Взаимодействие волн и частиц при особых условиях

Беспалов П.А.[1], **Савина О.Н.**[2]
[1]*ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, peter@ipfran.ru*
[2]*НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия*

Содержание

Введение

- ОНЧ хоровые излучения в дневной магнитосфере
- Особые условия взаимодействия волн и частиц
- Формирование облака активных электронов
- Расчет эффективности взаимодействия волн и частиц в квазигидродинамическом приближении
- Усиление короткого электромагнитного импульса
- Формирование дискретных электромагнитных излучений
- Импульсные излучения коричневого карлика TVLN 513-46546
- Extreme nanoshots в радиоимпульсах пульсара в Крабе

Заключение

Семнадцатая ежегодная конференция
Физика плазмы в солнечной системе
7–11 февраля 2022, ИКИ РАН

Введение

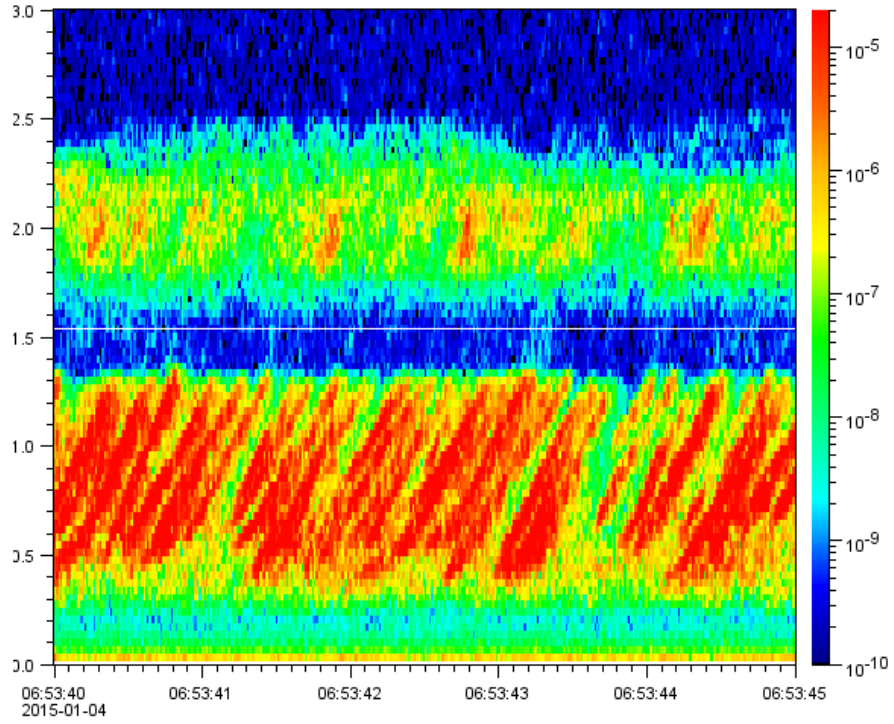
В космической плазме наблюдаются электромагнитные излучения с дискретной структурой динамического спектра и очень высокой яркостной температурой. Это, например, хоровые электромагнитные излучения в дневной магнитосфере Земли на частотах 1-5 кГц, импульсные излучения коричневого карлика TVLN 513-46546 на частотах 5-8 ГГц, гигантские всплески (extreme nanoshots) в главных радиоимпульсах пульсара в Крабе на частотах 0.4-5 ГГц, Для объяснения условий возбуждения указанных излучений необходимо принимать во внимание реальные свойства среды и дисперсионные особенности волновых возмущений. Условия возбуждения этих излучений можно во многом объяснить с единых позиций в рамках *BPA* (Beam-Pulse-Amplifier) механизма усиления коротких электромагнитных импульсов с предельно высоким темпом, характерным для неустойчивости гидродинамического типа. Этот механизм обеспечивает формирование интенсивных быстро меняющихся излучений с дискретной структурой динамического спектра в плазме без существенной анизотропии функции распределения энергичных частиц. Теоретический анализ и численные расчеты показали возможность реализации особых условий взаимодействия на резонансе Черенкова для облака активных частиц, которые движутся вместе с коротким импульсом через область взаимодействия волн и частиц. В результате слабые шумовые импульсы с подходящей несущей частотой, поляризацией и углом волновой нормали могут резко усиливаться и трансформироваться в дискретные электромагнитные излучения в плазменных оболочках намагниченных коричневых карликов, нейтронных звезд и планет.

ОНЧ хоровые излучения в дневной магнитосфере

За последние шестьдесят лет опубликованы сотни научных работ, обзоров и книг, посвященных генерации магнитосферных ОНЧ электромагнитных хоровых излучений.

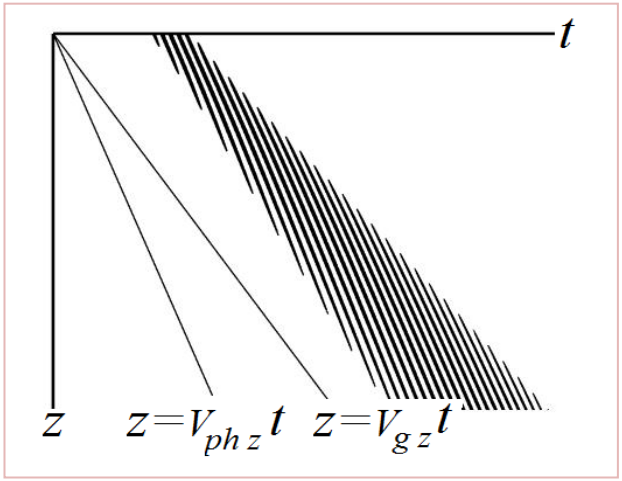
- Для объяснения наблюдаемых спектральных форм обычно обсуждаются различные варианты циклотронной генерации в предположении наличия высокой анизотропии электронного распределения**.**
- Однако согласно *THEMIS* экспериментальным данным (C. Zhou, R.M. Thorne et. al, 2015) в дневной магнитосфере возбуждение хоров происходит в областях с маргинально устойчивой функцией распределения энергичных электронов и контролируется длиной области однородной плазмы вблизи локального минимума магнитного поля.

В докладе обсуждаются предложенный авторами *BPA* механизм возбуждения хоров в дневной магнитосфере.



Особые условия взаимодействия волн и частиц

Если короткий электромагнитный импульс падает на однородный слой намагниченной плазмы вблизи локального минимума магнитного поля, то он будет расплываться из-за дисперсии и, если фазовая скорость отличается от групповой скорости, то линии постоянной фазы перемещаются относительно импульса,



Дисперсионное соотношение для свистовых волн

$$\omega = \frac{\omega_B \left|k_z\right| (k_z^2 + k_x^2)^{1/2}}{k_z^2 + k_x^2 + \omega_p^2 / c^2}$$

k_z и k_x компоненты волнового вектора вдоль и поперек магнитного поля:

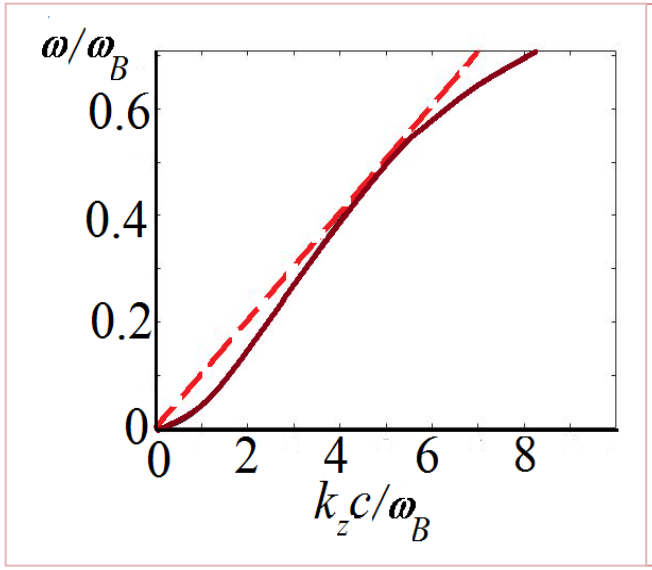
Это соотношение выполняется в полосе частот $\omega_{LHF} < \omega < \omega_B < \omega_p$, где ω_{LHF} - нижнегибридная частота, ω_B электронная циклотронная частота и ω_p электронная плазменная частота. Когда продольная фазовая и групповая скорости равны

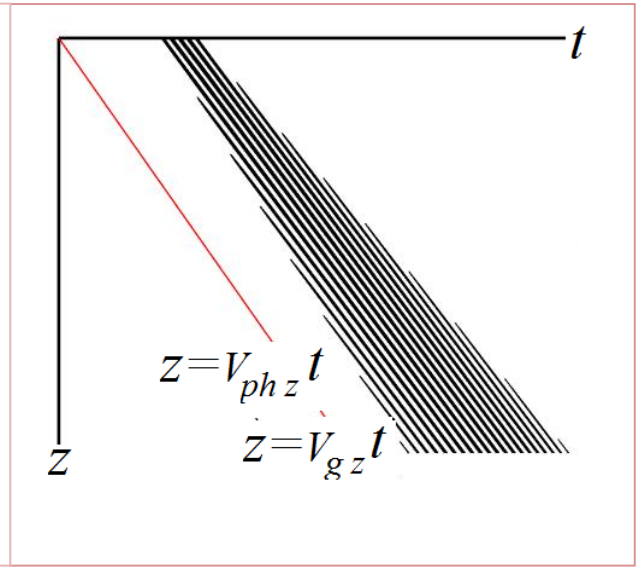
$$v_{phz} = v_{gz} = u = c\omega_B / (2\omega_p)$$

линии постоянной фазы "захвачены" внутри импульса и в соответствующем диапазоне частот его волновое поле можно записать в виде

$$\vec{E}_\sim = \vec{E}_\sim(z - ut), \ \vec{B}_\sim = \vec{B}_\sim(z - ut)$$

$$E_{\sim z} \neq 0$$





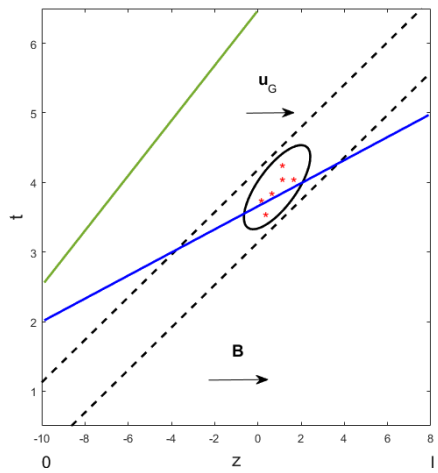
Формирование облака активных электронов

С коротким импульсом могут эффективно взаимодействовать на черенковском резонансе надтепловые электроны, которые движутся со скоростью u вдоль магнитного поля и влетели в область взаимодействия вместе с ним. Для других частиц взаимодействие настолько кратковременно, что они не успевают обменяться энергией. Поэтому, при реализации *BPA* механизма достаточно короткий импульс взаимодействует с "моноскоростным" облаком активных электронов с разбросом продольных скоростей

$$\Delta V_z \simeq u^2 t_p / l \ll u$$

t_p - длительность импульса

Иллюстрация формирования облака «активных» надтепловых электронов



Расчет эффективности взаимодействия волн и частиц в квазигидродинамическом приближении

Линеаризованные уравнениями квазигидродинамики

$$\frac{\partial n_{b\sim}}{\partial t} + u\frac{\partial n_{b\sim}}{\partial z} + n_b div(\vec{V}_\sim) = 0,$$

$$\frac{\partial \vec{V}_\sim}{\partial t} + u\frac{\partial \vec{V}_\sim}{\partial z} + \frac{e}{mc}\left(\vec{V}_\sim \times \vec{B}\right) = -\frac{e}{m}\vec{E}_\sim - \frac{eu}{mcB}\left(\vec{B}\times\vec{B}_\sim\right)$$

позволяют определить резонансную плотность тока

$$j_{rz} = i\frac{n_b e^2 \omega}{m\left(\omega - k_z u\right)^2} E_{z\sim}$$

Из уравнений Максвелла следует обычное уравнение для спектральных компонент электромагнитного импульса

$$\vec{k}(\vec{k}\vec{E}) - k^2\vec{E} + \frac{\omega^2}{c^2}\hat{\varepsilon}\vec{E} = 0$$

,

Отсюда следует дисперсионное уравнение

$$(\omega - \omega(k_z,\theta))(\omega - |k_z|u)^2 = \frac{n_b\omega_B^3}{32 n_p}\sin^2\theta\left|\cos\theta\right|^3$$

.

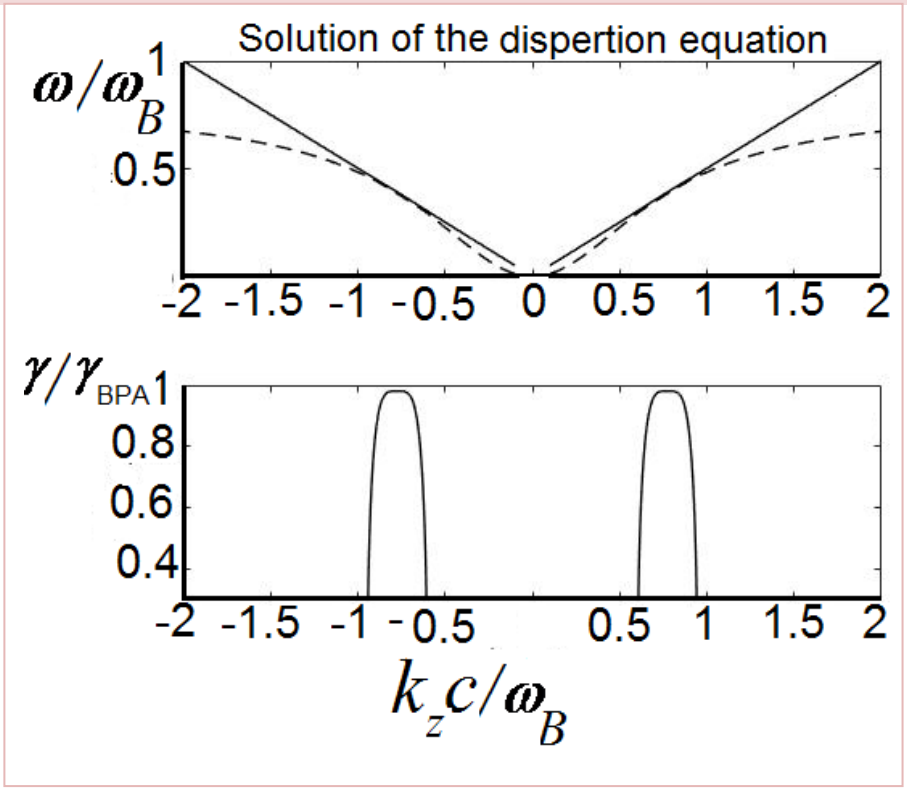
Хорошо известно, что имеется два режима взаимодействия волн и частиц (см., например, Л.А. Арцимович, Р.З. Сагдеев, 1979) на резонансе Черенкова. В первом режиме, при выводе формулы для инкремента сильно размытых пучков в приближении Ландау пренебрегается конечной шириной резонанса волна-частица и предполагается, что тепловой разброс пучка существенно больше ширины резонанса. Тогда для каждой неустойчивой волны на функции распределения пучка выделяется небольшая группа резонансных частиц, вклад которых в инкремент определяется наклоном функции распределения. Во втором режиме, когда $\Delta v_z < \gamma / k_z$ весь пучок как целое находится в резонансе с неустойчивой волной. Именно в этом случае возможно развитие сильной пучковой неустойчивости.

Усиление короткого электромагнитного импульса

С точностью до множителя порядка единицы инкремент роста волнового возмущения в такой системе определяется выражением

$$\gamma \approx \left(\frac{n_b}{n_p}\right)^{1/3} \omega_\circ$$

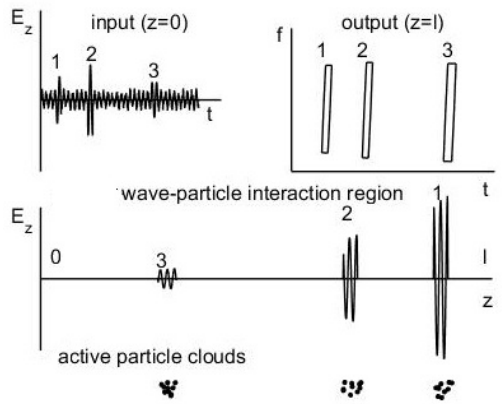
n_b и n_p - концентрация облака активных электронов и фоновой плазмы соответственно, $\omega_\circ$ - характерная частота волны.



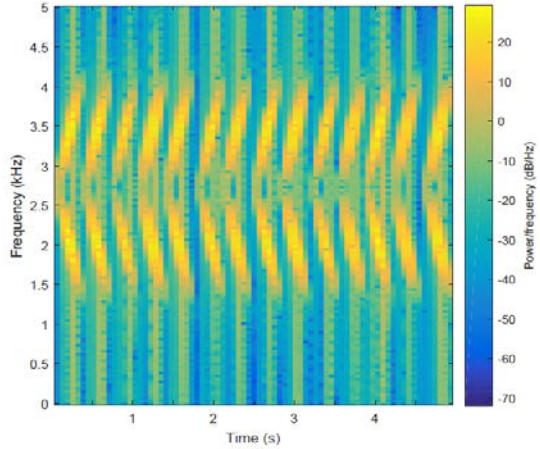
Формирование дискретных электромагнитных излучений

Слабые шумовые импульсы с подходящей поляризацией, диапазоном частот и углом волновой нормали на входе в области возбуждения усиливаются и превращаются в последовательность дискретных элементов хоровых электромагнитных излучений.

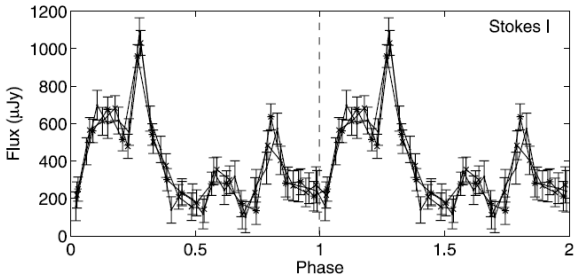
Иллюстрация формирования последовательности дискретных электромагнитных излучений.



Пример спектрограммы на выходе области усиления, полученный в результате численного расчета.



Импульсные излучения коричневого карлика TVLN 513-46546



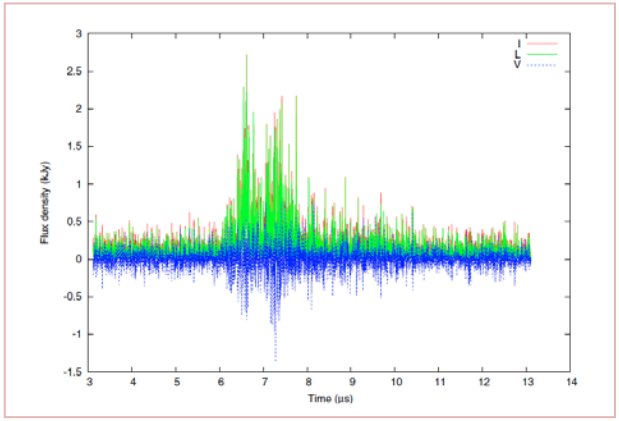
Согласно наблюдениям VLA с периодом 1.96 часа регистрируются чрезвычайно яркие 100% циркулярно поляризованные всплески когерентных радиоизлучений холодного коричневого карлика. Фотометрические измерения показали, что период отвечает вращению объекта. Результаты наблюдений практически идентичны на частотах 2-8 ГГц. Яркостная температура излучений до 10^{13} K,

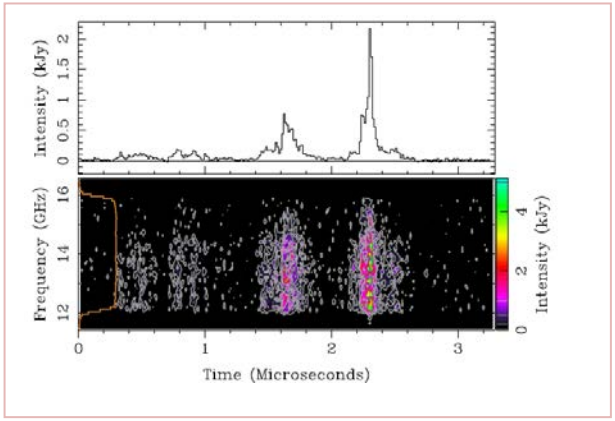
Hallinan, G., Antonova, A., Doyle, J.G., Bourke, S., Brisken, W.F. & Golden, A.. Rotational modulation of the radio emission from the M9 DWARF TVLM 513□46546: broad band coherent emission at the substellar boundary? *The Astrophysical Journal*, v. 653, p. 690- 699, 2006.

Условия: $\omega_B \simeq 2\cdot 10^{10}\ c^{-1}$, $\omega_B / \omega_p \simeq 10$, $t_p \simeq 3\cdot 10^{-3}\ c$, $\gamma_{LF} > 1$

Bespalov, P.A. & Savina, O.N. An excitation mechanism of electromagnetic pulses by relativistic electrons in the brown dwarfs rarefied magnetosphere. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, v. 480, Issue 4, p. 4761-4765.

Extreme nanoshots в гигантских радиоимпульсах пульсара в Крабе





Пример GP на частоте 8.4 ГГц показан с разрешение по времен 0.8 нс. Принимали на VLA, Arecibo, Green Bank, Goldstone. Красный цвет отвечает полной интенсивности . Поток энергии отвечает яркостной температуре $10^{35}-10^{37}$ K. Наблюдаются в широком диапазоне частот 0.4-5 ГГц (с несколько отличными свойствами от 23 МГц до 15.1 ГГц), период повторения $3.3\cdot10^{-2}$ с.

Hankins, T.H. & Eilek, J.A. Radio emission signatures in the Crab pulsar. *The Astrophysical Journal*, 2007, v. 670, issue 1, p. 693–701.

Условия: электро-позитронная плазмы $B\simeq10^{6}$ Гс, $t_p\simeq10^{-9}\,c$, $\gamma_{LF}\geq10^{2}$.

Bespalov, P.A. & Savina O.N. Excitation of the main giant pulses from the Crab pulsar. *Monthly notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, v. 498, p. 2864-2870.

Заключение

Проведено исследование особенностей возбуждения хоровых излучений в дневной магнитосфере посредством *BPA* механизма. Результаты расчетов позволяют объяснить многие свойства хоровых излучений:

- Локализацию области возбуждения.
- Полосу частот электромагнитных излучений.
- Направление волнового вектора и групповой скорости.
- Энергетику частиц и волн.

Рассмотренный механизм излучения полезен для объяснения условий возбуждения электромагнитных излучений с дискретной структурой динамического спектра и очень высокой яркостной температурой от космических источников.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 20-12-00268.

Литература

Bespalov, Peter & Savina, Olga. An excitation mechanism for discrete chorus elements in the magnetosphere. *Annales Geophysicae*, 2018, v. 36, Issue 5, 1201-1206. DOI: 10.5194/angeo-36-1201-2018

Bespalov, P.A. & Savina, O.N. On the linear theory of oblique magnetospheric chorus excitation. *J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2019a, v. 185, 58-67. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.01.016.

Bespalov Peter A. & Savina Olga N. Excitation of chorus with small wave normal angles due to beam pulse amplifier (BPA) mechanism in density ducts. *Annales Geophysicae*, 2019b, v. 37, 819–824. DOI: 10.5194/angeo-37-819-2019.

Bespalov, P.A., Savina, O.N. & Cowley S.W.H. The beam pulse amplifier in space and laboratory plasmas. *Results in Physics,* 2020, v. 16, 103004. DOI: 10.1016/j.rinp.2020.103004.

Bespalov, P.A. & Savina O.N. Electromagnetic pulse amplification in a magnetized nearly stable plasma layer. *Results in Physics*, 2021, v. 28, 104607.

Bespalov, P.A. & Savilov A.V. Amplification of a slipping quasi-monochromatic wave pulse by an electron flow with a wide velocity spread. *Physics of Plasmas*, 2021, v. 28, 093303.

Беспалов, П.А., Савина, О.Н. & Жаравина П.Д. Особенности возбуждения хоров посредством *BPA* механизма в магнитосферных волноводах уплотнения и разрежения с рефракционным отражением. *Космические Исследования*, 2022, т. 60, № 1, с. 17–25.