

学位論文題名

An Observational Study of Barred Spiral Galaxies at $z \sim 0.1$ with Spectral Line Profile Diagnostics(スペクトルの輪郭診断を利用した $z \sim 0.1$ の棒渦巻銀河に対する観測的研究)

学位論文内容の要旨

円盤銀河における非軸対称な棒状構造（以下、バー）は、銀河の構成要素間での角運動量の再分配をすることにより、ガスを銀河の中心領域へ落とすと考えられている。近年の、近傍宇宙に存在する渦巻銀河に対する CO($J=1-0$) 輝線の詳細なマッピング観測により、可視光では同じように見える銀河でも多様なガス分布を持つことが明らかになった。特に棒渦巻銀河のガス分布に着目すると、ガスが 1) バー全体に分布しているもの、2) 中心とバーの端に集中しているもの、3) 中心のみに集中しているもの、4) ガスがバー内部にほとんど存在しないもの、という 4 つの種類に分類できることがわかってきた。先行研究により、このようなバー内部でのガス分布の違いは、バーの進化段階の違い、バーの性質の違い、あるいはその両者を反映しているということが示唆されている。この 2 つの可能性を切り分けて、棒渦巻銀河のガス分布に、1) ~ 4) のような違いを生じさせる原因を探るためには、過去の棒渦巻銀河のガス分布を調べ、比較する必要がある。しかし近傍の渦巻銀河に対するマッピング観測で達成されている分解能で、バーの進化が見えるような遠方の銀河のマップを得るためには、今年 2011 年 9 月に部分運用が始まったアタカマ巨大ミリ波サブミリ波干渉計 (Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array, ALMA) の本格運用開始を待つ必要がある。

本論文では、赤方偏移 $z \sim 0.1$ に存在する棒渦巻銀河に対する CO($J=1-0$) 輝線を使用した一点観測の結果を報告する。観測は 2010 年と 2011 年の 1 月-5 月に、国立天文台野辺山宇宙電波観測所にある 45 m 電波望遠鏡を用いて行った。その結果、観測した棒渦巻銀河 9 天体のうち、6 天体から CO 輝線を検出 (信号対雑音比 S/N が 5 以上)、1 天体から弱い輝線を検出 (S/N ~ 4.4) することに成功した。CO の輝線光度、 L_{CO} は $(1.09 - 10.8) \times 10^9$ K km s $^{-1}$ pc 2 であり、これは近傍の通常の渦巻銀河の数倍程度の値である。また、今回観測した銀河はこれまで CO が検出されている $z \sim 0.1$ に存在する銀河の中で最も赤外線光度 L_{IR} の低い銀河に分類される。星形成効率に相当する $L_{\text{IR}}/L_{\text{CO}}$ 比は近傍の渦巻銀河のものと同程度もしくは少し高い程度であることがわかった。これより今回 CO を検出した棒渦巻銀河は、分子ガスの量、星形成は共に近傍の渦巻銀河よりも比較的高いものの、星形成の性質に関し

ては比較的通常銀河に近いサンプルであることが明らかになった。

通常、銀河の広がりが見望遠鏡の分解能以下であるような観測では、基本的には上述したような銀河全体での物理量を求めることしかできない。本研究ではこれらに加え、CO 輝線スペクトルの輪郭を銀河の性質を表す新たな量として提案する。一般的に天体からの CO スペクトルには、各視線速度成分にどの程度の CO が存在するか、という情報が含まれている。そこで銀河の CO スペクトルを速度（周波数）方向に3等分し、中心と左右の積分強度の比をとり、この量をスペクトル輪郭関数（Spectral Profile Function, SPF）と定義した。これよりスペクトルの形状が凹型であれば $SPF < 1$ 、凸型であれば $SPF > 1$ となる。近傍銀河の SPF を求めてみると、渦巻銀河は比較的低い SPF 値しか取れないのに対し、棒渦巻銀河は幅広い SPF 値を持つことがわかった。次にガス分布と速度場を与えることにより仮想的なスペクトルを作り、その SPF 値を求めることでガス分布と SPF の関係を調べた。その際、ガスの分布には、指数関数的な動径分布、速度場としては、円盤銀河に特徴的な平坦な回転曲線を仮定した。このようにガス分布、速度場は動径方向の分布を与えることで、回転対象な二次元分布を仮定している。そのため棒渦巻銀河が示しているようなガス分布の非軸対称性、速度場の非円運動は再現できていないが、棒渦巻銀河に特徴的な銀河中心領域での超過成分をガスの動径分布を与えることで、棒渦巻銀河のスペクトルを再現している。その結果、スペクトルの輪郭を決めているのは、銀河円盤の平坦な回転曲線領域内に分布しているガスの量に対する中心の剛体回転領域に分布しているガスの相対的な量であること、また、棒渦巻銀河のガス分布に見られるような中心超過成分がなければ、高い SPF 値を持つことができないということがわかった。次に空間的に分解されている近傍銀河のデータを使うことにより、ガス分布と SPF 値の関係、棒渦巻銀河に関してはバーの楕円率と SPF 値の関係を調べた。その結果、SPF 値はガスの中心集中度よりも、バーの強さを表すバーの楕円率と関係しており、さらにバーの楕円率が高い棒渦巻銀河ほど SPF 値が高くなる傾向が見られた。これは、SPF 値がガス分布と速度場の情報を含む量であることと、楕円率の高いバーほど非円運動が大きいこと、ガスの中心集中度が高いことを考えると自然な結果である。

最後に、今回観測した $z \sim 0.1$ の棒渦巻銀河の SPF 値を調べ、近傍宇宙に存在する棒渦巻銀河と比較した。 $z \sim 0.1$ の各天体の SPF 値は誤差が大きすぎるため、バーの楕円率-SPF プロット上で制限を与えることはできないが、その平均値は近傍の棒渦巻銀河で得られているバーの楕円率-SPF 関係上に乗ることがわかった。ただし、この結果だけでは棒渦巻銀河のガス分布の多様性の原因に制限を与えることはできない。そのためには、より遠方の棒渦巻銀河も含め、サンプル数を増やし、実際にガスの分布を比較する必要がある。ガス分布を直接調べるのは難しいが、提案した SPF 診断を利用することにより各赤方偏移でのバーの楕円率-SPF 関係を調べ、棒渦巻銀河のガス分布の多様性の原因を探っていくことが可能である。

学位論文審査の要旨

主査教授	羽部朝男
副査特任教授	藤本正行
副査特任教授	加藤幾芳
副査教授	香内晃
副査助教	徂徠和夫

学位論文題名

An Observational Study of Barred Spiral Galaxies at $z \sim 0.1$ with Spectral Line Profile Diagnostics

(スペクトルの輪郭診断を利用した $z \sim 0.1$ の棒渦巻銀河に対する観測的研究)

博士学位論文審査等の結果について (報告)

棒渦巻銀河は銀河の内側にラグビーボールのような恒星分布の棒状構造 (バー) を持つ渦巻銀河で、バーが銀河内部の角運動量の再配分を通してガスを銀河の中心部へと輸送し、銀河中心部での爆発的な星形成現象や超巨大ブラックホールへの質量降着に伴う銀河核の活動現象の燃料供給機構の有力な候補と考えられている。これまでの研究から、棒渦巻銀河の分子ガスはバーのない渦巻銀河に比べて銀河の中心に集中する傾向があることがわかっている。その一方で、棒渦巻銀河の中には、銀河の中心部だけでなくバー全体に分子ガスが広がって分布する銀河があることがわかってきており、さらにバー内部での分子ガスの広がりがバーの強さと関係がある可能性も指摘されている。バー内部の分子ガスの分布の違いが、バーの強さと関係しているのか、あるいはガスが中心部へと流れ込む進化段階の違いを表しているのかということの切り分けることは、銀河の進化を考える際に重要な情報を与えることが期待される。

本論文は、棒渦巻銀河のバー内部での分子ガスの分布が、銀河の進化とともに変化するのではないかという作業仮説を検証するために、進化を遡って距離の遠い銀河の分子ガス分布を明らかにすることを試みたものである。遠方の銀河のバー内部の分子ガスの分布を空間分解するのは非常に困難であり、昨秋から部分運用が始まった日米欧の国際プロジェクトであるアタカマ巨大ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) が完成した暁に観測可能となる赤方偏移が 0.1 程度が限界である。この状況を踏まえ、本論文は ALMA での観測を見据えた準備観測として、国立天文台野辺山 45 m 電波望遠鏡を使って、赤方偏移が 0.1 前後の棒渦巻銀河 9 天体について一酸化炭素分子のスペクトル線を探査している。このうち、6 天体から確実な検出、1 天体からは暫定的な検出をしたが、キューサーや超高光度赤外線銀河のような特殊な銀河を除く「通常」銀河としては、赤方偏移 0.1 からの一酸化炭素分子輝線の検出は最遠である。実際、赤方偏移 0.1 程度にある過去の検出例の中では、本論文のサンプルは遠赤外線光度が最も低く、星形成活動あるいは中心核活動は最も低い部類であることがわかる。本論文で分子ガスを検出した銀河の遠赤外線光度は、近傍銀河で分子ガス観測がなされている銀河の典型値に比べると高いが、星形成効率は同程度であり、星形成の性質が異なるのではなく、近傍銀河のサンプルよりも分子ガスが多い銀河であるということがわかった。

この観測は、空間分解能が銀河の見かけの大きさと同程度であるため、銀河内部の分子ガスの空間分布を直接測定することはできない。そこで、本論文では、過去に野辺山 45 m 電波望遠鏡で分子ガスの空間分布が明らかになっている銀河について、銀河内の各観測点における一酸化炭素分子のスペクトル線を足し合わせ、1つの銀河について1つのスペクトルを得て、そこからスペクトル線輪郭関数 (SPF) という量を定義し、近傍銀河と赤方偏移 0.1 の銀河の比較を試みている。SPF は一酸化炭素分子のスペクトル線が中心速度付近の強度が高い (スペクトル線の輪郭が凸型) 場合 1 以上の値を取り、逆に中心速度付近の強度が低い (スペクトル線の輪郭が凹型) 場合には 1 以下の値を取るよう定義しており、分子ガス分布の明らかな銀河について調べてみると、棒のない渦巻銀河では SPF が低い値しか取れないこと、それに対して棒渦巻銀河は SPF の値が広く分布することが明らかになった。この傾向について、本論文では、銀河の分子ガスの動径分布と回転曲線について簡単なモデルを作成し、そこから得られる SPF の値によってその妥当性を検証している。また、SPF は棒渦巻銀河のバーの強さを表す楕円率あるいは分子ガスの中心集中度が増加すると SPF の値が増加する傾向があることがわかった。このことは、距離が遠く分子ガスの分布を空間的に分解できない場合に、得られたスペクトルの輪郭から分子ガスの分布を推定できる可能性を見出した点で注目すべき結果である。

本論文で検出した赤方偏移が 0.1 前後の銀河について導出した SPF は、スペクトルの信号対雑音比があまり大きくないために誤差が大きくなり、近傍銀河との比較において有意な制限を与えることはできなかったが、今後 ALMA を使って遠方銀河を観測する際に、この種の診断はたいへん有効になると期待される。そういう意味でも、銀河の星間ガスの研究分野における貢献は非常に大きいものである。

よって著者は、北海道大学博士 (理学) の学位を授与される資格あるものと認める。