

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和2年5月11日現在

機関番号：13901

研究種目：特別推進研究

研究期間：2015～2019

課題番号：15H05694

研究課題名(和文) 星間水素の精密定量による新たな星間物質像の構築

研究課題名(英文) Innovation of the “Interstellar medium” by accurate measurements of the interstellar hydrogen

研究代表者

福井 康雄 (FUKUI, Yasuo)

名古屋大学・理学研究科・特任教授

研究者番号：30135298

交付決定額(研究期間全体)(直接経費)：424,200,000円

研究成果の概要(和文)：星間水素の挙動を詳細に解析し、新たな星間物質像を構築し、銀河進化研究に新局面を拓く成果をあげた。主な観測・理論解析の成果は以下にまとめられる。1) 星間水素原子は粒状に分布する低温相と広く分布する高温相とからなる。低温相は水素分子雲を形成し分子雲への転移を担う。2) 水素分子の紫外線観測が不可能であるために、分子雲形成を直接観測することはできないが、理論モデルとの比較によって兆候を抑え、形成途上の星間雲を特定した。3) COとCI(中性炭素原子)の比較観測が中性水素全体の挙動の解明に有効であることを示した。4) 水素を定量する新手法を開発し、精度良く水素原子柱密度を導出した。この際、 γ 線、ダスト放射との比較を併用し、ダストが水素ガス密度によって成長していることを見出した。5) 4)と並行して、星間雲中の重元素量の高精度定量を可能にし、銀河系をとりまく高中速度雲の多くが10%程度の低重元素を持つことを明らかにした。6) マゼラン雲、M33、アンテナ銀河等において、大規模星団形成が水素原子雲および分子雲同士の衝突によって形成されていることを発見した。さらに、7) 超新星残骸RXJ1713.7-3946において新たなガンマ線解析を行い、陽子起源ガンマ線の存在を立証した。8) 広域分子雲観測装置NASCOの開発を行い、所期の性能を実証して広域観測の基盤を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義：星間水素は宇宙を構成する最も基本的な物質のひとつであり、その物理的理解は重要である。本研究は、従来にない視点から星間水素の存在形態、物理的・化学的性質、ダスト進化、重元素の定量、球状星団の起源、さらに超新星残骸における宇宙線加速の実証という基本問題を、次々に解明して画期的な成果をあげた。その学術的意義は極めて高い。

研究成果の概要(英文)：In order to better understand a role of the interstellar hydrogen and its phase transition, we carried out a comprehensive study of the interstellar hydrogen based on observations and theoretical studies. The observational data were taken with NANTEN2, ALMA, ASKAP, *Planck*, *Fermi*, etc. by covering a wide range of wavelength, and the theoretical studies were based on the magneto hydrodynamical simulations of the interstellar hydrogen. Major results of the research are as follows. We revealed that the HI distribution is highly clumpy with dense HI clumps and that the H₂ formation takes place in the clumps at sub-pc scales simultaneously with the CO formation. The CO/H₂ clouds under formation have been identified in Pegasus etc. over a large scale and also with ALMA at very high resolution. In nearby galaxies, we discovered that HI colliding flows trigger the formation of young massive stellar clusters in R136 etc. and opened a new window toward understanding the formation of the ancient globular clusters. We also established the cosmic ray acceleration in the Galactic SNR RXJ1713.7-3946 through a comparison of the new HESS gamma ray data with the hydrogen distribution.

研究分野：天文学

キーワード：星間水素、分子雲形成、星間ダスト、ガンマ線、バリオン、NANTEN2

1. 研究開始当初の背景

星間水素原子は波長 21cm スペクトルで観測されてきたが、通常光学的に薄いとして定量されていた。福井らはこの仮定に問題があることに気づき、光学的厚みが大きい場合がむしろ支配的であることを示して、星間水素ガスの描像を革新することの重要性を 2015 年に指摘し、本研究を開始した。これは、星間ガスの精密な定量の可能性を拓き、同時に重元素量、ダスト量の精密な定量にもつながる。さらに、原子から分子への転移の詳細も解明することにつながり、星形成の条件の理解にも新たな途を拓くことが期待される。また、その成果は宇宙線の起源、銀河進化の解明にも大きく資するものと予想される。

2. 研究の目的

中性水素の物理的・化学的性質を解明し、宇宙における水素の役割を明らかにし、銀河進化を解明する。特に、水素 21cm 輝線の物理的意味を明らかにし、水素分子形成の条件を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

NANTEN2、ALMA 等の CO・C I 観測、GASKAP 等の H I 観測、プランクによるダスト放射、フェルミ等によるガンマ線観測、さらに磁気流体力学的数値計算を駆使して研究を推進する。

4. 研究成果

(1) 星間水素ガスの分布、物理状態：理論研究を進展させ、星間水素ガスの空間分布と物理量の詳細を疑似観測によって明らかにした(Fukui et al. 2018)。この結果、低温成分が高度に粒状でその体積占有率が約 3% であり、高温成分が残りの大部分の体積を占めることを明らかにした(図 1)。従来の定量手法は電波連続波源の吸収を測定する方法であるが、これは電波源が点源であり個数も少ないために、体積のサンプル割合が極端に小さく一般性が大きく制約されるために、直ちに星間物質の描像を導くことはできない。そこで、本疑似観測から観測量の分布関数を求めて観測と比較し、新たな描像によって観測の傾向が矛盾なく説明できることを示した。この結果は、以下の(2)において炭素の挙動によって実証されている。

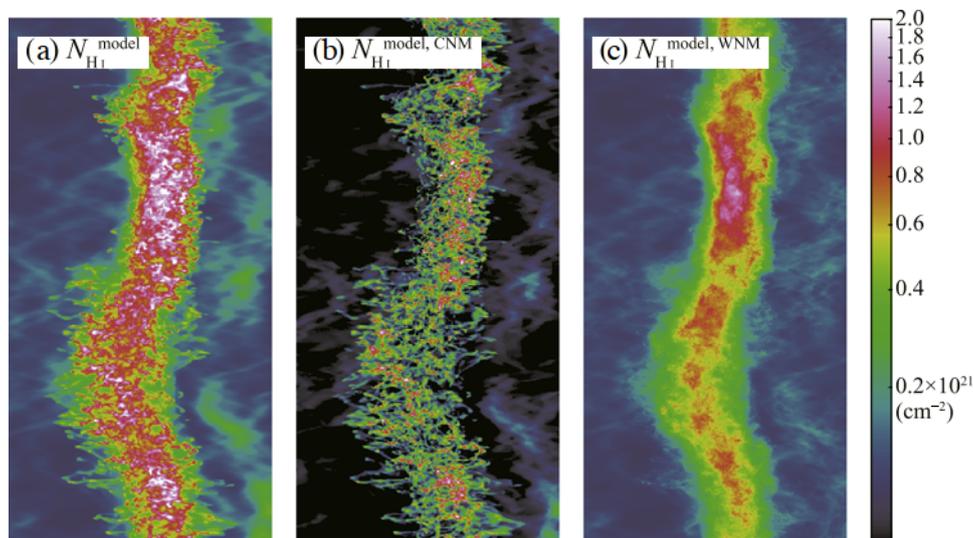


図 1 数値計算による、水素原子ガスの全て、低温成分(CNM)、高温成分(WNM)それぞれの柱密度の分布。図の左右から流れ込んだガスが中央部で衝突圧縮され、熱的不安定性により粒状の CNM が形成されている。(Fukui et al. 2018 より改変)

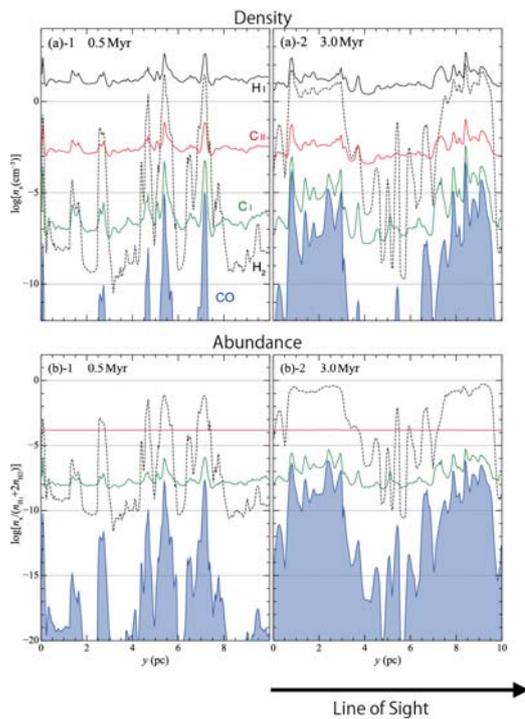


図2 数値計算による星間物質中の主な原子・分子種 (H I, H₂, C II, C I, CO) の密度 (上段) および全陽子数に対する存在比 (下段) の分布。横軸を擬似観測した視線方向にとった。衝突する中性原子ガスの時間進化を追い、計算開始から 50 万年後を左、300 万年後の結果を右図に示した。(Tachihara et al. submitted to ApJ より改変)

(2) 星間水素の原子-分子転移の検証 1: 「CO は H₂ のよいトレーサであるか否か」は、従来から重要な争点であった。(1)の計算を発展させて、粒状 H I 中での炭素原子(C I と C II)と一酸化炭素 CO の形成も含めることによって、水素原子・分子の定量法を検討した(Tachihara et al. submitted to ApJ 及び学会発表 5)。この結果、CO の存在量は水素分子によく追従し、CO は H₂ のよいトレーサであることを明確にした(図 2)。この結果を観測と綿密に比較することによって分子雲の観測的性質と比較検討し、ペガサス座領域等で形成途上の分子雲を特定した(図 3)。これらは粒状であり、豊富な原子ガスと共存するという特徴を示し、理論の予言する特徴をよく示す(図 4)。

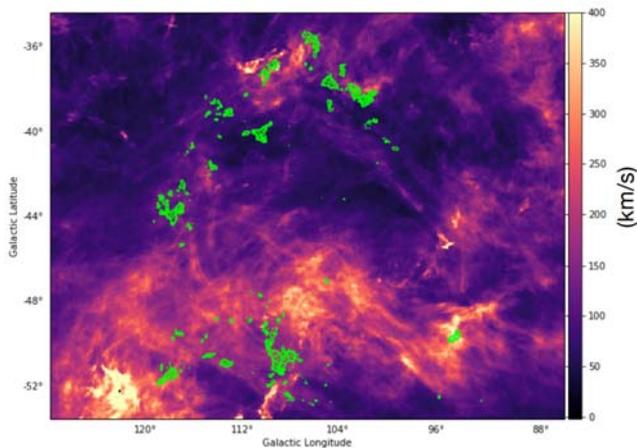


図3 ペガサス座領域における高銀緯分子雲(等高線)と、H I ガスの二次モーメント(イメージ)の分布。速度分散が比較的小さい領域で分子ガス形成が進んでいることがわかる。(Fukui et al. 2020 in prep.)

(3) 星間水素の原子-分子転移の検証 2: (2) の争点の背景として、「初期条件として高密度ガスを想定するか、それとも現実的な水素原子の割合が大きい低密度状態を仮定するか」が大きく結果を支配することを明らかにした。さらに理論計算の結果を、最近の ALMA による高分解能観測によって検証した(Tachihara et al. in prep. 及び学会発表 1)。これはサブミリ波で CO と C I を観測し、数百天文単位(AU)規模で CO の電波強度が大きく変動するのに対して C I は非常に一様に分布することを明らかにしたものであり、局部的に CO 組成比が大きく変動する一方、C I 組成比はゆるやかに変動することを初めて明らかにしたものである(図 5)。CO は H₂ によく追従して変動することから、CO の粒状性は H₂ の粒状性を反映し水素分子形成を示す結果である。

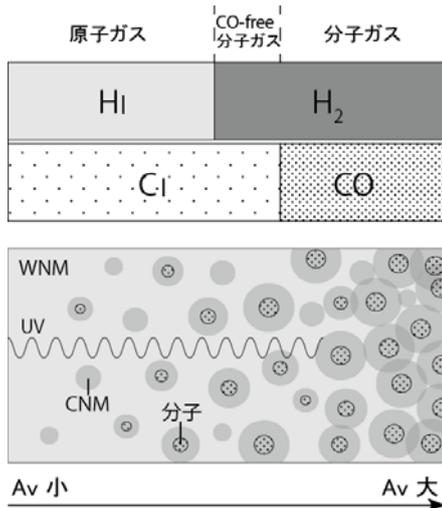


図 4 星間物質の原子と分子の分布モデル。横軸は減光量で、右に行くほど星間雲の高密度領域を示す。上段は従来から考えられてきた層状に分布するモデルで、外部からの紫外線放射にさらされた水素と炭素は、異なる領域において原子と分子の相転層を示す。下段は粒状の物質分布モデルで、分子ガスは小さな粒状に存在する低温原子ガス(CNM)の内部に存在している。

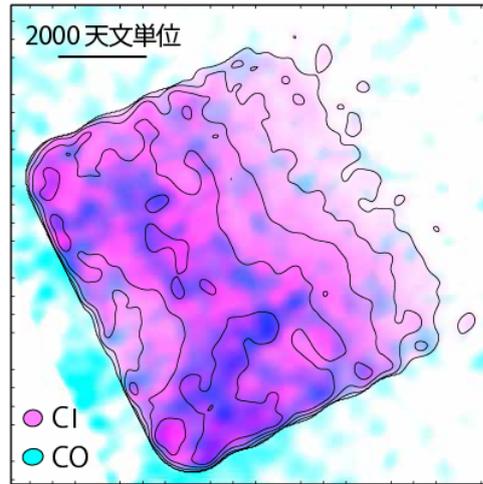


図 5 分子雲の縁において、ALMA 望遠鏡で観測された、CO (シアン) と CI (マゼンタ) の積分強度の分布。CI は数千 AU 程度のスケールで滑らかに分布しているのに対し、CO はその内部に、100 AU スケールの粒状構造で存在しており、局所的な CO 存在比の大きな変動を示している。2つのイメージは分解能をおよそ3秒角に揃え、それぞれ左下の楕円で示した。(Tachihara et al. in prep.)

(4) 星間水素雲におけるダスト進化の検証：新手法によって水素柱密度は精度良く導くことができる。ガンマ線・サブミリ波放射と水素柱密度の比較によって太陽系近傍のダスト量の分布を精度よく導き、同時にダストの断面積が水素原子柱密度の1.3乗で増加することを検証した(Okamoto et al. 2017; Hayashi et al. 2019 他)。これは、星間ダストが進化によって成長していることを示すものである。

(5) 星間水素雲における重元素量の定量：さらに、銀河系の周囲には水素原子ガスが取り巻いており、多くは銀河系に接近中であることが知られている。本研究の手法を用いて、精度よく前景の水素雲を定量し、系外のガスにおける重元素量をダスト放射によって高い精度で定量することに成功した。この結果、マゼラン雲方向の重元素量の変動を検出するなど、銀河系ハロー部分の水素ガスの相当部分が系外の低重元素ガスであることを示した。この種の研究は光学、紫外線域で背景とする点源の吸収によって行われていたが、新手法は連続的に広い体積をカバーできる点で優れている。

(6) 星間水素衝突流による銀河規模での星団形成：大小マゼラン雲は2億年前に近接遭遇したことが知られている。我々は、独自に開発した星間雲衝突を特定する新たな手法を駆使してマゼラン雲のHIデータを解析し、近接遭遇の際の潮汐力によって引き出されたガスが現在マゼラン雲に落下し、10万太陽質量の大星団の形成を誘起したことを発見した(Fukui et al. 2017 他)。これは、球状星団形成の解明につながる大きな成果である。この成果を受けて、大小マゼラン雲の全域、近傍銀河M33他についても同様の星団形成過程が起こっていることを明らかにしており、銀河間相互作用が星団形成を通して銀河進化に大きな影響を与えることを初めて実証した。

(7) 超新星残骸における宇宙線加速の検証：ガンマ線超新星残骸RXJ1713.7-3946においてHESSによる最新(2018年)のTeVガンマ線、NANTEN2/ATCAによる星間水素、そして、XMM NewtonによるX線の包括的な解析を実行し、ガンマ線は基本的に陽子起源であること、また約30%の電子起源成分が低密度部分で陽子起源成分と混在することを初めて明らかにした(Fukui et al. in prep.及び学会発表4)。この成果は、2003年に始まる福井らによる「陽子起源ガンマ線」の発見を深化発展させたものであり、宇宙線の超新星起源を立証した重要な成果である。

(8) 受信機開発と諸観測計画：NANTEN2 に本研究で開発した新受信機 NASCO を搭載し所期の性能を確認した。ただし、2020 年 2 月以降の不測事態等の影響を受けて計画が遅延したため観測時間が十分に確保できず、CO 観測データの取得は現時点で目標を下回った。昨年以前に取得した試験データ等も活用して必要な解析の一部は実行されており、上の成果につながっている(図 6)。今後、同受信機の活用によって当初目標の広域観測が遂行できる見通しである。ALMA による高分解能観測を実施し、ASKAP による HI データの取得も十分とは言えないがマゼラン雲の初期成果を活用して成果をあげた。

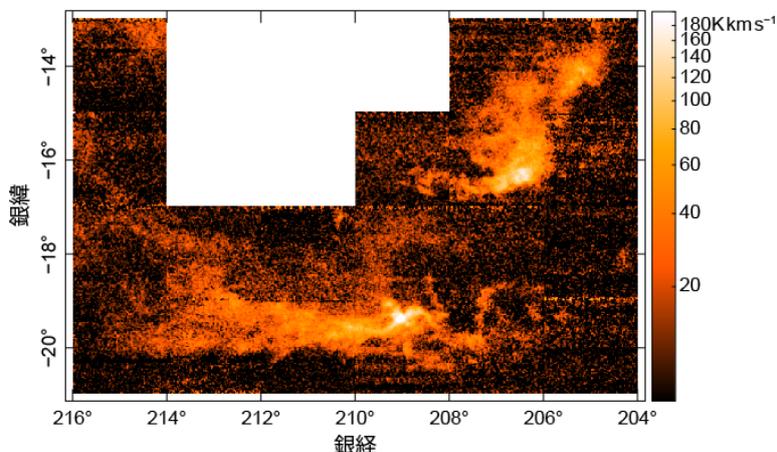


図 6 新受信機 NASCO の試験観測によって得られた、オリオン A 及びオリオン B 巨大分子雲の CO 積分強度図。本来の 1/4 程度の性能による試験的観測であるにも関わらず、わずか 4 日間の観測で取得され、NASCO 受信機の高いマッピング性能を示した。その後の調整により、現在は当初予定の 90%程度の性能まで引き上げられた。

<引用文献>

1. Fukui et al. 2017, PASJ 69, L5, DOI: 10.1093/pasj/psx032 (主要論文 2)
2. Fukui et al. 2018, ApJ 860, A33, DOI: 10.3847/1538-4357/aac16c (主要論文 1)
3. Hayashi et al. 2019, ApJ 878, A131, DOI: 10.3847/1538-4357/ab2051
4. Okamoto et al. 2017, ApJ 838, A132, DOI: 10.3847/1538-4357/aa6747 (主要論文 3)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 135 件)

- ① Fukui Y., Hayakawa T., Inoue T., Torii K., Okamoto R., Tachihara K., Onishi T., Hayashi K., “Synthetic Observations of 21 cm HI Line Profiles from Inhomogeneous Turbulent Interstellar HI Gas with Magnetic Fields”, ApJ, 査読有, vol. 860, 2018 年, article id 33, DOI: 10.3847/1538-4357/aac16c
- ② Fukui Y., Tsuge K., Sano H., Bekki K., Yozin C., Tachihara K., Inoue T., “Formation of the young massive cluster R136 triggered by tidally-driven colliding HI flows”, PASJ, 査読有, vol. 69, 2017 年, article id L5, DOI: 10.1093/pasj/psx032
- ③ Okamoto R., Yamamoto H., Tachihara K., Hayakawa T., Hayashi K., Fukui Y., “HI, CO, and Dust in the Perseus Cloud”, ApJ, 査読有, vol. 838, 2017 年, article id 132, DOI: 10.3847/1538-4357/aa6747

[学会発表] (計 315 件)

- ① 立原研悟、「ALMA 高分解能観測で見た分子雲の縁における CO/C I の構造」、日本天文学会 2020 年春季年会、2020 年
- ② 早川貴敬、「中間速度 HI 雲 IV Arch の重元素量」、日本天文学会 2020 年春季年会、2020 年
- ③ 木村公洋、「NANTEN2 マルチビーム受信機の開発および搭載試験の進捗報告」、日本天文学会 2019 年秋季年会、2019 年
- ④ Yasuo Fukui, “Cosmic-ray acceleration and star formation in the gamma ray SNR RXJ1713.7-3946”, Cosmic rays the salt of the star formation recipe, 2018 年
- ⑤ 立原研悟、「星間ガスの微細構造と原子・分子相転移と乱流の研究」、日本天文学会 2018 年春季年会、2018 年

[その他]

講演・メディア掲載情報等

<https://www.a.phys.nagoya-u.ac.jp/wordpress/yfukui/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：立原研悟
ローマ字氏名：(TACHIHARA, kengo)
所属研究機関名：名古屋大学
部局名：大学院理学研究科
職名：准教授
研究者番号 (8桁)：70432565

研究分担者氏名：山本宏昭
ローマ字氏名：(YAMAMOTO, hiroaki)
所属研究機関名：名古屋大学
部局名：大学院理学研究科
職名：助教
研究者番号 (8桁)：70444396

研究分担者氏名：佐野栄俊
ローマ字氏名：(SANO, hidetoshi)
所属研究機関名：名古屋大学
部局名：大学院理学研究科
職名：特任助教
研究者番号 (8桁)：50739472

研究分担者氏名：小川英夫
ローマ字氏名：(OGAWA, hideo)
所属研究機関名：大阪府立大学
部局名：理学系研究科
職名：客員教授
研究者番号 (8桁)：20022717

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：鳥居和史
ローマ字氏名：(TORII, kazufumi)

研究協力者氏名：早川貴敬
ローマ字氏名：(HAYAKAWA, takahiro)

研究協力者氏名：水野恒史
ローマ字氏名：(MIZUNO, tsunefumi)

研究協力者氏名：竹内努
ローマ字氏名：(TAKEUCHI, tsutomu)

研究協力者氏名：谷口義明
ローマ字氏名：(TANIGUCHI, yoshiaki)

研究協力者氏名：渡部直樹
ローマ字氏名：(WATANABE, naoki)

研究協力者氏名：井上剛志
ローマ字氏名：(INOUE, tsuyoshi)