

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01118

研究課題名(和文) CCS・S0のZeeman観測による星形成における磁場の役割の徹底解明

研究課題名(英文) A Thorough Understanding of Role of Magnetic Field in Star Formation Process by CCS/S0 Zeeman Observations

研究代表者

中村 文隆 (Nakamura, Fumitaka)

国立天文台・科学研究部・准教授

研究者番号：20291354

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、30-50GHz帯の新しい電波受信機を開発し、野辺山45m電波望遠鏡に搭載することと、それを用いて、この帯域にあるCCS(JN=43-32, 32-21)の2つの輝線とS0(JN=10-01)の輝線のゼーマン分裂を検出することであった。ゼーマン分裂が検出できれば、分裂幅が磁場強度に比例することから星形成領域の磁場強度を測定することができる。受信機の開発は、台湾中央研究院と共同で行い、受信機本体は完成し、コロナ禍の影響で、搭載が大幅に遅れたが、2021年11月25日に野辺山45m鏡に設置され、望遠鏡システムへのインテグレーションに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、星の形成過程における磁場の役割を解明することで、我々の太陽系のような星系がどのように誕生したかの知見が得られる。また、系外惑星の形成過程の初期条件への制限を行うことができ、生命の誕生のなぞに迫ることができると期待される。さらに、30-50GHzの電波観測を行う装置を作ったので、今後、この新たな電波観測から、星の誕生過程以外にも様々な天体現象の解明に役立つことが期待される。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop a new radio receiver in the 30-50GHz band, and mount it on the Nobeyama 45m radio telescope. In addition, we use it to detect the Zeeman splitting of CCS (JN=43-32, 32-21) and S0 (JN = 10-01) lines. If Zeeman splitting can be detected, the magnetic field strengths in the star-forming regions can be measured. The receiver was developed in collaboration with the ASIAA, and the receiver itself was completed. Although the installation was significantly delayed due to the influence of covid-19, it was successfully installed and integrated into the telescope system.

研究分野：天文学

キーワード：星間磁場 星形成 電波観測

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

分子雲コアから星が形成される過程は、ガスの自己重力、内部の乱流運動、磁場によってコントロールされている。ガスの自己重力や内部の乱流運動については、電波観測により観測データが比較的容易に得られる。一方、磁場については、その強度を測定することが技術的にも難しく、その力学的重要性の理解が進んでいない。理論的には数値シミュレーションにより、磁場の役割の重要性が指摘されてきたが、観測データが不足しており、論争的であった。

観測的には、分子雲コアに付随する磁場の正確な測定は、分子輝線のゼーマン分裂の検出が唯一の方法であるが、そのような観測が可能な受信機システムは世界的にも不足していた。例えば、アレシボ望遠鏡や IRAM30m 鏡などではゼーマン観測が可能であるが、星形成前段階の分子雲コアの磁場の測定はあまり盛んに行われていない。

我々は、2015 年頃より、ゼーマン観測が可能なシステム Z45 を作成し、野辺山 45m 鏡に設置し、おうし座の TMC-1 コアに向けてゼーマン観測を行った。CCS (JN=43-32)のゼーマン分裂を検出し、100 マイクロガウス程度の磁場の検出に成功した。しかしながら、観測に 30 時間も時間を要し、統計的な研究は困難であった。

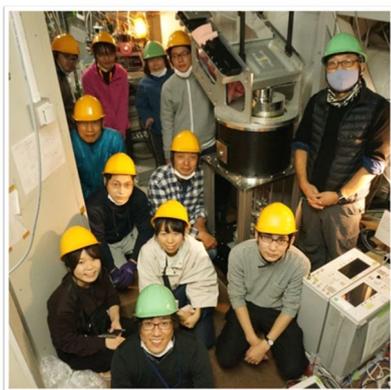
2. 研究の目的

本研究の目的は、星形成過程における磁場の力学的役割を解明するために、分子輝線のゼーマン分裂の検出をすることである。特に、星形成直前の高密度コアのトレーサーである、CCS (JN=43-32)、CCS (JN=32-21)、SO (JN=10-01)のラインをターゲットにし、これらの観測が可能なシステムを制作・構築し、偏波観測を行うことが大きな目的である。測定した磁場は視線方向に平行な成分であるので、天球面に平行な磁場成分は直線偏波観測から求められた平均値を使って、3次元磁場強度を推定する。それをを用いて、観測される高密度コアの重力エネルギーと磁場のエネルギーを比較し、磁場で支えられた状態にあるのか、もしくは磁場では安定に支えられない状態にあるのかを統計的に議論する。

3. 研究の方法

まず既存システム Z45 の開発経験を生かして、新しい技術を取り入れた、超高感度で広帯域の新受信機を作成する。ALMA Band-1 受信機の開発実績を持つ台湾中央研究院のグループと連携し、日本チームは光学系開発と分光計開発部分を中心に行う。また、受信機システム完成してなるべく早い段階で偏波観測に移行できるよう、解析ソフトウェアの開発を進める。

4. 研究成果



まず、コロナ禍の影響もあり、開発や観測などが大幅に遅れた。そのため、研究計画としては、偏波観測の実行までが該当年度内に完了することができなかった。しかし、受信機本体は完成し、野辺山 45m 鏡への搭載は 2021 年 11 月 25 日に完了した。左図は実際に 45m 鏡下部機器室に搭載後に撮影された写真である。中央あたりの円筒状の黒い筐体のものが開発した eQ 受信機である。受信機上部に偏波校正のためのワイヤーグリッドシステムが取り付けられている。

設置後の測定で、当初の予定通り、30-50GHz という

広帯域での観測が可能で、受信機のシステム雑音温度

は設計通りに 45GHz で 90 K、33GHz で 60 K となることを確認した。既存の Z45 受信機では、同じ気象状態で、45GHz で 120K 程度であったので、45GHz の観測でも 2 倍程度観測時間の短縮できることになった。さらに、ゼーマン観測のターゲット輝線 CCS (JN=43-32, 32-21)、SO (10-01)の同時観測もおうし座分子雲 TMC-1 にて実行、輝線検出できた。以上のように、開発し

表 1 Yebes 望遠鏡と野辺山の 7mm 帯受信機の性能の比較。両者とも両直線偏波。ビームサイズは 43GHz での値。

	Yebes	野辺山 45 m
口径	40 m	45 m
受信機名	Nanocosmos	eQ
周波数域 (GHz)	31.3–50.6	30–50
最小周波数分解能	6.1 kHz	3.81 kHz
ビームサイズ	40"	38"
開口能率	0.41–0.53	0.61–0.63
主ビーム能率	~0.5	~0.7
T_{sys}	~60 K	60–75 K
SO ($1_0 - 0_1$)	×	○
CCS ($3_2 - 2_1$)	○	○
CCS ($4_3 - 3_2$)	○	○
稼働開始	2019	2022

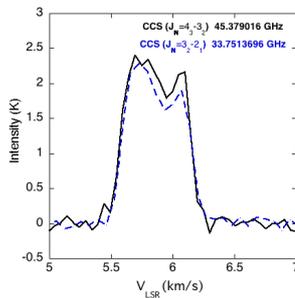
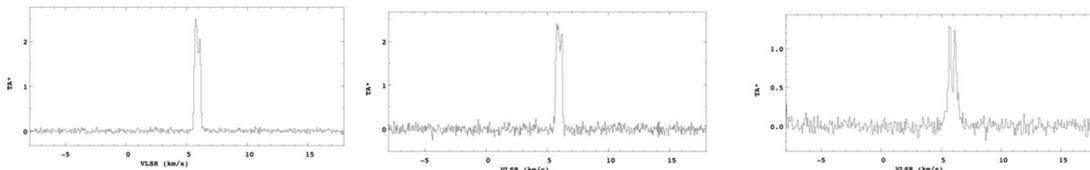
た受信機 eQ は世界で稼働中の Q バンド受信機としては最高性能であることが実証された。参考のため、表に Q バンド受信機で最も性能の良い Yebes の Nanocosmo 受信機との性能の比較をまとめる。

2021 年 12 月に行われた試験観測では、分子雲高密度領域の微弱な分子輝線の検出や高赤方偏移天体からの CO ($J=1-0$) 輝線の検出など、高感度でなければ達成できない天体観測ができることが実証できた。

さらに、ゼーマン観測のターゲットとなる分子雲コアのミニサーベイ観測をおうし座分子雲、ペルセ

ウス座分子雲にて行い、100 個程度のコアの CCS/SO データの取得が完了した。

下図は、実際に得られた CCS ($J_N=3_2-2_1$, 左) 33GHz と CCS ($J_N=4_3-3_2$ 中) 45GHz、SO (1_0-0_1 右) 30GHz のラインプロファイルである。特徴的なのは、SO がダブルピークになり、視線方向に重なった CCS の 4 成分のうちの 2 つに対応していることである。



観測天体は TMC-1 (CP) で、CCS に関してはライン強度・ライン形状とも先行研究の結果を再現した。また、この観測の過程で、CCS の 2 つの輝線の静止周波数が 10kHz ほど間違っている可能性がわかった。ゼーマン観測をするためにも、まず静止周波数が正しくわかっているラインの観測と比較し、CCS の静止周波数の特定をする必要がある。左にその比較結果を示す。観測から測定した静止周波数は、CCS (3_2-2_1) の値を基準にすると、図のように両者の広がり一致するためには、 $J_N=4_3-3_2$ は 45.379016 GHz である必要があることがわかった。ALMA でも用いられる Spatalogue カタログの値と比べると、30kHz ほど小さい。このような観測は、eQ システムの高周波数分解能モードで、SN 比の良い観測データが必要となるので、現在、野辺山に搭載

された eQ 受信機でのみ実行可能である。今後、他のラインを使った詳細な比較から、CCS 両者の静止周波数を 1kHz オーダーで決定する。これとともに、偏波観測のための較正データの取得、実際のゼーマン観測実行を進めていく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Dobashi, K., Shimoikura, T., Nakamura, F., Kamenno, S., Mizuno, I., Taniguchi, K.	4. 巻 864
2. 論文標題 Spectral Tomography for the Line-of-sight Structures of the Taurus Molecular Cloud 1	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/aad62f	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 Tomomi Shimoikura, Kazuhito Dobashi, Fumitaka Nakamura, Tomoaki Matsumoto, and Tomoya Hirota	4. 巻 855
2. 論文標題 A Statistical Study of Massive Cluster-forming Clumps	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1-45
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/aaaccd	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 Wu, Benjamin; Tan, Jonathan C.; Christie, Duncan; Nakamura, Fumitaka; Van Loo, Sven; Collins, David	4. 巻 841
2. 論文標題 GMC Collisions as Triggers of Star Formation. III. Density and Magnetically Regulated Star Formation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/aa6ffa	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 該当する
1. 著者名 Wu, Benjamin; Tan, Jonathan C.; Nakamura, Fumitaka; Christie, Duncan; Li, Qi	4. 巻 70
2. 論文標題 Giant molecular cloud collisions as triggers of star formation. VI. Collision-induced turbulence	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publ. Astron. Soc. of Japan	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pasj/psx140	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 該当する

1. 著者名 Dobashi, Kazuhito ; Shimoikura, Tomomi ; Ochiai, Tetsu ; Nakamura, Fumitaka ; Kamen, Seiji ; Mizuno, Izumi ; Taniguchi, Kotomi	4. 巻 879
2. 論文標題 Discovery of CCS Velocity-coherent Substructures in the Taurus Molecular Cloud-1	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 88
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab25f0	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 Nakamura, Fumitaka ; Kamen, Seiji ; Kusune, Takayoshi ; Mizuno, Izumi ; Dobashi, Kazuhito ; Shimoikura, Tomomi ; Taniguchi, Kotomi	4. 巻 71
2. 論文標題 First clear detection of the CCS Zeeman splitting toward the pre-stellar core, Taurus Molecular Cloud 1	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publ. Astron. Soc. of Japan	6. 最初と最後の頁 117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz102	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 Pillai, Thushara G. S. ; Clemens, Dan P. ; Reissl, Stefan ; Myers, Philip C. ; Kauffmann, Jens ; Lopez-Rodriguez, Enrique ; Alves, F. O. ; Franco, G. A. P. ; Henshaw, Jonathan ; Menten, Karl M. ; Nakamura, Fumitaka ; Seifried, Daniel ; Sugitani, Koji ; Wiesemeyer, Helmut	4. 巻 4
2. 論文標題 Magnetized filamentary gas flows feeding the young embedded cluster in Serpens South	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 1195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-020-1172-6	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 該当する

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 楠根貴成、中村文隆、土橋一仁、下井倉ともみ、杉谷光司
2. 発表標題 Serpens South Cloudの近赤外線偏光観測
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 玉置捷平, 杉谷光司, 楠根貴成
2. 発表標題 大質量星形成領域 RCW106 分子雲の近赤外線偏光観測
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 楠根貴成, 中村文隆, 土橋一仁, 下井倉ともみ, 杉谷光司
2. 発表標題 Magnetic Field Structure of Serpens South
3. 学会等名 Magnetic fields along the star-formation sequence (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村文隆, 楠根貴成, 亀野誠司, 土橋一仁, 下井倉ともみ, 谷口琴美, 水野いづみ
2. 発表標題 TMC-1におけるゼーマン分裂検出と磁場強度測定
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nakamura, F
2. 発表標題 CCS Zeeman Observations using NRO 45-m telescope
3. 学会等名 NAOJ-ASIAA Joint workshop on 40GHz Receiver (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kusune, T.
2. 発表標題 Magnetic field structure of Serpens South
3. 学会等名 NAOJ-ASIAA Joint workshop on 40GHz Receiver (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村文隆、Chau-Ching Chiong、西村淳、Ross Burns、谷口琴美、川邊 良平、藤井泰範、山崎康正、小川英夫、米倉覚則、土橋一仁、下井倉ともみ
2. 発表標題 野辺山 45m 鏡に搭載された eQ 受信機計画の概要と現状
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山崎康正 (大阪府大)、中村文隆、Chau-Ching Chiong、西村淳、Ross Burns、谷口琴美、川邊 良平、米山翔、川下紗奈、知念翼、小西亜侑、西本晋平、孫赫陽、小川英夫、大西利和、米倉覚則、土橋一仁、下井倉ともみ
2. 発表標題 野辺山 45 m 鏡 eQ 受信機の搭載及び光学系の評価
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2022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	小川 英夫 (Ogawa Hideo) (20022717)	大阪府立大学・理学(系)研究科(研究院)・客員教授 (24403)	

6. 研究組織（つづき）

	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	土橋 一仁 (Kazuhito Dobashi) (20237176)	東京学芸大学・教育学部・教授 (12604)	
研究分担者	亀野 誠二 (Seiji Kamenno) (20270449)	国立天文台・チリ観測所・教授 (62616)	
研究分担者	杉谷 光司 (Sugitani Koji) (80192615)	名古屋市立大学・大学院システム自然科学研究科・教授 (23903)	

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2件

国際研究集会 NAOJ-ASIAA Joint Workshop on Power of wideband receiver: Exploring sciences at 7mm wavelength with large single dish telescopes	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 Power of wideband receiver: Exploring sciences at 7mm wavelength with large single dish telescopes	開催年 2019年～2019年

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