

# Рассеяние электрона на сверхкоротком лазерном импульсе в перпендикулярной геометрии

Николай Мучной

24 октября 2023 г.

## Аннотация

Если рассеивать сверхкороткие лазерные импульсы на ультррелятивистском электронном пучке в перпендикулярной геометрии, можно получить сверхкороткие (много меньше длины пучка электронов) импульсы жестких (десятки МэВ) гамма квантов. В нижней части спектра релятивистского томсоновского излучения плотность фотонов  $dN/d\hbar\omega$  такая же, как и вблизи его верхней границы. При этом фотоны с определенной энергией рассеиваются на определенный угол. Если сфокусировать конус рассеянного излучения – можно спуститься в диапазон десятков кэВ, задача данной заметки – оценить возможную интенсивность.

## 1 Что такое сверхкороткий импульс?

К сверхкоротким принято относить импульсы излучения с длительностью менее 1 пс. На Рис. 1 представлен импульс излучения со средней длиной волны  $\lambda_0 = 1.056$  мкм и гауссовой формой огибающей, имеющей ширину на полувысоте (FWHM)  $\tau = 10$  фс.

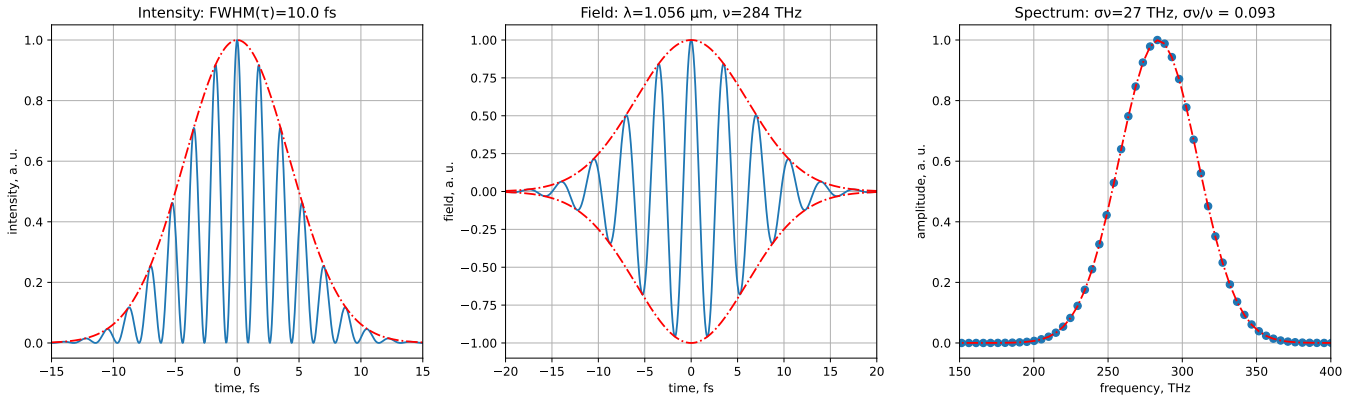


Рис. 1: Слева – квадрат поля (сплошная линия) и интенсивность (штрих-пунктирная линия). В середине – поле (сплошная линия) и его огибающая (штрих-пунктирная линия). Справа – спектр импульса, точки – результат преобразования Фурье от поля, линия – гауссиан с указанной над графиком шириной спектра.

Среднеквадратичная длительность импульса

$$\sigma_\tau = \frac{\tau}{2\sqrt{2\ln(2)}} \simeq 4.25 \text{ фс.} \quad (1)$$

Ширина спектра связана с длительностью импульса соотношением

$$\frac{\sigma_\nu}{\nu_0} = \frac{\sigma_\lambda}{\lambda_0} = \frac{\sqrt{\ln(2)}}{\pi\nu_0\tau} = \frac{\lambda_0\sqrt{\ln(2)}}{\pi c\tau} = \frac{1}{\sqrt{2}\omega_0\sigma_\tau} = \frac{\lambda_0/\sqrt{2}}{2\pi c\sigma_\tau}. \quad (2)$$

## 2 Светимость $1 \times 1 \times 1$

Имеется в виду “один электрон  $\times$  один фотон  $\times$  одна встреча”. Выберем систему координат в которой встречаются электроны и фотоны. Пучок электронов движется в направлении горизонтальной оси  $z$ , а оси  $x$  и  $y$  перпендикулярны  $z$  и направлены по-горизонтали и по-вертикали соответственно. Лазерный импульс движется вдоль оси  $x$ . Для описания размеров пучка электронов введем гауссовы ширины  $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ , а для

лазерного импульса –  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ . Плотности электронов  $\rho$  и фотонов  $\varrho$  в пространстве  $x, y, z, t$ :

$$\rho(x, y, z, t) = \frac{(2\pi)^{-3/2}}{\delta_x \delta_y \delta_z} \exp\left(-\frac{x^2}{2\delta_x^2} - \frac{y^2}{2\delta_y^2} - \frac{(z-ct)^2}{2\delta_z^2}\right), \quad (3)$$

$$\varrho(x, y, z, t) = \frac{(2\pi)^{-3/2}}{\sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{(x-ct)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right). \quad (4)$$

Светимость есть интеграл от произведения плотностей с учетом релятивистского преобразования, которое в рассматриваемом случае дает единичный множитель. Проинтегрируем:

$$I_1 = \int_{-\infty}^{\infty} (\rho \cdot \varrho) dy = \frac{(2\pi)^{-5/2}}{\delta_x \delta_z \sigma_x \sigma_z \sqrt{\delta_y^2 + \sigma_y^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\delta_x^2} - \frac{(z-ct)^2}{2\delta_z^2} - \frac{(x-ct)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right), \quad (5)$$

$$I_2 = \int_{-\infty}^{\infty} I_1(x, z, ct) dx = \frac{(2\pi)^{-2}}{\delta_z \sigma_z \sqrt{\delta_x^2 + \sigma_x^2} \sqrt{\delta_y^2 + \sigma_y^2}} \exp\left(-\frac{(z-ct)^2}{2\delta_z^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2} - \frac{(ct)^2}{2(\delta_x^2 + \sigma_x^2)}\right), \quad (6)$$

$$I_3 = \int_{-\infty}^{\infty} I_2(z, ct) dz = \frac{(2\pi)^{-3/2}}{\sqrt{(\delta_x^2 + \sigma_x^2)(\delta_y^2 + \sigma_y^2)(\delta_z^2 + \sigma_z^2)}} \exp\left(-\frac{(ct)^2}{2(\delta_x^2 + \sigma_x^2)} - \frac{(ct)^2}{2(\delta_z^2 + \sigma_z^2)}\right), \quad (7)$$

$$I_4 = \int_{-\infty}^{\infty} I_3(ct) dct = \frac{1}{2\pi \sqrt{(\delta_x^2 + \sigma_x^2 + \delta_z^2 + \sigma_z^2)(\delta_y^2 + \sigma_y^2)}} \xrightarrow{\delta_z \gg \sigma_x, \sigma_z, \delta_x} \frac{1}{2\pi \delta_z \sqrt{\delta_y^2 + \sigma_y^2}}. \quad (8)$$

Предел последней формулы достигается в случае, если продольный размер пучка электронов гораздо больше остальных размеров. Из интеграла  $I_3$  (7) получим среднеквадратичную длительность взаимодействия, которая определит длительность импульса рассеянного излучения:

$$\sigma_t = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{(\delta_x^2 + \sigma_x^2)(\delta_z^2 + \sigma_z^2)}{\delta_x^2 + \sigma_x^2 + \delta_z^2 + \sigma_z^2}} \xrightarrow{\delta_z \gg \sigma_x, \sigma_z, \delta_x} \frac{1}{c} \sqrt{\delta_x^2 + \sigma_x^2}. \quad (9)$$

### 3 Оценим что можно получить

*Преимущество накопителя перед линейным ускорителем –  
большой средний ток и средний поток излучения.*

#### Пучок электронов

Энергия электронов  $E_0 = 3$  ГэВ,  $\gamma = E_0/mc^2 = 5871$ .

По радиусу:  $\varepsilon_x = 10^{-10}$  м · рад,  $\beta_x = 2$  м,  $\delta_x = \sqrt{\varepsilon_x \beta_x} \simeq 13$  мкм.

По вертикали:  $\varepsilon_y = 10^{-11}$  м · рад,  $\beta_y = 16$  м,  $\delta_y = \sqrt{\varepsilon_y \beta_y} \simeq 14$  мкм.

В продольном направлении:  $\delta_z = 6290$  мкм.

Средний ток  $I_e \simeq 0.4$  А, число электронов в секунду  $N_e = I_e/e = 0.25 \cdot 10^{19} \text{ с}^{-1}$ .

#### Лазерные импульсы

Длина волны  $\lambda_0 = 1.056$  мкм, энергия фотона  $\hbar\omega_0 = hc/\lambda_0 = 1.88 \cdot 10^{-19}$  Дж = 1.174 эВ.

Длительность  $\sigma_\tau = 4.25$  фс, длина  $\sigma_x = c\sigma_\tau = 1.3$  мкм.

Фокусируем в размер электронного пучка:  $\sigma_y = \sigma_z = \sigma_0 = 14$  мкм.

Энергия импульса  $E_\Lambda = 1$  мкДж, частота повторения  $f_\Lambda = 357$  МГц, средняя мощность  $P_\Lambda = 357$  Вт.

Число лазерных фотонов в импульсе:  $N_\Lambda = E_\Lambda/\hbar\omega_0 \simeq 5 \cdot 10^{12}$ .

#### Излучение

Максимальная энергия  $\hbar\omega_{max} \simeq 4\gamma^2 \hbar\omega_0 \cdot \sin^2(\pi/4) \simeq 80$  МэВ.

Длительность импульса рассеянного излучения из формулы (9)  $\sigma_t^* \simeq 66$  фс.

Томсоновское сечение  $\sigma_T = 0.665 \cdot 10^{-16}$  мкм<sup>2</sup>,  $I_4 \simeq 1.276 \cdot 10^{-6}$  мкм<sup>-2</sup>,  $(\sigma_T \cdot I_4) \simeq 0.85 \cdot 10^{-22}$ .

Поток рассеянного излучения:  $\Pi = N_e \cdot N_\Lambda \cdot \sigma_T \cdot I_4 \simeq 10^9$  фотонов в секунду (2.8 на 1 столкновение).

Поток рассеянного излучения с энергиями до 80 кэВ – приблизительно в тысячу раз меньше.

