

CCS の回転遷移輝線のゼーマン効果による 高密度分子雲コアの磁場観測

新 永 浩 子

Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia Sinica P.O. Box 1-87, Nankang, Taipei 11529, Taiwan, R.O.C.

星形成における星間磁場の役割を探るため、高密度領域をトレースする分子輝線、 $CCS J_N = 43-32$ 輝線のゼーマン効果の観測を、おうし座分子雲中の早期型高密度分子雲コア、L1521E について試みました。かつて、正確に求められていなかった CCS のゼーマン効果についても実験室で分光実験を行い、私たちの計算結果が正しいことを確かめました。本稿では、この観測のために我々が新しく開発、構築した野辺山 45 m 電波望遠鏡用の広帯域ミリ波偏波計システムのことも含めて、CCS のゼーマン効果の磁場観測について紹介します。

1. はじめに

一 星間磁場について一

我々の銀河系は主に、円盤、バルジ、ハロー部に存在する恒星、そして円盤部の恒星の間に存在する星間物質から構成されています。現在、銀河系内の星間物質の総量は、暗黒物質を除けば、銀河系の質量の約 10% に過ぎません。しかし、この星間物質こそが、膨大な数の星を生み出す母体です。この星間物質からどの程度の質量の星がどのくらいの数、どのように生まれるのか、という星形成の物理プロセスを探ることは、銀河系全体の進化を探ることとも密接に結びつく、天文学の重要なテーマの一つといえます。

星間物質は水素を主成分とする星間ガスと星間塵（ダスト）と呼ばれる固体微粒子から成ります。星間ガスの存在形態は電離ガス、中性原子ガス、分子ガスに大きく分類することができます。星は、この星間ガスの中で最も密度の高い、分子雲の高密度部分（分子雲コアと呼ばれます）で誕生することが観測的に明らかにされています。星は、この分子雲コアの収縮によって生まれます。コアを収縮させるのはコア自身の重力と、コアの周囲から

加えられる外圧です。外圧は自己重力で収縮できないコアに収縮を始めさせる働きがあり、収縮の初期に有効なことがあります。星の状態にまで収縮させるのは自己重力において他にありません。しかし、コアの中のガス圧、磁場、回転による遠心力など収縮を妨げる要因があることが示唆されているので、コアの収縮過程はそう単純ではありません。自己重力と外圧がこれらの収縮を妨げる要因の全てに勝るときだけ、コアは収縮することになります。

銀河系には渦状腕に沿った、数 kpc に渡るような大規模な構造の磁場から 1 pc 以下の小さな構造を持つ磁場まで、様々なスケールの星間磁場が存在していることが知られています。星間磁場の起源については明らかにされていませんが、この現存する星間磁場は宇宙に存在するこれらの様々なスケールの構造を形成する過程で大きな影響を及ぼしたであろうことが示唆されています。もし重力だけの作用が優勢であれば、第一次近似的には球対称の構造がたくさん観測されることでしょう。しかし、現実には様々な形状の構造、例えばディスク構造やジェット、アウトフローなどの存在が明らかになっています。例えば細く絞り込まれたジェットの形成を重力だけの効果で説明することは難しいと考

えられています。

星間空間の磁場の存在の可能性について最初に指摘したのは Alfvén です。ガスの運動と星間磁場の相互作用について Alfvén¹⁾, Fermi²⁾らが考察したのが最初でした。星形成の物理過程において、重力収縮を妨げる磁場について、その重要性が認識・指摘されたのは 1950 年代のことです³⁾。その後、1957 年に、Bolton と Wild は水素の 21 cm 線のゼーマン効果の観測から星間磁場の強度がわかるだろうと指摘しました⁴⁾。その数年後から現在に至るまで、星間磁場の強度、形を調べるために、数多くの観測による研究が行われてきました。

星間磁場を測定する方法は複数ありますが、いずれも偏波、偏光観測です。磁場が偏波・偏光現象を起こさせる原因について、いくつか例を挙げてみましょう。磁場によって整列した長細い形状の星間塵により散乱された電磁波⁵⁾、星間磁場に巻きついた高エネルギー粒子が生み出すシンクロトロン放射は直線偏光しており、その物理過程から天球面上に投影された磁場の形状を知ることができます。この直線偏光が初めて星間空間で検出されたのは、半世紀前のこと^{6) 7)}、磁場によって整列したダストの存在が明らかになりました。シンクロトロン放射が有意に検出されたのは 1957 年のこと⁸⁾で、大変明るい天体として有名なかに星雲という超新星残骸からの 9.5 GHz の電波で検出されました。磁場の強度を調べるための手段として、ファラデー効果とゼーマン効果の観測などが挙げられます。ファラデー効果は、磁場中を直線偏波・偏光した電磁波が通過する際、その電場、磁場の振動面が回転する現象で、ファラデー回転とも呼ばれます。この回転の量が視線方向（電磁波が進む方向）の磁場の強度に比例しますが、この見積もりには伝播媒質のプラズマ密度と視線方向の長さを仮定しないとはいけません。一方、ゼーマン効果は、イオン、原子、分子などの基底状態、または励起状態が磁気モーメントをもつとき、磁場をかけることによって磁気量子数、即ち磁気モーメントの方

向に関する縮退が解けて、エネルギー準位が周波数方向に分裂する現象です。分裂してできた輝線は、磁気量子数の差分が +1 か -1 によって、右旋、左旋の円偏光・円偏波を示し、周波数のずれは磁場の強度に比例します。従って、周波数のずれを測定できれば、その輝線がでている場所の平均的な磁場の強度を、特別な仮定をおくことなく、直接調べられます。1908 年にこの現象を用いて Hale が太陽光の円偏光観測を行い、4000 G という強い磁場の存在を明らかにしています。このように、ゼーマン効果の観測は、昔からある、磁場測定のスタンダードな方法として使われていました。分子、原子、イオンによって、分裂する周波数は異なり、分裂が大きい遷移ほどより検出しやすいので、ゼーマン効果の観測に適しているといえます。図 1 にゼーマン効果の観測例を示します。ゼーマン効果を検出するためには、輝線強度が強く、線幅の狭い輝線が適していることがわかるでしょう。これまで、主に水素原子（波長 21 cm）、OH 遊離基分子の遷移（波長 18 cm）輝線、吸収線を用いてゼーマン効果の観測が行われてきました。これらは上に述べた、周波数分裂のずれが大きい遷移をもっており、強度も強いことがよく知られています。しかし、これらの遷移は臨界密度が低く（ 10^{1-3} cm^{-3} 程度の水素分子の個数密度の領域）、星間ガスのなかでもガス密度の高い、分子雲コア部分ではなく、周りの薄い密度の部分の磁場強度の測定でした^{9) 10)}。では、星の生まれる、分子雲コア内部の磁場強度はどうなっているのでしょうか。

生まれたばかりの、主系列星に進化するより前の、原始星と呼ばれる天体が高感度の赤外線観測から数多く見つかっています。これらの原始星には星周降着円盤やジェット、分子流と呼ばれる現象が観測されていますが、これらを支配する物理プロセスには磁場の効果を抜きにしては考えにくいことが電磁流体力学のシミュレーションからも示唆されています¹¹⁾。磁場が星形成の過程におい

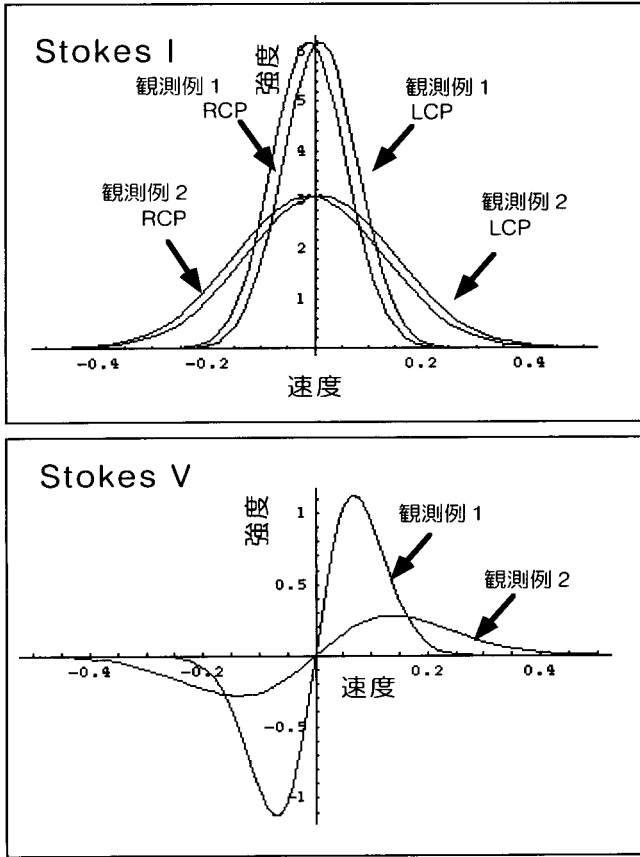


図1 ゼーマン効果の観測シミュレーションの例。RCPは右旋の、LCPは左旋の円偏波のスペクトルを意味する。縦軸は輝線の強度、横軸は速度である。観測例1のストークス(Stokes)のIスペクトルの線幅は観測例2の半分、強度は2倍で、磁場強度は同じ場合である。それぞれの場合のストークスのVスペクトルがその下に示されている。観測強度が強く、線幅が狭い方がストークスのVスペクトルの最大値、最小値の絶対値がより大きくなるので、検出しやすくなる。

て具体的に時間の経過とともにどのように進化、作用しているのか、理論的な説はこれまでいくつも存在しますが、実際はどうか、観測によって検証されなければ、本当に星形成の物理を理解したことはないでしょう。

過去には密度の比較的薄い星間ガスの磁場強度しか測られていないという背景から、高密度領域の磁場の形、及び強度の観測は重要なテーマの一つです。高密度領域の磁場は、ゼーマン効果による周波数分裂が大きく、高い臨界密度の遷移をも

ち、存在量が高く、線幅が狭い、という特徴をもった分子遷移、観測対象を見つける必要があります。中・小質量星形成領域である、いわゆる暗黒星雲と呼ばれる分子雲は線幅が狭い分子輝線が複数存在していることが知られています。このような分子雲で、比較的存在量の多い分子も複数知られていますが、水素の21 cm線やOHの18 cm線と比較すると、強度もそれほど強くないので、このような分子線の観測は大変難しく、まだ観測例が少ないのが現状で、これからの重要課題として残されています。世界にはミリ波の偏波観測が可能な装置はそう多くありませんし、観測時間も限られていますので、検出できそうな天体、分子輝線をよくよく選んで観測を実行する必要があります。そこで著者は、上述したような高い臨界密度をもつ分子輝線の観測を可能にする、野辺山宇宙電波観測所の45 m電波望遠鏡の偏波計を、茨城大学理学部坪井昌人助教授の指導の下、設計、開発しました。この偏波計の開発は、坪井研究室のプロジェクトの一つで、法政大学工学部の春日隆教授と共同で進めました。これは、45 m鏡で観測可能な殆どの周波数範囲(35–250 GHz)をカバーする、今までにない、世界で唯一の画期的な設計になっていま

す。私たちはこの装置を広帯域ミリ波偏波計と呼んでいます。この偏波計はもちろん、ゼーマン効果の観測以外にも複数の偏波観測のプロジェクトに用いる目的を持っていますが、紙面にも限られていますので、今回はゼーマン効果の観測に焦点をあてて紹介します。

2. 広帯域ミリ波偏波計

ここで簡単に広帯域ミリ波偏波計について紹介します。世界にはミリ波の偏波観測が可能な望遠

鏡はざっとかぞえて 20 程度挙げることができ、その多くは特定の周波数帯に固定された偏波計をそれぞれの周波数帯の受信機用に備えています。偏波計には、導波管タイプ、透過異方性媒質タイプ、反射タイプのものなど種々のタイプがあります。広帯域偏波計は反射型波長板で、特定の周波数で半波長板、四分の一波長板の両方として使えるよう、設計されています。周波数のチューニングが可能な偏波計を持っているのは、Owens Valley のミリ波干渉計とキットピークの 12 m 望遠鏡ですが、いずれも短ミリ波専用のもので、(キットピークの 12 m 鏡は 7 月に閉鎖されるようで、大変残念です。アメリカの観測所が置かれている状況の厳しさを象徴しているのかもしれませんが。)

45 m 望遠鏡は多くの鏡、偏波膜を利用し、複数の異なる周波数帯域の受信機にビームを伝送する構造になっています。図 2 に広帯域ミリ波偏波計が用いるビーム伝送系を示します。広帯域ミリ波偏波計は、このビーム伝送系の途中 (図の青く塗りつぶされた位置) に装着し、かつ周波数の調整が可能な構造に設計したので、広い周波数範囲をカバーできる仕組みになっています。しかし、45 m 鏡全ての受信機で使用可能なわけではありません。45 m 鏡には大きく 2 つのビーム伝送系が存在し、偏波計を置くことのできるはそのうちの一つです。また、観測可能な範囲は、その周波数でのビームの大きさ (太さ)

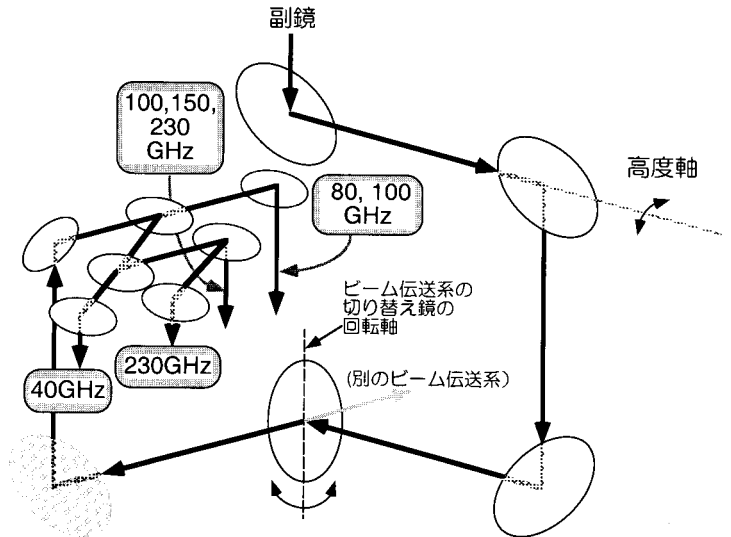


図 2 広帯域ミリ波偏波計を用いるときのビーム伝送系。太い矢印は伝送されるビームの方向を示している。多くの平面鏡、偏波膜を使って、同時に複数の受信機 (受信機の周波数帯を□で囲んで示した) を用いることができる。青く塗られた位置に偏波計を設置して用いるため、これを通るビームの受信機を用いることが可能である。

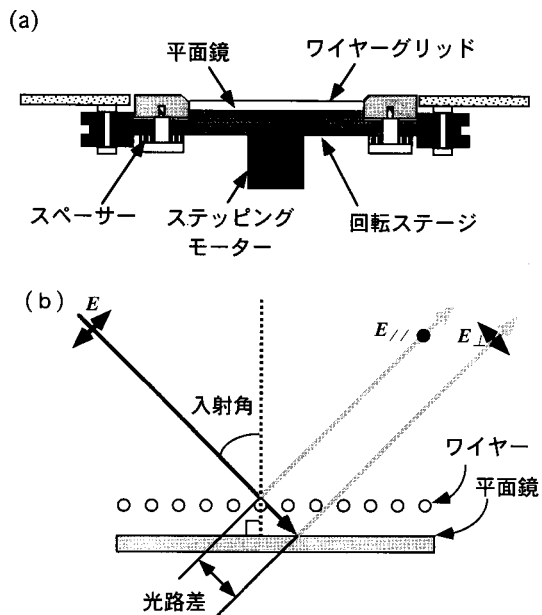


図 3 (a) 広帯域ミリ波偏波計の断面図。平行に置かれたワイヤーグリッドと平面鏡、これらの間を調節するスペーサー、これを回転させるための回転台、ステッピングモーターから成る。(b) 偏波計の原理の模式図。入射ビームが左上から斜め右下に入射角 45 度で落ちてくると、ワイヤーグリッドで反射される成分 $E_{//}$ と平面鏡で反射される成分 E_{\perp} に等分される。これらの光路差を半波長、または四分の一波長になるように調整することで、半波長板、四分の一波長板として用いる。

にも寄ります。

次に、偏波計の原理について簡単に紹介しましょう。図3は偏波計の断面図です。広帯域偏波計はワイヤーグリッドと平面鏡、スペーサー、そしてこれを回転させる回転ステージから成ります。入射角45度で入射したビームは偏波計でワイヤーグリッドと平面鏡で反射されます。ワイヤーグリッドで反射される成分と平面鏡で反射される成分の位相差を半波長、四分の一波長にセットすることにより半波長板、四分の一波長板として使用できます。ワイヤーグリッドは観測周波数帯域で偏波分離度が高くなるように設計されています。半波長板は直線偏波成分を調べるときに用い、四分の一波長板は円偏波成分を検出するときに用います。スペーサーはワイヤーグリッドと平面鏡の間隔を調節するために用います。ターゲットとする分子輝線、周波数帯は限られているので、目的に合わせて異なる厚みのスペーサーを用意し、観測ごとに入れ替えます。実際の波長板としての性能は、電波暗室

で各周波数帯ごとに種々の測定をし、確認します。この反射型偏波計のもう一つの特徴は、挿入損失が小さいことです。天体からの電波は日常、私たちの暮らしの中で使われている電気器具の発する電波などと比べて極めて弱いので、偏波計を通過したことによる損失は少ないほうがいいのです。他のタイプの波長板、例えばテフロン製の透過異方性媒質型の偏波計(図4)と比較してみると、110 GHzでは、反射型偏波計の挿入損失は透過異方性媒質型の透過損失の約半分、0.14 dBであることを確認しました。以上のような特徴をもった広帯域ミリ波偏波計は天体観測に適した偏波計システムであるといえます。この装置の詳細についてはShinnaga et al.¹²⁾にまとめられていますので、詳しくはこちらを参考にいただければと思います。

3. おうし座分子雲における CCS 輝線のゼーマン効果

CCS という分子は $^3\Sigma^-$ の電子基底状態をもつ常磁性の遊離基で、野辺山宇宙電波観測所ができた当初に行われた45 m望遠鏡の分子線サーベイプロジェクトでその存在が明らかにされました。45 GHzのCCSの回転遷移輝線は発見当初、未同定分子線U45379と呼ばれ、近傍(距離140 pc)のおうし座分子雲で特に強く観測されました。おうし座分子雲は中・小質量星形成領域で、CCSはこの分子雲で存在量が高いことがわかっています。おうし座分子雲では分子線サーベイにより様々な分子の存在が明らかになっており、その分布の違い、赤外線源の有無などから、数多く存在する分子雲コアの進化段階を推定するような観測がいくつも行われてきました。CCSはその一連の研究から、分子雲コアのなかでも進化段階の若い、早期型のコアで存在量が多い、という報告があります¹³⁾。CCSの $J_N = 4_3 - 3_2$ 輝線は温度が5-10 K程度、水素分子の個数密度で 10^{4-5} 個 cm^{-3} の比較的濃いところをトレースする

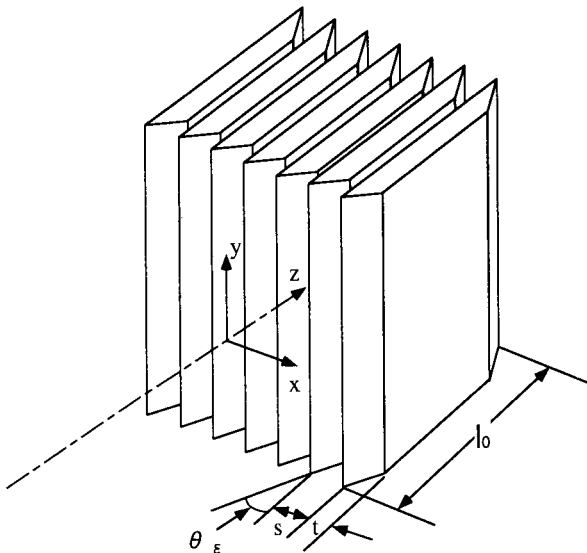


図4 等価異方性媒質型偏波計の構造。テフロンなどの媒質を用いる。電波はz軸に平行な方向に入射する。厚さt、幅10で、端を θ_ϵ の角度でカットした板を長さsの間隔で並べている。観測周波数により、これらのパラメータを設計する。

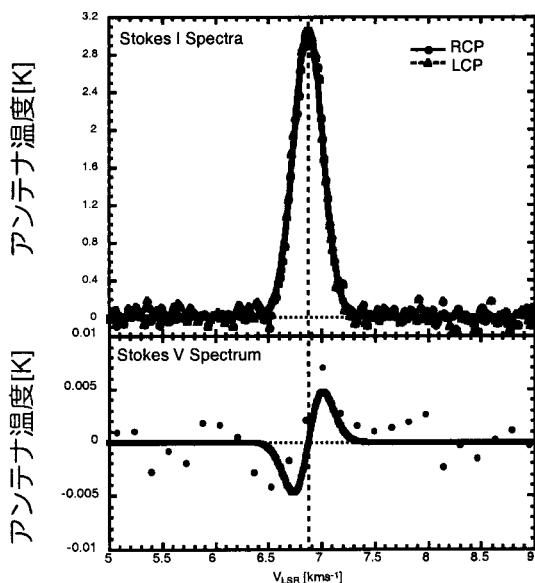


図5 L1521E コアの CCS $J_N = 4_3-3_2$ 輝線のゼーマン効果の観測結果。上に RCP, LCP (図1参照) のスペクトル, そして, 下にストークスの V スペクトルを示す。結果の磁場強度は $160 \pm 43 \mu\text{G}$ であった。

います。このコアは CCS $J_N = 4_3-3_2$ 輝線でみると、直径が 0.1pc (20000 AU) 程度のやや楕円形をしており、中心には赤外線源をもたないことから高密度で冷たい、進化段階で早期型の、3 太陽質量程度のコアと考えられます。このコアについて、磁場のエネルギーと自己重力によるエネルギー、運動エネルギーがほぼ等しいと仮定した場合の磁場強度¹⁷⁾を見積もってみると、値は $60 \mu\text{G}$ 程度となります。それでは、実際に観測して得られたストークスの I と V のスペクトルを見てください。図5に観測結果を示します。実際に観測された磁場強度値は $160 \pm 42 \mu\text{G}$ という結果でした。磁場の強度の値は大きな不定性を含んでいますが、 $160 \mu\text{G}$ という値がもし本当であれば、磁場の強度値が自己重力による収縮を妨げるのに必要な強度よりはるかに強いことを示しています。

4. 今後の課題

この観測は CCS のゼーマン効果の世界で初めての観測であり、他の観測結果と一致するか、比較することができません。観測の精度が十分ではないので、本当にこのような、理論的に予想される磁場の値より有意に高いのか、見極めるためには、観測サンプルを増やし、慎重に議論を進めていく必要があります。今後の課題として、今回観測したような中・小質量星形成領域の分子雲コアと大質量星形成領域の分子雲コアではどの程度、磁場の強度が異なるのか、調べることは重要だと考えます。なぜなら、大質量星の形成領域で見られるような、星が集団となって誕生しているような華々しい場所とおし座分子雲のように静かに個々の星が生まれている場所では、明らかに星の誕生のプロセスが異なるからです。そのような観点で、上記に述べたように、磁場という基本的な物理量をより正確に観測的に求めることは、異なる星形成の性質をもった領域は何が根本的に異なるのか、その一つのアプローチとして極めて重要だと考えます。大質量星形成領域の磁場の強度観測は、イリノイ大学の Crutcher らが CN という常磁性遊離基分子の輝線を用いて精力的に行っており、複数の観測サンプルが報告されています¹⁸⁾。これらの値と比較し、星形成の物理の謎に迫っていきたいと思います。一方、CCS, CN の他に、SO という分子もゼーマン効果の周波数分裂が大きい遊離基分子の一つです。SO の分子輝線が強い領域でゼーマン観測に適した天体を見つけ、CN, CCS とは別的手段として、観測サンプルを増やすことができれば、今後、星形成における磁場の役割をより定量的に議論することが可能になるでしょう。但し、上述したように、このような比較的弱い磁場強度のゼーマン効果の観測は、全てのキャリブレーションを精度よく行い、高い精度を達成させなくてはならない、体力、気力、根気の要る仕事です。日本でミリ波の分子輝線のゼーマン効果の観測が行われたのは今回が初

めてであり、まだ第一歩を踏み出したばかりですが、今後、世界に向けて磁場の観測的研究を発信できれば大変幸せです。

謝 辞

ここで紹介した内容は、茨城大学の坪井昌人助教授、法政大学の春日隆教授、東京大学の山本 智教授との共同研究です。本研究は筆者の博士論文で取り上げられた内容の一部です。装置の製作において、雄鳥試作研究所の皆様、ハーモニックスシステムドライブズの皆様にお世話になりました。45 m 望遠鏡での偏波計の種々の基本的な性能測定の際には、浮田信治助教授をはじめとする野辺山観測所の45 m 望遠鏡グループの皆さんに協力していただきました。ここに心より感謝申し上げます。広帯域ミリ波偏波計の開発において山田科学財団から、データ解析のソフトの開発において天文学振興財団から、制御機器の開発において国立天文台から、財政的に援助していただきました。ここに感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Alfvén H., 1943, Ark. Mat. Astr. och.Fys., 29B, 2
- 2) Fermi 1949, Phys. Rev., 75, 1196
- 3) Chandrasekhar S., Fermi E., 1953, ApJ 118, 113
- 4) Bolton J.G., Wild J.P., 1957, ApJ 125, 296
- 5) Davis L., Greenstein J.L., 1951, ApJ 114, 206
- 6) Hall J. S., 1949, Science 109, 166
- 7) Hiltner W. A., 1949, Science 109, 165
- 8) Mayer C. H., McCullough T. P., Sloanaker R. M., 1957, ApJ 126, 468

- 9) Heiles C., Goodman A. A. McKee C. F., Zweibel E.G., 1993, in Protostars and Planets III (The University of Arizona Press Tucson & London), 279
- 10) 例えば Crutcher R.M., 1999, ApJ 514, L121
- 11) 例えば Uchida U., Shibata K., 1984, PASJ 36, 105
- 12) Shinnaga H., Tsuboi M., Kasuga T., 1999, PASJ 51, 175
- 13) 例えば Hirahara Y., Masuda A., Kawaguchi K., Ohishi M., Ishikawa S., Yamamoto S., Takano S., Kaifu N., 1995, PASJ, 47, 845
- 14) Shinnaga H., Yamamoto S., 2000, to be submitted to ApJS.
- 15) Gordy W., Cook R.L., 1970, in Microwave Molecular Spectra, Chemical Applications of Spectroscopy, (West, W. Edt., a division of John Wiley & Sons), 99
- 16) 新永浩子 1999, 博士学位論文 (茨城大学大学院理工学研究科)
- 17) Myers P. C., Goodman A. A., 1988, ApJ 326, L27
- 18) Crutcher R. M., 1999, ApJ 520, 706

Observation of Interstellar Magnetic Field in a Dense Molecular Core with CCS Zeeman Effect

Hiroko SHINNAGA

Postdoctoral Fellow, Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia Sinica P.O. Box 1-87, Nankang, Taipei 11529, Taiwan, R.O.C.

Abstract: We made CCS Zeeman observation toward a dense molecular cloud core in Taurus molecular cloud (TMC), L1521E, by using a new polarimeter system developed for the Nobryama 45-m telescope (Shinnaga, Tsuboi, and Kasuga 1999). The polarimeter system covers wide millimeter-wavelength range(1.2-8.6mm). We confirmed our calculation values for low-N rotational state of Zeeman effect of CCS. The measured value of the magnetic field strength was 160 ± 42 microgauss, which suggests that the core is in magnetically subcritical state.