

磁気圏 3 次元グローバル電磁流体シミュレーションに基づく超低温矮星のオーロラ電流の推定

#原 亮太¹⁾, 木村 智樹¹⁾, 深沢 圭一郎²⁾, アサ サティアグラハ¹⁾, 藤井 友香³⁾, 埜 千尋⁴⁾

⁽¹⁾ 東京理科大, ⁽²⁾ 総合地球環境学研究所, ⁽³⁾ 国立天文台, ⁽⁴⁾ 情報通信研究機構

Estimation of Auroral Currents in Ultracool Dwarfs Based on 3D Global Magnetohydrodynamic Simulations

#Ryota HARA¹⁾, Tomoki KIMURA¹⁾, Keiichiro FUKAZAWA²⁾, Satyagraha ASA¹⁾, Yuka FUJII³⁾, Chihiro TAO⁴⁾

⁽¹⁾Tokyo University of Science, ⁽²⁾Research Institute for Humanity and Nature, ⁽³⁾National Astronomical Observatory of Japan,

⁽⁴⁾National Institute of Information and Communications Technology

Auroral emissions occur when charged particles surrounding an astronomical body are accelerated along magnetic field lines by energy input from the stellar winds, planetary rotation, or intrinsic magnetic fields, and subsequently collide with the atmosphere. The detection of auroral emissions thus serves as a key indicator of the presence of both magnetic fields and atmospheres. If auroral emissions are detected from exoplanets, they would provide direct evidence of magnetic fields and atmospheres, significantly contributing to the assessment of planetary habitability. Auroral radio emissions exhibit circular polarization (Wu & Lee, 1979), allowing them to be distinguished from other astrophysical radio sources, such as stellar radio bursts, which are typically weakly polarized. To prioritize observational targets among the many known exoplanets, researchers have employed theoretical and numerical estimations of auroral radio power using models such as the magnetosphere-ionosphere (M-I) coupling framework (Nichols & Milan, 2016) and global 3D MHD simulations (Turnpenney et al., 2020). These studies suggest that the typical auroral radio power of hot Jupiters is approximately 10^{15} W. Nevertheless, only one marginal detection of auroral radio emission from an exoplanet has been reported to date (Turner et al., 2021), which requires further model validation and refinement with the observation data.

In this context, ultracool dwarfs (UCDs) have recently attracted attention as promising analogs for testing auroral models relevant to exoplanets. Several UCDs with rapid rotation (periods of a few hours) and strong surface magnetic fields (several kilogausses) have exhibited intense, highly circularly polarized radio bursts, which are likely the auroral radio emissions (e.g., Hallinan et al., 2006). Nichols et al. (2012) and Turnpenney et al. (2017) extended their magnetosphere-ionosphere (M-I) coupling models originally developed for Jupiter and Saturn (e.g., Hill, 1979) to UCD's auroral processes using input parameters of UCD's typical environment. While these studies successfully reproduced observed radio power levels, some of the input parameters, including plasma angular velocity profiles and mass loading rates, remain largely uncharacterized, which introduced considerable uncertainty in the obtained auroral radio power.

Here, we conduct a three-dimensional global MHD simulation (Fukazawa et al., 2005) for UCDs that utilizes only well-constrained parameters, leading to a reduction of model uncertainty. This approach minimizes assumptions and enables a more self-consistent modeling of magnetospheric dynamics. Based on this simulation, we derived the auroral current and estimated the auroral radio power as a function of ionospheric Pedersen conductance. For example, the total auroral current of the UCD LSR J1835+3259 was estimated to be $\sim 1 \times 10^{10}$ A in our simulation. By comparing our results with VLA observations of LSR J1835+3259 (Hallinan et al., 2008), we inferred that a Pedersen conductance of approximately $1 - 10$ mho is required to reproduce the observed radio power ($\sim 10^{15} - 10^{16}$ W). This estimate is consistent with another independent estimation from the M-I coupling model ($0.1 - 10$ mho) presented by Satyagraha et al. (SGEPSS 2024). These results suggest the validation of our model. In future work, we aim to extend this methodology to hot Jupiters and Earth-like exoplanets to further validate our model and support future observational strategies. Here, we present the current status of our study.

オーロラは、天体周囲の宇宙空間に存在する荷電粒子が、恒星風や惑星の自転・固有磁場からエネルギーを得て磁力線に沿って加速され、大気に衝突することで起こる現象である。オーロラは、天体に磁場と大気が存在することを示す重要な指標となる。系外惑星からオーロラ放射が検出されれば、磁場と大気の実在を示す直接的な証拠となり、生命居住可能性の評価に大きく貢献する。オーロラ由来の電波放射は円偏波を示すため (Wu & Lee, 1979)、円偏波しにくい恒星電波など他の電波源と区別できる。数ある系外惑星の中から観測候補天体を絞り込むには、理論モデル・数値シミュレーションによる系外惑星オーロラ電波の放射パワー等の推定が必要である。先行研究によって、系外惑星向けに磁気圏-電離圏 (M-I) 結合モデリング (Nichols and Milan, 2016) や 3 次元グローバル電磁流体力学 (MHD) シミュレーション (Turnpenney et al., 2020) が行われ、Hot Jupiter のオーロラ電波放射パワーは典型的には約 10^{15} W と見積もられた。この推定値は観測で検証されるべきであるが、現在までの系外惑星からのオーロラ電波の検出報告は 1 例 (Turner et al., 2021) のみであり、検証が進んでいない。

系外惑星オーロラモデルの検証対象として、超低温矮星 (Ultracool Dwarf; UCD) が注目されている。UCD の中でも、

自転周期が数時間程度と極めて短く、磁場強度が数 kG に達する強磁場天体では、円偏光度の高い $\sim 10^{16}$ W の強力なオーロラ電波と思われる放射が複数報告されている（例：Hallinan et al., 2006）。Nichols et al. (2012) および Turnpenny et al. (2017) は、木星や土星などの回転磁化惑星向けの M-I 結合モデル（Hill, 1979）を応用し、UCD のパラメータでオーロラ過程を模擬した。その結果、観測値に匹敵するオーロラ電波放射パワーが再現された。しかし、UCD の周囲のプラズマ環境は未探査のため、モデルでは磁気圏プラズマの回転角速度やマスローディングレートなど、多くの未確定パラメータを仮定しており、得られた結果には恣意性や大きな不定性が含まれている。

そこで本研究では、不定性の小さなパラメータのみを採用し、3 次元グローバル MHD モデル (Fukazawa et al., 2005) で、UCD の磁気圏及びオーロラ過程を客観的に模擬した。本研究のモデルでは、先行研究のモデルに比べて仮定すべきパラメータが少なく、各物理量がシミュレーション内で自己無撞着に決定することができる。UCD の 1 つである LSRJ1835+3259 の磁気圏を模擬した結果、電波放射に関連するオーロラ電流の総量は $\sim 1 \times 10^{10}$ A と推定された。この電流総量の推定値から、オーロラ電波放射のパワーを電離圏の電気伝導度の関数として導出した。VLA による LSRJ1835+3259 の観測値 (Hallinan et al., 2008) と比較した結果、観測されたオーロラ電波のパワー (10^{15} - 10^{16} W) を再現するために必要な電離圏の伝導度は、1-10 mho であると推定された。この値は Satyagraha et al. (SGEPSS 2024) による UCD の M-I 結合モデルにおいて、本研究と独立に制約された電離圏伝導度 (0.1-10 mho) と矛盾しない。従って、本研究の MHD モデルは UCD のオーロラ過程を説明する妥当なモデルである可能性が高い。今後は本研究で構築したモデルを Hot Jupiter や地球型系外惑星にも応用し、モデルの検証や系外惑星探査を行う予定である。本発表では現状について報告する。