РАСЩЕПЛЕННЫЕ КОНФИГУРАЦИИ ТОНКОГО ТОКОВОГО СЛОЯ С ДВУМЯ САМОСОГЛАСОВАННЫМИ И ПОСТОЯННОЙ НОРМАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТАМИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

О. В. Мингалев¹, И. В. Мингалев¹, Х. В. Малова^{2,3}, М. Н. Мельник¹, Л. М. Зеленый²

Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН
 Институт космических исследований РАН

3. Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ

Цель работы — проверить, к чему приводит наложение на равновесную плоскую симметричную конфигурацию тонкого токового слоя (TTC) с постоянной нормальной компонентой магнитного поля B_z и самосогласованной тангенциальной компонентой $B_x(z)$ колоколообразного финитного возмущения сдвиговой компоненты $B_y^0(z)$ с амплитудой B_y^a в зависимости как от величины этой амплитуды, так и от величины нормальной компоненты B_z .

При помощи численной модели тонкого токового слоя (TTC), основанной на методе крупных частиц, впервые в численном моделировании получена расщепленная квазистационарная конфигурация TTC. Самосогласованными являются две компоненты магнитного поля (тангенциальная $B_x(z)$ и сдвиговая $B_u(z)$) и тока ($j_x(z)$ и $j_{u}(z)$, соответственно), а нормальная компонента магнитного поля (B_z) считается постоянной. В этой конфигурации токовый слой существенно несимметричен, и разделен на два токовых слоя с узкой областью малого отрицательного тока между ними. При этом сдвиговая компонента магнитного поля B_{y} положительна, и по амплитуде примерно в 4 раза меньше величины ΔB_x изменения при переходе через слой тангенциальной компоненты $B_x(z)$. Подобные расщепленные конфигурации ТТС встречаются в данных спутников CLUSTER.

Модель имеет размерность 1D3V, в ней учитываются только протоны, а электроны рассматриваются как холодный нейтрализующий фон. Используется система координат де Хоффмана-Теллера, что позволяет исключить электрическое поле. Магнитное поле и ток имеют вид:

$$\boldsymbol{B} = B_x(z) \, \boldsymbol{e}_x + B_y(z) \, \boldsymbol{e}_y + B_z \, \boldsymbol{e}_z \,, \quad \boldsymbol{j} = j_x(z) \, \boldsymbol{e}_x + j_y(z) \, \boldsymbol{e}_y \,. \tag{1}$$

Вне слоя в долях хвоста магнитное поле считается постоянным:

(здесь e_x , e_y , e_z — единичные базисные векторы системы координат GSM). Токовый слой образуется двумя встречными потоками плазмы, которые набегают из долей хвоста вдоль силовых линий магнитного поля с гидродинамической скоростью величиной V_D и имеют максвелловское распределение с температурой протонов T_{pg} :

$$f_{\pm}(z, \boldsymbol{v}) = \frac{n_{\pm}}{\left(V_{T0}\sqrt{2\pi}\right)^{3}} \exp\left\{-\frac{|\boldsymbol{v}-\boldsymbol{U}(z)|^{2}}{2V_{T0}^{2}}\right\}, \quad \text{где} \\ \boldsymbol{U}(z) = -\frac{z}{|z|} V_{D} \frac{\boldsymbol{B}(z)}{|\boldsymbol{B}(z)|}, \quad V_{T0} = \sqrt{\frac{eT_{pg}}{m_{p}}} \right\}$$
(3)

есть, соответственно, гидродинамическая скорость в источнике, тепловая скорость протонов в источнике. Знак (+) соответствует верхнему (северному) источнику, знак (-) — нижнему (южному).

В ходе расчетов методом трассирования крупных частиц совместно решается стационарное 1D3V уравнение Власова для протонов

$$v_{z}\frac{\partial f}{\partial z} + \frac{e}{m_{p}}\left(\left[\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}\right],\frac{\partial f}{\partial\boldsymbol{v}}\right) = 0, \qquad (4)$$

и уравнение Ампера для магнитного поля $\operatorname{rot} \boldsymbol{B}(z) = \mu_0 \boldsymbol{j}(z)$, которое дает два скалярных уравнения

$$\frac{dB_x(z)}{dz} = \mu_0 j_y(z), \quad \frac{dB_y(z)}{dz} = -\mu_0 j_x(z).$$
 (5)

Условия силового баланса вдоль осей X, Y и Z имеют вид

$$\Pi_{x,z}(z) - \frac{1}{\mu_0} B_z B_x(z) = const, \Pi_{y,z}(z) - \frac{1}{\mu_0} B_z B_y(z) = const, \Pi_{z,z}(z) + \frac{1}{2\mu_0} \left(|B_x(z)|^2 + |B_y(z)|^2 \right) = const,$$

$$(6)$$

где
$$\Pi_{i,k}(z) = m_p \int_{\mathbb{R}^3} v_i v_k f(z, \boldsymbol{v}) d^3 \boldsymbol{v}$$
 есть компоненты тензора напря-

жений.

Из условия баланса по ос
иZвытекает граничное условие для компоненты пол
я $\ B_x(z)$:

$$B_x(\pm L) = \mu_0 \frac{\Delta \Pi_{z,z}}{\Delta B_x} \pm \frac{1}{2} \Delta B_x , \qquad (7)$$

где $\Delta \Pi_{z,z} = \Pi_{z,z}(L) - \Pi_{z,z}(-L), \quad \Delta B_x = B_x(L) - B_x(-L).$

Плотность тока определяется формулой

$$\boldsymbol{j}(z) = e \int\limits_{\mathbb{R}^3} \boldsymbol{v} f(z, \boldsymbol{v}) \, d^3 \boldsymbol{v} \, .$$

Отношение концентраций в источниках n_+/n_- однозначно определяется из условия пространственной 1-мерности модели

$$j_z(z) = e \int_{\mathbb{R}^3} v_z f(z, \boldsymbol{v}) \, d^3 \boldsymbol{v} \equiv 0 \,, \tag{8}$$

а их значения n_{\pm} однозначно определяются изменением в слое тангенциальной компоненты магнитного поля $\Delta B_x = B_x(L) - B_x(-L)$.

Входными параметрами модели являются:

1) *z*-компонента магнитного поля B_z ;

2) внешняя заданная часть y-компоненты магнитного поля B_y^E ; 3) температура протонов в потоках плазмы из источников в долях хвоста T_{pg} (определяет тепловую скорость $V_{T0} = \sqrt{eT_{pg}/m_p}$) 4) величина V_D гидродинамической скорости потока плазмы из источников V_D (определяется параметром $\varepsilon = V_{T0}/V_D$); 5) величина изменения в слое x-компоненты магнитного поля ΔB_x ; 6) шаг пространственной сетки h и шаг по времени τ ; 7) полуширина области расчета магнитного поля L, положение источников $|z| = L_s$, полуширина области контроля частиц L_c .

В ходе моделирования в слое рассчитываются концентрация n(z), компоненты плотности тока протонов j(z), самосогласованные компоненты магнитного поля $B_x(z)$ и $B_y(z)$, а также компоненты тензора напряжений $\Pi_{i,k}(z)$. Для контроля системы вычисляются компоненты тензора давления $P_{i,k}(z)$ и тензора температуры $T_{i,k}(z)$, которые определяются формулами

$$P_{i,k}(z) = \Pi_{i,k}(z) - \frac{j_i(z)j_k(z)}{e^2 n(z)}, \quad T_{i,k}(z) = \frac{P_{i,k}(z)}{en(z)}.$$

По ним вычисляются собственные числа этих тензоров (занумерованные в порядке возрастания), которые обозначены как:

$$P_1(z) \le P_2(z) \le P_3(z)$$
, $T_1(z) \le T_2(z) \le T_3(z)$,

а также вычисляются продольное давление $P_{\parallel}(z)$ и продольная температура $T_{\parallel}(z)$.

Расчеты стартовали от плоской равновесной конфигурации TTC с заданной постоянной нормальной компонентой магнитного поля B_z и самосогласованной тангенциальной компонентой $B_x(z)$, то есть магнитное поле и ток имели вид

$$\boldsymbol{B} = B_x(z) \, \boldsymbol{e}_x + B_z \, \boldsymbol{e}_z \,, \ \boldsymbol{j} = j_y(z) \, \boldsymbol{e}_y \,.$$

В таких конфигурациях компонента плотности тока $j_x(z)$ и соответствующая ей сдвиговая компонента магнитного поля $B_y(z)$ получаются очень малыми по сравнению с амплитудами соответственно $j_y(z)$ и $B_x(z)$, и не учитываются. Были проверены следующие варианты.

1) Начинался учет только собственных самосогласованных компонент $j_x(z)$ и $B_y(z)$ без дополнительного начального возмущения, то есть магнитное поле и плотность тока начинали рассматриваться в форме (1).

2) Дополнительно к указанному в пункте выше накладывалось финитное (локализованное по пространству) колоколообразное возмущение сдвиговой компоненты $B_y^0(z)$ с амплитудой B_y^a . Рассматривались случаи $B_z = 1, 2, 3$ нТл, $B_y^a = 2, \ldots, 18$ нТл.

Остальные входные параметры модели имели следующие значения: $B_y^E = 0$ (внешнее постоянное магнитное поле отсутствует), $\Delta B_x = 40 \text{ нTл}, \quad T_{pg} = 4 \text{ кэв}, \quad V_D = 2V_{T0}, \quad где тепловая скорость протонов в источнике <math>V_{T0} = \sqrt{eT_{pg}/m_p} \approx 619 \text{ км/c}$. Область моделирования имеет полуширину $L = R_E$, шаг сетки $h = R_E/640 = 10 \text{ км},$ шаг по времени $\tau = 0.0025 \text{ c}$. Область контроля частиц составляет $\{ |z| < L_c = 2.5R_E \},$ источники расположены при $|z| = L_s = 1.6R_E.$

На следующем ниже рисунке 1 приведены конфигурации плоского симметричного токового слоя при $B_z = 1$ нТл для 3-х значений параметра $\varepsilon = V_{T0}/V_D = 0.4, 0.5, 0.625$.

На рисунке 2 приведены аналогичные конфигурации при значении параметра $\varepsilon = V_{T0}/V_D = 0.5$ для случаев $B_z = 1, 2, 3$ нТл. Плоские конфигурации ТТС: 1) $B_{y}(z)$, (нТл)

2) $j_{\nu}(z)$, (HA/M^2)



Плоские конфигурации ТТС: 1) $B_{y}(z)$, (нТл)

2) $j_{v}(z)$, (HA/M^{2})



РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для старта в варианте 1) (когда начинался учет только собственных самосогласованных компонент $j_x(z)$ и $B_y(z)$ без дополнительного начального возмущения) при всех значениях входных параметров получалась очень близкая к симметричной стационарная конфигурация ТТС уже с двумя самосогласованными (практически антисимметричными) компонентами магнитного поля и (практически симметричными) компонентами плотности тока и плотности плазмы. В этой конфигурации профили плотности плазмы, компоненты плотности тока $j_u(z)$ и тангенциальной компоненты магнитного поля $B_x(z)$ качественно мало отличаются от своих исходных профилей в плоской симметричной конфигурации. Такие конфигурации для случая $B_z = 2$ нТл мы показывали на докладах в прошлые годы.

Для случая $B_z = 3$ нТл полученная стационарная конфигурация ТТС приведена на рисунке 3. На рис. 4 для этого же случая показана стационарная конфигурация, которая получилась для старта в варианте 2) с амплитудой возмущения $B_y^a = 10$ нТл. На рис. 5 показано сравнение этих двух конфигураций.









Отметим, что профиль компоненты тока $j_y(z)$ на рис. 4 качественно очень похож на некоторые профили, которые строятся по данным CLUSTER.

Для случая $B_z = 2$ нТл при старте в варианте **2**) с амплитудой возмущения в диапазоне $B_{y}^{a} = 10, \ldots, 17$ нТл получается расщепленная квазистационарная конфигурация ТТС, которая показана на рис. 6. В этой конфигурации TC существенно несимметричен, и разделен на два токовых слоя с узкой областью малого отрицательного тока между ними. При этом сдвиговая компонента магнитного поля B_{u} положительна, и по амплитуде примерно в 4 раза меньше величины ΔB_x изменения при переходе через слой тангенциальной компоненты $B_x(z)$. Подобные расщепленные конфигурации TTC встречаются в данных спутников CLUSTER. На рисунке 7 показано выполнение для этой конфигурации соотношений силового баланса (4). Видно, что они выполнены с очень хорошей точностью. На рисунке 8 приведены собственные числа тензора давления протонов и тензора их температуры, а также среднее и продольное давление и соответствующие температуры. Эти рисунки демонстрируют характер

нарушения гиротропности в ТС.

Для случая $B_z = 2$ нТл при старте в варианте **2**) с амплитудой возмущения в диапазоне $B_y^a \ge 18$ нТл получается квазистационарная конфигурация ТТС с близким к постоянному профилем величины магнитного поля $|\mathbf{B}(z)|$, которая показана на рис. 9. Такие конфигурации мы также показывали на докладах в прошлые годы.

Подобные конфигурации TTC также встречаются в данных спутников CLUSTER. На рисунке 10 показано выполнение для этой конфигурации соотношений силового баланса (4). Видно, что они и в этом случае выполнены с хорошей точностью. На рисунке 11 приведены собственные числа тензора давления протонов и тензора их температуры, а также среднее и продольное давление и температуры.

Для случая $B_z = 1$ нТл при старте в варианте **2**) с амплитудой возмущения в диапазоне $B_y^a \ge 2$ нТл получается квазистационарная конфигурация ТТС с близким к постоянному профилем величины магнитного поля $|\mathbf{B}(z)|$, которая полностью аналогична описанной выше для случая $B_z = 2$ нТл и $B_y^a \ge 18$ нТл.





Собственные числа тензора давления (нПа): $P_1(z) \le P_2(z) \le P_3(z)$, а также $P_{\parallel}(z) \approx P_3(z)$







Собственные числа тензора давления (нПа): $P_1(z) \le P_2(z) \le P_3(z)$, а также $P_{\parallel}(z) \approx P_3(z)$



выводы

За последние годы при помощи развиваемой нашим коллективом численной модели ТТС были получены 2 новых типа квазистационарных конфигураций TTC размерности 1D3V с постоянной нормальной компонентой магнитного поля B_z и двумя самосогласованными компонентами магнитного поля и плотности тока. Для конфигураций первого типа профили величины магнитного поля |B(z)|, концентрации и *zz*-компоненты тензора напряжений близки к постоянным. Для конфигурации второго типа профиль компоненты $j_y(z)$ плотности тока является расщепленным, токовый слой существенно несимметричен, и разделен на два токовых слоя с узкой областью малого отрицательного тока между ними.