

Title	Laboratory study on outflow jet formation via semi-relativistic magnetic reconnection with high-intensity laser
Author(s)	Law, King Fai Farley
Citation	大阪大学, 2019, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/73513
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

Abstract of Thesis

Name (Law King Fai Farley)	
Title	Laboratory study on outflow jet formation via semi-relativistic magnetic reconnection with high-intensity laser (高強度レーザーを用いた半相対論的磁気リコネクションによるジェット放出過程の実験的研究)
<p>Abstract of Thesis</p> <p>Magnetic reconnection is a rearrangement of magnetic field topology in plasmas, also known as an energy conversion process from magnetic field energy to the kinetic energy of charged particles in the plasma. This phenomenon is accounted for a wide range of energetic astronomical phenomena, for example, solar coronal mass ejection, high energy photon emission from black hole systems and formation of stars.</p> <p>The main scope of this study is on magnetic reconnection outflow from plasma in a semirelativistic magnetization regime, where the magnetic field energy density exceeds the electron rest mass density but below that of the ion. The accretion disk corona of black hole systems lies in this regime, while the mechanism behind its high energy photon emission is still unsure. One of the proposed emission mechanism is magnetic reconnection, which provides energetic particles as a power source through the outflow jet. In this study, the magnetic reconnection of a magnetic field in kilotesla order is produced by using an intense laser with pulse duration in picosecond (10^{-12} s) order to study outflow jet in semi-relativistic reconnection.</p> <p>In the first part of this study, proton deflectometry is developed to directly probe the intense magnetic field generated in a laser platform. By injecting a proton beam with a wide energy spectrum, time-resolved magnetic field probing was also achieved. The second part of this study is about a magnetic reconnection experiment performed by the LFEX laser facility. The reconnection magnetic field of 2.1 kT is generated by the micro-coil scheme and measured by time-resolved proton deflectometry. Electron magnetization comparable to accretion disk corona of Cygnus X-1, a typical black hole binary system, was obtained. The particle energy spectrum of the reconnection outflow jet was measured, which possesses significant power-law component. This result supports magnetic reconnection models for powering hard-state X-ray emission from accreting black hole systems.</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (LAW King Fai Farley)			
論文審査担当者		(職)	氏 名
	主 査	教授	藤岡 慎介
	副 査	教授	山中 卓
	副 査	教授	千徳 靖彦
	副 査	講師	有川 安信
	副 査	助教	佐野 孝好

論文審査の結果の要旨

高強度レーザーとプラズマの相互作用によって駆動される電流はメガアンペアに達する。環状の物体にレーザーを照射し、環状の電流を作ることで、強磁場を生成可能である。他の磁場生成法と比べ、磁場のピーク強度が高い一方で、高強度レーザーを用いて生成した磁場の空間スケールは mm 程度と小さく、時間スケールもピコ秒からナノ秒程度と短いため、レーザー駆動磁場の利用には、正確な磁場強度の測定法の開発が必要であった。本論文では、磁気プローブとプロトンラジオグラフィ法を用いて、キロテスラ級の磁場強度を測定することに成功した。

プロトンラジオグラフィ法では、幅広いエネルギー分布を有するプロトンビームを磁場の発生領域に向けて照射した。プロトンの発生点から観測点の間を飛行する時間がエネルギー毎に異なることを利用し、ローレンツ力で偏向されたプロトンビームの空間パターンをエネルギーを分解しながら計測することで、高速時間分解磁場計測に成功した。レーザー駆動のマイクロコイルに大阪大学レーザー科学研究所の LFEX レーザーを照射することで、最大強度が 2.1 キロテスラ、半減期が 20 ピコ秒の強磁場が生成されていることを観測した。更に、マイクロコイル中に形成された磁場が、本研究の後半で着目する磁気リコネクションに必要な反平行の構造を有していることを示した。

磁気リコネクションは、プラズマ内における磁力線のつなぎ換え現象であり、磁場エネルギーからプラズマ内の荷電粒子の運動エネルギーへの変換過程としても知られている。この現象は、例えば太陽コロナからのプラズマの放出、ブラックホール周辺からの高エネルギー X 線放射など、複数の天体現象の根本原因の一つと考えられている。磁気リコネクションの実験的研究は長年行われているが、利用可能な磁場強度の上限により、非相対論領域での実験に限られていたため、相対論領域での磁気リコネクションを実験室内で研究することは当分野における挑戦の一つであった。本論文では、上述の高強度レーザーとマイクロコイルを用い、半相対論的磁気リコネクションを実現した。半相対論的とは、磁場エネルギー密度が電子の静止質量密度を越える一方で、イオンの静止質量密度を下回る状況を指している。

連星系からの高エネルギー光子放射が観測されているが、この高エネルギー光子の発生機構は未解明である。降着円盤コロナ内の磁気リコネクションが高エネルギー光子発生に寄与する高エネルギー電子を供給する機構として注目されている。本論文では、マイクロコイルで生成したキロテスラ級の磁場により、ブラックホールを含む連星系であるシグナス X-1 の降着円盤コロナに匹敵する電子の磁化率（磁気エネルギー密度と電子の静止質量密度の比）を得た。磁気リコネクションによって加熱されたプラズマ粒子のエネルギー分布を測定し、リコネクション領域の有限スケールに起因する最大エネルギーのカットオフを考慮したモデルを使って、観測結果を良くフィッティングできることを示した。この結果は、高エネルギー X 線の放射に必要な高エネルギー電子が降着円盤コロナ内の半相対論的磁気リコネクションによって供給されうることを示唆している。

高強度レーザーを用いた強磁場生成法、測定法、及び強磁場の実験室天文学への応用という面で新しい知見を当該分野にもたらす論文であり、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。