

# 論文審査の結果の要旨

氏名 小山翔子

本論文は、活動銀河核から相対論的速度で噴出するプラズマジェットの本元部分を直接観測できるレーザーに着目し、位相補償を組み合わせた超長基線干渉計 (VLBI) 観測を初めて行い、ジェットの放射機構について新たな知見を獲得した。

本論文は 5 章および補遺からなる。第 1 章は序論であり、レーザーの概要、特に、X 線での時間変動観測および電波での高解像度 VLBI 観測の現状をまとめた後、X 線放射の時間変動を説明する最も有望な理論として、内部衝撃波モデルを説明している。モデルによれば、X 線放射成分の位置は、中心エンジンから  $10^{17}$ - $10^{19}$ cm 程度の領域 (近傍のレーザーでは数  $100 \mu$  秒角に相当) に分布することが示唆されるが、高エネルギー望遠鏡はもちろん、通常の VLBI 観測では、位置決定精度が不足している。この現状を踏まえ、内部衝撃波モデルを観測的に検証する方法として、最も高い位置決定精度を有する位相補償 VLBI 観測を、最も距離の近いレーザーである Mrk 501 に対して複数期間行い、X 線放射成分の位置変動について制限をつけるという新しい考え方を提案している。Mrk 501 は電波から X 線に至るスペクトルが単一領域からのシンクロトロン放射で説明できることが知られているため、電波帯での VLBI 観測により、X 線放射成分の存在範囲を直接測定できることも指摘している。

第 2 章では、VLBI Exploration of Radio Astronomy (VERA) および Very Long Baseline Array (VLBA) を用いた、43GHz 帯での Mrk 501 に対する位相補償 VLBI 観測について詳述している。VERA で 2011 年に行った連続 4 日間の観測では、X 線放射成分の位置は 1 観測あたり約  $200 \mu$  秒角の精度で一致していた。ジェット方向に沿った X 線放射成分の存在範囲は 4 日間の平均で  $83 \pm 140 \mu$  秒角であることがわかった。VLBA では 2012 年 2 月、3 月、5 月、および 6 月に各 1 日、合計 4 期間の観測を行い、ジェット方向に沿った X 線放射成分の存在範囲は、 $89 \pm 43 \mu$  秒角であることがわかった。

第 3 章は、位相補償 VLBI 観測によって得られた、複数の期間にわたる電波コアの位置情報を用いて、Mrk 501 のジェット本元の詳細構造および運動学について述べている。VLBA による解析の結果、電波コアの北東約  $200 \mu$  秒角の位置に、ジェット軸とほぼ垂直方向という異例の場所に新成分 (NE 成分) が存在することを発見した。

以上の結果に基づき、第 4 章では、内部衝撃波モデルの妥当性を検証する観点から、得られた知見について論じている。中心エンジンから放出された、異なるローレンツ因子を持つ X 線放射成分同士が衝突し、その衝撃により粒子加速が起こるとする内部衝撃

波モデルによれば、X線放射成分のローレンツ因子の最大値と最小値の比（以下 b 値と称する）が小さいほど、X線の光度変動は弱くなる。観測された X線放射成分の位置の変動範囲が、この b 値と結びつけられることを示した後、本研究では、1ヶ月以上離れた2期間の測定結果から、b 値が 1.9 以下であるという制限が初めて得られたことを示している。この観測が行われた時期の X線光度変動は小さかったことが分かっており、得られた b 値の上限は、内部衝撃波モデルと矛盾しない。一方、ブレーザーの活動期には、X線光度変動の増大にあわせ、X線放射成分の位置変動は  $500\mu$  秒角以上になると予想し、本研究で達成した位置決定精度の VLBI 観測を再び実施することで、内部衝撃波モデルの妥当性をさらに検証できることを指摘した。また、第3章で示した NE 成分についても、電波コアと NE 成分とのフラックス比が内部衝撃波モデルの枠組みで説明できることを示し、中心エンジンの位置や根元におけるジェットの開き角を推定することに成功した。

第5章は結論であり、また補遺として、内部衝撃波モデルの定式化と関連する物理過程、VERA のデータ解析、VLBI における位相補償観測についてまとめている。

本論文は、ブレーザーにおける初の位相補償 VLBI 観測を実施・成功させ、さらに、複数の時期に測定された X線放射成分位置の分布範囲が、ローレンツ因子の最大値と最小値の比に結びつけられることを示し、実際に1ヶ月スケールでのローレンツ因子比についての制限を初めて得たことは、ジェットの物理過程に新たな知見を与えたものとして高い学術的価値を持つ。さらに、内部衝撃波モデルの妥当性を観測的に検証する独創的な方法論を提唱した点も高く評価できる。なお、本論文は、紀基樹・土居明広との共同研究であるが、論文提出者が主体となって観測、解析、および論証を行ったものであり、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ものと認める。