

# Электронные и ионные пучки

УДК 538

## Об ускорении частиц внутри неподвижного пространственно неоднородного стационарного электромагнитного поля. Ускорение неоднородными стохастическими полями

E. B. Майоров

Институт биохимической физики, Москва, Россия

B. B. Окороков

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

H. B. Свешникова

Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный Московской обл., Россия

**Рассмотрены вопросы ускорения заряженных частиц, прежде всего электронов, в пространственно неоднородных стохастических полях.**

Выталкивающее действие неоднородного высокочастотного электромагнитного (ВЧ ЭМ) поля на частицы обоих знаков впервые было отмечено М. А. Миллером [1], а также А. В. Гапоновым и А. М. Миллером [2] в 1957 г.

В том же 1957 г. А. В. Гапонов и М. А. Миллер предложили использовать это свойство неоднородного ВЧ ЭМ-поля для формирования потенциальных ям-ловушек для частиц [2] и для ускорения частиц, движимых ВЧ потенциальными ямами [3].

Идея ускорения частиц, движущихся лазерным фронтом, или фронтом фокусировки, или фронтом ультразвукового лазерного импульса принадлежит Г. А. Аскарьяну [4]. Он же предсказал и открыл красивейшее явление самофокусировки света при распространении в различных средах [5].

Усредненная сила, действующая на частицу в быстропеременном ЭМ-поле амплитуды  $E_0(r)$  и частоты  $\omega$ , равна:

$$f = -\frac{e^2}{2m\omega^2} \nabla (E^2)_{mid}.$$

Например [5], при напряженности сфокусированного поля  $E_f \approx \left(\frac{4W}{C}\right)^{\frac{1}{2}} \sim 10^7$  CGSE для наносекундных мощностей  $W \approx 30$  ГВт и при  $E_f \approx 10^8$  CGSE для пикосекундных мощностей при размере фокального пятна  $a \approx 10^{-3}$  см получим для частоты  $\omega \approx 2 \cdot 10^{15}$  с<sup>-1</sup> (частота неодимового лазера) эквивалентное электрическое поле

$$E_{eff} \approx \frac{1}{e} f_0 \approx -\frac{e^2}{2m\omega^2} E^2 \frac{1}{e} \approx 1 - 100 \text{ МэВ/см.}$$

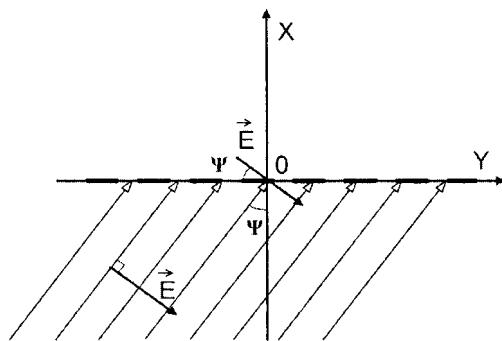
Использование таких полей эффективно при условии движения градиента поля вместе с ускоренной частицей.

Во всех перечисленных выше работах использовалось интегральное свойство неоднородного ВЧ ЭМ-поля формировать неподвижные и движущиеся потенциальные барьеры, управляющие движением заряженных частиц.

Представляет интерес внутренний механизм изменения скорости частиц, взаимодействующих внутри неподвижного неоднородного сгустка ВЧ ЭМ-поля, так как это дополнительный механизм ускорения частиц, начавших свой путь внутри ВЧ ЭМ-сгустка. Последнее утверждение подтверждено точным численным решением нелинейного уравнения, описывающего взаимодействие заряженной частицы с неоднородным ВЧ ЭМ-полем:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = eE_0 e^{-\frac{x}{\lambda}} \sin(\omega t). \quad (1)$$

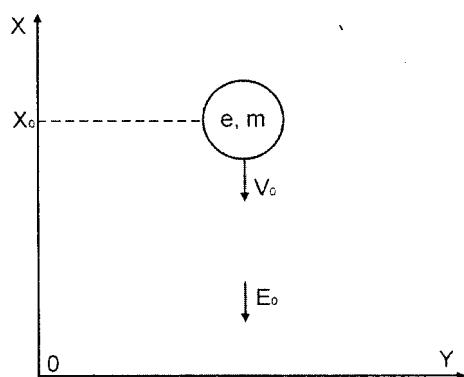
Экспоненциальный закон нарастания амплитуды  $E$  ВЧ ЭМ-поля выбран произвольно, но не случайно: такое поле просто реализуется на практике и лучше для последующего анализа некоторых новых приложений. Такой экспоненциальный закон изменения амплитуды электромагнитной волны формируется в неоднородной волне, возникающей при падении плоской ЭМ-волны на сетку с размером ячейки  $d < \lambda$ , естественно, со стороны "провисания" волны за сеткой (рис. 1.).



**Рис. 1. Формирование неоднородной ЭМ-волны при падении плоской высокочастотной волны на сетку с размером ячейки  $d < \lambda$**

Рассматриваемая задача формируется следующим образом: в каждой точке пространства вектор напряженности электрического поля направлен против оси ОХ (рис. 2), а его величина изменяется по закону, который приводит к уравнению (1):

$$E = E_0 e^{-\frac{x}{\lambda}} \sin(\omega t).$$



**Рис. 2. Направление скорости частицы и ориентация вектора напряженности электрического поля высокочастотных колебаний относительно градиента убывания поля (вдоль оси X)**

Уравнение (1) численно исследуется с начальными условиями:

$$x_{t=0} = x_0; \quad v_{t=0} = -v_0.$$

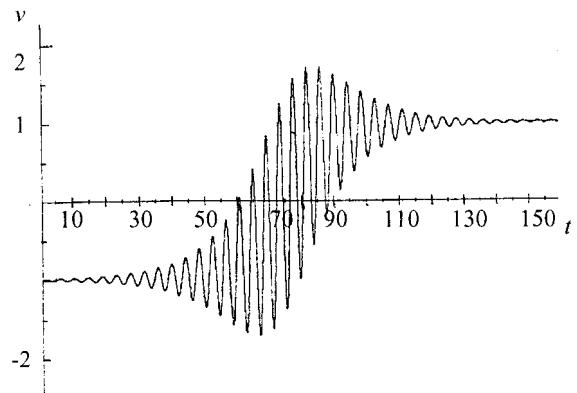
#### Результаты:

- частица (электрон) отражается неоднородным ВЧ-полем, причем в процессе отражения скорость частиц испытывает колебания с частотой порядка частоты поля (см. рис. 1);
- частица, начиная движение ( $v_{t=0} = 0$ ) внутри области, где ВЧ-поле имеет заметную величину, ускоряется до скорости, величина которой определяется глубиной стартовой точки внутри пространственно неоднородного ВЧ-поля (рис. 3 и 4). Наличие этого механизма ускорения до известной степени ахроматично, т. е. не зависит от частоты неоднородного ВЧ-поля.

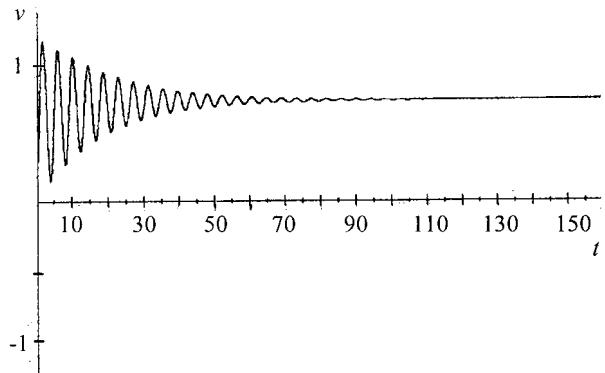
Для рис. 3 и 4 имеем:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{eE}{m} e^{\frac{x}{\lambda}} \sin \omega t,$$

где  $m = 1$ ;  $\omega = 1,5$ ;  $e = 1$ ;  $t_0 = 0$ ;  $E = 0,02$  (см. рис. 3) и  $E = 0,04$  (см. рис. 4);  $x_0 = 5$  (см. рис. 3) и  $x_0 = -40$  (см. рис. 4);  $\lambda = 13$ ;  $v_0 = -1$  (см. рис. 3) и  $v_0 = 0$  (см. рис. 4);



**Рис. 3. Закон изменения скорости частицы при отражении от экспоненциального высокочастотного сгустка ЭМ-колебаний**



**Рис. 4. Ускорение частицы внутри экспоненциально изменяющегося по амплитуде ВЧ-сгустка ЭМ-колебаний.  
Начальная скорость равна нулю**

- ахроматичность эффекта заставляет предположить, что аналогичным эффектом ускорения обладает пространственно неоднородное стохастическое ЭМ-поле.

Для проверки этого предположения был проведен численный расчет поведения заряженной частицы при взаимодействии с пространственно неоднородным стохастическим полем.

Для этого в уравнение (1) вместо синусоидально изменяющейся амплитуды  $E_0 \sin(\omega t)$  подставлялись случайные знакопеременные числа, генерированные специальными программами ("розовый" шум) [6]. Некоторые результаты для разного спектрального состава шума и соответствующие им графики изменения скорости частиц при взаимодействии с шумом приведены на рис. 5—11.

Для рис. 5 имеем генерированный "розовый" шум. При подстановке в дифференциальное

уравнение значения были смещены на 2 ед. вниз.  
Параметры шума:

$$x_{n+1} = px_n + r\sqrt{1-p^2},$$

где  $p = e^{-\frac{1}{t}}$ ;  $r \in [0, 1]$  — случайное число;  $t = 10$  — параметр;  $x_0 = 0$  — начальное значение.

Для рис. 6, 8, 10 и 11 имеем:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{eE}{m} e^{\frac{x}{\lambda}} w,$$

где  $m = 1$ ;  $w$  — шум;  $e = 1$ ;  $t_0 = 0$ ;  $E = 0,02$ ;  $x_0 = 5$ ;  $\lambda = 13$ ;  $v_0 = -1$ .

Для рис. 7 имеем генерированный "розовый" шум. При подстановке в дифференциальное уравнение значения были смещены на 7 ед. вниз. Параметры шума:

$$x_{n+1} = px_n + r\sqrt{1-p^2},$$

где  $p = e^{-\frac{1}{t}}$ ;  $r \in [0, 1]$  — случайное число;  $t = 100$  — параметр;  $x_0 = 0$  — начальное значение.

Для рис. 9 имеем генерированный "розовый" шум. Параметры шума:

$$x_{n+1} = px_n + r\sqrt{1-p^2},$$

где  $p = e^{-\frac{1}{t}}$ ;  $r \in [-0,5; 0,5]$  — случайное число;  $t = 100$  — параметр;  $x_0 = 0$  — начальное значение.

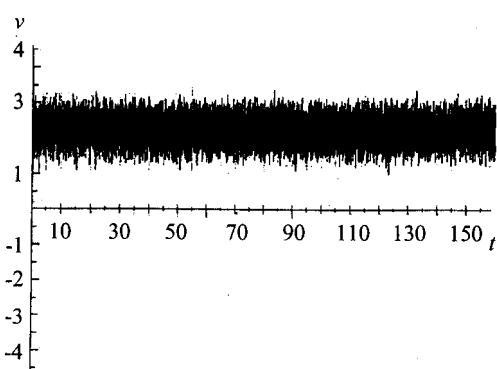


Рис. 5. Убывающий по амплитуде случайный шум, используемый для расчетов ускорения частиц внутри него

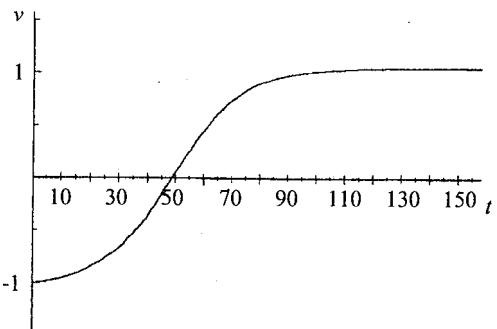


Рис. 6. Ускорение частицы внутри убывающего по амплитуде случайного шума, приведенного на рис. 5

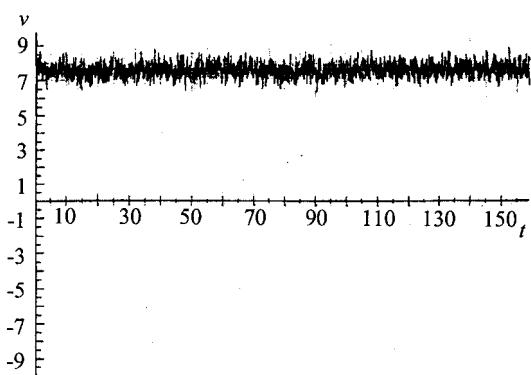


Рис. 7. Убывающий по амплитуде случайный шум, используемый для расчетов ускорения частиц внутри него

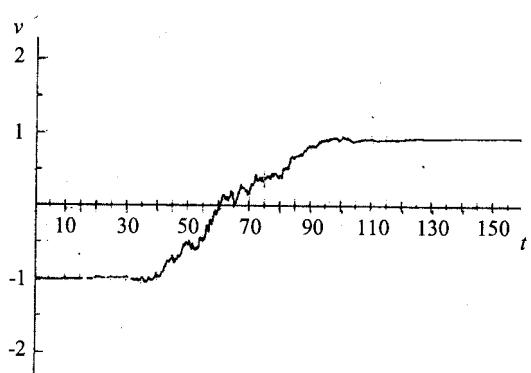


Рис. 8. Ускорение частицы внутри убывающего по амплитуде случайного шума, приведенного на рис. 7



Рис. 9. Убывающий по амплитуде случайный шум, используемый для расчетов ускорения частиц внутри него

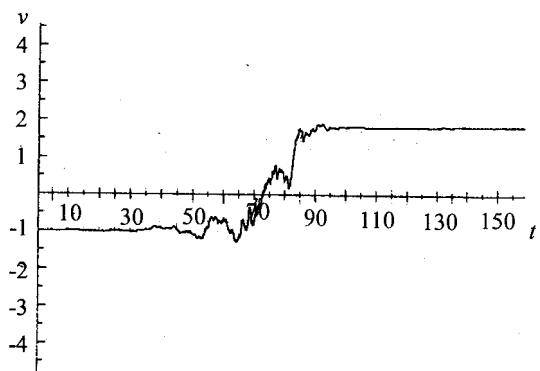
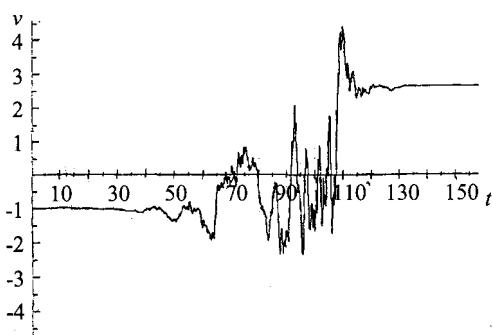


Рис. 10. Ускорение частицы внутри убывающего по амплитуде случайного шума, приведенного на рис. 9 (пример 1)



**Рис. 11.** Ускорение частицы внутри убывающего по амплитуде случайного шума, приведенного на рис. 9 (пример 2).

На рис. 5–11 отчетливо фиксируются: отражающее действие стохастических пространственно неоднородных колебаний, практически такое же, как и для синусоидальных электромагнитных колебаний (см. рис. 2);

эффект ускорения частиц, начинающих свое движение внутри пространственно неоднородного поля, аналогично синусоидальным электромагнитным колебаниям (см. рис. 3, 4).

## Выводы

Отмеченный эффект ускорения частиц пространственно неоднородными ЭМ-колебаниями любой формы может быть использован для объяснения довольно широкого круга явлений. Необходимым и достаточным условием такого ускорения является всего лишь пространственное изменение (наличие границы или затухания амплитуды) ЭМ-колебаний или шумов, а это часто может быть встречено в природе.

### Примеры:

**A.** Образование электронов довольно большой энергии ( $\sim 350$  кэВ) при взаимодействии лазерного импульса с поверхностью твердого тела [7]. Появление электронов такой энергии не может быть объяснено температурным нагревом материала поверхности. В работе [7] рассмотрены механизмы ускорения высокоэнергичных электронов в лазерной плазме. Однако рассмотренные модели оценки максимальной энергии электронов дают существенно меньшие значения, чем экспериментально измеренные.

Вопрос об ускорении электронов в лазерной плазме имеет большое значение для проблемы лазерного термоядерного синтеза. Как нам представляется, нельзя исключить возможность того, что ускорение электронов внутри неоднородного сгустка разлетающейся лазерной плазмы играет существенную роль для адекватного понимания проблемы взаимодействия мощных потоков ЭМ-излучения с поверхности твердого тела.

**Б.** Эффект ускорения не зависит от знака частиц. Поэтому пространственно неоднородное поле ускоряет и электроны, и положительно заряженные ионы. Но поскольку массы этих положительных и отрицательных зарядов отличаются минимум на 3 порядка, электроны быстро "выметаются" мощным неоднородным ЭМ-полем, например лазером, это в свою очередь приводит к тому, что образуются сгустки положительно заряженных ионов, которые остаются неподвижными (если импульс лазера достаточно короткий). Они начинают разлетаться под действием собственного кулоновского поля компактного сгустка ионов (т. н. "кулоновский взрыв"). Разлетающиеся ионы, среди которых присутствуют и многозарядные, используются в т. н. лазерных источниках многозарядных ионов для последующего ускорения до больших энергий в ускорителях тяжелых ионов [8].

**В.** Быстрые тяжелые ионы дейтерия — дейtronы, образующиеся в результате упомянутого в предыдущем пункте "кулоновского взрыва" кластеров (микрокапелек жидкого дейтерия, содержащего много ( $\sim 10^3$ – $10^5$ ) атомов дейтерия), под действием мощного лазерного импульса, при разлете генерируют нейтроны за счет ( $d, d$ )-реакций при межядерных столкновениях внутри разлетающегося облака дейтронов. Такой эффект также наблюдался экспериментально.

**Г.** При медленных разрядах или в стационарной плазме с градиентом плотности ЭМ-шумов (солнце, звезды, взрывы сверхновых звезд) различие в массах электронов и тяжелых ионов должно приводить к разделению зарядов — электроны улетают быстрее под действием сил Миллера, чем тяжелые положительно заряженные ионы. Как следствие этого возникает положительно заряженный слой ("нулевая гармоника"), который более эффективно выталкивает положительные ионы, чем градиент ЭМ-колебаний, который, как было уже упомянуто, не зависит от знака частиц. По-видимому, именно этими процессами (по крайней мере, частично!) обусловлено возникновение солнечного ветра от нашего светила [9], а также вынос вещества с поверхности горячих звезд, где, как и на солнце, бурлят процессы в плазме на поверхности.

Вопрос о количественном вкладе потери вещества звездами (и солнца, естественно, тоже) требует некоторых дальнейших проработок, связанных прежде всего с информацией о величине переменных ЭМ-полей, неизбежно сопровождающих светящуюся поверхность звезд.

Требуется также исследование возможности возникновения автоколебательных процессов при ускорении частиц обоих знаков пространственно неоднородными ЭМ-колебаниями. Интуитивно представляется, что большая разница в

массах ускоряемых положительных и отрицательных зарядов в неоднородных ЭМ-полях обуславливает своеобразный "тяни-толкай" процесс в образовании солнечного ветра.

Д. Турбулентная плазма, возникающая при мощных электрических разрядах (пинг-эффект, взрывающиеся проволочки) характеризуется значительными градиентами плотности, которые являются источниками, как уже отмечалось, не только ускоренных электронов, но и ускоренных тяжелых ионов.

По-видимому, именно этим механизмом ускорения дейtronов в дейтериевой плазме обусловлено появление нейтронов явно не термоядерного происхождения в разрядах, которые первоначально задумывались именно для сильного нагрева дейтериевой плазмы в целях решения проблемы управляемого термоядерного синтеза.

Е. Нельзя исключить некоторый вклад в ускорение частиц даже до релятивистских энергий (космические лучи) градиентом плотности ЭМ-колебаний, возникающих при взрывах сверхновых звезд или других драматических со-

бытиях Вселенной. Качественные снимки с больших современных телескопов обнаруживают контрастные и ярко светящиеся массы разлетающегося вещества, с которыми неизбежно связаны ЭМ-колебания [10], способные ускорять частицы своим градиентом.

#### Л и т е р а т у р а

1. Миллер М. А. Сообщение на II Всес. конф. МВО по радиоэлектронике. — г. Саратов, 1957.
2. Гапонов А. В., Миллер М. А.// ЖЭТФ. 1958. Т. 34. С. 242.
3. Гапонов А. В., Миллер М. А.// Там же. С. 751.
4. Аскарьян Г. А., Манукян С. Д.// Там же. 1972. Т. 62. С. 2156.
5. Аскарьян Г. А.// Там же. 1962. Т. 42. С. 1567.
6. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. — г. Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. — 528 с.
7. Иванов В. В., Князев А. К., Куценко А. В.// ЖЭТФ. 1995. Т. 109. Вып. 4. С. 1257—1266.
8. CERN COURIER, November, 2003. V. 43. № 9. P. 6.
9. Мензел Д. Г. "Наше Солнце". — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963.
10. CERN COURIER, June, 2003. V. 43. № 5. P. 12.

*Статья поступила в редакцию 1 апреля 2005 г.*

## About particles acceleration inside the fixed spatially-nonuniform stationary electromagnetic field. Acceleration by nonuniform stochastic fields

*E. V. Mayorov*

Institute of Biochemical Physics, Moscow, Russia

*V. V. Okorokov*

Institute of Theoretical and Experimental Physics, Moscow, Russia

*N. V. Sveshnikova*

Moscow Physical-Technical Institute, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia

*Problems of acceleration of charged particles (electrons, first of all) in spatially nonuniform stochastic fields are surveyed in this paper.*