



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

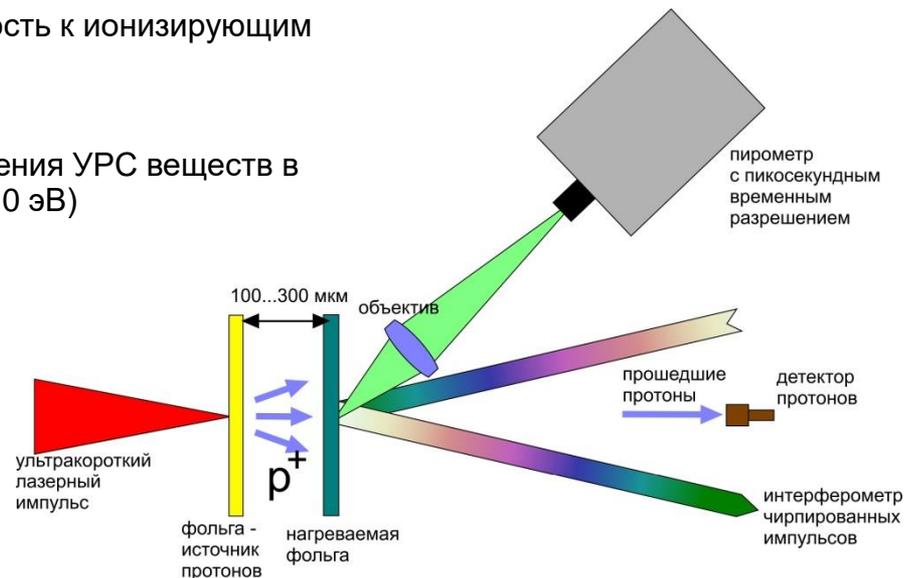
ЛАЗЕРНОЕ УСКОРЕНИЕ ПРОТОНОВ ПРИ ФОКУСИРОВКЕ НА МИШЕНЬ ПОСРЕДСТВОМ ДЛИННОФОКУСНОГО ПАРАБОЛИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА

*К. В. Сафронов, А. А. Бушухин, С. А. Горохов, В. А. Флегентов,
Н. Н. Шамаева, Д. И. Башкин, И. Н. Шишков, Д. О. Замураев,
А. Л. Шамраев, С. Ф. Ковалёва, Н. А. Федоров, А. В. Потапов*

Забабахинские научные чтения – 2025
19 – 23 мая 2025 г.

Лазерное ускорение протонов. Актуальные применения

1. Лазерный ускоритель для испытаний ЭКБ на стойкость к ионизирующим излучениям космического пространства
2. Изохорический разогрев тонких фольг для определения УРС веществ в состоянии теплой плотной плазмы ($\rho \sim \rho_{T/T}$, $T = 1 \dots 10$ эВ)



[1] P.K. Patel et al., Isochoric Heating of Solid-Density Matter with an Ultrafast Proton Beam, Phys. Rev. Lett. 91, 125004 (2003).

[2] S. Feldman et al., Measurement of the equation of state of solid-density copper heated with laser-accelerated protons, Phys. Rev. E 95, 031201(R) (2017).

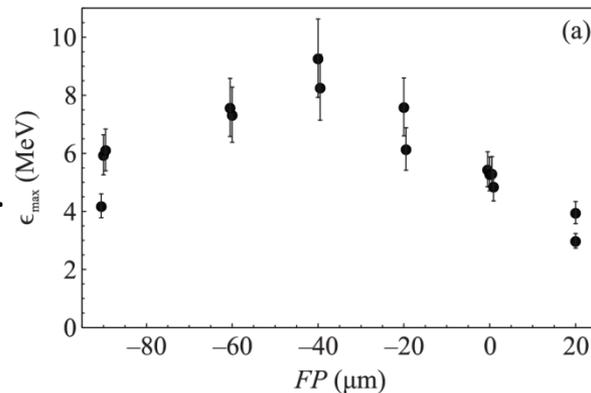
Повышение эффективности лазерного ускорения протонов

1. Снижение толщины мишени

- К.В. Сафронов и др. Письма в ЖЭТФ 88, 830 (2008)
- J. S. Green et al., Appl. Phys. Lett. 104, 214101 (2014)
- **А.А. Бушухин и др., ЗНЧ-2025.**

2. Использование преплазмы

- L.A. Gizzi et al., SR 11, 13728 (2021)
фс - предымпульс $E_{\text{cut-off}} \times 2$
- L. Torrisi et al., Phys. Rev. Accel. Beams 22, 021302 (2019).
нс - предымпульс УСИ $E_{\text{cut-off}} \times 3$
- К.В. Сафронов и др. Письма в ЖЭТФ 121, 562 (2025)
нс - предымпульс УСИ $E_{\text{cut-off}} \times 2$

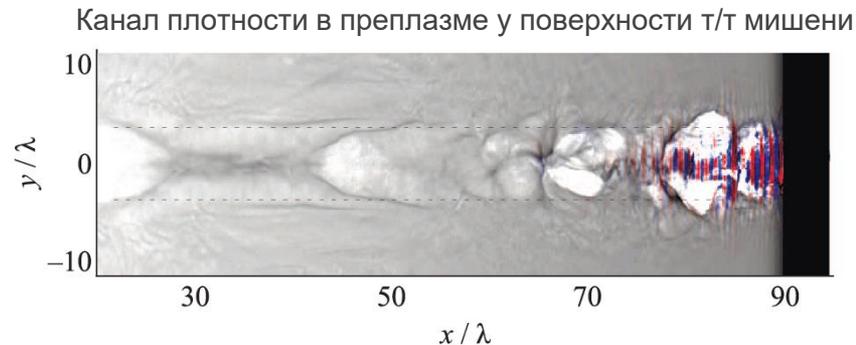


Самозахват ультракороткого лазерного импульса в низкоплотной плазме

Для устойчивого распространения релятивистски интенсивного лазерного импульса на расстояние много больше длины Рэлея требуется согласование поперечного размера лазерного импульса, его интенсивности и плотности плазмы:

$$R = \alpha \frac{c}{\omega} \sqrt{a_0 \frac{n_c}{n_e}} \Leftrightarrow f/\# = \frac{F}{D} \sim \frac{I^{1/4}}{n_e^{1/2}}$$

При увеличении фокусного расстояния параболического объектива согласование происходит при более низкой плотности плазмы, на большем расстоянии от мишени.



f/#	2,7	10
Интенсивность в фокусе	3e20 Вт/см ²	2e19 Вт/см ²
Длина Рэлея X _R	8 мкм	100 мкм

Постановка экспериментов

Лазерный импульс:

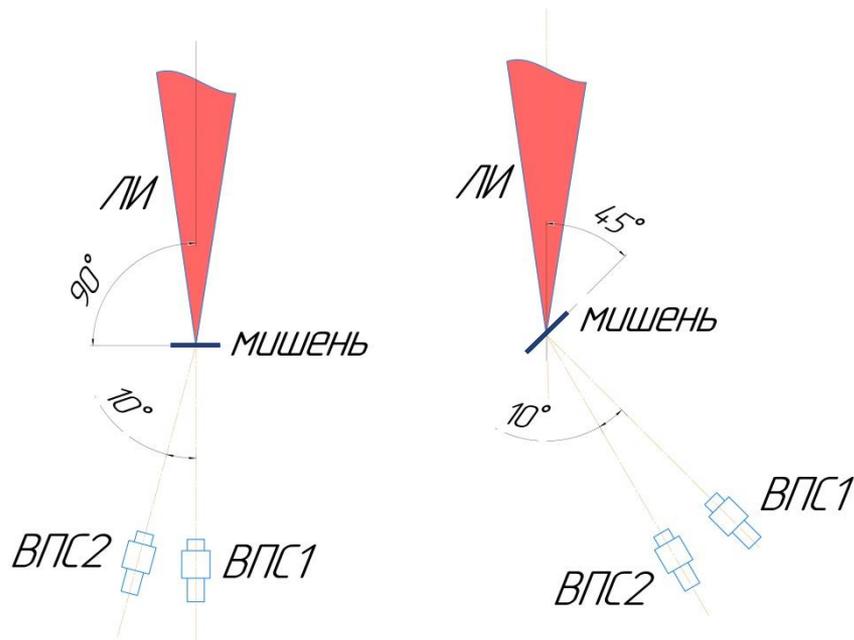
- Энергия на мишени до 2 Дж,
- Длительность 27 ± 2 фс,
- Фокусировка $f/10$,
- Пиковая интенсивность до $2 \cdot 10^{19}$ Вт/см²,
- Контраст по УСИ $\sim 10^8 \div 10^9$ (насыщающийся поглотитель)

Мишени:

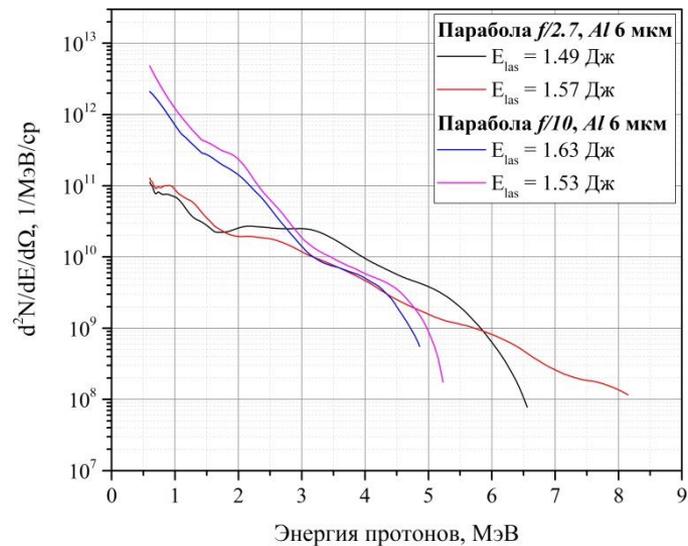
- Al фольга $6 \div 13$ мкм, облучение под углом 3° и 45°

Диагностики:

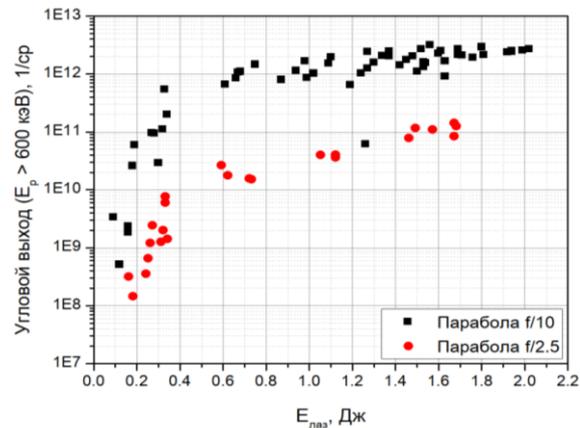
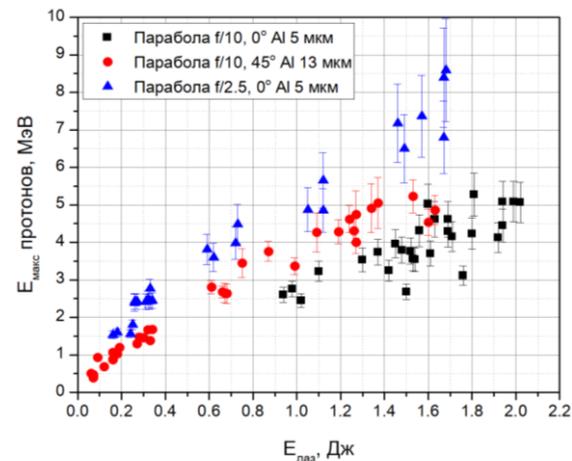
- Времяпролётные спектрометры (ВПС) с pin-диодом ФДУК-1УВСКМ



Результаты экспериментов. f/10 vs f/2,7

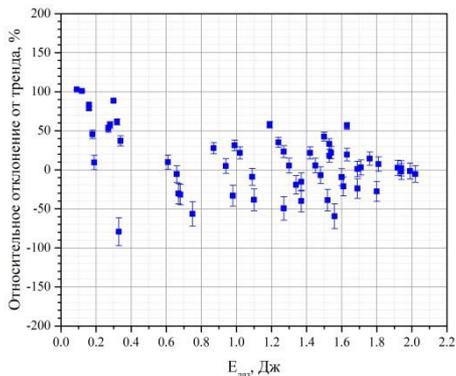


Применение фокусирующей параболы f/10 привело к снижению максимальной энергии протонов в 1,5÷2 раза, однако угловой флюенс частиц увеличился более чем на порядок



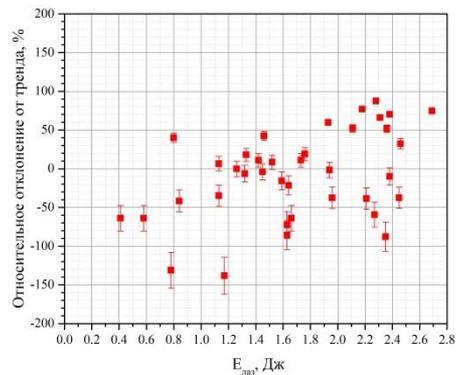
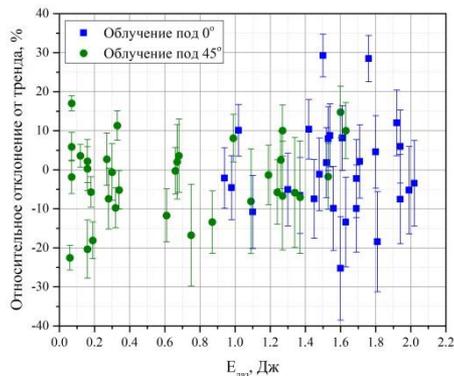
Стабильность протонного пучка

Угловой флюенс

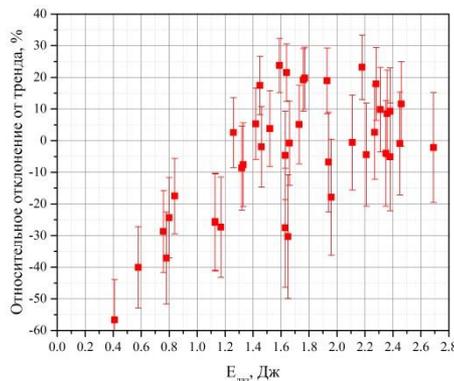


f/10

Максимальная энергия



f/2,7



Отклонение от аппроксимации в 70% экспериментов не превышает	f/10	f/2,7
Максимальная энергия протонов	13%	18%
Угловой флюенс протонов	33%	80%

Угловой растровый протонный пучок

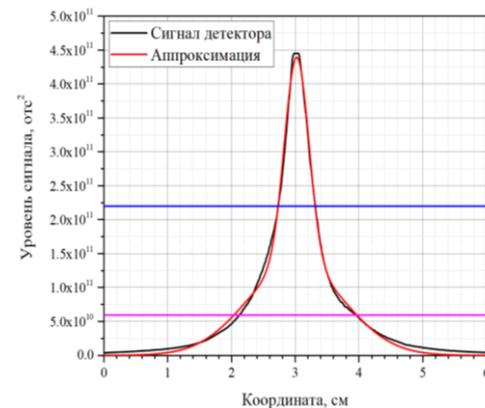
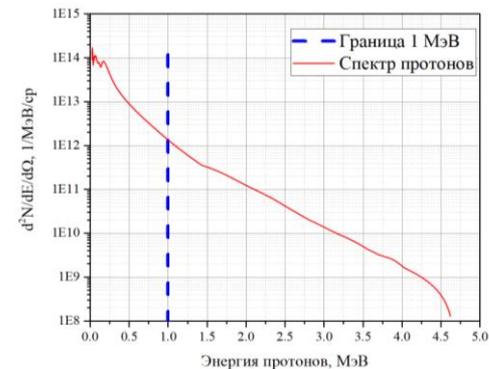
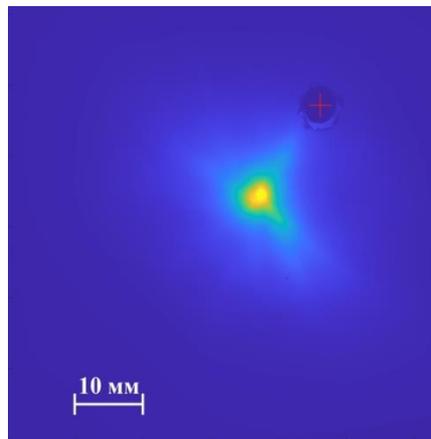
IP – монитор за Al светофильтром

pin - диод



лазерный пучок

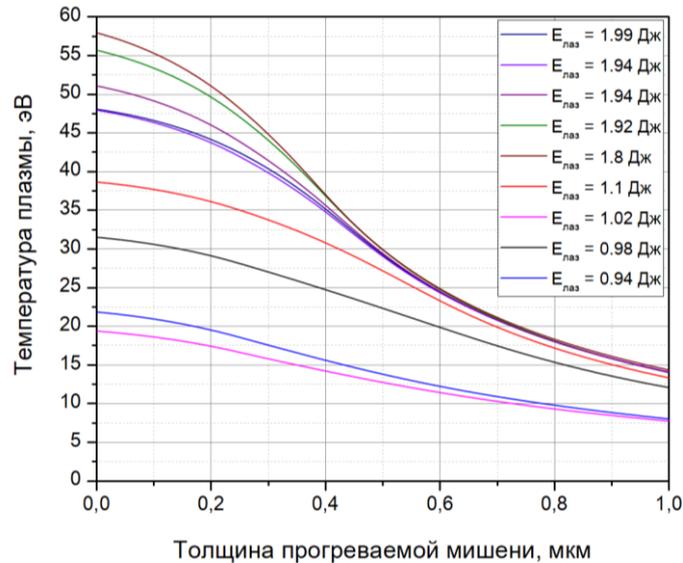
$E_{\text{ли}} = 1,63$ Дж, мишень Al 13 мкм



FWHM ($4,0 \pm 0,6$)°

Нагрев медной фольги протонным пучком. Расчет

Расстояние между мишенями 0,2 мм



Заключение

1. Экспериментально продемонстрирован новый режим лазерного ускорения протонов, обеспечивающий высокую эффективность генерации пучков частиц
 - конверсия в протоны с энергиями более 1 МэВ $\sim 1\%$ (x10);
 - угловой раствор $\sim 5^\circ$ (x3).
2. Расчет показывает, что пучок лазерноускоренных протонов позволяет нагреть медную фольгу толщиной 1 мкм до температур $(5 \div 50)$ эВ.
3. На основе детекторов image plate создан новый метод измерения углового распределения пучков лазерноускоренных протонов, обладающий высоким угловым разрешением (x3) и высокой чувствительностью.

Спасибо за внимание

Сафронов Константин Владимирович
Начальник научно-исследовательской группы

E-mail: dep5@vniitf.ru
www.vniitf.ru

