



# Генерация ТГц излучения и ускорение электронов при воздействии мультитераваттных фемтосекундных лазерных импульсов на твердотельные мишени.

М.М. Назаров, П.А. Щеглов, М.В. Чащин, А.В. Митрофанов,  
Д.А. Сидоров- Бирюков, В.Я. Панченко

NRC “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia.

Russian Quantum Center, Skolkovo, Moscow Region, Russia

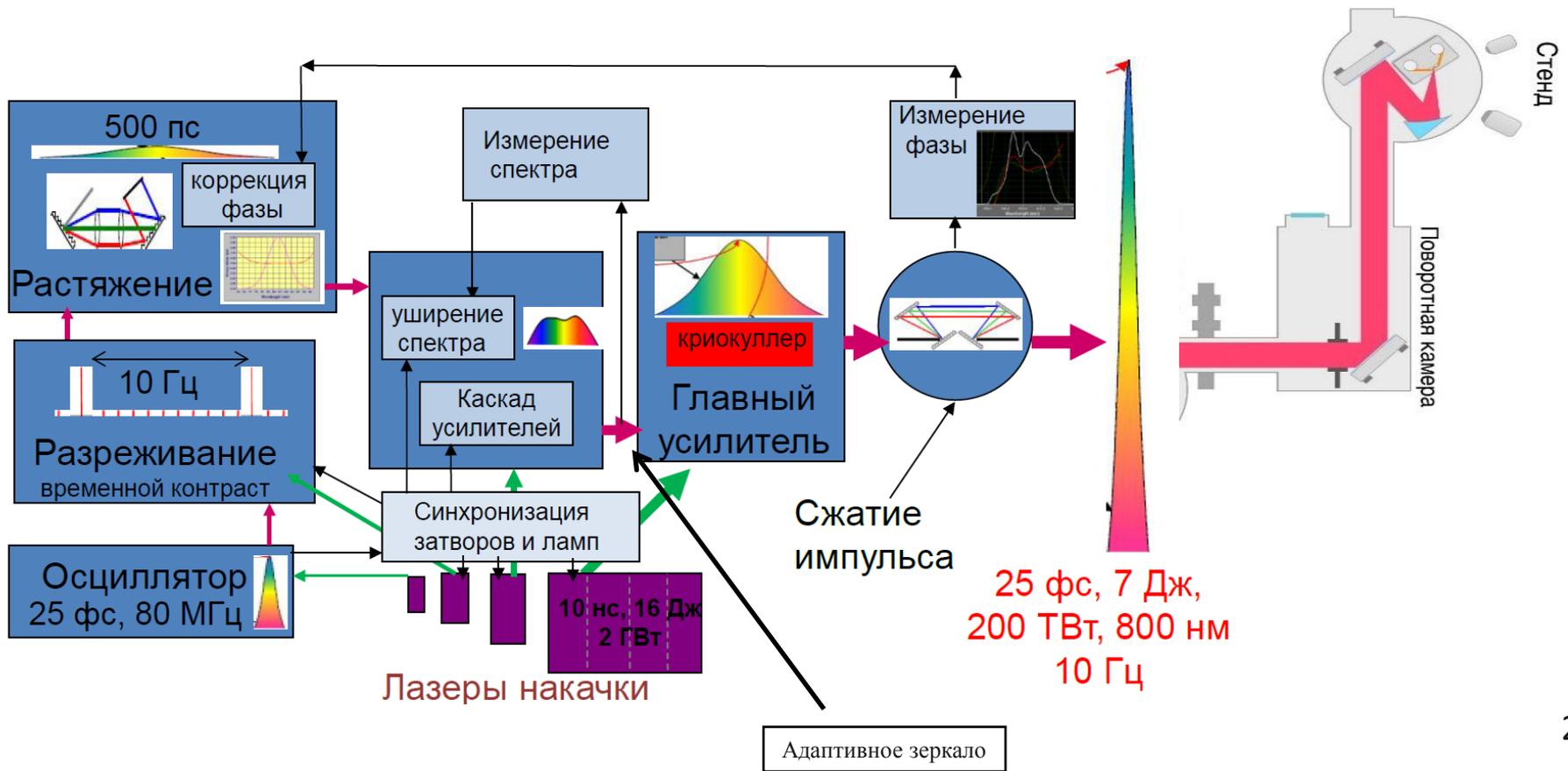
Physics Department, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Inst. Laser and Information Technol. – Branch of FSRC “Cryst.and Phot.” RAS, Shatura, Russia

30 May 2023

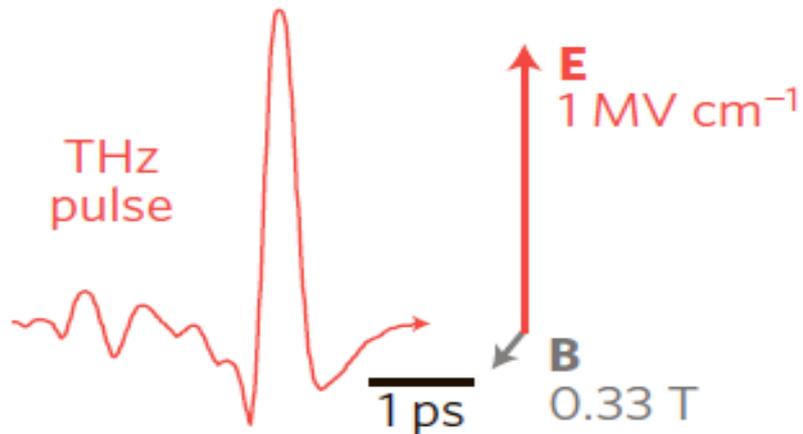
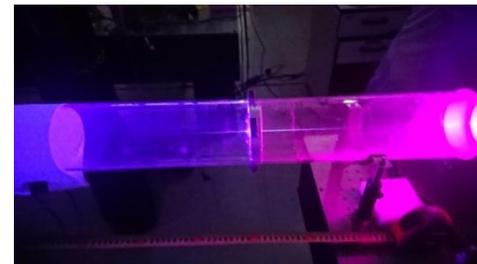


# Laser Terawatt Femtosecond Complex

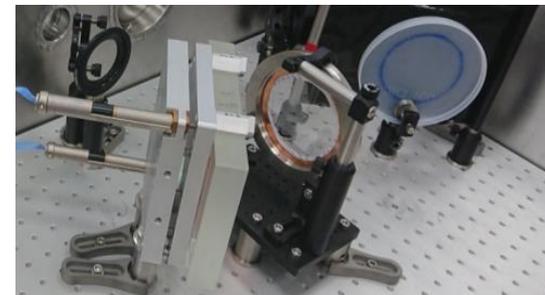


# Генерация мощного ТГц излучения

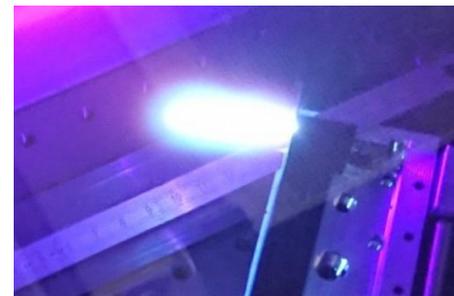
Двухцветный  
филамент



Широкоапертурный  
кристалл



Твердотельная,  
релятивистская плазма



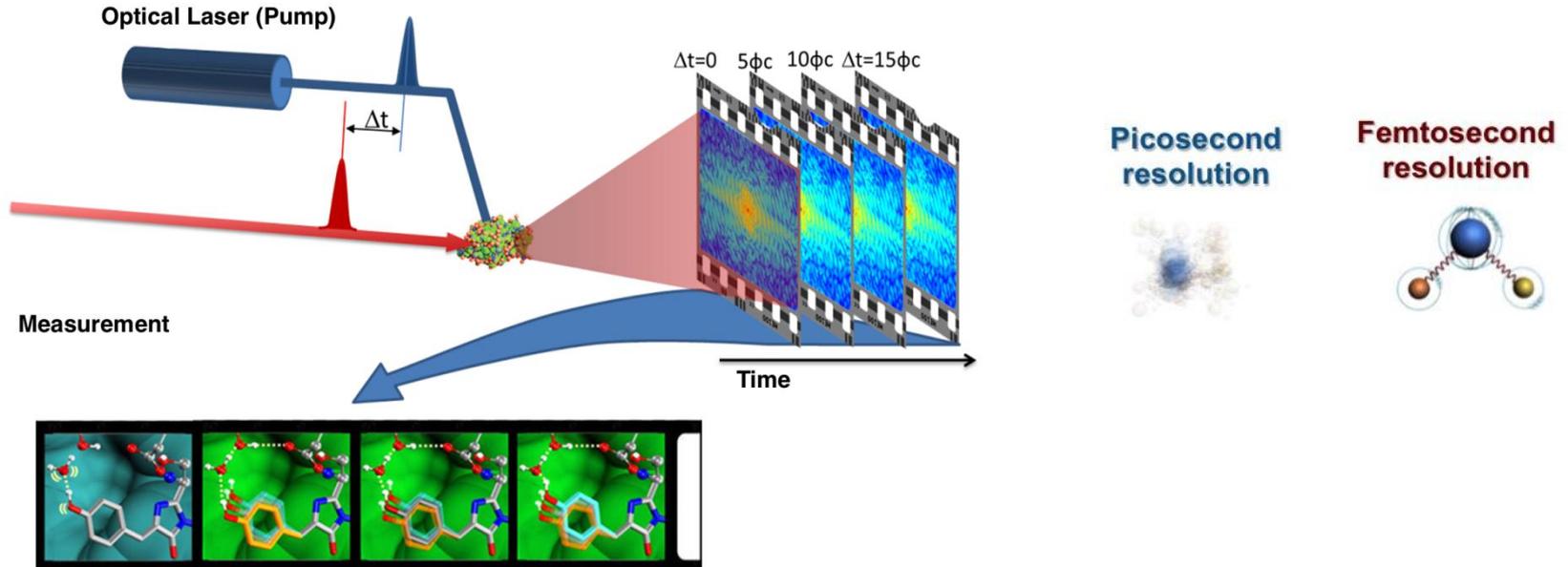
Кваз-постоянное сильное электрическое и магнитное поле,  
Управление заряженными частицами....  
Воздействие на крист.решётку....



# Накачка – Зондирование

Лазерная и терагерцовая

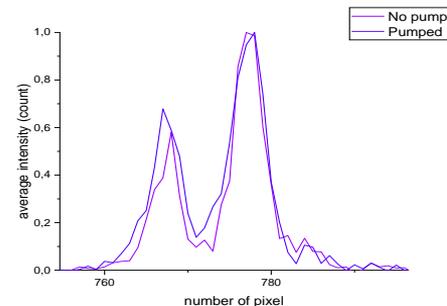
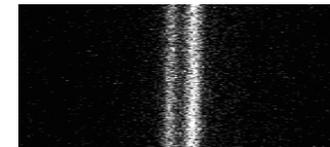
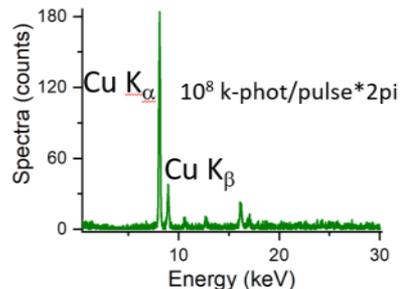
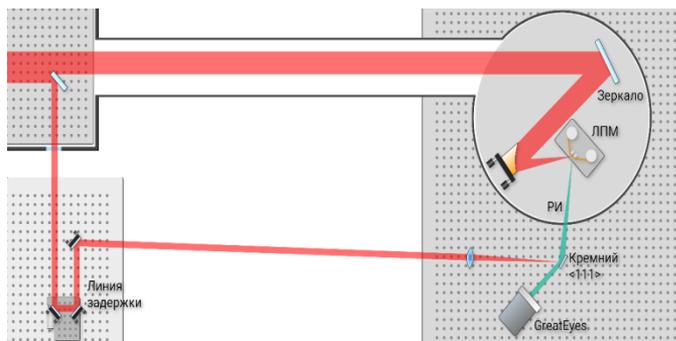
СИ или лазерно-плазменный рентген





# Генерация характеристического рентгеновского излучения

$K_{\alpha}$  линии с энергиями 8.028кэВ и 8.048кэВ, разрешение в 1' позволяет разделить  $K_{\alpha 1}$  и  $K_{\alpha 2}$

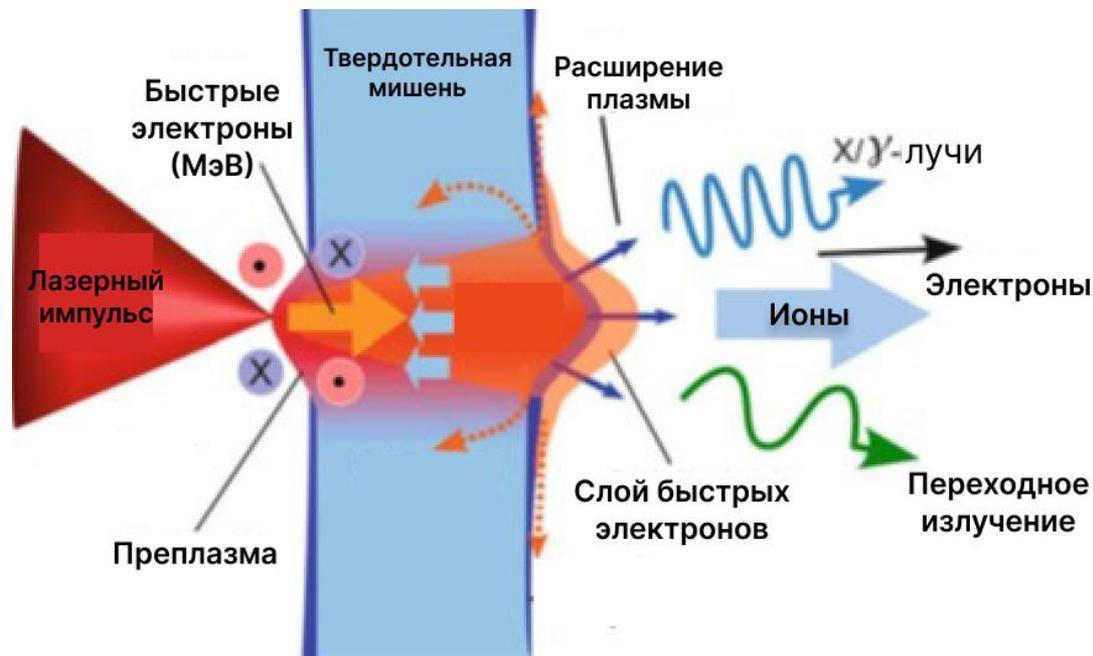


Интенсивность лазерного излучения порядка  $10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup> длительность 25 фс

$K_{\alpha}$  линия Cu 8 кэВ длительность **порядка 100 фс**

Эксперименты класса накачка – зондирование, где роль накачки играет мощный лазерный импульс, а зондирование осуществляется рентгеновским излучением

# Ускорение заряженных частиц от твердотельной мишени



Нестационарная, неоднородная плазма, рождающаяся при взаимодействии мощного, коротко лазерного импульса с поверхностью металла, является источником ускоренных электронов, а так же множества различных диапазонов излучений (рентгеновское, терагерцовое, оптические гармоники).

# Цели работы

Найти условия, когда одновременно с рентгеном и ТГц образуется направленный пучок ускоренных электронов.

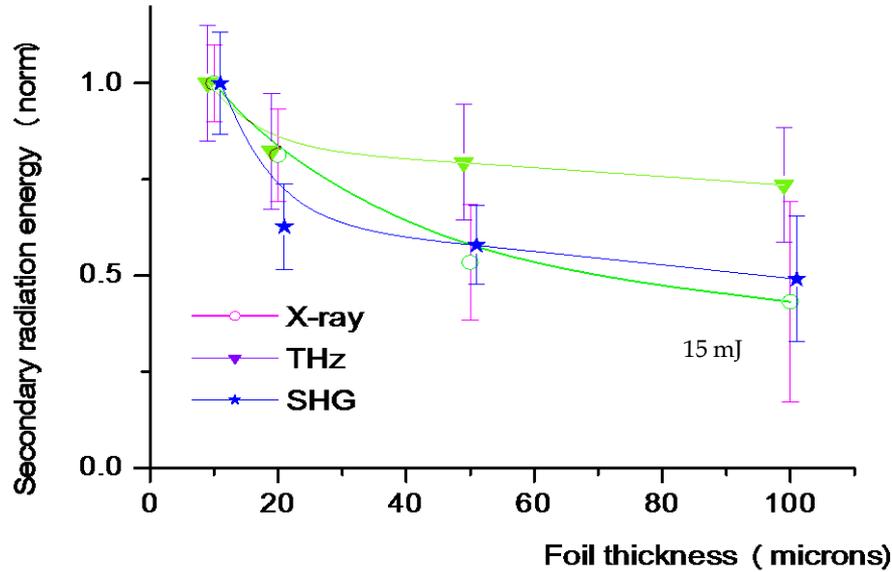
Уточнить основные процессы и влияющие параметры в фемтосекундной лазерной плазме при параметрах излучения данного мульти-тераваттного лазера  
( $CR 10^{-7}$ ,  $I = 10^{15}-10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup>)

Сравнить поведение вторичных излучений – рентгена, ТГц, гармоник при изменении длительности и энергии импульса.

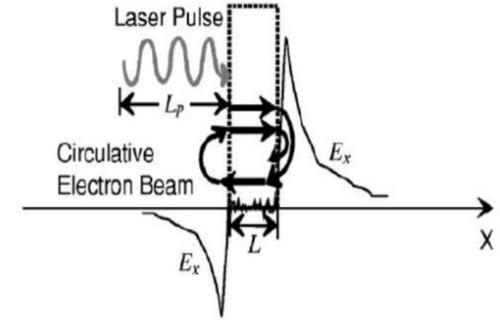


# Оптимизация толщины мишени

Лента нескольких толщин в одном измерении



(II)  $L < L_p/2$



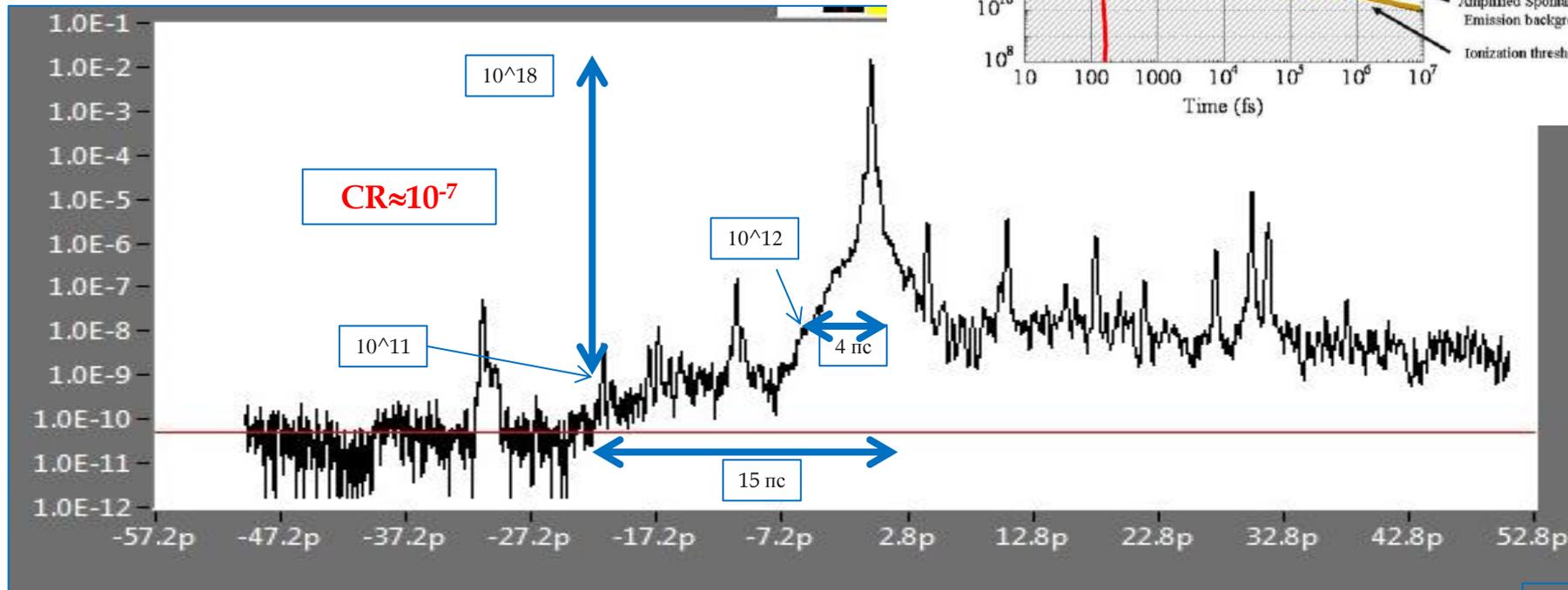
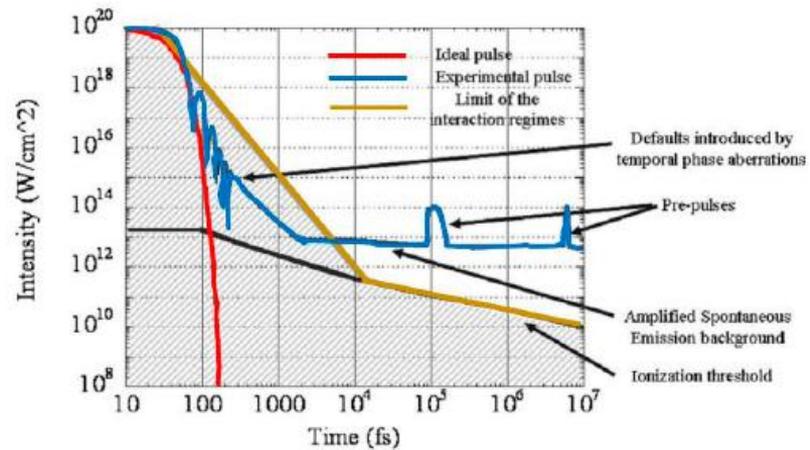
Рециркуляция  
электронов

Для энергий 5-50 мДж, (резонансное поглощение)

Для  $I > 10^{18}$  нет чувствительности к толщине.

Дальнейшие измерения для 10 мкм

# Пикосекундный контраст



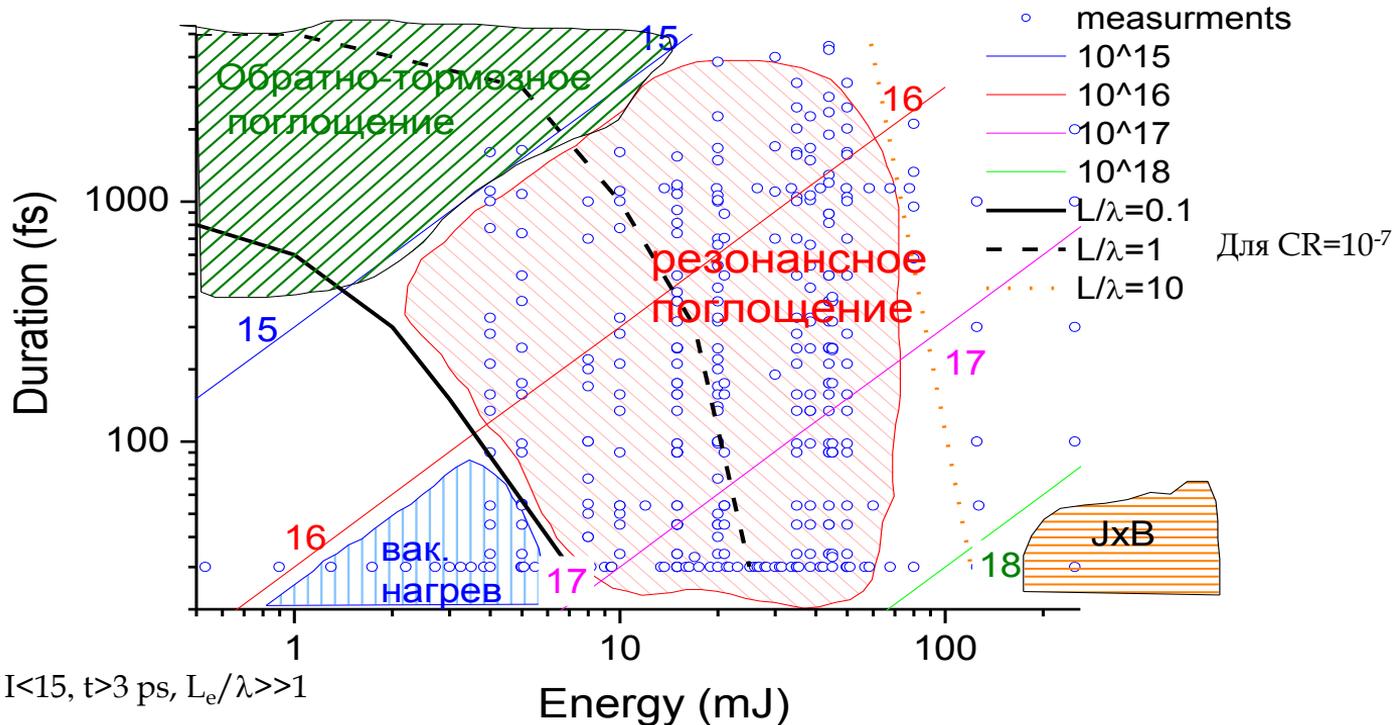
10 нс предимпульс  $\rightarrow 10^{-8} - 10^{-6}$  контраст ( $10^{10} - 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>)

# Используемый диапазон параметров

$$L_e = \left( \frac{1}{N_e} \frac{\partial N_e}{\partial x} \right)^{-1}$$

пространственный масштаб  
градиента электронной  
плотности

$v_p \sim 0.1-0.2$  nm/fs  
Разлёт пламы



Столкновительные механизмы,  $I < 15$

Обратное тормозное поглощение,  $I < 15, t > 3$  ps,  $L_e/\lambda \gg 1$

Скин эффект  $I < 15, t < ps, L_e/\lambda < 1$

Безстолкновительные механизмы  $I > 15$

Резонансное поглощение  $15 < I < 17, t < ps, L_e/\lambda \sim 1$

Вакуумный нагрев  $16 < I < 18, t < ps, L_e/\lambda < 0.1$

Аномальный скин-эффект,  $I > 16, t < ps, L_e/\lambda \ll 0.1$

JxB механизм,  $I > 18$

[0] М. В. Чащин и др. // Опт. и спектроскопия, (2023), 131, С 186

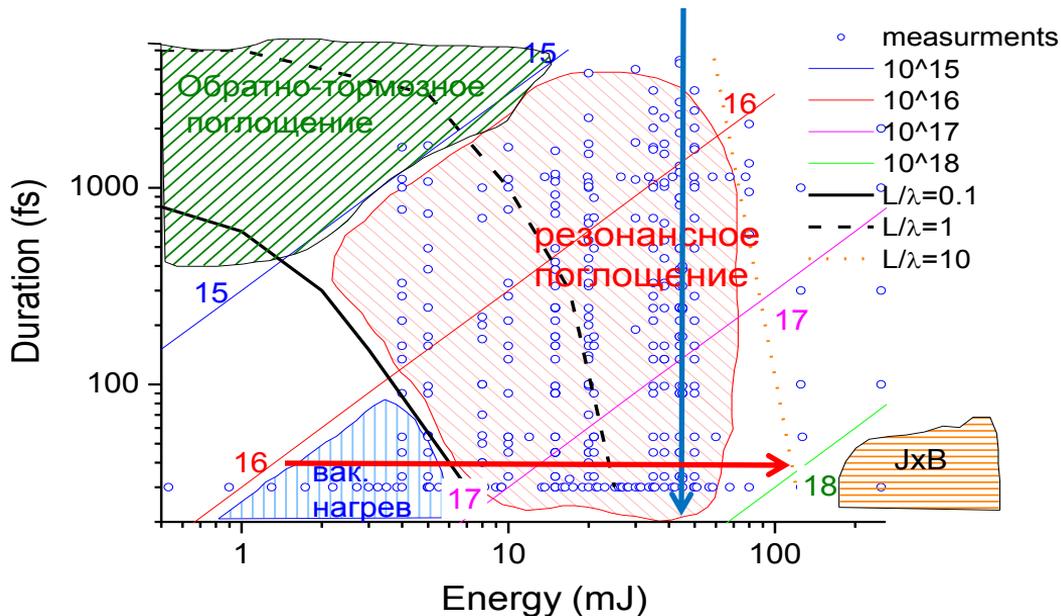
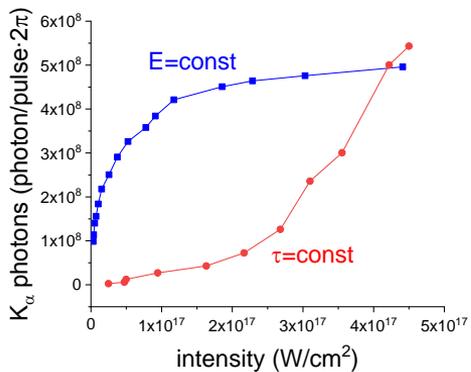
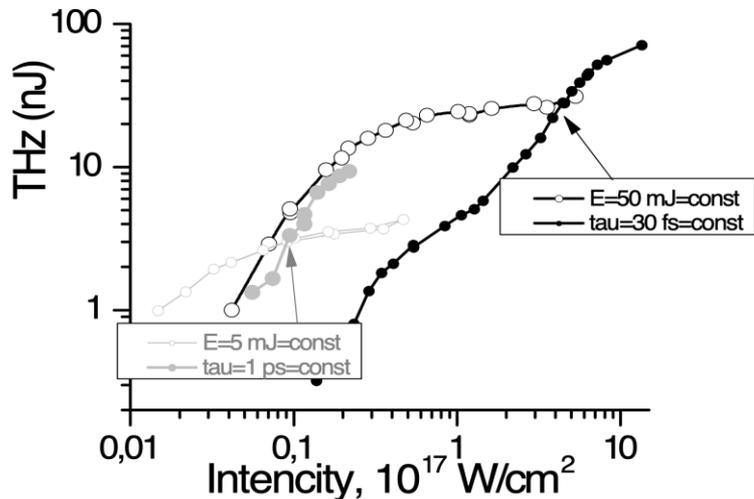
[1] M. Gambari, et al. Sci Rep, **11** (1), 23318 (2021).

[2] М. В. Седов.. Канд. дис. (СПбГУ, СПб., 2019).

[3] L. M. Chen, et. al. Phys Rev Lett, **100** (4), 045004 (2008).



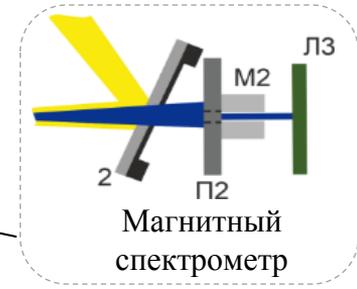
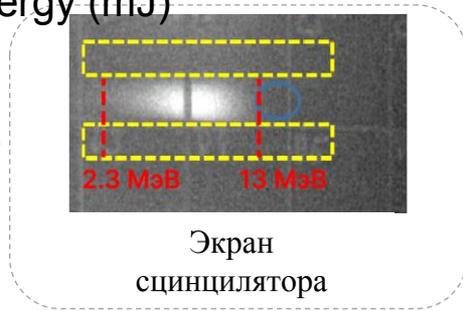
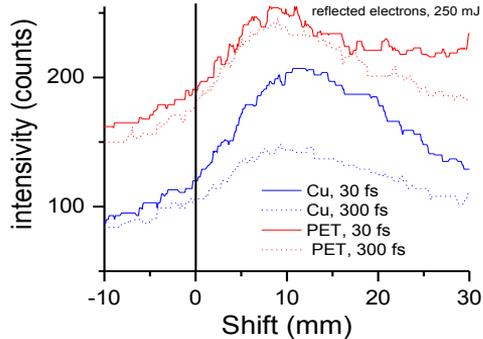
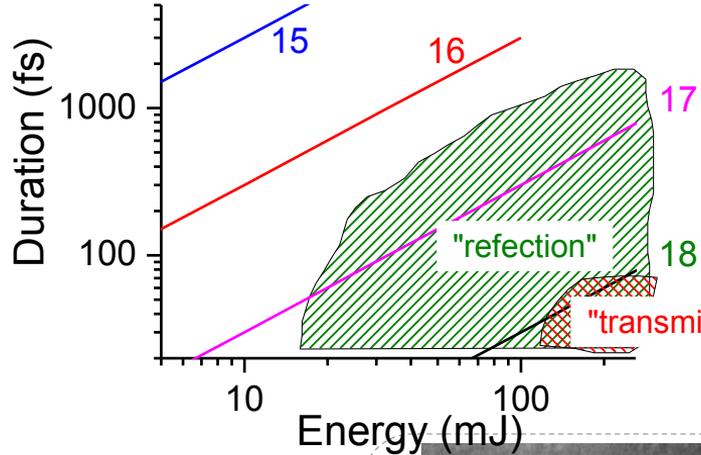
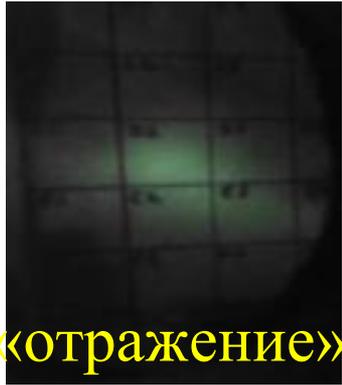
# Плотность энергии важнее длительности



# Направленность и энергия ускоренных электронов

угловой размер пучка 30 мрад

Большой заряд по сравнению с газовой мишенью, но плохая коллимация и спектральная яркость



Механизмы ускорения: самомодулированное ускорение лазерного кильватерного поля SM-LWFA и прямое лазерное ускорение DLA

Распределение электронов по энергии 2.5-13 МэВ

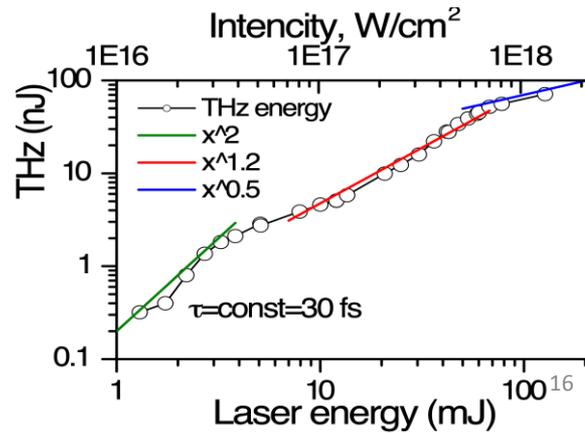
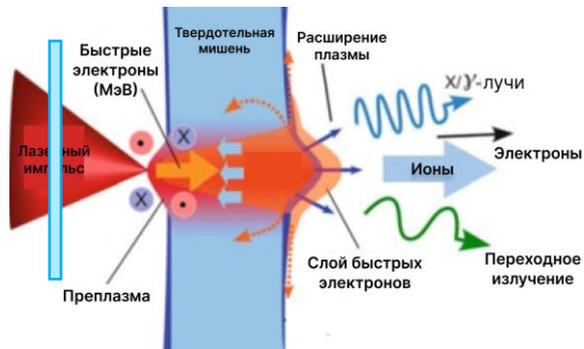
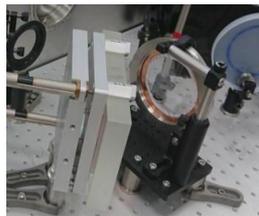
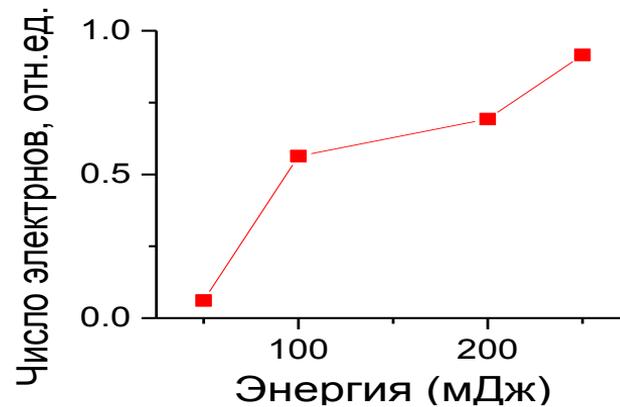
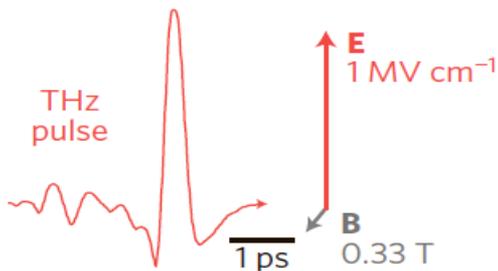
# Несколько конфигураций измерения электронов

Магнитное поле, Гл	Направление	Расстояние от мишени, см	Расстояние до экрана, см	Энергия в импульсе, мДж	Длительность импульса, фс	Интенсивность, Вт/см <sup>2</sup>	E <sub>max</sub> , МэВ	E(при N <sub>e</sub> =max), МэВ	E <sub>min</sub> , МэВ
0.1	Пропускание	17	5	100	30	1·10 <sup>18</sup>	11±3	4.9±0.5	2.8±0.2
0.1	Пропускание	17	5	250	30	2·10 <sup>18</sup>	12±3	4.9±0.5	2.3±0.12
0.1	Пропускание	17	5	250	300	2·10 <sup>17</sup>	13±3	4.8±0.5	2.3±0.12
0.1	Пропускание	17	5	250	950	6·10 <sup>16</sup>	0	0	0
0.6	Пропускание	14.3	7.3	250	35	2·10 <sup>18</sup>	14±4	–	3.5±1.1
0.7	Отражение	7	0.1	100	30	1·10 <sup>18</sup>	6.8±1.7	2.49±0.2	2.2±0.1
0.7	Отражение	7	0.1	250	30	2·10 <sup>18</sup>	11±3	2.25±0.2	2.1±0.1
0.7	Отражение	7	0.1	250	300	2·10 <sup>17</sup>	14±4	2.5±0.21	2.1±0.1
0.7	Отражение	7	0.1	250	950	6·10 <sup>16</sup>	0	0	0
0.1	Отражение	9	1.7	125	30	1·10 <sup>18</sup>	5±1.4	–	–
0.6	Отражение	7	9	250	35	2·10 <sup>18</sup>	–	15±6	5.9±1.2



# Что общего между ТГц и ускоренными электронами?

Квазипостоянный ток,  
Движение пакета электронов как целого



# Выводы

- При околорелятивистских интенсивностях определяющим является плотность энергии на мишени а не длительность импульса
- Энергии электронов, лежат в диапазоне энергий от 2 до 14 МэВ в геометрии на отражение и на пропускание. «На отражение» ускоренные электроны появляются от интенсивности  $1 \cdot 10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>, в конусе 30 мрад «на пропускание» - от интенсивности  $2 \cdot 10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>, ненаправленные
- ТГц импульс может быть как следствием так и причиной ускорения заряженных частиц в лазерной плазме.

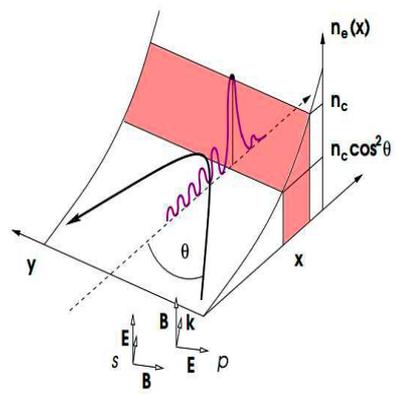
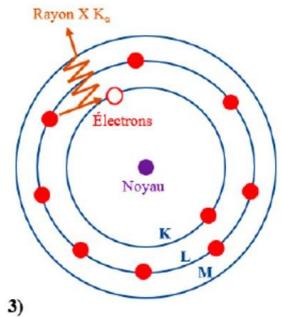
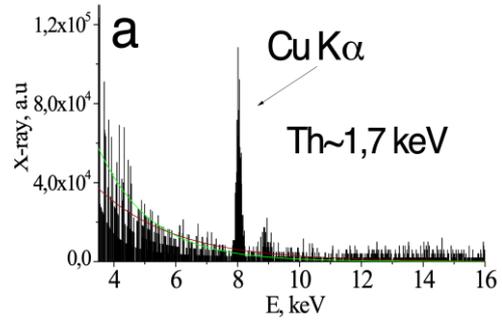
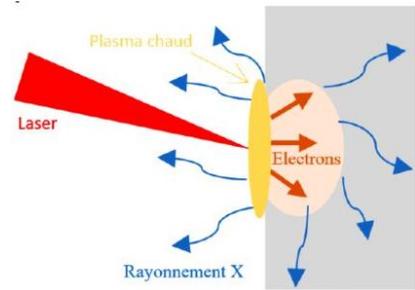
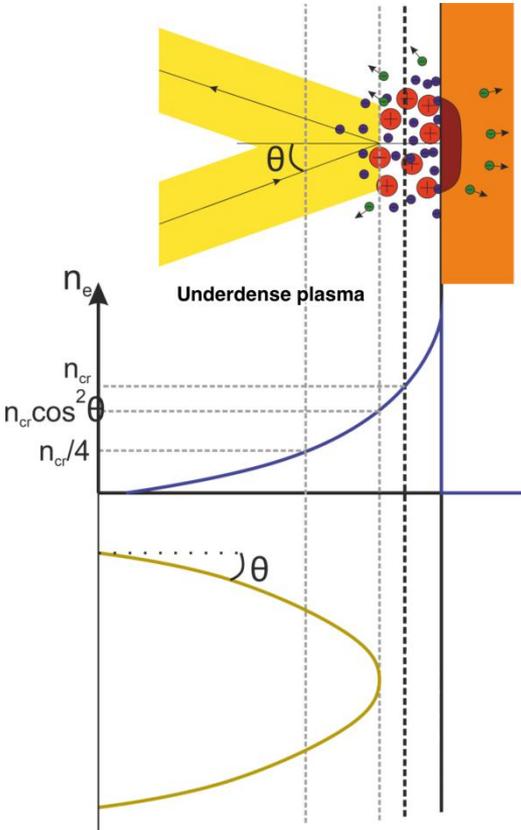




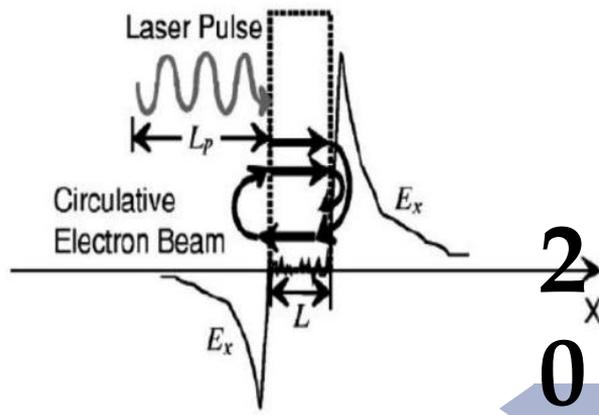
**Запасные слайды ниже**



# Short Volume of Laser Plasma

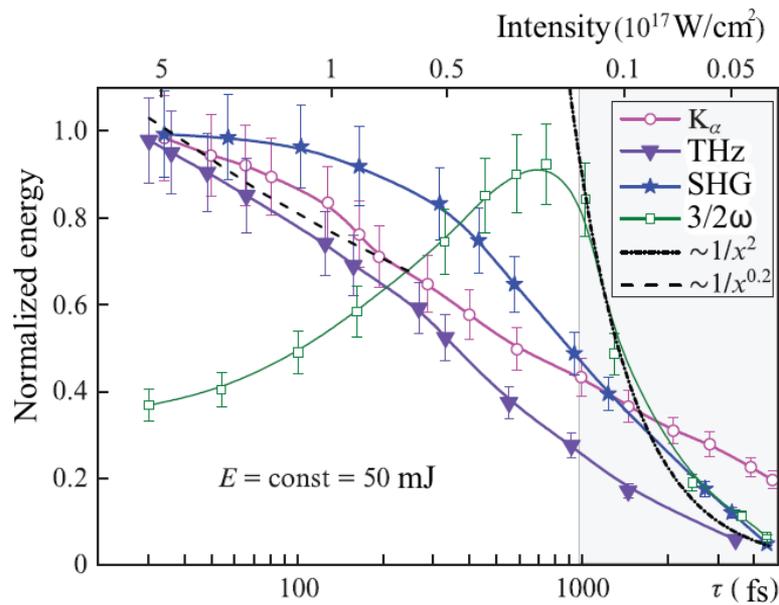
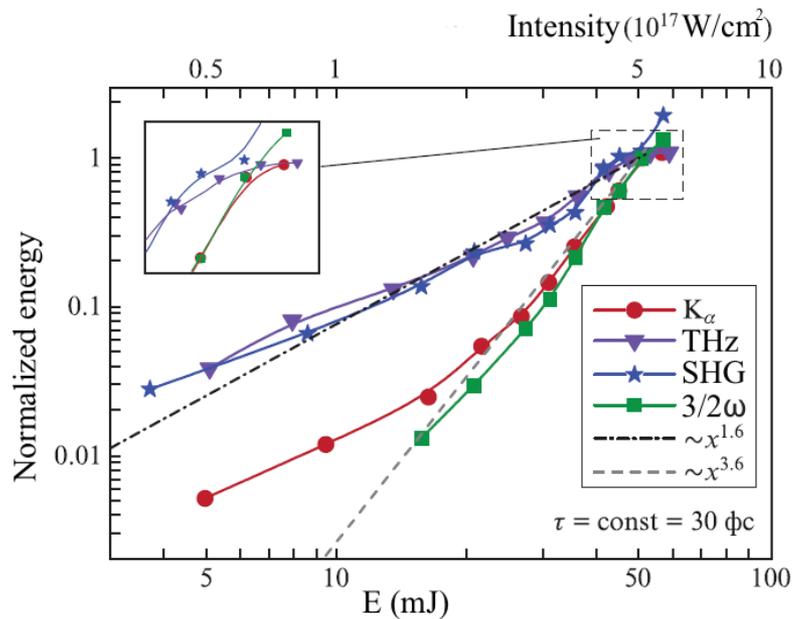


(II)  $L < L_p/2$



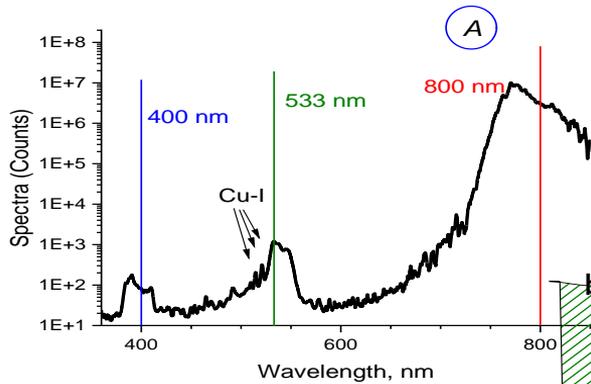


# Secondary radiation shows similar behavior

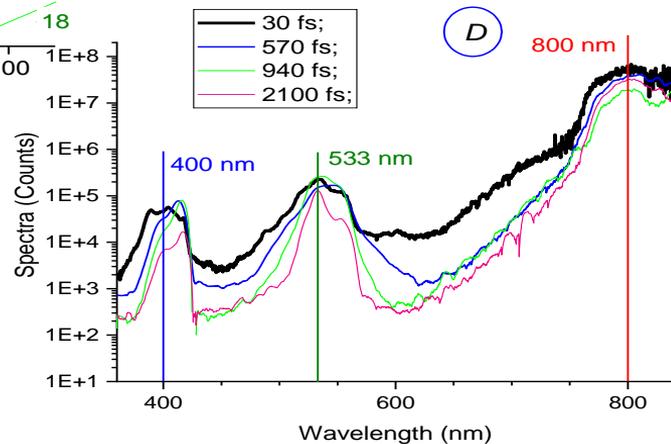
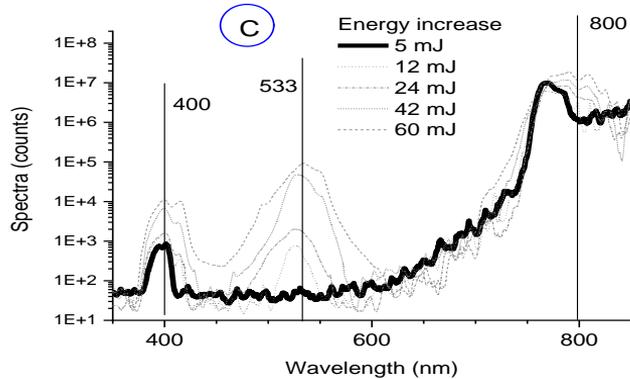
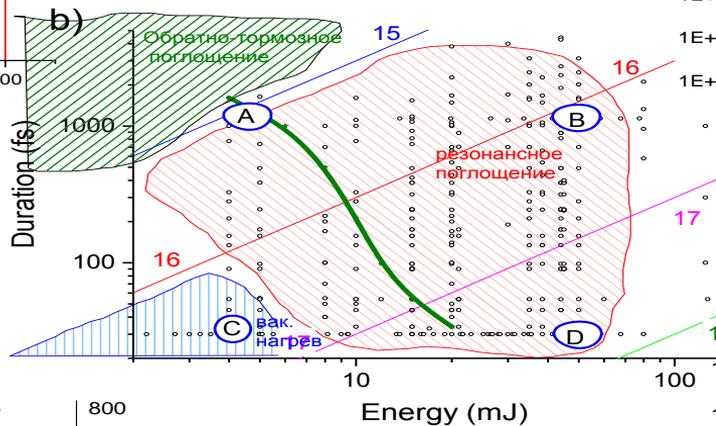
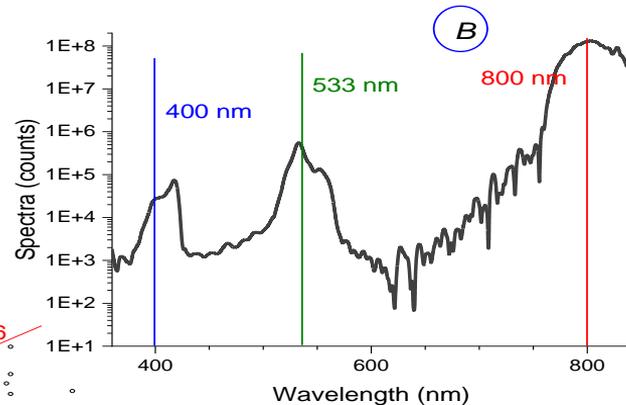


6

2  
1



# Спектр ВИДИМОГО диапазона



# Аналитические расчёты

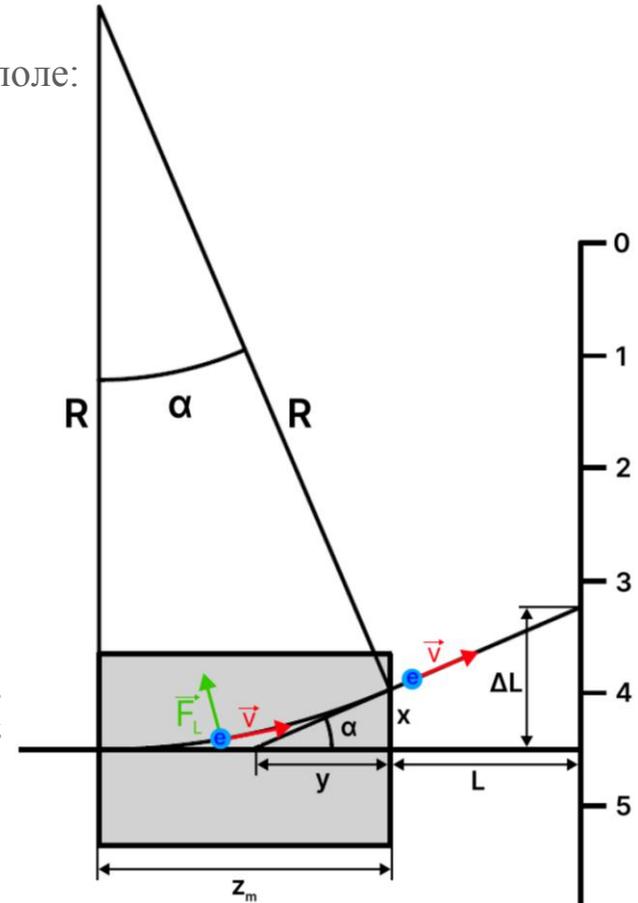
Радиус траектории, по которой движется электрон в магнитном поле:

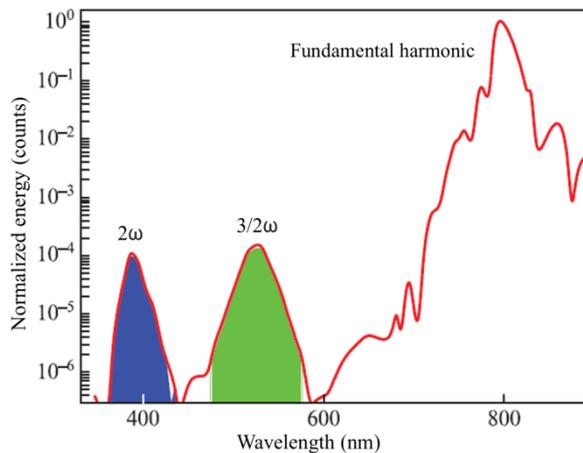
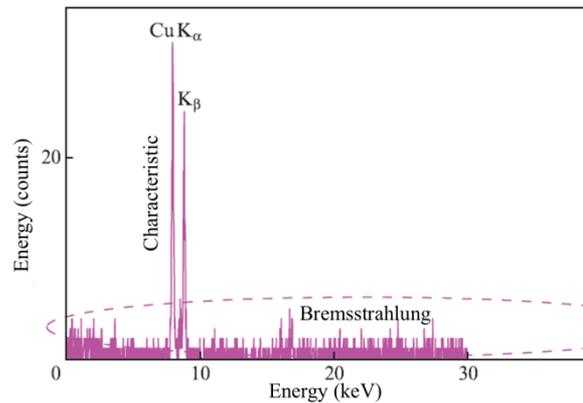
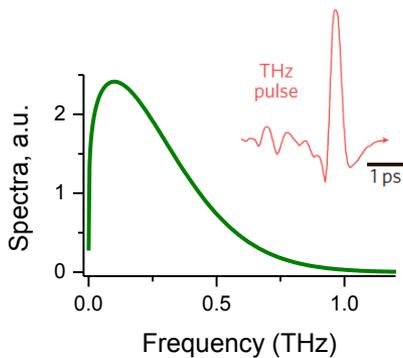
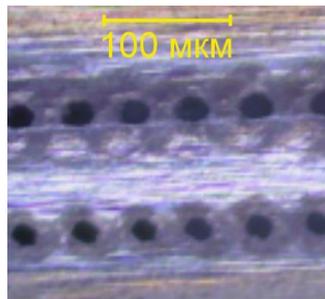
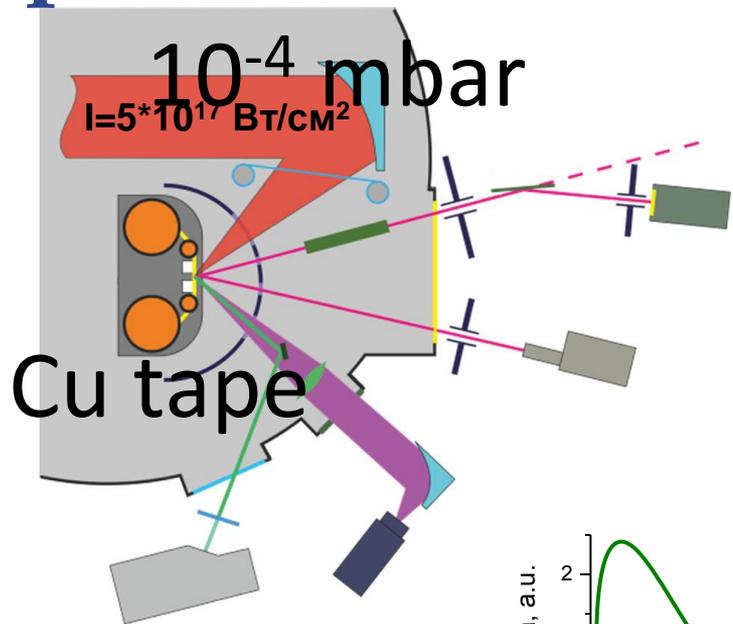
$$R = \frac{m_e c \sqrt{\left(\frac{E}{E_0}\right)^2 - 1}}{q_e B}$$

Полная энергия электрона:

$$E = E_0 \sqrt{\left(\frac{q_e B R}{c m_e}\right)^2 + 1}$$

$B$  - величина магнитной индукции,  $E_0$  - энергия покоя электрона,  $z_m$  - длина магнита,  $L$  - расстояние от магнитов до экрана Lanex,  $\Delta L$  - величина отклонения электронов на экране,  $m_e$  - масса электрона и  $q_e$  - заряд электрона

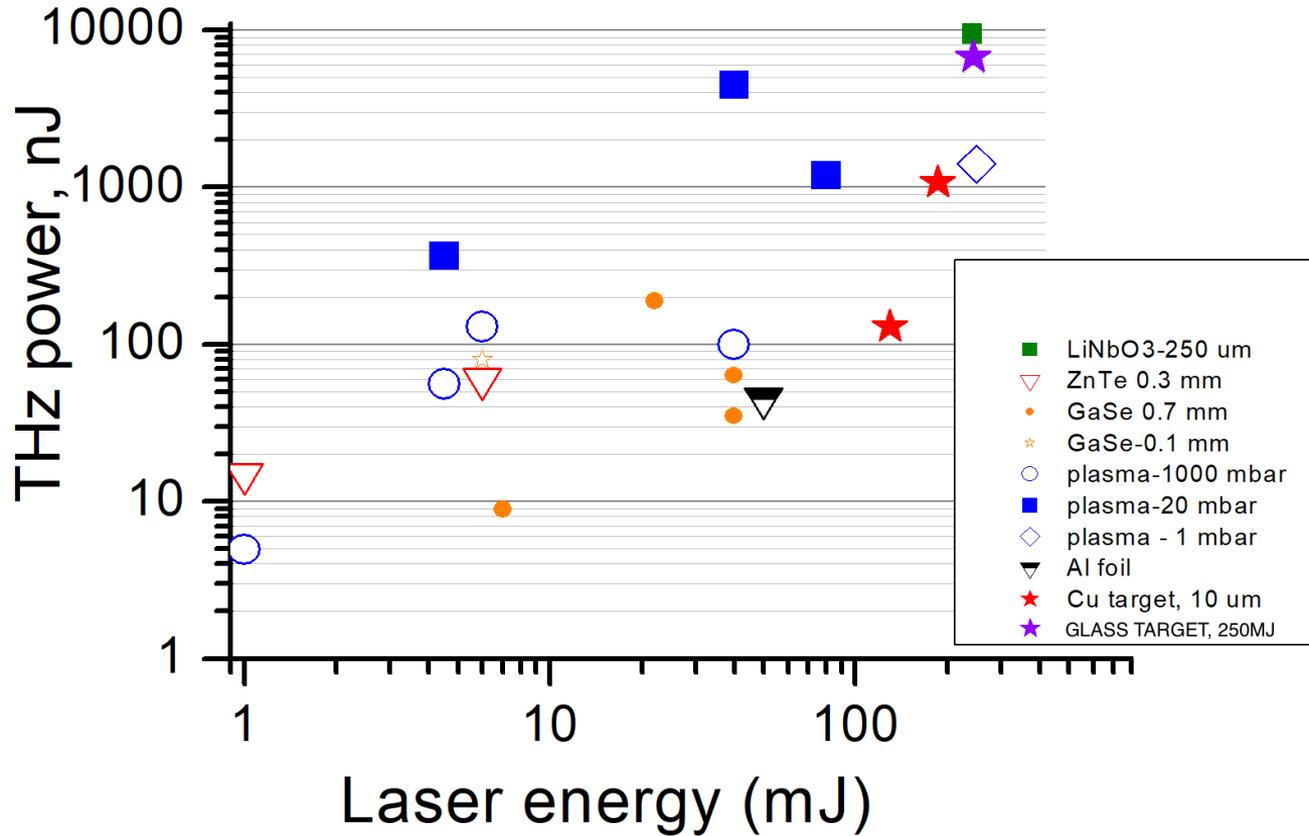




Real beam waist  $\square$  20-30  $\mu\text{m}$   $\rightarrow 10^{17}$   
Theoretical – 3  $\mu\text{m}$   $\rightarrow 10^{19}$  W/cm<sup>2</sup>

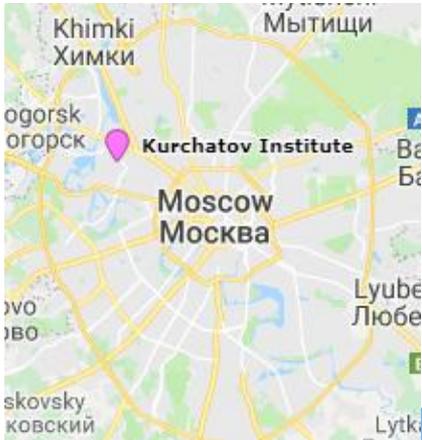


# Strong field THz-laser sources



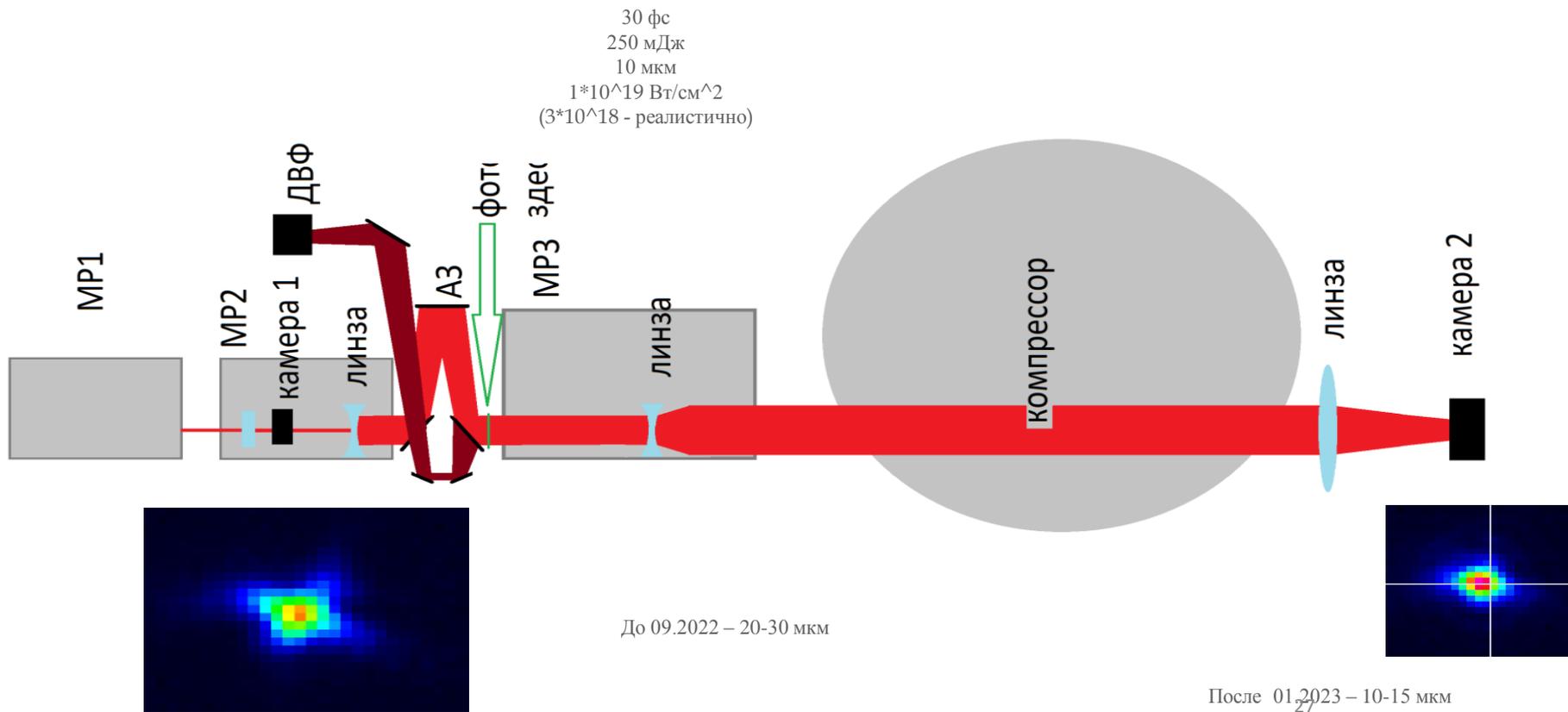


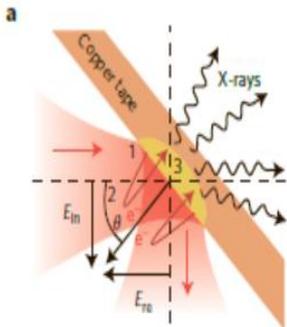
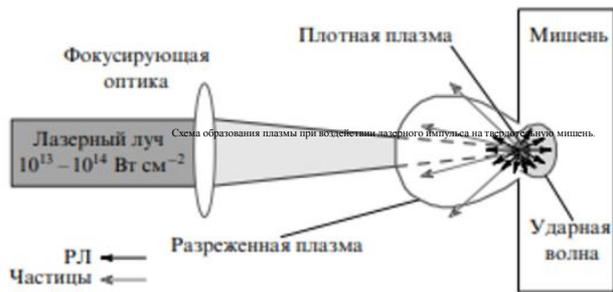
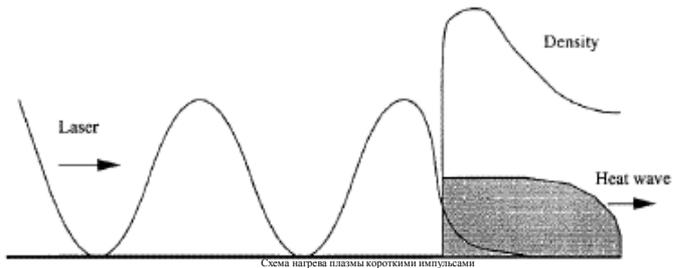
# NRC «Kurchatov Institute»



2  
“Pulsar-200 TW”  
6

# Адаптивное зеркало и перетяжка





Вид тормозного спектра определяется формулой

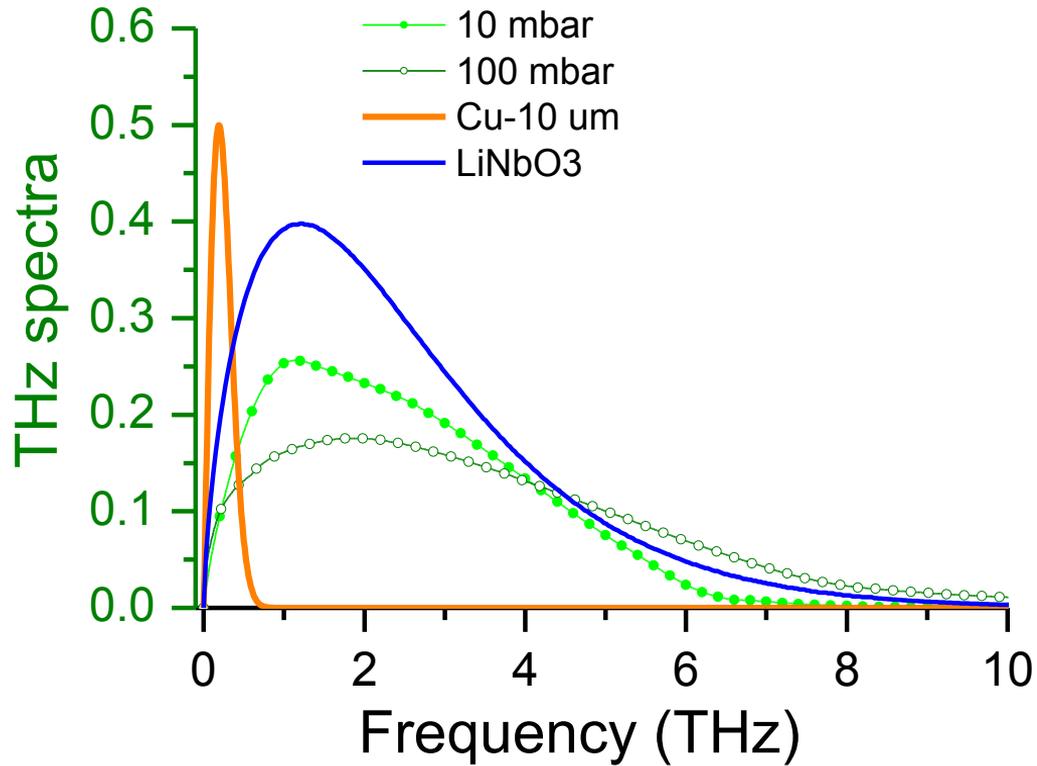
$$Y_{x-ray} \cong \frac{\beta}{\sqrt{T_{hot}}} \exp\left(-\frac{E}{T_{hot}}\right) \quad (2)$$

$$T_{hot} \cong (5.3 \pm 0.2)(I\lambda^2)^{1/3} \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения, выраженная в мкм,  $I$  – его интенсивность, выраженная в  $10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup>. Важно отметить, что формула предполагает, что плазма поглощает энергию резонансно. При интенсивностях лазерного излучения больших, чем  $10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup>, становятся заметными такие эффекты как вакуумный нагрев и аномальный скин-эффект, поэтому формула (3) принимает вид [1, 2]:

$$T_{hot} \cong B(I\lambda^2)^{2/3} \quad (4)$$

где коэффициент  $B$  приблизительно равен  $3 \div 5$ .





# Relevant papers on generation in metal :

\*\*\*\*\*  $I < 10^{14} \text{ W/cm}^2$  \*\*\*\*\*.

Akhmedzhanov, et.al. Radiophysics and Quantum Electronics, 57(11), 807-820. (2015)

Bezhanov, S.G. , et.al. Laser Physics Letters, 16(7), p.076002. (2019)

Petrov G.M, et.al. Physics of Plasmas. 2020; 27(1), pp 013109.

\*\*\*\*\*

A gap for  $10^{15} < I < 10^{17} \text{ W/cm}^2$

\*\*\*\*\*  $10^{17} < I < 10^{18} \text{ W/cm}^2$  \*\*\*\*\*

Li, C., et.al., (2014). Optics Express, 22(10), pp.11797-11803.

Liao, G.Q., et.al. Physics of Plasmas, 23(1), p.013104. (2016).

\*\*\*\*\*  $I > 10^{18} \text{ W/cm}^2$  \*\*\*\*\*

Hamster, H., et.al.. Physical review letters, 71(17), p.2725.(1993)

Jin Z, et. al. Physical Review E.;94(3),p.033206.(2016)

Liao G, et.al.. Proc. Nat. Academy of Sciences. Mar 5;116(10), p. (2019)

Gopal, A., et.al. Physical Review E, 100(5), 053203. (2019)

Sun WF, et.al. Opto-Electron Sci, 1, 220003 (2022).



# Conclusions

- The yield of secondary radiation from a femtosecond laser plasma (characteristic x-ray, harmonics of the visible range) is determined primarily by the energy density, and not by the intensity or duration of the pump pulse. An increase in the duration of femtosecond laser pulses in the range from 30 to 300 fs practically does not weaken the yield of secondary radiation in the intensity range from  $10^{15}$  to  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>. In metal THz, x-ray, SHG depends in similar way on laser pulse energy and duration at  $10^{15} < I < 10^{18}$  W/cm<sup>2</sup> range. The main intermediate process is hot electrons formation.
- Long fs pulses are more efficient for all secondary radiation generation. TPD instability makes a considerable contribution in hot electrons formation.
- The advantage THz generation in metal – is the absence of saturation above TW power level, the presence of bright x-ray pulses for time-resolved studies.

More details in:

M. M. Nazarov, et.al. Quant.Electron, (2022).

M.M. Nazarov, P.A.Shcheglov et all, JPCS, 1692, 012018 (2020).

М.В. Чащин, et. al. Оптика и спектроскопия, 2023 (2) – в печати.

We acknowledge Ministry of Science, Agreement № 075-15-2022-830, 27 may 2022