



ДИНАМО ФАРАДЕЯ И ДИНАМО ВЕЙБЕЛЯ В КИНЕТИКЕ РАЗЛЕТА ГОРЯЧЕЙ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ

Секция 3 “Явления в
плотной плазме”.
Рук. П.А. Лобода,
Е.А.Гаврас

В. М. Губченко

*Институт прикладной физики РАН,
Нижний Новгород, РОССИЯ*

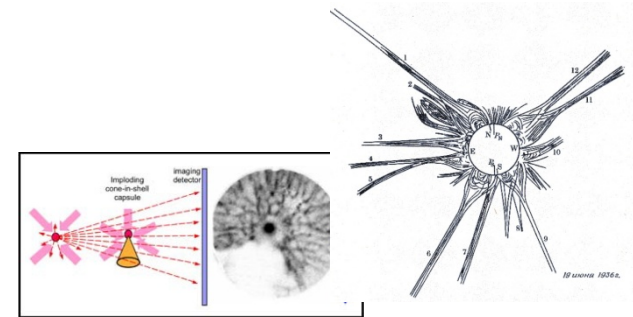
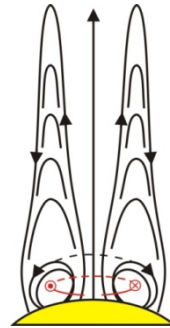
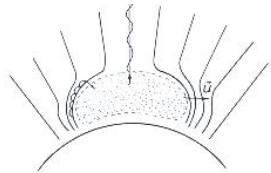
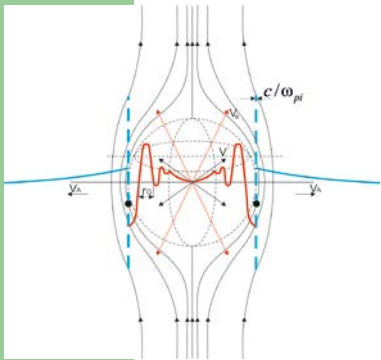
*«Неприменимости ГД к
каким-либо реальным
ситуациям существенно
усложняет жизнь
исследователям.
Кинетику даже при
бесстолкновительном
приближении решать
весьма трудно». К.В.Чукбар*

Май 31 , 2023

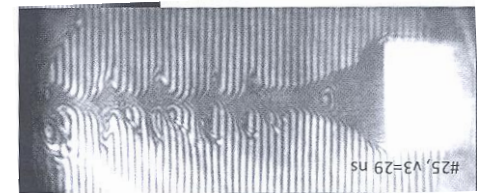
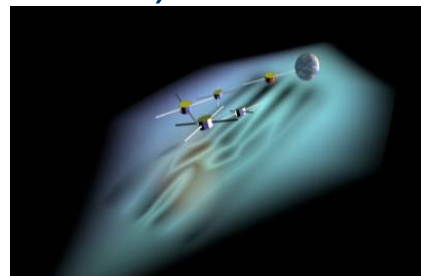


Космическая (Макро) и лазерная (микро) горячая бесстолкновительная плазмы разлетов, расширений, потоков. 3D , 2D , 1D TC – индукционные токовые системы вблизи границ с “апертурой”, на которой задано магнитное поле или намагниченность.

- Диамагнитн. (симм. и асимметрия разлета) микро и макро



- Область диполизации и магнитного пересоединения макро и микро (асимметрия разлета)



Методы в ИПФ РАН: 2D-PIC, эксп. «Крот» - «Перл» и аналитика.

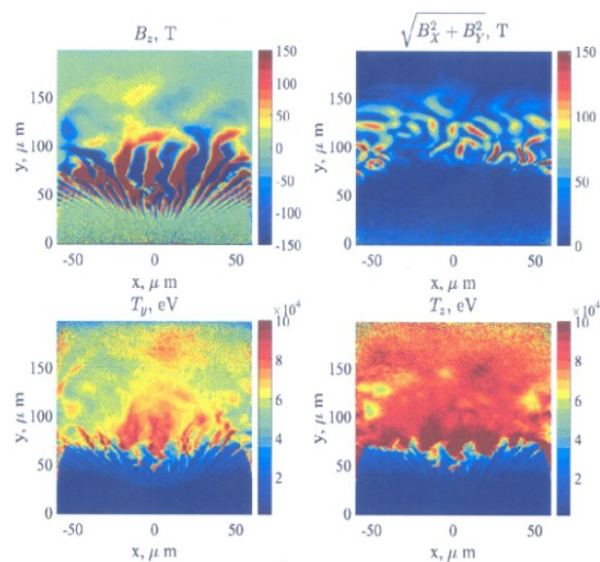


Figure 1. Structure of the longitudinal, B_z , and transverse, $B_\perp = (B_x^2 + B_y^2)^{1/2}$, magnetic fields in Tesla (upper left and right) as well as the effective temperatures T_y and T_z in eV (lower left and right) at $t = 3.6$ ps after the start of the injection of hot electrons (which lasted for 2 ps) from the target surface into the background plasma with an inhomogeneity scale $L = 32 \mu\text{m}$ at an injection ratio $n_0^*/N_0 = 0.03$ of the densities of hot and background electrons for a semicylindrical form of the hot-electron spot elongated along the surface of the plasma boundary where the cylindrical axis z is lying.

18, A81 (2021)

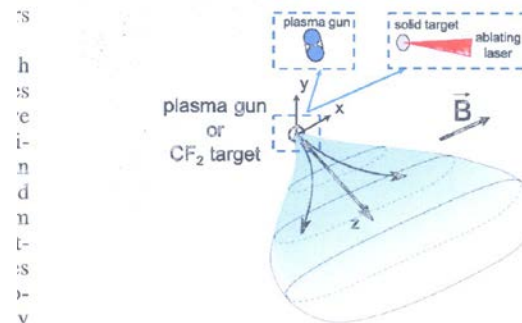
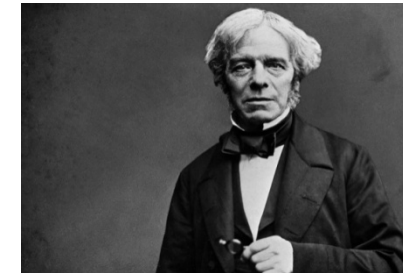
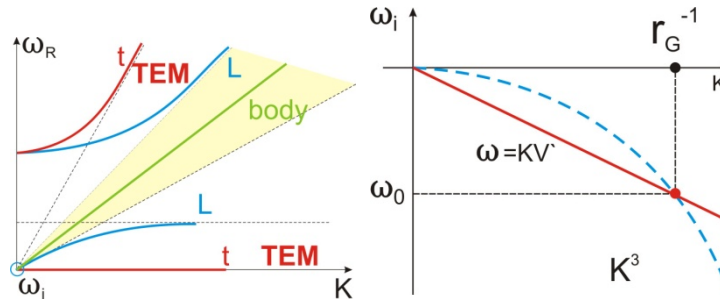
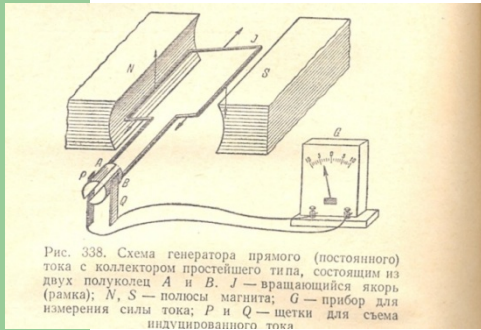


Fig. 2. Schematic view of the experimental set-up. A plasma is generated from a plasma gun or a laser-ablated Teflon (CF_2) target. It expands into the vacuum (along z as the main expansion axis), which is embedded in a strong external magnetic field, orientated along x . Because of the imposed magnetization, the plasma is progressively flattened out along y , while it can flow along the magnetic field line (i.e. along x). Hence, it progressively morphs into a 'pancake', as depicted.

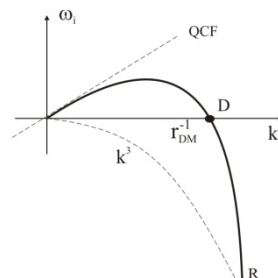
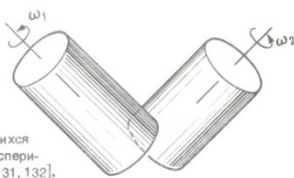
Токи Фуко –индукционная мода в плазме. Динамо Фарадея и динамо Вейбеля в горячей кинетике. Сила Ампера + диамагнитное удержание и парамагнитное выталкивание плазмы в горячей кинетике. Параметр их соотношения G .

- Генератор тока Фарадея на **асимметрии**: статор, ротор, якорь, коллектор, щетки, магнитное поле на границах, поступательное или вращательное движение металла – рамки. ТС ограничена рамкой!



- Генератор тока Вейбеля из-за **анизотропии** в системе, двигатель удержание или выталкивание?

Рис. 6.5. Конфигурация из двух вращающихся цилиндров, рассмотренная в экспериментах Лоуэса и Уилкинсона [131, 132].



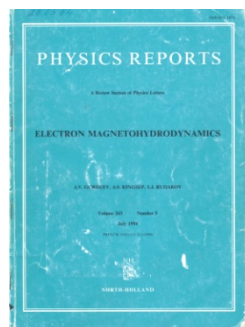
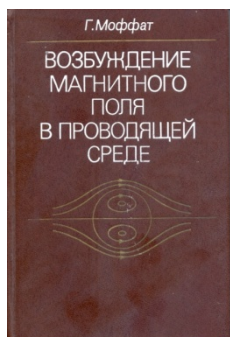
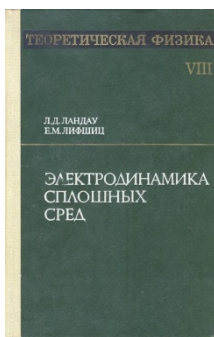
$$\mathbf{f} = \frac{1}{c} [\mathbf{j} \times \mathbf{B}] + \frac{\mu - 1}{8\pi\mu} \nabla B^2$$

$$D_T(\mathbf{k}, \omega) = 1 - \frac{\omega^2}{(ck)^2} \varepsilon_t(\omega, \mathbf{k}) = 0.$$

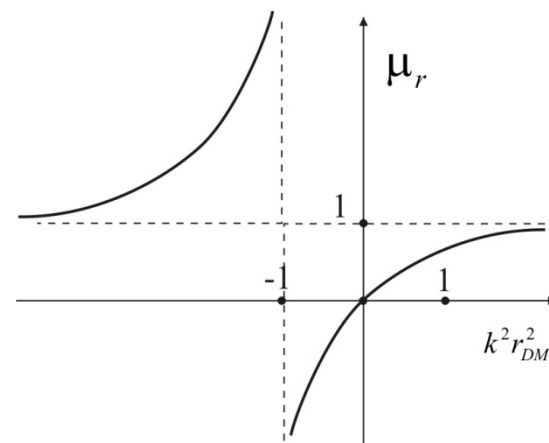


Ламинарное динамо в электронной МГД без диссипации и нет магнитной проницаемости, а в горячей физической кинетике дает и диссипацию-ток проводимость и магнитную проницаемость- ток намагничивания –гибрид асимметрии и анизотропии?

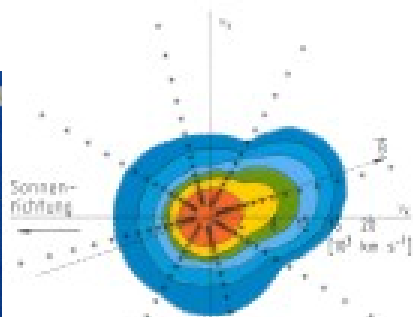
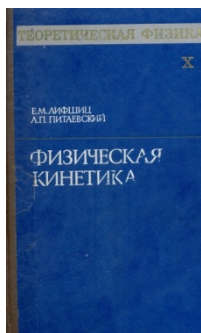
- Руководства



$$1 - \frac{1}{\mu(\omega)} = \frac{\omega^2}{c^2} \lim_{k \rightarrow 0} \frac{\varepsilon_t(\omega, \mathbf{k}) - \varepsilon_l(\omega, \mathbf{k})}{k^2}$$



$$\omega = kv$$



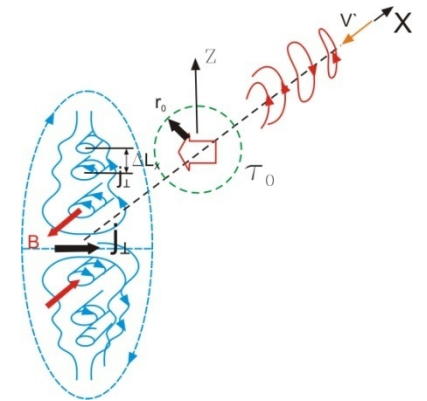
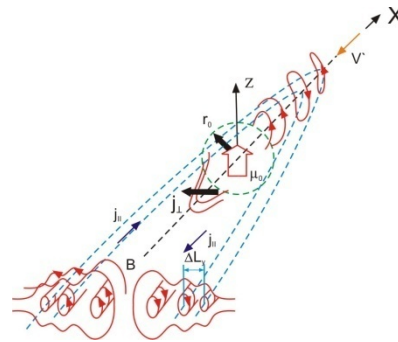
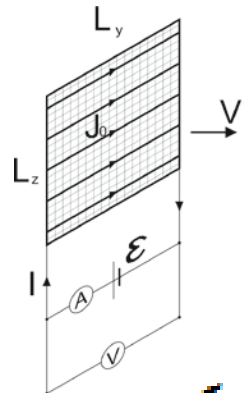
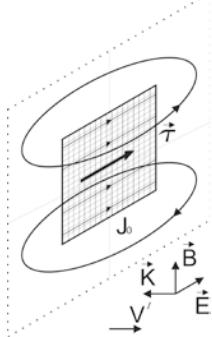
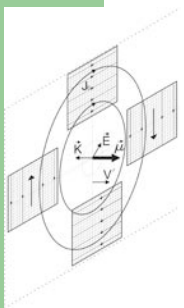
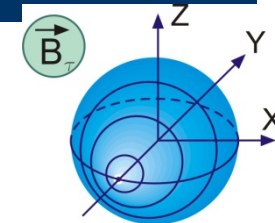
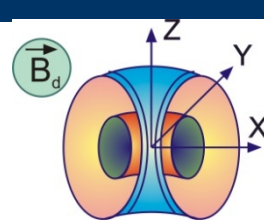
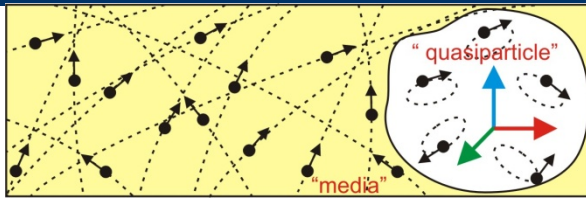
$$\mathbf{A}_{\omega, \mathbf{k}} \mathbf{j}_{\omega, \mathbf{k}} \sim D_T^{-1}(\omega, \mathbf{k})$$

$$\frac{\omega - \omega_0}{|k_z| v_\alpha} \gg 1 \quad \text{Im} \varepsilon(\omega, \vec{k}) = 0$$

$$\frac{\omega - \omega_0}{|k_z| v_\alpha} \ll 1 \quad \text{Im} \varepsilon(\omega, \vec{k}) \neq 0$$

«Неприменимости ГД к каким-либо реальным ситуациям существенно усложняет жизнь исследователям. Кинетику даже при бесстолкновительном приближении решать весьма трудно». К.В.Чукбар

Разлет плазмы относительно границ или объемов с 1D-3D источниками тока - намагниченностями или это же - движение границы относительно плазмы с током на апертуре. Вынужденные аналитические решения и переходные решения установления структур .

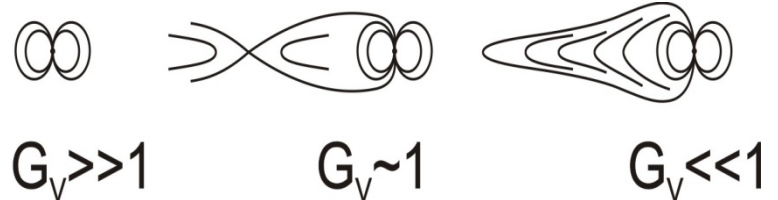


$r = k^{-1}(r_0, X, r_{disp})$ – масштабы структур

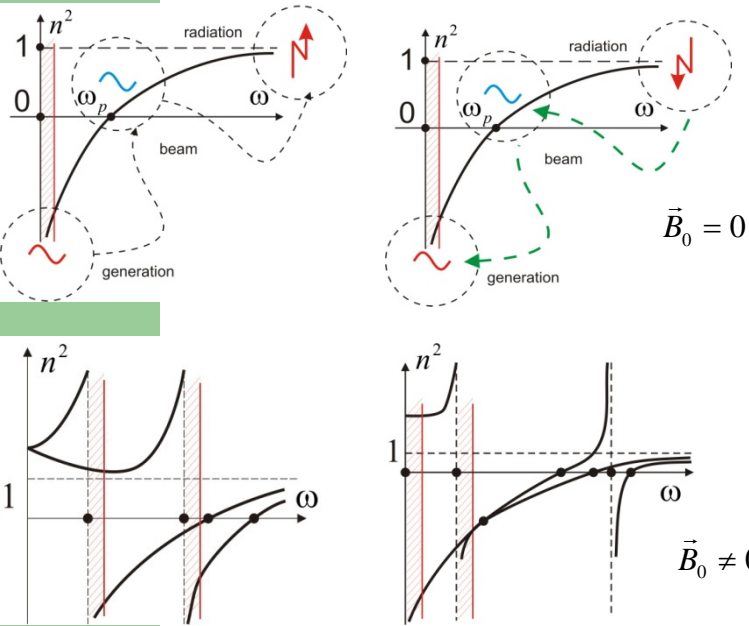
r_0 – апертура

X – расстояние до источника

r_{disp} – масштабы дисперсии



Где энтропийная мода в кинетике. Electromagnetic dissipation of the hot collisionless plasma is located on the “cold” ideal (no dissipation) dispersion curves? Plasma resonances are on frequencies where squared refractive index is infinite (with + and -). We get transparent (overcritical with +) and nontransparent (subcritical with – “dark”) e.m. processes. Reconnection e.m. fields are in the subcritical regime and are located in the resonances, inside plasma absorption (e.m. dissipation as acceleration of electrons) line which is studied via Vlasov kinetics (hot plasma PDF) . We obtain magnetic reconnection in the zero resonance Cherenkov and cyclotron (or hybrid) lines. We get “new” plasma e.m. dispersion scales and “new” dimensionless parameters. Radiation from and penetration into magnetic reconnection band by e.m. wave provided by energetic electron “beam”.



$$\varepsilon_{ij}(\omega, \vec{k}) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad \varepsilon_{ij}(\omega, \vec{k}) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

$$\omega_0 = 0 \quad \frac{\omega - \omega_0}{|k_z| v_\alpha} \gg 1 \quad \text{Im} \varepsilon(\omega, \vec{k}) = 0 \quad \frac{\omega - \omega_0}{|k_z| v_\alpha} \ll 1 \quad \text{Im} \varepsilon(\omega, \vec{k}) \neq 0$$

$$\omega = \vec{k} \vec{v}' \rightarrow v' / v_e \ll 1 \quad D_T(\mathbf{k}, \omega) = 1 - \frac{\omega^2}{(ck)^2} \varepsilon_t(\omega, \mathbf{k}) = 0. \quad D_{L1} = \varepsilon_t(\omega, \mathbf{k}) = 0$$

$$D_T(\omega, \vec{k}) = 1 - \frac{1}{k^2 \lambda^2} + \frac{1}{k^4 \lambda^2 r_{DE}^2} - \frac{1}{k^2 r_{DM}^2} - \frac{i \pi^{1/2}}{2^{1/2}} \Sigma_\alpha \frac{(\kappa_{D\alpha} + 1) \omega_{p\alpha}^2 \omega}{c^2 v_\alpha |k|^3} \quad \lambda = c / \omega$$

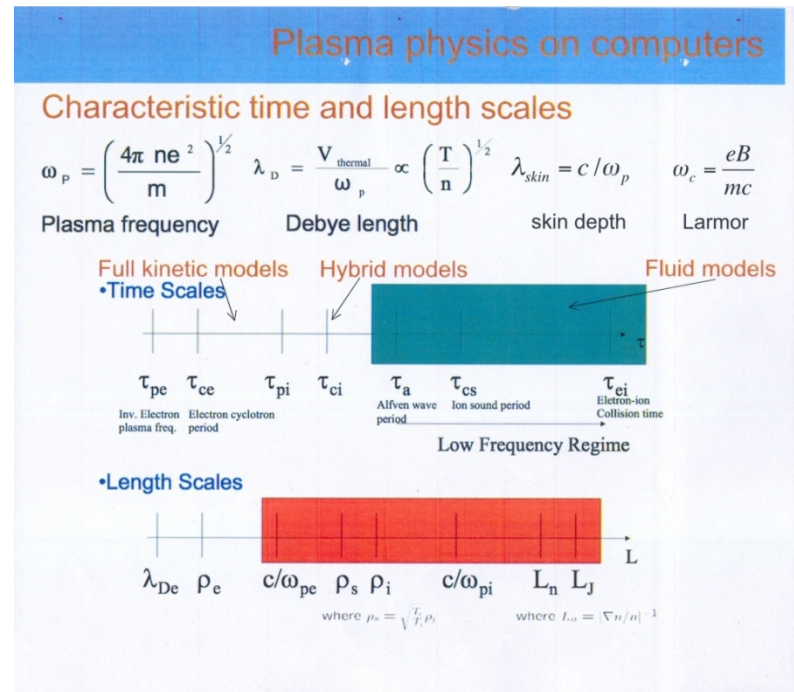
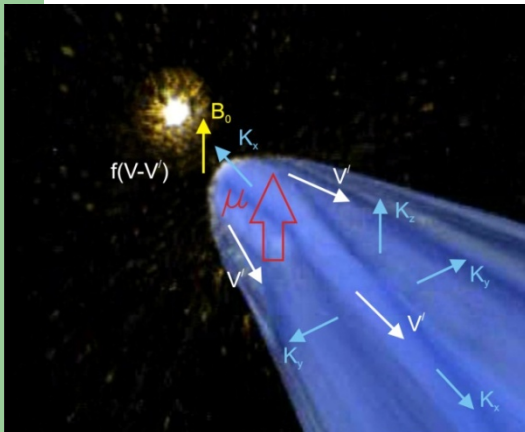
$$D_T(\vec{k} \vec{v}', \vec{k}) = 1 - \frac{v'^2}{c^2} + \frac{1}{k^2 r_{DM}^2} - i \frac{1}{k^2 r_G^2}$$

$$\frac{\partial f_{re}}{\partial t} + \left(\vec{V}_\perp \frac{\partial f_{re}}{\partial \vec{r}_\perp} \right) - \frac{e}{m_e} \left(-\frac{\partial \phi}{\partial r_\perp} - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \frac{1}{c} [\vec{V}, \nabla \times \vec{A}], \frac{\partial f_{re}}{\partial \vec{V}} \right) = 0 \quad G_V = G_{\vec{k} \vec{v}', \vec{k}} = r_G'^2 / r_{DM}'^2$$

Дисперсионные масштабы горячей бесстолкновительной плазмы: МГД, электронное МГД и кинетические, характеризуемые функциями распределения частиц (ФРЧ=PDF=VDF) по скоростям: анизотропия и асимметрия (LSK?).

$$\omega_0 = k_0 v' = \omega(k_0)$$

$$r_{disp} = k_0^{-1}$$



$$D_T(\mathbf{k}, k_x v') = 1 - \frac{i}{k^2 r_G^2} \frac{k_x v'}{|\mathbf{k}| |\mathbf{v}'|} + \frac{1}{k^2 r_{DM}^2} \frac{k_x^2}{|\mathbf{k}|^2} = 1 - \frac{i}{\xi_x^2} \frac{\xi_x v'}{|\xi_x| |\mathbf{v}'|} + \frac{G_V}{\xi_x^2} \frac{\xi_x^2}{|\xi|^2}$$

“Thin” (anomalous skin) and “thick” (magnetic Debye) scales for LSK modeling (Крупномасштабная кинетика незамагниченной плазмы)

$$r_{c\alpha} \gg r_G, r_{DM} \quad (k_{\perp} r_{c\alpha} \gg 1)$$

Anomalous convective skin scale

$$r_G^{-2} = \sum_{\alpha} \frac{\omega_{p\alpha}^2}{c^2} |v'| \pi F_{\alpha 0} \left(\frac{k_x v'}{|\vec{k}|} \right) = \sum_{\alpha} \frac{\omega_{p\alpha}^2}{c^2} \kappa_{G\alpha}$$

“Momentum” Faradey anisotropy

$$|v'| \pi F_{\alpha 0} \left(\frac{k_x v'}{|\mathbf{k}|} \right) = \kappa_{G\alpha}$$

Diamagnetic Debye scale

$$r_{DM}^{-2} = \sum_{\alpha} \frac{\omega_{p\alpha}^2}{c^2} v'^2 2 \int_{-\infty}^{\infty} du \frac{\partial F_{\alpha 0}}{\partial u^2} = \sum_{\alpha} \frac{\omega_{p\alpha}^2}{c^2} \kappa_{D\alpha}$$

“Energy” Wiebel anisotropy

$$v'^2 2 \int_{-\infty}^{\infty} du \frac{\partial F_{\alpha 0}}{\partial u^2} = \kappa_{D\alpha}$$

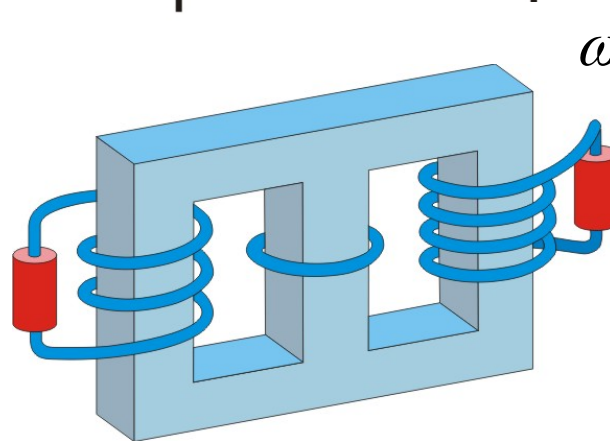
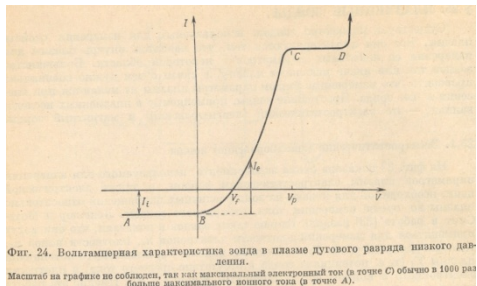
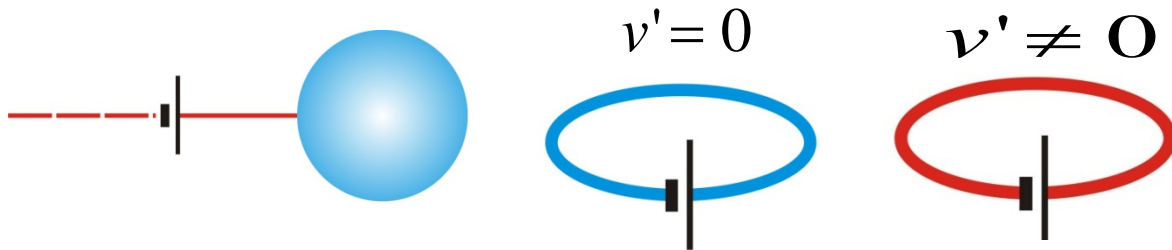
The LSK limit appeared when: $\kappa_D, \kappa_G \ll 1$

Maxwellian flow: $\kappa_{D\alpha} = v'^2 / v_{\alpha}^2 \ll 1$ $\kappa_{G\alpha} = v' / v_{\alpha} \ll 1$

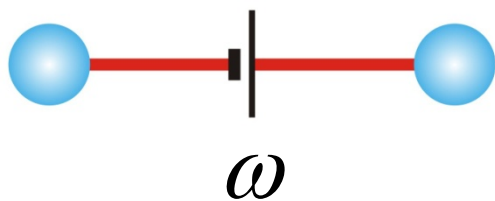
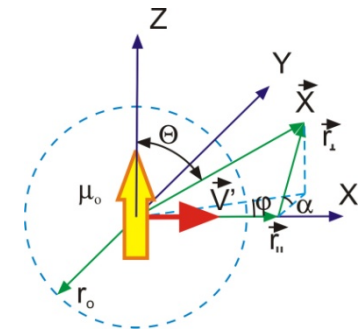
$$G_{\omega, \mathbf{k}} = \frac{j_d}{j_r} = \frac{\text{Re } \varepsilon_t(\omega, \mathbf{k})}{\text{Im } \varepsilon_t(\omega, \mathbf{k})}$$

$$G_V = \text{ctg } \gamma_V = \frac{r_G^2}{r_{DM}^2} = \frac{\kappa_D}{\kappa_G}$$

Импедансный датчик по измерению G. Известны электрические зонды (монополи) и вибраторы (диполи). Вольт-амперные характеристики С зонда. Магнитная рамка как трансформатор или генератор постоянного тока (кинетический аналог МГД генератора), вторичная обмотка и нагрузка которого плазменный поток. Измеряя «сопротивление излучения R и ее индуктивность L» мы измеряем безразмерные параметры плазмы – рамка магнитный зонд.



$$\omega = \vec{k} \vec{v}'$$

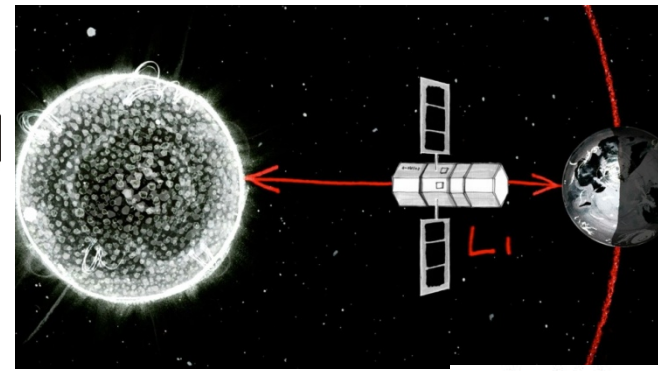
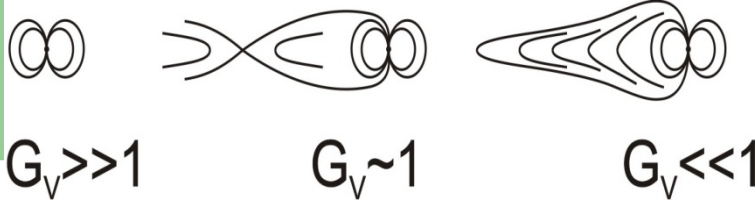


$$Z(R_{\Sigma}, L, C)$$

$$R_{\Sigma}(Re_m, G_V) = ??? \neq R_{vac} = 0$$

$$L_{vac} \neq L(Re_m, G) = ?$$

Z(R_Σ, L, C)



Импедансный датчик по измерению G у солнечного ветра в точке Лагранжа или измерения G при разлете лазерной плазмы в ФВПЭ

$$D_T(\mathbf{k}, k_x v') = 1 - \frac{i k_x v'}{k^2 r_G^2 |\mathbf{k}| |v'|} + \frac{1}{k^2 r_{DM}^2} \frac{k_x^2}{|\mathbf{k}|^2} = 1 - \frac{i \xi_x v'}{\xi_x^2 |\xi_x| |v'|} + \frac{G_V \xi_x^2}{\xi_x^2 |\xi|^2}$$

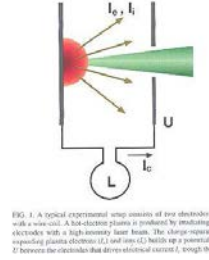
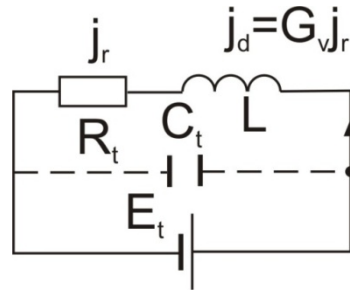
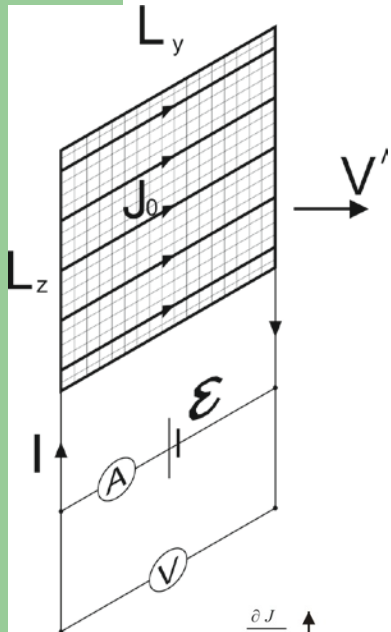


FIG. 1. A typical experimental setup consists of four electrodes connected with a wire coil. A bidirectional plasma is produced by radiating one of the electrodes with a high-intensity laser beam. The charge separation in the expanding plasma electrons (I2) and ions (I3) holds up a potential difference U between the electrodes that drives electrical current I0 through the coil.



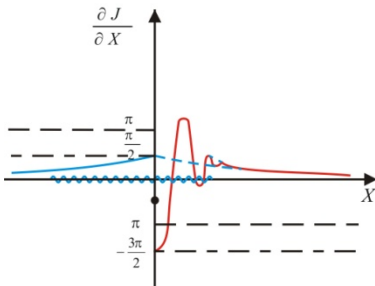
$$\varphi_V = \pi/2 - \gamma_V = \tan^{-1} G_V$$

$$G_V = G_{\vec{k}\vec{v}, \vec{k}} = r_G'^2 / r_{DM}'^2 = \kappa_D / \kappa_G$$

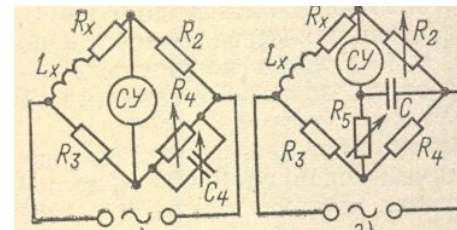
$$R_\Sigma = 2 \frac{v L_y}{c^2 L_z} \left(\varphi_V + \frac{\pi}{2} \right) = 2 \frac{1}{c} \frac{v L_y}{L_z} \left(\varphi_V + \frac{\pi}{2} \right)$$

$$\frac{1}{c} \text{ГГСЭ} = 30 \text{ Ом}$$

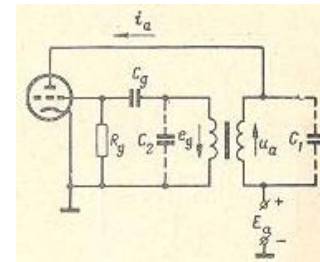
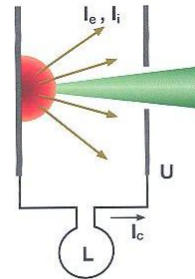
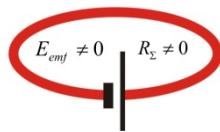
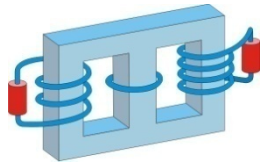
$$C = 2 \frac{L_y L_z}{r_{DE}}$$



$$L = r_G \frac{L_y}{L_z} \frac{2\pi}{\sqrt{2(G_V + \sqrt{1 + G_V^2})}} = r_G \frac{L_y}{L_z} \sqrt{\frac{\cos \varphi_V}{\sin \varphi_V + 1}}$$



Z-описание-ИМПЕДАНС. The integral description by the RCL elements (provided by the 3D kinetic solutions for magnetic dipole component here) and by “triode” tube element of the hot plasma dynamic expansion (flow) under action from the ambipolar and quasistationary electromagnetic fields. There are three governing dimensionless e.m. parameters plus kinetic magnetic Reynolds number. Asymmetric transformer by second loops and by core illustrates plasma flow, the first loop is a coil providing dipole and toroidal magnetizations (laser target or magnetoactive region) . The “grid” circuit models magnetic field action on flow. The “anode” circuit models ambipolar plasma expansion from the “cathode” (laser target) to the virtual “anode”. The triode has “magnetron” key type “Volt/Ampere” characteristic where magnetic “grid” provides integral Ampere force drag action.



$$\varphi = E_a - \Delta\varphi \quad \Delta\varphi = E_{emf}$$

$$\omega = \vec{k}\vec{v}$$

$$E_{emf} = R_{\Sigma}I + \frac{L}{c^2} \frac{dI}{dt} + \frac{I^2}{2c^2} \frac{dL}{dt}$$

$$RI \ll \left(\frac{L}{c^2} \frac{dI}{dt} + \frac{I^2}{2c^2} \frac{dL}{dt} \right)$$

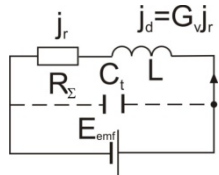


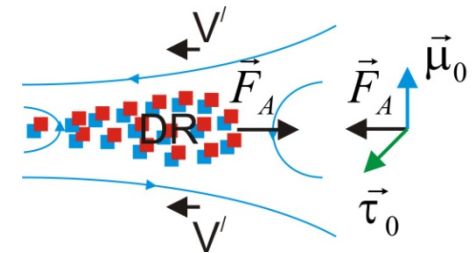
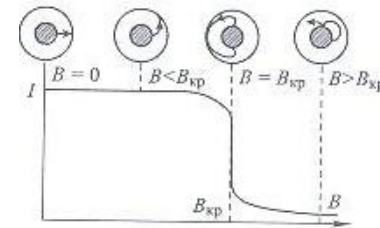
FIG. 1. A typical experimental setup consists of two electrodes connected with a wire-coil. A hot-electron plasma is produced by irradiating one of the electrodes with a high-intensity laser beam. The charge-separation in the expanding plasma electrons (I_e) and ions (I_i) builds up a potential difference U between the electrodes that drives electrical current I_c through the coil L .

$$L = L_v + 2L_{12} + L_{22}$$

$$\tau_L = L / Rc^2$$

$$\tau_C = RC$$

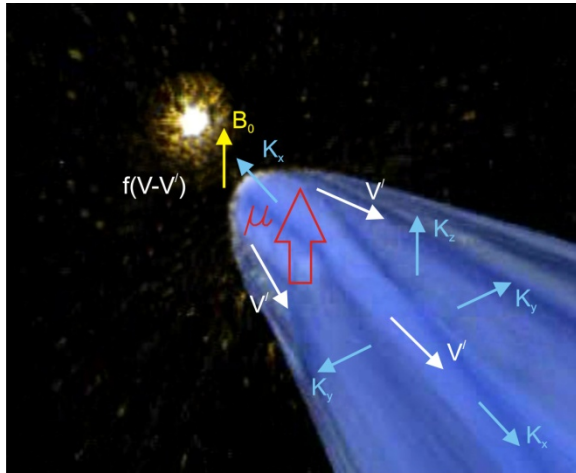
$$T_{LC} = 2\pi\sqrt{\tau_L\tau_C} = 2\pi\sqrt{LC} / c$$



Выводы

- Космическая (Макро) и лазерная (микро) горячая бесстолкновительная плазмы разлетов от границ формирует ТС – индукционные токовые системы.
- Параметры асимметрии и анизотропии электронной ФРЧ определяются разными моментами PDF плазмы.
- При формировании структур воздействуют гибридно через «динамо Фарадея» и «динамо Вейбеля».
- Соотношение «динамо Фарадея» и «динамо Вейбеля» при описании возбуждения индукционных ТС определяется управляющим параметром электромагнитной добротности.
- В спутниковых и лазерных диагностиках, а также при обработке численных данных PIC моделирования КМК структур необходимо «измерять» модуль и знак «управляющего» параметра электромагнитной добротности G для определения геометрии и перестроек ТС.

Магнитосфера- «волновой» пакет из квазипродольных и квазиперечных ЭМ индукционных и волновых возмущений. Диссипативные «хвост и магнитопауза», как эффекты **пространственной дисперсии** в горячих потоках бесстолкновительного солнечного ветра с заданной ФРЧ



$$\varepsilon_{ij}(\omega, \vec{k}) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_{ij}(\omega, \vec{k}) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

$$\varepsilon_{ij}(\omega, \vec{k}) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & 0 \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

$$D_{ij} = \delta_{ij} - \frac{k_i k_j}{k^2} - \frac{\omega^2}{k^2 c^2} \varepsilon_{ij}(\omega, \vec{k}) \quad \varepsilon_{ij}(\omega, \vec{k}) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ 0 & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

$$k^2 D_{ij} E_{\vec{k}j} = 4\pi \frac{i\omega}{c^2} j_{i\vec{k}}$$

$$E_{\vec{k}i}(\omega, \vec{k}) = \frac{\Delta_i(\omega, \vec{k})}{\text{Det}(\omega, \vec{k})}$$

$$\Delta_i(\omega, \vec{k})$$

$$\text{Det}(\omega, \vec{k}) = \Lambda(\omega, \vec{k}) = |D_{ik}(\omega, \vec{k})| = |\Lambda_{ij} / k^2|$$

Фурье образы установившихся полей в задаче разлета.
 Числитель определяется конкретным источником на апертуре.
 Знаменатель образован слагаемыми, отвечающими за динамо
 Фарадея – резистивная компонента в ТС и динамо Вейбеля -ТС
 намагниченности.

$$k^2 D_{ij} E_{\vec{k}j} = 4\pi \frac{i\omega}{c^2} j_{i\vec{k}source} \quad \mathbf{A}_{\omega, \mathbf{k}} \mathbf{j}_{\omega, \mathbf{k}} \sim D_T^{-1}(\omega, \mathbf{k})$$

$$D_{ij} = \delta_{ij} - \frac{k_i k_j}{k^2} - \frac{\omega^2}{k^2 c^2} \varepsilon_{ij}(\omega, \vec{k})$$

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

$$E_{\vec{k}i}(\omega, \vec{k}) = \frac{\Delta_i(\omega, \vec{k})}{\text{Det}(\omega, \vec{k})}$$

$$G_V = G_{\vec{k}\vec{v}', \vec{k}} = r_G'^2 / r_{DM}'^2 = \mathbf{K}_D / \mathbf{K}_G$$

$$\text{Det}(\omega, \vec{k}) = \Lambda(\omega, \vec{k}) = |D_{ik}(\omega, \vec{k})| = |\Lambda_{ij} / k^2|$$

$$D_T(\mathbf{k}, \mathbf{k}\mathbf{v}') = 0$$

$$\Delta_i(\omega, \vec{k})$$

k_{\pm} корни приведенного уравнения дают гибридные масштабы структур, образованных уже из двух скиновых масштабов.

- Разлет плазмы от границ – асимметрия – поступательное движение и далее формирование анизотропии(?). Что первично?
- Границы – сфера, цилиндр, плоскость-лайнер. Условия на частицы.
- Магнитные поля на границе «апертура = магнитоактивная область= лазерное пятно. Окружены плазмой конечных или бесконечных размеров.
- Микро- лазерная плазма, Макро- космическая плазма.
- «Магнитное динамо» – формирование токовых структур (ТС) индукционного тока. «Энтропийная волна» – мода индукционного тока Фуко.
- Динамо (ламинарное) Фарадея -1833 – индукционные ТС в металлах.
- Электрические машины – генераторы и электродвигатели.
- МГД Плазма - МГД генератор и двигатель - асимметрия – поступательное движение плазмы.
- Горячая слабозамагниченная бесстолкновительная плазма. Специфика PDF (асимметрия + анизотропия). Где динамо?
- Магнитное динамо Фарадея (1833) -асимметрия, магнитное динамо Вейбеля (1959) -анизотропия(?). Где это в уравнениях Власова и Максвелла?

Свод безразмерных из размерных электромагнитных параметров свойств потока из МГД и из кинетического рассмотрения, связанные с формой ФРЧ

- Сжимаемость потока по отношению к волновым продольным возмущениям – число Маха M
- Поток по отношению к поперечным нераспространяющимся (ЭМ) полям проводящий металл или диамагнетик? ЭМ число G_V , определяется формой ФРЧ $F(v')$.
- Замагниченность: обобщение M на магнитозвуковое число Маха M_s .
- Замагниченность: возникает э.м. число Альвена M_A и электромагнитная альвеновская волна
- Замагниченность и обобщение диссипативного G_V на диссипативное число $\Gamma_B = G/M_A$ при изучении процессов в линиях.