

Observational Study of Dense Gas Formation in the End of the Galactic Bar

(銀河系のバーエンドにおける高密度分子ガス形成についての観測的研究)

学位論文内容の要旨

銀河の棒状構造(バー)は銀河進化において重要な役割を果たすものの一つである。バーは銀河の中心部の非軸対称な構造で、角運動量を輸送することで星間ガスやダストを銀河中心に輸送でき、爆発的星形成を引き起こすと考えられている。また、渦状腕やリング状構造を駆動するとも考えられている。一方、バーの質量が大きくなりすぎるとバーそのものが破壊されてしまうという側面も持っている。このようなバーにおける分子ガスの運動や星形成を調べることは銀河進化において非常に重要である。

銀河系外のバーの観測からは、バー内部での星形成の様子とバーと渦状腕の接合部(バーエンド)での星形成の様子が異なることが明らかとなってきた(Watanabe ら 2011)。彼らは単位分子ガスから単位時間当たりにもまれる星質量を表す星形成効率が、バー内部では低く、バーエンドでは高くなっていることを示した。Watanabe ら (2011) はバーエンドでは星の軌道が込み合い、その影響で分子雲同士の衝突が起こり、星形成効率が高くなっている可能性を示唆している。

我々の銀河系も中心部にバーを持つと考えられている。系外銀河では観測装置の分解能の制限により、分子雲を分解し、星の直接の母体となる高密度分子ガスを観測することは難しい。しかし、銀河系内であれば分子雲を分解し、高密度ガスの性質を明らかにすることが可能である。本研究で、私は北海道大学苫小牧 11m 電波望遠鏡を用いて、銀河系のバーエンドにあると考えられている大質量星形成領域 G23.44-0.18 と渦状腕上にあると考えられている大質量星形成領域 W 39、G23.01-0.41 の NH_3 (J, K) = (1,1), (2,2), (3,3) 輝線観測を行った。

G23.44-0.18 では 14 点中 12 点で(1,1)、6 点で(2,2)が検出されたが、(3,3)は検出されなかった。W 39 では 19 点中 15 点で(1,1)、8 点で(2,2)、3 点で(3,3)が検出された。G23.01-0.41 では 11 点中 8 点で(1,1)、4 点で(2,2)が検出され、(3,3)は検出できなかった。W 39 と G23.44-0.18 ではアンモニア分子輝線と同時に CCS 分子輝線の観測も行ったが、検出できなかった。G23.01-0.41 では水メーザーが検出され、先行研究で検出された強度のピークの視線速度とは異なる速度でピークが検出された。これは数年でメーザー強度が変動することを示している。

銀河系のバーエンドと渦状腕で分子ガスに対する高密度ガスの割合や星形成に違いがあるのかを調べるために、私は種々の相関を取った。希薄な分子ガスは Galactic Ring Survey による ^{13}CO ($J=1-0$) 輝線のアーカイブデータを使用し、星形成の指標となる遠赤外線光度を求めるために IRAS 60、100 μm のアーカイブデータを使用した。その結果、観測領域全体の傾向として遠赤外線光度が増加すると ^{13}CO 、 NH_3 積分強度も増加することがわかり、これは分子ガスが多くなると高密度ガスも多くなり、星形成が活発になることを示している。一方、個々の星形成領域を比較すると、遠赤外線光度に差があることがわかった。さらに、星形成効率の指標となる ^{13}CO 積分強度に対する遠赤外線光度と ^{13}CO 、 NH_3 積分

強度の比である高密度分子ガスの割合を比較すると、W 39 では高密度分子ガスの割合が大きくなると星形成効率が高くなるのに対し、G23.44-0.18 ではその傾向は全く見られなかった。この傾向は W 39 では、遠赤外線光度のピーク、 ^{13}CO 積分強度のピーク、 NH_3 積分強度のピークにずれが生じているのに対し、G23.44-0.18 ではほぼ一致していることによるものと考えられる。連続的な星形成、つまり、第一世代の大質量星が形成され、電離ガスから成る電離水素領域を形成しながら衝撃波により分子ガスを圧縮し、そこで次の世代の星形成が始まるというシナリオであればそれぞれのピークのずれを説明することができる。ピークが一致する可能性は二つあり、一つは遠赤外線ピークと ^{13}CO 、 NH_3 積分強度が視線方向に重なっている場合、もう一つは分子雲同士の衝突によってバースト的に星形成が起こった場合である。G23.44-0.18 では領域内に二つの分子ガス成分があることがわかっているため、これらの成分と遠赤外線源である電離水素領域が同じ場所にあるとすると、分子雲衝突の可能性は高いと考えられる。バースト的に星形成が起きると、第一世代の大質量星が周囲の分子ガスを散逸させる前に次の世代の星が生まれるため、ピークの一致を説明することができる。これらを切り分けるためには、高密度クランプの進化段階が電離水素領域の膨張で説明できるかどうかを調べる必要がある。

G23.44-0.18 で分子雲同士の衝突が起きているのかを確認するため、私は国立天文台野辺山 45m 電波望遠鏡を用いて高密度クランプトレーサーである H^{13}CO^+ ($J=1-0$) 輝線観測を行った。観測の結果、三つのクランプを同定し、サイズの大きい順に Clump A, B, C とした。Clump B と C はサイズ、積分強度ともに小さく、それぞれの上限值しか求められなかった。形成された全星質量と、もとの分子雲質量の比である星形成効率を導出すると、Clump A の星形成効率は $\sim 25\%$ となり、これは先行研究によって観測された同じ進化段階にあるどの星団形成領域よりも高いことが明らかとなった。これは Clump A での星形成が非常に活発であることを示している。さらに、分子雲全体での高密度ガス質量比を導出すると、 $0.2-0.5\%$ となり、他の大質量星形成領域よりも有意に低いことがわかった。これは高密度クランプ形成と大質量星形成が始まったばかりであることを示唆している。

クランプ形成が電離水素領域の膨張による掃き集めによって引き起こされたのかどうかを評価するために、電離水素領域の力学年齢と掃き集められたガス中で重力不安定が成長し始める時間を比較した。その結果、Clump B と C ではガスが掃き集められている最中であるが、Clump A ではすでに若い大質量星が形成されており、電離水素領域の膨張だけではその形成が説明できないことが明らかとなった。

さらに、分子雲全体の星形成効率は $0.4-1\%$ 程度で、これは銀河系の分子雲の典型値である。一方、個々の星形成領域を比較すると G23.44-0.18 は W 39 よりも低い可能性がある。これは、W 39 では電離水素領域による分子雲の散逸が G23.44-0.18 よりも進んでいることを示し、遠赤外線光度、 ^{13}CO 、 NH_3 積分強度のピークがずれていることと一致する。この結果も G23.44-0.18 が星形成をはじめたばかりの分子雲であることを示唆している。

以上の結果から、銀河系のパーエンドにある大質量星形成領域 G23.44-0.18 は、分子雲衝突によって高密度分子ガス形成と大質量星形成が誘発されたと示唆される。

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	石川健三
副査	教授	倉本圭
副査	助教	徂徠和夫

学位論文題名

Observational Study of Dense Gas Formation in the End of the Galactic Bar

(銀河系のバーエンドにおける高密度分子ガス形成についての観測的研究)

博士学位論文審査等の結果について (報告)

円盤銀河における星形成は、平均的には星形成率 (単位時間に形成される星の総質量) の面密度はガスの面密度のべきの関係にあるという Kennicutt-Schmidt 則が成り立つことがこれまでの研究から知られている。しかし、近年のミリ波域の分子スペクトル線の高空間分解能観測から、銀河を全体として平均するのではなく銀河内の個々の領域に分割してみると、Kennicutt-Schmidt 則からずれる場合があることがわかってきている。その原因については、星の形成母体となる分子ガスの分布だけでなく、運動や物理状態が関係していることが指摘されているが、まだ十分に明らかにされていないのが現状である。

例えば、これまでの研究から、いくつかの棒渦巻銀河の棒状構造 (バー) の両端 (バーエンド) では、星形成効率 (星形成率を分子ガスの質量で割った値で、星の形成されやすさを表す量) が他の円盤部に比べて非常に高いことが知られている。バーエンドではガスの軌道が混み合い、結果として分子雲どうしが衝突することが、この高い星形成効率の原因の可能性と指摘されているが、既存の観測装置では棒渦巻銀河のバーエンドの分子ガスを分子雲スケールで空間分解することが困難であるために、この仮説の検証には至っていない。

本論文は、分子雲を空間分解できる銀河系 (天の川) のバーエンドに注目し、そこで星形成に密接に関係する密度の高い分子ガスがどの程度存在するのかを調べ、分子雲衝突の可能性について検証したものである。銀河系のバーエンドに注目した分子スペクトル線観測はこれまでになく、バーエンドに位置すると考えられる大質量星形成領域 G23.44-0.18 と比較のために渦状腕上にある大質量星形成領域 W 39 及び G23.01-0.41 について、本学の苫小牧 11 m 電波望遠鏡を用いてアンモニア分子スペクトル線の探査観測を実施した、いずれの観測領域からもアンモニア分子スペクトル線を検出し、高密度分子ガスが存在することを明らかにした。

バーエンドに位置する G23.44-0.18 は過去の研究で2つの分子雲が視線方向に重なって観測されており、それぞれの分子雲の視線速度から両者が衝突している可能性が指摘されていたが、本研究では2つの分子雲がまさに重なっている場所に密度の高い分子ガスが存在することを明らかにした。高密度分子ガスが発見された領域は、遠赤外線のアークイブデータの解析から、形成直後の大質量星が放射する紫外光によって周辺のガスが電離された電離水素領域の位置と一致することから、分子雲衝突だけではなく、電離水素領域の膨張による周辺

の分子ガスの圧縮による高密度分子ガス形成、さらに星形成というシナリオも考えられる。

本研究では、その検証のために、G23.44-0.18について国立天文台野辺山 45 m 電波望遠鏡を使った H^{13}CO^+ イオンのスペクトル線観測を実施した。この観測はより高い空間分解能で分子雲内部を見通すことを目指したもので、苫小牧望遠鏡で発見した高密度分子ガス領域の内部に、3つの高密度クランプ（ガス塊）を発見した。このうち2つのクランプは質量も小さく、現在収縮途上にある高密度分子ガスであることが推測された。質量が最大のクランプ（クランプ A）については、赤外線のアークイブデータから導出した星形成率と比べると、星形成効率が 25% となったが、この値は同程度の進化段階にある銀河系内のどの星団形成領域よりも高い。一方で、一酸化炭素分子のスペクトル線のアークイブデータを用いて導出した分子ガスの全体量と比較すると、高密度分子ガスの割合は 0.5% 以下であり、他の大質量星形成領域よりも有意に低い。これらの事実は、G23.44-0.18 の高密度分子ガスがかなり若い段階にあることを意味している。一方で、電離水素領域の力学年齢と、電離水素領域の膨張によってガスが掃き集められた場合にガスの重力不安定によって星が形成される時間を比較したところ、電離水素領域の膨張では、クランプ A で大質量星が既に形成されている事実を説明できない、つまり分子雲衝突のような外的要因が必要であることが明らかになった。

本論文では、系外銀河の観測から指摘された分子ガスから星が形成される大局的な過程について、銀河系内を対象とすることで分子雲を空間分解し、分子雲内部の高密度クランプのスケールで、分子雲衝突による高密度分子ガス形成、さらにその結果としての星形成の可能性を検証したものであり、当該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。