



Title	Shocks and Particle Energization in Supermassive Black Hole Coronae
Author(s)	Ly Nhat, Minh
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105642
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

Abstract of Thesis

Name (Minh Nhat Ly)	
Title	Shocks and Particle Energization in Supermassive Black Hole Coronae (超大質量ブラックホールコロナにおける衝撃波と粒子高エネルギー化)
Abstract of Thesis The recent identification of the Seyfert galaxy NGC 1068 as a source of high-energy neutrinos by the IceCube Neutrino Observatory presents a major challenge to standard high-energy astrophysical models. The detected neutrino flux, unaccompanied by a comparable flux of TeV gamma-rays, points to a particle acceleration environment that is transparent to neutrinos but opaque to gamma-rays: likely the hot coronal region surrounding the supermassive black hole (BH). However, the dominant particle acceleration mechanism in such high-density, high-temperature environments remains unestablished. Diffusive Shock Acceleration (DSA) has emerged as a leading candidate, particularly given recent observations indicating weak coronal magnetic fields (high plasma β) where magnetic reconnection is likely inefficient. This thesis investigates the microphysics of collisionless shocks and particle energization through a comprehensive suite of first-principles, one-dimensional Particle-in-Cell (PIC) simulations. The study is structured to bridge fundamental plasma kinetics with astrophysical applications. First, we establish a unified framework for collisionless dissipation in the unmagnetized electrostatic limit or electrostatic shocks. By analyzing the collisionless Riemann problem, we map the dynamical transition from shocks formation regime in plasmas to the vacuum expansion regime. We identify that electrostatic double-Layer structures emerge as the critical intermediate regime connecting these two distinct behaviors. This analysis defines the baseline potential structures governing ion dynamics before the introduction of magnetic complexity. Second, we extend this kinetic analysis to the magnetized regime relevant to BH coronae. We aim to resolve the critical uncertainty regarding the viability of DSA: specifically, whether shocks can accelerate protons to ~ 100 TeV with 10% efficiency under realistic coronal conditions. To address the poorly understood regimes of low sonic Mach number (M_s) and non-equilibrium temperatures ($T_i \neq T_e$), we systematically survey the parameter space of M_s, Alfvénic Mach number (M_A) shock velocity v_{sh}, and the temperature ratio T_i/T_e. We demonstrate that quasi-parallel collisionless shocks are robust proton accelerators. We find that DSA consistently converts approximately 10% of the shock wave's kinetic energy into non-thermal ions. This holds true even in the low-Mach-number regime ($M_s \approx 2$), which was traditionally considered inefficient. Furthermore, we verify that the acceleration rates are sufficient to reach the requisite ~ 100 TeV energies, providing the necessary reservoir for hadronic neutrino production. Additionally, we characterize the self-generated magnetic turbulence driven by non-resonant (Bell) and resonant streaming instabilities. Crucially, we link strong magnetic amplification to the suppression of primary electron acceleration. In regimes of high amplification, the shock front becomes locally superluminal, trapping thermal electrons and inhibiting their injection into the DSA cycle. We also observe that a lower initial electron temperature ($T_i \neq T_e$), typical of coronal plasmas, appears to result in lower electron acceleration efficiency. However, the electron dynamics have yet to achieve a true steady-state in such cases due to computational limitations. It remains unclear whether this suppression persists in the long-term steady state or represents a transient phase of shock evolution. Finally, we discuss the multi-messenger implications of these micro-physical constraints, examining the potential for neutrino production in BH coronae and the consequences of shock acceleration for the radiative spectra of leptons.	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (MINH NHAT LY)			
論文審査担当者	(職)		氏 名
	主 査	教授	千徳 靖彦
	副 査	教授	浅野 健一
	副 査	教授	藤岡 慎介
	副 査	准教授	佐野 孝好
	副 査	准教授	井上 芳幸

論文審査の結果の要旨

最新の観測により検出されたテラ電子ボルト (TeV) ニュートリノ群は、同程度のエネルギーを持つガンマ線を伴っておらず、このことは、ニュートリノに対しては透明だが、ガンマ線に対しては不透明な選択的粒子加速機構の存在を示唆している。このことから超巨大ブラックホール (BH) 周辺の高温コロナプラズマが粒子加速場である可能性が高い。しかし、このような高密度かつ高温の環境における支配的な粒子加速メカニズムは、未だ確立されていない。拡散衝撃波加速 (DSA) は、有力な候補として浮上している。

本論文では、包括的な第一原理一次元粒子シミュレーション (PIC 法) を用いて、BH 周辺のプラズマで支配的である無衝突衝撃の粒子エネルギー加速を調べた。本研究は、基礎的な運動論的プラズマ物理学から始まり、超高エネルギー粒子加速といった宇宙物理学的应用を橋渡しするように構成されている。

第一に、静電衝撃波における無衝突散逸のための統一的な枠組みを構築している。急峻な圧力勾配にあるプラズマ中での無衝突衝撃波形成から真空膨張への動的な遷移条件を明らかにした。特に、これら二つの異なる領域を繋ぐ重要な中間領域として、静電二重層構造が出現することを特定した。この結果は、イオン加速のダイナミクスを支配するポテンシャル構造を明らかにした。

第二に、BH 周辺コロナプラズマを想定した磁化プラズマへと無衝突衝撃波の物理を拡張し、衝撃波により何度も加速を受けイオンが高エネルギー化する拡散衝撃波加速 (DSA) の物理を解明した。DSA は、従来は非効率と考えられていた低マッハ数条件においても、衝撃波の運動エネルギーの約 10% を非熱的イオンに変換することを見出した。加えて、ストリーミング不安定性によって衝撃波上流に磁気乱流が生じ、電子加速の抑制が起こることも明らかにした。コンピュータ資源の制約から、シミュレーションで得られたプロトン加速の結果は、宇宙から飛んでくるニュートリノを説明するに足るエネルギーには達していない。イオン加速の持続性、電子加速の抑制といった現象が、長期に渡り定常的に持続するのか、あるいは衝撃波進化の過渡的な段階を表しているのかまでは不明である。しかし、TeV ニュートリノを生み出す高エネルギープロトンの加速機構として DSA が有力な候補であることを、本研究は提示している。

以上、本研究は、宇宙物理学の謎の一つとされる超高エネルギーニュートリノ群の発生の起源について、プラズマの運動論的現象である無衝突衝撃波を幅広いパラメーター領域において解析し、そこで起こるイオン加速に関して新たな物理描像を与えた。本成果は、プラズマ物理学及び宇宙プラズマ物理学の発展に貢献するものである。よって、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。