

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 19 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800111

研究課題名(和文) 星形成の初期物理状態：3次元磁場構造の探査

研究課題名(英文) Initial Physical Condition of Star Formation: Three Dimensional Magnetic Field Structure

研究代表者

神鳥 亮 (Kandori, Ryo)

国立天文台・太陽系外惑星探査プロジェクト室・研究支援員

研究者番号：90534636

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：磁場は、恒星の形成母体である分子雲コアの安定性と収縮過程に重要な役割を果たすと考えられているが、観測の困難から観測的研究は立ち遅れている。我々は、IRSF/SIRPOLによる近赤外広視野偏光観測に基づき、コアの磁場構造の解明を進めている。

へびつかい座 分子雲を構成する6ヶ所の高密度コア領域では、コア群をゆるやかに繋ぎながら、雲全体に渡って歪んだ磁場構造が得られた。これは同領域で進んでいるクラスター形成過程の影響かもしれない。パイプ星雲領域とグロビュールでは、20天体中3天体に砂時計形状の磁場構造を発見した。この構造は、凍結磁場が重力により歪められながら収縮する標準的なモデルとよく一致する。

研究成果の概要(英文)：Magnetic fields are believed to play an important role in controlling the stability and evolution of molecular cloud cores leading to the formation of stars. We measured the magnetic field geometry across cores on the basis of the polarization of stars located background to the cores in the near-infrared wavelengths. The cores in rho Ophiuchi cloud and Pipe nebula as well as Bok globules were mapped using the SIRPOL polarimeter on the IRSF 1.4m telescope in South Africa.

In the rho Ophiuchi cloud, we found gradual differences in magnetic field direction over the surface of six sub-regions (cores), which make a large distorted field geometry covering the cloud. The cluster formation process taking place in this region may be the origin of the field distortion. In the Pipe nebula region and Bok globules, we found 3 out of 20 cores with axisymmetrically curved (hourglass-shaped) magnetic fields, suggesting the distortion of frozen-in magnetic field under the influence of gravity.

研究分野：星間物理学

キーワード：星形成 赤外線天文学 偏光 ダスト

1. 研究開始当初の背景

恒星の形成メカニズムの解明は、天文学の重要な未解決問題である。誕生後の恒星の進化は、観測が比較的容易なこともあり、基本シナリオに関しては理論面からの理解も進んでいる。しかし、恒星の誕生以前の物理状態は、星形成の初期条件を決めるという本質的重要性にも関わらず、観測的困難から未解明な点が多く残されている。これは、恒星誕生に向けた物理プロセスが、厚いガスと塵に包まれた濃密で冷たい領域の深部で進行し、何が起きているかの理解と精密な観測が難しいためである。

恒星の形成母体は、高密度のガスと塵の塊(分子雲コア)である。星形成に向けた重力収縮の開始直前の段階にあると思われる分子雲コアの探査や、その初期物理状態の測定、内部構造、力学的安定性の解明などは「星形成の初期条件問題」と呼ばれ、急速に進展しつつある分野である。しかし、物理量の中でも特に磁場については、分解能と感度の点で十分な観測装置の不在から、観測的理解が立ち遅れてきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、星形成の初期物理状態を決める最後のピースである初期磁場構造を観測的に解明することである。分子雲コア内外の磁力線構造、磁場強度、力学的安定性といった重要な物理情報についての普遍的描像をまず明らかにし、次いで多様性の理解を進めていく。

恒星の形成母体である分子雲コアの性質(サイズ、質量、密度、温度、乱流、磁場など)が、形成される星の物理量を決めると考えられている。ひとたびコアの自己重力が他のコアをサポートする力(熱、乱流、磁場)を上回ったとき、その後の収縮を止めるメカニズムは存在しない。したがって、分子雲コアが自己重力収縮を開始した瞬間に持つ物理量が、星形成過程の初期物理状態を決めることになる。

磁場以外の分子雲コアの物理量は比較的良く決定されている。典型的な値は、質量 $\sim 1-10$ 太陽質量、直径 $\sim 10^4$ 天文単位、中心密度 $\sim 10^5$ 個/cc、温度 ~ 10 K である。コア内の物質は、宇宙線により弱く電離しており、中性粒子はイオン粒子との衝突を介して磁場に凍結している。このことにより、コアの自己重力収縮を妨げる力として磁気圧が働く。また、ローレンツ力の非等方性により収縮が磁力線に並行な方向に制御される。このように、磁場は、コアの力学的安定性や収縮過程において重要な役割を果たすと考えられている。

磁場の観測において重要なことは、1) コア内外を取り巻く磁場の形を明らかにすること、2) コアの磁場強度を求めること、の2点である。様々な要因(外部からの圧縮、乱流の散逸、磁場の磁気双極性拡散過程な

ど)で自己重力が優勢になったコアでは、物質に凍結した磁場が重力により引きずられて歪められることが予想される。また、磁場強度の測定からは、エネルギー比較と安定性などの議論が可能になる。これら2点を満たすための磁場観測には、コアを空間的に分解しつつ、濃密なコア中心から希薄な外縁部までを十分な感度で測定できることが求められる。

3. 研究の方法

分子雲コアを貫く磁場構造を探るため、星間磁場に対して整列した塵粒子が引き起こす偏光の観測を用いる。星間塵粒子の磁場による整列機構の研究によれば、弱く磁化した回転する非球形塵粒子は、磁気的相互作用によりその回転軸(短軸)が周囲の星間磁場と平行な向きに整列することがわかっている。この物理機構に基づいて、塵の偏光分布(放射・吸収)の観測から、磁場の向きの分布をマッピングできる。

これまで遠赤外線やサブミリ波領域での塵の放射偏光の測定に基づいて、コアの磁場構造探査が精力的に行われてきた。しかし、同波長域での大気の透過率の悪さと装置感度・分解能の両面の不足により、得られる測定点は濃密なコア中心のごく近傍のみにとどまっており、コア中心から外縁部までに至る広い領域の磁力線分布をまんべんなくトレースできた事例は無い。これから本格化するALMAの偏波観測運用においても、この厳しい状況は変わらず、分解能は劇的に改善されるものの、中心から離れた領域では感度とレゾルブアウトなどの問題から磁場のマッピングは困難だと思われる。

我々は、これらの困難を回避するために、分子雲コアの背後の星々を光源として、塵による吸収偏光を測定する方法を用いている。塵に対する透過力の高い近赤外波長域において広視野・高感度の偏光撮像を行い、コアを通過してきた多数の星々が受ける吸収偏光を観測する。

我々は、南アフリカ共和国で運用中のIRSF 1.4 m 望遠鏡のための広視野近赤外向撮像装置SIRPOLを開発してきた。IRSF/SIRPOLを用いた近傍分子雲コアの観測では、コア1天体あたり典型的には100-1000点の測定点がコア中心から外縁部までで確保できる。この測定点数は、コアを取り巻く磁場の形を決めることと、偏光角分散の統計(チャンドラセカール・フェルミ法)から磁場強度を見積もること、の両方の解析を行うのに十分な数である。

IRSF/SIRPOLの大きな特徴は、十分に深い感度を持ちつつ、競合装置と比べて広視野撮像(8分角、近赤外3バンド同時)が可能であることと、専有望遠鏡のための専有装置(長期・長時間観測が可能)であることである。分子雲コアの詳細観測と多天体サーベイを効率よく進められるのは、現時点において

も本装置のみである。

4. 研究成果

研究期間全体を通じて、南アフリカ 1.4m 望遠鏡 IRSF と近赤外 3 色同時偏光撮像装置 SIRPOL の運用と改良ならびに科学的観測を推進し、データ解析パイプラインの開発も併せて行った。

分子雲コアの観測領域は、銀河中心方向に存在する近傍分子雲複合体であるパイプ星雲、その近傍にあるへびつかい座 分子雲、ならびに孤立した分子雲コア群 (ボック・グロビュール) である。

へびつかい座 分子雲の観測 (発表論文 1) では、分子雲内部で 6 ヶ所 (Oph-A, B, C, E, F と Oph-AC) に分かれている高密度コア領域 ($A_V > 50$ mag) の場所毎に異なる磁場の向きが得られた。コア群の磁場構造はゆるやかに繋がりながら、分子雲全体をカバーするように歪んだカーブを描いていることがわかった。より広範囲をカバーする可視偏光の先行研究と、濃密な部分までを網羅する我々の近赤外偏光のデータとの比較に基づいて、我々はへびつかい座 分子雲の高密度領域の歪んだ磁場構造の起源として、近傍の Scorpius-Centaurus OB アソシエーションからの圧縮により進むクラスター形成過程による影響を受けているというシナリオを提唱した。

パイプ星雲領域とボック・グロビュールでは、20 天体の観測のうち 3 天体 (原始星付随: 1 天体、付随無し: 2 天体) に軸対称に歪んだ砂時計形状の磁場構造を発見した。この構造は、物質に凍結した磁場が重力により歪められながら収縮していく標準的な理論モデルとよく一致する。特に、原始星の付随が無い「星なしコア」周囲に物質集積の履歴とも言える砂時計型の磁場構造を発見したことは、星形成の最初期段階 (恒星誕生以前・重力収縮以後) のコアサンプルとして重要である。

我々は観測した全てのコアにおいて、ダスト吸収量 (A_V) と偏光度 (P) とが比例関係 (偏光効率 $P/A = \text{一定}$) にあるという重要な結果を得た。このことは、1) 観測された吸収偏光が確かにコア内部で磁場に整列した塵により引き起こされていることの直接的な証拠になるだけでなく、2) 近年いくつかの論文において強調される「分子雲コア深部における偏光効率 P/A の低下傾向の観測」と我々の観測とが一致しない、という 2 つの点で重要である。ダスト吸収と偏光との相関関係は、冷たく高密度なコア内部におけるダスト粒子の磁場への整列機構の理論 (特に輻射トルクによるダスト整列機構) が成立するかどうかにおいて決定的に重要であるため、これらのデータの出版準備を急いでいる。

IRSF/SIRPOL の装置・運用面では、望遠鏡への SIRPOL 着脱部の改良を行い、直線偏光モードと円偏光モードとの切り替えが迅速

(数分以内) に行えるようになった。このために、近赤外円偏光撮像による大規模観測が可能となり、2014 年度に星形成領域の近赤外円偏光サーベイの論文として出版した (Kwon, Tamura, Kandori et al., 2014, *Astrophysical Journal Letters*, 795, 16)。

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 1 件)

Jungmi Kwon, Motohide Tamura, James H. Hough, Yasushi Nakajima, Shogo Nishiyama, Nobuhiko Kusakabe, Tetsuya Nagata, and Ryo Kandori,

“Wide-field Infrared Polarimetry of the Ophiuchi Cloud Core”, 2015, *Astrophysical Journal Supplement*, 220, 17-33 査読有り

DOI: 10.1088/0067-0049/220/1/17

[学会発表] (計 0 件)

[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

神鳥 亮 (KANDORI, Ryo)

国立天文台・太陽系外惑星探査プロジェクト

室・研究支援員

研究者番号: 9 0 5 3 4 6 3 6

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者
()

研究者番号：