

Эволюция поляризации электрона в лазерно-плазменном ускорителеД.В. Пугачёва^{1,2}, Н.Е. Андреев^{1,2}¹Московский физико-технический институт (государственный университет)²Объединённый институт высоких температур РАН

Рассмотрена динамика поляризации спина электрона, ускоряемого в поле кильватерной волны, генерируемой фемтосекундным релятивистски-интенсивным лазерным импульсом. Моделирование динамики электрона и прецессии его спина $\vec{s} = \{s_x, s_y, s_z\}$ проводилось путём численного решения уравнений Т-ВМТ [1] совместно с уравнениями движения в безразмерных координатах $\xi = k_{p0}(z - ct)$, $\zeta = k_{p0}z$, $\vec{\rho} = k_{p0}\vec{r}_\perp$:

$$\frac{dq_x}{d\zeta} = \frac{1}{\beta_z} \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} \cos \phi, \quad \frac{dq_y}{d\zeta} = \frac{1}{\beta_z} \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} \sin \phi, \quad (1)$$

$$\frac{dq_z}{d\zeta} = \frac{1}{\beta_z} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi}, \quad \frac{d\xi}{d\zeta} = 1 - \frac{1}{\beta_z}, \quad (2)$$

$$\frac{dx}{d\zeta} = \frac{q_x}{q_z}, \quad \frac{dy}{d\zeta} = \frac{q_y}{q_z}, \quad (3)$$

$$\frac{ds_x}{d\zeta} = \frac{s_z}{\beta_z} \left(a_m + \frac{1}{\gamma} \right) \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} \cos \phi, \quad (4)$$

$$\frac{ds_y}{d\zeta} = \frac{s_z}{\beta_z} \left(a_m + \frac{1}{\gamma} \right) \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} \sin \phi, \quad (5)$$

$$\frac{ds_z}{d\zeta} = -\frac{1}{\beta_z} \left(a_m + \frac{1}{\gamma} \right) \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} [s_x \cos \phi + s_y \sin \phi], \quad (6)$$

здесь c — скорость света, e, m — заряд и масса электрона, a_m — аномальный магнитный момент электрона, $\omega_{p0} = \sqrt{4\pi e^2 N_0 / m}$ — плазменная частота и $k_{p0} = \omega_{p0} / c$, N_0 — начальная концентрация электронов на оси плазменного канала, \vec{q} — безразмерный импульс электрона $\vec{q} = \vec{p}_e / (mc)$, $\gamma = \sqrt{1 + q^2}$ — релятивистский фактор электрона и $\beta_z = q_z / \gamma$, $\phi = \arctan(y/x)$ — угол, характеризующий положение электрона в плоскости XY , Φ — кильватерный потенциал нормирован на mc^2 / e . Ускоряющая $F_z = E_z = \partial \Phi / \partial \xi$ и фокусирующая $F_r = E_r - B_\phi = \partial \Phi / \partial \rho$ силы, действующие на ускоряемый электрон, самосогласованно рассчитывались с помощью кода LAPLAC [2].

Результаты численных расчётов динамики поляризации спина электрона, ускоряемого в поле кильватерной волны, генерируемой лазерным импульсом (с радиусом фокального

пятна 89.13 мкм, длительностью 56 фс, интенсивностью 4.28×10^{18} Вт/см² и мощностью 534 ТВт при длине волны лазерного излучения $\lambda = 0.8$ мкм) при его распространении вдоль оси OZ цилиндрически симметричного плазменного канала (с характерным радиальным размером 305.1 мкм и $N_0 = 10^{17}$ см⁻³), сопоставлялись с приближенной аналитической формулой (рис. 1), описывающей изменение огибающей деполяризации электрона $\Delta \vec{s}(t) = \vec{s}(t) - \vec{s}_0$, движущегося под действием постоянных сил $F_z = E_{ac}$, $F_r = \alpha \rho$:

$$|\Delta \vec{s}(\tau)|_{env} = a_m r_0 \sqrt{1 - s_{\theta 0}^2} [\alpha^2 \gamma_0 (\gamma_0 + E_{ac} \tau)]^{1/4}, \quad \tau = \omega_{p0} t. \quad (7)$$

На рис. 1 изображена деполяризация в зависимости от расстояния электрона от оси канала ρ_0 и фазы ξ_0 при его инжекции: $\rho_0 = 0.125$, $\xi_0 = 3.2$ (1); $\rho_0 = 0.25$, $\xi_0 = 3.0$ (2); $\rho_0 = 0.25$, $\xi_0 = 3.2$ (3); $\rho_0 = 0.25$, $\xi_0 = 3.4$ (4); $\rho_0 = 0.5$, $\xi_0 = 3.2$ (5). Серая пунктирная и штрихпунктирная линии соответствуют значениям формулы (7) для параметров кривой (1) и (5) соответственно. Таким образом, разработанная модель позволяет исследовать динамику прецессии спина электрона в ходе лазерно-плазменного ускорения в зависимости от начальной энергии электрона и фазы его инжекции.

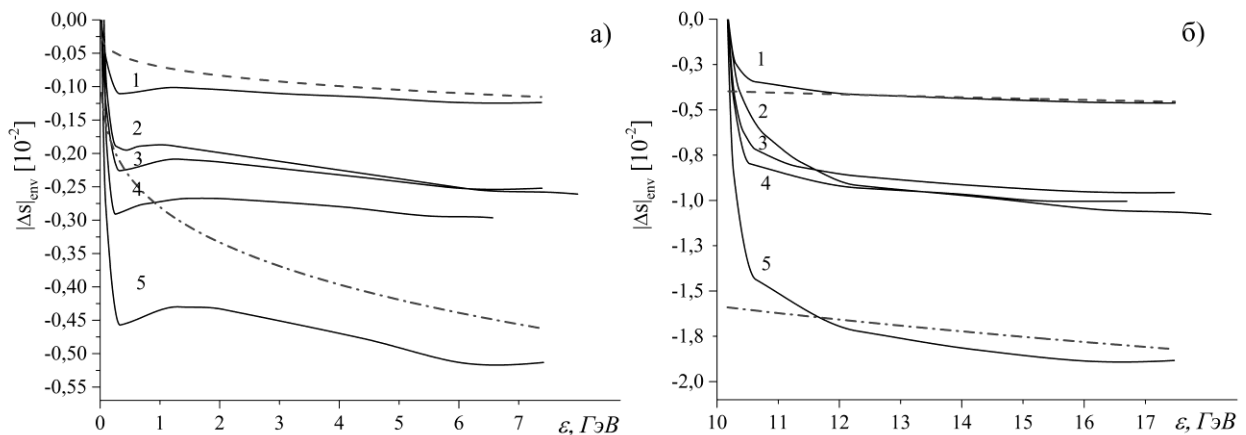


Рис. 1. Огибающая деполяризации электрона с $\vec{s}_0 = \{0.279, -0.335, 0.9\}$ и начальной энергией $\varepsilon_0 = 67.5$ МэВ (а) и $\varepsilon_0 = 10.2$ ГэВ (б) как функция его энергии $\varepsilon = \gamma(\tau)mc^2$

Работа выполнена при поддержке программой фундаментальных исследований Президиума РАН.

Литература

1. Bargmann V., Michel L., Telegdi V. L. Precession of the polarization of particles moving in a homogeneous electromagnetic field // Phys. Rev. L. – 1959. – V. 2. – 435 p.
2. Andreev N. E., Kuznetsov S. V. Laser Wakefield Acceleration of Finite Charge Electron Bunches // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2008. – V. 36. – 1765 p.