ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КОРОНЕ И ИМПЕДАНС ОБЛАСТИ СТАЦИОНАРНОГО МАГНИТНОГО ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ

Губченко В.М.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

THE SOURCE OF ELECTROMAGNETIC EMISSION IN THE CORONA AND IMPEDANCE OF THE MAGNETIC RECONNECTION REGION

Gubchenko V.M.

Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

Efficiency of the electromagnetic (e.m.) emission with power $P_{rad} < P_{acc}$ is estimated via impedance as $R_{acc} = \text{Re } Z$ of the magnetoactive region: a coil with current I inductively loaded by hot collisionless plasma flow. Here $P_{acc} = I^2 R_{acc}$ - power of electrons acceleration/magnetic reconnection process. Plasma flow characterized by the asymmetric and anisotropic particle velocity distribution function (PDF). The impedance Z is a measure of the plasma flow drag.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-127-130

1. Наблюдается физическое подобие между медленными индуктивными механизмами с характерным временем t , работающими с мощностью P на низких субкритических частотах $\omega \approx 1/t \ll \omega_p$ (ω_p – плазменная частота), формирующими асимметричные астрофизические крупномасштабные $r \approx 1/k$ (k – волновое число) магнитные структуры (магнитные хвосты, корональные стримеры, джеты-выкрутасы), являющиеся источниками электромагнитного излучения, и механизмами формирования мелко-масштабных магнитных структур и их излучения в лазерной плазме (рис. 1.). Излучение происходит от ускоренных электронов на сверхкритических частотах $\omega_p \ll \omega$ на волнах с $\lambda_{rad} \ll r$ с мощностью P_{rad} и к.п.д. P_{rad} / P .

Импедансное представление позволяет проводить сравнения по импедансам $Z(R_\Sigma, L, C)$, когда нормируются мощности потерь $P = I^2 R_\Sigma$ на силу тока I в источниках разномасштабных магнитных структур лазерной, солнечно-земной и астрофизической плазм, разделяя также «ускорительные $R_\Sigma = R_{acc}$ » и «радиационные $R_\Sigma = R_{rad}$ » каскады нагрузок в них. Тогда к.п.д. $R_{rad} / R_{acc} < 1$ и вычисление R_{acc} является верхней оценкой эффективности излучателя в магнитной структуре пересоединения абсолютно и относительно (рис. 2.).

2. Структуры возбуждаются горячим бесстолкновительным потоком плазмы $\vec{v} = v' \vec{x}_0$, согласованны с эффективным амбиполярным потенциалом

$\varphi = E_a - \Delta\varphi$ разлета, где E_a электростатический потенциал поля, а $\Delta\varphi = E_{emf}$ - э.д.с. электромагнитной индукции.

Рис. 1. Магнитное пересоединение (поток-проводник $G_V \ll 1$) и диполизации (поток-диамагнетик $G_V \gg 1$) в магнитосферных структурах солнечно-земной и лазерной физики, управляемые параметром электромагнитной добротности G_V .

Бесстолкновительная плазма задана функцией распределения частиц (ФРЧ электронов и ионов), форма ФРЧ $f_a(\vec{v} - \vec{v}')$ характеризуется двумя параметрами анизотропии κ_D и асимметрии κ_G и в соответствии с ними плазма характеризуется диамагнитным r_{DM} и резистивным r_G масштабами скинирования. Их отношение $G_V = r_G^2 / r_{DM}^2 = \kappa_D / \kappa_G$ - кинетический параметр электромагнитной добротности потока. Относительное движение (асимметрия ФРЧ) плазмы и намагниченности $\vec{\mu}(\vec{X})$ со скоростью $\vec{v}'$ приводит к появлению спектра частот $\omega = \vec{k}\vec{v}'$ возбуждения в системе отсчета $\vec{x} = \vec{v}'t + \vec{X}$ в горячем режиме $v' < v_e = (T_e / m_e)^{1/2}$, индукционно возбуждающих стационарный волновой пакет, составленный из апериодических индукционных полей $\approx \exp(i\vec{k}\vec{x} - i\omega t)$ с амплитудами вектор-потенциала $\vec{A}_{\omega, \vec{k}}$. При изменении параметров потока во времени $\omega \neq \vec{k}\vec{v}'$ формируется нестационарная структура.

Рис. 2. Три характерные магнитоактивные области, образованные из тороидальной и магнитодипольной намагниченностей. В шлемовидной (перевернутая Y) конфигурации X точка – область магнитного пересоединения – источник излучения. В центре показатель преломления n^2 холодной электромагнитной моды. Магнитное пересоединение у линии поглощения/ускорения $\omega_0 = 0$ в диапазоне за критичности, излучение в диапазоне сверхкритичности. Справа эллипс поляризации магнитостатического поля структуры.

3. Заданная намагниченность $\vec{\mu}(\vec{X})$ с током I рассматривается как квазичастица масштаба r_0 . Создается сторонним процессом магнитного динамо с ЭДС E_{emf} , поддерживающей заданный ток в контуре с $I = \sqrt{I_d^2 + I_\tau^2}$,

так что $E_{emf} / I = R_{acc}$ (рис. 3.). Характеристикой магнитоактивной области являются ее магнитные моменты $\vec{\mu}_0$ и $\vec{\tau}_0$ и их взаимная ориентация к скорости $\vec{v}'$ отражают распределение в контуре интегральных кольцевых I_d и тороидальных I_τ токов по площади S и по объему V в области радиального масштаба r_0 . В солнечно-земной плазме $\Gamma_{\tau\mu} = I_\tau / I_\mu \ll 1$, в лазерной $\Gamma_{\tau\mu} \gg 1$ (рис. 2).

Рис. 3. Схематическое электротехническое (импедансное) представление магнитной структуры в виде трансформатора с контурами, контура самоиндукции с током I и электротехнической схемы.

4. Мощность индукционного процесса выражается как $P = I^2 R$, где сопротивление $R = R_{acc}$ активная часть импеданса Z , характеризует диссипацию энергии в бесстолкновительной структуре – ускорение группы «резонансных» частиц. Посредством R_{acc} характеризуется интегрально процесс магнитного пересоединения, формирующий вытянутую в 3D хвост магнитную структуру. Реактивная часть L и C импеданса Z характеризует энергию магнитного и электростатического поля вблизи источника намагниченности, обусловленную вкладом диамагнитных эффектов поляризации от тока «нерезонансных» частиц. Импеданс $Z(G_V, \Gamma_{\tau\mu}, Re_m)$ интегрально характеризует электромагнитные свойства плазмы параметрами добротности – G_V , конфигурации контура тока I намагниченности – $\Gamma_{\tau\mu}$ и его размеров магнитным числом Рейнольдса – $Re_m = r_0 / r_G$. Значения L, C, R связаны с характерными временами осцилляций T и релаксации $\tau = \tau_{L,C}$ магнитной структуры. Период осцилляций $T = 2\pi\sqrt{LC}$. Времена релаксации $\tau_C = RC$ и $\tau_L = L / R$, тогда $T^2 = (2\pi)^2 \tau_C \tau_L$. На основе Z вводится э.д.с. самоиндукции $E_{emf} = R_{acc} I + \frac{LI}{c^2} \frac{dI}{dt} + \frac{I^2}{2c^2} \frac{dL}{dt}$ (рис. 3.), показывающая тормозящее воздействие на амбиполярное расширение плазмы и на процесс ускорения протонов плазмы в поле ϕ . Возможно ускоряющее воздействие при смене знака E_{emf} в импульсных процессах и при изменении знаков анизотропии ($R_{acc} < 0$). Активная часть импеданса R_{acc} определяет э.д.с. магнитных шумов.

5. Интегральное (по координатам $\vec{X}$) описание позволяет представить 3D структуру динамической «точкой»-«электротехнической схемой». Магнитоактивная область и амбиполярный разлет плазмы, описывается схематически (интегрально), двумя контурами токов, индукционно связанных посредством двух элементов: «триод» и «трансформатор» (рис. 3.).

«Анодный контур» соответствует разлету плазмы, а «сеточный контур» магнитоактивной области. «Сетка» показывает «запирающее» воздействие поперечного магнитного поля $\vec{B}(\vec{x}, t)_n \perp \vec{v}'$ на разлет подобно магнетронному. «Трансформатор» и его «сердечник» характеризуют магнитную проницаемость $\mu_{\omega, \vec{k}}$ потока и обратное активное и реактивное воздействие потока на магнитоактивную область, посредством R_{acc} . Сеточный контур с током I характеризуется импедансом $Z(L, C, R_{acc})$. При определенных значениях Z – положительной обратной связи, структура становится генератором гармонических и импульсных полей.

6. Амплитуды вектор-потенциала полей $\vec{A}_{\omega, \vec{k}} = \vec{A}_{\mu, \vec{k}} + \vec{A}_{\tau, \vec{k}}$, возбуждаемых в анизотропной плазме при появлении воздействия на частотах $\omega = \vec{k}\vec{v}'$ описывают эллиптическую «поляризацию магнитного поля», где $\vec{A}_{\mu, \vec{k}} = \mu_0 i(k_y \vec{x}_0 - k_x \vec{y}_0) M_{G\vec{k}}$ и $\vec{A}_{\tau, \vec{k}} = -\tau_0 (\vec{k} k_y - k^2 \vec{y}_0) M_{G\vec{k}}$. Циркулярная компонента в поляризации – бессиловая часть в структуре, возникает при $\Gamma_{\tau\mu} \neq 0$. Здесь $M_{G\vec{k}}(\vec{k}, \text{Re}_m, G_V) = 4\pi / (2\pi)^3 \exp(-\frac{k^2 r_0^2}{2}) / k^2 D_T(\vec{k}, \vec{k}\vec{v}')$ (рис. 2). Знаменатель $D_{T1} = 1 - \omega^2 \varepsilon_{\perp}(\omega, k) / c^2 k^2$ определяется из уравнений Максвелла/Власова поперечной компонентой ε_i тензора диэлектрической проницаемости. Полюс $D_T = 0$ – дисперсионные уравнения для э.м. мод: функции $\omega(k)$ и $n^2(\omega) = (ck / \omega)^2$ (рис. 2). При $\omega / |k| v_\alpha \gg 1$ – холодная МГД, нет поглощения ($\text{Im} \varepsilon_i = 0$), резонанс $n^2(\omega) = -\infty$ на линии $\omega_0 = 0$ (рис. 2). Диссипативный процесс ($\text{Im} \varepsilon_i \neq 0$) магнитного пересоединения локализован внутри линии: $\omega = \vec{k}\vec{v}' \rightarrow v' / v_e \ll 1$ – горячая кинетика. В этой ситуации электромагнитные свойства плазмы даны как $D_T(\vec{k}\vec{v}', \vec{k}) = 1 - \frac{v'^2}{c^2} + \frac{1}{k^2 r_{DM}^2} - i \frac{1}{k^2 r_G^2}$, что позволяет вычислить мощность P_{acc} пересоединения и R_{acc} . При $\Gamma_{\tau\mu} \ll 1$, $G_V \ll 1$:

$$R_{acc} = \frac{P_{acc}}{I_\mu^2} = \frac{v'}{c^2} \frac{2}{(2\pi)^2} \left\{ \frac{4}{3\varepsilon} - \frac{12}{\varepsilon^3} + \frac{5}{\varepsilon} - \frac{3\pi}{2\varepsilon^2} - \frac{48}{\varepsilon^3} + \frac{30\pi}{\varepsilon^4} + \right.$$

$$\left. [ci(\varepsilon) \sin(\varepsilon) - si(\varepsilon) \cos(\varepsilon)] \left(-4 + \frac{33}{\varepsilon^2} - \frac{60}{\varepsilon^4} \right) + [ci(\varepsilon) \sin(\varepsilon) - si(\varepsilon) \cos(\varepsilon)] \left(\varepsilon - \frac{13}{\varepsilon} + \frac{60}{\varepsilon^3} \right) \right\}, \text{ где}$$

$\varepsilon = \text{Re}_m^2$, $si(\varepsilon)$ и $ci(\varepsilon)$ – интегральные синусы и косинусы, L, C приведены в www.nwp.sci-nnov.ru/LaB_presentations/5/Volga-2017-Gubchenko-2.pdf

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0035-2019-0002, частично поддержана грантами РФФИ (№. 19 02 00704, № 17 02 00091), 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 КП19-270 Президиума РАН (проект I.14 “Ускорение заряженных частиц и волновые процессы в солнечной, гелиосферной и магнитосферной плазме”).