

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540277

研究課題名(和文) 星間乱流の起源の観測的研究

研究課題名(英文) Observational study of origin of the interstellar turbulence

研究代表者

立原 研悟 (Tachihara, Kengo)

名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70432565

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：分子雲境界部の12CO高分解能観測から、サイズ数千AUの分子雲微細構造を検出した。微細構造のスペクトル線幅は典型的に分子雲中で得られるものの半分以下であり、分子雲は均一なガスからなるのではなく、高温低密度に広がった媒質の中にある、低温高密度で熱平衡状態にある微細構造の集合体として存在することを示した。これは理論的二相媒質モデルでよく説明され、その成因として暖かい原子ガスの熱的不安定性が示唆された。これは原子ガスからの分子雲形成という、星間物理学の大きな問題の解決への糸口を示した物で、より高分解能観測の分子および原子ガスの観測的研究へと繋がり、今後のALMAなどでの観測が予定されている。

研究成果の概要(英文)：We discovered small-scale structures of molecular clouds by high-resolution 12CO observations. The small-scale structures have much smaller velocity dispersions of the spectra compared to typical ones observed in the middle of molecular clouds. These imply that molecular clouds are not uniform entities, but consist of cold and dense small-scale structures in the thermal equilibrium, as suggested by the theoretical two-phase medium model and thermal instability of the warm neutral medium. These results gave clues about molecular cloud formation, one of the biggest issues of the interstellar physics. The follow-up observations of molecular and atomic gas with high angular resolution by ALMA and others are scheduled to solve the problems.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：星間乱流 電波観測 星間磁場

1. 研究開始当初の背景

分子雲における星形成の有様は多様性に満ちており、様々なモードが見られることが知られている。例えば大質量星や星団が活発に形成されている分子雲もあれば、低質量星の形成のみしか見られないもの、さらには活発な星形成の兆候が見られないものなどである。星形成のモードや活発さは、銀河の進化を司る重要な因子であるにも関わらず、これらの多様性がどこからくるのかは大きな謎であった。これまでの高密度コアのサーベイ観測から、コア内部の速度分散が大きいものほど、星形成が不活発である傾向がえられた。このことから分子雲の乱流が重力収縮の妨げ、活発な星形成を阻害すること、また環境によって分子雲が初期に持つ乱流エネルギーが異なることが示唆された (Tachihara et al. 2000a; Tachihara et al. 2002)。しかし、星間乱流の起源は長い間謎とされ、星形成にいたる長いタイムスケールで乱流を維持できるメカニズムは解明されていなかった。

2. 研究の目的

上記の状況を打破する理論的モデルとして、星間物質の二相媒質乱流モデルが提唱された。これは星間ガスがこれまで考えられて来た一様な物ではなく、高温低密度なガス (WNM) と低温高密度なガス (CNM) からなるというもので、さらに WNM の熱的不安定性は星間雲に小さな構造を作り、それらの乱流的運動が星間ガスの超音速乱流として観測される、というものである (e.g., Koyama & Inutsuka 2002)。このモデルを観測的に検証し、星形成の活動性を司る星間乱流の起源を明らかにすることを目的に、観測とその結果の理論モデルとの比較研究を行った。

理論モデルでは WNM と CNM という 2 つの相が考えられているが、これらは中性水素ガスの観測から示された、ことなる温度の原子ガスとも対応する (Heiles 2001)。しかし実際には原子ガスから分子ガスへの相転移もおこるので、分子雲で観測される乱流の起源は原子ガス、中でも温度数百度以上の WNM からもたらされると考えるべきである。分子雲形成をも考慮に入れた原子ガスの振る舞いを調べることが、初期条件として乱流エネルギーをもった分子雲形成の理解にとって本質的である。このため本助成事業の後半には、原子ガスの性質と分子雲形成にまで研究目的を広げ、新たに公開された中性水素の観測データの解析も行い、原子/分子ガスの双方での微細構造や乱流運動の解明を目的として研究を進めた。

3. 研究の方法

(1) 理論的数値計算から予想される分子雲の微細構造を検出するため、高分解能の分子ガス観測を行うことにした。使用する望遠鏡は CO 1-0 輝線の観測で世界最高の分解能を有する国立天文台野辺山電波観測所の 45m 鏡を選んだ。45m 鏡は大きな集光力を持ち、小さな分子雲からの微弱な信号を検出する高い感度を有している。また分子雲の速度構造に注目するため、分光計を高い周波数分解能のモードに設定して観測した。

観測対象として選んだのは、分子雲と電離ガス (HII 領域) の接する境界面を選んだ。これは分子雲内部を観測すると、たとえ微細な構造が多数存在していたとしても、それらは視線方向に重なり合い、個々の構造を分解して検出することが困難になってしまうからである。またこの境界面では電離ショックによりガスが圧縮され、効率的に熱的不安定性が励起されることが期待される。そこで我々は、太陽系に最も近い O 型星である θ Oph 星の周囲に広がる HII 領域に接している、L204 分子雲の表面をターゲットに選んだ。この分子雲はこれまでの「なんてん」望遠鏡の観測から、紫外線と分子雲との相互作用がすでに知られていた領域でもある (Tachihara et al. 2000b)。

このように選んだ領域を、45m 鏡に搭載された BEARS マルチビーム受信器を用い、On-The-Fly mode で繰り返し観測し、高い S/N 比のデータを得た。望遠鏡のビームサイズはおよそ 2200 AU で、これまでに無い高分解能で分子ガスの分布を得ることができた。

(2) また、原子ガスの観測はこれまで、波長 21 cm の中性水素からの電波観測によるものが多かったが、波長が長いために大型望遠鏡でも高い空間分解能が得られず、原子ガスの小さな構造はあまり調べられてこなかった。近年、世界最大の単一鏡電波望遠鏡である Arecibo 300m 鏡のサーベイ観測データが公開され、分解能がこれまでの 30 分角程度から 4 分角に向上した。これにより、中性水素ガスの微細構造を調べることが可能となり、この Arecibo 望遠鏡のデータ解析を行い、分子雲との分布の比較や速度や空間構造を調べた。

4. 研究成果

(1) 45m 鏡による CO 輝線の観測から、紫外線に照らされた分子雲表面で、複雑で微小な空間・速度構造が得られた (図 1)。サイズ数千 AU、0.05 太陽質量程度の小さな分子雲で、いくつかの連続した速度チャンネルにわたって検出されたが、各々の中心速度は異なっており、輝線強度を速度で積分するとこれらの小さな構造は見えなくなってしまう。分

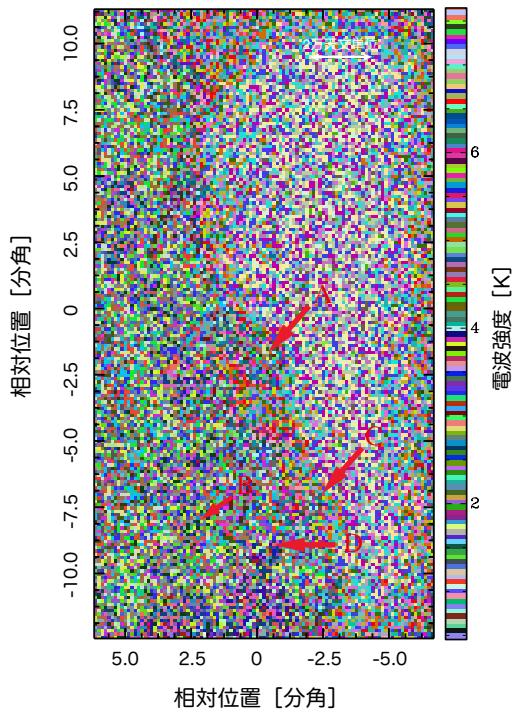


図1：CO輝線観測による分子雲表面で検出された微細構造。中央に見える塊Aの半径はおよそ6000 AU。矢印は図2に示したスペクトルが検出された位置を示す。

子雲表面では重なり効果の軽減でき、微細構造を初めて分離することができた。またこれらの小さな分子雲がもつ速度分散は小さく、わずか0.6 km/sであった。典型的な分子雲では1.2 km/s程度以上であり、超音速乱流の証拠とされていたが、実際には分子雲はこのような微細構造の集合体であり、これまでの観測がそれらを分解できていなかったことがわかった。

以上の結果はInoue & Inutsuka 2012など

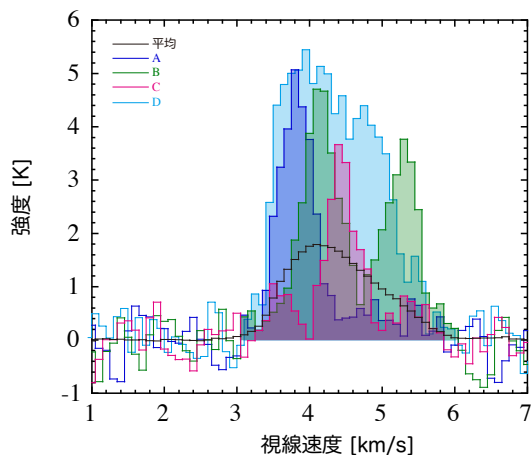


図2：上記図1の矢印の点におけるCOスペクトル。分子雲微細構造方向のA,B,C点では異なる速度成分に分解され、線幅は約0.6 km/s程度であった。一方点Dでは多くの速度成分が混ざり、線幅は大きい。実線は全領域の平均スペクトルを示す。

の理論モデルと調和的である。星間乱流が星間物質の熱的不安定性によって駆動され、WNMとCNMからなる二相媒質によって長時間維持されることが示され、Tachihara et al. 2012としてApJ誌に論文が発表された。さらに小さな、数百AU以下の構造とそれらのサイズ分布、速度分散などを調べるため、ALMAに観測提案を出し、受理された。観測は2014年度中には行われる予定である。

(2) 一方理論モデルの予想から、星間物質の乱流エネルギーの起源は、希薄に広がるWNMの熱的エネルギーにあり、WNMから微細構造をもつCNMの形成、さらには原子ガスのCNMからの分子ガス形成を理解する必要がある。そこでArecibo 300m望遠鏡のアーカイブデータを解析し、分子ガスとの比較を行った。対象は質の良いデータのそろっている高銀緯分子雲、MBM 53-55領域を選んだ。フィラメント状のCOガスの分布がYamamoto et al. 2003で示されているが、HIガスはその周囲にも広く分布している。速度チャンネルごとの分布を見ると、密度の高いCOガスの周囲に、フィラメントないしはクランプ状の水素原子ガスの構造が確認できる(図3)。また大きなスケールでの速度勾配も見られ、これは理論計算で設定されているcolliding flowと同様な状況と考えられる。その衝突面では熱的不安定性によって、フィラメントないしはクランプ状の複雑な構造が形成されたと考えられる。

特にHIのスペクトルを詳細に調べると、CO輝線で見られた物と同様、複数の速度成分に分解されることがわかった。スペクトルを複数のガウシアン分布に分解して調べると、速度分散が数km/s程度と小さな数個の成分

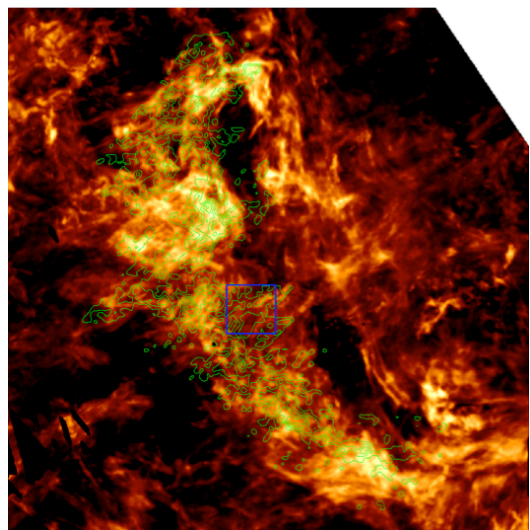


図3：MBM 33-35周囲15度四方の領域における、Arecibo 300m鏡によるHIガスの観測。とある速度チャンネルの強度分布をカラーで、緑のコントラストはCOガスの分布を示す。青い四角は図4でスペクトルの分解し、各コンポーネントの分布を調べた場所。

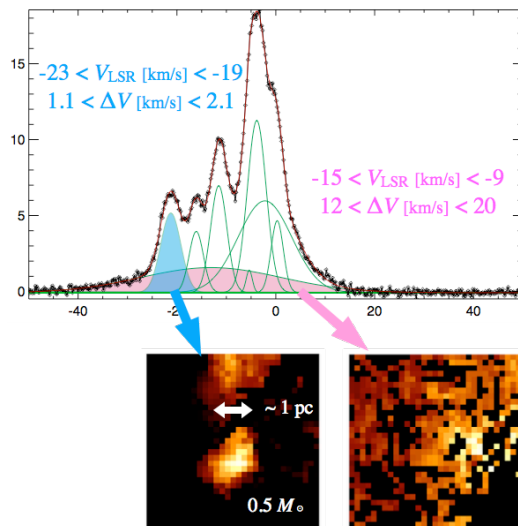


図4：複数の成分に分解されたHIの輝線スペクトル。下段は、青と赤で示された速度分散の小さな成分と大きなもの、2つの成分の分布を示す。

と、15 km/s 程度以上の成分に分けることができた。これらはそれぞれ CNM と WNM に対応すると考えられるが、CNM の複数成分のうち CO の検出された物はその一部のみであった。また特に良く分離される線幅の小さな成分の空間分布を調べたところ、サイズ 1 pc 以下の塊状に分布する、0.5 太陽質量程度の小さな原子ガスの雲が同定された。一方線幅の大きな成分は広く至る所に分布し、目立った構造が見られなかった。これらはそれぞれ二相媒質の CNM と WNM に対応するものと考えられる。またごく最近の Planck 衛星との比較研究から、相当な割合の原子ガスの温度は比較的低温 ($T < 70$ K) で、光学的に厚いことが分かって来た (Fukui et al. 2014)。分子ガス形成は CNM の内部で進むので、このような、小さく低温の原子ガス塊の内部は分子雲形成の有力な現場であることが分かった。

現在はさらの原子ガスの進化や、低温になった水素原子ガスがダスト表面に吸着し、水素分子が形成される過程を、理論研究者や実験物理学者と共同で研究を進めている。星間乱流の起源の研究から、星間ガスの相転移や分子雲形成といった、宇宙物理学の本質的問題を理解する研究に行き着いた。今後予定されている ALMA での観測や、将来の SKA 計画への参加などの共同研究も始まり、新たな展開へと発展するものである。

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 11 件)

Muller, E., Mizuno, N., Minamidani, T., Kawamura, A., Rosie Chen, C.H., Indebetouw, R., Enokiya, R., Fukui, Y., Gordon, K.,

Hayakawa, T., Mizuno, Y., Murai, M., Okuda, T., Onishi, T., Tachihara, K., Takekoshi, T., Yamamoto, H., & Yoshiike, S., Unusually bright $^{12}\text{CO}(3-2)$ condensations in the tidally perturbed Small Magellanic Cloud "tail", Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 66, 2014, pp. 4- DOI:10.1093/pasj/pst006

Sano, H., Fukuda, T., Yoshiike, S., Sato, J., Horachi, H., Kuwahara, T., Torii, K., Hayakawa, T., Tanaka, T., Matsumoto, H., Inoue, T., Yamazaki, R., Inutsuka, S., Kawamura, A., Yamamoto, H., Okuda, T., Tachihara, K., Mizuno, N., Onishi, T., Mizuno, A., Acero, F., & Fukui, Y., A detailed study of non-thermal X-ray properties and interstellar gas toward the gamma-ray supernova remnant RX J1713.7-3946, The Astrophysical Journal, 査読有, 2014, in press

Sano, H., Tanaka, T., Torii, K., Fukuda, T., Yoshiike, S., Sato, J., Horachi, H., Kuwahara, T., Hayakawa, T., Matsumoto, H., Inoue, T., Yamazaki, R., Inutsuka, S., Kawamura, A., Tachihara, K., Yamamoto, H., Okuda, T., Mizuno, N., Onishi, T., Mizuno, A., & Fukui, Y., Non-thermal X-Rays and Interstellar Gas Toward the gamma-Ray Supernova Remnant RX J1713.7-3946: Evidence for X-Ray Enhancement around CO and H I Clumps, The Astrophysical Journal, 査読有, 778, 2013, pp. 59 DOI:10.1088/0004-637X/778/1/59

de Gregorio-Monsalvo, I., Ménard, F., Dent, W., Pinte, C., López, C., Klaassen, P., Hales, A., Cortés, P., Rawlings, M. G., Tachihara, K., Testi, L., Takahashi, S., Chapillon, E., Mathews, G., Juhasz, A., Akiyama, E., Higuchi, A. E., Saito, M., Nyman, L. A., Phillips, N., Rodón, J., Corder, S., & Van Kempen, T., Unveiling the gas-and-dust disk structure in HD 163296 using ALMA observations, Astronomy and Astrophysics, 査読有, 557, 2013, pp. A133- DOI:10.1051/0004-6361/201321603

Maciejewski, G., Dimitrov, D., Seeliger, M., Raetz, S., Bukowiecki, L. and 36 coauthors including Tachihara, K. (34 番目), Multi-site campaign for transit timing variations of WASP-12 b: possible detection of a long-period signal of planetary origin, Astronomy and Astrophysics, 査読有, 551, 2013, pp. A108 DOI:10.1051/0004-6361/201220739

Espada, D., Komugi, S., Muller, E.,

Nakanishi, K., Saito, M., Tatematsu, K., Iguchi, S., Hasegawa, T., Mizuno, N., Iono, D., Matsushita, S., Trejo, A., Chapillon, E., Takahashi, S., Su, Y. N., Kawamura, A., Akiyama, E., Hiramatsu, M., Nagai, H., Miura, R. E., Kurono, Y., Sawada, T., Higuchi, A. E., Tachihara, K., Saigo, K., & Kamazaki, T., Giant Molecular Clouds and Star Formation in the Tidal Molecular Arm of NGC 4039, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 760, 2012, pp.L25
DOI:10.1088/2041-8205/760/2/L25

Tachihara, K., Saigo, K., Higuchi, A. E., Inoue, T., Inutsuka, S.-i., Hackstein, M., Haas, M., & Mugrauer, M., Toward Understanding the Origin of Turbulence in Molecular Clouds: Small-scale Structures as Units of Dynamical Multi-phase Interstellar Medium, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 754, 2012, pp.95
DOI:10.1088/0004-637X/754/2/95

Pineda, J. E., Maury, A. J., Fuller, G. A., Testi, L., Garcia-Appadoo, D., Peck, A. B., Villard, E., Corder, S. A., van Kempen, T. A., Turner, J. L., Tachihara, K., & Dent, W., The first ALMA view of IRAS 16293-2422. Direct detection of infall onto source B and high-resolution kinematics of source A, *Astronomy and Astrophysics*, 査読有, 544, 2012, pp.L7
DOI:10.1051/0004-6361/201219589

Nakamura, F., Kamada, Y., Kamazaki, T., Kawabe, R., Kitamura, Y., Shimajiri, Y., Tsukagoshi, T., Tachihara, K., Akashi, T., Azegami, K., Ikeda, N., Kurono, Y., Li, Z.-Y., Miura, T., Nishi, R., & Umemoto, T., Erratum: 'The Molecular Outflows in the rho Ophiuchi Main Cloud: Implications for Turbulence Generation', *The Astrophysical Journal*, 査読有, 750, 2012, pp.174- DOI:10.1088/0004-637X/750/2/174

Tachihara, K., Saigo, K., Higuchi, A., Inoue, T., & Inutsuka, S., Small Scale Structures as Units of Dynamical Multi-Phase Interstellar Medium, *American Astronomical Society Meeting Abstracts #219*, 査読無, 219, 2012, pp.#444.19- DOI:

Neuhäuser, R., Errmann, R., Berndt, A., Maciejewski, G., Takahashi, H., and 78 coauthors including Tachihara, K. (26 番目), The Young Exoplanet Transit Initiative (YETI), *Astronomische Nachrichten*, 査読有, 332, 2011, pp.547- DOI:10.1002/asna.201111573

[学会発表] (計 12 件)

Tachihara, K., The NANTEN CO survey and SKA, SKA (Square Kilometer Array) Science Workshop in East Asia, Nagoya University, 2013/06/05

立原研悟, TW Hya 周囲の原始惑星系円盤の ALMA Science Verification 観測, 日本天文学会秋季年回, 東北大学, 2013/9/11

Tachihara, K., Understanding of Gas and Dust Properties in the Interstellar Medium from the Planck All-sky Survey, *The Life Cycle of Dust in the Universe: Observations, Theory, and Laboratory Experiments*, Taipei, 2013/11/18-22

Tachihara, K., Formation of molecular clouds and the origin of the interstellar turbulence, Birth and death of high-mass stars: Lesson on newly explored phases of the interstellar medium, Nagoya University, 2014/1/8-11

Tachihara, K., Driving the interstellar turbulence and the initial conditions of molecular clouds, *The Impact of Galactic Structure on Star Formation*, Hokkaido University, 2014/2/17-21

立原研悟, Planck 衛星のサーベイデータと星間ガスの比較解析 4:HI 雲の速度構造, 日本天文学会春季年回, 国際基督教大学, 2014/3/19-22

Tachihara, K., The Origin of the interstellar turbulence and small scale structures of molecular clouds, *New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era*, ザ・プリンス箱根, 2012/12/3-8

Tachihara, K., Looking into the inner disk of TW Hya, *The First Year of ALMA Science*, Puerto Varas, Chile, 2012/12/12-15

Tachihara, K., Small Scale Structures as Units of Dynamical Multi-phase Interstellar Medium, *American Astronomical Society meeting #219*, Austin, TX, USA, 2012/1/12

[図書] (計 2 件)

Tachihara, K., *The Origin of the Interstellar Turbulence and Small Scale Structures of Molecular Clouds*, ASP Conference Series 476 巻, 2013, 111

Mauersberger, R., Villard, E., Peck, A. B.,
Asayama, S., Barkats, D., Calisse, P.,
Corder, S., Cortes, J., Cortes, P., de
Gregorio, I., Dent, W. R. F., Fomalont, E.,
Fulla, D., Garcia-Appadoo, D., Gunawan, D.,
Hales, A., Hills, R. E., Kamazaki, T., Knee,
L., Kneissl, R., Komugi, S., Leon, S.,
Lucas, R., Lundgren, A., Marconi, G.,
Matsushita, S., Planesas, P., Rawlings, M.,
Richards, A., Sawada, T., Simon, R.,
Tachihara, K., van Kempen, T., & Wiklind,
T., Commissioning and Science
Verification of ALMA, IAU Symposium, 280,
2011, pp.402P

6. 研究組織

(1) 研究代表者

立原 研悟 (TACHIHARA Kengo)

名古屋大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：70432565