

令和 5 年 5 月 22 日現在

機関番号：33401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04034

研究課題名（和文）アルマ望遠鏡による吸収線および輝線観測で解明する分子雲の内部構造と中性炭素の分布

研究課題名（英文）Internal Structure and Distribution of Neutral Carbon in Molecular Clouds Revealed by Absorption and Emission Line Observations with ALMA

研究代表者

宮本 祐介（Miyamoto, Yusuke）

福井工業大学・工学部・准教授

研究者番号：00599384

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：銀河系の背後にある、明るいクェーサー(QSO)に対して、ALMAを用いたCO、[CⅠ] 高空間分解能観測を行い、QSOの前景にある銀河系内分子雲を吸収線として検出することに成功した。吸収線スペクトルの詳細な解析から分子雲内部でCO、[CⅠ]の分布が異なることが分かった。また、近傍渦巻銀河M83の[CⅠ]観測から、[CⅠ]の分子ガストレーサーとしての有用性を検証し、銀河円盤領域では他のトレーサーに比べ、[CⅠ]で求めた分子ガス質量は過小評価される傾向にあることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

星形成の母体である分子雲の分布および内部構造を明らかにすることは、星形成および銀河進化を理解する上で本質的に重要である。分子雲の主成分は水素分子であるが、直接観測できない。本研究は、水素分子に変わる分子雲トレーサーとして用いられている一酸化炭素(CO)や炭素原子[CⅠ]について、それらの分子雲内部から銀河円盤に渡る分布を、吸収線および輝線観測から明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We performed high spatial resolution CO and [CⅠ] observations toward bright quasars (QSOs) behind the Milky-Way with ALMA and detected absorption lines of molecular clouds in the foreground of the QSOs. Detailed analysis of the spectra revealed that the distribution of CO and [CⅠ] is different inside the molecular cloud. In order to verify the usefulness of [CⅠ] as a molecular gas tracer, we also performed [CⅠ] observations of the nearby spiral galaxy M 83 and showed that the molecular gas mass determined by [CⅠ] tend to be underestimated compared to other tracers in the disk region.

研究分野：天文学

キーワード：電波天文学 星間物質 分子雲

1. 研究開始当初の背景

星間空間における低温 (~ 10 K) で密度が高い ($\sim 10^3$ cm $^{-3}$) 分子ガスの塊は分子雲と呼ばれ、ここで星が生成される。分子雲の主成分である水素分子 (H_2) は低温で励起されず直接測定できないため、存在量が H_2 に次いで多い一酸化炭素 (CO) が分子雲のトレーサーとして用いられてきた。近年、銀河系内外の分子雲観測から、炭素原子 ($[C\text{I}]$ ($3P_1$ - 3P_0):以降、 $[C\text{I}]$) と一酸化炭素 (CO) の分布が星からの距離 (紫外線強度) に関わらずほぼ一致することが見出され、 $[C\text{I}]$ が (特に遠方銀河や低金属量銀河などで) CO に変わる分子ガスのトレーサーになることが期待されている。一方、この結果は星間ガスの分布・構造理解の基礎である光解離領域 (photo-dissociation region; PDR) モデルで説明できず大きな問題となっている。PDR モデルでは $[C\text{I}]$ は紫外線によって電離された分子雲の周りの炭素イオン (C^+) と分子雲内部の CO との境界に存在すると期待される。観測結果を説明する一つのアイデアとして、分子雲が希薄な分子ガスと高密度クランプで構成される非一様構造であるとする Clumpy-PDR モデルが提唱された。このモデルでは紫外線が希薄なガスを介し分子雲内部に入り込むことができるため、分子雲内部でも CO から $[C\text{I}]$ へ解離される。これにより、分子雲スケール (~ 10 pc) で観測される CO と $[C\text{I}]$ 分布の大局的一致が説明できる。ただし、Clumpy-PDR モデルの実証については、銀河系内の分子雲を分解する高空間分解能 $[C\text{I}]$ 輝線観測などから試みられているものの、解決には至っていない。また、これまでの $[C\text{I}]$ 観測は星形成領域や銀河中心領域などに限られており、分子ガストレーサーとしての $[C\text{I}]$ の有用性を評価するには、 $[C\text{I}]$ の生成メカニズム、および銀河円盤での分布を明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

$[C\text{I}]$ 生成メカニズムの解明を目指して、銀河系分子雲を高空間分解能で観測し、その内部での CO と $[C\text{I}]$ の関係を詳細に調べる。ただし、分子雲を高密度クランプのスケール (数 10 AU) 分解能で輝線として観測する場合、対象の表面輝度が暗くなり、検出が難しい。本研究では、銀河系の背後にある明るいクェーサー (QSO) に対して分光観測を行い、QSO の前景にある銀河系内分子雲、またその内部のクランプを吸収線として炙り出す。吸収線の強度は背景の QSO の明るさと分子雲の光学的厚みで決まるため、検出が容易である。 $[C\text{I}]$ および CO 吸収線スペクトルから分子雲内部でのそれらの関係を求める。本研究では、さらに、近傍銀河円盤領域の $[C\text{I}]$ マッピング観測を実施し、既存の CO データ、およびそれらと独立した手法で推定した分子ガス分布と比較することで、 $[C\text{I}]$ の分子ガストレーサーとしての有用性を検証する。

3. 研究の方法

分子雲の内部構造を明らかにするために、天の川銀河の背景に存在するコンパクトな QSO の連続波をそれと同程度の空間分解能で観測し、系内分子雲を分光スペクトルの吸収線として検出する。QSO の前景の分子雲内にコンパクトなクランプが複数存在する場合、検出される吸収線は線幅の狭いスパイク状になり、各吸収線スペクトルが個々のクランプに対応する。これは、銀河回転により各吸収線のピーク速度がクランプの位置 (銀河中心からの距離) に対応し、速度幅は低温ガスの音速 (~ 10 K のとき ~ 0.3 km s $^{-1}$) に相当するためである。また、細いビームによる観

測はクランプ周りのガスからの放射の影響を無視できるため、複数のエネルギー準位の吸収線の比較からクランプの物理状態が正確に求まる。一方、分子雲全体の性質を調べるためには、分子雲スケール(数 pc)の比較的大きなビームでの観測が必要である。得られるスペクトルはビームに含まれるガスの総和であり、分子雲内にガスが連続的一様に存在する場合、滑らかな輝線として観測される。また、分子雲内で希薄ガスとクランプが共存する場合は、輝線と吸収線の速度が一致することが期待される。その場合、吸収線観測で得られたクランプの光学的厚みと温度を用いることで、低分解能ビーム内に含まれる希薄なガスの割合を見積もることができる。加えて、吸収線と輝線からクランプと広がった希薄なガスの物理状態(温度、柱密度)をそれぞれ求めることができ、それらの整合性が確認できる。本研究では、ALMA と単一鏡(野辺山 45m 電波望遠鏡および ASTE)を用いて天の川銀河の背景にある QSO の [CI]、CO 観測を実施し、分子雲の内部構造(高密度クランプ(< 100 AU)や希薄な分子ガスの存在)および分子雲内での [CI] と CO のスペクトル(分布および運動)の差異、そしてそれらクランプと希薄ガスの性質を明らかにする。

[CI] が低温分子ガスのトレーサーとなりうるか理解するためには CO-[CI] の関係に加え、 H_2 と [CI]、および H_2 と CO、の関係性を明らかにする必要がある。これには分子ガスの分布、量を推測する別の指標が必要である。本研究では、星間ダスト量から分子ガス量を推定する。ダストとガスがよく混ざっており、ガス/ダスト比(GDR)が観測領域で一定であるとすると、 $n_{H_2} = GDR \times n_{dust}$ の関係が成り立つ。CO または [CI] が分子ガスをトレースする場合、それらの積分強度に変換係数($\alpha_{CO}, \alpha_{[CI]}$)を適用した、 $n_{H_2} = \alpha_{CO} I_{CO} (= \alpha_{[CI]} I_{[CI]})$ の関係から、分子ガス量を導出できる。上 2 式から、GDR の変動が最も小さい時の変換係数($\alpha_{CO}, \alpha_{[CI]}$)が最尤値となり、同時に GDR も決定する。ダスト量は遠赤外線(Spectrum Energy Distribution (SED) フィット)から、水素原子の量は HI データから直接求めることができる。このため、多波長アーカイブデータが揃っていること、銀河構造の分解が必要なため真正面を向いて近傍であること、などの制限から本研究では近傍渦巻銀河 M83 をターゲットとして、[CI]、CO、そしてダストから求めた H_2 の関係を調べた。

4 . 研究成果

我々は分子雲の内部構造を調べるために ALMA を用いて、我々の銀河系の背後に存在する QSO(J1851+0035 と J1935+2031)を背景光とした銀河系内分子雲の [CI] と CO 観測(^{12}CO , ^{13}CO , $C^{18}O$ の $J=2-1$ および $J=1-0$)を実施した(図 1)。ALMA (空間分解能 <1 ")での観測に先立ち、単一鏡

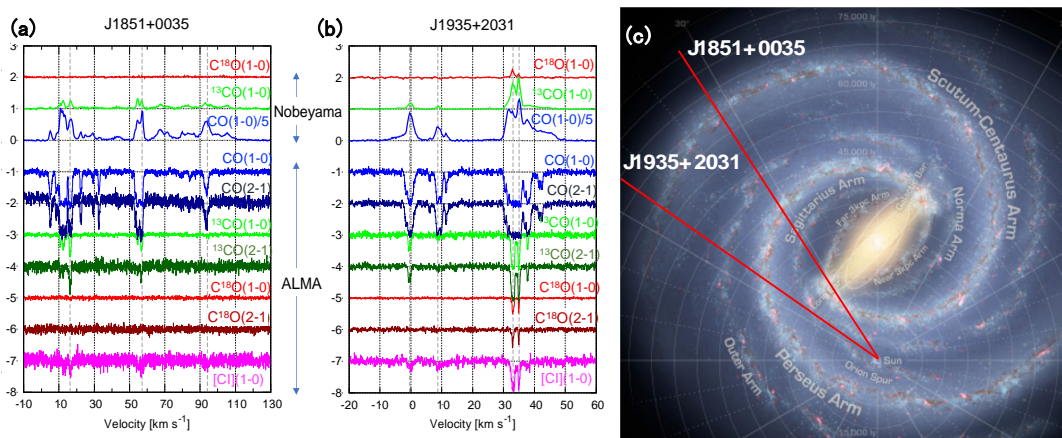


図 1: (a)J1851+0035 と(b)J1935+2031 を観測した時の CO と CO 同位体($J=1-0, 2-1$)および [CI] の吸収線スペクトル。(c)天の川銀河を真正面から見た場合のイメージ図と観測した QSO の方向

($\sim 15''$)観測を実施し、CO、CO 同位体および[CII]輝線が両 QSO の方向の銀河円盤に存在することを確認した。ALMA のシャープなビームで QSO を観測すると、単一鏡で輝線ピークとなる速度成分で、速度幅 0.2km/s 程度の狭線幅の吸収線スペクトルが得られた。この速度幅は 10K 程度の音速に対応しており、熱圧力で支持されるクランプの存在を示唆する。広い速度域にわたり¹²CO の光学的厚みが飽和していることから、分子雲は希薄なガスとコンパクトなクランプで構成されることが示された。また、CO、[CII]の吸収線のスペクトルプロファイルを 0.25km/s の速度分解能で比較するとピーク位置など形状は互いによく一致するものの、0.04km/s の速度分解能では様子が大きく異なり、[CII]の方が CO に比べてコンポーネントが多いことがわかった。これは対局的には[CII]と CO の分布が一致してみえるものの、微視的には異なる分布をしていることを示唆する。さらに PDR 領域のトレーサーである CN の吸収線の検出にも初めて成功しており、CN と[CII]の吸収線強度が非常に良い相関を持つことを見出した。これらの結果は、紫外線が小さな分子雲の内部まで入り込み、CO の光解離反応で[CII]を生成しているとする clumpy PDR モデルを支持する。今後、[CII](³P₂-³P₁)の吸収線観測を行うことで、分子雲内での[CII]と CO の存在量およびそれらの変化が得られ、これによって CI 生成メカニズムに重要な観測的制限を得ることができる。分子ガス視線速度からの分子雲位置の導出についても進展があった。運動学的に距離を導出する際に得られる 2 つの解(近傍解と遠方解)を深層学習に判定させることで、14 万個の分子雲の距離の導出に成功した。

さらに、ASTE による近傍銀河 M83 の[CII]マッピング観測を行い、既存の CO データと分布を比較した。結果、銀河中心領域では[CII]と CO の分布は一致しているものの、渦状腕では明らかなオフセットを持つことがわかった。[CII]と CO の積分強度の相関図では、中心領域では先行研究と同様強い相関を示すものの、円盤領域では分散が大きく、特に渦状腕領域ではほぼ相関がないことが見出された。加えて、多波長遠赤外線データより SED フィットを行い、銀画面でのダスト温度とダスト質量の分布を求めた(図 2)。ダスト質量から GDR を適用して求めた分子ガス質量と、CO、CI の積分強度に変換係数(α_{CO} , $\alpha_{[CII]}$)を適用して求めた分子ガス質量を比較することで、円盤領域では[CII]で求めた分子ガス質量は過小評価する傾向にあることを初めて見出した。この結果は、[CII]を銀河全体の低温分子ガスのトレーサーとして用いることに警鐘を鳴らしている。また、太陽の 10^{12} 倍以上の赤外線光度を持つ超高光度赤外線銀河(ULIRG)Arp220 における[CII]と CO の関係を調査した。銀河全体での[CII]/CO 強度比は他 ULIRG で得られた値と一致したものの、特に西側の銀河中心核から放出されるアウトフローで[CII]/CO 強度比が高くなっており、励起輻射輸送計算から、この強度比は主に CI と CO の存在比に依ることを見出した。

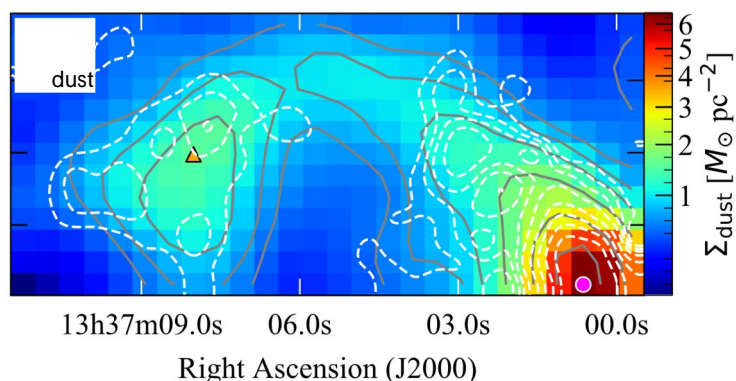


図 2: 近傍銀河 M83 のダスト (カラー)、CO (実線)、[CII] (破線) の分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Miyamoto Yusuke, Yasuda Atsushi, Watanabe Yoshimasa, Seta Masumichi, Kuno Nario, Salak Dragan, Ishii Shun, Nagai Makoto, Nakai Naomasa	4. 巻 73
2. 論文標題 Atomic carbon [C I](3P1-3P0) mapping of the nearby galaxy M83	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 552 ~ 567
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ueda Junko, Michiyama Tomonari, Iono Daisuke, Miyamoto Yusuke, Saito Toshiki	4. 巻 74
2. 論文標題 Spatially-resolved relation between [C I] 3P1-3P0 and 12CO (1-0) in Arp 220	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 407 ~ 420
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fujita Shinji, Ito Atsushi M, Miyamoto Yusuke, Kawanishi Yasutomo, Torii Kazufumi, Shimajiri Yoshito, Nishimura Atsushi, Tokuda Kazuki, Ohnishi Toshikazu, Kaneko Hiroyuki, Inoue Tsuyoshi, Takekawa Shunya, Kohno Mikito, Ueda Shota, Nishimoto Shimpei, Yoneda Ryuki, Nishikawa Kaoru, Yoshida Daisuke	4. 巻 75
2. 論文標題 Distance determination of molecular clouds in the first quadrant of the Galactic plane using deep learning: I. Method and results	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 279 ~ 295
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Andreani Paola, Souvatzis Lazaros, Papadopoulos Padelis, Bisbas Thomas, De Breuck Carlos, Emonts Bjorn, Zhang Zhi-Yu, Miyamoto Yusuke, Mann Allison	4. 巻 265
2. 論文標題 The Interstellar and Circumgalactic Media at low and high redshift as traced by Atomic Carbon and Carbon Monoxide	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 00046 ~ 00046
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202226500046	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 宮本祐介
2. 発表標題 近傍渦巻銀河 M83 の[Cl] mapping 観測
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮本祐介
2. 発表標題 ALMA望遠鏡による吸収線観測で探る分子雲内部の中性炭素と一酸化炭素の関係
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Miyamoto Yusuke
2. 発表標題 Relationship between [Cl] and CO inside molecular clouds probed by absorption line observations with ALMA
3. 学会等名 East-Asian ALMA science Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年～2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	石井 峻	国立天文台・アルマプロジェクト・特任准教授	
	(Ishii Shun)		
	(70733567)	(62616)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------