



ВНИИА
РОСАТОМ

Диагностика сверхинтенсивного лазерного света

О. Е. Вайс^{1,2}, Н. Д. Бухарский^{2,3}, В. Ю. Быченков^{1,2}, Ф. А. Корнеев^{2,3}

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова*

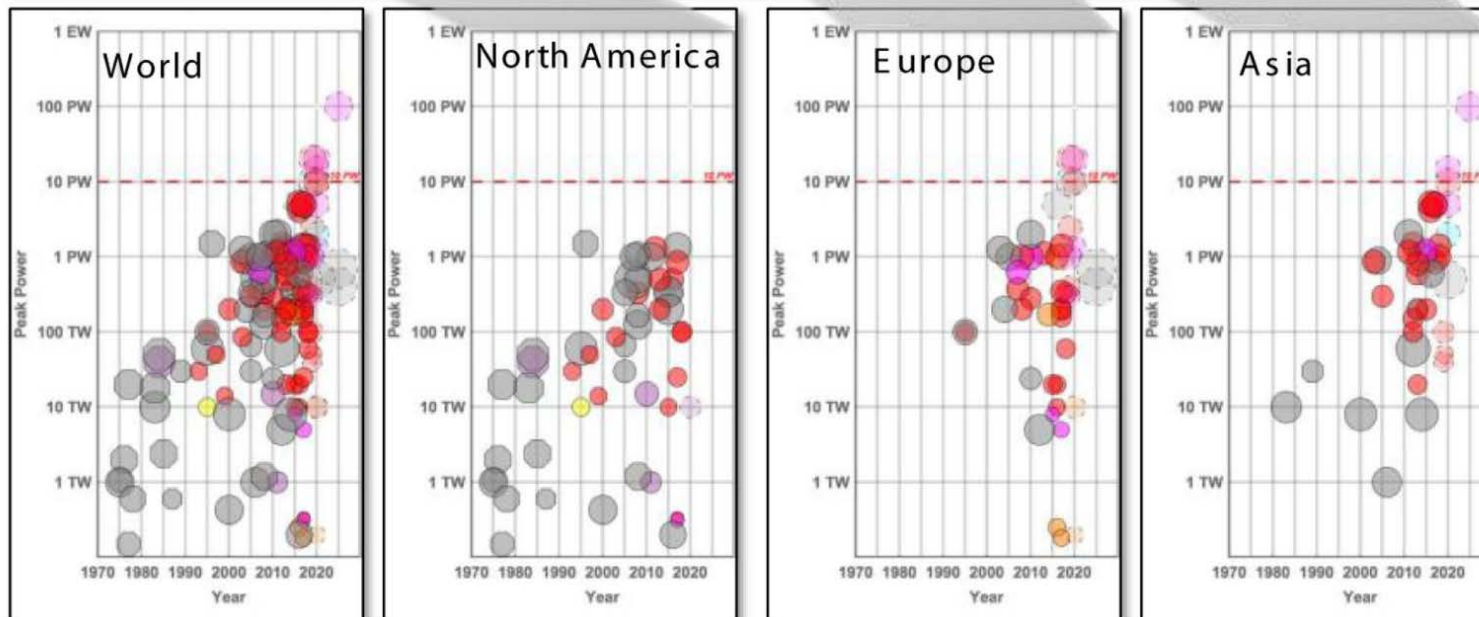
² *Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН*

³ *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

Забабахинские Научные Чтения 2023

31.05.2023

Высокомощные лазерные системы



[Danson C.N., et al *High Power Laser Sci. Eng.*, 7, e54 (2019)]

- Лазерные установки с пиковой интенсивностью свыше 10^{22} Вт/см²:
0.3 ПВт HERCULES (USA), 0.3 ПВт J-KAREN-P (Japan),
Texas ПВт (USA), 4.0 ПВт CoReLS (South Korea) – 10^{23} Вт/см²,
5.4 ПВт SULF (China)
- Установки в РФ: PEARL (Нижний Новгород), проект XCELS (в рамках НЦФМ)

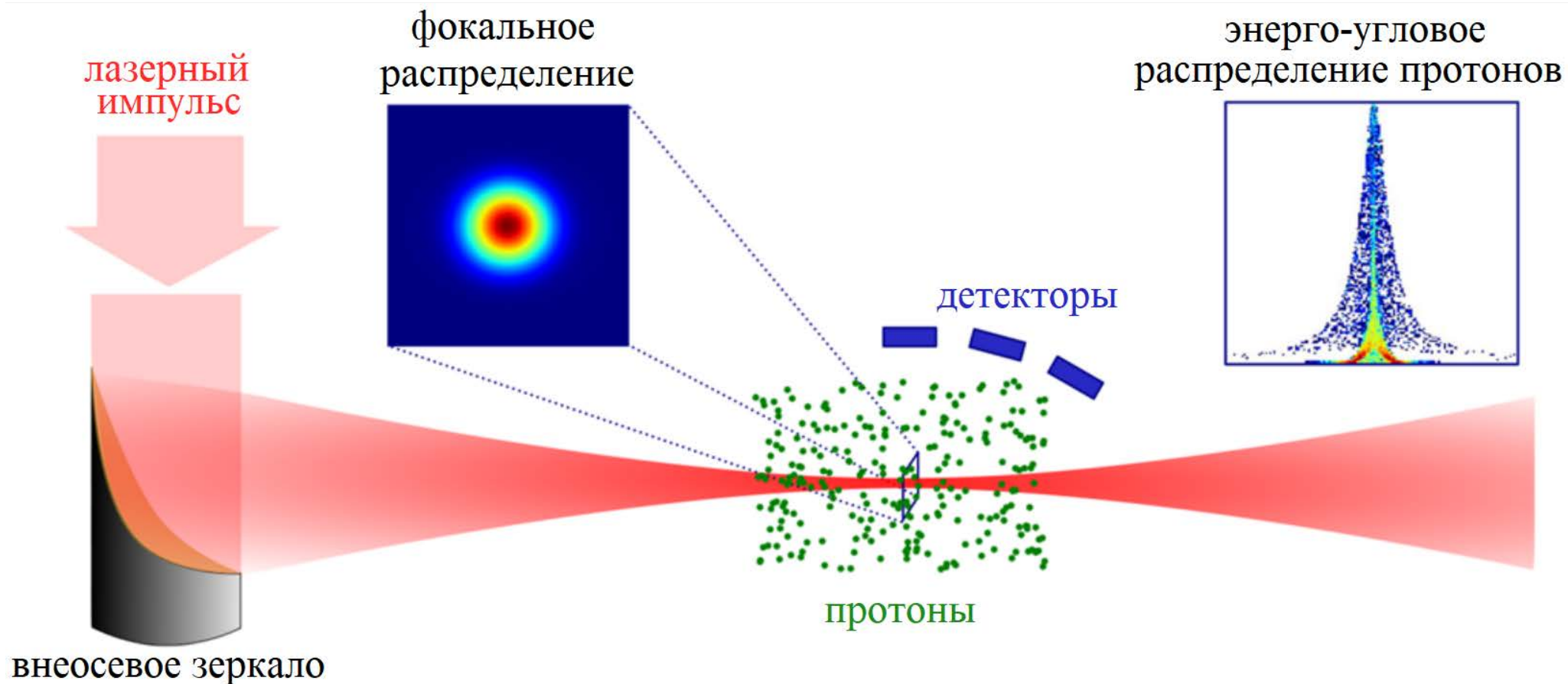


Рис. 1. Схема диагностики лазерных импульсов при помощи спектрально-углового распределения протонов

Моделирование взаимодействия лазерного импульса с разреженным газом

Моделирование лазерных импульсов

- Дифракционные интегралы Стреттона-Чу
- Фокусировка внеосевым параболическим зеркалом вплоть до дифракционного предела ($D_F \approx \lambda$)
- Моделирование различных пространственных профилей

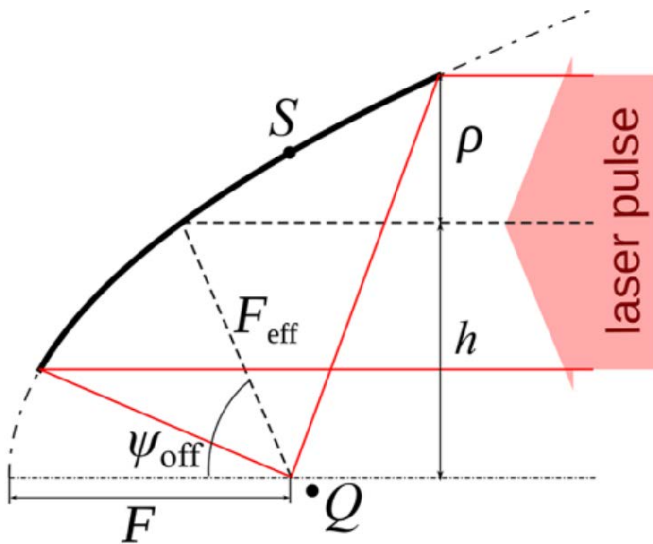


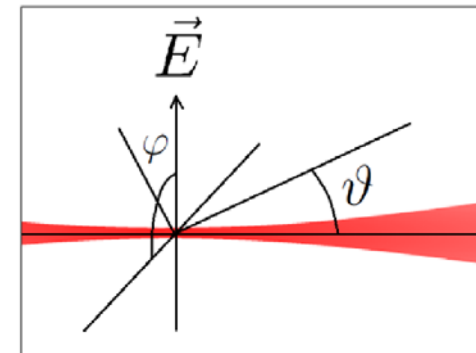
Рис. 2. Схема фокусировки лазерного импульса внеосевым параболическим зеркалом

Моделирование динамики протонов

- Приближение нерелятивистской пондеромоторной силы (описывает дрейф частицы в поле лазерного импульса)

$$\frac{d\vec{p}_{\text{drift}}}{dt} = \vec{F}_p = -\frac{q^2}{4m\omega^2} \nabla |\vec{E}|^2$$

- Конечная энергия и направление вылета частицы
- Сферическая система координат



Влияние распределения поля лазерного импульса вблизи фокуса на динамику протонов

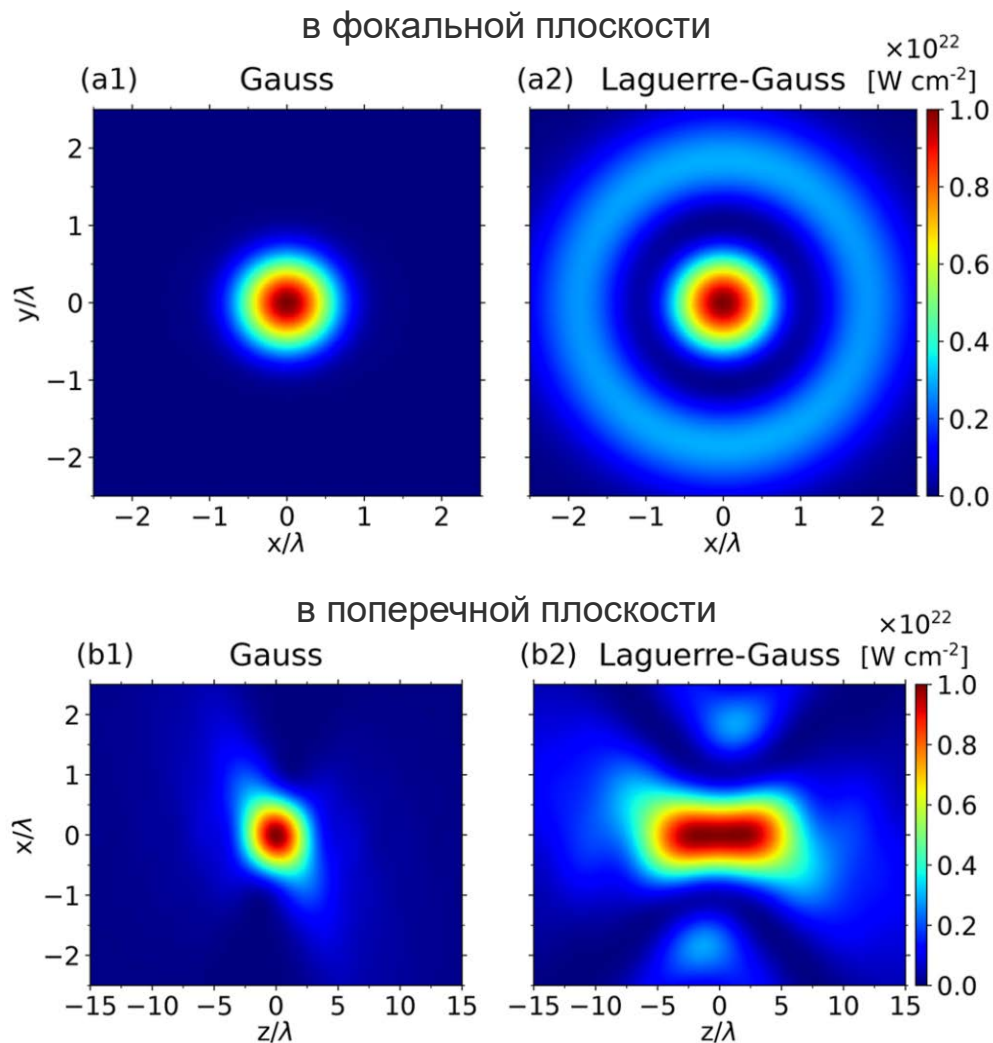


Рис. 3. Распределения интенсивности лазерного пучка в различных плоскостях.

скейлинги

максимальная энергия $E_{max} \propto \left(\frac{\partial I(r, z)}{\partial r} \Big|_{r_0, z_0} \right)^2$

угловая ширина $\tan(\Delta\theta/2) \propto \frac{D_F}{z_R}$

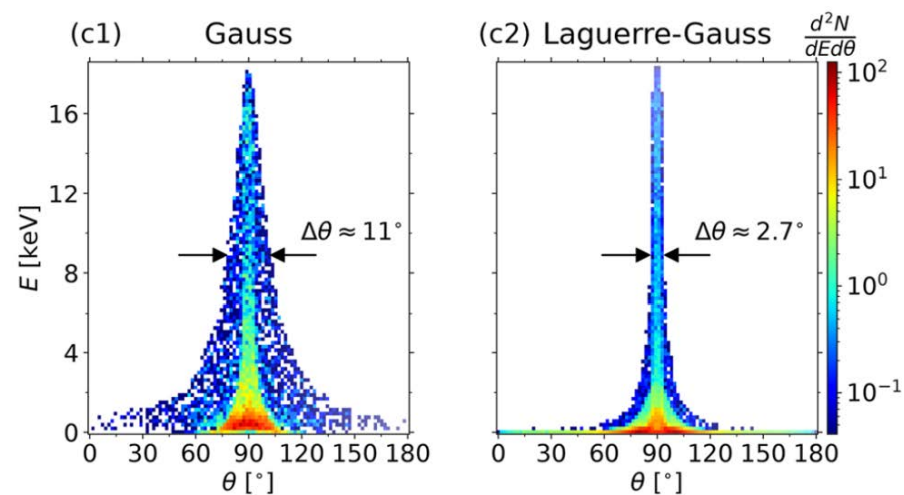


Рис. 4. ϕ -интегральные спектральные распределения протонов

Влияние распределения поля лазерного импульса вблизи фокуса на динамику протонов

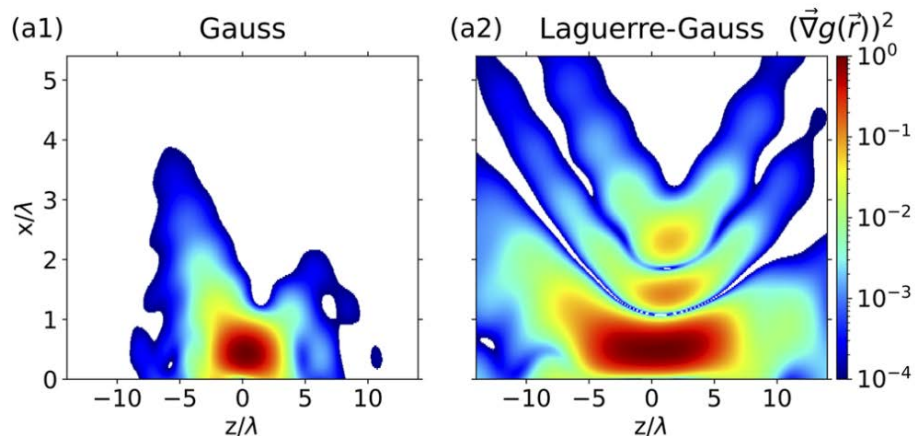


Рис. 5. Распределение градиента лазерного импульса в продольной плоскости

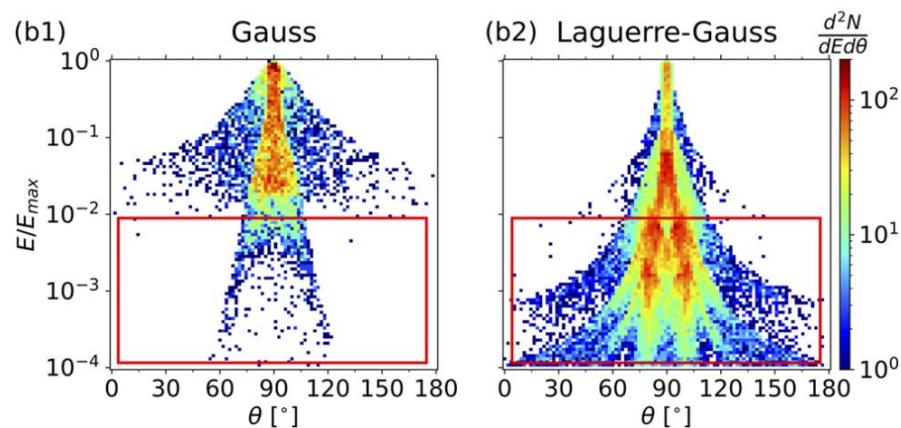


Рис. 6. ϕ -интегральные спектральные распределения протонов в логарифмическом масштабе

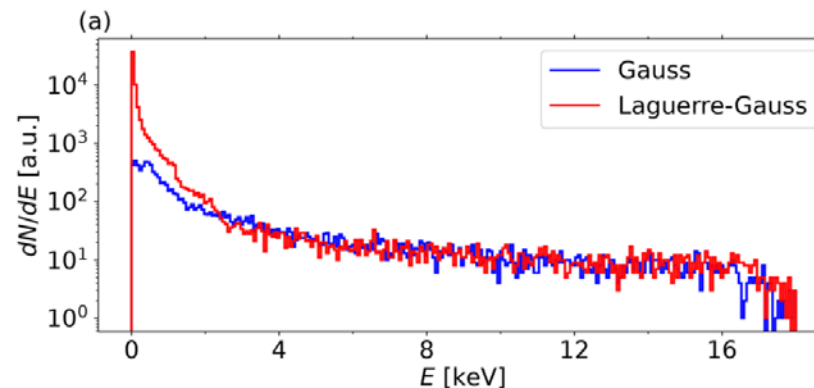


Рис. 7. Энергетические спектры протонов

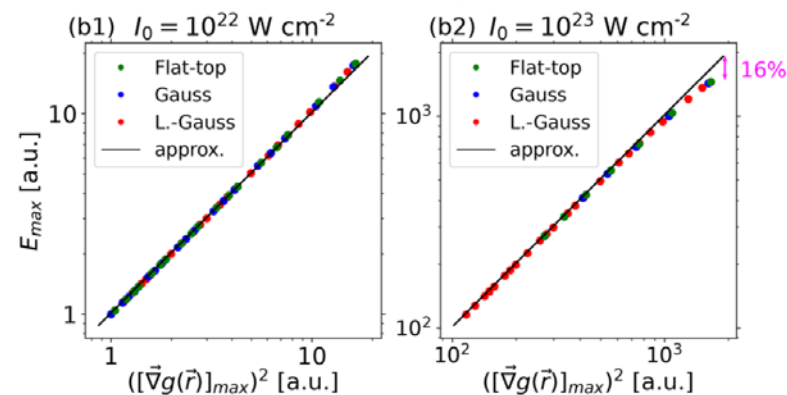
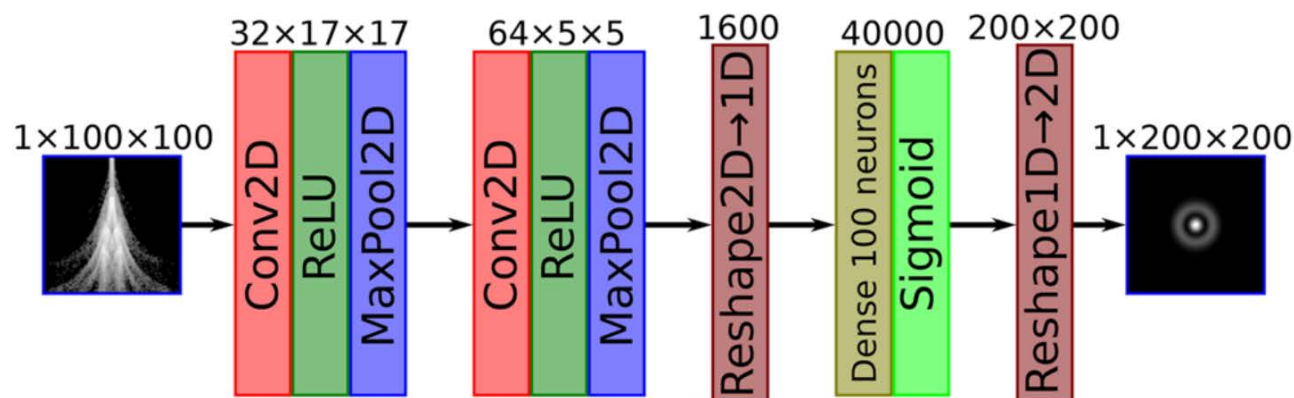


Рис. 8. Зависимость максимальной энергии частиц от градиента лазерного импульса заданной интенсивности

Восстановление пространственного профиля лазерного импульса и его пиковой интенсивности



Обучающая выборка:

- 1030 пары
«распределение интенсивности» (log)
- «угловое распределение протонов»
(линейный)
- распределения: однородное, гаусс (2, 4, 6 порядка), лаггерр-гаусс
- ~ 20 различных $f_{\#}$ ($D_F \sim (1 - 4)\lambda$)

Рис. 9. Архитектура нейронной сети, используемой для восстановления пространственного профиля лазерного импульса

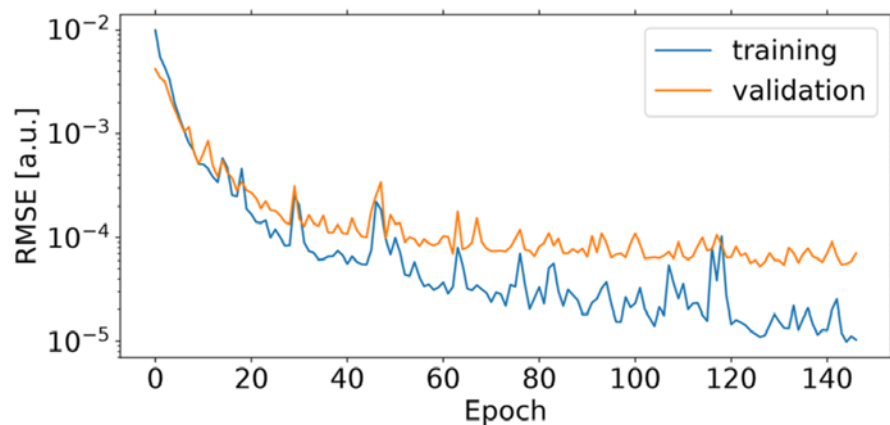


Рис. 10. Пример обучающей кривой

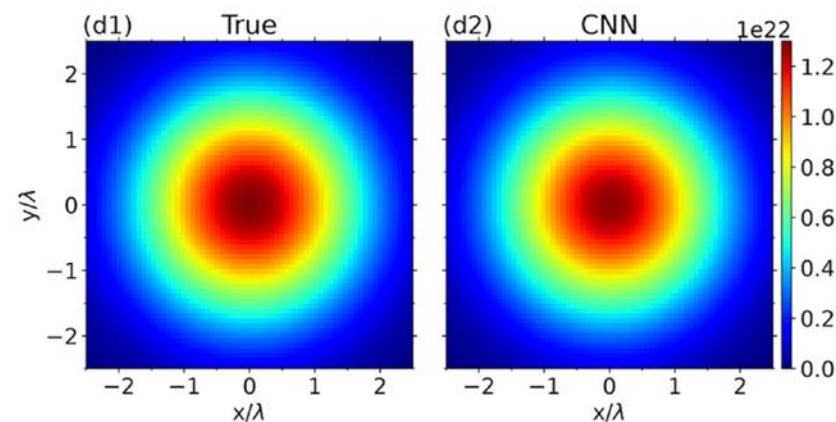


Рис. 11. Пример исходного (True) и восстановленного (CNN) профилей

Восстановление пространственного профиля лазерного импульса и его пиковой интенсивности

Однородный профиль:

(a1) $f_{\#} = 1.3, I_0 = 2 \times 10^{22}$ Вт/см²

(a2) $f_{\#} = 2.8, I_0 = 3 \times 10^{21}$ Вт/см²

(a3) $f_{\#} = 3.3, I_0 = 6 \times 10^{21}$ Вт/см²

Гауссов импульс:

(b1) $f_{\#} = 1.4, I_0 = 8 \times 10^{21}$ Вт/см²

(b2) $f_{\#} = 2.2, I_0 = 1.3 \times 10^{22}$ Вт/см²

(b3) $f_{\#} = 2.6, I_0 = 4 \times 10^{21}$ Вт/см²

Лагерр-Гаусс:

(c1) $f_{\#} = 2.1, I_0 = 3 \times 10^{21}$ Вт/см²

(c2) $f_{\#} = 2.9, I_0 = 1.6 \times 10^{22}$ Вт/см²

(c3) $f_{\#} = 3.5, I_0 = 3 \times 10^{22}$ Вт/см²

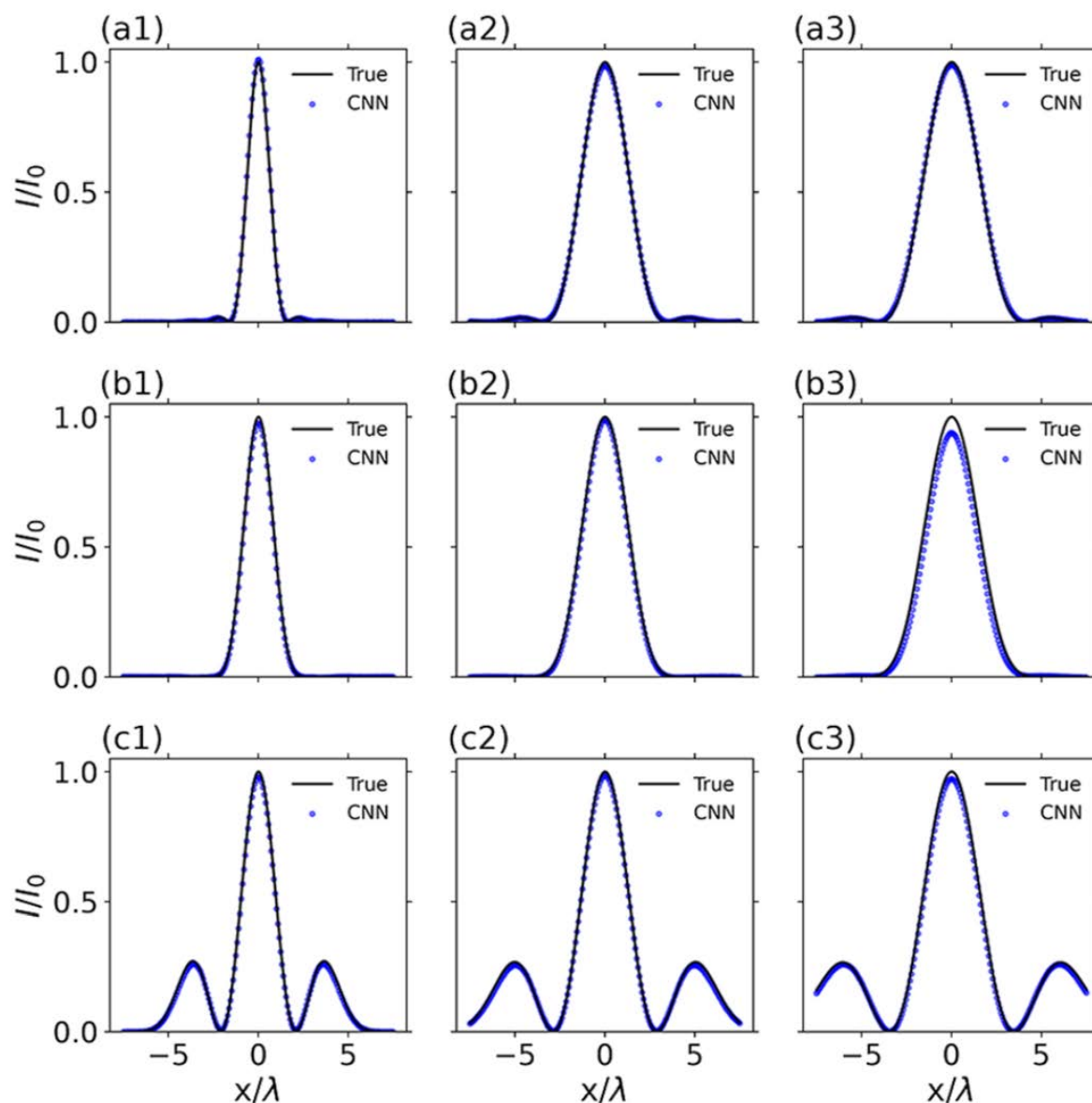


Рис. 12. Результат восстановления профиля лазерного импульса для различных параметров лазерных импульсов 8

Устойчивость и точность метода

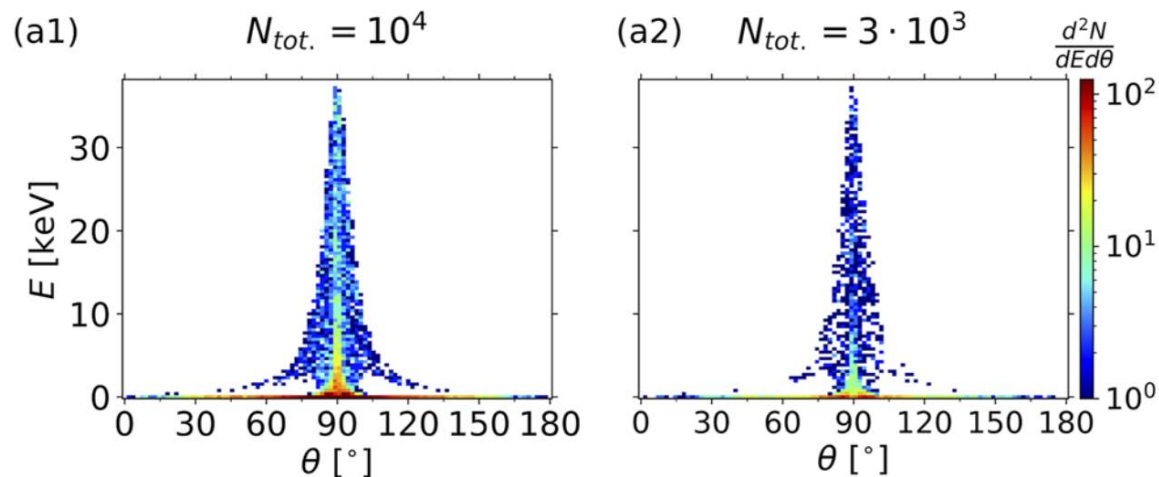


Рис. 13. ϕ -интегральные спектры протонов, полученные с использованием различного числа частиц

- Относительная ошибка определения пиковой интенсивности и диаметра фокального пятна не превышала 6% (для 10^4 частиц в расчетной области)
- При уменьшении числа частиц в 10 раз ошибка увеличивается до 20%
- Достаточная концентрация 10^{15} см^{-3} (3×10^3 частиц в расчетной области)
- Корректность определения θ : $\pm 1^\circ$ (превышение приводит к относительной ошибке выше 20%)

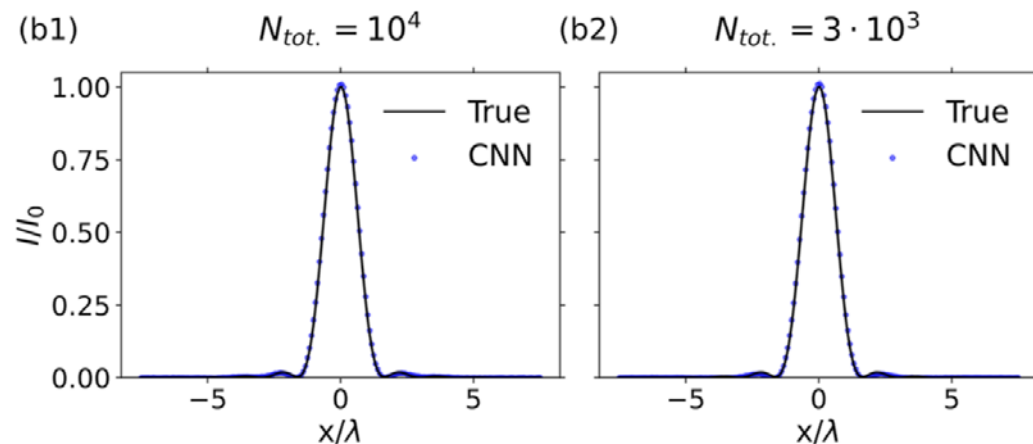


Рис. 14. Восстановленные профили лазерного импульса по данным (см. Рис. 13)

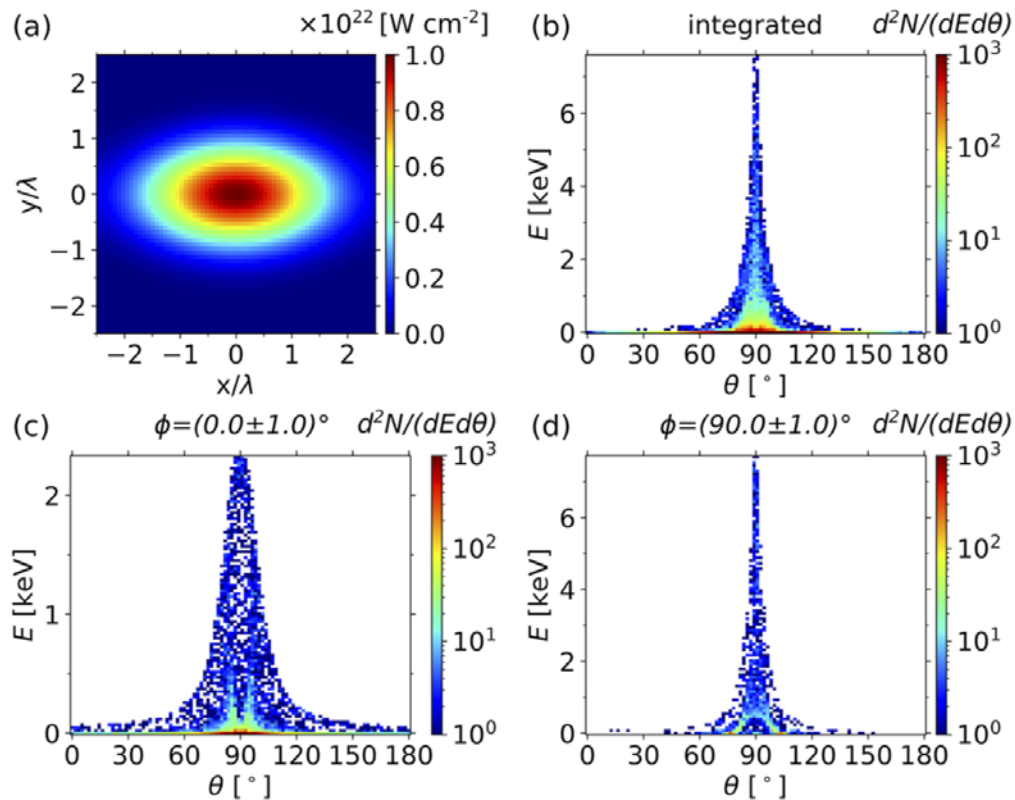


Рис. 15. Распределение интенсивности в фокальной плоскости (a) и угловые распределения протонов (b – d)

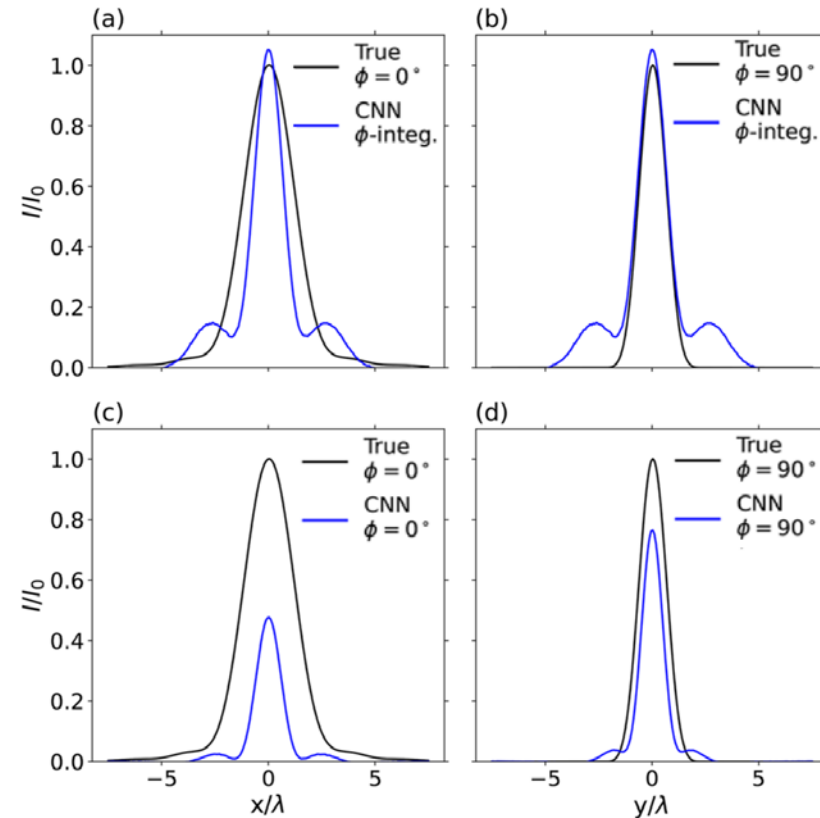


Рис. 16. Радиальные профили лазерных импульсов, полученные по различным угловым распределениям частиц (см. Рис. 15)



- Предложен нейросетевой метод восстановления фокального распределения интенсивности лазерного импульса по спектрально-угловым распределениям протонов
- Было показано, что точность метода оказывается в пределах 6% при выполнении условия по числу частиц в области взаимодействия (достаточной концентрации разреженного газа) и при определении направления распространения лазерного импульса с точностью до 1°
- Исследования были проведены для аксиально-симметричного случая, который может быть расширен путем перехода от двумерных входных данных к трехмерным с целью учета особенностей распределения протонов по углу φ

Спасибо за внимание

Вайс Ольга Евгеньевна

ovais@lebedev.ru

