドで検出された。可視分光観測は1995年にキットピーク天文台2m望遠鏡を用いて行われ、そのうちの1個の”硬い”X線源はレッドシフトが0.9にある幅の狭い輝線のみを示すAGNに同定された。この天体は可視波長域のスペクトルでナローラインしか示さず、X線ではソフトX線が吸収を受けた非常に硬いX線スペクトルを示している。これらの特徴は近傍宇宙の2型セイファート銀河に似ている。が、ハードX線で見えた中心核光度は $7 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ 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⁹⁾。この発見は2型QSOのX線宇宙背景放射への寄与が無視できないものであることを示唆している。

3 隠された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の寄与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」のコンフォーシオンリミット²⁾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2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

²⁾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。重なり合う深さのことをコンフォーシオンリミットという。

天空をサーベイするあすかラージスカイサーベイ(LSS)を行った。1993年から1995年にかけて行われた観測によって、ハードX線のバンドで34個のX線源が検出された。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、X線宇宙背景放射のスペクトルに近いものであった。これはX線宇宙背景放射のスペクトルを硬くしている種族がついに捉えられたことを意味している¹⁰⁾。

こうして検出されたX線源の可視対応天体は主にパロマ-観測所スカイサーベイプレート(POSSプレート)のデータを用いて候補天体をリストアップし、1999年にマウナケア山頂にあるハワイ大学2m望遠鏡を用いて分光観測を行った。これにより33個のX線源はその正体が特定された。³⁾そのうち30個はAGNであった。硬いX線スペクトルを持つX線源はレッドシフトが0.4までの光度の小さいセイファート2型に同定された¹¹⁾⁴⁾。あすかLSSでは2型QSOと呼べる天体は見つからなかった。レッドシフトが0.4以下の領域では1型セイファート8個と2型セイファート5個が発見された。水素柱密度で 10^{23} cm^{-2} 以上の吸収を受けたセイファート銀河は2-10keVでは検出しにくいことを考慮すれば、近傍宇宙で見つかっている1型セイファートと2型セイファートの存在数の比と矛盾しない結果であった。一方、レッドシフトが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。これらの結果は、X線宇宙背景放射の硬いスペクトルは2型セイファート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ことはない、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。

³⁾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。

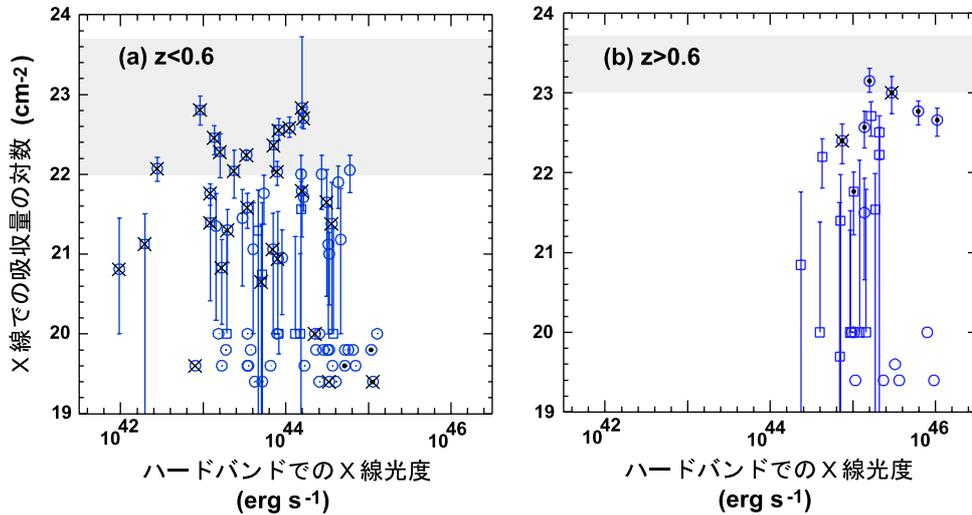


図 3: 「あすか」MSS (青丸)、LSS (青四角)で見つかったAGNのX線吸収量とハードX線光度の関係。(a) $z < 0.6$ のサンプル。幅の広いH β 輝線を示さないAGNにはバツ印をつけてある。(b) $z > 0.6$ のサンプル。幅の広い輝線を示さないAGNにはバツ印をつけている。両方の図ともX線可視光度比の大きいAGNは点をつけている。図5では灰色の領域にあるサンプルをX線で吸収されたAGNとして扱っている。

そこで、「あすか」のポインティング観測でえられたデータからターゲットとなった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(あすかメディアムセンシティビティサーベイ; MSS¹²⁾)。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)のアーカイブデータから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ラージスカイサーベイと同じくPOSSプレート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2m望遠鏡を5晩、ハワイ大学2m望遠鏡を10晩使用して分光観測を行った。暗い可視天体に対してはすばる望遠鏡のFOCASを用いた分光観測も行った。この結果、2個の2型QSO候補があらたに発見された。これらは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を示すAGNで

あった¹³⁾。また、87個すべてのX線源の正体は明らかになり、79個のAGN(3個はBL Lac天体)が新たに発見された(その他は銀河団、銀河系内の星であった)。こうして得られたAGNのサンプルの光度、吸収量の分布をレッドシフト0.6で分けて図3に載せておいた。レッドシフト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、2型セイファート銀河に似た性質を持つ。一方レッドシフト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2型QSOが可視で暗く見つかることが困難であるという予想どおりであった。

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X線バンドを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に移され、特に「チャンドラ」ではハッ

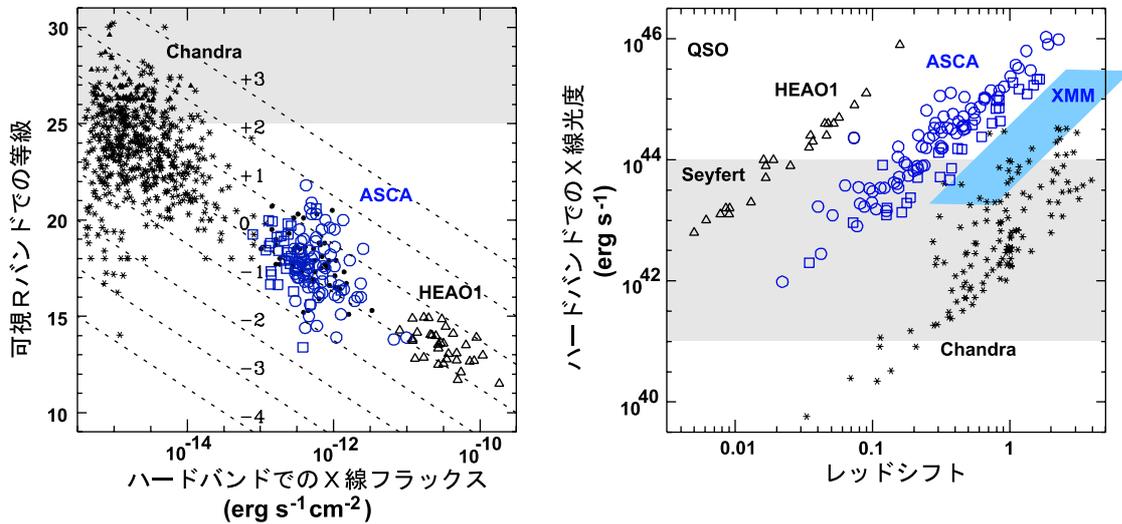


図 4: ハード X 線セレクトの AGN サンプルの比較。(a) ハードバンドフラックスと可視等級の関係。あすか (青丸: MSS、青四角: LSS)、HEAO1 (三角)、チャンドラ (アスタリスク: CDFN と CDFS) のサンプル。点線はハード X 線、可視のフラックス比一定の線を示す。上から $\log f_X/f_R = +3, +2, +1, 0, -1, -2, -3, -4$ 。灰色の領域は 8 - 10 m クラス望遠鏡では分光できない R バンドで 2.5 等より暗い領域を示している。(b) レッドシフト、光度の分布。記号は (a) と同じ。チャンドラについては分光でレッドシフト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。

ブルディープフィールドの領域で 2 Ms (単純計算で 23 日間!)にも及ぶチャンドラディープサーベイ (CDFN) が行われた。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¹⁴⁾。

しかし、「あすか」のサンプルは依然として 2 型 QSO の存在数に制限をつける上ではユニークなサンプルである。図 4 に「あすか」で見つかった AGN と「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 (a) とレッドシフトと光度の関係 (b) を載せた。「あすか」によって見つかった X 線源は CDFN で見つかった X 線源よりも X 線フラックスで 100 倍明るい。

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 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 のレッドシフト、光度分布は全く異なっている。「あすか」ではレッドシフト 0.1 から 2 あたりの QSO が見えているのに対して、CDFN では同じレッドシフト領域のセイファート銀河が主に見えている (図 4 (b))。

また、100 倍明るいということで、可視対応天体も典型的には 100 倍明るく (図 4 (a))、可視分光観測も比較的容易である。X 線可視光度比が大きい天体 (X 線で明るく可視で暗い、 $\log f_X/f_R > +2$) は隠された 2 型 QSO の候補と考えられる。CDFN のサンプルで光度比が大きい天体はほとんどが 8 - 10 m 級望遠鏡の観測限界 (R バンドで 2.5 等) よりも暗く、分光的にその正体を明ら

かにすることは難しい。しかし、「あすか」のサンプルではすべてがRバンドで22等よりも明るく、分光観測によってその正体も明らかにされた。実際、「あすか」MSS、LSSで見つかったAGNのうちでレッドシフトが0.6よりも大きくX線での吸収量が 10^{23} cm^{-2} に近い大きな吸収を受けたAGNの多くはX線可視光度比の大きい天体であった(図3(b))。隠されたQSOを探求する上では「あすか」のサンプルはユニークであり、CDFNなどのサンプルと相補的になっている。

われわれは、「あすか」で見つかった明るいX線源の中でも非常に硬いX線スペクトルを持つX線源だけをピックアップして、「チャンドラ」の高い空間分解能を活用して位置を精度よく特定し、可視同定観測を行った。ここでも非常にハードなX線源は、比較的レッドシフトの小さい(レッドシフト0.5以下の)2型セイファート銀河であった¹⁵⁾。X線宇宙背景放射をハードにしているのは、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。2型QSOは考えられているほど多数は存在しない。

3.2 吸収を受けたAGNの割合

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吸収を受けたAGNの割合の光度依存性をグラフにして図4に載せた。図5(a)ではレッドシフト0.6以下の領域でX線の吸収量が 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 線を示さないAGNの割合(青丸)を載せた。また光度の低い領域ではCDFNでの 10^{22} cm^{-2} 以上の吸収のAGNの割合も載せた(黒四角)。図5(b)ではレッドシフト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の割合をあすかサンプル(青四角)とCDFN(黒四角)について載せた。吸収を受けたAGNの割合は光度が大きくなるにしたがって減少している。レッドシフト0.6以下での「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優位に小さい。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へる傾向が見られる。

これはセイファート銀河で得られている隠された2型セイファートと1型セイファートの比率は、QSOにはそのまま適用できず、QSOでは隠された2型QSOの割合はセイファートで見られているほど大きくはない。この結果はX線宇宙背景放射に大きく寄与しているのは隠された2型セイファートであることを示唆する。隠された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QSOにおいては中心核の周りがあるダストーラスの開口角が大きいと見ることができる。これは光度が大きくなると、中心核からの光の輻射によって、内側のダス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。

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定性的な傾向(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「観測された」割合を「実際の」割合にするには、吸収量に対する検出限界のレッドシフト依存性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 新たなる問題提起

「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しめすAGNが見つかった。たとえば、最初に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100ks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¹⁶⁾。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いることがわかった。一方、

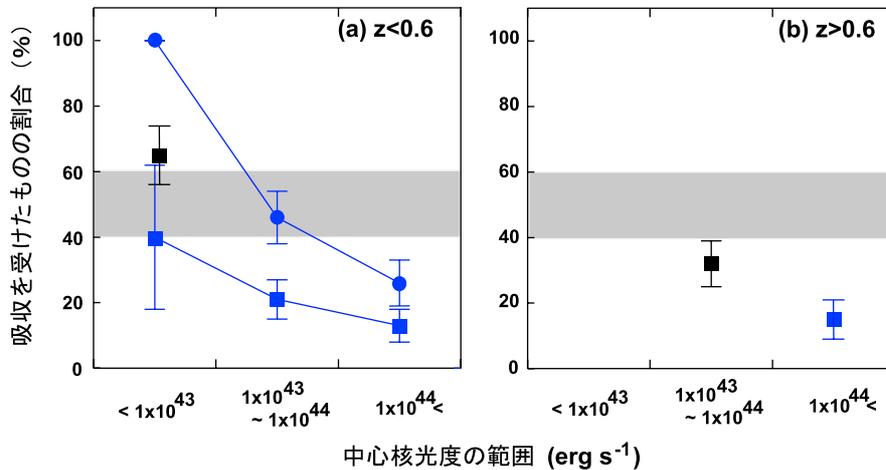


図 5: 吸収を受けた AGN の割合の光度依存性。青四角はあすかサンプルの X 線スペクトルに基づいた割合、青丸は可視スペクトルに基づいた割合。黒四角はチャンドラ CDFN のサンプルから求めた割合。

すばる望遠鏡の可視分光器 FOCAS、近赤外線分光器 IRCS を用いた観測も行われた。特に IRCS による H α 線の観測では H α 線に幅の広い輝線が検出された。可視波長域の減光量は幅の広い H α 輝線の検出、スペクトル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 線の吸収量から予想される減光量 1.3 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 $z > 0.6$ 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つた (図 3 (b))。このような食い違いは AGN、特に光度の大きな QSO で普通に起こっていることのようにである。

このことは QSO における X 線の吸収量と可視の吸収量が、銀河系のガスダスト比を仮定した計算とは 2 桁も一致しないことを示している。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。一方で QSO の中心核付近のガスのガスダスト比が、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 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 線でのハードさがどの程度の量の、吸収によるのかを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波長域での測光観測を行い、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を行っている。さらに H α 、H β の幅広い輝線の近赤外分光観測 (赤外線波長域へとレッドシフトしている) 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できるだろう。

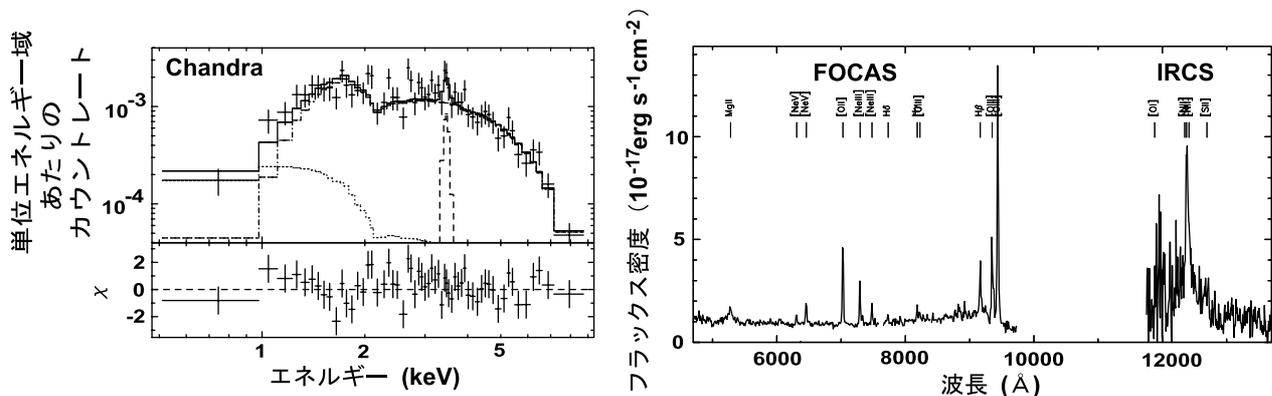


図 6: (a) 隠された QSO、AXJ のチャンドラ衛星による X 線スペクトル。柱密度 $2 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ の吸収を受けたパワーローでよくフィットされる。(b) すばる望遠鏡による可視 (FOCAS) 近赤外 (IRCS) 波長域のスペクトル。近赤外波長域にレッドシフトした H α 輝線に強い幅の広い (10000 km s^{-1}) 成分が発見された。

4 ブラックホール成長過程の定量化へ

隠された AGN の割合のレッドシフトに依存した変化はあるのだろうか。たとえば、宇宙年齢をさかのぼれば、それぞれの銀河の形成期に近づき、それぞれの中心核付近はより多量のガスのあ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、中心核からの放射によって晴れ上がるという QSO の進化をとるとレッドシフト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 GT 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 平方度の領域サーベイしようというものである。2002 年 8 月に終了する「XMM ニュートン」の 7 視野のディープサーベイにより 2-10keV ハードバン

ドにおいて 500 個程度の X 線源が検出されると予想され、これによってレッドシフト 1 から 5 の付近の QSO が多数発見されると考えている (図 4 (b) 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 AGN の割合のレッドシフト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。

また、X 線源として見えてきた AGN の物理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 X 線から可視、赤外、電波波長域のスペクトルエネルギー分布から、その AGN の持つ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、AGN のスペクトルエネルギー分布のモデルをかいして定量化すること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。S X D S 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主に高橋 忠幸氏 (宇宙科学研究所) 山田 亨氏 (国立天文台三鷹) との共同研究で進めてきました。

参考文献

- [1] Giacconi, R., Gursky, H., Paolini, F.R., and 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] Akiyama, M., et al. 2000, *ApJ*, 532, 700
- [5] Merritt, D., and Ferrarese, L. 2001, *MNRAS*, 320, L30
- [6] Barger, A.J., Cowie, L.L., Bautz, M.W., Brandt, W.N., Garmine, G.P., Hornschemeier, A.E., Ivison, R.J., and Owen, F.N. 2001, *AJ*, 122, 2177
- [7] Comastri, A., Setti, G., Zamorani, G., and Hasinger, G. 1995, *A&A*, 296, 1
- [8] Huchra, J., and Burg, R. 1992, *ApJ*, 393, 90
- [9] Ohta, K., Yamada, T., Nakanishi, K., Ogasaka, Y., Kii, T., and Hayashida, K. 1996, *ApJ*, 458, L57
- [10] Ueda, Y. et al. 1998, *Nature*, 391, 866
- [11] Akiyama, M. et al. 1998, *ApJ*, 500, 173
- [12] Ueda, Y., Ishisaki, Y., Takahashi, T., Makishima, K., and Ohashi, T. 2001, *ApJS*, 133, 1
- [13] Akiyama, M., Ueda, Y., Ohta, K., Takahashi, T., and Yamada, T. 2002, *ApJS*, submitted
- [14] Barger, A.J., et al. 2002, *AJ*, in press, *astro-ph/0206370*
- [15] Watanabe, S., Akiyama, M., Ueda, Y., Ohta, K., Mushotzky, R., Takahashi, T., and Yamada, T. 2002, *PASJ*, in press, *astro-ph/0208232*
- [16] Akiyama, M., Ueda, Y., and Ohta, K. 2002, *ApJ*, 567, 42