

# Аномальное поглощение сверхмощных лазерных импульсов в релятивистски неплотной плазме

Михаил Серебряков

9 ноября 2023 г.

## Взаимодействие лазерного излучения с веществом

▶  $a_0 = \frac{eE_0}{mc\omega}$  — безразмерная амплитуда лазерного поля,

▶  $\chi = \frac{\sqrt{(\epsilon\mathbf{E}/c + \mathbf{p} \times \mathbf{B}) - (\mathbf{p} \cdot \mathbf{E})^2}}{mcE_S}$  — КЭД параметр,

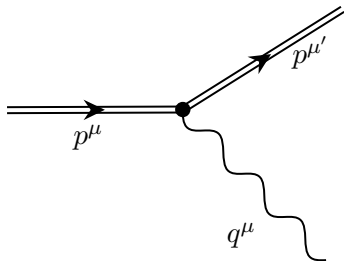
$$E_S = \frac{m^2c^3}{\hbar e},$$

▶  $n_{cr} = \frac{m\omega^2}{4\pi e^2}$  — критическая плотность плазмы.

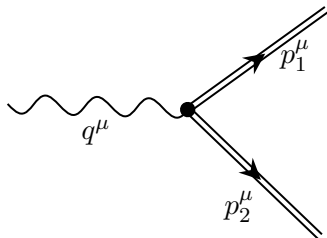
## Взаимодействие лазерного излучения с веществом

- ▶  $a_0 = \frac{eE_0}{mc\omega}$  — безразмерная амплитуда лазерного поля,
- ▶  $\chi = \frac{\sqrt{(\varepsilon\mathbf{E}/c + \mathbf{p} \times \mathbf{B}) - (\mathbf{p} \cdot \mathbf{E})^2}}{mcE_S}$  — КЭД параметр,  
$$E_S = \frac{m^2c^3}{\hbar e},$$
- ▶  $n_{cr} = \frac{m\omega^2}{4\pi e^2}$  — критическая плотность плазмы.
  
- ▶  $a_0 \gtrsim 1$  — релятивистские колебания,
- ▶  $\chi \gtrsim 1$  — влияние КЭД эффектов.

# Взаимодействие лазерного излучения с веществом



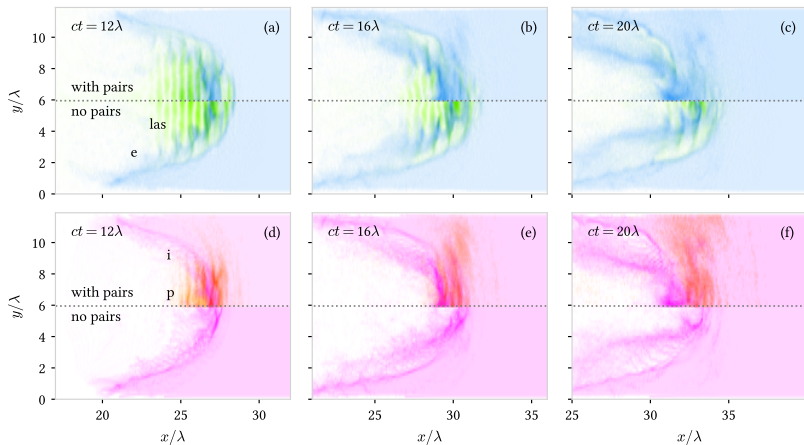
Нелинейное Комptonовское  
рассеяние



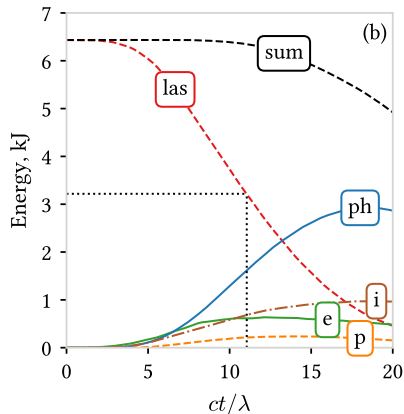
Процесс Брейта-Уилера

# Плотность плазмы: зависимость от КЭД эффектов

3D PIC моделирование:  $a_0 = 2100$ ,  $n_e = 50n_{cr}$ .

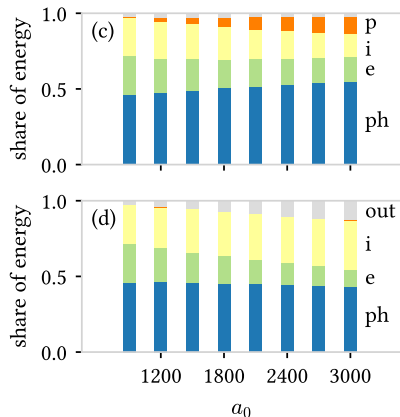


# Перераспределение энергии лазерного импульса

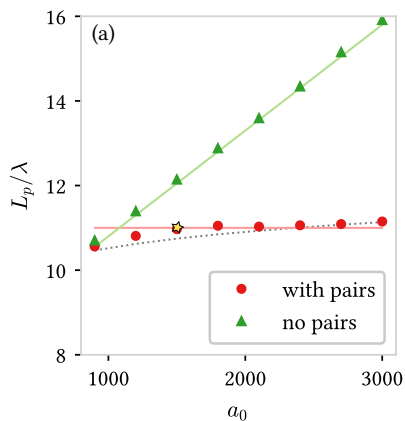


3D PIC:

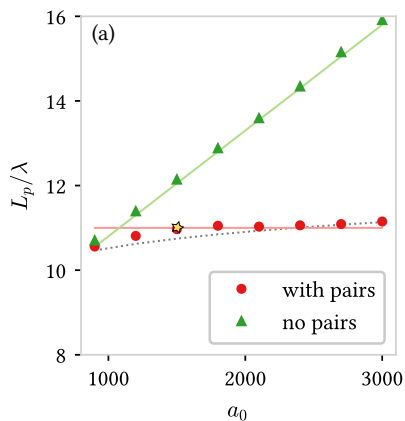
$$a_0 = 1800, n_e = 50n_{cr}.$$



# Глубина проникновения лазерного импульса в плазму: численное моделирование и оценки

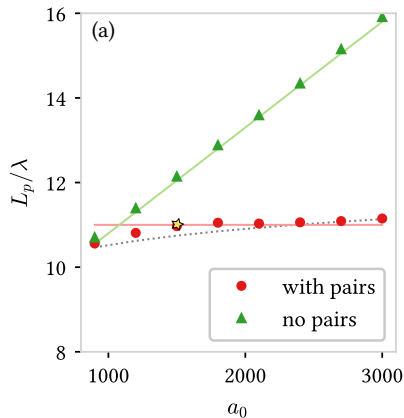


# Глубина проникновения лазерного импульса в плазму: численное моделирование и оценки



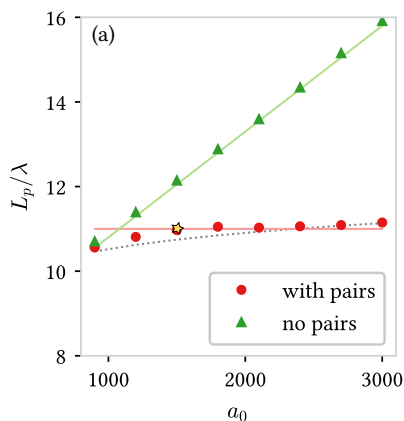


# Глубина проникновения лазерного импульса в плазму: численное моделирование и оценки



Рождение  $e^-e^+$  пар не учтено:  
$$\frac{L_p - L_i}{\lambda} \approx \frac{a_0 n_{cr}}{2sn_e};$$

# Глубина проникновения лазерного импульса в плазму: численное моделирование и оценки



Рождение  $e^-e^+$  пар не учтено:

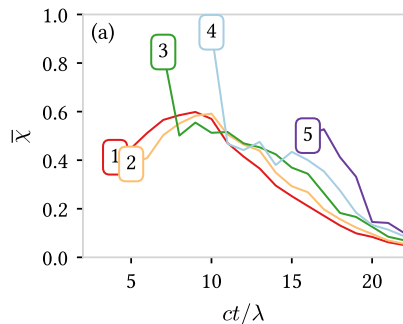
$$\frac{L_p - L_i}{\lambda} \approx \frac{a_0 n_{cr}}{2sn_e};$$

примем во внимание развитие

КЭД каскада:  $L_p =$

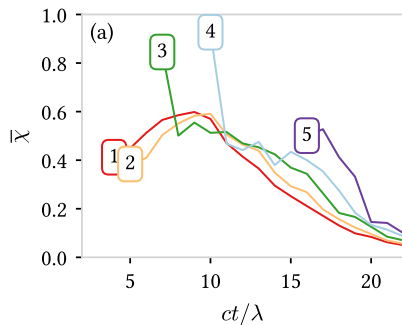
$$L_{e^+e^-} + \frac{c}{\Gamma} \ln \left( \frac{L_{las}}{2(L_p - L_i)} \frac{a_0 n_{cr}}{n_0} \right)$$

# Проверка существования КЭД каскада: численное моделирование и учёт продольного поля

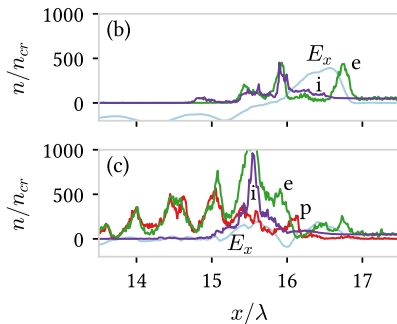


Моделирование демонстрирует существование 5 поколений частиц при  $a_0 = 2500$ ,  $n_e = 50n_{cr}$ .

# Проверка существования КЭД каскада: численное моделирование и учёт продольного поля

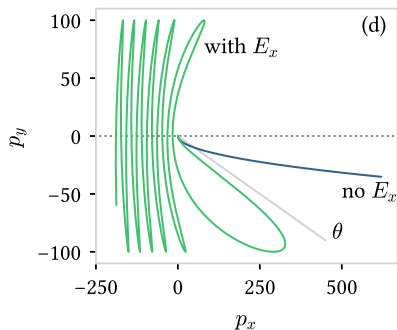


Моделирование демонстрирует существование 5 поколений частиц при  $a_0 = 2500$ ,  $n_e = 50n_{cr}$ .



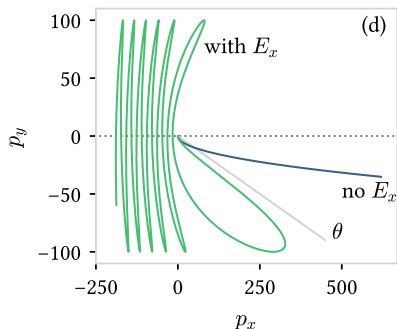
Поле  $E_x$  не превышает 0,1 лазерного поля, однако радикально меняет траекторию заряженной частицы.

## Движение электрона в плоской волне с добавочным продольным полем



В случае  $E_x = 0$  траектория электрона в импульсном пространстве представляет собой параболу  $p_x = p_y^2/2$ .

## Движение электрона в плоской волне с добавочным продольным полем

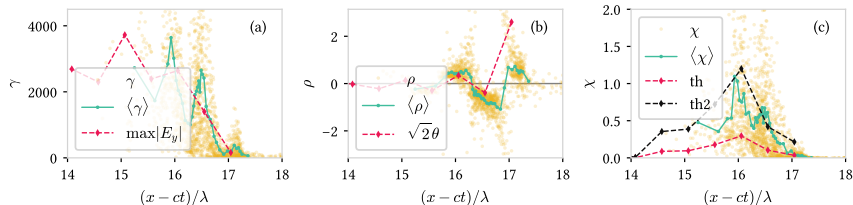


В случае  $E_x = 0$  траектория электрона в импульсном пространстве представляет собой параболу  $p_x = p_y^2/2$ . При  $E_x \neq 0$  появляется новое стабильное направление —  $\theta_{rf} \approx 2E_x/E_y$ .

Траектория при ненулевом продольном поле:

$$p_x(\xi) = \frac{1 + [C_y + A_y(\xi)]^2 - [C_x - \xi E_x]^2}{2(C_x - \xi E_x)} \quad (1)$$

# Оценки параметра $\chi$

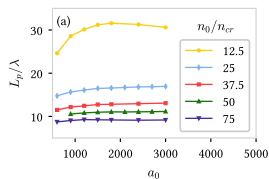


$$\overline{\sin \theta_{rf}} = \frac{8}{\pi} \frac{a_0 E_x}{a_0^2 + 2E_x^2} \longrightarrow \chi \approx \frac{\gamma F_{\perp}(\bar{\theta}_{rf})}{a_S}, \quad (2)$$

где  $a_S = eE_S/mc\omega_L$ . Если  $E_x \ll a_0$ , то  $\chi \approx E_x^2/a_S$ .

# Зависимость поглощения от начальной плотности плазмы

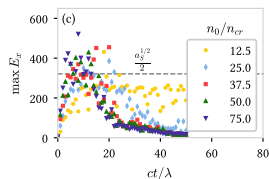
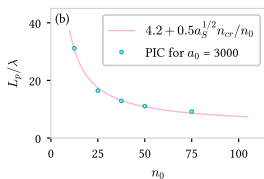
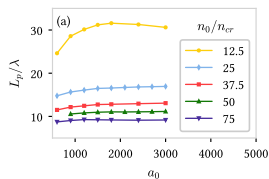
$$L_p \approx L_{e^+e^-} \sim L_0 + \frac{\lambda a_S^{1/2}}{2\pi} \frac{n_{cr}}{n_0} \quad (3)$$





# Зависимость поглощения от начальной плотности плазмы

$$L_p \approx L_{e^+e^-} \sim L_0 + \frac{\lambda a_S^{1/2}}{2\pi} \frac{n_{cr}}{n_0} \quad (3)$$



## Выводы

- ▶ Глубина проникновения лазерного импульса в разреженную плазму не растёт при дальнейшем увеличении интенсивности после достижения  $a_0 \sim 1000$ .
- ▶ Анализ движения электрона показывает, что добавление слабого продольного поля к полю плоской волны приводит к росту квантового параметра  $\chi$ , а значит, делает возможным развитие КЭД каскада.
- ▶ Формируется плотный электрон-ионный сгусток, который и создаёт упомянутое продольное поле.