

論文審査の結果の要旨

氏名 藤本征史

赤外線での宇宙背景放射(CIB)は、ダストに隠された星形成銀河が担い、かつ宇宙における銀河の形成および進化と密接に関わっていると考えられているが、その理解は十分に進んでいない。未解決の CIB の起源に加え、ダストに隠された星形成銀河の物理的特性の解明も望まれていた。本論文では、これまでに ALMA により取得されたミリ波・サブミリ波データを活用し最大規模の統計的サンプルを構築して、遠方銀河に付随する冷たい星間物質(ISM)について星間及び銀河周辺物質(CGM)スケールから宇宙の構造スケールに渡り、銀河や CIB の起源について統計的に研究した結果についてまとめている。

本論文は、8章から構成されている。

第1章は序論であり、宇宙における銀河の形成と進化の理解においては、ISM スケールから宇宙の大規模構造までをカバーしたマルチスケールでの研究が必要であることが述べられている。特に、ISM スケールでは銀河の形態、CGM スケールでは形成中の銀河へのガスの供給やアウトフローなどを調べるのが重要であると指摘している。また、先行研究では、CIB の 50%が個々の銀河に分解されたが、残りについては十分に理解が進んでいないことなどが述べられている。さらに、それぞれのスケールで得られた銀河の形成や進化に関する知見と共に、未解決問題をまとめている。

第2章では、用いたデータと解析手法についてまとめている。データに関しては、ALMA アーカイブにある 2018 年 4 月までに利用可能となったもの全てを利用しており、ALMA Band 6/7(波長 1.3mm/0.85mm)で取得された計 1677 枚の連続波イメージを用いている。それらは、5つのサブセットに分かれており、静止系遠赤外線(以下、遠赤外線)での銀河サイズや銀河形態の統計的研究、赤方偏移がおよそ 6 の銀河における一階電離炭素輝線([CII]輝線)の広がり研究、赤方偏移がおよそ 6 の QSO における[CII]輝線の広がり研究、そして CIB の起源を探る研究に用いられている。それらの結果は、第3章から第7章にまとめられている。解析においては、空間周波数空間でのデータのスタッキング法(以下、空間周波数スタッキング)を活用し、統計的な銀河の性質を導出している。これまでで最大規模のサンプルを構築し、統計的な研究を行っていることは、本論文の独創的な点である。

第3章では、遠赤外線での銀河サイズと遠赤外線光度の関係や、空間周波数スタッキングによって求めた銀河サイズの赤方偏移進化などを調べている。これらの解析より、遠赤外線銀河サイズと遠赤外線光度の間に正の相関があること、遠赤外線銀河サイズは HST データから得られた静止系可視光(以下、可視光)銀河サイズより小さいこと、遠赤外線銀河サイズはより近傍の赤方偏移 1-3 で求められている星形成を伴わない静かな銀河の可視光での銀河サイズとほぼ一致すること、などを見出している。星からなるより大きな円盤の中心部にダスト放射を伴う星形成領域があり、その後静かな銀河へと進化するとの解釈を与えている。

第4章では、銀河形態の指標の一つである Sérsic index n と遠赤外線銀河サイズについて

て調べている。高空間分解能 ALMA モザイクイメージを用いた空間周波数スタッキングにより、円盤銀河を示唆する $n = 1.2 \pm 0.2$ と、1.0–1.3 kpc のサイズを得ている。可視光でも、 $n = 0.9 \pm 0.3$ と同様な結果が得られたが、可視光銀河サイズは 3.2 ± 0.6 kpc となった。この結果も、第 3 章の結果と一致し、遠赤外線で捉えた星形成が活発な円盤構造は、星からなるより大きな円盤の内側に対応していることを示している。この解析においても、遠赤外線銀河サイズと遠赤外線光度の間に正の相関を得ている。これらダスト放射を伴う星形成領域の形態とサイズについての研究成果は、遠方銀河での重元素汚染を伴うスターバーストの起源を解明する上で、重要な示唆を与えている。

第 5 章では、赤方偏移がおよそ 6 の通常の星形成銀河において、重元素量の指標となる [CII] 輝線と遠赤外線放射について、CGM スケールでの広がり調べた結果について述べている。また、同じサンプルに対して静止系紫外線(以下、紫外線)とライマン α 輝線に対してもスタッキング解析を行っている。その結果、遠赤外線と紫外線放射ではコンパクトな構造を示すのに対して、[CII] とライマン α 輝線では、半径 10 kpc まで広がったハロー成分を持つことを発見している。また、同様の距離の QSO でも [CII] ハローを見い出しており、ともにアウトフロー起源であると指摘している。これらの研究は、アウトフローにより銀河外へ重元素が効率的に運ばれる事を示唆しており、ALMA により銀河進化解明の鍵となるアウトフロー研究が可能であることを示した点で非常に独創性が高い。

第 6 章では、大規模構造スケールでの、ALMA で微弱なミリ波サブミリ波ソースとして観測された星形成銀河の個数密度とクラスターリングについて調べている。重力レンズによる増光の効果も利用して、波長 1 mm でこれまでで最も微弱な銀河まで捉えて個数密度を調べた結果、総放射量が CIB の 104^{+31}_{-25} % に相当し、CIB が個々の星形成銀河の重ね合わせで説明できることを見出している。

第 7 章では、上記の章の個々の結果に関する考察を行っている。また、それらの結果に基づいて宇宙星形成史の考察も行い、以下の結果を得ている。すなわち、ダストに隠された星形成も考慮した場合、赤方偏移 1–4 での総星形成密度は、光赤外線で得られている星形成密度の 140^{+20}_{-40} % となり、ミリ波サブミリ波で新たに見出され銀河の寄与を含めても、2 倍にはならない。宇宙星形成史において、総星形成密度への新たな制限を与えたことは、非常に価値が高い。

第 8 章では、結論を述べている。

これまでで最大規模の ALMA データを構築し、それを活用して星形成銀河の統計的性質を導いた手法は極めて独創的であり、星形成銀河の物理的性質や [CII] ハローの存在、CIB の起源を明らかにした本研究は、銀河の進化や宇宙星形成史を理解する上で学術的に価値が非常に高いと認められる。

本論文は、指導教員である大内正己に加え、河野孝太郎、廿日出文洋、永井洋、田村陽一、但木謙一、梅畑豪紀、李民主、長尾透、谷口義明、山口裕貴、上田佳宏、澁谷隆俊、石垣真史、小野宜昭、百瀬莉恵子、井上茂樹、中西康一郎、大木平、Rob Ivison、James S. Dunlop、Sune Toft、Wiphu Rujopakarn、Wei-Hao Wang、Yiping Ao、Andrea Pallottini、Andrea Ferrara、Tao Wang、Daniel Espada、Carlos Gómez-Guijar との共同研究の成果をまとめたものであるが、論文提出者が主体となって研究計画を立案し、データ解析を行い考察を与えたものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断できる。

したがって、博士(理学)の学位を授与できると認める。