

機関番号：62616

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21740147

研究課題名（和文） 星形成の初期物理状態の解明：磁場構造の詳細観測

研究課題名（英文） Determination of Initial Magnetic Condition of Star Formation

研究代表者

神鳥 亮 (KANDORI RYO)

国立天文台・光赤外研究部・研究員

研究者番号：90534636

研究成果の概要（和文）：恒星の形成母体である高密度ガス塊に付随する磁場構造を初めて明らかにするための大規模観測を、世界最高性能の広視野探査能力をもつ近赤外線偏光装置 SIRPOL で行った。この観測により星間物質の自己重力収縮により形成されたとと思われる砂時計型に湾曲した磁力線形状を伴う高密度ガス塊を発見した。このような天体は、恒星形成の極めて初期段階に位置すると考えられ、星形成の初期物理条件解明のための極めて重要なサンプルである。

研究成果の概要（英文）：Extensive near-infrared polarimetric observations have been conducted to reveal the magnetic field structure associated with dense gas clump, which is a parent object of newly formed stars. We discovered a dense gas clump associated with distorted magnetic field structure reminiscent of "hourglass". The structure is an indicative of frozen-in uniform magnetic fields dragged by gravitationally contracting medium. The dense gas clumps with distorted magnetic fields should be in the very early stage of star formation, and are invaluable samples for the determination of initial physical condition of star formation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：天文学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：光学赤外線天文学、磁場、ダスト、偏光

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理論・観測の両面から解明が進んでおり、特に、その進化過程が主に恒星の質量により決定されることは古くからわかっている。一方で、恒星の誕生以前の物理状態は、その本質的重要性が注目されてきたにも関わらず、観測が困難である等の理由から、未解明な点

が多く残っている。

星形成過程ならびに形成される星の性質（質量など）は、恒星の形成母体である高密度ガス塊（高密度の分子ガスとダストの塊）が重力収縮を開始した時点に持つ物理的性質（サイズ、質量、密度構造、磁場構造など）により決定されると考えられている。特に極めて進化の初期段階（重力収縮の開始直前・恒星の誕生直前）にあると思われる高密度ガス

塊の探査やその質量・内部構造・力学的安定性などの解明は、「星形成の初期条件問題」と呼ばれ、近年、急速に観測や理論的検討が進んでいる分野である。

磁場以外のガス塊の物理量に関しては、過去の観測（遠赤外線でのダストの熱放射観測や電波領域での分子ガス輝線観測など）から比較的良く決定されてきた。その典型的な値は、質量 $\sim 1\text{--}10$ 太陽質量、直径 $\sim 10^4$ 天文単位、密度 $\sim 10^5$ 個/cc、温度 $\sim 10\text{ K}$ である）。しかしながら、星形成に本質的な役割を果たす磁場の情報については観測的困難のためほとんどわかっておらず、新たな装置による大規模な磁場観測が待望されていた。

本研究で目指すのは、この未解明領域である「高密度ガス塊の磁場構造」の観測的解明である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、恒星の母体である高密度ガス塊を多数観測し、その周囲に伴う磁場の強さと磁力線構造の形状を初めて明らかにすることである。これにより、星形成の初期物理状態の研究において未解明であった最後の物理量である磁場情報を獲得する。

高密度ガス塊内の物質は、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ガス塊を貫く星間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き、また、ローレンツ力の非等方性により、ガス塊の収縮方向が（磁力線に沿った方向に）制御される。このように、磁場はガス塊の力学的安定性や重力収縮過程において重要な役割を果たしていると考えられている。しかしながら、ガス塊の磁場構造は、観測的によく解明されていない。これまで遠赤外・サブミリ波領域でのダスト熱放射の偏光観測により磁場構造が調べられてきたが、既存の観測装置の感度不足のため、コア中心から外縁部までに至る領域を貫く磁力線分布を十分にトレースできた事例は無い。

本研究では、星形成における磁場の役割（磁気圧によるガス塊支持、収縮方向のコントロールなど）を観測的に解明すると共に、高密度ガス塊から恒星誕生までの進化を理論モデルとの比較により研究する。

3. 研究の方法

世界最高性能の近赤外線偏光観測装置

(SIRPOL)を開発したことにより、宇宙を漂う高密度ガス塊を貫く磁場の向きや強さを高精度かつ広域にマッピングすることが可能になった。この装置を南アフリカ共和国で運用中の1.4-m赤外線望遠鏡IRSF（国立天文台・名古屋大学）に取り付けて観測を進めている。

測定するのはこれまで主流であった宇宙塵からの熱放射の偏光ではなく、宇宙塵による二色性吸収により引き起こされる吸収偏光である。星間塵粒子の磁場による整列機構の研究によれば、弱く磁化した非球形塵粒子は、磁氣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になる向きにトルクを受けて整列することがわかっている。高密度ガス塊内の塵粒子が発する熱放射（遠赤外線）の偏光観測から天球面上に投影したガス塊を貫く磁力線分布を観測できることが知られている。しかしながら、遠赤外波長域での地球大気の透過率は悪く、既存の装置の感度では、濃密なガス塊中心部の数点の位置でしかデータを取得できない。

我々はこの困難を乗り越えるため異なるアプローチを用いる。それは、高密度ガス塊の背後の星々（無偏光）を光源として、ガス塊内の塵による吸収偏光（星間偏光）を近赤外線の波長域で調べる手法である。

可視光の波長域では半世紀以上前からダストの吸収偏光の観測が行われてきており、これにより銀河系の星間磁場の向きや強度が測定されてきた。しかしながら、可視光域の観測が有効なのは希薄な星間物質に対してのみである。物質が高密度に濃縮した領域（可視光で5等級以上の減光、粒子柱密度 $\sim 5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ ）では、ダスト粒子による減光が激しく、領域の背後の星々の観測は不可能である。このため、高密度ガス塊の磁場構造を調べるためには、可視光に比べてダストに対する透過力の強い近赤外波長（ $1\text{--}2 \mu\text{m}$ ）での偏光観測が必要である。

近赤外波長域では、星間ダストによる減光係数が可視域の1/10になるため、高密度ガス塊（粒子柱密度 $\sim 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ ）の中心方向であっても見通して背後の星々からの光を検出できる。このように、ダスト吸収に対する透過力の高い近赤外波長域において十分に広い視野と感度の偏光撮像を行えば、高密度ガス塊を通過してきた多数の星々が被る吸収偏光を測定可能である。IRSF/SIRPOLによる近赤外偏光観測では、典型的には高密度ガス塊1天体あたり100点以上の磁場測定点を確保できる。これにより、ガス塊を取り巻く磁力線構造を中心部から外縁部まで、一筆書きでなぞれるほどの精度でトレースできる。

IRSF/SIRPOLの最大の特徴は、他の類似の装置と比べて圧倒的に（1桁以上）広い観測視野（約8分角）を持つことである。3個の近赤外検出器（1024x1024素子）を装備し、近赤外域の3バンド（J, H, Ksバンド、 $1\text{--}2 \mu\text{m}$ ）を同時に偏光撮像できる非常にサーベイ効率の高い装置である。他の類似装置で数十回の撮像とモザイクを要する広大な領域を、IRSF/SIRPOLでは1回の観測でカバー

できる。約8分角という視野は、太陽系近傍に存在する高密度ガス塊の視直径とほぼ同じである。高密度ガス塊の詳細観測と多天体サーベイを効率良く推進できるのは、現時点で本装置だけである。

観測では、実際に恒星の形成が起きている太陽系近傍(1000光年以内)の星間分子雲複合体中の高密度ガス塊を多数観測し、ガス塊周囲の磁場分布を詳細にマッピングする。このような観測は他に例がない。吸収偏光の背景光源としてフィールド星を用いるため、この研究では天球面上での星々の分布密度が磁場測定点数に直結する。このため、天の川から離れた星々の分布密度が低い領域(高銀緯領域)は観測しない。銀河中心方向に近く、天の川や銀河系バルジの星々を背景光源として使いやすい近傍分子雲複合体の中でも恒星形成の観点から特に興味深いパイプ星雲やへび座分子雲などの領域を集中的に観測する。

4. 研究成果

銀河中心方向のパイプ星雲領域を中心に25視野、へび座分子雲複合体の高密度ガス塊に対して9視野の観測を行った。それぞれのガス塊の内外で100点以上の磁場の向きを測定したことにより、ガス塊を貫く大局的磁場の方向、磁力線分布の形、磁場強度が求められた。

特に重要な成果は、砂時計型に湾曲した磁力線構造を伴う高密度ガス塊の発見である(査読付き論文1件目および学会発表)。パイプ星雲領域で2天体、はえ座領域で1天体、へび座領域で1天体を発見した。これらのガス塊に伴う磁場構造は、ガス塊周囲で直線的によく揃った向きに分布しているが、ガス塊の両サイドでガス塊中心に向かってくびれた形状を示す(砂時計構造)ことがわかった。

このような軸対象な「砂時計状」の歪みは、宇宙線により弱く電離した物質に凍結した一様磁場が自己重力収縮により引きずられると形成されることが理論的にわかっている。高密度ガス塊の周囲でこのような砂時計型磁場構造(磁場の重力湾曲)が見つかったのは、これが初めてである。追観測を含めた解析から、複数の天体での発見例を積み重ねたことにより、このような砂時計型磁場構造が宇宙に普遍的に存在するらしいことが明らかになった。

ガス塊の磁場エネルギーを重力エネルギーと比較したところ、いずれも重力が磁場を上回る(磁気超臨界)ことが判明した。このことは重力収縮により砂時計磁場が形成されるという理論的示唆からも支持される。ガス塊の柱密度分布と磁場構造との比較からは、全てのケースでガス塊の質量分布の短軸方向と磁場の向きが平行になっていること

が判明した。このことは、ローレンツ力の非等方性により、磁力線に沿った方向に制御された物質移動(収縮)が卓越し、そのもとでガス塊形成ならびに中心領域での円盤構造形成が進む途上にあると考えられる。この描像は磁場の効果までを含めた星形成モデルで理論的にもよく説明される。磁場を歪めながら収縮するガス塊は星形成の極めて初期段階の天体だと考えられる。星形成の初期物理状態解明のための極めて重要なサンプルを本研究で得ることができた。

今後の展望としては、本研究で発見した天体は重力収縮の開始直後にあると考えられるため、高精度かつ高感度の電波分子ガス輝線観測を行うと、きわめてゆっくりとした(亜音速の)収縮ガス運動が検出できる可能性がある。本研究で決定した磁場情報ならびに既知の物理量を初期物理状態とした、ガス塊から星形成までの収縮シミュレーションの研究も重要である。ガス塊の最外縁部の領域の磁場構造には、過去に分子雲から高密度ガス塊が形成された際に、物質が凍結磁場を引きずりながら移動した履歴が記録されていると考えられる。高密度ガス塊を取り巻く砂時計磁場は、ある場所で母体分子雲を貫く直線磁場に接続するはずである。観測時間を多くかけた非常に深い偏光撮像によりその空間スケールを特定できれば、高密度ガス塊の形成スケールや初期磁場強度の情報が得られると考えられる。このような研究を通して、分子雲複合体から高密度ガス塊の形成、そして恒星の誕生までの進化過程を磁場構造の観点から明らかにしていきたい。

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2件)

- ① 杉谷光司、田村元秀、神鳥亮、他 Polarimetry of the Serpens Cloud Core: Magnetic Field Structure, Outflows, and Inflows in a Cluster Forming Clump, 2010, *Astrophysical Journal*, 716, pp. 299-314 (査読有)
- ② 福江翼、田村元秀、神鳥亮、他 Extended High Circular Polarization in the Orion Massive Star Forming Region: Implications for the Origin of Homochirality in the Solar System, 2010, *Origin of Life and Evolution of Biospheres*, 40, pp. 335-346 (査読有)

[学会発表] (計1件)

- ① 神鳥亮、Near Infrared Polarimetry of Nearby Dense Cores with SIRPOL,

MAGNETIC FIELDS: from core collapse to young stellar objects (国際研究集会)、
2010年5月19日、ウェスタン・オンタ
リオ大学 (カナダ)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神鳥 亮 (KANDORI RYO)

国立天文台・光赤外研究部・研究員

研究者番号：90534636

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし