

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2011

課題番号：21253003

研究課題名（和文）NANTEN2 による相対論的ジェット起源分子雲の系統的探査

研究課題名（英文）A systematic search for molecular clouds formed under the dynamical influence of relativistic jets

研究代表者

福井 康雄 (FUKUI YASUO)

国立大学法人 名古屋大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：30135298

研究成果の概要（和文）：

「なんてん」銀河面サーベイのデータを詳細に解析し、計 11 個のジェット分子雲候補天体を発見した。このうちの 1 つは銀河系中心の大質量ブラックホールに付随し、過去にジェットを放出するような活動期があったことを初めて示すものである。また一酸化炭素分子(CO)の多輝線観測を候補天体を実施、特に 348.5 度方向では分子雲内部の温度・密度分布を明らかにした。さらに磁気流体数値計算を共同研究で実施し、ジェットの周囲で高密度領域を形成することができることを示した。

研究成果の概要（英文）：

Eleven candidates of molecular clouds which have been made by an interaction of jet with an interstellar medium are identified from NANTEN Galactic Plane Survey Dataset. One of the candidates is associated with massive black hole in the Galactic Center, indicating that the massive black hole had an active period that the jet is emanated for. CO multi-line observations have been carried out toward the candidates. The distribution of temperature and density of the molecular clouds toward the candidate of L^{348.5} is revealed by the observations. In addition, MHD simulation has been carried out with collaborators and reveals that dense region can be formed around the jet.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	12,900,000	3,870,000	16,770,000
2010 年度	11,400,000	3,420,000	14,820,000
2011 年度	11,400,000	3,420,000	14,820,000
総計	35,700,000	10,710,000	46,410,000

研究分野：電波天文学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：電波天文学・星間分子雲・分子雲ジェット・分子雲形成

1. 研究開始当初の背景

マイクロクェーサーや非等方超新星爆発によって光速に近いジェットが加速・放出されると考えられ、これまでこのようなジェットはそれ自体の放つ非熱的電波や X 線、ガンマ線によって検出されてきた。近年、この高

エネルギージェットと星間物質が相互作用している可能性があることを Mirabel らによって GRS1915+105, SS433 について検討されてきたが、明確な結論は得られないまま終わっていた(例:Chaty et al. 2002)。

我々は「なんてん」で取得された ¹²CO(J=1-0)輝線の銀河面サーベイデータを再解析し、

高エネルギージェットと中性水素ガスと相互作用によって生み出されたと思われる分子雲を銀経 348.5 度方向と SS433 方向で発見した (Yamamoto et al. 2008)。銀経 348.5 度方向 (Molecular Jet G348.5=MJG348.5) については銀緯 ± 2 度にわたり、4 つの分子雲が直線上に分布していた。この直線と銀河面の交点には CTB37A/B を含む 3 つの超新星残骸が存在しており、これらの中にジェットの駆動源候補が存在していると考えられる。SS433 は X 線ジェットを放出している X 線連星として非常に有名な天体である。この双方向のジェットの軸上に直線的に並ぶ 10 個の分子雲を発見した。ジェットのエネルギー、運動量、タイムスケールは分子雲を形成するのに十分であることが吟味され、ジェットによる分子雲形成の可能性が強く示唆された。さらに探査を進め、MJG348.5、SS433 を含む 6 天体の候補を発見した。6 天体に共通する性質は以下の 3 点である；

- ・ジェットの長さは中心天体から 100–300pc 程度である。これは X 線や電波連続波で検出されてきたジェットの数倍にあたる。
- ・分子雲の質量は 1 万太陽質量程度であり、中性水素ガスがジェットの衝撃を受けて圧縮され、 10^5 – 10^6 年のタイムスケールで形成された。

- ・4 天体については駆動源が確認されている。

2 天体については電波連続波の高感度観測がないなどの理由で未だ確認されていない。

さらに MJG348.5 に対しては Mopra 望遠鏡を用いた ^{12}CO (J=1-0)、 ^{13}CO (J=1-0)、 C^{18}O (J=1-0) 輝線の高分解能観測により、南側の先端の分子雲 (高密度天体から最も遠い位置にある分子雲) はきれいなヘリカル分布をしていることをつきとめた。この分布は通常の分子雲のような自己重力と乱流に支配される形状とは大きくかけ離れており、圧倒的な大エネルギーと高度に系統的な外力による形成以外に、この形状を解釈することができない。そのため高エネルギージェットのヘリカル分布に起因する分子雲であることが強く示唆される。以上の結果から分子雲が高エネルギージェットのトレーサーとして十分使える可能性を見いだした。

2. 研究の目的

宇宙ジェットの普遍性と、その天体物理学上の重要性は明らかであり、本研究はこれまでの探査によるジェット検出率を考慮し、十分現実的目標と考えられる、分子雲ジェットのサンプル数を現在の 6 個のほぼ 10 倍増にし、分子雲ジェットの天体物理学的性質を確立することを目標とする。分子雲ジェットは、全長 500pc と SS433X 線ジェットのほぼ 10 倍の長さを持ち、ジェット活動のタイムス

ケールが長いことを示唆する。分子雲という新たなトレーサーによって、相対論的ジェットの全体像をとらえる可能性が初めて開かれたことは注目に値し、ジェットの形成、伝播、そして終端に至る全体像が、本研究によって可能になると期待される。特に電波連続波、X 線と違い、分子雲は速度方向を含めた 3 次元のデータを取得可能である。分子雲の速度は奥行き方向の距離に焼き直せるため、分子雲の運動を詳細に調べることで、ジェットに対してこれまで不可能であった奥行き方向を含めた 3 次元の空間分布を明らかにすることが可能となる。また、分子雲自体はジェットが出なくなっても数千万年はその形状を保ったまま残るため、今は静かで過去に活発に活動していたマイクロユーザーを同定できる可能性をもつ。以上からブラックホールジェット、非等方超新星爆発による、宇宙ジェットの性質の定量的解明が飛躍的に進むと期待される。磁気流体力学の理論研究、および電波連続波、X 線、ガンマ線の他波長観測との比較によって、現象への理解を深め、高エネルギージェットの性質を解明することを目指す。

3. 研究の方法

本課題の研究を遂行するため、「なんてん」銀河面サーベイのデータを用いて、新たなジェット候補分子雲の探査を行う。「なんてん」銀河面サーベイは銀経 200 度から銀河系中心 (銀経 0 度) を含む銀経 60 度、銀緯 ± 5 度の 2200 平方度をビームサイズ 2.6 分角に対して 4 分角グリッドで分子雲観測を行っている。また、分子雲はジェットの軸上に点在しているため、分子雲だけでは候補天体を見逃す可能性がある。そこで本探査では中性水素ガスのデータも使用する。中性水素ガスは宇宙空間にほぼ連続的に分布しているため、ジェットとの相互作用を空間的に連続的に把握することができる。しかし、現存する広域データは分解能が 2 分角程度の ATCA+Parkes は銀緯方向に ± 1.5 度しかカバーされておらず、その外側は 16 分角の分解能のデータしかない。高銀緯領域のジェット候補を探査する分解能としてはやや不十分であるが、分子雲のデータと合わせることで効率的に候補天体を発見できるはずである。

チリ、アタカマ高地に設置した NANTEN2 4m サブミリ波望遠鏡を用いて銀経 ± 60 度、銀緯 ± 10 度の計 2400 平方度について ^{12}CO (J=2-1) 輝線のサーベイを OTF 観測法 (on the fly: スキャン観測により連続的にデータを取得する方法、高効率で優れたデータの質が確保される) で行う。銀緯方向に広くカバーしていることがジェット分子雲発見につながって

いるため、他に類のない規模で銀緯方向にも観測を広げる。分子雲ジェットの典型的な大きさは数分角以上であるので、OTF データを2分角強の分解能にスムージングし、分子雲を探索する。見つかった候補天体については、1.5分角の分解能で詳細観測をする。これによって、代表的な分子雲ジェットについてただちにヘリカル構造の有無が判定できる。本探索で、ヘリカル構造の普遍性を確立して、その典型的な波長などを導く。また、CO分子の多遷移(J=1-0, 2-1, 3-2, 4-3, 7-6)観測によってジェット分子雲の温度・密度分布を明らかにし、理論研究の指針を得る。

駆動源となるコンパクト天体とそれに付随するジェットの探索を行う。VLA 他の高分解能機器と、X線、ガンマ線の観測データを活用する。HESS、Fermi (旧 GLAST) 衛星によるガンマ線観測、Suzaku による X線観測結果も参照しつつ、ジェットの駆動源の特定を行う。

さらにジェットと星間水素原子雲との相互作用について、磁気流体力学による数値シミュレーションを共同研究として行い、分子雲形成の条件、ヘリカル形状の起源を明らかにする。

4. 研究成果

本研究を実施し、以下の結果を得た。

1) 分子雲探索

「なんてん」銀河面サーベイのデータ、中性水素原子のデータから 11 個の候補天体を発見した。中でもジェットが確認されている X線連星 XTE J1550-564 に対してサーベイデータを詳細に解析したところ、ジェットの軸上に分子雲群を発見した(図 1)。

また、銀河系中心部の二重らせん星雲に付

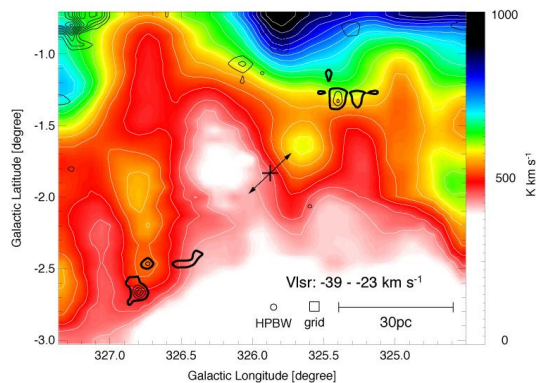


図 1 $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線の積分強度図(コントラスト)と中性水素ガスの積分強度図(イメージ)。十字は X 線連星の位置、矢印はジェットの向きを示している。

随する垂直に伸びた柱状の分子雲を発見した。その根元は銀河系中心核の大質量ブラックホールを取り囲むガス円盤に連なっており(図 2)、回転円盤によって駆動された磁気流体力学現象によって、分子雲の分布と運動が説明できる可能性を指摘した。これは我が銀河系の中心部にも、ジェットを放出した活動的な時期があることを初めて示すものである。

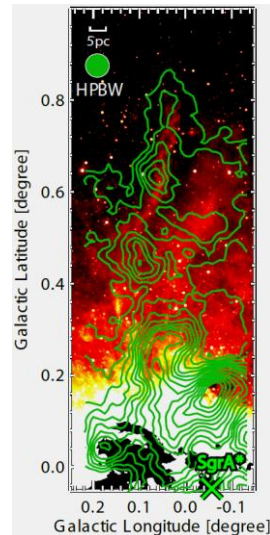


図 2 Spitzer 衛星の $24\mu\text{m}$ の放射強度図に「なんてん」で取得された $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線の積分強度図(コントラスト)を重ねたもの。×印は銀河系中心部にある巨大ブラックホールの位置を示す。

2) NANTEN2 鏡を用いた $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ 、 $^{13}\text{CO}(J=2-1)$ 輝線観測

XTE J1550-564, SS433, Wd2, MJG348.5 方向に対して $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ 輝線観測を OTF 法にて実施した。また、一部の領域については $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線の 1 点観測を実施した。検出した分子雲は 10pc 程度の構造を持つことがわかり、特徴的なヘリカル構造がより明らかに示された。CO(J=2-1)、CO(J=1-0)の強度比は領域によっては銀河系内の星形成領域と同程度の値であった。このことは分子雲が高温もしくは高密度になっている可能性を示している。しかし、赤外線点源等の加熱源となりうる天体が分子雲の周囲には存在していないため、高エネルギージェットからの衝撃波による加熱・圧縮により、分子雲形成が誘発された可能性を示唆した。また、「なんてん」で同定した Wd2 のジェットに付随するアーク、ジェット分子雲に対し、すでに Mopra 望遠鏡で取得済みの高分解能 CO(J=1-0)輝線の強度分布は TeV ガンマ線強度分布と良い一致を示すことを明らかにした(図 3)。さらに CO(J=2-1) 輝線と強度の比較を行い、LVG(Large Velocity Gradient)法にて温度が 10K ないし 20K の比較的低温であることを明らかにした。このことは分子雲形成に伴う衝撃波が約 100 万以前に起き、冷却したことで矛盾しない。ジェット・アークの成因として

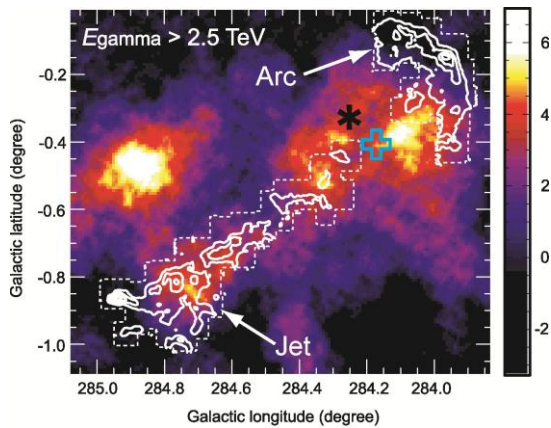


図3 Westerlund2方向のTeVガンマ線の強度分布(イメージ)にMopra望遠鏡で取得した $^{12}\text{C}0(\text{J}=1-0)$ の積分強度(コントア)を重ねたもの。青十字はガンマ線源の中心、アスタリスクは星団の位置を示す。

非等方超新星爆発、ならびにジェットに駆動されたバウショックの可能性を示唆した。

3) コンパクト天体の同定

同定した10個の候補天体の駆動源の付随状況は以下のである。

- ・ブラックホールに付随：3天体
- ・超新星爆発に付随：1天体
- ・ガンマ線に付随：2天体
- ・星団に付随：1天体
- ・付随天体がない：3天体

未だ付随天体が発見されていない3天体に対し、既存の電波連続波、X線データを用いて、高密度天体、超新星残骸の痕跡を詳細に調査したが、対応天体が発見することができなかった。

4) CO分子及び同位体の多遷移観測

4-1) ASTE望遠鏡によるCO(J=3-2)輝線観測・データ解析

ASTE 10m鏡を用いて、2天体について観測を実施した。また、すでに取得済みであったMJG348.5についてMopra望遠鏡で取得した $^{12}\text{C}0(\text{J}=1-0)$ 、 $^{13}\text{C}0(\text{J}=1-0)$ 輝線と合わせて、LVG法を行い、30秒程度の分解能(MJG348.5の距離で0.9pcに対応)で分子雲全域にわたる温度・密度分布を明らかにした(S図4はS3のみ)。S3の特に先端部分では温度 $\sim 72 \pm 12\text{K}$ ・密度 $\sim 680^{+250}_{-160}\text{cm}^{-3}$ と領域の中で、温度・密度の両方の値が大きく、先端部分で加熱・圧縮が起きていることを示唆した。

4-2) 野辺山45m鏡を用いたCO(J=1-0)輝線高分解能観測

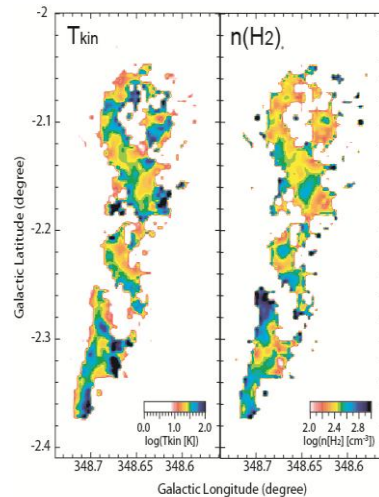


図4 $^{12}\text{C}0(\text{J}=1-0)$ 、 $^{13}\text{C}0(\text{J}=1-0)$ 輝線のデータを用いてLVG法にて導出したMJG348.5S3の分子雲内部の温度(左図)と密度(右図)の分布。

SS433のジェットに付随する分子雲に対して野辺山45m鏡を用いて $^{12}\text{C}0(\text{J}=1-0)$ 輝線の観測を行い、詳細な分子雲地図を得た(図5)。また以下の結果を得た。

- ・NANTEN2で取得している $^{12}\text{C}0(\text{J}=2-1)$ 輝線との比較を行い、 $\text{C}0(\text{J}=2-1)/\text{C}0(\text{J}=1-0)$ 比は全体的に0.7以下と典型的な暗黒星雲より低い、局所的には1.0を超える部分が存在している。
- ・北側でSS433に最も近い分子雲(NE)はX線ジェットと同一視線方向上にあり、SS433に近い場所ほど比が高い。
- ・分子雲の冷却のタイムスケールが年齢より短いため、全体的に励起状態が低い可能性が示唆される。
- ・比が高い部分は分子雲の冷却率よりジェットのエネルギーが大きく、局所的に高励起するの矛盾しない。

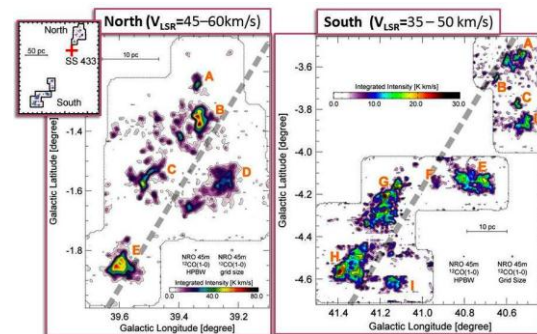


図5 野辺山45m鏡で取得したSS433のジェットに付随する分子雲の $^{12}\text{C}0(\text{J}=1-0)$ 積分強度図。中央図と右図は分子雲の分布を示す。左上図は中央図、右図とSS433の位置関係を表す。

5) 磁気流体力学による数値シミュレーション(共同研究)

千葉大学松元亮治教授のグループと2次元及び、3次元の磁気流体数値シミュレーションを行い、高密度中性水素ガスに注入された超音速ジェットの伝搬過程を調べた。ジェットの先端方向に形成されたバウショックに

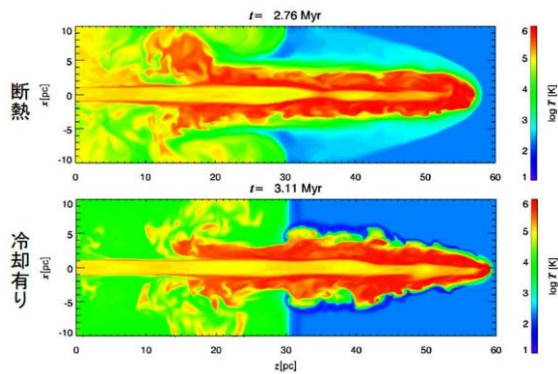


図 6 2次元数値計算にジェットと相互作用した星間媒質の温度分布。上図は断熱状態、下図は冷却を考慮した場合。

より、圧縮されたガスは冷却不安定性によって効率良く冷却され、高密度領域がジェットの周囲に形成されることを明らかにした(図6)。

(総括)

複数のサンプルに対し、CO の多準位輝線観測を実施することにより、ジェットに付随する分子雲の物理量を明らかにし、ジェットとの相互作用の様子が見えつつある。特に MJG348.5 については分子雲内部の温度・密度分布を 1pc 以下のスケールで明らかにし、これは今後数値計算と詳細な比較をする際に重要になる。数値計算も成果出つつあり、今後観測データとの詳細な比較が可能となり、本研究課題への理解がより一層深まるものと思われる。銀河系中心の巨大ブラックホールは現在非常に不活発な状況であるが、本研究により、過去ジェットを放出していた活動期がある可能性を指摘できた点で新しい。今後より詳細な解析を進めて駆動源の理解とジェットの理解を深めていく。

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 35 件)

Fukui, Y. (1 番目), Yamamoto, H. (12 番目), Onishi, T. (15 番目), 総著者数=17 名, A Detailed Study of the Molecular and Atomic Gas toward the γ -ray Supernova Remnant RX J1713.7-3946: Spatial TeV γ -Ray and Interstellar Medium Gas Correspondence, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 746, 2012, id. 82

Paradis, D., Paladini, R., Noriega-Crespo, A., Lagache, G., Kawamura, A., Onishi, T.,

Fukui, Y., Spitzer Characterization of Dust in the Ionized Medium of the Large Magellanic Cloud, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 735, 2011, id. 6

Getman, K. V. (1 番目), Fukui, Y. (9 番目), 総著者数=9 名, Source Contamination in X-ray Studies of Star-forming Regions: Application to the Chandra Carina Complex Project, The Astrophysical Journal Supplement, 査読有, Vol. 194, 2011, id. 3

H. E. S. S. Collaboration; Fukui, Y. (192 番目), 総著者数=197 名, Revisiting the Westerlund 2 field with the HESS telescope array, Astronomy and Astrophysics, 査読有, Vol. 525, 2011, id. A46

Sano, H. (1 番目), Yamamoto, H. (5 番目), Onishi, T. (11 番目), Fukui, Y. (26 番目), 総著者数=26 名, Star-forming Dense Cloud Cores in the TeV Gamma-ray SNR RX J1713.7-3946, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 724, 2010, pp. 59--68

Fukui, Y., Kawamura, A., Molecular Clouds in Nearby Galaxies, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 査読有, vol. 48, 2010, pp. 547--580

Molinari, S., Fukui, Y. (42 番目), 総著者数=124 名, Clouds, filaments, and protostars: The Herschel Hi-GAL Milky Way, Astronomy and Astrophysics, 査読有, Vol. 518, 2010, id. L100

Ohama, A. (1 番目), Yamamoto, H. (6 番目), Onishi, T. (9 番目), Fukui, Y. (13 番目), 総著者数=13 名, Temperature and Density Distribution in the Molecular Gas Toward Westerlund 2: Further Evidence for Physical Association, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 709, 2010, pp. 975--982

Fukui, Y. (1 番目), Onishi, T. (8 番目), 総著者数=13 名, Molecular and Atomic Gas in the Large Magellanic Cloud. II. Three-dimensional correlation Between CO and H I, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 705, 2009, pp. 144--155

Fukui, Y. (1 番目), Yamamoto, H. (5 番目), Onishi, T. (13 番目), 総著者数=15 名, A Peculiar Jet and Arc of Molecular Gas toward the Rich and Young Stellar Cluster Westerlund 2 and a TeV Gamma Ray Source,

Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol.61, 2009, pp.L23--L27

Dawson, J. R., Kawamura, A., Mizuno, N., Onishi, T., Fukui, Y., Catalogue of $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ and $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ Molecular Clouds in the Carina Flare Supershell, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol.60, 2008, pp.1297--1315

〔学会発表〕(計 23 件)

Furukawa, N., TeV ガンマ線源 HESS J1023-575 とアーク・ジェット分子雲の形成と放射機構, 日本天文学会 2012 年春季年会, 2012.3.22, 龍谷大学

Enokiya, R., 銀河系中心部の Double Helix Nebula に付随する分子雲の発見 2, 日本天文学会 2012 年春季年会, 2012.3.22, 龍谷大学

Furukawa, N., Westerlund2/HESS J1023-575 方向のアーク・ジェット分子雲, 分子雲ジェットワークショップ, 2012.3.14, 名古屋大学

Enokiya, R., 銀河系中心部の Double Helix Nebula に付随する分子ガスの観測的研究, 分子雲ジェットワークショップ, 2012.3.14, 名古屋大学

Matsumoto, R., 銀河中心の磁気タワージェットモデル, 分子雲ジェットワークショップ, 2012.3.14, 名古屋大学

Asahiha, Y., ジェットと星間ガス相互作用の磁気流体シミュレーション, 分子雲ジェットワークショップ, 2012.3.14, 名古屋大学

Asahina, Y., 冷却効果を含む磁気流体ジェットと星間ガス相互作用の 3 次元数値実験, 日本天文学会 2011 年秋季年会, 2011.9.20, 鹿児島大学

Enokiya, R., 銀河系中心部の Double Helix Nebula に付随する分子雲の発見, 日本天文学会 2011 年秋季年会, 2011.9.20, 鹿児島大学

Okamoto, R., X線連星 SS433 方向の直線状分子雲の詳細解析, 日本天文学会 2011 年春季年会, 2011.3.18, 筑波大学(講演予稿集)

Yamamoto, H., XTE J1550-564 のジェットに

付随する分子雲, 日本天文学会 2010 年春季年会, 2010.3.26, 広島大学

Furukawa, N., Westerlund2/HESS J1023-575 方向のアーク・ジェット状分子雲の $\text{CO}(J=2-1, 1-0)$ 高分解能観測, 日本天文学会 2010 年春季年会, 2010.3.26, 広島大学

Fukui, Y., 「なんてん」による分子雲観測と Fermi ガンマ線源, 日本天文学会 2010 年春季年会, 2010.3.25, 広島大学

Yamamoto, H., 高密度天体からのジェットと星間物質の相互作用 -- 銀河面天体の網羅的サーベイ --, 分子雲ジェット研究会, 2010.3.19, 名古屋大学

Hara, T., マイクロクエーサー SS433, XTE J1550-564 に付随する分子雲ジェット, 分子雲ジェット研究会, 2010.3.19, 名古屋大学

Fukui, Y., 銀河系内大規模星団 Wd2 に付随する最新の成果, ALMA 星形成サブ WG ワークショップ, 2009.12.1, 国立天文台

Ohama, A., NANTEN2 望遠鏡による Westerlund2 のアークとジェット状分子雲の観測, ミニワークショップ「高エネルギージェットと星間物質」, 2009.10.5, 名古屋大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福井 康雄 (FUKUI YASUO)
名古屋大学・理学研究科・教授
研究者番号: 30135298

(2) 研究分担者

大西 利和 (ONISHI TOSHIKAZU)
大阪府立大学・理学系研究科・教授
研究者番号: 30314058

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