

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24244017

研究課題名(和文) CCSゼーマン効果と理論計算を連携させた星形成における磁場の役割の研究

研究課題名(英文) Toward Understanding of role of magnetic field in the process of star formation

研究代表者

中村 文隆 (Nakamura, Fumitaka)

国立天文台・理論研究部・准教授

研究者番号：20291354

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,700,000円

研究成果の概要(和文)：星形成における磁場の役割はよく理解されていない。その主な理由は、磁場強度の測定が困難だからである。本研究の目的は、星形成領域、特に高密度コアの磁場構造とその力学的役割に制限を与えることである。まず、ゼーマン観測を行うための受信機システムを開発し、野辺山45m鏡を用いて、星形成前のコアに豊富に存在するCCS分子輝線のゼーマン観測を行い、星形成前のコアの磁場強度を測定した。その結果、TMC-1コアに対して、CCSでは初めてのクリアなゼーマン分裂の検出に成功し、約200マイクロガウスという強い磁場でコアが支えられていることを発見した。理論研究では、直線偏波マップを作成するツールを開発した。

研究成果の概要(英文)：It remains uncertain how magnetic fields are important in the process of star formation. The main reason is the technical difficulty of the measurements of the field strength. In this study, to derive the magnetic field associated with dense cores, we carried out Zeeman observations of CCS which is abundant in the prestellar phase. As a result, we detected a first clear Zeeman splitting of CCS and derived the field strength of about 200 micro Gauss toward TMC-1. This suggests that the TMC-1 core is magnetically supported against the gravitational collapse. For theoretical study, we developed a tool to make polarisation maps with numerical simulation data.

研究分野：理論天文学

キーワード：磁場 電波観測 ゼーマン分裂 分子雲

1. 研究開始当初の背景

星形成過程における磁場の役割はよくわかっていない。その主な理由は、磁場強度を物理の第一原理から導出することができないため、磁場が星形成コアの力学状態に及ぼす影響が定量的に調べられないからである。したがって、磁場の強度を観測的に測定することが非常に重要である。しかし、宇宙空間の磁場の強度を観測的に測定する方法は、非常に限られている。星形成領域の磁場の観測は(1)直線偏波による磁場の天球面方向の向きの観測や(2)ゼーマン観測による視線方向の強度測定などにより行われている。前者の直線偏波観測からは磁場の向きしか求められないので、強度を測定するには後者のゼーマン観測を実施するしかない。

特に星形成過程における磁場の役割を調べるには、星形成が起こる直前の高密度分子雲コア(星なしコア)の磁場を測定することが重要である。本研究開始当初は、世界的にも国内でも直線偏波観測が中心に行われてきた。ゼーマン観測に関しては、日本には分子雲コアに向けたゼーマン観測を実行する観測装置がなく、また、世界的にも星形成前のコアに向けたゼーマン観測はアレシボ望遠鏡、グリーンバンク望遠鏡、IRAM望遠鏡などの限られた望遠鏡でしか行われず、星形成における磁場の役割は全く理解が進んでこなかった。日米欧共同のALMA望遠鏡では、将来、ゼーマン観測モードがオープンされる方向で作業が進んでおり、ALMAに向けた観測準備という意味でも、単一鏡によるゼーマン観測の実行は重要な状況であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、星形成前の高密度コアに付随する磁場強度をゼーマン観測により測定することである。そのために、星なしコアで豊富に存在するCCS分子輝線に着目した。CCSは星形成前でのみ豊富に存在し、比較的大きなゼーマン分裂ファクターを持つ。45GHzのCCS分子輝線のゼーマン観測により測定し、星形成過程における磁場の役割について制限を与えることが主な目的である。

しかし、ゼーマン観測だけでは、磁場の視線成分の強度しかわからず、磁場の3次元構造の理解のためには、数値シミュレーションを組み合わせた、観測と理論を密に連携させた解析が重要となる。そのような研究を実行することで、星なしコアの重力収縮過程における磁場の力学的役割に制限を与えることが具体的な目的である。

3. 研究の方法

まず、ゼーマン観測を実行するためのシステムが必要となるので、45GHzのCCS分子輝線の偏波観測を実行するための電波受信機システムの開発を行った。星なし高密度コアの典型的なサイズは0.1pc程度であるので、このコアを適度な空間分解能で観測するに

は、大口径の電波望遠鏡が必要となる。そこで、野辺山電波観測所の45m電波望遠鏡用の受信機システムを開発した。45m鏡を用いれば、近傍の星形成領域では0.02pc程度の空間分解能が達成でき、コアの中心部を分解することが可能である。

また、ゼーマン分裂はCCSのゼーマンファクターの大きさから、100Hzオーダーと小さいことが予想されるので、それを適度に分解するために、新しく分光計の開発も行った。開発した分光計はPolarisと呼ばれ、周波数分解能は60Hzになった。

4. 研究成果

ゼーマン観測では、左右両偏波の差のスペクトルがストークスVパラメータに比例すること、その差の周波数が磁場強度によって一意に決まることから、磁場強度を測定する。

ストークスVスペクトルの強度はストークスIの数パーセント程度と予想されるので、強いCCS輝線を放出する星なしコアをターゲットに選ぶことにした。まず、先行研究の結果と開発の新システムを使った新たなコアの探査により、ターゲットコアの順位付けを行った。

次に、そのターゲットに向けたゼーマン観測を実行した。ターゲットとして、TMC-1コア、TMC-1(OH)コア、L1495B、L1521B、Serpens South星なしコアの5つのコアの観測を行った。その結果、TMC-1コアにおいて、200マイクロガウスの磁場強度の検出に成功した。他のコアに対しては、磁場強度の上限は、100マイクロガウス以下であることが分かった。

TMC-1コアに対しては、ハーシェルによる柱密度の測定結果を用いて、コアを安定に支えることのできる強度を見積もったところ、200マイクロガウス程度になると見積もられた。つまり、本測定から、TMC-1コアは、磁場で安定に支えられた力学状態にあることが予想された。

数値シミュレーションとの密な連携を目指し、MHDシミュレーションデータから、分子雲のダスト連続波による直線偏波マップを作成するツールを開発した。また、磁気拡散を入れた分裂の数値計算を実行し、コア形成過程を調べた。その結果は、現在論文にまとめているところである。この計算データとTMC-1コアの磁場観測とを比較し、このコアの磁場構造とに磁場の力学的役割について力を深める予定である。

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10件)

First Clear Detection of CCS Zeeman Splitting of TMC-1, Nakamura, F., Kameno, S., Mizuno, I., Dobashi, K.,

Shimoikura, T., Taniguchi, K. in Star Formation in Different Environments, 2017, in press, , 査読無

GMC Collisions as Triggers of Star Formation. II. 3D Turbulent, Magnetized Simulations, Wu, B., Tan, J. C., Nakamura, E., Van Loo, S., Duncan, C., Collins, D. 2016, ApJ, 835, 137, 査読有
DOI: 10.3847/1538-4357/835/2/137

Dense Clumps and Candidates of Molecular Outflows in W40, Shimoikura, T., Dobashi, K., Matsumoto, T., Nakamura, E. 2015, ApJ, 806, 201, , 査読有
DOI:10.1088/0004-637X/806/2/201

Z45: A new 45-GHz band dual-polarization HEMT receiver for the NRO 45-m radio telescope, Nakamura, E., Ogawa, H., Yonekura, Y. et al. 2015, PASJ, 67, 6, , 査読有
DOI: 10.1093/pasj/psv088

Cluster Formation Triggered by Filament Collisions in Serpens South, Nakamura, E., Sugitani, K., Tanaka, T., Nishitani, H., Dobashi, K., Shimoikura, T., Shimajiri, Y., Kawabe, R., Yonekura, Y., Mizuno, I., Kimura, K., Tokuda, K., Kozu, M., Okada, N., Hasegawa, Y., Ogawa, H., Kameno, S., Shinnaga, H., Momose, M., Nakajima, T., Onishi, T., Maezawa, H., Hirota, T., Takano, S., Iono, D., Kuno, N., Yamamoto, S. 2015, ASP Conf. Series, 499, 239, 査読有

Software Polarization Spectrometer “PolariS”, Mizuno, I., Kameno, S., Kano, A. et al. 2014, AI, 3, 1450010, 査読有
DOI: 10.1142/S225117171450010X

Cluster Formation Triggered by Filament Collisions in Serpens South, Nakamura, E., Sugitani, K., Tanaka, T., Nishitani, H., Dobashi, K., Shimoikura, T., Shimajiri, Y., Kawabe, R., Yonekura, Y., Mizuno, I., Kimura, K., Tokuda, K., Kozu, M., Okada, N., Hasegawa, Y., Ogawa, H., Kameno, S., Shinnaga, H., Momose, M., Nakajima, T., Onishi, T., Maezawa, H., Hirota, T., Takano, S., Iono, D., Kuno, N., Yamamoto, S. 2014, ApJ, 791, L23, 査読有
doi:10.1088/2041-8205/791/2/L23

The software-based polarization spectrometer PolariS
Kameno, S., Mizuno, I., Nakamura, E.,

Kuroo, M., Kano, A., Kawaguchi, N., Shibata, K. M., Kuno, N., Takano, S., Kuji, S. Proceedings of the SPIE, Volume 9153, id. 91532D, 2014, 査読無
<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1891556>

A New 45 GHz Band Receiver with Dual Polarization for NRO 45-m telescope.
Tokuda, K., Kozu, M., Kimura, K., Muraoka, K., Maezawa, H., Onishi, T., Ogawa, H., Nakamura, E., Kuno, N., Takano, S., Iono, D., Kawabe, R., Kameno, S. New Trend in Radio Astronomy in the ALMA Era: ASP Conference Series, 2013, 476, 403, 査読無
<http://aspbooks.org/custom/publications/paper/476-0403.html>

The CCS 45 GHz Zeeman Project: Magnetic Field Towards Prestellar Cores,
Nakamura, E., Ogawa, H., Kameno, S., Kimura, K., Mizuno, I., Tokuda, K., Kozu, M., Tanaka, T., Iono, D., Takano, S., Dobashi, K., Matsumoto, T., Kuno, N., Kawabe, R., Onishi, T., Momose, M., Shinnaga, H., Yamamoto, S., Maezawa, H., Hirota, T. New Trend in Radio Astronomy in the ALMA Era: ASP Conference Series, 2013, 476, 239, 査読無
<http://aspbooks.org/custom/publications/paper/476-0239.html>

〔学会発表〕(計 28 件)

Discovery of A Magnetically Subcritical Core,
Nakamura, E., Kameno, S., Mizuno, I., Dobashi, K., Shimoikura, T., Taniguchi, K., S, May 23 – May 26, 2016, Star formation, magnetic fields, and diffuse matter in the galaxy, Wisconsin (USA)

Are Prestellar Cores Magnetically Subcritical?
Nakamura, E., Kameno, S., Mizuno, I., Dobashi, K., Shimoikura, T., Taniguchi, K., S, June 27 – July 1, 2016, Early Phase of Star Formation 2016, Rindberg (Germany)

First Clear Detection of CCS Zeeman Splitting Toward TMC-1,
Nakamura, E., Kameno, S., Mizuno, I., Dobashi, K., Shimoikura, T., Taniguchi, K., S, July 25 – July 29, 2016, Star Formation in Different Environments, Qui Nyon (Vietnam)

Evaluation of Single Dish Zeeman Observations using ALMA Band-1 Receiver,

Chau-Ching Chong, Nakamura, F., 2016 ALMA/ASTE/NRO Users Meeting, NAOJ, (Mitaka, Tokyo, Japan)

Preparatory Survey and Polarization Experiments with Enhanced ALMA Band-1 Receiver At Nobeyama 45-m Telescope, Nakamura, F., Chau-Ching Chong, 2016 ALMA/ASTE/NRO Users Meeting, NAOJ, (Mitaka, Tokyo, Japan)

Giant Molecular Cloud Collisions as Triggers of Star Formation
Wu, B., Tan, J. C, Van Loo, S., Nakamura, F., Brudeler, S. 2016, American Astronomical Society, AAS Meeting #227 (USA)

磁場で支えられた分子雲コアの発見、中村文隆 他, 2016年3月14日~3月17日, 日本天文学会春季年会 首都大学東京(東京都八王子市)

ゼーマン効果検出を念頭においた TMC-1 周辺の CCS/HC3N の OTF 観測
土橋一仁 他, 2016年3月14日~3月17日, 日本天文学会春季年会 首都大学東京(東京都八王子市)

TMC-1 における CCS 分子輝線のゼーマン効果計測検証、亀野誠二 他, 2016年3月14日~3月17日, 日本天文学会春季年会 首都大学東京(東京都八王子市)

CCS ゼーマン観測による Prestellar Core の磁場測定
中村文隆, 2016年1月26日~1月28日
偏波・偏光観測によるサイエンス、茨城大(茨城県水戸市) 招待講演

偏波観測の戦略と較正方法
亀野誠二, 2016年1月26日~1月28日
偏波・偏光観測によるサイエンス、茨城大(茨城県水戸市) 招待講演

Cluster Formation Triggered by Filament Collisions in Serpens South,
Nakamura, F., Sugitani, K., Tanaka, T. et al. August 3 – August 14 2015, IAU General

Assembly in Hawaii, Meeting #29, Hawaii (USA)

CCS Zeeman Observations towards TMC-1
Nakamura, F., Kameno, S., Mizuno, I., Dobashi, K. et al. June 29 – July 1, 2015, Star Formation Workshop 2015, From Clouds to Cores, NAOJ, (Mitaka, Tokyo, Japan)

Cluster Formation : The Case of Serpens South Triggered by Cloud-Cloud Collision: The Case of Serpens South,
Nakamura, F., Kameno, S., Mizuno, I., Dobashi, K. et al. November 11 – November 15, 2014, The Early Life of Stellar Clusters: Formation and Dynamics Noordwijk, (Netherlands)

Cluster Formation Induced by Filament Collisions,
Nakamura, F., Kameno, S., Mizuno, I., Dobashi, K. et al., December 8 – December 11, 2014 Tokyo International Forum, (Tokyo, Japan) Revolution in Astronomy with ALMA – The Third Year

Magnetic Fields in Star-Forming Regions,
Nakamura, F., Kameno, S., Mizuno, I., Dobashi, K. et al., March 10 – March 11, 2014, The 3rd Workshop on Large Aperture mm/submm Telescopes in The ALMA era 招待講演, NAOJ, (Mitaka, Tokyo, Japan)

Evaluation of Single Dish Zeeman Observations using ALMA Band-1 Receiver,
Chau-Ching Chong, Nakamura, F., March 10 – March 11, 2014 The 3rd Workshop on Large Aperture mm/submm Telescopes in The ALMA era, NAOJ, (Mitaka, Tokyo, Japan)

Revealing the Initial Conditions of Star Cluster Formation: The Case of Serpens South,
Nakamura, F., Kameno, S., Mizuno, I., Dobashi, K. et al. November 3 – November 7, 2014, The Early Life of Stellar Clusters: Formation and Dynamics, Copenhagen (Denmark) 招待講演

野辺山 45m 鏡における 40GHz 帯偏波計測システム
水野いずみ, 亀野誠二 他
2014年9月13日
日本天文学会秋季年会 山形大(山形県山形市)

単一鏡電波観測における偏波計測手法
水野いずみ、亀野誠二他
2013年3月20日
日本天文学会春季年会、国際基督教大（東京都三鷹市）

⑳ 野辺山 45m 鏡 45GHz 帯新受信機を用いた CCS マッピング観測
中村文隆
2013年9月10日
日本天文学会秋季年会、東北大（宮城県仙台市）

㉑ 野辺山 45m 電波望遠鏡搭載 45GHz 帯新受信機（Z45）の試験観測
落合哲、土橋一仁、下井倉智美他
2013年9月12日
日本天文学会秋季年会 東北大（宮城県仙台市）

㉒ 野辺山 45m 電波望遠鏡搭載 45GHz 帯新受信機（Z45）の開発
岡田望、小川英夫、木村公彦他
2013年9月12日
日本天文学会秋季年会 東北大（宮城県仙台市）

㉓ 野辺山 45m 電波望遠鏡搭載 45GHz 帯新受信機（Z45）のアンテナ搭載試験
米倉覚則、小川英夫、中村文隆他
2013年9月10日
日本天文学会秋季年会 東北大（宮城県仙台市）

㉔ ソフトウェア偏光分光計 PolariS の開発 II
水野いずみ、亀野誠二他
2013年9月10日
日本天文学会秋季年会 東北大（宮城県仙台市）

㉕ ソフトウェア偏光分光計 PolariS の開発 III---GPU を用いた分光処理
亀野誠二
2013年9月21日
日本天文学会秋季年会 東北大（宮城県仙台市）

㉖ CCS ゼーマン分裂による星なし分子雲コアの磁場強度測定計画
中村文隆
2012年9月20日
日本天文学会秋季年会 大分大（大分県大

分市）

㉗ ソフトウェア偏光分光計 PolariS の開発
亀野誠二
2012年9月21日
日本天文学会秋季年会 大分大（大分県大分市）

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

中村文隆 (Fumitaka Nakamura)
国立天文台・理論研究部・准教授
研究者番号：20291354

(2)研究分担者

亀野誠二 (Seiji Kameno)
国立天文台・チリ観測所・教授
研究者番号：20270449

土橋一仁 (Kazuhito Dobashi)
東京学芸大学・教育学部・教授
研究者番号：20237176

高野秀路 (Shuro Takano)
日本大学・工学部・准教授
研究者番号：00222084

小川英夫 (Hideo Ogawa)

大阪府立大学・理工系研究科・教授
研究者番号： 20022717

松本倫明 (Tomoaki Matsumoto)
法政大学・人間環境学部・教授
研究者番号： 60308004

伊王野大介 (Daisuke Iono)
国立天文台・チリ観測所・准教授
研究者番号： 60425402