

ダイポール磁場中の電子・陽電子プラズマ生成計画と磁気圏現象の実験研究

Electron-positron plasma creation and experiments on magnetospheric phenomena in dipole field

齋藤晴彦 東大新領域

惑星磁気圏と大域的に等価なダイポール磁場を活用した実験室研究の現状と進行中の計画について報告する。東京大学 Ring Trap グループでは、磁気浮上した超伝導コイルにより人工磁気圏を生成し、(1)ダイポール磁場の優れた閉じ込め性能を活用した反物質プラズマの実現や、(2)磁気圏現象と核融合プラズマの共通課題としての波動粒子相互作用の解明を目指す研究を進めている。

まず、(1)高エネルギー天体の周辺等に存在すると考えられる電子・陽電子プラズマは、等質量の粒子から構成されるペアプラズマとして、特異的な安定性や波動特性を示すと予測されているが、実験研究の例は少ない。近年、粒子線技術の進展により大強度の低速陽電子ビームが入手可能となり、磁場閉じ込めによる電子・陽電子プラズマの生成プロジェクトが開始されている。ダイポール磁場は、断熱不変量の保存を介して電荷符号に依存しない荷電粒子の捕獲が可能であり、電子・陽電子プラズマに適した閉じ込め配位の一つである。超伝導磁気浮上装置 RT-1 では電子のみの非中性プラズマの 300 秒以上の閉じ込めが実現され、また、低速陽電子施設 NEPOMUC における永久磁石を用いた小型ダイポール装置による実験では、大強度陽電子ビームの高効率入射と捕獲が示された。これらの初期実験結果に基づき、産業技術総合研究所のパルス陽電子源を活用した電子・陽電子プラズマの実現に向け、希少粒子の高密度状態実現に適したコンパクトな磁気浮上ダイポール装置開発を進めている。

次に、(2)波動との相互作用による粒子の加速や輸送現象は、ジオスペースなどの自然界や実験室のプラズマに共通して重要な研究課題である。RT-1 では、木星周辺に観測される高ベータプラズマをヒントに先進核融合の原理検証を実施しており、各種の波動粒子相互作用を介したプラズマの輸送や構造の自己組織化など、磁気圏と類似した現象が発見された。RT-1 において、内向き輸送を駆動すると考えられる低周波揺動の他に、電子サイクロトロン共鳴加熱により生成した高温電子が主として圧力を担う高ベータプラズマでは、ホイッスラー波帯域の電磁場揺動の自発励起が観測された。揺動は時間的な周波数変動を示し、コーラスモードとの類似性が認められる。RT-1 のダイポール磁場配位において、円偏波した電磁場により加速される電子の軌道は容易にカオス化し、輸送に影響を与える可能性がある。

In this study we report the recent status and plan of laboratory experiments by using a dipole magnetic field configuration, which is globally equivalent to the geometry of a planetary magnetosphere. The Ring Trap Group of the University of Tokyo aims to (1) create antimatter plasmas using the excellent confinement properties of a dipole magnetic field, and to (2) understand the wave particle interactions as common phenomena in both magnetospheres and fusion-oriented plasma experiments, in an "artificial magnetosphere" created by a levitated superconducting magnet.

(1) It is predicted that electron-positron plasmas exist around high-energy astrophysical objects. Because of the mass symmetry, electron-positron plasmas exhibit unique stability and wave properties as one of "pair plasmas", plasmas consist of particles with equal mass. Experimentally, very few studies have been conducted on this topic so far. Based on recent drastic advances in beam technologies that have realized intense low-energy positron beams, several attempts are made to experimentally realize magnetically-confined electron-positron plasmas in a laboratory. Because the dipole magnetic field can trap charged particles independent of their charge signs according to the conservation of adiabatic invariants, this configuration is suitable for the confinement of electron-positron plasmas. In RT-1, a superconducting levitated dipole experiment, we have realized confinement of pure electron non-neutral plasma for more than 300 seconds. In a prototype dipole field trap with a permanent magnet

operated at NEPOMUC slow positron facility, efficient injection and relatively long trapping of positron beams have been demonstrated. Based on these initial investigations, we plan to create electron-positron plasmas in a compact levitated dipole trap suitable for realizing high-density states of charged particles, to be operated with a pulsed positron source of AIST.

(2) Particle acceleration and transport phenomena due to the wave particle interactions are important research subjects that are common to plasmas in nature and laboratories. At RT-1 we investigate the principles of advanced fusion concept by taking a hint from high-beta plasmas observed around Jupiter. Several similarities are found between the transport properties and self-organization processes of structures caused by the wave particle interactions observed in RT-1 and in natural magnetospheres. In the hot-electron high-beta plasma of RT-1 generated by the electron cyclotron resonance heating, we observed spontaneous excitation of electromagnetic fluctuations in the Whistler wave frequency range, in addition to low-frequency fluctuations that drive the so-called inward diffusion. The fluctuation mode often shows frequency sweeping, which is similar to the planetary chorus mode emission. In the dipole magnetic field configuration of RT-1, electrons are efficiently accelerated by the circularly polarized electromagnetic fields and can take chaotic orbits, which may affect the transport properties of plasmas.