

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：12604

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287030

研究課題名(和文)速度分散法による「暗黒ガス」の徹底解明

研究課題名(英文)Revealing the origin of dark gas around molecular clouds using the velocity-dispersion method

研究代表者

土橋 一仁 (DOBASHI, Kazuhito)

東京学芸大学・教育学部・教授

研究者番号：20237176

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、未知の星間ガスである「暗黒ガス」の成分を解明することである。暗黒ガスとは、遠赤外線や γ 線では検出されるものの、中性水素原子の放射する21cm線やCO分子輝線では検出されないガスであり、濃密な分子雲の周辺に多く存在することが知られている。その正体は、おそらく光学的に厚い冷たいHIガスか、CO分子が形成されない(あるいは励起されない)希薄な分子ガスである。我々が独自に開発した速度分散法を利用して、おうし座分子雲の21cm線とCO分子輝線のデータを解析したところ、同分子雲の暗黒ガスの約2割が冷たいHIガスであることがわかった。残りの約8割は希薄な分子ガスであると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of our study is to quantify the components of “dark gas”. The dark gas is the gas which can be detected by the far-infrared dust emission or by gamma-ray, but cannot be traced by the HI 21cm line nor CO emission lines, and it is known to be abundant around dense molecular clouds. The origin of the dark gas should be either optically thick cold HI gas or diffuse molecular gas (H₂) which cannot form or excite CO molecules. Using the new method that we named “velocity-dispersion method”, we analyzed the 21cm and CO emission lines around the Taurus molecular cloud, and found that the fraction of the cold HI gas in the dark gas is about 20%, and therefore the rest (~80%) of the dark gas should be the diffuse molecular gas without CO emission.

研究分野：天文学

キーワード：電波天文学 データベース天文学

1. 研究開始当初の背景

中性水素原子の放射する 21cm 線でも CO 分子輝線でも検出されない暗黒ガスは、Heithausen & Mebold (1989) によって希薄な星間雲 (Polaris Cirrus) で発見された。彼らは、遠赤外線ダスト放射 (IRAS 100 μm) や可視光減光量 (A_V) から予想されるガス量が、21cm 線や CO 分子輝線で直接検出されるガス量よりもかなり多いことに気がついた。その後、Reach et al. (1994) や Hauser et al. (1998) など幾つかのグループにより暗黒ガスの検出がなされたが、特に Grenier et al. (2005) は EGRET 衛星による 線データと 21cm 線・CO 分子輝線の全天データを比較して、このような暗黒ガスが太陽系近傍の星間空間に普遍的かつ大量に存在することを示した。

本研究の遂行に先立ち、代表者である土橋は、IRAP 研究所 (France/ Toulouse) の J.Ph. Bernard・D. Paradis 氏のグループと共に、Planck 衛星による最新の遠赤外線ダスト放射のデータや、2MASS 点源カタログを利用した赤外線減光量マップ (Dobashi 2011) を 21cm 線・CO 分子輝線の全天データと比較し、線データを用いた Grenier 氏の結果が大筋で正しいことを確認した (Bernard et al. 2011; Paradis et al. 2012)。さらに、我々が行ったこれらの研究では、暗黒ガスは全星間ガスの 30% 程度 (全天平均) を占めることを突き止め、また、主に分子雲周辺の中密度領域 (A_V で 0.5 mag 程度) に偏在するという新しい知見を得ることができた。図 1 に、暗黒ガスの検出方法の模式図と、おうし座分子雲周辺での分布の例を示す。

2. 研究の目的

本研究の目的は、宇宙空間に広がるこの未知のガスの起源を解明することである。前述の通り、このガスは、中性水素原子 (H) の放射する 21cm 線や、分子ガス (H_2) のトレーサーである一酸化炭素 (CO) の分子輝線では検出されず、水素原子核の総数に比

例する 線やダスト量に比例する遠赤外線データのデータから初めてその存在が示唆されたものである。暗黒ガスと呼ばれるこの未知のガスは、星間ガス全体の実に 30%~50% もの量を占めており、太陽系近傍の星間分子雲の研究から宇宙初期の星形成の研究を含め、現代天文学上の大問題として認識されつつある。

このガスの正体は、おそらく低温の水素原子ガス (冷たい HI ガス) と、CO のない分子ガス (純粋な H_2 ガス) の混合ガスであることが予想される。本研究では、我々が新たに開発した速度分散法を駆使して暗黒ガスに含まれる冷たい HI ガスを定量し、暗黒ガスの総量との差をとることで純粋な H_2 ガス量を推定する。さらに、本研究では、分子形成のシミュレーションも遂行して、暗黒ガスの組成 (冷たい HI ガスと純粋な H_2 ガスの割合) の深い理解を得ることを目指す。

3. 研究の方法

暗黒ガス起源 (正体) の現実的な候補としては、以下の 2 つが考えられる。

冷たい HI ガス: 分子雲周辺の光学的に厚い低温の水素原子ガス

純粋な H_2 ガス: 分子雲周辺の CO 分子が形成 (または励起) されていない低密度分子ガス

実際の暗黒ガスは、 と の混合ガスであると考えられる。本研究では、太陽系近傍の暗黒ガスに占める と のガスの割合を定量する。 と のガスを天空の広い範囲でそれぞれ直接検出・定量することは極めて困難である。しかし、暗黒ガスの総量は定量することができるので、どちらか一方を計測することができれば、両者の割合を知ることができる。

最近、我々は、冷たい HI ガスを定量するための「速度分散法」という解析法を開発した。この解析法を用いれば、50% 程度の精度で冷たい HI ガスを測定することができる。暗黒ガスの総量と冷たい HI ガスの総量が判明すれば、それらの差として純粋な H_2 ガスを推定することは十分可能である。

分子雲に付随する冷たい HI ガスは、21cm 線中では「山」または「谷」として現れる。冷たい HI ガスは、分子ガスと共存しているため、同じ方向で観測される CO 分子輝線のピーク速度付近に見られる。速度分散法では、このように CO 輝線のピーク速度付近に見られる「山」や「谷」を抽出する。さらに、冷たい HI ガスの速度分散は、分子量の大きな CO 分子の速度分散よりも大きいはずである、という物理的な条件を考慮し、HI ガスのスピン温度に制限を付け、

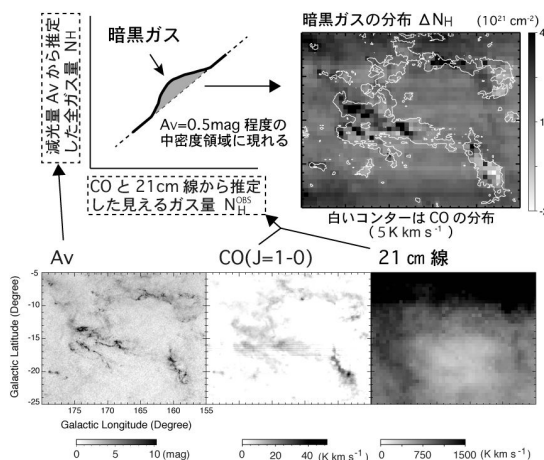


図 1 暗黒ガスとその検出方法

21cm 線中の「山」や「谷」の部分に含まれる HI ガスを定量する(スピン温度、光学的厚さ、柱密度を求める)。

本研究では、主に以上の方法により、図2に示す「おうし座分子雲」などの太陽系近傍の分子雲について、冷たい HI ガスの定量解析を行なった。解析には、LAB サーベイの 21cm 線データと、コロンビアサーベイ(Dame et al. 2002)による CO データや、名古屋大学 4m 鏡による C¹⁸O データを利用した。

4. 研究成果

おうし座分子雲では、図2の TMC-1 と L1498 周辺の 21cm スペクトル中に、冷たい HI ガスによる「山」や「谷」が顕著に見られる(図2中の白いダイヤモンド印と黒いプラス印の観測点)。解析の結果、この部分に含まれる冷たい HI ガスは、暗黒ガス全体の約 22±12% を占めることが示唆された。よって、暗黒ガスの主要な成分(残りの約 80%)は、CO 分子が形成または励起されていない低密度 H₂ 分子ガスであると考えられる。

本研究では、速度分散法による上記の解析の他に、動的収縮を伴う分子雲の MHD シミュレーションを遂行し、その中で分子形成の計算も試みた(e.g., Wu et al. 2018, 準備中)。現在、計算結果を吟味しているところであるが、星形成が起きる前後の分子雲では、概ね上記の観測的結果と矛盾しない解析結果が得られている。

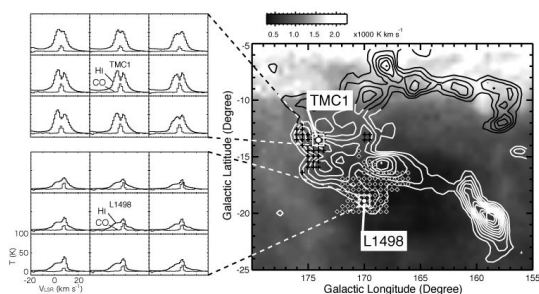


図2 おうし座分子雲中に見られる冷たい HI ガス

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 13 件)

Shimoikura Tomomi, Dobashi Kazuhito, Nakamura Fumitaka, Matsumoto Tomoaki, Hirota Tomoya, “A Statistical Study of Massive Cluster-forming Clumps”, *The Astrophysical Journal*, Volume 855, article id. 45, 28 pp., 2018 [査読有り]

広瀬亜紗、土橋一仁、下井倉ともみ、西浦慎悟、「N₂H⁺分子輝線の解析法を学ぶための学部生用天文教材の開発」、*地学教育*, Vol.70, No. 2, pp. 63-77, 2017 [査読有り]

Saajasto M., Juvela M., Dobashi K., Shimoikura T., Ristorcelli I., Motillaud J., Malinen J., Pelkonen V. M., Feher O., Rivera-Ingraham A., Toth L., V., Motier L., Bernard J.-Ph., Onishi T., “Correlation of gas dynamics and dust in the evolved filament G82.65-02.00”, *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 608, article id.A21, 22pp., 2017 [査読有り]

Taniguchi Kotomi, Saito Masao, Hirota Tomoya, Ozeki Hiroyuki, Miyamoto Yusuke, Kaneko Hiroyuki, Minamidani Tetsuhiro, Shimoikura Tomomi, Nakamura Fumitaka, Dobashi Kazuhito, “Observations of Cyanopolyynes toward Four High-mass Star-forming Regions Containing Hot Cores”, *The Astrophysical Journal*, Vol. 844, article id. 68, 12pp., 2017 [査読有り]

Nakamura Fumitaka, Dobashi Kazuhito, Shimoikura Tomomi, Tanaka Tomohiro, Onishi Toshikazu, “Wide-field ¹²CO (J=2-1) and ¹³CO (J=2-1) Observations toward the Aquila Rift and Serpens Molecular Cloud Complexes. I. Molecular Clouds and Their Physical Properties”, *The Astrophysical Journal*, Vol. 837, Issue 2, article id. 154, 15 pp., 2017 [査読有り]

Shimoikura Tomomi, Dobashi Kazuhito, Matsumoto Tomoaki, Nakamura Fumitaka, “Discovery of Infalling Motion with Rotation of the Cluster-forming Clump S235AB and Its Implication to the Clump Structures”, *The Astrophysical Journal*, Vol.832, article id. 205, 11 pp., 2016 [査読有り]

Nakamura Fumitaka, Ogawa Hideo, Yonekura, Y. Kimura Kimihiko, Okada Nozomi, Kozu Minato, Hasegawa Yutaka, Tokuda Kazuki, Ochiai Tesu, Mizuno Izumi, Dobashi Kazuhito, Shimoikura Tomomi, Kamenno Seiji, Taniguchi Kotomi, Shinnaga Hiroko, Takano Shuro, Kawabe Ryohei, Nakajima Taku, Iono Daisuke, Kuno Nario, Onishi Toshikazu, Momose Munetake, Yamamoto Satoshi, “Z45: A new 45-GHz band dual-polarization HEMT receiver for the NRO 45-m radio telescope”, *Publications of the*

Astronomical Society of Japan, Vol. 67, id. 117, 19pp., 2015 [査読有り]

Shimoikura Tomomi, Dobashi Kazuhito, Nakamura Fumitaka, Hara Chihomi, Tanaka Tomohiro, Shimajiri Yoshito, Sugitani Kouji, Kawabe Ryohei, “Dense Clumps and Candidates for Molecular Outflows in W40”, *The Astrophysical Journal*, Vol 806, id. 201, 19 pp., 2015 [査読有り]

Shimajiri Y., Kitamura Y., Nakamura F., Momose M., Saito M., Tsukagoshi T., Hiramatsu M., Shimoikura T., Dobashi K., Hara C., Kawabe R., “Catalog of Dense Cores in the Orion A Giant Molecular Cloud”, *The Astrophysical Journal Supplement*, Vol 217, id. 7, 28 pp., 2015 [査読有り]

Matsumoto Tomoaki, Dobashi Kazuhito, and Shimoikura Tomomi, “Star Formation in Turbulent Molecular Clouds with Colliding Flow”, *The Astrophysical Journal*, Vol 801, id. 77, 21 pp., 2015 [査読有り]

Atsushi Nishimura, Kazuki Tokuda, Kimihiro Kimura, Kazuyuki Muraoka, Hiroyuki Maezawa, Hideo Ogawa, Kazuhiro Dobashi, Tomomi Shimoikura, Akira Mizuno, Yasuo Fukui, Toshikazu Onishi, “Revealing the Physical Properties of Molecular Gas in Orion with a Large-scale Survey in J = 2-1 Lines of ^{12}CO , ^{13}CO , and C^{18}O ”, *The Astrophysical Journal Supplement*, Vol 216, id. 18, 24 pp., 2015 [査読有り]

Kazuhiro Dobashi, Tomoaki Matsumoto, Tomomi Shimoikura, Hiro Saito, Ko Akisato, Kenjiro Ohashi, Keisuke Nakagomi, “Colliding Filaments and a Massive Dense Core in the Cygnus OB 7 Molecular Cloud”, *The Astrophysical Journal*, Vol 797, id. 58, 22 pp., 2014 [査読有り]

Fumitaka Nakamura, Koji Sugitani, Tomohiro Tanaka, Hiroyuki Nishitani, Kazuhiro Dobashi, Tomomi Shimoikura, Yoshito Shimajiri, Ryohei Kawabe, Yoshinori Yonekura, Izumi Mizuno, Kimihiko Kimura, Kazuki Tokuda, Minato Kozu, Nozomi Okada, Yutaka Hasegawa, Hideo Ogawa, Seiji Kamen, Hiroko Shinnaga, Munetake Momose, Taku Nakajima, Toshikazu Onishi, Hiroyuki Maezawa, Tomoya Hirota, Shuro Takano,

Daisuke Iono, Nario Kuno, Satoshi Yamamoto, “Cluster Formation Triggered by Filament Collisions in Serpens South”, *The Astrophysical Journal Letters*, Vol 791, id. L23, 5 pp., 2014 [査読有り]

〔学会発表〕(計 29 件)

土橋一仁、下井倉ともみ、中村文隆、廣田朋也、松本倫明、「星団を形成するクランプの回転を伴う収縮運動」、日本天文学会春季年会、2018

下井倉ともみ、土橋一仁、中村文隆、廣田朋也、松本倫明、「星団を形成するクランプの統計的研究」、日本天文学会春季年会、2018

下井倉ともみ、土橋一仁、中村文隆、「星形成レガシープロジェクト III W40 と Serpens South 領域の C^{18}O 分子輝線観測」、日本天文学会春季年会、2018

Kotomi Taniguchi, Masao Saito, Yusuke Miyamoto, Tomomi Shimoikura, Kazuhiro Dobashi, Tomoya Hirota, Fumitaka Nakamura, Hiroyuki Ozeki, Tetsuhiro Minamidani, Hiroyuki Kaneko, “Long cyanopolyynes at the G28.28-0.36 hot core”, 日本天文学会春季年会、2018

広瀬亜紗、土橋一仁、下井倉ともみ、西浦慎悟、「 N_2H^+ 分子輝線の解析の学部生向け教材の開発」、日本天文学会秋季年会、2017

Kotomi Taniguchi, Masao Saito, Tomoya Hirota, Fumitaka Nakamura, Hiroyuki Ozeki, Yusuke Miyamoto, Hiroyuki Kaneko, Tetsuhiro Minamidani, Kazuhiro Dobashi, Tomomi Shimoikura, “Possibility of chemical differentiation among high-mass star-forming cores”, 日本天文学会秋季年会、2017

中村文隆、亀野誠二、水野いづみ、土橋一仁、下井倉ともみ、谷口琴美、「直線偏光観測とゼーマン観測を連携させた TMC-1 コアの磁場強度の見積もり」、日本天文学会秋季年会、2017

土橋一仁、下井倉ともみ、平原純一、谷口琴美、水野いづみ、亀野誠二、中村文隆、「 $\text{HC}_3\text{N} \cdot \text{CCS}$ 分子輝線を利用した TMC-1 の視線方向の構造解析」、日本天文学会秋季年会、2017

広瀬亜紗、土橋一仁、下井倉ともみ、中村文隆、「星形成レガシープロジェクト M17 SWex 領域の分子雲コアサーベイ」、日

本天文学会秋季年会、2017

大西利和、長谷川豊、徳田一起、原田遼平、森岡祐貴、高橋諒、井上将徳、高田勝太、本間愛彩、黒田麻友、上田翔汰、阿部安宏、木村公洋、村岡和幸、前澤裕之、小川英夫、西村淳、土橋一仁、下井倉ともみ、「1.85m 電波望遠鏡プロジェクトの開発進捗 (IX)」、日本天文学会秋季年会、2016

齋藤弘雄、土橋一仁、齋藤正雄、「W3 Main における分子ガス構造と星団形成との関係の解明 2」、日本天文学会秋季年会、2016

下井倉ともみ、土橋一仁、「教員志望学生を対象にした天体望遠鏡実習の授業実践とその効果」、日本天文学会秋季年会、2016

村田泰宏、坪井昌人、竹内 央、望月奈々子、中島潔、山本善一、上原顕太、石川 聡一、河野裕介、小山友明、金口政弘、鈴木駿策、中西裕之、齋田智恵、藏原昂平、土橋一仁、下井倉ともみ、春日隆、藤沢健太、「臼田 64m 等の衛星・探査機用アンテナを利用した電波天文観測のシステムと今後の方向性について」、日本天文学会春季年会、2016

土橋一仁、下井倉ともみ、松本倫明、中村文隆、「クラスターを形成するクランプの回転+インフォール運動のモデル化」、日本天文学会春季年会、2016

下井倉ともみ、土橋一仁、松本倫明、中村文隆、「星団を形成するクランプの力学的進化」、日本天文学会春季年会、2016

中村文隆、下井倉ともみ、土橋一仁、Quang Nguyen Luong、Patricio Sanhueza、原千穂美、島尻芳人、「星形成レガシープロジェクト:Aquila Rift, Orion A, M17 領域の CO 分子雲カタログの作成」、日本天文学会春季年会、2016

土橋一仁、下井倉ともみ、亀野誠二、中村文隆、谷口琴美、「ゼーマン効果検出を念頭においた TMC-1 の CCS/H₃N の OTF 観測」、日本天文学会春季年会、2016

亀野誠二、中村文隆、土橋一仁、下井倉ともみ、谷口琴美、水野いづみ、「TMC-1 における CCS 分子輝線のゼーマン効果計測検証」、日本天文学会春季年会、2016

中村文隆、亀野誠二、土橋一仁、下井倉ともみ、谷口琴美、「磁場で支えられた分子雲コアの発見」、日本天文学会春季年会、2016

徳田一起、原田僚平、切通僚介、松本貴雄、森岡祐貴、長谷川豊、木村公洋、村岡和幸、前澤裕之、大西利和、小川英夫、秦野義子、下井倉ともみ、土橋一仁、西村淳、立原研悟、福井康雄、「大阪府立大学 1.85m 電波望遠鏡による銀河系内分子雲の広域観測:2014 年度進捗」、日本天文学会秋季年会、2015

②秦野義子、土橋一仁、下井倉ともみ、中村文隆、原千穂美、「星形成レガシープロジェクト:FOREST による W40 の ¹²CO・¹³CO 観測」、日本天文学会秋季年会、2015

②米谷夏樹、土橋一仁、下井倉ともみ、落合哲、米倉覚則、百瀬宗武、佐藤雄貴、中島拓、水野いづみ、岡田望、徳田一起、長谷川豊、阿部安宏、木村公洋、小川英夫、中村文隆、亀野誠二、新永浩子、久野成夫、高野秀路、伊王野大介、川辺良平、楠野こず枝、谷口琴美、「野辺山 45m 鏡搭載 Z45 受信機によるペルセウス座領域の CCS マッピング」、日本天文学会秋季年会、2014

②秦野義子、片倉翔、山日彬史、下井倉ともみ、土橋一仁、原千穂美、島尻芳人、西谷洋之、中村文隆、「星形成レガシープロジェクト V. W40 領域の分子分光観測」、日本天文学会秋季年会、2014

②山日彬史、片倉翔、秦野義子、下井倉ともみ、土橋一仁、原千穂美、島尻芳人、西谷洋之、中村文隆、「星形成レガシープロジェクト III. カリフォルニア分子雲の分子分光観測」、日本天文学会秋季年会、2014

②澤村将太郎、土橋一仁、下井倉ともみ、徳田一起、木村公洋、村岡和幸、前澤裕之、大西利和、小川英夫、西村淳、福井康雄、「1.85m 電波望遠鏡による銀河面分子雲の広域探査 IV」、日本天文学会秋季年会、2014

②片倉翔、山日彬史、秦野義子、下井倉ともみ、土橋一仁、田中智博、西谷洋之、島尻芳人、原千穂美、中村文隆、「星形成レガシープロジェクト IV. 大質量星形成領域 DR21 の分子輝線観測」、日本天文学会秋季年会、2014

②落合哲、土橋一仁、下井倉ともみ、米谷夏樹、米倉覚則、百瀬宗武、佐藤雄貴、中島拓、水野いづみ、岡田望、徳田一起、長谷川豊、阿部安宏、木村公洋、小川英夫、中村文隆、亀野誠二、新永浩子、久野成夫、高野秀路、伊王野大介、川辺良平、楠野こず枝、谷口琴美、「野辺山 45m 電波望遠鏡搭載 45 GHz 受信機 (Z45) の試験観測」、日本天文学会秋季年会、2014

⑳ 下井倉ともみ、土橋一仁、中村文隆、川邊良平、島尻芳人、西谷洋之、杉谷光司、原千穂美、田中智博、「W40 に付随する分子雲の $^{12}\text{CO}(J = 3 - 2)$ 及び $\text{HCO}^+(J = 4 - 3)$ 観測」、日本天文学会秋季年会、2014

㉑ 土橋一仁、下井倉ともみ、Deborah Paradis、Jean-Philippe Bernard、「おうし座分子雲に付随する冷たい HI ガスの定量」、日本天文学会秋季年会、2014

〔その他〕

ホームページ等

東京学芸大学天文学研究室

<http://darkclouds.u-gakugei.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

土橋 一仁 (DOBASHI, Kazuhito)

東京学芸大学・教育学部・教授

研究者番号：20237176

(2) 研究分担者

前澤 裕之 (MAEZAWA, Hiroyuki)

大阪府立大学・理学系研究科・准教授

研究者番号：00377780

(3) 研究分担者

松本 倫明 (MATSUMOTO, Tomoaki)

法政大学・人間環境学部・教授

研究者番号：60308004

(4) 研究分担者

村田 泰宏 (MURATA, Yasuhiro)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：70249936

(5) 研究分担者

中西 裕之 (NAKANISHI, Hiroyuki)

鹿児島大学・学術研究院理工学域理学

系・准教授

研究者番号：90419846

(6) 研究分担者

井上 剛志 (INOUE, Tsuyoshi)

名古屋大学・理学研究科・准教授

研究者番号：90531294