

ВЗАИМОДОПОЛНЯЮЩИЕ ДИАГНОСТИКИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ  
ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ПОМОЩИ ВАКУУМНОГО  
УСКОРЕНИЯ ПРОТОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ

О.Е. Вайс и В.Ю. Быченков

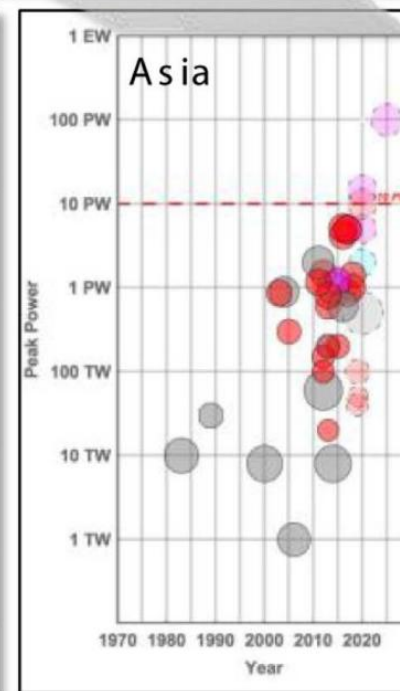
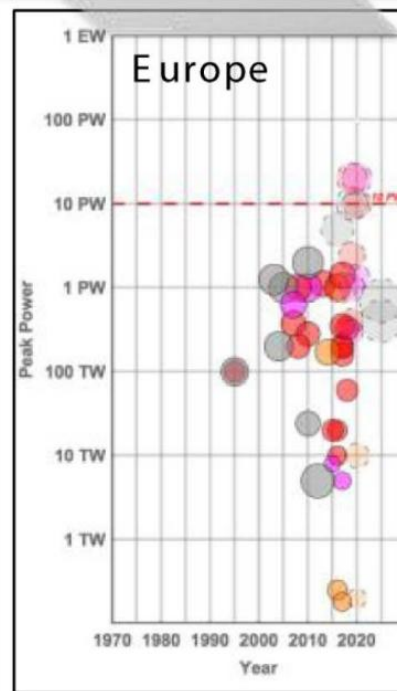
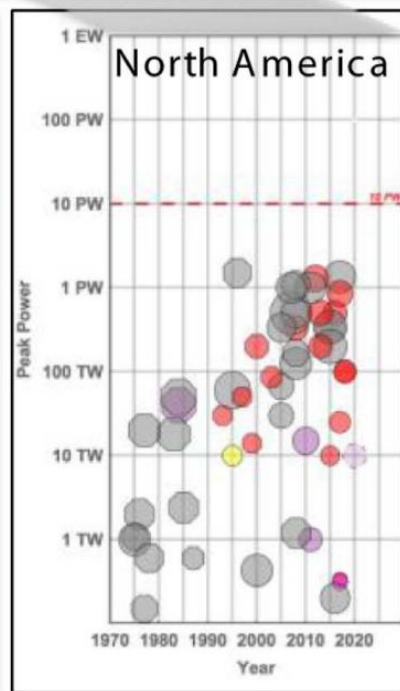
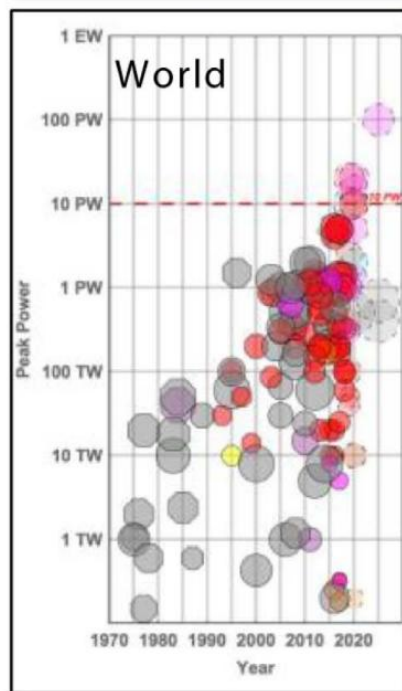
*<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,*

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

## План выступления

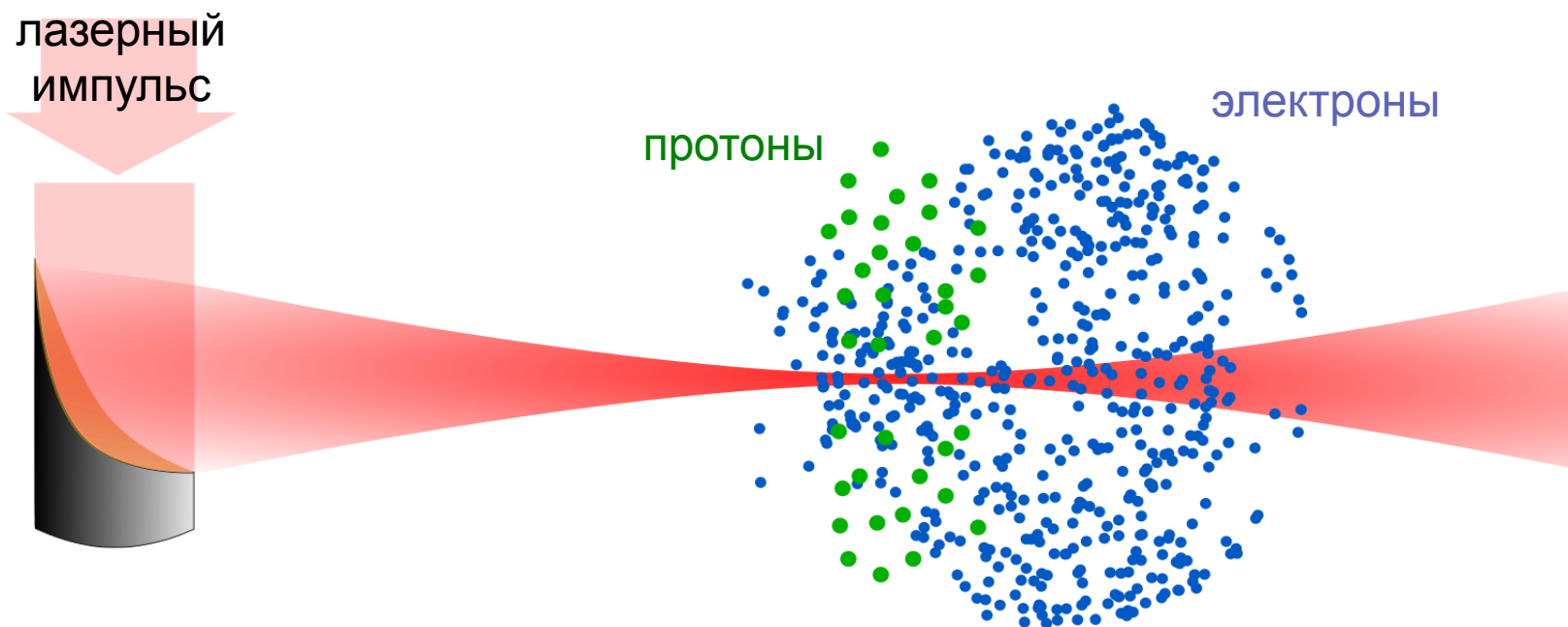
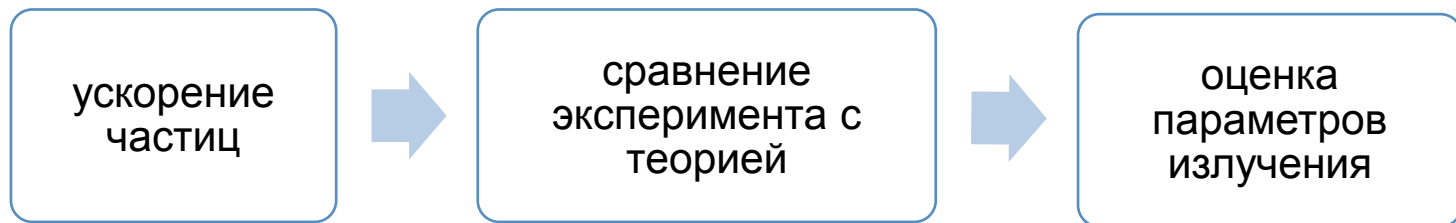
- Петаваттные лазерные системы
- Схема диагностики лазерного импульса на основе вакуумного ускорения частиц и условия применимости
- Модели, используемые в теоретическом расчете:
  - Остросфокусированный лазерный импульс
  - Метод пробных частиц
- Взаимодополняющая диагностика на основе одновременного детектирования протонов и электронов [Vais O. E., Bychenkov V. Yu. Complementary diagnostics of high-intensity femtosecond laser pulses via vacuum acceleration of protons and electron, Plasma Phys. Control. Fusion 63, 014002 (2021).]

# Петаваттные лазерные системы



Danson C.N., Haefner C., Bromage J., Butcher Th.  
*High Power Laser Sci. Eng.*, 7, e54 (2019).

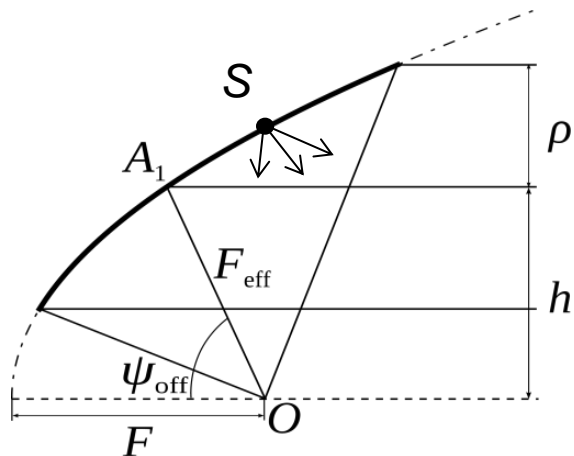
# Схема диагностики лазерного импульса



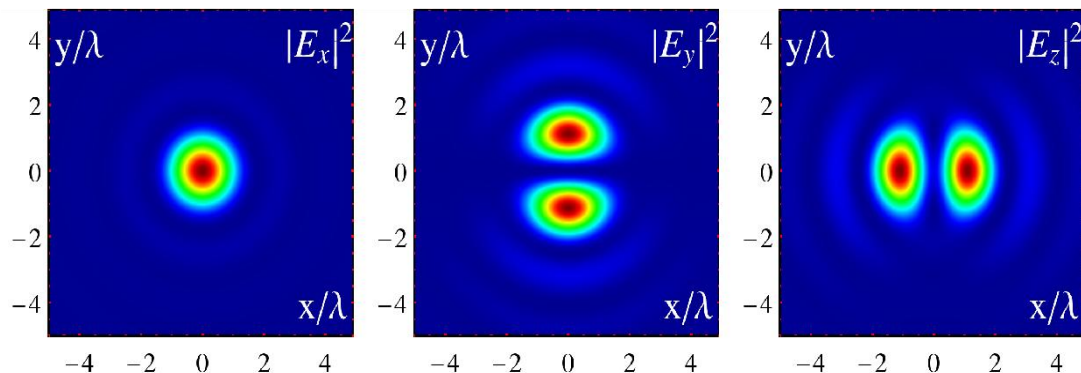
диагностика при помощи одного типа частиц → диаметр пятна + интенсивность

# Описание компонент лазерного импульса

Внеосевое параболическое зеркало:



Распределения компонент электрического поля лазерного импульса в фокальной плоскости:



$\psi = 60^\circ$

Линейно поляризованный лазерный импульс:

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

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

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

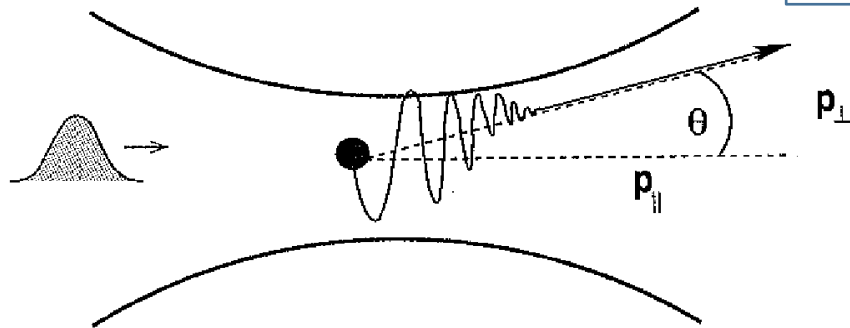
Уменьшение диаметра фокального пятна →  
увеличение относительной амплитуды  
продольной компоненты лазерного импульса  
( $E_z$ )

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

# Метод пробных частиц

Релятивистское уравнение движение с силой Лоренца:

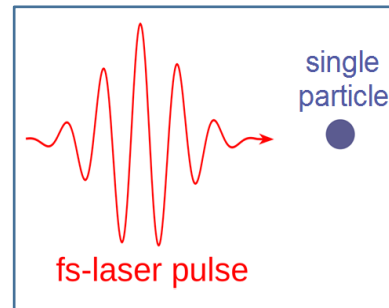
$$\frac{dm\vec{v}\gamma}{dt} = q \left( \vec{E} + \frac{[\vec{v} \times \vec{B}]}{c} \right), \quad \frac{d\vec{R}}{dt} = \vec{v}$$



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/см<sup>2</sup>],  $\lambda$  – 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:

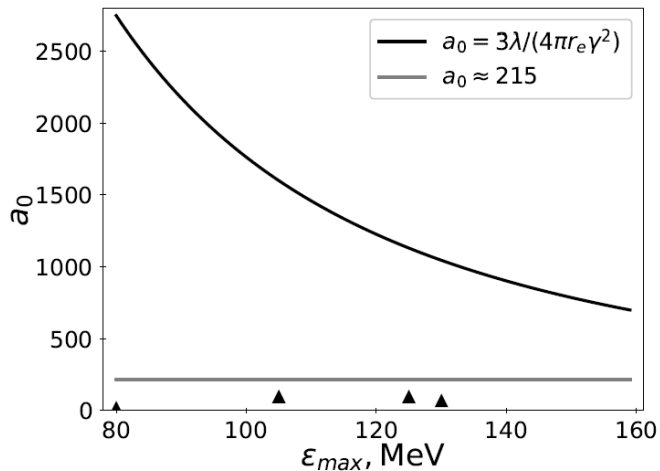
$$\vec{F}_p = -\frac{q^2}{4m^2\omega^2} \vec{\nabla} E^2$$

Интенсивность лазерного импульса

$$I_L < 10^{24} \text{Вт/см}^2$$

# Условия применимости

проверка условия малости сил  
радиационного трения



1. Силы кулоновского взаимодействия между частицами и остаточным зарядом много меньше силы взаимодействия частиц с лазерным импульсом:

$$n_e \ll n_{cr} \frac{a_0 \lambda}{D_F} \quad (\text{газ}) \quad \Delta z \ll \Delta z_{\max} = \frac{a_0 n_{cr}}{\pi n_e} \quad (\text{нанофольга})$$

$$n_{cr} = m_e \omega_0^2 / (4\pi e^2) = 1.7 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$$

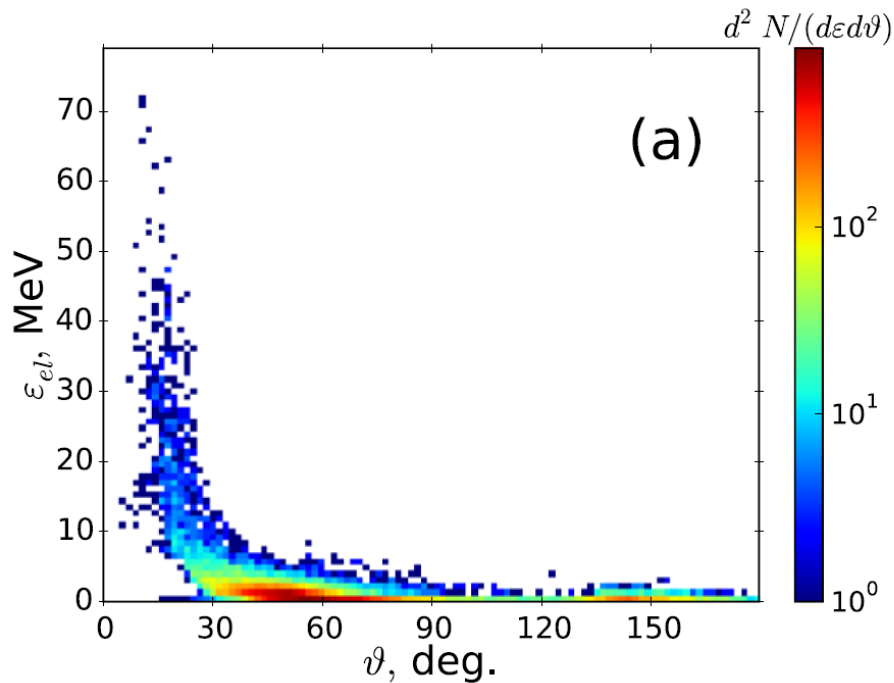
2. Малость силы радиационного трения

$$a_0 \ll 3\lambda / (4\pi r_e \gamma^2)$$

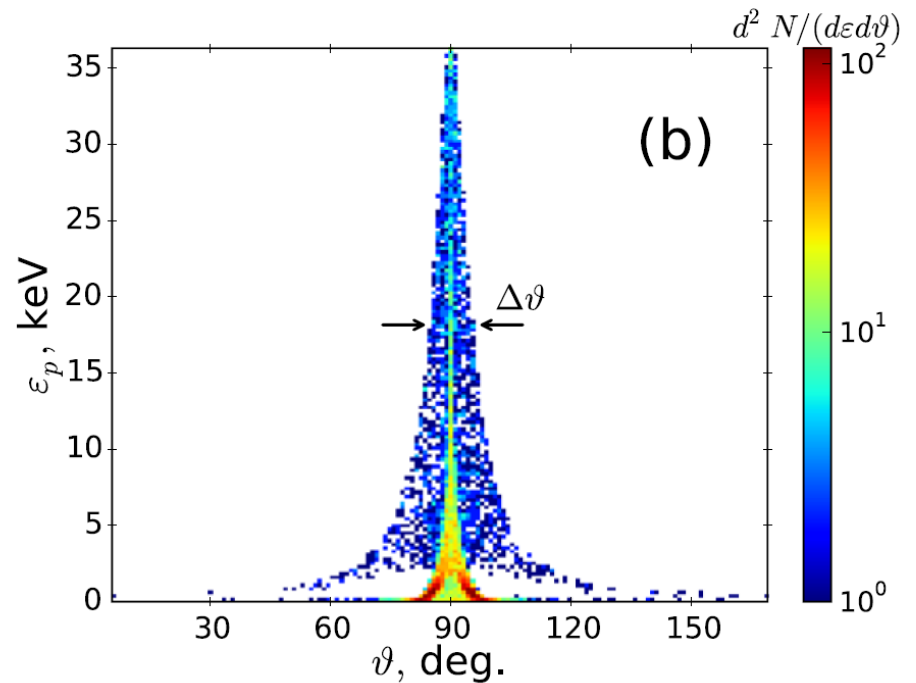
3. Длина свободного пробега протонов в газе много больше расстояния до детектора
4. Малость рефракции лазерного импульса при прохождении через ионизированный газ
5. Мощность лазерного импульса ниже критического значения

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

# Спектрально-угловые распределения ускоренных частиц



спектрально-угловое  
распределение релятивистских  
электронов

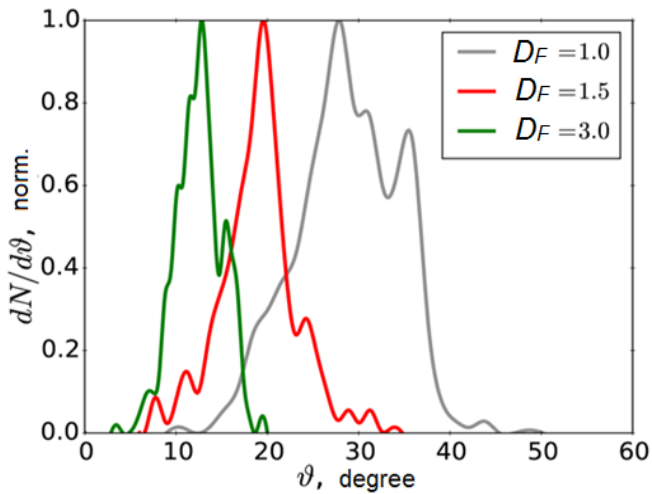


спектрально-угловое  
распределение  
нерелятивистских протонов

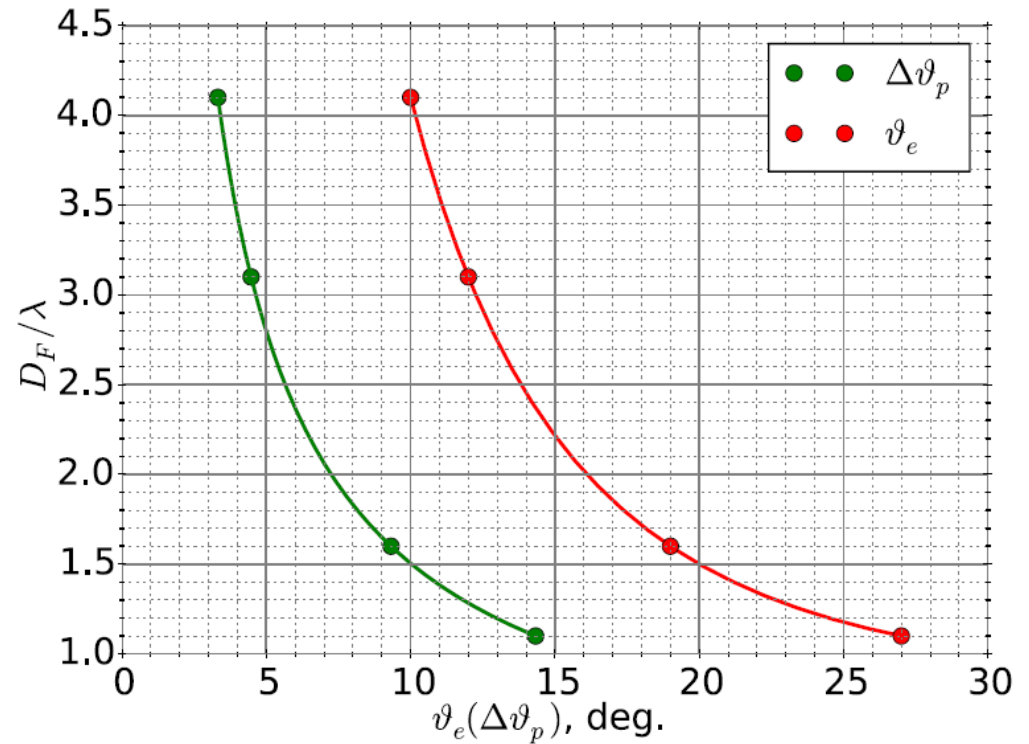


# Угловые распределения частиц

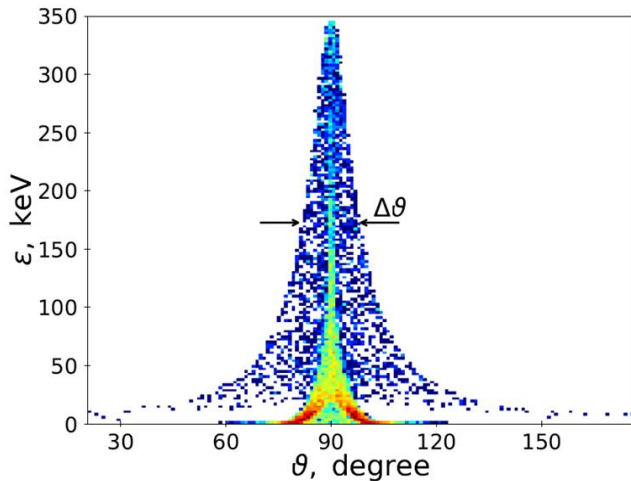
угловое распределение быстрых электронов (>10 МэВ)



связь диаметра фокального пятна с угловыми характеристиками распределений частиц

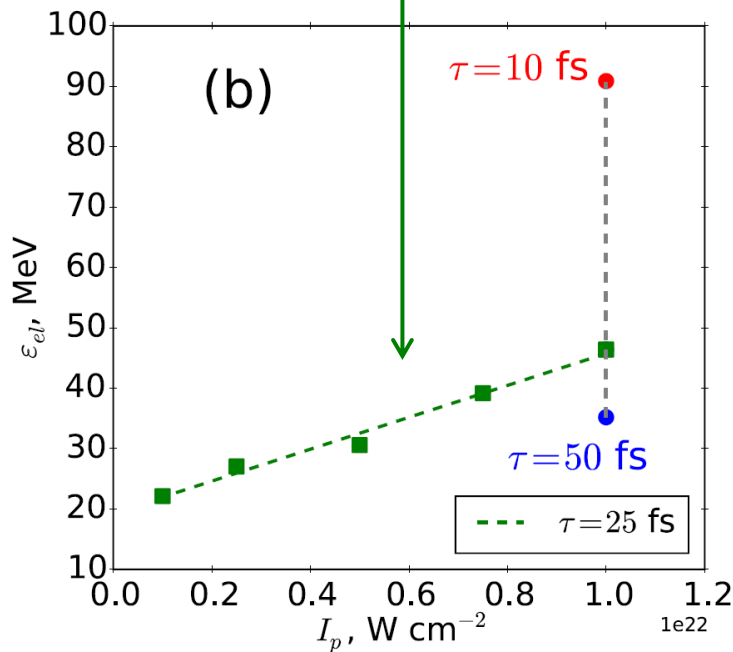
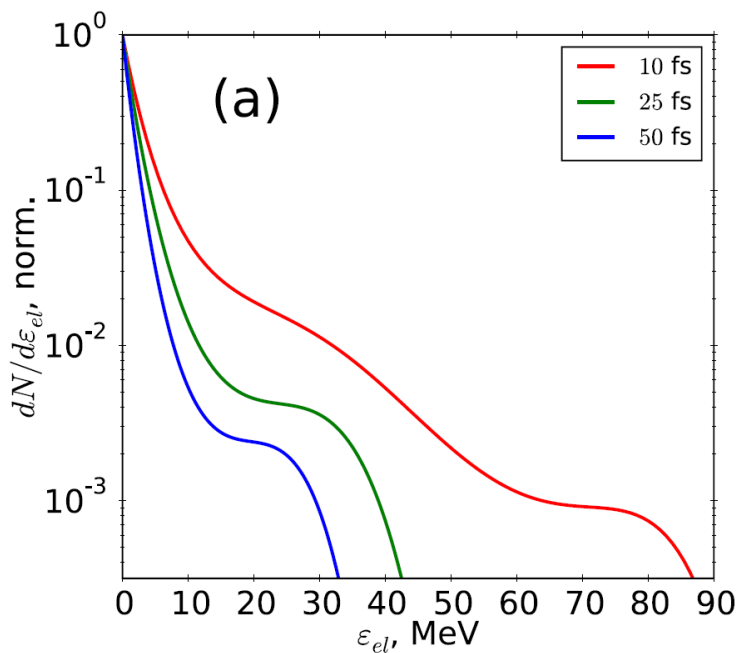
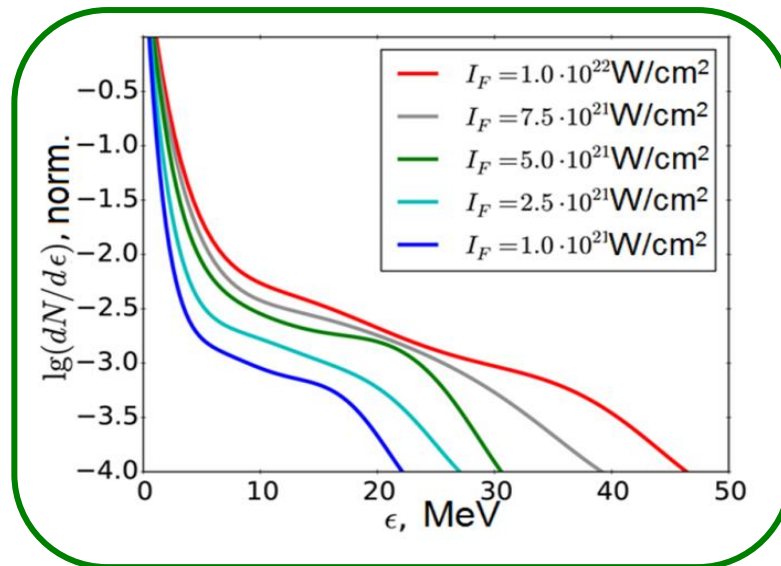
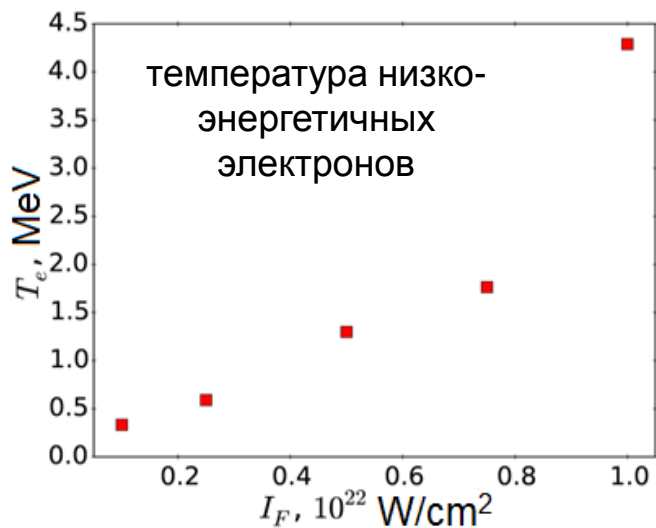


спектрально-угловое распределение протонов

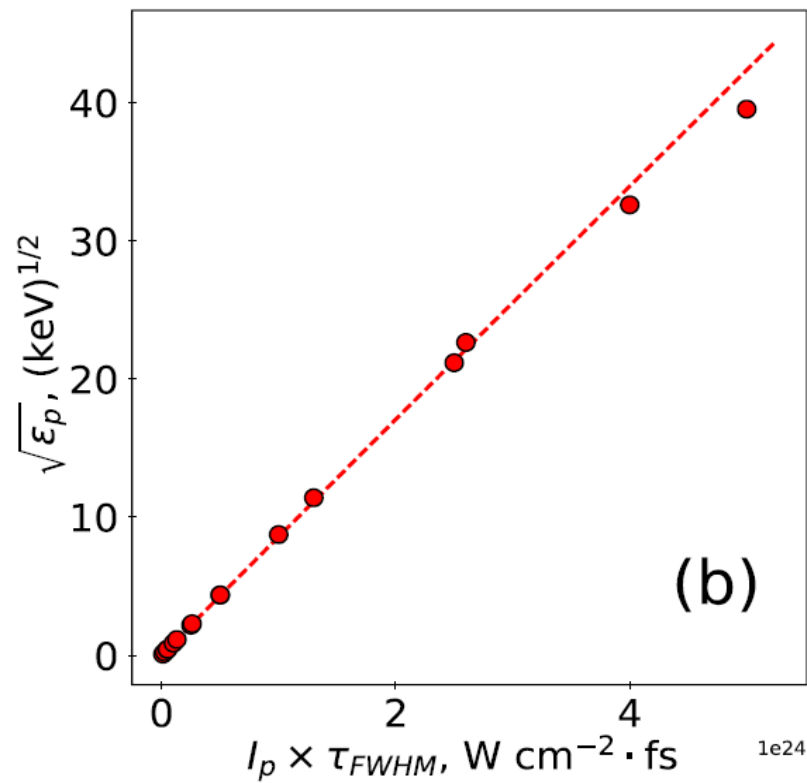
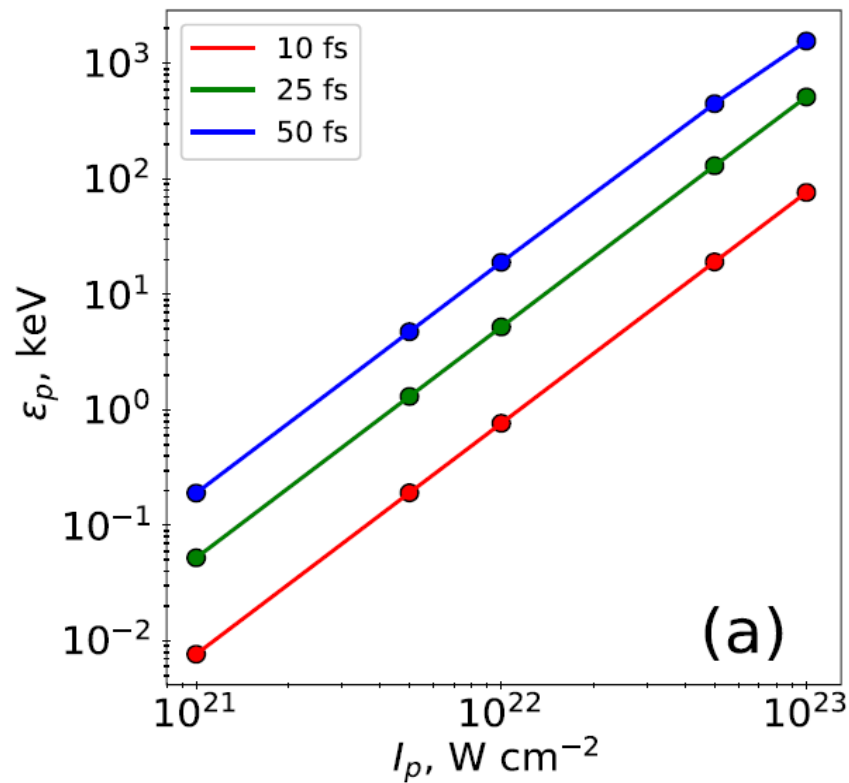


$$\tan(\nabla \vartheta / 2) \ll 1 \Rightarrow \frac{\tan(\nabla \vartheta / 2)}{D_F / z_R} \approx const.$$

# Спектральные распределения электронов



# Энергии отсечки протонных спектров



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

# Энергии отсечки протонных спектров

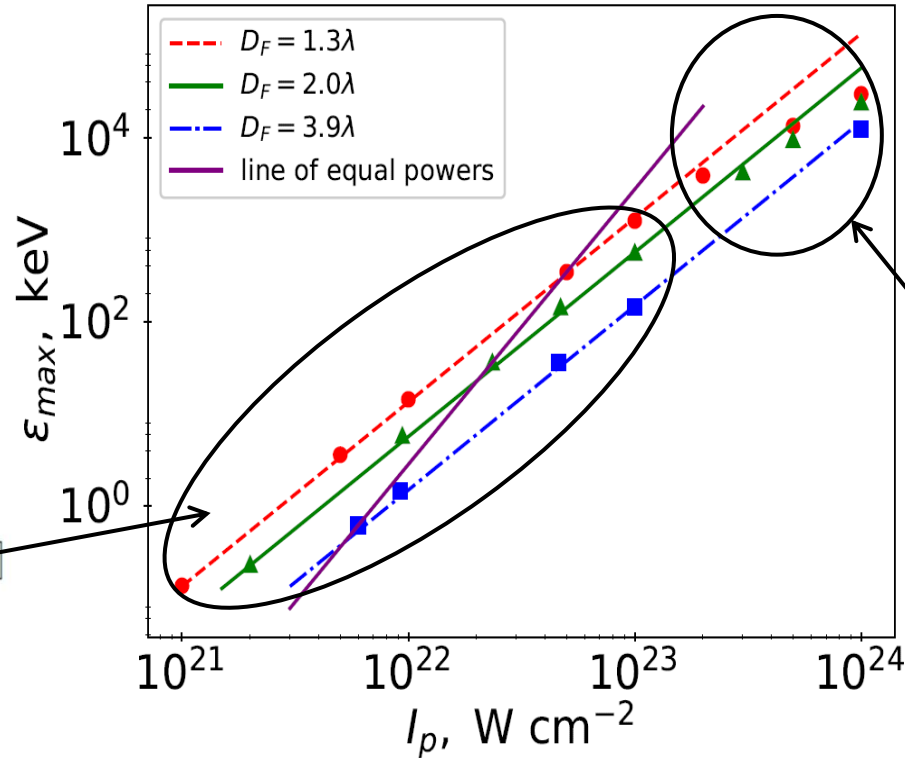
энергии отсечки  
протонных спектров

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

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

3)  $\varepsilon_{\text{max}} \approx 1.7 \times I_{\text{L23}}^2 \times (\tau_{\text{FWHM}}[\text{fs}] / D_{\text{F}\lambda})^2 [\text{keV}]$

$I_{\text{L23}} = I_p / 10^{23} \text{ W cm}^{-2}$



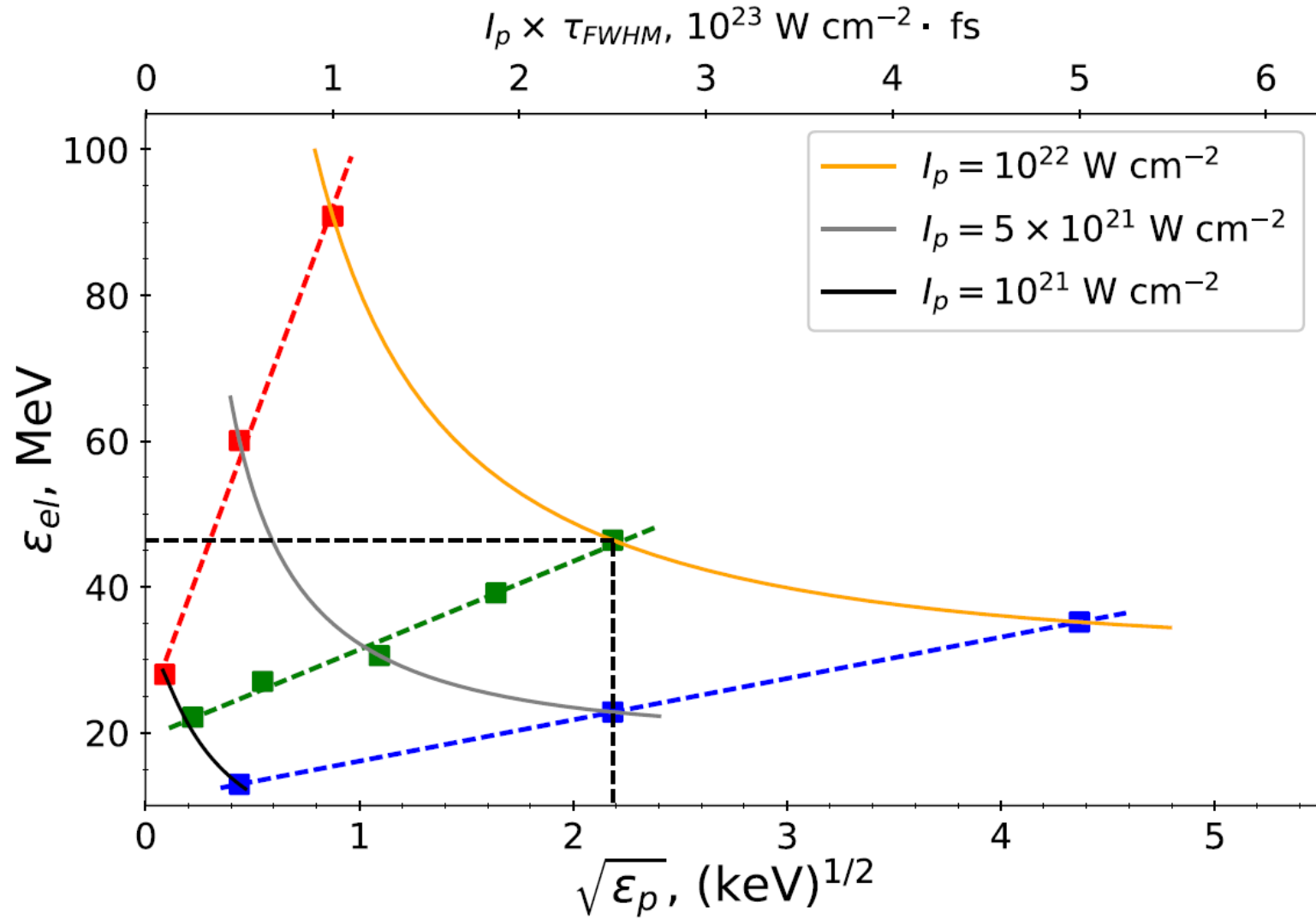
1)  $\tau_{\text{int}} \sim w_0 / \sqrt{I_p}$

2)  $\varepsilon_p \sim I_0$

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

$\tau_{\text{FWHM}} = 36 \text{ fs}$

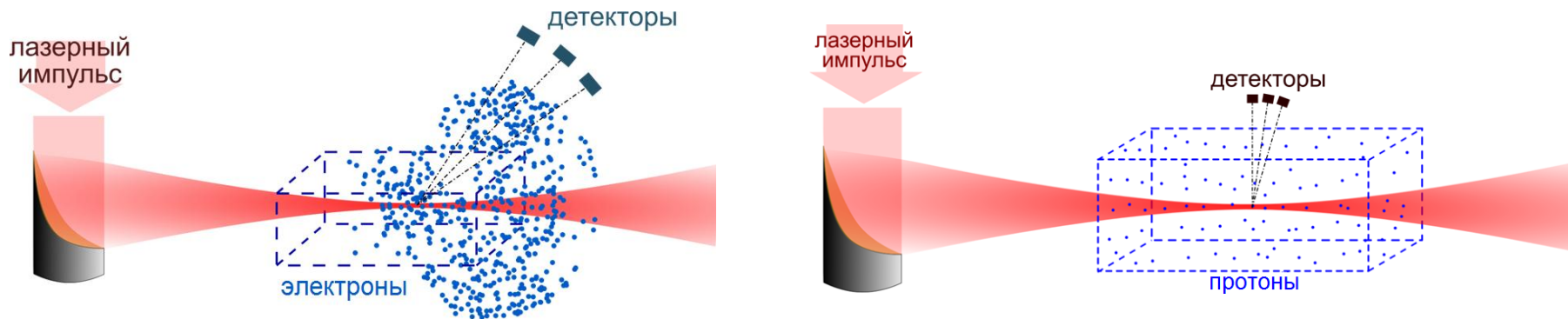
# Карта энергий электронов и протонов



$$\epsilon_{el} \sim I_p^\alpha \tau_{FWHM}^{-\beta}, \alpha, \beta > 0$$

$$\epsilon_p \sim (I_p \tau_{FWHM})^2$$

# Заклучение



**электроны**

**протоны**

углы вылета частиц

$$\vartheta < \pi/6$$

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

характерные энергии

МэВ

кэВ

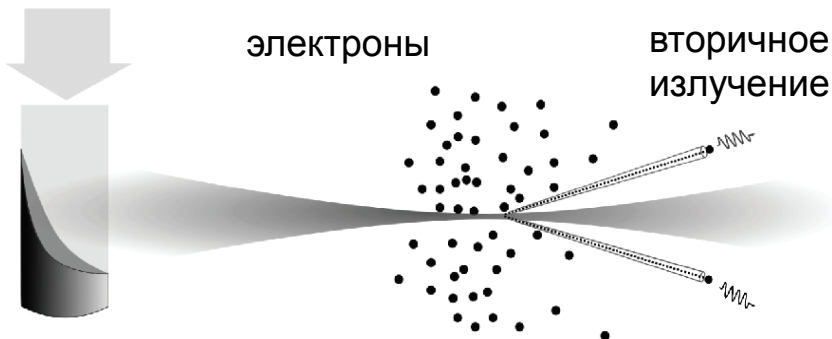
зависит от:

пространственно-временной формы лазерного импульса

Характерные параметры лазерного импульса: фемтосекундные длительности (10 – 100 фс), интенсивности  $10^{21}$ - $10^{23}$  Вт/см<sup>2</sup>, диаметр фокального пятна 1- 6 длин волн.

# Нелинейное томсоновское рассеяние

лазерный импульс



Условие применимости приближения

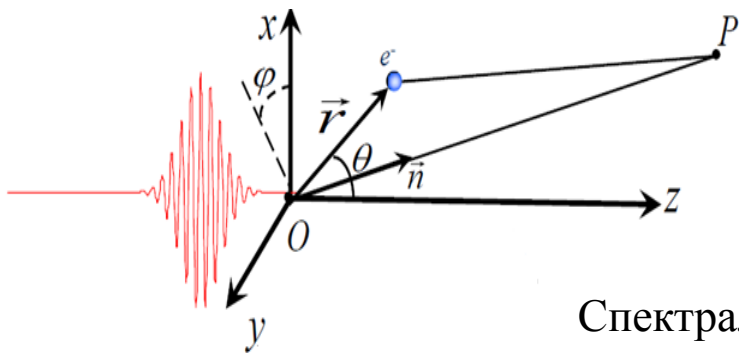
$$\hbar\omega_0 \ll m_e c^2$$

Безразмерная скорость частицы

$$\vec{\beta} = \frac{\vec{v}}{c}$$

Мощность вторичного излучения в единицу телесного угла

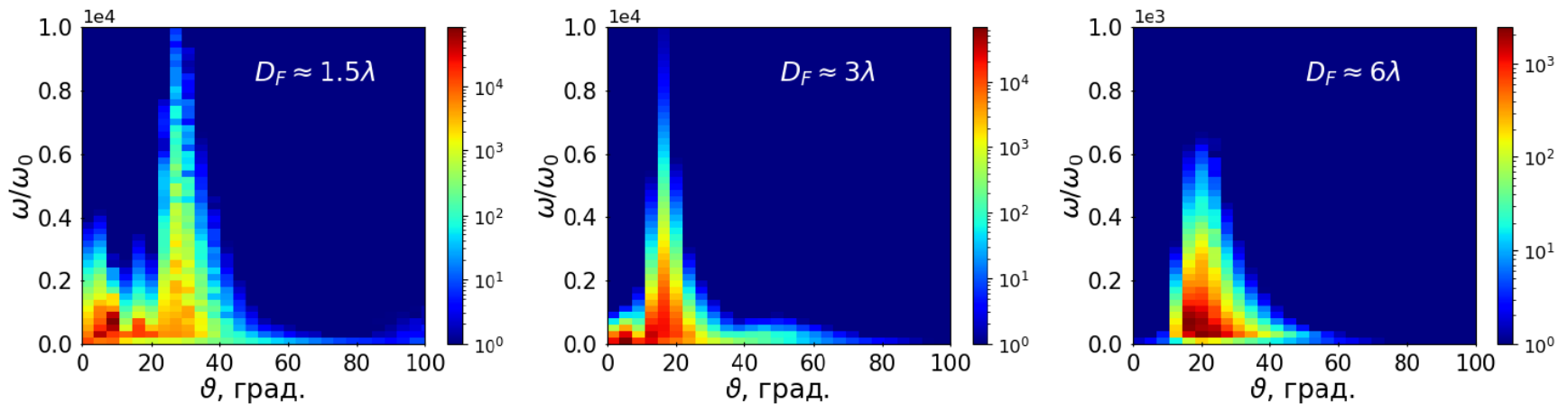
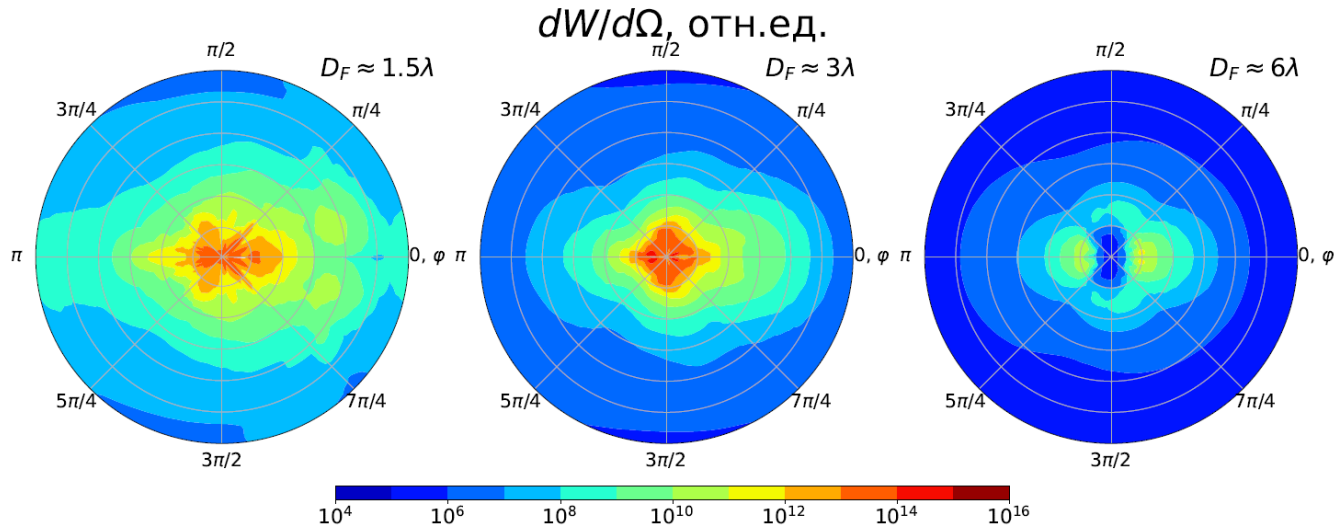
$$\frac{dP(t')}{d\Omega} = \frac{e^2}{4\pi c} \left| \frac{\left[ \vec{n} \times \left[ (\vec{n} - \vec{\beta}) \times \dot{\vec{\beta}} \right] \right]}{(1 - \vec{n} \cdot \vec{\beta})^3} \right|_{ret}^2, [Bm / sr]$$



Спектральная плотность мощности вторичного излучения в ед. тел. угла

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2 \omega^2}{4\pi^2 c} \left| \int_{-\infty}^{\infty} dt \left[ \vec{n} \times \vec{\beta} \right] e^{i\omega(t - \vec{R} \cdot \vec{n}/c)} \right|^2, \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{эВ} \cdot \text{ср}} \right]$$

# Нелинейное томсоновское рассеяние



Угол (град)	$D_F/\lambda$					
	1.1	1.6	3.1	4.1	5.2	6.2
$\vartheta_{el}$	27	19	12	10	13	17
$\vartheta_{rad}$	36	25	15	11	16	16

[О.Е. Вайс, В.Ю. Быченков, "Нелинейное томсоновское рассеяние острогофокусированного релятивистски интенсивного лазерного импульса на ансамбле частиц", *Квант. электроника*, 2020, **50** (10), 922–929.]