

**ЭЛЕКТРОННЫЕ СКИНОВЫЕ МАСШТАБЫ И БЕЗРАЗМЕРНЫЕ  
ПАРАМЕТРЫ В ФИЗИКЕ РАЗЛЕТОВ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ  
С АНИЗОТРОПИЕЙ И АСИММЕТРИЕЙ  
ЕЕ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ**

**Губченко В.М.**

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия*

**ELECTRON SKIN-SCALES AND DIMENSIONLESS PARAMETERS IN  
PHYSICS OF HOTPLASMA EXPANSION WITH ANISOTROPY  
AND ASYMMETRY OF DISTRIBUTION FUNCTION**

**Gubchenko V.M.**

*Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia*

*The approach under development to the large scale (LS) weakly magnetized structures formation by hot collisionless plasma expansion in the hyper beta plasma regime by “dynamo” of plasma inductive modes. Non MHD electron Large Scale Kinetic Dynamo (LSK-D) is activated: the dissipative scale is originated from resonant electron acceleration - (Faraday D), is defined by PDF asymmetry parameter. The diamagnetic - the non dissipative scale - is defined by non resonant electrons by PDF anisotropy parameter (Weibel D). Ratio of these parameters – ratio of the Faraday to Weibel D effects-is plasma - Governing electromagnetic quality parameter  $G_V$ ; wide positive to negative, to be measured in space, laser and PIC.*

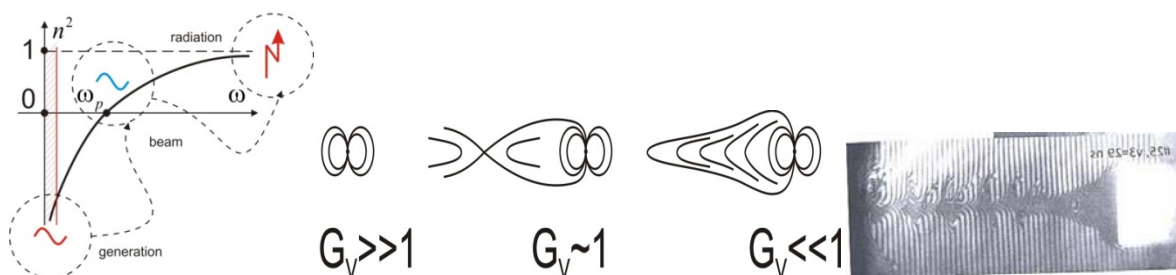
**DOI: 10.31725/0552-5829-2022-77-80**

**1.** Слабозамагниченная горячая бесстолкновительная плазма с индукционными возбуждениями магнитных структур представлена в космосе 3D макроструктурами симметричного и асимметричного видов, и в большей степени в лазерной плазме, где стоит задача УТС магнитного удержания плазмы собственным и внешним магнитным (ВМ) полем **B**.

Здесь развивается электронная кинетическая (не МГД, т.е. основанная на введении функции распределения частиц (ФРЧ)  $f_\alpha$  плазмы с параметрами анизотропии  $\kappa_D \ll 1$  и асимметрии  $\kappa_G \ll 1$  от её формы) аналитическая формулировка задачи о квазистационарной медленной динамике слабозамагниченной горячей бесстолкновительной плазмы, сопряженной с самосогласованным возбуждением и затуханием в ней крупномасштабных размера  $L_G$  магнитных и вихревых электрических полей **A** и токовых структур (ТС) **j**. Процессы «медленные» и «горячие» –  $\omega/kv_e \ll 1$ , т.е. идут в условиях  $v' = \omega/k \ll v_e$ , т.е. характерная скорость  $v'$  от поступательных движений и вращений  $\omega'$  меньше тепловой электронной  $v_e$ , где  $1/\omega$  характерное время,  $1/k \ll 1$  – характерный масштаб. Это позволяет в фазовом пространстве выделять различие в динамике группы «резонансных-ускоряемых» и «нерезонансных диа/пара магнитных» электронов с учетом их инерции. Здесь

нет противоречия включения в рассмотрение сверхзвуковых движений, когда  $\omega/kv_i \gg 1$  [1].

Рассмотрение идет на основе двух видов «динамо» возбуждения пакетов полей и токов  $\mathbf{A}, \mathbf{j}$  из «горячих» индукционных мод плазмы: асимметрией  $\kappa_G \propto v' \neq 0$ , т.е. расширением, потоком, разлетом со средней скоростью  $v' \neq 0$  и аддитивной анизотропией  $\kappa_D = \kappa_\tau + \kappa_w + \kappa_c \neq 0$  с  $\kappa_\tau$  – температурной анизотропией, анизотропией  $\kappa_w$  от взаимопроникновения потоков плазмы или с  $\kappa_c$  от взаимопроникновения потоков электронов и ионов в электрическом токе. В МГД индукционная мода известна как «энтропийная мода», мы рассматриваем её кинетически на основе уравнения Власова (Рис. 1.).



**Рис. 1.** Индукционная мода – вертикальная линия на частоте  $\omega = 0$  – особенность  $n^2 = -\infty$  квадрата показателя преломления в «холодном» МГД описании с  $v_\alpha = 0$ . При «разрешении» в кинетическом рассмотрении в режимах  $\omega/kv_\alpha \ll 1$  возникает полоса частот «поглощения» и «аномальной» непрозрачности. Даны структуры «пересоединения – разрывов» (поток – «омический» проводник  $G_V \ll 1$ ) и «диполизации – сшиваний» (поток – диамагнетик  $G_V \gg 1$ ) в макро магнитосферных структурах космической плазмы, управляемые параметром электромагнитной добротности  $G_V > 0$ . Представлена микро «магнитосфера» с лазерной плазмой, с прорывом ВМ поля.

**2.** Ключевые процессы формирования (магнитное пересоединение, формирование диамагнитного облака – диполизация) происходят в условиях слабой замагниченности по электронам, что дает возможность свободного ускорения групп «резонансных» с индукционным электрическим полем электронов, это обуславливает их основной вклад и в бесстолкновительную диссипацию и во всю динамику. Область, где это происходит, 3D вытянутая в хвост/след «электронная диссипативная структура». Нерезонансные электроны формируют электромагнитную поляризацию (проницаемость), создают «электронное диа/пара магнитное облако» (рис. 1).

Возможность таких горячих режимов связана с высокими «гипер» значением  $\beta_G$  в них плазменного бета  $\beta = \beta_e$  – отношение электронного давления плазмы к магнитному давлению, которое выше критического  $\beta_c$ . Критическое  $\beta_c$  определяется из условия замагниченности кинетических скин-масштабов  $r_G$  и  $r_{DM}$ . При значениях  $\beta$  выше единицы, но меньше критических  $1 < \beta < \beta_c$ , становится существенна замагниченность электронов, но кинетический индукционный процесс сохраняется для обычно-

венной поляризации его моды. При низких значениях бета  $\beta < 1$  плазма «холодная» и рассматривается в рамках МГД, а индукционная мода сильно подавлена.

В «гипер» случае  $\beta_G$  нет возможности свести описание к НЧ МГД модам, т.е. изучать структуры на основе МГД ионных скиновых масштабах, которые входят в описание дисперсии «холодных», невозбуждаемых здесь МГД мод плазмы, масштабы которых оказываются физически малы для их применения при масштабированиях  $L_G$ . Требуется развитие методов «крупномасштабной кинетики» (КМК) на основе введения специфических больших кинетических масштабов в условиях  $\kappa_D, \kappa_G \ll 1$ , которыми и являются масштабы  $r_G^{-2} \propto \kappa_G$  – аномальный скин-слой и  $r_{DM}^{-2} \propto \kappa_D$  – магнитный радиус Дебая. Эти масштабы входят в описание дисперсии индукционной моды и в «дифракционные» масштабы  $L_G$  структур, как их функции по разным зонам  $X$  – дистанций до апертуры источника размера  $r_0$ .

Рассматриваемая здесь КМК противоречит МГД представлениям, развитым применительно к холодным плазмам, где МГД отвечала за КМ описание процессов, а кинетика, на основе уравнений Власова, за мелкомасштабные «структуры – турбулентные шумы» на КМ фоне.

3. Индукционные эффекты относятся в электродинамике к физике «магнитного динамо» – возбуждению магнитных полей поступательными или циклическими движениями проводников тока, что есть асимметрия с  $\kappa_G \propto v' \neq 0$ , вносимая в систему. Это динамо-механизм Фарадея – основа электротехники электрических машин – двигателей или генераторов.

В рамках теории «МГД динамо»  $\kappa_D = 0$ , где возбуждаемые поля индуцируются только «первым» динамо Фарадея при  $\kappa_G \propto v' \neq 0$ . В «кинетическом магнитном динамо», т.е. в рассмотрении на основе уравнения Власова, аддитивно присутствует как асимметрия  $\kappa_G \neq 0$ , так и анизотропия  $\kappa_D \neq 0$ , что возможно только в бесстолкновительной плазме и что вносит второй фактор в возбуждение-генерацию индукционных полей. В КМК динамо Фарадея модифицируется из-за особого рассмотрения «резонансных» электронов («эффект проводимости из-за их ускорения») в фазовом пространстве при асимметрии  $\kappa_G \propto v' \neq 0$ . При отсутствии асимметрии ( $\kappa_G = 0$ ), работает «второе» динамо (неустойчивость) Вейбеля, если анизотропия по отношению к поляризации индукционного поля отрицательна –  $\kappa_D < 0$  и  $r_{DM}^2 < 0$ , – это неустойчивость токов Фуко среды, затухавших при  $\kappa_G = 0$  и  $\kappa_D \geq 0$ .

Действительно, в слабозамагниченном режиме электромагнитные свойства плазмы и, в частности, индукционное поле определяются дисперсионным выражением  $D_T(\mathbf{k}, \omega) = 1 - \omega^2 / (ck)^2 \varepsilon_i(\omega, \mathbf{k})$ , в котором  $\varepsilon_i(\omega, \mathbf{k})$  поперечная диэлектрическая проницаемость плазмы в условиях асимметрии и анизотропии ее ФРЧ. Корни уравнения  $D_T(\mathbf{k}, \omega) = 0$  описывают дисперси-

онные кривые электромагнитных мод плазмы: электромагнитной волны и индукционной моды (рис. 1).

В установившемся индукционном режиме разлетов от поверхности – границы или стороннего источника на ней, в которых  $\omega/kv_\alpha \ll 1$ , анизотропия  $\kappa_D \neq 0$ , а асимметрия  $\kappa_G \neq 0$  пропорциональна средней скорости разлетов  $\mathbf{v}'$ , для черенковского процесса возбуждения  $\omega = \mathbf{k}\mathbf{v}'$  «амплитуды» в волновом пакете  $\mathbf{A}_{\omega,\mathbf{k}}, \mathbf{j}_{\omega,\mathbf{k}} \sim D_T^{-1}(\omega, \mathbf{k})$ . В установившемся стационарном состоянии структуры дисперсионное выражением квадратичного вида [1]

$$D_T(\mathbf{k}, \mathbf{k}\mathbf{v}') = 1 - \frac{v'^2}{c^2} + \frac{1}{k^2 r_{DM}^2} - i \frac{1}{k^2 r_G^2},$$

где  $k_\pm$  корни  $D_T(\mathbf{k}, \mathbf{k}\mathbf{v}') = 0$ , обратная величина которых является гибридными КМК масштабами двух «подструктур». В этом выражении эффекты анизотропии и асимметрии входят аддитивно, через выражения скиновых масштабов  $r_G$  и  $r_{DM}$ , что характеризует и подобие, но и отличия механизмов возбуждения диамагнитных (анизотропия) и резистивных (асимметрия) токовых структур (ТС) в такой кинетической «электромашине».

Соотношение «динамо Фарадея» и «динамо Вейбеля» при описании возбуждения индукционных электромагнитных полей определяется параметром электромагнитной добротности  $G_V = r_G^2 / r_{DM}^2 = \kappa_D / \kappa_G$ , который принимает широкий диапазон значений: от положительных до отрицательных.

4. Параметры анизотропии и асимметрии электронной ФРЧ определяются разного рода моментами ФРЧ плазмы и при формировании структур воздействуют гибридно. В связи с наличием 1D поверхности-границы, 2D мишени, 3D «точки» взрыва: разлет – асимметрия-  $\kappa_G \neq 0$ . Как правило, известные нам исследования предполагают, что «микро» плазменная система находится в режиме «динамо Вейбеля», где  $1/|G_V| \approx 0$ , а фактор асимметрии – потока – «динамо Фарадея», где  $|G_V| \neq 0$  необоснованно игнорируется. Предполагается, что  $|G_V| \neq 1$  режим был на ранней стадии разлета и в стороне. В «макро» плазме чаще напротив  $|G_V| \ll 1$  (Рис.1). Следовательно, в спутниковых и лазерных диагностиках, а также при обработке численных данных РС моделирования КМК структур необходимо «измерять» модуль и знак «управляющего» параметра электромагнитной добротности – «гервь»:  $G_V = r_G^2 / r_{DM}^2 = \kappa_D / \kappa_G$  для определения геометрии и ее перестроек.

Работа выполнена в рамках Государственных заданий № 0030-2021-0002 и № 0030-2021-0015, частично поддержана грантом РФФИ № 20-02-00108 и грантом РНФ 23-22-00405.

#### Литература

1. Gubchenko V.M. // Geomagnetism and Aeronomy, 2020, Vol. 60, No. 7, pp 896-903.