

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287035

研究課題名(和文) 太陽系近傍領域の星間ガスの全容の解明

研究課題名(英文) Elucidation of whole picture of an interstellar gas near solar system

研究代表者

山本 宏昭 (YAMAMOTO, HIROAKI)

名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：70444396

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,800,000円

研究成果の概要(和文)：高銀緯領域(太陽系近傍領域)において、Planck衛星とIRAS衛星のデータから導出された低温ダストの光学的厚み及びダスト温度のパラメータと水素原子(HI)ガス、CO輝線強度のデータを比較した。この比較研究の結果から光学的に厚いHIガスが従来考えられていたよりも多量に存在し、MBM53, 54, 55などで分子雲の周囲にも広がって分布していることを明らかにした。このHIガスの光学的厚みは1-2程度、スピン温度は30K程度が多くの割合を占めている。近年注目されている原子、分子輝線では直接トレースできないDark gasはHIガスが光学的に厚いということを考慮することで説明可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：The comparative study among the optical depth and temperature of interstellar grain, and intensity of atomic hydrogen (HI) and carbon monoxide has been carried out toward the region at high galactic latitude (near solar system). It is found that an optically thick HI gas is more abundant than the gas previously thought and is extended around molecular clouds. The optical depth and spin temperature of 1-2 and ~30 K is dominant. Dark gas which is considered not to be able to trace by atomic or molecular line emission directory can be explained by the optically thick HI gas.

研究分野：電波天文学

キーワード：分子雲 太陽系近傍 ダークガス プランク

1. 研究開始当初の背景

Planck 衛星の高周波観測装置 (HFI, High Frequency Instruments, 80GHz から 1THz までをほぼくまなくカバー) によるミリ波・サブミリ波帯のかつてない高感度連続波全天観測により、銀河系内の低温ダストの分布、その性質の詳細が明らかになってきた (Planck early results: Ade et al. 2011 など)。このダストの性質と水素原子雲 (HI)、分子雲の観測結果を合わせることで、従来の観測では検知できない星間物質 (Dark gas) が多量にあることが示唆された (Ade et al. 2011)。またこの Dark Gas の存在はガンマ線放射の観測からも示唆されている (Grenier et al. 2005)。このような Dark gas の存在は数値シミュレーションによっても示唆されてきた (Wolfire et al. 2010,)。また、HFI で受信されるデータには星間雲で最も強度の強い分子輝線である一酸化炭素 (CO) からの放射が混入していることが明らかになっている (Planck early results, VI. Ade et al. 2011)。ここから CO 輝線以外の放射をモデル化し、CO 輝線の強度のみを取り出す作業もなされており、銀河系内の CO 輝線の分布についてもその詳細が明らかにされようとしていた。近年の多波長観測の進展により、HI、電波連続波、遠・中・近赤外線、可視、X 線、ガンマ線とほとんどの波長帯で全天の地図が作製されている中、分子雲だけが未だ全天をカバーしていない状況下において、この Planck の CO 輝線強度の地図作成は大きな期待がある。しかし、Planck の HFI の各バンドの帯域は ^{12}CO 輝線と ^{13}CO 輝線の周波数差よりも広いため、 ^{12}CO 輝線と ^{13}CO 輝線は同一のバンド内に混入する。このため、両輝線を足し合わせた強度しかわからない。また、連続波検出器のため、CO 輝線の速度情報はない。このため、研究開始当初は分子雲自体の性質を議論することも難しい状況であった。

本研究の準備段階として、Planck 衛星チームの関係者と共同で Planck 衛星によって取得された CO 地図と NANTEN2 望遠鏡によって取得された CO 地図との比較を一部の領域について行ってきた。平成 23 年 2 月に Planck 側研究者が 1 週間名古屋に滞在、研究代表者は平成 24 年 1 月に 1 週間フランスに滞在し、また適宜 E メールにて打合せ・議論・解析を実施し、本計画の準備をしてきた。平成 24 年 10 月 18-19 日には京都・名古屋にて打合せを実施し、本計画に備えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は高銀緯領域 (太陽系近傍領域) の星間ガスの全容を明らかにすることである。銀河の主要構成要素であるガスとダストの分布・量・性質を明らかにすることは銀河進化の議論につながる重要な課題である。

銀河進化を議論することはひいては宇宙の起源にもかかわる根源的な課題の 1 つである。本研究では高銀緯領域の銀河系内のガスの総量・分布を明らかにした上でその性質を解明することを目指す。近年注目されている Dark Gas についてもその示唆を与える。

3. 研究の方法

本研究を達成するにあたり、以下の研究を実施した。

1) NANTEN2 望遠鏡による CO (J=2-1) 輝線の観測および CO (J=1-0) 輝線データの解析

チリ・アタカマ高地に設置されている名古屋大学が所有する NANTEN2 ミリ波・サブミリ波望遠鏡を用いて高銀緯領域の一部の領域に対して ^{12}CO (J=2-1)、 ^{13}CO (J=2-1) 輝線の観測を、スキャン観測法 (OTF 法) により行う。これにより観測する領域の分子雲をくまなく検出する。観測は座標系に対して、X 方向と Y 方向を最低 1 回ずつ行い、basket-weaving 処理 (Emerson & Graeve 1988) を行い、スキャンノイズを軽減させる。

すでに NANTEN2 望遠鏡によって観測されている ^{12}CO (J=1-0) 輝線のデータの解析を行い、本研究に使用する。

2) 星間物質の定量

高銀緯領域にある有名天体をいくつか抽出し、Planck 衛星の HFI の 353GHz、545GHz、857GHz、IRAS100 μm のデータから導出された 353GHz のダストの光学的厚み (τ_{353})、温度 (T_d) 等の物理パラメータと HI、CO 輝線観測のデータとの比較を行う。HI のデータについては $-1^\circ < \text{赤緯} < +38^\circ$ については Arecibo 望遠鏡によって取得された GALFA-HI の narrow band のアーカイブデータ (Peek et al. 2011、空間分解能 4 分角、速度分解能 0.18 km s^{-1}) を、赤緯 $< +1^\circ$ については Parkes 望遠鏡によって取得された GASS II (Kalberla et al. 2010) または GASS III (Kalberla & Haud 2015) のアーカイブデータ (空間分解能 16 分角、速度分解能 0.82 km s^{-1}) を用いた。また、全天の解析を行う際には LAB のデータ (Kalberla et al. 2005、空間分解能 36 分角、速度分解能 1.0 km s^{-1}) を用いた。比較においては星間ガス (HI ガス+ H_2 ガス) の中で、 H_2 ガスの寄与を取り除くために、NANTEN2 望遠鏡で取得した ^{12}CO (J=1-0) 輝線のデータを元に、CO 輝線が有意に検出されている領域はマスクした。また、視線方向上で熱源が確認されている領域についてもマスクした。これによりガス成分は HI のみとし、ダストの量を反映する τ_{353} とダイレクトに比較することで HI ガスの定量を精度よく実施できるようにした。

4. 研究成果

NANTEN2 望遠鏡を用いて、MBM53、54 55 領

域、ペガサス座領域、銀緯-70度の領域を $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ 、 $^{13}\text{CO}(J=2-1)$ 輝線にて観測し、Planckとの比較可能なデータを取得した。

MBM53, 54, 55領域に対して τ_{353} とHIの積分強度(W_{HI})の比較を行った。HIについてはArecibo望遠鏡のアーカイブデータを使用した。図1は各点における τ_{353} と W_{HI} をプロットしたものである。図1(a)はすべての測定点を分類なしでプロットしたものである。データの分散が大きく、 τ_{353} と W_{HI} の関係性を見いだすことはできないが、このプロットをダストの温度ごとに色分けすることで(図1(b), (c))、ダスト温度の一番高い成分は分散が小さく直線に近い分布を示すことがわかった。ダスト温度が低くなるにつれて、分散が大きくなり、かつ直線的な分布は τ_{353} - W_{HI} 上でだんだん寝てくる(傾きが小さくなる)。ガス-ダスト比が一定である場合、 τ_{353} - W_{HI} 上ですべての測定点が1つの直線上に乗るはずであるが、比較結果の違いは T_d の違いで傾きが異なっている。これは W_{HI} および τ_{353} のどちらかが飽和していることを

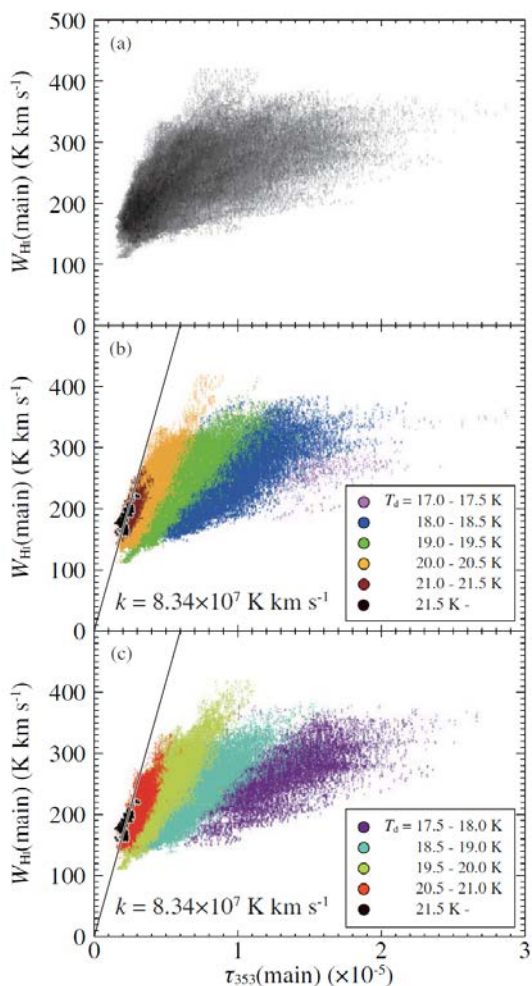


図1. MBM53, 54, 55領域の W_{HI} と τ_{353} の相関図。HIの積分範囲は-25から+12 km s^{-1} 。 (a)はすべての測定点、(b)と(c)はダスト温度 T_d ごとに色を変えて表示している。黒線はダスト温度が21.5 K以上のデータのみで原点を通る直線でフィットした結果。このときの傾きは k であり、値を図中に示す。

意味している。 τ_{353} は1よりも十分小さいため、 τ_{353} が飽和しているのではなく、 W_{HI} が飽和していると考えた。このとき、ダスト温度の一番高い成分は真にガスとダストの量をトレースしていると考えることができ、ダスト温度の低い成分についてはダスト温度が一番高い関係に合わせ W_{HI} の強度を補正することで飽和の問題を解決できる。また、この補正により、輻射輸送方程式、光学的厚みの式を連立させることでHIのspin温度(T_s)およびHIの光学的厚み(τ_{HI})を導出した。 T_s と τ_{HI} の分布を図2に示す。 τ_{HI} が1を越える光学的に厚いHIガスは分子雲の周囲にも広く分布していることを明らかにした。このことは光学に厚いHIガスが従来考えられていたよりも多く広がって存在していることを示す結果である。

図3は τ_{HI} 、 T_s 、本解析で導出した $N(\text{HI})$ の質量分布を示している。 τ_{HI} が1-2程度、 T_s が30K程度のHIガスが大部分を占めており、その $N(\text{HI})$ は 10^{21} cm^{-2} のオーダーである。HIガスの総量は従来のHIガスは光学的に薄いと仮定して求めた量よりも約1.8倍多くなった。またこれらの冷たいHIガスは平均密度が 100 cm^{-3} 程度と見積もられる。スペクトルの線幅が 15 km s^{-1} 程度であることから冷たいHIガスの動圧は H_2 ガスの動圧と同程度になり、冷たいHIガスが内部の H_2 ガス雲を安定的に閉じ込めておくことが可能になるこ

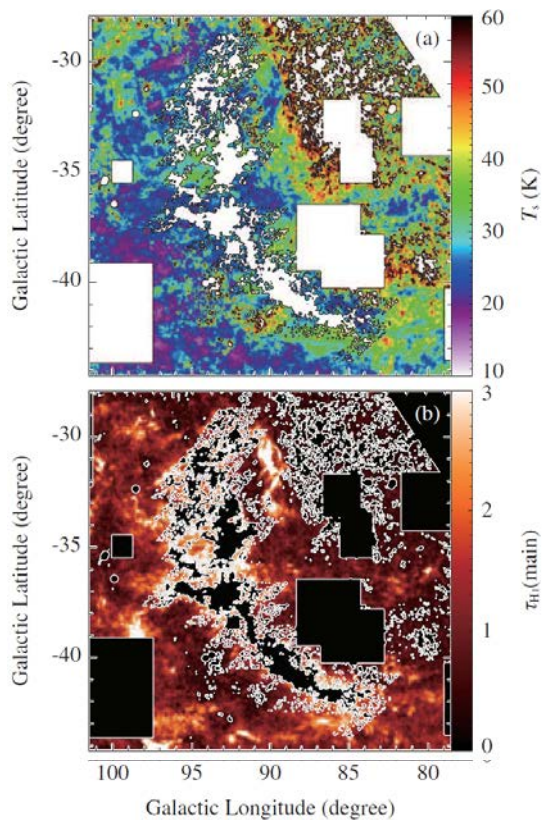
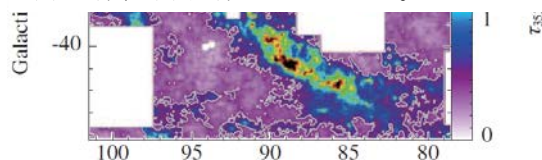


図2. MBM53, 54, 55領域の(a) T_s の分布と(b) τ_{HI} の空間分布図。図中(a)の白抜きの領域、および(b)の黒抜きの領域はマスクをした領域。解析領域とマスク領域の境界を(a)黒線、(b)白線で示している。



とを示唆した。

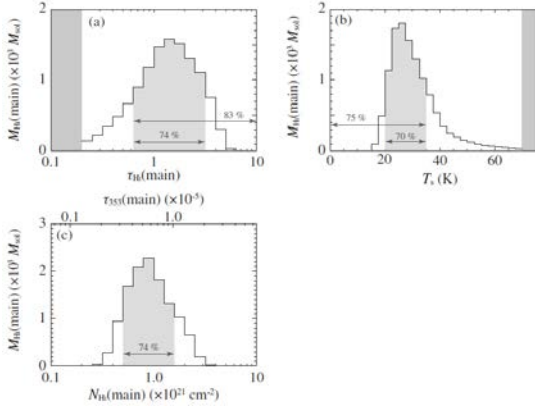


図 3. 周囲の HI ガスの (a) τ_{HI} に対する、(b) T_s に対する、(c) HI の柱密度に対する質量分布を示す。 $\tau_{\text{HI}} < 0.2$ および $T_s > 70$ K は精度がないため、マスクした。

CO 輝線が検出されている領域に対して、 τ_{353} との比較を行った (図 4)。CO 輝線強度が大きい領域では T_d が小さくなっており、密度が大きいために冷却がよく効いていることを示している。また、図 4(b)において、CO 輝線が検出されている領域の τ_{353} と CO の積分強度 (W_{CO}) の比較の結果を示す。ガスダスト比が一定であるとすると τ_{353} はガスの総量 (HI ガス+分子雲) をトレースする。一方で W_{CO} は分子雲の成分のみをトレースする。

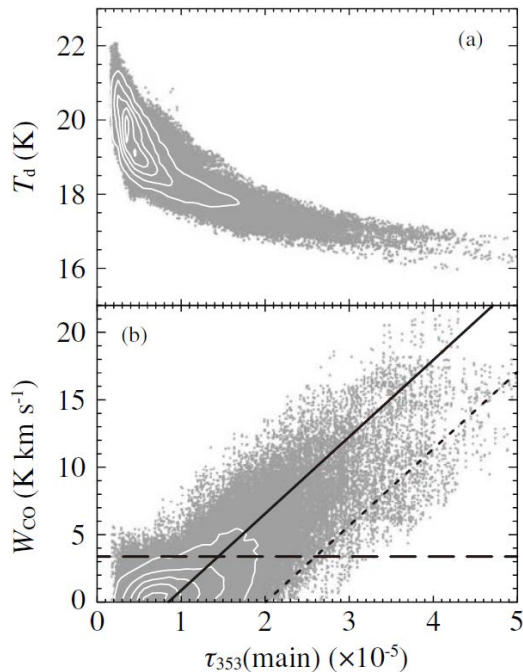


図 4. (a) 熱源でマスクした領域を除いた T_d と τ_{353} のプロット。コンタは図中のプロットの密度がピークの 90%、70%、50%、30%、10%を示す。(b) W_{CO} と τ_{353} のプロット。プロットの領域、コンタレベルは (a) と同じである。破線は W_{CO} が 3σ のレベルを示す。実線は W_{CO} が 3σ 以上のデータでフィットしたものの。

従って

$$N(\text{H}) = k \times X_{\text{HI}} \times \tau_{353} = a \times N(\text{HI}) + 2b \times N(\text{H}_2)$$

より

$$\tau_{353} = (2b \times X_{\text{CO}} / k \times X_{\text{HI}}) \times W_{\text{CO}} + (a / k \times X_{\text{HI}}) \times N(\text{HI})$$

となり、図 4(b)の直線の傾きから X_{CO} を導出することができる。フィットした結果は

$$\tau_{353}(\text{main}) = [(1.8 \pm 0.8) \times 10^{-6}] \times W_{\text{CO}} + [(8.4 \pm 5.0) \times 10^{-6}]$$

これより X_{CO} (CO の積分強度を $N(\text{H}_2)$ に変換する係数) は $1.3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2} (\text{K km s}^{-1})^{-1}$ と求められ、この結果は従来銀河系内で求められていた X_{CO} の半分程度の値である。これは従来考えられてなかった冷たい HI ガスの影響があるかもしれない、今後注意深く解析する必要がある。

これらの結果を論文にまとめ The Astrophysical Journal に出版した (Fukui et al. 2014: 5 の雑誌論文の②に相当)。

また、MBM 領域と同等の解析を全天の銀緯が ± 15 度以上の領域について 36 分角の分解能で行った。図 (5) は HI ガスの T_s 、 τ_{HI} 、 $N(\text{HI})$ の HI ガスの質量分布を示す。全天の解析においても光学的に厚い HI ガスは従来考えられていたよりも広く、多量に存在することを明らかにした。特に τ_{HI} が 1 程度、 T_s が 25K 程度の HI ガスの割合が多く、MBM 同様それらの $N(\text{HI})$ は $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ 程度である。図 6(a) は本解析で導出した $N(\text{HI})$ と従来の光学的に薄いと仮定して導出した $N(\text{HI})^*$ の比の空間分布を示す。図 6(b) は図 6(a) で示した比のヒストグラムである。典型的に $N(\text{HI})$ の補正量は 1.5-2 倍程度であり、領域によっては 3 倍に達するところもある。また、この空間分布は Grenier et al. (2005) において、ガンマ線観測より導出された Dark gas の分布とほぼ一致している。また、その量もほぼ一致していることから、Grenier et al. (2005) で導出された Dark gas は光学的に厚い HI で説明可能であることを示した。また、図 7 は τ_{353} と本解析で導出した $N(\text{HI})$ の関係を τ_{HI} 、 T_s 、 T_d で色分けしたプロットである。Ade et al.

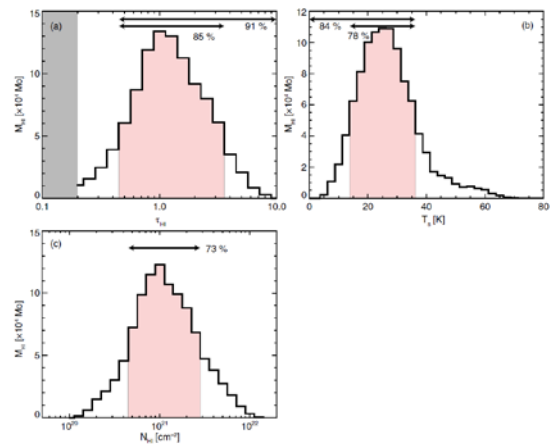


図 5. 全天の解析によって得られた (a) T_s 、(b) τ_{HI} 、(c) $N(\text{HI})$ の HI の質量分布を示す。(a) のグレーの領域は τ_{HI} の精度がない領域。各プロットのピンクの部分には全体の 70-80% のデータが含まれている。

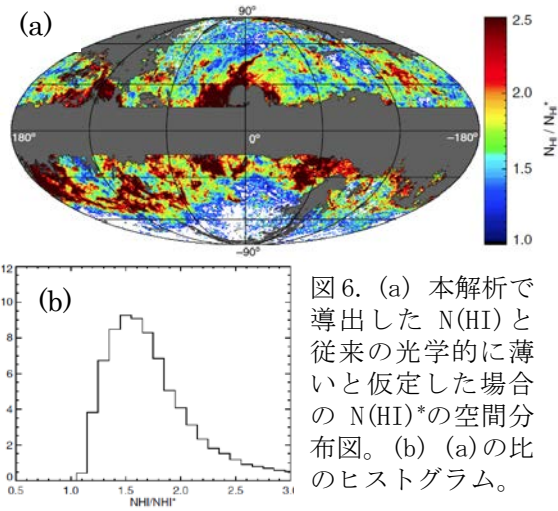


図6. (a) 本解析で導出した $N(\text{HI})$ と従来の光学的に薄いと仮定した場合の $N(\text{HI})^*$ の空間分布図。(b) (a) の比のヒストグラム。

(2011) で示された Dark gas についても図 7 より光学的に厚い HI ガスで説明可能である。Ade et al. (2011) において、プロットには幅があることが分かっているが、この幅は τ_{HI} が関係していることを明らかにした。

Roy et al. (2012) では、柱密度の大きいところでは τ_{1200} (1200GHz での光学的厚み) と $N(\text{H})$ は冪が 1.28 乗の指数関数でよく関係づけられると結論づけている。そこで、本解析においても τ_{353} と $N(\text{H})$ が冪 1.28 乗に比例するとして同様の解析を実施したところ、冪を 1.28 乗としても光学的に厚い HI が支配的であることを示した。

これらの結果を論文にまとめ The Astrophysical Journal に出版された (Fukui et al. 2015: 5 の雑誌論文の①に相当)。

同様の解析をペガサス座ループ、ペルセウス座領域、カメレオン領域、オリオン座領域、CrA 領域についても全天の解析よりもよい空間分解能 (5 分角または 16 分角) で行い、同様に光学的に厚い HI ガスが支配的である結果を得た。これらの結果から星間空間には従来考えられていたよりも多量の光学的に厚い HI ガスが存在することを明らかにした。さらに光学的に厚い HI ガスの検証、定量の精度

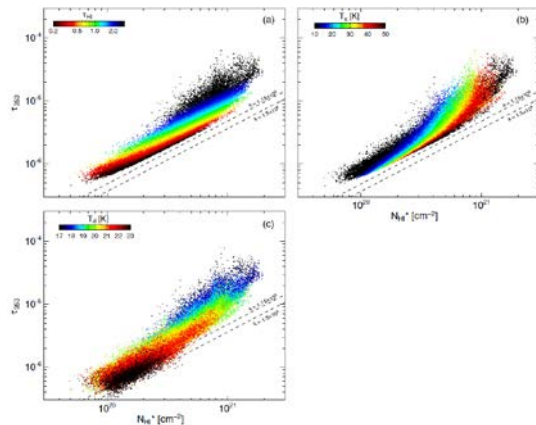


図7. 本解析で導出した $N(\text{HI})$ と τ_{353} の相関プロット図。それぞれのプロットの色分けは (a) τ_{HI} 、(b) T_s 、(c) T_d によってなされている。

を上げるため、Fermi 衛星のガンマ線放射との比較を行ってきており、 τ_{353} と $N(\text{HI})$ の比例関係性も含めて検証を行っている。

<引用文献>

- Planck early results: Ade, P. A. R. et al. 2011, A&A, 536, A19
 Planck early results. VI.: Ade, P. A. R. et al. 2011, A&A, 536, A6
 Emerson, D. T., & Graeve, R. 1988, A&A, 190, 353
 Grenier, I. A., Casandjian, J.-M., & Terrier, R. 2005, Sci, 307, 1292
 Kalberla, P. M. W., et al. 2010, A&A, 512, A14
 Kalberla, P. M. W., & Haud, U. 2015, A&A, 578, A78
 Kalberla, P. M. W., et al. 2005, A&A, 440, 775
 Peek, J. E. G., et al. 2011, ApJS, 194, 20
 Roy, A., et al. 2013, ApJ, 763, 55
 Wolfire, M. G., Hollenbach, D., & McKee, C. F. 2010, ApJ, 716, 1191

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 5 件)

- ① Fukui, Y. (1 番目), Yamamoto, H. (12 番目), 他 14 名, “The Two Molecular Clouds in RCW38: Evidence for the Formation of the Youngest Super Star Cluster in the Milky Way Triggered by Cloud-Cloud Collision”, The Astrophysical Journal, 査読あり, 820, 2016, 17pp, DOI=10/3847/0004-637X/820/1/26
- ② Fukui, Y. (1 番目), Yamamoto, H. (15 番目), 他 21 名, “High-mass Star Formation Triggered by Collision between CO Filaments in N159 West in the Large Magellanic Cloud”, The Astrophysical Journal Letters, 査読あり, 807, 2015, 6pp, DOI=10.1088/2041-8205/807/1/L4
- ③ Fukui, Y. (1 番目), Yamamoto, H. (4 番目), 他 6 名, “Optically Thick HI Dominant in the Local Interstellar Medium: An Alternative Interpretation to “Dark Gas””, The Astrophysical Journal, 査読あり, 798, 2015, 15pp, DOI=10.1088/0004-637X/798/1/6
- ④ Fukui, Y. (1 番目), Yamamoto, H. (4 番目), Kawahara, T. (12 番目), 他 9 名, “HI, CO, and Planck/IRAS Dust Properties in the High Latitude Cloud Complex, MBM 53, 54, 55 and HLCG92-35. Possible Evidence for an Optically Thick HI Envelope around the CO Clouds”, The Astro-

- physical Journal, 査読あり, 796, 2014, 11pp, DOI=10.10880004-637X/796/1/59
- ⑤ Planck Collaboration; Ade, P. A. R., (アルファベット順で1番目), Fukui, Y. (73番目), Yamamoto, H. (239番目), 他241名, “Planck 2013 results. XIII. Galactic CO emission”, Astronomy & Astrophysics, 査読あり, 571, 2014, 22 pp, DOI=10.1051/0004-6361/201321553

[学会発表] (計41件)

- ① Fukui, Y., “Keynote speech”, Nagoya Workshop on the Interstellar Hydrogen, 2015年3月26日, Nagoya
- ② 岡本竜治, 「Planck 衛星によるダスト放射データを用いた星間水素ガスの定量: 個別分子雲領域における解析」, 日本物理学会第70回年次大会, 2015年3月23日, 早稲田大学
- ③ 漆原宏亮, 「銀河面における星間水素の定量1: 銀河面全体の解析」, 日本天文学会2015年春季年会, 2015年3月21日, 大阪大学
- ④ 山本宏昭, 「銀河面における星間水素の定量2: 高分解能の解析」, 日本天文学会2015年春季年会, 2015年3月21日, 大阪大学
- ⑤ 岡本竜治, 「分子雲領域における星間水素の定量」, 日本天文学会2015年春季年会, 2015年3月21日, 大阪大学
- ⑥ Fukui, Y., “Optically thick HI in the local interstellar medium: An alternative to “dark gas”, Workshop on Interstellar Matter 2014, 2014年10月18日, Hokkaido University
- ⑦ 岡本竜治, 「Planck 衛星のデータに含まれる前景成分の再現に向けて: ガス/ダストによる比較解析3」, 日本物理学会2014年秋季大会, 2014年9月18日, 佐賀大学
- ⑧ 福井康雄, 「星間水素雲の正確な質量決定について」, 日本天文学会2014年秋季年会, 2014年9月11日, 山形大学
- ⑨ 山本宏昭, 「Planck 衛星のサーベイデータと星間ガスの比較解析: CrA領域」, 日本天文学会秋季年会, 2014年9月11日, 山形大学
- ⑩ 岡本竜治, 「Planck 衛星によるダストデータと星間ガスの比較解析: 高銀緯分子雲領域における比較」, 日本天文学会秋季年会, 2014年9月11日, 山形大学
- ⑪ Fukui, Y., “Optically thick HI dominant in the local interstellar medium”, The UNIVERSE IN THE LIGHT OF AKARI and Synergy with future Large Space Telescopes, 2014年7月9日, Oxford UK
- ⑫ 山本宏昭, 「Planck 衛星のサーベイデータと星間ガスの比較解析3: オリオン座領域での比較」, 日本天文学会2014年春

季年会, 2014年3月20日, 国際基督教大学

- ⑬ 山本宏昭, 「NASC0 計画の進捗 -Planck 衛星による宇宙背景放射の前景成分の理解に向けて-」, 日本物理学会秋季大会, 2013年9月21日, 高知大学
- ⑭ 山本宏昭, 「宇宙マイクロ波背景放射における前景成分の理解にむけて1」, 日本天文学会2013年秋季年会, 2013年9月10日, 東北大学
- ⑮ Yamamoto, H., “NASC0 -Nanten Super CO survey-: Understanding the foreground component mostly associated with the Milky Way”, International Conference on Cosmic Microwave Background, 2013年6月10日, OIST Okinawa

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本宏昭 (YAMAMOTO HIROAKI)
名古屋大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 70444396

(2) 研究分担者

福井康雄 (FUKUI YASUO)
名古屋大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 30135298
(平成27年4月、特別推進研究の研究代表者となったため辞退)

桑原利尚 (KUWAHARA TOSHIHISA)
名古屋大学・大学院理学研究科・研究員
研究者番号: 80648303
(平成27年1月、民間に就職のため辞退)

佐野栄俊 (SANO HIDETOSHI)
名古屋大学・大学院理学研究科・特任助教
研究者番号: 50739472
(平成27年4月より)