



東京学芸大学リポジトリ

Tokyo Gakugei University Repository

原始星候補天体 IRAS 21025+5221 に付随する巨大分子雲コアのアンモニア分子輝線による温度測定

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2011-06-15 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 大橋,健次郎, 土橋,一仁, 秋里,昂, 高木,知里, 井上,舞, 鈴木,裕子, 下井倉,ともみ, 齋藤,弘雄, 松本,倫明 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2309/107953

原始星候補天体 IRAS 21025+5221 に付随する 巨大分子雲コアのアンモニア分子輝線による温度測定

大橋 健次郎*・土橋 一仁*・秋里 昂*・高木 知里*・井上 舞*
鈴木 裕子*・下井倉 ともみ*・齋藤 弘雄**・松本 倫明***

宇宙地球科学分野

(2010年5月21日受理)

OHASHI, K., DOBASHI, K., AKISATO, K., TAKAGI, C., INOUE, M., SUZUKI, Y., SHIMOIKURA, T., SAITO, H. and MATSUMOTO, T.:
Temperature measurement of a massive dense core associated with the protostellar candidate IRAS 21025+5221 based on the NH_3 (J, K) = (1, 1)
and (2, 2) emission lines. *Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci.*, **62**: 33–38. (2010)

ISSN 1880-4330

Abstract

This paper presents results of a temperature measurement for a massive dense core ($1 \times 10^4 M_\odot$) associated with the protostellar candidate IRAS 21025+5221 embedded in a giant molecular cloud in the Cygnus region. The measurement has been performed by analyzing the emission lines of ammonia molecule at 23 GHz observed with the 45m telescope at Nobeyama Radio Observatory. Among the observed emission lines arising from the transitions (J, K) = (1, 1) – (4, 4), we detected those for (J, K) = (1, 1) and (2, 2). Analyses of the spectral data using a simple method proposed by Tosaki et al. (2009) yield an estimate of the rotational temperature of the molecule $T_{\text{rot}} = 12.6$ K. This value is significantly lower than a typical temperature of other massive dense cores forming massive protostars (30–100 K), indicating that IRAS 21025+5221 is in a very early stage of protostellar evolution.

Key words: ammonia molecule, star formation, dense core

Department of Earth Sciences, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan

要旨: 本研究では、はくちょう座の巨大分子雲内にある原始星候補天体 IRAS 21025+5221 に付随する巨大分子雲コア ($1 \times 10^4 M_\odot$) の温度測定について報告する。温度測定は、分子雲コアから放射される一連のアンモニア分子輝線 (23 GHz 帯) を、国立天文台野辺山宇宙電波観測所の 45m 電波望遠鏡で観測することにより行った。観測した回転-反転遷移 (J, K) = (1, 1) ~ (4, 4) による分子輝線のうち、(J, K) = (1, 1) 及び (2, 2) の分子輝線を検出することができた。濤崎ほか (2009) が提案した方法を用いてこれらの分子輝線を解析したところ、この分子雲コアの温度 (アンモニア分子の回転温度) は、 $T_{\text{rot}} = 12.6$ K であることが分かった。これは、典型的な大質量分子雲コアの温度 (30 ~ 100 K) よりも有意に低く、IRAS 21025+5221 が進化のかなり早い段階にある若い原始星であることを示唆するものである。

* 東京学芸大学 (184-8501 小金井市貫井北町 4-1-1)

** 国立天文台 (184-8588 三鷹市大沢 2-21-1)

*** 法政大学 (184-8584 小金井市梶野町 3-7-2)

1. はじめに

IRAS 21025+5221 (表 1) は, 遠赤外線点源のカタログである IRAS Point Source Catalog (IRAS PSC) に記載されている天体であり, はくちょう座の 7 番目の OB アソシエーション近傍の巨大分子雲 ($1 \times 10^5 M_{\odot}$; Dobashi et al. 1994) の方向に位置している。以後, この巨大分子雲のことを単に Cyg OB 7 と呼ぶ。IRAS 21025+5221 は, 遠赤外線でのフラックスの特徴から Cyg OB 7 内で形成されつつある原始星候補天体であると考えられる (大橋 2010)。

Cyg OB 7 は太陽系から約 800 pc の距離に位置し (Humphreys 1978), 太陽系近傍 (1 kpc 以内) の分子雲としては最大級の規模を誇る巨大分子雲であるが, 大質量星が形成されていないという特異な特徴をもつ (例えば, Falgarone & Perault 1987)。近赤外線 of 星の測光データである 2 Micron All Sky Survey Point Source Catalog (2MASS PSC) を用いた最近の研究により, Cyg OB 7 には特に密度の高い領域である巨大な分子雲コアが 2 つあることが明らかになった (図 1; 高木 2010)。そのうちの

1 つは L1004 として知られる領域の東端にあり, もう 1 つは L988 と呼ばれる領域に対応している (Lynds 1962)。L988 に対応する分子雲コアには小質量原始星であると考えられる赤外線点源や低光度の輝線星 (若い星) が複数付随しているのに対し (Dobashi et al. 1994), L1004 の東端に対応する分子雲コアには IRAS 21025+5221 以外に同様の低光度の赤外線点源が 1 つ見つかったのみである。今後, 本論文では, L1004 の東端にある分子雲コアを, L1004E と呼ぶ。

ごく最近, 我々は L1004E に対して $C^{18}O$ 分子輝線を用いた高角分解能観測を遂行し, この分子雲コアが $1 \times 10^4 M_{\odot}$ もの質量をもつ極めて巨大なものであることを明らかにした (秋里 2010)。この質量は Cyg OB 7 全体の質量の約 10% に相当し, また小質量星形成領域としてよく研究されているおうし座分子雲群の総質量に匹敵する。このように巨大な分子雲コアの発見例は極めて稀である。さらに, 付随する赤外線点源がたった 2 つしかない事実を考えると, この分子雲コアは大質量星を含む活発な星形成を引き起こす直前 (あるいは直後) の状態

表 1 IRAS21025+5221

IRAS No.	Position				Flux Density									C.C.*	L
	$\alpha(J2000)$ [h m s]	$\delta(J2000)$ [$^{\circ}$ ' "]	ℓ [$^{\circ}$]	b [$^{\circ}$]	F12 [Jy]	F25 [Jy]	F60 [Jy]	F100 [Jy]	Q12	Q25	Q60	Q100			
21025+5221	21 4 6.5	52 33 47	92.27	3.78	0.3691	1.907	8.101	39.96	3	3	3	3	CAAA	35.9	

* Correlation Coefficients

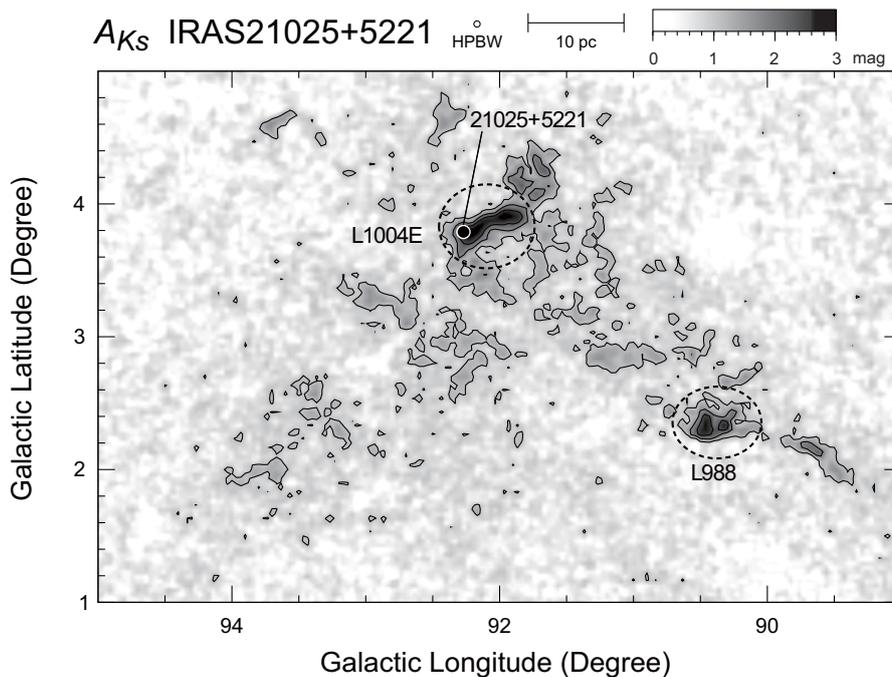


図 1 Cyg OB 7 の A_{Ks} マップ (高木 2010 より)。マップのグリッドは $2'$ である。コントアの最小値は $A_{Ks} = 0.9$ mag であり, 以降のコントアは 0.6 mag 毎に引いてある。黒色の丸印は L1004E に付随する IRAS 21025+5221 を示す。2 つの分子雲コア L1004E と L988 を破線で示す。

にあることが強く示唆される (秋里 2010)。将来的に小質量星を形成するスターレスコア (まだ星形成が起きていない分子雲コア) は他の領域で幾つか発見されているが, 大質量星を形成するスターレスコアについては, これまで明確な発見例は無い。大質量星はもともと数が少ない上に, 星形成のタイムスケールが極めて短いためである。L1004Eは, 大質量星形成を引き起こす分子雲コアの物理状態を探る上で, 極めて貴重なサンプルであると言える。

本研究の目的は, L1004Eを構成する分子ガスの温度を定量的に調査することである。調査の手段としては, アンモニア分子 (NH_3) の回転-反転遷移による 23 GHz 帯の分子輝線を用いる。アンモニア分子による分子輝線は, Cheung (1968) の銀河中心方向の観測で初めて検出された。以来, 同分子には様々な励起状態に対応する多くの遷移が存在する為, 星間空間の様々な領域で観測され, 電波天文学において重要な役割を果たしてきた (例えば, Ho & Townes 1983)。特に, 周波数 23-24 GHz 帯には多くの遷移が存在し, 濃密な領域における分子ガスの励起温度 (回転温度) を推定するのに有用である (例えば, Benson & Myers 1989 ; 壽崎ほか 2009)。また, アンモニア分子が励起される臨界密度は高いため, これらの分子輝線は水素分子の密度で $n(\text{H}_2) > 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 程度の高密度領域からのみ放射される。つまり, アンモニア分子の 23 GHz 帯の回転-反転遷移は, 分子雲コアを検出しその内部の高密度ガスの温度を推定する「温度計」として適しているのである。

我々は, IRAS 21025+5221 の方向について 23 GHz 帯のアンモニア分子輝線の観測を遂行し, L1004E 内の高密度ガスの温度測定を試みた。本論文では, 観測の概要と解析結果について述べる。

2. 観測とデータの整約

観測に用いた分子輝線は, 23-24 GHz にあるアンモニ

A 分子の回転-反転遷移 (J, K) = (1, 1), (2, 2), (3, 3) 及び (4, 4) に対応する 4 輝線である。これらの輝線の静止周波数を表 2 にまとめる。

これらの分子輝線の観測は, 国立天文台野辺山宇宙電波観測所の 45m 電波望遠鏡 (以後, 45m 鏡という) を用いて, 2009 年 4 月 13 日に行った。23 GHz 帯での 45m 鏡のビームサイズは HPBW = 73" である。使用した受信機及び分光計は, H22 受信機 (20 GHz 帯用) 及び音響光学型分光計 (AOS) である。AOS は 40 kHz の周波数分解能で 40 MHz の周波数帯域をカバーしている。これらの周波数分解能及び周波数帯域は, 視線速度 (V_{LSR}) で速度分解能 0.5 km/s 及び速度帯域 520 km/s に相当する。

観測は標準的なチョッパーホイール法 (Kutner & Ulich 1981) によるポジションスイッチにより行い, アンテナ温度スケールのスペクトルデータを得た。使用したオフ点 (放射ゼロの場所) の座標は, $\alpha_{2000} = 20\text{h}58\text{m}36.98\text{s}$, $\delta_{2000} = 51^\circ 36' 59.2''$ である。

野辺山宇宙電波観測所のリダクションソフトウェア NewStar を用いて得られたスペクトルデータから 1 次のベースラインを差し引き, これを 45m 鏡の 23 GHz 帯の主ビーム能率 $\eta = 0.81$ で除して, 輝度温度 (T_{R}^*) に換算した。

観測中の典型的なシステム雑音温度 (大気込み) は $T_{\text{SYS}} = 140 \text{ K}$ であった。速度分解能 0.5 km/s に対し, 3.8 時間の積分時間で標準偏差 $\Delta T_{\text{R}}^* = 0.03 \text{ K}$ のノイズレベルのデータを取得した。

本観測で得られた IRAS 21025+5221 方向のスペクトルを図 2 に示す。図から分かるように, 本観測では (J, K) = (1, 1) 及び (2, 2) の輝線を検出することができた。(J, K) = (1, 1) の輝線については, 中心のメイン成分とそのすぐ両側のインナーサテライト成分, 及び少し離れたアウターサテライト成分 (合計 5 成分) が検出された。(J, K) = (2, 2) の輝線については, メイン成分のみ検出された。(J, K) = (3, 3) 及び (4, 4) の輝線については, 本観測では検出できなかった。

表 2 観測諸元

分子輝線	静止周波数* [GHz]
$\text{NH}_3 (J, K) = (4, 4)$	24.139417
$\text{NH}_3 (J, K) = (3, 3)$	23.870129
$\text{NH}_3 (J, K) = (2, 2)$	23.722633
$\text{NH}_3 (J, K) = (1, 1)$	23.694506

* NIST Recommended Rest Frequencies for Observed Interstellar Molecular Microwave Transitions 2009 Revision (<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Micro/Html/contents.html>)

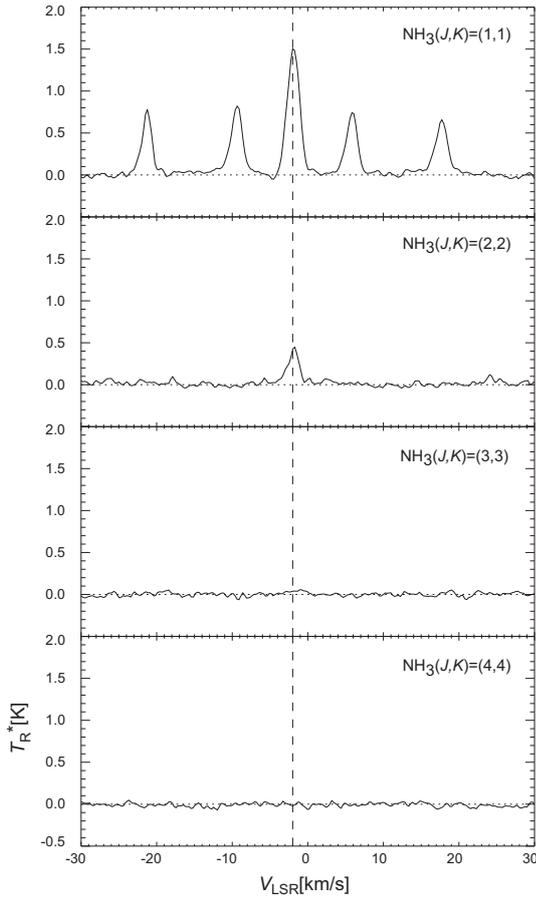


図2 IRAS 21025+5221 方向のアンモニア分子の回転-反転遷移の輝線スペクトル。横軸はメイン成分の視線方向の速度 V_{LSR} ，縦軸は輝度温度 T_R^* である。縦方向の破線は、 $V_{LSR} = -2 \text{ km/s}$ を表し、横方向の点線は、 $T_R^* = 0 \text{ K}$ を表す。 $\text{NH}_3(J, K) = (1, 1)$ 分子輝線は電気四重極子モーメントによる5つの成分に分かれており、 $V_{LSR} = -2 \text{ km/s}$ にメイン成分、その両隣にインナーサテライト成分、更に外側に OUTER サテライト成分が見られる。 $\text{NH}_3(J, K) = (2, 2)$ 分子輝線はメイン成分のみが見られる。 $\text{NH}_3(J, K) = (3, 3)$ 及び $(4, 4)$ 分子輝線は検出できなかった。

3. 結果と考察

2つの異なる回転-反転遷移のアンモニア分子輝線の強度比を用いれば、分子の励起温度（回転温度）や輝線の光学的厚さ等を計算することができる（例えば、Ho & Townes 1983；瀧崎ほか 2009）。

ある回転-反転遷移 (J, K) のメイン成分のピーク温度 $T_R^*(J, K, m)$ 及びインナーサテライト成分のピーク温度 $T_R^*(J, K, s)$ の強度比と、それぞれの成分の光学的厚さ $\tau(J, K, m)$ 及び $\tau(J, K, s)$ の間には、以下の式1で表される関係が成り立つ。

$$\frac{T_R^*(J, K, m)}{T_R^*(J, K, s)} = \frac{1 - e^{-\tau(J, K, m)}}{1 - e^{-\tau(J, K, s)}} \quad \text{式1}$$

また、 $(J, K) = (1, 1)$ の場合、メイン成分の光学的厚さとインナーサテライト成分の光学的厚さは、以下の式2で表される関係にある。

$$\tau(1, 1, s) = 0.28\tau(1, 1, m) \quad \text{式2}$$

上記の式1及び式2を用いると、未知数は $\tau(1, 1, m)$ のみとなる。しかし、この $\tau(1, 1, m)$ は解析的には解けない。そこで、光学的厚さ $\tau(1, 1, m)$ の計算は、瀧崎ほか (2009) が紹介した表計算ソフトによる簡便な方法を用いて行った。具体的な手順は、以下の (1)～(3) の通りである。

- (1) $(J, K) = (1, 1)$ の分子輝線のスペクトルのメイン成分、及びインナーサテライト成分をガウス関数でフィットし、それぞれの成分の輝度温度 $T_R^*(1, 1, m)$ ，及び $T_R^*(1, 1, s)$ を求める。
- (2) $T_R^*(1, 1, m)$ と $T_R^*(1, 1, s)$ の比を求める。
- (3) 表計算ソフトを用いて、 $\tau(1, 1, m)$ の値を0.1刻みで変化させ、(2) で求めた値に最も近い $\tau(1, 1, m)$ の値を採用する。

本研究で得られた IRAS 21025+5221 方向でのスペクトルの場合、手順 (1) で求めたメイン成分、及びインナーサテライト成分の輝度温度は、それぞれ $T_R^*(1, 1, m) = 1.52 \text{ K}$ ， $T_R^*(1, 1, s) = 0.76 \text{ K}$ となった。よって、手順 (2) の輝度温度の比は、 $T_R^*(1, 1, m) / T_R^*(1, 1, s) = 2.0$ となる。手順 (3) の表計算ソフトによる結果を、図3に示す。観測された $T_R^*(1, 1, m) / T_R^*(1, 1, s)$ 比に最も近い値を与えるのは、 $\tau(1, 1, m) = 2.0$ のときであることが分かった。

$(J, K) = (2, 2)$ の輝線スペクトルをガウス関数でフィットして求めた輝度温度は、 $T_R^*(2, 2, m) = 0.41 \text{ K}$ である。各成分の輝度温度、及び光学的厚さを表3にまとめる。これらのパラメータを用いて、アンモニア分子の回転温度 T_{rot} は次の式3で求めることができる（瀧崎ほか 2009）。

$$T_{rot} = -41.5 / \ln \left[-\frac{0.282}{\tau(1, 1, m)} \ln \left\{ 1 - \frac{T_R^*(2, 2, m)}{T_R^*(1, 1, m)} \times (1 - e^{-\tau(1, 1, m)}) \right\} \right] \quad \text{式3}$$

この式を用いて計算した結果、回転温度は $T_{rot} = 12.6 \text{ K}$ となった。

福井ほか (2008) によると、比較的質量の大きな分子雲コア (10 M_\odot 以上) の典型的な温度は、30～100 K である。IRAS 21025+5221 に付随する分子雲コア (L1004E) は、同質量程度の典型的な分子雲コアよりもかなり低温であると言える。我々はこの分子雲コアに対する ^{12}CO 分子輝線を用いた観測も別途行い、分子ガスの温度につい

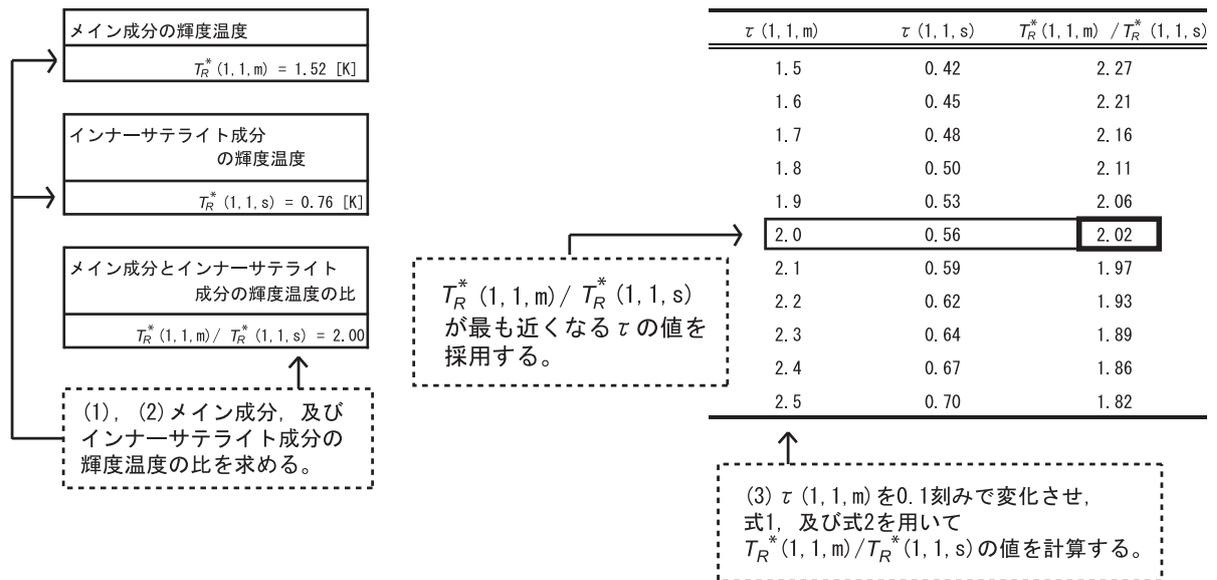


図3 表計算ソフトを用いたアンモニア分子輝線の光学的厚さの算出手順。(1) 左のパネルに示したように, $\text{NH}_3(J, K) = (1, 1)$ 分子輝線のメイン成分, 及びインナーサテライト成分の輝度温度を求め, (2) それらの比を計算する。(3) メイン成分の光学的厚さを0.1刻みで変化させ, 式1の左辺の値を計算する。手順(3)で計算した値の中で, 手順(2)の値と最も近い光学的厚さを採用する。

表3 アンモニア分子輝線のパラメータ

分子輝線	T_R^* [K]	τ
$\text{NH}_3(1, 1, m)$	1.52	2.0
$\text{NH}_3(1, 1, s)$	0.76	0.56
$\text{NH}_3(2, 2, m)$	0.41	-

注: 1列目はアンモニアの分子輝線を表し, 括弧内の数字とローマ字は, 左から順番に, J の値, K の値, およびメインまたはサテライトを表す。

て本研究とは独立した見積りを行った(秋里 2010)。その結果, ^{12}CO 分子輝線から推定される分子ガスの温度もやはり 10 K 程度であるという結論を得ている。よって, この分子雲コアの温度は 10 K 程度であると結論する。

質量の大きな分子雲コアでは, 小質量星に加え大質量星も形成される場合が多い。大質量星は強烈な紫外線を放射し, 周囲のガスを加熱する。その極端な例はコンパクト HII 領域として知られている。L1004E の場合には比較的 low 光度の IRAS 点源 (合計 60 L_{*} 程度) が 2 つ付随しているだけであり, 巨大な分子雲コア全体を加熱するほどの熱源には成り得ない。つまり, この分子雲コアが他の大型の分子雲コアに比べて低温なのは, 大質量星を含む活発な星形成活動がまだ起きていないためであると考えられる。

4. 結論

本研究では, 野辺山宇宙電波観測所の 45m 電波望遠鏡を用いて IRAS 21025+5221 に付随する巨大な分子雲コア L1004E のアンモニア分子輝線 (23 GHz 帯) による観測を行った。回転-反転遷移 (J, K) = (1, 1) 及び (2, 2) の輝線を解析した結果, この分子雲コアのアンモニア分子の回転温度は 12.6 K であることが分かった。他の大型の分子雲コアの典型的な温度 (30~100 K) に比べ, L1004E は極めて低温であると言える。L1004E の中でまだ大質量星を含む活発な星形成活動が起きていないことが, その低温の原因であると考えられる。

謝 辞

本研究は、筆頭著者である大橋の卒業研究（平成21年度）として行いました。2MASSのデータの準備の一部は、西浦慎悟先生にご協力頂きました。また、本研究の一部は科学研究補助金（Nos. 21650205, 22340040, 22700785）の資金的援助を受けて行いました。ここに感謝致します。

引用文献

- Benson, P. J., & Myers, P. C. 1989, *Astrophysical Journal Supplement Series* vol.71, pp.89-108
- Cheung, A. C., Rank, D. M., Townes, C. H., Thornton, D. D., & Welch, W. J. 1968, *Physical Review Letters*, vol.21, pp.1701-1705
- Dobashi, K., Bernard, J.-Ph, Yonekura, Y., & Fukui, Y. 1994, *Astrophysical Journal Supplement Series*, vol.95, pp.419-456
- Falgarone, E., & Perault, M. 1987, in *Physical processes in interstellar clouds; proceedings of the NATO Advanced Study Institute, Irsee, Federal Republic of Germany, August 18-28, 1986*. Dordrecht, D. Reidel Publishing Co., pp.59-73
- Ho, P. T. P., & Townes, C. H. 1983, *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, vol.21, pp.239-270
- Humphreys, R. M. 1978, *Astrophysical Journal Supplement Series*, vol.38, pp.309-350
- IRAS Point Source Catalog ver.2.0 1988, joint IRAS Science Working Group (Washington DC : GPO)
- Kutner, M. L., & Ulich, B. L. 1981, *Astrophysical Journal*, vol.250, pp.341-348
- Lynds, B. T. 1962, *Astrophysical Journal Supplement Series*, vol.7, pp.1-52
- NIST Recommended Rest Frequency for Observed Interstellar Molecular Microwave Transitions 2009 Revision (<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Micro/Html/contents.html>)
- 秋里 昂 2010, 修士論文 (東京学芸大学), pp.1-32
- 大橋健次郎 2010, 卒業論文 (東京学芸大学), pp.1-19
- 高木知里 2010, 修士論文 (東京学芸大学), pp.1-31
- 壽崎智佳, 久野成夫, 樋口あや, 梅本智文, 高野秀路, 澤田剛士 2009, *地学教育*, 第62巻, pp.9-20
- 福井康雄, 犬塚修一郎, 大西利和, 中井直正, 舞原俊憲, 水野亮 2008, 「星間物質と星形成」, 日本評論社, p.41