

电子磁漂移波的静电修正问题

章 扬 忠

(中国西南物理研究所)

1981年11月11日收到

提 要

本文对为什么在托卡马克输运中电子表现为反常而离子表现为经典提出了一种解释。

为了解释在现有托卡马克实验中的电子反常输运问题,文献[1]曾建议以电子磁漂移波导致的电子洛伦兹漂移作为电子反常输运的机制。所得的结果在数量级上与现有实验相符。但在这种处理中,我们完全略去了离子运动和静电效应。一个显然的问题是这种省略的条件是什么,以及在现有的托卡马克实验中这种条件是否可以得到满足。为此我们需要考察包括离子运动及静电势的低 β 低频电磁漂移波问题。

Drake 等人^[2]以及最近 Dominguez 等人^[3]对此进行了讨论。他们的讨论均以两体碰撞为主,因而在非线性处理中没有做重整化的考虑,同时也没有对静电势的影响大小做出分析。本文沿用文献[1]的概念,利用均匀磁场及湍性碰撞为主的模型,在 Марков 近似下对这个问题做了讨论。指出,在现有托卡马克实验条件下静电势对于电子输运的影响是不重要的。

在讨论漂移波问题时,离子的导向中心运动方程应考虑到 B_0^{-2} 的近似。取线性漂移速度并在导向中心运动满足流守恒条件的近似下可以导出 ϕ 所满足的方程为

$$k_{\parallel} i^{(e)} + n M_i (c/B_0)^2 [\omega - \omega_*^{(i)} (1 + \eta_i)] \nabla_{\perp}^2 \phi = 0, \quad (1)$$

它与安培定律组合后利用均匀磁场条件可以得到

$$\phi_k = (\omega/k_{\parallel} c) (k/k_{\perp})^2 \chi_{\lambda}^2 A_k. \quad (2)$$

这里 $\chi_{\lambda}^2 = k_{\parallel}^2 v_A^2 / \omega [\omega - \omega_*^{(i)} (1 + \eta_i)]$ 。

在考虑 ϕ 的效应之后,文献[1]中导致横向漂移等效电场 E_k 可以写为

$$E_k = i(v_{\parallel}/c) [(k \times b_0) - (\omega/k_{\parallel} v_{\parallel}) k_{\perp} \chi_{\lambda}^2] A_k. \quad (3)$$

重复文献[1]中的 Марков 近似计算,只是取代换

$$A_k \rightarrow A_k (1 - k_{\parallel} v_A^2 / [\omega - \omega_*^{(i)} (1 + \eta_i)] v_{\parallel}) \quad (4)$$

之后,得到电子的横向扩散系数为

$$D_{\perp}^{(e)} = (v_e/B_0) |A_k| \sqrt{(1 - k_{\parallel} v_A^2 / [\omega - \omega_*^{(i)} (1 + \eta_i)] v_e)^2 - (k_{\parallel} B_0 / k_{\perp}^2 |A_k|^2)}. \quad (5)$$

于是得到湍性激发条件为

$$(\tilde{B}/B_0) \geq (k_{\parallel}/k_{\perp}) |1 - k_{\parallel} v_A^2 / [\omega - \omega_*^{(i)} (1 + \eta_i)] v_e|^{-1}. \quad (6)$$

按照现有托卡马克实验数据 $(\tilde{B}/B_0) \sim 10^{-4} - 10^{-5}$ 。如果(6)式中 $k_{\parallel} v_A^2 / [\omega - \omega_*^{(i)} (1 + \eta_i)] v_e \geq 1$, 那末不难看出,(6)式的条件不能满足。由此可知应有; $(\tilde{B}/B_0) \geq (k_{\parallel}/k_{\perp})$ 。

这表明应有 $k_{\parallel} \leq 10^{-3} \text{cm}^{-1}$. 由此估计出代表静电修正效应的 $(k_{\parallel} v_A^2 / \omega_* v_e)$ 因子大约为 10^{-1} 的量级. 这说明静电效应对电子磁漂移波的修正是很小的.

与此同时, 我们可以讨论静电势对于非线性色散关系的修正问题. 这里应当指出, 电子的运动方程中将出现 $\nabla_{\perp} A \times \nabla_{\perp} \phi$ 的非线性项. 这一项导致了粒子的双波相互作用. 这个新的相互作用的出现要求对以前的相干重整化理论^[4] 做出相应的推广. 事实上, 我们已经一般地证明了在相干重整化理论中包括了这种相互作用顶点后理论的可重整化性质. 但问题在于这个相互作用, 按照相干重整化微扰论, 使得微扰展开的最低级中出现绝对非相干源项, 因而破坏了非线性色散关系的概念. 因此当利用非线性色散关系讨论时就要求把这个相互作用略去. 这样一来, 漂移电流又成为无功的, 因而也就伴随了微扰级数应满足匹配条件的问题^[5], 否则将会导致能量不守恒的困难. 但是由于上面讨论的那样, 对于我们感兴趣的电子运动来说 ϕ 的修正效应很小. 因此仍然可以近似采用准线性的重整化介电函数来做估计. 类似于文献[1]的处理, 非线性色散关系的实部给出饱和时的色散关系为

$$\omega = \frac{1}{2} \{ \omega_*^{(e)} \pm \sqrt{\omega_*^{(e)2} - 4[(ck\Gamma_k/\omega_{pe})^2 - (k_{\parallel} v_A)^2]} \}. \quad (7)$$

(在导出(7)式时, 为简单起见, 设离子电荷为 1, $T_e = T_i$, 且仅考虑密度梯度所造成的漂移. 这时 $\omega_*^{(i)} = -\omega_*^{(e)} = \omega_*$, $\eta_i = 0$, $\eta_e = 0$, 否则将给出 ω 的三次色散方程) 而虚部给出

$$[(1 - \chi_A^2)\omega - \omega_*^{(e)}][\Gamma_k^2 - (3/2)(k_{\parallel} v_e)^2] + 2\omega_*^{(e)}\omega^2\chi_A^2 = 0. \quad (8)$$

(7)式要求

$$\Gamma_k \lesssim (\omega_{pe}/ck) \sqrt{(\omega_*^{(e)2}/2)^2 + k_{\parallel}^2 v_A^2}. \quad (9)$$

当以 $\omega \sim \omega_*$ 及 $\omega_*/\Gamma_k \sim O(1)$ 代入时, (8)式给出

$$k_{\parallel} v_e / \Gamma_k \sim O(1). \quad (10)$$

按照已知的数量关系, 它与电子磁漂移波的基本结论一致.

以上所做的 Марков 近似处理也可以同样应用于离子, 所不同的是 $v_e \rightarrow v_i$. 这时的数量关系表明, 对离子来说静电效应为主, 对应(6)式的离子激发条件可以得到满足, 也就是说离子对于湍性运动也有贡献. 对应的离子湍性扩散系数为

$$D_{\perp}^{(i)} \sim (c/B_0)|\phi_k| \sim (v_i/B_0)|A_k|. \quad (11)$$

它一般小于离子的经典扩散系数.

以上的分析半定量地描述了在现有托卡马克实验条件下低频电磁漂移波所导致的湍性输运图象:

电子输运以电子在电子磁漂移波形成的随机磁场中所受到的洛伦兹漂移为主要机制, 静电修正效应对它是不重要的. 而离子输运则以离子在电子磁漂移波所伴随的静电波中的静电漂移为主要机制, 它的输运系数小于离子的经典输运系数. 这可以解释为什么在目前的托卡马克实验中仅对电子存在反常的输运而对离子的输运可以采用经典描述.

参 考 文 献

- [1] 章扬忠, 物理学报, 30 (1981), 1649.

- [2] J. F. Drake, N. T. Gladd, C. S. Liu, C. L. Chang, *Phys. Rev. Lett.* **44** (1980), 994.
- [3] R. R. Dominguez, M. Rosenberg, C. S. Chang, *Phys. Fluids*, **24** (1981), 472.
- [4] 章扬忠, 物理学报, **30** (1981), 1020.
- [5] 章扬忠, 物理学报, **30** (1981), 1565.

THE ELECTROSTATIC CORRECTIONS TO THE ELECTRON MAGNETIC-DRIFT WAVES

ZHANG YANG-ZHUNG

(Southwestern Institute of Physics, Leshan, Sichuan China)

ABSTRACT

It is explained in this note why the electron transport appears anomalous while the ion transport appears classical in the Tokamak experiments.