

## 長期間派遣成果報告書

2012年3月7日 国立天文台 高野秀路

タイトル 星間分子の電波観測による星間物質の組成の研究

Study of interstellar matter by radioastronomical observations of molecules

所属・氏名 国立天文台 野辺山宇宙電波観測所 高野秀路

Nobeyama Radio Observatory,

National Astronomical Observatory of Japan Shuro TAKANO

派遣期間 2011年6月4日～2011年12月7日(主たる滞在先のライデン大学での期間)

June 4, 2011 – December 7, 2011

研究機関 Leiden Observatory, Leiden University, P.O. Box 9513,

NL-2300 RA Leiden, The Netherlands

研究指導者 Prof. Ewine F. van Dishoeck

### 英文サマリー

In Leiden Observatory, I carried out following three research topics.

(1) Observational proposals for the new radiotelescope “ALMA” (Atacama Large Millimeter / submillimeter Array), which is under construction in Chile, were prepared and submitted in the end of June 2011. The purpose of one of our proposals is to observe dust/shock related molecules in active galaxies NGC 1068 and NGC 253, and it was accepted for observations.

(2) We detected rotational transitions of methyl formate ( $\text{HCOOCH}_3$ ) in the second torsionally excited state in Orion KL. Recent progress on microwave spectroscopy of methyl formate in laboratory and sensitive radioastronomical observations made it possible to assign about 20 emission lines to methyl formate in this state. The column density obtained is  $(3.0 \pm 1.5) \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ . The manuscript was prepared and submitted.

(3) To study the abundance and temperature of ammonia in the center of a nearby galaxy M 51 and to compare them with those in other nearby galaxies, we observed its  $(J,K)=(1,1)$ ,  $(2,2)$ ,  $(3,3)$ , and  $(4,4)$  transitions at the wavelength of 1.3 cm. The temperature obtained from the  $(1,1)$  and  $(2,2)$  transitions of para-ammonia is  $25 \pm 2 \text{ K}$ , and the column density is  $(8.1 \pm 2.4) \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ . The manuscript was prepared and submitted.

今回の派遣の主な目的は、派遣先において関連分野の研究者と議論などを行いながら、すでに取得した電波天文観測のデータの解析および論文執筆を行うことである。本派遣事業に採択していただき、改めて感謝する次第である。派遣先では、主に下記の3つのことを行った。

#### (1) 国際共同電波干渉計 ALMA(アルマ)の観測提案書の作成

上記観測装置は、東アジア(日本、台湾)、北米(アメリカ、カナダ)、およびヨーロッパが中心となり、国際共同で南米のチリの高地で建設中である。すでに完成している部分の装置を用いた「部分運用」が、2011年10月ごろから始まっている。

この部分運用における観測提案書の締め切りが2011年6月末であった。私達も、観測提案書の作成を行い提出した。研究テーマは、これまでに私達が行っている激しい活動性を示す銀河での分子の観測であり、特にその空間分布を観測することにより、このような環境でどのようにして分子の存在量が決まるのか、を調べるものである。私が筆頭提案者となった観測提案書のタイトルは、“Imaging study of molecules in the nearby galaxies NGC 1068 and NGC 253: Effects of active galactic nucleus and starburst on the shock/dust related molecules SO, HNC, CH<sub>3</sub>OH, and CH<sub>3</sub>CN”である。

9月に審査結果が通知され、上記の提案は全提案の top 10%にランクされ、最優先で観測される予定となった。今後の研究活動に重要な、質の高い観測データが得られることになる。派遣先で約1カ月の期間を費やし、かつ1つの重要な成果であると考え、あえて記載した次第である。また、他の研究者が筆頭提案者となった提案書2件に共同研究者として参加し、1件は同様に top 10%にランクされ、他の1件は不採択となった。

#### (2) オリオン大星雲での、ねじれながら回転しているギ酸メチル分子(HCOOCH<sub>3</sub>)の検出(ねじれ振動第2励起状態)

【序】オリオン大星雲は、星の形成が現在でも活発に進んでいる領域であり、その原料であるガスや塵が非常に多い。ガスは主に分子からなり、分子は回転することによって電波を放出するため(スペクトル線)、多くの種類の分子からの極めて多くの本数のスペクトル線を、電波望遠鏡で観測することができる。

それらの多くの電波を識別し、どの分子からのものかを明らかにし、かつ、説明できない電波については、未知の分子によるものかどうかを調べる研究が行われている。このような研究は、分子からの電波を用いて星間分子雲の物理的環境(温度、密度)や物質組成を明らかにし、さらには星の形成過程や物質の進化を明らかにするために重要である。

今回取り上げたギ酸メチル(HCOOCH<sub>3</sub>)は多くのスペクトル線を持ち、上記の観点

からその電波の研究は重要である。今回は、この分子のメチル基(CH<sub>3</sub>)のねじれ振動第 2 励起状態からのスペクトル線をオリオン大星雲で検出し、解析を行うことができた。

【電波望遠鏡を用いた観測】 観測は、国立天文台野辺山宇宙電波観測所(長野県)の直径 45m 電波望遠鏡を用いて行った。実験室での周波数測定結果(Kobayashi et al. in preparation)に基づき、オリオン大星雲での観測を行った結果、4 本のスペクトル線を検出することができた(図 1)。さらにスペインの 30m 電波望遠鏡、およびアメリカの 12m 電波望遠鏡のデータを文献で調べることにより、さらに 15 本のスペクトル線を確認することができた。

【解析】 解析は、詳細は省略するが「回転ダイヤグラム法」という標準的な手法を用いて行った。その結果、ねじれ振動第 2 励起状態のギ酸メチルの存在量は、 $(3.0 \pm 1.5) \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  となった。(これは「柱密度」と呼ばれる表示方法で、観測者から天体まで伸びる断面積  $1 \text{ cm}^2$  の仮想的な筒の中に存在する当該分子の個数を示している。)また、振動基底状態およびねじれ振動第 1 励起状態のスペクトル線についても、同時に観測を行った。回転温度は、それぞれ  $43 \pm 9 \text{ K}$  および  $53 \pm 8 \text{ K}$  となった。また、柱密度はそれぞれ、 $(3.8 \pm 1.2) \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  および  $(9.8 \pm 2.3) \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  となり、ねじれ振動第 2 励起状態の存在量の約 13 倍および 3 倍である。

さらに、振動基底状態、および第 1、第 2 ねじれ振動励起状態の 3 つの状態のデータを用いることにより、ねじれ振動の振動温度として、 $124 \pm 5 \text{ K}$  が得られた。この値は、回転温度よりも有意に高い。

【議論】 上記の 3 つの状態のスペクトル線の線幅および速度(観測周波数からドップラー効果を用いて計算)を比較したところ、有意な差はなかった。このことは、これらの 3 つの状態にいる分子は、準位のエネルギーとしては異なるが、空間的分布および運動はほぼ同じであることを示している。

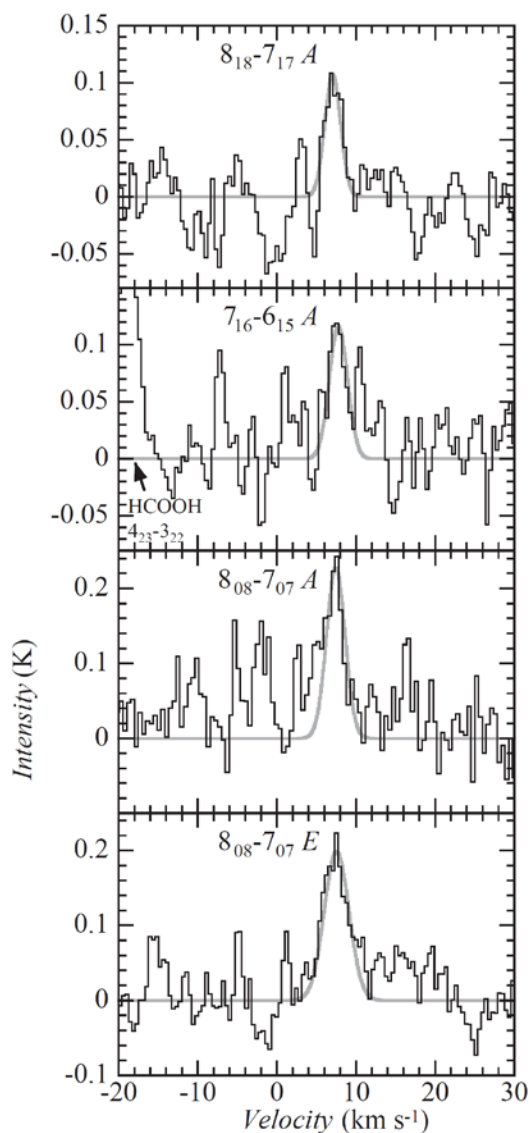


Fig. 1 The lines of HCOOCH<sub>3</sub> in the second torsionally excited state observed with the Nobeyama 45m radiotelescope. The results of Gaussian fits to the lines are overlaid with gray curves.

振動基底状態およびねじれ振動第 1 励起状態のスペクトル線は、信号対雑音比が比較的良いため、スペクトル線の形状を詳しく調べることができた。その結果、これらのスペクトル線は、細いものと太いものの2つのガウシアン成分の合成で説明できることがわかった。太い成分は、より運動が激しいところから生じていると考えられる。その起源としては、オリオン大星雲の若い星(原始星)から吹き出すガス(分子流)であると考えられる。

ねじれ振動温度が回転温度より高い結果となったが、これはねじれ振動が励起される機構の反映であると考えられる。そこで、その機構を考察するために、ねじれ振動が脱励起する際のアインシュタイン A 係数(以後“A 係数”)と純回転遷移の A 係数を比較した。通常、振動遷移(ねじれ振動を含む)の A 係数は、純回転遷移のものよりもはるかに大きい。比較を行った結果、ギ酸メチルのケースでは予想と異なり、純回転遷移の A 係数の方が大きいことがわかった。そのため、水素分子との衝突や遠赤外線によって、一旦ねじれ振動が励起されると、回転の脱励起が早いいため、回転温度が早く下がり、ねじれ振動温度よりも低くなると考えられる。定性的にはこれで観測結果を説明できた。

【終わりに】 ALMA が本格的に運用を始めると、感度が高いため、多くの未同定スペクトル線が見出されることは間違いない。今回のギ酸メチルのねじれ振動第 2 励起状態の検出は、このような未同定線のある程度の部分が、ギ酸メチルや他の有機分子の低い振動励起状態で説明できる可能性を示すものである。実験室での分子分光学の研究とさらに協力し、未同定線を調べて行くことは、星間分子雲の物理的および化学的環境をさらに調べ、かつ新しい分子種を見出すことにつながる。

【論文出版】 本研究の結果は、2011 年 11 月 3 日に日本天文学会欧文誌(PASJ)に投稿し、2012 年 3 月 1 日に受理された。タイトルおよび著者は以下の通りである。

“Detection of Methyl Formate in the Second Torsionally Excited State ( $v_t=2$ ) in Orion KL”,

Shuro Takano, Yusuke Sakai, Suguru Kakimoto, Mutsumi Sasaki, and Kaori Kobayashi

### (3) 系外銀河 M 51 でのアンモニアの検出

【序】 私達の銀河系の外の銀河(系外銀河)での分子の観測は、距離が大きく強度が弱いため一般的には難しい。しかし、これまでに約 40 種の分子が検出され、銀河の分子組成の研究が盛んになってきている。今回取り上げた比較的近傍にある銀河 M 51 は、傾きが少ない(face-on)渦巻き銀河であり、「子持ち銀河」として知られている。この銀河では、CO, HCN などこれまでにいくつかの種類が検出されている。

アンモニア分子は、星間分子雲の温度を求めるために有用な分子であり、系外銀河ではこれまでに数個の銀河で検出されてきた。また、ガスが多い近傍の銀河 M82 では、多くの分子種が検出されているが、特異的にアンモニアの量が少なく、その理由については十分には解明されていない。このような特徴を持つアンモニアであるが、M 51 では検出が報告されていない。そこで、上記の観点から、その存在量などに興味を

持ち観測を行った。

【電波望遠鏡を用いた観測】 観測は、マックスプランク電波天文研究所の Effelsberg 100m 電波望遠鏡(ドイツ・ボン近郊)を用いて、2000 および 2002 年に行った。23-24 GHz 帯の 4 本のスペクトル線を観測し、そのうちの 3 本を検出することができた。

【解析】 ギ酸メチルと同様に「回転ダイヤグラム法」という標準的な手法を用いて行った。その結果、アンモニア(パラアンモニア)から求めた温度は  $25 \pm 2$  K となった。また、アンモニアの柱密度は  $(8.1 \pm 2.4) \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  となった。これは、最も多く存在する分子である水素分子に対する相対的な値として、 $4 \times 10^{-9}$  程度となる。

【議論】 今回求めた温度は、他の近傍の銀河である NGC 253 および M 82 と同程度であった。また、アンモニアの相対存在量は、NGC 253 および IC 342(近傍の銀河)などよりも約 5 倍低い、M 82 よりは 1 ケタ程度多い(図2)。そのため、M 82 でのアンモニアの特異的な存在量の低さを、さらに示す結果となった。

M82 でアンモニアが少ない理由としては、これまでに私達は生成過程に原因がある可能性を指摘してきた(アンモニアなどの星間ダスト上で生成するとされている分子の存在量が低い)。一方、アンモニアは紫外線で光解離しやすいことを指摘しているグループもある。

今回、派遣先の Prof. van Dishoeck が光解離の専門家でもあることから、この点について情報提供をいただき議論を行った。その結果、アンモニアのみが特異的に光解離しやすいことはなく、「光解離説」のみでは説明できないと結論した。

【終わりに】 議論において、派遣先の教授の専門知識に特に助けられ、アンモニアの存在量について議論を進めることができた。このことは、系外銀河の分子組成の理解に役立ち、今後さらに深く議論していきたいと考えている。

【論文出版】 本研究の結果は、2011年12月6日にヨーロッパの天文学の学術誌 *Astronomy & Astrophysics* に投稿した。タイトルおよび著者は以下の通りである。

“Detection of ammonia in M 51”,

Shuro Takano, Toshiaki Takano, Naomasa Nakai, Kentaro Kawaguchi, and Peter Schilke

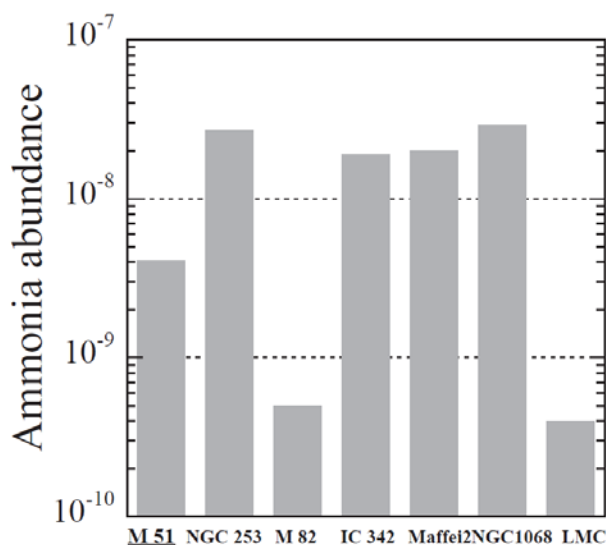


Fig. 2 The abundance of ammonia relative to H2 in nearby galaxies. The data except M 51 were taken from several references.

### その他(ご参考)

今回の滞在中に、日本の共同研究者が中心となって作成した論文に、私が共著者として入ったものとして、以下の2つがあげられる。

(1) “A Search for Interstellar Carbon-chain Alcohol  $\text{HC}_4\text{OH}$  in Star-forming Region I1527 and Dark Cloud TMC-1”, Araki, Mitsunori; Takano, Shuro; Yamabe, Hiromichi; Koshikawa, Naohiro; Tsukiyama, Koichi; Nakane, Aya; Okabayashi, Toshiaki; Kunimatsu, Arisa; Kuze, Nobuhiko, The Astrophysical Journal, Volume 744, Issue 2, article id. 163 (2012).

(2) “Molecular Line Observations of MCLD 123.5+24.9 in the Polaris Cirrus”, Shimoikura, Tomomi; Dobashi, Kazuhito; Sakurai, Tohko; Takano, Shuro; Nishiura, Shingo; Hirota, Tomoya, The Astrophysical Journal, Volume 745, Issue 2, article id. 195 (2012).