

ПОНДЕРОМОТОРНОЕ РАССЕЯНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ КАК МЕТОД ДИАГНОСТИКИ РЕЛЯТИВИСТСКИ ИНТЕНСИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

О.Е. Вайс и В.Ю. Быченков

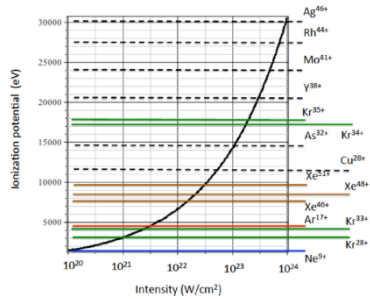
¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,

*²Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л.
Духова «Росатом»*

Новые виды диагностик ультраинтенсивных лазерных импульсов

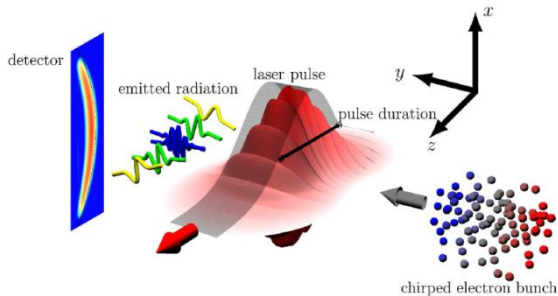
- мультифотонная ионизация

Ciappina M.F., Popruzhenko S.V., Bulanov S.V., Ditmire T., Korn G. and Weber S. Phys. Rev. A 99 043405 (2019)



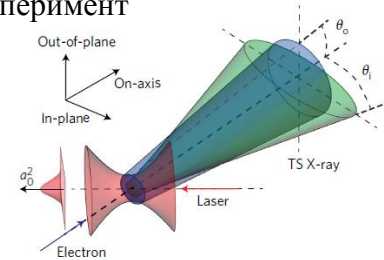
- рассеяние на chirпированном пучке электронов

F. Mackenroth and A. R. Holkundkar Sci.Rep. (2019) 9 19607



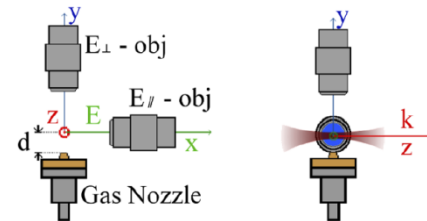
- рассеяние на встречном пучке электронов (рассеяние Комптона)

W. Yan, C. Fruhling, G. Golovin et. al Nat. Photon. 11 (2017) 514 - эксперимент



- нелинейное томсоновское рассеяние

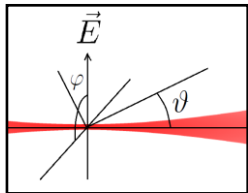
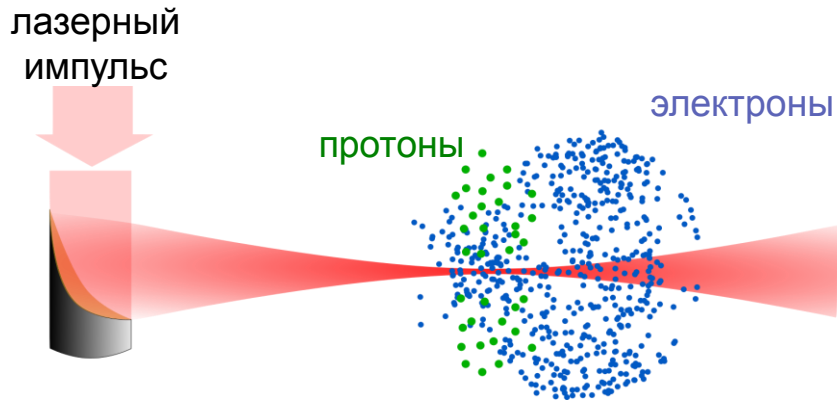
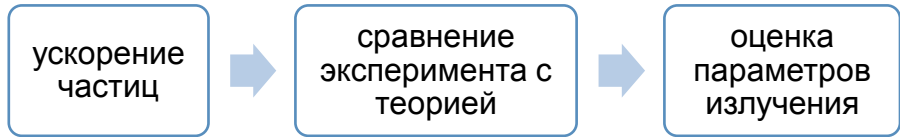
C.Z. He, A. Longman, J.A. P'erez-Hern'andez et al. Opt.Express Vol. 27 N.21 (2019) 30020 - эксперимент



План выступления

- Схема диагностики лазерного импульса на основе вакуумного ускорения частиц и условия применимости
- Модели, используемые в теоретическом расчете:
 - Остросфокусированный лазерный импульс
 - Метод пробных частиц
- Характеристики электронов
- Характеристики протонов

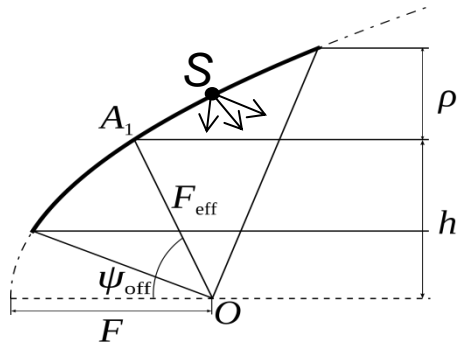
Схема диагностики лазерного импульса



- Силы кулоновского взаимодействия между частицами и остаточным зарядом много меньше силы взаимодействия частиц с лазерным импульсом: $E_C \ll E_l$
- Длина пробега протонов много больше расстояния до детектора
- Малость рефракции лазерного импульса при прохождении через ионизованный газ
- Мощность лазерного импульса ниже критического значения

$$(P_L < P_{\text{crit}} = 17(\omega/\omega_{pe})^2[\text{ГВт}])$$

Описание компонент лазерного импульса



Линейно поляризованный лазерный импульс:

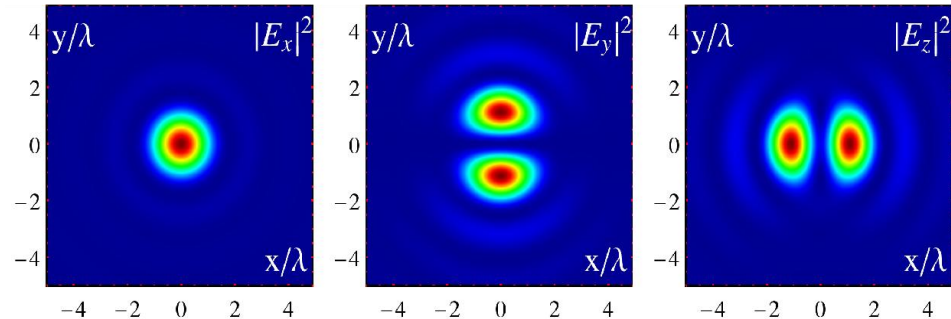
$$\mathbf{E}_i = E_{0x} \mathbf{e}_x \exp(-i(kz + \omega t + \phi_0))$$

$$\mathbf{B}_i = -E_{0x} \mathbf{e}_y \exp(-i(kz + \omega t + \phi_0))$$

Дифракционные интегралы Стреттона-Чу
[Stratton J. A., Chu L. J., Phys.Rev., 1939,
56, 99]

Распределения компонент электрического поля лазерного импульса в фокальной плоскости:

$$\psi = 60^\circ$$



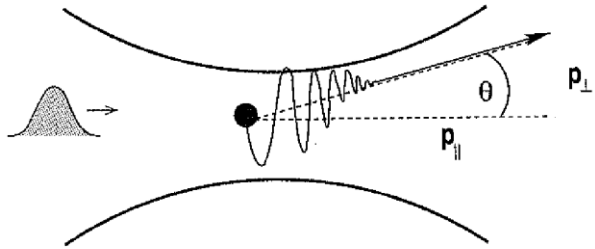
$$E_z \approx \varepsilon E_x, E_y \approx \varepsilon^2 E_x, \varepsilon = (kD_F/2)^{-1}$$

Уменьшение диаметра фокального пятна \rightarrow увеличение относительной амплитуды продольной компоненты лазерного импульса (E_z)

Метод пробных частиц

Релятивистское уравнение движение с силой Лоренца:

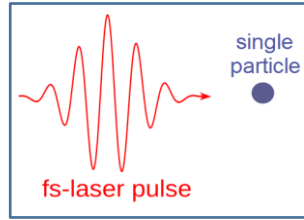
$$\frac{dm\vec{v}\gamma}{dt} = q \left(\vec{E} + \frac{[\vec{v} \times \vec{B}]}{c} \right), \quad \frac{d\vec{R}}{dt} = \vec{v}$$



Релятивистские интенсивности (для электронов):

$$a_0 = 0.85 \times (I_L \lambda^2)^{1/2} > 1,$$

где I_L – интенсивность лазерного импульса [10^{18} Вт/см²], λ – длина [мкм].



Описание динамики протонов

$$\vec{v} = \vec{v}_{fast} + \vec{v}_{slow}$$

осцилляции

дрейф

Электрическое поле:

$$\vec{E} = (\vec{E}_0 + (\vec{r}\vec{\nabla})\vec{E}_0) \cos \phi$$

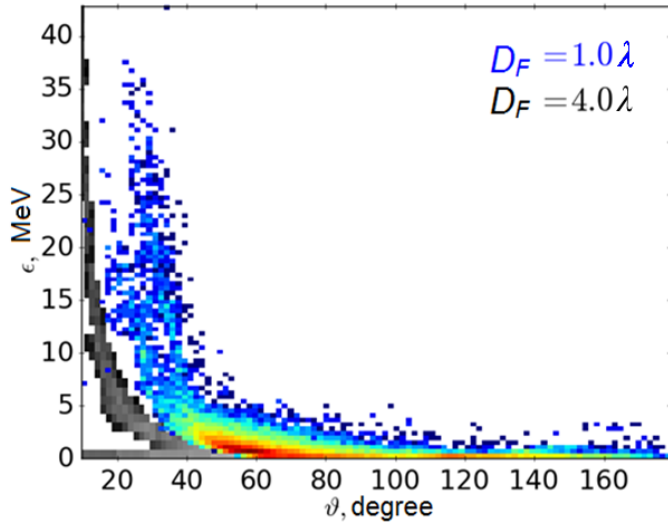
$$(\vec{r}\vec{\nabla})\vec{E}_0 \ll \vec{E}_0$$

Нерелятивистская пондермоторная сила:

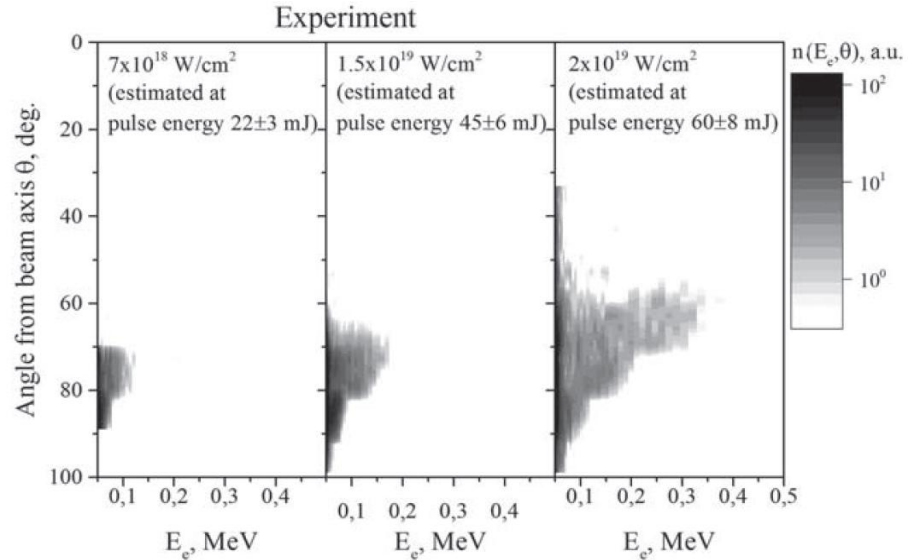
$$\vec{F}_p = -\frac{q^2}{4m^2\omega^2} \vec{\nabla} E^2$$

Спектрально-угловые распределения ускоренных электронов

интенсивности свыше 10^{21} Вт/см²



интенсивности от 10^{18} до 10^{20} Вт/см²

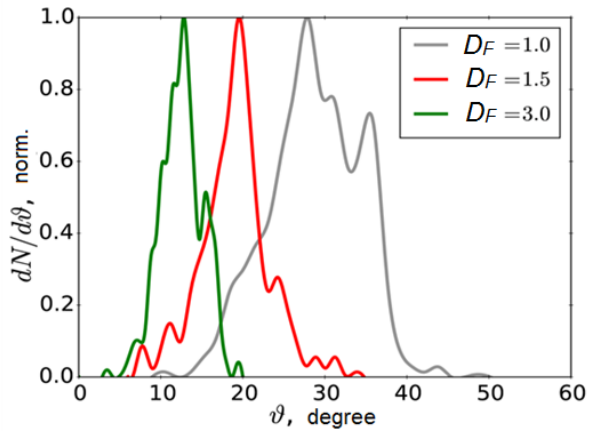


O.E. Vais and V.Yu. Bychenkov,
Appl. Phys. B 124 211(2018)
<https://doi.org/10.1007/S00340-018-7084-9>

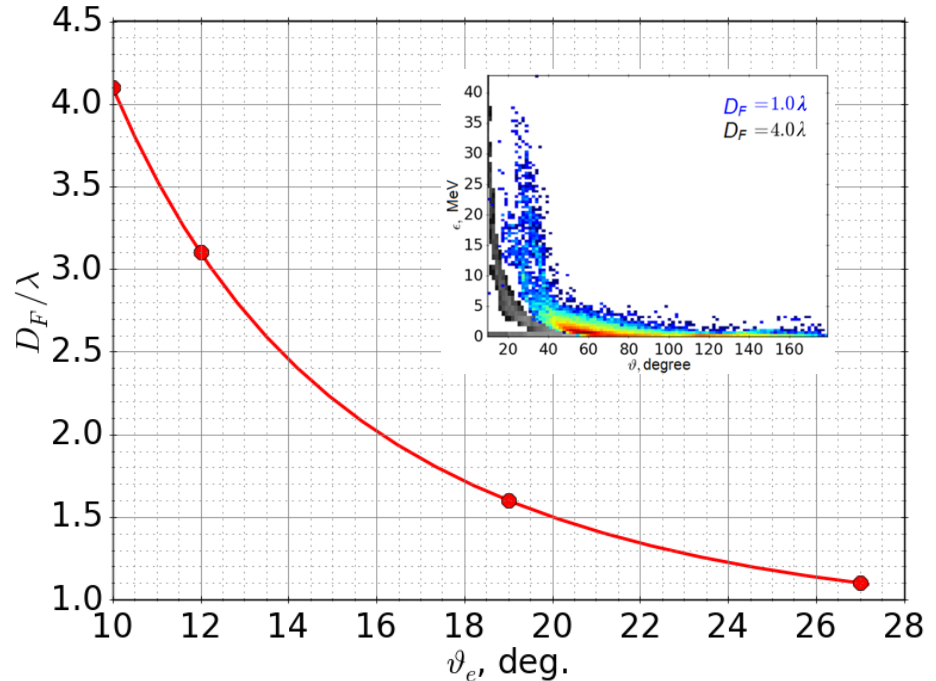
K.A. Ivanov, I.N. Tsymbalov, O.E. Vais,
S.G. Bochkarev, R.V. Volkov, V.Yu. Bychenkov,
A.B. Savel'ev,
Plasma Phys. Control. Fusion 60 105011 (2018)
<https://doi.org/10.1088/1361-6587/aada60>

Спектрально-угловые распределения ускоренных электронов

Угловые особенности распределений

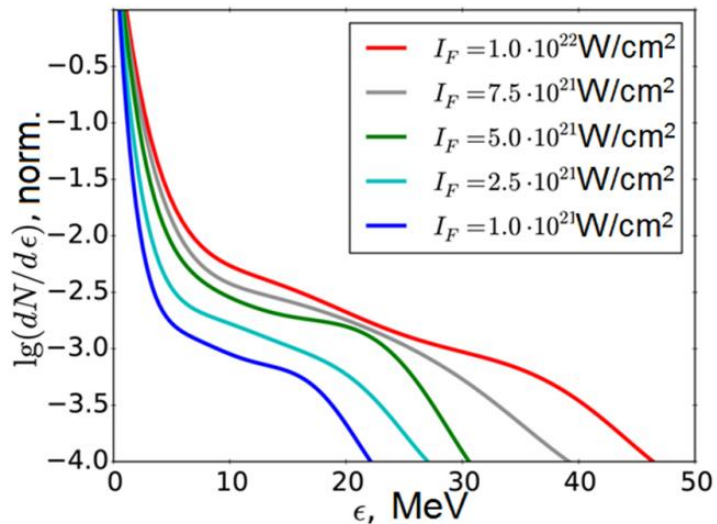


угловое распределение
быстрых частиц (>10 МэВ)



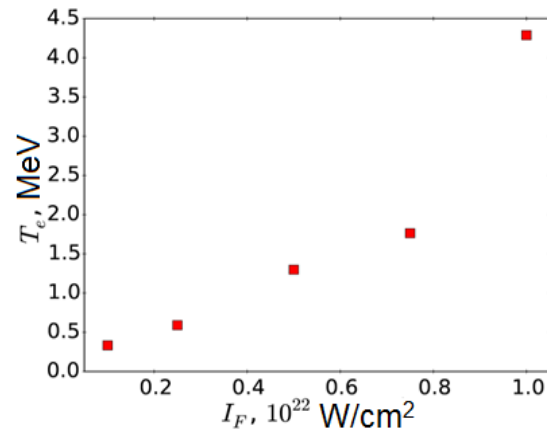
Спектрально-угловые распределения ускоренных электронов

полные энергетические спектры электронов

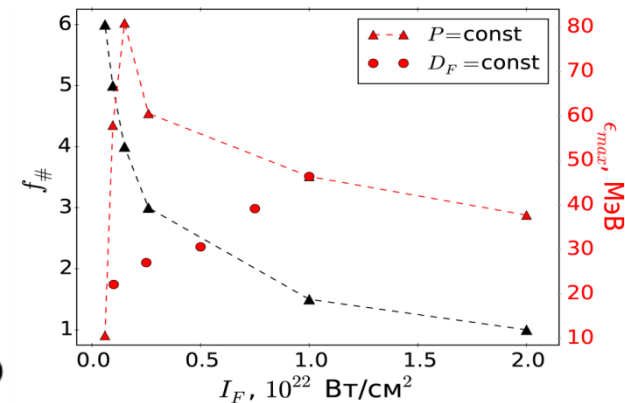


$$D_F \approx 1.5\lambda, \tau_{FWHM} = 26\text{fs}$$

Температура
низко-
энергетичных
электронов



Энергия
отсечки

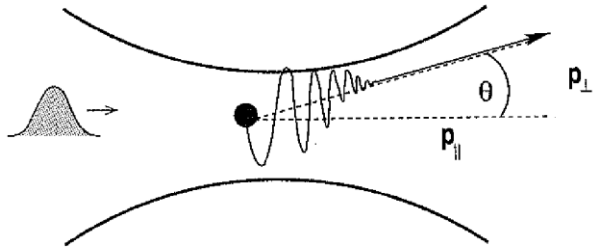


$$f\# = F_{\text{eff}}/2\rho$$

Метод пробных частиц

Релятивистское уравнение движение с силой Лоренца:

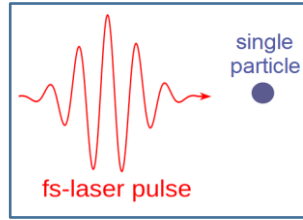
$$\frac{dm\vec{v}\gamma}{dt} = q \left(\vec{E} + \frac{[\vec{v} \times \vec{B}]}{c} \right), \quad \frac{d\vec{R}}{dt} = \vec{v}$$



Релятивистские интенсивности (для электронов):

$$a_0 = 0.85 \times (I_L \lambda^2)^{1/2} > 1,$$

где I_L – интенсивность лазерного импульса [10^{18} Вт/см²], λ – длина [мкм].



Описание динамики протонов

$$\vec{v} = \vec{v}_{fast} + \vec{v}_{slow}$$

осцилляции

дрейф

Электрическое поле:

$$\vec{E} = (\vec{E}_0 + (\vec{r}\vec{\nabla})\vec{E}_0) \cos \phi$$

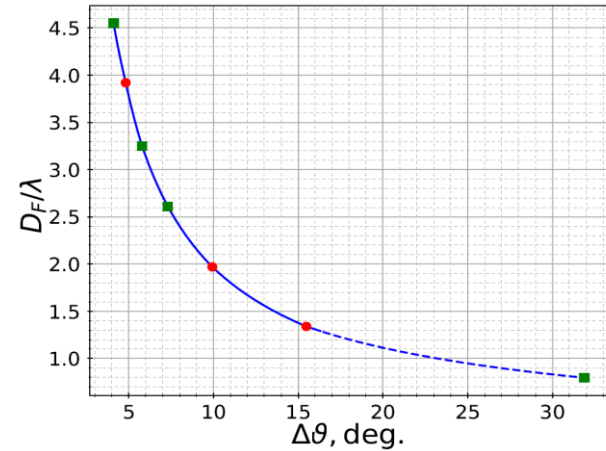
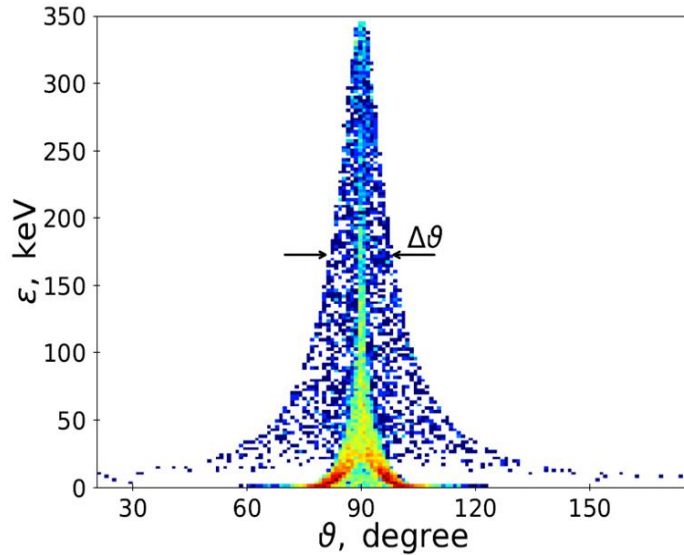
$$(\vec{r}\vec{\nabla})\vec{E}_0 \ll \vec{E}_0$$

Нерелятивистская пондермоторная сила:

$$\vec{F}_p = -\frac{q^2}{4m^2\omega^2} \vec{\nabla} E^2$$

Спектрально-угловые распределения протонов

Угловые особенности распределений



$$\tan(\nabla \mathcal{G} / 2) \ll 1 \Rightarrow \frac{\tan(\nabla \mathcal{G} / 2)}{D_F / z_R} \approx \text{const.}$$

$$\vec{F}_p = -\frac{q^2}{4m^2\omega^2} \vec{\nabla} E^2 \rightarrow \varepsilon_p \sim \frac{\tau_{\text{FWHM}}^2}{w_0^2} I_0^2$$

O.E. Vais, A.G.R Thomas, A.M. Maksimchuk,
 K. Krushelnick and V.Yu. Bychenkov
 New J. Phys. 22 (2020) 023003
<https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab6eac>

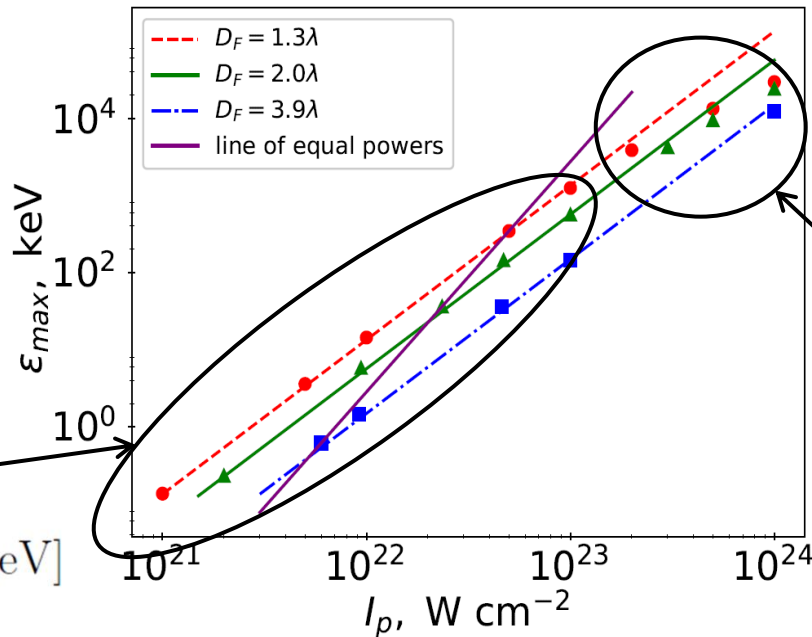
Спектрально-угловые распределения протонов

Энергетические особенности распределений

1) $\tau_{\text{int}} \approx \tau_{\text{FWHM}}$

2) $\varepsilon_p \sim \frac{\tau_{\text{FWHM}}^2}{w_0^2} I_0^2$

3) $\varepsilon_{\text{max}} \approx 1.7 \times I_{\text{L23}}^2 \times$
 $(\tau_{\text{FWHM}}[\text{fs}] / D_{\text{FL}})^2 [\text{keV}]$
 $I_{\text{L23}} = I_p / 10^{23} \text{ W cm}^{-2}$

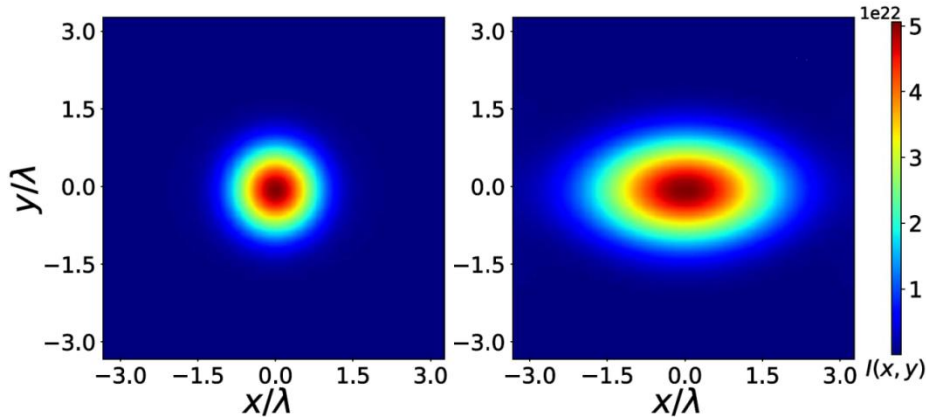


1) $\tau_{\text{int}} \sim w_0 / \sqrt{I_p}$

2) $\varepsilon_p \sim I_0$

$P = \text{const.} \quad \varepsilon_p \sim I_0^3 / P$

Спектрально-угловые распределения протонов



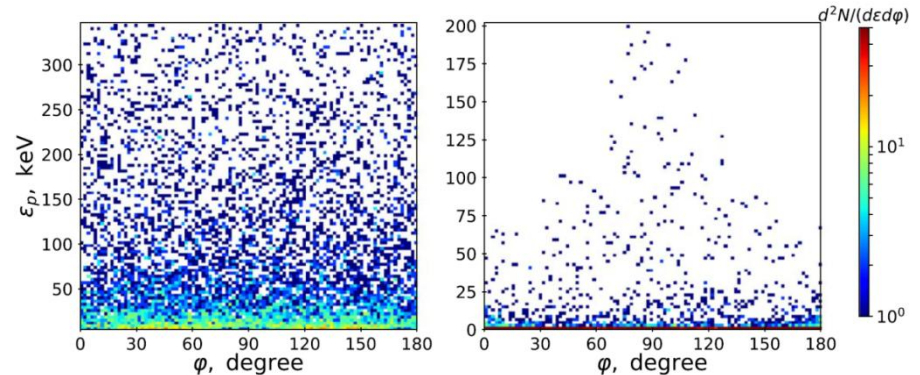
Распределения интенсивности лазерного пучка в фокальной плоскости:

- 1) фокусировка пучка с гауссовым профилем
- 2) фокусировка пучка, соответствующего половине гауссова профиля ($x > 0$)

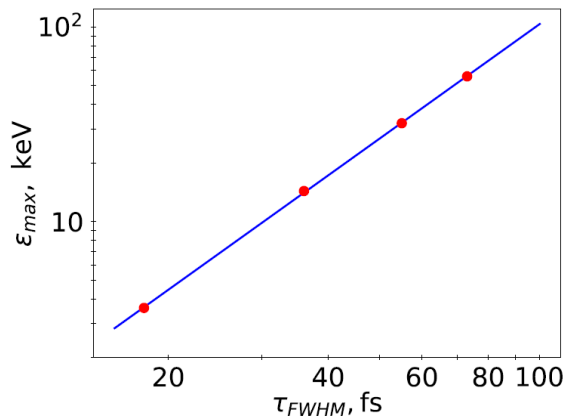
$$1) \frac{dp_i}{dt} = -\frac{2\pi q^2}{m\omega^2 c} \frac{\partial I(\vec{r}, t)}{\partial r_i}$$

$$2) p_x/p_y \simeq D_{Fy}/D_{Fx}$$

$$3) \varepsilon_p(\varphi = 0^\circ)/\varepsilon_p(\varphi = 90^\circ) \simeq (D_{Fy}/D_{Fx})^2$$



Спектрально-угловые распределения протонов

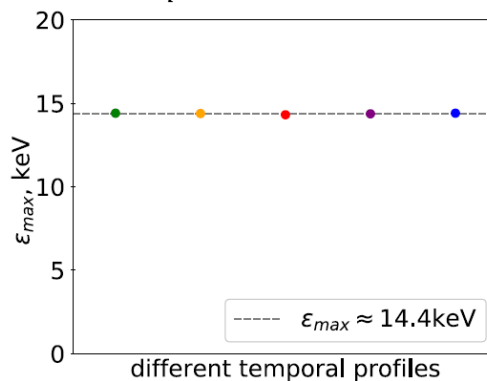


энергии отсечки протонных спектров

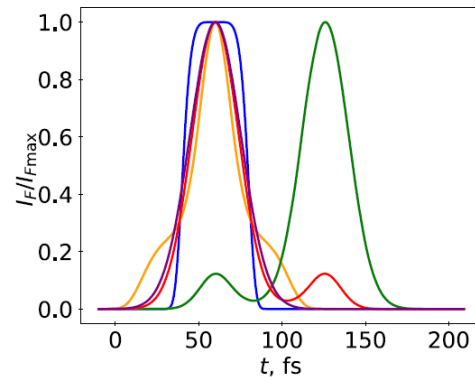
$$I_p = 10^{22} \text{ ВТ/см}^2, D_F \approx 1.3\lambda$$

$$\varepsilon_p \sim \frac{\tau_{FWHM}^2 I_0^2}{w_0^2} \left(\int_{-\infty}^{\infty} f(\xi_*) d\xi_* \right)^2$$

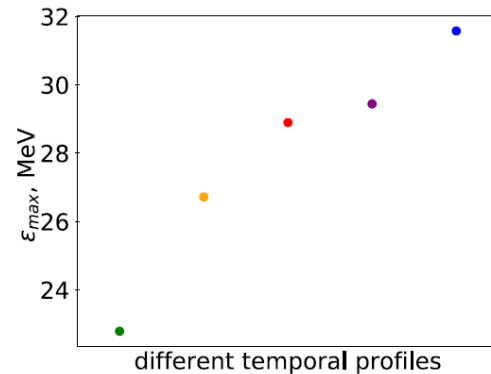
$I_p = 10^{22} \text{ ВТ/см}^2$



временные огибающие



$I_p = 10^{24} \text{ ВТ/см}^2$



Заключение

электроны

протоны

углы вылета частиц

$$\vartheta < \pi/6$$

$$\vartheta \approx \pi/2$$

характерные энергии

МэВ

кэВ

зависит в том числе от:

пространственно-временной формы лазерного импульса и его длительности

для диагностики диаметра пятна и пиковой интенсивности ($I_p > 10^{21}$ Вт/см²)