

## **РЕЗУЛТАТИ ОТ ЧИСЛЕНОТО МОДЕЛИРАНЕ НА УСКОРЯВАНЕТО НА ЗАРЕДЕНИ ЧАСТИЦИ ВЪВ ВЪНШНО ЕЛЕКТРИЧЕСКО ПОЛЕ**

**Стилиян Луков<sup>1</sup>, Румен Шкевов<sup>1</sup>, Николай Ерохин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт за космически изследвания – БАН,*

<sup>2</sup>*Институт космических исследований – РАН*

*e-mail: slukov@space.bas.bg*

**Абстракт:** Изследван е процесът на ускоряване на заредени частици в космическата плазма и, по-специално, влиянието на радиационната сила на триене върху това ускоряване. Получени са числени решения на уравнението на движение на частиците с добавъчен член, отчитащ реакцията на излъчването. Резултатите от численото моделиране при отчитане на радиационната сила на триене се сравняват с тези, получени при пренебрегване на тази сила. Проведените изследвания могат да намерят приложение при създаване на модели на процесите на ускоряване на заредени частици с високи енергии в космическата плазма.

**Ключови думи:** Ускоряване на заредени частици, уравнение на движението, електрически полета.

## **NUMERICAL CALCULATIONS MODELLING RESULTS OF PARTICLE ACCELERATED MOVEMENT IN THE EXTERNAL ELECTRICAL FIELD**

**Stiliyan Lukov<sup>1</sup>, Rumen Shkevov<sup>1</sup>, Nikolay Erokhin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Space Research Institute – Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria*

<sup>2</sup>*Space Research Institute – Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: slukov@space.bas.bg*

**Abstract:** Acceleration process of charged particles in space plasma is discussed, taking into account the radiation reaction force. Numerical calculations of the movement equations including the radiation reaction force term are made. The results of the obtained movement parameters are compared with those without radiation reaction force factor and they are shown in the drawings. The results can be applied in space plasma and high energy particles investigations.

**Key words:** Charged particles acceleration, movement equation, electrical fields.

### **Въведение**

Изясняването на механизмите на ускоряване на заредените частици в космическото пространство има важно значение за обяснение на ултрависоките енергии на тези частици, регистрирани от космическите сонди. Следва да се отбележи, че в тази област са предложени и се изследват множество механизми, но засега няма окончателно решение на проблема. По всяка вероятност, следва да се приеме, че на практика се реализират множество механизми на ускоряване на заредените частици, като всеки един от тях действа в съответните условия и в съответната скала от енергии. Тук ние изследваме един сравнително прост механизъм на ускоряване на заредени частици – под действие на външно постоянно електрическо поле. При това възниква въпроса за изясняване на ролята на неизбежните ограничаващи фактори, влияещи на темпа на ускоряване на частиците. Един такъв фактор се явява т.н. “радиационна сила на триене”, възникваща като реакция на излъчването на ускорената частица. Обикновено се счита, че влиянието на тази сила е много слабо и на практика може да се пренебрегне. Обаче, както се указва в [1], при релативистки скорости на движение радиационната сила на триене може да стане съществена и даже доминираща върху движението на ускоряваната

частица. В настоящата работа ние целим количествено изясняване на влиянието на реакцията на излъчването върху движението на ускорена частица във външно постоянно електрическо поле. Това става на базата на решаване на уравнението на движение на ултрарелативистката частица, допълнено с член, отчитащ влиянието на радиационната сила на триене.

### 1. Основни уравнения

В наша предишна работа [2] беше изведен приближен израз за тази сила, валиден за случая на постоянно ускорение. В случая, когато външната ускоряваща сила, ускорението и скоростта на частицата са колинеарни, този израз (в система единици SI) има следния вид

$$(1) \quad \vec{F}_R = \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} a^2 v \vec{e}_F,$$

където  $v, a$  – съответно, скорост и ускорение на частицата,  $\vec{e}_F$  - единичен вектор по направление на външната ускоряваща сила.

В дадения случай външната ускоряваща сила се явява постоянното електрическо поле  $\vec{E}$ , за което приемаме, че е насочено по направление на оста  $X$

$$(2) \quad \vec{E} = E_0 \vec{e}_X, \quad E_0 = const.$$

Тогава уравнението на движение на ускоряваната частица в релативистка форма има вида

$$(3) \quad \frac{d}{dt} \left[ \frac{m_0 v}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \right] + \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \left[ \frac{d}{dt} \left( \frac{v}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \right) \right]^2 \left( \frac{v}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \right) = eE_0,$$

където  $m_0, e$  - съответно, релативистката маса и електрически заряд на частицата.

Тъй като при отсъствие на радиационната сила на триене ускорението на частицата ще бъде постоянно, можем да положим

$$a = \frac{d}{dt} \left( \frac{v}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \right) = \frac{eE_0}{m_0} = const.$$

Замествайки в (3) получаваме

$$(4) \quad \frac{d\gamma}{dt} + \alpha\gamma = \sigma,$$

където е означено

$$(5) \quad \gamma = \frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad \beta = \frac{v}{c},$$

$$(6) \quad \alpha = \frac{e^4 E_0^2}{6\pi\epsilon_0 m_0^3 c^5}; \quad \sigma = \frac{eE_0}{m_0 c}.$$

Горните константи имат размерност  $[1/s]$  в системата SI.

Уравнението (4) описва движението на частица под действие на външна ускоряваща сила при наличие на съпротивително триене. В дадения случай «триенето» се създава от реакцията на излъчването на ускорено движещата се частица.

От (6) се вижда, че радиационното триене се оказва пропорционално на квадрата на напрегатостта на външното поле, което съответствува на израза за радиационната сила в релативистичния случай, получен в [1].

Както е известно, уравнението (6) има аналитично решение

$$(7) \quad \gamma(t) = \frac{\sigma}{\alpha} - C_1 \exp(-\alpha t).$$

Тук  $C_1$  е интеграционна константа, която можем да определим от началното условие – при  $t = 0$  имаме  $\gamma(t) = 0$ , откъдето получаваме  $C_1 = -\frac{\sigma}{\alpha}$ .

След заместване в (7) получаваме

$$(8) \quad \gamma(t) = \frac{\sigma}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha t)].$$

Разлагайки експонентата в ред, можем да получим

$$(9) \quad \gamma(t) = \sigma \left( t - \frac{1}{2} \alpha t^2 + \frac{1}{6} \alpha^2 t^3 - \dots \right).$$

В нулево приближение, когато се запазва само първия член на разлагането, имаме

$$(10) \quad \gamma_0(t) = \sigma t.$$

По този начин, изразът (9) дава решението на уравнението на движение на частицата с отчитане на радиационната сила на триене, докато изразът (10) дава решението в случая, когато тази сила се пренебрегва.

За изясняване на влиянието на радиационното триене естествено е да се въведе функция на разликата

$$(11) \quad \Delta\gamma(t) = \frac{\gamma_0(t) - \gamma(t)}{\gamma_0(t)},$$

или в проценти

$$(12) \quad \Delta\gamma(t)\% = 100 \frac{\gamma_0(t) - \gamma(t)}{\gamma_0(t)}.$$

Въпреки, че релятивисткият фактор  $\gamma(t)$  дава представа за влиянието на радиационната сила на триене върху ускоряването на заредената частица, полезно е да се разгледа и изменението на относителната скорост  $\beta(t) = \frac{v(t)}{c}$  на частицата в хода на ускорението на същата.

За тази цел от (5) правим обратното преобразуване и получаваме функционалните уравнения

$$(13) \quad \beta(t) = \frac{\gamma(t)}{\sqrt{1 + [\gamma(t)]^2}}; \quad \beta_0(t) = \frac{\gamma_0(t)}{\sqrt{1 + [\gamma_0(t)]^2}},$$

а също така уравнението на разликата

$$(14) \quad \Theta(t) = \frac{\beta_0(t) - \beta(t)}{\beta_0(t)},$$

или в проценти

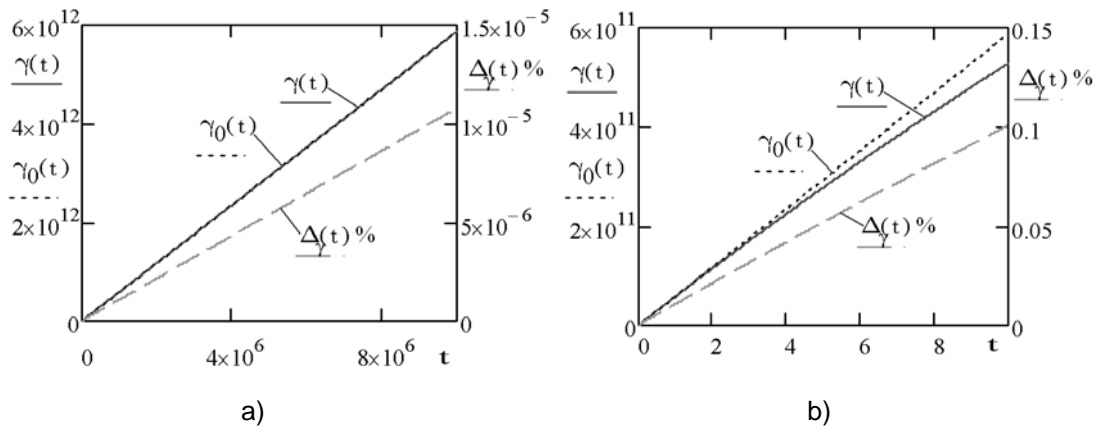
$$(15) \quad \Theta(t)\% = 100 \frac{\beta_0(t) - \beta(t)}{\beta_0(t)}.$$

## 2. Числени резултати

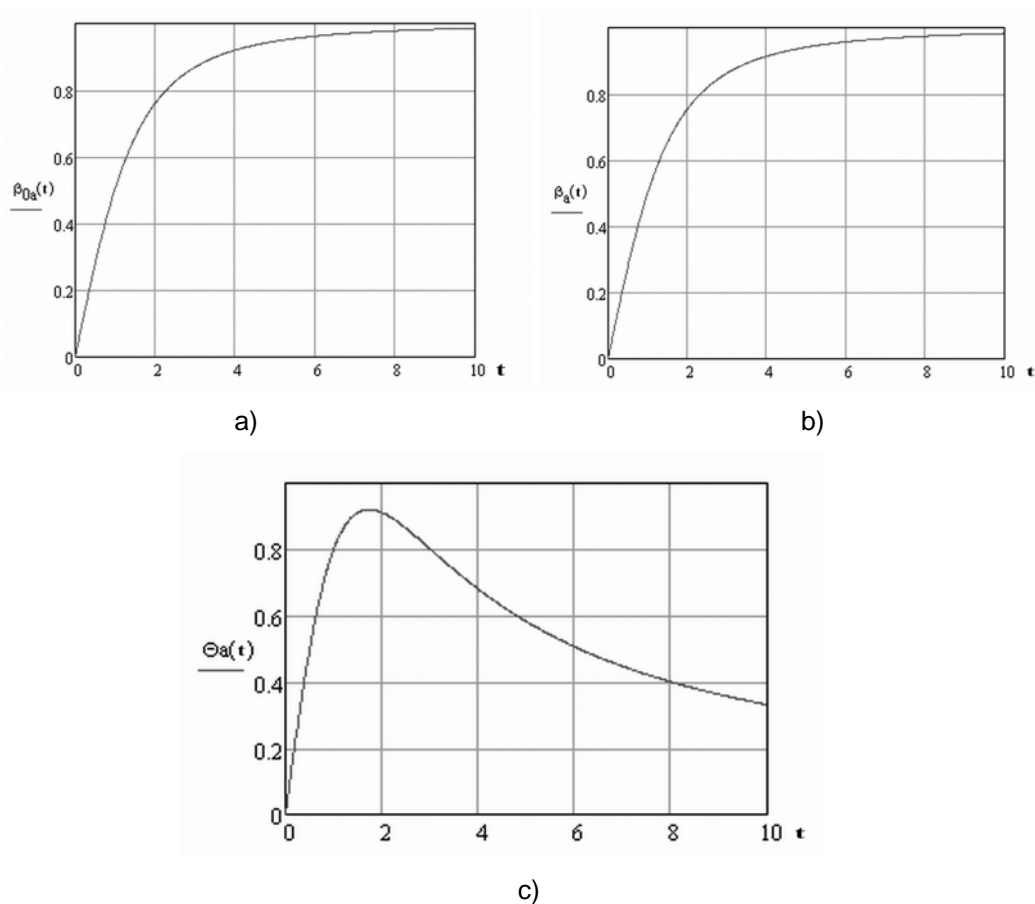
За провеждане на числения “експеримент” с цел количествена оценка на влиянието на радиационната сила на триене върху ускорението на заредената частица под действие на външно постоянно електрическо поле, от нас беше използвана компютърната програма “MATCAD”. При това, в качеството на аргумент при решаването на основните уравнения беше взето реалното време  $t[s]$ , а в качеството на параметър – напрегатостта на външното постоянно и еднородно електрическо поле  $E_0[V/m]$ . Всички размерни величини са изразени в система мерни единици SI.

На Фиг.1а, b са представени графически расчетните зависимости на величините  $\gamma(t)$ ,  $\gamma_0(t)$ ,  $\Delta\gamma\%(t)$ , съответно, при сравнително малки ( $\approx 1000V/m$ ) и при големи ( $\approx 10^8V/m$ ) напрегатости на външното електрическо поле.

На Фиг.2а, б, с са представени, съответно, получените зависимости на величините  $\beta(t)$ ,  $\beta_0(t)$ ,  $\Theta\%(t)$  при големи напрегнатости на ускоряващото електрическо поле ( $\approx 10^8 V/m$ ).



Фиг. 1. Разчетни стойности на релативисткия фактор  $\gamma(t)$ , съответно, а) при относително малка ( $E_0 \approx 1000V/m$ ) и б) при относително голяма ( $E_0 \approx 10^8V/m$ ) напрегнатост на външното електрическо поле



Фиг. 2. Разчетни стойности на а)  $\beta_0(t)$ , б)  $\beta(t)$  и с)  $\Theta(t)$  при относително относително голяма ( $E_0 \approx 10^8V/m$ ) напрегнатост на външното електрическо поле

### 3. Обсъждане на резултатите

Получените резултати от числения експеримент показват, че при сравнително малки напрегнатости на външното ускоряващо електрическо поле влиянието на радиационната сила на триене върху движението на заредената частица е нищожно дори при много големи времена на ускоряване ( $t \geq 10^6 s$ ) (Фиг.1a) и напълно може да се пренебрегне. Но, при големи напрегнатости на полето ( $E_0 \geq 10^8 V/m$ ) (Фиг.1b) влиянието на радиационното триене става вече забележимо дори при сравнително малки времена на ускоряване ( $t \approx 10s$ ). При такива грамадни напрегнатости на ускоряващото електрическо поле частицата много бързо достига ултрарелативистки скорости. По тази причина отличието между относителната скорост на частицата при пренебрегване на радиационното триене  $\beta_0(t)$  (Фиг.2a) и при отчитане на същото  $\beta(t)$  (Фиг.2b) е незабележимо. В същото време изчислената относителна разлика на тези величини  $\Theta\%(t)$  (Фиг.2c) е от порядъка на части от процента. Прави впечатление времевата зависимост на тази величина – започвайки от нула, същата бързо нараства, достига до определен максимум, след което бавно намалява, стремежи се асимптотично към определена постоянна стойност. Този ход на кривата  $\Theta\%(t)$  вероятно е свързан със специфичния характер на изменение на ускорението на частицата – в началните моменти, когато ускорението е голямо, са големи и радиационните загуби, които оказват влияние и на скоростта на частицата, а впоследствие, когато скоростта на последната достига релативистки стойности, ускорението намалява, в резултат на което падат и радиационните загуби. Разбира се, за точното количествено изясняване на тази зависимост е необходимо да се вземе предвид релативисткият характер на ускорението на частицата и да се изследва числено, което може да бъде обект на следваща работа.

Ще отбележим още, че разглежданите тук характерни стойности на напрегнатостта на ускоряващото поле ( $E_0 \geq 10^8 V/m$ ) и време на ускоряване ( $t \approx 10s$ ), което при субсветлинни скорости на движение на частиците изисква грамадни размери на областта на ускоряване ( $L \approx 10^6 m$ ), поставят естествено въпроса къде на практика биха могли да се реализират тези условия? Според нас, естествена реализация на разглеждания мащаб на величините е възможна в астрофизически условия и, в частност, в близост до радиопулсарите. Съвременните модели на тези обекти предполагат, че в тяхната околност могат да възникват електрически полета с огромна напрегнатост – до  $10^8 - 10^9 V/m$  [3]. Това означава, че разглежданият тук механизъм на ускоряване на заредени частици може да намира реализация именно в областите на радиопулсарите. При това, част от енергията на ускоряваните частици ще се отнася от електромагнитното излъчване, играейки в същото време ролята на спиращо триене.

### 4. Изводи

4.1. На базата на числен експеримент е изследван процеса на ускоряване на заредени частици във външно постоянно електрическо поле с отчитане на радиационната сила на триене.

4.2. Получените резултати показват, че при сравнително малки напрегнатости на ускоряващото поле влиянието на реакцията на излъчването е нищожно и може да се пренебрегне, докато при много големи напрегнатости ( $E_0 \geq 10^8 V/m$ ) това влияние става забележимо.

4.3. Разглежданият сравнително прост механизъм на ускоряване на заредени частици би могъл да се реализира в областите в близост до радиопулсарите, където се предполага възникването на електрически полета с огромна напрегнатост.

### Литература:

1. Л а н д а у Л. Д., Е. М. Л и ф ш и ц. Теоретическая физика в десяти томах, том II Теория поля, М., Физматлит, 2001.
2. L u k o v S.L, N. S. E r o k h i n, D. I. T o m o v a, R. S h k e v o v, P. T r e n c h e v, K. S h e i r e t s k i. On the charged particles movement in the external accelerated fields. Proceedings of Fourth Scientific Conference with International Participation "SENS 2009", 4 –7 June 2008, Varna, Sunny Beach, Bulgaria – p.p.33-38.
3. М а л о в И. Ф. Радиопулсары, М., "Наука", 2004.