

УДК 539.12

УСКОРЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ С ПОСТОЯННЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

С.С. ИСРАЕЛЯН, Х.В. СЕДРАКЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 15 апреля 2005 г.)

С помощью численного интегрирования классических релятивистских уравнений движения исследована динамика заряженной частицы в поле поперечной электромагнитной волны конечной длительности и определенной формы огибающей поля, в преломляющей среде с постоянным показателем преломления ($n > 1$). Рассмотрена возможность ускорения заряженных частиц реальными лазерными импульсами в газовой среде, соответствующая нелинейному индуцированному черенковскому явлению "отражения" и захвата заряженной частицы поперечной электромагнитной волной.

В настоящее время проводятся исследования двух типов нетрадиционных ускорителей заряженных частиц – лазерных ускорителей сверхвысоких энергий [1] и плазменных ускорителей малых размеров [2]. Недавний прогресс в лазерной технологии и наличие суперинтенсивных фемтосекундных лазеров, интенсивности которых превышают 10^{20} Вт/см² [3], делают актуальной реализацию лазерных [4] и плазменных [5] ускорителей.

Как известно [6], при взаимодействии заряженной частицы с плоско-поперечной электромагнитной волной в преломляющей среде с показателем преломления $n > 1$ при интенсивностях, превышающих некоторое критическое значение, волна становится потенциальным барьером для внешней по отношению к волне частицы или ямой – для частицы, находящейся первоначально внутри нее, и происходит "отражение" или захват частицы волной. Это нелинейное пороговое явление, обусловленное индуцированным черенковским эффектом. При "отражении" от фронта волны частица ускоряется или замедляется в зависимости от начальных условий (волна догоняет частицу или наоборот). Что касается явления захвата, то скорость частицы в этом случае осциллирует во времени, оставаясь в среднем постоянной. Поэтому в среде с постоянным показателем преломления механизмом для лазерного ускорения заряженных частиц может служить явление "отражения". Однако, последнее выявлено аналитически [6-8] для плоско-поперечной электромагнитной волны, между тем как реальные лазерные импульсы явля-

ются ограниченными как по времени, так и по пространственным координатам. Поэтому целью настоящей работы является исследование нелинейной динамики заряженной частицы в поле поперечной электромагнитной волны конечной длительности и пространственных размеров в преломляющей среде с постоянным показателем преломления.

Вначале рассмотрено взаимодействие заряженных частиц с плоским импульсом электромагнитной волны в среде с постоянным показателем преломления. Численным методом решены классические релятивистские уравнения движения частиц в поле электромагнитного импульса с электрической напряженностью

$$E_x = E_z = 0, \quad E_y = E_0 \frac{\cos(\omega(nx - t + \varphi_0))}{\cosh((nx - t + \varphi_0)\tau)}, \quad (1)$$

где E_0 , φ_0 , τ – соответственно, амплитуда, начальная фаза и продолжительность импульса электромагнитной волны, n – показатель преломления среды. Понятно, что речь может идти только о средах с $n > 1$, в которых лишь возможно реальное изменение энергии частицы при взаимодействии с поперечной электромагнитной волной, благодаря черенковскому эффекту.

Результаты численного интегрирования для выбранного вида плоского электромагнитного импульса приведены на рис.1.

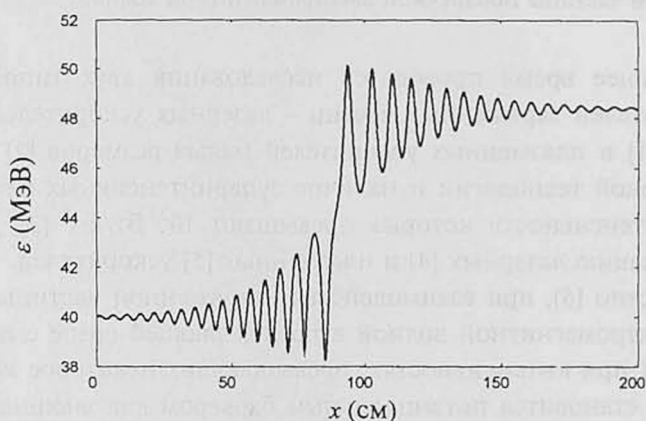


Рис.1. Зависимость энергии заряженной частицы, взаимодействующей с плоским импульсом электромагнитной волны, от x координаты частицы.

Как видно из рис.1, в результате взаимодействия энергия частицы претерпевает скачок, т.е. здесь имеет место эффект “отражения” частицы от фронта импульса электромагнитной волны. Начальные условия взяты так, что импульс волны с напряженностью $E_0 = 2.96 \cdot 10^8$ В/см, длиной волны $\lambda = 1.064 \cdot 10^{-4}$ см и продолжительностью $\tau = 4T$ (где T – период электромагнитной волны) догоняет частицу с энергией $\varepsilon_0 = 40$ МэВ, которая движется под углом $\alpha = 9 \cdot 10^{-3}$ рад по отношению к направлению распространения импульса, в газовой среде с показателем преломления $n = 1.0001$.

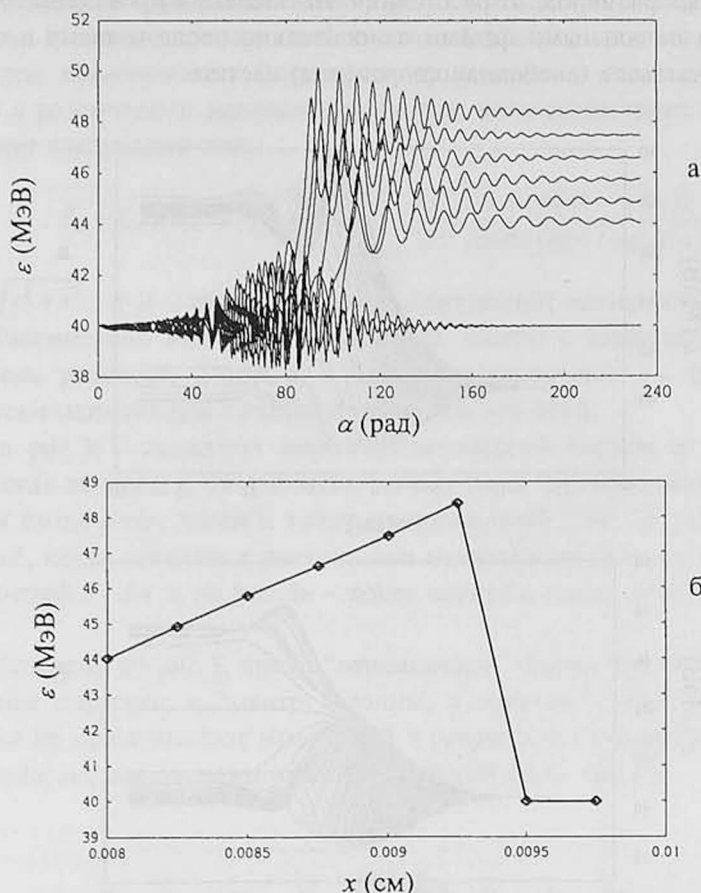


Рис.2. а) Зависимость энергий частиц от x -координаты при различных углах взаимодействия с плоским электромагнитным импульсом с заданной огибающей, б) зависимость конечной энергии частиц (показанной на рис.2а) от угла взаимодействия.

На рис.2а приведены зависимости энергий частиц от расстояния при различных углах взаимодействия с плоским импульсом электромагнитной волны. Рассмотрено движение частиц, имеющих одинаковую начальную энергию (~ 40 МэВ), но в зависимости от угла взаимодействия с волной конечная энергия получается различной. На рис.2б приведена зависимость конечной энергии частиц от угла взаимодействия с волной. Как видно из этого рисунка, в результате взаимодействия энергия частиц, которые налетают на электромагнитную волну под углами в определенной апертуре, претерпевает скачок, а вне этой области энергия частиц не изменяется в результате взаимодействия.

Исследования проведены также для реальных лазерных импульсов с конечными поперечными размерами. На рис.3 приведена зависимость энергий заряженных частиц, взаимодействующих с лазерным импульсом конеч-

ных поперечных размеров, от расстояния. Вычисления проведены для частиц с различными начальными фазами относительно входа в волну и с различными координатами z (свободная координата) частиц.

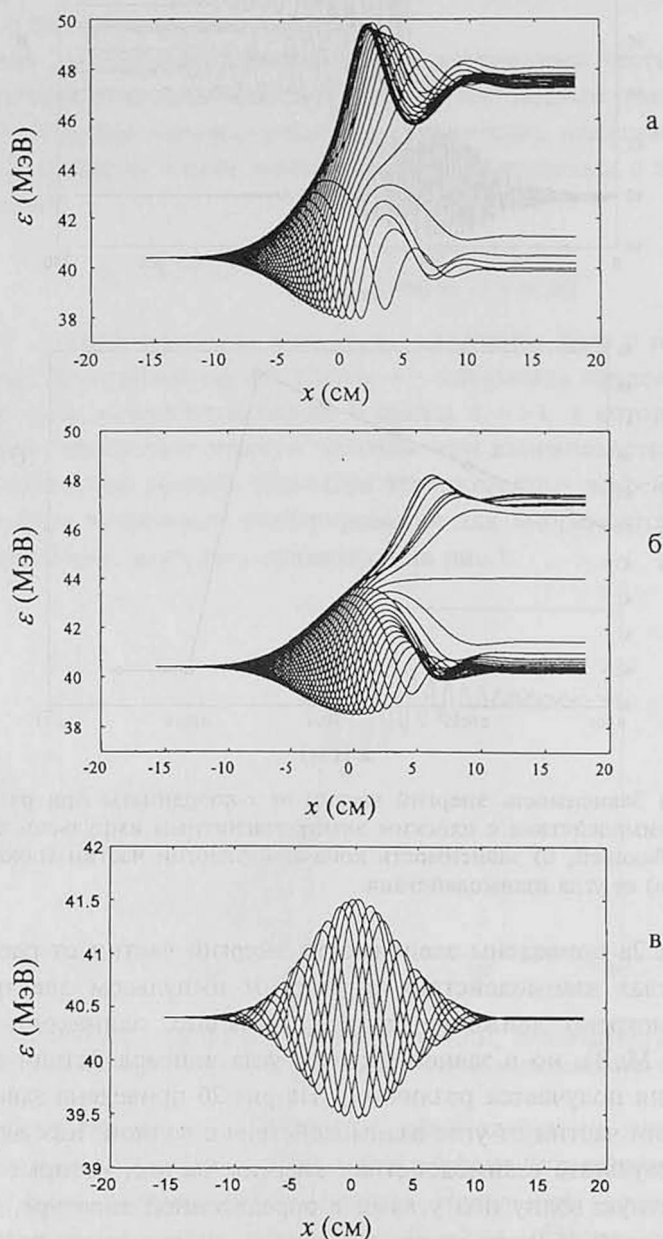


Рис.3. Зависимость энергий заряженных частиц, взаимодействующих с лазерным импульсом, имеющим конечный поперечный размер, от x -координат частиц. Графики соответствуют частицам с различными начальными фазами относительно входа в волну и с различными z -координатами (свободная координата) частиц: а) $z = 0$, б) $z = d/4$, в) $z = d/2$.

Рассмотрено взаимодействие пучка заряженных частиц с лазерным импульсом, имеющим поперечный гауссовый профиль в среде с постоянным показателем преломления. Частицы с одинаковыми начальными импульсами, но с различными начальными фазами взаимодействуют с волной, которая имеет следующий вид:

$$E_x = E_z = 0, \quad E_y = E_0 \exp\left(-\frac{4\rho^2}{d^2}\right) \frac{\cos(\omega(nx-t+\varphi_0))}{\cosh((nx-t+\varphi_0)/\tau)}, \quad (2)$$

где $\rho = \sqrt{y^2 + z^2}$, а d – параметр, характеризующий поперечный размер импульса. Рассмотрено взаимодействие пучка частиц с лазерным импульсом с поперечным размером $d=1000\lambda$ и продолжительностью $\tau=50T$. Частицы в пучке имеют одинаковую начальную энергию ~ 40 МэВ.

На рис.3а приведены зависимости энергий частиц от расстояния в случае, когда частицы с различными начальными фазами взаимодействуют с лазерным импульсом, входя в волну с координатой $z=0$; на рис.3б представлен случай, когда частицы с различными начальными фазами входят в волну с координатой $z=d/4$, а на рис.3в – когда частицы взаимодействуют с волной с $z=d/2$.

Как видно из рис.3, число “отраженных” частиц тем больше, чем ближе частицы налетают к “центру” волны, а энергии частиц с координатой $z=d/2$ вовсе не претерпевают изменений в результате взаимодействия с лазерным импульсом, вне зависимости от начальной фазы частиц.

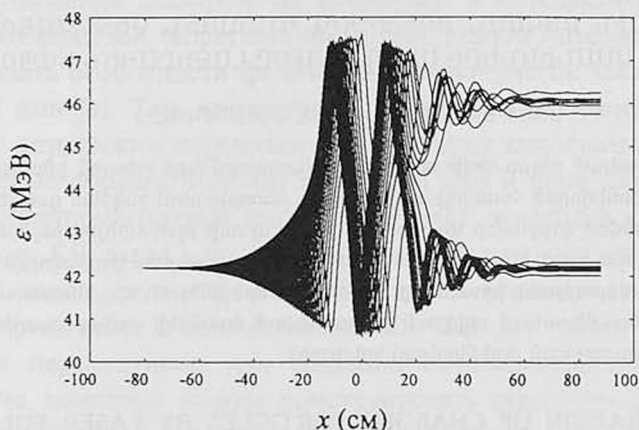


Рис.4. Зависимость энергий частиц, взаимодействующих с широким лазерным импульсом, от x -координат частиц.

Представляет интерес также рассмотрение взаимодействия пучка частиц с импульсом электромагнитной волны, который имеет относительно большие поперечные размеры ($d=5000\lambda$). Рассмотрен случай, когда частицы в пучке, имея одинаковую начальную энергию (~ 42 МэВ), взаимодействуют с волной с различными начальными фазами. На рис.4 приведена зависимость

энергий частиц от расстояния, в результате взаимодействия с широким импульсом электромагнитной волны. Частицы, имея небольшой поперечный импульс, входят в волну под определенным углом, но с различными начальными фазами и z -координатами. Как видно из рис.4, в результате взаимодействия с широким импульсом волны происходит “захват” частиц электромагнитной волной. Так как рассмотрено движение частиц с различными начальными фазами, то некоторая часть частиц выходит из волны ускоренными, а остальные частицы – почти без изменения энергии.

В заключение авторы выражают благодарность проф. Г.К.Аветисяну за ценные советы и многочисленные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. P.X.Wang et al. Appl. Phys. Lett., **78**, 2253 (2001); Y.L.Salamin, C.K.Keitel. Phys. Rev. Lett., **88**, 095005 (2002); Ch.Varin, M.Piche, M.A.Porras. Phys. Rev. E, **71**, 026603 (2005).
2. T.Tajima, J.M.Dawson. Phys. Rev. Lett., **43**, 267 (1979); E.Esarey et al. IEEE Trans. Plasma Sci., **24**, 252 (1996); E.Esarey et al. IEEE J. Quant. Electr. **33**, 1879 (1997).
3. Th.Stohlker et al. Phys. Rev. Lett., **86**, 983 (2001); M.Drescher et al. Sci. Expr., 1058561 (2001).
4. K.McDonald. Phys. Rev. Lett., **80**, 1350 (1998); P.Mora, B.Quesnel. Phys. Rev. Lett., **80**, 1351 (1998).
5. S.P.D.Mangles et al. Nature, **431**, 535 (2004); C.G.R.Geddes et al. Nature, **431**, 538 (2004); J.Faure et al. Nature, **431**, 541 (2004).
6. В.М.Арутюнян, Г.К.Аветисян. Квантовая электроника, **1**, 54 (1972).
7. В.М.Арутюнян, Г.К.Аветисян. ЖЭТФ, **62**, 1639 (1972).
8. Г.К.Аветисян. Докторская диссертация. Москва, 1982.

ՀԱՍՏԱՏՈՒՆ ԲԵԿՍԱՆ ՑՈՒՑԻՉՈՎ ԳԱԶԱՅԻՆ ՄԻՋԱՎԱՅՐՈՒՄ
ԼԻՑԵՆԿԱՎՈՐՎԱԾ ՄԱՍՆԻԿՆԵՐԻ ԱՐԱԳԱՑՈՒՄԸ ԼԱԶԵՐԱՅԻՆ ԻՄՊՈՒԼՍՆԵՐՈՎ

Ս.Ս. ԻՍՐԱԵԼՅԱՆ, Խ.Վ. ՍԵԴՐԱԿՅԱՆ

Շարժման դասական ռելյատիվիստական հավասարումների թվային ինտեգրման միջոցով հետազոտված է լիցքավորված մասնիկի դինամիկան, հաստատուն բեկման ցուցչով ($n>1$). Բեկող միջավայրում տարածվող վերջավոր տևողությամբ և որոշակի պարուրիչով լայնական էլեկտրամագնիսական ալիքի դաշտում: Դիտարկված է գազային միջավայրում լիցքավորված մասնիկների արագացման հնարավորությունը իրական լազերային իմպուլսներով, որը համապատասխանում է լայնական էլեկտրամագնիսական ալիքում լիցքավորված մասնիկի «անդրադարձման» և զավթման n_2 -գծային հարկադրական չերենկովյան երևույթին:

ACCELERATION OF CHARGED PARTICLES BY LASER PULSES IN A GASEOUS MEDIUM WITH A CONSTANT REFRACTION INDEX

S.S. ISRAELYAN, KH.V. SEDRAKYAN

The dynamics of charged particles is investigated by means of numerical integration of the classical relativistic equations of motion in the field of a transverse electromagnetic wave of finite duration and the certain form of the envelope function of the field in the refractive medium with a constant refraction index ($n>1$). The possibility of acceleration of charged particles by actual laser pulses in the gaseous medium corresponding to the nonlinear induced Cherenkov effect of "reflection" and capture of the charged particle by a transverse electromagnetic wave is considered.