

学 位 論 文 題 名

An Observational Study based on the 1.1-mm Continuum
Survey of the Small Magellanic Cloud

(小マゼラン雲に対する 1.1mm 連続波サーベイに基づく観測的研究)

学位論文内容の要旨

サブミリ波帯の連続波観測は、宇宙初期から現在にまでいたる星形成と銀河形成の歴史を
探るうえで欠かすことのできない観測であり、近年開発が進みつつあるボロメータカメラを用
いた、高感度かつ広域のサーベイ観測は、このような観測的研究を効率的に推進することを可
能にする。本論文では、チリのアタカマ砂漠に設置されたサブミリ波望遠鏡 ASTE に搭載され
た波長 1.1mm 帯の連続波カメラ AzTEC を用いた、小マゼラン雲に対するサーベイ観測の結果
を示すとともに、その検出天体に対する詳細な解析結果について述べる。また、さらなるサブ
ミリ波帯連続波観測を推進すべく開発した ASTE 搭載用多色ボロメータカメラの光学系の設計
について述べる。

小マゼラン雲 (SMC) は、大マゼラン雲とならび我々に最も近い銀河の一つであり、ガス
やダストなど、星形成の元となる星間物質の詳細観測に最適な天体である。また、低金属量、
強い紫外線輻射場といった特徴は、宇宙初期の爆発的星形成銀河に近い環境であり、このよう
な特有の環境下における星間物質や星形成の物理を理解する上で、小マゼラン雲に対するサー
ベイ観測を推進することは重要である。本研究では、世界で初めて波長 1.1mm 帯連続波による
小マゼラン雲の全面、4.5 平方度におよぶ高空間分解能サーベイを行い、5~13 mJy/beam という
高感度を達成した。データ解析は点源天体に感度をもつ手法 (PCA cleaning) と広がった成分
に感度を持つ手法 (FRUIT) で行った。点源に感度を持つ解析の結果、53 個のコンパクトな
天体を検出した。これらのほとんどは小マゼラン雲中の星形成領域などに対応天体を持つが、
その他に SMC の背景にある既知の 2 つの近傍銀河と、3 つの高赤方偏移銀河の候補天体を検出
した。

この 3 つの候補天体のうち、SMC Wing 領域で検出された天体 (MM J01071-7302、以後
MMJ0107 と呼ぶ) の詳細な研究を行い、MMJ0107 が波長 1.1mm 帯連続波で検出されたもの
としては、これまで知られている中で最も明るい (43mJy) サブミリ波銀河であることがわか
った。MMJ0107 の位置には、電波 (843MHz)、サブミリ波 (Herschel/SPIRE 500, 350, 250 μ m)、
遠赤外線 (Spitzer MIPS 24 μ m)、中間赤外線 (Spitzer IRAC 8, 5.8, 4.5, 3.6 μ m, WISE 22, 12,
3.6, 3.4 μ m)、近赤外線 (J, H, Ks バンド) でも対応する点源が検出されている。また、MMJ0107
の中心から 1.4 秒角離れた位置に、可視光 (U, V, B バンド) 天体が検出されており、これは重
力レンズ天体の可能性がある。MMJ0107 の赤方偏移は、複数の銀河のスペクトルエネルギー
分布 (SED) テンプレートをを用いたフィットにより、1.4~3.9 と見積もられた。電波領域では、
テンプレート SED に対する超過が見られ、radio-loud AGN の存在が示唆される。見かけの赤
外線光度は $(0.3\text{--}2.2)\times 10^{14}$ 太陽光度であり、星形成率は 5600~39000 太陽質量/年に相当する。
このような異常な星形成率を持つ銀河種族は知られておらず、重力レンズにより増光された爆

発的星形成を伴う遠方銀河であると考えられる。

また、広がった成分の解析から、46 個の広がった天体を同定した。波長 1.1mm の広がった放射は、波長 160 μ m の放射とも相関がよく、これらがダストの質量を支配する、冷たい (~20K) ダスト成分からの熱放射であることを示唆している。ほとんどの広がった天体は、これまでに一酸化炭素分子輝線観測により知られている巨大分子雲、あるいは星形成領域のトレーサーである 24 μ m の放射が伴う。したがって、これらの天体は巨大分子雲であると考えられる。1.1mm で検出されたこれらの巨大分子雲候補天体の物理量を調べるため、単一のダスト温度を仮定したダスト熱放射のスペクトルエネルギー分布を用いて、物理量の推定を行った。小マゼラン雲で知られているガス・ダスト質量比 700 を仮定すると、これらの天体の質量範囲は $10^4 \sim 10^6$ 太陽質量に相当する。これは我々の銀河系や近傍銀河で知られている巨大分子雲の質量範囲と一致する。

このような ASTE 望遠鏡に搭載された AzTEC 受信機による成果は、さらなるサブミリ波帯連続波観測の必要性を示している。このような要求のもと、ASTE 望遠鏡に搭載すべく、新たに超伝導遷移端センサーを用いた連続波カメラの開発を行った。カメラ光学系は光線追跡法によって、ASTE 望遠鏡のカセグレン光学系と適合するように設計した。その結果、2 波長同時観測が可能で、7.5 分角もの広視野を持ち、十分な多素子化が可能な光学系を設計した。このカメラの素子数として、270, 350, 670 GHz (波長 1.1mm, 0.85mm, 0.45mm) それぞれのバンドで、169, 271, 919 素子を実現した。設計した光学系は、物理光学的手法を用いて評価および最適化した。冷却腫の大きさは、ボロメータへの 300K からの放射が十分小さくなるように、幾何光学で決定したサイズの 85% の直径に最適化した。また、フィルターや鏡面精度の影響を除いた光学系の開口能率は、270, 350, 670GHz それぞれで ~35%, 35%, 32%、またビームサイズは ~28, 22, 12 秒角になることを明らかにした。

この新連続波カメラの評価試験は、国立天文台野辺山宇宙電波観測所で行った。2012 年 5 月には、チリ現地において ASTE 望遠鏡へ搭載し、天体画像の取得に成功した。270, 350 GHz 帯検出器による本格的な天文観測は、2013 年から行われる見込みである。これらに加えて、670GHz 帯検出器の開発はサブミリ波銀河の測光学的赤方偏移の推定などの観測的研究に必須である。広視野、高感度な連続波カメラは、初期運用が始まったサブミリ波干渉計 ALMA と相補的な観測装置として、今後重要性が増してくる。

学位論文審査の要旨

主査	教授	羽部朝男
副査	教授	小笹隆司
副査	教授	鈴木久男
副査	教授	香内晃
副査	准教授	徂徠和夫

学位論文題名

An Observational Study based on the 1.1-mm Continuum Survey of the Small Magellanic Cloud

(小マゼラン雲に対する 1.1mm 連続波サーベイに基づく観測的研究)

博士学位論文審査等の結果について（報告）

宇宙初期から現在に至るまでの星形成と銀河形成の歴史を観測的に明らかにすることは、現在考えられている宇宙の構造形成および銀河・星形成の理論を検証する上で、不可避の研究課題である。波長 0.1 - 1mm 前後の電磁波であるサブミリ波帯の連続波は、活発な星形成活動の指標であるとともに、超遠方銀河（サブミリ波銀河）を検出することができるため、サーベイ観測を行うことによってこの課題に取り組むことができるユニークな波長帯となっている。

著者は、我々に最も近い系外銀河の一つである小マゼラン雲に対して、世界で初めてとなる波長 1.1mm 連続波での高空間分解能サーベイ観測を高感度で行い、多数の天体を検出した。これら検出された天体の大多数は、小マゼラン雲内の天体であったが、超遠方銀河の候補天体も新たに3つ発見した。このうち1つの候補天体については、他波長データとの詳細な比較を行い、超遠方に位置する銀河であること、非常に高い星形成率を示していること、重力レンズ効果によって増光を受けていることを明らかにした。このように非常に明るい超遠方銀河は、検出例が極めて少なく、宇宙初期の爆発的星形成過程を理解する上で貴重な天体であり、意義深いものである。さらに、小マゼラン雲内の天体についても、他波長データとの比較を行い、低温の星間微粒子からの放射であること、巨大分子雲の分布と相関が良いことを明らかにした。これは、1.1mm 連続波が、星形成の母体である分子雲の良いトレーサーであり、物理状態を明らかにする手法として重要であることを示している。

また、著者は、サブミリ波帯サーベイ観測のさらなる大規模・多波長化を可能する、多色連続波カメラの開発を行い、日本での評価試験を経て、南米チリのサブミリ波望遠鏡への搭載・試験観測を行った。これは、超遠方銀河の三次元的分布と星形成活動性を明らかにすることのできる強力な観測装置であり、宇宙の星形成史を解き明かすために必要不可欠な装置である。

以上のように、本論文は、波長 1.1mm 連続波サーベイ観測によって多数の天体を検出し、その素性を明らかにすることで、宇宙初期の星形成過程の解明に迫るものであり、当該研究分野の発展に貢献するところ大である。よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。