

强磁场对等离子体输运的影响

李定^{1, 2, 3}, 董超¹, 姜畅¹, 张文禄¹, 曹金涛¹, 包键¹

¹中国科学院物理研究所, 北京 100190

²松山湖材料实验室, 东莞 523808

³中国科学院大学, 北京 100049

Email: dli@cashq.ac.cn

摘要:近年来, 磁约束聚变界正在设计和建造一批强磁场托卡马克实验装置, 例如 SPARC 设计的环向磁场高达 12 特斯拉, 而惯性约束聚变研究中发现了很强的自生磁场, 磁惯性约束实验装置中 10 特斯拉的种子磁场有可能会被压缩到 5000 特斯拉。可是目前的理论基础仍然是基于弱磁场建立的等离子体物理学。

半个多世纪前, 当动理学方程被引入等离子体物理时, 方程的左边加上了电磁场, 方程右边的碰撞项没有加上磁场, 因为当时采用弱场近似, 假设磁场对碰撞过程的影响很小, 可以包含在方程左边的自洽场中。当磁场很强时, 这样的假设还能否成立? 等离子体物理学的理论基础面临着强磁场带来的挑战。

当磁场很强时, 带电粒子的回旋运动对库仑碰撞的影响不能忽略, 强磁场会改变散射角、碰撞截面、碰撞项, 进而改变碰撞频率、弛豫时间和输运系数, 有可能对等离子体输运和约束产生很大影响。研究强磁场对等离子体输运及约束的影响刻不容缓。

本文综述了我们最近的一系列研究结果: 研究了磁场对能量传递与温度弛豫的影响, 发现磁场对电子-离子不同分量之间能量传递的影响显著不同, 会大大加快电子平行动能与离子垂直动能之间的传递; 导出了一系列均匀强磁化等离子体动理学方程, 包括强磁化 Fokker-Planck 方程、强磁化 Landau 方程和强磁化 Balescu-Lenard-Guernsey 方程; 研究了强磁场中横越磁场输运的新机理, 导出了沿磁场运动的带电粒子反射引起的 Fokker-Planck 碰撞项; 研究了磁场对高能量离子慢化效应的影响, 导出了离子能量损失率的表达式, 发现随着离子速度的增加, 磁场首先加速离子能量的损失, 然后减慢离子能量的损失; 还研究了磁场对 Rutherford 散射的影响, 导出了包含磁场的散射角解析表达式等。

关键词: 磁场; 等离子体; 输运; 约束

参考文献

- [1] C. Dong, H. J. Ren, H. S. Cai, and D. Li, Temperature relaxation in a magnetized plasma, *Phys. Plasmas* 2013, 20, 102518; Effects of magnetic field on anisotropic temperature relaxation, *ibid* 2013, 20, 032512.
- [3] C. Dong, W. L. Zhang, and D. Li, Fokker-Planck equation in the presence of a uniform magnetic field, *Phys. Plasmas* 2016, 23, 082105.
- [4] C. Dong, W. L. Zhang, J. T. Cao, and D. Li, Derivation of the magnetized Balescu-Lenard-Guernsey collision term based on the Fokker-Planck approach, *Phys. Plasmas* 2017, 24, 122120.
- [5] C. Dong, D. Li, and C. Jiang, Electron-electron collision term describing the reflections induced scattering in a magnetized plasma, *Chin. Phys. Lett.* 2019, 36, 075201.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 11835016)、国家自然科学基金项目(Nos. 11675257, 11875067, 11705275)、中科院前沿科学重点项目(No. QYZDJ-SSW-SYS016)、中科院国际合作项目(No. 112111KYSB20160039)、中科院 B 类先导专项课题(XDB16010300)和国家磁约束聚变能源研发项目(No. 2018YFE0311300)等。