СТРУКТУРА ГРАНИЦЫ ДИАМАГНИТНОГО ОБЛАКА В ЭЛЕКТРОННОМ КИНЕТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ ПРИ ИНЖЕКЦИИ В ГИПЕРБЕТНОМ РЕЖИМЕ

Губченко В.М.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

STRUCTURE OF THE DIAMAGNETIC CLOUD BORDER IN ELECTRON KINETIC DESCRIPTION UNDER HYPERBETA INJECTION REGIME

Gubchenko V.M.

Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

We considered dissipative structure of the fields inside of supersonic weakly magnetized expanding diamagnetic cavity. It is characterized by hyper values of hot plasma beta. Dissipation is due to electron acceleration process which defines kinetic scale of the cavity field fine structure.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-81-84

1. Классической задачей физики плазмы является бесстолкновительный разлет плазменного облака в окружающую замагниченную плазму. Облако возникает от импульсного источника горячей бесстолкновительной плазмы с конечной энергией и конечным числом частиц, инжектируемых в неограниченную замагниченную или неоднородно замагниченную (дипольное или тороидальное поле) фоновую плазму. Разлет происходит в низкобетную фоновую плазму с альвеновским числом Маха $M < 1$ на периферии. Разлет внутри облака происходит в высокобетной плазме с альвеновским числом $M > 1$ [1].

Это облако, как правило, называют диамагнитным облаком (ДО), т.к. при его разлете происходит полное вытеснение магнитного поля и разрыв силовой линии симметрии в каверне, где частицы не замагничены. Это позволяет говорить о его диамагнетизме и эффектах магнитной проницаемости или, с другой стороны, об эффектах высокой проводимости при слабых, но важных эффектах омической диссипации.

Появление облака приводит к появлению волновых распространяющихся возмущений магнитозвукового и альвеновского типа от него на внешних границах каверны, где частицы замагничены.

Облако является мощным источником высокоэнергичных ускоренных частиц: как электронов, так и ионов. Этот омический диссипативный процесс ускорения в каверне представляет особый интерес при изучении динамики ДО.

Рис. 1. На первых двух рисунках диамагнитное облако в бесстолкновительной плазме в МГД описании с бесструктурной каверной и границей, образованной магнитозвуковым возмущением в виде токового цилиндра-слоя (ТС) с «холодной» ионной скин-ово толщиной, расширяющимся со сверхзвуковой скоростью [1]. На третьем рисунке показана в кинетическом описании диссипативная структура поля в «горячей» каверне с масштабами электронного аномального скин-слоя, находящейся в «гипербетном» режиме и возбужденная потоком тепловых горячих электронов, обгоняющими ТС.

2. Облако может иметь естественную и искусственную природу. В астрофизике облако ассоциируется с джетами, в солнечно-земной физике облако связано с солнечной вспышкой и корональным выбросом массы. В физике ионосферы и магнитосферы это «макро» облако связано с инъекцией плазмы от внешних источников. В лабораторном плазменном эксперименте на крупномасштабных установках типа «Крот» ИПФ РАН ставятся задачи моделирования естественных процессов с возможностью пространственного разрешения «ненулевых» полей в каверне и границ облака. Особую роль играют процессы формирования «микро» облака в лазерных экспериментах в физике высоких плотностей энергии, в частности, на установках «Pearl» ИПФ РАН и КИ-1-Новосибирск, где ставятся задачи магнитного удержания разлета плазмы и задачи моделирования астрофизических и магнитосферных явлений в ближнем космосе.

3. Исторически ДО исследовалось как макро явление разлета в средах с высокой частотой столкновений и описывались классической МГД, но с высокой проводимостью при отсутствии магнитной восприимчивости – реального диамагнетизма, что предполагает «холодную» кинетику ионов и МГД природу токовой системы (ТС) на границы облака. При этом, в расчет не включалось ускорение электронов, вносящих диссипацию, необходимую для эффектов разрыва силовых линий в «горячем» ДО, что делает ДО подобной электронной диффузионной области магнитного пересоединения.

В заданном разлете Райзера [2] заложен эффект МГД вытеснения магнитного поля, расширяющимся облаком плазмы с идеальной проводимостью, т.е. режим больших магнитных чисел Рейнольдса. Важную роль здесь в описании границы поля ДО играет скин-овый масштаб, который выражается через МГД проводимость окружающей среды.

Важнейшим в «силовом» МГД описании возбуждения бесстолкновительных МГД токовых систем на границах каверны ДО стал магнитоламинарный механизм (МЛМ) с автоточечной динамикой разлета облака и магнитного поля [3]. Здесь делается предположение об изотропном инжекторе плазмы – «горячих» электронах, что вносит асимметрию в формах функций распределения частиц плазмы. МЛМ это вариант двухкомпонентной электронной МГД и ионной МГД с эффектами силового давления: постулирован изотропный импульсный разлет в плазму из точки радиального инжектирования горячей компоненты электронов. Горячие электроны, распределяясь при разлете по скоростям, по существу, описываются локально холодной МГД. С учетом обратного тока ионов создается «квазистационарная» и «квазинейтральная» динамика облака плазмы в разлете. Вся электронная компонента описывается как идеально-проводящая МГД среда.

Для детального описания возбуждения индукционных электромагнитных полей в каверне при включении анизотропного инжектора на начальном этапе, когда сформирована анизотропная по температуре среда, применена электронная «бессильная» МГД. Описываются нелинейные колебательные режимы каверны на основе развития МГД неустойчивости Вейбеля индукционной моды плазмы [4].

4. В настоящее время ДО в магнитосфере, в короне Солнца и в лазерной плазме – это неоднородная, динамичная высокоэнергичная бесстолкновительная горячая плазменная э.м. структура с ТС, образованная в результате амбиполярного разлета (с гиперзвуковой скоростью, но меньшей тепловой электронной) от «точечного» источника в фоновую низкоэнергичную плазму поперек внешнего слабонеоднородного магнитного (ВМ) поля. Поле способствует удержанию высокоэнергичной плазмы, с дальнейшей остановкой разлета ВМ полем или происходит прорыв этого ВМ поля.

В результате такого э.м. процесса образуются разрывы (диссипация) и выталкивание (диамагнетизм) силовых линий магнитного поля из ДО, формируется на границе квазицилиндрическая токовая система (ТС), подобная плоскому слою. Структура ТС обусловлена поляризацией плазмы (диамагнетизм), ускорением «резонансных» электронов (аномальная проводимость плазмы) и возбуждением МГД волн.

На периферии ДО частицы плазмы замагничены, плазменное бета мало, а структура ТС рассматривается в рамках МГД на основе магнитоламинарного механизма (МЛМ) и определяется «холодными» э.м. МГД масштабами дисперсии плазмы. Внутри ДО, в «горячей» каверне плазма незамагничена и плазменное электронное бета высокое – гипербета, выше вычисленных критических значений, определяемых по незамагниченности ДО по отношению к кинетическим масштабам индукционной (энтропий-

ной) моды плазмы. Здесь формируется ТС, структурированная «горячими» э.м. масштабами кинетической природы [5, 6] (рис. 1).

5. Существует подобие в описании токовой системы (ТС) диффузионной области и ТС диамагнитного облака, в «гипербетных» состояниях с высокими электронными бета незамагниченной плазмы, выше критических. Важны параметры анизотропии и асимметрии (разлет) функции распределения горячих электронов и ионов. Омический (аномальный скин-овый) и диамагнитный кинетические масштабы дисперсии обусловлены горячей электронной компонентой определяют внутреннюю структуру каверны и границы диамагнитного облака с «горячими» масштабами, превышающими МГД – «холодные» скин-овые для внешней структуры (рис. 1).

Резистивный электронный масштаб самосогласован с процессами «резонансного» ускорения электронов горячей компоненты индукционными полями, возбуждаемыми быстрым разлетом горячей электронной компоненты относительно поля сверхальвеновского $M > 1$, сравнительно медленно расширяющегося фронта – тонкого токового цилиндра, сформированного холодной МГД компонентой плазмы. Диамагнитный масштаб обусловлен разлетом «нерезонансных» частиц, возникает магнитная проницаемость (диамагнитная/парамагнитная) разлетающейся плазмы.

Магнитное поле, замагничивая разлет частиц к границе диамагнитного облака, определяет величину критического гипербета. Возникает критерий «гипербетного» разлета без замагничивания горячей компоненты. Получена структура электромагнитного поля каверны вблизи незамагниченной квазиплоской границы диамагнитной области, отвечающая скин-ированию в горячем электронном разлете (рис. 1).

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0035-2019-0002 "Волны, неустойчивости и структуры в лабораторной и космической плазме" и частично поддержана грантами РФФИ (№. 19_02_00704, № 20-02-00108), Министерством образования и науки РФ в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы" субсидия №14.607.21.0196, УИН проекта RFMEFI60717X0196, программой фундаментальных исследований РАН № КП19-270 "Вопросы происхождения и эволюции Вселенной с применением методов наземных наблюдений и космических исследований".

Литература

1. *Winske D. et al.* Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 2019, v. 5, a. 51, pp 1-14. DOI: 10.3389/fspas.2018.00051.
2. *Райзер Ю.И.* // ПМТФ, 1963, № 6.
3. *Bashurin V., A Golubev, V. Terekhin* // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 1983, v. 24, pp. 614-622. DOI: 10.1007/BF00905870.
4. *Bychenkov V.Yu., W. Rozmus, and C.E. Capjack* // JETP Lett, 2003, 78, No. 3, pp 119-122.
5. *Gubchenko V.M.* // Geomagnetism and Aeronomy, 2015, v. 55, No. 7, pp. 831-845, DOI: 10.1134/S0016793215070099,
6. *Gubchenko V.M.* // Geomagnetism and Aeronomy, 2015, v. 55, No. 8, pp. 1009-1025, DOI: 10.1134/S0016793215080101