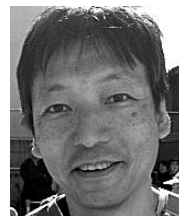


Z45プロジェクト—新たなセンチ波電波 天文学の開拓に向けて—



中 村 文 隆

〈国立天文台科学研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: fumitaka.nakamura@nao.ac.jp

我々は、世界有数の大口径電波望遠鏡である野辺山45 m鏡を用いたセンチ波帯（42–45 GHz）電波観測を推進するため、HEMT増幅器を使った両直線偏波Z45受信機を開発し、2013年3月に野辺山45 m鏡に設置した。本計画の科学目標は、静止周波数が45 GHzのCCS分子輝線のゼーマン分裂を検出し、星形成直前の高密度分子ガス塊に付随する磁場強度を測定することであった。センチ波帯電波観測は利用可能な受信機がほとんどなかったこともあり東アジアではさほど盛んに行われてなかった。しかし近い将来、ALMA Band-1などでアクセス可能となる波長域であり、新たなサイエンスの開拓が望まれる。ここではセンチ波帯電波天文学の新たな展開を期待して始めたZ45プロジェクトの概要と開発した受信機について紹介する。

1. Z45プロジェクト—事始め—

Z45というのは、野辺山宇宙電波観測所の45 m電波望遠鏡に搭載されている45 GHz帯の両偏波受信機[1]のことである。Z45受信機は2013年3月に45 m電波望遠鏡に搭載された。科学目標は、CCSと呼ばれる直線炭素鎖分子輝線のゼーマン分裂を検出し、これまで精確な測定例が極めて少ない高密度ガスの磁場強度を測定しようという野心的なものであった。観測波長はセンチ波帯（ ≈ 0.7 cm）で、受信機の帯域は42から45 GHzと狭いが、この帯域には炭素鎖分子、SiO分子やメタノール分子をはじめ、多数の分子輝線が存在[2]し、他の様々なサイエンスにも利用可能である。

プロジェクトを開始した当時は、磁場の観測と言うと、南アフリカのIRSF望遠鏡のSIRPOLなどを用いた直線偏光観測が盛んに行われていた[3, 4]。しかし、直線偏光観測からは天球面上に射影した磁場の向きは測ることができるが、磁場強度を精確に導出することは難しかった。そのた

め、星形成過程における磁場の役割の理解はあまり進んでいなかった。星形成過程において磁場が力学的に重要な役割を及ぼす（磁場は強い）と主張する研究者から、磁場は重要ではない（磁場は弱い）と結論付ける研究者までいて、議論が収束していなかった[5–7]。

星間磁場の強度の測定は、ゼーマン観測が最も適しているが、星間空間で予想されるゼーマン分裂は後で述べるCCSの場合でも、せいぜい60 Hz程度の分裂幅を検出する必要があり、技術的にも大変難しい観測である。世界的には熱的な輝線に限定すると、H I 21 cm輝線やOH輝線・吸収線、100 GHz帯のCN輝線のゼーマン測定が盛んに行われていた[5]。しかしH IやOH輝線は周波数が低く、分子雲の高密度領域の磁場測定はできない上に観測の空間分解能が悪い。一方、CNは高密度領域をよくトレースするが、主に星形成が進んだような領域の観測に適したものであった。星形成における磁場の役割を解明するには、星形成が起こる直前の領域での磁場の役割を理解すること

が重要である。

そこで本プロジェクトでは、周波数 45 GHz、つまり波長約 0.7 cm の CCS 輝線をターゲットにすることにした。この輝線は日本人グループが実験室で周波数を測定し、野辺山 45 m 鏡を使った観測で世界で初めて星間空間からやってくる輝線の同定・検出に成功したという意味で重要な輝線 [8] である。また、CCS 分子は星形成が起こる前の進化段階で豊富に存在する分子で、臨界密度も 10^4 cm^{-3} 程度と高く、高密度ガスの重力収縮で始まる星形成を調べるには最適の分子輝線の一つである [9]。さらに不對電子を持ち分裂幅が比較的大きい輝線 [10] であり、静止周波数も 100 GHz に比べて小さいので分裂が検出しやすいという利点もある。つまりゼーマン観測には最適と考えられる分子輝線である。

野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いた CCS 分子輝線のゼーマン観測は新永弘子氏が 1999 頃実行したことがあった [11] が、本プロジェクトを始めた 2010 年当時、ゼーマン観測が可能な両偏波受信機は野辺山にはなかったもので、自分たちで製作することにした。このような活動を始めるきっかけを与えてくださったのは、東京大学の山本智氏である。2010 年頃、ゼーマン観測を行うための受信機を製作するプロジェクトを始めるために科研費を申請しようとしたことがあり、山本氏に当時私が住んでいた新潟にまでわざわざ来ていただき議論したこともあった。結局このときの計画は、民主党政権の仕分けの影響を受け、応募直前に申請予定の科研費カテゴリーが消滅してしまったため、申請できなかった。

その数年後に野辺山観測所長の川邊良平氏と議論したり、野辺山ユーザーズミーティングで講演したりして徐々に計画が具体的にまとまってきた。そこで、大阪府立大学の小川英夫氏に受信機製作の依頼をすることになった。またそれまであまり面識がなかったが、本プロジェクトのキーパーソンとなった亀野誠二氏と話をしたのもユー

ザーズミーティングのときだった。亀野氏は超高周波数分解能観測を可能とするソフトウェア分光計 PolariS [12] の開発、それを用いた偏波較正法確立が主な担当であった。

受信機について小川氏に相談すると、「中村くん、受信機と言ってもねえ〜。本気？ あれだよ。あれ。先立つもの。なんにもない何も始まらないからね。」と多少謎めいたコメントが返ってきた。はっきりとはわからなかったが、先立つものって予算かなと理解し、予算を得るために科研費を応募することになった。科研費を獲得する可能性は低いと思い、全く期待していなかったが、運良く採択していただき、計画をスタートすることができた。ただ、これまで主に数値シミュレーションをやってきた私にとっては全く新しい世界で戸惑うことが多かった。

受信機の開発を始めるに当たり、その他の研究への応用も考えられるだろうということで、40 GHz 帯での星間化学の研究や高赤方偏移天体からの分子輝線の検出（それによる赤方偏移の同定）も進められないかと考えた。そのようなサイエンスをひっくくめて、Z45 受信機により、これまで東アジアではあまり行われてこなかったセンチ波帯での電波観測が盛んになると嬉しいなという期待もあった。

2. Z45 受信機

開発した受信機を紹介する。受信機の開発は大阪府立大学の小川英夫氏と木村公洋氏および大阪府立大学の学生さんが中心になって行った。図 1 に Z45 の光学系と野辺山 45 m 鏡のビーム伝送系の概略を示した。新規開発部分は四角い枠で示した箇所である。まず天体からの電波は、45 m のパラボラアンテナで受信され、複数のミラーを通じて Z45 の上部まで導かれる。ビーム伝送系からの電波は、平面鏡と楕円鏡を通じて新規開発したコルゲートホーンから受信機内部へと導かれる。のちに平面鏡と楕円鏡の組み合わせが、ゼーマン

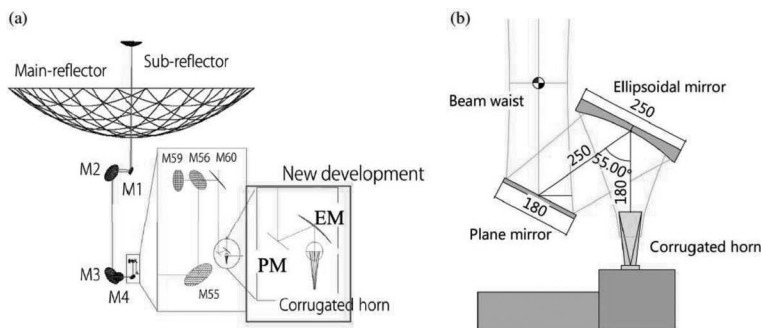


図1 野辺山45 m電波望遠鏡とZ45の光学系の概要. 左図 (a) の四角で囲われた部分が開発したZ45受信機である. 右図 (b) は受信機部分を拡大した詳細図である. PM (Plane Mirror) とEM (Ellipsoidal Mirror) は開発した平面鏡と楕円鏡.

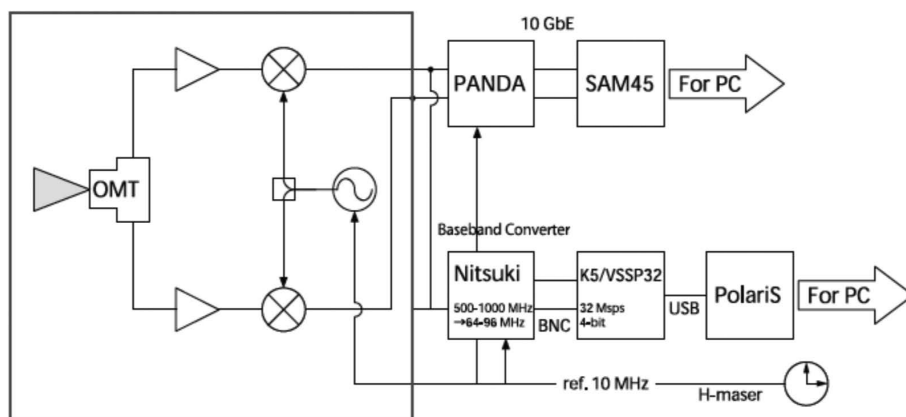


図2 Z45受信機のブロック図.

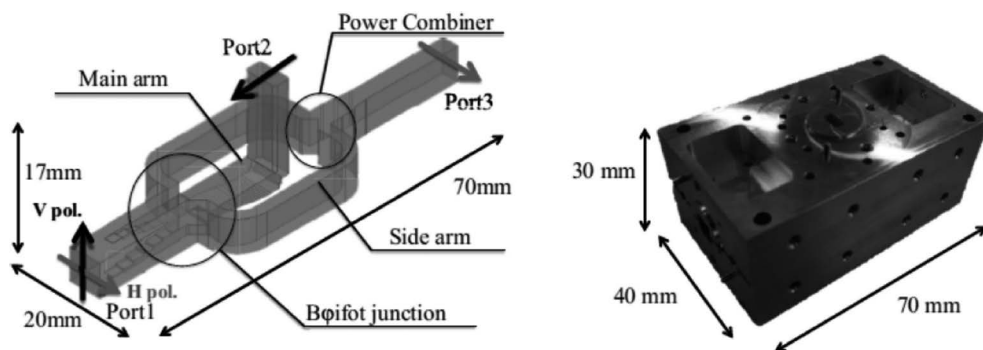


図3 新たに開発した導波管OMT. これを使って望遠鏡で受けた電磁波を2つの直線偏波成分に分離する. 開発の一部の成果は, 2012年12月に箱根で開催された国際研究会「New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era」にて当時修士1年の徳田一起氏が「A New 45 GHz Band Receiver with Dual Polarization for NRO 45-m Telescope」という題名のポスター論文を発表し, 「Poster Award」を受賞した.

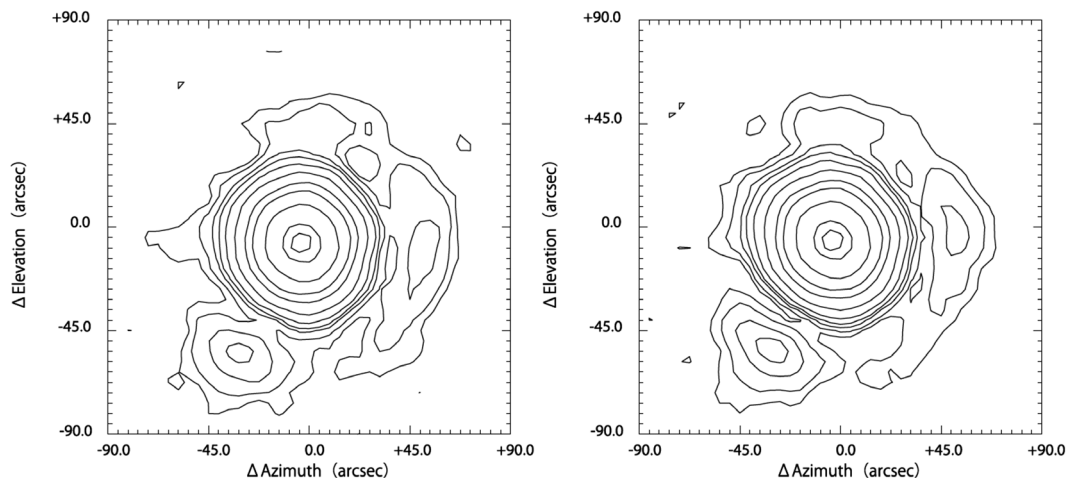


図4 R-LeoからのSiOメーザーを使ったビームパターンの測定. 左が水平成分, 右が垂直成分の積分強度. 等高線は下からピーク強度の0.5, 1, 2, 3, 5, 7, 10, 20, 30, 50, 70, 90%の強度で引かれている. 試験測定は茨城大学の米倉氏の下行った.

分裂の検出の困難さを大きくするとは, このときは想像していなかった. 参考のため, 受信機のブロック図を図2に示す(受信機全体のデザインおよび実物の写真は亀野誠二氏の記事を参照). 受信機内部に入った電波はまず, 新規開発した導波管(OMT=Ortho mode Transducer)で直線偏波2成分に分けられる(図3参照). OMTは当時学部4年生であった大阪府立大学の徳田一起氏が中心になって設計した. この受信機の特徴は, 上部に偏波較正のために方向が既知の偏波を作るためのワイヤグリッドシステムの取り付け部分があることである. さらに受信した信号は2系統の出力から, 一方はデジタル分光計SAM45とソフトウェア分光計PolariSへと送られる. ゼーマン観測をするときはPolariSを使い, 通常観測をする際はSAM45を用いる.

受信機や分光計の立ち上げや試験観測については水野いづみ氏の記事に詳しく書かれている. そちらもご覧いただきたい.

3. 試験観測の結果

さて, 無事に受信機設置が完了し, 次に行ったのは各種測定である. ここでは, 茨城大学の米倉覚則

表1 Z45のスペック.

受信機タイプ	HEMT
RF周波数	42-46 GHz
IF周波数	4-8 GHz
受信機雑音温度	約50 K
偏波	両直線偏波
使用分光計	PolariS/SAM45
ビームサイズ (HPBW)	37"
ビーム能率	0.72 (43 GHz)

氏がリーダーとなって行った測定観測の結果を紹介する. システム雑音温度の測定などの各種測定では, 当時大学院生であった水野いづみ氏と谷口琴美氏が精力的に行ってくれ, 非常に頼りになった.

まず受信機が期待される性能を持つかを確認する必要がある. 設置した状態で信号が正しく受信機で検出できるか, 受信機の雑音温度は実験室での測定結果に矛盾しないかなどの基本的な確認を行った.

次に, 天体からの電波を使って受信機のビームパターンに変な歪みがないか, またビームサイズは予想通りかなどの通常行われる試験観測を太陽系内の惑星や変光星からのSiOメーザーなどを用いて行った. これらの測定観測を行う前に, 受信機の光軸が望遠鏡の軸ときちんと一致するように

正しい位置に設置する必要があった。受信機の最初の位置調整は、野辺山観測所で研究員の経験もあり、受信機開発を専門とする中島拓氏の協力も非常に重要であった。受信機位置調整のための観測は、当初の割当日の昼間は弱い風があり、数日やったがなかなか決まらなかった。その日の夜間の霧が立ち込める中、不思議と無風であったので、当時の観測所長であった久野成夫氏から許可をもらい、深夜に位置決め観測を行った。濃霧

であったので通常観測は不可能であったが、強いSiOメーザー源を使つての観測は可能であった。米倉氏と中島氏の指示の下、受信機位置調整を終え、次の日に再度確認したりして無事に完了した。

これらの観測には野辺山にある既存のデジタル分光計SAM45を使った。図4にミラ型変光星し座R星(R Leo)のSiOメーザーのマップを示した。図からわかるとおり、外側で1%程度の非対称な成分が見られるが、中心部分はほぼ対称で

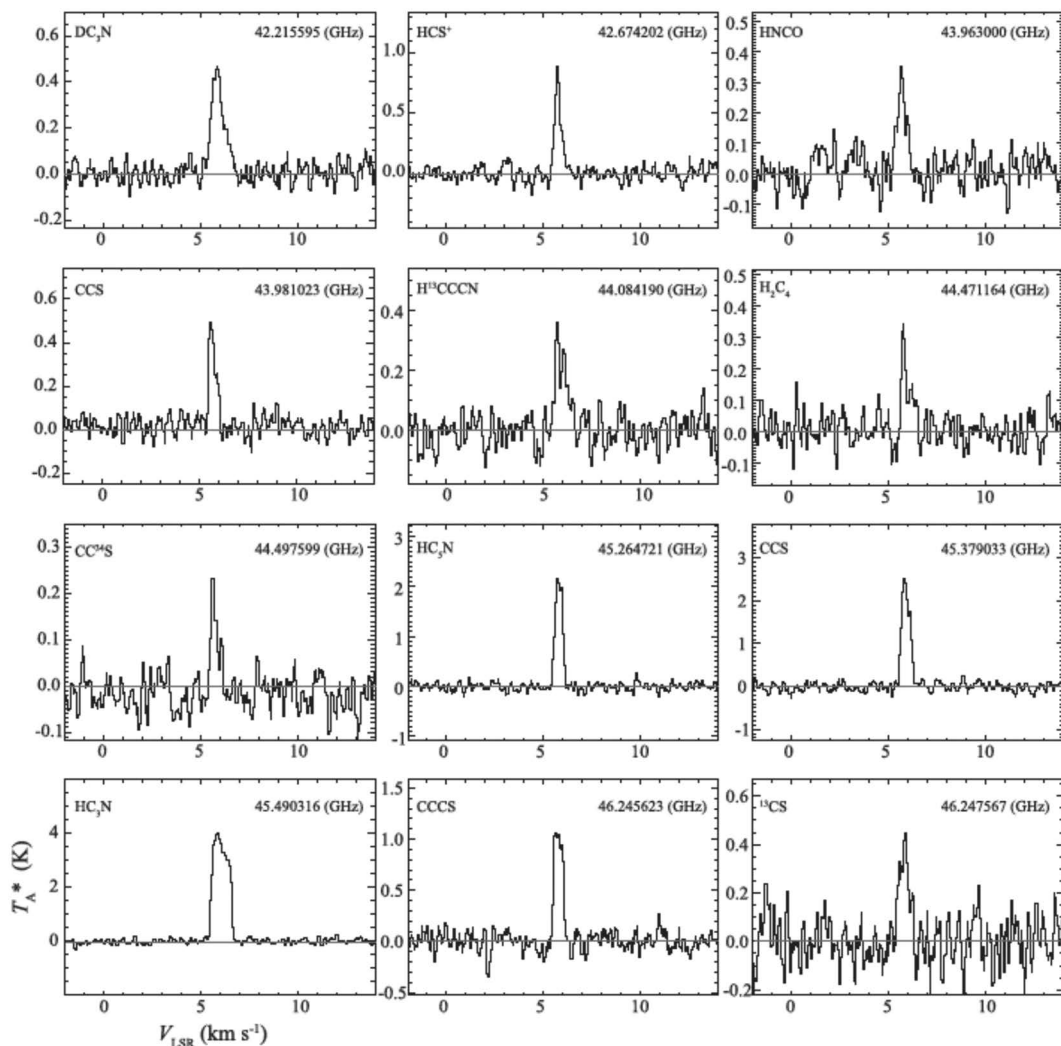


図5 おうし座星無しコアTMC-1 (CP)で受信された分子輝線のプロファイル。ゼーマン観測のターゲット輝線CCSはこの観測点では比較的強く、強度が2 Kを超えている。積分時間は輝線によってやや異なるが、200-600秒程度である。達成されたノイズレベルは速度分解能 $\Delta V = 0.075 \text{ km s}^{-1}$ で $\Delta T_{\text{rms}} = 0.03 - 0.08 \text{ K}$ である。

あることがわかる。科学目標であるゼーマン観測では、偏波2成分の差（左右円偏波の差がストークスVになる）を取ることで、ビームパターンに歪みがあると、ストークスVプロファイルに人工的な分裂パターンが出てしまう。しかし、この測定等から、偏波観測に影響するほどの強いサイドローブはないことがわかり安心した。これら確認を完了し決定したZ45受信機の性能の一部を表1にまとめた。センチ波帯では、ビームサイズは37"とやや大きいですが、ビーム効率も100 GHz帯に比べて1.5倍ほど高く、効率の良い観測ができることがわかる。

4. 最初の観測成果

これら試験観測を行い、当初期待された観測が実行可能であることを確認できた。まず、ゼーマン観測の第一ターゲットであったおうし座星無しコアTMC-1（CP）へ向けた1点観測を行い、いくつかの分子輝線の観測を行った。取得した分子輝線のプロファイルを図5に示した。この位置では、ターゲットのCCSやHC₃Nなどの炭素鎖分子の輝線強度が強いことがわかる。

次に行ったのは、マッピング観測など野辺山での通常観測での受信機の性能チェックとゼーマン観測をするために新たなターゲット探査である。この頃、別の観測プロジェクトでSerpens Southという星形成領域に注目し、名古屋市立大学の杉谷光司氏と共同で研究をしていたところであった。この領域はフィラメント状暗黒星雲の中心に高密度クランプがあり若い星団が形成されている領域である。クランプの中心部にある原始星の8割以上がクラス0/I天体であった。つまり星団形成が最近始まった非常に若い領域である。ASTE望遠鏡を使ってCOアウトフローの観測をして、実際に多数のアウトフローを検出した[14]。若い領域であれば、CCS輝線も強いに違いないと予想し、Serpens Southのマッピング観測も行った。そのとき取得したマップは図6で示したように強いCCS輝線がフィラメントに沿って検出された。マップ

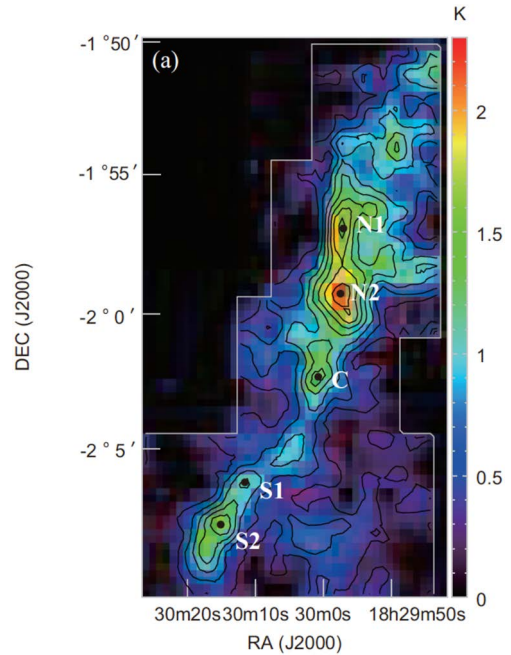


図6 Serpens South領域のCCS積分強度図。

としてもきれいなものが比較的短時間で取得できた。400 pcも離れているにもかかわらず、おうし座TMC-1よりも強いCCS輝線が受かったのは驚きであった。フィラメントに沿って複数の高密度領域が分布していることがわかる。N2というラベルのあるコアでは若い星団が形成されている。

そのときのデータをさらに解析し、本領域のきれいなCCSマップからフィラメントが衝突して星団形成が誘発されていることが示唆された。45 GHzのSiO ($J=1-0$)の熱的輝線もCCSとの同時観測により取得していたが、中心部からの原始星アウトフローがSiOでも検出された。さらに注意深くデータを見ると、複数の地点でアウトフロー起因では説明が難しい非常に弱く線幅が広がった成分も検出された。SiOは温度が高くなった領域でダストから出てくるので、これらの弱いSiO輝線は、フィラメント衝突による衝撃波の影響を示しているかもしれないと予想された[15]。これはセンチ波帯でのサイエンスの1例として重要と思い、研究成果を論文として出版した。なお、

Serpens South も含む Aquila Rift 領域については、2020年7月号掲載の大妻女子大学の下井倉ともみ氏の月報記事に詳しく解説されている。

5. ま と め

単一鏡を用いたセンチ波帯観測は空間分解能がミリ波帯観測に比べて大きくなるので、分子雲の微細構造を見るには不利である。しかし、特に野辺山45 m鏡の主力であるミリ波帯観測に比べ、ビーム能率が良いので、観測効率は非常に良い。他の記事でも紹介するように、様々なサイエンス成果も出ており、単一鏡を用いたセンチ波帯観測で特色ある観測成果を今後も出すことは可能であろう。

現在、台湾中央研究院と共同で、より高感度かつ広帯域の受信機システムeQ受信機の開発を進めている。受信機は完成し野辺山に搭載する時期をうかがっているところであるが、COVID-19の影響を受け、搭載計画が大幅に遅れている。早く日本-台湾の渡航規制が解除されることを願っている。新受信機は帯域30-50 GHz (1-0.6 cm) と非常に広帯域であり、またALMA Band-1の帯域(35-50 GHz)もカバーしている。単一鏡に搭載された新受信機とALMA Band-1[16]ならびにngVLAなどのセンチ波帯の干渉計観測を連携させたサイエンスが東アジアでも展開され、新しい天文学的発見が出てくることを強く祈っている。eQ受信機開発に関しては、台湾中央研究院のChau Ching Chiong氏の記事で紹介するので、そちらをご覧ください。

謝 辞

Z45受信機の開発・設置・試験観測に協力してくださった多くの方々の献身的協力に感謝する。また野辺山観測所職員の方には、私たちの数々の無理なお願いに対応してくださりました。この場を借りて深く感謝いたします。本開発・研究は科研費基盤研究A(24244017, 17H01118)の補助を受けました。

参考文献

- [1] Nakamura, F., et al., 2015, PASJ, 67, 117
- [2] Kaifu, N., et al., PASJ, 2004, 56, 69
- [3] Sugitani, K., et al., 2011, ApJ, 734, 63
- [4] Kwon, J., et al., 2011, ApJ, 741, 35
- [5] Crutcher, R. M., 2012, ARAA, 50, 29
- [6] Nakamura, F., & Li, Z. -Y., 2008, ApJ, 687, 354
- [7] Mouschovias, T. C., & Tassis, K., 2009, MNRAS, 400, L15
- [8] Saito, S., et al., 1987, ApJ, 317, L115
- [9] Suzuki, H., et al., 1992, ApJ, 392, 551
- [10] Shinnaga, H., & Yamatomo, S., 2000, ApJ, 544, 330
- [11] Shinnaga, H., et al., 1999, in Star Formation 1999, ed. Nakamoto, T., (Nobeyama Radio Observatory, Nagano), 175
- [12] Mizuno, I., et al., 2014, JAI, 3, 1450010
- [13] Tokuda, K., et al., 2013, ASP Conf. Ser. 476, 403
- [14] Nakamura, F., et al., 2014, ApJ, 791, L23
- [15] Nakamura, F., et al., 2011, ApJ, 737, 56
- [16] Huang, Y. D., et al., 2016, arXiv:1612.00893

Z45 Project: Opening a New Window of cm-Radio Astronomy

Fumitaka NAKAMURA

Division of Science, National Astronomical Observatory of Japan 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: We have constructed a 45 GHz (~ 0.7 cm) band dual-linear polarization receiver, Z45, and have installed it on the Nobeyama 45-m telescope. The main science goal was to detect a Zeeman splitting of the CCS ($J_N=4_3-3_2$) line from dense prestellar cores to derive the strength of magnetic fields. The cm-wavelength radio observations have not been done actively especially in East Asia except the VLBI observations, because the receivers in the cm-band have not been available. Our receiver can be used for other sciences such as ISM astrochemistry and molecular line detection for high- z objects. In near future, the ALMA band-1 (35-50 GHz) will also be available. We believe that the cm-wavelength observations have a potential to open up new sciences. We hope that researchers in East Asia will explore the cm-radio astronomy more actively and find great astronomical discoveries.