

学位論文の審査結果の要旨

本論文は、銀河形成と進化において重要な役割を演ずる銀河周辺物質（Circumgalactic Medium: CGM）を、クェーサーのスペクトル上に吸収線として検出することで、kpc スケールの局所的内部構造を統計的に考察したものである。背景光源として数秒角程度の離角を有するレンズクェーサーを選択することにより、微小な視線間距離を利用した CGM の内部構造探査を行っている。観測結果の考察に加え、5つのパラメータによる CGM のモデル化も試みており、その内部構造に対する定量的な制限を加えることにも成功している。

ダークハローの重力ポテンシャルによって銀河間空間から引き込まれたガスが銀河形成を促進する一方で、銀河内部の爆発的星形成活動や銀河中心核からのフィードバック効果により、一部のガスは銀河間空間へと還元される。このように、銀河 - 銀河間空間の物質循環の全貌を解明するうえで CGM の理解が欠かせない。一方で CGM は、直接撮像が極めて困難な希薄なガス相にあるため、クェーサーを背景光源とする吸収線観測が主要な研究手法となっている。本研究では背景光源に重力レンズクェーサーを用いた多視線観測を行っているが、同様な観測は申請者らの研究（Misawa et al. 2014, *The Astrophysical Journal Letters*, 794, 20）によって、すでに別の対象（背景クェーサーから噴き出すガス流）に対して一定の成果を挙げている。これについてはクェーサー吸収線の物理や CGM の重要性と共に第 1 章でまとめられている。

第 2 章ではデータの詳細をまとめている。本論文で扱っているクェーサー 10 天体のスペクトルは、重力レンズクェーサーの同定を目的として取得されたものであるが、十分な波長分解能と S/N 比を有することから吸収線の検出も可能である。さらに先行研究からレンズクェーサー 3 天体のデータを加えることにより、13 個のクェーサー（29 個のレンズ像）の視線上で検出された計 293 本の金属吸収線カタログとしてまとめている。これは、重力レンズクェーサーを用いたものとしては現時点で最大規模のカタログである。一般的な宇宙論パラメータに基づく視線間実距離の評価方法、および本研究で扱う等価幅変動値、吸収線欠落頻度の定義も本章で行っている。

解析結果は第 3 章にまとめられている。電離状態によって 2 つのグループに分けられた CGM ガスに対する、1) 視線間吸収強度の相関、2) 等価幅変動値、3) 吸収線欠落頻度の傾向は、いずれも低電離状態にある CGM ガスの方が小スケールで大きな密度揺らぎを持つことを示唆している。しかし定量的な議論は次章のモデルとの比較を待つことになる。

第 4 章において観測結果のモデル化を試みている。同一サイズのガス球を規則的に並べることによって CGM の内部構造を再現するという試み（単純等価幅ガス球モデル）は、単純化しすぎたモデルであることは否定できない。しかし本研究のように十分なサンプルが確保できなければ、そもそもこのような試み自体が不可能であるため、本研究の重要性を損なうものではない。観測との比較から予想される最適モデルは、全体サイズが 500 kpc 程度の領域に、完全掩蔽を示す広がった高電離ガスと、部分掩蔽を示す kpc スケール未満の低電離ガス雲が漂っているというものであり、従来の描像を支持している。加えて CGM の全体スケールと CGM 内部の典型的密度揺らぎのスケールを定量的に評価していることが本研究の成果である。この結果については、申請者を筆頭著者とする査読付き論文として報告されている（Koyamada et al. 2017,

The Astrophysical Journal, 851, 88)。

本研究では CGM を有する銀河 (ホスト銀河) の検出・同定は行っていない。その理由は、研究目的があくまでも CGM の内部構造を探索することに置かれているからである。一方で、本研究の最適モデルから導かれる低電離状態にある CGM ガスの体積充填率が、先行研究と比べて極端に高いという結果は、ホスト銀河からの距離依存性を考慮していないことが原因であると考察している。ホスト銀河の検出と、その物理的特徴 (形態、光度、星形成活動など) と CGM の相関を探ることを将来的展望として第 5 章にまとめている。

このように本研究では、重力レンズクェーサーを用いて CGM の局所的内部構造を観測的に探るとともに、モデルとの比較から CGM の定量的なスケール評価にも成功しており、またその結果が 2 本の査読付き学術論文 (うち 1 本は筆頭著者として) として報告されていることから、論文内容、体裁共に学位論文に充分相当するものと判断した。

公表主要論文名

- Suzuka Koyamada, Toru Misawa, Naohisa Inada, Masamune Oguri, Nobunari Kashikawa, Katsuya Okoshi, “Resolving the Internal Structure of Circumgalactic Medium Using Gravitationally Lensed Quasars”, 2017, The Astrophysical Journal, Volume 851, Issue 2, article id. 88, 13 pp.
- Toru Misawa, Naohisa Inada, Masamune Oguri, Poshak Gandhi, Takashi Horiuchi, Suzuka Koyamada, Rina Okamoto, “Resolving the Clumpy Structure of the Outflow Winds in the Gravitationally Lensed Quasar SDSS J1029+2623”, 2014, The Astrophysical Journal Letters, Volume 794, Issue 2, article id. L20, 5 pp.
- Toru Misawa, Naohisa Inada, Masamune Oguri, Jane C. Charlton, Michael Eracleous, Suzuka Koyamada, Daisuke Itoh, “Spectroscopic Observations of the Outflowing Wind in the Lensed Quasar SDSS J1001+5027”, 2018, The Astrophysical Journal, Volume 854, Issue 1, article id. 69, 14 pp.
- Takashi Horiuchi, Toru Misawa, Tomoki Morokuma, Suzuka Koyamada, Kazuma Takahashi, Hisashi Wada, “Optical variability properties of mini-BAL and NAL quasars”, 2016, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 68, Issue 4, article id.48, 19 pp.