

氏名・(本籍)	く の なり お 久 野 成 夫
学位の種類	博 士 (理 学)
学位記番号	理博第1300号
学位授与年月日	平成5年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程)天文学専攻
学位論文題目	Seven Element Bolometer Array for the Nobeyama 45-m Telescope (野辺山45メートル鏡用七素子ボロメータアレイ)
論文審査委員	(主査) 教 授 竹 内 峯 教 授 土 佐 誠 教 授 池 沢 幹 彦 教 授 水 野 皓 司 (東北大・通研)

論 文 目 次

1. Introduction
2. The Nobeyama Bolometer Array
3. Receiver
4. Operation
5. Data reduction
6. Performance
7. Observations of M82
8. Summary
9. Acknowledgment

論文内容要旨

ミリ/サブミリ波帯の連続波観測は、天文学において開発の遅れた分野の一つである。この波長域は、星間ダストに関する重要な情報を含むにも関わらず、開発が遅れた理由は、地球大気の吸収が大きいためである。これをさけるために、ロケットやバルーンといった飛翔体を用いた高高度からの観測がなされてきた。しかし、その場合望遠鏡の大きさが限られてしまい十分な角分解能が得られない。それに対し、地上からの観測では観測は大気の窓に限られるが、大口径アンテナを用いた高角分解能観測が可能である。このため近年ミリ/サブミリ波用大口径アンテナが世界中でいくつか建設されている。日本の野辺山45m鏡も近年その鏡面精度が向上し、より高周波の観測が可能となっている。地上からの観測の場合、問題となるのは、いかにして大気変動の影響を軽減するかということである。一般的にはビームスイッチを用いて天体と大気を交互に観測し、大気成分の差し引きを行っている。しかし、この方法では時間的空間的に異なる空をレファレンスとするため、大気変動の影響がかなり残る。これに対して有効なのが複数の検出器を並べたアレイである。アレイの場合、天体を観測しながら同時に大気もモニターでき、実時間の差し引きが行える。

この波長域で最も有効な検出器はボロメータである。ボロメータの場合、バンド幅が広くとれるため、連続波観測では最も高感度となる。ボロメータの感度を上げるためには温度を下げるということと、熱伝導率を下げる必要がある。しかし、熱伝導率を下げると、ボロメータの時定数が大きくなってしまいうため、回路の $1/f$ ノイズをさけるために変調する際に変調周波数を充分高くとれなくなる。そのために、現在地上用に使われてきたボロメータの感度は $NEP \sim 1 \times 10^{-15} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度である。この問題を解決する方法として有効なのが、ロケット観測用に開発されたACブリッジ差動読み出し法である。この方法では2つのボロメータにACバイアスをかけ、その差分を読み出す。ACバイアスで極性を変えることによって変調するためにボロメータの温度は一定に保たれ、時定数による制限がゆるくなり、高感度ボロメータの使用が可能となる。この方法をアレイに用いることによってごく近傍の大気をレファレンスとした実時間の大気の差し引きが可能となる。我々は、この新しい大気の差し引き方法を用いて野辺山45m鏡用ボロメータアレイの開発を行った。この方法により大気変動の影響は大幅に軽減され、さらに高感度ボロメータを用いたアレイであることから観測効率の飛躍的向上が期待される。

野辺山ボロメータアレイは、ボロメータ7素子を一つのボロメータを他の6個のボロメータでかこむような配置となっており、中心と他の6個との差分をACブリッジで読み出している。また、大気モニターとして中心のボロメータのDC出力も読み出している。ボロメータはできるだけ温度を下げるため ^3He を用いて0.3Kまで冷している。この温度でのボロメータのNEPは $1.3 \times 10^{-16} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ である。中心周波数は150GHz、バンド幅は40GHz、効率率は16.5%である。

ACブリッジは2つのボロメータに共通のノイズを軽減することもできる。共通のノイズとは、

ボロメータをとりつけてあるコールドプレートの温度ゆらぎ、バイアス電圧のゆらぎ、入射エネルギーのゆらぎが考えられる。しかし、これらのノイズを軽減するためには、ボロメータの特性をそろえなければならない。7個のボロメータの特性は温度ゆらぎ、バイアス電圧ゆらぎによるノイズをボロメータ自身のノイズ以下におさえるのに十分なマッチングが得られた。しかし、入射エネルギーのゆらぎは差動出力に残ってしまう。これを落とすために、ボロメータ感度の補正を行う。これは大気モニターと差動出力の相関から感度差を補正する。この補正によって、大気変動の影響は約2ケタ小さくなることが確かめられた。ボロメータの感度は本来非線形であり、入射エネルギー量により変化する。このため観測中の大気変動による感度変化が問題となる。この感度変化を小さくするために、熱伝導率を最適値より大きめにし、バイアス電圧も最適値より高めに設定している。これによってボロメータの感度変化は非常に小さくおさえられほぼ線形とみなせる。ボロメータからの出力はACブリッジで差分を読み出し、A/Dコンバーターによって2.5msec間隔でサンプリングされ、ワークステーションに転送されたのち、デジタルロックインを行う。その後データは積分され最終的には0.179s間隔となる。観測はまず、ポインティング及びフラックスキャリブレーションから行われる。ポインティングは点源を中心のビームに入れ6個の差動出力から補正值がもとまり、点源としてフラックスがわかっているものを選ぶことによって、フラックスキャリブレーションもかねることになる。マッピングはアレイをスキャン方向から 19.1° 傾けラスタースキャンによって行う。こうすることによって7素子が別々ノスキャンパスを通ることになる。マップに現れるスキヤニングアーティファクトを消すためにリダクションでバスケットウィービング法を用いるためマッピングは赤経方向、赤緯方向のスキャンにより行う。このとき差分をとっているため、ビームスイッチは用いる必要がない。得られたデータに感度補正をほどこす。

リダクションは大きく分けて二つの段階からなる。まず第一段階としては、6個の差動出力から中心のch1のレベルを決める。これは、6個の差動出力から各サンプリング時でのアレイ面を平面で近似しその平面のスキャン方向の傾きを求め、それを天体からの放射がないマップの端から積分することによって決めることができる。ただし、この方法では点源が中心のビームに入った場合、アレイパターンがマップ上に現れるため、その補正を行う。これは、各サンプリング点と比較し、その残差の自乗和が最小となるようch1のデータを補正する。リダクションの次の段階では、バスケットウィービングによって赤経、赤緯方向のスキャンによるマップを足し合わせる。

これらのリダクション方法によって像が正しく再生されることを確かめるために、数値シミュレーションを行った。その結果、この方法が正しく像を再生できることが、確認された。現在、アレイの性能は、検出限界 $50\text{mJy}/\sqrt{\text{Hz}}$ を達成している。これは入射エネルギーの統計的ゆらぎ及びボロメータ固有のNEPの和で定まるトータルの $\text{NEP} \sim 1.9 \times 10^{-16}\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$ から予想される $13\text{mJy}/\sqrt{\text{Hz}}$ より大きい。これは大気変動の影響がまだ完全には消えていないためと考えられる。しかし、現在の性能でも、ミリ波観測装置としては、世界最高感度を達成して

いる。

このアレイの性能を系外銀河M82を観測することによって確かめた。M82は距離3.25Mpcにあり、中心領域では活発な星形成が起きているスターバースト銀河である。この銀河の中心 1.9×1.9 の領域をマッピングした結果、これまでのダスト観測ではみられなかった銀河面に垂直方向にのびた構造が見つかった。これらは一酸化炭素の輝線でみられる構造と一致し、水素の再結合線をとりにかこむような形をしている。これは、中心での激しい星形成により、密度の薄い銀河面に垂直方向のガスがふきとばされ、円筒状に分布したものを横からみた場合にみられる構造と考えることができる。この観測によりアレイの性能が実証された。

論文審査の結果の要旨

分子雲は、恒星と異なり、宇宙空間に拡散状態で存在するが、宇宙のバリオンよりなる物質の約1割に相当し、恒星の形成の場となっている。また、星間塵は恒星表面で形成されるが、電磁波の伝達に大きな影響を与え、いずれも銀河の研究上重要な天体である。これらの天体を、地上より大口径の観測装置を用いてミリ波サブミリ波領域での観測することの有用性は広く認められている。

本論文は、国立天文台の野辺山45メートル電波望遠鏡に搭載する150ギガヘルツ帯用のボロメータ利用の観測装置に関するもので、感度および精度の向上のために7個の素子のアレイを用いた装置の製作およびその試験観測の結果について述べたものであるが、その結果は、より短波長（より高周波数）の観測に応用可能なものであって、天文学の研究にとって大きな意義のある問題を取り上げたものといえる。

本論文では、その製作にあたっては、素子の特性について充分注意を払う必要があること、また、7個の素子より得られる出力を相互に比較して、雑音を取り除きかつ高精度の結果が得られるような処理プログラムをつくる必要があることが示され、これらの点について詳細な検討が行われた結果、従来の同種の観測装置に比べてほぼ10倍の感度（10mJy）をもつものが製作されたことが述べられている。系外銀河M82について行った試験観測の手順および結果についても具体的に述べられている。

以上のように、この論文は、天文学の研究上大きな意義のあるミリ波サブミリ波帯の観測装置の能力向上についての重要な研究結果をまとめたもので、著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって、久野成夫提出の論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。