

Формирование сильных магнитных полей и замагниченной плазмы с помощью мощных лазерных импульсов

Ф. Корнеев*, ‡, \$

и многие другие...

‡ ФИАН им. Лебедева

07.11.2024, Нелинейные волны - 2024

Содержание

1 Введение

- Неоптические разрядные схемы
- Некоторые примеры нелинейной трансформации интенсивного света в магнитные поля

2 Оптически индуцированные разряды и токи, параметр ξ в лазер-плазменном взаимодействии.

- "Медленное" взаимодействие, $\xi \gg 1$.
- "Короткие" импульсы, "протяжённые" мишени

3 Мишени со скользящим падением

- Мишени со скользящим падением при $\xi \gtrsim 1$.
- Мишени со скользящим распространением лазерного импульса в фс режиме, $\xi \ll 1$.
- Капиллярные структурированные мишени, $\xi \ll 1$.

4 "Протяжённые" мишени в фс режиме взаимодействия, $\xi \ll 1$.

- Электромагнитные поля, возбуждаемые кольцевыми мишениями
- Контролируемое ТГц излучение из ондуляторных проволок

5 Заключительные замечания и выводы

Характерные величины магнитных полей

Magnetars

Radio pulsars

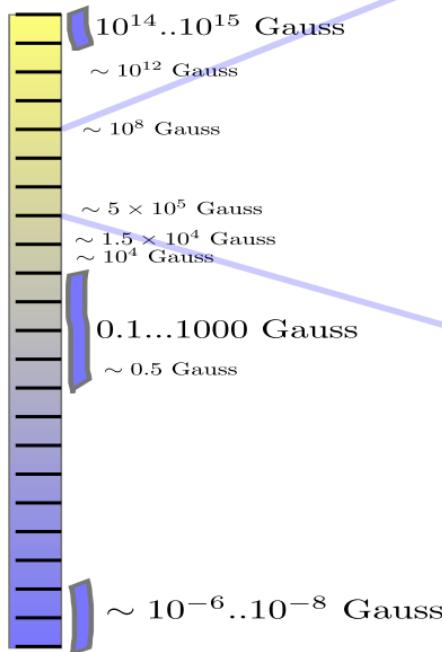
Strong effect
on atomic structure

Discharge coil
(nondestructively)
Magneto-Resonance
Imaging
Neodymium magnets

Solar magnetic fields

Earth magnetosphere

Interstellar fields



B-field generation
without implosion

S. Fujioke et al., Sci. Rep. 3, 1170 (2013)

B-field compression
with laser implosion

P. Y. Chang et al., PRL 107, 036006 (2011)

B-field compression
with a bomb



- VNIIEF in Sarov, Russia, 1996
- S. Takeyama et al., Low Temp. Phys. 159, 329 (2010)
- U. Wagner et al., Phys. Rev. E 70, 026401 (2004)
- M. Hohenberger et al., Phys. Plasmas 19, 056306 (2012).
- H. Yoneda et al., Phys. Rev. Lett. 109, 125004 (2012).

Record values for
laser-plasma magnetic fields

> 10 kT
with a new scheme

2017

1.5 kT

w/o implosion

2013

4 kT

w/ implosion

2011

2.8 kT

2003

2010

2012

2013

2014

2015

2016

2017

2018

2019

2020

2021

2022

2023

2024

2025

Зачем нужны сильные магнитные поля в лазерной лаборатории

Фундаментальные исследования

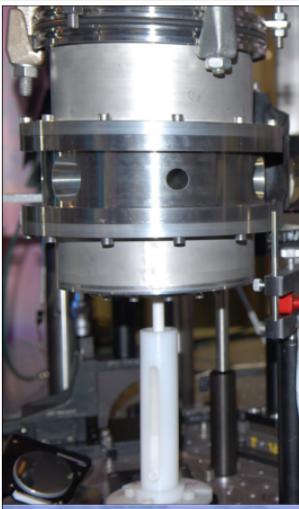
- Астрофизические явления
 - Солнце и звёзды
 - Космические лучи
 - Ударные волны
 - Астрофизические джеты
 - ...
- Вещество в сильных магнитных полях
 - Атомная физика
 - Твердое тело
 - Ядерная физика
 - ...

Приложения

- Управление и ускорение частиц и плазмы
 - Пучки частиц
 - Генерация вторичного излучения
 - Направленные потоки плазмы
- Удержание плазмы
- Инерциальный термоядерный синтез с магнитным полем
 - Подавление электронной теплопроводности
 - Коллимация частиц для Fast Ignition
 - Перспективные схемы
- ...

Неоптические разрядные схемы

Магнитные поля в катушках многоразового использования.



Фотография разрядной катушки.

$$B \sim 5..40 \text{ T}, \\ V \sim 1 \text{ cm}^3$$

Разрядные катушки способны создавать магнитное поле в вакууме в импульсном режиме до $\tau \sim 10^{-6}$ sec.

Предел прочности стали: до 1500 Мпа, соответствует магнитному полю $B \approx 40\text{T}$.

$$P = \frac{B^2}{8\pi}, \quad (1 \text{ дин}/\text{см}^2 = 0.1 \text{ Па.})$$

Инерциальный (импульсный) режим

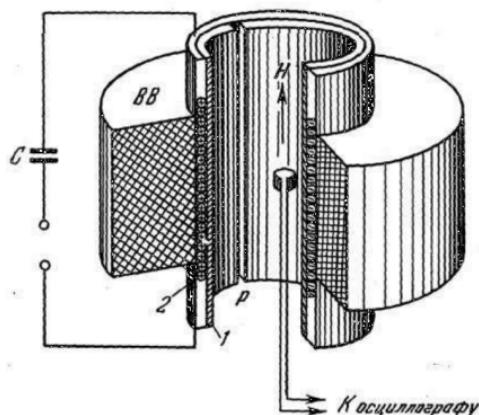
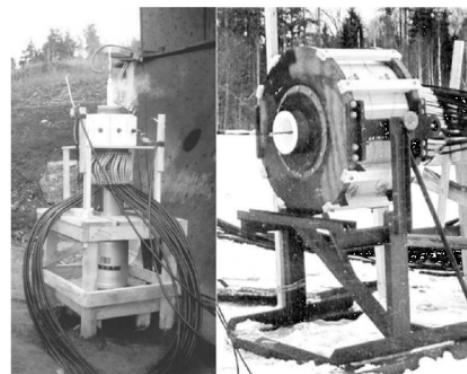


Рис. 1. Схема генератора МК-1.



Взрывомагнитные генераторы[†]: сжатие магнитного потока (цилиндрическая имплозия) : до 2500 – 3000 Т.

[†]A. D. Sakharov, Magnetoimplosive generators, Soviet Physics Uspekhi 9, 294 (1966);
 A. I. Bykov, M. I. Dolotenko, N. P. Kolokolchikov, V. D. Selemir, and O. M. Tatsenko, VNIIIEF achievements on ultra-high magnetic fields generation, Physica B: Condensed Matter 294–295, 574 (2001)

MIFEDS и импульсные одноразовые разрядные катушки

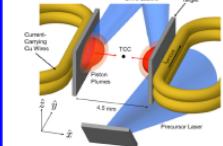
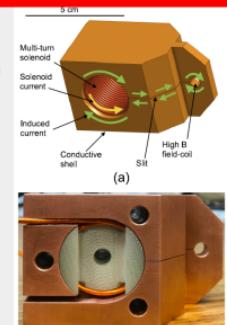
MIFEDS (magneto-inertial fusion electrical discharge system)

LLE Rochester

REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 89, 084703 (2018)

Inductively coupled 30 T magnetic field platform for magnetized high-energy-density plasma studies

G. Fiksel,^{1,a)} R. Backhus,² D. H. Barnak,^{3,4} P.-Y. Chang,⁵ J. R. Davies,^{3,6} D. Jacobs-Perkins,³ P. McNally,² R. B. Spielman,³ E. Vigés,² and R. Betti^{3,6}



PHYSICS OF PLASMAS 24, 122702 (2017)

High-Mach number, laser-driven magnetized collisionless shocks

D. B. Schaeffer,^{1,a),b)} W. Fox,² D. Haberberger,³ G. Fiksel,⁴ A. Bhattacharjee,^{1,2} D. H. Barnak,^{3,5} S. X. Hu,³ K. Germaschewski,⁶ and R. K. Follett³

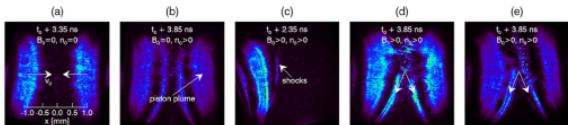


FIG. 2. Representative AFR images. (a) No applied magnetic field or ambient plasma. (b) Ambient plasma but no applied magnetic field. Panels (c)-(e) have both an ambient plasma and an applied magnetic field. (c) Single target. (d) Dual targets in a parallel magnetic topology. (e) Dual targets in an anti-parallel magnetic topology.

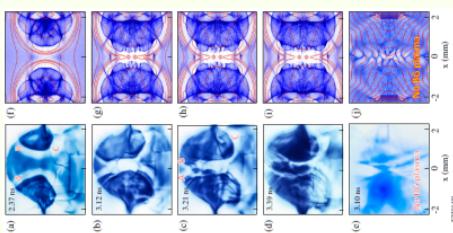
PRL 113, 105003 (2014)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
5 SEPTEMBER 2014

Magnetic Reconnection between Colliding Magnetized Laser-Produced Plasma Plumes

G. Fiksel,^{1,2,*} W. Fox,³ A. Bhattacharjee,³ D. H. Barnak,^{1,2} P.-Y. Chang,^{1,2} K. Germaschewski,⁴ S. X. Hu,¹ and P. M. Nilson^{1,2}



Нелинейное преобразование лазерного излучения в импульс магнитного поля

Уровень 1 кТ с помощью "конвенциальных"
(нелазерных) схем можно получить, по
видимому, лишь при взрыве.



Нелинейное преобразование лазерного
излучения в импульсные (квазистационарные)
магнитные поля

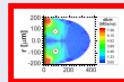
Большая плотность энергии, большая мощность
лазерного воздействия

Нелинейная трансформация света в магнитные поля

Некоторые примеры нелинейного преобразования (оптическая генерация магнитных полей)

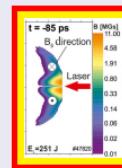
В лазерном излучении, например, при $I \sim 10^{18} \text{ Вт}/\text{см}^2$, $\lambda \sim 1 \mu\text{м}$, осциллирующее магнитное поле порядка 10 кТ. Задача в его эффективном преобразовании во времени и пространстве.

Гидродинамика



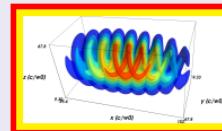
при разлёте лазерной плазмы

Коллективные
кинетические эффекты
(быстрые электроны)



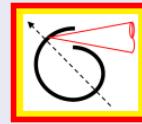
лазерное ускорение
электронов

Неинтегрируемость,
стохастический нагрев,
плазменные волны

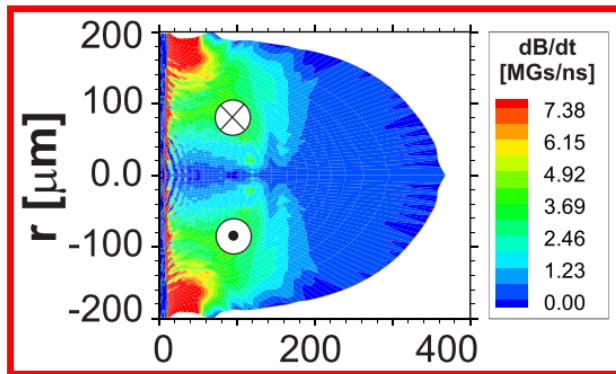


Передача момента импульса обратный плазме, эффект Фарадея ...

Лазерно-индукционные разряды



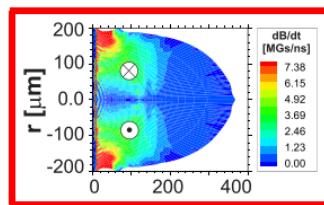
"Затравочное" магнитное поле во Вселенной и в лазерно-плазменном взаимодействии.



Проблема возникновения магнитных полей при эволюции Вселенной [†] – откуда во Вселенной магнитные поля?

[†]Biermann, L. and Schlüter, A. (1950) 'Über den Ursprung der Magnetfelder auf Sternen und im interstellaren Raum', Zeitschrift für Naturforschung - Section A Journal of Physical Sciences, 5(2), pp. 65–71

Скрещенные градиенты или "батарея Бирмана"



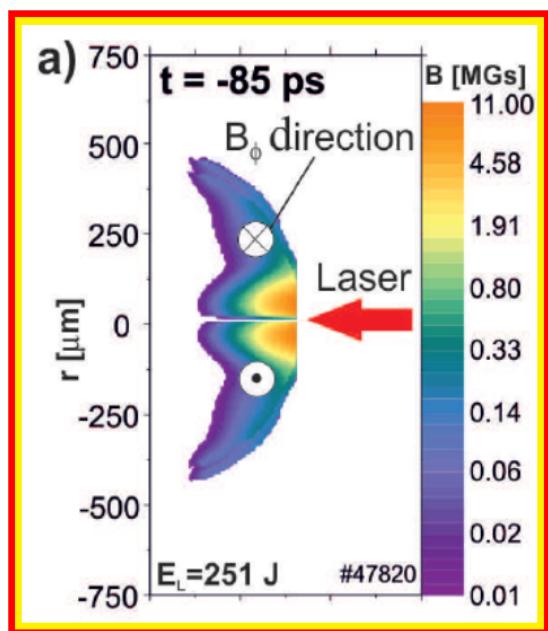
Вспомним уравнение магнитной гидродинамики с безмассовыми электронами и без вязкости[§],

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \text{rot}[\vec{v} \times \vec{B}] - \text{rot} \left[\frac{\vec{J}}{en_e} \times \vec{B} \right] - \frac{c}{en} [\nabla n \times \nabla T] - \frac{c}{e} \text{rot} \frac{\vec{R}_T}{n_e} - c \text{ rot} \left(\frac{\vec{J}_{||}}{\sigma_{||}} + \frac{\vec{J}_{\perp}}{\sigma_{\perp}} \right),$$

где \vec{R}_T – термосила, σ – проводимость.

[§]Braginskii, S. I. (1965) 'Transport processes in a plasma'

"Кинетическая магнетизация" – токи лазерно-ускоренных электронов



Токи возникают при столкновительном или бесстолкновительном поглощении лазерной энергии в плазме, обычно при наличии профиля плотности.

Гидродинамический или кинетический механизм?

Ускоренные "наружу" электроны и скрещенные градиенты возбуждают поле одинаковой топологии и направления, эти механизмы сложно различить.
Эксперимент на установке PALS (Чехия) ¶:
Плоская массивная мишень,

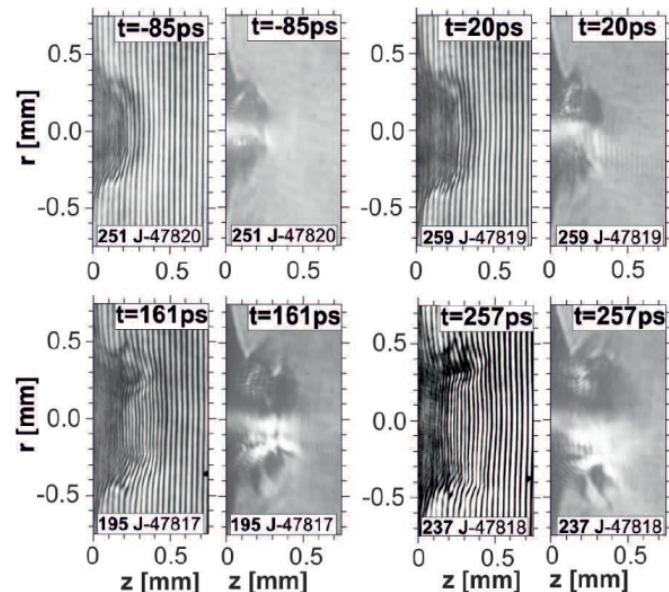
Параметры взаимодействия:

$I \sim 1.5 \times 10^{16} \text{W/cm}^2$ пятно фокусировки $\sim 50 \mu\text{m}$

$\lambda \approx 1 \mu\text{m}$

длительность $\approx 250 \text{ps}$ (HWFM)

основная диагностика: интерферометрия и полярометрия

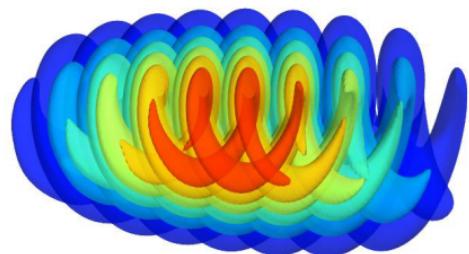


¶Pisarczyk, T. et al. Kinetic magnetization by fast electrons in laser-produced plasmas at sub-relativistic intensities. Physics of Plasmas 24, 102711 (2017)

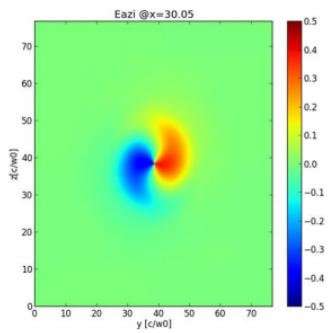
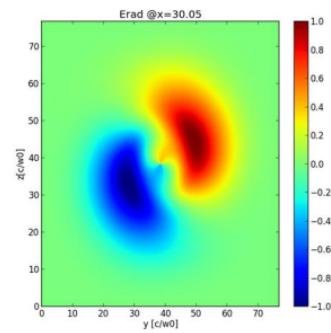
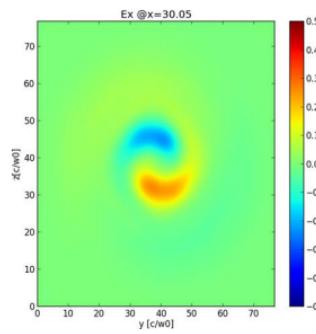
Нелинейная трансформация света в магнитные поля

Передача углового орбитального момента лазерного импульса плазме

“Радиальная” поляризация: $\vec{E}(r, \theta, t, z) = E_0 \times g(t) \times f(r) \times \cos(l\theta - \omega_0 t) \vec{e}_r$



Пример импульса с угловым орбитальным моментом.

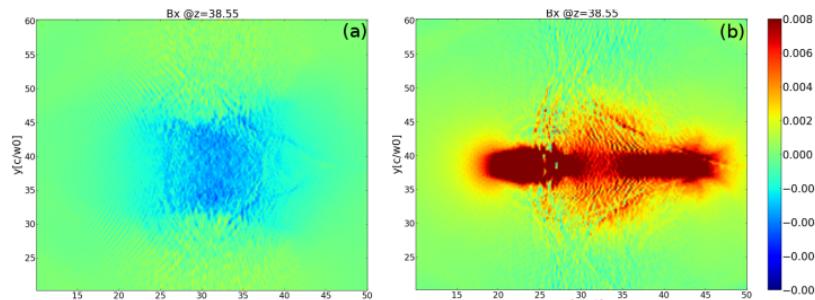


Nuter, R. et.al., Plasma solenoid driven by a laser beam carrying an orbital angular momentum. Phys. Rev. E 98, 033211 (2018)

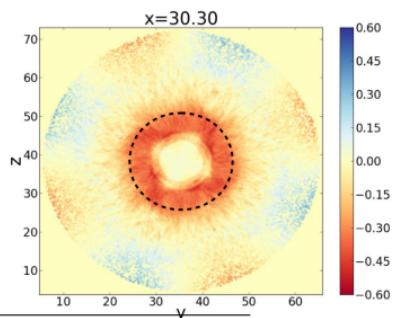
Нелинейная трансформация света в магнитные поля

Передача углового орбитального момента лазерного импульса плазме^{††}

Численное моделирование показывает эффективную генерацию магнитного поля, но есть вопросы...**



Центральное сечение $B_{||}$ после взаимодействия с лазерным импульсом с "радиальной поляризацией", слева $l = -1, \tau = 6T$, справа $l = 1, \tau = 12T$.



Распределение момента импульса электронов после взаимодействия.
Пунктир - максимальная амплитуда.

** см. семинары 6А.

^{††}Nuter, R., et.al., Plasma solenoid driven by a laser beam carrying an orbital angular momentum. Phys. Rev. E 98,

Плазменные волны с угловым орбитальным моментом^{††}

Существуют "закрученные" плазменные волны (в базисе Лагерр-Гаусовых функций),

$$\begin{aligned}\Phi(z, r, \theta, t) &= \sum_{p,l} \phi_{p,l} F_{p,l}(X) \exp(-i\omega t + ikz + il\theta + i\varphi_{p,l} + iqX), \\ \delta f_e(z, r, \theta, \mathbf{v}, t) &= \sum_{p,l} f_{p,l}(\mathbf{v}) F_{p,l}(X) \exp(-i\omega t + ikz + il\theta + i\varphi_{p,l} + iqX).\end{aligned}$$

являющиеся решениями уравнения Пуассона

$$\Delta \Phi = \frac{e}{\epsilon_0} \delta n_e$$

и Власова

$$-i(\omega - kv_z) \delta f_e + \mathbf{v}_\perp \cdot \nabla_\perp \delta f_e = -iekv_z \Phi \partial_\varepsilon f_{e0} - e\mathbf{v}_\perp \cdot \nabla_\perp \Phi \partial_\varepsilon f_{e0}.$$

с дисперсионным уравнением и затуханием Ландау, соответственно

$$\omega^2 = \omega_{pe}^2 \left(1 + 3k^2 \lambda_{De}^2 + \frac{2p + |l| + 1}{k^2 w_b^2} \right),$$

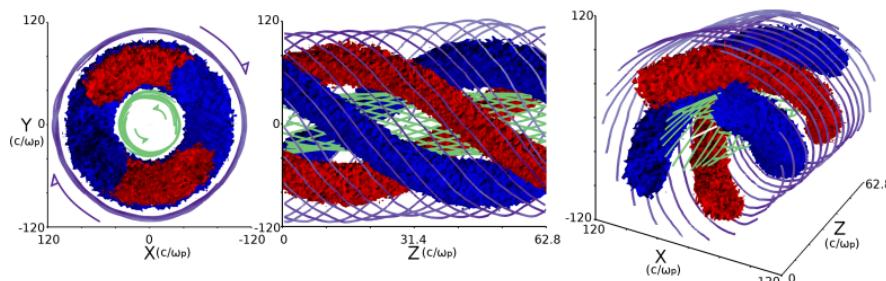
$$\frac{\text{Im } \omega}{\omega} = -\sqrt{\frac{\pi}{8}} \frac{1}{k^3 \lambda_{De}^3} \exp\left(-\frac{\omega^2}{2k^2 v_{th}^2}\right) R\left(2 \frac{\sqrt{p + (|l| + 1)/2}}{k^2 \lambda_{De} w_b}\right).$$

^{††}Blackman et.al.,(2019), PRE, 100(1), p. 013204; Blackman et.al., (2019) Journal of Russian Laser Research, 40(5), p. 419

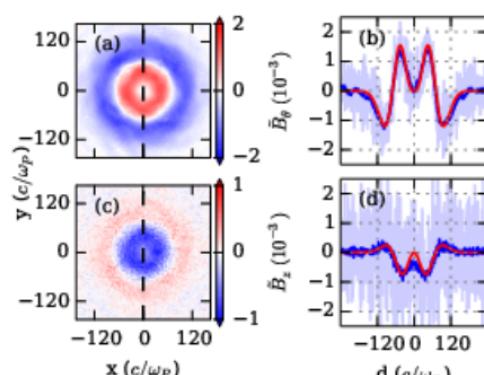
Нелинейная трансформация света в магнитные поля

Плазменные волны с угловым орбитальным моментом*

Во втором порядке в таких волнах присутствует стационарное магнитное поле



Профиль плотности для $p = 0, l = 2$.



слева вверху: азимутальное магнитное поле B_θ ; слева внизу: аксиальное магнитное поле B_z .

справа: поперечные центральные сечения магнитных полей.

*Blackman et al. (2019) PRF 100(1) p. 013204; Blackman et al. (2019) Journal of Russian Laser Research 40(5) p. 520

Нелинейная трансформация света в магнитные поля

Плазменные волны с угловым орбитальным моментом[†]

Нелинейное затухание Ландау приводит к передаче момента импульса от волны электронам, что соответствует азимутальному току и аксиальному магнитному полю.

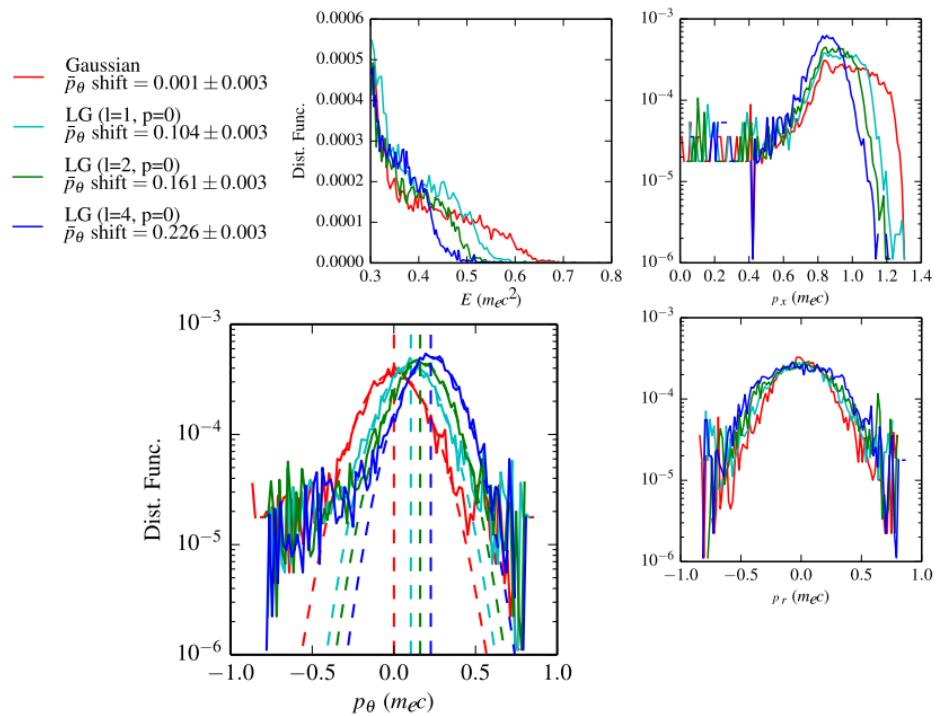


Рис: Параметры ускоренных частиц

Стационарное распределение соответствует θ -пинчу.

[†]Blackman et.al.,(2019), PRE, 100(1), p. 013204; Blackman et.al., (2019) Journal of Russian Laser Research, 40(5), p.

Контролируемые лазерно-индуцированные разряды: генерация магнитных полей и длинноволнового излучения.

Перераспределение заряда (токи) под действием интенсивного лазерного излучения

Интенсивные импульсы ($\gtrsim 10^{15} \dots 10^{16} \text{ W/cm}^2$) существенно меняют пространственно-энергетическое распределение зарядов (электронов)

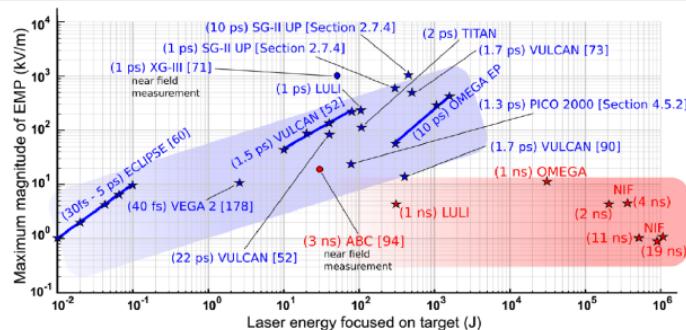
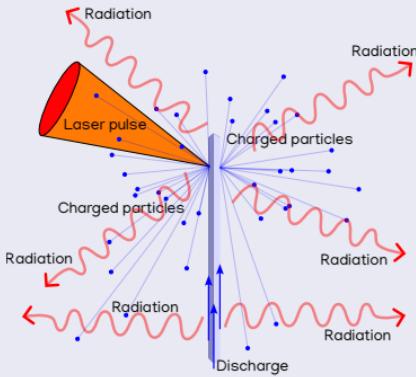


Figure 75. Compilation of the measured amplitudes of EMP signals at different laser installations. Field values present in this picture were taken or estimated by Refs. [52, 60, 71, 73, 90, 94, 178], from data shown in this paper or supplied by private communications or reports. Blue and red zones outline the data obtained with ps and ns laser pulses, respectively. All data were normalized to the reference distance of 1 m from the source. Values for the ABC^[94] and the XG-III^[71] experiments were obtained at distances 85 mm and 400 mm from the target, respectively. The normalization might produce a field overestimation of a few times.

Экспериментальные данные* по амплитуде электромагнитного импульса (EMP).

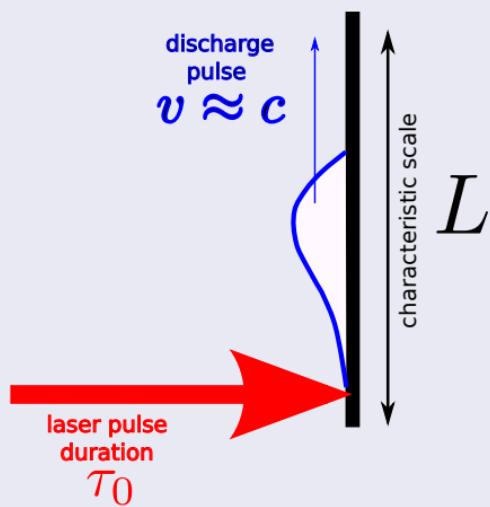
*F. Consoli et al., Laser Produced Electromagnetic Pulses: Generation, Detection and Mitigation, High Power Laser Science and Engineering 8, (2020)

Длина и длительность разрядного импульса тока

Важнейшие определяющие параметры

- Длительность лазерного импульса
- Размер пятна фокусировки
- Импеданс мишени (индуктивность прежде всего для токов)
- Распространение разряда: дисперсия, поглощение, нагрев и модификация вещества мишени ...

Для коротких сильно сфокусированных импульсов и протяжённых мишеней перераспределение заряда имеет "переходную" природу.



Что означает протяжённые мишени и короткие импульсы?

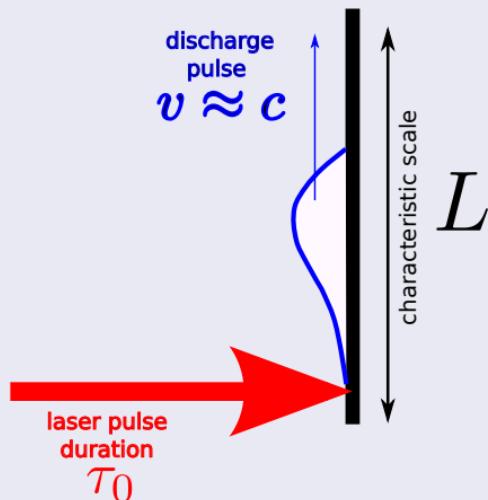
Что означает протяжённые мишени и короткие импульсы?

В общем случае

Соотношение $\xi = c\tau_0/L$ определяет, насколько переходные процессы важны
(c – скорость света, τ_0 длительность импульса, L характерная длина мишени.)

$\xi \gg 1$ – "компактная" мишень, "длинный" импульс, квазистационарный режим перераспределения заряда;

$\xi \ll 1$ – "протяжённая" мишень, "короткий" импульс, режим распространения.



Замечание по поводу индуктивности.

Индуктивность определяется энергией магнитного поля для постоянного тока

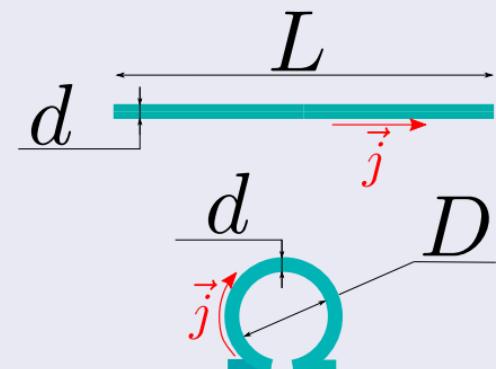
Прямой проводник $d = 10 \mu\text{m}$, $L = 100\pi \mu\text{m}$

$$\rightarrow \mathcal{L} \approx 0.25 \text{ nH}$$

сравнимо с

одновитковая катушка $D = 100 \mu\text{m}$, такая же проволока
 $d = 10 \mu\text{m}$

$$\rightarrow \mathcal{L} \approx 1 \text{ nH} \Leftarrow \text{взаимная индукция}$$



В электромагнитных процессах в присутствии плазмы, при наличии излучения и т.д. использование понятия индуктивности затруднено.

$\xi \gg 1$

"Длинные" лазерные импульсы = "компактные" мишени

Взаимодействие в случае $\xi \gg 1$.

$\xi \gg 1$

Стандартная мишень типа “конденсатор-катушка”: нс режим

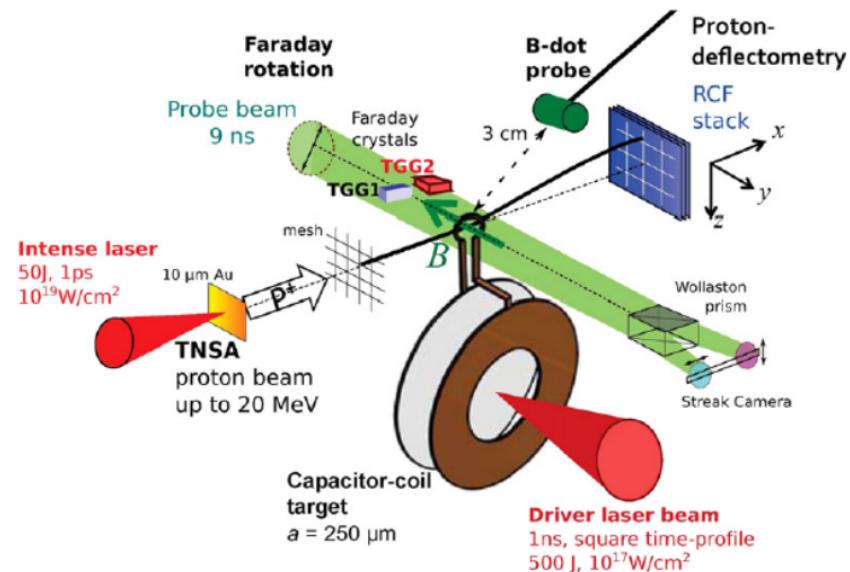
Стандартная мишень типа “конденсатор-катушка” *

мм размеры и нс лазерные импульсы

В этом случае: $\xi \gg 1$

Лазерный импульс облучает одну пластину “конденсатора”

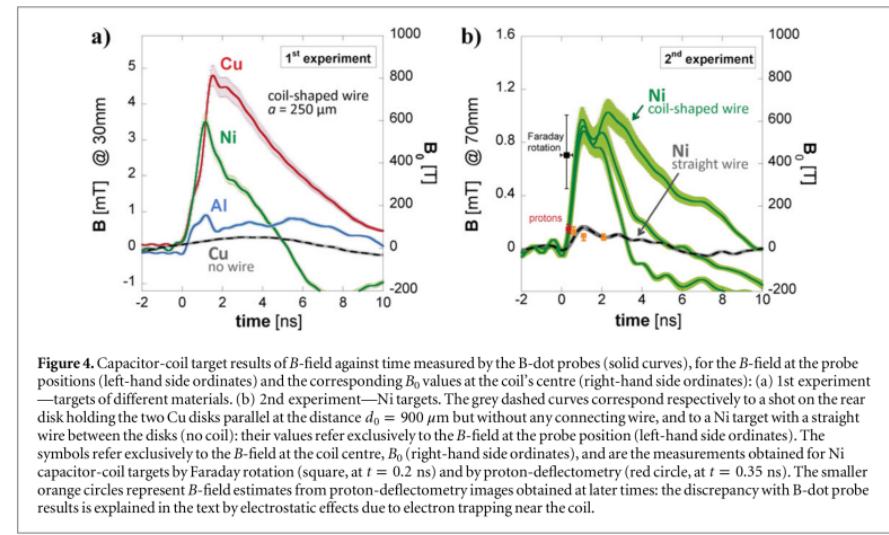
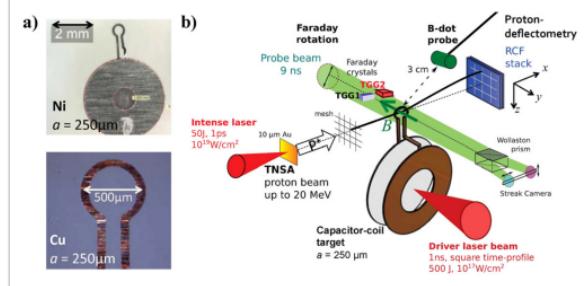
“Конденсатор” разряжается через проволочный виток



*Korobkin, V. V. and Motylev, S. L. (1979), Soviet Technical Physics Letters (in Russian), 5, p.474; Daido et.al., PRL, 56(8), pp. 846 (1986); Fujioka et.al., Scientific Reports, 3(1), p. 1170 (2013); Santos et.al., New Journal of Physics. 17(8), p. 083051 (2015)

$\xi \gg 1$

Стандартная мишень типа “конденсатор-катушка”: – аккуратные измерения и особенности диагностики*



Длительность порядка длительности лазерного импульса; сложность измерения...

*Santos, J. J. et al. Laser-driven platform for generation and characterization of strong quasi-static magnetic fields. New Journal of Physics 17, 083051 (2015); Santos, J. J. et al. Laser-driven strong magnetostatic fields with applications to charged beam transport and magnetized high energy-density physics. Physics of Plasmas 25, 1–11 (2018)

$\xi \gg 1$

Стандартная мишень типа “конденсатор-катушка”: – аккуратные измерения и особенности диагностики[†]

Протонная радиография: один из примеров

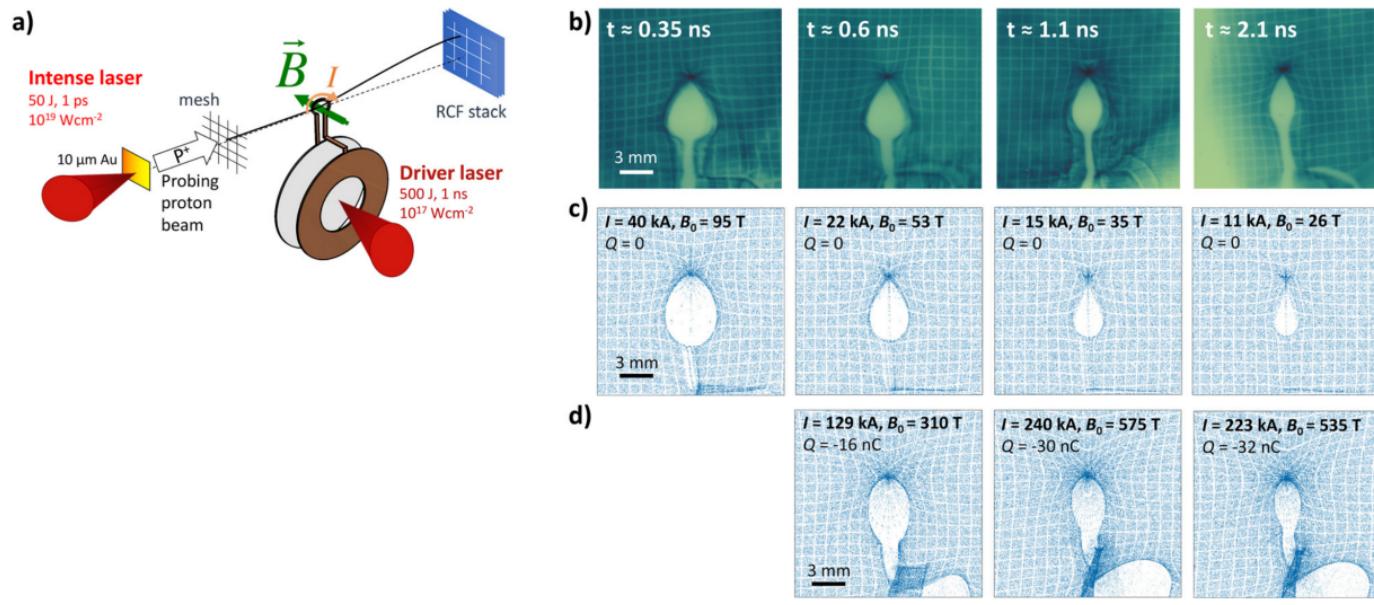


FIG. 2. (a) Sketch of the proton-deflectometry setup (not to scale). (b) Zoomed RCF data for 13 ± 1 MeV protons from shots with varying delay between the lasers, $\Delta t = 0.25, 0.5, 1, \text{ and } 2 \text{ ns}$ (from left to right). The labels give the probing times, accounting for the protons' time-of-flight between the foil and the coil. (c) Corresponding synthetic proton-deflectograms, obtained from numerical simulations of the proton trajectories through 3D B-field maps matching the experimental data (labelled by the discharge current I and the corresponding strength of the B-field at the coil center B_0). (d) Idem setting the B-field strength to the average value inferred from the R-dot data at the corresponding times [orange diamonds in Fig. 1(b)] and adding a charge of magnetized plasma electrons Q .

Пример использования магнитных полей для управления потоками частиц



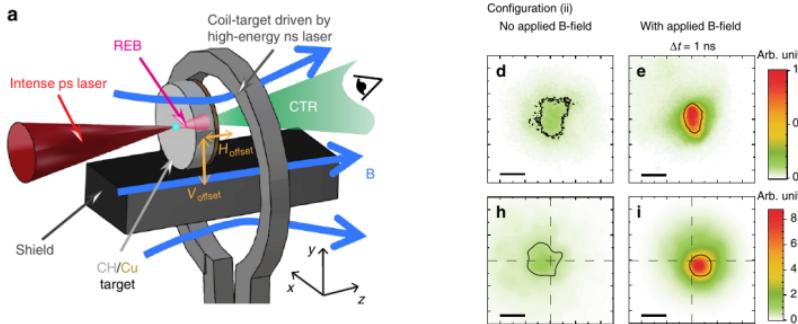
ARTICLE

DOI: 10.1038/s41467-017-02641-7

OPEN

Guiding of relativistic electron beams in dense matter by laser-driven magnetostatic fields

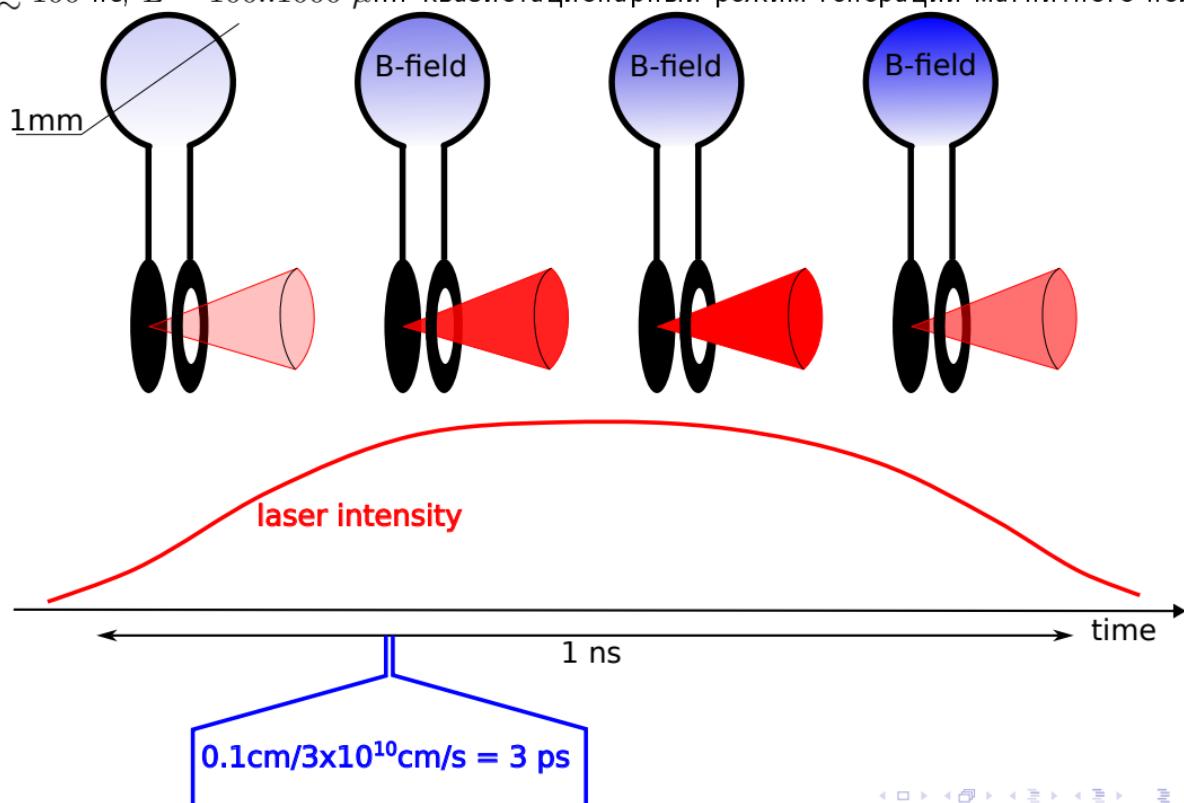
M. Bailly-Grandvaux¹, J.J. Santos¹, C. Bellei¹, P. Forestier-Colleoni¹, S. Fujioka², L. Giuffrida¹, J.J. Honrubia³, D. Batani¹, R. Bouillaud¹, M. Chevrot⁴, J.E. Cross⁵, R. Crowston⁶, S. Dorard⁴, J.-L. Dubois¹, M. Ehret^{1,7}, G. Gregori⁵, S. Hulin¹, S. Kojima², E. Loyez⁴, J.-R. Marquès⁴, A. Morace², Ph. Nicolaï¹, M. Roth⁷, S. Sakata², G. Schaumann⁷, F. Serres⁴, J. Servel¹, V.T. Tikhonchuk¹, N. Woolsey⁶ & Z. Zhang²



$\xi \gg 1$

“Конденсатор-катушечные мишени” с “длинными” импульсами

Параметры: $\tau \gtrsim 100$ пс, $L \sim 100..1000$ μm : квазистационарный режим генерации магнитного поля



$$\xi \gtrsim 300 \gg 1.$$

Замечание о режиме взаимодействия

Чем больше мощность (короче лазерный импульс), тем больше магнитное поле

Во многих приложениях гораздо дешевле и практичнее использовать короткие импульсы (напр. задача ускорения частиц)

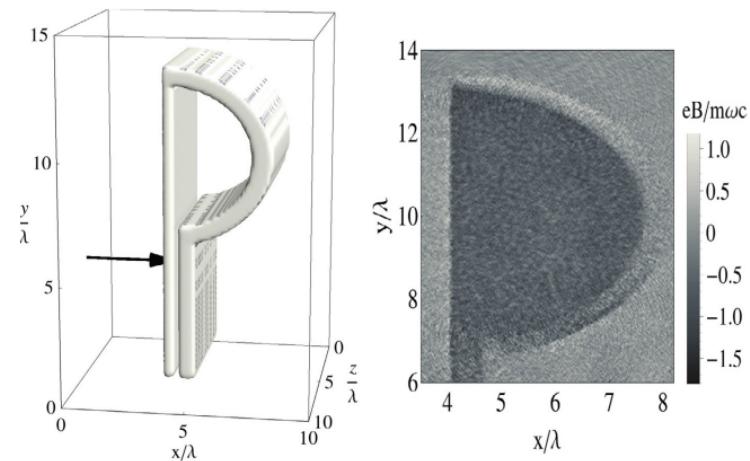
Но при уменьшении длительности $\xi \lesssim 1$!

$\xi \gg 1$

“Конденсатор-катушечные мишени” могут быть просто уменьшены

Пример взаимодействия с малой мишенью для получения магнитного поля большой амплитуды [†]

$\tau \sim 100 \text{ fs}$, $L \sim 10 \mu\text{m}$:
при этом $\xi \gtrsim 1$.



Короткие импульсы, высокая интенсивность импульсов, малый объём – 10 кТ.

[†]Brantov et.al. (2019) Laser Physics Letters, 16(6), p. 066006

"Короткие" импульсы, "протяжённые" мишени

Уменьшение длительности лазерного импульса → увеличение интенсивности...

Ожидается, что:

более высокая интенсивность → больше горячих (быстрых, нетепловых)
электронов →
сильнее разрядные процессы (токи) → сильнее магнитные поля.

Как при условии $\xi \lesssim 1$ создать область квазиоднородного квазистационарного
магнитного поля?

Можно ли эффективно увеличить длительность разрядного импульса?

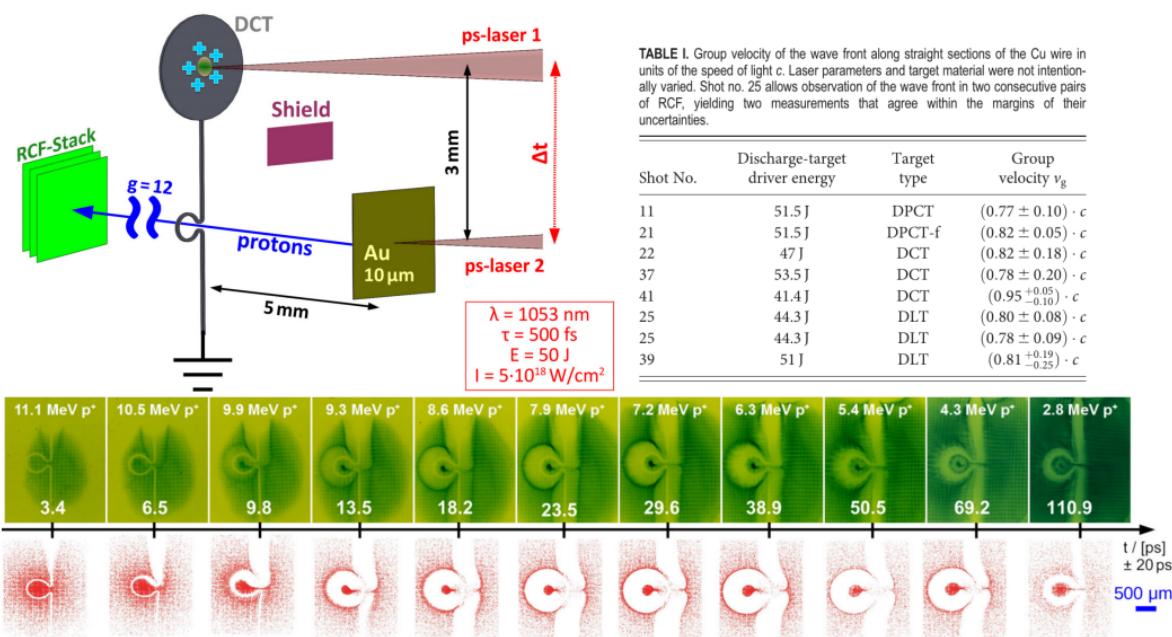
"Короткие" импульсы, "протяжённые" мишени

"Короткие" импульсы, "протяжённые" мишени

Разрядный электромагнитный импульс распространяется по проводнику[§]:

Эксперимент: переходные процессы, но разрядный импульс заметно длиннее лазерного импульса,

$$v_{\text{propagation}} < c.$$



[§]M. Ehret et al., Guided Electromagnetic Discharge Pulses Driven by Short Intense Laser Pulses: Characterization and Formation of Strong Magnetic Fields and Magnetized Plasmas, 07.11.2024, Нелинейные волны - 2024

Что определяет скорость распространения импульса?

Напишем уравнения Максвелла для бесконечного плазменного цилиндра

$$\begin{cases} (\partial_z E_r(r, z, t) - \partial_r E_z(r, z, t)) \vec{e}_\theta = -\frac{1}{c} \partial_t \vec{B}(r, z, t), \\ \frac{1}{r} \partial_r(r B_\theta(r, z, t)) \vec{e}_z - \partial_z B_\theta(r, z, t) \vec{e}_r = \frac{1}{c} \partial_t \vec{D}(r, z, t), \\ \frac{1}{r} \partial_r(r D_r(r, z, t)) + \partial_z D_z(r, z, t) = 0. \end{cases}$$

с тензором диэлектрической проницаемости для плазмы

$$\varepsilon_{rr}(\omega, k) = 1 - \frac{\omega_e^2}{\omega^2} F\left(\frac{\omega}{\sqrt{2}kv_T}\right), \quad \varepsilon_{zz}(\omega, k) = 1 + \frac{\omega_e^2}{(kv_T)^2} \left[1 + F\left(\frac{\omega}{\sqrt{2}kv_T}\right)\right],$$

где $F(x) = \frac{x}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-z^2}}{z-x-i0} dz$, $\omega_e = \sqrt{4\pi n_e e^2 / m_e}$ – электронная плазменная частота, $v_T = \sqrt{T_e/m_e}$.

Дисперсионное соотношение[§]

$$\frac{K_0(\alpha ka)}{K_1(\alpha ka)} = -\frac{\left(\frac{1}{\varepsilon_{rr}(\omega, k)} - \frac{\omega^2}{k^2 c^2}\right)}{\alpha \beta} \frac{I_0(\beta ka)}{I_1(\beta ka)}, \quad (1)$$

где $\alpha \equiv \pm \sqrt{1 - \frac{\omega^2}{(kc)^2}}$, $\beta \equiv \pm \sqrt{\frac{\varepsilon_{zz}(\omega, k)}{\varepsilon_{rr}(\omega, k)} - \frac{\omega^2}{(kc)^2}}$, $I_i(x)$ и $K_i(x)$ – модифицированные функции Бесселя i -го порядка первого и второго типа соответственно.

[§]M. Ehret et al., Guided Electromagnetic Discharge Pulses Driven by Short Intense Laser Pulses: Characterization and Modeling, Physics of Plasmas 30, 013105 (2023).

Бесстолкновительное поглощение, зависимость от нагрева

Анализ дисперсионного соотношения на качественном уровне ⇒
импульс распространяется в приповерхностной прогретой плазме[§]

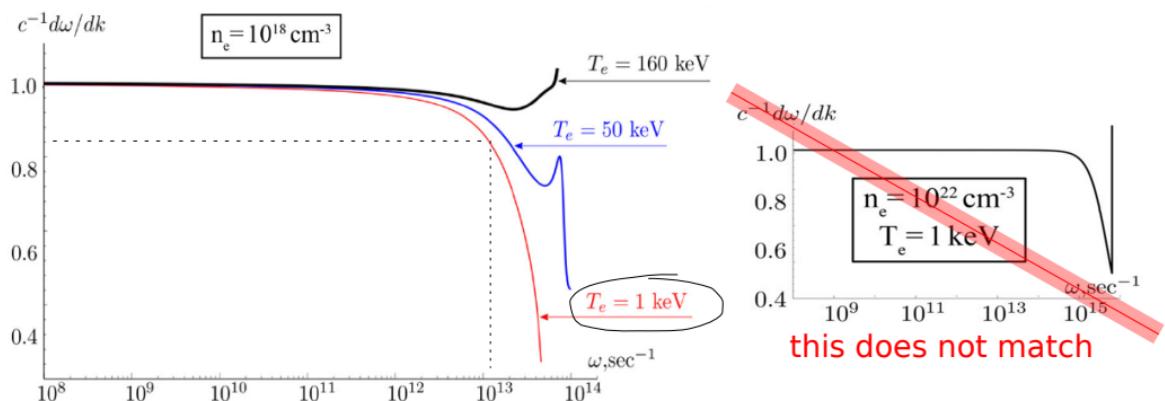


FIG. 9. (a) Frequency dispersion of the discharge pulse group velocity, calculated numerically from the dispersion relation equation (14), for $n_e = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and $T_e = 1 \text{ keV}$ (red, lower curve), $T_e = 50 \text{ keV}$ (blue, middle curve), and $T_e = 160 \text{ keV}$ (black, upper curve). (b) The numerical solution for the group velocity for $n_e = 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ and $T_e = 1 \text{ keV}$. (c) The phase velocity for the lower branch of the dispersion relation equation (14) for $n_e = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and $T_e = 160 \text{ keV}$.

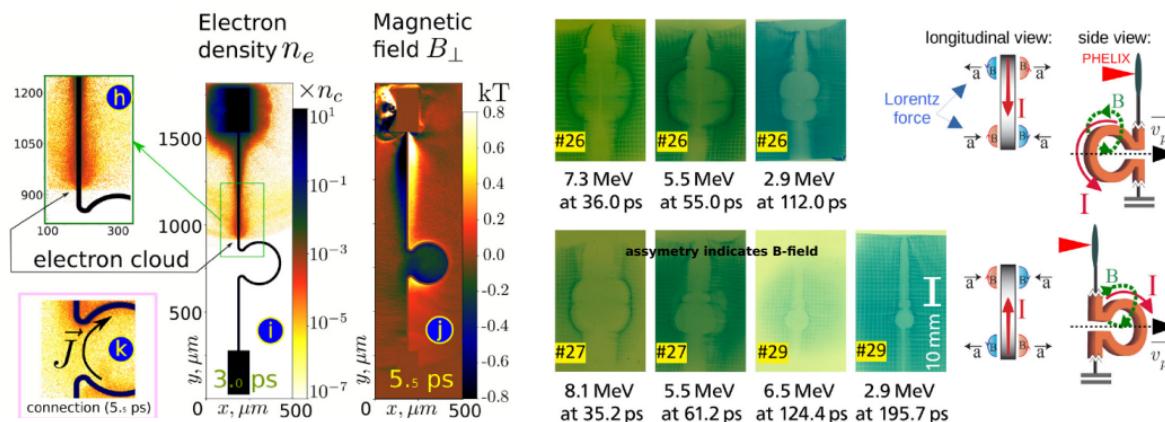
[§]M. Ehret et al., Guided Electromagnetic Discharge Pulses Driven by Short Intense Laser Pulses: Characterization and Modeling, *Physics of Plasmas* 30, 013105 (2023).

"Короткие" импульсы, "протяжённые" мишени

Магнитное поле "вмораживается" в приповерхностную нагретую плазму[§]

В результате:

- Разрядный импульс гораздо длиннее, чем лазерное воздействие.
- Бесстолкновительное поглощение существенно для режима распространения!
- В катушке контур тока замыкается в приповерхностной нагретой плазме → формируется "магнитное поле кольца".



[§]M. Ehret et al., Guided Electromagnetic Discharge Pulses Driven by Short Intense Laser Pulses: Characterization and Modeling, Physics of Plasmas 30, 013105 (2023).

"Короткие" импульсы, "протяжённые" мишени

Попробуем упростить мишень для наиболее эффективной генерации поля

Сконцентрируем весь разряд в области витка

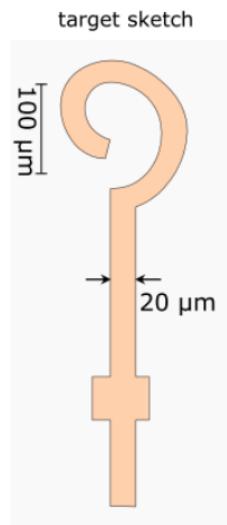
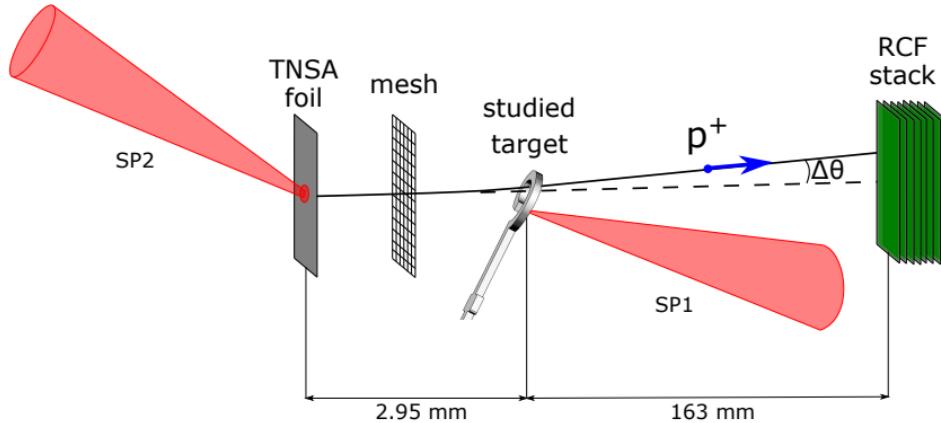


Оставим только сам виток, но нужно создать направленный ток.

"Короткие" импульсы, "протяжённые" мишени

"Катушечная" мишень с $\varnothing \sim 100 \mu\text{m}$ и 0.5 пс лазерным импульсом:

"протяжённая" мишень $\xi \sim 0.5$



Эксперимент был сделан на установке PHELIX (GSI, Darmstadt)

$I \approx 2 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$, $\tau \approx 0.5 \text{ ps}$,

Энергия $\approx 50 \text{ J}$

Диагностика: протонная радиография

Il. Kochetkov et al., Neural Network Analysis of Quasistationary Magnetic Fields in Microcoils Driven by Short Laser Pulses, Sci Rep 12, 13734 (2022)

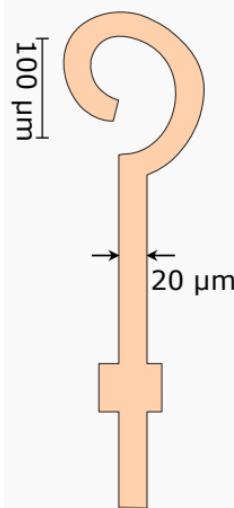
"Короткие" импульсы, "протяжённые" мишени

"Катушечная" мишень \ddagger с $\varnothing \sim 100 \mu\text{m}$ и 0.5 пс лазерным импульсом:

"протяжённая" мишень $\xi \sim 0.5$

Две ориентации мишени для идентификации магнитного поля

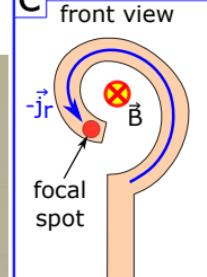
a target sketch



b target image



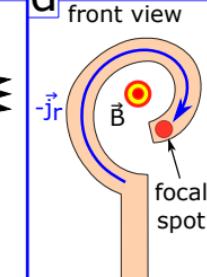
c Shot 18 front view



side view

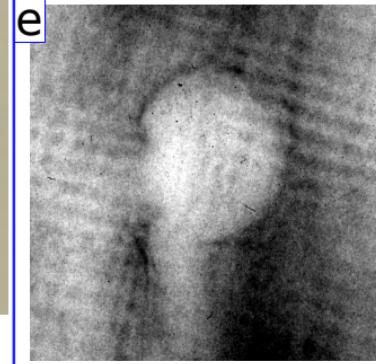


d Shot 22 front view

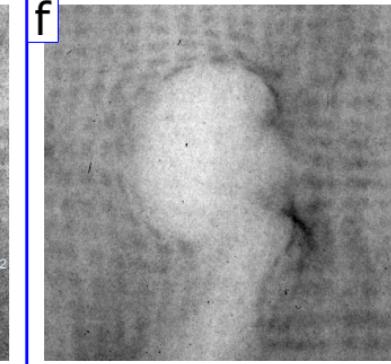


side view

e



f



\ddagger Iu. Kochetkov et al., Neural Network Analysis of Quasistationary Magnetic Fields in Microcoils Driven by Short Laser Pulses, Sci Rep 12, 13724 (2022)

"Короткие" импульсы, "протяжённые" мишени

"Катушечная" мишень с $\varnothing \sim 100 \mu\text{m}$ и 0.5 пс лазерным импульсом:

"протяжённая" мишень $\xi \sim 0.5$

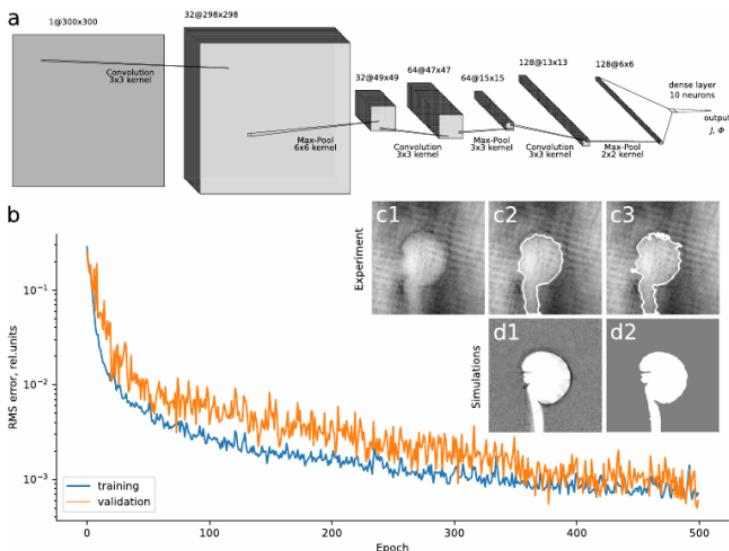
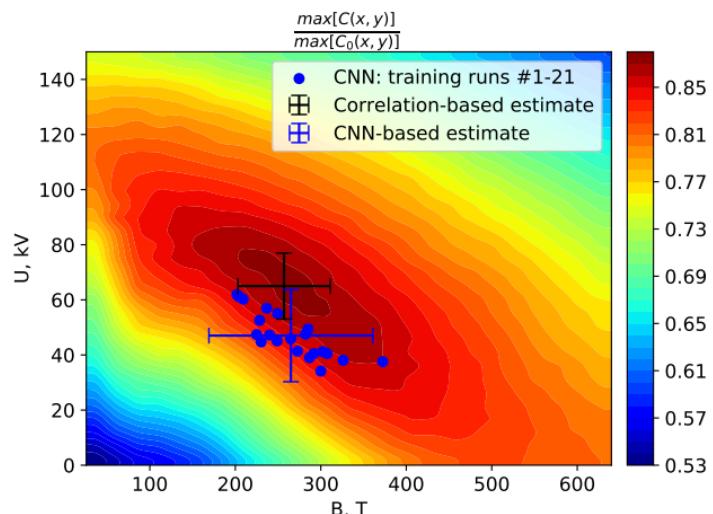


Figure 3. Architecture of the developed CNN (a) and learning curves for training and validation data sets, obtained in training run #1 and displaying the decrease of the mean squared error with the number of epoch (b). Panels (c1) and (d1) provide a comparison of proton patterns obtained in the experiment and in simulation for the field parameters extracted in training run #1. Corresponding 'void' contours used for assessment of the fields are shown in panels (c2, c3, d2); for the experimental image two different possible contours are shown, (c2) corresponds to the parameters of the contour retrieval algorithm that intuitively provide a better fit of the 'void' region boundary while (c3) corresponds to the parameters which that were used to retrieve the contours from all synthetic images. For easier comparison experimental contours are shown without inner

Анализ экспериментальных данных показывает долгоживущее магнитное поле $\sim 300\text{T}$ – самосогласованная структура поле-ток:

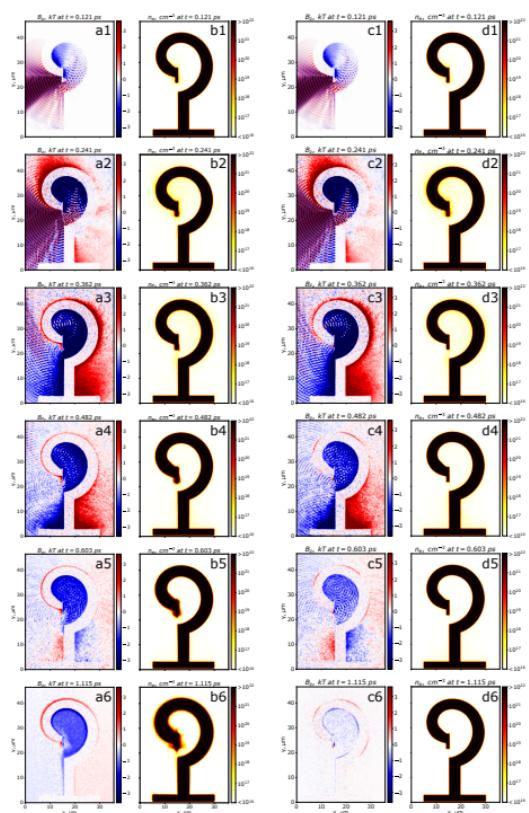
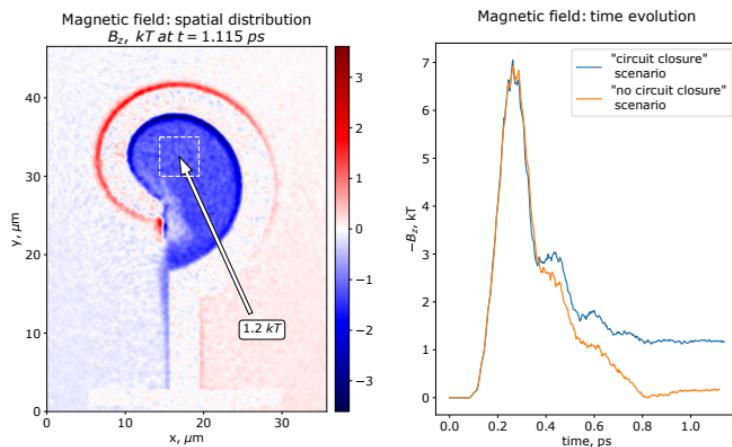


"Короткие" импульсы, "протяжённые" мишени

Как формируется стационарная структура при условии $\xi \lesssim 1$?

Численное моделирование демонстрирует два сценария в зависимости от замыкания контура с током:

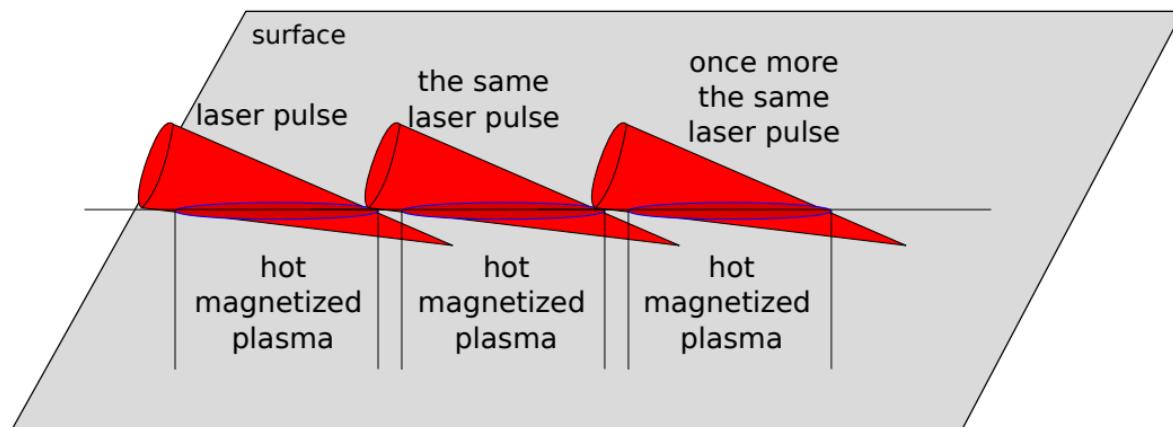
- Магнитное поле исчезает после ~ 1 пс
(разряд уходит из контура).
- Магнитное поле квазистационарно
(разряд замыкается в контуре).



Квазистационарность = замкнутый контур с током

"Короткие" импульсы, "протяжённые" мишени: геометрические эффекты

Как распространить взаимодействие на всю протяжённую мишень?



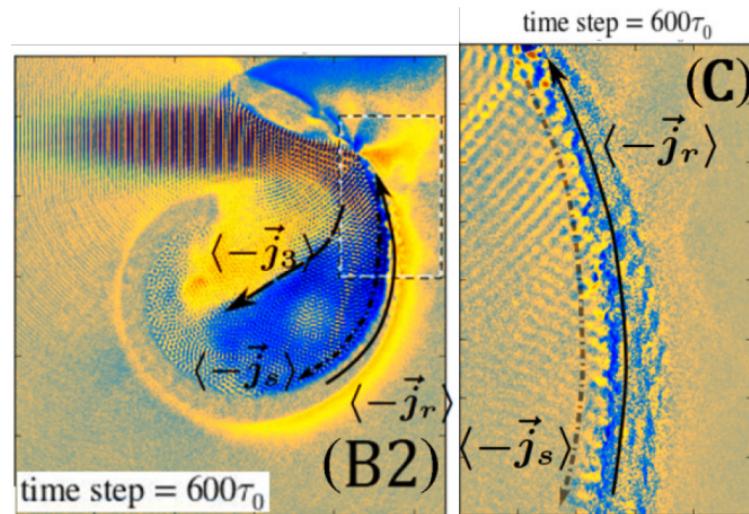
В случае скользящего падения, длина взаимодействия зависит от
истощения импульса, а не его длительности.

Snails, $\xi \gtrsim 1$.

Мишени со скользящим падением при $\xi \sim 1$

В полостных мишениях со скользящим падением* создаётся замагниченная плазма, в которой замыкается контур с током.

Экспериментально показана работоспособность таких мишней в ns режиме[†] ($\xi \gg 1$) и в ps режиме^{‡, §, ¶} ($\xi \sim 1$).



*Ph.K., E. D'Huméries, and V. Tikhonchuk, Gigagauss-Scale Quasistatic Magnetic Field Generation in a Snail-Shaped Target, Physical Review E 91, 43107 (2015).

[†]T. Pisarczyk et al., Magnetized Plasma Implosion in a Snail Target Driven by a Moderate-Intensity Laser Pulse, Scientific Reports 8, 17895 (2018).

[‡]K. F. F. Law et al., Relativistic Magnetic Reconnection in Laser Laboratory for Testing an Emission Mechanism of Hard-State Black Hole System, Physical Review E 102, 033202 (2020).

[§]M. Ehret et al., Kilotesla Plasmoid Formation by a Trapped Relativistic Laser Beam, Phys. Rev. E 106, 045211 (2022).

Snails, $\xi \gtrsim 1$.

Генерация замагнченной горячей плазмы с $B \gtrsim 1kT^{\frac{1}{2}}$, $\xi \lesssim 1$

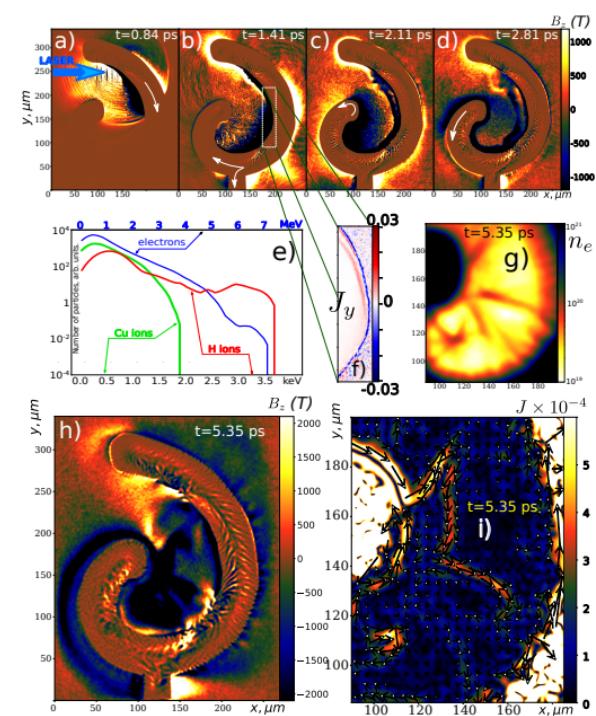
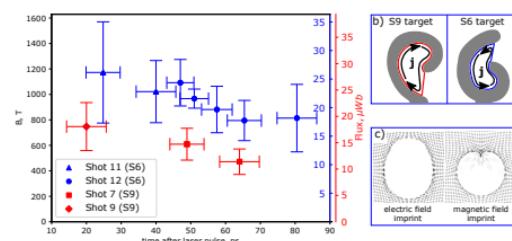
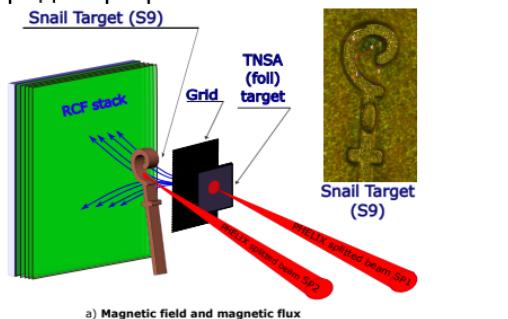
Эксперимент на установке PHELIX

(GSI, Darmstadt)

$I \approx 2 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$, $\tau \approx 0.5 \text{ ps}$,

Энергия $\approx 50 \text{ J}$

Диагностика:
радиография
протонная



§ M. Ehret et al., Kilotesla Plasmoid Formation by a Trapped Relativistic Laser Beam, Phys. Rev. E 106, 045211 (2022).

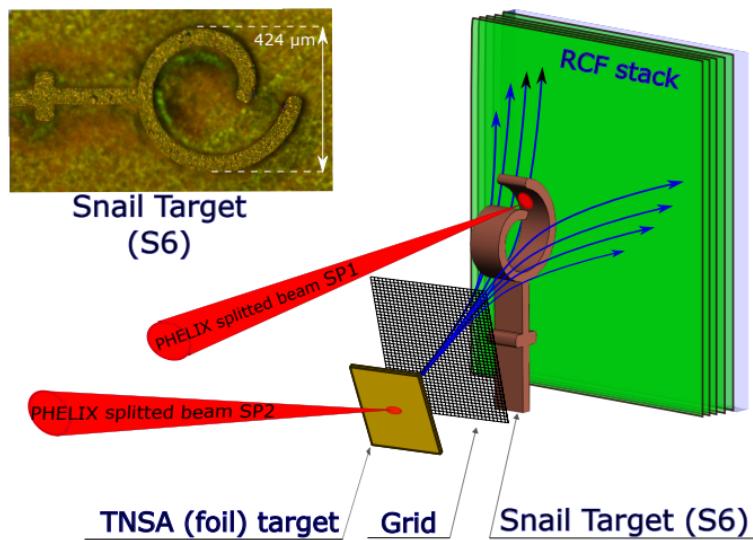
Snails, $\xi \gtrsim 1$.

Генерация замагнченной горячей плазмы с $B \sim 200\text{T}^*$, $\xi \sim 150\mu\text{m}/800\mu\text{m} \ll 1$

Ещё один эксперимент на установке
PHELIX (GSI, Darmstadt)
 $I \approx 2 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$, $\tau \approx 0.5 \text{ ps}$,
Энергия $\approx 50 \text{ J}$

Диагностика:
радиография

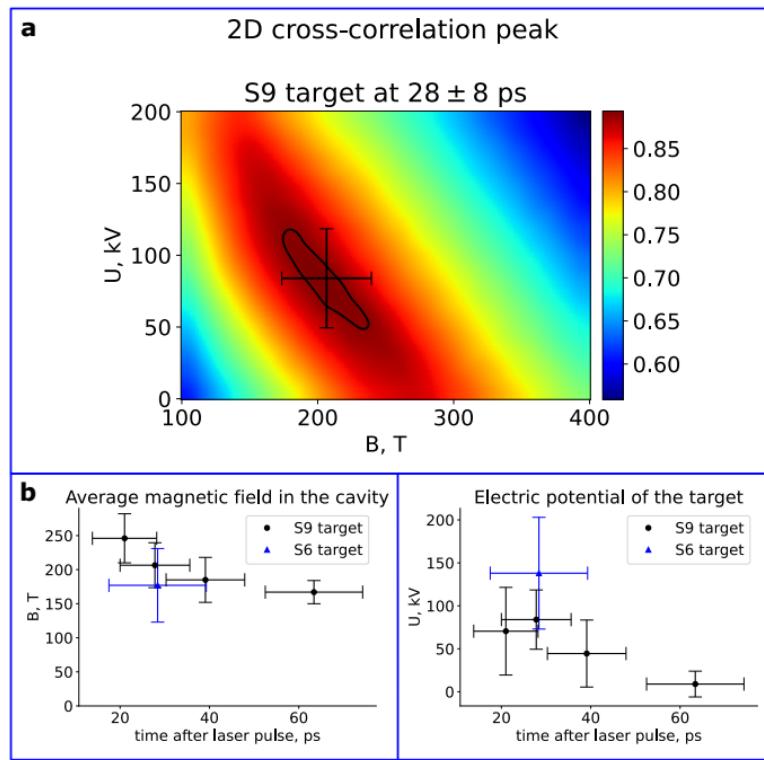
протонная



Snails, $\xi \gtrsim 1$.

Генерация замагнченной горячей плазмы с $B \sim 200\text{T}^*$, $\xi \sim 150\mu\text{m}/800\mu\text{m} \ll 1$

Сотни Тесла в квазистационарном режиме (десятки пс).



*Ph.K, N. Bukharskii, I. Kochetkov, M. Ehret, J. J. Santos, Y. Abe, K. F. F. Law, S. Fujioka, G. Schaumann, and B. Zielbauer, Optical Generation of Quasi-Stationary Plasma Electromagnetic Structures for Particle Collimation with PetaWatt Picosecond Laser, arXiv:2304.07816.

Snails, $\xi \gtrsim 1$.

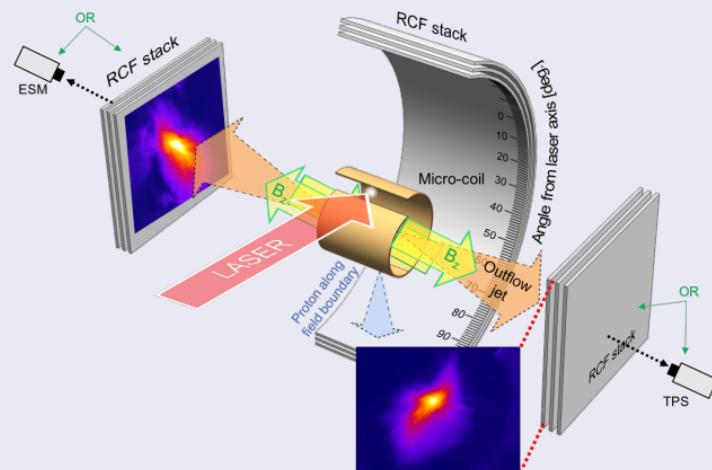
Исследование магнитного перезамыкания в релятивистской плазме*

Эксперимент на установке LFEX
(Osaka)

$I \sim 2 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$, $\tau \approx 1 \text{ ps}$,

Энергия $\approx 500 \text{ J}$

Диагностика: протонная
радиография и спектрометры



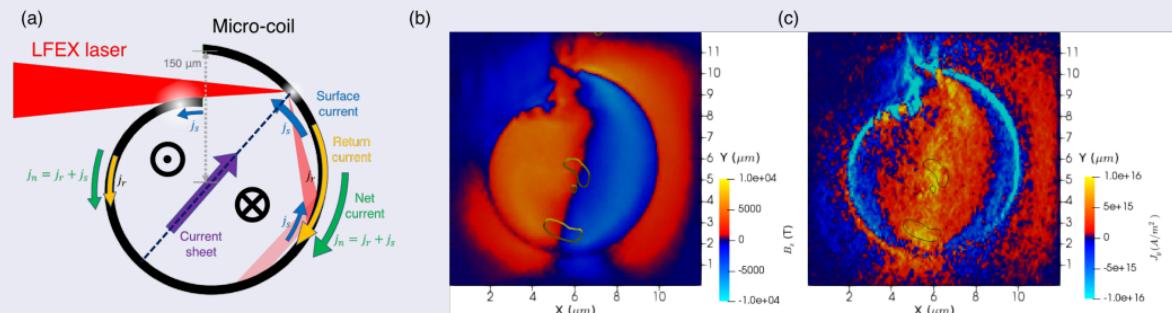
Общая схема эксперимента.

*K. F. F. Law et al., Relativistic magnetic reconnection in laser laboratory for testing an emission mechanism of hard-state black hole system, Physical Review E 102, 033202 (2020).

Snails, $\xi \gtrsim 1$.

Формирование биполярной сильно-замагнченной структуры[†]

Геометрия облучения соответствовала ☺ схеме (а), магнитные поля распределены согласно (б), токи J_y показаны на панели (с).



[†]K. F. F. Law et al., Relativistic magnetic reconnection in laser laboratory for testing an emission mechanism of hard-state black hole system, Physical Review E 102, 033202 (2020).

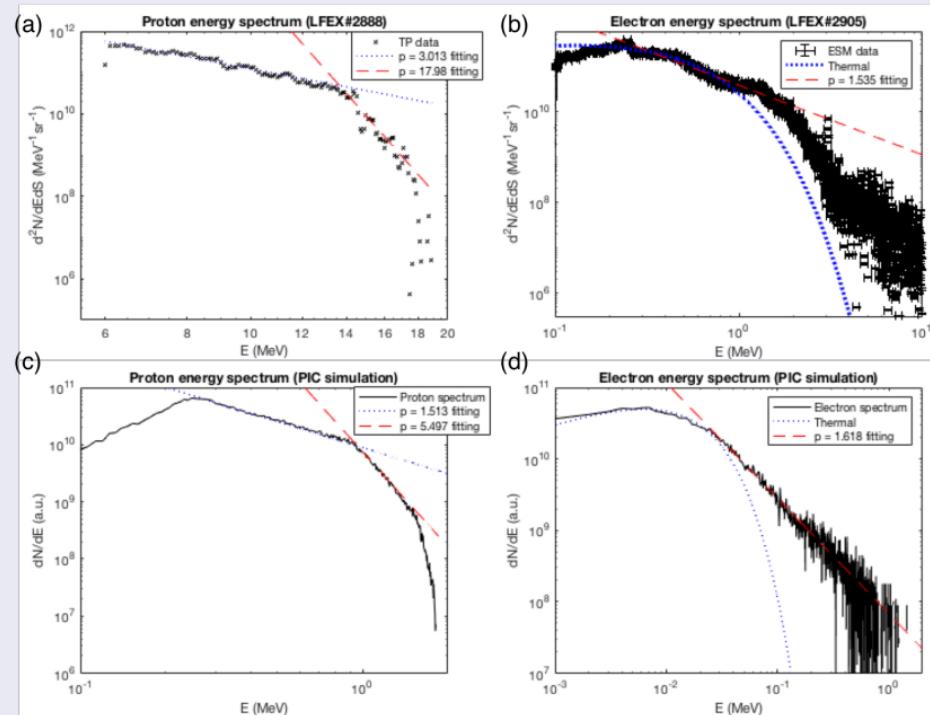
Snails, $\xi \gtrsim 1$.

Сравнение экспериментальных и рассчитанных спектров[†]

(a) Протонные спектры (чёрные крестики) > 6 MeV.

(b) Электронные спектры > 100 keV.

Спектры, полученные в численном моделировании, для протонов (c) и электронов (d).



[†]K. F. F. Law et al., Relativistic magnetic reconnection in laser laboratory for testing an emission mechanism of hard-state black-hole system. Physical Review E 102, 033202 (2020)

Snails, $\xi \gtrsim 1$.

Параметры плазмы в мишени**

Magnetized hot plasmas	B [T]	n_e [m^{-3}]	T_e [K]	$\frac{\sigma_e^{hot}}{\frac{B^2}{\mu_0 n_e m_e c^2 \Gamma_e h_e}} =$	v_A/c
Laser-driven "snail"	~ 3000	$10^{23}..10^{24}$	$10^9..10^{10}$	40-200	0.22-0.58
Cygnus X-1 §	1000	5×10^{24}	10^9	130	0.3
Microquasar coronae ¶	10..1000	$10^{19}..10^{22}$	10^9	$10^{-1}..10^5$	0.003..1
Fast reconnection region of GRB jet	7×10^4	10^{16}	10^8	5×10^{12}	0.9

§Del Santo et.al. The magnetic field in the x-ray corona of Cygnus X-1. MNRAS 430, 209-220 (2013)

¶Melzani, M. et.al. The energetics of relativistic magnetic reconnection: ion-electron repartition and particle distribution hardness. A&A 570, A112 (2014); Reis, R. et.al. On the size and location of the X-ray emitting coronae around black holes. AJL 769, L7 (2013).

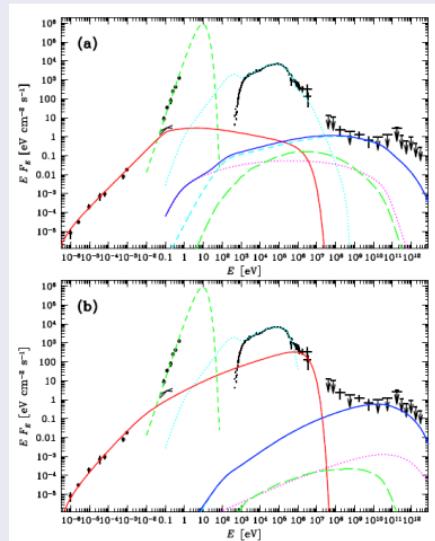
||Melzani, M. et.al. The energetics of relativistic magnetic reconnection: ion-electron repartition and particle distribution hardness. A&A 570, A112 (2014); McKinney, J. C. & Uzdensky, D. A. A reconnection switch to trigger gamma-ray burst jet dissipation. MNRAS 419, 573-607 (2011).

**K. F. F. Law et al., Relativistic magnetic reconnection in laser laboratory for testing an emission mechanism of hard-state black hole system, Physical Review E 102, 033202 (2020).

Snails, $\xi \gtrsim 1$.

Связь с астрофизическими наблюдениями: Cygnus X-1[†]

Степенные хвосты в электронном распределении – степенные хвосты в жёстком излучении



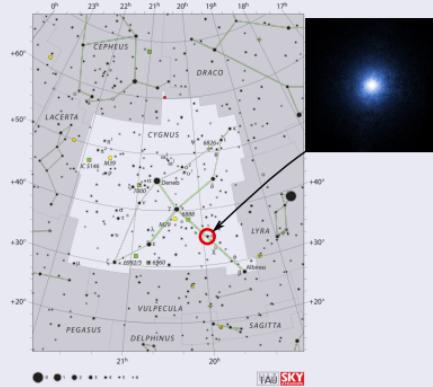
Предлагаемые* объяснения наблюдаемых спектров: (а) модель 1: мягкий спектр инжектируемых электронов ($p = 2.5$), комптонизация. (б) модель 2: жёсткий спектр инжектируемых электронов ($p = 1.4$), синхротронное излучение.

* Zdziarski et.al., (2014) 'Jet contributions to the broad-band spectrum of Cyg X-1 in the hard state', MNRAS, 442(4), pp. 3243.

[†] K. F. F. Law et al., Relativistic magnetic reconnection in laser laboratory for testing an emission mechanism of hard-state black hole system, Physical Review E 102, 033202 (2020).

Snails, $\xi \gtrsim 1$.

Кусочек звезды в лаборатории



Положение источника Лебедь X-1 на небе и его изображение в рентгеновском спектре (Chandra X-ray Observatory)[‡]

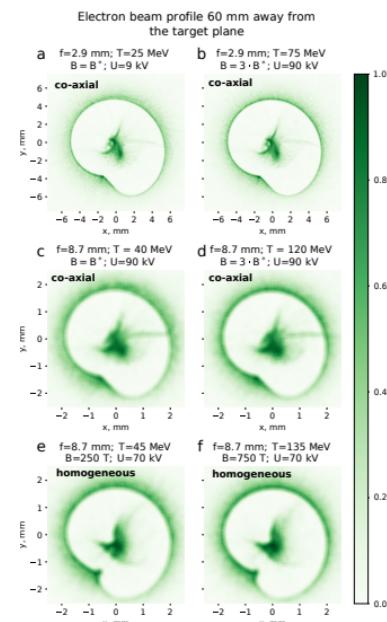
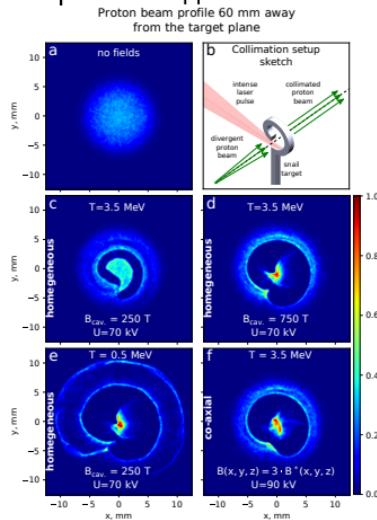
В микроскопическом объёме, на короткое время создано состояние плазмы с параметрами, соответствующими плазме в аккреционных дисках тесных двойных систем.

[‡]https://fr.wikipedia.org/wiki/Cygnus_X-1

Snails, $\xi \gtrsim 1$.

Пример – возможность управления потоками частиц *, $\xi \sim 150\mu\text{m}/800\mu\text{m} \ll 1$

Возможна эффективная коллимация протонов и электронов в рамках одной оптической схемы.



*Ph.K, N. Bukharskii, et.al., Optical Generation of Quasi-Stationary Plasma Electromagnetic Structures for Particle Collimation with PetaWatt Picosecond Laser, arXiv:2304.07816.

Snail, $\xi \ll 1$

Можно ли возбуждать квазистационарные магнитные поля фс лазерными импульсами?

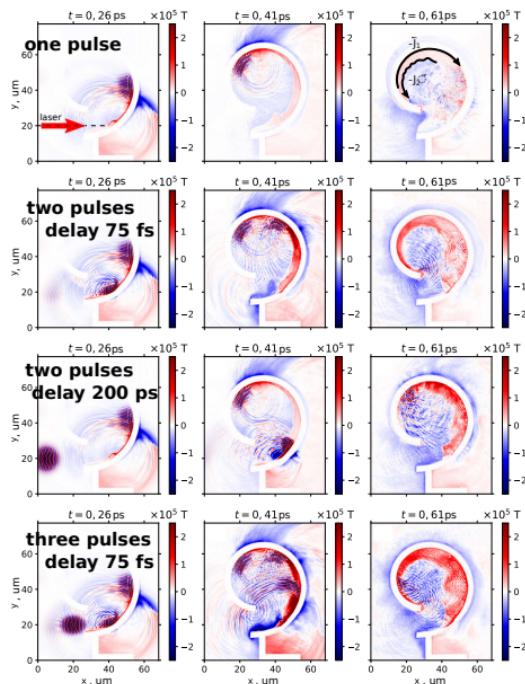
В этом случае $\xi \sim 0.1...0.001!$

Snail, $\xi \ll 1$

Мишень типа "улитка" в фс режиме *, $\xi \ll 1$

Можно!

Можно использовать
несколько импульсов, можно
получать большие значения
квазистационарных магнитных
полей при спользовании достаточно
мощных драйверов **

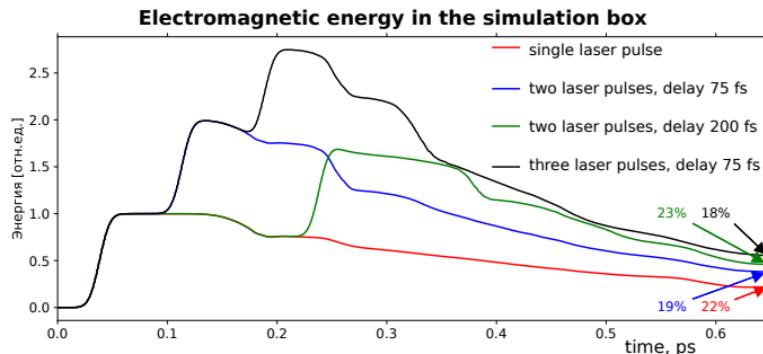


*N. D. Bukharskii & PhK, Study of a Highly Magnetized Relativistic Plasma in the Context of Laboratory Astrophysics and Particle Flow Control, Bulletin of the Lebedev Physics Institute 50(8), p. S869 (2023).

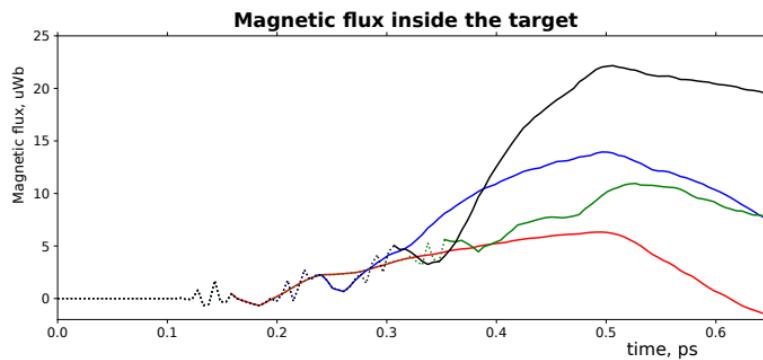
**Building ExaWatt facility, 12 multiPetaWatt beams, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Snail, $\xi \ll 1$

Мишень типа "улитка" в фс режиме*



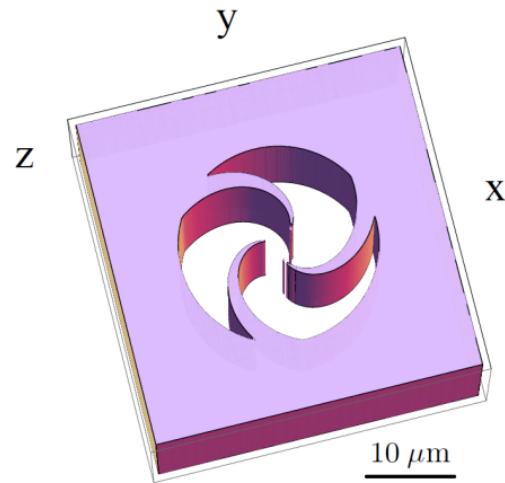
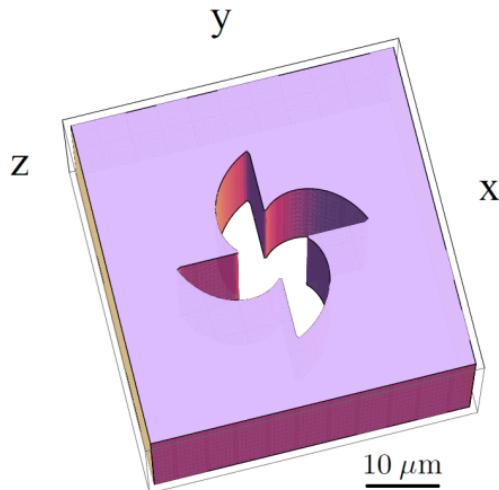
Энергетическая эффективность в расчётах $\sim 20\%$



*N. D. Bukharskii & PhK, Study of a Highly Magnetized Relativistic Plasma in the Context of Laboratory Astrophysics and Particle Flow Control, Bulletin of the Lebedev Physics Institute 50(8), p. S869 (2023).

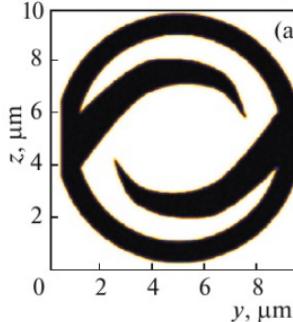
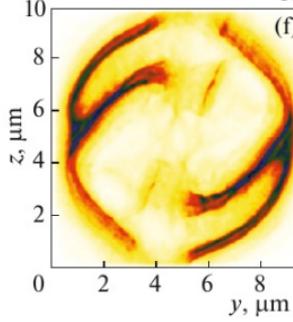
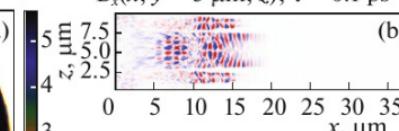
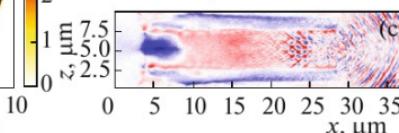
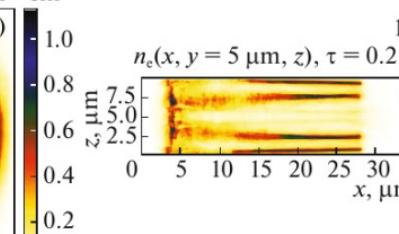
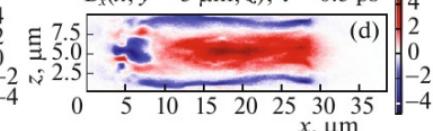
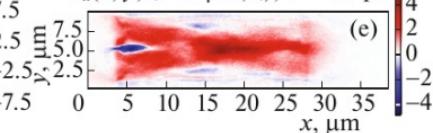
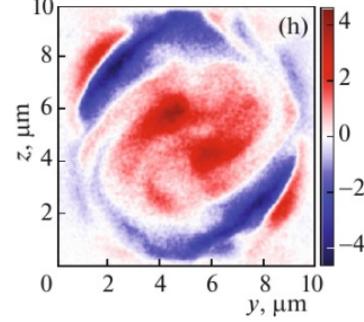
Капиллярные структурированные мишени, $\xi \ll 1$

Капиллярные структурированные мишени обеспечивают режим скользящего распространения в пс, фс режиме ^{††}



Примеры капиллярных мишней

^{††}PhK, Tikhonchuk, V., D'Humières, E. Magnetization of laser-produced plasma in a chiral hollow target. New Journal of Physics, 19(3), 033023 (2017)

Капиллярные структурированные мишени, $\xi \ll 1$ Структурированные капиллярные мишени $\xi \sim 0.1...0.001$ $n_c(x = 11.6 \mu\text{m}, y, z), \tau = 0.02 \text{ ps}$ 10^{22} cm^{-3}  $n_c(x = 11.6 \mu\text{m}, y, z), \tau = 0.03 \text{ ps}$ 10^{23} cm^{-3}  $B_x(x, y = 5 \mu\text{m}, z), \tau = 0.1 \text{ ps}$ 10 kT  $B_x(x, y = 5 \mu\text{m}, z), \tau = 0.2 \text{ ps}$ 10 kT  $n_c(x = 5 \mu\text{m}, y, z), \tau = 0.3 \text{ ps}$ 10^{22} cm^{-3}  $B_x(x, y = 5 \mu\text{m}, z), \tau = 0.3 \text{ ps}$ 10 kT  $B_x(x = 11.6 \mu\text{m}, y, z), \tau = 0.03 \text{ ps}$ 10 kT  $B_x(x, y, z = 5 \mu\text{m}, z), \tau = 0.3 \text{ ps}$ 10 kT  $B_x(x = 11.6 \mu\text{m}, y, z), \tau = 0.03 \text{ ps}$ 10 kT 

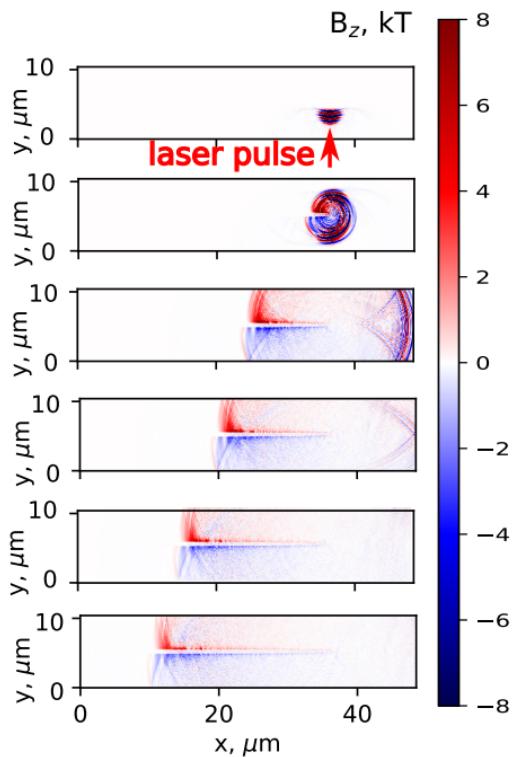
Что если воздействовать на длинные проволоки фс импульсами?

Без скользящего падения, при условии $\xi \sim 0.1...0.001$

Суб-мм мишени в фс режиме взаимодействия $|\xi| \sim 0.1...0.001$

Какой сценарий можно ожидать?

- Энергия в фс импульсе гораздо меньше, чем в пс импульсе при той же интенсивности.
- Нагрев и поглощение импульса существенно меньше.
- Можно ли замкнуть контур с током?
Получится ли квазистационарное магнитное поле?



Loops, $\xi \ll 1$

Суб-мм мишени в фс режиме : ТГц излучение

Есть исследования для прямых проволок:

EPI Web of Conferences 195, 03002 (2018)

<https://doi.org/10.1051/epjconf/201819503002>

Laser induced THz Sommerfeld waves along metal wire

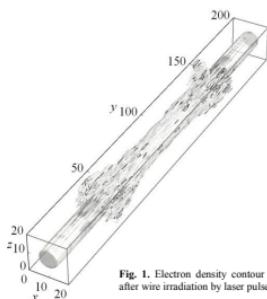
A.V.Brantov^{1,2}, A.S.Kuratov¹, A. Maksimchuk³, Yu. M. Alev² and V.Yu.Bychenkov^{1,2}

Fig. 1. Electron density contour plot at instant of 350 fs after wire irradiation by laser pulse with $a_0 = 2.7$.



Figure 2. Transversal ($x=0$) and longitudinal ($x=0$) electric field distributions in x - y plane at the instant of 350 fs after wire irradiation by laser pulse with $a_0 = 4.7$. Wire lies be-

Novel efficient THz undulator using a laser-driven wire

Kazuhisa Nakajima

Light: Science & Applications (2017) 6, e17063; doi:10.1038/lsa.2017.63; published online 19 May 2017

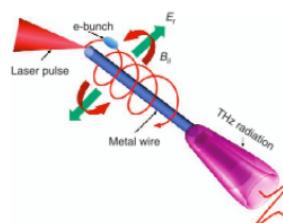
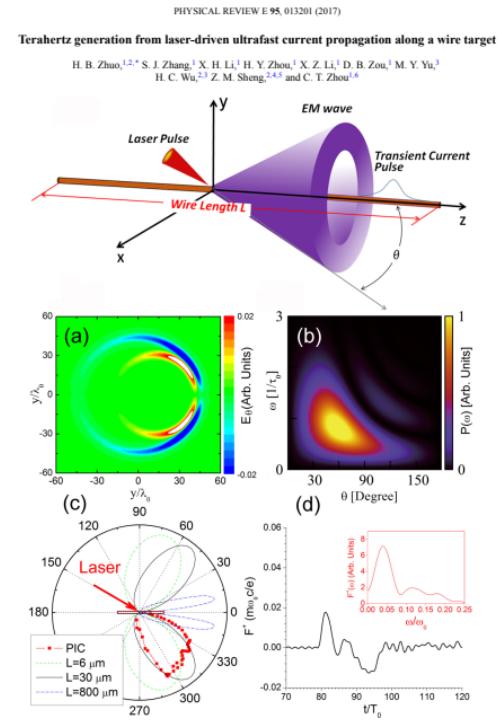


Figure 1 A schematic view of the laser-driven-wire-guided undulator (LWGU) developed at SIOM. A femtosecond laser pulse irradiating a metal wire emits an energetic electron bunch. Concurrently, a highly positive transient current excites an outward-pointing radial electric field (E_r) and azimuthal magnetic field (B_ϕ) along the wire. The laser-generated fast electrons undergo helical betatron motion due to strong Lorentz forces and emit amplified THz radiation.

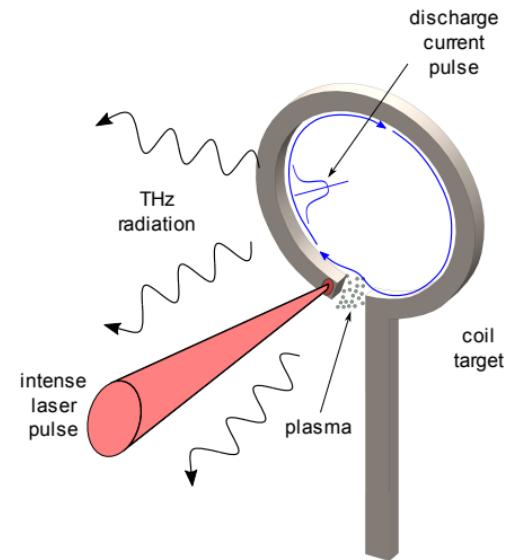


Суб-мм мишени в фс режиме : ТГц излучение от кольца*, $\xi \ll 1$

Рассмотрим аналог одновитковой мишени для генерации квазистационарного магнитного поля в фс случае.

Для замыкания в случае фс импульса нужна очень тонкая щель.

Можно запустить разряд по кругу!

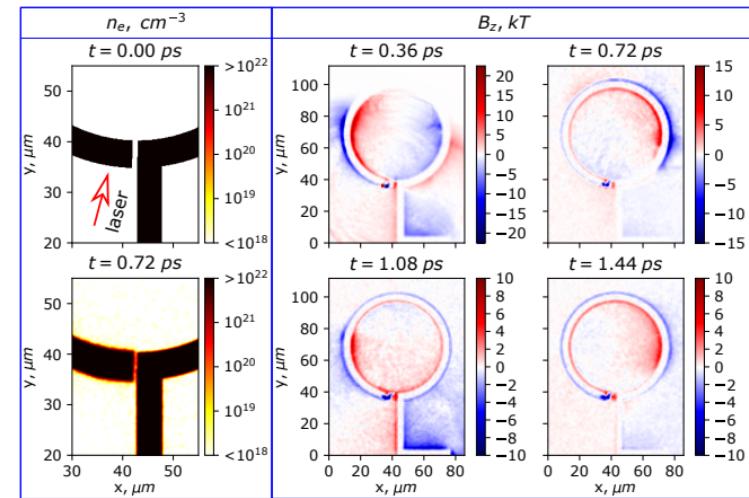


*Bukharskii, N., Kochetkov, Iu. & PhK, Terahertz annular antenna driven with a short intense laser pulse.
Appl. Phys. Lett., vol. 120, no. 1, p. 014102, (2022)

Суб-мм мишени в фс режиме : ТГц излучение от кольца*, $\xi \ll 1$

Результаты численного моделирования (SMILEI):

- Разряд распространяется по кольцу (по часовой стрелке на рисунке).
- Противоположный разряд слабее (против часовой стрелке на рисунке).
- Щель заполняется плазмой за время одного прохода импульса по кольцу.



Разряд может многократно пройти по кольцу в заданном направлении.

*Bukharskii, N., Kochetkov, Iu. & PhK, Terahertz annular antenna driven with a short intense laser pulse. Appl. Phys. Lett., vol. 120, no. 1, p. 014102, (2022)

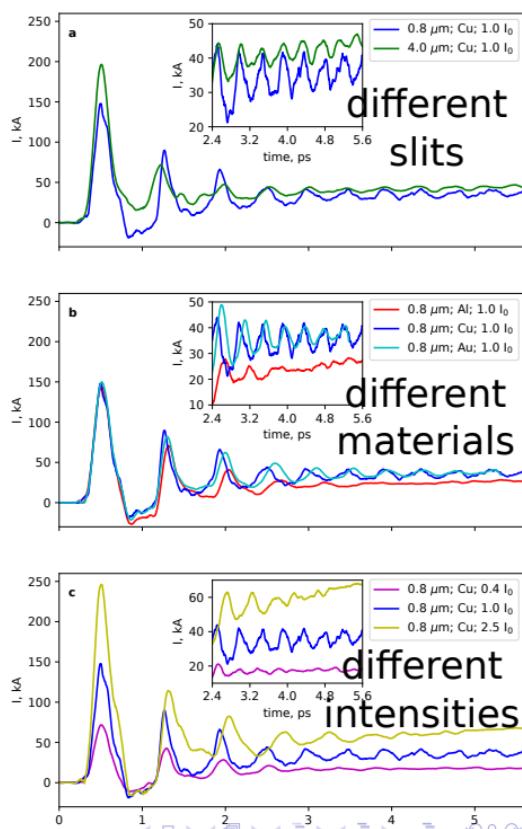
Loops, $\xi \ll 1$

Колебания тока в суб-мм кольце в фс режиме*, $\xi \ll 1$

$\lambda = 800 \text{ nm}$, $\tau = 24 \text{ фс}$, focal spot $\approx 8 \mu\text{m}$, $I_0 \approx 10^{21} \text{ W/cm}^2$, $E_0 \approx 10 \text{ J}$.

- Слишком широкая щель ($4\mu\text{m}$ vs $0.8\mu\text{m}$ для Cu) препятствует колебаниям.
- Слишком лёгкое вещество (Al vs Cu vs Au) препятствует колебаниям.
- Существует оптимальное значение интенсивности для генерации излучения ($\sim I_0$) и для генерации магнитного поля $\sim 2.5 \times I_0$.

При высокой интенсивности сильнее нагрев – больше поглощение и сильнее растягивается импульс.

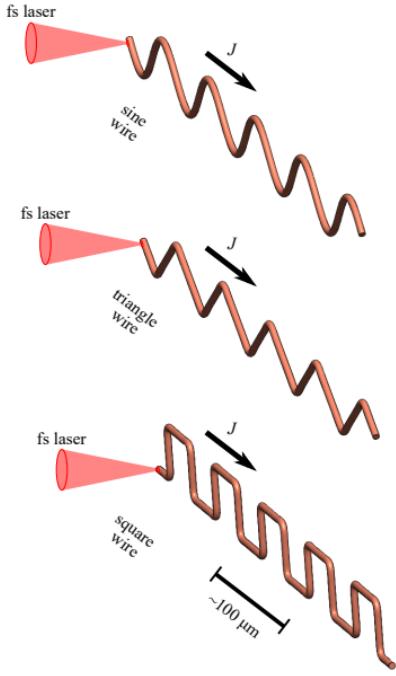


*Bukharskii, N., Kochetkov, Iu. & PhK,

Terahertz annular antenna driven with a short intense laser pulse,
Appl. Phys. Lett., vol. 120, no. 1, p. 014102, (2022)

Ондукторы, $\xi \ll 1$

Можно использовать произвольную форму проволоки*



Рассмотрим проволочный ондулятор, облучаемый $\sim 10..50$ фс интенсивным лазерным импульсом.

Релятивистский разряд распространяется вдоль проводника и излучает в соответствии с

$$\phi = \int \frac{\rho_{t-R/c}}{R} d^3r,$$

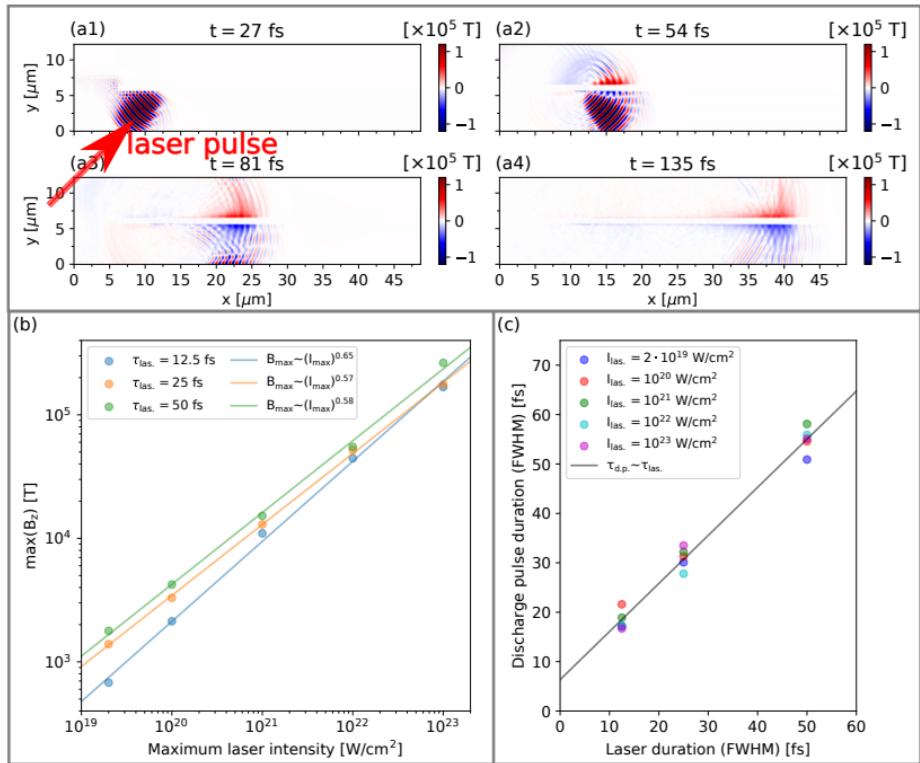
$$\mathbf{A} = \frac{1}{c} \int \frac{\mathbf{j}_{t-R/c}}{R} d^3r.$$

Простая оценка для несущей частоты (точность $\lesssim 10\%$):

$$\omega_0 \sim \frac{\kappa}{\frac{2\kappa}{\pi v_0} l_{1/2} + \frac{\cos \theta}{c}}.$$

*N. Bukharskii and Ph. K, Intense Widely-Controlled Terahertz Radiation from Laser-Driven Wires, Matter and Radiation at Extremes 8, 044401 (2023).

Формирование компактного разрядного импульса*

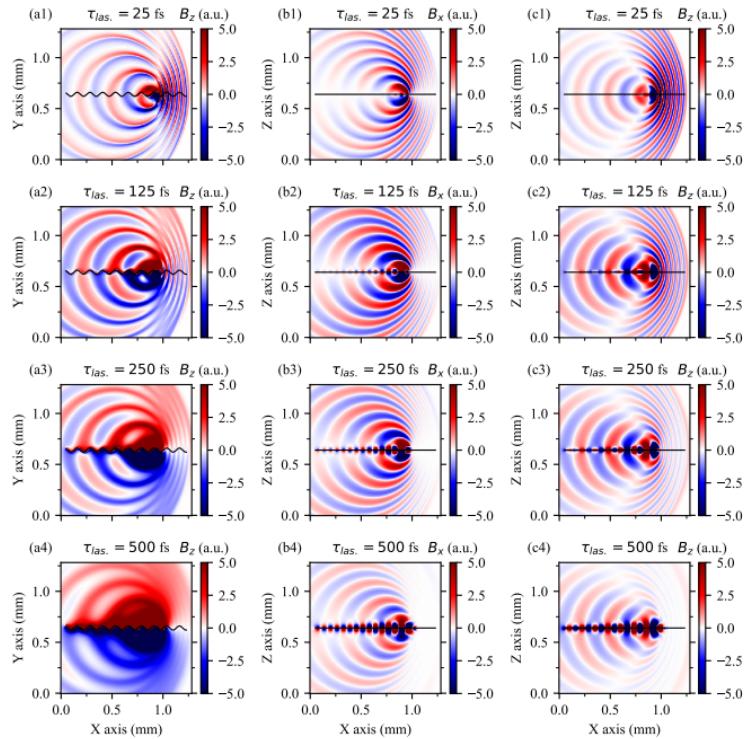


В численном моделировании мы видим, что разрядный импульс в фс режиме взаимодействия остаётся компактным и масштабируется по отношению к параметрам фс драйвера.

*N. Bukharskii and Ph. K, Intense Widely-Controlled Terahertz Radiation from Laser-Driven Wires, Matter and Radiation at Extremes 8, 044401 (2023).

Ондукторы, $\xi \ll 1$

Излучение или квазистационарный режим?*



Для эффективной генерации излучения разрядный импульс должен быть короткий!

Надёжных экспериментальных данных пока слишком мало

*N. Bukharskii and Ph. K, Intense Widely-Controlled Terahertz Radiation from Laser-Driven Wires, Matter and Radiation at Extremes 8, 044401 (2023).

Заключительные замечания и выводы

- Среди всех оптических методов генерации магнитных полей наиболее разработаны разрядные методы.
- Параметр $\xi = c\tau_0/L$ определяет режим распространения разрядного тока по проводящей мишени.
- Переходные процессы важны при $\xi \lesssim 1$.
- Поглощение, дисперсия, геометрические особенности распространения позволяют конвертировать временные масштабы воздействия для получения квазистационарных полей.

- Короткие мощные лазерные импульсы (пс, суб-пс, фс) могут быть использованы для создания магнитных полей в суб-мм пространственном масштабе в квазистационарном режиме.
- Если разрядный импульс остаётся компактным, $\xi = c\tau_0/L \ll 1$ (например, при фс взаимодействии) мишень может стать эффективным излучателем в ТГц диапазоне.

Спасибо за внимание