

論文内容の要旨

論文題目 Chandra Study of Diffuse X-ray Emission from Nearby Edge-on Galaxies

(チャンドラ衛星による近傍 edge-on 銀河からの広がった X 線放射の研究)

大島 泰

銀河は我々の宇宙の構造と化学進化の最も根本的な要素の一つである。銀河内では星と星間物質の間の物質循環により重元素を生成・蓄積する。銀河団空間や銀河間空間に重元素が存在していることは、少なくともその一部は銀河から銀河の外に放出されていることを示している。我々の銀河系のような渦巻銀河においては、温度数百万度の高温物質が、銀河内の物質循環と銀河間空間への物質の供給の一部を担っていると考えられている。すなわち、OB アソシエーションのような重たい星の密度の高い領域において、超新星爆発が継続的に発生し高温ガスの巨大な泡 (superbubble) が銀河面内に生成される。その高温物質はやがて銀河ハローに流れだし、高温物質の温度や周辺条件により、やがて冷えて再び銀河面に戻る (Galactic fountains)、もしくは、銀河の重力圏を脱出する (Galactic winds)、と考えられているのである。

このような高温物質の典型的な温度は 10^6 K であるので、その観測には紫外線や X 線、特に 0.1-1 keV 程度の軟 X 線が有効である。しかし、このような物質循環と物質放出をその銀河の内部から観測することは容易ではない。むしろ我々の銀河系の外の銀河を観測する方が適当である。しかし、これまでは、観測の感度、特に銀河内や背景に存在する個々の X 線源の寄与の不確定性により制限される感度のために、このような研究は主に、一部の星生成の活発な銀河=スターバースト銀河、すなわち高温ガスの X 線放射の特に強い銀河、についてのみ行なわれてきた。しかし、我々は、宇宙の化学進化を探るには、むしろ活動性の高くない「普通の」銀河を理解することが重要であると考え。すなわち、より普遍的な普通の銀河においてはこれは未だに未知の領域であり、その特徴を観測的に明らかにできれば、宇宙の構造及び化学進化における銀河の役割についての理解を大きく深めることができると考える。

もちろん、これまでも ROSAT 衛星や ASCA 衛星によって研究は行なわれているが、X 線分光能力や空間分解能が十分でなく、観測上大きな不確定性が残ってしまっている。これに対して、チャンドラ衛星は、高い空間分解能とそれを生かした点状の X 線源に対する高い検出感度と 200 eV 程度の X 線エネルギー分解能を持つ。これにより、個々の X 線源の寄与の影響は無視できる程度に小さくすることができ、かつ、放射の温度や重元素濃度を中程度の感度で決定することが可能である。我々は、この点に注目し、最も近傍にある (距離 1.6 Mpc) edge-on 銀河 (傾斜角 ~ 90 度) である NGC 55 を選び抜きチャンドラ衛星に観測提案を行ない受理されて観測を行なった。近傍の edge-on 銀河、NGC 55 を観測対象として選んだ理由は以下の全ての条件を満たすからである。

1. 銀河面から銀河ハローに吹き出した表面輝度の小さな X 線放射を検出し、そのスペクトルパラメータを決定するために、

- 幾何学的な配置が edge-on であること、
 - 我々の銀河による X 線吸収が小さいこと。
2. 銀河面内に存在すると予想される星形成からの X 線放射を検出し、そのスペクトルパラメータを精度良く決定するために、
- edge-on であるにもかかわらず、銀河自身の X 線吸収が小さいこと。
3. 距離が近いこと。

一方、NGC 55 は、dwarf galaxy にも分類される質量の小さなシステムであるため、必ずしも得られた結果が典型的な渦巻銀河に共通なものとは直ちには結論できないという欠点もある。この問題を解決するために我々は、チャンドラ衛星のアーカイブデータの中から距離 10 Mpc 程度以内の edge-on (傾斜角 >80 度) の銀河を選び、これらの解析もあわせて行なった。

スペクトル解析においては、0.5 秒角というチャンドラ衛星の優れた角度分解能を活用することによって点源からの寄与という最大の不定性を排除することができる。一方、チャンドラ衛星の点源の観測では、X 線検出器のごく小さな領域のデータにより X 線スペクトルを構築することができるため、一般にバックグラウンドの影響は小さい。しかし、本観測のように、広がった X 線の観測においてはバックグラウンドの寄与は大きく、その不確定性は結果に大きく影響する。特に、本観測は数 100 万度程度の温度のプラズマからの X 線放射を扱うため、0.5 から 2keV 程度のエネルギー範囲が重要であるが、このエネルギー範囲においては数度の空間スケールで大きな強度変動を示す我々の銀河系内の数百万度程度の温度のプラズマからの放射がバックグラウンドとして支配的である。このバックグラウンドの方向依存性のために、多くの観測データから点源の寄与を取り除いて構築されたいわゆる標準バックグラウンドデータを利用することはできない。実際、NGC 55 のデータにこれを適用すると、観測視野の広い範囲において X 線強度が負になってしまう。そこで、我々は、バックグラウンドを荷電粒子に起因する成分、銀河系外の X 線源による成分 (点源に分解されなかった宇宙 X 線背景放射)、銀河系内の放射の 3 つの成分にわけ、これらをアーカイブデータ中のバックグラウンド観測データ (X 線入射窓の開口前、X 線望遠鏡から検出器を隠した場合、太陽の当たっていない月の観測、の 3 通りのデータ) と、本観測データ自身を使ってモデル化することによって精度良くバックグラウンドを差し引く方法を新たに構築し、その差し引きにともなうシステムティック誤差を評価した。これによって、我々は初めてバックグラウンドの不確定性を誤差として評価しつつ、表面輝度の低い X 線放射の物理量をこれまでにない高い精度で決定することが可能となった。

実際の解析としては、チャンドラ衛星による NGC 55 の観測の高分解能イメージより、まず $f_{X:0.5-2keV} = 7 \times 10^{-16} \text{ ergs cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ までの点源を取り除いた。銀河中に存在する X 線連星系の個数を、我々の銀河系との質量比によって見積もり、宇宙背景 X 線放射を形成する遠方天体と合わせると、検出された点源の個数と一致する。次に、前述の方法によりバックグラウンドの差し引きを行なう。

バックグラウンドの差引後、NGC 55 の disk 内には、広がった X 線放射が見られた。そのピークを星形成領域を示すと考えられる $H\alpha$ 画像と比較すると、X 線放射のピークは約半径 350 pc の $H\alpha$ のシェル構造の内部にあることがわかった (図 1 中 Region A)。X 線のエネルギースペクトルを作成し、温度、重元素量、NGC 55 にある星間物質による吸収量を調べた。Region A の周囲の領域 (図 1 中 Region B-A) は、星間物質による吸収が大きいことから、ディスクの背後にあって、Region A および $H\alpha$ で示される星形成領域とは直接に関係はないことが示唆される。Region A の X 線放射から、ガスの密度、温度を求めると、 $H\alpha$ ガスの圧力とつりあっており、CO 輝線で示される分子雲は X 線ガスの周囲で強いことから、Region A はディスク内で周囲の圧力により閉じ込められ

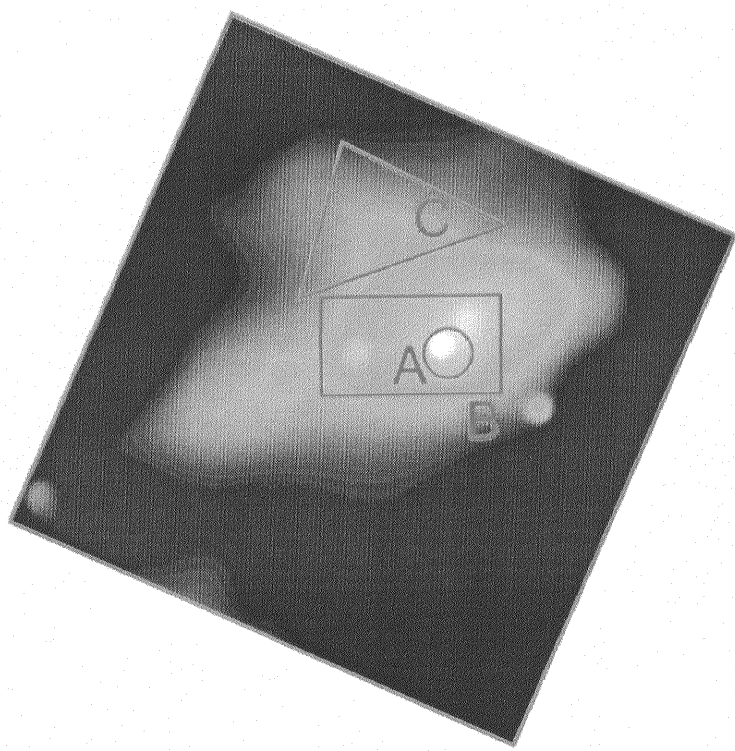


図 1: NGC 55 の全体のX線 (0.5-2 keV) イメージ。X線のピーク (Region A) の北側に広がったハロー状の放射領域を発見した (Region C)。正方形 (Region B) の拡大図を図 2 に示す。

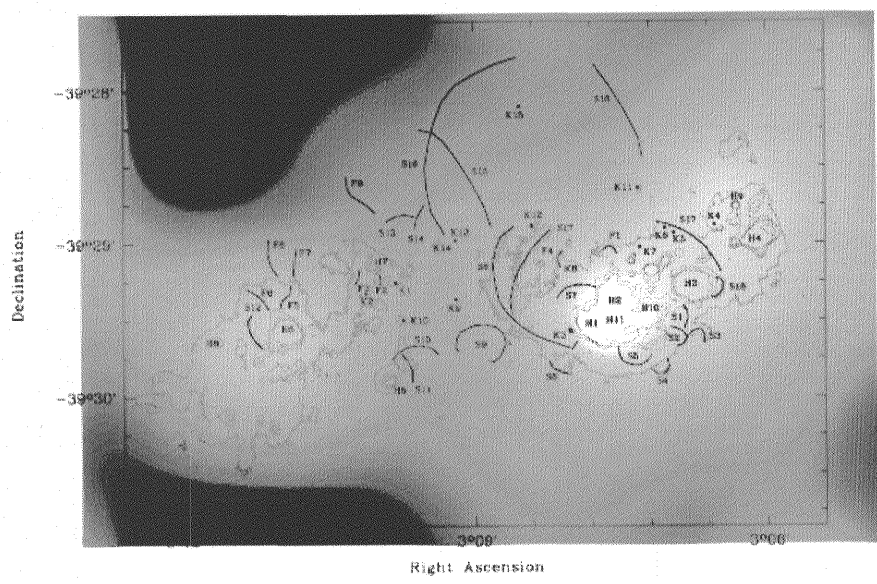


図 2: NGC 55 の中心部のX線 (0.5-2 keV) イメージ (図 1 中 Region B の拡大図) と Otte & Dettmar (1999) らによる H_{α} の等高線の重ね合わせ。図の右側のX線のピークと H_{α} の明るい星形成領域が一致している様子が見て取れる。X線のピークの周りとその上にシェル構造がはっきりと見えている。

ているとみなせる。Region A に含まれるガスの質量は $M_{\text{tot}} = (4.0 - 5.4) \times 10^4 M_{\odot} \left(\frac{R}{350 \text{ pc}}\right)^{-3/2}$, エネルギーは $E_{\text{th}} = (3.0 - 5.1) \times 10^{53} \text{ ergs} \left(\frac{R}{350 \text{ pc}}\right)^{-3/2}$ であり、このことから Region A は約 1000 個の超新星爆発によってできたスーパーバブルであると考えることが妥当である。

さらにディスクから 2 kpc 離れた北側にも広がったハロー状の X 線放射を発見した (図 1 中 Region C)。Region A の温度が $kT \sim 0.8 \text{ keV}$ であるのに対し、region C では $kT \sim 0.2 \text{ keV}$ と低温になっており、これは断熱膨張によると半定量的に解釈できる。また、位置的な関係からも、Region A からディスクと垂直方向に吹き出したガスと考えることができる。また Region A の密度、 $n_e = (1.7 - 2.3) \times 10^{-2} \text{ cm}^{-3} \left(\frac{R}{350 \text{ pc}}\right)^{-3/2}$ は、Norman & Ikeuchi (1989) による「チムニー」モデルの条件を満たしている。Region A からのガスのふきだし速度は、音速が上限になると考えると、Region C の質量、エネルギーがそれぞれ $M_{\text{tot}} = (1.3 - 10.7) \times 10^5 M_{\odot} \left(\frac{R}{970 \text{ pc}}\right)^{-3/2}$ $E_{\text{th}} = (1.9 - 25.0) \times 10^{53} \text{ ergs} \left(\frac{R}{970 \text{ pc}}\right)^{-3/2}$ となることから、Region C にガスを供給するには、3000 個の超新星爆発が 10^8 年の間に継続しておき続けることが必要である。しかし、放射冷却に要する時間は 1×10^9 年以上とさらに長いことから、冷えた物質がハローからディスクに再落下しているとは考えにくい。

Region A からの X 線放射スペクトルより、希薄なプラズマからの X 線放射モデルを用いてスーパーバブル内の重元素量を求めることができる。観測しているエネルギー範囲 0.5 ~ 2 keV では、電離した鉄による L 輝線が卓越しているものと考えられるが、現在の CCD 検出器のエネルギー分解能では個々の輝線の分離は困難であり、鉄の重元素量と、より軽い α 過程によって形成される酸素、ネオン、マグネシウム等の重元素量を独立に求めることはできない。しかし、ベストフィット値で鉄の重元素量は太陽組成の $0.07_{-0.04}^{+0.1}$ 倍と極めて低い。また、 α 元素との比 Z_{Fe}/Z_{α} も約 0.46 と低く、タイプ II の超新星爆発のイジェクタで予想される量 ~ 0.3 に近い。これは Region C でも同様であり、ハローに逃げ出したガスは、ほとんどタイプ II 超新星爆発で作られ、そのままディスクから脱出したものと考えられる。この結果は、Ptak (1996) らによるスターバースト銀河 NGC 253, M82 の観測とも一致するが、我々の銀河系の重元素量とは大きく食い違い、超新星爆発でできた重元素を含む星間物質から再び星が形成され、太陽のような重元素比を示す、という考え方とは一致しない。

このような、超新星爆発によるガスの脱出が NGC 55 のような質量の軽い銀河系に特有の現象であるかを調べるために、他の 4 つの edge-on 銀河 (NGC 891, NGC 3628, NGC 4631, NGC 4945) についてもチャンドラ衛星による観測データの解析を行なった。全ての銀河ディスクから広がった X 線放射が検出され、ハロー成分も NGC 3628 から見つかった。これらの広がった放射によるエネルギースペクトルは、光子統計や銀河自身の吸収の制限から、NGC 55 ほど強い制限を与えられるものはないが、少ない鉄の重元素量、小さな Z_{Fe}/Z_{α} と矛盾するものはなかった。すなわち、NGC 55 で発見した現象は、NGC 55 のなんらかの特殊事情によるという可能性は高くないと考えられる。

本論文では、バックグラウンドの詳細な評価により、NGC 55 から、星形成領域と一致するスーパーバブルと見なせる広がった X 線放射を検出し、さらにスーパーバブルのガスが銀河ディスク外に脱出している、という可能性を観測的に明らかにした。これらは、宇宙の化学進化に、銀河内での星形成活動と銀河風が寄与している、という予想と一致するものである。一方で、脱出しているガスの重元素量が銀河団ガスで観測されているものよりも小さく、これだけでは銀河間物質に含まれる重元素量を説明することはできず、化学進化への寄与は銀河の規模などによって大きく異なっているということを示唆しているものと考えられる。今後の観測では、銀河の規模、種類、環境による銀河風の形成過程、星形成における重元素のリサイクル過程の違いを、観測によって定量的に明らかにすることが求められる。