

УДК 52—726+524.354.4

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЕЛЯТИВИСТСКОГО НЕЙТРАЛЬНОГО ПУЧКА С НЕОДНОРОДНЫМ ПРОФИЛЕМ СКОРОСТИ В МАГНИТОСФЕРАХ ПУЛЬСАРОВ

Т. Д. КАЛАДЗЕ, П. Г. МАМРАДЗЕ

Поступила 17 июня 1983

Принята к печати 15 января 1984

Исследуется неустойчивость электромагнитных волн альфвеновского типа в магнитосферах пульсаров. Неустойчивость обусловлена наличием поперечного градиента скорости у пучка, истекающего с релятивистской скоростью из астрономического объекта.

1. *Введение.* В настоящее время считается общепринятым, что пульсар представляет собой быстро вращающуюся нейтронную звезду с сильным (порядка $10^{12} \div 10^{13}$ Гс) магнитным полем, причем в магнитосфере пульсара имеется преимущественно электронно-позитронная плазма [1, 2]. Для выяснения механизма наблюдаемого мощного радиоизлучения пульсаров значительный интерес представляет собой исследование плазменных неустойчивостей, развитие которых возможно в магнитосфере пульсаров. По имеющимся данным, из большинства астрономических объектов (обычные звезды, пульсары, рентгеновские источники, квазары и ядра активных галактик) происходит как непрерывное, так и взрывное истечение плазмы с ультрарелятивистскими (соответствующий Лоренц-фактор $\Gamma \sim 10^3 \div 10^7$) скоростями. При этом профиль скорости поперек ее направления является значительно неоднородным [3]. В такой плазме возможно развитие неустойчивости [4]. Развиваясь в магнитосфере пульсара, подобные неустойчивости приведут к генерации волн, что в конечном счете может сказаться на наблюдаемом излучении пульсаров. Отметим, что в работе [5] рассматривалась электростатическая неустойчивость «холодного» ультрарелятивистского пучка заряженных частиц с неоднородным профилем скорости в магнитосфере пульсаров.

В настоящей работе, в рамках модели электронно-позитронной плазмы в магнитосфере пульсара, исследуется электромагнитная неустойчивость поверхностных волн альфвеновского типа, возбуждаемых скомпенсированным нейтральным пучком с неоднородным профилем скорости. При

этом предполагается, что скорость и плотность потока при определенном значении поперечной координаты изменяются скачком. Отметим, что в рамках модели нейтрального пучка неустойчивость, рассмотренная в [5], не имеет места.

2. Пусть электроны и позитроны плазмы магнитосферы пульсара движутся вдоль магнитного поля пульсара \vec{B}_0 с одинаковой релятивистской скоростью \vec{V}_0 , профиль которой неоднороден по поперечной координате x , $d\vec{V}_0/dx \neq 0$. Будем предполагать, что в рассматриваемой области магнитное поле однородно и направлено вдоль оси z , так что $B_0(0, 0, -B_z)$. Плотности электронов и позитронов считаются равными. Как и в работе [5], температуру частиц будем считать достаточно малой и пренебрежем столкновениями между частицами. Исходными для нас будут релятивистские уравнения двухжидкостной гидродинамики:

$$\frac{\partial \vec{P}_\alpha}{\partial t} + (\vec{V}_\alpha \nabla) P_\alpha = e_\alpha \left(\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{V}_\alpha \vec{B}] \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_\alpha}{\partial t} + \text{div} (n_\alpha \vec{V}_\alpha) = 0 \quad (2)$$

и уравнения Максвелла:

$$\text{rot} \vec{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \sum_\alpha e_\alpha n_\alpha \vec{V}_\alpha, \quad (3)$$

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (4)$$

Здесь e_α и n_α соответственно заряд и плотность частиц сорта α , \vec{E} и \vec{B} напряженность электрического поля и магнитная индукция, c — скорость света. Средний импульс $\vec{P}_\alpha(x, t)$ связан со средней скоростью $\vec{V}_\alpha(x, t)$ частиц соотношением:

$$\vec{V}_\alpha = \frac{\vec{P}_\alpha}{m_\alpha (1 + P_\alpha^2 / m_\alpha^2 c^2)^{1/2}}, \quad (5)$$

где m_α — масса покоя частиц.

Предполагая возмущения стационарных величин малыми, используем стандартную процедуру линеаризации уравнений (1)–(4). Далее, полагая, что все возмущенные величины зависят от координат и времени по

закону $\Phi(x) \exp(ik_y y + ik_z z - i\omega t)$ (ось x направлена вдоль неоднородности равновесных параметров плазмы, k_y и k_z — составляющие волнового вектора вдоль осей y и z), рассмотрим низкочастотные и длинноволновые возмущения, такие, что выполняются условия

$$|\omega - k_z V_0| \ll \frac{\omega_B}{\Gamma}, \quad \frac{\partial}{\partial x} \ll \frac{\omega_p}{c}.$$

Здесь $\Gamma = (1 - V_0^2/c^2)^{-1/2}$ релятивистский фактор, ω_p и ω_B — соответственно плазменная и циклотронная частоты электронов, ω — частота возбужденной волны.

Аналогично [6], из системы (1)–(4) можно получить следующее дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon}{k_y^2 + k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon} \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) - \left(k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon \right) E_y = 0, \quad (6)$$

где

$$\varepsilon = 1 + \frac{2\omega_p^2 \omega'^2}{\omega_B^2 \omega^2} \Gamma, \quad (7)$$

а величина $\omega' = \omega - k_z V_0$.

В случае однородной плотной плазмы уравнение (6) описывает альфвеновские и быстрые магнитозвуковые волны. При наличии неоднородности волны этих двух типов оказываются связанными друг с другом и описываются дифференциальным уравнением (6). Это уравнение можно упростить при малых k_z/k_y , когда можно снова различать альфвеновские и магнитно-звуковые волны [6].

Рассмотрим волны альфвеновского типа, которые благодаря своей малой частоте могут раскачиваться при наличии градиента у V_0 . Для таких волн имеем $\varepsilon \ll (ck/\omega)^2$, так что их электрическое поле удовлетворяет уравнению:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\left(k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon \right) \frac{\partial E_y}{\partial x} \right] - k_y^2 \left(k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon \right) E_y = 0. \quad (8)$$

Рассмотрим простейший случай скачкообразного профиля скорости и плотности. То есть будем считать, что

$$V_0(x) = \begin{cases} V_1, & x < 0 \\ V_2, & x > 0 \end{cases}, \quad n_0(x) = \begin{cases} n_1, & x < 0 \\ n_2, & x > 0 \end{cases}. \quad (9)$$

Это означает, что скачок скорости и плотности происходит в слое толщиной a , малой по сравнению с поперечным размером потока. Используем

метод поверхностных волн [6], согласно которому возмущения предполагаются локализованными вблизи границы раздела (возмущения типа поверхностных волн). Будем считать, что вдали от переходного слоя возмущение спадает по закону

$$E_y = E_{0y} \exp(-x|x|), \quad x > 0 \quad (10)$$

и что E_y непрерывно при $x = 0$. Это означает, что толщина переходного слоя мала по сравнению с масштабом спада возмущения:

$$x\alpha \ll 1. \quad (11)$$

Подставляя (10) в (8), найдем:

$$x = \sqrt{k_y^2 + k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} - 2 \frac{\omega^2 \omega'^2}{c^2 \omega_B^2} \Gamma}. \quad (12)$$

Так как мы рассматриваем возмущения с $k_z \ll k_y$, $k_z \sim \omega/c \sim \omega'$, то имеем $x \sim |k_y|$. Учитывая далее непрерывность E_y внутри переходного слоя, интегрируем обе части равенства (8) по слою. В результате получим дисперсионное уравнение

$$-2 \frac{c^2 k_z^2}{\omega^2} + \varepsilon_2 + \varepsilon_1 = 0. \quad (13)$$

Индексы 1 и 2 означают, что величина (7) берется по разные стороны слоя. Решая (13), можно найти критерий неустойчивости следующего вида:

$$Q = -\frac{\Gamma_1 \Gamma_2}{c_{A1}^2 c_{A2}^2} (V_1 - V_2)^2 + \frac{1}{c^2} + \frac{1}{c_{A1}^2 \Gamma_1} + \frac{1}{c_{A2}^2 \Gamma_2} < 0. \quad (14)$$

Здесь $c_A = c(\omega_B/\omega_p)$ — скорость Альфвена. Инкремент неустойчивости определяется выражением

$$\gamma = |k_z| \left(\frac{1}{c^2} + \frac{\Gamma_1}{c_{A1}^2} + \frac{\Gamma_2}{c_{A2}^2} \right)^{-1} \sqrt{|Q|}, \quad (15)$$

а реальная часть частоты

$$\omega = k_z \left(\frac{V_1 \Gamma_1}{c_{A1}^2} + \frac{V_2 \Gamma_2}{c_{A2}^2} \right) \left(\frac{1}{c^2} + \frac{\Gamma_1}{c_{A1}^2} + \frac{\Gamma_2}{c_{A2}^2} \right)^{-1}. \quad (16)$$

3. Проведенные в данной работе исследования показывают, что при наличии в магнитосфере пульсара ультрарелятивистского потока плазмы, скорость которого направлена вдоль магнитного поля и обладает значительным поперечным градиентом, в магнитосфере пульсара могут возбуждаться низкочастотные, существенно электромагнитные волны.

Предполагая $V_1 = -V_2 \simeq c$, из (14) можно получить упрощенное условие неустойчивости

$$-\frac{c^2 \Gamma^2}{c_A^4} + \frac{1}{c^2} < 0. \quad (17)$$

Это означает, что рассмотренная неустойчивость возможна в плазме с параметром $\beta = \frac{\omega_p^2}{\omega_B^2} \Gamma > 1$. При этом инкремент неустойчивости по порядку величины равен:

$$\gamma \simeq k_z c \lesssim c/a, \quad (18)$$

где a — толщина переходного слоя.

Из условия $\varepsilon \ll (kc/\omega)^2$ находим ограничение на величину поперечной составляющей волнового вектора:

$$k_y \gg \frac{\Gamma^{1/2}}{c_A} \omega. \quad (19)$$

Поскольку частота возбуждаемой волны $\omega \sim k_z c$, то $k_y/k_z \gg (c/c_A) \Gamma^{1/2}$.

Отметим наконец, что в магнитосферах пульсаров рассматриваемая неустойчивость может играть существенную роль наряду с пучковой [7—9] и диклотронной пучково-альфвеновской [10, 11].

Авторы благодарят А. Б. Михайловского за оказанное внимание к работе и многочисленные ценные замечания и Дж. Г. Ломинадзе за полезные обсуждения.

Институт прикладной математики
Тбилисского государственного
университета
Абастуманская астрофизическая
обсерватория

THE ELECTROMAGNETIC INSTABILITIES OF THE RELATIVISTIC NEUTRAL BEAM WITH THE INHOMOGENEOUS VELOCITY PROFILE IN THE MAGNETOSPHERES OF PULSARS

T. D. KALADZE, P. G. MAMRADZE

The instability of the electromagnetic Alfvén type waves in the magnetospheres of pulsars is investigated. The instability is due to the inhomogeneous velocity profile of the relativistic beam which outflows from pulsar.

ЛИТЕРАТУРА

1. *F. Curtis Michel*, *Rev. Mod. Phys.*, 54, 1982.
2. *Р. Манчестер, Дж. Тейлор*, Пульсары, Мир, М., 1980.
3. *C. F. Kennel, F. S. Fujimura, R. Pellat*, *Space Sci. Rev.*, 24, 407, 1979.
4. *А. Б. Михайловский, А. А. Рухадзе*, *ЖТФ*, 35, 2143, 1965.
5. *J. Arons, D. F. Smith*, *Ap. J.*, 229, 728, 1979.
6. *А. Б. Михайловский*, Теория плазменных неустойчивостей, т. 2, Атомиздат, М., 1977.
7. *M. A. Ruderman, P. G. Sutherland*, *Ap. J.*, 196, 51, 1975.
8. *Дж. Г. Ломинадзе, А. Б. Михайловский*, *ЖЭТФ*, 76, 959, 1979.
9. *В. Д. Егоренков, Дж. Г. Ломинадзе, П. Г. Мамрадзе*, О пучковой неустойчивости плазмы в магнитосфере пульсаров. Сообщ. АН Груз.ССР (в печати).
10. *Дж. Г. Ломинадзе, Г. Э. Мачабели, А. Б. Михайловский*, *Физика плазмы*, 5, 1337, 1979.
11. *Г. Э. Мачабели, В. В. Усов*, *Письма АЖ*, 5, 445, 1979.