

Z45によるTMC-1高密度コアの CCSゼーマン分裂の検出



楠 根 貴 成

〈名古屋大学大学院理学研究科 〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町〉
e-mail: takayoshi.kusune@u.phys.nagoya-u.ac.jp

私たちはTMC-1高密度コアに対して観測を行い、CCS分子輝線のゼーマン分裂をクリアに検出し、高精度での磁場強度測定を世界で初めて実現しました。測定された磁場強度は $117 \pm 21 \mu\text{G}$ でした。またゼーマン分裂を起こさない HC_3N 輝線の観測も同時に行い、CCSと同じ手法で偏波校正をしましたが、ゼーマン分裂は検出されずCCSのゼーマン分裂が確かなものであることを確認しました。得られた磁場強度を用いて磁気安定性を評価した結果、このTMC-1高密度コアは磁氣的に超臨界状態にあり重力収縮をしていると結論づけました。

1. 星形成における磁場の役割

星は分子雲と呼ばれる密度の高いガス雲から誕生します [1, 2]。分子雲の力学状態は、主に自己重力・内部の超音速乱流・星間磁場の3つの要因によって決められます。1960年代以降、林忠四郎らの理論研究によって原始星の進化の理解が進んできました。一方で、分子雲から原始星の母体となる高密度コアを形成する過程やその進化は、分子雲中での磁場の役割がわからないため理解が進んでいません。

2009年にHerschel宇宙望遠鏡による観測が始まると、分子雲中にはフィラメント構造が普遍的に存在し、フィラメント構造の分裂が高密度コア形成の重要な過程であることが明らかにされてきましたが [3]、フィラメント形成過程で磁場が果たす役割やフィラメントの分裂から高密度コアが形成される過程における磁場の役割は依然不明のままです。近年の理論研究では、将来的にブラックホールになるような大質量星の形成には強い磁場が必要であると提案されていますが [4]、最新のALMA観測によると、大質量コアでは予想に

反し弱い磁場であることを示唆する結果も報告されています。このように一連の星形成過程における磁場の役割は全く理解が進んでいません。

2. 星形成過程は遅い？ それとも速い？

仮に分子雲の自己重力だけが支配的で、星が分子ガス雲の自由落下時間（約100万年）で形成されるとしましょう。この場合、銀河系の星形成率（単位時間あたりに星に変化されるガスの総質量）は1000太陽質量/年と算出できますが、実際の観測による見積もりは約2-3太陽質量/年です。つまり星形成過程は非効率的なのです。星形成研究の最大の課題はこの「なぜ星形成過程は非効率的なのか」を説明することです。1970年代以降、この低い星形成率を説明するモデルとして2つの対立するモデルが提案されてきました [5]。1つは、星形成は乱流横断時間（100万年以下）で完了し、星によるフィードバックによって分子雲が破壊される、という「速い星形成モデル」です。このモデルでは、すべての分子ガス雲が星に変換される前に星形成を短時間に完了させることで星

形成率を低く抑えるため、非常に弱い磁場でなくてはなりません。もう1つは、磁場や乱流によって分子雲が長時間安定に支えられて、重力収縮がゆっくりと進む、という「遅い星形成モデル」です。このモデルでは、非効率な星形成が長時間続き星形成率が低くなるため、強い磁場による支えが重要となります。このように現在の星形成研究では、星形成が速い過程なのか遅い過程なのかという基本的な事柄ですらよく理解されてはいません。この問いに答えるには、星形成における磁場の力学的役割を観測的に解明することが必要となります。

3. 磁場の観測手法

分子雲に付随する磁場を観測する手法は主に2つありますが、どちらも得られる情報は限定的です。1つは、分子雲に含まれる非球状な星間塵が磁場に対して整列することで起こる電磁波の直線偏波（偏光とも言う）を測る観測で、近年盛んに行われています。例えば、Planck衛星[6]、IRSF望遠鏡のSIRPOL[7-8]、BLASTPol[9]、SOPHIA[10]、BISTRO[11]等の望遠鏡やプロジェクトが挙げられます。しかし直線偏波の観測では、天球面に投影された磁場 (B_{\perp}) の方向の情報しか得られず、磁場強度を直接測定することはできません。もう1つの手法は、原子・分子の輝線・吸収線の円偏波によるゼーマン分裂の観測です。円偏波ゼーマン観測では、輝線・吸収線の左右円偏波成分の微小な周波数のズレから視線方向の磁場成分 (B_{\parallel}) の方向と磁場強度を測定することが可能です。大変頼もしい手法のように思われますが、その周波数のズレは数十Hz程度と非常に小さく、長時間観測が必要となり技術的にも難しいものです[12]。

磁場強度を測定するために、私たちはZ45受信機を新たに作製し野辺山45m望遠鏡を用いてゼーマン観測を試みることになりました。Z45プロジェクトの概要の詳細は中村文隆氏の記事を参照してください。

4. CCS分子輝線のゼーマン観測と解析

高密度コアの重力収縮を妨げる磁場には臨界強度 B_{cr} という重要な量があります。コアの磁場が $B < B_{cr}$ のとき、磁気力はコアの自己重力よりも小さくなり、コアを安定に支えることができません。このようなコアは磁氣的に超臨界状態にあると言います。磁氣的に超臨界なコアはコアの自由落下時間程度で収縮し原始星を形成します。一方、 $B > B_{cr}$ のとき、磁気力はコアの自己重力よりも大きくなり、コアを安定に支えることができます。このようなコアは磁氣的に亜臨界状態にあると呼ばれます。磁氣的に亜臨界なコアはそのままずっと潰れないわけではありません。分子ガスの主成分は中性ガスですので、磁気力を直接受ける電荷を帯びた粒子とは多少異なる運動をします。この運動を天文学では双極性拡散と呼びます。この双極性拡散によってコア中心部の磁場の力が相対的に弱くなり準静的に重力収縮します。やがてコア中心部分が磁氣的に超臨界状態になると重力収縮を開始します。この過程は自由落下時間よりも遅く進むので、コアの磁場の強度はコアの進化時間を決める重要な物理量となります。

私たちのZ45プロジェクトでは、まず重力収縮する直前にあると思われる高密度コアに付随する磁場をゼーマン観測によって検出することを目標にしました。そこで着目したのが45 GHz帯のCCS分子輝線です。実はこれまでもゼーマン分裂の観測は、OH分子やH I輝線、OHメーザー線で行われていたのですが、これらは分子雲の希薄な領域や星形成終了後の高密度領域をトレースするため、それらの中間的な密度を持つ高密度コアの磁場強度測定には適切ではありませんでした。CCSは野辺山45m鏡を用いて発見された分子輝線で、特に45 GHz帯での遷移は比較的大きなゼーマン分裂を起こすことが知られています。さらにCCSの存在量は高密度コアの形成直後の

段階で大きくなりますが、その後減少します。そのため星形成直前のコアを探すにはうってつけの分子輝線です。また今回 HC_3N 輝線の観測も同時に行いました。 HC_3N 輝線は CCS 輝線よりも強度が強く、ゼーマン分裂を起こさないため、この輝線を同時観測することで、天体以外の装置起因の偏波成分が CCS 輝線において正しく較正されているか確認することができます。

ところが、亀野誠二氏の記事で詳しく述べられていますように、解析した当初はコントロールである HC_3N でゼーマン分裂が検出されてしまいました。そして後にそれがビームスクイント（右旋・左旋偏波間の指向性差）と速度勾配の相互作用により生まれたものであることが判明しました。ここではより正確に補正を行うために、高度角を変化させたときにどのようにビームスクイントが変化するかを、 SiO メーザー源 NML Tau を使い調べてみました。図1には、観測した高度角に対するビームスクイント量を示しています。このようにスクイントは高度角に対して線形に変化していることがわかります。観測値に対して

$$\begin{aligned} dAZ &= dAZ_0 + dAZ_1 \cos EL + dEL_1 \sin EL, \\ dEL &= dEL_0 + dAZ_1 \sin EL + dEL_1 \cos EL, \end{aligned}$$

という式でフィッティングしてあげると、

$$\begin{aligned} dAZ_0 &= -0''.41 \pm 0''.16 \\ dEL_0 &= -1''.25 \pm 0''.16 \\ dAZ_1 &= -2''.05 \pm 0''.15 \\ dEL_1 &= -0''.39 \pm 0''.16 \end{aligned}$$

の値が求まりました。次章で示されているストークス I や V の値は、この高度角を考慮したビームスクイント補正を適用したものです。

これでめでたく偏波較正が正しくできるようになったわけですが、結果へと移る前に少し脱線をして、速度勾配へ焦点を当ててみましょう。ここでは速度勾配を適当に変化させ、最終的に得られるストークス V 、および V プロファイルから得られ

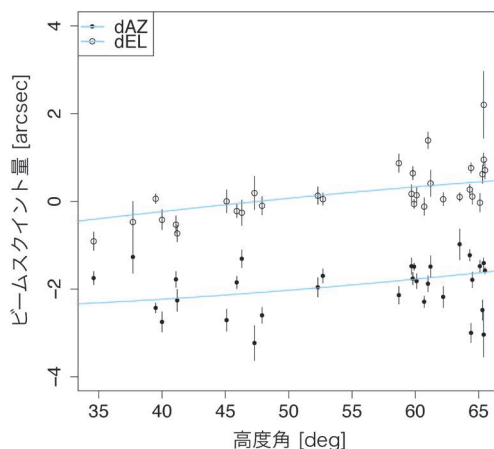


図1 SiO メーザー源 NML Tau を観測して測定された、高度角に対するビームスクイントの値。点は観測値を、線はフィッティングを示します。

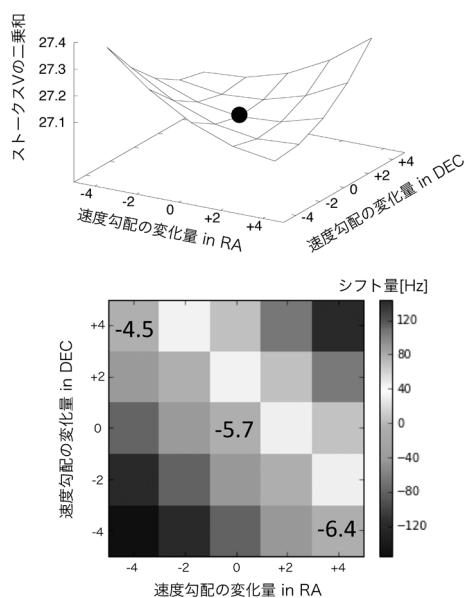


図2 HC_3N の分子輝線観測で得られた速度勾配を基準（黒丸）に、 $\pm 2, \pm 4 \text{ km s}^{-1} \text{ deg}^{-1}$ 変化させたときの、ストークス V の二乗和（上）とゼーマンシフト量（下）を示します。

るシフト量がどのように変化するかを検証してみます。例として TMC-1 の HC_3N 分子輝線マップから得られる速度勾配 $(dv/dl, dv/dm) = (3.68, 3.43) \text{ km s}^{-1} \text{ deg}^{-1}$ を基準に $\pm 2, \pm 4 \text{ km s}^{-1} \text{ deg}^{-1}$ と変化させてみました。その結果を示したのが

図2です。観測から得られている速度勾配(図中黒丸)は、ちょうどストークスVおよびゼーマンシフト量が最小となる谷に位置することがわかります。このように、もしも速度勾配が正しく求められていない場合ですと、非ゼーマン輝線から偽ゼーマンシフトが検出されることになります。

5. TMC-1

ゼーマン分裂の観測には非常に長い観測時間が必要となります。実際、今回のTMC-1での観測では天球面上の1点で30時間(ポインティングや較正天体を含めると計51時間)もの観測時間をかけてようやく検出に成功しました。そのため、なるべくゼーマン分裂が検出しやすいターゲットを選ぶ必要があります。よいターゲットの条件は(1)比較的長時間観測可能であること(2)CCS輝線が強いこと(3)輝線プロファイルの端のほうが急峻であることと考えました。(1)の条件は当然ですが、(2)の条件が望ましいのは一般にゼーマン分裂は左右2つの円偏波成分の差であるストークスVのプロファイルのフィットから導出され、ストークスVの強度はストークスIの数%程度であるため、なるべく放射の強い領域のほうを観測がしやすいからです。(3)の条件は、プロファイルの端のほうが急峻であることで差が検出しやすくなるためです。先行観測[13]の結果を参考にして、おうし座分子雲(Taurus Molecular Cloud)にある星なしコアTMC-1を選びました。

まずTMC-1での観測点を決めるために、On-The-Fly(OTF)観測によるマッピング観測を行いました。図3はその際に取得したTMC-1のCCS輝線の積分強度図です。ご覧のようにこの天体は細長く伸びたフィラメント状の形状をしています。この南東側(図の左下側)でCCS輝線強度が強くなっています。先行研究では、CCSが最も強い点がTMC-1(CP)と名づけられていましたが、私たちのOTF観測によって得られた

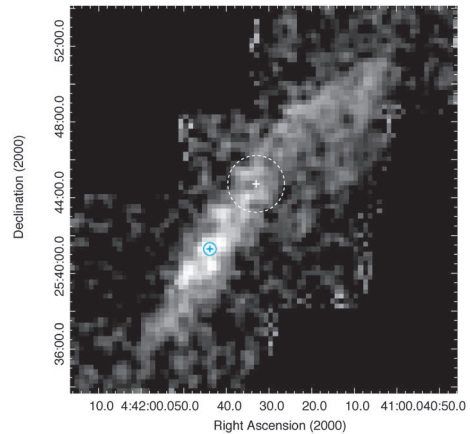


図3 TMC-1のCCS積分強度図。CCSゼーマン観測のポジションは左下付近にある青十字で示されます。中央の白十字はOHゼーマン観測[14]のポジションを示し、円はHPBWビームサイズを表します。

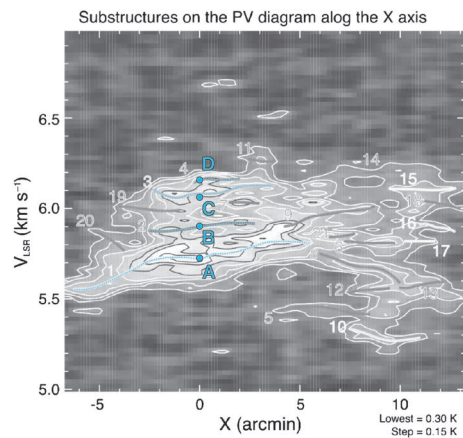


図4 TMC-1の伸長方向に沿った位置速度図上に示された小フィラメント[15]。CCS積分強度図のピーク(=ゼーマン観測点)をX=0としている。ここで示されているA, B, C, Dは、図7と対応している。

最大強度の点はややずれていました。ゼーマン観測は新しく決めたTMC-1(CP)に選びました。

ゼーマン観測から話が逸れますが、このOTF観測から、TMC-1フィラメント内部には速度空間でつながった小フィラメントが多数存在することがわかりました。その同定した構造を図4に示

します。私たちの観測点付近には複数の小フィラメント（図中AからD）が存在していることがわかります。この複数の構造がゼーマン分裂の検出に影響する可能性があることにこのときは気づいていませんでした。一方、この複数構造の影響で3次元構造の情報が得られる可能性があることもわかっていませんでした。これについては、土橋一仁氏の記事に詳しく記述されていますので参照されてください。

6. CCS分子輝線のゼーマン分裂の検出

今回のゼーマン観測から導出されたCCSのストークスIのプロファイルは図5（上）のようなものでした。これを亀野氏の偏波較正法の記事にある手法を用いてストークスVを導出して、磁場強度を測定すると $117 \pm 21 \mu\text{G}$ と見積もることができました。図6には、CCSと同時観測をし同じ偏波較正法を適用した HC_3N のプロファイルを示しています。ただし HC_3N のメイン成分ではなくサテライト成分（ $F=4-4$ ）を使用しています。これは HC_3N のメイン成分が、光学的に厚い3つの超微細構造（ $F=5-3, 5-4, 6-5$ ）を含むため複雑なプロファイルを示しているからです。ご覧の通り HC_3N のサテライト成分ではシフト量が $61.1 \pm 77.1 \text{ Hz}$ とゼーマン分裂は検出されず、CCSのゼーマン分裂が確かなものであることがわかります。

さてこの領域の磁場はTMC-1コアの収縮に影響を与えるほど重要なのでしょうか？そこで次に、得られた磁場強度を使ってコアの力学状態を評価してみましょう。ただし、前述した通りゼーマン観測からは視線方向の磁場強度（ B_{\parallel} ）しかわかりません。3次元の磁場強度を知るためには、天球面に投影された磁場強度（ B_{\perp} ）も必要になります。直線偏波観測からは天球面に投影された磁場の方向の情報しか得られないと述べましたが、直線偏波観測マップを使って磁場方向の乱れ

CCS

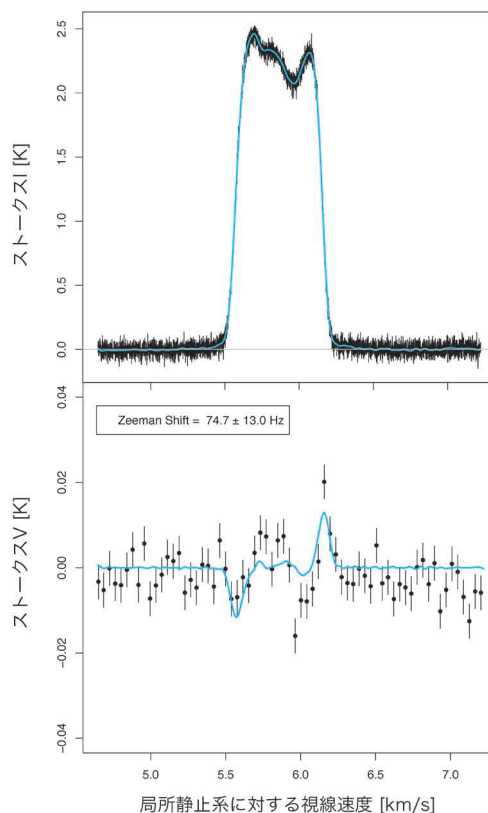


図5 CCS輝線のストークスIとストークスVのプロファイル。ストークスIを平滑化したプロファイル（上の青線）の導関数をストークスVにフィッティングしたものが下の青線。

を定量化することで、天球面に投影された磁場強度の目安を見積もる試みが昔からされてきました。Davis–Chandrasekhar–Fermi法と呼ばれる手法です[16, 17]。この方法で導出された磁場強度は $B_{\parallel} \sim 100 \mu\text{G}$ でした。これらの値を用いて3次元の磁場強度が導き出すと、 $B_{\text{tot}} = \sqrt{B_{\perp}^2 + B_{\parallel}^2} \sim 154 \mu\text{G}$ で、視線方向に対して約 45° 傾いていることがわかりました。

TMC-1コアの柱密度から見積もられる磁場の臨界強度は $B_{\text{cr}} = 340 \mu\text{G}$ ですが、上の方法で導出された3次元磁場強度 B_{tot} は $\sim 154 \mu\text{G}$ です。よって、TMC-1コアは磁氣的に超臨界状態であると

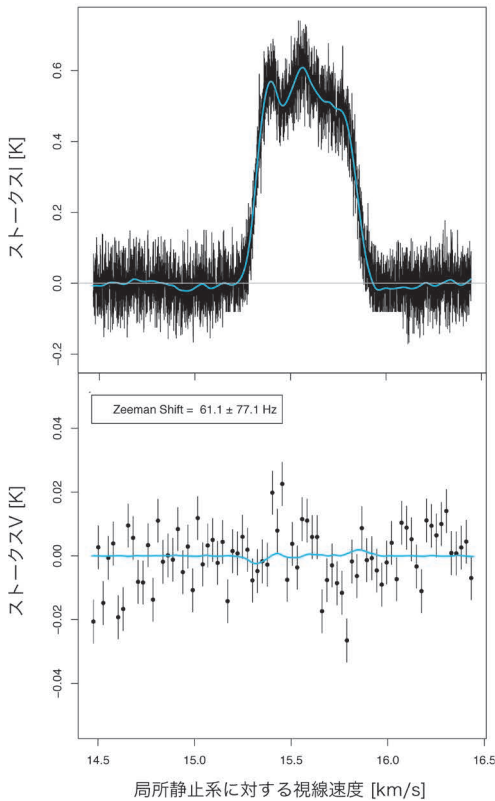
HC₃N

図6 HC₃N輝線の衛星成分のストークスIとストークスVのプロファイル。HC₃NではCCSで見られたようなストークスVの分裂パターンは見られません。

私たちは結論づけることができました。

磁氣的に超臨界状態にあるならば、磁場によって分子雲を支えることができず重力収縮しているかもしれないと考えられます。土橋氏の記事に詳細が書かれているように輻射輸送計算を解いてあげて小フィラメントの視線方向の並び位置を推測すると、ちょうど小フィラメントが中心に向かって動く配置になることがわかりました。図7はその描像を示した模式図になります。これはつまり、中心に向かって収縮しているというモデルであり、分子雲コアは超臨界状態にあるという今回の観測結果とよく合います。以上のような解析結果と考察から、TMC-1コアは磁氣的に超臨界

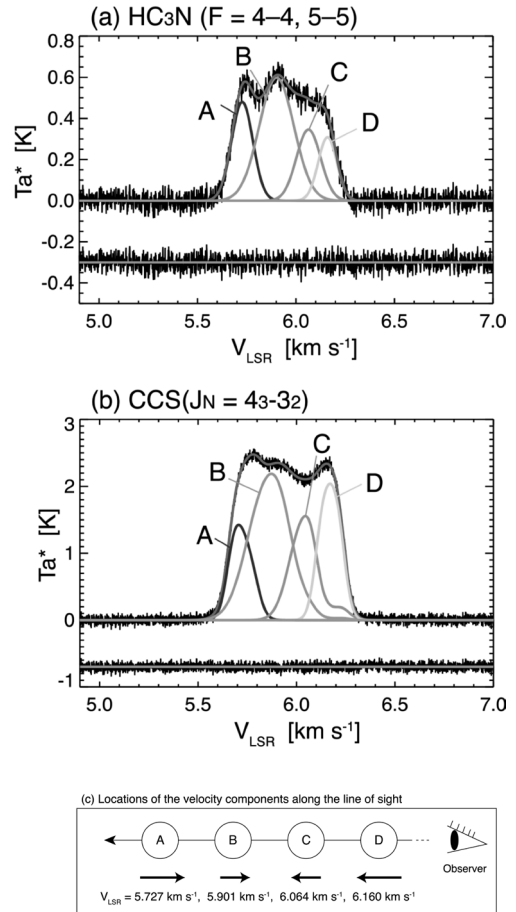


図7 TMC-1のCCS, HC₃Nプロファイルの4成分フィットとそれらの成分の位置関係 [18]。

状態にあり分子雲コアは重力収縮をしています。まだ原始星形成には至っていないというのが本研究の結論です。

7. 結 び

中村氏の記事にも書かれていますが、Z45プロジェクトの科学目標は「ゼーマン分裂を検出することで星形成直前の高密度コアに付随する磁場強度を測定すること」でした。今回のTMC-1分子雲コアのゼーマン観測では、CCS輝線では t 値が9.0、 p 値は $< 2 \times 10^{-16}$ と十分有意な検出と言える結果が得られ、当初の目的を達成することができました。これまでに観測がなされていなかった密

度領域の磁場強度を直接精度よく測定したことにより、星形成過程における磁場の力学的役割を定量的に議論することが可能となりました。そして「星形成は遅いのか？ 速いのか？」という疑問の解決に向け、本観測研究が大きな一歩になったのではないかと考えております。

TMC-1では、高密度コアは磁場で完全には支えられておらず既に重力収縮していることがわかりました。一方で観測値の $\sim 154 \mu\text{G}$ という磁場強度は、力学的に影響を与えないほど極端に弱い磁場ではありませんので、遅い星形成モデルに合う結果となりました。どのように現在の磁氣的に超臨界状態へとなったのかは今後議論していく必要があります。

謝 辞

赤外線天文学出身の筆者に対し、数多の有益なコメント・アドバイスをくださり、また本稿の執筆において多大なご協力をいただいた本プロジェクトリーダーの中村文隆准教授（国立天文台/総合研究大学院大学）には心より深謝の意を表します。ゼーマン観測のいろはや解析手法への助言等大変お世話になりました亀野誠二教授（国立天文台）、TMC-1分子雲フィラメント構造解析でお世話になりました土橋一仁教授（東京学芸大学）・下井倉ともみ准教授（大妻女子大学）に深く感謝いたします。本研究の観測および解析は、科学研究費補助金基盤研究（A）17H01118（代表中村文隆）の助成を受けたものです。

参 考 文 献

- [1] MacLow, M.-M., & Klessen, R. S., 2004, *Rev. Mod. Phys.*, 76, 125
- [2] McKee, C. F., & Ostriker, E. C., 2007, *ARA&A*, 45, 565
- [3] Andre, Ph., et al., 2010, *A&A*, 518, L102
- [4] Inoue, T., & Fukui, Y., 2013, *ApJ*, 774, 31
- [5] Crutcher, R. M., 2012, *ARA&A*, 50, 29
- [6] Planck Collaboration, *A&A*, 576, id.A105
- [7] Sugitani, K., et al., 2011, *ApJ*, 734, 63
- [8] Kusune, T., et al., 2019, *PASJ*, 71, S5
- [9] Fissel, R., et al., 2016, *ApJ*, 824, 134
- [10] Pillai, T., et al., 2020, *Nature Astron.*, 4, 1195
- [11] Ward-Thompson, D., et al., 2017, *ApJ*, 842, 66
- [12] Suzuki, H., et al., 1992, *ApJ*, 392, 551
- [13] Nakamura, F., et al., 2015, *PASJ*, 67, 117
- [14] Troland, T. H., & Crutcher, R.M., 2008, *ApJ*, 680, 457
- [15] Dobashi, K., et al., 2019, *ApJ*, 879, 88
- [16] Davis, L., 1951, *Phys. Rev.*, 81, 890
- [17] Chandrasekhar, S., & Fermi, E., 1953, *ApJ*, 118, 113
- [18] Dobashi, K., et al., 2018, *ApJ*, 864, 82

Detection of the CCS Zeeman Splitting toward Taurus Molecular Cloud-1

Takayoshi KUSUNE

*Graduate School of Science, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8601,
Japan*

Abstract: We successfully detected the Zeeman splitting of a CCS emission line at 45 GHz toward the nearby pre-stellar dense filament, Taurus Molecular Cloud 1 (TMC-1). This is the first clear measurement of the line-of-sight magnetic strength at this core with a signal-to-noise ratio of ~ 5.7 , and the t value was 9.0. Along with the CCS line, we simultaneously observed HC_3N emission line which is non-Zeeman line, and did not detect any significant splitting of the non-Zeeman line. Thus, we conclude that our detection of the CCS Zeeman splitting is robust. The derived line-of-sight magnetic field strength was about $117 \pm 21 \mu\text{G}$. Using this value, we conclude that the TMC-1 filament is magnetically supercritical. We have done radiative transfer calculations of the CCS and HC_3N emission lines along the line of sight. Our calculations suggest that the filament is collapsing. This is consistent with our conclusion that the TMC-1 filament is magnetically supercritical.