



université
de BORDEAUX



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



P.N. Lebedev
Physical Institute



大阪大学
OSAKA UNIVERSITY



Экспериментальные результаты по оптической генерации электромагнитных плазменных структур в пикосекундном режиме для коллимации потоков ускоренных частиц

Bukharskii N.^{1,*}, Kochetkov Yu.¹, Ehret M.^{2,3}, Santos J.J.²,
Abe Y.⁴, Law K.F.F.⁵, Korneev Ph.^{1,6}

¹ National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation;

² Laboratoire CELIA, Université de Bordeaux, France;

³ Institut für Kernphysik, Technische Universität Darmstadt, Germany;

⁴ Institute of Laser Engineering, Osaka University, Japan;

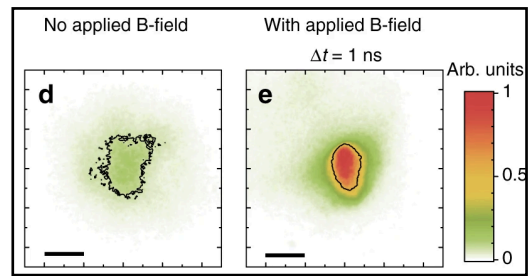
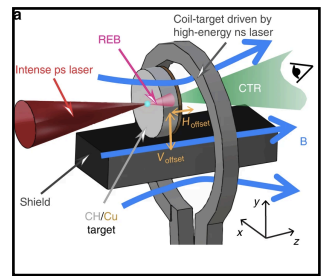
⁵ Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, Japan;

⁶ Lebedev Physical Institute, Moscow, Russian Federation

* e-mail: n.bukharskii@gmail.com

Возможные области применения

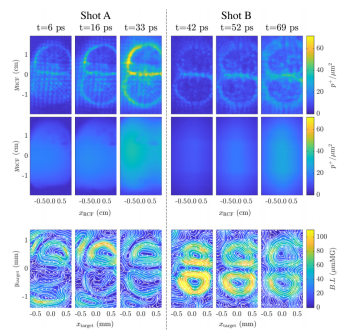
- управление пучками высокоэнергетических заряженных частиц в вакууме и веществе



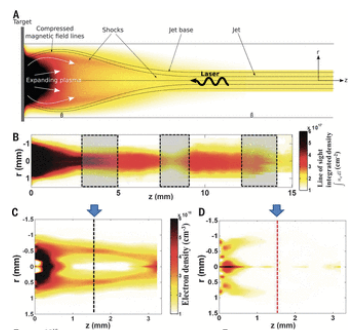
а Схема для управления пучками релятивистских электронов в транспортной мишени при помощи внешнего магнитного поля
 d, e Экспериментальные изображения когерентного переходного излучения, создаваемого электронами при прохождении границы вещество-вакуум на обратной стороне транспортной мишени

M. Bailly-Grandvaux *et al.* Nat Commun **9**, 102 (2018)

- исследования астрофизических процессов в лабораторных условиях

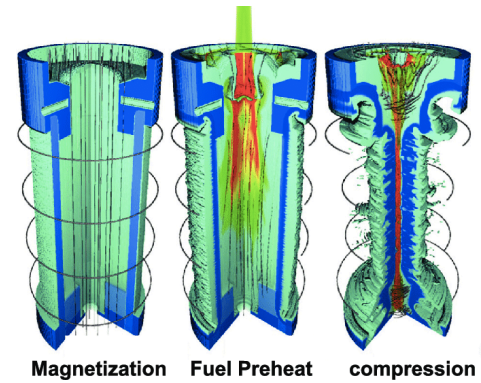


Результаты протонной радиографии магнитного пересоединения в лабораторной плазме
 C.A.J. Palmer *et al.* Phys. Plasmas **26**, 083109 (2019)



Лабораторная демонстрация формирования астрофизического джета
 B. Albertazzi *et al.* Science **346**, 325-328 (2014)

- инерциальный термоядерный синтез с обжатием замагниченной во внешнем магнитном поле мишени

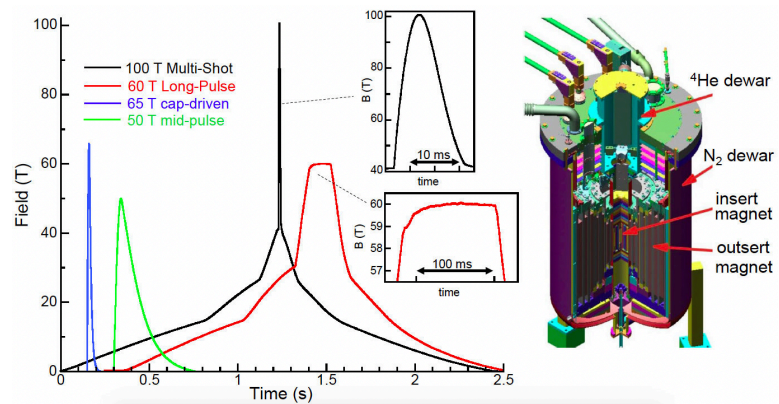


S.A. Slutz *et al.* Phys. Plasmas **17**, 056303 (2010)

- Также:** ускорение заряженных частиц, генерация синхротронного излучения, атомная физика в сильных магнитных полях и другие приложения в различных фундаментальных и прикладных исследованиях

- Основной метод - создание в обмотках катушек импульса тока с помощью электрического разряда батареи конденсаторов

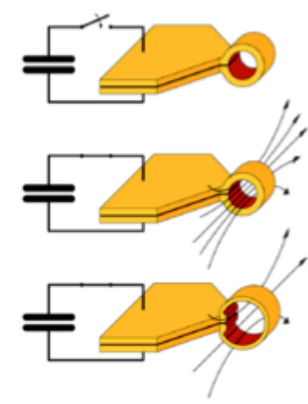
Недеструктивные магниты



R. Battesti *et al.* arXiv:1803.07547v1

За счет использования батареи конденсаторов с энергией 2.2 МДж достигается поле в **100 Тл**

Деструктивные (одноразовые) магниты



R. Battesti *et al.* arXiv:1803.07547v1

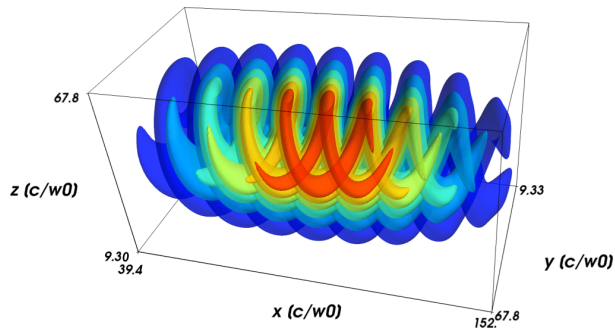
Магнитное поле до **300 Тл** в однвитковом соленоиде диаметром 5 мм
Длительность - ≈ 5 мкс
Катушка разрушается под воздействием давления МП

Недостатки - необходимость использовать громоздкие батареи конденсаторов; ограниченный доступ к экспериментальной области для размещения исследуемых образцов, элементов диагностики и т.п.; необходимость защиты катушки от деструктивного воздействия в ходе эксперимента / необходимость постоянной замены катушек.

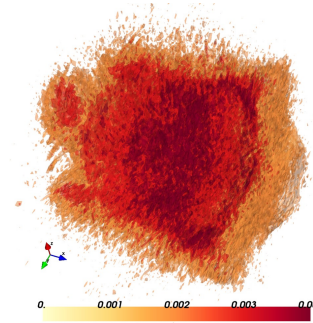
В условиях лазерной лаборатории для создания магнитных полей можно использовать энергию лазера.

Генерация магнитных полей с помощью лазеров

- создание магнитного поля в плазме с помощью световой волны с орбитальным угловым моментом



Распределение энергии для лазерного импульса с $l=1$
R. Nuter *et al.* Phys. Rev. E **98**, 033211 (2018)



Профиль продольной компоненты магнитного поля;
значение 0.004 соответствует полю ~ 50 Тл
R. Nuter *et al.* Phys. Rev. E **98**, 033211 (2018)

- генерация в скрещенных градиентах $\nabla \mathbf{n}_e \times \nabla \mathbf{T}_e$ (механизм батареи Бирмана)

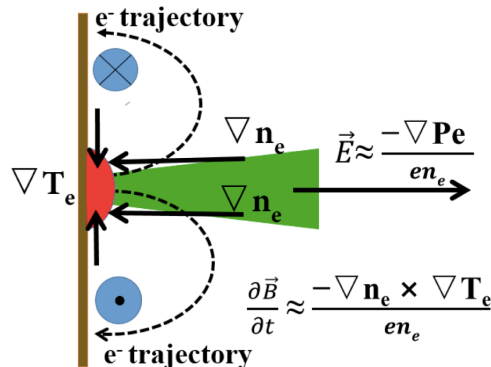
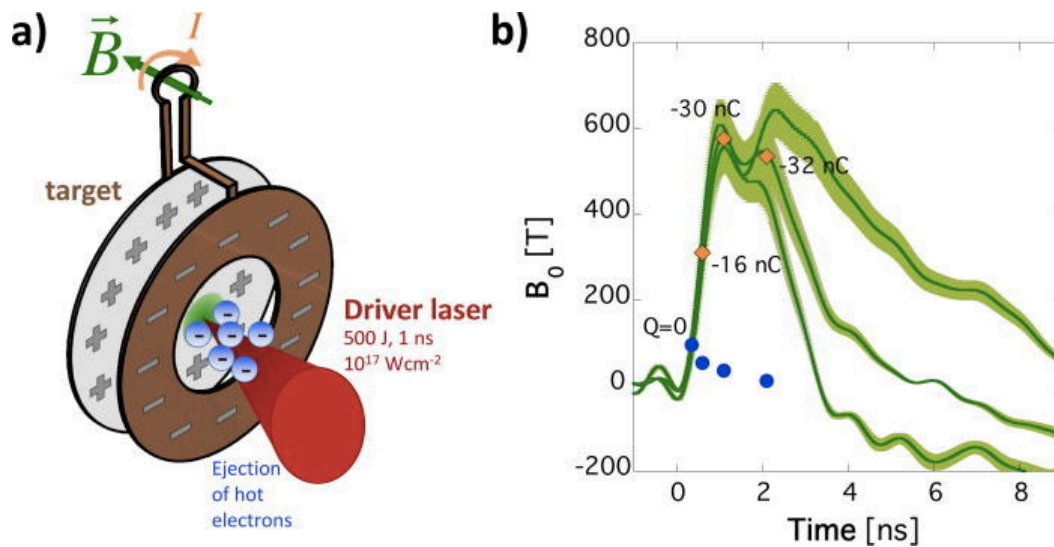


Схема генерации кольцевого спонтанного магнитного поля в лазерной плазме

J. Zhong *et al.* HPLSE **6**, e48 (2018)

Схема мишени типа «конденсатор-катушка» (а) и результаты измерения магнитного поля в центре мишени, полученные различными методами (b)



J.J. Santos *et al.* Phys. Plasmas **25**, 056705 (2018)

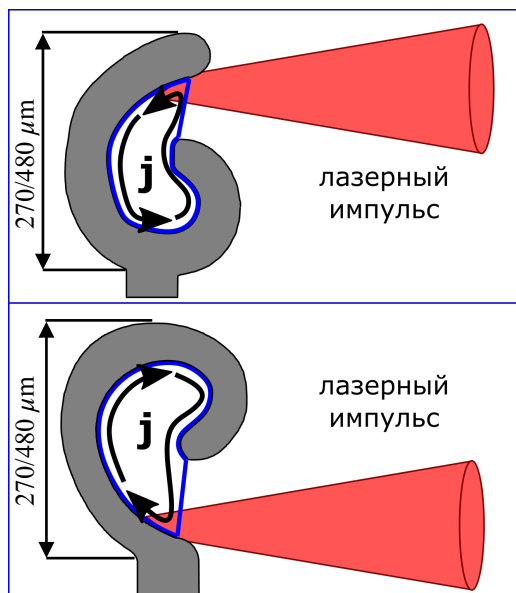
Для создания сильного квазистационарного МП с помощью данных мишеней используются **наносекундные лазеры субкилоджоульного - килоджоульного уровня энергии**

Например - PALS (Чехия), NANO2000 @ LULI (Франция), Gekko XII (Япония)

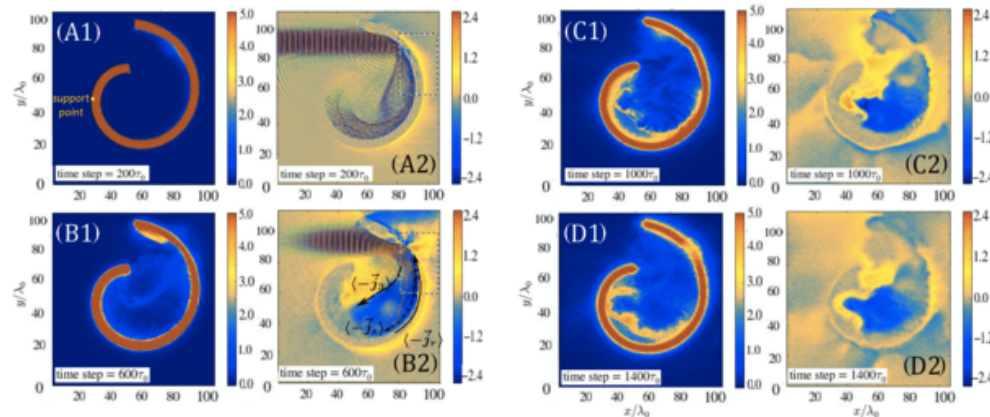
Параметры PALS (500 Дж в импульсе 0.5 нс) соответствуют величине магнитного поля **500 Тл**

Магнитное поле, генерируемое протекающими через проволоку токами, создается **в вакууме**

Для генерации МП в пикосекундном режиме можно использовать субмиллиметровые структурированные мишени, не разделяемые на конденсатор и катушку, например мишени типа «улитка»



Мишени для генерации МП в пикосек. режиме S6 (сверху) и S9 (снизу)



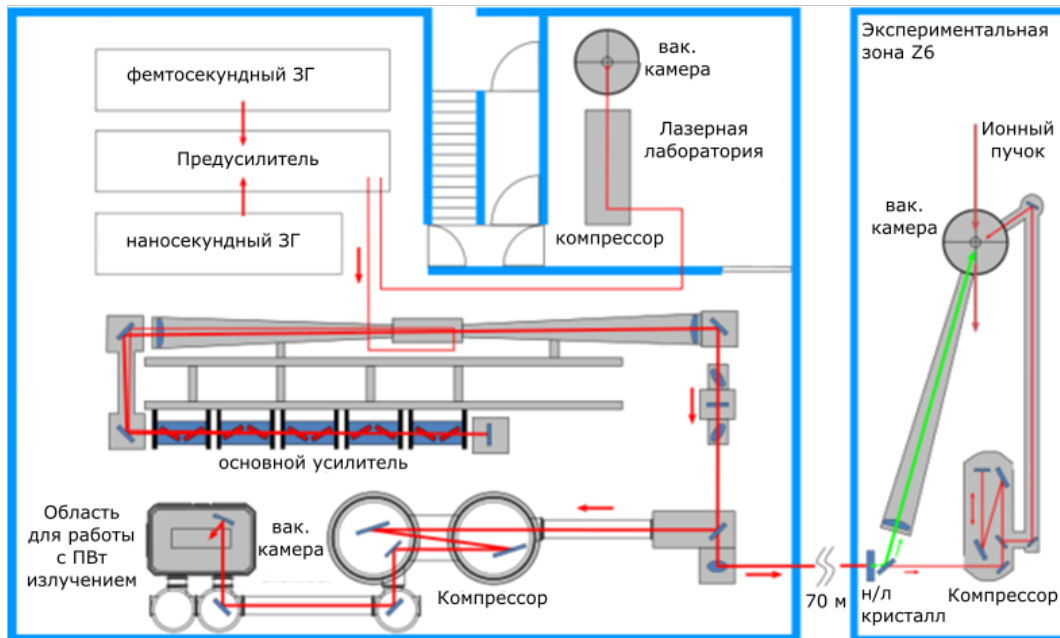
Результаты двумерного PIC-расчета: электронная плотность и магнитное поле в моменты времени 0.62, 1.9, 3.1 и 4.3 пс

Ph. Korneev *et al.* Phys. Rev. E **91**, 043107 (2015)

Основные особенности генерации МП в пикосекундном режиме

- $\frac{c\tau_p}{L} \sim 1$ - существенны нестационарные процессы
- высокая плотность энергии в области взаимодействия - магнитное поле создается в плазме, а не вакууме
- эффект экранировки - измерение с помощью индукционных сенсоров ('B-dot probe') может дать некорректный результат
- поле существует на гидродинамической временной шкале разлета мишени (~100 пс)
- структура поля может быть достаточно сложной, так как в ее формировании играют роль не только разрядные токи, текущие по поверхности мишени, но и токи быстрых электронов

Общая схема лазерного комплекса PHELIX



Телескопическая система основного усилителя



Батарея конденсаторов ламповой накачки основного усилителя



Параметры лазерных импульсов в эксперименте

Длина волны: 1.056 мкм

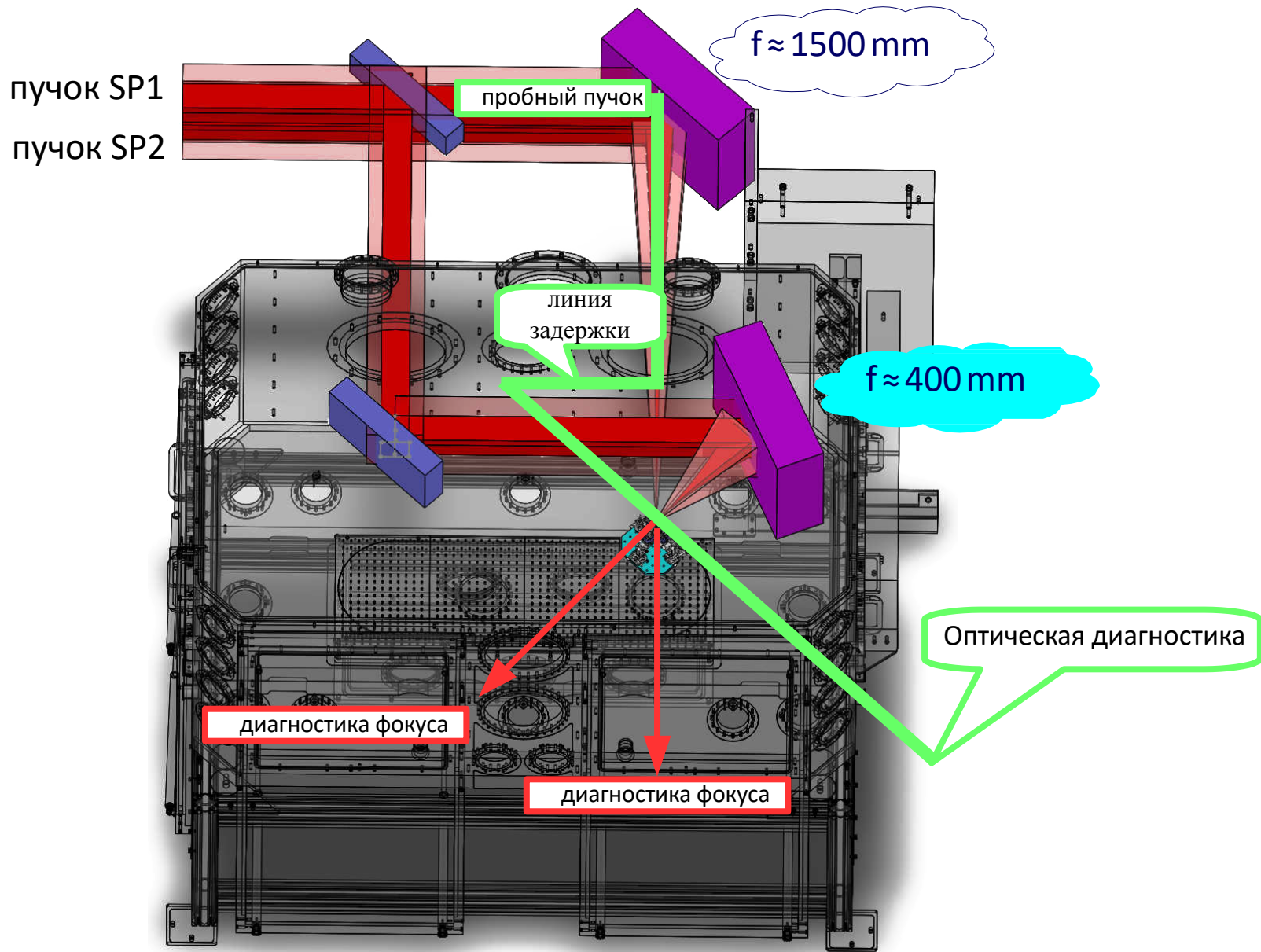
Энергия: 50+50 Дж

Длительность: 0.5 пс (FWHM)

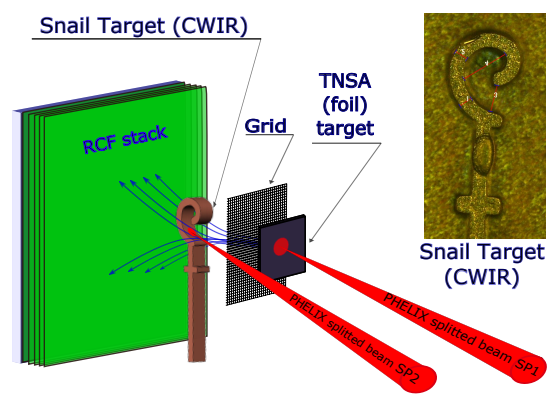
Интенсивность: $\sim 10^{19}$ Вт/см²



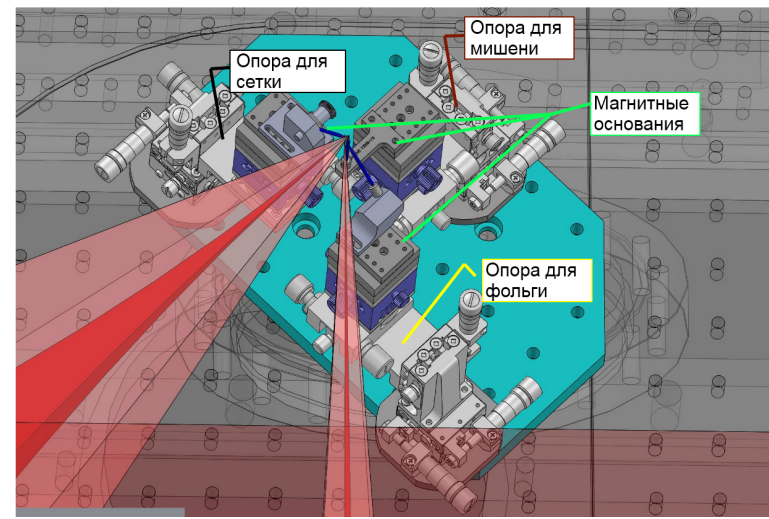
Размещение основных элементов внутри вакуумной камеры



Принципиальная схема протонной радиографии в эксперименте P136



3D модель платформы, на которой устанавливались держатели с мишенями



Фотография сборки с юстировочного микроскопа

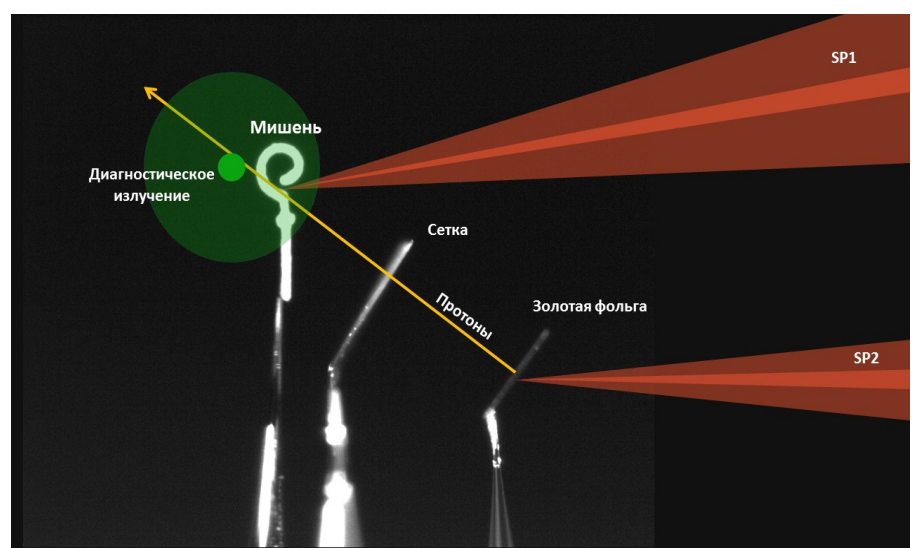
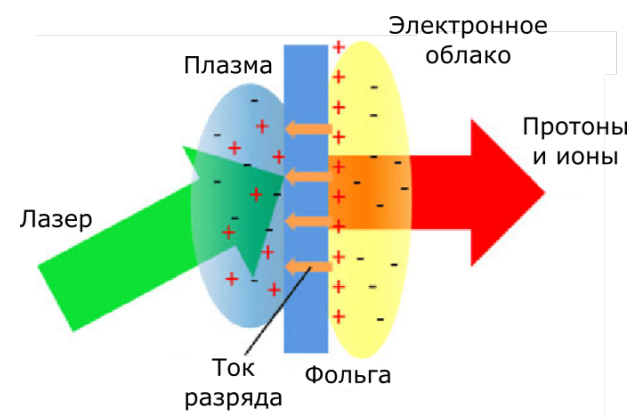


Иллюстрация TNSA механизма



Пример размещения различных слоев в стопке радиохромных пленок

- 1 слой Al фольги толщиной 12 мкм (отсечение сигнала тяжелых ионов)
- 5 HD-V2 пленок
- 4 EBT-3 пленки (более чувствительные, чем HD-V2, расположены в конце стопки)

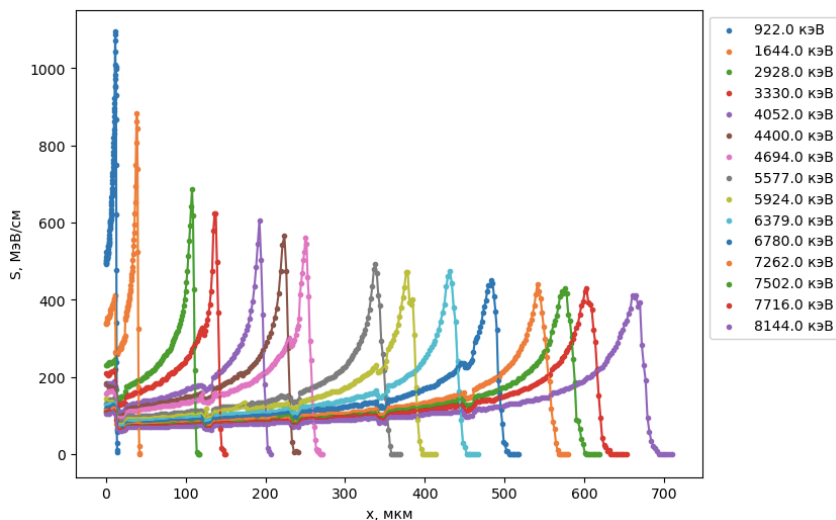
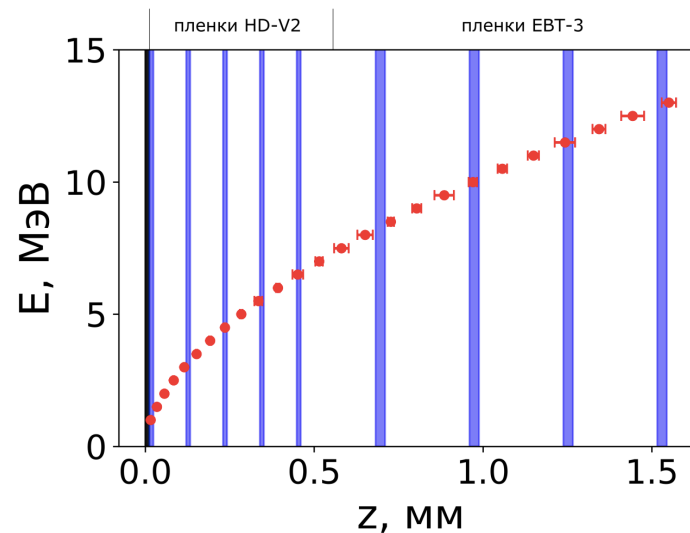


График зависимости ионизационных потерь энергии протонов на единицу длины от глубины их проникновения в стопку радиохромных пленок



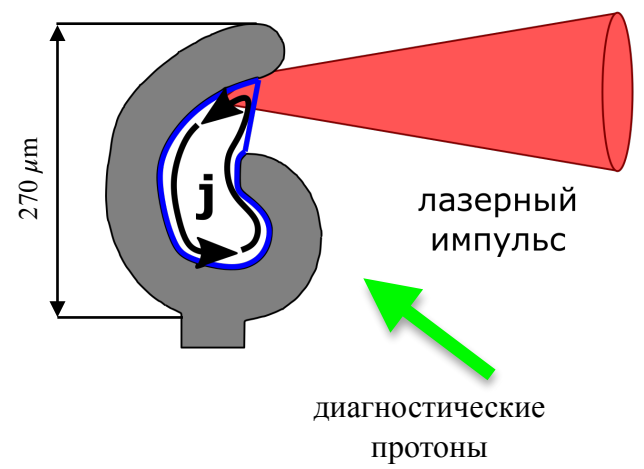
Распределение протонов различной энергии по слоям стопки радиохромных пленок

Разница во времени пролета для протонов 2 и 3 слоев - ~ 20 пс (при расстоянии между фольгой и мишенью в 3 мм)

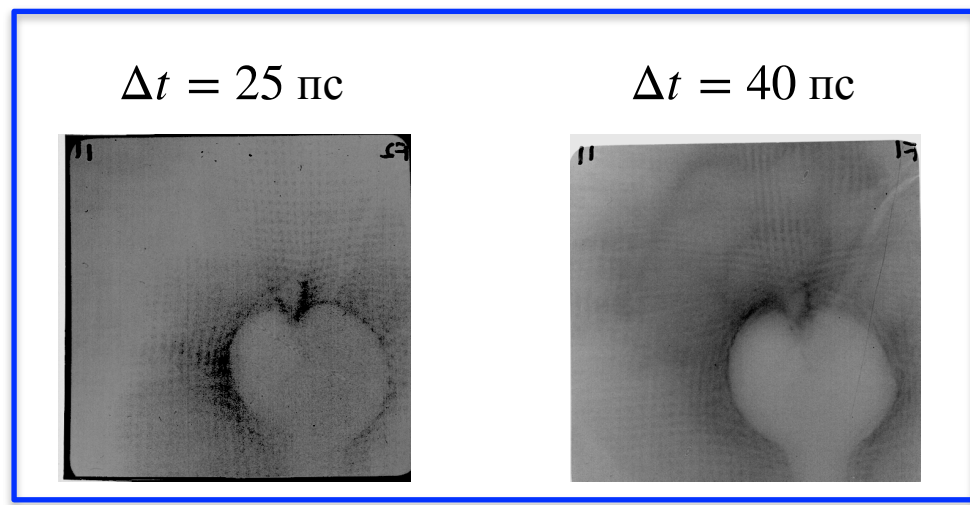
Полный диапазон разрешенных во времени измерений - ~ 160 пс (при активации всех слоев)

Для перестройки диапазона измерений в широких пределах регулируется временная задержка между пучками SP1 и SP2

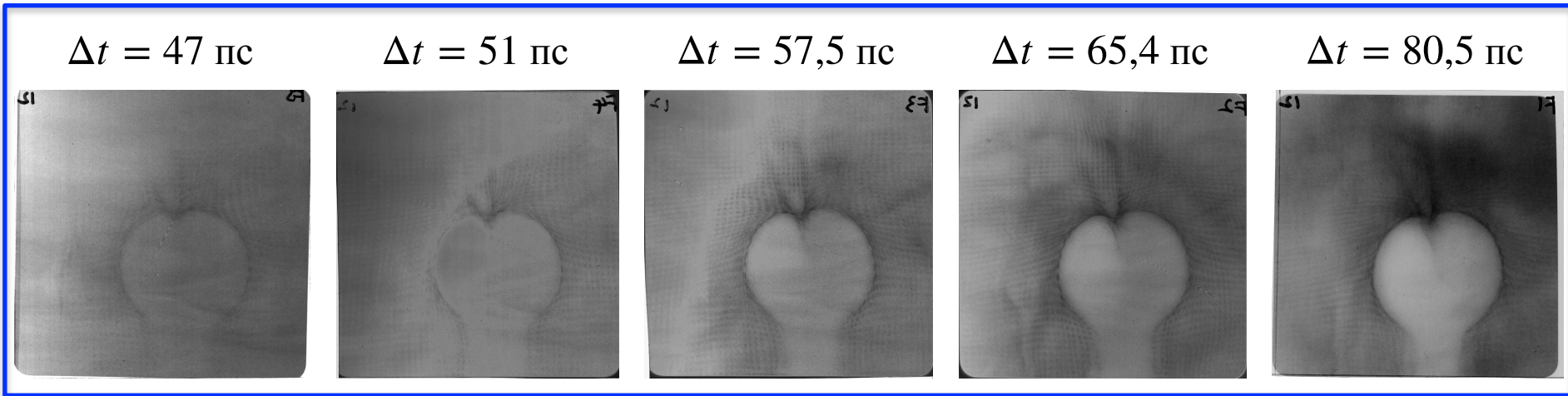
мишень S6



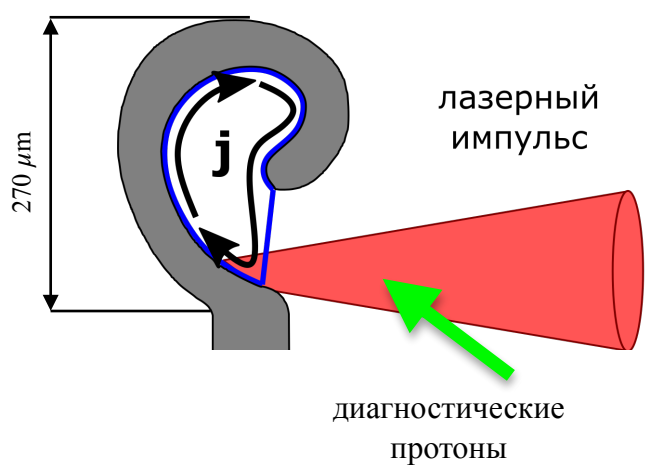
результаты выстрела №11



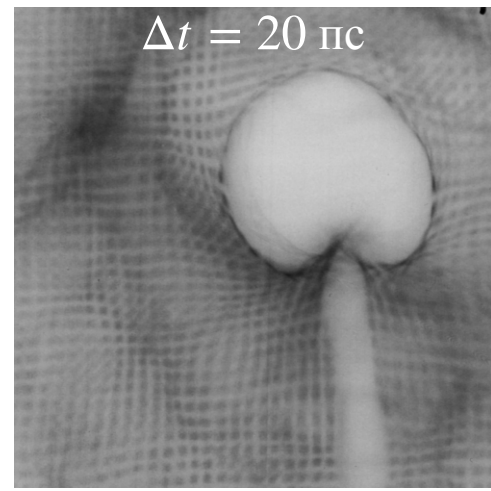
результаты выстрела №12



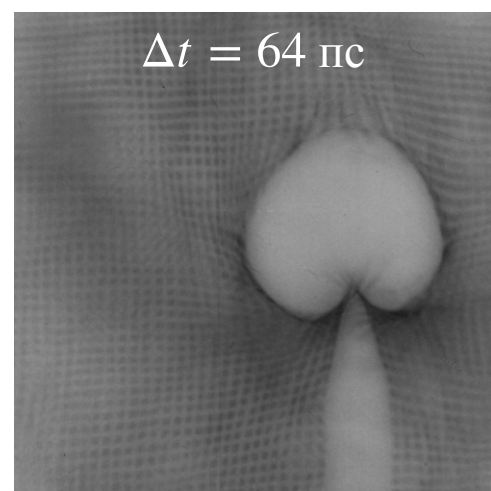
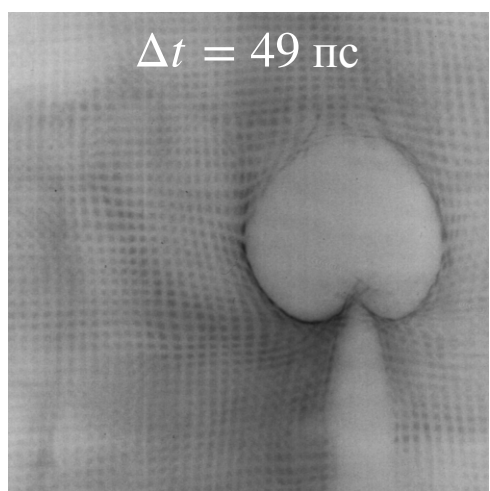
мишень S9

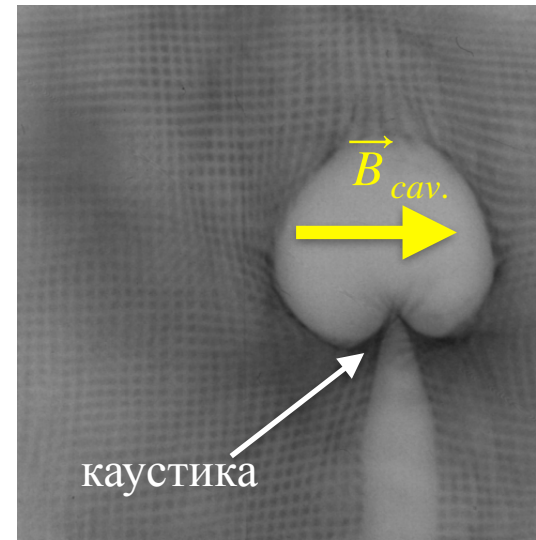
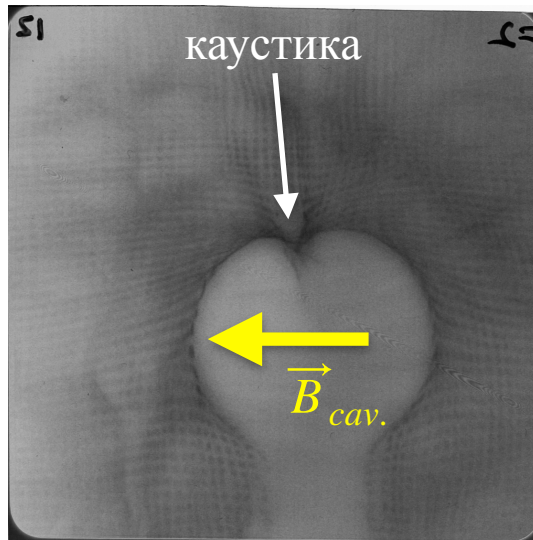


результаты выстрела №9



результаты выстрела №7





Противоположные ориентации контуров с разрядным током - противоположное расположение каустик

Необходимо решать сложную 3-мерную обратную задачу. Универсального алгоритма инверсии радиограмм не существует, но радиограммы можно рассчитать численно:

$$\frac{d\vec{p}_i}{dt} = q_p \cdot \left(\vec{E}(\vec{r}_i) + \frac{d\vec{r}_i}{dt} \times \vec{B}(\vec{r}_i) \right)$$

↑
модельное распределение
электрического поля $\vec{E}(U)$

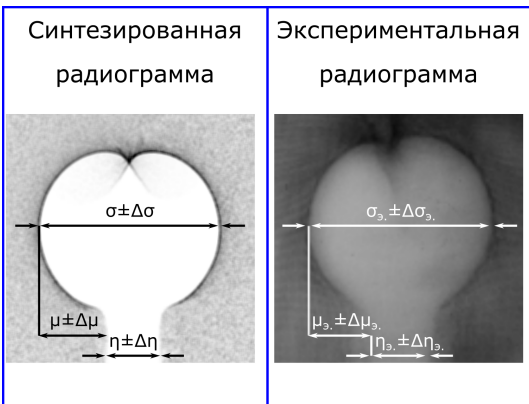
↑
модельное распределение
магнитного поля $\vec{B}(\vec{j}_1, \dots, \vec{j}_k)$



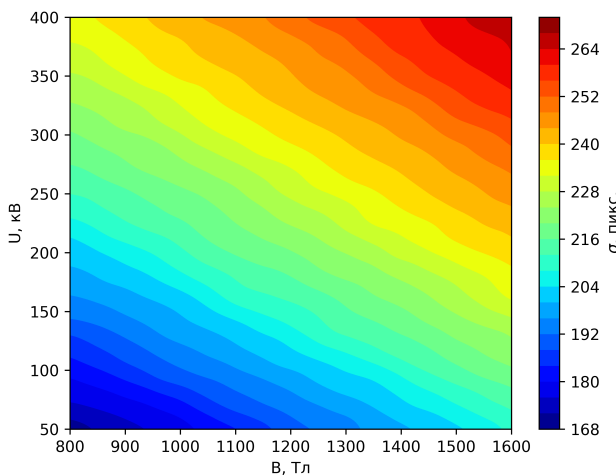
Качественный анализ с использованием метода пробных частиц демонстрирует, что характерные экспериментальные изображения формируются именно при наличии в области мишени магнитных полей

Оценка на основе сравнения геометрических параметров структуры на синтезированной радиограмме с соответствующими параметрами на экспериментальной радиограмме

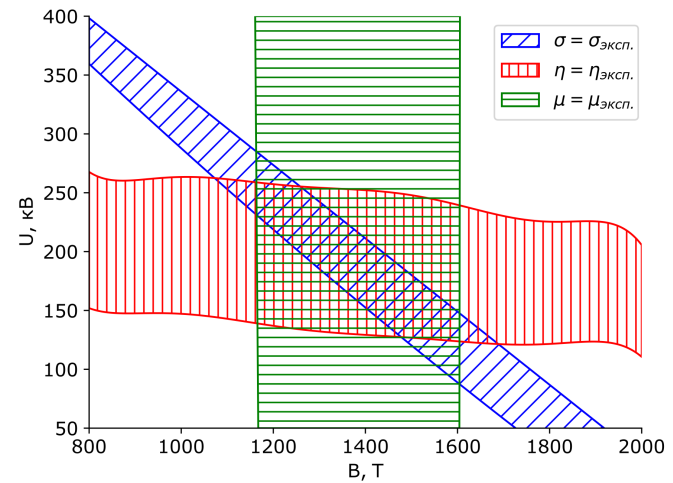
Пример геометрических параметров, на основе которых можно выполнить оценку полей



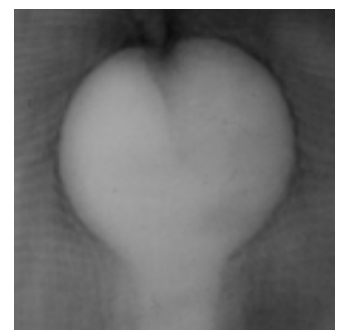
Карта зависимости величины σ от параметров полей



Результат параметрического подбора полей



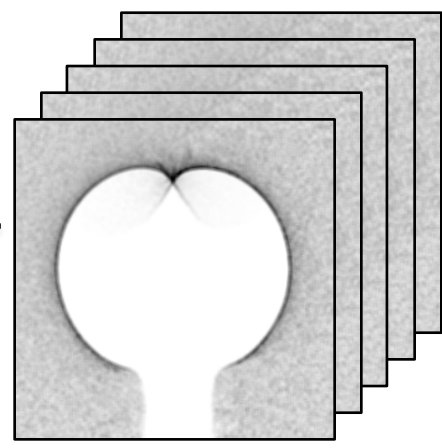
Параметрический подбор - предварительная оценка диапазона параметров полей, более точный результат - кросс-корреляционный анализ.



Экспериментальная радиограмма

кросс-корреляция

$$c(u, v) = \sum_{x, y} f(x, y) \cdot g(x - u, y - v)$$



Синтезированные радиограммы

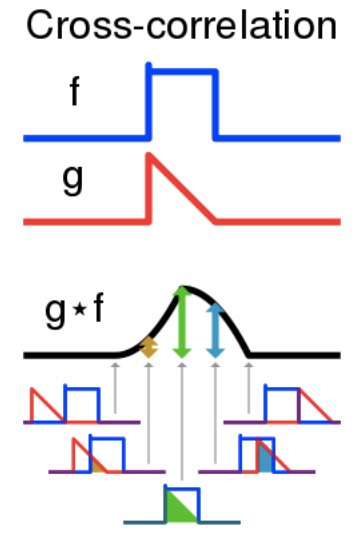
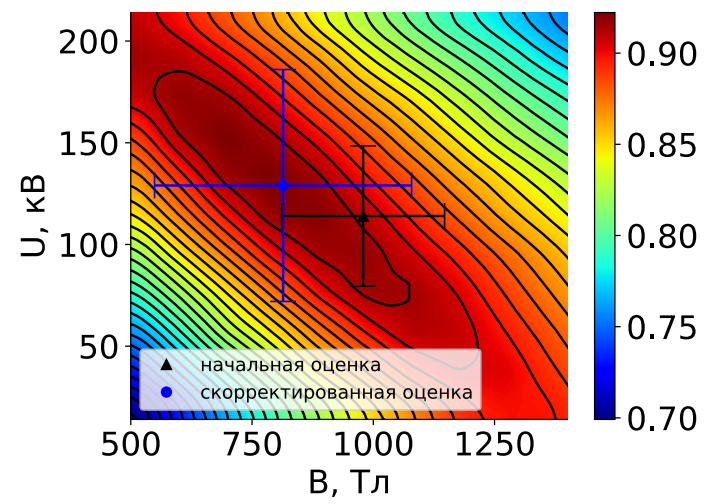


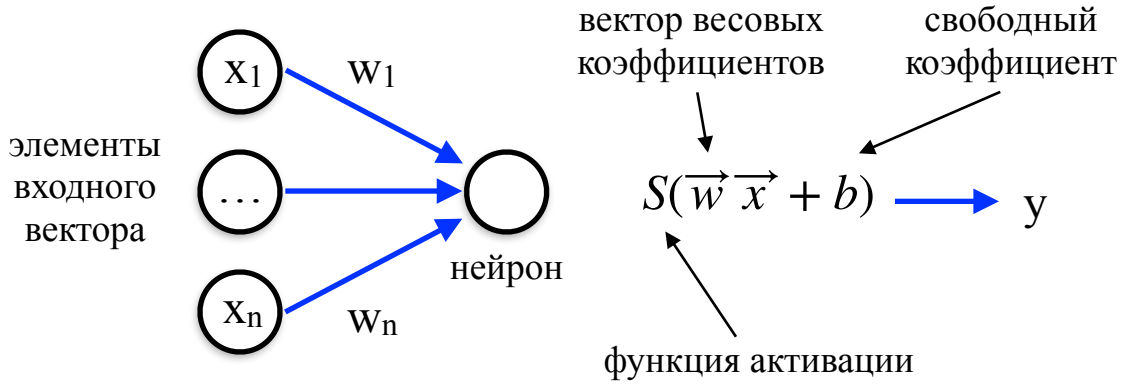
Иллюстрация одномерной кросс-корреляции

Кросс-корреляционный пик

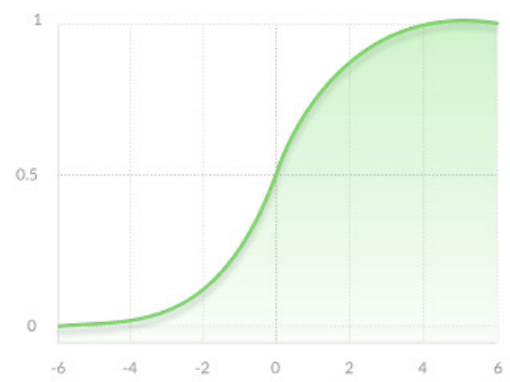


Кросс-корреляционный пик - более точная оценка параметров полей, учитывающая совпадение всей структуры радиограммы, а не отдельных геометрических параметров

Ограничение - высокая вычислительная сложность: для расчета стандартной кросс-корреляции изображений 500×500 требуется выполнить $6.25 \cdot 10^{10}$ операций перемножения

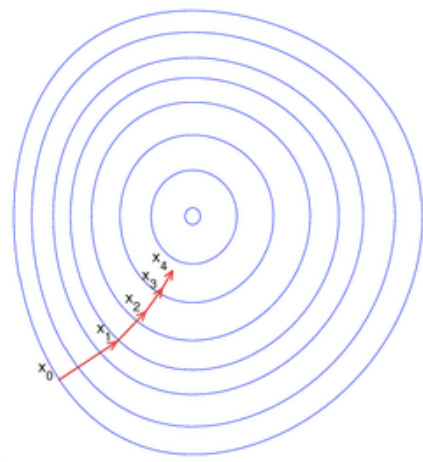


Сигмоидная функция активации $\sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$

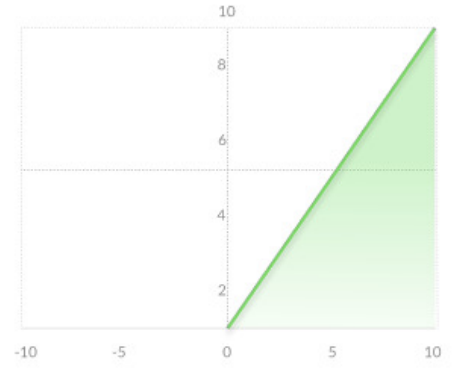


В задачах регрессии выходное значение y - скаляр или вектор.
Роль элементов входного вектора играют пиксели изображения.

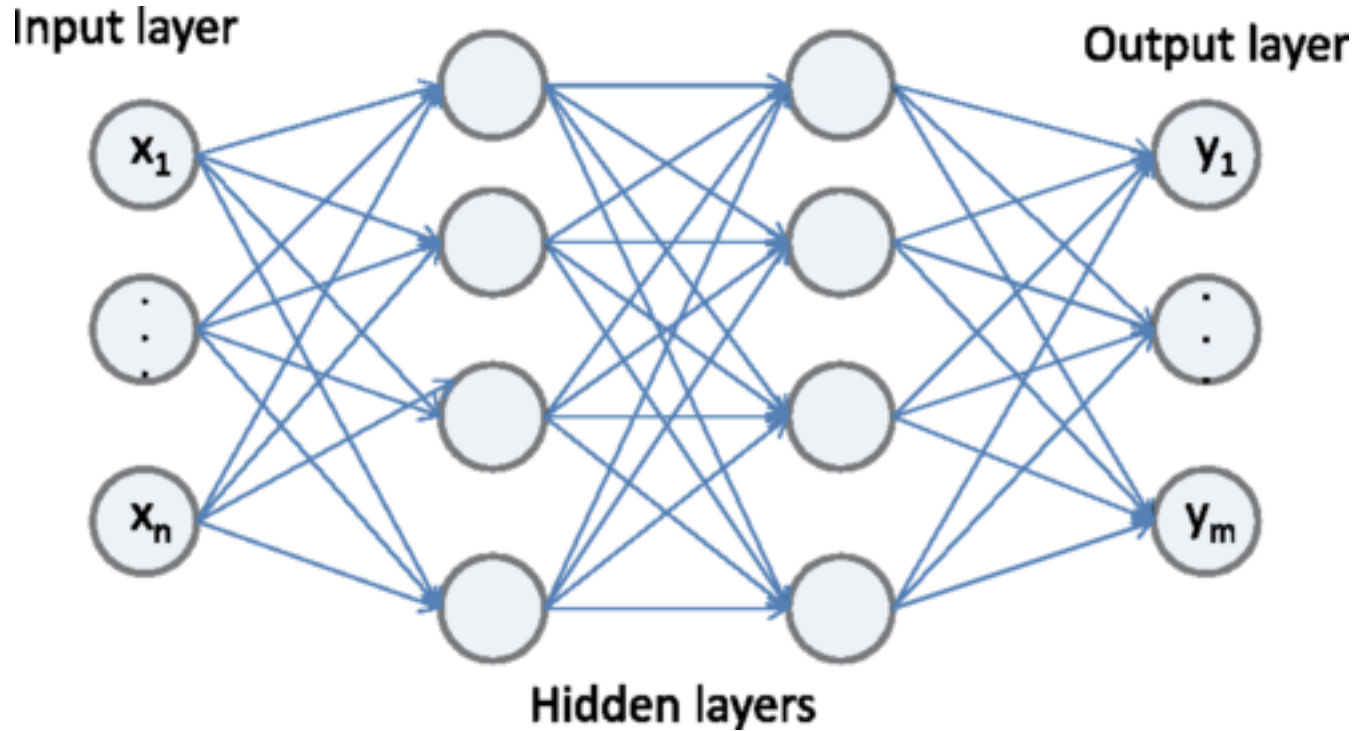
Иллюстрация метода градиентного спуска



Функция активации ReLU $f(z) = \max(0, z)$



Обучение - минимизация целевой функции (например, среднеквадратичной ошибки извлечения параметров) на основе различных оптимизационных алгоритмов (например, метода градиентного спуска)



N.F.Y. Chen *et al.* Phys. Rev. E **95**, 043305 (2017)

Прямоточность - информация между последовательно расположенными слоями передается только в одном направлении.

Полносвязность - каждый нейрон одного слоя соединен со всеми нейронами последующего слоя.

Пример архитектуры сверточной нейронной сети

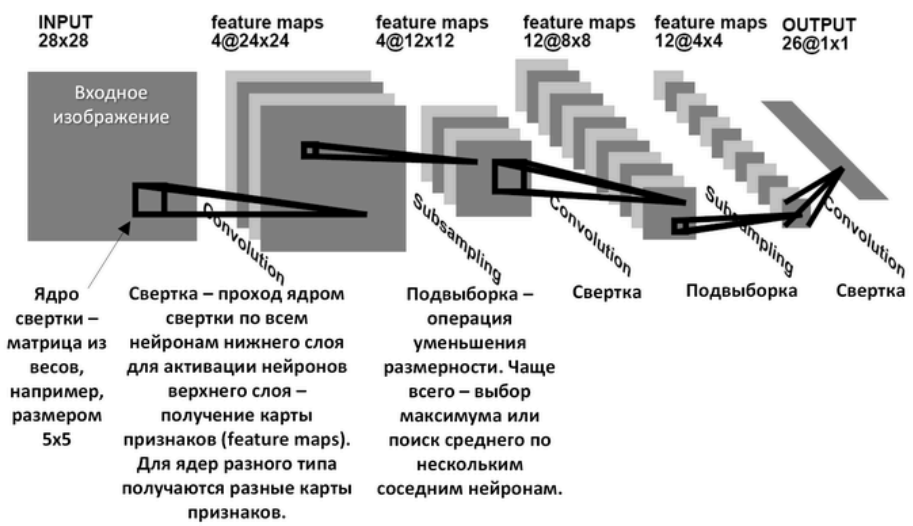
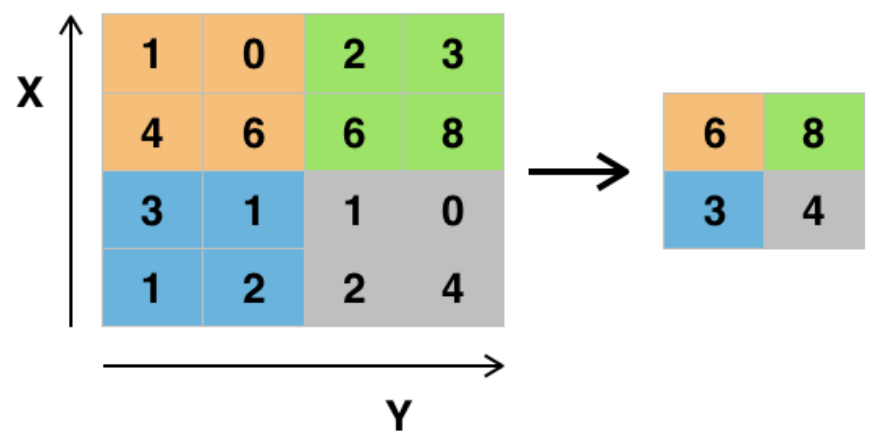
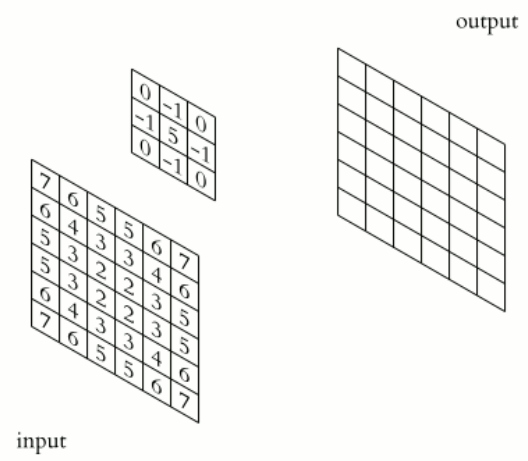


Иллюстрация процесса свертки входного изображения с фильтрующим ядром



Субдискретизация посредством извлечения максимального значения в каждой из окрестностей

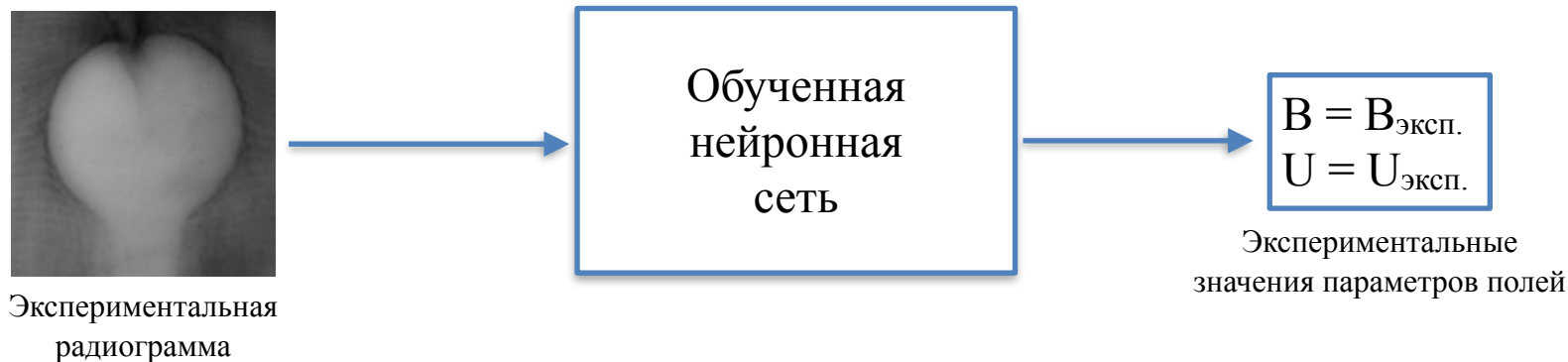
В данном случае размерность выходного вектора уменьшается в 4 раза

Общий принцип

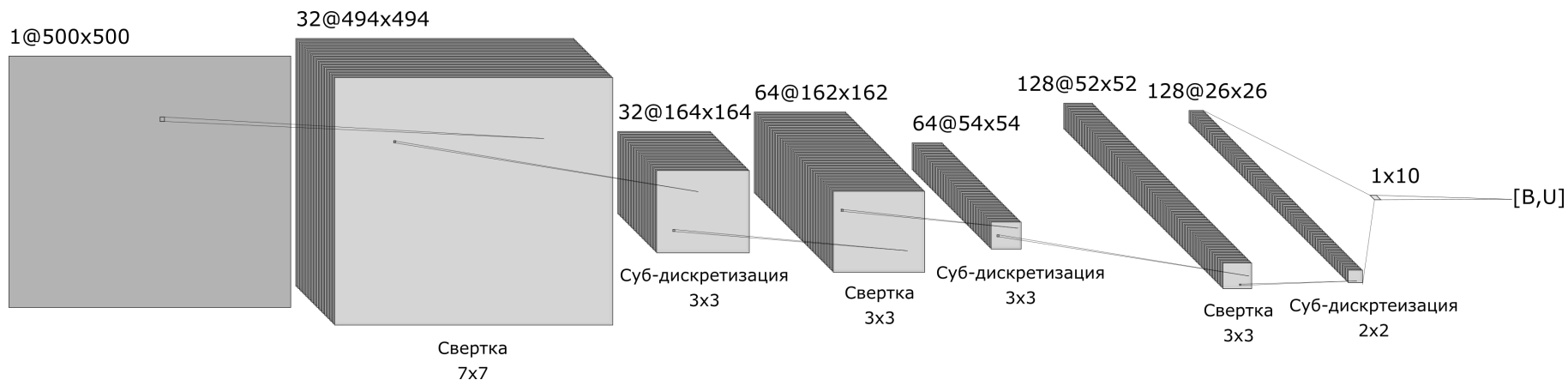
1. Обучение и валидация на синтезированных данных



2. Восстановление параметров полей по экспериментальной радиограмме



Для анализа радиограмм была разработана свёрточная нейронная сеть



тренировочный набор данных состоял из 525 синтезированных радиограмм;

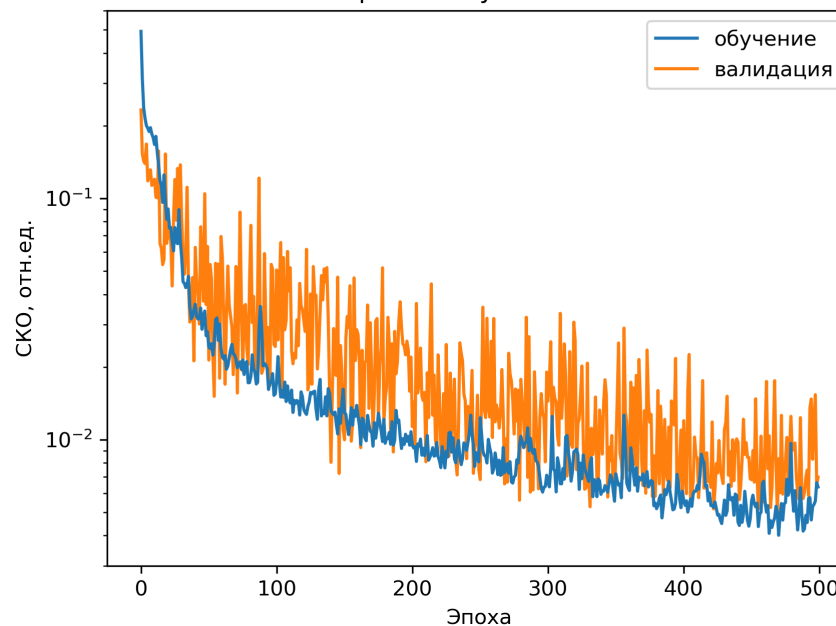
валидационный набор - из 143 радиограмм;

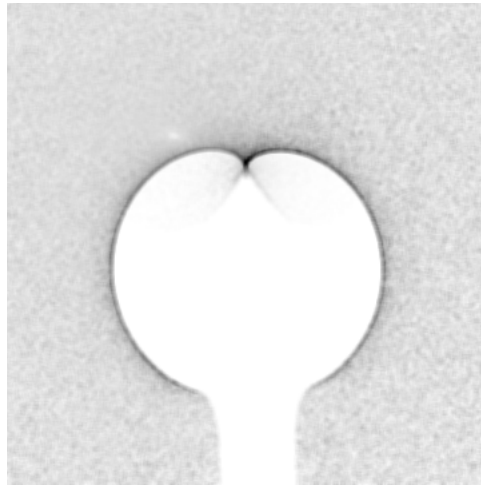
магнитное поле варьировалось в диапазоне ± 600 Т около ожидаемого значения;

электрический потенциал - в диапазоне ± 100 кВ около ожидаемого значения.

Расчет тренировочного набора данных занимает около часа на обычном ПК;
обучение нейронной сети - около 50 минут

Кривые обучаемости



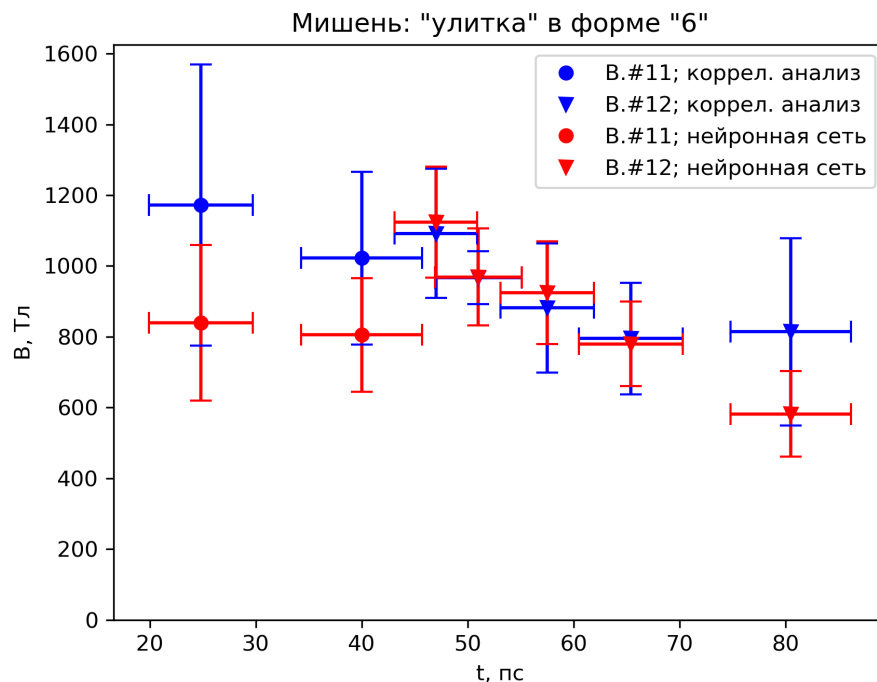


бинаризация + фильтрация
основного контура



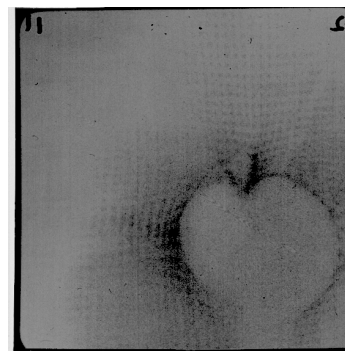
Основная информация об электромагнитных полях содержится именно в форме контура основной структуры.

Использование бинаризованных изображений этого контура способствует снижению ошибок, связанных с шумами и другими отличиями между экспериментальными и синтетическими данными.

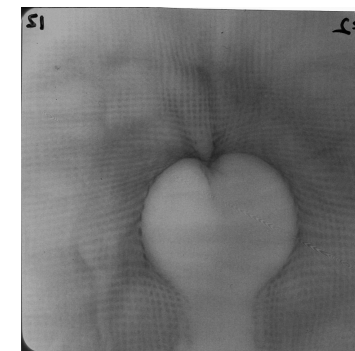


Результаты сходятся в пределах погрешности.
При этом вычислительные затраты на обучение нейронной сети компенсируются возможностью ее использования для обработки других радиограмм, полученных с данным типом мишени.

Возможная причина существенного отличия результатов для V.#11 - низкое качество экспериментальных изображений.

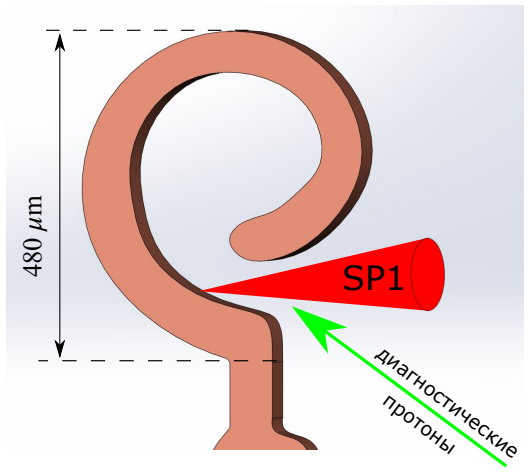


радиограмма для V.#11

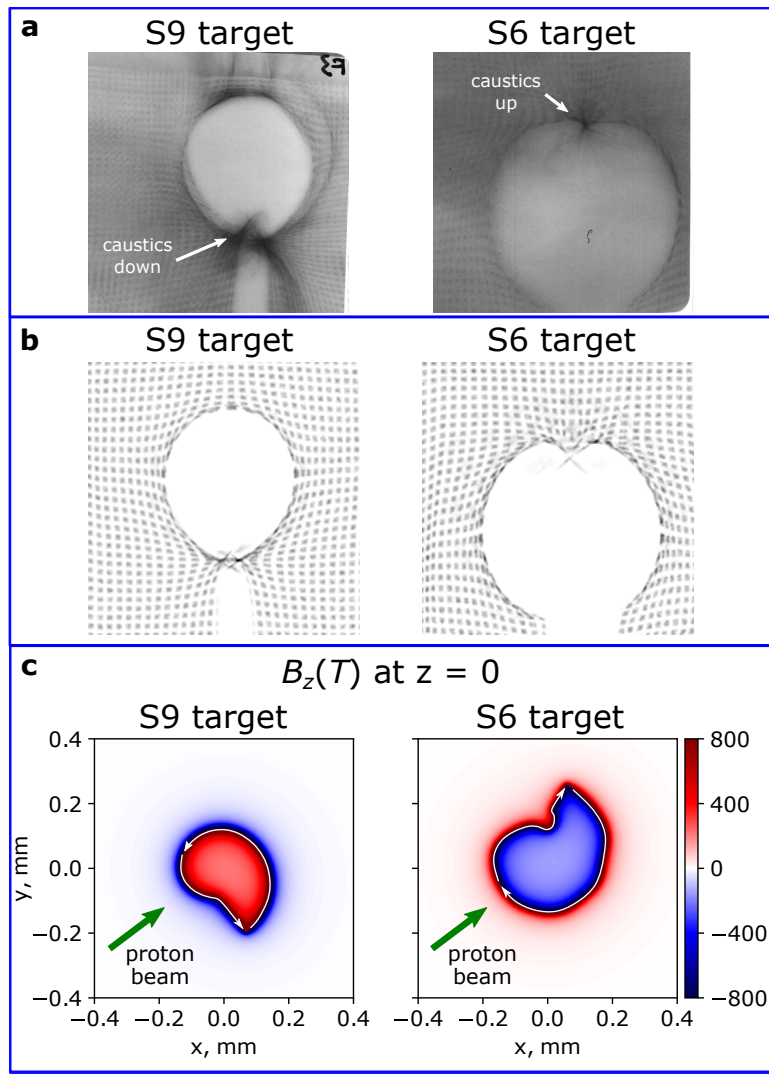
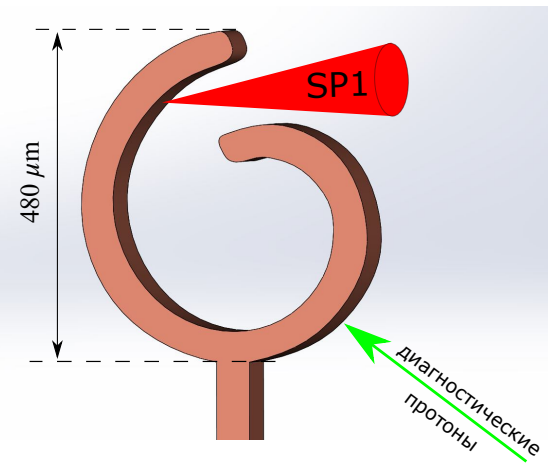


радиограмма для V.#12

мишень S9

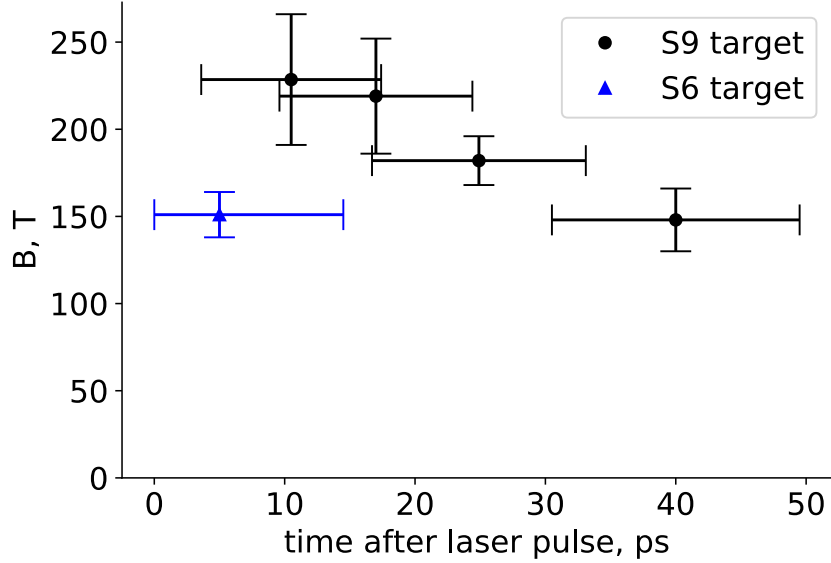


мишень S6

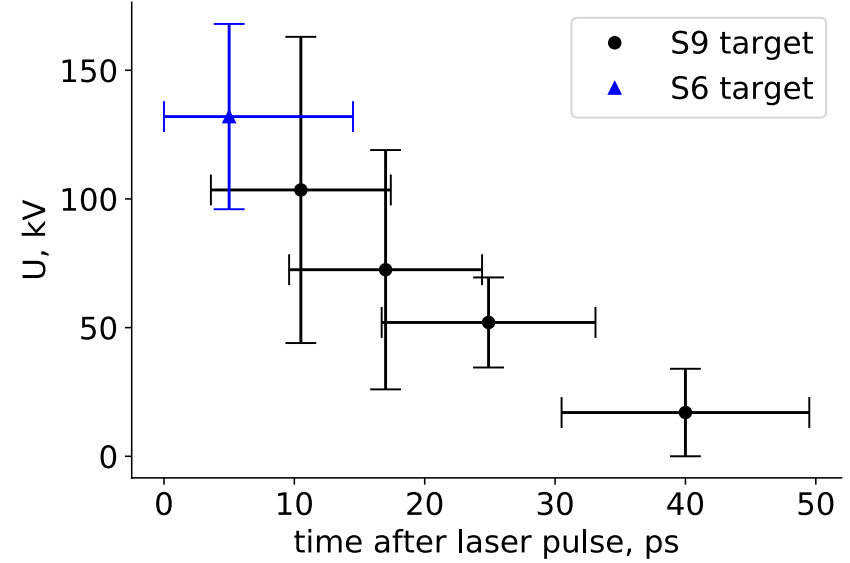


a: Экспериментальные радиограммы для мишеней S9 и S6, соответствующие моментам времени 17 ± 7 пс и 5 ± 10 пс с конца лазерного импульса; **b:** Синтетические радиограммы, полученные для восстановленных по экспериментальным радиограммам параметров электромагнитных полей в предположении однородной внутренней структуры магнитного поля; **c:** Однородная структура магнитного поля, на основе которой была выполнена оценка среднего магнитного поля во внутреннем объеме мишени

Average magnetic field in the cavity



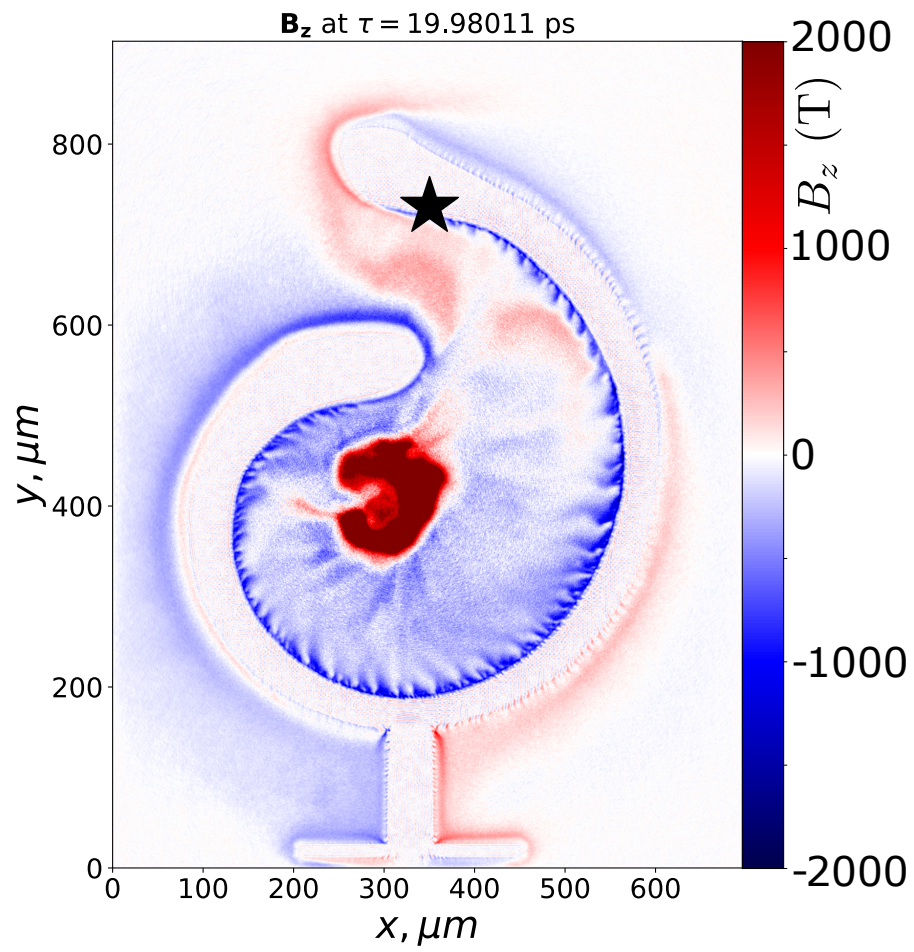
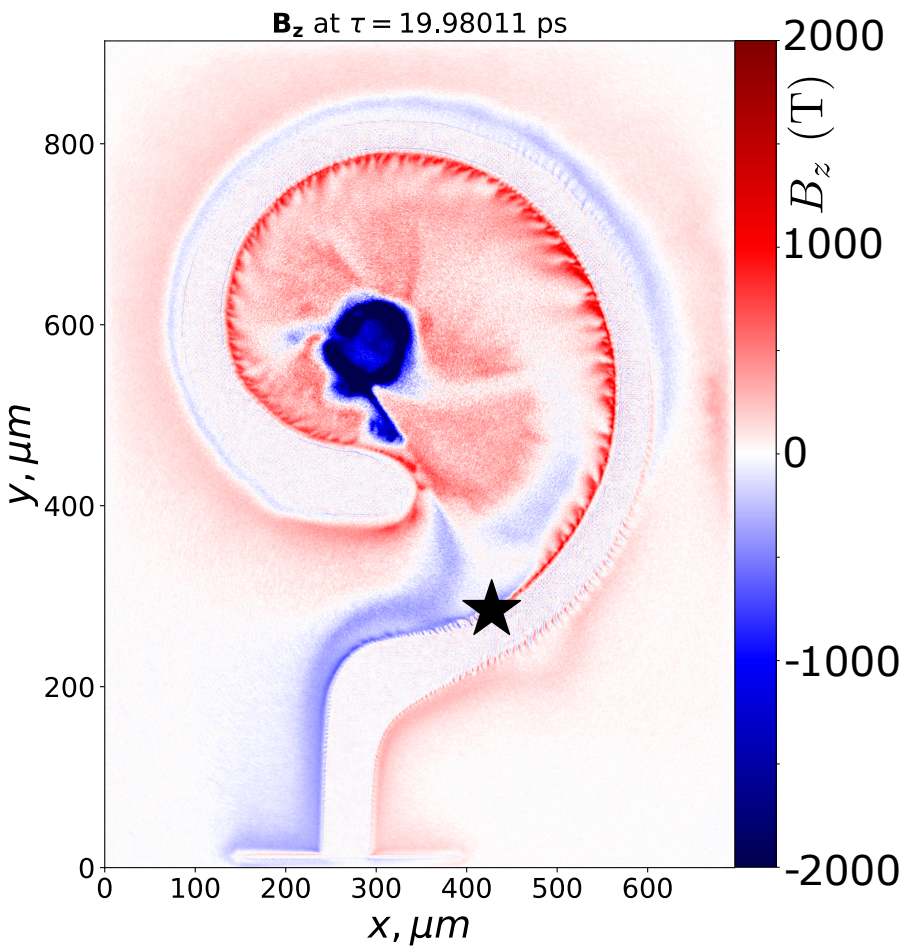
Electric potential of the target



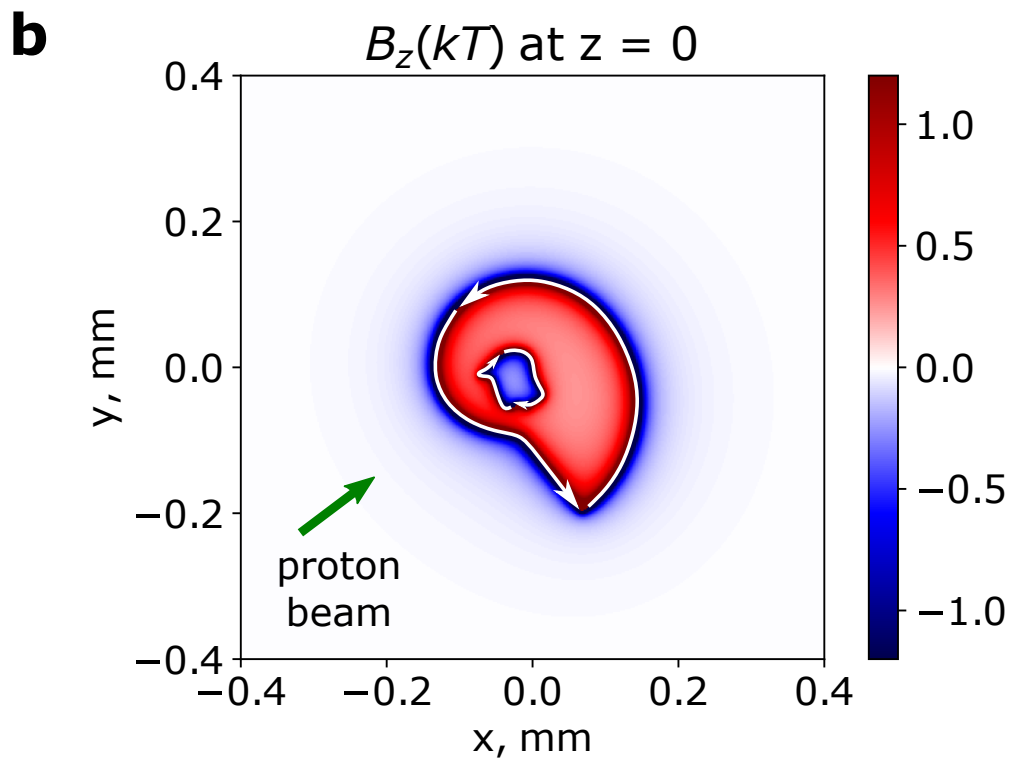
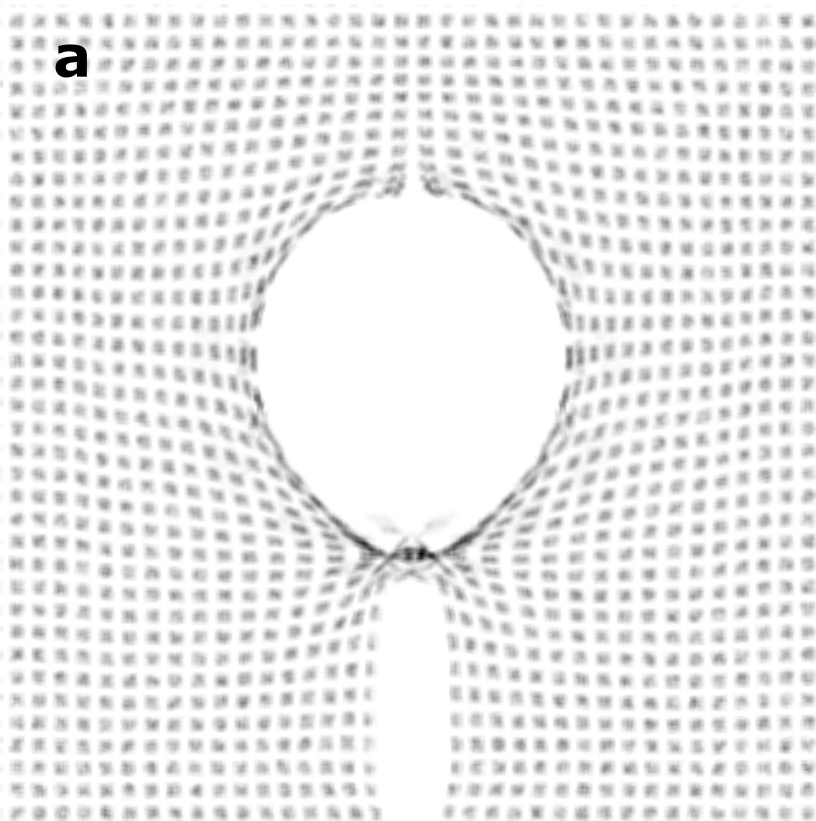
Графики среднего магнитного поля во внутреннем объеме мишени (слева) и электрического потенциала мишени (справа), полученные на основе корреляционного анализа экспериментальных радиограмм в предположении однородной внутренней структуры магнитного поля



Результаты двумерных PIC-симуляций для мишеней «улитка» с увеличенным диаметром



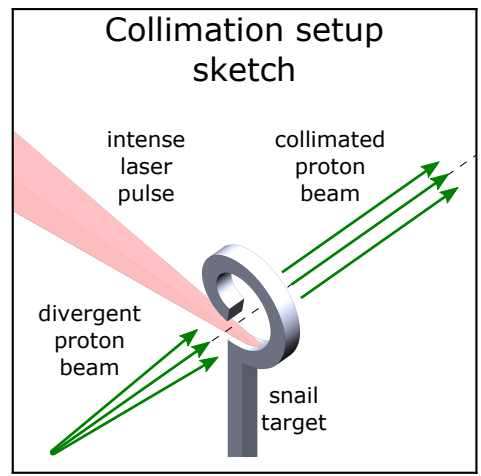
Коаксиальные распределения магнитного поля, создаваемые при облучении мишеней S9 (слева) и S6 (справа) в момент времени ≈ 20 пс



a: Синтетическая радиограмма, рассчитанная на основе подобранных при помощи корреляционного анализа параметров электромагнитных полей; **b:** Коаксиальное распределение магнитного поля, создаваемое двумя контурами, ток в которых был подобран при помощи корреляционного анализа экспериментальной радиограммы

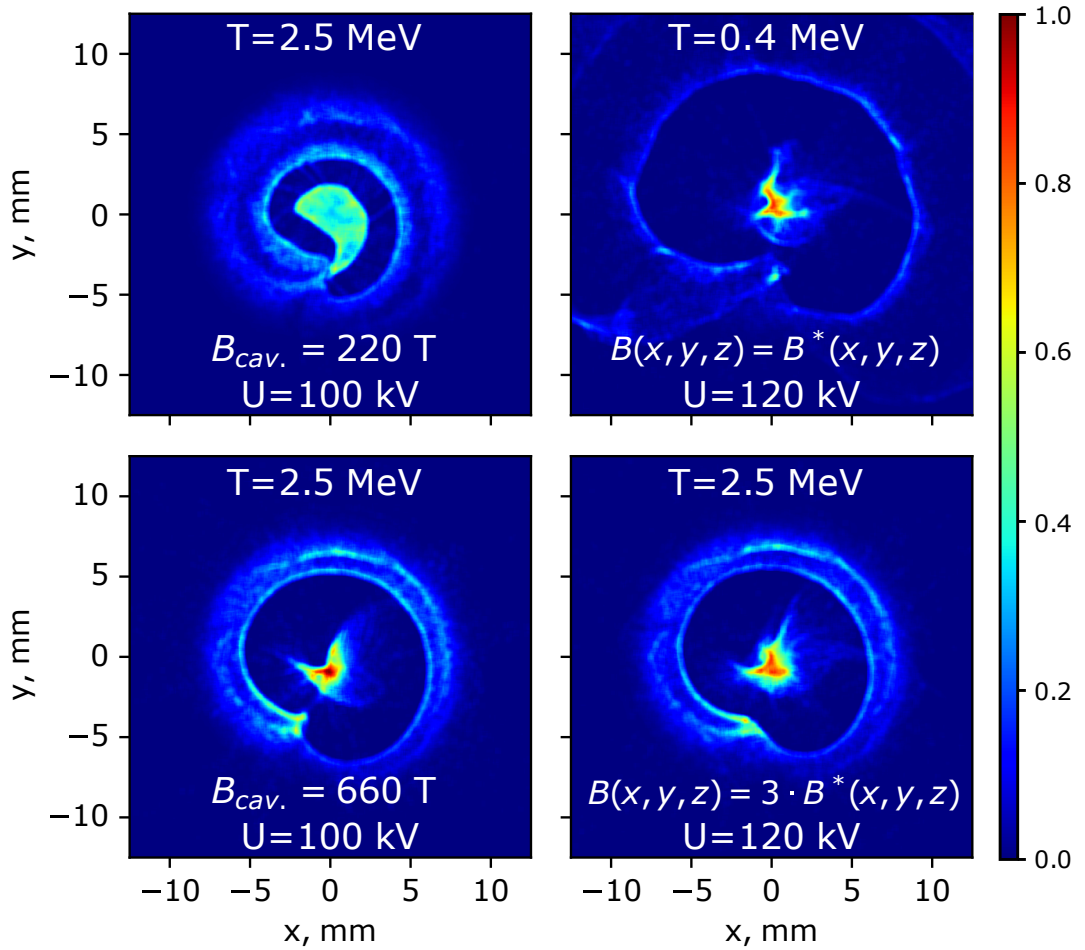
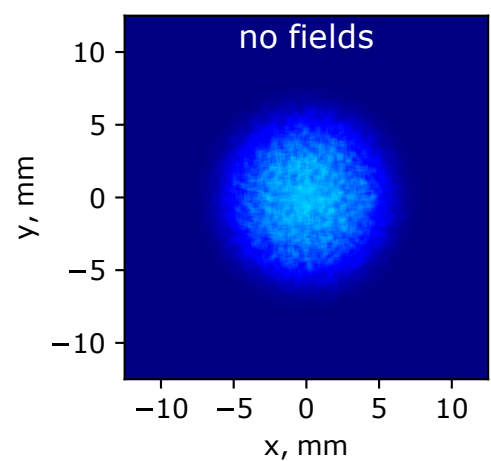
Сделать вывод о наличии внутренней области с противоположной полярностью магнитного поля на основе имеющихся данных затруднительно - требуется протонная томография

Схема коллимации пучка протонов при помощи мишени S9



Распределение частиц в пучке протонов с различной энергией, формируемое под воздействием электрического поля и магнитных полей различной структуры (слева - однородная; справа - коаксиальная) и величины; расстояние между источником протонов и мишенью - 2.9 мм; расстояние от мишени до плоскости «детектора» - 60 мм

Распределение протонов в пучке в отсутствие внешних полей; расстояние между источником протонов и мишенью - 62.9 мм



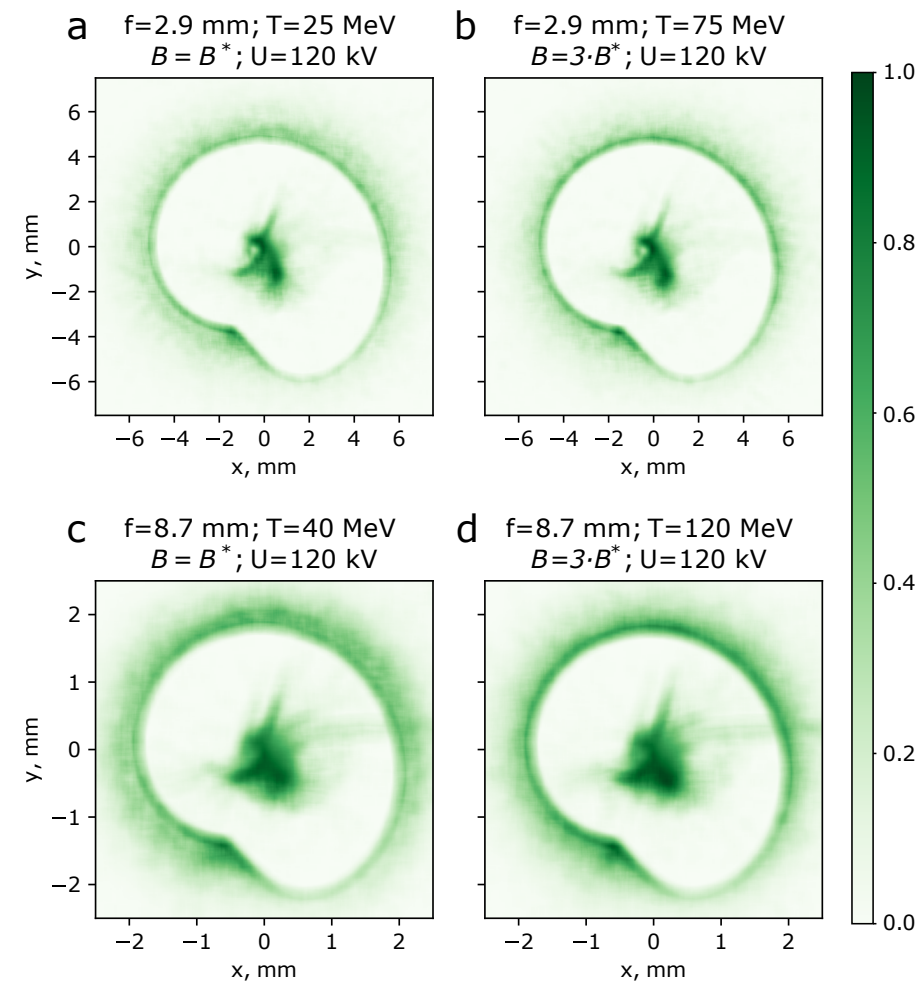
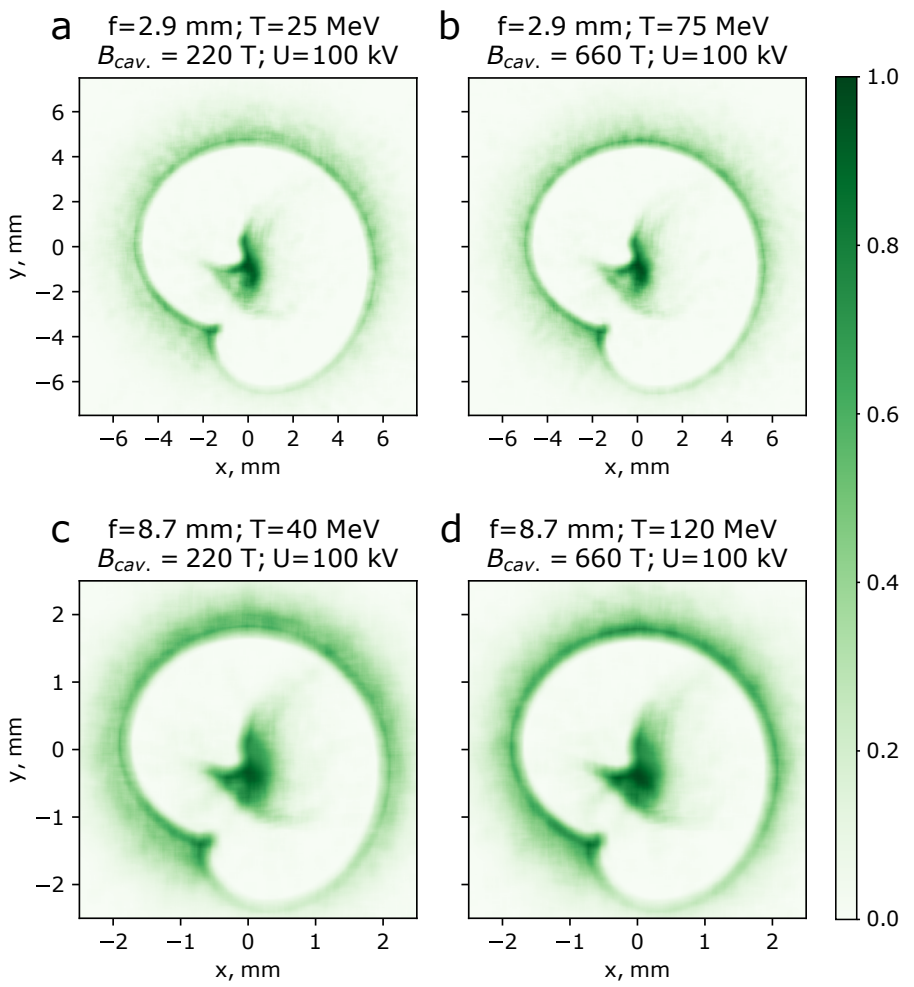


Коллимация релятивистских электронов с помощью мишеней типа «улитка» с увеличенным диаметром



Распределение частиц в пучке релятивистских электронов, создаваемое при различных соотношениях положения источника частиц, энергии частиц и величины однородного магнитного поля; расстояние от мишени до плоскости «детектора» - 60 мм

Распределение частиц в пучке релятивистских электронов, создаваемое при различных соотношениях положения источника частиц, энергии частиц и величины коаксиального магнитного поля; расстояние от мишени до плоскости «детектора» - 60 мм





О возможности «ахроматической» коллимации протонов

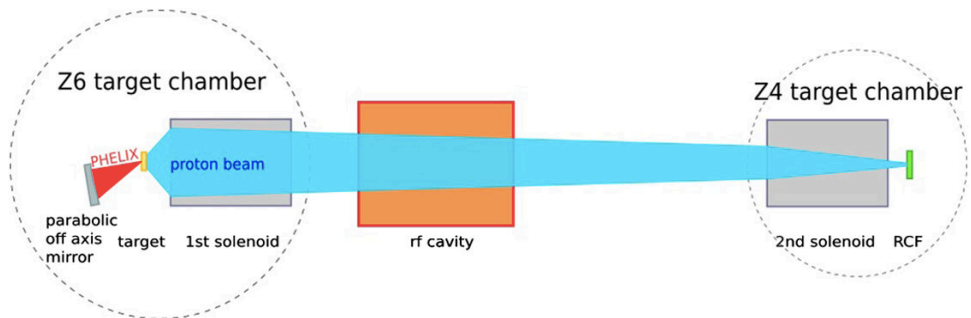


Схема для получения субнаносекундных сфокусированных протонных пучков (LIGHT beamline, GSI)

D. Jahn *et al.* PRAB 22, 011301 (2019)

Ахроматическая коллимация на начальном этапе → увеличения числа протонов, попадающих в резонатор

В предположении, что магнитная линза представляет собой тонкое проводящее кольцо радиуса R , ее фокусное расстояние будет определяться по формуле:

$$f \sim \frac{E}{R \cdot B_0^2}$$

где $E \approx \frac{mV^2}{2} = \frac{mf^2}{2t^2}$ - кинетическая энергия протонов, t - время пролета протона с соответствующей энергией до

области магнитного поля, B_0 - магнитное поле в центре кольца

С учетом вклада от электрического поля мишени, заряженной до потенциала U , получаем:

$$\frac{\alpha U}{R} + \beta R B_0^2 = \frac{f}{t^2}, \text{ где } \alpha \text{ и } \beta - \text{ константы}$$

Если магнитное поле распадается как t^{-1} , а электрическое как t^{-2} с необходимой скоростью, они будут одинаково коллимировать как высокоэнергетичные протоны, пролетающие мишень в ранние моменты времени, так и менее энергетичные, пролетающие через мишень в более поздние моменты

Так, если магнитное поле уменьшается с **660 Тл** до **510 Тл** за **40 пс**, с его помощью можно добиться «ахроматической» коллимации в диапазоне энергий **≈1.5 - 2.5 МэВ**



Заклучение



- проведена серия экспериментов по генерации магнитного поля в пикосекундном режиме в мишенях типа улитка разного размера
- разработана свёрточная нейронная сеть для анализа экспериментальных радиограмм
- с помощью предложенных методов выполнена обработка данных для оптических генераторов магнитного поля типа «улитка» и подтверждена эффективная генерация в них магнитных полей свыше 1000 и 200 Тл для мишеней разного размера при энергии лазерного импульса 50 Дж
- рассмотрена возможность применения исследуемых мишеней для коллимации потоков заряженных частиц - протонов с энергией в несколько МэВ и релятивистских электронов с энергиями в десятки МэВ



université
de BORDEAUX



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



P.N. Lebedev
Physical Institute



大阪大学
OSAKA UNIVERSITY



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!