

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月31日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2012

課題番号：20244011

研究課題名（和文） 天の川のアンモニア掃天観測

研究課題名（英文） Survey of Ammonia Molecules along the Milky Way

研究代表者

中井 直正（NAKAI NAOMASA）

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：80192665

研究成果の概要（和文）：つくば 32m 電波望遠鏡の 20GHz 帯受信観測システムを周波数広帯域化・高感度化して、アンモニア分子の 6 本の輝線スペクトルを同時観測するシステムを開発した。それを用いて大質量星形成領域であるオリオン分子雲の観測を行い、分子雲は外から大質量星の輻射によって暖められていることと大質量星形成が $\sim 10^5 - 10^6$ 年前以降に起きたことを明らかにした。また天の川銀河中心部のアンモニア掃天観測を行い、その温度分布と加熱機構を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The 20-GHz observing system of the Tsukuba 32-telescope was much improved in the frequency coverage and sensitivity to make observations of six lines of ammonia molecules simultaneously. Using the system, Orion Molecular Clouds were observed in ammonia lines, resulting that the clouds have been made warm by outside massive stars. Ammonia along the Milky Way galaxy was also surveyed to determine the temperature and make its heating mechanism clear.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|------------|------------|
| 2008年度 | 20,700,000 | 6,210,000 | 26,910,000 |
| 2009年度 | 4,500,000 | 1,350,000 | 5,850,000 |
| 2010年度 | 4,500,000 | 1,350,000 | 5,850,000 |
| 2011年度 | 4,100,000 | 1,230,000 | 5,330,000 |
| 2012年度 | 4,100,000 | 1,230,000 | 5,330,000 |
| 総計 | 37,900,000 | 11,370,000 | 49,270,000 |

研究分野：電波天文学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：電波天文学、天の川銀河、アンモニア、星形成、電波望遠鏡

1. 研究開始当初の背景

(1) 銀河は主として星とガスから構成されており、星は星間ガスが収縮し高密度になって誕生する。したがって個々の星形成領域および銀河全体の大局的星形成を明らかにするには高密度ガスの観測が必須である。また測定されたガスの性質（温度、密度、運動など）から星が逆に星間ガスに与える影響や銀河

全体の構造も明らかにすることができる。

(2) 高密度星間ガス（分子雲）の大部分は水素分子が占めるが、星間ガスは極低温（ ~ 10 K）なので電気双極子モーメントを持たない水素分子は輝線をほとんど出さない。そこで次に存在量が多くて輝線強度が強い一酸化炭素 CO の観測がよくなされるが、CO は低密度ガスもトレースしてしまうとともに温

度や密度は正確には求まらない。

(3) アンモニア分子 NH_3 は $n \geq 10^3 \text{ H}_2 \text{ cm}^{-3}$ の高密度ガスをトレースするとともに 20GHz 帯の狭い周波数範囲に複数本の輝線スペクトルを放射するのでそれらの強度からガスの温度と密度が正確に求まり、オルソ・パラ比から過去の温度、速度から運動が求まる。よって星形成の母体である分子雲の観測には非常に適している。

(4) 天の川銀河（銀河系）全体のアンモニア観測の例はなく、その中の星形成領域の広い領域の観測例も限られている。また天の川に沿っての広い領域の観測を行うことができれば銀河系の構造や温度分布、大局的星形成機構なども明らかにすることができる。したがって天の川銀河の広い領域のアンモニア観測は銀河系全体の構造解明と星形成過程の研究に極めて重要である。

2. 研究の目的

(1) 筑波大学の近くにある国土地理院つくば 32m 電波望遠鏡（図 1）の 20GHz 帯受信観測システムを周波数広帯域化・高感度化して、アンモニア分子 NH_3 の 23.6~25.1 GHz にある回転反転遷移輝線 $(J,K)=(1,1) \sim (6,6)$ の 6 本の輝線ならびに超微細構造線を同時観測できるシステムを構築する。

| (J,K) | | 周波数 |
|-------|-----|-----------|
| (1,1) | パラ | 23.695GHz |
| (2,2) | パラ | 23.722 |
| (3,3) | オルソ | 23.870 |
| (4,4) | パラ | 24.139 |
| (5,5) | パラ | 24.533 |
| (6,6) | オルソ | 25.056 |

(2) 天の川銀河（銀河系）の $-1^\circ < \text{銀経} < +40^\circ$ 、 $-0.2^\circ < \text{銀緯} < +0.2^\circ$ の広い領域のアンモニア $(J,K)=(1,1) \sim (6,6)$ 輝線を掃天観測し、分子雲の励起温度、密度、オルソ・パラ比したがってアンモニア形成時の過去の温度を正確に求め、それらの分布を明らかにして銀河系の構造と大局的星形成過程を求める。

(3) オリオン分子雲などの近傍星形成領域のアンモニア $(J,K)=(1,1) \sim (6,6)$ 輝線の広領域観測を行い、高密度分子雲の物理状態を求めて星形成過程を探るとともに星形成による影響も明らかにする。

(4) 観測した膨大なスペクトル線データのデータベースを構築して公開し、世界中の研究者が可視光・赤外線・X 線の観測結果と比較するなど有用に使用できるようにする。

3. 研究の方法

(1) 国土地理院つくば 32m 電波望遠鏡の 20GHz 帯受信機に右円偏波観測システムを追加するとともに、周波数帯域 1GHz のデジタル分光計を 2 台追加して 23.695 GHz~25.056GHz にあるアンモニア $(J,K)=(1,1) \sim (6,6)$ 輝線の左右両円偏波同時観測システムとし、感度を向上させる。

(2) つくば 32m 電波望遠鏡を用いて天の川銀河（銀河系）の $-1^\circ < \text{銀経} < +40^\circ$ 、 $-0.5^\circ < \text{銀緯} < +0.1^\circ$ の広い領域のアンモニア $(J,K)=(1,1) \sim (6,6)$ 輝線を掃天観測し、分子雲の励起温度、密度、オルソ・パラ比したがってアンモニアが形成された過去の温度の分布を求め、銀河系の構造と大局的星形成との関係を明らかにする。

(3) 同様にオリオン分子雲などの大質量星形成領域およびおうし座分子雲などの小質量星形成領域を観測し、分子雲の物理量を求めて星形成過程の解明と星形成による影響を明らかにする。

(4) 取得した観測データおよびそれらを解析した結果得られる分子ガスの励起温度、密度、オルソ・パラ比、過去の温度などの情報をデータベース化し、天体や位置を指定することによって検索し表示することのできる検索システムを構築する。

4. 研究成果

(1) 国土地理院つくば 32m 電波望遠鏡の 20GHz 帯受信機に右円偏波観測システムを追加して 19.5GHz~25.2GHz 帯で左右両円偏波同時観測を可能とした。また周波数帯域 1GHz のデジタル分光計を 2 台追加して 23.695 GHz~25.056GHz にあるアンモニア $(J,K)=(1,1) \sim (6,6)$ 輝線の左右両円偏波同時観測も可能となった。これにより連続するパラ・アンモニア輝線 4 本とオルソ・アンモニア輝線 2 本を同時観測できる世界で唯一の観測システムを構築することができた。

また受信機系の同軸ケーブルに断熱処理を施して温度安定化をはかることにより、観測中の受信機の利得を安定にして実質的な観測感度を向上させた。

(2) 大質量形成領域であるオリオン分子雲 (OMC1, OMC2, OMC3) のアンモニア $(J,K)=(1,1) \sim (6,6)$ 輝線を同時観測し、物理量を導出した。角分解能は $\text{HPBW}=100''$ である。各輝線の積分強度を図 1 に示す。BN/KL 天体のところでの輝線も強い強度を示すとともに、 $(J,K)=(1,1), (2,2)$ では北側の OMC-2 や OMC-3 でも有意に検出された。また BN/KL 領域ではメタノール CH_3OH の 6 本の輝線と水素の再結合線 $\text{H}64\alpha$ も検出された。

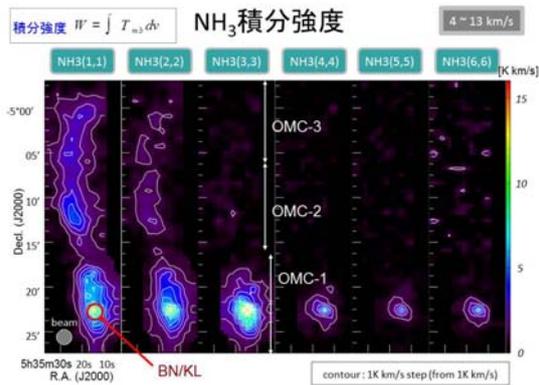


図 1. NH_3 (J, K)=(1, 1)-(6, 6) の積分強度

6 輝線を用いた回転ダイアグラムから励起温度を求めると、図 2 右のように分子雲の外縁部が高くなっている (~50K-80K)。その場所を見ると近くに大質量星があるので、大質量星からの輻射で温められていることがわかる。一方、オルソ・パラ比から求めたアンモニアが形成されたとき (~ 10^5 - 10^6 年前) の過去の温度を求めると (図 2 左)、分子雲の内部で温度が高くなっている。これは分子雲が自己重力で収縮したときに重力エネルギーを解放して温度が高くなったと考えられる。またこの時期の分子雲外縁部の温度 (<18K) は現在の温度よりも低い。これらのことから現在の大質量星の高い生成率は ~ 10^5 - 10^6 年前には起きておらず、それ以降に発生したと考えられる。このように分子ガスの現在と過去の温度の比較を行ったのは初めてである。

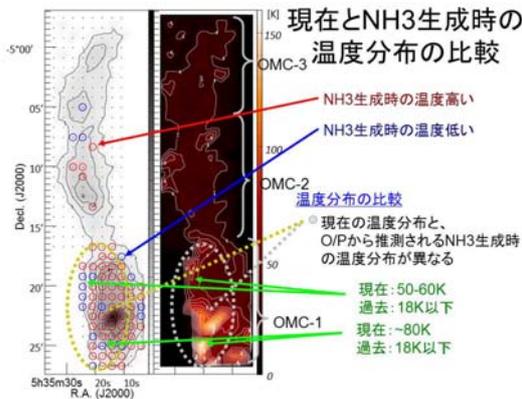


図 2. 分子ガスの現在の励起温度 (右) とアンモニアが形成されたときの過去の温度 (左)。

(3) 天の川銀河の銀河面に沿ってアンモニア (J,K) =(1,1)~(6,6) 輝線を掃天観測した。観測した領域は $-0.6^\circ < \text{銀経} < +1.4^\circ$ 、 $-0.25^\circ < \text{銀緯} < +0.15^\circ$ であり、角分解能は $\text{HPBW}=100''$ で観測点間の間隔は $50''$ でナイキストサンプリングである。1 点当たりの積分時間は約 1 分であり、全部で 2664 点を観測した。

6 本の輝線の各積分強度を図 3 に示す。

Sgr-B で最も強く、Sgr-A (銀河中心) 付近でも強いことがわかる。

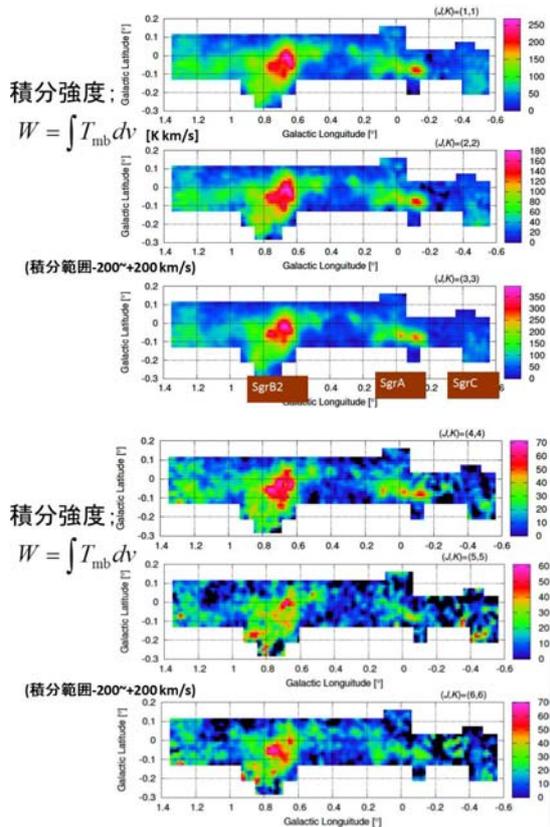


図 3. 6 本の輝線の積分強度。上から順に (J, K)=(1, 1)-(6, 6) であり、各横軸が銀経で縦軸が銀緯である。

低励起輝線と高励起輝線で励起温度が異なることから 2 温度モデルを採用し LTE (局所熱平衡状態) を仮定するとそれぞれの最頻度の温度は 25K と 120K であった。また励起温度の空間分布を求めると図 4 のように低温ガスと高温ガス共に分子雲の周辺部と速度の末端で高いことがわかった。また分子雲の速度の末端でも温度が高いことがわかった。これも分子雲の周辺部で密度の低い領域が高温であることを示している。これらの結果は星間輻射場で分子雲が暖められている可能性を示唆する。一方、分子雲を加熱するのに必要な熱量とそれを供給できる熱源を考えると星間輻射場のほかに分子ガスの乱流エネルギーの散逸が寄与している可能性もある。なお、大質量星からの輻射や X 線を放射している高温プラズマによる加熱は熱量が不足、熱源に可能性は低いことがわかった。

オルソ・パラ比から求めたアンモニア分子の生成時の温度は 25K-30K 程度であり、現在の分子ガスの多くを占める低温ガスの温度と同程度であり、オリオン分子雲とは異なることが明らかになった。

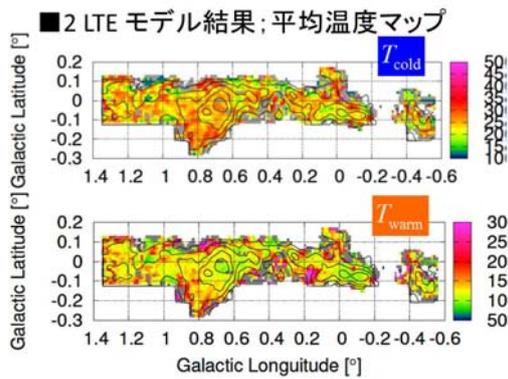


図4. 低温分子ガス（上段）と高温分子ガス（下段）の平均励起温度の分布。

なお、天の川銀河の銀河面のアンモニア掃天観測は引き続き、継続している。また平行して、これらの観測データのデータベース化と検索システムの開発も行っている。

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8件）

- ① Salak, D., Nakai, N., Miyamoto, Y., Yamauchi, A., “Large-Field CO (J=1-0) Observations of the Starburst Galaxy M82”, 査読有、Publications of the Astronomical Society of Japan, 2013, 65, in press.
- ② Takano, S., Takano, T., Nakai, N., Kawaguchi, K., Schilke, P., “Detection of ammonia in M51”, 査読有, Astronomy and Astrophysics, 2013, 552, A34, 5p
DOI: 10.1051/0004-6361/201118593
- ③ Yamauchi, Y., Nakai, N., Ishihara, Y., Diamond, P., Sato, N., “Water-Vapor Maser Disk at the Nucleus of the Seyfert 2 Galaxy IC 2560 and its Distance”, 査読有, Publications of the Astronomical Society of Japan, 2012, 64, A103, 12p
<http://ads.nao.ac.jp/abs/2012PASJ...64..103Y>
- ④ Sorai, K., Kuno, K., Nishiyama, K., Watanabe, Y., Matsui, H., Habe, A., Hirota, A, Ishihara, Y., Nakai, N., 査読有, “Properties of Molecular Gas in the Bar of Maffei 2”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 2012, 64, A51, 10p
<http://ads.nao.ac.jp/abs/2012PASJ...64...51S>
- ⑤ Curran, S.J., Whiting, M.T., Combes, F., Kuno, N., Francis, P., Nakai, N., Webb, J.K

., Murphy, M.T., Wiklind, T., 査読有, “On the absence of molecular absorption in high redshift millimeter-band searches”, Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 2011, 416, 2143-2153

DOI: 10.1111/j.1365-2966.2011.19193.x

- ⑥ Huré, J.-M., Hersant, F., Surville, C., Nakai, N., Jacq, T., 査読有, “AGN disks and black holes on the weighting scales”, Astronomy and Astrophysics, 2011, 530, A145, 8p

DOI: 10.1051/0004-6361/201015062

- ⑦ Mamyoda, K., Nakai, N., Yamauchi, A., Diamond, P., Hure, J.-M., “Detection of a Sub-Keplerian Water Maser Disk at the Active Galactic Nucleus of the Galaxy IC 1481”, 査読有, Publications of the Astronomical Society of Japan, 2009, 61, 1143-1151

<http://ads.nao.ac.jp/abs/2009PASJ...61.1143M>

- ⑧ 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., 査読有, “Large-scale NH₃ Observations toward the Galactic Star Forming Regions I. W51 Molecular Clouds Complex”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 2008, 60, 1285-1296
<http://ads.nao.ac.jp/abs/2008PASJ...60.1285S>

〔学会発表〕（計8件）

- ① 荒井均（代表）、永井誠、藤田真司、中井直正、他宇宙観測グループ同（筑波大学）、栗原忍、他宇宙測地グループ（国土地理院）、「国土地理院つくば32m電波望遠鏡によるアンモニア分子反転遷移輝線の銀河系中心領域広域サーベイ観測」、日本天文学会、2013年3月21日、埼玉大学
- ② 瀬田益道（代表）、宮本祐介、中井直正、萩原健三郎、善甫啓一、堀江雅明、秋山大樹、高柳星佳、榎原崇雄、Dragan SALAK、32m鏡運用チーム、「つくば32m鏡による近傍銀河のアンモニア分子輝線観測」、日本天文学会、2012年3月22日、龍谷大学
- ③ 扇野光俊（代表）、中井直正、他宇宙観測グループ、栗原忍、他宇宙測地グループ、「国土地理院つくば32m電波望遠鏡によるオリオン分子雲の観測」、日本天文学

- 2011年9月22日、鹿児島大学
- ④ 二本松佳樹 (代表)、増田浩和、宮本祐介、瀬田益道、中井直正、石井峻、荒井均、扇野光俊、寺部佑基、他宇宙観測グループ、栗原忍、他宇宙測地グループ、「同軸ケーブル伝送特性と20GHz帯受信機の安定性」、日本天文学会、2011年9月20日、鹿児島大学
 - ⑤ 石井峻 (代表)、瀬田益道、中井直正、宮本祐介、永井誠、他32m望遠鏡グループ、「つくば32m電波望遠鏡によるM17領域のアンモニア輝線観測」、日本天文学会、2011年3月18日、筑波大学
 - ⑥ 荒井均 (代表)、粉川慶太、瀬田益道、宮本祐介、扇野光俊、二本松佳樹、石井峻、中井直正、他宇宙観測グループ、栗原忍、他宇宙測地グループ、「国土地理院つくば32m電波望遠鏡の左右両円偏波受信観測システムの開発」、日本天文学会、2010年9月24日、金沢大学
 - ⑦ 永井誠 (代表)、荒井均、瀬田益道、中井直正、ほか32mグループ、「つくば32m電波望遠鏡を用いた銀河系中心領域アンモニア輝線観測」、日本天文学会、2009年9月14日、山口大学
 - ⑧ 荒井均 (代表)、瀬田益道、中井直正、萩原健三郎、宮本祐介、永井誠、石井峻、「広帯域デジタル電波分光計AC240の水冷機構の開発と性能評価」、日本天文学会、2009年9月14日、山口大学

[図書] (計3件)

- ① 新井一郎、梅村雅之、漆原秀子、小笠原正明、指田勝男、澤村京一、白岩善博、杉田倫明、角替敏昭、中井直正、他、筑波大学出版会、「現代人のための統合科学ービッグバンから生物多様性まで」、2012、384 (89-117)
- ② 中井直正、他、日本評論社、シリーズ現代の天文学 16巻「宇宙の観測 IIー電波天文学」、2009、352 (1-19, 103-109)
- ③ 福井康雄、犬塚修一郎、大西利和、中井直正、舞原俊憲、水野亮、他、日本評論社、シリーズ現代の天文学 6巻「星間物質と星形成」、2008、325 (15-26, 163-165, 175-177)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中井 直正 (NAKAI NAOMASA)
筑波大学・数理物質系・教授
研究者番号：80192665

(2) 研究分担者

瀬田 益道 (SETA MASUMICHI)
筑波大学・数理物質系・講師
研究者番号：80358994

(3) 連携研究者

山内 彩 (YAMAUCHI AYA)

国立天文台・水沢 VLBI 観測所・研究員
研究者番号：70431674