

論文内容の要旨

論文題目

An X-Ray Study of the Starburst-Driven Outflow in NGC 253
(NGC 253 銀河の爆発的星生成に伴うアウトフローの X 線による観測的研究)

氏名 三石郁之

1 研究の背景: 爆発的星生成に伴う銀河スケールアウトフロー

宇宙に存在する水素やヘリウム以外の金属(以下、重元素)は、宇宙開闢以降、主に銀河中の超新星爆発により生成されたと考えられている。しかしながら、銀河から銀河間空間への重元素を含む物質の流出過程は、未だ明らかではない。現在、その流出過程として最も有力な説として爆発的星生成(以下、スターバースト)により引き起こされる銀河スケール(>kpc)のアウトフローが挙げられる。これはスターバースト領域にて連続的に起こる II 型超新星爆発により加熱された高温プラズマが星間物質を押し、広がっていくというものである(e.g., Veilleux et al., 2005)。最終的にガスのもつ運動エネルギーが母銀河の重力ポテンシャルを上回る場合、ガスは銀河を抜け出し銀河間空間へと流出していく。つまり、加熱されたアウトフローガスはスターバースト領域を飛び出し、ディスク、ハロー、そして銀河間空間へと抜け出していく。

観測的には近年、いくつかのスターバースト銀河からディスクの外側までのびた X 線ハローの検出が報告されている(Strickland et al., 2004, Tsuru et al., 2007, Yamasaki et al., 2009)。また、そのいくつかのスターバースト領域にて、 $H\alpha$ 観測から 100 pc スケールの銀河面垂直方向への数 100 km/s のアウトフローが報告されており(Shoptell et al., 1998; Westmoquette et al., 2011)、X 線との相関が知られている(Strickland et al., 2004)。しかしながら、アウトフローとして流出している高温ガスは X 線では観測できず、その速度やエネルギーを知ることは困難である。

一方ガスの化学組成については、スターバーストに起因する II 型超新星爆発に特徴的な α 元素(O, Ne, Mg, Si など)に富んだガス組成比が期待される。しかしながら重元素汚染の鍵を握る X 線ハローガスが希薄で暗いため、これまでの衛星では制限をつけることができなかった。これに対しバックグラウンドが低く、 α 元素を含む低エネルギーでの輝線感度が

最も高いすざく衛星により、スターバースト銀河ハロー内の X 線ガスの重元素組成比が初めて観測的に求められた(Yamasaki et al., 2009; Konami et al., 2011)。しかしながら統計不足や角度分解能に起因する点源からの漏れ込み除去が難しく、ハロー領域のガスの起源に迫ることはできていない。

2 本研究の目的と構成

本論文の目的は、スターバースト領域からハロー領域までを含めた、kpc を超える銀河スケールのスターバーストアウトフロー現象の観測的検証を行うことである。そのためにスターバースト銀河のディスク領域の高温ガスが超新星起源と考えられるか、また X 線ハローとディスク領域の化学組成比の定量的比較、X 線ハローを形成する高温ガスの温度分布、密度分布を観測から明らかにすることでハローが真にアウトフローしているかを検証する。そのためには α 元素を含めた化学組成比を数 10% の精度で決定し、また X 線ハローの温度を決めることが必要である。そこで私は近傍で明るく、ディスクとハロー領域の空間的切り分けが容易なエッジオン、かつ視直径が最も大きなスターバースト銀河 NGC 253 に着目し、3 つの天文衛星すざく、Chandra、XMM 衛星を用い、NGC 253 の中心核・内側ディスク・外側ディスク・ハローについて解析を行った(図 1 左)。

まず私は電波や赤外の観測から活発な星生成が示唆されている NGC 253 の中心核の解析を行い、X 線ホットガスの温度・密度およびその起源を調べた。次に中心核領域の外側に存在し、 $H\alpha$ 観測からアウトフローが確認されている領域(以下、スーパーウィンド領域)の解析を行い、X 線ホットガスの温度・密度および化学組成を調べた。同様にスーパーウィンド領域の外側のディスク領域、ディスクの外側のハロー領域の X 線ホットガスの物理状態および化学組成を調べた。これらの各領域の解析を合わせることで、X 線ハローガスの起源、およびスターバーストに伴う銀河スケールのアウトフロー現象の観測的検証を行った。

本論文で用いるすざく衛星の観測は私が Contact Co Investigator として共同観測提案を行いすざく衛星の国際公募観測による観測時間を得た観測である。XMM, Chandra 衛星は公開データを用いた。

3 銀河 NGC 253 の中心核領域の解析と結果

すざく、Chandra、XMM 衛星により NGC 253 の中心核領域の解析を行った。特にすざく衛星の高エネルギー(>6 keV)における高いエネルギー決定精度(<6 eV at 6 keV)と大きな有効面積をいかし、中心 2.3 kpc 領域から中性鉄(Fe I)、水素様高階電離鉄輝線(Fe XXVI)を >99.99 %, 99.89 % の有意度で初めて検出した(図 1 右)。さらに 0.5 秒角の高い角度分解能をいかした Chandra 衛星の解析により、すざく衛星で観測された鉄輝線構造を特徴とす

るハード X 線が $128 \times 48 \text{ pc}^2$ の非常にコンパクトな領域に集中していること、両輝線はこの領域内で広がっていることを初めて突き止めた。また Chandra の Fe XXV 輝線の強度と星生成に伴う非常に密度の濃い ($\sim 10^{24} \text{ cm}^{-2}$) 分子雲の位置との相関を初めて示した。

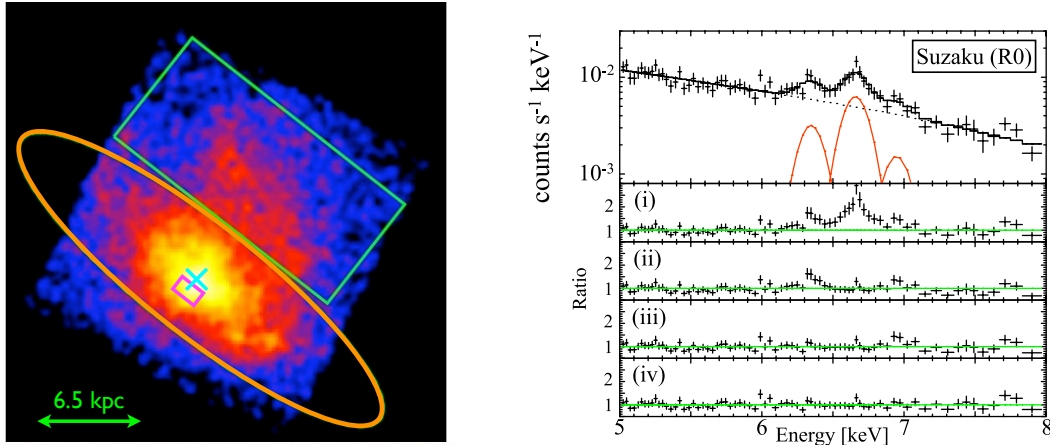


図 1: (左)すざく衛星による 0.4-1.0 keV バンドでの NGC 253 銀河。シアンは中心核、マゼンタはスーパーウィンド、オレンジはディスク、緑はハロー領域。(右)中心 2.3 kpc から初めて検出された Fe I (6.4 keV), Fe XXVI (7.0 keV) を含めた鉄輝線構造。

4 NGC 253 のスーパーウィンド・ディスク・ハロー領域の解析

中心核領域から 300 pc 程離れた 100 pc スケールのアウトフローが観測されているスーパーウィンド領域、厚さ 3.4 kpc 以内のディスク領域および中心からディスク垂直方向に 3.4~10 kpc まで広がるハロー領域を Chandra、XMM、すざく衛星を用いて解析した。各領域のホットガスの温度・密度や化学組成を調べ、単温度では観測された輝線放射を説明できないこと、2 温度のプラズマでは説明できることを示した。また、各領域のスペクトルからは O, Ne, Mg, Si, Fe 輝線の特徴とした各種重元素の輝線が観測され、これらの領域から初めて化学組成比を求めることに成功した。8 kpc にもわたる各領域の温度が狭い温度範囲 ($kT=0.2-0.31 \text{ keV}$, $0.56-0.61 \text{ keV}$) に集中している結果を得た。特にハロー領域については、すざく衛星によるこれまでで最も統計の良いデータをいかし、得られた低温度プラズマに感度がある 0.8-1.0 keV/0.4-0.8 keV でのハードネス比を算出することで、より空間分解能をあげた温度マップを作成した。その結果、1 温度で温度を表した場合、ディスクからハローにかけて factor 3 程度温度が低下し、2 kpc 以降のハロー領域では、温度は 20 % の範囲で一様であった(図 2 左)。

5 議論および結論

まず私は中心核領域で観測されたハード X 線放射の起源を議論した。観測された輝線強度を考慮すると、Fe I、Fe XXV の両輝線を全て点源だけで説明するには、極端に多くの個数を要することが分かった。そこで広がった天体起源として考えると、Fe XXV は 10-1000

以下の超新星残骸で説明できる。Fe I は、中心核領域からの X 線放射が分子雲によって反射され生じた蛍光 X 線と考えると矛盾しない結果を得た。これにより、NGC 253 の中心核では密度の濃い分子雲が集中するようなスターバーストに伴い、多量の超新星爆発が起こっている、という描像が示唆される。

次に X 線ハローとディスクの高温ガスの起源について議論した。各領域で観測された X 線ガスの化学組成比を図 2 に載せる。ガスに含まれる各重元素の比 O/Fe, Ne/Fe, Mg/Fe, Si/Fe は 90 %のエラーの範囲内でスーパーウィンド・ディスク・ハロー領域全てで一致していた。これは外側の X 線ハローガスの起源として、内側のガスと考えると矛盾しないことを意味する。またその化学組成比から、II 型超新星爆発が支配的であることが初めて観測的に示された。以上、中心核からの放射がスターバーストに伴う高温ガス起源と考えられること、X 線ハローガスがディスクおよびより内側のスーパーウィンド領域と同じ起源、かつ II 型超新星爆発により生成されたと示唆されることから、ハロー高温ガスが中心核で生じ、ディスクを通じてハローに到達している描像が描かれる。最後に、私は得られた輝度分布とハードネス分布が各々密度の二乗および温度に比例すると仮定し、それらの関係を調べた結果、ディスク領域までは断熱膨張、ハロー領域では自由膨張でおおよそ表されるという結果を得た。

以上のように、本論文ではスターバースト銀河 NGC 253 の X 線観測により、中心核付近からハローまでの数 kpc スケールの高温ガスが、すべて II 型超新星起源と考えられること、またディスク内でのガス膨張では断熱過程が、ハローではほぼ自由膨張が支配的であることを示した。

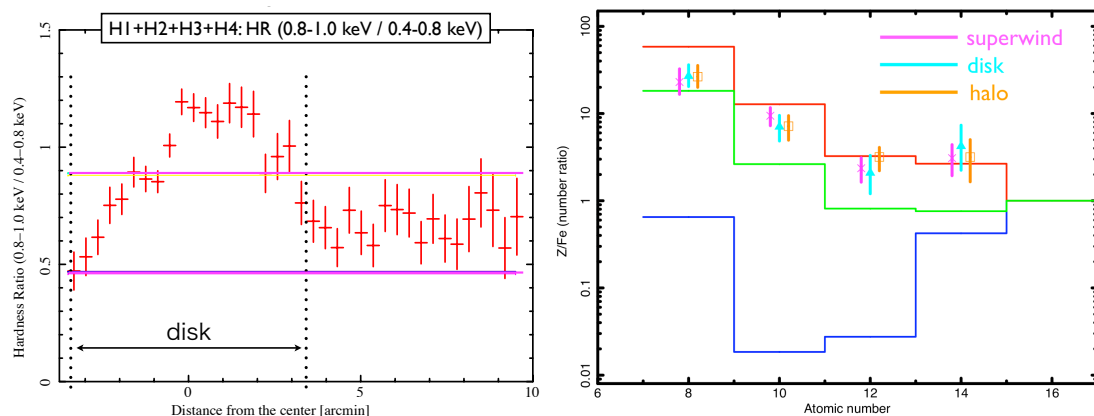


図 2: NGC 253 のハードネス比(左)と各領域の X 線ガスの化学組成比(右)。