

7 mm 帯電波観測の究極の受信機作り： eQ 受信機計画の概要



章 朝 盛

〈台湾中央研究院天文及天文物理研究所 〒10617 台北市羅斯福路四段 1 號中央研究院／台灣大學天文數學館 11 樓〉
e-mail: ccchiong@asiaa.sinica.edu.tw

野辺山 45 m 電波望遠鏡に搭載するという目標のもとで、我々は 7 mm 帯の電波観測用の eQ 受信機を開発しました。この受信機は、従来の受信機に比べて格段に広い観測帯域幅を持つ高感度受信機で、複数の分子輝線のゼーマン同時観測などの新しいサイエンスの開拓に役立つと期待しています。大口径単一鏡用に開発した eQ 受信機は、電波干渉計 ALMA 用の Band-1 受信機から発展させた部分もありますが、新しい光学設計と極低温低雑音増幅器 (CLNA) を採用したことで、Band-1 受信機より広い観測帯域幅、より低いシステム雑音温度が達成できました。受信機は台湾中央研究院の実験室で開発・組み立てられ、実験室での性能テストを無事に終えています。システム雑音温度は平均で 15 K という低い値を達成しました。2020 年 4 月に受信機設置審査に合格しましたが、COVID-19 の影響による台湾-日本の渡航制限を受け、設置作業の日程は依然として不確定です。

1. eQ 受信機計画

7 mm 帯の電波観測は、長い炭素鎖分子の探査、系外銀河のサーベイ、原始星コアの磁場の強度測定などの様々なサイエンスで有用です。2008 年に台湾中央研究院 (Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics, ASIAA) が ALMA Band-1 コンソーシアムに参加したとき、単一鏡用の 7 mm 帯受信機、eQ 受信機製作が提案されました。eQ という名前の由来は、extended Q-band から来ています。Q-band はおよそ 33–50 GHz の周波数域を指します。当時の計画は ALMA Band-1 の試作機を野辺山宇宙電波観測所の 45 m 電波望遠鏡に設置して初期の予備観測を行うことでした。このアイデアは、当時、野辺山観測所長であった川邊良平氏が計画していた 20 GHz から 100 GHz までをカバーし、遠方銀河の赤方偏移を測定しようという z-machine 計画にも貢献できる期待がありました。

野辺山 45 m 鏡は、ミリ波サブミリ波の波長域では東アジアで最大の単一望遠鏡で集光力も高く、eQ 受信機が野辺山に設置されれば、これまでにない高感度の電波観測が実現できると期待できます。特に東アジアでは、7 mm 帯の電波観測はこれまであまり盛んに行われてこなかったもので、ALMA Band-1 を用いた新しいサイエンスの検討にも役立つと期待されます。2019 年 3 月に国立天文台三鷹で開催された台湾と日本の合同ワークショップでも様々な可能性が検討され、新たな天文学研究の開拓・展開について活発な議論が行われました (図 1 参照)。サイエンスの 3 つの柱として、遠方銀河からの分子輝線 (CO) の検出、星間空間のゼーマン分裂の検出、7 mm 帯の星間化学の開拓が提案されました。どれも ALMA Band-1 によるサイエンスの展開が期待されるものです。

ALMA Band-1 受信機の試作期間中に我々は、受信機の性能を落とすことなく帯域を Band-1 計

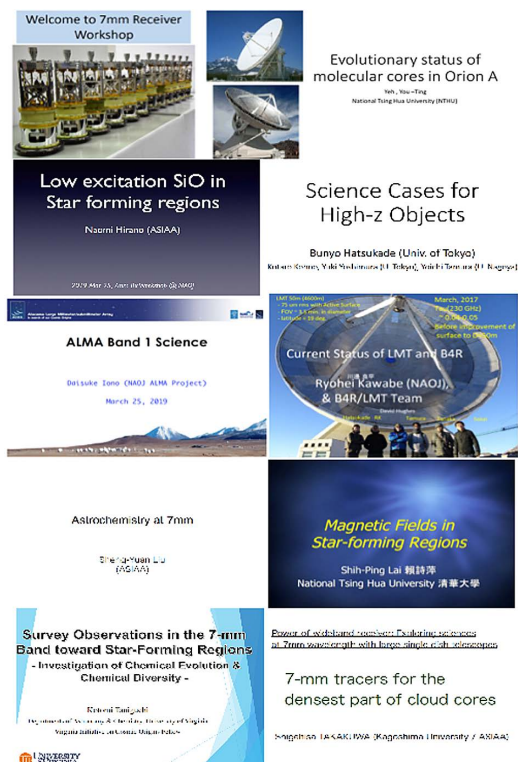


図1 サイエンス検討会議のハイライト。

画よりも低周波側に5 GHz広域な30–50 GHzに拡張可能なことに気づきました。ASIAAのeQ受信機開発チーム(図2参照)は優秀な若手も多く、様々な観点から受信機改良のアイデアが出てきました。ASIAAは、台湾の最高学術研究機関のなかの天文天体物理学研究部門で、本部は国立台湾大学内にあります。

2. サイエンスの目玉: 星間磁場測定

ALMA Band-1よりも低周波側に5 GHz広い帯域(30–35 GHz)には、多数の特徴ある分子輝線が存在します。炭素鎖分子と呼ばれる鎖のようにつながった、地上では存在の難しい分子の輝線がその例です。また、静止周波数がこの帯域に含まれるSO ($J_N=1_0-0_1$)とCCS ($J_N=3_2-2_1$)は磁気モーメントの大きな遷移があるので、ゼーマン分裂の検出に適していると期待され、特別に注目してきました。したがって、eQ受信機を使えば、SO ($J_N=1_0-0_1$)、CCS ($J_N=3_2-2_1$)、CCS ($J_N=4_3-3_2$)の3輝線同時観測によるゼーマン分裂の検出が可能となります。

3輝線同時にデータが取得できると、3輝線を別々に観測する場合に比べ観測時間が大幅に短縮

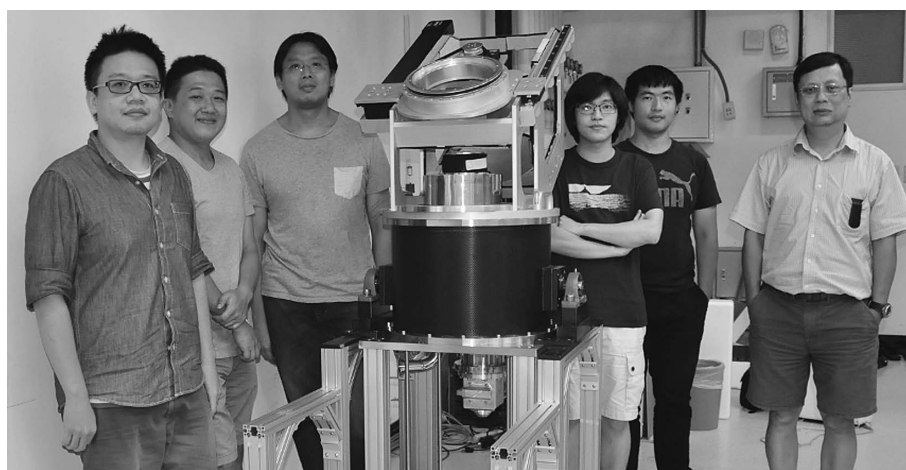


図2 ASIAAのeQ受信機開発チーム。左から順にShou-Ting Jian (簡守廷), Chin-Ting Ho (何晉廷), Chau-Ching Chiong (章朝盛), Chen Chien (簡誠), You-Ting Yeh (葉佑廷), Yuh-Jing Hwang (黃裕津)。真ん中にあるのが開発したeQ受信機。

表1 30-50 GHzのゼーマン分子輝線.

分子	遷移	周波数 GHz	ゼーマン係数 A_{mol} $\text{km s}^{-1} \text{Gauss}^{-1}$
SO	$J_k=1_0-0_1$	30.0015	12.425
CCS	$J_N=3_2-2_1$	33.7514	4.409
CCS	$J_N=4_3-3_2$	45.3790	2.938

できること, CCSについては異なる遷移データから励起温度や密度などの物理状態の情報も得られること, また, CCSとSOの同時観測により進化段階の違う分子雲コアの観測が一度にできることなどの大きな利点があります. たとえば, CCSは化学進化が若い段階にあるコア(たとえば, 形成直後のコア)で豊富に存在するのに対し, SOは化学進化が進んだコア(たとえば, 原始星コア)でも比較的豊富に存在するので, コアの進化段階に関係なく磁場の測定ができます. 既存のZ45受信機では100 μGauss 程度の磁場の測定に30時間もの積分時間が必要でした. eQ受信機の雑音温度は3倍程度は低いので検出時間は3時間程度に短縮できます. そのため, より多くのコアの観測やある領域を複数点観測することで磁場強度のマップの作成もできそうであると期待しています. 参考のため, 表1に3輝線の周波数とゼーマン分裂係数をまとめました. CCS ($J_N=4_3-3_2$)はALMA Band-1でも観測できますが, 最もゼーマン分裂係数が大きいSOはeQ受信機でしかカバーできません.

3. 受信機開発

100 GHz以下の周波数用の受信機では, 極低温低雑音増幅器(cryogenic low noise amplifier, 略してCLNA)が重要な役割を果たします. しかしながら, ALMA Band-1のCLNAは30-33 GHz帯をカバーしていませんでした. 2016年, ALMA Band-1開発が開始された頃, Low Noise Factory(LNF)社が28-52 GHz帯をカバーする新しいCLNAを発売しました. このCLNAでは約10 Kという低い有効雑音温度が達成できます. これを

使うことで帯域を広げ, より低雑音温度も実現できると期待されました. しかしながら, 単一鏡用のeQ受信機にはこの新CLNAに加え, 30-35 GHz帯をカバーできる新しいフィードホーンと円形導波管(OMT)の開発が必要でした. それに加え, 野辺山45 m鏡に合わせた光学システムと, 受信機の特徴である非常に広い帯域全体を同時にカバーする分光計の開発も必要でした. この目標を目指して, 台湾と日本の合同チームは協力して, eQ受信機を野辺山に設置するという提案を2017年に野辺山宇宙電波観測所に行いました. この合同チームには, ASIAAや国立天文台のほか, 台湾・日本両国の大学も参加しています. 我々のeQ受信機設置提案は2017年9月に採択されました.

ALMA Band-1受信機の開発では様々な課題に直面し, それらを解決することは非常に良い経験になりました. たとえば, システム雑音温度は当初18-25 Kが目標でしたが様々な要因で25-32 Kに変更され, その後, 光学系の影響を考慮して, 最終目標は28-32 Kに落ち着きました. この開発から, (1)分厚いHDPEレンズ(高密度ポリエチレンレンズ)は大きな誘電損失を与えること, (2)受信機の真空窓の直径がBand-1の周波数帯では小さすぎて損失が大きくなることなどを学びました. Band-1受信機の光学系での損失は全体で9-11 Kもありましたが[1], 受信機のシステム雑音温度が全体で30 K程度であることを考えると, これは大きなパワーロスになります. そのため, eQ受信機の開発においては光学システムの設計を注意深く行うことが特に重要な点であると考えました.

光学系開発では, 交差偏波特性を低く保ちつつシステム雑音温度も低く抑える必要があります. 光学系開発の難しい課題の一つでした. 特に本受信機はゼーマン観測をするので交差偏波特性は低く抑える必要がありますし, 限られた観測時間で微弱的な分裂のサイン(ストークスVスペクトル)を

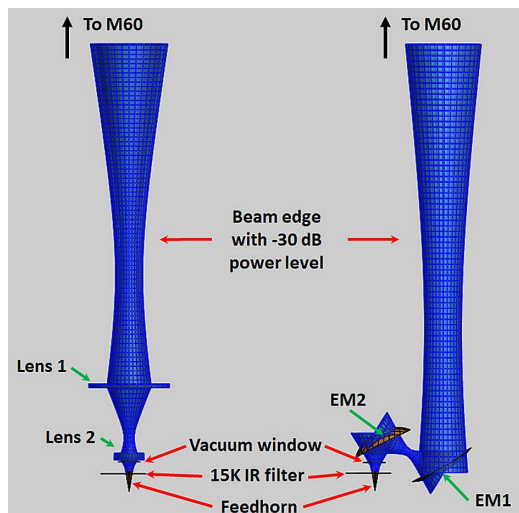


図3 GRASPによるレンズ部分(左)とミラー部分(右)の光学シミュレーションの結果。天体(上部)からくる電波がどのように下部にあるフィードホーンまで届くかを電磁波計算したもの。左図は、フィードホーンや光軸すべてを同じ軸になるように配置した場合。システムが対称になるので交差偏波特性は対称性も良く性質の良いものとなります。しかし様々な設計上の条件により、図に示したように途中にレンズ(Lens 1, Lens 2)を入れる必要があります。大きなノイズが入ってしまいます。右図は楕円鏡(EM1, EM2)を2つ使った場合。交差偏波特性の対称性はやや悪くなりますが、レンズのノイズは入りません。eQ受信機では楕円鏡の位置を調整し、右の方式を採用しました。

検出するには低い雑音温度も譲ることのできない条件でした。光学軸上にレンズ系を配置する場合、系の対称性も良いので交差偏波特性も低く抑えられますが、電磁場解析ツールであるGRASPシミュレーションによると、開発する光学系のサイズを考慮すると、45 m望遠鏡のビーム全体をカバーするには、高誘電率の大きな厚いシリコンレンズを入れる必要があることが判明しました(図3左)。そのようなレンズを採用すると受信機の雑音温度がさらに10 K以上高くなってしまいます。つまり受信機雑音温度が2倍程度に増加してしまいます。一般に、観測時間は受信機雑音温

度の2乗に比例して増加しますので、観測時間が4倍も増えることになります。

そこで試行錯誤を重ねた後、図3右のような2つの楕円鏡を用いた光学系にすれば、交差偏波特性は5%程度悪くなるが、受信機雑音温度にはほとんど影響がないことがわかりました。そのため、ALMA Band-1受信機で採用されている厚いHDPE誘電レンズ(厚み40.8 mm, 雑音温度4 K)を取り除き、その代わりにミラーを設置することにしました。次になるべく損失を低く抑えるために、すべての窓とミラーの直径を慎重に決めました。

その他の部分の開発では、フィードホーン、OMT, CLNA, ダウンコンバーターの構造を、非常に広い周波数域を同時にカバーできるように設計することが大きな挑戦でした。フィードホーンとOMTの設計については、Band-1の設計を参考にしました[2, 3]。フィードホーンは広い帯域(相対帯域50%)をカバーするために、全長が短いコルゲートホーンになるように設計しました[4]。この種のフィードホーンの欠点は、ビームパターンのサイドローブレベルが高くなってしまいます。そのため、既存のZ45受信機と異なり、ノイズを減らすために図4に示したようにフィードホーンをデュワー内部に置く設計し、デュワーは冷却することにしました。

eQ受信機では偏波観測をするため、入力信号を2つの偏波成分に分離するOMTの性能が重要となります。eQ受信機のOMT(図5参照)はBand-1受信機と同じように直線偏波システムを採用しました。ちなみにZ45受信機も同じ直線偏波システムです。このOMTでは入射した信号を2つの直線偏波成分に分けます。ゼーマン観測では、2つの円偏波成分の差であるストークスVから磁場強度を導出します。円偏波受信機のほうが直接ストークスVプロファイルを出せて良さそうに思われますが、そうすると、受信機起因の人工的に生み出された円偏波成分の影響がかなり大

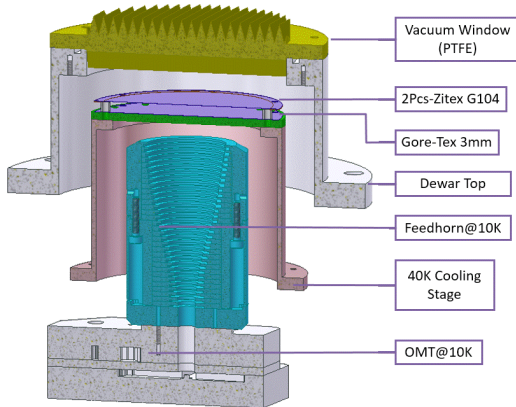


図4 光学コンポーネントのレイアウト。受信機雑音温度を下げるため、eQ受信機では冷却デューワーを採用しました。図は冷却部分の構造です。Vacuum Window (PTFE) は冷却デューワーの上部 (図3右の Vacuum window と同じ) で、室温部分との接続部分です。この部分から天体からの電波が入射してくることになります。2 Pcs-Zitex G104とGore-Tex 3 mmのフィルムは、室温からの熱放射の影響を低減させるためのフィルターに相当し、Feedhornは図3右のフィードホーンと同じです。

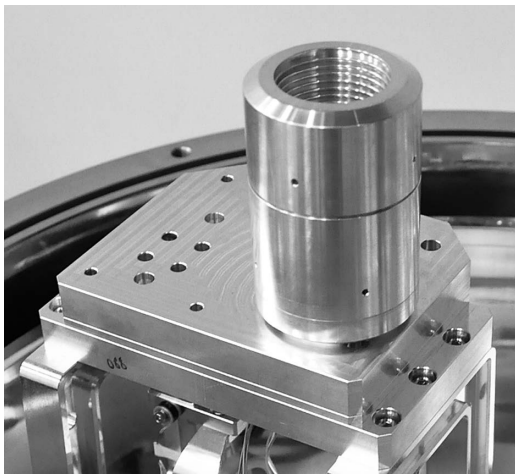


図5 フィードホーンとOMT部分の写真。図4の下部の構造。eQ受信機ではノイズ軽減のためホーン部分は低温に冷却されています。

きくなるため、偏波較正をかなり注意深く行う必要が出てきます。一方、亀野誠二氏の記事[5]にもあるように、2つの直線偏波成分の相互相関か

ら円偏波成分を導き出すと、受信機起因の円偏波成分の寄与を小さくできるので、得られたストークスVは装置起因の成分の影響が小さくなります。そのため、ゼーマン観測には直線偏波システムのほうが適しています。OMTは回転分岐型OMT[6]と呼ばれるタイプのものを開発することにしました。実験室での測定結果では、フィードホーンとOMTも含めた光学系での損失を3-5 Kに抑えることに成功しました。

通常の実験機と同様にeQ受信機でもダウンコンバーターと呼ばれる信号を変換する機器を使う必要があります。受信機の実験機を示す値としてIF (Intermediate Frequency) 周波数というものがあります。IFとは受信機の間段階での信号の周波数のことです。野辺山45 m鏡のIFシステムは、各入力ポートごとに最大4 GHzのIF帯域幅しか受け入れることができない仕様になっているため、一度にeQ受信機のIF帯域をカバーすることができません。この問題を解決するために、ダウンコンバーターを2SBと呼ばれる動作モードのものに変更し、各サイドバンドを4-8 GHz IF帯域幅にするという設計にしました。この工夫により、広い周波数域の同時観測が可能となりました。

4. 受信機性能と世界の受信機との比較

上記のように工夫を重ねて開発したeQ受信機システムをASIAAで組み立て、2019年に実験室で性能測定をしました。受信機の雑音温度は平均値約15 Kと設計通りの低雑音温度を達成することができました (図6)。この値は、この周波数帯では最先端の非常に低い値です。野辺山45 mのeQ受信機と代表的な大口径電波望遠鏡の受信機 (Green Bank望遠鏡の広帯域受信機とEffelsberg望遠鏡に搭載された7 mm帯の受信機) との比較を表2にまとめました。野辺山45 m鏡の口径は他の2つの望遠鏡と比べて半分程度ですが、円偏波ゼーマン信号を正確に測定できる両直線偏

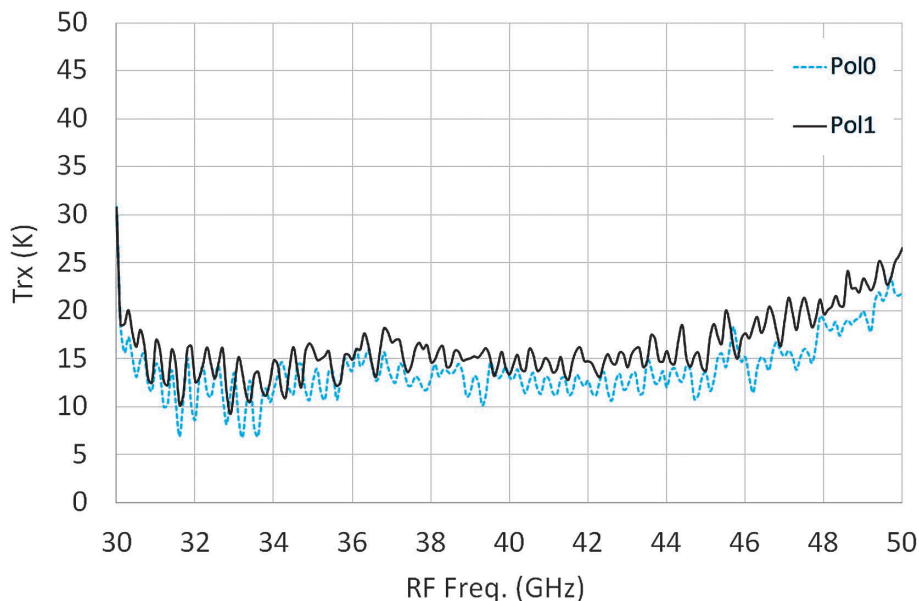


図6 測定された受信機雑音温度の周波数依存性。広い周波数域で受信機雑音温度は15 K程度に抑えられています。2本の線は向きの異なる偏波成分を表します。どちらに対しても周波数依存性はほぼ同じで受信機雑音温度レベルもほぼ同じです。

表2 代表的な大口径望遠鏡における7 mm帯受信機の性能の比較。Green Bankはアメリカにある100 m鏡。Effelsbergはドイツにある100 m鏡。どちらも円偏波受信機です。野辺山45 m鏡は望遠鏡口径は半分程度となり角分解能は劣りますが、eQ受信機は直線偏波受信機なのでゼーマン分裂測定での偏波較正はしやすい。Green BankのKa-band受信機はeQ受信機と同じ直線偏波受信機ですが、片偏波受信機で、2つの偏波成分の同時受信はできません。

	Green Bank		Effelsberg	野辺山45 m	
口径	100 m		100 m	45 m	
鏡面精度	240 μm		550 μm	100 μm	
受信機名	Q-band	Ka-band	S7 mm	eQ	
周波数域 (GHz)	38-50	26-40	33.5-50	30-50	
開口効率	0.58-0.64	0.63-0.67	0.22-0.27	0.61-0.63	
ビーム数	2		2	1	
偏波	両円偏波	片直線偏波	両円偏波	両直線偏波	
システム温度 (天頂)	67-160 K	50-120 K	70 K (@36 GHz) 103 K (@45 GHz)	69-113 K	
点源に対する					
感度 (mJy)	@30 GHz	—	10.2	—	72.8
	@35 GHz	—	12.2	—	75.8
	@40 GHz	16.3	—	46.5	81.1
	@45 GHz	20.3	—	54.4	90.8
	@50 GHz	32.5	—	—	119.4
SO (1_0-0_1)	×	○	×	○	
CCS (3_2-2_1)	×	○	○	○	
CCS (4_3-3_2)	○	×	○	○	

波システムを搭載しているのは、eQ受信機だけです。また、7mm帯の3つのゼーマン輝線の同時観測ができるのはeQ受信機のみです。このように野辺山45mとeQ受信機を組み合わせてやれば、世界レベルの7mm帯の天文観測を遂行することができると期待できます。

5. 最後 に

2020年の受信機設置に向け、小川英夫氏率いる日本チームのメンバーが2019年12月に台湾を訪れました(図7)。このとき、受信機設置の具体的な手順と野辺山45m鏡システムとの接続に関して、注意する点や大きな問題がないかを詳細にチェックしました。eQ受信機はかつて野辺山の研究を支えてきたS80/S100受信機が設置されていた場所に置かれることになっています。これまでに現地調査も数回行ってきました。受信機設置チームのリーダーは大阪府立大学の西村淳氏で、野辺山観測所の宮沢千栄子氏と高橋茂氏らの

現地サポートのもと、2020年5月に設置する予定で順調に計画が進んでいました。チームメンバーと野辺山宇宙電波観測所スタッフの協力もあり、2020年4月に開かれた設置準備の審査会も無事に通過し、あとは受信機を日本に向けて輸送し設置するだけでした。しかし、コロナウイルスのパンデミックにより、台湾-日本の渡航が制限され、5月の設置は不可能になってしまいました。パンデミックと渡航制限がなるべく早く緩和され、新たな設置日程が決まることを願っています。

謝 辞

本開発計画は、ASIAAのみなさんの様々な協力により成功しました。また、科研費基盤研究(A)「CCS・SOのZeeman観測による星形成における磁場の役割の徹底解明」(代表 中村文隆)からの財政面でのサポートも受けました。これらのサポートに対して感謝申し上げます。また、国立天文台野辺山宇宙電波観測所の方々には本開発



図7 2019年12月に開かれたeQ受信機を囲んでのASIAA・大阪府立大・国立天文台チームの事前打ち合わせの様子。受信機の上は図5の拡大写真で示した部分と同じ。

計画段階から様々な形で協力していただきました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Hwang, Y.-J., et al., 2016, SPIE, 9914, 99141X
- [2] Tapia, V., et al., 2017, J. Infrared Millim. Terahertz Waves, 38, 261
- [3] Henke, D., & Claude, S., 2014, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 62, 840
- [4] Chiong, C.-C., et al., 2021, Proc of Microwave Week 2020, accepted
- [5] 亀野誠二, 2021, 天文月報, 114, 95
- [6] Chiong, C.-C., et al., 2018, Proc of 2018 Asia-Pacific Microwave Conference, 1271 (doi:10.23919/APMC.2018.8617524)

Ultimate Receiver for 7 mm Frequency Band: An Overview on the eQ Receiver Project

Chau Ching CHIONG

Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia Sinica, 11F of AS/NTU Astronomy-Mathematics Building, No. 1, Sec. 4, Roosevelt Rd, Taipei 10617, Taiwan, R.O.C.

Abstract: A new receiver covering 30–50 GHz is built for the Nobeyama 45-m telescope. The wide bandwidth with high sensitivity will be useful for many new science cases, including simultaneous probing of three Zeeman lines at this frequency regime. The receiver is evolved from the ALMA Band-1 receiver, but with wider bandwidth and lower receiver noise temperature due to new optics component designs and cryogenic low noise amplifier (CLNA). The receiver has been successfully integrated and tested at ASIAA with averaged receiver noise temperature of ~ 15 K. The receiver has passed the installation readiness review in April 2020, but due to the COVID-19 outbreak, the actual installation time is still uncertain.