

氏名・(本籍)	おか べ のぶ ひろ 岡 部 信 広
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第2178号
学位授与年月日	平成17年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)天文学専攻
学位論文題目	Study of Non-equilibrium Plasma in Clusters of Galaxies (銀河団非平衡プラズマの研究)
論文審査委員	(主査) 教授 二間瀬 敏 史 教授 千 葉 柁 司 助教授 服 部 誠

論 文 内 容 要 旨

In this thesis, we investigate a new possibility of the generation mechanisms of magnetic fields and apply to clusters of galaxies.

The electron velocity distribution function must be deviated from the equilibrium shape, the Maxwell-Boltzmann, when there is a temperature gradient, since the system is in non-equilibrium due to a finite heat flux. It has been known that magnetic waves are excited by the microscopic plasma instability seeded by this non-equilibrium velocity distribution function. We successfully determined that the physical mechanism of the excitations is due to the effective temperature anisotropy fed by the temperature gradient, which is identical to the Weibel instability. The Weibel instability is well known as one of the generation mechanism of magnetic fields. The physical reasons of the differences between this case and the pure Weibel instability are also able to be explained.

We carried out the plasma particles simulations specialized to the Weibel-type instability driven by the temperature gradient. The numerical simulations focus on the local plasma in the global temperature gradient. We confirm that the saturation level of this instability is determined by the Alfvén current. This instability is the weak plasma instability which requires a large number of commutated particles to realize the deviation from the Maxwell-Boltzmann, which gives so many time steps before the saturation levels. A large number of time steps lead the breakdown of the energy conservation comparable to the excited energy. It limits us to investigate the evolutions after the saturation by numerical simulations. The evolution after the saturation could be speculated from the results performed for the Weibel instability with relatively strong temperature anisotropy. The excited electric beams merge with each other and become larger beam. That is the inverse-cascade process. However, it has not yet been clear that final structures and coherent lengths of magnetic fields generated by the Weibel-like instability.

The thermal plasmas in clusters of galaxies have various types of spatial temperature variations that are global gradient, discontinuity and fluctuation. Based on the Weibel-type instability, magnetic fields are “in-situ” generated in the plasma because the growth time scale is much faster than the dynamical time. We obtained the projected

intensity and temperature maps of A665 from the Chandra X-ray data. We derived the map of magnetic fields strength under the assumption that the projected map has the cylindrical structure. Those maps show that magnetic fields are strongly correlated with the temperature variations.

We estimated the magnetic strengths in cold front of A3667. The generated magnetic fields are one order of magnitude weaker than that required to suppress the KH instability by an order. The directions of generated fields are parallel to the cold fronts. The generated fields would suppress the heat conductivity in cold fronts and keeps the temperature jumps because they exist all over the cold front.

We plotted the radio halo powers ($P_{1.4}$) at a frequency 1.4GHz versus the X-ray temperature (T) from literatures. There appears to be a steep relation between $P_{1.4}$ and T, though it has a large scatter. We examined the theoretical predictions of two different models of the origin of the magnetic fields using the $P_{1.4}$ -T relation, under the assumption that the relativistic electrons are created by cluster merger. We showed that the dynamo model is difficult to reproduce the observed steep $P_{1.4}$ -T relation but the Weibel-type instability fed by temperature gradient can realize more successfully.

We summarize the predictions of Weibel-type instability driven by the temperature gradient .

- Magnetic fields are “in-situ” generated and don’t depend on the redshift because the evolution timescale of magnetic fields is short.
- Magnetic fields are ubiquitous in galaxy space plasma with temperature inhomogeneities.
- The generated magnetic field strengths are determined by the plasma environment
- The generated magnetic fields are strongly correlated with the temperature structures.
- The predicted field strength of $0.1-1 \mu\text{G}$ is consistent with values derived by the minimum energy arguments and the combination between the radio and IC hard X-ray emissions, without the assumption.
- The magnetic fields along cold fronts in A3667 exist all over fronts.
- The heat conduction could be self-regulated, since magnetic fields are generated by the plasma itself.

論文審査の結果の要旨

岡部信広君は、銀河団の高温希薄プラズマを非平衡という新たな切り口で研究する分野を開拓する独創的な業績を挙げそれを博士論文として提出した。近年のX線観測技術の飛躍的進展により衝撃波や接触不連続面、温度分布の非一様性など、銀河団プラズマは様々な複雑な構造をもつことが明らかになってきた。これらの構造に共通のキーワードの一つは、熱平衡状態からのずれ、言い換えれば、プラズマの速度分布関数のマックスウエル分布からのずれである。このことを考慮して銀河団プラズマ現象を研究するには、流体近似の扱いでは不十分であり、プラズマの速度分布の時間発展を記述するボルツマン方程式に立ち返る必要がある。このような研究手法をプラズマの運動論と呼ぶ。岡部君の業績の一つは、プラズマ運動論の手法を用いた銀河団プラズマの理論的研究である。高温希薄プラズマが温度勾配を持つとき不安定性により磁場を伴うプラズマの波が発生することがプラズマ運動論に基づいた線形理論によりこれまで知られていた。岡部君は、この不安定性の物理的機構を世界で始めて解明し、この不安定性が温度異方性を持つプラズマの不安定性として有名なWeibel不安定性と物理的に等価であることを示した。これによりこの不安定性が一躍日の目を見るようになった。又、Weibel不安定性に対してこれまでに成されてきた研究成果を適応することに道を開いた。岡部君はWeibel不安定性の非線形発展の研究成果から得られた結果を銀河団に適応する事で、温度勾配が存在する時に生じるプラズマ不安定性が銀河団の磁場の起源になりうる事を世界で始めて指摘した。この新しい磁場の起源に関する理論モデルを検証する為、自らプラズマ粒子シミュレーションを行った。その結果、統計的揺らぎのみを種にして本来に磁場が発生し、非線形発展の様子はWeibel不安定性とほぼ同じであることを示した。更に最新のX線観測結果を解析し銀河団の温度マップを得、これから銀河団の磁場強度分布の予言を行った。この結果により自らの理論モデルを将来のX線観測計画によりどの様に検証できるか提案した。

上記の事は、自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって、岡部信広君提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。