

СИЛЬНОЕ СЕРФОТРОННОЕ УСКОРЕНИЕ ПРОТОНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНОЙ В КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ ПРИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ НАЧАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЯХ ЧАСТИЦ

Румен Шкевов¹, Николай Ерохин², Надежда Зольникова², Людмила Михайловская²

¹Институт космических исследований и технологий – Болгарская академия наук

²Институт космических исследований – Российская академия наук

e-mail: shkevov@space.bas.bg, nerokhin@mx.iki.rssi.ru

Ключевые слова: Серфотронное ускорение протонов, захват частицы, интеграл движения, нелинейное уравнение, электромагнитная волна, фаза волны, фазовая плоскость, космическая плазма.

Аннотация: Рассмотрено сильное релятивистское ускорение протонов электромагнитной волной, распространяющейся в космической плазме поперек магнитного поля. Анализ проведен на основе численных расчетов решения нелинейного дифференциального уравнения второго порядка для фазы волны на траектории ускоряемого протона. Начальная энергия частицы была существенно релятивистской. Показано, что в этом случае структура областей благоприятных (для реализации серфинга) начальных фаз существенно упрощается. Для благоприятных начальных фаз захват протонов волной с последующим ультрарелятивистским ускорением происходит сразу и через некоторое время характеристики захваченной частицы (поперечные компоненты скорости, темпы роста энергии и компонент импульса, фаза волны на траектории протона) выходят на асимптотические значения. Получены аналитические аппроксимации для характеристик ускоряемых частиц. При неблагоприятных начальных фазах захват протонов волной на доступных временах численных расчетов не наблюдался, сильное ускорение частиц отсутствует. Протоны совершают ларморовское вращение во внешнем магнитном поле. Обсуждаются оптимальные условия для реализации в рассматриваемой системе ультрарелятивистского серфотронного ускорения частиц, возникновение вариаций потоков космических частиц в сравнительно спокойной космической плазме (в отсутствие экстремальных событий типа взрывов).

STRONG SURFATRON ACCELERATION OF PROTONS BY AN ELECTROMAGNETIC WAVE IN SPACE PLASMAS FOR RELATIVISTIC INITIAL ENERGY OF PARTICLES

Rumen Shkevov¹, Nikolay Erokhin², Nadezhda Zolnikova², Ludmila Mikhailovskaya²

¹Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences

²Space Research Institute – Russian Academy of Sciences

e-mail: shkevov@space.bas.bg, nerokhin@mx.iki.rssi.ru

Key words: Proton surfatron acceleration, particles trapping, particles momentum, nonlinear equation, electromagnetic wave, wave phase, phase plane, space plasma

Abstract: Strong relativistic proton acceleration by an electromagnetic wave propagating in space plasma across the magnetic field is considered. Analysis is based on numerical solution of the nonlinear differential equation of second order for the wave phase on the accelerated proton trajectory. The initial energy of the particle was essentially relativistic. It is shown that in this case, the structure of favorable regions for surfing realization, the initial phases is considerably simplified. At favorable initial wave phases for proton capture followed by ultra-acceleration occurs immediately and after some time the parameters of the captured particles (transverse velocity components, the energy growth rate, momentum component, the wave phase on the trajectory of the proton) tend to the asymptotic values. The analytical approximation to the characteristics of the accelerated particles are obtained. Under unfavorable initial phases for proton capture by the wave at the available times for numerical calculations are not observed, there is no strong acceleration of particles. Protons performs Larmor rotation in the external magnetic field. The optimal conditions for realization of an ultrarelativistic surfatron acceleration of particles in studied system, the genesis of variations in space particle streams in relatively quiet space plasmas (in the absence of extreme blasts type of event) are discussed.

Введение

Анализ механизмов формирования потоков ультрарелятивистских заряженных частиц входит в число актуальных задач современной физики космической плазмы. Например, это представляет большой интерес для проблемы происхождения космических лучей (КЛ) включая процессы формирования спектров КЛ, возникновения их изменчивости и зависимости характеристик КЛ от космической погоды. Ранее серфотронное ускорение зарядов (СУЗ) на электромагнитных волнах в плазме рассматривалось, в частности, в работах [1-11]. Было показано, что СУЗ является эффективным механизмом генерации потоков ультрарелятивистских частиц в космической плазме. Поэтому его исследование применительно к космической плазме требуется для оценки количества ускоренных частиц, характерных размеров областей ускорения, определения их энергетических спектров и влияния возможных внешних факторов. Задача является многопараметрической. Соответственно, для определения главных закономерностей серфотронного ускорения зарядов волнами в космической плазме нужен большой объем численных расчетов. В настоящей работе на основе численных расчетов рассмотрено сильное серфотронное ускорение протонов с релятивистскими начальными энергиями при их взаимодействии с электромагнитной волной, распространяющейся в космической плазме поперек внешнего магнитного поля H_0 . Изучена динамика захвата и ускорения протонов. Показано, что при захвате частицы в режим длительного ускорения поперечные компоненты импульса захваченного протона и его релятивистский фактор увеличиваются практически линейно с ростом времени. Это соответствует постоянному темпу роста энергии захваченной частицы, причем он одинаков для электронов, позитронов, протонов и антипротонов. Расчеты показывают, что поперечные компоненты скорости заряда v_x , v_y выходят на асимптотические значения, а продольная (относительно внешнего магнитного поля) скорость v_z стремится к нулю. С ростом энергии ускоряемые частицы постепенно конденсируются на дно эффективной, нестационарной, потенциальной ямы. Заметим, что захват протонов в режим серфинга происходит для амплитуд волны E_0 выше следующего порога $\sigma = e E_0 / m_e c \omega > u \gamma_p = u / (1 - \beta_p^2)^{1/2}$, где $\beta_p = \omega / c k$, $u = \omega_{He} / \omega$, ω_{He} - циклотронная частота нерелятивистских электронов плазмы, ω - частота волны, k - волновой вектор.

Основные уравнения и результаты численных расчетов

При анализе серфотронного ускорения исходными являются релятивистские уравнения движения протона, взаимодействующего с электромагнитной волной. Релятивистские уравнения движения для ускоряемого протона с массой M и релятивистским фактором γ в поле волны $E_x = E_0 \cos\Psi$, $\Psi = \omega t - kx$ имеют вид

$$\begin{aligned} d(\gamma\beta_x)/dt &= (e E_0 / M c) \cos\Psi + (e H_0 / M c) \beta_y \\ (1) \quad d(\gamma\beta_y)/dt &= - (e H_0 / M c) \beta_x \\ d\gamma/dt &= (e E_0 / M c) \beta_x \cos\Psi \\ \gamma\beta_z &= h = \text{const} \end{aligned}$$

Здесь $\beta = \mathbf{v} / c$, $\beta_x = \beta_p (1 - d\Psi/d\tau)$, $\tau = \omega t$ безразмерное время. Пусть $\xi = \omega x / c$, тогда для фазы волны имеем выражение $\Psi = \tau - (\xi / \beta_p)$. Для удобства дальнейших расчетов введем малый параметр задачи $\varepsilon = (m_e / M)^{1/2}$, а также нормированное безразмерное время $s = \varepsilon \tau$. Нетрудно показать, что система уравнений (1) помимо h имеет второй интеграл $J = \gamma\beta_y + u \varepsilon^2 \beta_p (\tau - \Psi) = \text{const}$, т.е. $\gamma\beta_y = J + u \varepsilon^2 \beta_p (\Psi - \tau)$. Для упрощения записей введем обозначение $B = 1 + h^2 + [J + u \varepsilon^2 \beta_p (\Psi - \tau)]^2$. Следовательно, γ определяется формулой $\gamma^2 = B / (1 - \beta_x^2)$. С учетом интегралов движения J , h из (1) получаем следующее нестационарное, нелинейное уравнение второго порядка для фазы волны на траектории протона

$$(2) \quad d^2\Psi/ds^2 + [\sigma \cdot (1 - \beta_x^2)^{3/2} / B^{1/2} \cdot \beta_p] \cos\Psi + (u / B \beta_p) \cdot (1 - \beta_x^2) \cdot [J + u \varepsilon \beta_p (\varepsilon\Psi - s)] = 0$$

и выражение для безразмерной компоненты скорости протона вдоль волнового фронта $\beta_y = [J + u \beta_p \cdot (\tau - \Psi)] / \gamma$.

Нелинейное уравнение для фазы волны (2) решалось численно с начальными данными $\Psi(0) = \Psi_0$, $\Psi_\tau(0) \equiv a$. При этом имеем $\beta_x(0) = \beta_p(1 - a)$, где параметр a находится в диапазоне $1 - (1 / \beta_p) < a < 1 + (1 / \beta_p)$. Интересно отметить, что при сильном ускорении протонов волной темп набора его энергии $M c^2 \gamma$ выходит на асимптотику $d(M c^2 \gamma)/d\tau = m_e c^2 u \beta_p \gamma_p$.

Следовательно, скорости роста энергии для электронов, позитронов, протонов и антипротонов одинаковы.

Согласно аналитическим оценкам, на достаточно больших временах ускорения протона численное решение должно выходить на следующие асимптотики для компонент скорости частицы $\beta_x \approx \beta_p$, $\beta_y \approx -1/\gamma_p$. Таким образом в асимптотике темп ускорения не зависит от амплитуды волны E_0 , которая определяет характеристику среднего темпа ускорения $\langle \cos\Psi(\tau) \rangle \approx \sigma_c/\sigma$, т.е. асимптотику положения дна эффективной потенциальной ямы для захваченной частицы. Отметим, что в асимптотике компоненты скорости β_y для электронов и протонов отличаются только знаком.

Для нахождения диапазона начальных фаз $\Psi(0)$, при которых происходит захват протона в режим ультрарелятивистского ускорения волной, в расчетах фиксировалась фазовая скорость волны β_p в интервале $0 < \beta_p < 1$, для начальной фазы брался диапазон $|\Psi(0)| < \pi$. Амплитуда волны σ выбиралась выше порогового значения $\sigma = 1.5 \sigma_c$.

Численными расчетами на сравнительно малых временах $\tau \leq 7000$ определялся диапазон начальных фаз, в котором имел место захват протона в режим ультрарелятивистского ускорения волной. Если на этом интервале для некоторых фаз $\Psi(0)$ захвата не было, счет выполнялся до значения $\tau_m = 7 \cdot 10^4$.

Приведем результаты расчетов для следующего варианта параметров задачи $h = 5$, $\beta_p = 0.7$, $\gamma(0)\beta_y(0) = -10$, $u = 0.2$, $a = 0$, соответствующего релятивистскому протону. Результаты расчетов для начальных фаз в интервале $-3.1 \leq \Psi(0) \leq 3.1$ с шагом по фазе $\delta\Psi(0) = 0.1$ показали, что для 14 значений начальных фаз на интервале $\tau \leq \tau_m$ захват протонов волной имеет место. В качестве примера на рис.1 представлена зависимость времени захвата τ_c от значения $\Psi(0)$. Синие области обозначают отсутствие захвата протона волной на соответствующем интервале времени, белые – наличие захвата.

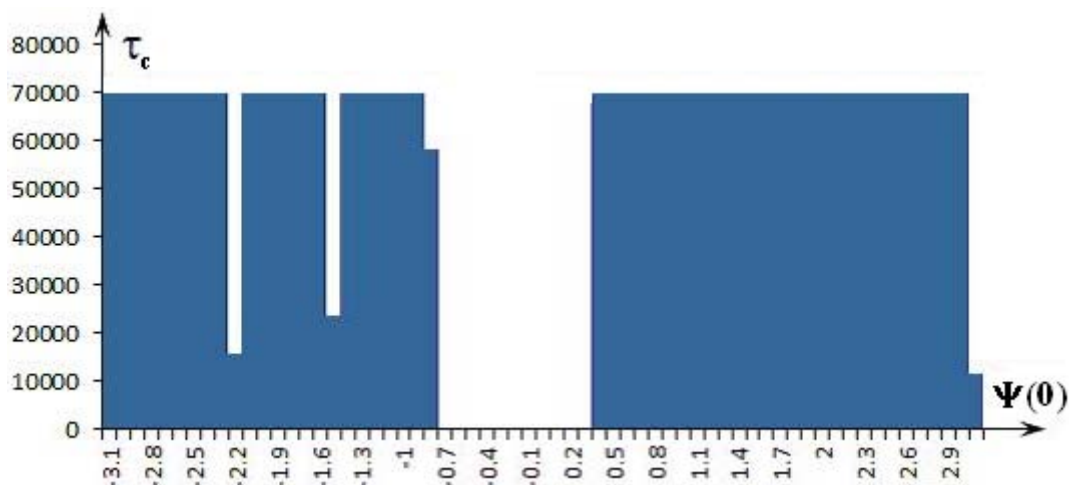


Рис. 1. Зависимость времени захвата τ_c от значения фазы волны $\Psi(0)$. Синие области обозначают отсутствие захвата

Итак, в данном варианте параметров задачи захват протонов волной в режим ультрарелятивистского ускорения происходит для 22.6 % начальных фаз, что существенно для генерации вариаций потока КЛ в области высоких энергий поскольку при росте энергии частиц на (3÷5) порядков величины даже малая доля попадающих в захват волной протонов с энергией порядка ГэВ после сильного доускорения может создавать в космической плазме значительные вариации потока КЛ на энергиях 10^{15} эВ и более.

Были проведены расчеты для случая $\gamma(0)\beta_y(0) = -100$ при неизменных прочих параметрах задачи на интервале времени $\tau \leq \tau_m$. Результаты расчетов для начальных фаз в интервале $-3.1 \leq \Psi(0) \leq 3.1$ с шагом по фазе $\delta\Psi(0) = 0.1$ показали, что для 11 значений начальных фаз на интервале $\tau \leq \tau_m$ захват протонов волной имеет место. В качестве примера на рис.2 представлена зависимость времени захвата τ_c от значения $\Psi(0)$. Как и на рис.1 синие области обозначают отсутствие захвата протона волной на интервале времени $\tau \leq \tau_m$, белые – наличие захвата частиц в потенциальную яму.

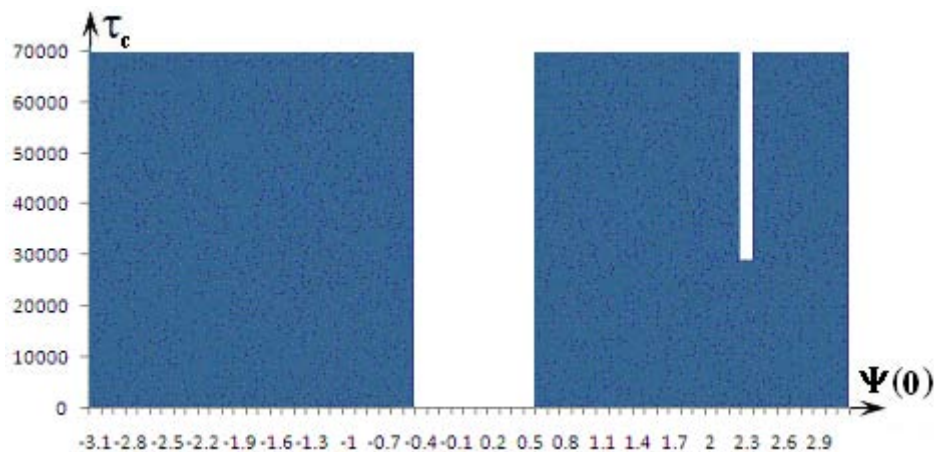


Рис. 2. Зависимость времени захвата τ_c от значения фазы волны $\Psi(0)$ при $\gamma(0)\beta_y(0) = -100$

Как видим, число благоприятных для реализации серфотронного ускорения релятивистских протонов начальных фаз $\Psi(0)$ несколько уменьшилось (11 значений). Для захваченных частиц время расчетов можно увеличить до $5 \cdot 10^6$, но они остаются захваченными. Согласно проведенным расчетам графики релятивистского фактора протона γ , поперечных компонент импульса $\gamma\beta_y$, $\gamma\beta_x$ хорошо аппроксимируются линейными функциями т.е. темпы их роста практически постоянны и соответствуют выходу поперечных скоростей на указанные выше асимптотики. Траектория захваченного протона на перпендикулярной к магнитному полю плоскости также близка к прямолинейной. На фазовой плоскости (Ψ , $d\Psi/d\tau$) траектория изображающей точки является спиралевидной, с особой точкой типа устойчивый фокус (дно эффективной, нестационарной, потенциальной ямы). График фазы $\Psi(\tau)$ показывает осцилляции амплитуда которых по мере ускорения уменьшается, а период возрастает.

Заключение

В настоящей работе на основе численных расчетов исследована динамика захвата и последующего сильного серфотронного ускорения протонов с релятивистскими начальными энергиями электромагнитной волной, распространяющейся в космической плазме поперек слабого магнитного поля. Амплитуда электрического поля волны превышала на 50 % пороговое (для реализации серфотронного механизма ускорения) значение. Задача сведена к численному анализу нелинейного уравнения второго порядка для фазы волны на траектории частицы $\Psi(\tau)$.

Рассмотрены зависимость динамики компонент импульса, скорости и энергии частицы, структуры фазовой плоскости (Ψ , $d\Psi/d\tau$), а также времени захвата заряда волной τ_c от величины начальной фазы $\Psi(0)$. Установлено, что примерно для 20 % значений $\Psi(0)$ захват протонов волной в эффективную потенциальную яму происходит сразу либо спустя некоторое, сравнительно небольшое время. На интервале времени численного счета $\tau \leq \tau_m = 7 \cdot 10^4$ наблюдается ультрарелятивистское ускорение частиц с относительно небольшим разбросом по приобретаемым ими энергиями. Это ускорение и наблюдается на интервалах счета до $5 \cdot 10^6$. По оценкам серфотронный механизм ускорения электромагнитными волнами в плазме местных межзвездных облаков может обеспечить ускорение протонов с начальной энергией порядка десятков ГэВ до уровня 10^{15} эВ и более [10].

Выше описаны варианты серфотронного ускорения протонов с отрицательным начальным значением импульса частицы вдоль волнового фронта (ось y). В обратном случае — положительных начальных значений импульса протона вдоль волнового фронта происходит следующее. Частица с $\beta_x \approx \beta_p$ захватывается волной и начинает тормозиться уменьшая компоненту скорости β_y . Оставаясь захваченной частица меняет знак компоненты скорости β_y на отрицательный и только затем происходит серфотронное ускорение.

Для больших начальных энергий частиц на этапах торможения-ускорения для релятивистского фактора заряда $\gamma(\tau)$ получаются линейные аппроксимации.

Список литературы:

1. Katsouleas, N., J. M. Dawson. Unlimited electron acceleration in laser-driven plasma wave. *Physical Review Letters*, 1983, v. 51, № 5, pp. 392-395.
2. Грибов, Б. Э., Р. З. Сагдеев, В. Д. Шапиро, В. И. Шевченко. О затухании плазменных волн и ускорении резонансных электронов в поперечном магнитном поле. *Письма в ЖЭТФ*, 1985, т.42, вып.2, с. 54-58.
3. Ерохин, Н. С., А. А. Лазарев, С. С. Моисеев, Р. З. Сагдеев. Увлечение и ускорение заряженных частиц замедленной волной в неоднородной плазме. *ДАН СССР*, 1987, т. 295, № 4, с. 849-852.
4. Ерохин, Н. С., С. С. Моисеев, Р. З. Сагдеев. Релятивистский серфинг в неоднородной плазме и генерация космических лучей. - *Письма в Астрономический журнал*, 1989, т.15, № 1, с.3-10.
5. Кичигин, Г.Н. Серфотронный механизм ускорения космических лучей в галактической плазме. – *ЖЭТФ*, 2001, т. 119, вып. 6, с. 1038-1049.
6. Dieckmann, M. E., P. K. Shukla. *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2006. V. 48. Issue 10. P. 1515.
7. Нейштадт, А. И., А. В. Артемьев, Л. М. Зеленый, Д. Л. Вайнштейн. *Письма в ЖЭТФ*. 2009. Т.89.Вып. 9. с. 528.
8. Ерохин, Н. С., Н. Н. Зольникова, Е. А. Кузнецов, Л. А. Михайловская. Динамика релятивистского ускорения заряженных частиц в космической плазме при серфинге на пакете электромагнитных волн. *Вопросы атомной науки и техники, сер. Плазменная электроника*, № 4(68), с. 116-120, 2010.
9. Erokhin, N. S., N. N., Zolnikova, R. Shkevov, L. A. Mikhailovskaya, P. Trenchev. *C.R. Acad. Bulg. Sci. (Proceedings BAS)*, 60, 2007, No 9, p.p. 967-972.
10. Лозников, В. М., Н. С. Ерохин, Л. А. Михайловская. *Космические исследования*. 2013. Т.51. № 3. с.191-203.
11. Shkevov, R., N. S. Erokhin, L. A. Mikhailovskaya, N. N. Zolnikova. *JASTP*. 2013. V.99. pp. 73-77.