

RAINBOW 干渉計の受信機開発と共同利用の開始

芝 塚 要 公

〈東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: shiba@nro.nao.ac.jp

RAINBOW 干渉計 (RAINBOW) とは、野辺山ミリ波干渉計 (NMA) と野辺山 45m 望遠鏡 (45 m 鏡) を組み合わせたミリ波干渉計システムで、昨年度から共同利用が開始された。本報告では、45 m 鏡に搭載した RAINBOW の受信機開発と性能、そして共同利用の状況とその最新の成果を報告する。

1. RAINBOW 干渉計とは？

RAINBOW 干渉計計画は、国立天文台野辺山宇宙電波観測所が中心となって進めている、45 m 鏡と NMA を結合した高感度干渉計を立ち上げる計画である^{1), 2), 3), 4), 5), 6)}。国立天文台野辺山は、同一敷地内にミリ波帯の大型単一鏡と干渉計を擁する世界で唯一の観測所であり、その地の利を活かしたユニークな計画といえる。この RAINBOW という名前は、7 台 (7 色) のアンテナに由来している。

45 m 鏡が加わる事は干渉計の感度に大きなインパクトをもたらす。NMA は 10 m 鏡が 6 台からな

る干渉計で、その集光面積は合計約 470 平方メートルである。しかし 45 m 鏡を加える事で 2060 平方メートルと 3 倍以上にはねあがる。この値は、同じミリ波干渉計である IRAM 干渉計や OVRO 干渉計の 2~3 倍に相当する。この強力な集光力によって、原始銀河や原始星円盤の探索、近傍銀河の微弱な分子輝線の検出等が可能となる。2001 年現在、RAINBOW は世界最強のミリ波干渉計として様々な天文学的成果が生み出される事が期待されている。

2. RAINBOW 受信機の新規開発

RAINBOW 干渉計の共同利用開始にあわせ、筆者は 2000 年の春から RAINBOW 干渉計の 45 m 鏡

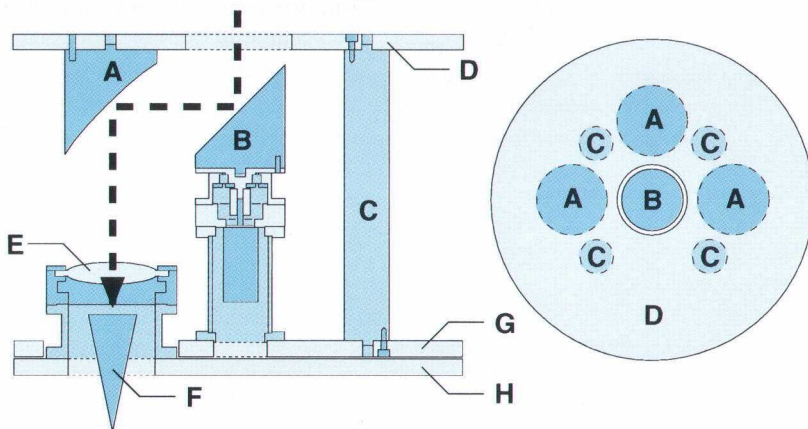


図1：採用された単純な光学系 中央の平面鏡 (B) を回転させる事で、BAND の切替えを行う。

側受信機（以下 RAINBOW 受信機）の新規開発を行った。5月に基礎設計をはじめ、45 m 鏡で first wave を検出したのは11月28日の深夜であった。

光学系及び受信機の内部部品の大部分は雄鳥製作研究所（東京）、コルゲートホーンは Thomas Keating 社（米国）、誘電体レンズはキーコム（埼玉）で製作された。

2.1 光学系

RAINBOW 受信機は NMA と同じく 100/150/230 GHz 帯の 3BAND の受信機を搭載する必要がある。その為 BAND 切替えができる光学系を考える必要があった。また、RAINBOW は共同利用に供される観測装置である為、運用を簡略化できる構造にする必要があり、設計上それに一番心を砕いた。

設計の為、準光学でビームをトレースする簡単なコードを書いて、最適な解を求めた。その結果、図1の様な単純な光学系を採用した。中央の平面鏡（部品 B）を回転させる事で、BAND の切替えを行う仕組みである。3つの BAND は基本的に同じ光学系であり緊急時には楕円ミラー（部品 A）やレンズ（部品 E）、ホーン（部品 F）の交換が出来るようになっている^{注1}。

誘電体レンズの使用は、通過損（測定値約 0.3 dB @ 88 GHz）をまねくが、設置場所のスペース等の制約によりやむを得ず使用する事にした。感度が命の RAINBOW にとっては、とても痛い決断であった。

また光学系の全ての部品（ミラー、レンズ、ホーン、位置合わせ治具）には位置合わせのノックピンを付けて、徹底した機械精度での光軸合わせを行った。この方針のお蔭でミラーやレンズを外したとしても光軸がずれず、メンテナンスの手間が大きく減った。

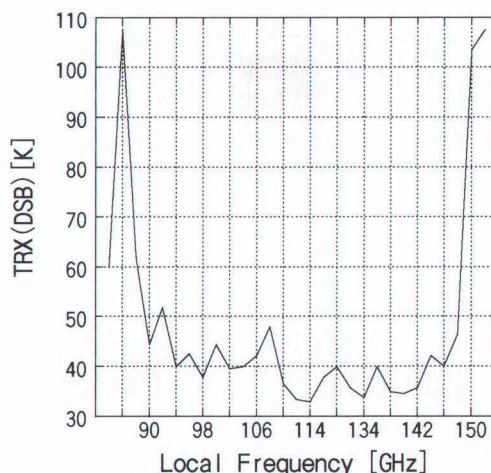


図2：超広帯域ミキサーを使った RAINBOW 受信機の受信機雑音温度。ミキサー及び素子の開発は国立天文台の岩下浩幸、高橋敏一、野口卓、半田一幸が中心になった行った（五十音順）。

光学系の下板（部品 G）は受信機の蓋（部品 H）の上に取り付けられる構造になっているが、両者は位置合わせのノックピンと固定の為のネジを除いては、非接触な 2 層構造になっている。受信機の蓋は、受信機内部を真空冷却する際に大気圧によって僅かに歪む。この 2 層構造は、その影響が光学系に波及するのを防ぐため採用した。

これらの製作方針により、いままで設定が繁雑であった RAINBOW 受信機とその周辺装置は、少ない手順で設定できるようになった。また来期まで（2001-2002 年冬）には自動設定が出来るようにする予定であり、その布石として様々な切替箇所をリモート化対応の仕様にした。

2.2 受信機性能

RAINBOW 受信機には 100/150/230 GHz の受信機が搭載される。今期の 100 GHz 帯及び 150 GHz 帯

注1：部品の互換性は厳密には完全ではない。例えば誘電体レンズには反射防止膜を付けている事で、band pass filter 的な特性を持っている。そのため他の周波数ではロスが大きくなる場合がある。しかし共同利用を行う上で大きな問題になる程ではない。

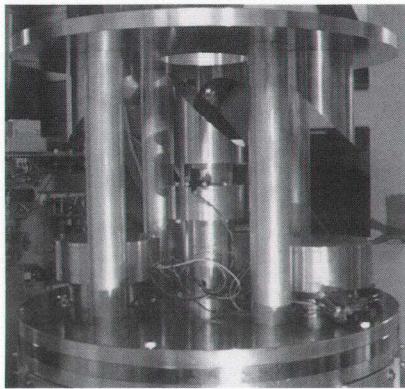


図3：完成した受信機

の受信機は80–150 GHzをカバーする超広帯域の超電導ミキサを採用した。この超広帯域ミキサ及び超電導素子は、国立天文台の岩下浩幸及び野口卓（文中敬称略）らによって開発されたものである。図2は受信機雑音を示したものである。

2000年の6月からはじまったRAINBOW受信機の開発は、同年11月27日に45 m鏡への搭載を迎えることになった。搭載された受信機の光学系部分の写真を図3に示す。

3. 観測・性能

昨年度（2000–2001年冬）のRAINBOWの観測は、上に述べた新受信機を搭載して行われた。本節では昨年度のRAINBOW観測と性能評価、そして主な結果を報告する。

3.1 共同利用観測とその解析

昨年度からRAINBOWは期間限定（1月から2月）の観測装置として共同利用に公開された。本節では昨年度の共同利用観測について報告する。

採択された件数は補欠1を含む5件であり、その内4件に対し観測時間がスケジュールされた。昨年度から共同利用観測となるので、採択された各観測にはNMA側と45 m鏡側から計3名のサポーターが担当する事になった。周波数切替えにかかる時間は大体20分程度で終了する。RAINBOW用の観測指示書作成は、NMAと同様にWeb経由で行えるようになっている（国立天文台 中西康一郎）。45 m鏡のポインティングに使う指示書等は共通のものが用意されており、周波数設定を切替える手間を省いている。

解析ツール面に関しても環境は整いつつある。UVPROC2は、データの一次処理（装置の特性や天候に対しての較正処理）を行う為にNMAで使われているデータ処理ソフトウェアである。このソフトウェアはNMAの6アンテナを想定して作られていたが、国立天文台の鎌崎剛によってRAINBOWの7アンテナ対応に拡張された。また45 m鏡の副鏡の移動の問題^{注2}も、茨城大学の百瀬宗武によって簡単に補正できるようになっている。そして一次処理の終えたデータは、いままでのNMAのデータと同様に解析することができる。

3.2 悪天候に祟られたRAINBOW

昨年度のRAINBOWは雪との戦いであった。昨年度は4、5年に一度の雪の当たり年で、観測の前半分は雪によって断念せざる得ない状況であった。その為有意な観測データが得られた観測は僅かであり、非常に残念な結果に終わった。

天候はRAINBOWにとって非常に大きな影響を与える。45 m鏡（巨大な単一鏡）は巨大なアンテナ故に、雪や風に弱いのに対し、NMAは10 m鏡と比較的小さなアンテナなので風や雪の影響を相

注2：45 m鏡は観測する高さ方向の角度（EL角度）によって副鏡が移動する構造になっている。この構造は、自重変形によってアンテナが歪んでも鏡面が双曲線を保つ「ホモロガス構造」に必要な機構である。しかし干渉計は天体からの電波が「受信機」に届いた時刻によって天体の構造を調べる装置であるので、副鏡の移動による天体と受信機間の距離の変化は、大きな問題となる。

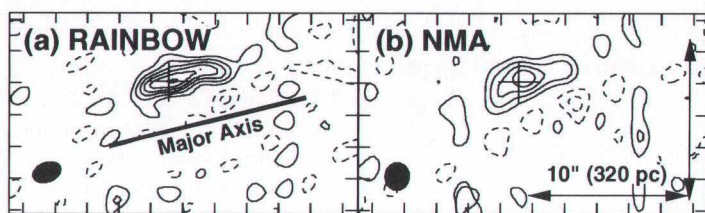


図4：NGC 3628 の3 mm 連続波の画像。中心のクロスはVLAで測定されたセンチ波連続波のピークであり、本観測の視野中心である。等高線はノイズレベルの1.5倍毎に引いている。左下の黒丸はビームサイズである。(a) RAINBOW のデータから作った画像。ビームサイズは 1.8×1.2 秒。ノイズレベルは0.55 mJy。(b) NMA (左のデータから45 m 鏡のデータを引いたもの)のデータから作った画像。ビームサイズは 1.7×1.5 秒。ノイズレベルは0.75 mJy。

対的に受けにくい。しかし一方、干渉計は大気の影響（電波シーイング）の悪化に非常に弱い。つまりRAINBOWは天候に多くの弱点を抱えているのである。

余談であるが、昨年度に限らずRAINBOWの前半は毎年、雪や風等の悪天候に祟られる事が多い。一部では「虹(RAINBOW)は雨(RAIN)の後に現れる」からだと言わなければならない。閑話休題。

3.3 新RAINBOW干渉計の優れた性能

今期のRAINBOWの観測と解析は、上に述べた新受信機とソフトウェアによって行われた。本節ではこの新受信機を搭載した新RAINBOWの性能を評価する。本評価には、第一期RAINBOW干渉計共同利用採択観測「High Resolution Synthesis of HCN & HCO⁺ in the Central Regions of Edge-on Starburst Galaxies NGC 3628 and NGC 3079, Shibatsuka et al.」の観測データを使用する。

図4 aはRAINBOWのみで観測したNGC 3628の3 mm 連続波の結果である。また同じデータから45 m 鏡を差し引いた結果を図4 bに示す。この2つの画像のノイズレベルを比較すると、45 mを加えた事で約0.7倍ノイズレベルが低くなっている事が分かる。この事は観測時間で2倍近くの差であり、45 m鏡を加える意義が大きい事を示している。また分解能も向上しているが、不幸にもこの

天体は構造の伸びの方向とビームの伸びの方向が同じ方向である為、目にはっきり分かる程の構造の差は見えないのが残念である。

また、表紙に掲載されたのは、NGC 3628のHCN及びHCO⁺の全積分図である。左半分の図はプロポーザルに提出した図(NMA：積分時間18時間)、右半分はその観測にRAINBOWの観測(14時間)を足したものである。この観測は現在筆者が進めているMusical Ring計画(Multi-line Survey in the Central Regions of Nearby Galaxies)の一環として行われた。約10個の近傍銀河を9種の分子輝線で観測する事により、分子ガスの物理状態と星形成の間に横たわる関係を明らかにするのが本計画の目的である。詳しい議論は執筆中の論文にゆずるが、RAINBOWによる観測の効果が明らかに現れている。

4. 最後に・・・

それは学部2年の春の事。

「45m 鏡は干渉計につながらないのですか？」

まだ雪の残る野辺山宇宙電波観測所に初めて見学に訪れた筆者は案内してくれた教官にそう訪ねた。つないだら感度が良くなると単純に思ったからだ。

そして大学院でRAINBOWと出会った。

いま考えるとそれがRAINBOWの開発に携わる原点だったのかも知れない。

5. 謝辞

本稿で報告しました新 RAINBOW 受信機は、国立天文台の多くのスタッフや大学院生、そして雄島試作研究所とキーコムの技術者の協力なくしては開発・製作出来ませんでした。特に、国立天文台川辺良平・浮田信治・野口卓・奥村幸子・砂田和良・河野孝太郎・岩下浩幸・高橋敏一・半田一幸・中西康一郎・鎌崎剛、茨城大学百瀬宗武、千葉大学鷹野敏明、Harvard-Smithsonian 研究所（アメリカ）松下聡樹、Max-Planck 研究所（ドイツ）萩原喜昭の各氏の貢献なくして、新 RAINBOW 受信機の完成はなかった事を感謝の気持ちを込めて明記したいと思います。

そして最後に、学部時代に受信機開発へのきっかけを与えてくれた茨城大学坪井昌人氏に感謝致します。

参考文献

- 1) Okumura S. K., 2000, PASJ, 52, 393
- 2) Kawabe R., 2000, in the Imaging at Radio through Submillimeter Wavelengths, ed. J. Mangum, ASP Conference Series, 34
- 3) Kohno K., 2000, in Galaxies and their Constituents at the Highest Angular Resolution, IAU Symposium, no. 205., Manchester, England
- 4) Hagiwara Y., 1999, in Proceedings of the 2nd millimeter-VLBI science workshop, ed. A. Greve and T.P. Krichbaum St. Martin d'Herès, IRAM, Granada, Spain, 49
- 5) Momose M., 1999, in Observational Astrophysics in Asia and its Future, ed. Chen P. S., Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming, China, 263
- 6) Hagiwara Y., 1998, Ph.D. Thesis, The Graduate University for Advanced Studies, Japan

Rainbow Interferometer: Receiver Development and Start of Open Use

Toshihito SHIBATSUKA

Department of Astronomy, School of Science, University of Tokyo 113-0033

Abstract: RAINBOW interferometer consists of 6-element Nobeyama Millimeter Array and 45-m telescope, which is the most sensitive millimeter interferometer in the world. We have developed a new receiver for RAINBOW interferometer, and installed it on 45-m telescope. Last year we have started the open use observations. In this article, I report the design and performance of the new receiver and first results of RAINBOW observations.