



Достижение уникальных характеристик вещества при помощи современных лазерных систем

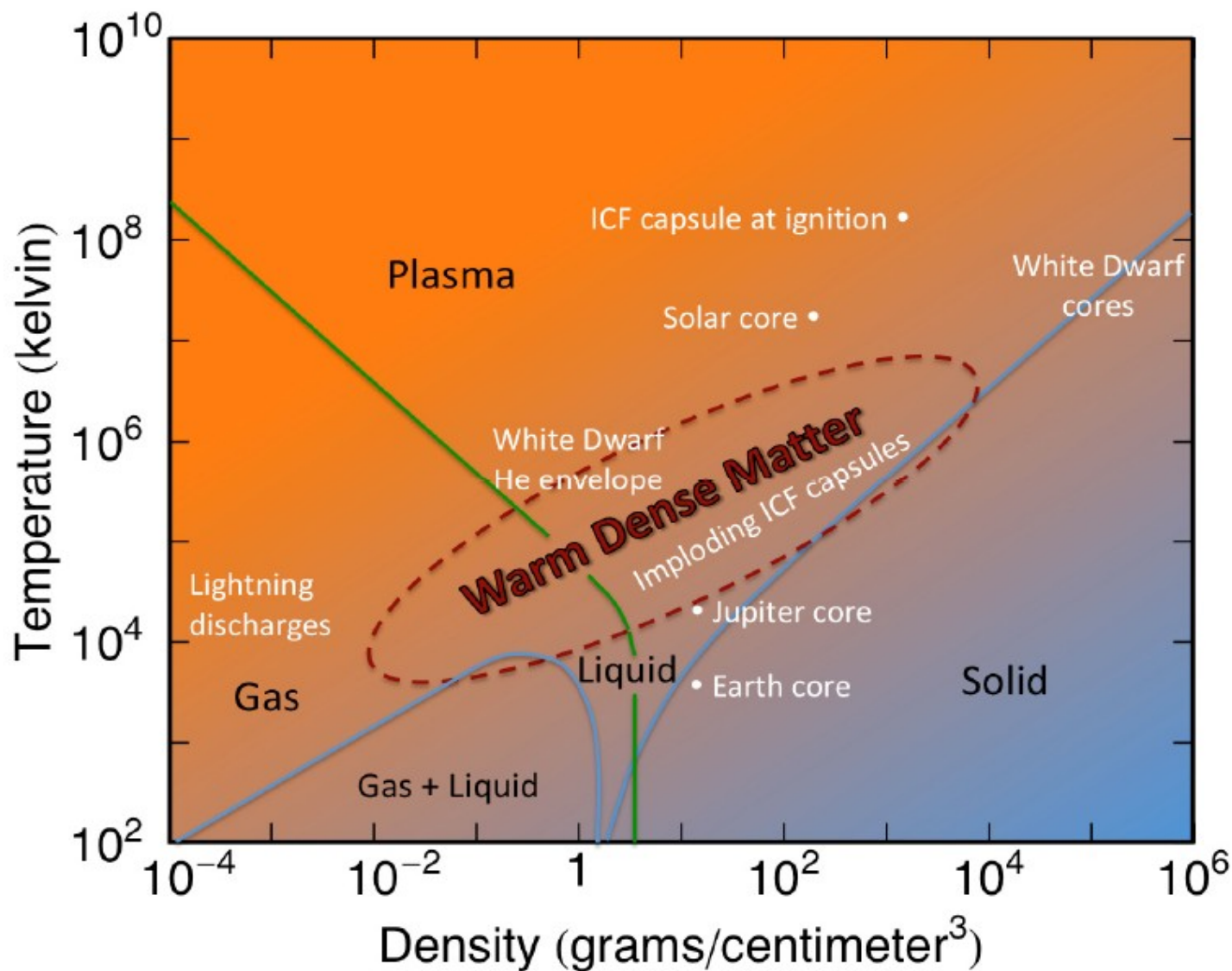
А. В. Коржиманов

Институт прикладной физики РАН
Нижний Новгород

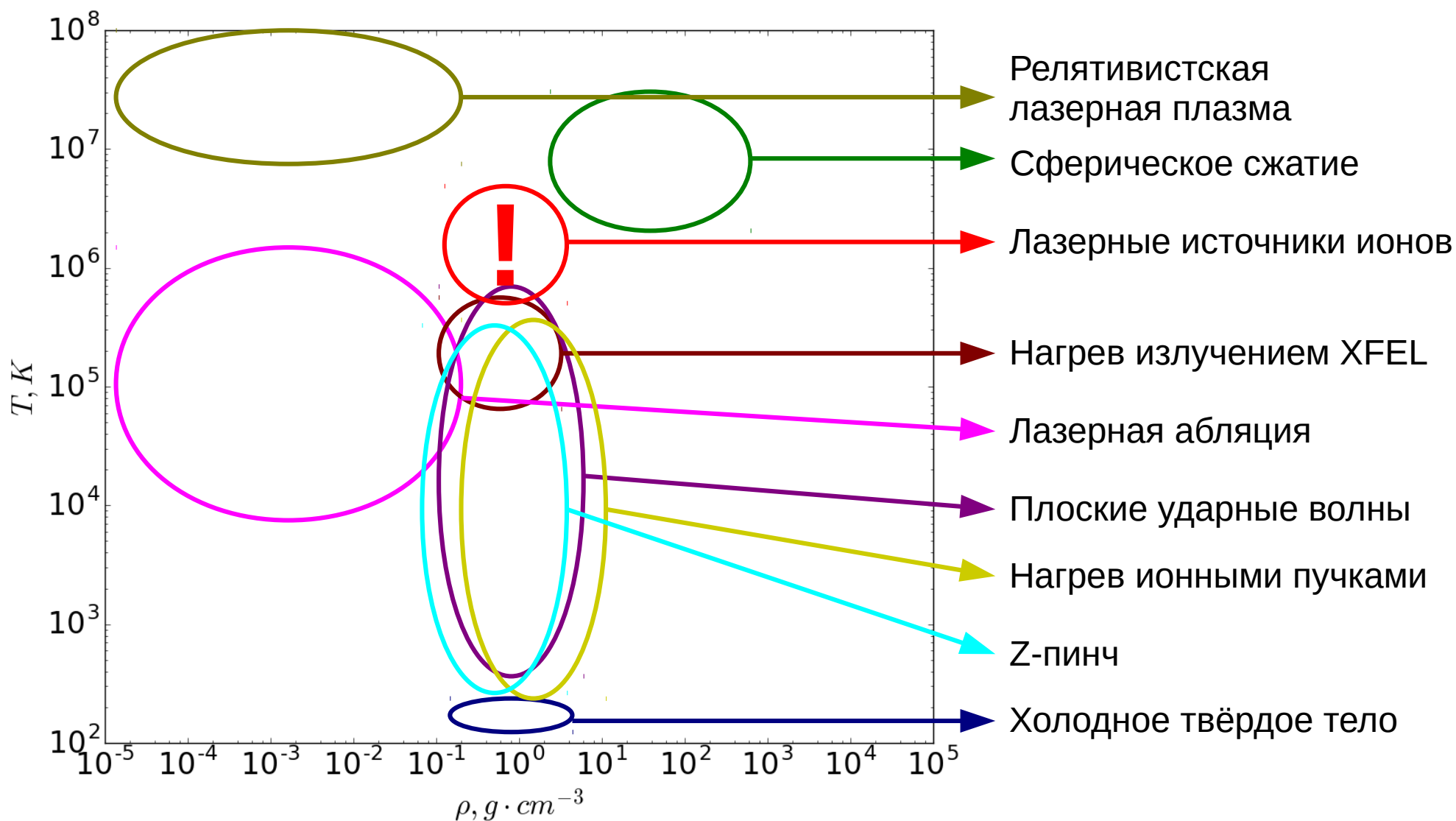
2 апреля 2018

Совещание «Исследования в области физики высоких плотностей энергии
лазерными и электрофизическими методами»
Нижний Новгород

Что такое *высокие* плотности энергии?



Как создают высокие плотности энергии?



Нагрев лазерными ионными пучками



- Механизм нагрева — возбуждение и ионизация атомов среды налетающими ионами
- Достоинства:
 - Пикосекундная длительность — возможность квазиизохорического нагрева
 - Возможность профилирования области нагрева для квазиadiaбатического сжатия
- Недостатки:
 - Широкий энергетический спектр и низкая энергия отдельного иона — однородный по объёму нагрев затруднён
 - Низкая полная энергия — микроскопический размер нагреваемой области

Современные лазеры



Лазерная система	Длительность импульса, фс	Энергия импульса, Дж
Nova (LLNL, USA)	440	660
Vulcan (RAL, GB)	500	500
PHELIX (GSI, Germany)	400	400
PETAL (CEA, France)	700	840
LFEX (ILE, Osaka, Japan)	1000	1000
ELI Beamlines L4 (Czech Republic)	150	1800
XCELS (Russia)	20	4000

Лазерное ускорение ионов



- 1 кДж, 100-1000 фс лазер
- Диаметр пучка — 10 мкм
- Эффективность конверсии энергии в ионы — 1–10%
- Энергия ионов — 100–1000 МэВ/нуклон

- Количество ионов — 10^{10} частиц
- Интегральная плотность потока энергии — 10^7 Дж/см²

- Длина торможения — 0,1—10 мм
- Плотность энергосвечения —

$$10^{14} \text{ Дж/м}^3 \Rightarrow 10 \text{ МДж/г} \Rightarrow 10 \text{ кэВ/атом}$$

Торможение ионов



Требуется самосогласованная теория,
описывающая торможение ионов в среде,
параметры которой меняются под действием самих ионов

Торможение ионов

Потери на связанных электронах



- Формула Бора — Бёте — Блоха

$$\left(\frac{dE}{ds}\right)_{bound} = KN_a(Z_2 - Z_{eff})f_{bound}$$

$$K = \frac{4\pi(Z_1e^2)^2}{m_e c^2}$$

$$f_{bound} = \frac{1}{\beta^2} \left(\ln \frac{2m_e c^2}{\langle I \rangle} + \ln \frac{\beta^2}{(1-\beta^2)} - \beta^2 - \frac{C}{Z_2} \right)$$

Торможение ионов

Потери на свободных электронах



- Теория бинарных соударений с поправкой Чандрасекара

$$\left(\frac{dE}{ds}\right)_{free} = KN_a Z_{eff} f_{free}$$

$$f_{free} = \frac{1}{\beta^2} G\left(\frac{m_e c^2 \beta^2}{2T_e}\right) \ln \frac{m_e c^3 Z_1 \beta}{e^2 \omega_p u^2}$$

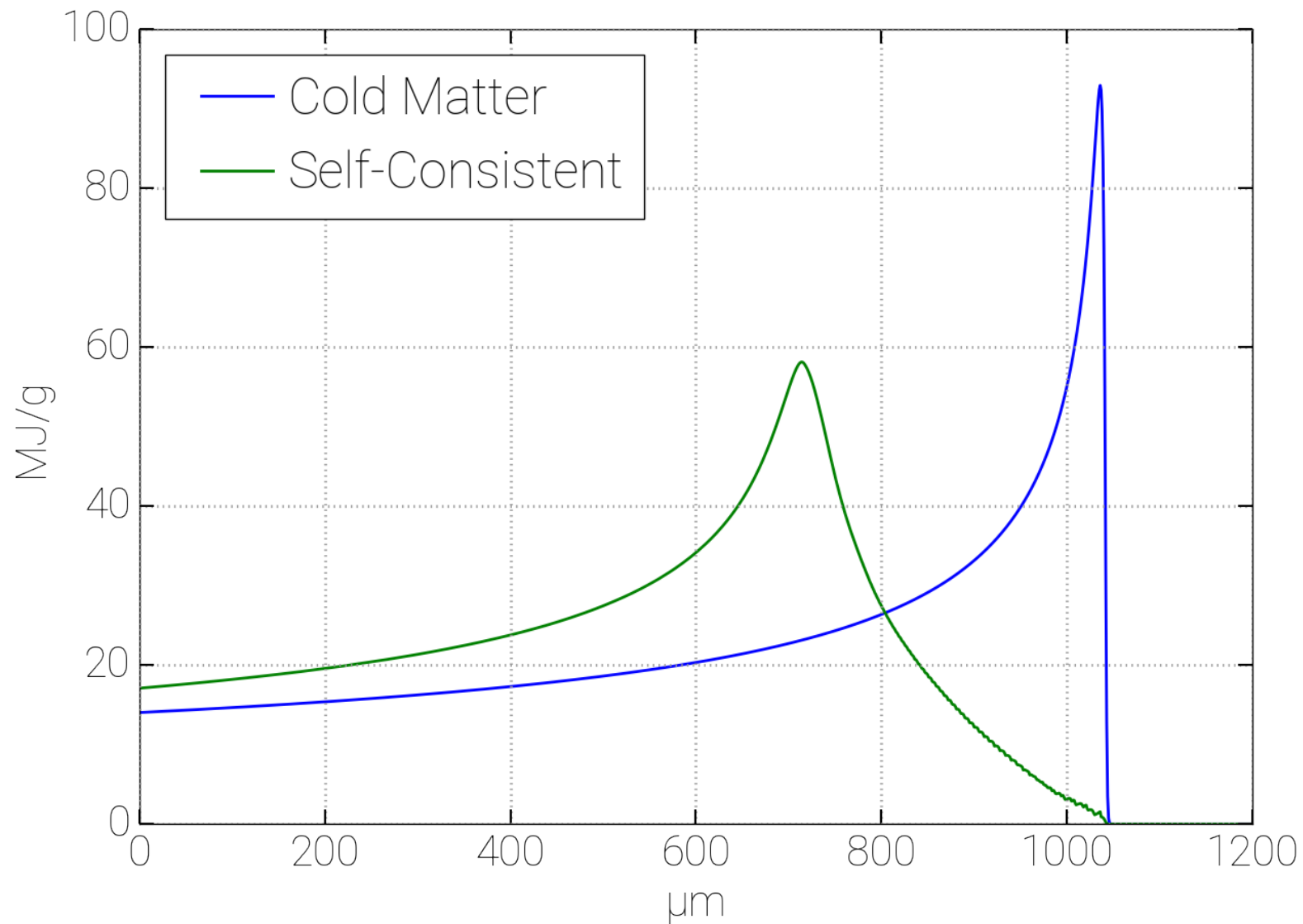
$$G(x) = \operatorname{erf}(\sqrt{x}) - 2\sqrt{x/\pi} \exp(-x)$$

$$u^2 = \frac{2T_e}{m_e c^2} - \beta^2$$

Торможение ионов Нелинейные эффекты



protons
30 MeV
 10^7 J/cm²
 2×10^{18} cm⁻²



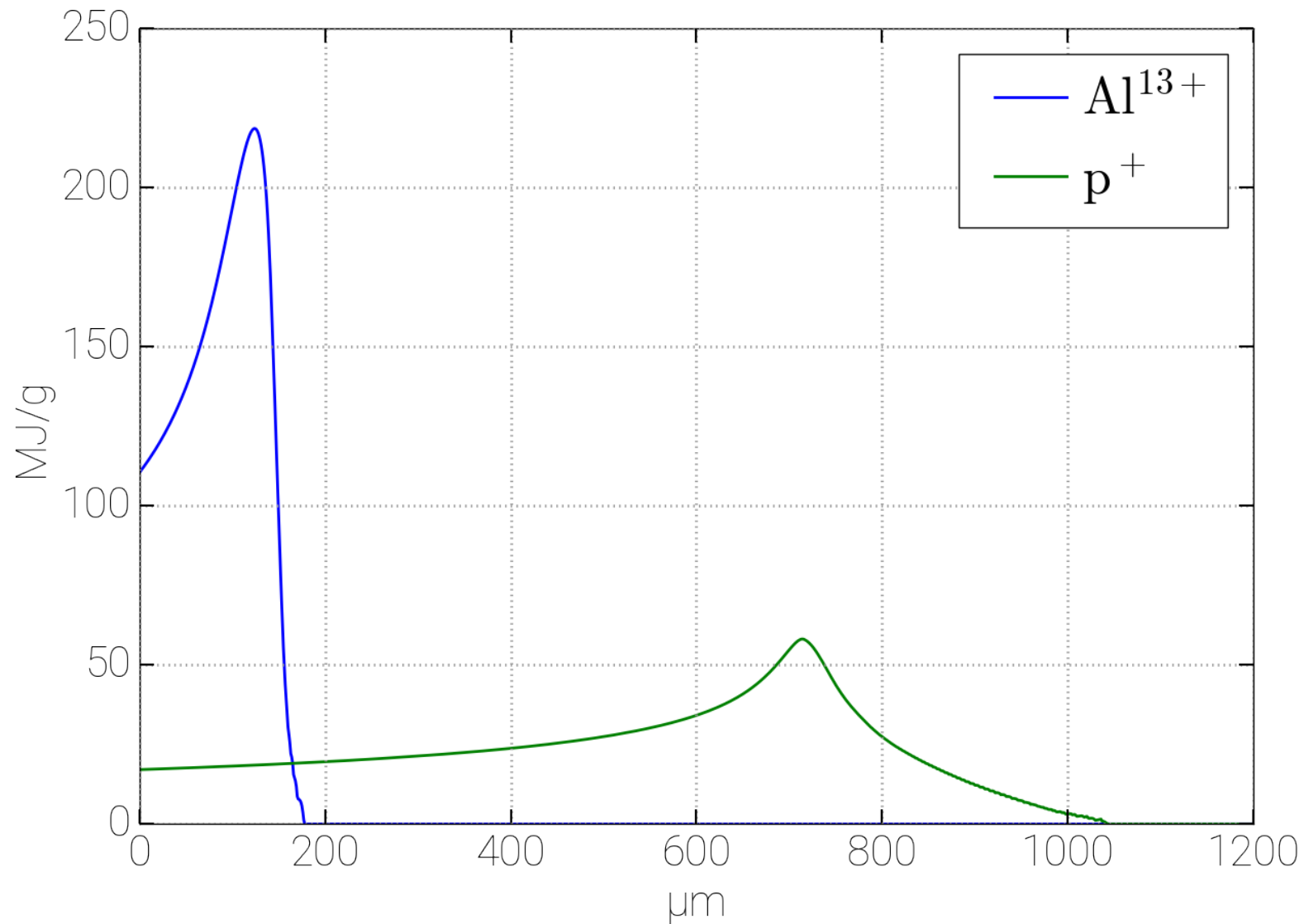
Торможение ионов

p^+ vs Al^{13+}



protons
30 MeV
 10^7 J/cm²
 2×10^{18} cm⁻²

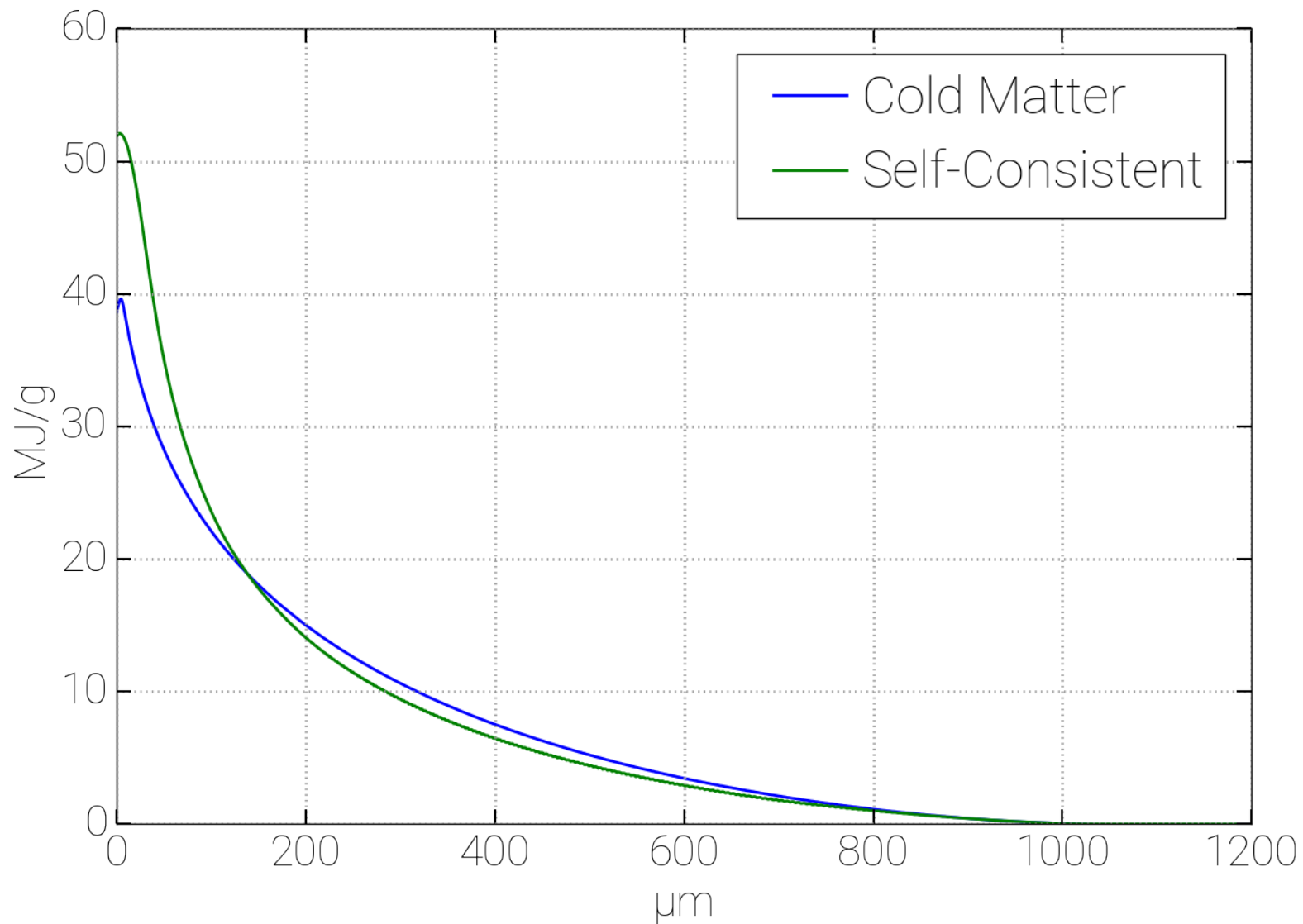
Al ions
30 MeV/n
 10^7 J/cm²
 7×10^{15} cm⁻²



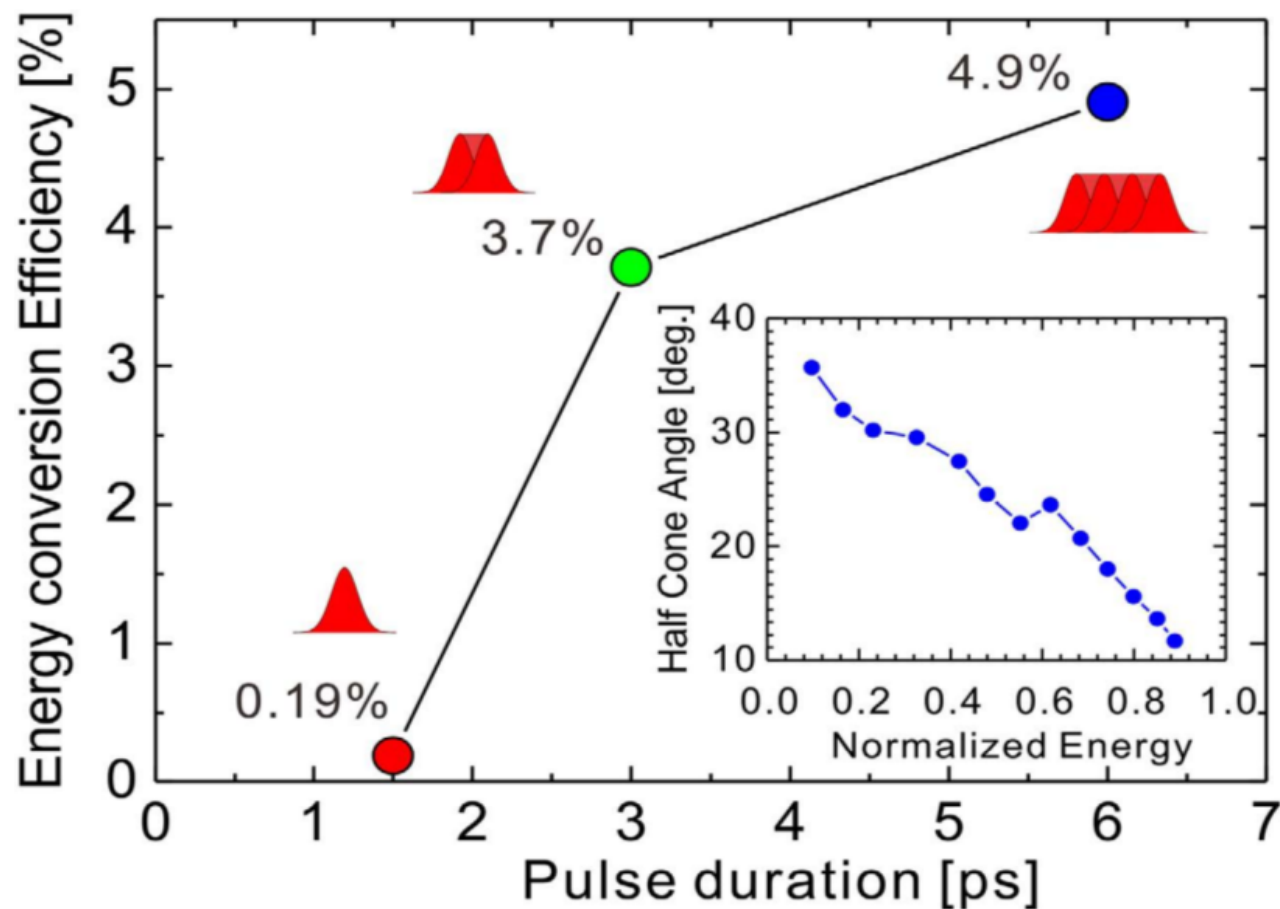
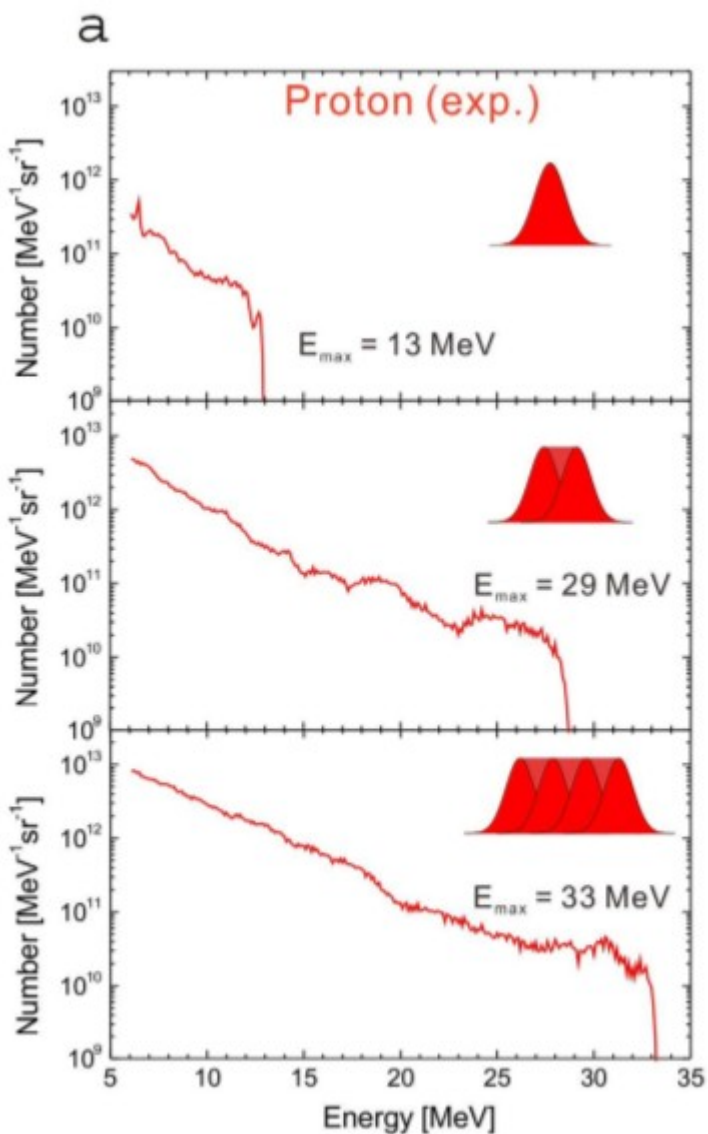
Торможение ионов Случай широкого спектра



protons
1–30 MeV
 $f(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-1}$
 10^7 J/cm^2
 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$



Ускорение протонов на LFEX

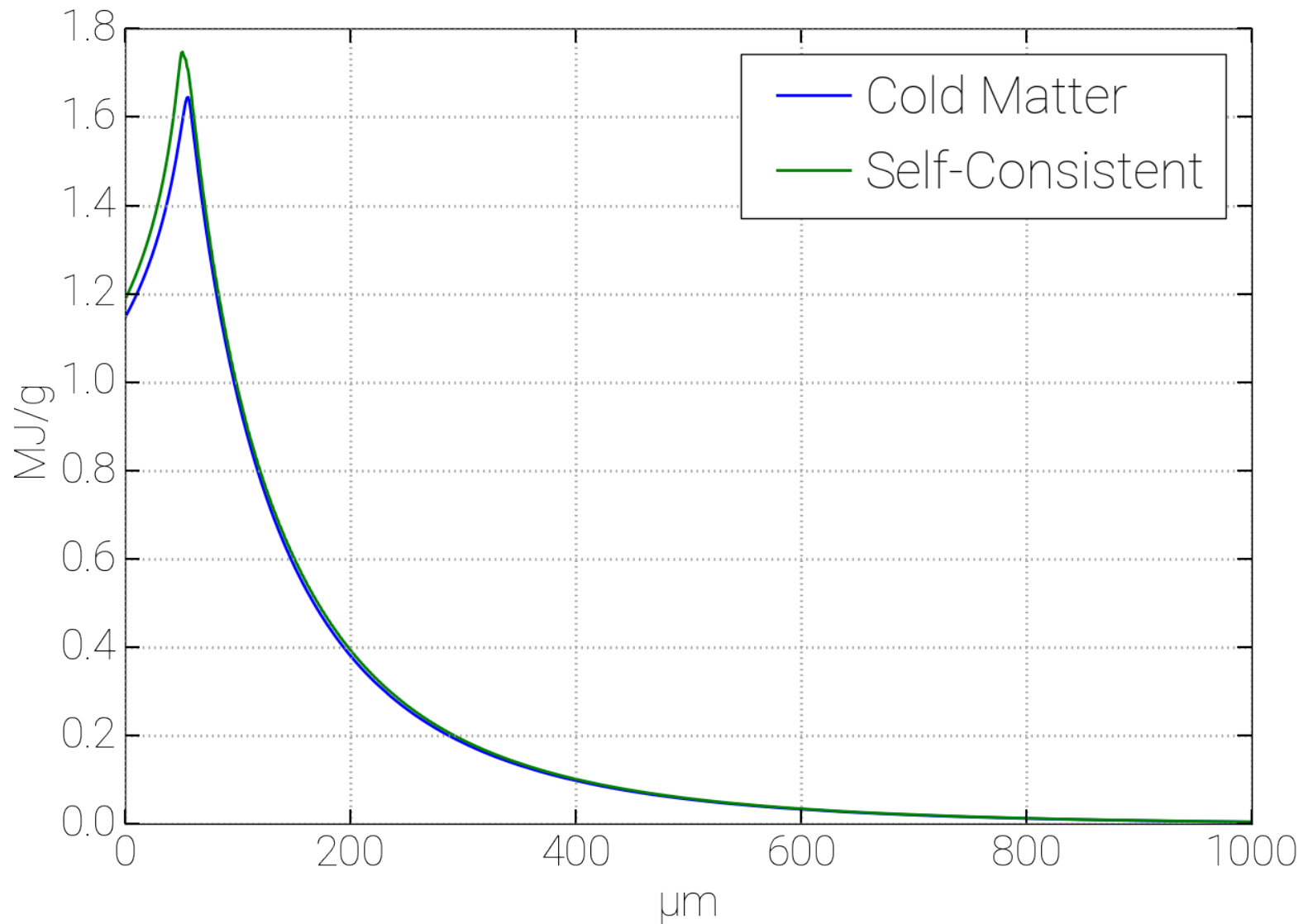


Торможение ионов

Протоны из эксперимента LFEX



protons
5–33 MeV
 $f(\varepsilon) \sim 10^{-\varepsilon/10 \text{ MeV}}$
50 J
 \varnothing 300 μm
 $5.6 \times 10^5 \text{ J/cm}^2$
 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$



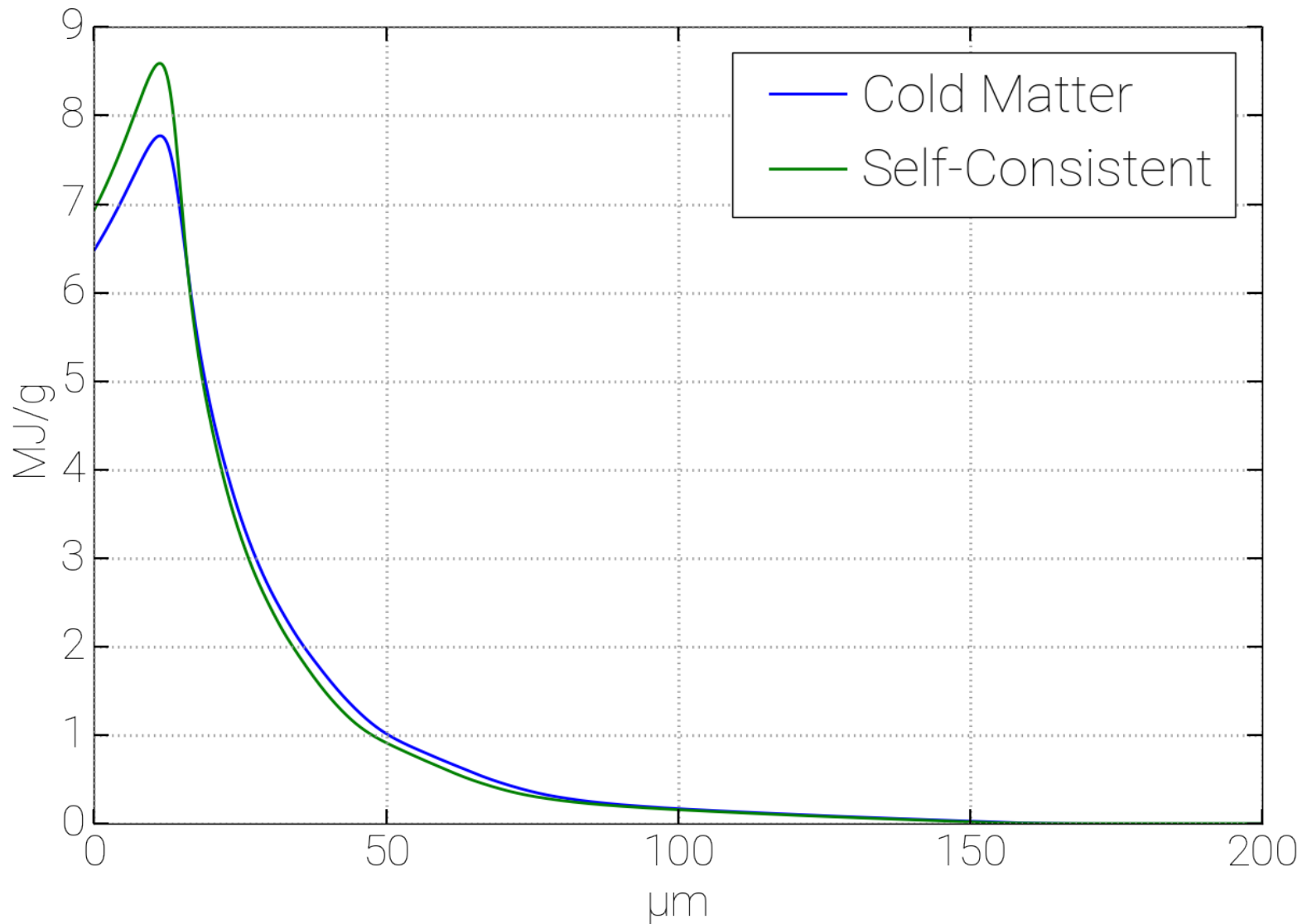
Торможение ионов

Ионы Al из PIC-моделирования



Laser pulse
1 kJ, 1 ps
Ø 10 µm

Al¹¹⁺
1–30 MeV/n
15 J
Ø 40 µm
 $9.4 \times 10^5 \text{ J/cm}^2$
 $1.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$

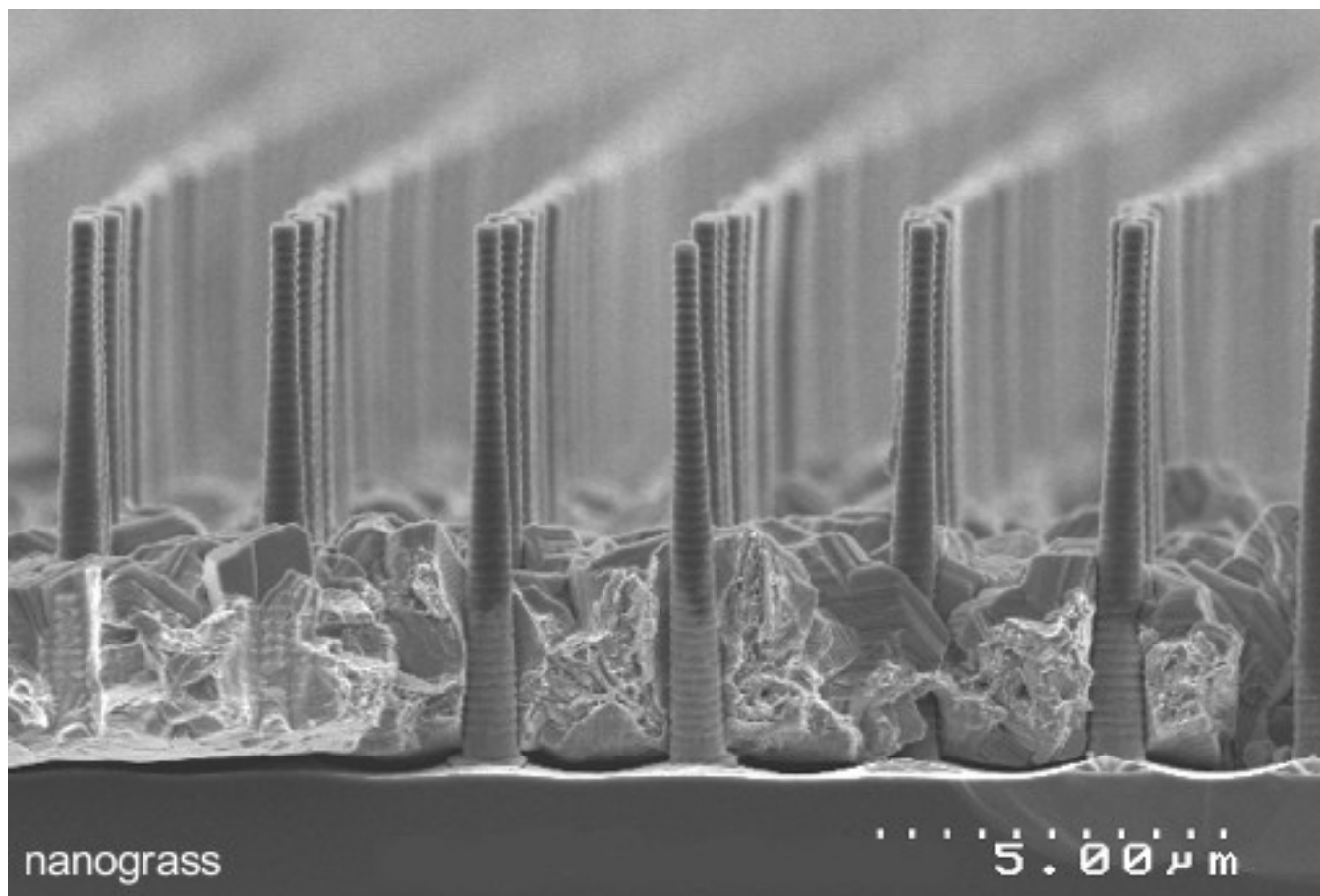


Прямой лазерный нагрев

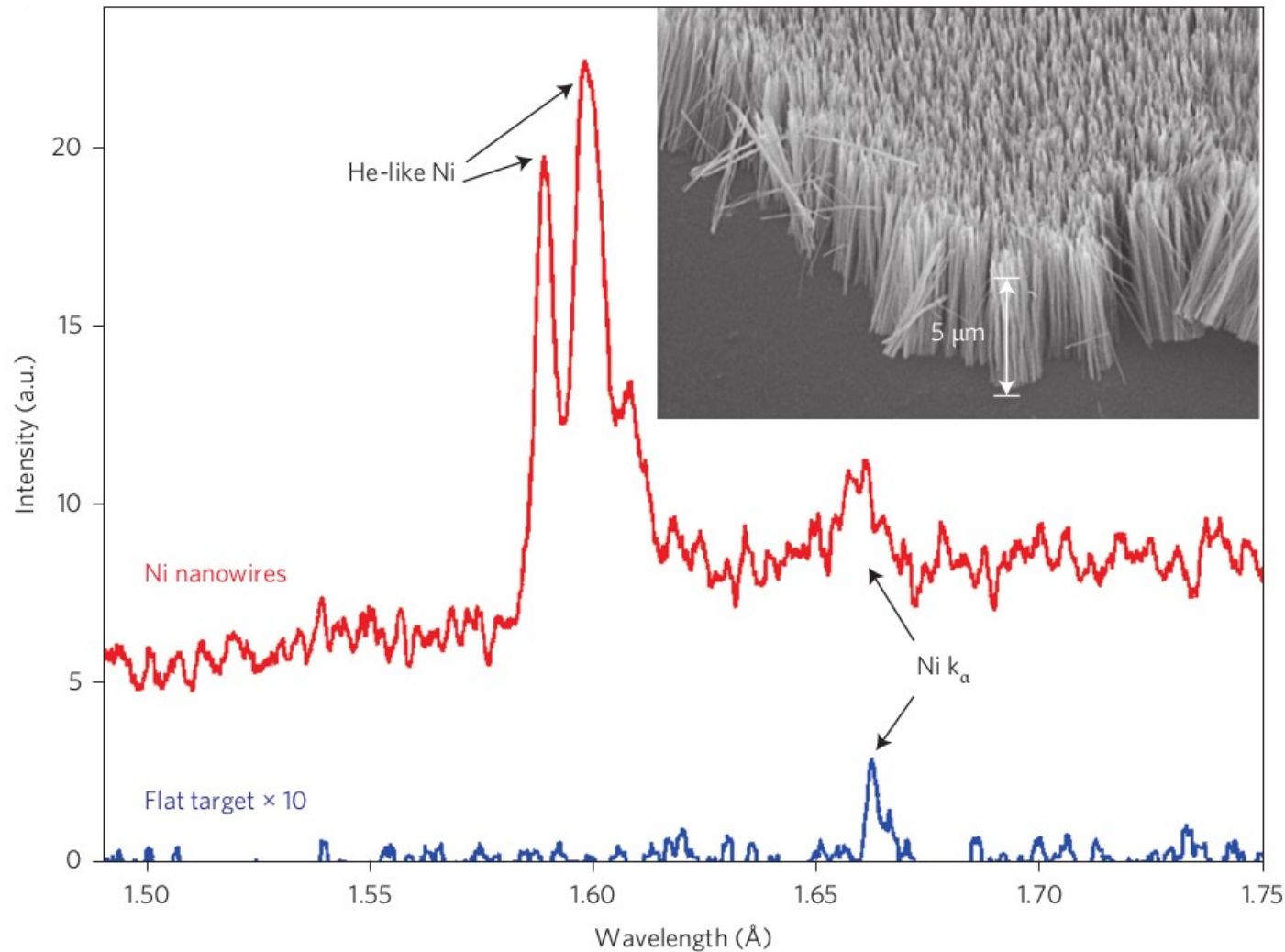


- Эффективен только вблизи критической поверхности
- Остальные области греются опосредованно
- При этом размер нагреваемой области велик — большая длина пробега горячих электронов

Нагрев наноструктурированных мишеней

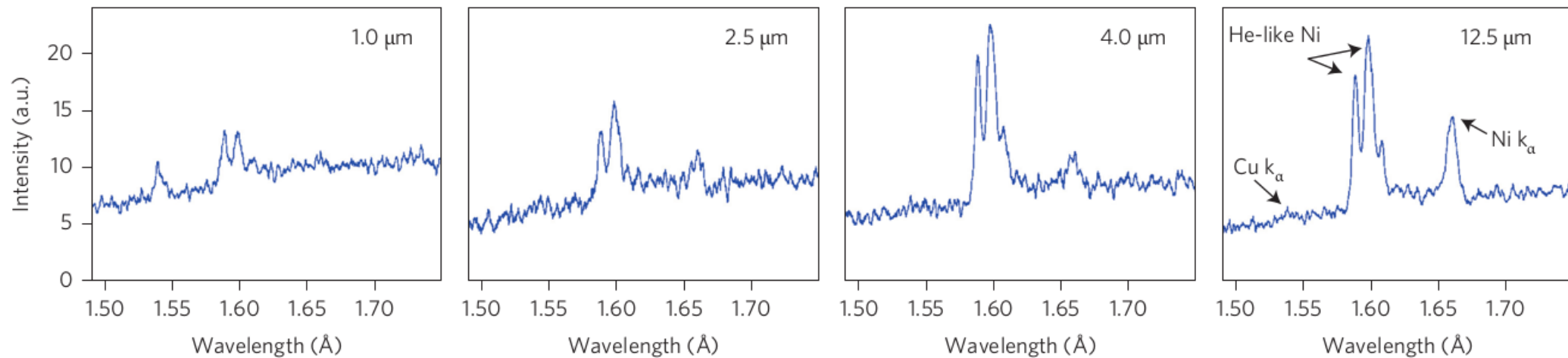
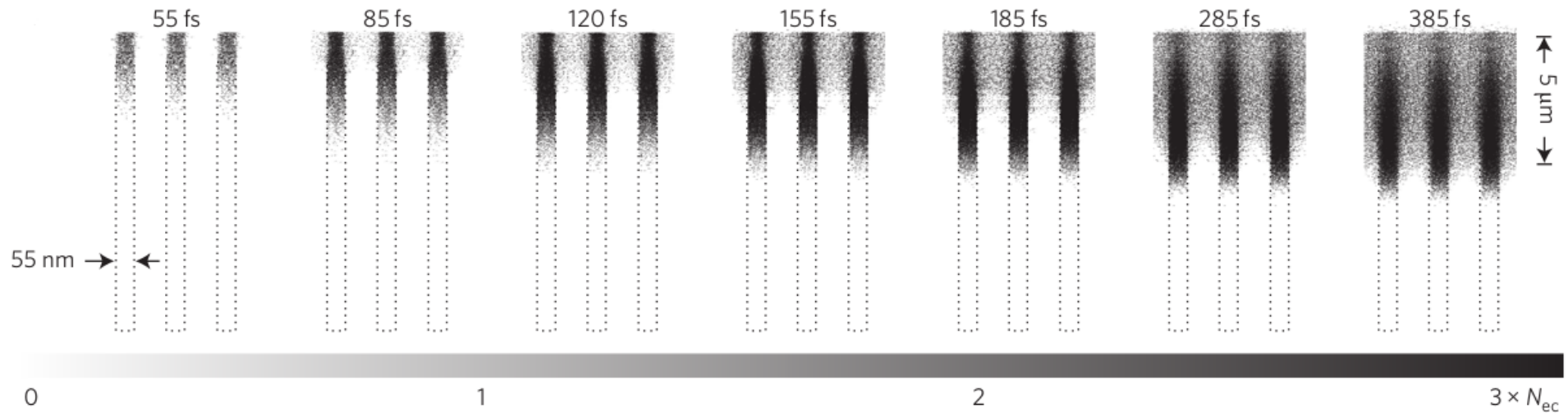


Нагрев наноструктурированных мишеней



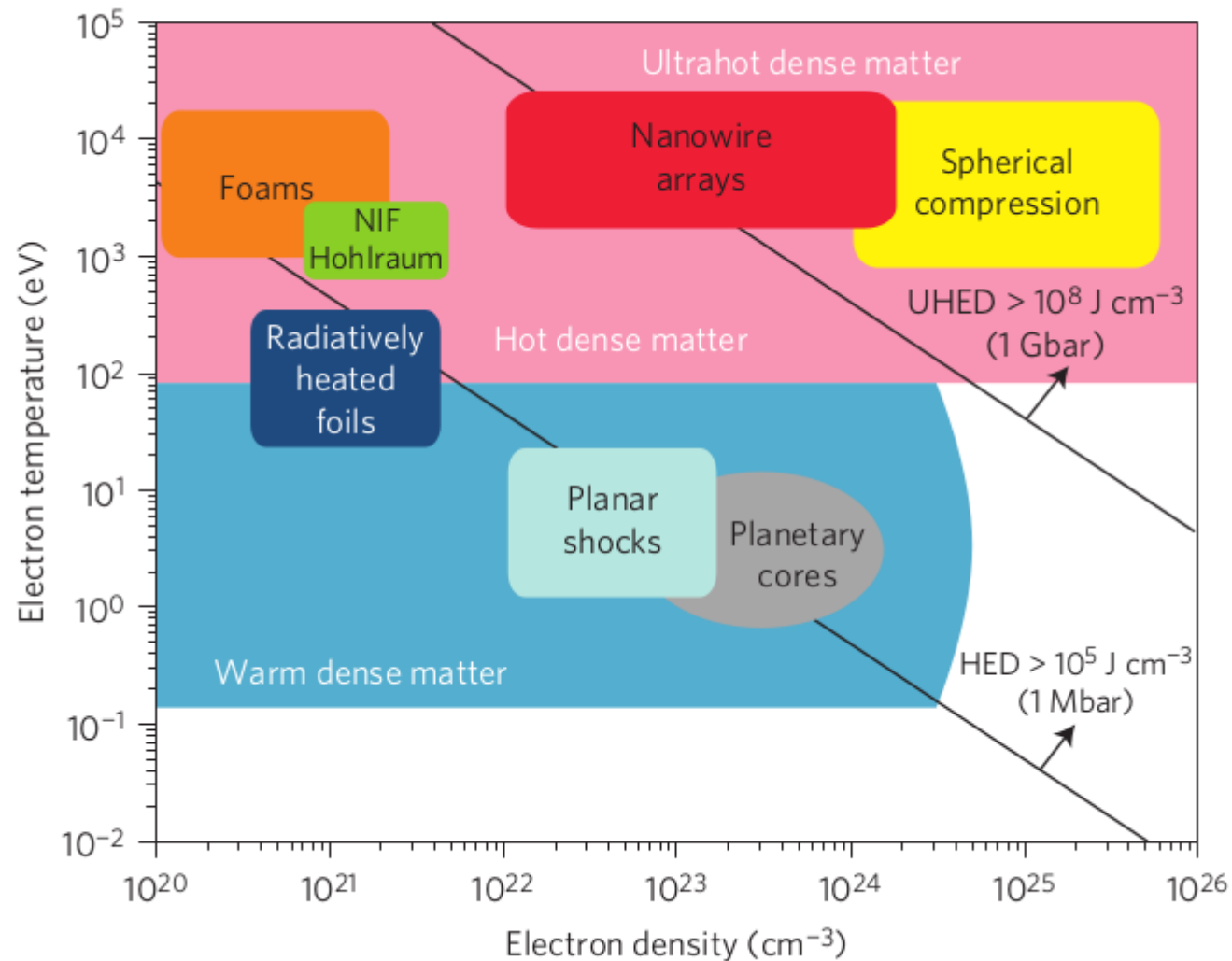
0,5 Дж / 60 фс / 5×10^{18} Вт/см²
контраст $> 10^{11}$

Нагрев наноструктурированных мишеней

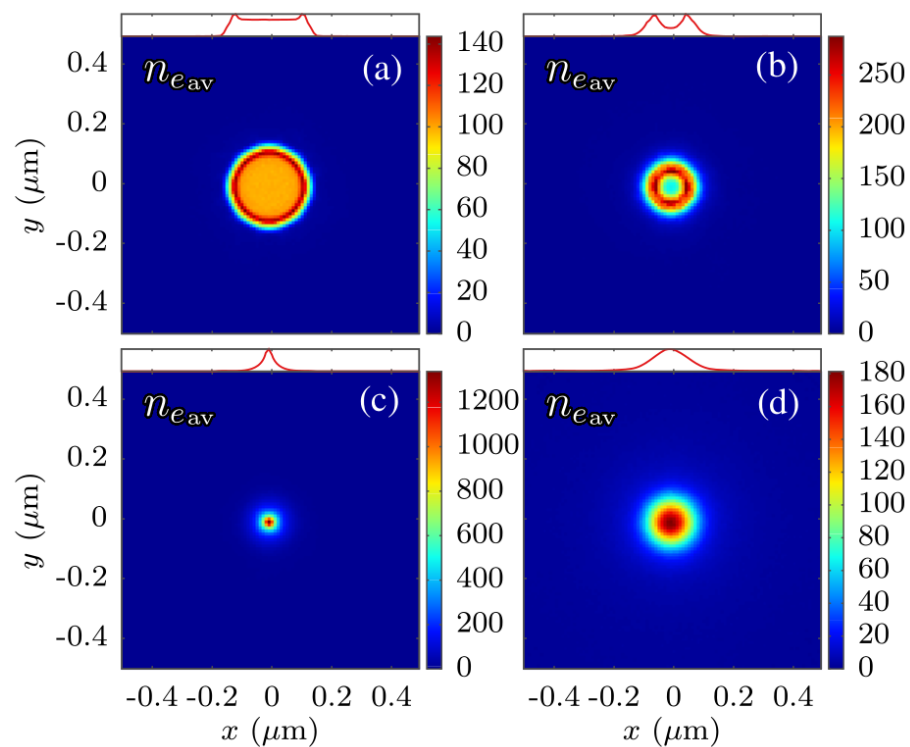
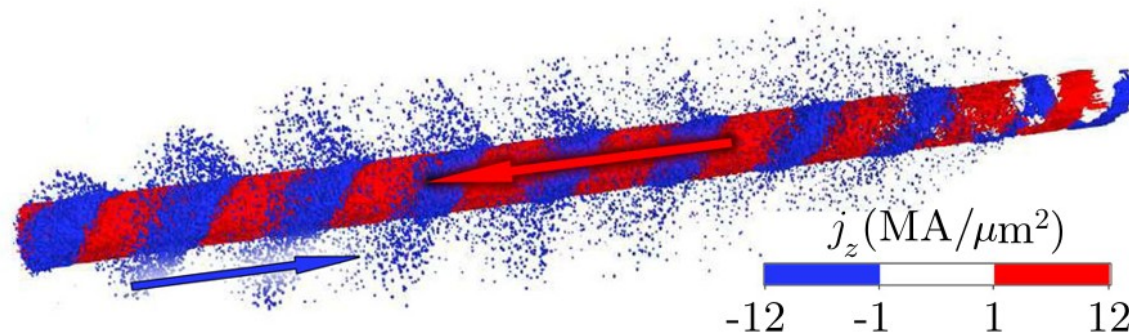


0,5 Дж / 60 фс / 5×10^{18} Вт/см²
контраст > 10^{11}

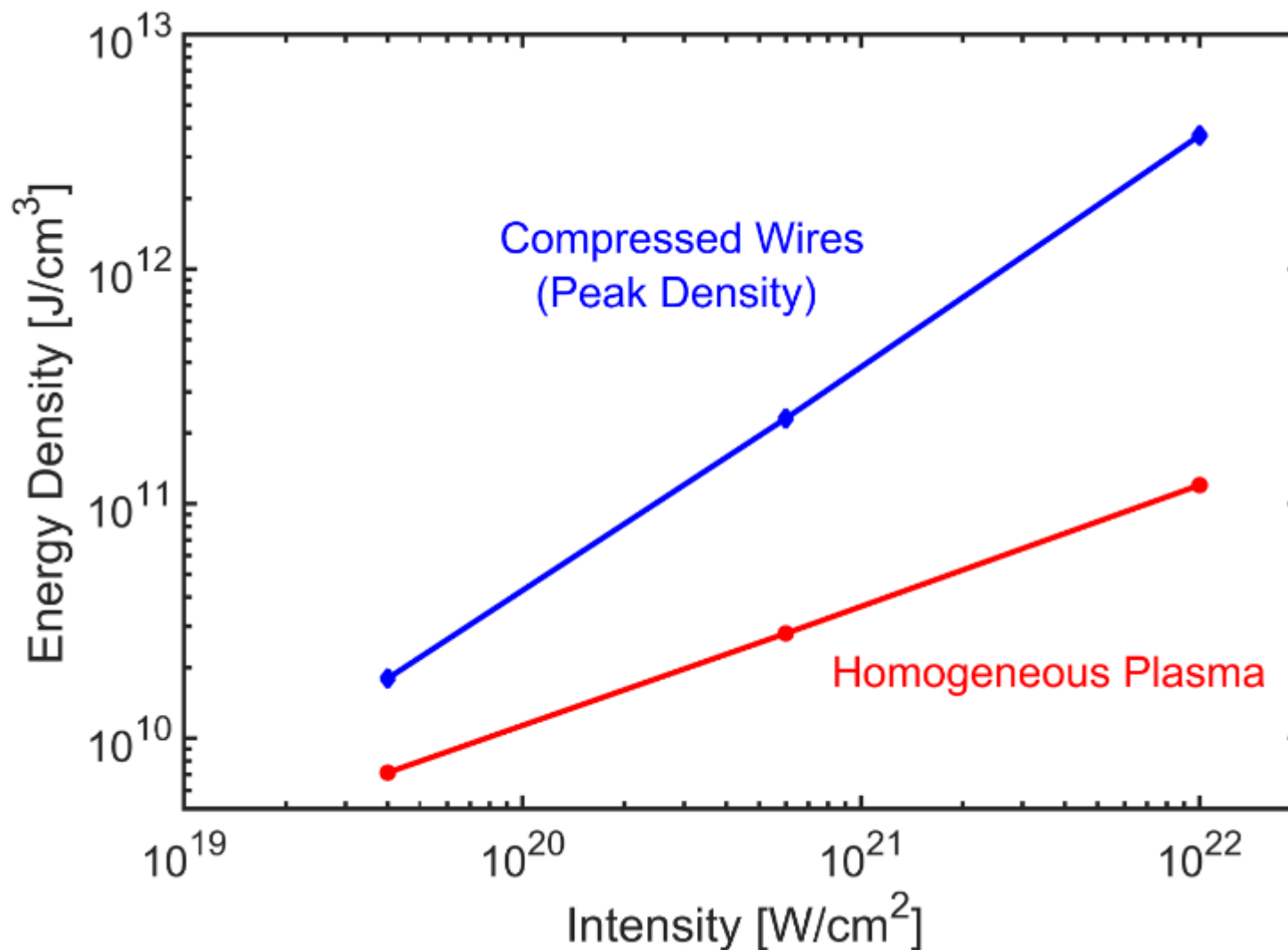
Нагрев наноструктурированных мишеней



Сверхплотный нано-пинч

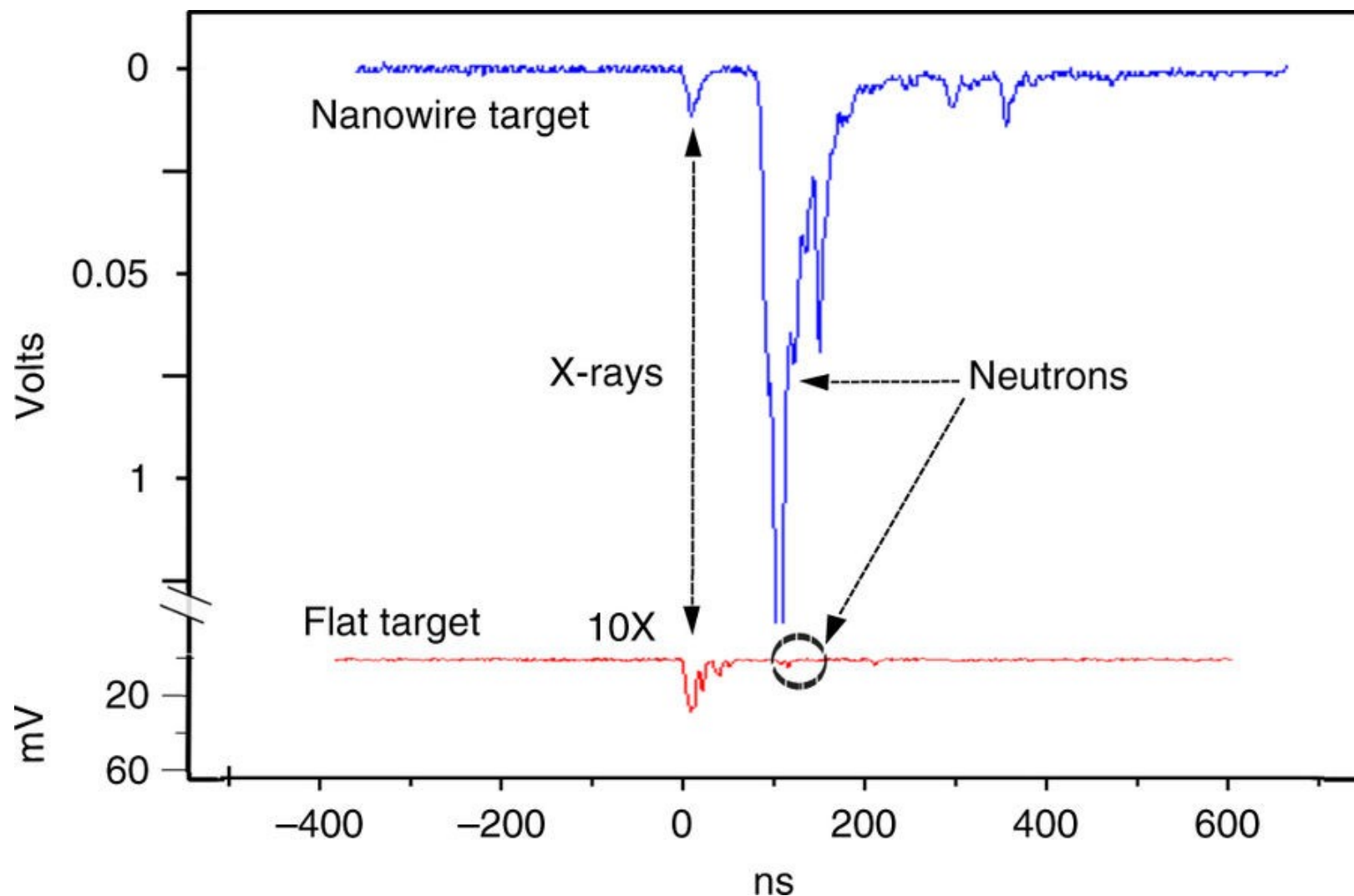


Давление порядка Тбар



0,6 Дж / 55 фс / ø 5 мкм / 4×10¹⁹ Вт/см²
контраст ~ 10¹²

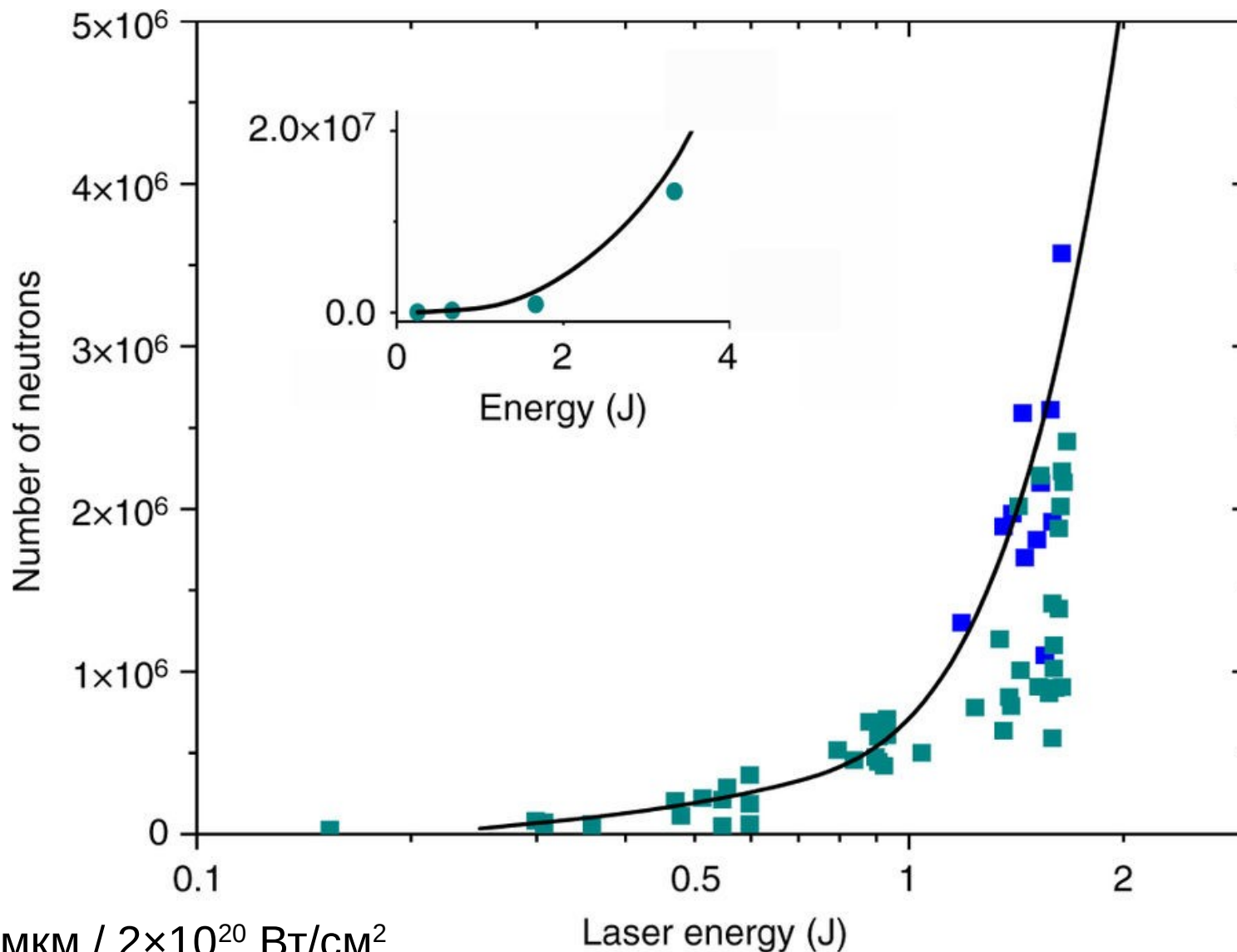
Выход нейтронов из нагретых наноструктурированных мишеней



1,65 Дж / 60 фс / \varnothing 2 мкм / 2×10^{20} Вт/см²
контраст $> 10^{12}$

Curtis et al., Nat. Commun. 9: 1077 (2018)

Выход нейтронов из нагретых наноструктурированных мишеней



60 фс / ø 2 мкм / 2×10^{20} Вт/см²
контраст > 10^{12}

Curtis et al., Nat. Commun. 9: 1077 (2018)

Результаты



- Современные лазерные системы кДж-уровня могут генерировать пучки ионов, способные изохорически нагревать твердотельные мишени до температур в сотни эВ, достигая давлений на уровне Гбар
- Облучение наноструктурированных мишеней высоконтрастными лазерными импульсами может приводить к достижению пиковых давлений порядка Тбар и созданию однородной плазмы с давлением в десятки Гбар и близкой к твердотельной плотностью