

АНАЛИЗ НА ДИНАМИКАТА НА СЪРФАТРОННО УСКОРЕНИЕ НА СЛАБОРЕЛАТИВИСТКИ ЕЛЕКТРОНИ ОТ ВЪЛНОВИ ПАКЕТ В КОСМИЧЕСКА ПЛАЗМА

Румен Шкевов¹, Николай Ерохин², Владимир Лозников², Надежда Зольникова²,
Людмила Михайловская²

¹Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките

²Институт за космически изследвания, Руска академия на науките
e-mail: shkevov@space.bas.bg, nerokhin@mx.iki.rssi.ru

Ключови думи: сърфатронно ускорение, потенциална яма, космическа плазма, пакет от електромагнитни вълни, фаза на вълната, траектория на частицата, захващане на частицата.

Резюме: Представено е изследване на сърфатронното ускорение на електрони със слаборелативистка начална енергия от пакет от електромагнитни вълни в космическа плазма на базата на числени експерименти. Нелинейното нестационарно диференциално уравнение от втора степен за фазата на вълната на траекторията на частицата бе решавано точно, прилагайки набор от начални параметри и различни начални фази на вълновия пакет. Проведен е анализ на последователните начални етапи на ускоряването на електроните и динамиката на техните траектории. Проследен е естественият ход на етапите на ускоряване на електрона - незахваната частица, периодът непосредствено преди улавянето, моментът на улавяне, динамиката на частиците в потенциалната яма. Разгледана е времевата динамика на свободна частица в слабо външно магнитно поле, периода преди улавянето и времето на улавяне от вълновия пакет в режим на сърфиране за различни фази на вълновия пакет. Показани са резултатите от числените пресмятания, които са представени в графична форма за различните етапи от сърфатронното ускоряване на електрона. Обсъдени са началните етапи при ускоряване на частици от пространствено локализиран вълнов пакет. Направени са заключения за динамиката на частиците при силно сърфатронно ускорение в космическа плазма.

DYNAMICS ANALYSIS OF THE LOW RELATIVISTIC ELECTRONS SURFATRON ACCELERATION BY A WAVE PACKET IN SPACE PLASMA

Rumen Shkevov¹, Nikolay Erokhin², Vladimir Loznikov², Nadezhda Zolnikova²,
Ludmila Mikhailovskaya²

¹Space and Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

²Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: shkevov@space.bas.bg, nerokhin@mx.iki.rssi.ru

Key words: surfatron acceleration, potential well, particles trajectory, space plasmas, electromagnetic wave packet, particles trajectory, particles capture.

Abstract: A study of the surfatron acceleration of low relativistic electrons by a packet of electromagnetic waves in space plasma, based on numerical experiments, is presented. The research is conducted thru the exact solution of second order nonlinear nonstationary differential equation for the wave packet phase on the particle's trajectory for several initial sets of parameters. An analysis of a sequence of stages for the electrons acceleration and their trajectory dynamics is carried out. The natural course of all electron acceleration stages is alternately tracked out - untrapped particle, pre capturing period, trapping moment, particle dynamics in the potential well and finally, electron's fly out zone. The temporal dynamics of an untrapped particle in a weak external magnetic field, pre capturing period and trapping time by the wave packet in surfing mode for a set of initial particle parameters and different wave packet phases is studied. Special attention is paid on the particle dynamics and their trajectories. Numerical calculations results and figures for different stages of the electron's surfatron acceleration are shown. The initial stages of particles surfatron acceleration by a spatially

localized wave packet in space plasma are discussed. Conclusions about particle dynamics in the course of strong surfatron acceleration in space plasma were done.

Въведение

На базата на цифрови експерименти е проведено едно теоретично изследване на резонансни взаимодействия от типа вълна-частица протичащи в естествените условия на космическата плазма. Особено внимание е отделено на динамиката на ускоряването на електрони със слаборелативистка начална енергия от пространствено локализиран пакет от електромагнитни вълни в космическа плазма, при наличие на слабо напречно на разпространението на пакета, постоянно магнитно поле. Изучавано е силното ускоряване на електрони от електромагнитни вълни и в частност сърфатронното ускорение на заредени частици, разглеждано преди в работите [1–5]. В работите [6–14] са разгледани различни аспекти на това физично явление, като взаимодействия на забавена вълна в нееднородна плазма [6, 7, 13], динамика [8] и взаимодействия с две вълни [9], а в работите [11, 12] е изследвана ефективността на ускоряването на частиците. Публикациите [6, 7, 10, 13-15] разглеждат сърфатронното ускорение на заредени частици е един от възможните механизми за генериране на потоци от ултрарелативистки частици в природата. Разглежданият процес принадлежи към категорията на резонансните процеси на взаимодействие между електромагнитните вълни и заредените частици, в които има относително голямо увеличение на енергията на частиците - нарастването на енергията на частицата е надхвърля 4 порядъка [11, 12]. Едно от основните изисквания за осъществяването на този клас взаимодействие е необходимостта да се изпълни условието за резонанс на Черенков [6, 7, 11, 12].

Този доклад на базата на числени пресмятания се анализира динамиката и протичането на отделните етапи силно сърфатронно ускорение на електрони в космическа плазма в присъствието на слабо постоянно магнитно поле H_0 , а именно - свободна частица, периода непосредствено преди захващането, самото захващане, процеса на ускоряването, периода непосредствено преди неговия край и излитането на електрона от потенциалната яма. Предварително подбраните начални параметри на заредената частица съответстват на нейната слаборелативистка начална енергия. Резултатите от пресмятанията поради ограничения обем страници в този формат са представени само за началните от изброените по-горе етапи и са представени в графичен вид.

Теоретична обосновка и основни уравнения

Нека да разгледаме ускорението на слабо селективните електронни електрони от р-поляризирана електромагнитна вълна с гладка лоренцова обвиваща на амплитудата, разпространяваща се по оста x в магнитоактивна плазма напречно на слабо външно магнитно поле H_0 , което е насочено по оста z [6–14]. Разглеждаме случая, в който честотата на вълната е близка до честотата на горния хибриден резонанс, но се различава от него, когато е изпълнено следното условие: $\omega_{He} / \omega = u < 1$, където ω_{He} е циклотронната честота на нерелативистки електрони на плазма.

При пресмятанията предполагаме, че фазовата скорост на вълната $v_{ph} = \omega / k$ е по-ниска от скоростта на светлината във вакуум и имаме реализиран резонанс Черенков между ускорените частици и електромагнитния пакет. Според проведените по-ранни изчисления [8] задачата за изучаването на силното ускорение на електрони в космическа плазма може да бъде опростен чрез пренебрегване на вихрови компоненти на вълновите полета E_y и H_z , защото влиянието им върху резултата от изчисленията е незначително. В този случай електрическото поле на вълната може да се счита за електростатично, т.е. $E_x(x, t) = A \cos \Psi$, където $\Psi = \omega_0 t - k_0 x$, където ω_0 е носещата честота на пакета, $k_0 = k(\omega_0)$ вълновия вектор, а $A(x, t)$ е функцията определяща гладката лоренцова обвиваща на амплитудата на пакета.

Нека разгледаме релативистките уравнения за импулса \mathbf{p} за движението на ускоряемия електрон [6–14]:

$$\begin{aligned} dp_x / dt &= -e E_x - e v_y (H_0 + H_z) / c, \\ (1) \quad dp_y / dt &= -e E_y + e v_x (H_0 + H_z) / c \\ dp_z / dt &= 0, \quad p_z = \text{const.} \end{aligned}$$

За удобство на записите въвеждаме безразмерните променливи и параметри $\beta = v/c$ - скорост на електрона, $\sigma = e E_0/m c \omega_0$ - амплитуда на вълната, $\tau = \omega_0 t$, $\xi = \omega x/c = k_0 x$ - безразмерна координата, $\gamma = 1/(1 - \beta^2)^{1/2}$ - релативистки фактор на частицата, $u = \omega_{He} / \omega_0$, $\omega_{He} = e H_0 / m c$ нерелативистка циклотронна честота на електроните, E_0 - амплитуда на електрическото поле в центъра на вълновия пакет. Захващането на заредени частици в режим на сърфатронно ускорение е възможно, когато амплитудата на електрическото поле - една от компонентите на електромагнитната вълна, е над определена критична стойност, т.е. за $\sigma = e E_0/m c \omega > u \gamma_p = u/(1 - \beta_p^2)^{1/2}$. Необходимо е да обърнем внимание, че безразмерната скорост на заредената частица може да бъде изразена с $\beta_x = \beta_p [1 - (d\Psi/d\tau)]$, $\beta_p = \omega_0/c k_0$, импулса на електрона е равен на $\mathbf{p} = m c \gamma \boldsymbol{\beta}$, а показателя на пречупване на плазмата $N = c k / \omega$ е свързан с фазовата скорост на вълната с израза $\beta_p = 1/N$.

Използвайки горните изрази, нека да запишем релативистките уравнения за движение за импулса на ускоряемия електрон в безразмерен вид [8, 11, 12] :

$$\begin{aligned} d(\gamma \beta_x) / d\tau &= -\Lambda \cos \Psi - u \beta_y \\ (2) \quad \gamma \beta_z &= \text{const} \equiv h \\ d(\gamma \beta_y) / d\tau &= u \beta_x \\ d\gamma / d\tau &= -\Lambda \beta_x \cos \Psi, \end{aligned}$$

където $\Lambda = \sigma / \{ 1 + [(\tau - \Psi)/\rho]^2 \}$ е лоренцовата обвиваща на амплитудата на вълновия пакет, параметъра за ширината на вълновия пакет ρ се смята достатъчно голям за реализация на ултарелативисткото ускорение на захванати частици при $\rho = \omega_0 L/c \sim (10^4 \div 10^6)$, където $2L$ е характерната ширина на вълновия пакет. Използвайки (2) можем да намерим интегралите за движение на ускоряемия електрон. Подробно извеждане на уравнението (3) може да бъде намерено в работите [8, 11, 12]. Отчитайки всички полагания можем да запишем крайния вид на нелинейното нестационарно уравнение от втори порядък за фазата на вълната на траекторията на частицата:

$$(3) \quad d^2 \Psi / d\tau^2 - [\sigma (1 - \beta_x^2) / \gamma \beta_p] \cos \Psi - (u \beta_y / \gamma \beta_p) = 0.$$

На основата на численото решаване на нелинейното, нестационарно уравнение (3) за фазата на вълновия пакет $\Psi(\tau) \equiv \Psi[x(\tau), \tau]$ на носещата честота е изследвано захващането на слаборелативистки електрони в режим на силно сърфатронно ускорение от пакет електромагнитни вълни [8, 11, 12].

При решаването на (3) началните данни вземаме във вида $\Psi(0) = \Psi_0$, $\Psi_\tau(0) = a$. Съответно имаме $\beta_x(0) = \beta_p (1 - a)$. Нека да въведем компонентите за безразмерния импулс на частицата $g_x = \gamma \beta_x$, $g_y = \gamma \beta_y$. За достатъчно големи времена на ускоряване на електрона численото решение трябва да излиза на следите асимптотични значения за компонентите на скоростта и релативисткия фактор на частицата $\gamma(\tau) \approx u \beta_p \gamma_p \tau$, $\beta_x \approx \beta_p$, $\beta_y \approx 1/\gamma_p$.

По такъв начин темпът (скоростта) на ускорението е постоянен и не зависи от амплитудата на вълната σ , определяща асимптотичното значение на функцията $\sigma < \beta_x \cos \Psi >$.

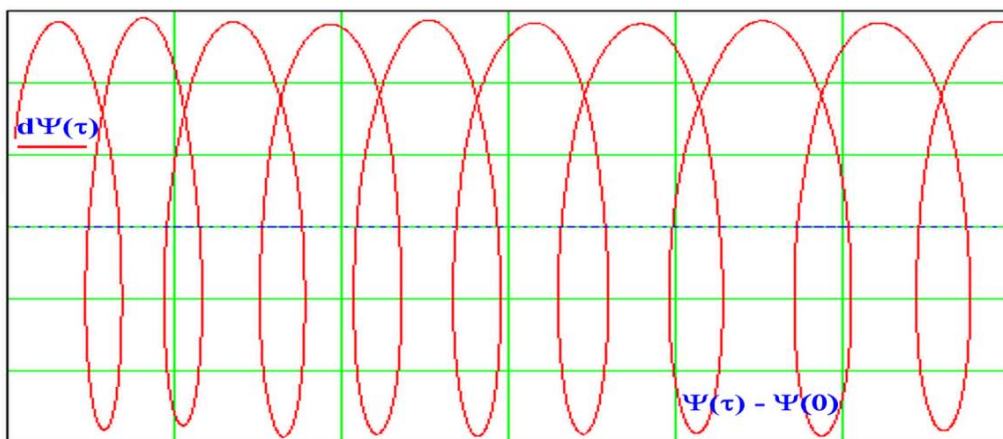
Резултати от числените пресмятания

В настоящия раздел са представени в графичен вид една малка част от получените резултати при провеждането на цифрови експерименти за поведението на частицата. Основната насоченост в случая е изследване на динамиката на траекторията и компонентите на скоростта на частицата в различните етапи на взаимодействия с вълновия пакет при сърфатронен механизъм на ускоряване. Нека дефинираме етапите на взаимодействията вълна - частица, като в дадения случай под вълна разбираме пакет от електромагнитни вълни отговарящ на условията описани в раздела „Теоретична обосновка и основни уравнения“, а под заредена частица - електрон. Целия процес на сърфатронно ускоряване може да бъде разделен на седем основни пространствено-времеви състояния на системата вълна-частица, като протичащите взаимодействия могат да бъдат разделени на следните основни седем етапа:

- Етап 1 - (E1) – движение на вълновия пакет и частицата без наличие на каквото и да са взаимодействия между тях. Частицата извършва циклотронно въртене в слабо постоянно магнитно поле H_0 .
- Етап - (E2) – вълновия пакет и частицата се движат в общо пространство и има наченки на взаимодействия между тях, които не водят до захващането и. Това е периода далеч преди захващането на частицата, характеризиращ се с изменено циклотронно въртене на траекторията на частицата, повлияно от силата, посоката и типа на протеклите взаимодействия.
- Етап 3 - (E3) – периода непосредствено преди улавянето на частицата в потенциалната яма. Силно изменена траектория, подчинена на улавянето на частицата.
- Етап 4 - (E4) – интервала на самото захващане на частицата. Циклотронното въртене преминава в линейно движение на частицата.
- Етап 5 - (E5) – зона на същинското сърфатронно ускоряване на частицата, при изпълнени условия за резонанса на Черенков. Линейно движение и ускорение на частицата, намираща се вътре в движещата се със скоростта на вълновия пакет потенциална яма.
- Етап 6 - (E6) – периода непосредствено преди излитането на частицата от потенциалната яма. Край на зоната за ускоряване на частицата.
- Етап 7 - (E7) – частицата е излетяла извън потенциалната яма и е свободна. Движението преминава от линейно-ускорително обратно в циклотронно въртене без последващи взаимодействия между вълновия пакет и частицата.

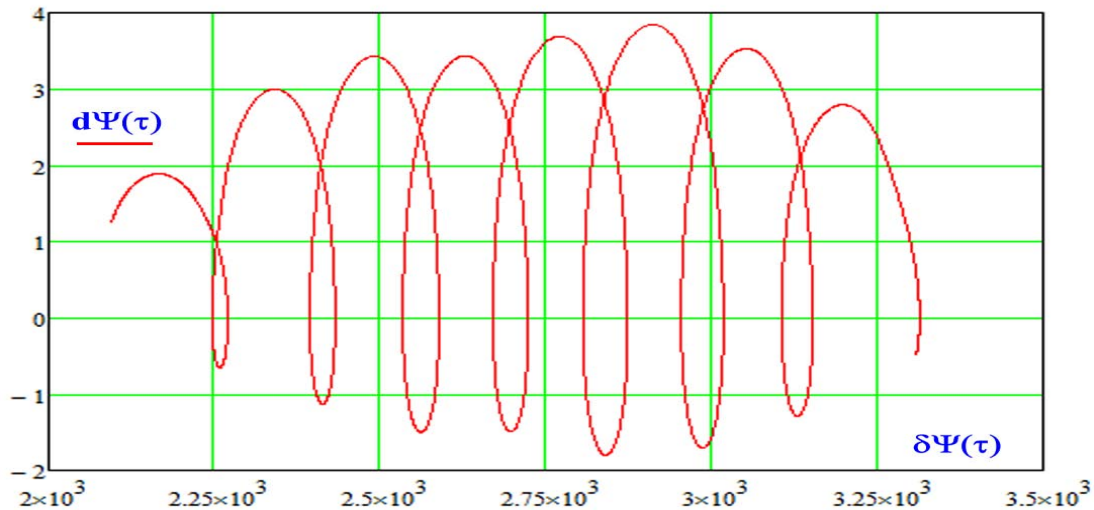
Проведения анализ е направен с помощта на следния набор от начални параметри, като за различните величини са приети следните значения: $u = 0.20$; $\beta = 0.35$; $h = 0.30$; $g = 0.4$; $\rho = 70000$, $\Psi_0 = \Psi(0) = 0$, $a = 0$; $\sigma = u \gamma_p = 1.65 \sigma_c$. Положено е $\Psi(0) = 0$, което съответства на началната позиция на частицата в центъра на вълновия пакет. Оценката на началния релятивистки фактор на електрона дава величината $\gamma(0) = 1.194$, което съответства на начална енергия на електрона $E_{inl} = 0.61 \text{ MeV}$. За пресмятията и получените фигури са използвани следните варианти за начална фаза на вълновия пакет $\Psi_0 = -2.4$, $\Psi_0 = -2.3$ и $\Psi_0 = -1.9$.

Нека започнем анализа на динамиката на движението на електрона от етап (E1). Числените експерименти показват, че е относително рядко явление да няма никакви взаимодействия между вълновия пакет и частицата, така че да се наблюдава несмутено циклотронно въртене на електрона, каквото е показано на Фиг. 1. В случая графиката е получена чрез функцията $\Phi(\tau) = d\Psi/d\tau = d\Psi$ отразяваща изменението на фазата на вълновия пакет Ψ в зависимост от безразмерното време τ . Почти идеалната крива отговаря на циклотронно въртене на електрона в полето на постоянното външно магнитно поле.



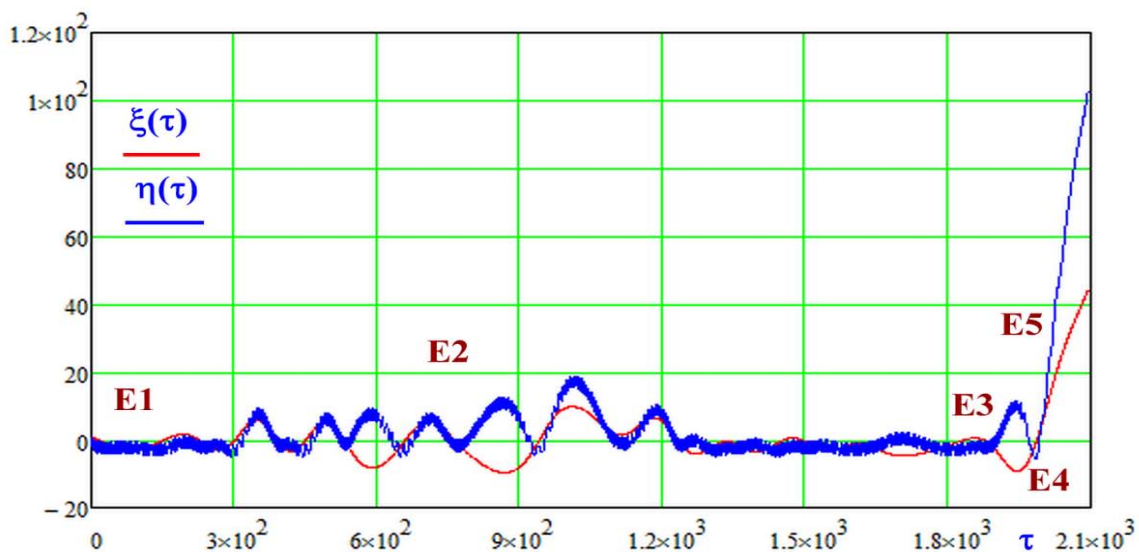
Фиг. 1. Етап 1 - отсъствие на взаимодействия между вълновия пакет и частицата. Частицата извършва циклотронно въртене в слабо постоянно външно магнитно поле H_0 . Почти идеалната крива е много близка до траекторията на електрона при циклотронното въртене.

Като правило, винаги се наблюдават някакви взаимодействия, които дори и много слаби, водят до изменения в енергията на частицата променящи нейната траектория, което в крайна сметка води до изменено движение, а от там и до несиметрична траектория на електрона, която е показана на Фиг. 2.



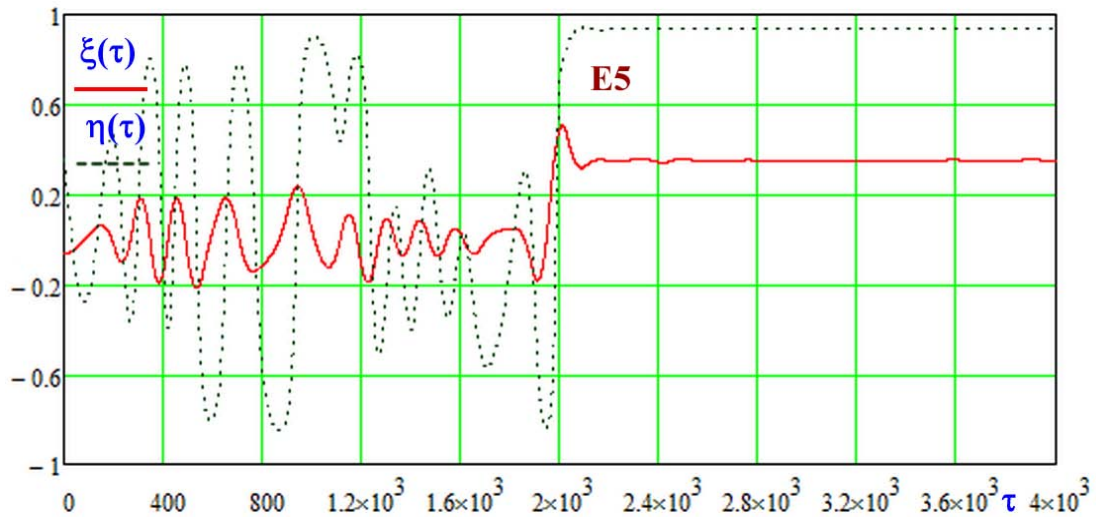
Фиг. 2. Етап 2 - изменена траектория на електрон с начална енергия $E_{INI} = 0.61$ MeV, в резултат на възникнали взаимодействия с вълновия пакет

Нека разгледаме някои параметри, характерни за динамиката на движението и траекторията на слабо-релятивистки електрони с начална енергия 0.61 MeV в зоните E1 – E5. В случая са показателни преместването на частицата по посока на разпространение на вълновия пакет, перпендикулярно на вектора на магнитното поле $H_0 - \xi(\tau) = \omega x / c$ и преместването по направление на вълновия фронт $\eta(\tau) = \omega x / c$, както и компонентите на скоростите на частицата, β_x , β_y и β_z . На Фиг. 3 са представени кривите на $\xi(\tau)$ и $\eta(\tau)$. На фигурата ясно се очертават и зоните E1 – E5. Получените криви са при проведен числен експеримент за резонансно ускоряване на електрон при сърфатронно ускорение с пакет от електромагнитни вълни с $E_{INI} = 0.61$ MeV, $\Psi_0 = -2.3$ момент на захващане $\tau_c = 1791$ и момент за край на зоната за укоряване $\tau_d = 57970$.



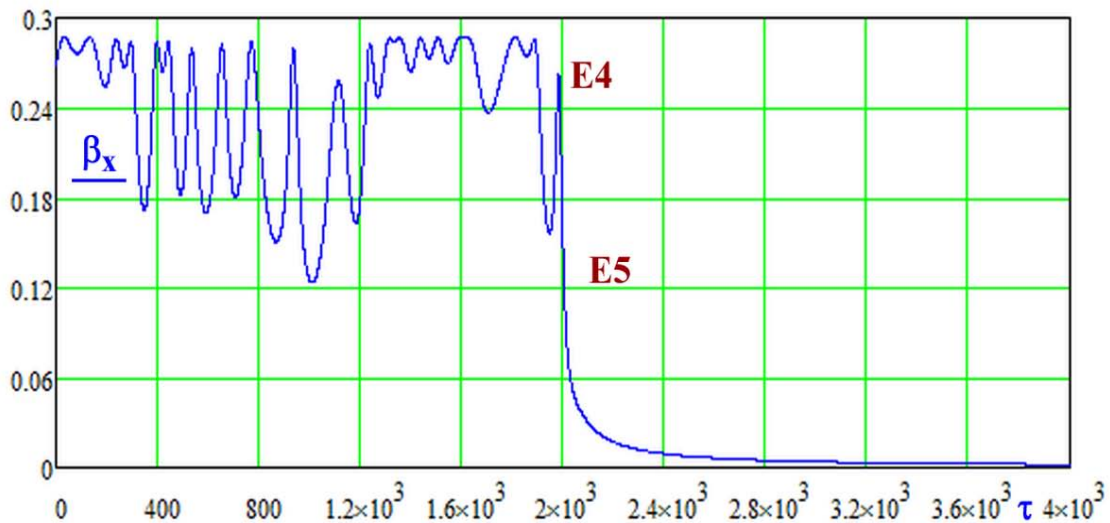
Фиг. 3. Траектория на електрон в направленията $\xi(\tau)$ и $\eta(\tau)$. На фигурата ясно се очертават етапите E1-E5.

На Фиг. 4 са представени компонентите на скоростта на частицата β_x , β_y при условията на гореописания числен експеримент. На фигурата са различни отделните зони E1–E5. В случая се наблюдава очакваното поведение, а именно – достигане на асимптотичните стойности на компонентите скоростта на частицата след захващането на електрона - $\beta_x \approx \beta_p \approx 0.35$ и $\beta_y \approx 1/\gamma_p = 0.937$.



Фиг. 4. Динамика на компонентите на скоростта β_x и β_y на заредена частица със слабо релативистка начална енергия $E_{\text{ини}} = 0.61$ MeV при сърфатронно ускорение. При достигане на етап E5 компонентите се стремят към асимптотичните си значения $\beta_x \approx \beta_p \approx 0.35$ и $\beta_y \approx 1 / \gamma_p = 0.937$.

Компонентата на скоростта на частицата насочена вертикално β_z след преминаване през етапите E1–E4 достига етап E5. В съответствие с теорията изложена по-горе, вертикалната компонента на скоростта трябва да започне да намалява след захващането на частицата, като се стреми към асимптотичното си значение нула, което произтича от закона за съхранение на импулса. На Фиг. 5 е представена графиката за вертикалната компонента на скоростта на частицата β_z .



Фиг. 5. Вертикалната компонента на скоростта на електрона β_z клони към нула след захващането на частицата в съответствие със закона за съхранение на импулса - $\beta_z(\tau_d) = 7.193 \cdot 10^{-5}$.

За β_z можем да запишем $\gamma \beta_z = h$ [3,4], [8]. При сърфатронно ускорение напречната компонента на скоростта $\beta_t = (\beta_x^2 + \beta_y^2)^{1/2}$ нараства непрекъснато. От тук следва, че при нарастване на β_t следва β_z да клони към нула. Според проведените разчети $\beta_z(4000) = 1.95 \cdot 10^{-3}$ и $\beta_z(\tau_d) = 7.193 \cdot 10^{-5}$, което напълно отговаря на теоретичната постановка.

Анализите на проведени по-рано изследвания [6–9], [11, 12] за резонансно сърфатронно ускорение на частици със слабо релативистка начална енергия от пакет електромагнитни вълни в космическа плазма показаха високата ефективност (повече от три порядъка) на този тип взаимодействия. Базирайки се на гореизложеното смятаме, че сърфатронното ускорение на заредени частици е един от възможните механизми за генериране на космични лъчи [15–17].

Заклучение

В настоящата работа е представено едно теоретично изследване проведено чрез точното решаване на нелинейното нестационарно диференциално уравнение от втори порядък за фазата на вълната на траекторията на частицата.

Предложена е схема от 7 етапа, описваща последователността на процесите през които преминава при ускоряване една заредена частица при сърфатронно ускорение.

Проведен е анализ на траекторията и динамиката на компонентите на скоростта на началните етапи от ускоряването на заредена частица в космическа плазма от пакет електромагнитни вълни, разпространяващ се перпендикулярно на слабо постоянно магнитно поле.

Проведените числени експерименти и резултатите получени от тях са представени във вид на графики, нагледно представящи началните етапи при такъв вид резонансни взаимодействия.

Така представените фигури позволяват по-лесно да бъде разбран един от механизмите за ускоряване на заредени частици в естествените условия на космическата плазма.

Детайлното познаване и нагледно представяне на отделните етапи при ускоряване на частици от електромагнитни вълни ще позволи, части от това знание да бъде използвано в бъдеще, при изследване на други механизми за ускоряване на заредени частици в естествена и синтетична плазма.

Литература:

1. Сагдеев, Р. З., Сб. Вопросы теории плазмы, М.: Атомиздат, 1964.
2. Сагдеев, Р. З., Шапиро В.Д. Влияние поперечного магнитного поля на затухание Ландау. Письма в ЖЭТФ. Т.17, № 7, 1973, с.с. 389–394.
3. Tajima, T. and J. M. Dawson Laser electron accelerator. Phys. Rev. Let. V.43, No.4, 1979, pp. 267–270.
4. Katsouleas, N., J. M. Dawson. Unlimited electron acceleration in laser-driven plasma wave. Physical Review Letters, V. 51, № 5, 1983, pp. 392-395.
5. 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, т. 42, № 2, 1985, с.с. 54–58.
6. Ерохин, Н. С., А. А. Лазарев, С.С. Моисеев, Р.З. Сагдеев. Увлечение и ускорение заряженных частиц замедленной волной в неоднородной плазме. ДАН СССР, т. 295, № 4, 1987, с.с. 849–852.
7. Ерохин, Н. С., С.С. Моисеев, Р.З. Сагдеев. Релятивистский серфинг в неоднородной плазме и генерация космических лучей. Письма в Астрономический журнал, т.15, № 1, 1989, с.с.3–10.
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 электр., № 4(68), 2010, с.с. 116–120.
9. Erokhin, N. S., N. N., Zolnikova, R. Shkevov, L. A. Mikhailovskaya, P. Trenchev. On the charged particles surfatron acceleration in space plasmas. C.R. Acad. Bulg. Sci., 60, № 9, 2007, pp. 967–972.
10. Кичигин, Г. Н. Серфотронный механизм ускорения космических лучей в галактической плазме. ЖЭТФ, т. 119, № 6, 2001, с.с. 1038–1049.
11. Shkevov, R., N. S. Erokhin, L. A. Mikhailovskaya, N. N. Zolnikova. Numerical investigation of the surfatron acceleration efficiency of charged particles by wave packets in space plasma. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, JASTP, V. 99, 2013, pp. 73–77.
12. Shkevov, R., N. S. Erokhin, V. M. Loznikov, N. N. Zolnikova, L. A. Mikhailovskaya. Surfatron acceleration of weakly relativistic electrons by electromagnetic wave packet in space plasma. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, JASTP, Volume 177, October 2018, p.p. 266–273.
13. Dieckmann, M.E., P.K. Shukla. Electron surfing acceleration by the electron two-stream instability in a weak magnetic field. Plasma Phys. Control. Fusion, V. 48, Issue 10, 2006, pp. 1515–1530.
14. Нейштадт, А. И., А. В. Артемьев, Л. М. Зеленый, Д. Л. Вайнштейн. Серфотронное ускорение в электромагнитных волнах с малой фазовой скоростью, Письма в ЖЭТФ. т. 89, вып. 9, 2009, с.с. 528–534.
15. Loznikov, V. M., N. S., Erokhin, L. A. Mikhailovskaya. An explanation of variable peculiarities in spectra of electrons and positrons of cosmic rays. Cosmic Research, V.51 (3), 2013, pp. 177–188.
16. Loznikov, V. M., Erokhin, N.S., Zolnikova, N. N. and Mikhailovskaya, L. A. On the reason for the kink in the rigidity spectra of cosmic ray protons and helium nuclei near 230 GV. Plasma Physics Reports, V. 42 (7), 2016, pp. 658–665,
17. Loznikov V. M., N. S. Erokhin, N. N. Zolnikova, L. A. Mikhailovskaya. Surfatron Accelerator in the Local Interstellar Cloud. Plasma Physics Reports, 43 (1), pp. 51–61, 2017.