

平成 22 年 5 月 24 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19540233
 研究課題名（和文）アンモニア分子スペクトル線観測による銀河系内の高密度分子ガス探査
 研究課題名（英文）NH₃ Survey of Dense Molecular Gas in the Milky Way
 研究代表者
 徂徠 和夫（SORAI KAZUO）
 北海道大学・大学院理学研究院・助教
 研究者番号：80344464

研究成果の概要（和文）：銀河系内の星形成領域に対して、アンモニア分子のスペクトル線観測によって密度の高い分子ガスの探査を実施した。観測量から求めた分子ガスの温度は星形成の活発さと関係があり、活発な星形成の結果分子ガスが加熱されていることが示唆された。星形成が非常に活発な天体では、分子雲スケールで温度の高い成分が存在した。さらに、銀河系外の棒渦巻銀河の分子ガスの性質とその結果として星形成が銀河スケールの運動に影響を受けていることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Ammonia spectral line observations were conducted to survey dense molecular gas in the Galactic star forming regions. Molecular gas temperature derived from the observations was related to star formation activity, which suggested that active star formation heated the gas. Moreover, molecular gas was hot in a cloud scale in one of the extremely active star forming regions. It was also appeared that molecular gas properties and thus star formation were affected through gas kinematics in a galactic scale.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：電波天文学，銀河系天文学，分子雲，星形成，渦巻銀河，星間物理学

1. 研究開始当初の背景

銀河系のような渦巻銀河が、どのように進化して現在の姿になったのかを明らかにするためには、恒星がいつどこでどのようにして形成されるのかということを知る必要がある。

恒星を生む母体となる分子雲については、銀河系全域に渡る探査観測がなされているが、実際に恒星が形成されるのは分子雲内部のコアと呼ばれる密度が高い局所的な領域であり、この分子雲コアが銀河系のさまざまな場所で異なった分布や性質を持っている

のかどうかということは殆ど調べられていない。

2. 研究の目的

銀河系内の様々な領域の分子雲について、密度の高い分子雲コアの個数、物理状態に違いがあるのかを調べ、星形成の活動度との関係を調べる。さらに、密度の高い分子ガスのこれらの性質と渦状腕やバー構造といった銀河系内の大きな構造やそれに付随したガスの運動との関係を明らかにする。

また、銀河系との比較のために、近傍の棒渦巻銀河の分子ガスの運動、分布、物理状態と銀河スケールでの星形成との関係について調べる。

3. 研究の方法

北海道大学苫小牧 11m 電波望遠鏡を用いて、銀河系内の様々な星形成領域について、アンモニア分子 (NH_3) のスペクトル線探査観測を行い、このスペクトル線がトレースする密度が高い (10^4 - 10^5 cm^{-3}) 分子ガスの分布を調べる。また、 $(J, K) = (1, 1), (2, 2), (3, 3)$ (及び一部の観測点では $(J, K) = (4, 4)$) という複数の遷移を同時に観測することによって、回転温度と呼ばれる分子ガスの励起温度を導出する。さらに、 NH_3 分子のうち $K=3n$ ($n=0, 1, 2, \dots$) (オルソ) と $K \neq 3n$ (パラ) との存在量の比から、 NH_3 分子が形成された「過去」の温度を推定する。この導出に際しては、星間塵上で NH_3 分子が形成される際にその温度によってオルソとパラの存在量が決まることと、オルソとパラの間の転換反応に 10^6 年程度以上の時間がかかることを利用している。

観測の対象となる星形成領域は、太陽系近傍のものから比較的距離が遠いものまで距離にすると 10 倍近くも違いがあり、空間分解能がそれだけ異なってしまう。そこで、比較的遠い星形成領域については、空間分解能を揃えるために、国立天文台野辺山宇宙電波観測所 45m 電波望遠鏡による NH_3 分子スペクトル線探査観測を行う。

さらに、分子雲コアの形成初期段階に観測される一硫化二炭素分子 (CCS) のスペクトル線も同時に探査し、コアの進化段階についての考察を試みる。

本研究では、銀河系の渦状腕やバー構造に付随する星形成領域における分子ガスの性質に違いがあるかどうかを明らかにすることを目標としているが、銀河系の場合、我々観測者が銀河円盤内部に位置するためにこれらの銀河スケールの構造を直接目にすることができない。このため、銀河系外の棒渦巻銀河の分子ガスについて、分布、運動、性質の特徴も並行して調べる。ただし、系外銀

河では NH_3 分子スペクトル線の検出が極めて困難なため、主に一酸化炭素 (CO) 分子がトレースする分子ガス (密度が 10^2 - 10^3 cm^{-3} 程度) について取り扱う。

4. 研究成果

(1) 銀河系内の NH_3 分子スペクトル線探査 (雑誌論文①③, 学会発表①②③⑥⑩⑪⑫⑱⑳㉑)

①探査領域と高密度分子ガスの検出

北海道大学苫小牧 11m 電波望遠鏡を用いて大質量星形成領域を中心に探査を行った。主な観測天体は、W51, M17, W43, S140, ふたご座 OB1 星落, はくちょう座 X 領域, オリオン座 A 分子雲, 同 B 分子雲, 同 East 分子雲, W39 及び小質量星形成領域のおうし座分子雲である。いずれの観測領域についても $(J, K) = (1, 1)$ のスペクトル線は検出できたが、おうし座分子雲では $(J, K) = (2, 2), (3, 3)$, ふたご座 OB1 星落では $(J, K) = (3, 3)$ のスペクトル線は検出できなかった。一方、W51 の中心部では追加で実施した観測によって $(J, K) = (4, 4)$ のスペクトル線も検出できた。

② NH_3 分子スペクトル線の回転温度

観測点のうち、 $(J, K) = (1, 1)$ 及び $(2, 2)$ のスペクトル線が検出できた場所については、回転温度を導出した。その値は典型的に 20 K 程度であり、電離水素領域に隣接するような場所ではやや高めの値を取ることがわかった。一方、電離水素領域から離れた場所では回転温度が 10 K 程度と低い場所も存在する。

③W51 における高温成分

特筆すべきは W51 の中心部で、苫小牧望遠鏡の空間分解能 (約 4.5 分角, W51 の距離では約 8 パーセク) のスケールで回転温度が 40 K と高いことである。W51 は銀河系内でも非常に活発に大質量星形成が進んでいる場所であり、その影響によって分子ガスの温度が上昇していることをうかがわせる。W51 については、空間分解能が 1/4 (約 2 パーセク) になる野辺山 45m 望遠鏡による観測も行い、 $(J, K) = (1, 1), (2, 2), (4, 4)$ の観測から、その中心部では励起温度が 50 K 程度の成分に加えて 150 K 程度の高温成分が存在することが明らかになった。

④M17 における大質量星形成の条件

M17 では、大質量星形成が活発に起こっている B 分子雲と静穏な A 分子雲との間で回転温度の差は殆どなく、 NH_3 分子の柱密度が異なっていることがわかった。これは、大質量星形成の条件が、分子雲コアの性質よりはむしろその個数に関係することを示唆している。

⑤回転温度と星形成の指標との関係

本研究での観測領域について、遠赤外線観

測衛星 IRAS のデータから推定した星形成率あるいは星形成率を NH_3 分子スペクトル線観測から導出した高密度分子ガスの質量で割った星形成効率と、 NH_3 分子スペクトル線の回転温度との間には正の相関があることがわかった。このことは、星形成活動が活発な領域では形成された若い星からの紫外光によって分子ガスが加熱されるという「結果」、もしくは元々分子ガスの温度が高い場所が活発な星形成を起しやすいうという「原因」のいずれかを示唆する。

⑥オリオン座 A 分子雲における高密度分子ガスの加熱

オリオン座 A 分子雲では、これまでの研究から OMC-1, OMC-2, OMC-3, 南部領域の順に星形成の進化段階が若くなることが知られているが、この順に回転温度が低くなる傾向があることがわかった。一方、IRAS のデータから推定した星間塵の温度と、オルソ-パラ比から導出した過去の星間塵の温度の差、つまり星形成による加熱は、この過去の温度と相関がないことがわかった。これらのことは、星形成の進化段階が進むほどその影響を高密度分子ガスの温度は高くなるが、それは過去の温度と関係がないことを意味しており、前項での「原因」説を棄却することとなる。従って、少なくともオリオン座 A 分子雲では、活発な星形成の結果、現在の高密度分子ガスの温度が上昇していると解釈される。

(2) 銀河系内の CCS 分子スペクトル線探査 (学会発表①⑥⑭)

小質量星形成領域であるおうし座分子雲でのみ CCS 分子スペクトル線を検出することができたが、それ以外の大質量星形成領域では全ての観測点で検出できなかった。CCS 分子スペクトル線の観測は NH_3 分子以上に非常に限られた天体に対してしか行われてきておらず、私たちの広域観測は進化段階の初期にある分子雲コアの探査という点でユニークなものであり、中小質量星形成領域を中心に今後も探査を継続する予定である。

(3) 棒渦巻銀河 NGC 3627 における分子ガスの性質と星形成 (雑誌論文②, 学会発表⑤⑭⑰⑱⑲)

近傍の棒渦巻銀河 NGC 3627 について、野辺山 45m 電波望遠鏡で $^{13}\text{CO } J=1-0$ 輝線、ASTE 望遠鏡で $^{12}\text{CO } J=3-2$ 輝線のマッピング観測を行った。これらの結果を野辺山 CO アトラスで取られている $^{12}\text{CO } J=1-0$ 輝線の結果と比較し分子ガスの物理状態の空間分布を調べた。その結果、特にバーの端 (バー・エンド) で分子ガスの密度が高くなっていることが明らかになった。

$\text{H}\alpha$ 輝線及び $24\mu\text{m}$ の連続光のアーカイブデータから星形成率の空間分布を導出し、さら

に分子ガスのデータを用いて星形成効率の空間分布を導出した。その結果は、星形成率、星形成効率ともにバー・エンドで著しく高いことを示した。ガス円盤の不安定性の議論から、これは非軸対称なバー・ポテンシャル下でバー・エンド付近に分子ガスが集積した結果、分子雲どうしの衝突が起りやすくなり、分子ガスの密度が上昇し星形成を促進していることを意味している。

また、 $^{12}\text{CO } J=1-0$ 輝線から求めた分子ガス量を用いて導出したバーにおける星形成効率が渦状腕に比べて低いのにに対して、 $^{13}\text{CO } J=1-0$ 輝線から分子ガス量を求めた場合にはバーと渦状腕で星形成効率が殆ど変わらないことを見出した。これは、バーにおいては激しい非円運動のために分子ガスが収縮しにくくなり渦状腕に比べて光学的に薄くなっていることが原因と推定される。つまり、一般に光学的に厚い条件下で適用される $^{12}\text{CO}-\text{H}_2$ 変換係数を用いるとバーでは分子ガス量を過大評価してしまうことになる (^{13}CO 輝線は光学的に薄いためにこの変換係数を使わずに直接分子ガス量を導出できるためにバーと渦状腕で殆ど差がでない)。このことは、これまでの研究で言われてきたバーにおける星形成効率の低い要因の一部が、分子ガスの過大評価に基づくものであることを意味している。なお、この結果については、現在 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 誌に投稿中である (Watanabe, Y. ほか)。

(4) 棒渦巻銀河 Maffei 2 における分子ガスの性質 (学会発表⑳㉑)

近傍の棒渦巻銀河 Maffei 2 について、野辺山 CO アトラスの $^{12}\text{CO } J=1-0$ 輝線のスペクトルデータからピーク温度、線幅、積分強度を各観測点に対して求めた結果、これら 3 つのパラメータがバーや渦状腕ごとに異なる分布を示すことが明らかになった。これは、バーと渦状腕で分子ガスの物理状態が異なることを意味している。

分子雲の集合体に対して $^{12}\text{CO } J=1-0$ 輝線の励起解析 (LVG 解析) を用いて観測されるスペクトル線をシミュレーションしたところ、バーにおいては分子雲内部の速度分散の違いが観測で得られたスペクトル線のパラメータ分布を再現することがわかった。この分子雲内部の速度分散の変化に際して、 $\text{CO}-\text{H}_2$ 変換係数を導出したところ、通常値の半分程度の値を取り得ることが判明した。このことは、前項と同様、バーにおける分子ガスの見積もりが過大評価されている可能性を示すものである。

(5) 系外銀河の分子ガスの運動と星形成の関係 (学会発表㉒)

野辺山 CO アトラスのサンプルのうち、距離や銀河円盤の傾き、銀河の形態が似た4つの棒渦巻銀河 (NGC 4303, NGC 4321, NGC 4535, NGC 4536) について CO スペクトル線の線幅と Spitzer 衛星の 24 μ m 遠赤外線光度から求めた星形成効率を比べると、線幅が広くなるにつれて、星形成効率が下がる傾向があることが明らかになった。これはバーのようにガスが激しい運動を行うような環境下では、高密度分子ガスが形成されにくい、あるいは破壊されることによって、星形成が抑制されていることを示唆している。

(6) 今後の展望

銀河系内の星形成領域に対するアンモニア分子ガス探査はまだ未完であり、現在は銀河系のバーに付随すると考えられる領域を中心に探査を継続中である。今後、本研究で近傍の棒渦巻銀河のバー領域で明らかになった分子ガスの性質が、銀河系でも見られるのかどうかを比較する予定である。さらに、間もなく部分運用を開始するアタカマ・ミリ波サブミリ波巨大干渉計 (ALMA) を使った高空間分解能/高感度観測により、系外の棒渦巻銀河について分子雲スケールでの観測を展開し、銀河の構造と分子ガス及び星形成の関係について明らかにしたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① Nishitani, H., The Ammonia Survey Observation of Massive Star-Forming Region W43 with Tomakomai Radio Telescope, 北海道大学学位論文, 査読有, 2010年
 - ② Watanabe, Y., Observational Study of Distribution and Physical State of Molecular Gas and Secular Evolution in Barred Spiral Galaxies, 北海道大学学位論文, 査読有, 2010年
 - ③ Sorai, K., Habe, A., Nishitani, H., Hosaka, K., Watanabe, Y., Miwa, S., Ohishi, Y., Motogi, K., Minamidani, T., Awano, J., Sumida, S., Fukuya, Y., Uchida, R., Kaneko, N., Fujimoto, M.Y., Koyama, Y., Kimura, M., Nakai, N., Large-scale NH₃ Observations toward the Galactic Star Forming Regions I. W 51 Molecular Clouds Complex, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol. 60, No. 6, 2008, pp. 1285-1296
- ① 大石晋恵, Gemini OB1 アソシエーションにおける NH₃ 輝線観測, 日本天文学会 2010 年春季年会, 2010 年 3 月 24-27 日, 広島大学
 - ② 館内謙, 苫小牧 11m 電波望遠鏡によるオリオン座 A 分子雲の広域観測, 日本天文学会 2010 年春季年会, 2010 年 3 月 24-27 日, 広島大学
 - ③ 徂徠和夫, CO 輝線パラメータによる棒渦巻銀河の分子ガスの物理状態についての考察, 日本天文学会 2010 年春季年会, 2010 年 3 月 24 日, 広島大学
 - ④ 松井佳菜, 渦巻銀河におけるバーの強さと星形成の関係, 日本天文学会 2010 年春季年会, 2010 年 3 月 24 日, 広島大学
 - ⑤ 渡邊祥正, 棒渦巻銀河 NGC 3627 における分子ガスの性質と星形成, NRO ワークショップ: 高精度ミリ波・サブミリ波観測と最新理論モデル, 2009 年 11 月 17 日, 鹿児島大学
 - ⑥ 徂徠和夫, バーにおける分子ガスの物理状態, NRO ワークショップ: 高精度ミリ波・サブミリ波観測と最新理論モデル, 2009 年 11 月 16 日, 鹿児島大学
 - ⑦ 渡邊祥正, 棒渦巻銀河 NGC 3627 の星形成と分子ガス観測, 日本天文学会 2009 年秋季年会, 2009 年 9 月 14-16 日, 山口大学
 - ⑧ Sorai, K., Large-Scale NH₃ Observations toward the Galactic Star-Forming Regions, International Astronomical Union XXVII General Assembly, Special Session 8, 2010 年 8 月 11-14 日, SulAmérica Convention Center, Rio de Janeiro, Brazil
 - ⑨ 渡邊祥正, 棒渦巻銀河の衝撃波領域における高密度ガスの割合と星形成, 日本天文学会 2009 年春季年会, 2009 年 3 月 24-27 日, 大阪府立大学
 - ⑩ 徂徠和夫, SKA/ASKAP によるサイエンス (系内編), 2008 年 VLBI 懇談会シンポジウム, 2008 年 12 月 25 日, 岐阜大学
 - ⑪ 徂徠和夫, 銀河系及び系外銀河における NH₃ 分子スペクトル線観測, SKA ワークショップ, 2008 年 11 月 1 日, 国立天文台三鷹
 - ⑫ 渡邊祥正, 棒渦巻銀河における衝撃波による分子雲加熱の可能性, 日本天文学会 2008 年秋季年会, 2008 年 9 月 13 日, 岡山理科大学
 - ⑬ 大石晋恵, 近傍の棒渦巻銀河における分子ガスの運動と星形成, 2008 年 9 月 11-13 日, 岡山理科大学
 - ⑭ 竹腰達哉, アンモニア分子輝線による Cygnus-X 分子雲複合体の観測, 2008 年 9 月 11-13 日, 岡山理科大学
 - ⑮ 保坂啓太, Orion B 及び Orion E 分子雲における NH₃, CCS 輝線観測, 2008 年 9 月 11-13 日, 岡山理科大学

[学会発表] (計25件)

- ⑩ 徂徠和夫, 巨大分子雲複合体 W51 領域における高密度分子ガスと星形成, 2008 年 9 月 11-13 日, 岡山理科大学
- ⑪ 徂徠和夫, 北海道大学苫小牧 11m 電波望遠鏡プロジェクト, 2008 年 9 月 11-13 日, 岡山理科大学
- ⑫ 南谷哲宏, 北海道大学 11m 電波望遠鏡: 光学系・中間周波数変換部の改良, 日本天文学会 2008 年春季年会, 2008 年 3 月 25-27 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター
- ⑬ 徂徠和夫, CO Atlas of Barred Spiral Galaxies in Clusters of Galaxies within $z \sim 1$, 銀河ショッパ ALMA (第 5 回) / ALMA-JT 銀河サブワーキンググループ (2008 年度第 3 回), 2008 年 7 月 11 日, 鹿児島大学
- ⑭ Hosaka, K., CCS/NH₃ and Evolution of Cores in the Taurus Molecular Cloud Complex, Workshop on Carbon-Chain Chemistry, 20th Anniversary of CCS, 2007 年 12 月 7 日, 東京大学
- ⑮ 渡邊祥正, 棒渦巻銀河 NGC 3627 の ¹³CO(J=1-0)マッピング観測, 日本天文学会 2007 年秋季年会, 2007 年 9 月 26-28 日, 岐阜大学
- ⑯ 三輪真一, 電離水素領域 W51 の 23GHz 帯電波再結合線観測, 日本天文学会 2007 年秋季年会, 2007 年 9 月 26-28 日, 岐阜大学
- ⑰ 西谷洋之, W43 領域の NH₃ 分子輝線観測, 日本天文学会 2007 年秋季年会, 2007 年 9 月 26-28 日, 岐阜大学
- ⑱ 大石晋恵, M17 分子雲複合体の NH₃ 輝線観測, 日本天文学会 2007 年秋季年会, 2007 年 9 月 26-28 日, 岐阜大学
- ⑲ 保坂啓太, おうし座分子雲複合体におけるコアの CCS/NH₃ 輝線強度比と進化段階, 日本天文学会 2007 年秋季年会, 2007 年 9 月 26 日, 岐阜大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:

権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

徂徠 和夫 (SORAI KAZUO)
北海道大学・大学院理学研究院・助教
研究者番号: 80344464

(2) 研究分担者

羽部 朝男 (HABE ASAO)
北海道大学・大学院理学研究院・准教授
研究者番号: 90180926

(H19)

久野 成夫 (KUNO NARIO)
国立天文台・野辺山宇宙電波観測所・准教授

研究者番号: 30311179

(H19)

(3) 連携研究者

羽部 朝男 (HABE ASAO)
北海道大学・大学院理学研究院・准教授
研究者番号: 90180926

(H20-21)

久野 成夫 (KUNO NARIO)
国立天文台・野辺山宇宙電波観測所・准教授

研究者番号: 30311179

(H20-21)

(4) 研究協力者

南谷 哲宏 (MINAMIDANI TETSUIHIRO)
北海道大学・大学院理学研究院・助教
研究者番号: 20451437

西谷 洋之 (NISHITANI HIROYUKI)
北海道大学・大学院理学院・大学院生
研究者番号: なし

渡邊 祥正 (WATANABE YOSHIMASA)
北海道大学・大学院理学院・大学院生
研究者番号: なし

保坂 啓太 (HOSAKA KEITA)
北海道大学・大学院理学院・大学院生
研究者番号: なし

大石 晋恵 (OHISHI YUKIE)

北海道大学・大学院理学院・大学院生
研究者番号：なし