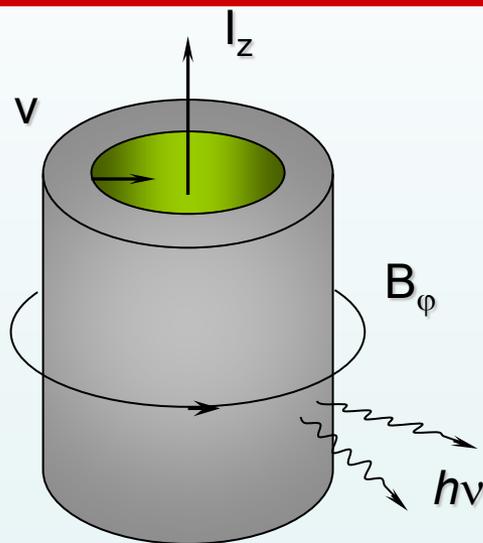

Орешкин Владимир Иванович
Институт сильноточной электроники СО РАН

**Радиационные и термодинамические свойства
плотной плазмы пинчей**

Z-пинчи и плазменные лайнеры



4 фазы сжатия:

- инициация разряда;
 - сжатие лайнера;
 - стагнация;
 - разлёт плазмы.
- **Инерциальный термоядерный синтез** (схемы ИТС: Dynamic Hohlraum; MagLIF; MAGO и др.).
 - **Генерация сильных магнитных полей.**
 - **Исследование экстремальных состояний вещества.**
 - **Имитатор воздействий ядерного взрыва.**
 - **Источники излучения** (для ИТС, рентгеновской литографии, модификации поверхностей, исследования взаимодействия излучения с веществом).
 - Физическое описание динамики пинчей основывается на **радиационном магнитогидродинамическом (РМГД) приближении.**
 - Расчет излучение плазмы основывается на ударно-излучательных моделях.
 - Основные виды излучения: **тормозное излучение; рекомбинационное излучение; излучение в спектральных линиях.**

- осесимметричные плазменные объекты, сжимаемые собственным магнитным полем.

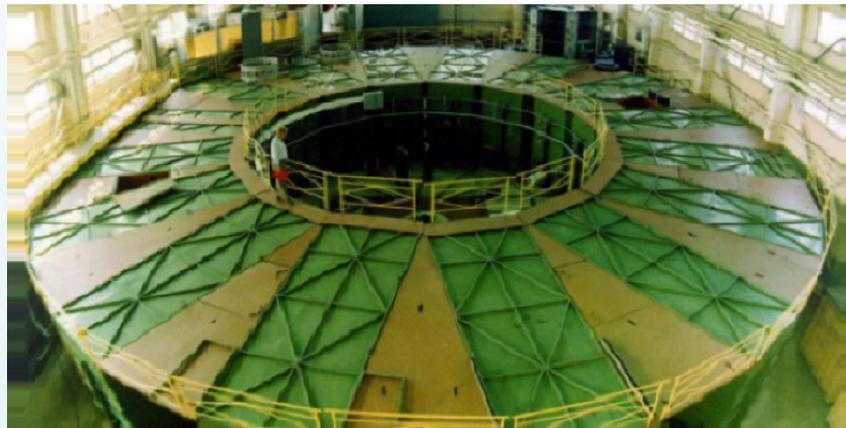
Применения пинчей

Сильноточные импульсные генераторы тераваттного уровня мощности

Генератор МИГ (3 МА, 100 нс)
ИСЭ СО РАН

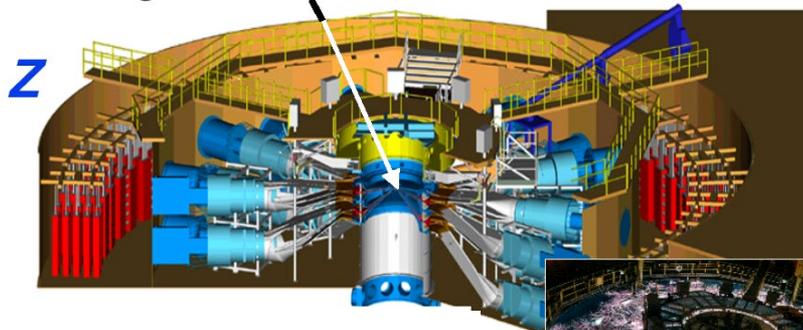


Генератор ГИТ-12 (6 МА, 1.8 мкс)
ИСЭ СО РАН



Ангара-5-1
(5 МА, 100 нс)
ТРИНИТИ, Троицк

Target Chamber



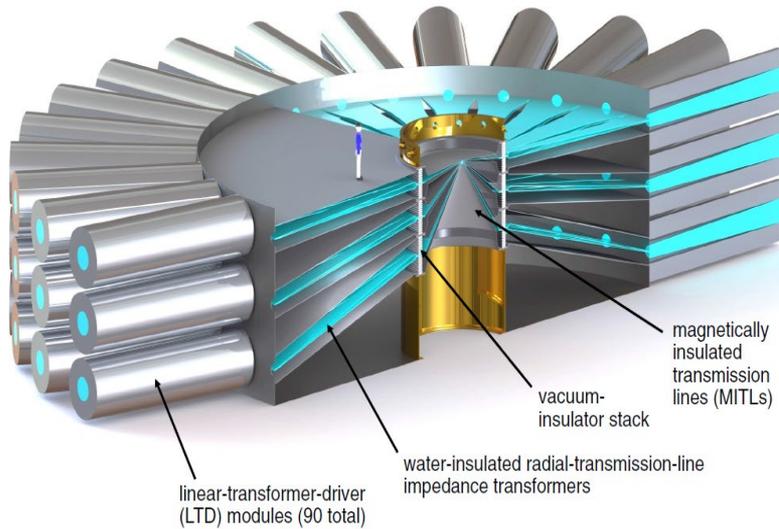
Генератор Z
(20 МА, 100 нс)
Сандия, США



Проектируемые высокоточные импульсные генераторы

W. A. STYGAR *et al.*

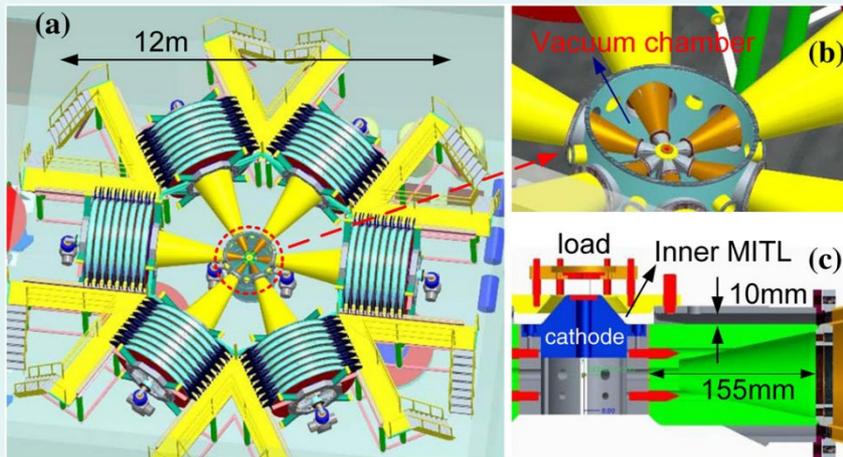
Phys. Rev. ST Accel. Beams 18, 110401 (2015)



Генератор Z 300,
ток ~50 МА,
Сандия, США



Генератор Ангара-15,
ток ~ 15 МА
ТРИНИТИ, Троицк



LTD-генератор,
ток ~ 6 МА,
Миньян, Китай

Радиационный коллапс

В природе возможно два вида коллапса:

- Гравитационный коллапс;
- Электромагнитный коллапс (пинч-эффект).

При радиационном коллапсе соблюдается условие беннетовского равновесия (Bennett W.H., 1934):

$$\nabla p = \frac{1}{c} \mathbf{J} \times \mathbf{B} \Rightarrow kT = \frac{m_i I^2}{2c^2 m(1+Z)}$$

$$p \nabla \mathbf{v} = \frac{\mathbf{J}^2}{\sigma} - \nabla \mathbf{W}_R$$

I - ток; m - масса пинча;

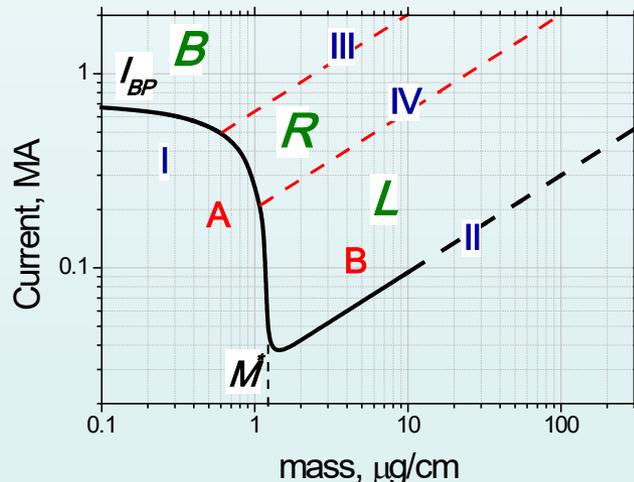
Z - средний заряд ионов.

\mathbf{v} - скорость;

\mathbf{W}_R - поток излучения.

Уравнение баланса энергии:

Границы радиационного коллапса определяются из уравнения баланса энергии при $\mathbf{v} = 0$.



Кривая I - при преобладании тормозного и рекомбинационного излучения, описывается уравнением:

$$\frac{I^2}{I_{BP}^2} + \frac{m}{M^*} = 1$$

где

$$I_{BP} = 0.22 \sqrt{\lambda} \frac{Z_{яд} + 1}{Z_{яд}} \quad \text{- ток Брагинского-Пизе [С.И.Брагинский 1951, R.S.Pease, 1957];}$$

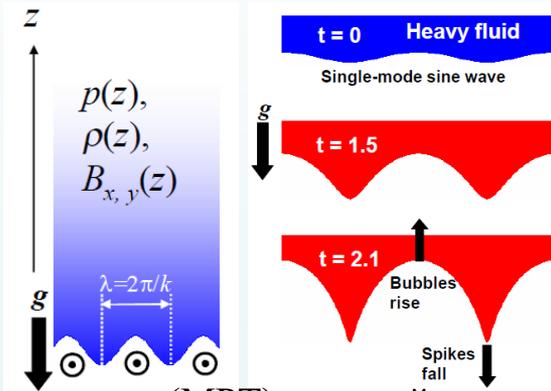
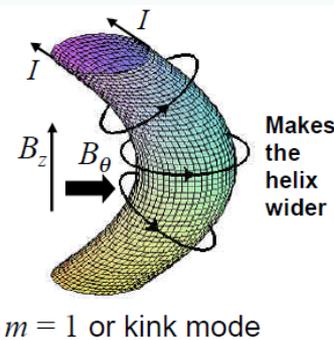
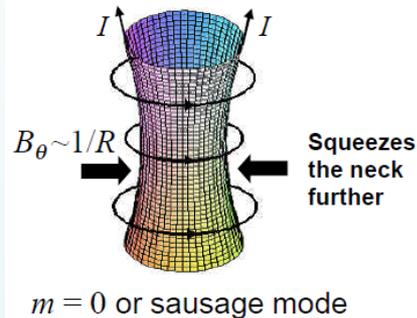
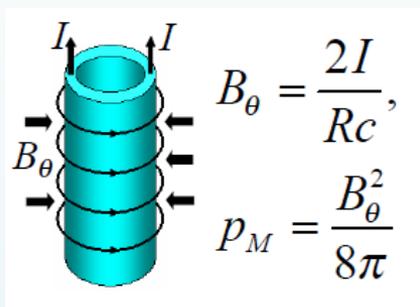
$$M^* = 9.5 \lambda \frac{A(Z_{яд} + 1)}{Z_{яд}^4}$$

Кривая II - при преобладании излучения спектральных линий.

Кривые III, IV - изотермы.

I-m диаграмма области радиационного коллапса [Орешкин В.И. О радиационном коллапсе в Z-пинчах //Изв. вузов Физ. – 1997. – Т. 40. – №. 12.]

Магнитные Рэлей-Тейлоровские неустойчивости Z-пинчей



Амплитуды малых возмущений $\sim \exp\{\gamma t + ik_z z + im\theta\}$

Для моды $m=0$ инкремент нарастания: $\gamma \sim \sqrt{-gk_z}$

Магнитная Рэлей-Тейлоровская (МРТ) неустойчивость является наиболее опасной при сжатии пинчей.

МРТ-неустойчивости затухают при положительном значении ускорения g , то есть при торможении оболочки.

Способы подавления МРТ-неустойчивостей:

- Использование генераторов с малым фронтом нарастания тока;
- Ведение начального аксиального магнитного поля;
- Двухкаскадные лайнеры;
- Каскадированные лайнеры с внешним аксиальным магнитным полем;
- Пинчи с гауссовским начальным распределением плотности (металло-плазменные лайнеры, сформированные с помощью системы вакуумно-дуговых разрядов);
- Использование предыонизации;

Цель исследований: добиться больших степеней сжатия пинчей, то есть больших значений температуры и плотности плазмы в финале имплозии.

Стабилизация пинчей с помощью аксиального магнитного поля

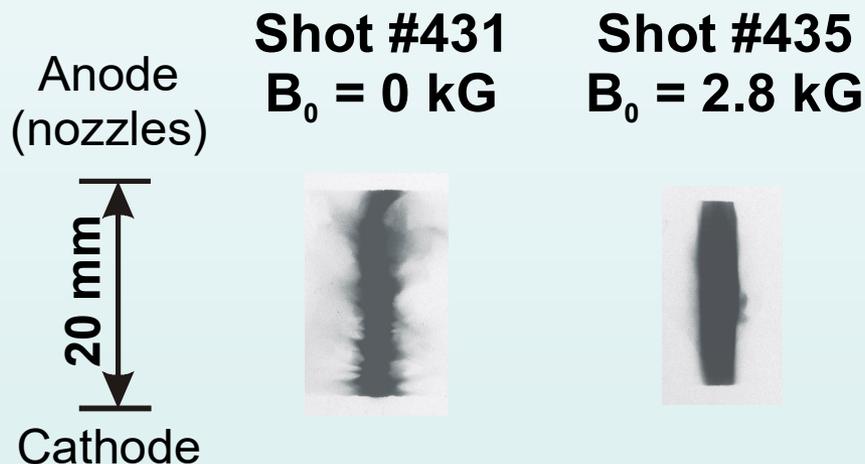
Критерий стабилизации лайнеров аксиальным магнитным полем, аналог критерия Шафранова-Крускала:

$$B_{z0} [\text{кГс}] \geq (10 - 20) \frac{I_{\text{max}} [\text{МА}]}{R_0 [\text{см}]}$$

при 10-ти кратном сжатии величина аксиального магнитного поля сравнивается с азимутальным и значение ускорения пинча становится положительным, а МРТ- неустойчивости затухают:

$$\gamma \sim \sqrt{-gk_z}$$

Эксперименты с неоновым лайнером проводились на генераторе ИМРИ-4 при уровне тока 500 кА и времени нарастания тока 450 нс [Chaikovsky S.A., Labetsky A.Yu., Oreshkin et al., *The K-shell radiation of a double gas puff z-pinch with an axial magnetic field // Laser and particle beams. – 2003.*]



Без магнитного поля Shot #431:

$$Y_k = 1160 \text{ Дж/см}; \quad P_k = 180 \text{ ГВт/см}$$

$$T_e = 1.4 \div 1.7 \text{ кэВ}; \quad N_i = (7 \div 10) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$$

С магнитным полем Shot #435:

$$Y_k = 275 \text{ Дж/см}; \quad P_k = 50 \text{ ГВт/см}$$

$$T_e = 1 \div 1.2 \text{ кэВ}; \quad N_i = (6 \div 7.7) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$$

Результат:

Использование аксиального магнитного поля приводит к стабилизации пинча в финале сжатия, но в то же время оно ведет к уменьшению мощности и выхода мягкого рентгеновского излучения.

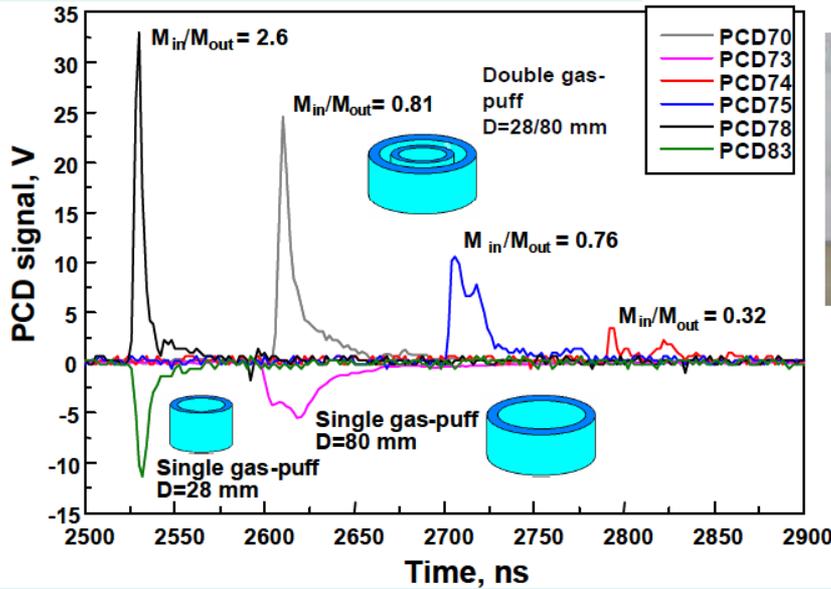
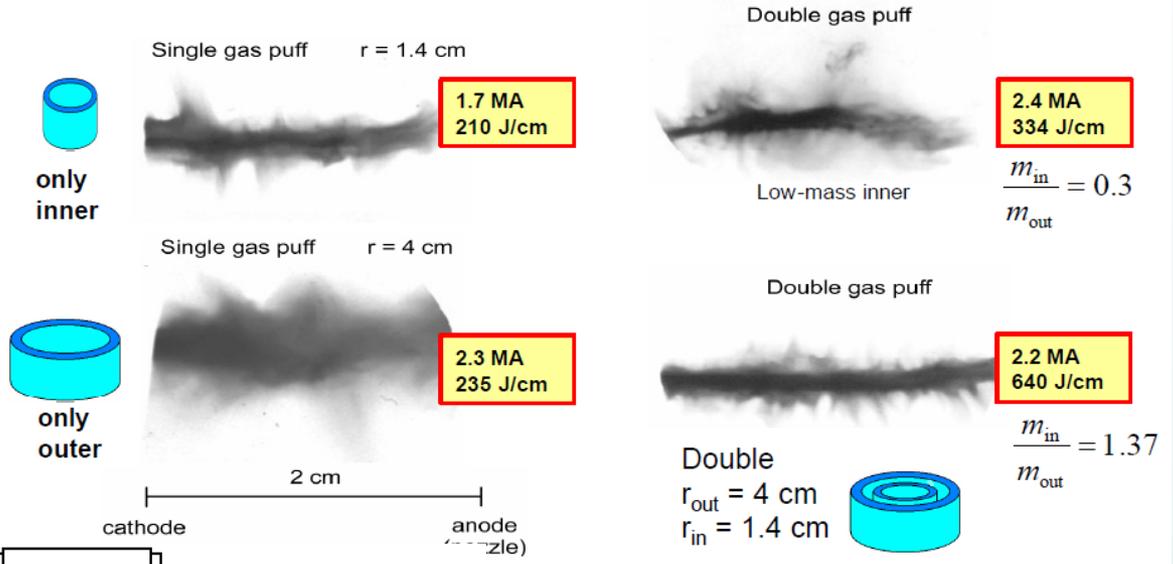
Стабилизация сжатия пинчей за счет каскадирования оболочек

[A.V.Shishlov, R.B.Baksh, A.V.Fedunin, F.I.Fursov, B.M.Kovalchuk, V.A.Kokshenev, N.E.Kurmaev, A.Yu.Labetsky, V.I.Oreshkin, A.G.Russkikh, A.Fisher, B.Moosman, B.V.Weber— *Physics of plasmas* – 2001. – Т. 9.]

Эксперименты на ГИТ-12
 Подавление Рэлей-Тейлоровских
 неустойчивостей при сжатии
 двухкаскадных пинчей:

$$\gamma \sim \sqrt{-gk_z}$$

при положительном значении
 ускорения пинча МРТ-
 неустойчивости затухают.



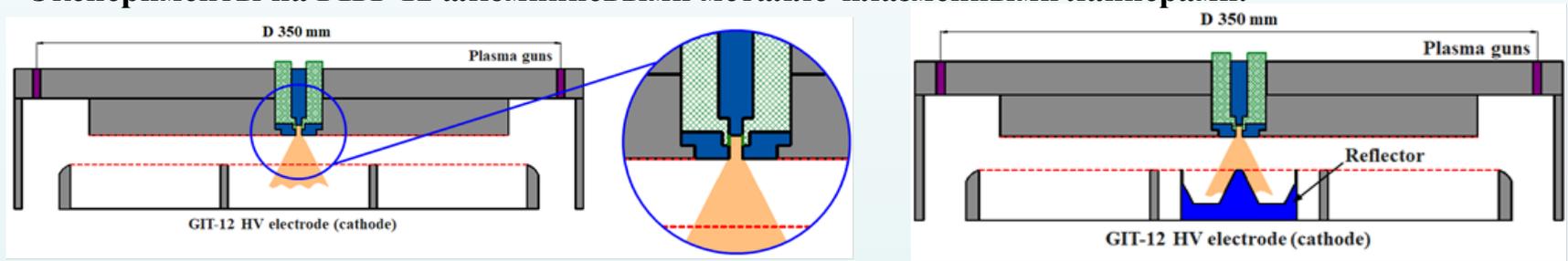
Titan Pulse
 Science Division
 1234 double shell
 nozzle

Результат:
 в экспериментах и РМГД-
 расчетах найдены
 оптимальные с точки зрения
 выхода мягкого
 рентгеновского излучения
 соотношения масс и радиусов
 внешней и внутренней
 оболочек.

Сжатия металло-плазменных лайнеров

Металло-плазменные лайнеры формируются с помощью системы вакуумно-дуговых разрядов, при этом начальное распределение плотности плазмы (температура 1-3 эВ) описывается **функцией Гаусса** [Oreshkin V.I., Baksh R.B., Cherdizov R.K. et al. *Studies on the implosion of pinches with tailored density profiles* // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. – 2021. – T. 63. – №. 4.]

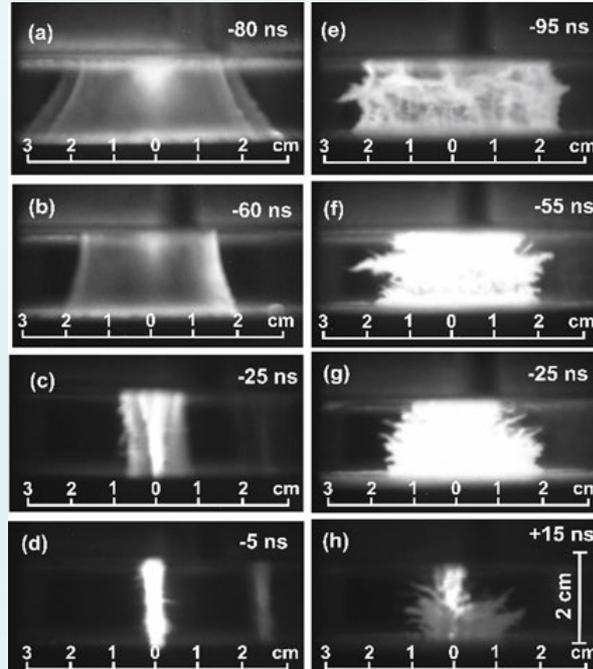
Эксперименты на ГИТ-12 алюминиевыми металло-плазменными лайнерами.



При начальном гауссовом профиле плотности плазменная оболочка после короткого периода ускорения тормозится за счет механизма snow-plow (набора массы).

$$\gamma \sim \sqrt{-gk_z}$$

При положительном значении ускорения пинча в процессе его сжатия МРТ- неустойчивости не развиваются.



Время визуализации указано в верхнем правом углу каждого изображения. ($t = 0$ соответствует моменту имплозии)

Результат:
Использование гауссовского профиля плотности приводит к стабилизации сжатия пинча. В металло-плазменных лайнерах реализуются рекордные мощность и выход мягкого рентгеновского излучения.

Мощный источник рентгеновского излучения с энергией квантов 7-20 кэВ

Цель. При радиационных испытаниях: в диапазоне $h\nu < 7$ кэВ - Z-пинчи (излучение в K-линиях); в диапазоне >20 кэВ - релятивистские электронные пучки; диапазон 7-20 кэВ?

В пинчах для сильноизлучающих веществ существует «радиационный барьер» (излучение в мягком спектре). Величина «радиационного барьера» растет с ростом атомного номера. В работе [Velikovich A.L., Davis J., Oreshkin V.I. et al. High energy photon radiation from a Z-pinch plasma // *Physics of Plasmas*. – 2001. – Т. 8. – №. 10.] разработана аналитическая модель, в которой показано, что для диапазон 7-20 кэВ рекомбинационный механизм излучение становится выгоднее, чем излучение в спектральных линиях. Следует использовать вещества с атомным номером от 18 до 22.

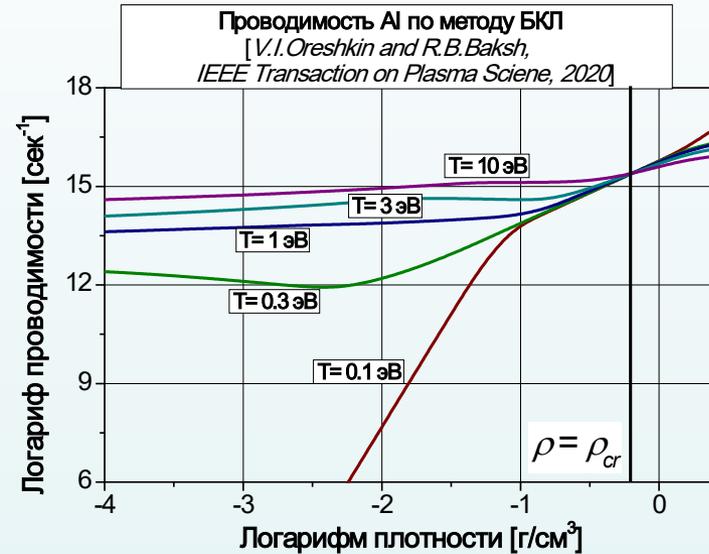
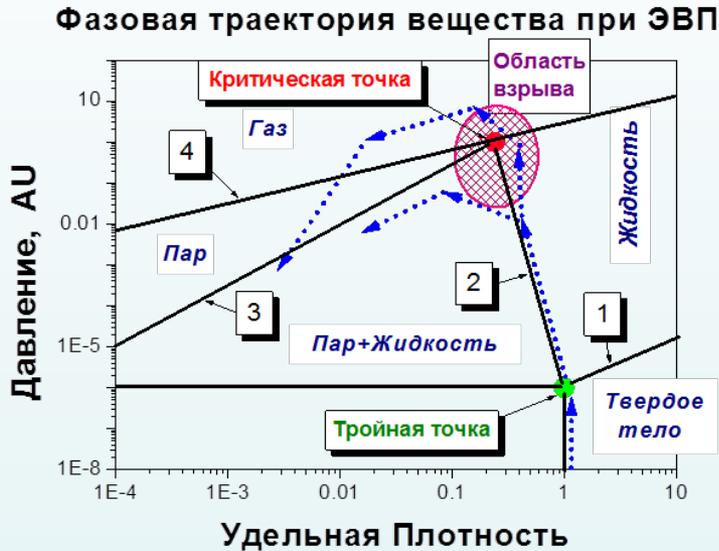
Эксперименты с двухкаскадными лайнерами проводились на генераторе ГИТ-12 (Ne, Al и Ar, 2.5 МА) [Орешкин В.И., Бакуит Р.Б., Лабецкий А.Ю. и др., Исследование рекомбинационного излучения плазменных лайнеров // *Письма в ЖТФ*. – 2005. – №. 13.] и генераторе Z (Ar, 15МА) [Jones B., Deeney C. ...and Oreshkin V.I., K-shell radiation physics in low-to moderate-atomic-number z-pinch plasmas on the Z accelerator // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2006. – Т. 99. – №. 1-3.].

Результат: Эксперименты на генераторе ГИТ-12 и генераторе Z полностью подтвердили выводы модели и МРГД моделирования. Показано, что рекомбинационное излучение Z-пинчей, сжимаемых на мультимегаамперных генераторах, является безальтернативным мощным (10^{12} - 10^{14} Вт) источником излучения в диапазон 7-20 кэВ.



Результаты экспериментов на генераторе Z (Сандия) и МРГД-расчеты

Исследование проводимости металлов вблизи критической точки с помощью электрического взрыва проводников (ЭВП) в воде



Для построения таблиц использовался метод БКЛ (Бакулин-Куропатенко-Лучинский), в котором предполагается, что переход металл-диэлектрик происходит в критической точке, то есть в точке фазовой диаграммы, в которой сходятся жидкая, газовая и двухфазная области.

Для Al, Ti, Cu и W проводимость в критической точки лежит в пределах $(1700-2600) \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Эта величина близка к «минимальной металлической проводимости» (предел Иоффе-Регеля):

$$\sigma_{\min} \approx A \frac{e^2 n_e^{1/3}}{\hbar}$$

Теоретическое значение безразмерного коэффициента: $A \approx 0.1$

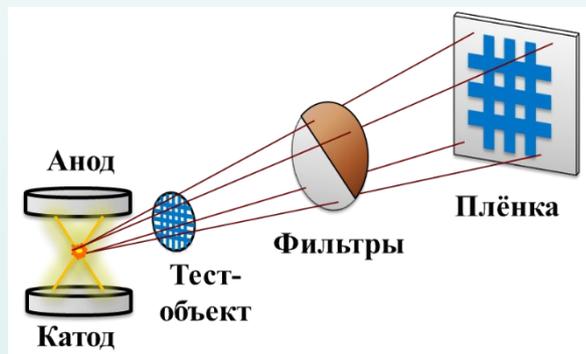
Значение безразмерного коэффициента, определенное в экспериментах по ЭВП:

$$A \approx 0.2 \div 0.3$$

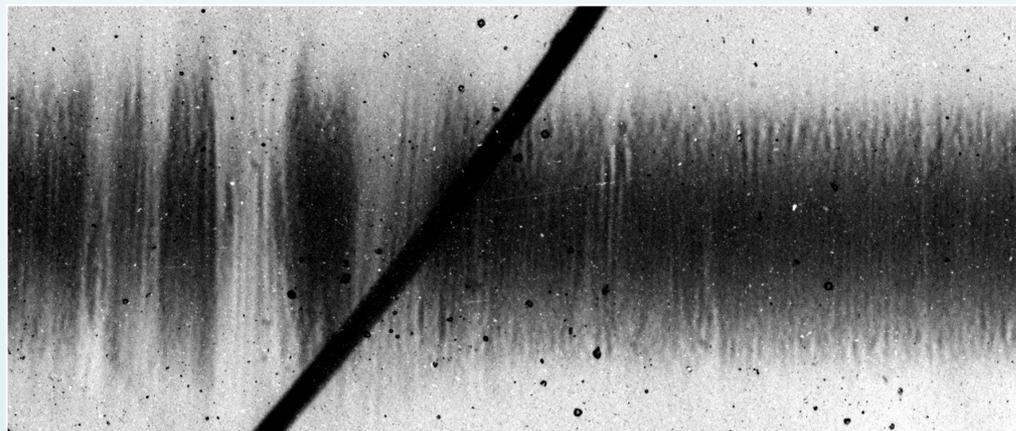
Результат: совокупность экспериментальных данных (по ЭВП в воде) и МГД расчетов позволили построить таблицы проводимости различных металлов (алюминий, титан, медь, вольфрам) в широком диапазоне термодинамических параметров.

Формирование страт при ЭВП в быстром режиме (плотность тока $> 10^7$ А/см²)

В работе [Oreshkin V.I., Baksht R.B., Ratakhin et al. *Wire explosion in vacuum: Simulation of a striation appearance //Physics of plasmas.* – 2004. – Т. 11. – №. 10] с помощью МГД расчетов было показано, что в страты образуются как результат развития перегревных неустойчивостей. В работе [Oreshkin V.I., *Thermal instabilities during an electrical wire explosion //Physics of plasmas.* – 2008. – Т. 15. – №. 9] была построена теория перегревных неустойчивостей определены, определены их инкременты нарастания и характерные длины волн для различных фазовых состояний (жидкость, метастабильная жидкость, двухфазная область). Экспериментальные результаты опубликованы в цикле работ, в частности, в [Roussikh A.G., Oreshkin V.I., Chaikovskiy S.A. et al. *Study of the strata formation during the explosion of a wire in vacuum //Physics of Plasmas.* – 2008. – Т. 15. – №. 10.].

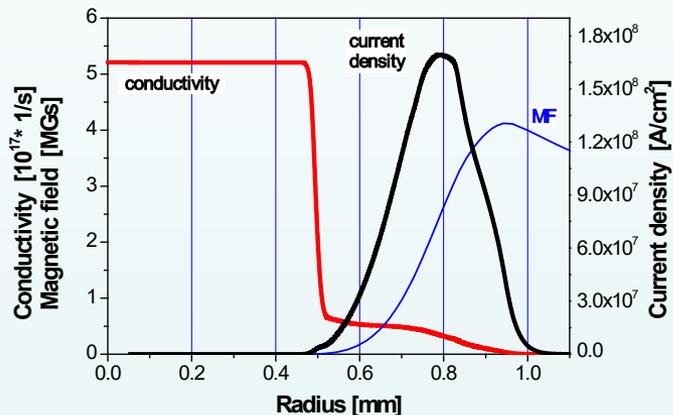


Источник мягкого рентгеновского излучения с размерами < 1 мкм и длительностью < 1 нс..



Результат: Эксперименты по электрическом взрыву микропроводников при плотностях тока $> 10^7$ А/см² полностью подтвердили теоретические выводы. Было доказано, что в быстром режиме взрыва страты образуются в результате развития перегревных неустойчивостей.

ЭВП в мегагауссных магнитных полях при скоростях роста $(2-5) \cdot 10^{13}$ Г/сек

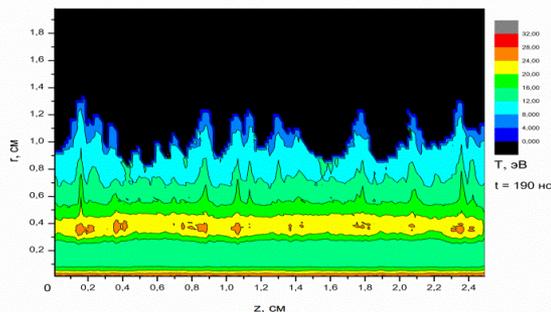
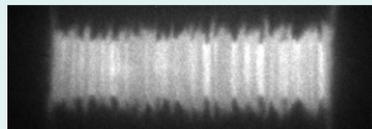
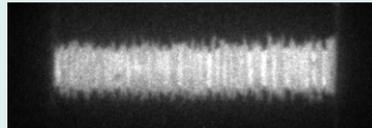
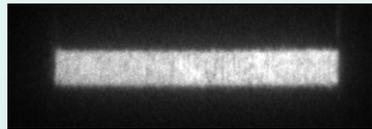
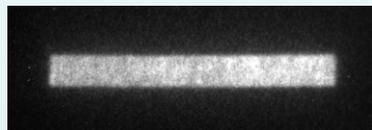


Эксперименты проводились на установке МИГ (2 МА; 100 нс; Al, Cu, Ti, сталь).

В этих условиях реализуется режим скинирования тока (плотность тока в скин-слое до 10^9 А/см²).

Основные процессы:

- Распространение ударной волны (УВ);
- Распространение волны нелинейной диффузии магнитного поля (ВНД);
- Поверхностное плазмообразование;
- Развитие крупномасштабных неустойчивостей.



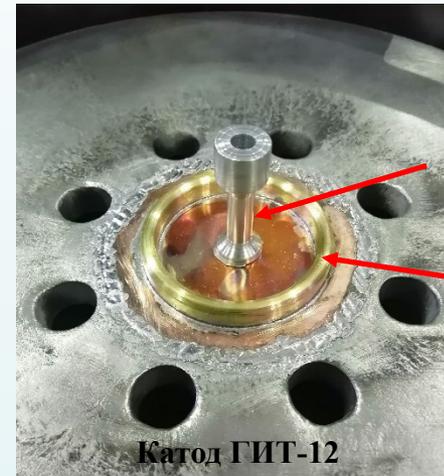
На основе сравнения МГД-расчетов и результатов экспериментов показано, что причиной возмущений на границе является рост Рэлей-Тейлоровских неустойчивостей [Oreshkin V.I., Chaikovsky S.A., Datsko I.M. et al. MHD instabilities developing in a conductor exploding in the skin effect mode // *Physics of Plasmas*. – 2016. – Т. 23. – №. 12.].

Результаты:

- Выработан критерий взрыва – плотность энергии магнитного поля = плотность энергии сублимации.
- Определена скорость ВНД.
- Доказано, что при распространении ВНД моды, с длинами волн порядка толщины проводника, устойчивы, а коротковолновые моды локализованы вблизи фронта ВНД.

ЭВП в мегагауссных магнитных полях при скоростях роста $(1-5) \cdot 10^{12}$ Г/сек

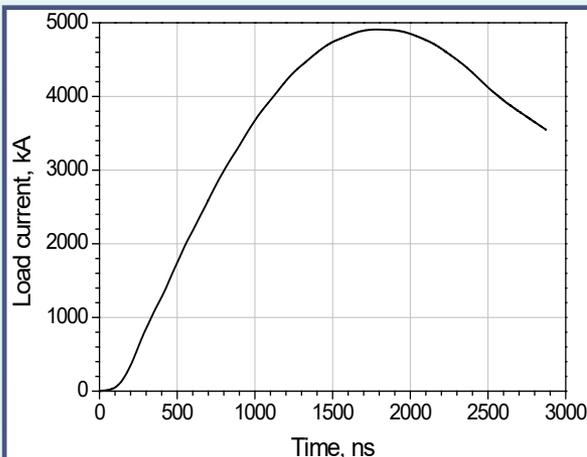
Эксперименты на установке ГИТ-12 (5 МА; 1.7 мкс) Al, Cu



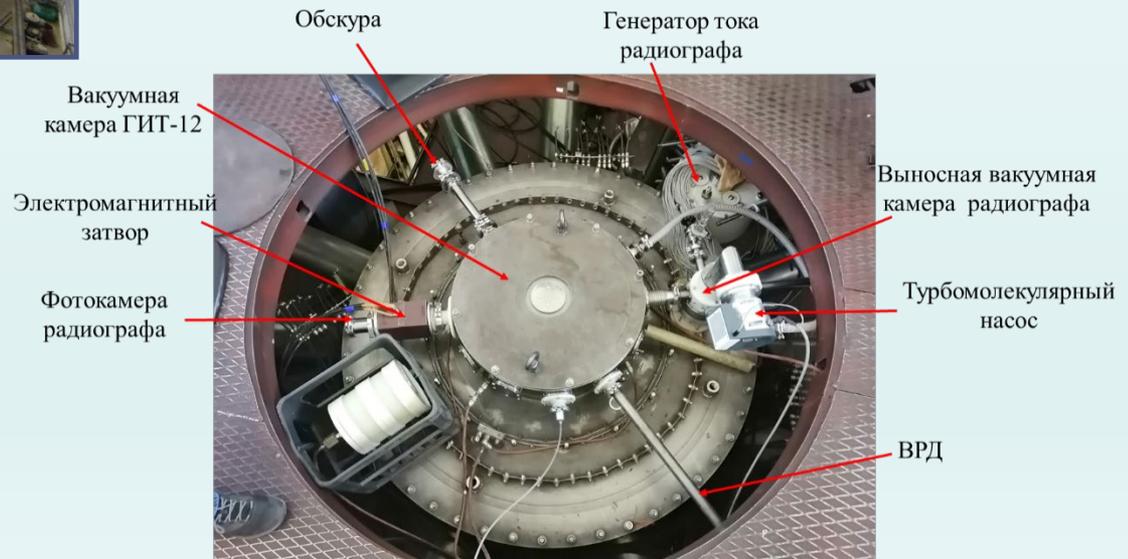
Алюминиевая трубка

Защита от рентгеновского излучения из области контактов

Катод ГИТ-12

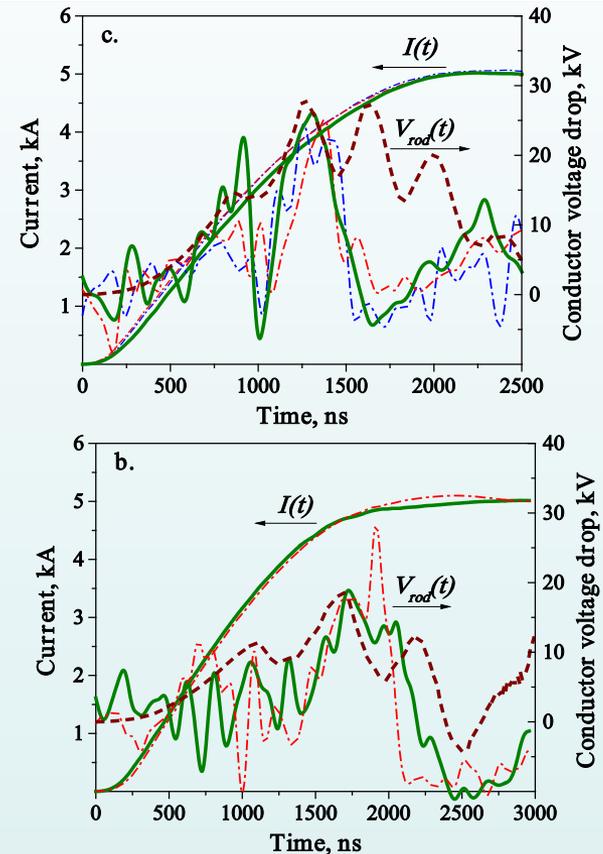
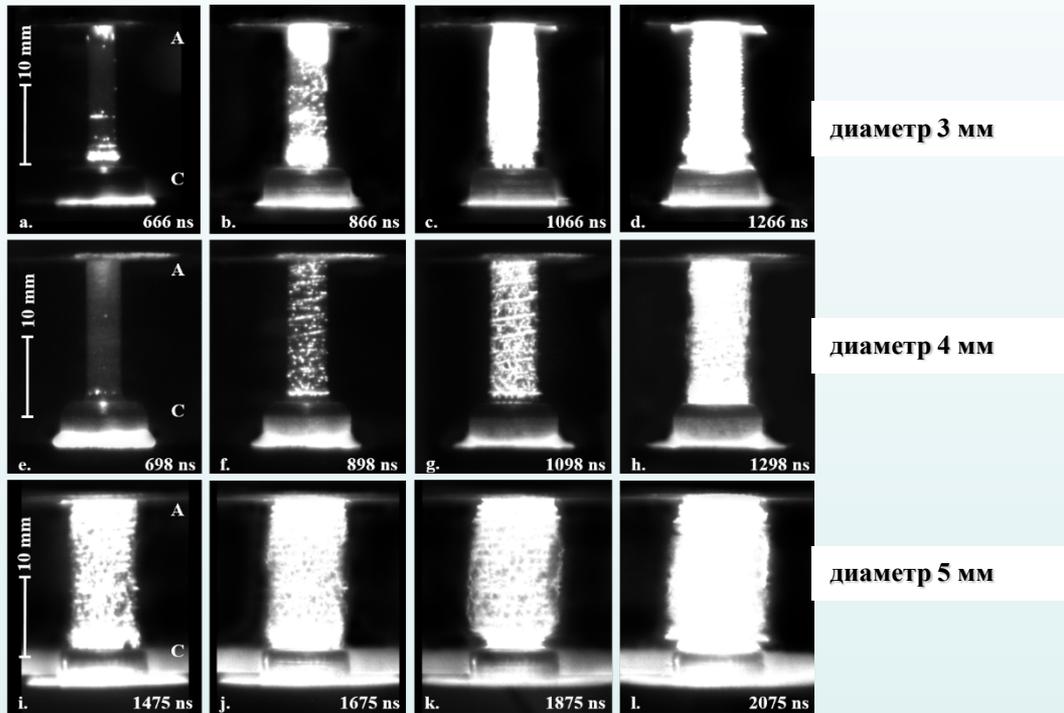


Оциллограмма тока генератора ГИТ-12



Генерация магнитозвуковых волн при ЭВП мегаамперными импульсами тока

Изображения медных стержней, полученные с помощью четырехкадровой оптической камера HSFC Pro.

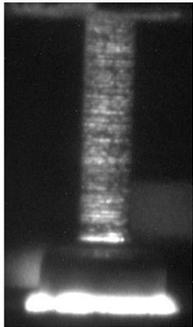


Результат: Впервые обнаружено, что при взрыве проводников в сверхсильных магнитных полях в металле возбуждаются магнитозвуковые волны, которые проявляются в виде низкочастотных колебаний напряжения, падающего на проводнике. Магнитозвуковые волны возбуждаются в керне взрываемого стержня, поэтому электротехнические измерения несут информацию о состоянии плотной приосевой плазмы, в которой реализуются наиболее экстремальные состояния металла. [Oreshkin V.I., Bakshat R.B., Chaikovskiy S.A. et al. Generation of magnetosonic waves by electrical explosion of conductors driven by mega-ampere current pulses // *Physics of Plasmas*. – 2023. – Т. 30. – №. 11.]

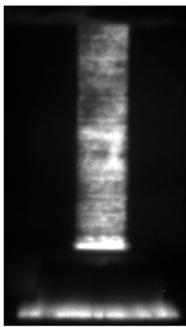
Сжатие тяжелых металлических лайнеров мегаамперными импульсами тока

Shot#3048

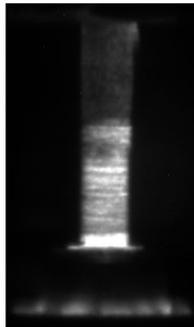
Трубка из меди высота 2.24 см, внешний диаметр 4 мм, толщина стенки 500 мкм



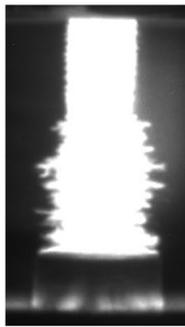
Tfr 1=720 ns



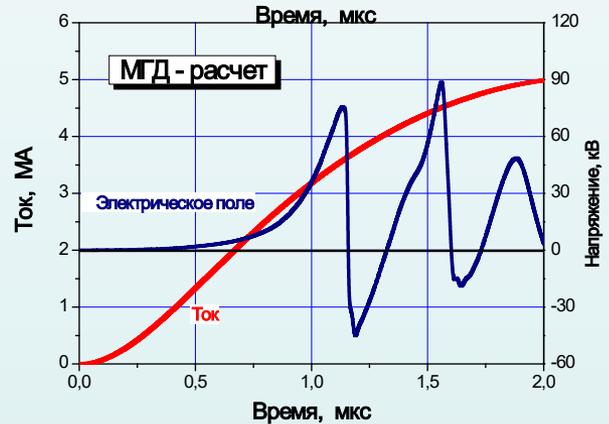
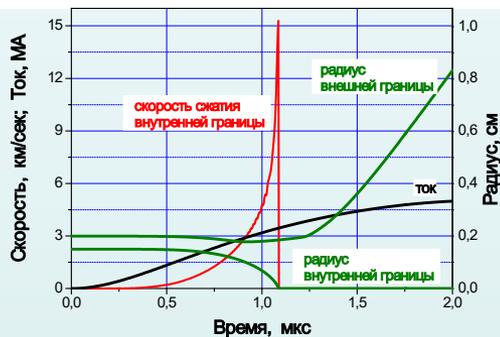
Tfr 2=920 ns



Tfr 3=1120 ns



Tfr 4=1320 ns

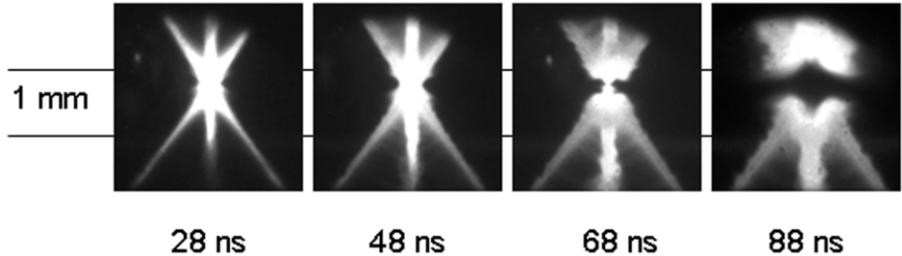
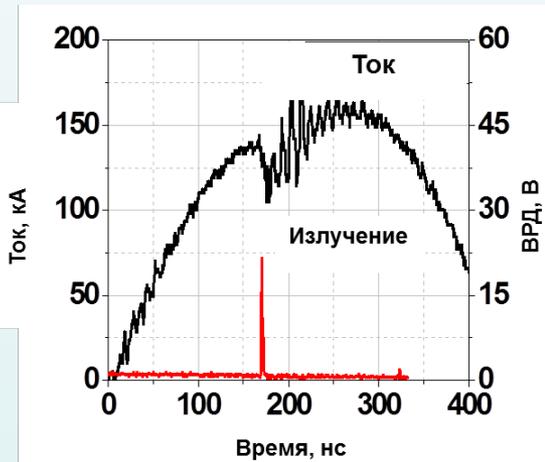
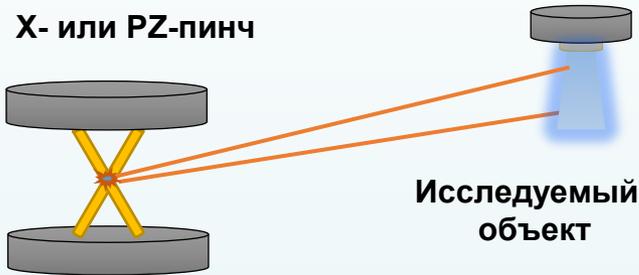


Результат: Показано, что осциллографические измерения напряжения позволяют зарегистрировать генерацию в веществе проводника сильной ударной волны, вызванной схлопыванием оболочки на оси системы, и определить время имплозии оболочки.

[Oreshkin V.I., Baksht R.B., Chaikovskiy S.A. et al. Implosion of heavy metal liners driven by megaampere current pulses // *Physics of Plasmas*. – 2024. – T. 31. – №. 10.]

Источники зондирующего излучения – X- и PZ-пинчи

X- или PZ-пинч



Сжатие X- и PZ-пинчей сопровождается вытеканием вещества из области перетяжки размером несколько сот микрон.

В процессе сжатия формируется “горячая точка” со следующими параметрами:

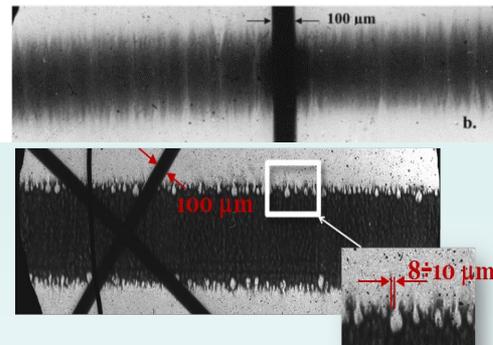
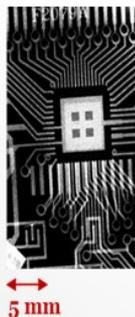
- время существования – 0.1-1 нс;
- размер – несколько микрон;
- плотность - порядка твердотельной;
- температура – десятки миллионов градусов;
- тепловое и магнитное давление – сотни миллионов атмосфер;
- давление излучения – десятки миллионов атмосфер.

В финале происходит кулоновский “горячей точки” [Oreshkin V.I. et al. *Coulomb explosion of “hot spot” //Physics of Plasmas.* – 2016. – T. 23. – №. 9].

Муха
(> 3 кэВ)



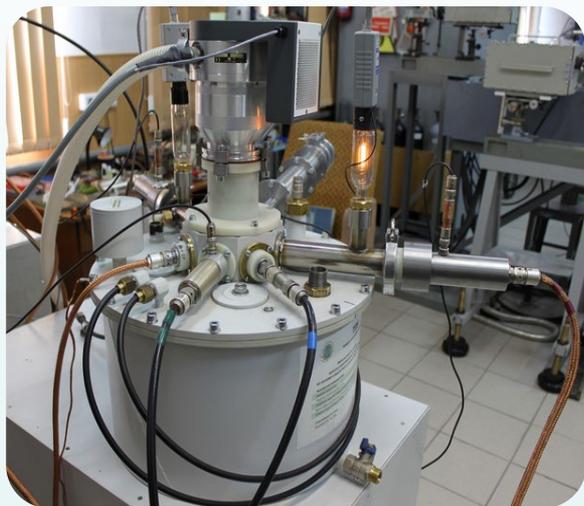
Микросхема
(> 8 кэВ)



Взрывающийся проводник

Взрывающаяся фольга

Субнаносекундные источники мягкого рентгеновского излучения



Источники излучения были поставлены:

- Северо-Западный институт, г. Сиань, Китай;
- Инженерный университет, г. Сиань, Китай;
- ТРИНИТИ, г. Троицк (4 шт., Ангара-5-1);
- ФИАН, г. Москва (2 шт.);
- ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск (ЛИУ-3);
- Томский политехнический университет.

Три генератора работают в ИСЭ СО РАН.

Основные научные результаты

- **Практическая реализация каскадированных лайнерных структур для подавления Рэлей-Тейлоровских неустойчивостей, позволившая по эффективности генерации импульсов мягкого рентгеновского излучения превзойти аналоги.**
- **Обоснование возможности создания источника рентгеновского излучения в диапазоне энергий фотонов 7–20 кэВ с использованием излучения в рекомбинационном континууме в плазме, образованной сжатием Z-пинчей.**
- **Построение таблиц проводимости различных металлов в широком диапазоне термодинамических параметров.**
- **Доказательство того, что при взрыве микропроводников с плотностью тока $> 10^7$ А/см² страты образуются в результате развития перегревных неустойчивостей.**
- **Впервые выполнено детальное исследование нелинейной диффузии мегагаусных полей в проводники, установлен критерия взрыва в режиме скинирования тока, исследована устойчивость волны нелинейной диффузии.**
- **Впервые обнаружено, что при взрыве проводников в сверхсильных магнитных полях в металле возбуждаются магнитозвуковые волны, которые проявляются в виде низкочастотных колебаний напряжения, падающего на проводнике.**
- **Разработка серии уникальных компактных радиографов, поставленных в крупные научные центры России (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск; ТРИНИТИ, г.Троицк; ФИАН, г. Москва) и за рубеж.**

Публикационные показатели

Научные результаты опубликованы:

- Physics of Plasmas - **42 статей**;
 - IEEE Transactions on Plasma Science - **14 статей**;
 - Plasma Physics and Controlled Fusion – **7 статей**;
 - ЖТФ и Письма в ЖТФ – **18 статей**;
 - Физика плазмы – **8 статей** и др.
- Всего более **300** научных работ, из них **4** монографии.
 - В международной базе данных Google Scholar проиндексированы **316** публикаций (Scopus – **212**).
 - Общее число цитирований в Google Scholar - **3906** (Scopus – **2739**).
 - Индекс Хирша в Google Scholar - **36** (Scopus – **31**).

Спасибо за внимание!