

# X線背景放射の起源と活動銀河核の 宇宙論的進化の解明

上田 佳宏

〈宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉

e-mail: ueda@astro.isas.jaxa.jp

活動銀河核の宇宙論的進化の解明は、X線天文学のゴールであった。ここに紹介する話は、X線背景放射の謎に魅せられた科学者たちによる、個人的には10年間、人類として40年間にわたる努力の総まとめである。筆者らは、「隠されたAGN」の宇宙論的進化の全貌を初めて明らかにし、同時に、X線背景放射の起源の大部分を定量的に解明することに成功した。最後に、この結果の示唆する、銀河中心の巨大ブラックホール成長史の結果について紹介する。

## 1. はじめに

1962年6月18日、ジャコーニらは、初めての宇宙X線の検出を目指し、ガイガーカウンターを搭載したロケットによる実験を行った<sup>1)</sup>。そこで思いもかけず発見されたのが、全天で最も明るいX線源・さそり座X-1と、正体不明の背景信号「X線背景放射」\*<sup>1</sup>である。これが有名な、X線天文学の幕開けの瞬間である。かくして歴史上、最も古い宇宙背景放射となったX線背景放射の起源の謎は、その後40年間以上にわたり常にX線天文学の第一課題として君臨することになる。その重要性はただの謎解きだけにあるのではない。以下に述べるように、他の観測が進むにつれ、X線背景放射の研究が、巨大ブラックホール生成および銀河形成との関連を解き明かす鍵を握っていることが認識されてきた。

## 2. AGNの進化と巨大ブラック ホールの成長

近傍に存在する銀河バルジのほとんどに、太陽

の100万から10億倍もの質量をもつ巨大ブラックホールが潜んでいることが最近の観測でわかってきた<sup>2)</sup>。この事実は、銀河生成と巨大ブラックホール生成が密接に結びついていることを意味する。これら巨大ブラックホールは、一体、いつ、どのようにして作られてきたのだろうか？AGNの進化の解明は、質量降着による巨大ブラックホールの成長過程を解き明かすことに直結する。これは宇宙の銀河全体の進化を理解するために不可欠な、現代天文学に課せられた重要課題である。

AGNを見つけるための最も完全かつ効率の良い方法は、透過力の強い、エネルギーの高いX線（硬X線；本記事では、2 keV以上のエネルギーをもつX線のことを指す）でサーベイを行うことである。AGNは強い硬X線を出すので、普通の銀河とは、比較的、簡単に区別できる。可視光では、星からの光が邪魔になるため、暗いAGNを見つけることは難しい。可視光やエネルギーの低いX線（軟X線）を使う最大の問題は、塵やガスに深く埋もれた「隠された」AGNに対して、ほと

\*<sup>1</sup> XRB (X-Ray Background) あるいは CXB (Cosmic X-ray Background) と略される。

んど無力になってしまうことである。実は「隠された」AGNこそがAGN全体から見て最も多い種族であり、これらの観測なしにAGNの統一的理解はありえない。

以下に述べるように、宇宙全体に存在するAGNからのX線放射の重ね合わせが、X線背景放射として見えている。つまり、X線背景放射の起源を定量的に解明することは、AGNの宇宙論的進化を解明することである。AGNの統計的な性質を記述する最も基本的な観測量が、AGNの空間数密度を光度の関数として表した統計量、つまり「光度関数」である。AGNまでの距離（赤方偏移、 $z$ ）ごとに光度関数を知るためには、X線背景放射を個々のAGNに分解したうえで、それを光学同定し、赤方偏移を一つずつ決めていくというプロセスが必要となる。硬X線領域でより感度の高い観測を行うことは、HEAO-1、「ぎんが」、「あすか」、Chandra・XMM-Newtonへと続く、X線天文学の発展の歴史そのものでもあった。AGNの硬X線光度関数の宇宙論的進化の決定は、X線サーベイ天文学の目指してきたゴールの一つである。

### 3. X線背景放射—40年来の謎—

X線背景放射については、これまでにたびたび月報の記事で解説されてきた<sup>3)-5)</sup>。それらと重複するところもあるが、ここでもう一度、簡単にレビューしておきたい。X線背景放射の強度は非常に大きく、その全天からの総放射強度は、銀河系内天体からのX線強度の総和の10倍にも達する。2 keV以上の強度分布は、銀河面方向を除けば極めて一様である<sup>6)</sup>。X線背景放射の等方性はそれが銀河系外起源であることを意味し、その宇宙論的重要性は当初から明白であった。1980年、

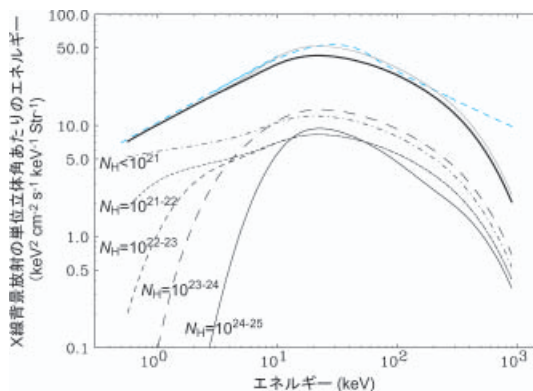


図1 青：観測されたX線背景放射のスペクトル (SED)。黒：最新の種族合成モデル<sup>25)</sup>による、異なる吸収量（吸収体の水素柱密度  $N_H$  で表す）をもつAGNからのX線背景放射スペクトルへの寄与。太線：全 Compton thin AGN ( $N_H < 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ ) の寄与。細線：Compton thick AGN の寄与を含めた場合。下側の点—破線、短破線、中破線、長破線、実線はそれぞれ、図中で示した範囲の吸収量を受けたAGNからの寄与。

HEAO-1 衛星はX線背景放射スペクトルの形を3–100 keVの範囲で精度よく測定し、その形が、温度4億度（40 keV）の光学的に薄いプラズマからの熱的放射に酷似していることを発見した<sup>7)</sup>。結論から言えば、このスペクトルの類似はただの偶然であった\*2。図1に示すようにX線背景放射の Spectral Energy Distribution (SED) は、およそ30 keVに強度ピークをもち、2 keV以上の硬X線領域における放射（硬X線背景放射）がその大部分のエネルギーを占めていることがわかる。2–10 keVの範囲では光子指数1.4のべき関数で近似される。

その後、軟X線領域（ここでは2–3 keV以下のX線を指す）で撮像能力をもつX線衛星が打ち上げられ、X線背景放射の軟X線領域（軟X線

\*2 このHEAO-1の結果に基づいて、X線背景放射の起源を宇宙を満たす温度40 keVのプラズマに求める議論が盛んに行われたこともあった。しかし1994年、COBE衛星が宇宙マイクロ波背景放射のスペクトルを精密測定したところ、逆コンプトン散乱による変形（スニヤエフ-ゼルドビッチ効果）が全く検出されなかったことから、高温プラズマ説はほぼ完全に否定された<sup>8)</sup>。

背景放射)が、個々の銀河系外 X 線源 (大部分は AGN で、一部銀河団も含む) からの放射の重ね合わせで説明されることが、しだいに明らかになってきた。アメリカの *Einstein* 衛星、ドイツの *ROSAT* 衛星は、軟 X 線背景放射のそれぞれ 30%, 80% 近くを個々の X 線源に分解した<sup>9), 10)</sup>。光学同定の結果、軟 X 線領域で見つかった X 線源のほとんどは、吸収を受けていない AGN (いわゆる 1 型 AGN) であることが判明した<sup>11)</sup>。しかし決して、これらのサーベイで X 線背景放射の謎が解かれたわけではなかった。*EXOSAT* 衛星や「ぎんが」衛星などによって行われた明るい 1 型 AGN の観測によると、その 2-10 keV 帯域での X 線スペクトルは、X 線背景放射よりずっと軟らかい (光子指数にして 1.7-2.0) ことがわかっていた<sup>12), 13)</sup>。つまり、この種族の足し合わせで、X 線背景放射のメインである硬 X 線背景放射の起源を説明することは不可能である。この矛盾は「スペクトル・パラドックス」と呼ばれ、X 線背景放射の起源を考えるうえで最大の問題となっていた。X 線背景放射を作るには、1 型 AGN よりもはるかに硬いスペクトルをもつ X 線源が必要である。

1990 年代の始め、粟木久光氏らは「ぎんが」衛星を用いて、近傍の 2 型セイファート銀河から大きな吸収を受けた硬い X 線スペクトルを検出し、可視偏光観測などによる結果<sup>14)</sup>から提唱されていた、セイファート銀河の「統一モデル」の妥当性を強力に裏づけた<sup>15)</sup>。すなわちセイファート銀河は基本的に 1 型も 2 型も同一の種族であり、ブラックホールの周囲に存在するトーラスに対する見込み角の違いによって、1 型・2 型といった「見かけ上の」性質が決定される、という考え方である。2 型セイファート銀河は、中心核ブラックホールへの視線がトーラスに邪魔されているため、可視では広輝線領域が見えず狭輝線のみが見え、X 線スペクトルはトーラスによって大きな光電吸収を受ける。この議論をもとに、2 型セイ

ファート銀河の寄与により X 線背景放射スペクトルを説明しようというアイデアがいくつか提唱された<sup>16)</sup>。

## 4. 偉大なる「あすか」

### 4-1 The *ASCA* Large Sky Survey

硬 X 線背景放射を担う X 線源を直接検出し、その宇宙論的進化を明らかにするには、より高い感度で硬 X 線サーベイを行うのが唯一の方法である。1993 年に打ち上げられた「あすか」衛星は、2-10 keV のエネルギー範囲で撮像能力を有した世界初の X 線天文衛星で、*HEAO-1* 衛星の 3 桁上の検出感度を達成した。X 線天文学の最大の謎とされてきた硬 X 線背景放射の起源の解明は、「あすか」に課された最大の使命の一つであった。

筆者らは「あすか」を用い、1993 年から 1995 年の複数の時期にかけて、かみのけ座方向にある 7 平方度にわたる連続領域のサーベイ観測を行った。検出器の性能を最大限引き出すべく、較正の知識を十分に利用し、画像データの詳細な解析を行った。その結果、100 個以上の微弱な X 線源を検出し、硬 X 線背景放射の 20-30% を直接点源に分解することに成功した (*ASCA* Large Sky Survey = *ALSS*)<sup>17), 18)</sup>。ここで大事なことは、X 線背景放射の主要な構成要素と考えられる、硬い X 線スペクトルをもつまとまった種族を発見し、実際にそれらが強い吸収を受けていること、その結果、微弱な X 線源の平均スペクトルが 1 型 AGN のそれよりも有意に硬くなっている証拠を見つけたことである。

この世界初の硬 X 線撮像サーベイの結果を 1997 年 6 月、ポツダムで行われた X 線サーベイに関する国際ワークショップで口頭発表した。その 1 カ月前にこの内容をネイチャー誌に投稿していた筆者は、聴衆の中に間違いなくレフェリーがいるに違いないと確信しながら、緊張して話し終えた。会議が中休みに入ると間もなく、度の強い眼鏡をかけた、恰幅のいい紳士が、“Congratula-

tions!”と言いながら、私と、同じく発表を終えたばかりの小賀坂康志氏の二人に向かい、握手を求めてゆっくりと近づいてきた。(この方はいったい誰だろう?)少し訝しげに思っているわれわれの気持ちを見透かしたかのように、その紳士は握手をする直前、みずから名乗った。

“I am Giacconi.”

握る手が、感激で震えた。多重薄板型 X 線望遠鏡を用いた硬 X 線領域での撮像という「あすか」のコンセプトをめぐり、最初はその意義を否定したジャコニ博士と、田中靖郎先生との間に激論があり、しかる後に二人がより親しくなられたというエピソード<sup>19)</sup>を知ったのは、ずいぶん後のことである。

ALSS プロジェクトの頃から、秋山正幸氏(現・国立天文台)、太田耕司氏(京大理)、山田亨氏(現・国立天文台)らを中心とする光学天文学者との、密接かつ強力な共同研究が始まった。詳しい解説が、秋山・上田・太田による月報記事<sup>4)</sup>にもあるので参照されたい。光学追求観測により、ALSS で 2 keV 以上で検出された 33 個すべての X 線源の同定に成功した<sup>20)</sup>。この結果、吸収を受けた X 線源はすべて赤方偏移 0.5 以下の近傍宇宙に存在し、2 型クエーサーが少ないことなど、いくつかの興味深い事実を発見した。

#### 4-2 The ASCA Medium Sensitivity Survey

ALSS の結果は斬新であったが、次の研究ステップへ至るにはサンプルの大きさが不十分であった。そこで筆者らの研究は、より定量的な評価を目指し、さらに大規模なサーベイ (ASCA Medium Sensitivity Survey = AMSS) へと進んだ。AMSS はアーカイブデータを利用して、「あすか」GIS 検出器の視野に偶然入る X 線源を系統的に検出するセレンドピタス・サーベイで、膨大なデータ量の解析を必要とした。一時期は宇宙研 X 線グループのほとんどの計算機を占領して迷惑を

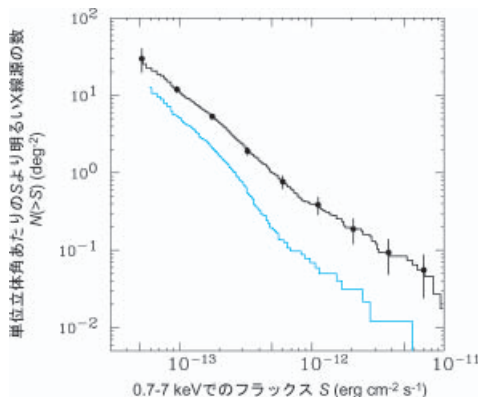


図 2 AMSS で決定された 0.7-7 keV バンドでの  $\log N\text{-}\log S$  関係<sup>22)</sup>。黒: 全 X 線源。青: 0.7-10 keV の範囲で見かけの光子指数が 1.7 よりも小さいスペクトルをもつ X 線源の寄与。

かけながらも、最後は、1,300 個以上の X 線源を含んだ、過去最大規模の X 線カタログを出版することができた<sup>21)</sup>。AMSS のカバーした面積の広さは現在でも世界最大で、極めてユニークなサンプルとなっている。筆者らは AMSS のデータから、0.7-10 keV のエネルギー範囲でナンバーカウント ( $\log N\text{-}\log S$  関係<sup>\*3)</sup> をかかってない精度で決定した上、2 keV 以上で硬いスペクトルをもつ X 線源が、フラックスが低くなるに従って急激に増加することを発見し、同時に、図 2 に示すように「あすか」以前に指摘されていた、軟 X 線領域と硬 X 線領域のナンバーカウントの不一致の問題を解決した (図 2)<sup>22)</sup>。

1999 年 4 月、筆者は、秋山氏、Ingo Lehmann 氏(現 MPE)とともに、スペイン・カラーアルト天文台で観測に参加していた。ドイツの研究チームと共同で、ALSS 領域で見つかった「あすか」ソースの位置を精度よく決定するため ROSAT 衛星・HRI 検出器による追従観測を行ったのだが、その ROSAT ソースカタログを光学同定するのが今回の観測の目的であった。観測は順調だったが、賦に落ちない筆者は、観測中、秋山氏につ

\*3 天体のフラックス (見かけの明るさ)  $S$  に対して、それより明るい天体の単位立体角あたりの数  $N(>S)$  を両対数プロットしたもの。

い日本語で話しかけた。「どうしてわれわれは *ROSAT* ソースの同定なんてやってるんだろう？ 軟 X 線選択サンプルなんて、いまさら仮に 100 個も同定したところで、硬 X 線サンプル 10 個の科学的価値に及ばないよ。僕のハードディスクには *AMSS* の硬 X 線サンプルという宝のデータがあるのだから、この観測は中止して、こっちを同定しよう」「う、うえださん！ それを言っちゃおしまいですよー。われわれ日本人にはそうそう簡単に使える望遠鏡がない。ドイツ人 *PI* の名で、望遠鏡を使わせてもらっているのだからこの仕事はやらなくてはならないんです」。しかし、共通の意識をもったわれわれ二人は、翌日にはもう、*AMSS* の光学同定計画の遂行を硬く決意していた。その様子を見ていた *Lehmann* 氏はわれわれをからかった「いまさら *EMSS*\*4 ソースを追求観測して何か意味があるの？」。われわれは答えた「違う。 *AMSS* だ！」。われわれは、現実取得可能な観測時間とマンパワーを考慮し、いきなり数百個という目標は設定しなかった。「まずは 50 個！ *ALSS* の 2-3 倍を目指そう。」また、フラックス限界を  $3 \times 10^{-13} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (2-10 keV) と、明るめに設定した。検出器のシミュレーションにより、これよりフラックスレベルが暗くなると、ソース混入ノイズが無視できなくなることがわかっていたからである。ここでわれわれが、*AMSS* の最大の特徴である「サーベイ面積の広さ」を活かすべく、表面密度の少ない「明るいサンプル」に注目したことは正解であった。後により感度の高い *Chandra*, *XMM-Newton* のサーベイ結果が出始めてからも、予想どおり、*AMSS* 硬 X 線サンプルは決してその独自性を失わなかったからである。

*AMSS* 同定計画は、3 年がかりのプロジェクトとなったが、2003 年にこの仕事を完了し、結果、100 個あまりの X 線源をほぼ完全に同定するこ

とに成功した<sup>23)</sup>。と言うのは簡単だが、光学同定は決してスムーズなものではなく、「あすか」の位置精度（最終的な較正により、絶対位置精度は 20 秒まで向上させることができた<sup>24)</sup>）との戦いでもあり、限られた望遠鏡の観測時間の中で、リアルタイムに判断し、あらゆる情報を用いて最大限の効率で追求を行う観測は、まさに匠の世界である。われわれゲリラ部隊は、ハワイ大学 2.2 m, キットピーク 2.1 m, セロトロロ 1.5 m, 最後は「すばる」と、世界中の天文台を渡り歩いた。

## 5. 明かされる AGN の進化の全貌

10 年間の格闘の末、筆者らの研究はいよいよゴール（いや、大きな中間ステップというべきかもしれない）へと至る。筆者らは、*ALSS*, *AMSS* に加えて「あすか」*SIS* 検出器によるディープサーベイの結果を加え、さらに、より明るいフラックス側の *HEAO-1* 衛星による AGN サンプルと、より暗い側の *Chandra* 衛星によるサンプル

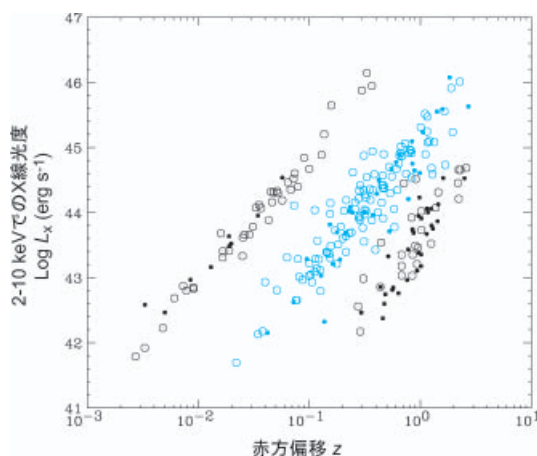


図 3 硬 X 線選択 AGN サンプルの赤方偏移-硬 X 線光度プロット<sup>25)</sup>。中抜き丸：X 線で吸収を受けていない AGN ( $N_{\text{H}} < 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ )。塗りつぶし丸：X 線で吸収を受けた AGN ( $N_{\text{H}} > 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ )。青は、「あすか」によるサーベイで検出された AGN。

\*4 Extended Medium Sensitivity Survey. *Einstein* 衛星による、軟 X 線バンドのセレンディピタス・サーベイ。

を合わせ、図3のように247個のソースからなるサンプルを構築した。このサンプルの特徴は、(1)「隠されたAGN」を含む硬X線選択サンプルであること、(2)広い光度と赤方偏移の範囲をカバーしていること、(3)極めて同定完全性が高いことであり、ほかに類を見ないものである。サンプルの不完全性は、最終的な光度関数の不定性の最大の原因となりうる。しかし筆者らのサンプルは96%と非常に完全性が高く、十分な信頼度で光度関数を制限することが可能であった。

筆者らは、AGNの進化を記述する統計量として、光度関数に加え、 $N_H$ 関数（AGNの吸収量分布の確率密度関数）を定義した。光度関数、 $N_H$ 関数いずれも、硬X線光度（ $L_X$ ；吸収を受ける前の2-10 keV光度）および、赤方偏移パラメーター（ $z$ ）の関数である。これら二つの関数を組み合わせることで、隠されたAGNの寄与も含め、あらゆる観測量を簡単に計算することができる。 $N_H$ 関数の導入は、AGNの統一モデルの検証という意味もあった。もしAGNの構造が1種類しか存在しない「完全な統一モデル」が正しいなら、 $N_H$ 関数は $L_X, z$ ともに依存しないことになるからである。ただし、正しく $N_H$ 関数、光度関数を導出するには、細心の注意が必要であった。過去の研究で必ずしもきちんと考慮されてこなかった、選択バイアスを完全に排除した解析方法を確立するには、サーベイに使われた検出器の応答関数の完全理解に加え、多くの試行錯誤を必要とした。論文投稿前の数カ月間というもの、寝食を忘れて月々火水木金のまるで軍隊のような日々を過ごしながら、私は「この結果が世に出れば、X線天文学の歴史が変わる」と確信していた。

そして遂に筆者らは、世界で初めて「隠された」種族を含めたAGNの光度関数の宇宙論的進化を解明することに成功した<sup>25)</sup>。この結果は同時に、X線背景放射の起源の大部分について、初めて定量的な解決を与えたものである。図4は光度関数そのもの、図5はAGNの空間密度を赤方偏移パ

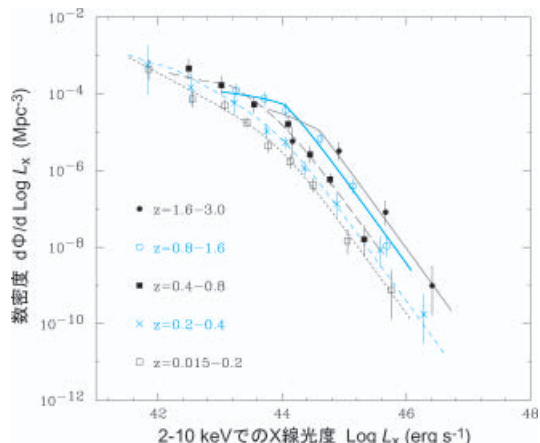


図4 AGNの硬X線光度関数（共動座標での空間数密度を、硬X線光度の関数として表したものを異なる赤方偏移 $z$ の範囲ごとに示した<sup>25)</sup>。線はベストフィットモデル。

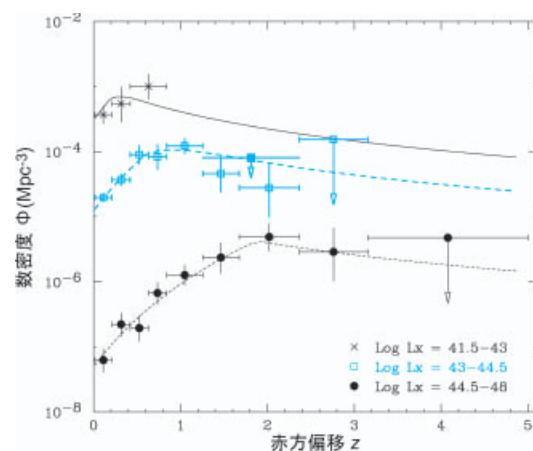


図5 AGNの空間数密度の赤方偏移パラメーター依存性<sup>25)</sup>。上から：低光度AGN、中光度AGN、大光度AGN（それぞれ図中で示した硬X線光度の範囲で積分した）。線はベストフィットモデル。

ラメーター $z$ に対してプロットしたものである。光度関数の宇宙論的進化は、光度に依存した密度的進化でよく記述されることがわかった。図6は $N_H$ 関数の結果を示している。吸収されたAGNの割合は光度が大きくなるほど減ることがわかる。この結果を単純に解釈すると、トーラスの形状がAGN光度に依存することを示唆し、少なく

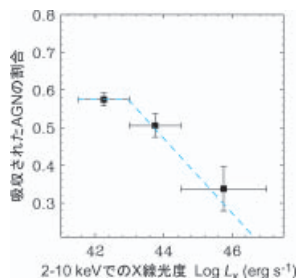


図 6 全 Compton thin AGN ( $N_{\text{H}} < 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ ) に対する吸収された AGN ( $N_{\text{H}} > 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ ) の割合を、X 線光度の関数としてプロットしたもの<sup>25)</sup>。

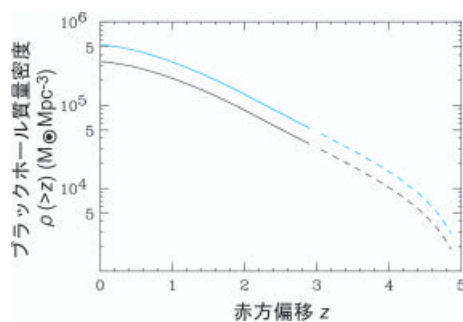


図 7 巨大ブラックホール成長曲線（点線は光度関数を外挿して計算した部分）。青は Compton thick AGN の寄与も含めた場合。

とも単純な AGN 統一モデルの描像に修正が必要であることを意味している。

さらに筆者らは、光度関数と  $N_{\text{H}}$  関数を組み合わせることで、「純粋に観測に基づいた」種族合成モデルを構築した。モデルという言い方はふさわしくないかもしれない。ほとんど観測結果そのものと言ってよいからである。図 1 に、このモデルから予言される、異なる吸収量をもった AGN の X 線背景放射スペクトルへの寄与をプロットした。なお、筆者らのサーベイは 10 keV 以下で行われているため、コンプトン散乱に対して光学的に厚い吸収 ( $N_{\text{H}} > 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ ) を受けた AGN (Compton thick AGN) は含まれていない。実際、近傍の 2 型セイファート銀河の  $N_{\text{H}}$  分布に基づいて Compton thick AGN の寄与を加えると、X 線背景放射のスペクトルをより正確に再現できることがわかった。ただし、近傍の Compton thick AGN の直接観測は、将来の 10 keV 以上における高感度サーベイの結果を待たねばならない。

光度関数で特に注目すべき結果は、大光度 AGN (クエサー) は  $z \sim 2$  にピークがあるが、より低光度の AGN (セイファート銀河) は  $z \sim 0.8$  あたりにピークがあり、もっと最近になって形成されてきたという点である (図 5)。「大きなものほど後でできる」宇宙の構造形成論から見て、一見、矛盾する結果であるのが面白い。類似した結

果が、銀河の進化そのものについても報告されている<sup>26), 27)</sup>。筆者らは、この AGN の結果を母銀河の星生成活動との関連で説明できるのではないかと考えている。世界的な研究の流れは、AGN の進化から、AGN と母銀河の形成過程との関連の究明へと移りつつある。

はじめに述べたように、我々の解明した AGN の進化は、巨大ブラックホール生成史を直接、制限する。適当な放射効率および SED を仮定することで、X 線光度から質量降着率を知ることができる。その結果、宇宙の単位体積あたりのブラックホールの総質量が、時間とともにどのように増加してきたかがわかる。図 7 は、そのようにして得られた「ブラックホール成長曲線」である。この方法で計算された現在の宇宙のブラックホールの総質量は、近傍の銀河から  $M-\sigma$  関係 (ブラックホール質量と、母銀河の星の速度分散との関係) で調べられたブラックホールの総質量とほぼ一致する。ブラックホール質量関数の時間発展を追ったより詳しい計算によると、エディントン光度比  $\sim 1$ 、放射効率  $\sim 0.1$  を仮定して硬 X 線光度関数を積分することで、現在のブラックホール質量分布の形までもよく説明できることがわかってきた<sup>28)</sup>。では、より遠方の宇宙では、この関係はどうなっているのであろうか？ AGN ができたときに、星生成はすでに終了しているのだろうか？

あるいはその逆だろうか？世界のライバルからの心地よい刺激のもと、筆者らの挑戦はまだまだ続く。

## 謝 辞

この一連の研究成果は、努力とチームワークを武器に常に世界の科学フロンティアを切り開ける可能性を示したとともに、多波長連携研究の大切さを実証することとなりました。この仕事は、多くの共同研究者の協力をもってなしたものです。特に、光学チームの秋山正幸氏、太田耕司氏、山田 亨氏、光度関数の計算において助言をいただいた宮地崇光氏、高エネルギー物理学の手法を導入していただいた高橋忠幸氏、特に較正とソフトウェア開発でお世話になった石崎欣尚氏、本計画のメイン検出器となった GIS の開発者である牧島一夫氏、大橋隆哉氏、大学院生時代に本研究のきっかけを与えて下さった井上 一氏、田代信氏、ほか「あすか」銀河系外サーベイにかかわった共同研究者の方々はもちろん、衛星計画にかかわった方々に深く感謝します。最後に、受賞に対し、天文学会会員の皆様に御礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) Giacconi R., Grusky H., Paolini F. R., Rossi B. B., 1962, *Phys. Rev. Lett.* 9, 439
- 2) 例えば Kormendy J., 2004, in *Carnegie Observatories Astrophysics Series, Vol. 1: Coevolution of Black Holes and Galaxies*, ed. Ho L. C., in press
- 3) 小賀坂康志, 上田佳宏, 石崎欣尚, 1997, *天文月報* 90, 11月号, 522
- 4) 秋山正幸, 上田佳宏, 太田耕司, 2003, *天文月報* 96, 3月号, 119
- 5) 井上 一, 2003, *天文月報* 96, 5月号, 254
- 6) 例えば Kushino A., et al., 2002, *PASJ* 54, 327
- 7) Marshall F., et al., 1980, *ApJ* 235, 4
- 8) Mather J. C., et al., 1994 *ApJ* 420, 439
- 9) Giacconi R., et al., 1979, *ApJ* 234, L1
- 10) Hasinger G., et al., 1998, *A&A* 329, 482
- 11) 例えば Schmidt M., et al., 1998, *A&A* 329, 495
- 12) Turner T. J., Pounds K. A., 1989, *MNRAS* 240, 833
- 13) Williams O. R., et al., 1992, *ApJ* 389, 157
- 14) Antonucci R. R. J., Miller J. S., 1985, *ApJ* 297, 621
- 15) Awaki H., et al., 1991, *PASJ* 43, 195
- 16) 例えば Comastri A., et al., 1995, *A&A* 296, 1
- 17) Ueda Y., et al., 1998, *Nature* 391, 866
- 18) Ueda Y., et al., 1999, *ApJ* 518, 656
- 19) 田中靖郎, 2003, *天文月報* 96, 5月号, 252
- 20) Akiyama M., et al., 2000, *ApJ* 532, 700
- 21) Ueda Y., et al., 2001, *ApJS* 133, 1
- 22) Ueda Y., et al., 1999, *ApJ* 524, L11
- 23) Akiyama M., et al., 2003, *ApJS* 148, 275
- 24) Gotthelf E. V., et al., 2000, *ApJ* 542, 417
- 25) Ueda Y., et al., 2003, *ApJ* 598, 886
- 26) Cowie L. L., et al., 1996, *AJ* 112, 839
- 27) Kodama T., et al., 2004, *MNRAS* 350, 1005
- 28) Marconi A., et al., 2004, *MNRAS* 351, 169

## The Origin of the X-ray Background and the Cosmological Evolution of AGNs Now Revealed

Yoshihiro UEDA

*Institute of Space and Astronautical Science,  
Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1  
Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa 229-8510,  
Japan*

Abstract: Since the discovery of the X-ray background in 1962, revealing its origin has been a goal of X-ray astronomy. Here I introduce our 10 years efforts to reveal the cosmological evolution of AGNs that constitute the major part of the X-ray background. I will also introduce the growth history of supermassive black holes suggested by our investigation.