

Мкртичан Гоар Сергеевна

преподаватель

ГБОУ СПО «Московский областной

профессиональный колледж

инновационных технологий»

д. Долгое Ледово, Московская область

аспирант

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов»

г. Москва

ФАЗОВАЯ ПЛОСКОСТЬ ДЛЯ СЕРТФОТРОННОГО УСКОРЕНИЯ ЧАСТИЦ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ВОЛНАМИ ПРИ НЕРЕЛЯТИВИСТСКОЙ НАЧАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ

***Аннотация:** исследование механизмов формирования потоков ультрарелятивистских частиц в космической плазме входит в число актуальных задач астрофизики и, в частности, оно представляет интерес для проблемы генерации космических лучей. При этом одним из главных механизмов формирования потоков ультрарелятивистских частиц является серфинг зарядов на электромагнитных волнах [1–16]. Соответственно для оценок возможного количества ускоренных частиц, их максимальной энергии, энергетических спектров необходим детальный анализ оптимальных условий для захвата заряженных частиц волновым пакетом в эффективную потенциальную яму с последующим ультрарелятивистским ускорением, а также эффективности ускорения в зависимости от исходных параметров задачи.*

***Ключевые слова:** циклотронное вращение, захват частиц, потенциальная яма, благоприятная фаза, пролетная частица, фазовая плоскость, черенковский резонанс.*

На основе численного анализа исследована структура фазовой плоскости при серфотронном ускорении слаборелятивистских заряженных частиц

пространственно локализованным пакетом электромагнитных волн с лоренцовской огибающей амплитуды в космической плазме. Исследован захват частиц волновым пакетом в режим ультрарелятивистского серфотронного ускорения с увеличением энергии зарядов на три порядка величины и более используя нелинейное уравнение для фазы пакета на несущей частоте в месте нахождения ускоряемой частицы. Для слабoreлятивистских зарядов захват частиц в режим серфинга возможен и при невыполнении условия черенковского резонанса на начальном этапе их взаимодействия с пакетом. Изучена временная динамика процессов захвата и последующего ультрарелятивистского ускорения частиц с учетом их циклотронного вращения, рассмотрена структура фазовой плоскости исследуемого нелинейного уравнения. Показано, что для захваченной частицы фазовая плоскость имеет особую точку типа устойчивый фокус. При сильном ускорении наблюдается существенная локализация траекторий на фазовой плоскости в окрестности фокуса (конденсация ускоряемых зарядов на дно эффективной потенциальной ямы). Изучена временная, динамика компонент импульса захваченных заряженных частиц.

Для наглядности, приведем случай взаимодействий заряженных частиц с волновым пакетом с разными условиями движения в данном пакете. Численные расчеты проведены для следующих наборов исходных параметров: $u = 0,22$, $\beta_p = 0,37$, $h = 11$, $g = 19$, $a = 0$, где h , $g(0)$ компоненты импульса частицы соответственно вдоль магнитного поля и волнового фронта.

Результаты проведенных численных расчетов показали, что при взаимодействии заряженных частиц с электромагнитной волной в магнитоактивной плазме делятся на две группы: пролетные и захваченные. Пролетные частицы совершают циклотронное вращение во внешнем магнитном поле (рис. 1), для них за счет возникновения локальных (по времени) резонансов с волной возможно некоторое увеличение энергии. На фазовой плоскости (Φ , Ψ) траектории изображающих точек вполне подобны случаю взаимодействия частиц с ленгмюровской волной в плазме без магнитного поля.

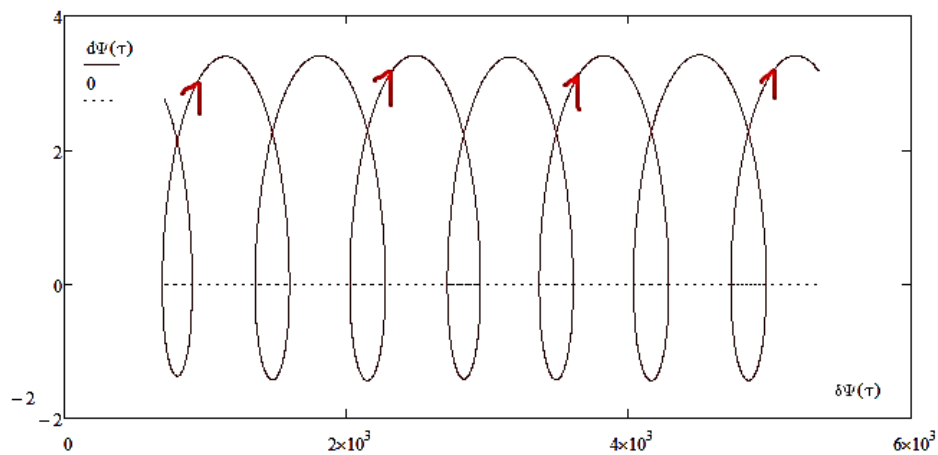


Рис. 1. Фазовая плоскость для незахваченной частицы

Группа захваченных волной частиц возникает при превышении полем волны критического значения. На фазовой плоскости (Φ, Ψ) траектории изображающих точек, в отличие от захваченных ленгмюровской волной частиц в плазме без магнитного поля, имеют особую точку типа устойчивый фокус (рис. 2).

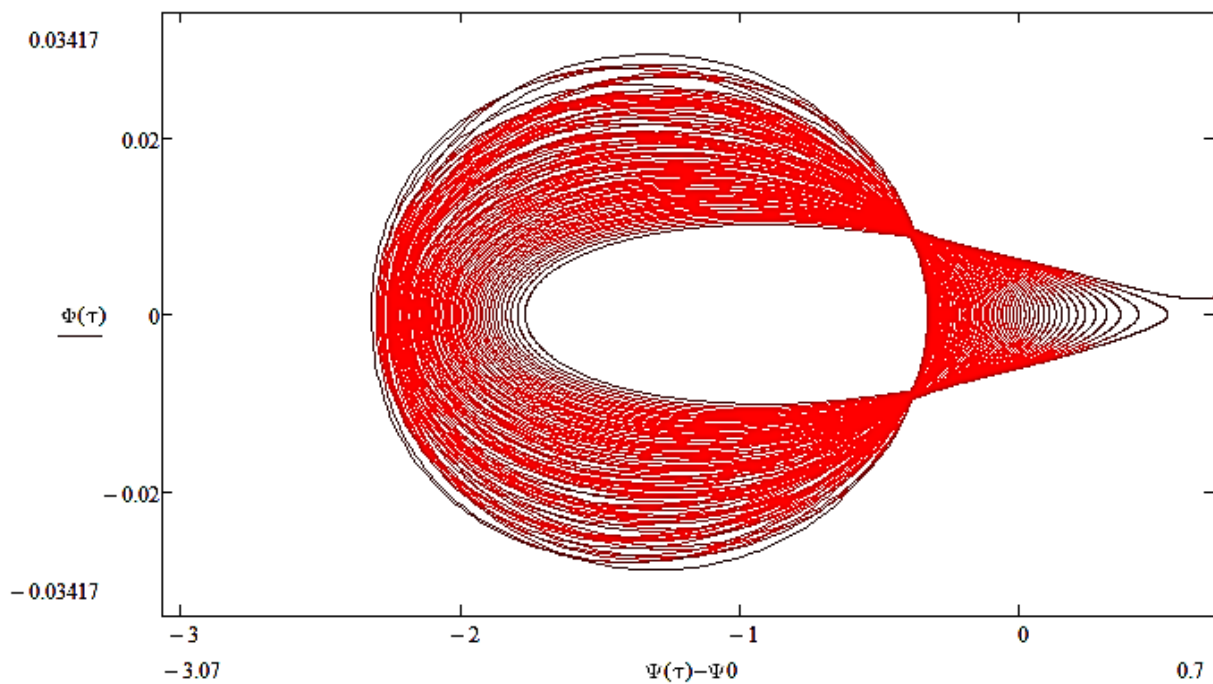


Рис. 2. Фазовая плоскость для захваченной частицы

Захваченные частицы колеблются в эффективной потенциальной яме в области ускоряющих значений электрического поля, где реализуется

серфотронный механизм ускорения. Темп ускорения (набора энергии) практически постоянен и не зависит от амплитуды электрического поля волны.

В качестве хорошей иллюстрации можно продемонстрировать поведение заряженных частиц после вылета частицы из эффективной потенциальной ямы, где начинается циклотронное вращение частицы, в котором кривая уходит влево т.е. компонента скорости в направлении распространения волнового пакета β_x убывает, а компонента скорости вдоль волнового фронта β_y увеличивается (рис. 3).

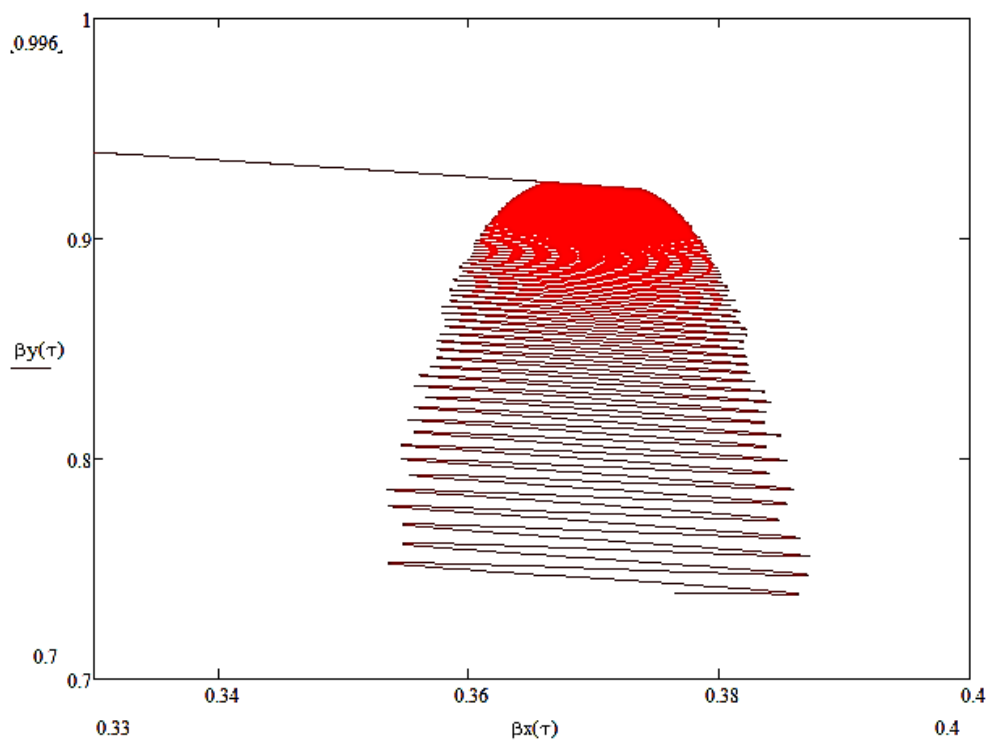


Рис. 3. Траектория изображающей точки на плоскости (β_x , β_y)

Заключение.

Рассмотрено релятивистское ускорение заряженных частиц локализованным в пространстве лоренцевским пакетом. Однако, начальный циклотронный период частицы с положительным знаком во внешнем магнитном поле относительно мал, заряд совершив ряд гирооборотов попадает в благоприятную для захвата волной фазу при одновременном выполнении черпенковского резонанса. После захвата же происходит ультрарелятивистское ускорение частиц с ростом их энергии на $3\div 4$ порядка величины и более, если время захвата не слишком велико.

Следовательно, число ускоренных волновым пакетом частиц может быть достаточно большим вследствие увеличения в пространстве начальных импульсов области, из которой заряды попадают в режим эффективного серфотронного ускорения. Показано, что во время сильного ускорения компоненты импульса и релятивистский фактор захваченной частицы возрастают практически с постоянным темпом. При отсутствии захвата происходит циклотронное вращение частиц и тем не менее в этом процессе возможно доускорение частиц с увеличением их энергии, например, на порядок.

Интересен вариант отрицательного знака компоненты импульса заряда вдоль волнового фронта. Согласно расчетам вначале частица тормозится и меняет знак этого импульса, а затем имеет место ее ускорение.

По результатам численных расчетов, на первом этапе движение изображающей точки на фазовой плоскости соответствует траектории около неустойчивого фокуса с увеличением расстояния от него по мере торможения заряда. На втором этапе, когда имеет место ускорение частицы электромагнитной волной (частица находится в области ускоряющих фаз электрического поля волны), траектория изображающей точки отвечает движению другой фазы – не устойчивого фокуса типа цилиндр с постоянной амплитудой осцилляций по мере роста энергии заряда.

Список литературы

1. Katsouleas N., Dawson J.M. Physical Review Letters. – 1983. – V. 51. – №5. – P. 392.
2. Joshi C. Radiation in plasmas. – 1984. – V. 1. – №4. – 514 p.
3. Грибов Б.Э. Письма в ЖЭТФ / Б.Э. Грибов [и др.]. – 1985. – Т. 42. – Вып. 2. – С. 54.
4. Буланов С.В. Письма в ЖЭТФ / С.В. Буланов, А.С. Сахаров. – 1986. – Т. 44. – Вып. 9. – С. 421.
5. Ситнов М.И. Письма в ЖТФ. – 1988. – Т. 14. – Вып. 1. – С. 89.
6. Ерохин Н.С. [и др.]. – ДАН СССР, 1987. – Т. 295. – №4. – С. 849.

7. Ерохин Н.С. Письма в Астрономический журнал / Н.С. Ерохин, С.С. Моисеев, Р.З. Сагдеев. – 1989. – Т. 15. – №1. – С. 3.
8. Ерохин Н.С. Физика плазмы / Н.С. Ерохин, Н.Н. Зольникова, А.Г. Хачатрян. – 1990. – Т. 16. – Вып. 8. – С. 945.
9. Кичигин Г.Н. ЖЭТФ. – 1995. – Т. 108. – Вып. 10. – С. 1342.
10. Кичигин Г.Н. ЖЭТФ. – 2001. – Т. 119. – Вып. 6. – С. 1038.
11. Лозников В.М. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Плазменная электроника / В.М. Лозников, Н.С. Ерохин. – 2010. – №4 (68). – С. 121.
12. Ерохин Н.С. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Плазменная электроника / Н.С. Ерохин [и др.]. – 2010. – №4 (68). – С. 116.
13. Dieckmann M.E., Shukl P.K. Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2006. – V. 48. – Issue 10. – P. 1515.
14. Wang De-Yu., Lu Quan-Ming Advances in Space Research. – 2007. – V. 39. – Issue 9. – P. 1471.
15. Нейштадт А.И. Письма в ЖЭТФ / А.И. Нейштадт [и др.]. – 2009. – Т. 89. – Вып. 9. – С. 528.
16. Kichigin G.N., Strokin N.A. Geomagnetism and Aeronomy. – 2007. – V. 47. – №6. – P. 704.