

論文審査の結果の要旨

氏名 山口 裕貴

宇宙の星形成史を理解するための重要な課題として、ダストに覆われた星形成活動を明らかにすることと、星の材料であるガスの量を見積もることが挙げられる。本論文は、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array: ALMA) を用いて、 $z = 0.3 - 6$ という幅広い赤方偏移において、ダストに隠された星形成活動と冷たいガスの量を調べ、宇宙の星形成史を考察したものである。

本論文は6つの章と3つの付録からなる。第1章は序章であり、本論文の背景や研究動機などがまとめられている。従来のミリ波サブミリ波の単一鏡観測では空間分解能が悪いため、高赤方偏移宇宙でのダストに覆われた星形成活動がまだよく調べられていないこと、従来の冷たいガスのサーベイは他波長で検出された銀河に対して行われているため無バイアスではないことを指摘している。本研究では、空間分解能の高いALMAによる深く広いダスト連続光サーベイデータを用いることで前者の問題に、一酸化炭素 (CO) と炭素イオン [CII] 輝線の無バイアスなサーベイを行うことで後者の問題に取り組んでいる。

第2章では、本研究で用いたダスト連続光サーベイ (ALMA twenty-Six Arcmin² survey of GOODS-S At One-millimeter: ASAGAO) の詳細が述べられている。ASAGAOは、26平方分という比較的広い天域における波長 1.2 mm での高感度かつ高空間分解能の撮像サーベイであり、ALMAによる同様の目的のサーベイの中でも高い競争力を持つ。また、GOODS-Sは全天の中でも最も高感度な多波長データが揃っている天域の一つである。

第3章では、近赤外線 K バンドで検出された銀河のカatalogである ZFOURGE catalog に対応天体を持つ 66 個の ASAGAO 検出天体 (ASAGAO サンプル) に対して多波長解析を行い、星形成率や星質量等を求めている。このサンプルは、波長 1.2 mm における暗い銀河 (フラックス密度 1.0 mJy 未満) のサンプルとしては最大である。

多波長解析の結果、まず、ASAGAO サンプルの 90%程度は一般的な星形成銀河であることがわかった。また、星形成率は同じでも、ダスト放射の光度には大きなばらつきがある (ALMA で検出されるものもあればされないものもある) こともわかった。これは銀河によってダスト吸収の強度が 1 - 2 桁も異なっていることを意味する。そこで、空間分解できた $z \sim 2$ の約 10 天体を詳しく調べ、ダスト吸収強度の大きなばらつきは銀河内の星とダストの分布の違いが原因である可能性を指摘している。こうした空間分解した解析はこれまで 1 天体しか行われておらず、本研究は大きな前進である。

続いて、ASAGAO サンプルを用いて、ダストに覆われた星形成が宇宙全体の星形成にどの程度寄与しているかを $z = 0 - 5$ にわたって調べている。本サンプルには、先行研究より暗い $10^{10} - 10^{11}$ 太陽光度の赤外光度の銀河まで含まれている。ASAGAO サンプルから見積もられるダストに覆われた星形成活動は、 $z = 2 - 3$ でピークを持ち、 $z = 0$ に向かって減少していくことがわかった。 $z = 2 - 3$ において ASAGAO サンプルの銀河は、宇宙全

体の星形成活動の約 60%、ダストに覆われた星形成活動に限れば約 80%を説明できることもわかった。

ASAGAO のデータからは K バンド対応天体を持たない天体も見つかった。第 4 章ではこれらのうち ALMA での S/N が 5 を超える信頼性の高い天体について、その性質を調べている。可視光から電波までのスペクトルの形状は、これらの天体が $z = 3 - 5$ 付近に存在する可能性を示している。また、K バンドで見えないことから、これらの天体が形成初期の銀河であることも示唆している。宇宙の星形成活動へのこれらの天体の寄与は 10 - 30%に達し、明るいサブミリ銀河に匹敵している可能性がある。

第 5 章では、4 つの重力レンズ銀河団領域（背後の銀河が増光された領域、合計 16 平方分）の ALMA の 3 次元データ（空間 2 次元、波長 1 次元）を用いて、冷たいガスからの輝線の無バイアスサーベイを行っている。輝線は検出されなかったが、 $z = 0.3, 0.7, 1.2$ の 3 つの赤方偏移において CO 光度関数に、 $z = 6$ において $[C_{II}]$ 光度関数に上限を与えることに成功している。これは、重力レンズ効果を利用した 1 周波数チューニングの広範囲観測がこうした光度関数の制限に有効であることを初めて実証したものである。

第 6 章は論文のまとめである。

本研究は、最先端の ALMA データを用いて、星形成活動そのものだけでなく、星形成の材料である冷たいガスにも注目して、宇宙の星形成史を幅広い赤方偏移で調べたものである。特に、暗いサブミリ波銀河について宇宙全体の星形成への寄与や空間分解された星形成活動を明らかにした点、重力レンズ効果を利用した無バイアスサーベイによってガス輝線の光度関数に制限を与えた点は学術的価値が高い。本研究は河野孝太郎他 30 名との共同研究であるが、論文提出者が主体となって行なったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。