

軟 X 線観測で見た活動銀河中心核 (AGN) の進化 - ROSAT 衛星によるサーベイの成果とその後の発展 -

宮地 崇光

〈Department of Physics, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213, USA〉

e-mail: miyaj@astro.phys.cmu.edu

活動銀河中心核 (AGN) の宇宙論的タイムスケールでの進化に関する話題を、我々が、ROSAT 衛星によるサーベイ観測から組み上げた軟 X 線光度関数を軸にまとめる。特に、軟 X 線光度関数の全体的なふるまい、初期宇宙における QSO の勃興、そして、星生成と AGN 活動の関係についての話題を、チャンドラ衛星による最新の成果を含めて紹介する。

1. はじめに

ドイツのマックスプランク地球外物理学研究所を中心に、アメリカ・イギリスの研究機関が参加してつくられた ROSAT X 線衛星は、1990 年 6 月に打ちあげられ、1999 年 2 月にその寿命を全うした。ミッションの最初の半年を費した全天サーベイから、半径 15 分角程度の天域を合計 120 万秒にわたって極めて深く露出した Lockman Hole の観測にいたるまで、実に多くのグループが、いろいろな深さや広さで X 線サーベイを行い、発見された X 線源の光学同定を行った。こういったグループの長年の努力の結果、極めて完全性の高いカタログが出そろっている。

X 線は、活動銀河中心核 (Active Galactic Nucleus, 以下 AGN)、つまり、銀河の中心にある超巨大質量ブラックホールへの物質の降着とそれにともなう強い輻射、を探すのに最も適した波長帯である。ROSAT 衛星は、エネルギー帯域が軟 X 線 (光子のエネルギーがおよそ 2 keV 以下の X 線で、銀河系外の天体のサーベイには、銀河系自身の星間ガスによる吸収の影響を避けるため、0.5 keV 以下のエネルギーチャンネルを無視して、0.5–2 keV のバンドで行なわれるのが普通である) に限られているとはいえ、これまでにない画期的な空間分解能と感

度で、X 線の空を撮像することができた。そして、X 線フラックスで選んだ X 線源のほぼ完全な光学同定が行われ、AGN の同定とその赤方偏移の測定が、さまざまな広さと深さで行われた。このことは、AGN の進化と宇宙 X 線背景放射の起源を探るうえで極めて重要なことである。こういった研究は、本号の秋山氏らの記事¹⁾にあるように「あすか」衛星などによってさらにエネルギーの高い領域に、そして最新のチャンドラ衛星や XMM-ニュートン衛星によってエネルギー領域と感度の両面から拡大されている。特に、エネルギーの高い硬 X 線 (2 keV 以上のエネルギー帯域) では、2 型セイファートのような吸収をうけた AGN も検出できるため、超巨大質量ブラックホールの進化を探るのには欠かせない。しかし、軟 X 線領域では、現在のところ、同定された X 線源の数とサンプルがカバーするフラックス領域の広さ、カタログや同定の完全性などが格段に良い。したがって、吸収を受けていない AGN を拾うという制限がつくが、軟 X 線サンプルを使つての研究は、AGN の進化の細かいふるまい、稀少な種族である高光度 QSO の進化等をさぐるには、現在のところ最も適した波長帯である。

ここでは、筆者が、ドイツのポツダム天体物理研究所およびマックス・プランク地球外物理学研

究所にポスドクとして在籍中に、Günther Hasinger 教授と Maarten Schmidt カリフォルニア工科大名誉教授と共同で行った、AGN の軟 X 線の光度関数の進化についての研究^{2), 3)}を軸に、宇宙論的タイムスケールでの AGN 進化の話題をまとめてみる。また、最近のチャンドラ衛星の観測による発展もあわせて触れる。本稿では、AGN という用語は、QSO やセイファート銀河中心核等の活動銀河中心核一般をさし、特に高光度のものに限って論ずる場合、QSO という用語を使うことがある。また、ハッブル定数として $H_0 = 50 h_{50} [\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}]$ という表現を使い、 h_{50} 依存は明示、対数の底は 10 である。また、図では、Einstein de-Sitter 宇宙、つまり、宇宙項なしの平坦宇宙 ($\Omega_m = 1, \Omega_\Lambda = 0$) および、宇宙項ありの平坦宇宙 ($\Omega_m = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7$) 場合について図示する¹。但し、宇宙が始まってからの年齢(t で表現する)は、すべて、現在標準になっている $\Omega_m = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7, h_{50} = 1.3$ で計算してある。

2. ROSAT 衛星によるサーベイと AGN の軟 X 線光度関数の進化

光度関数 (Luminosity Function) とは、天体の光度ごとの個数密度を光度の関数としてあらわしたものである。宇宙は膨張しているので、銀河でも AGN でも、進化がない場合、空間の実体積あたりの個数密度は時間がたつともなって減少するが、光度関数を論ずる場合、実体積よりは、宇宙膨張に対して固定された座標系ではかった体積 (comoving volume) あたりの個数であらわすのが一般的である。(従って進化がなにもない場合には、個数密度は赤方偏移によって変わらず、光度関数も変化しない。) 本稿で、以降、体積、密度という用語を用いる際は、この座標系ではかったものの意である。この座標系ではかった光度関数を、赤方偏移ごとにプロットすれば、ある明るさの AGN の

表 1 光度関数の計算に使用したサーベイ

サーベイ (略号)	限界フラックス [$10^{-14} \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$]	立体角 [deg^2]	AGN 個数
RBS	~ 250	2×10^4	216
SA-N	~ 13	685	130
RIXOS	3.0	15	205
NEP	1.0	0.21	13
UKD	0.5	0.16	29
RDS-Marano	0.5	0.20	30
RDS-LH	0.17-0.9	0.30	68

—略号の説明—

RBS:The ROSAT Bright Survey

SA-N:The Selected Area-North

RIXOS:The ROSAT International X-ray Optical Survey

NEP:The North Ecliptic Pole

UKD:The UK Deep Survey

RDS-Marano: The ROSAT Deep Survey - Marano field

RDS-LH: The ROSAT Deep Survey - Lockman Hole

各サーベイのリファレンスについては、2), 3) を参照。

個数が宇宙年齢とともにどのように進化したかが一目瞭然でわかる。

図 1 に ROSAT 衛星で得られた X 線源で可視同定されたサンプルにおける軟 X 線光度関数：

$$\frac{d\Phi}{d\text{Log } L_x}(L_x, z)$$

つまり、単位対数光度あたり、単位体積あたりの AGN の個数を、X 線光度の関数として示す。各カーブは、サンプルを赤方偏移ごとにわけたものであり、光度関数の進化が見てとれる。図 1 から明らかのように、X 線で選んだサンプルでも、可視光で選んだ QSO と同様、その個数に強い進化があることがわかる。高赤方偏移では、あまり変化は見られないが、おおむね、 $z \sim 1.5$ ($t \sim 4.5 \text{ Gyr}$) ぐら

¹ 文献 3) のプレプリント版 (<http://xxx.lanl.gov/src/astro-ph/0101279>) には、各宇宙論パラメータセットについての光度関数の表の ASCII 版がはいっている。

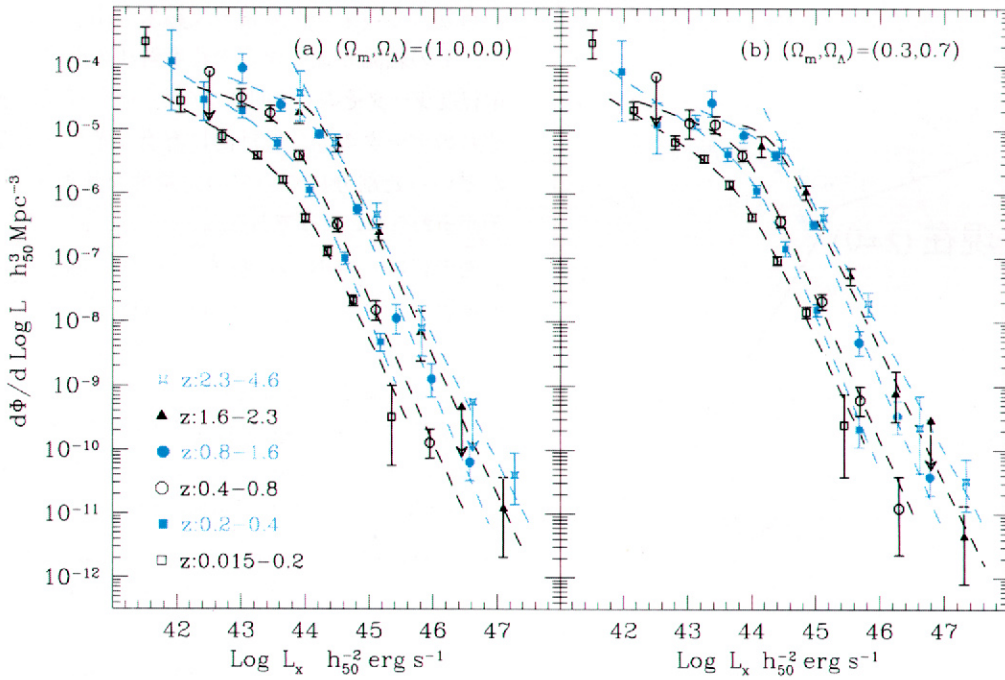


図1 ROSAT 衛星によるサーベイで検出された AGN の軟 X 線 (0.5–2 keV) での光度関数を、赤方偏移ごとに示した。横軸に光度、縦軸は、単位対数光度あたりでの個数密度で、宇宙項なしの平坦宇宙 (左) と宇宙項あり場合 (右) について示してある。いずれの場合でも、赤方偏移があがるにつれ、右上にシフトしており、過去にはより活発な AGN 活動があったのがわかる。なお、プロットされたデータ点の計算と、破線で示された、なめらかな関数へのフィットについては 3) を参照。

いから現在 ($t = 14.5$ Gyr) まで急激に個数密度が減少している。最もサンプルが充実している高光度の領域で、 $\propto (1+z)^5$ 、すなわち、この間に個数密度が実に 100 分の 1 に減っている。それぞれの赤方偏移における光度関数は、平坦な低光度側と、光度が高くなるにつれ急激に個数が減少する高光度側がつながった形になっており、さらに、光度が低いところでは ($\text{Log } L_x \leq 42$, 単位については、図 1 の横軸参照、以下同)、さらに超過がみられる。この低光度における超過は、低光度 AGN、スターバースト成分、今話題の Ultraluminous X-ray source (ULX, 中質量ブラックホールからの X 線と考えられているが、異論もある) などが混ざったものが寄与していると考えられる。その低光度の超過部分はとりあえず別問題として、 $\text{Log } L_x \geq 42$ の部分の

ふるまいをみってみる。

AGN の進化については、純光度進化 (Pure Luminosity Evolution または PLE) 派と密度進化 (Density Evolution) 派の論争がある。それは、簡単にいえば、AGN の進化を、前者は、「過去は、AGN の光度がより高かった」と見る見方であり、後者は、「過去は、より多くの AGN があった」と見る見方である。純光度進化と、密度進化の極端な場合としての純密度進化 (Pure Density Evolution, PDE) の場合の光度関数のふるまいを図 2 にスケッチする。数式で表わすと、

$$\frac{d\Phi}{d\text{Log } L}(L, z) = \frac{d\Phi}{d\text{Log } L}(L/e_1(z), 0) \dots \text{(PLE)} \quad (1)$$

$$\frac{d\Phi}{d\text{Log } L}(L, z) = \frac{d\Phi}{d\text{Log } L}(L, 0) \cdot e_d(z) \dots \text{(PDE)} \quad (2)$$

となる。

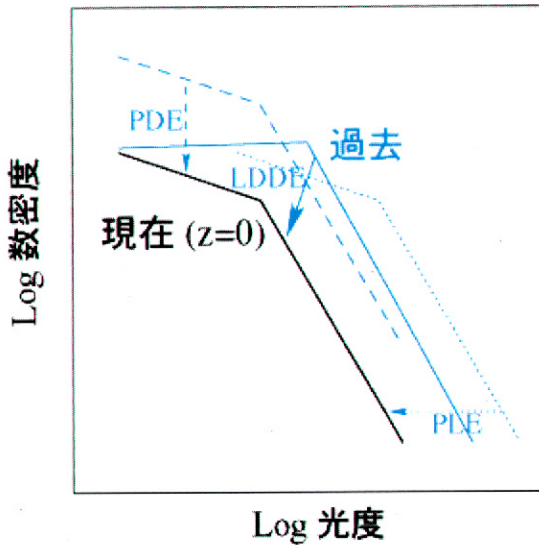


図2 純光度進化 (PLE), 純密度進化 (PDE), および光度依存密度進化 (LDDE) の概念のスケッチ。

光度関数が単純な巾関数 (図2では直線) で、その傾きが、赤方偏移によらないものであれば、その2つは全く区別ができない。傾きが変化する「肩」の部分が各赤方偏移で観測されて、やっとなんとか区別がつくようになるのであるが、一般的に、高赤方偏移での「肩」の部分は、統計が足りなく、サンプルの選択でバイアスがかかりやすいわけで、多くの場合、PLEでも大体合う。PDEでは多くの場合無理が出るが、密度進化率に、光度依存をつける光度依存密度進化 (Luminosity-Dependent Density Evolution または LDDE)、式(2)で、 e_d が z だけの関数でなく、 $e_d(z,L)$ というように光度にも依存する)で記述することも多い。但し、「純」"Pure"をつけることとつけないことで、大きな違いがあり、「純」がつく場合、光度関数の形が一定であるのに対して、つかない場合は、それが、赤方偏移に依存して変化するという自由度が加わる⁴⁾。図2の概念スケッチに、LDDEのふるまひも示した。可視域での光度関数において、なぜか、純光度進化派の面々はPLE型に合致する結果を一貫して出しており⁵⁾、非PLE (LDDE) 派は、光度関数の形の変

化を検出している^{6), 4)}。ただ、それぞれのグループが自分たちのデータを使って結果を出しているため、その結論の違いがどの程度解釈の問題で、どの程度データそのもの問題なのか、そもそも、それぞれのデータ間に統計的に有為な差異があるのかといった部分についての定量的な比較まで皆、手がまわらないようである。

過去には、AGNの長寿派、つまり、現在の銀河では数パーセントしか占めないAGNは、過去にもずっとAGNであって、その中心核の超巨大ブラックホールに降着する物質の量が少なくなるにつれて、次第に光度が落ちてゆくという見方を、光度進化に結びつけ、AGNの短命派、すなわち、AGN活動は短命でほとんどの銀河が過去のなんらかの時点でAGN活動をしていて、光度関数の進化は、そういったAGN活動の頻度をしめす、という見方を、密度進化に結びつける考え方もあった。しかし、ほとんどの銀河の中心に超巨大ブラックホールが存在し、その質量はおおよそ、バルジの質量と比例関係にあるという発見がなされた^{7), 8)}。その比例定数については、いまだいくつかのグループが2-3倍異なった結果を出しているが、バルジを持つほぼすべての銀河に、超巨大ブラックホールの成長期、つまり、物質が降着してAGN活動を示す時期があったということでは一致している。つまりAGNの少数・長寿説は基本的に否定されたわけである。PLEという見方をとるにしても、それは個々のAGNの光度が式(1)の $e_l(z)$ のような光度の変化の軌跡をたどったというわけではなく、ほとんどの銀河の中心でAGN活動のオン・オフがあり、その統計的ふるまひが結果としてそのような光度関数進化の形になったと解釈できるわけである。

軟X線領域の話にもどると、初期のAGNの軟X線光度関数に関するいくつかの論文は、主に、純光度進化派の人達によって書かれ、光度関数の記述は、PLE型の関数のパラメーター表示で与えられていた。それを単純に、ROSATの限界フラックスより暗い部分まで外挿して、AGNによる軟X線背

景放射 (0.5–2 keV) の寄与は 30% 程度であろうと見つもられていたのである。その後、ROSAT 全天サーベイをもとにした、ROSAT Bright Survey (RBS) や、Lockman Hole における、ROSAT Deep Survey, Ultra-Deep Survey のフォローアップが進むにつれ、PLE では合わない部分があることが次第に明らかになり、むしろ、PDE のほうがよく観測されたふるまいを記述するようになってきた。その違いの原因として次のようなことがあげられる。(1) ROSAT 全天サーベイによって近傍の AGN の統計があがったこと。

(2) ROSAT ミッションの前半には、Position Sensitive Proportional Counter (PSPC) という検出器が、その感度の良さでエネルギー分解能があることから、深サーベイ観測に使われていたが、PSPC のガスが残りに少なくなって使えなくなり、代わりに、感度は落ちるがよりシャープな撮像ができる High Resolution Imager (HRI) という検出器のみを使うようになってから、それを使った Lockman Hole の超深サーベイ観測で位置決定精度が飛躍的にあがり、誤同定が解消されたこと。(3) Keck Telescope による観測で AGN 活動を示す高励起の輝線が見つかり、以前であれば、AGN のサンプルに入れないようなものも AGN とされ、低光度、中赤方偏移での AGN の個数密度を押しあげたこと。以上のような理由で、単純な PLE では合わなくなってきたのである。

一方、PDE で記述した場合の最大の問題点は、そのモデルを検出限界以下まで外挿し、それを視線方向単位立体角あたりで積分したフラックス (表面輝度) にすると、(軟) 宇宙 X 線背景放射の絶対値として測られている値よりも大きくなってし

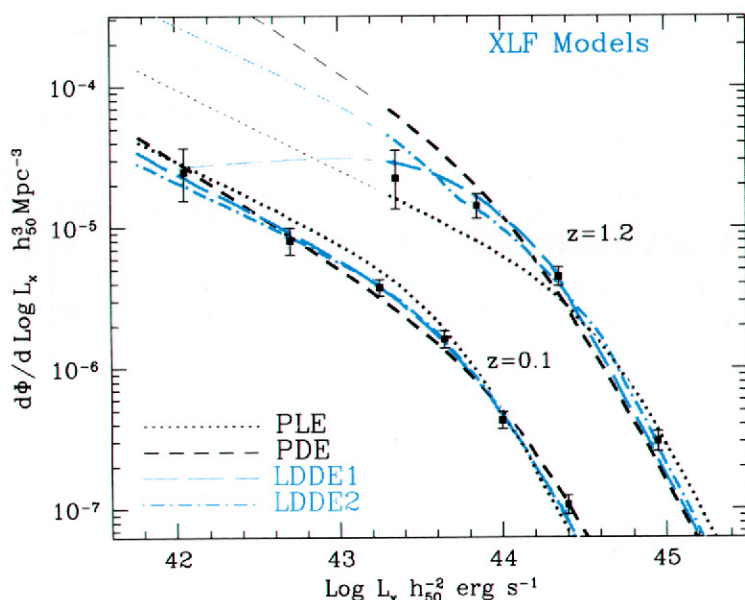


図3 観測された光度関数への、PLE、PDE、および2種類のLDDE関数へのフィットを、赤方偏移 $z=0.1$ と 1.2 について示した。各モデルを表す線については、図中ラベル参照。 $z=1.2$ の $\text{Log } L_x < 43.3$ で各線が細くなっているのは、ROSAT における X 線源の検出限界以下でデータがない部分への各関数の外挿であることを示す。

まうということである。また、実際の光度関数の、比較的低光度側にも少し不一致が生じてくる。そこで、我々は、低光度側で進化率が低くなるような光度依存密度進化 (LDDE) を使って記述することにした。しかし、いくら、ROSAT 超深サーベイの結果を使ったとはいえ、その限界は、 $z=1.2$ で、 $\text{Log } L_x = 43.3$ 、それもごく狭い領域でやっとそれだけの深さになるため、その限界での統計誤差は大きく、LDDE での記述のしかたにはかなり自由度がある。つまり、低光度側 ($\text{Log } L_x \leq 44$) の進化の速さについては、まだまだ決まらないというわけである。そこで、我々は、データのある部分では、統計的に十分正しく、データのない部分への外挿では両極端になるような2つのLDDEモデルを考えた²⁾—LDDE1: 進化率は $\text{Log } L_x \leq 44$ で急速に落ち、 $\text{Log } L_x \leq 42$ では無進化、モデルを積分すると、軟 X 線背景放射 (0.5–2 keV) の銀河系外成分の

50% ~ 60% になる、そして、LDDE 2 : 進化率は、データに合わせるため、いったん $\text{Log Lx} \leq 44$ で落ちるものの、また平坦になり、その詳細は、軟X線背景放射 (0.5 - 2 keV) の銀河系外成分の90% になるように微調整する。この、LDDE 1 と LDDE 2 については、特に物理的描像が動機となっているわけではなく、データが欠けている部分への外挿としてもっともらしい範囲を示すために便宜上導入したものである。図3に、 $z = 0$ と 1.2 における、各モデルのふるまいをデータとともに示す。

その後の発展として、チャンドラ衛星

の深サーベイ Chandra Deep Field North や South のX線源カウントは、LDDE2 より、低光度側での進化が極端に遅くなるLDDE1のほうより合致しているらしいことがわかってきた。さらに、チャンドラ深サーベイで検出されたX線源のうち、現時点で赤方偏移のわかっているものと、ROSAT衛星のサンプルを組み合わせた予備的な光度関数においては、そのふるまいはさらに極端であり、 $\text{Log Lx} \leq 43$ では逆進化(過去のほうが数密度が低い)が見えているようである。そして、低光度側での数密度のピークは、 $z \sim 1.5$ (次節参照) よりはより近傍の、 $z \sim 0.7$ 付近にあり、軟X線光度

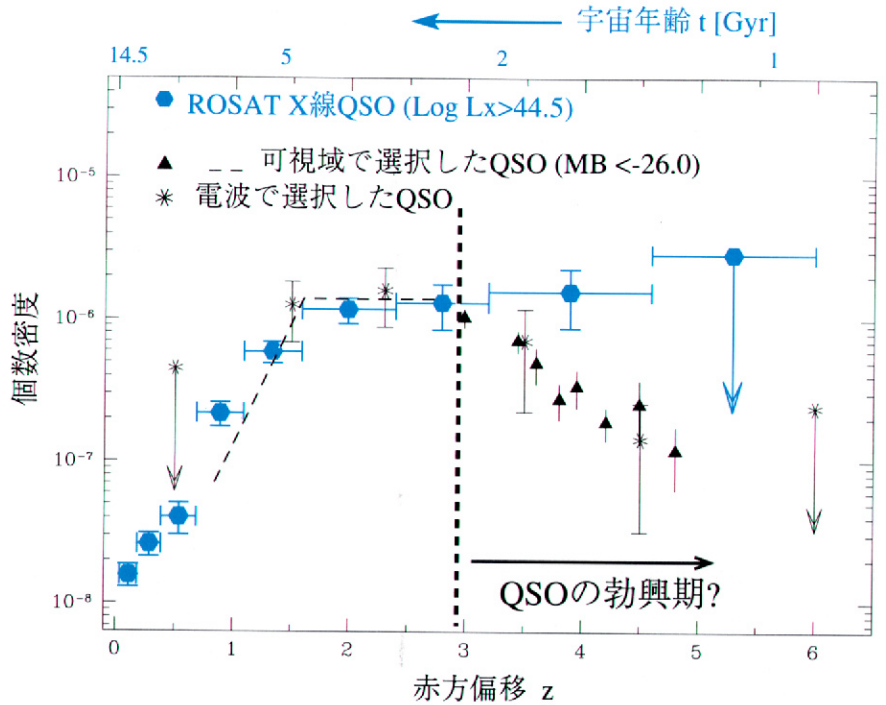


図4 軟X線光度 $\text{Log Lx} > 44.5$ のQSOの個数密度を赤方偏移の関数としてプロットした(青色). 縦軸の単位は、X線QSOについて $h_{50}^3 \text{Mpc}^{-3}$. 過去の文献との歴史的比較のため、宇宙年齢を除き、宇宙項なしの平坦宇宙 ($\Omega_m = 1, \Omega_\Lambda = 0$) で計算したものを示してある. 比較として、可視域で選んだQSO(\blacktriangle)^{9), 10)}と電波で選んだQSO($*$)¹¹⁾の個数密度の進化もプロットした. ただし、個数密度の絶対値は、 $z=2$ 付近ではほぼ同じ位置にプロットできるように定数倍してある. いずれも、現在 ($z=0$) からさかのぼって、 $z \sim 1.5$ までの数密度の増加は顕著であるが、 $z > 2.7$ で可視、電波選択のQSOは減少しているにもかかわらず、軟X線選択のものは $z \sim 4$ ぐらいまで、平坦にのびている.

関数の形は赤方偏移とともに徐々に変化しているのがわかる. 筆者らは、本稿執筆時点において、さらにその部分を含めた定量的な解析を行なっているところである.

いずれにせよ、AGNの進化については、もはや、PDEやPLEといった単純なパラメータ表示では表現し切れない. 超巨大ブラックホールの形成や、燃料補給、星生成との関係や放射スペクトルの中心ブラックホール質量依存、吸収といった様々な物理的過程が、あるバンドでの光度関数に関する以上、結果としてPLEやPDEのような単純な形式になるほうが不自然であろう.

3. 若い宇宙における QSO の勃興

今度は、近傍から非常に遠方まで、良くサンプルされている高光度の QSO ($\text{Log } L_x > 44.5$) のふるまいに目を向けてみる。その数密度を、赤方偏移の関数としてプロットしたのが図 4 である。前述したような、 $z \sim 1.5$ ($t \sim 4.5$ Gyr) から現在 ($t = 14.5$ Gyr) にかけての 1/100 の数密度の減少 (あるいは、現在から、 $z \sim 1.5$ にさかのぼって 100 倍の増加) がみてとれるが、さらにさかのぼっても、サンプルの限界の $z \sim 4$ ($t \sim 1.6$ Gyr) まであまり変化がなく、 $z \sim 5$ ($t \sim 1.3$ Gyr) での上限値につらなる。

一方、光学域や電波域では、 $z \sim 2.7$ ($t \sim 2.5$ Gyr) からさかのぼって $z \sim 5-6$ ($t \sim 1$ Gyr) ぐらいまで、QSO の個数密度が急激に減少していることが観測されている^{9), 10), 11)}。あるいは、宇宙のはじまりから、 $t \sim 1$ Gyr に QSO が出現しはじめて、さらに、1 Gyr 後ぐらいに個数密度がピークに達すると言ひ換えられる。その様子は、図 4 に、ピークがほぼ一致するよう定数をかけて、重ね書きしてある。この、「QSO の勃興」が、ROSAT のサンプルでは見られない。その原因として、いくつかの可能性が考えられる。統計的には、可視 QSO のような $z > 2.7$ での急激な減少は X 線のサンプルでは 96% の有為性で棄却される。確実なことを言うには、少し統計が足りないが、しかし、X 線と、可視および電波での進化の違いが、見ている QSO の光度の違いによる実際の進化の違いを反映している可能性も十分ある。可視や電波でサンプルした QSO は、ROSAT でサンプルしたものより全体的に数倍パワフルなものであり、電波で選択したものは、Radio-Loud なものを拾っているというように、その進化は、お互いに異なるという可能性は十分ある。Haiman & Loeb¹²⁾らがその理論で仮定したように、宇宙初期の構造形成において、できつつあるダークマターハローに比例する質量の超巨大ブラックホールが形成されていたとすれば、光度の低いものからまず現れ、次第に大質量の構造とともに

超巨大ブラックホールが成長するにつれ、次第にパワフルな QSO が現われてくるということも想像に難くない。(但し、Haiman & Loeb¹²⁾の定量的予測自体は、 $z > 5$ の X 線 AGN の数という点で、最新のチャンドラ衛星の深サーベイの結果とは合わないようである。) また X 線と可視の光度比の、光度や赤方偏移への微妙な依存性や、K-補正の系統的違いが関係して来るかも知れない。

様々な可能性のひとつのチェックとして、われわれは、 $z > 2.7$ で数密度の減少が見えている Schmidt, Schneider, Gunn⁹⁾のサンプルから $z \sim 2.7$ 付近と $z \sim 4$ 付近でそれぞれ数個ずつ選んでチャンドラ衛星で観測する提案をした。QSO と X 線と可視域での光度比や、平均的な X 線スペクトルを比較し、X 線と可視域での観測上の数密度の進化に対する影響を調べるためである。結局、他のグループが $z > 4$ の QSO を多く観測しているため $2.7 < z < 3$ のもの 6 個が観測されることになった。この比較によって、見えている進化の差が、異なる波長帯の観測による見かけのものなのか光度の違いの進化のしかたを実際に反映しているのかがわかるであろう。XMM-Newton やチャンドラ衛星によって、ROSAT で最も深い観測を軽く凌駕する感度でのより広い領域のサーベイが様々なグループによって行なわれつつある。その結果、こういう興味深い高赤方偏移にある QSO のより詳しい光度関数の進化の様子、X 線と可視域で選択された QSO の関係などが明らかになって来ることが期待される。

4. AGN 活動と星生成の歴史

次に、 $z \sim 1.5$ から現在 ($z = 0$) までの進化に注目してみる。つまり、 $t \sim 4.5$ Gyr 以降、特に高光度の QSO の個数密度が次第に減少して行く時代である。その様子は、宇宙の星生成率のカーブ (いわゆる Madau プロット¹³⁾) に良く似ていることに気づかれた方もおられるであろう。しかし、QSO の数密度のほうは、その間に 100 倍

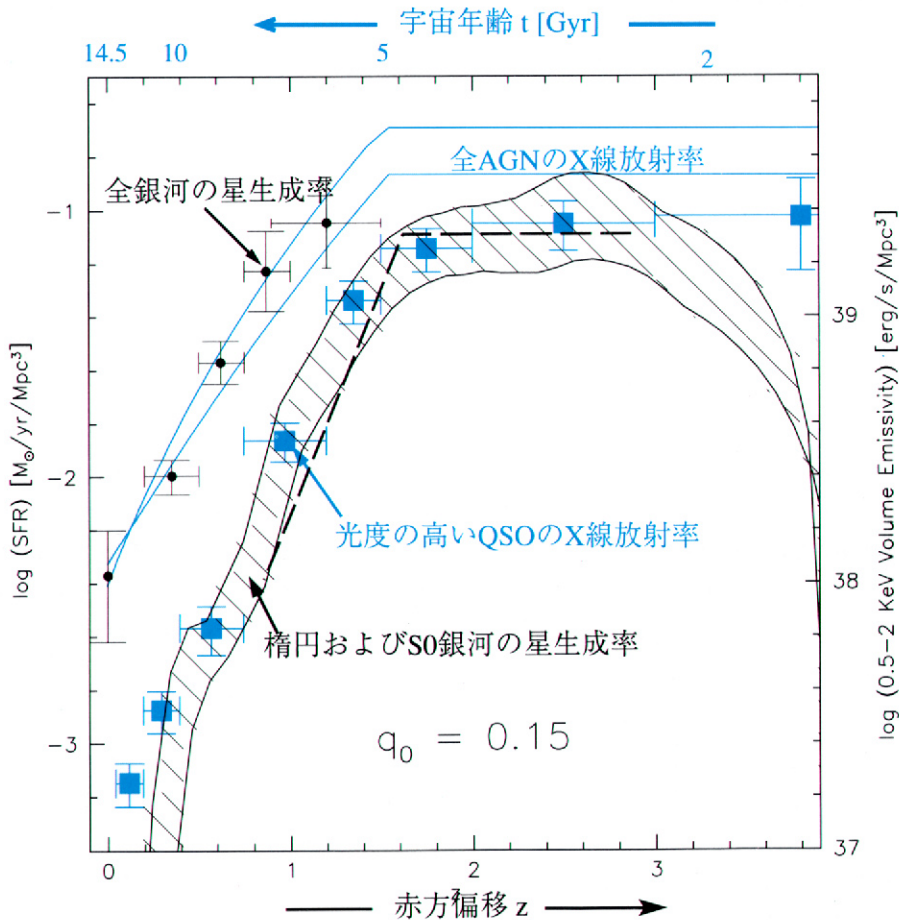


図5 宇宙における AGN の X線放射率の歴史を、星生成率と比較する。縦軸は宇宙単位体積あたりの星生成率および AGN の軟 X線放射率。青点は、高光度 ($\text{Log } L_x > 44.25$) QSO の宇宙単位体積あたり X線放射率、黒斜線は、楕円・S0 銀河のみでの星生成率を示す。小黑点は、いわゆる Madau プロットの改訂版で、全銀河の星生成率、青細線は、本文第 2 章の、LDDE1 (下) 及び LDDE2 (上) モデルに基づいた AGN の X線放射率の進化である。ただし、現在では、チャンドラ衛星などの成果から、LDDE1 のほうが実際に近いことがわかっている。図は、Franceschini et al.¹⁴⁾による。

変化するのに対し、全体的な星生成率のほうは、よりゆるやかで、30 倍程度である。ところが、星生成率のほうを、楕円銀河と S0 銀河といった、バルジ（銀河の楕円成分）が優勢なものだけに限って見た場合、その変化率は、渦巻銀河などを含む全体の星生成率に比べ、より急激に変化し、クェーサーの数密度のカーブに近い振舞いを示すことが、Franceschini ら¹⁴⁾によって指摘された。その比較を図 5 に示す。上の結果は、バルジにお

ける星生成と、特に光度の高い QSO の進化に強いつながりがあることを示唆するものである。また、全銀河の星生成率（Madau プロットにその後、吸収の効果などを補正した改訂版）は、低光度セIFAートも含めた、AGN 全体の X線放射率と同様の進化をしている。上述したように、超巨大ブラックホールの質量が、バルジ内の星の質量とほぼ比例関係にあることと無関係ではあるまい。

5. 軟X線サンプルでの限界

以上の議論では、0.5–2 keV の軟X線のサンプルを使用している。しかし、もしX線発生源と観測者の間に物質の層があれば、軟X線は、ガスの原子から電子をたたき出すことによって吸収されてしまう(光電吸収)。こういった効果は、2型セイファートと呼ばれるAGNに顕著であるが、光学域で1型と分類されているものにもたまに見られる¹⁾。いずれにせよ、軟X線によるサーベイではこういう吸収を受けたものは検知されにくく、吸収のうけていないAGNが大部分を占めているとあって良い。エネルギーの高い硬X線では、そういったガスは格段に透明度を増す。そして、硬X線サーベイとの比較や、AGNの重ねあわせで作られている宇宙X線背景放射の強度やスペクトルとの比較から、エネルギー的には、軟X線でサンプルされるものの数倍もの、吸収を受けたAGNが存在して、X線背景放射のほとんどをつくることになる。従って、ROSATサンプルでは、超巨大ブラックホールへの降着によるエネルギー放出のほんの一部を見ているに過ぎない。こういった、吸収を受けたAGNの種族の探索においては、「あすか」が重要な役割を果し、その後、チャンドラやXMM-Newton衛星に引きつがれている。特に、近年多くの研究者が興味をもっている、現在における銀河中心超巨大ブラックホールの宇宙単位体積あたり総質量(前述のバルジと中心ブラックホール質量の比例関係を使って見つめる)と、宇宙のはじまりから、現在まで、ブラックホールに降り積った質量(X線放射から見つめる)の比較については、こういった吸収の影響をきちんと評価することが重要である。このような、種族の探索とその意義については本号、秋山氏らの記事¹⁾に詳しい。

6. おわりに

本稿では、観測されたX線AGNについての現象論的な記述が主となってしまった感がある。同じ

銀河系外の強いX線源でありながら、AGNは、銀河団と違って、その形成過程に複雑な様々な物理が関わって来るため、その光度関数とその進化を理論的枠組のなかで捉えるのは困難である。標準的な冷たいダークマター(Cold Dark Matter; CDM)に基いた天体形成の理論では、解析的な計算で、初期宇宙の密度ゆらぎが成長して、高密度領域が自己重力で収縮した「ダークマターハロー」の形成を追うことができるし(例えば、長島氏による解説¹⁵⁾参照)、近年の数値シミュレーションではダークマター成分とガス成分の構造を再現することができる。前述の銀河団からのX線は、そういった構造がつくりだす重力ポテンシャルにたまった熱いプラズマからのものなので、直接的な理論との比較が可能で、そのX線光度関数や温度関数とその進化は、宇宙の密度パラメーターなどの計測にすら使われている。それとは対照的に、AGNの光度関数の場合、その「ダークマターハロー」と銀河、星(生成)、そして銀河の中でもシュバルツシルト半径にしてAU程度というごく小さい構造である中心ブラックホールの形成およびそれへの物質の降着とそれともなう放射を関連づけるには、その間に、いくつもの物理的ステップがある。例えば、いかにして、銀河内の物質の角運動量を失なわせ、ブラックホールのある中心領域に押し込むかといった過程である。AGNの光度関数を宇宙論的なスケールの天体形成理論から予測するには、そういった複雑な物理の全体的な効果を、単純化した仮定に置き換えて行なわなければならないのが実状のようである。例えば、前述したHaiman & Loeb¹²⁾の最初のモデルは、ダークマターハローの質量に比例する中心ブラックホールを仮定した計算を行なっているが、チャンドラ衛星での最新の結果には合わないようである。さらに、ダークマターハローと中心ブラックホールの質量間の関係や、QSOの寿命などを変えて、その観測的帰結を論ずる努力もなされている^{16), 17)}。同様の枠組に基づきながら、銀河同士の合体を星生成や、中心ブラック

ホールへの物質補給に関連づけた Kauffmann & Haehnelt¹⁸⁾のモデルは、 $z \sim 1.5$ から現在にかけての急激な QSO の数密度の落ちを再現しているようである。いずれにせよ、そういった理論のなかでの、例えば、ダークマターハローと中心ブラックホールの質量比や AGN 活動の持続時間などの重要なパラメータは、物理的描像からの第一原理の必然として与えられる訳ではなく、観測されている AGN の光度関数や、バルジとブラックホール質量の関係などに合わせて決められている。逆に、光度関数などの観測が、宇宙の構造形成と、ブラックホール形成の間の物理的な過程を解きあかす鍵となるのである。

前述したように、X線は、中心ブラックホールへの降着から来る AGN 活動を探索するのに最も有効な波長帯である。様々な深さ、広さで行なう X線サーベイとその多波長同定で見つけた AGN について、光度関数とその進化の詳細はもちろんのこと、そのホスト銀河の形態や、そういったものが置かれている環境（特に宇宙の大規模構造のなかでの）などを調べることによって、銀河の中の星生成と中心ブラックホールの成長のメカニズムとその歴史が解き明かされて行くであろう。

最後に、本稿のもとになった研究論文の共著者である Günther Hasinger, Maarten Schmidt 両教授、および、論文の投稿前に、サーベイの結果を提供して頂いた、各 PI の方々、また、本稿を仕上げるにあたり、再三、締め切りを先送りにして頂き、御迷惑をおかけしてしまった太田耕司氏はじめ編集委員の方々、関連記事のドラフトを送って頂いた秋山正幸氏、ドラフトの不備を指摘して頂いた後藤友嗣氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 秋山正幸, 上田佳宏, 太田耕司 2003, 天文月報, 本号
- 2) Miyaji T., Hasinger G., Schmidt M., 2000, A&A 353, 25
- 3) Miyaji T., Hasinger G., Schmidt M., 2001, A&A 369, 49
- 4) Wisotzky L., 1998, Astron. Nachr. 319, 257
- 5) Boyle B. J., et al., 2000, MNRAS 317, 1014
- 6) Schmidt M., Green R.F., 1983, ApJ 269, 325
- 7) Magorrian J., et al., 1998, AJ 115, 2285
- 8) Merritt D., Ferrarese L., 2001 ApJ 547, 140
- 9) Schmidt M., Schneider D.P., Gunn J.E., 1995, AJ 110, 68
- 10) Fan X., et al., 2001, AJ 121, 54
- 11) Shaver P.A., et al., 1996, Nature 384, 439
- 12) Haiman Z., Loeb A., 1999, ApJ 521, 9
- 13) Madau P., Pozzetti L., Dickinson, M., 1998, ApJ 498, 106
- 14) Franceschini A., Hasinger G., Miyaji T., Malquori D., 1999, MNRAS 310, L5
- 15) 長島雅裕, 2002, 天文月報 Vol 9 No.5, 211
- 16) Haiman Z., Hui L., 2001, ApJ 547, 27
- 17) Hosokawa T., 2002, ApJ 576, 75
- 18) Kauffmann G., Haehnelt M., 2000, MNRAS 311, 576

Cosmological Evolution of Active Galactic Nuclei: A Soft X-ray View with ROSAT and Beyond

Takamitsu MIYAJI

*Department of Physics, Carnegie Mellon University
Pittsburgh, PA 15213, USA*

Abstract: We summarize topics on the cosmological evolution of AGNs based on our investigation of soft X-ray luminosity function (SXLf) of this population using the ROSAT Surveys. The topics include the global description of the SXLf, the emergence of the QSO population in the early universe, and the relation between star formation history and AGN activity. We also comment on the subsequent progress on these topics from recent results from the Chandra.