

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	恒任 優
論文題目	Investigating Disk-Jet Structure around Supermassive Black Hole through Polarization Images (偏光画像から探る、超大質量ブラックホール付近の円盤—ジェット構造)		
(論文内容の要旨)			
<p>事象の地平望遠鏡 (EHT) による超大質量ブラックホールの影 (ブラックホールシャドウ) の直接撮像が実現し、謎に包まれた活動銀河核ジェットの駆動メカニズムの解明に向け、新たな地平が切り拓かれた。申請者はこの好機をとらえ、既存の一般相対論的磁気流体シミュレーションデータを元に、ポストプロセスで偏光画像の輻射輸送計算を行って、ブラックホール付近のジェットの根本部分および降着円盤の高温ガスや磁場の構造を調査しようと考えた。ブラックホール近傍から生み出されるシンクロトロン放射は主に直線偏光成分のみ有しているため、それまでの研究は直線偏光に特化したものが主流であった。しかし申請者は、その直線偏光が高温磁化プラズマを伝搬中に円偏光へと転化される現象 (ファラデー変換) に注目し、EHTが観測した二つの天体を対象に、直線偏光画像に加えて新しく円偏光画像の計算を行った。</p> <p>申請者はまず、ジェット噴出が顕著な楕円銀河M87の中心にある巨大ブラックホールを対象に計算を実行した。そして直線偏光ベクトルが、比較的低温の円盤外部でファラデー回転により掻き乱されて元の情報を失うことを確認するとともに、放射時点では微弱な円偏光成分が、高温で揃った磁場を持つ円盤最内縁部でファラデー変換を受け増幅されることを世界で初めて明確に示した。</p> <p>次に申請者は、はっきりしたジェット構造を持たない銀河系中心のいて座A*に焦点をあてて偏光画像を計算した。そして、円偏光の符号が垂直な境界線をはさんで反転すること、またこれに呼応して直線偏光フラックスはその境界線上で明るくなることを見いだした。そしてこれらの特徴が、ジェット根本のトロイダル (らせん状) 磁場構造に起因することを突き止めた。</p> <p>さらに申請者は、シンクロトロン放射が生成されるジェット根本付近、ファラデー変換が起きる高温の円盤内部、そしてファラデー回転を担う比較的低温の円盤外部からなるジェット-円盤構造モデルを構築し、その観測的特徴として、直線偏光強度のピーク位置と円偏光強度のピーク位置が分離することを示した。すなわち、直線偏光画像では円盤を通過せずファラデー回転を受けないジェット下流 (観測者に近い側) からの放射が支配的となる一方、円偏光画像では内部円盤を通りファラデー変換で強められた上流 (観測者から離れた側) からの放射が支配的となることを確認し、それをを用いて両者のピーク位置の分離の度合いを定量化した。この結果はEHTやその他のVLBI (超長基線干渉計) による直線偏光画像観測と合致する。さらに申請者は波長やモデルパラメータを変えて計算を進め、全放射強度マップ、直線偏光画像、円偏光画像の違いが、ファラデー回転・変換の大きさおよびシンクロトロン自己吸収の光学的厚みの違いで説明できることを示し、円盤-ジェット構造の統一描像を打ち立てた。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

アインシュタイン理論の発表以来100年以上に渡るブラックホール研究において、事象の地平面望遠鏡 (EHT) による、超大質量ブラックホールの影 (ブラックホールシャドウ) 画像の取得は記念すべき一里塚であった。ブラックホール研究は「直接撮像」という武器を手に入れ、新しい時代が幕を開けたといっても過言ではないであろう。では、次の課題は何か? ブラックホールにまつわる長年の謎といえは、なんでも吸い込むはずのブラックホールから、いかにして光速に近い高速でしかも細く絞られたジェットが噴出するのか、というジェット駆動機構の解明であろう。直接撮像はいかにして、この謎に挑むのだろうか。

現在、ジェット駆動機構として最有力視されているのが、磁場を用いるものである。磁場は加速にも収束にも両方に威力を発すると期待される。これは理論の予想であるが、では何をどう観測すれば、ジェットの磁場駆動説を実証できるのか? そこで登場したのが偏光観測であった。偏光特性は磁場構造に敏感だからである。それが本申請論文のテーマである。

しかし単に偏光に着目したことが申請論文のオリジナリティではない。そのような研究はすでにあつた。すなわちブラックホール近傍の磁化プラズマが生み出すシンクロトロン放射の直線偏光画像の計算である。シンクロトロンは直線偏光が強く円偏光は弱いので、研究者が直線偏光に着目したのは自然な流れであつた。しかし申請者はその先をゆく。直線偏光が、高温で強い磁場を帯びたプラズマを伝搬中に円偏光へと転化される効果 (ファラデー変換) に目をつけたのである。そして、世界に先駆けて円偏光画像を計算し、それを直線偏光画像と照合し比較を行った点に、申請者の鋭い洞察力と非凡な発想が見られ、その意味で、本申請論文の意義は極めて高く評価されよう。

では円偏光画像から、何がわかるのか? 申請者はまずジェットの姿が如実に観測されている楕円銀河M87のケースについて計算を進め、直線偏光ベクトルは、円盤外部の冷たいプラズマ伝搬中にうけたファラデー回転により元の情報を失う一方で、元々微弱だった円偏光成分が、最内縁部の揃った磁場を持つ高温円盤中で増幅されることを示した。次のターゲットは銀河系中心のいて座A*である。この天体ではジェットがはっきり見えないため、円盤電子温度をより高温としたモデルで偏光画像を計算した。その結果、円偏光成分が、ある境界線を境に正 (プラス) の領域と負 (マイナス) の領域とにきれいに分かれることを見出した。なおその正負の境界で直線偏光成分が極大となる。申請者はこれらの特徴が、円盤中心部にあるトロイダル磁場 (ぎりぎり巻きのらせん磁場) の証拠となることを示した。これはそれまで誰も言わなかったことであり、将来の観測への重要な理論予測と言える。ここにも申請者の優れた物理直観力・洞察力がうかがい知れる。

さらに申請者は、個別のケースに特化して得られた知見から、より普遍的な結論を引き出すことを考えた。モデルパラメータを変えた計算を実行し、直線偏光成分が極大となる領域 (ジェット上流)、全放射強度が極大となる領域 (ブラックホー

ル近傍)、円偏光成分が極大となる領域(ジェット下流)の見え方が、全放射強度マップ・直線偏光画像・円偏光画像といった画像毎に異なることを示し、結果を観測波長の関数として統一的に説明する方策を示した。これを使えば、近い将来、事象の地平面望遠鏡やそのほかのVLBI(超長基線干渉計)による直線偏光と円偏光両方をカバーした高分解能観測により、磁場やプラズマ特性により強い制限を与えることが期待され、大変意義深い研究といえる。

以上まとめると、申請者は、新しく円偏光画像の計算を行ってブラックホール近傍の磁場や高温プラズマの構造を特定する手法を見だし、既存の一般相対論的磁気流体シミュレーションデータを用いた計算によりその有効性を実証した。これら一連の成果の天文学的意義は極めて高いと判断できる。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年1月13日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降