

Гибридные лайнеры как эффективные источники мягкого рентгеновского излучения

А.В. ШИШЛОВ, В.А. КОКШЕНЕВ, Н.Е. КУРМАЕВ, Р.К. ЧЕРДИЗОВ

Институт сильноточной электроники СО РАН

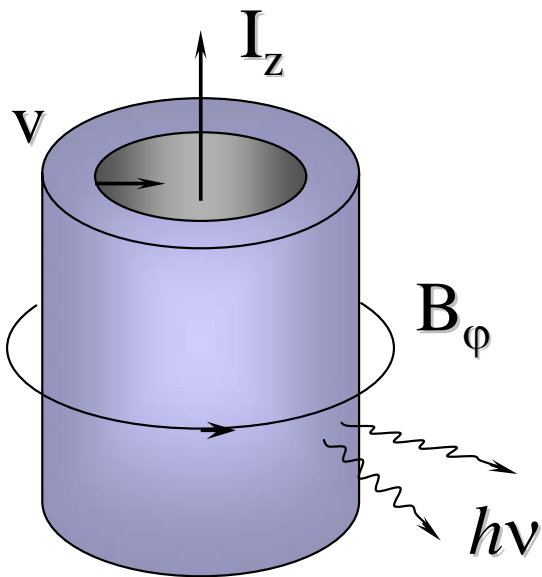
Томск, Россия



Расширенный авторский коллектив

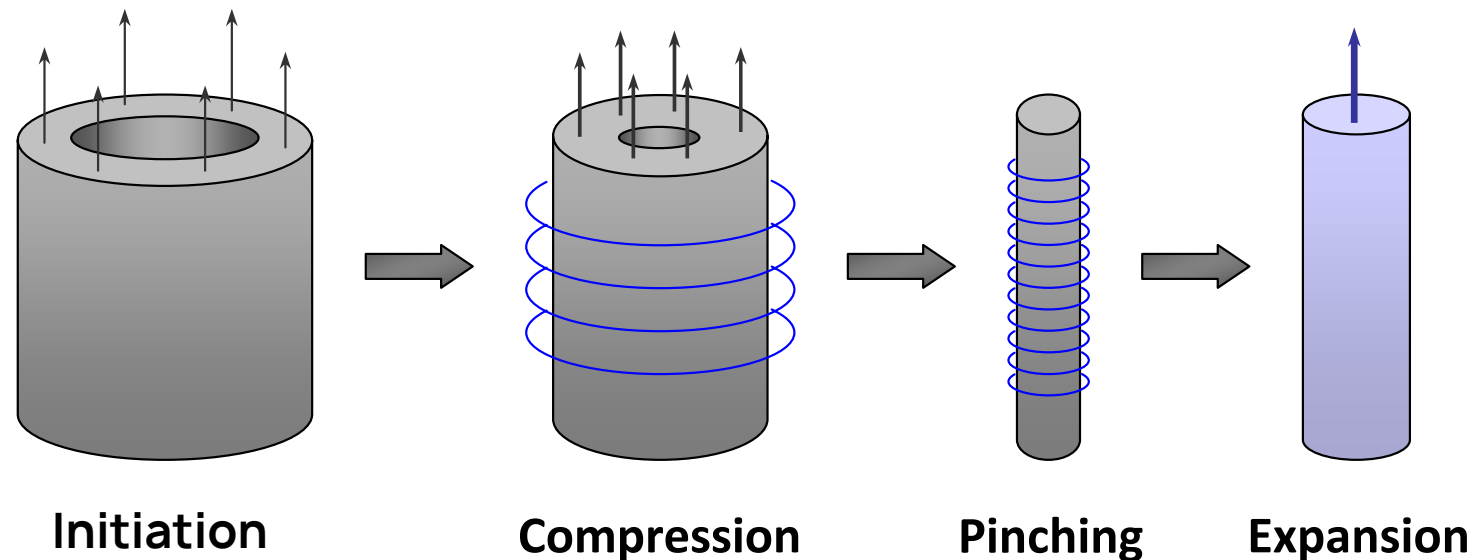
Р.Б.Бакшт, Б.М.Ковальчук, В.А.Кокшенев, Н.Е.Курмаев,
Н.А.Лабецкая, А.Ю.Лабецкий, В.И.Орешкин, Н.А.Ратахин,
А.Г.Русских, А.П.Семенов, А.В.Федюнин, Ф.И.Фурсов,
С.А.Чайковский, Р.К.Чердизов, А.В.Шишлов

Z-пинч



“Z-PINCHES use the electrical current from a pulsed power generator to transform a material load into a plasma and then magnetically compress it onto the axis aligned with the current flow.”

J.L. Giuliani, R.J. Commisso, IEEE Trans. Plasma Sci., 43, 2385, 2015

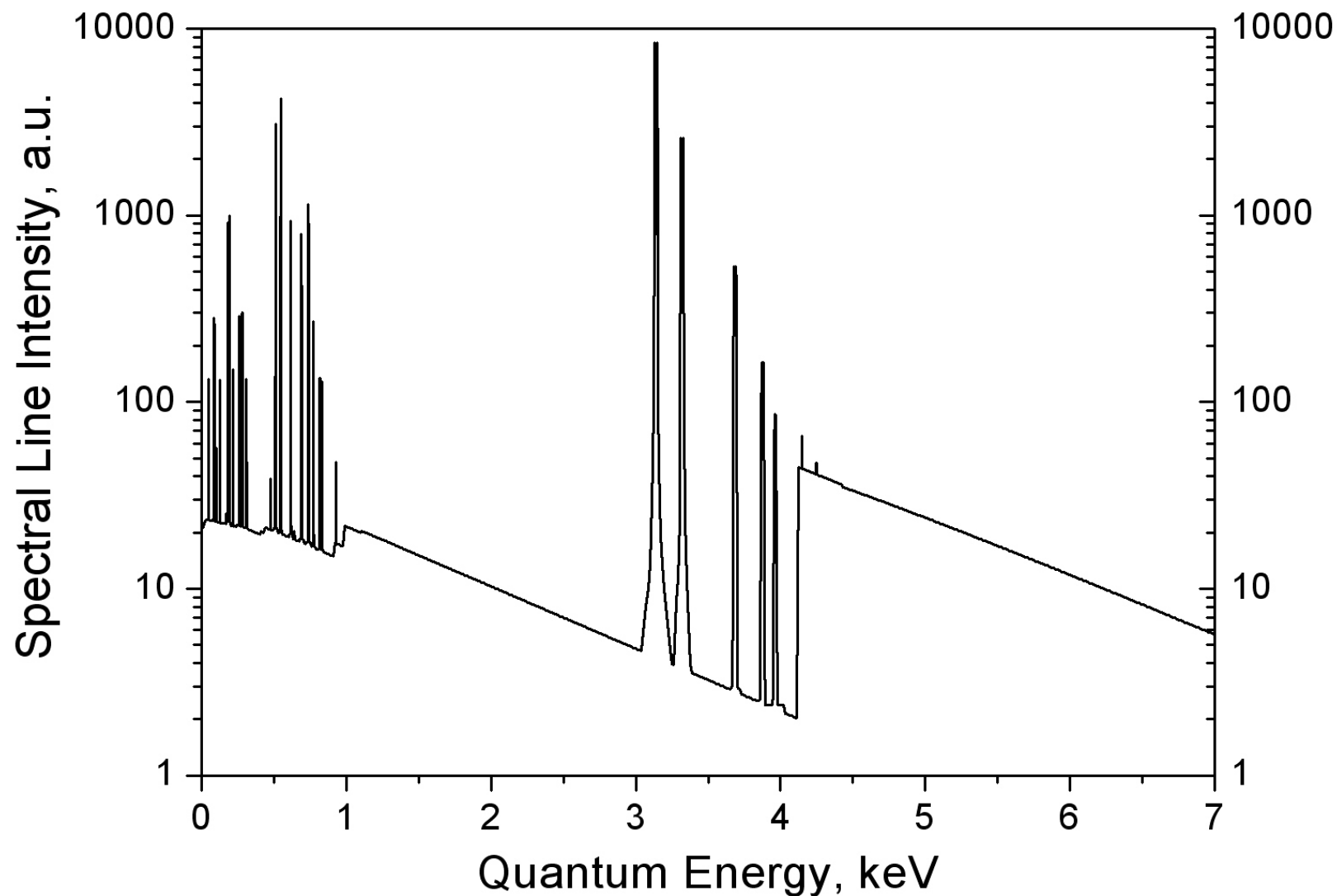


Длительное время кинетическая энергия лайнера рассматривалась как основной источник энерговклада в плазму Z-пинча.

Области применения Z-пинчей

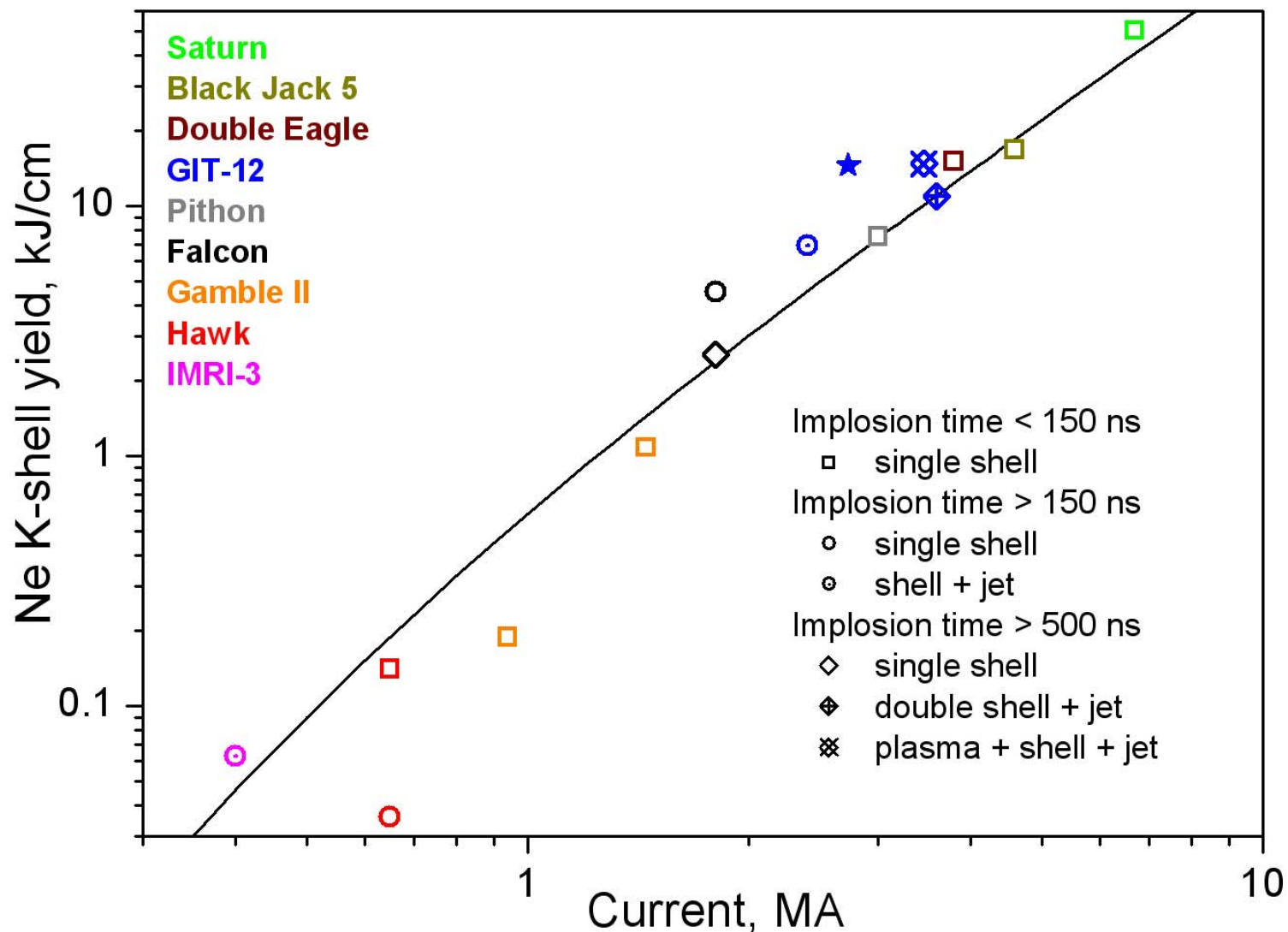
- **Инерциальный термоядерный синтез**
- **Плазменные источники излучения:**
 - исследование взаимодействия излучения с веществом
 - исследование экстремальных состояний вещества
 - рентгеновская литография
 - модификация поверхности материалов
- **Генерация сильных магнитных полей**
- **Астрофизические исследования**

Плазменные источники излучения в K-линиях вещества лайнера



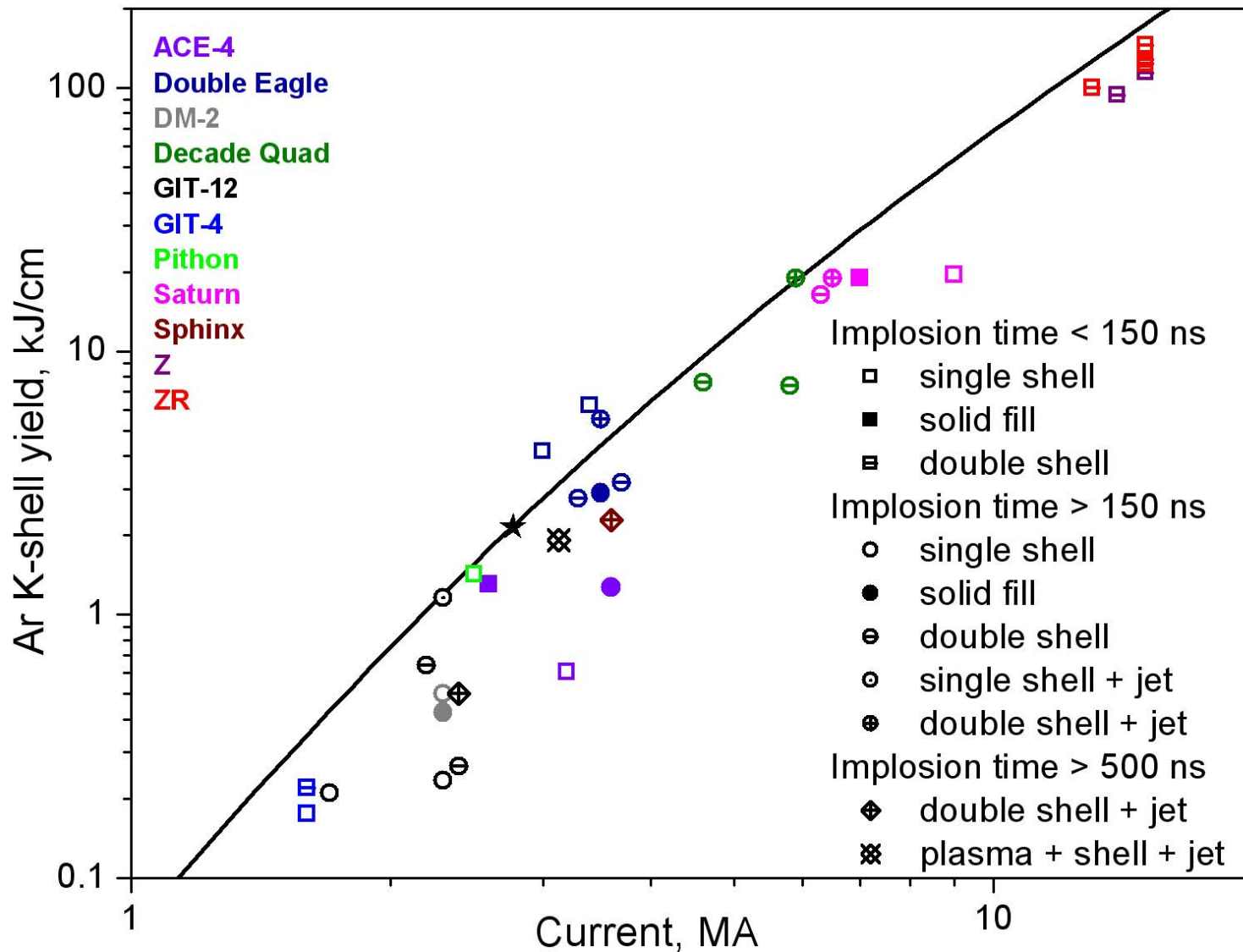
«Излучение в K-линиях» = излучение водородо- и гелиоподобных ионов, как в линейчатом спектре, так и в рекомбинационном континууме.

Выход излучения в K-линиях неона



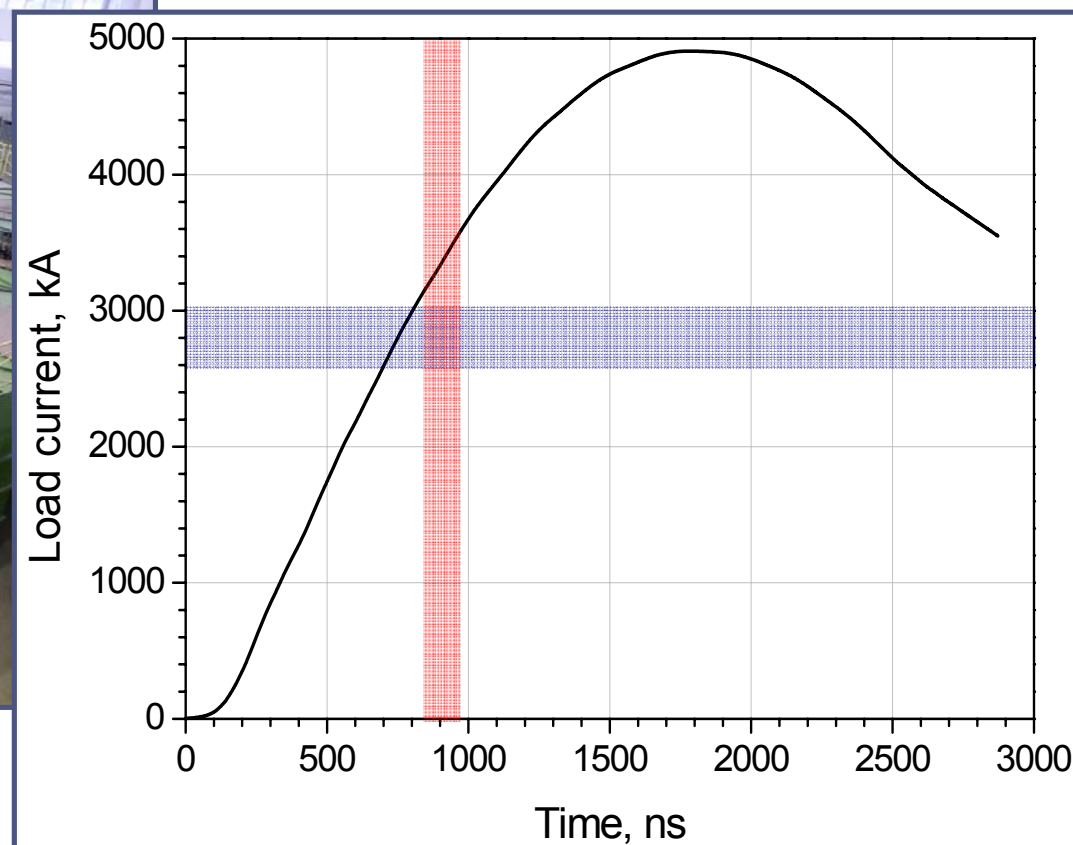
Мы определяем эффективность плазменного источника излучения как $Y_{k_{\text{exp}}}/Y_{k_{\text{theor}}}$
 $Y_{k_{\text{theor}}}$: D. Mosher, N. Qi, M. Krishnan, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **26**, 1052, 1998

Выход излучения в К-линиях аргона



Эффективность плазменного источника излучения падает при увеличении атомного номера рабочего вещества лайнера.

Генератор ГИТ-12



Зарядное напряжение: 50 кВ Запасаемая энергия: 2.6 МДж
Режим работы без МПРТ: 4.7 МА, 1.7 мкс, 3 кА/нс

Плазменные источники излучения в микросекундном режиме имплозии

Multi-shell gas puff experiments (2003-2005)

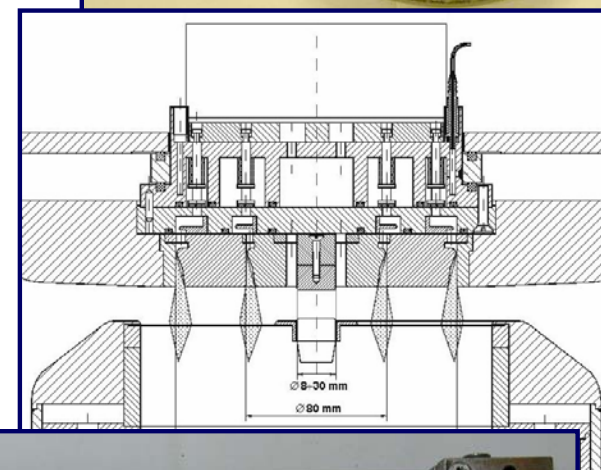
Ne: **11 kJ/cm** ($I_{LOAD} = 3.6 \text{ MA}$, $T_{IMP} = 1000 \text{ ns}$, $Eff. = 1$)

Ar: **0.5 kJ/cm** ($I_{LOAD} = 2.4 \text{ MA}$, $T_{IMP} = 700 \text{ ns}$, $Eff. = 0.36$)



Gas-puff-on-wire-array experiments (2004-2005)

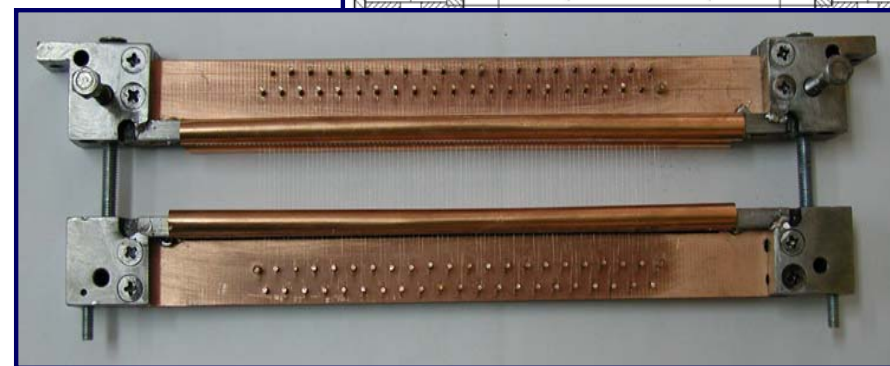
Al: **4 kJ/cm** ($I_{LOAD} = 3.4 \text{ MA}$, $T_{IMP} = 950 \text{ ns}$, $Eff. = 0.5$)



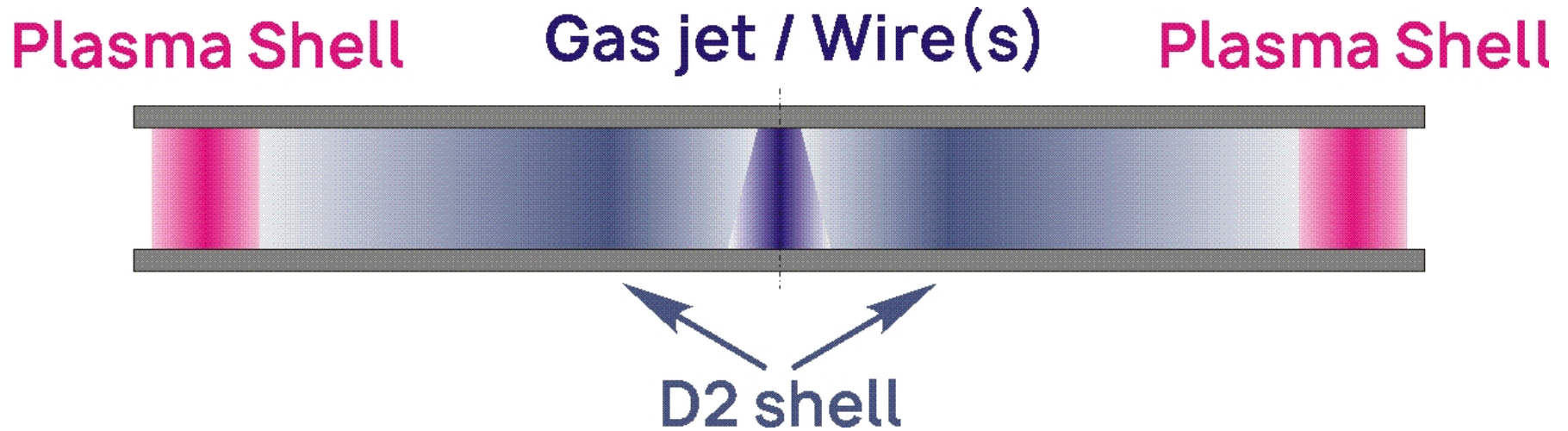
Planar wire arrays experiments (2006-2010)

Al: **6.5 kJ/cm**

($I_{LOAD} = 3.8 \text{ MA}$, $T_{IMP} = 1050 \text{ ns}$, $Eff. = 0.63$)



Структура гибридной нагрузки



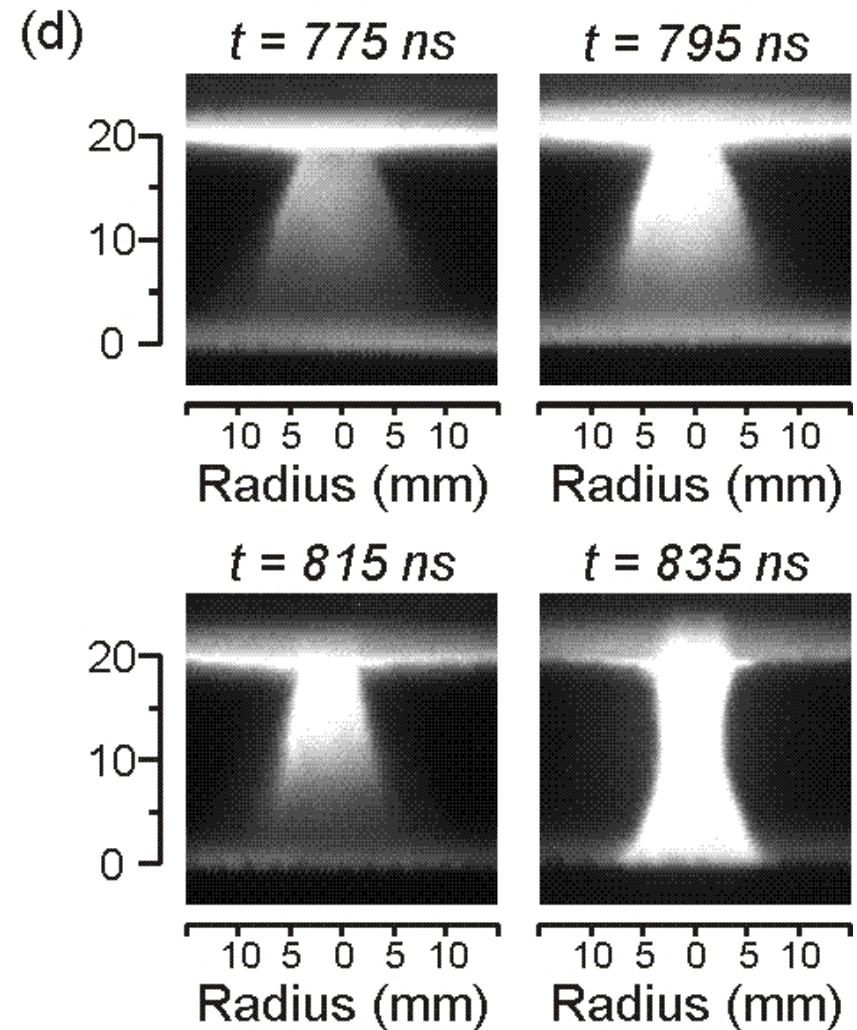
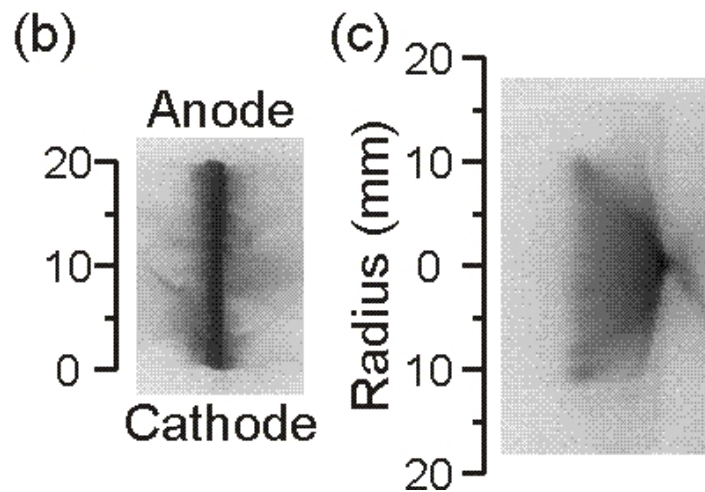
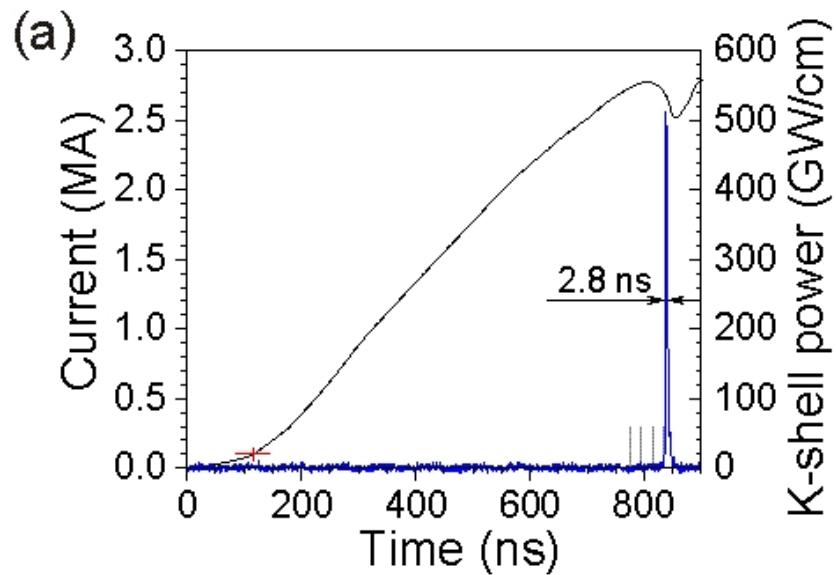
Плазменная оболочка: формирование однородного токового слоя.

Дейтериевая оболочка: перенос тока в приосевую область, стабилизация процесса имплозии.

Внутренний каскад: формирование пинча, генерация излучения в заданном спектральном диапазоне.

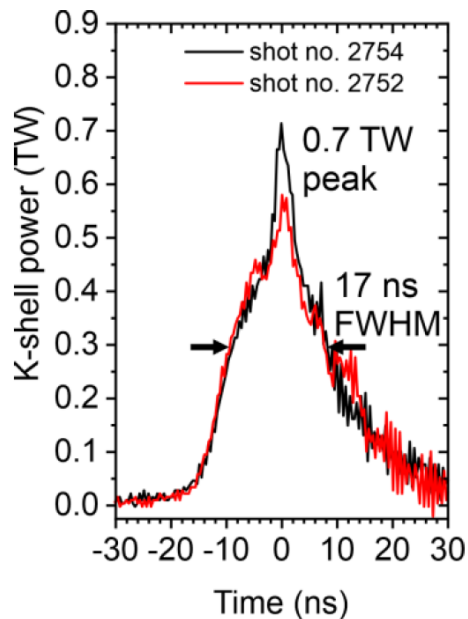
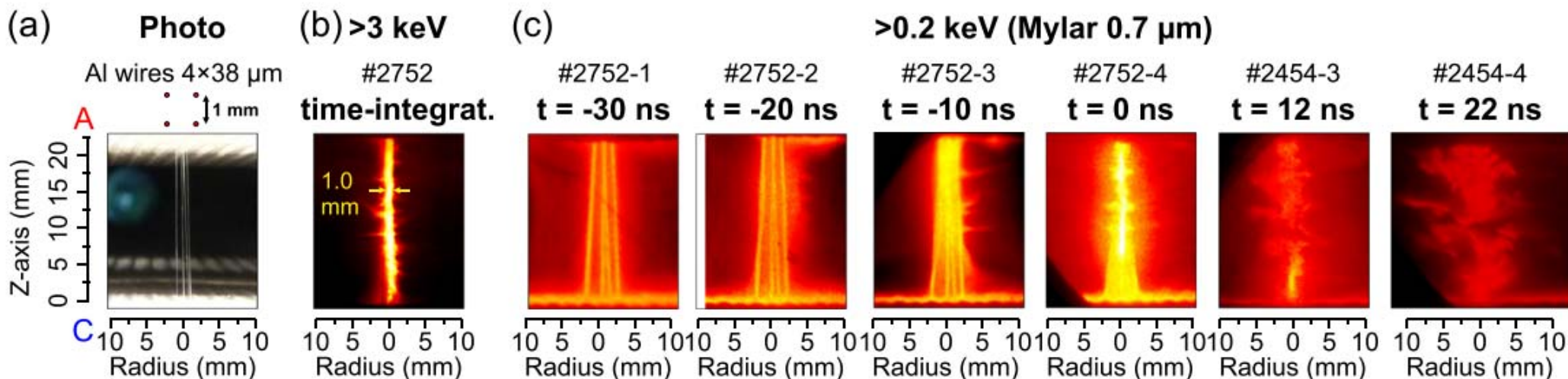
Бонус: в случае газового лайнера не требуется отдельная система предьонизации

Динамика имплозии аргонного гибридного лайнера



Пиковый ток имплозии: $2.74 \pm 0.13 \text{ MA}$
Время сжатия: $730 \pm 48 \text{ ns}$

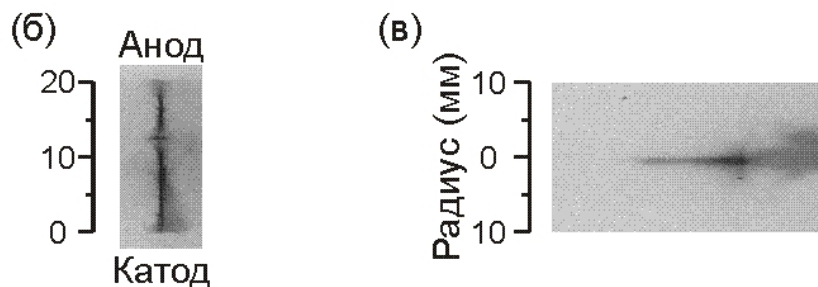
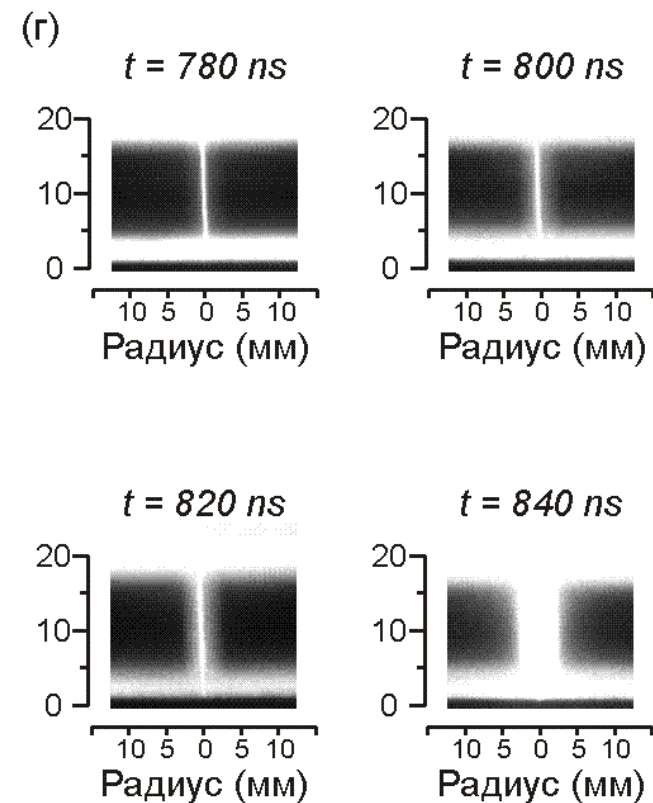
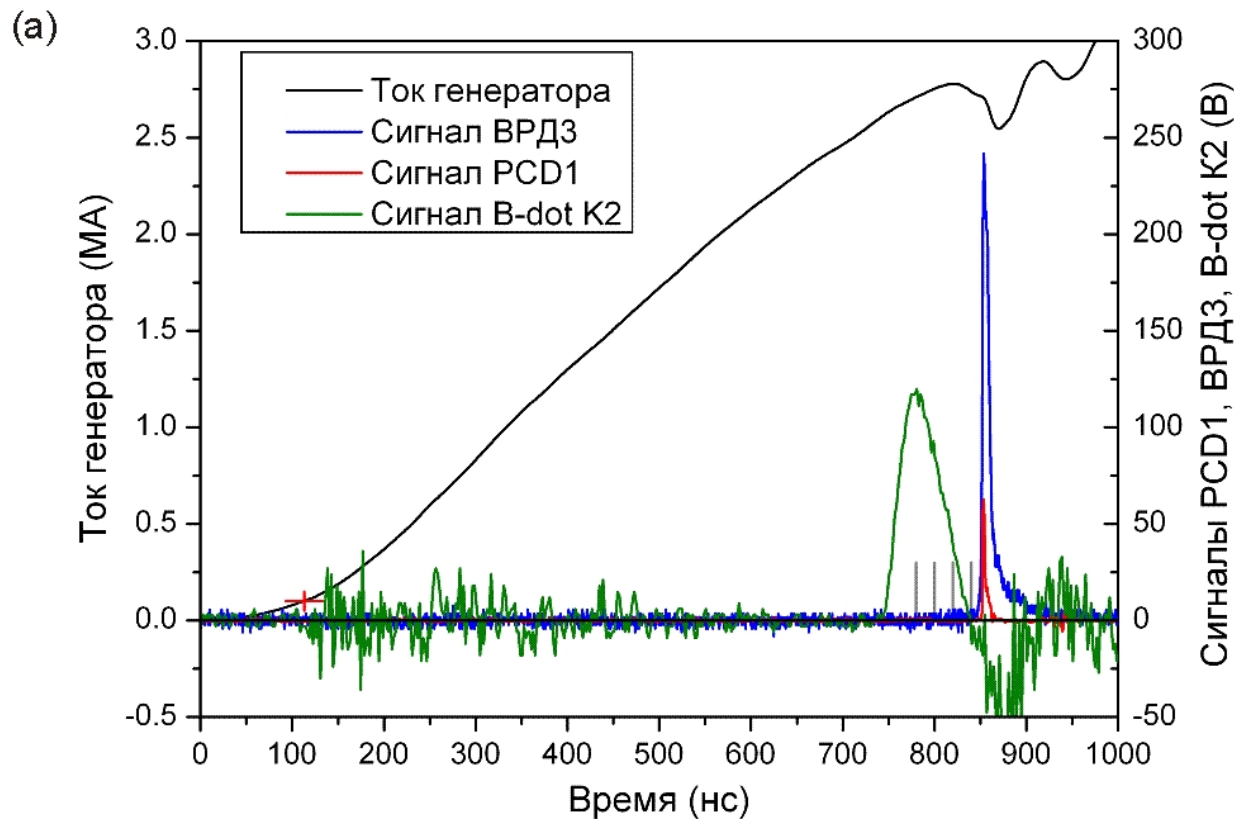
Дейтериевый газовый лайнер с каскадом проводников на оси



Гибридный Al-D₂ лайнер с внешней плазменной оболочкой

Выход излучения в K-линиях алюминия: 5.1 кДж/см
 ($I_{LOAD} = 2.77$ МА, $T_{IMP} = 680$ нс, $Eff. = 1.16$)

Динамика имплозии титанового гибридного лайнера



Использовались проводники диаметром 28, 50 и 125 мкм

Пиковый ток имплозии: $2.72 \pm 0.1 \text{ МА}$
Время сжатия: $745 \pm 60 \text{ нс}$

Результаты экспериментов с гибридной нагрузкой

Вещество излучателя	Пиковый ток, МА	Выход излучения, кДж/см	Эффективность источника
Неон	2.73	14.5	2.4
Алюминий	2.67	5.1	1.16
Аргон	2.77	2.2	0.99
Титан	2.67	0.22	0.29

Эффективность источника снижается с ростом атомного номера рабочего вещества. Требуется коррекция двухуровневой модели.

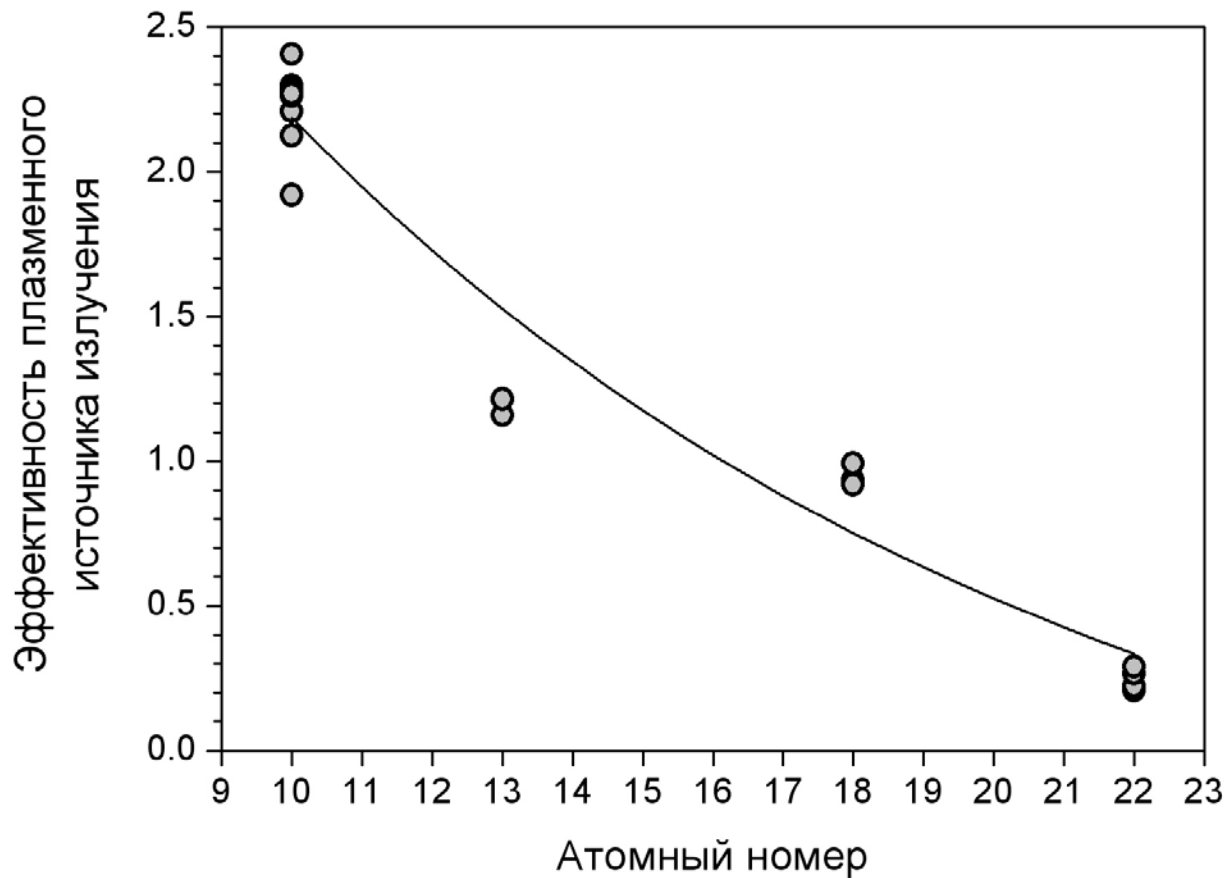
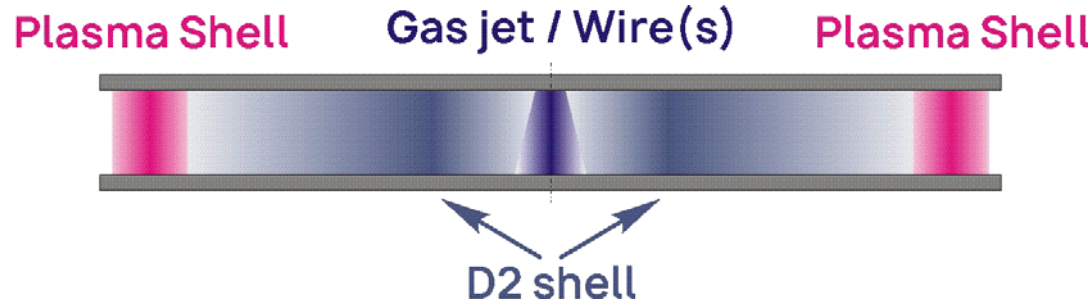
Эффективность титанового гибридного лайнера

	GIT-12 (IHCE)	Z (SNL)
Peak current, MA	2.67	16-18
Implosion time, ns	710	~100
K-shell yield	220 J/cm	62.5 kJ/cm
K-shell power	60 GW/cm	3.8 TW/cm
PRS efficiency	0.29	0.29 - 0.38

А может ли кто-то лучше*?

* C. Deeney et al., *Phys. Plasmas*, vol. 6, no. 5, pp. 2081-2088, May 1999.

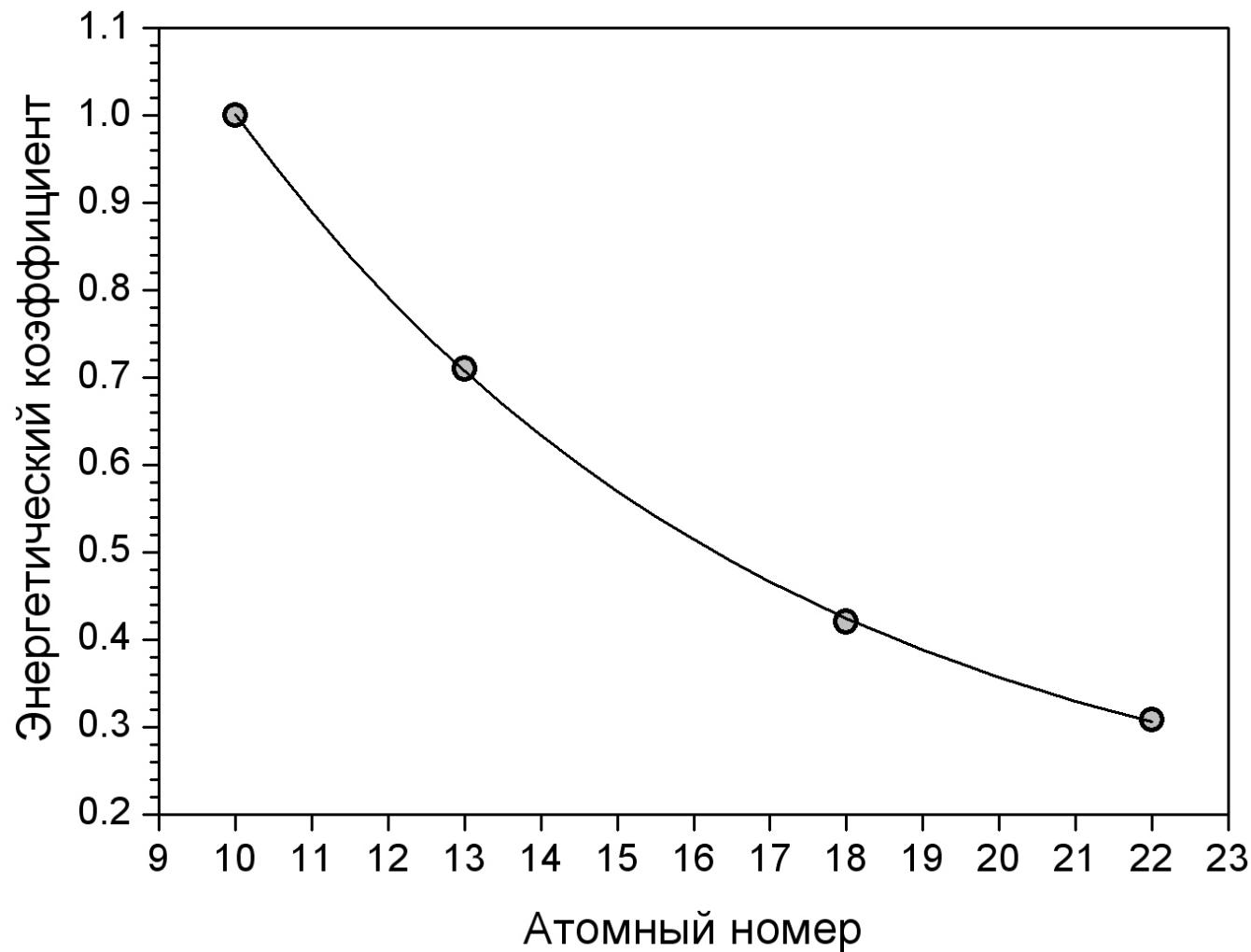
Результаты экспериментов с гибридной нагрузкой



- Эксперименты проведены с нагрузкой одного типа.
- Параметры внешних каскадов обеспечивали практически одинаковый пиковый ток и время имплозии.
- Наблюдается снижение эффективности плазменного источника излучения с ростом атомного номера вещества излучателя.
- Возможное объяснение:

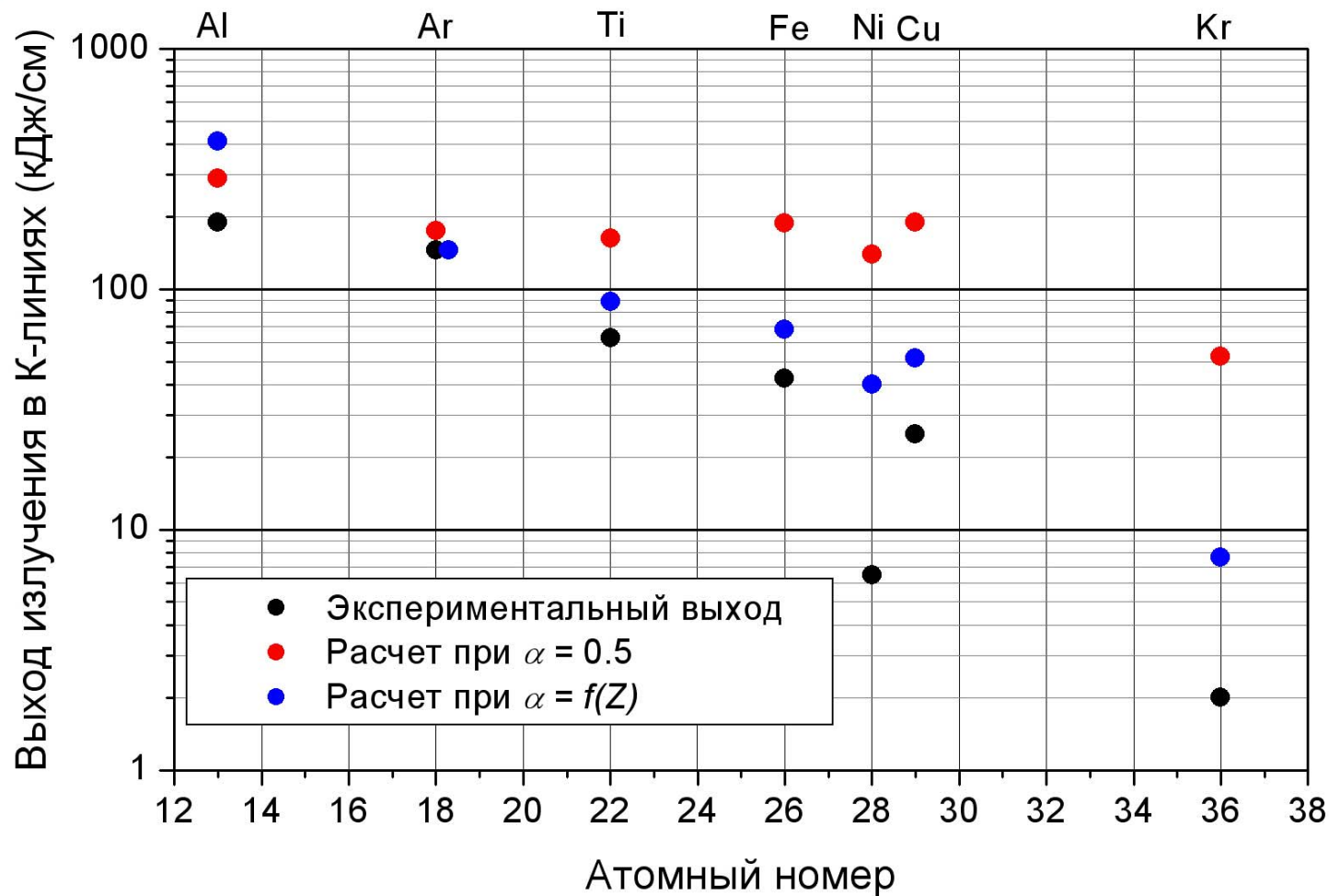
$$\alpha = f(Z)$$

Расчетные значения энергетического коэффициента



- В расчетах энергетический коэффициент варьировался до тех пор, пока расчетный выход излучения не совпадал с экспериментальным.
- Можно экстраполировать полученную зависимость в область веществ с большим атомным номером.

Сравнение с экспериментальными данными



- Для сравнения использовались экспериментальные данные, полученные в экспериментах на генераторе Z/ZR (Sandia National Laboratories, USA).
- Для каждого элемента взяты данные о максимальном выходе излучения в K-линиях, наблюдаемого в эксперименте.
- В расчетах пиковый ток имплозии соответствовал экспериментальным значениям.

Заключение

- Результаты экспериментов показали, что гибридная нагрузка является эффективным плазменным источником К-излучения (энергия квантов 0.9 – 5.0 кэВ), работающим в режиме микросекундной имплозии.
- Полученные результаты свидетельствуют о том, что конструктивно более простые и дешевые микросекундные генераторы тока могут быть использованы для генерации К-излучения с целью исследования взаимодействия излучения с веществом в научных и прикладных целях.
- На основании полученных экспериментальных данных об эффективности плазменных источников излучения была проведена корректировка параметров двухуровневой модели, что позволяет проводить более точную оценку ожидаемого выхода излучения в будущих экспериментах.

Двухуровневая модель

(Mosher D., Qi N., and Krishnan M., IEEE Trans. Plasma Sci., 26, 1052, 1998.)

Мы используем двухуровневую модель при анализе результатов эксперимента, рассчитывая эффективность плазменного источника излучения – Y_{exp} / Y_{theor}

В основе модели лежит уравнение баланса энергии:

$$E_{dep} = E_I + Y + E_{loss} \Rightarrow \alpha E_{dep} = E_I + Y$$

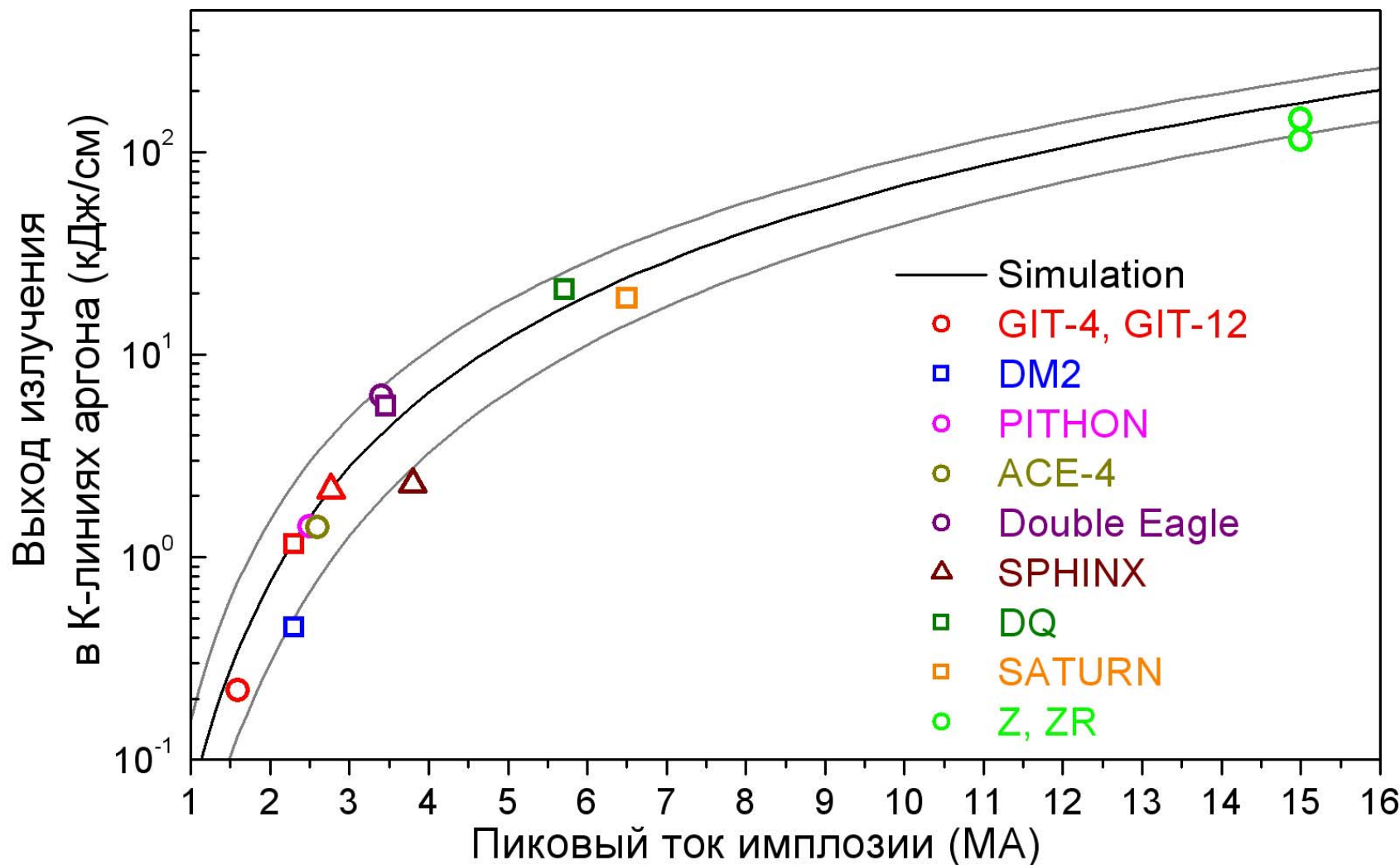
где E_{dep} – энергия, вложенная в плазму; E_I – внутренняя энергия плазмы; Y – выход излучения в К-линиях; E_{loss} – потери энергии в различных неучтенных процессах; коэффициент α характеризует долю вложенной энергии, доступной для ионизации и нагрева плазмы и обеспечения выхода излучения в К-линиях (энергетический коэффициент). Двухуровневая модель имеет “свободные параметры”.

$$E_{dep} = 10^{-9} \gamma \ln \left(\frac{R_0}{R_f} \right) I_0^2, \quad Y = f(R_f)$$

«По умолчанию»:

$$E_{dep} (\text{Дж} / \text{см}) = 2000 \times I_0^2 (\text{МА}), \quad R_f = 0.1 \text{ см}, \quad \alpha = 0.5$$

Влияние вложенной энергии и финального радиуса



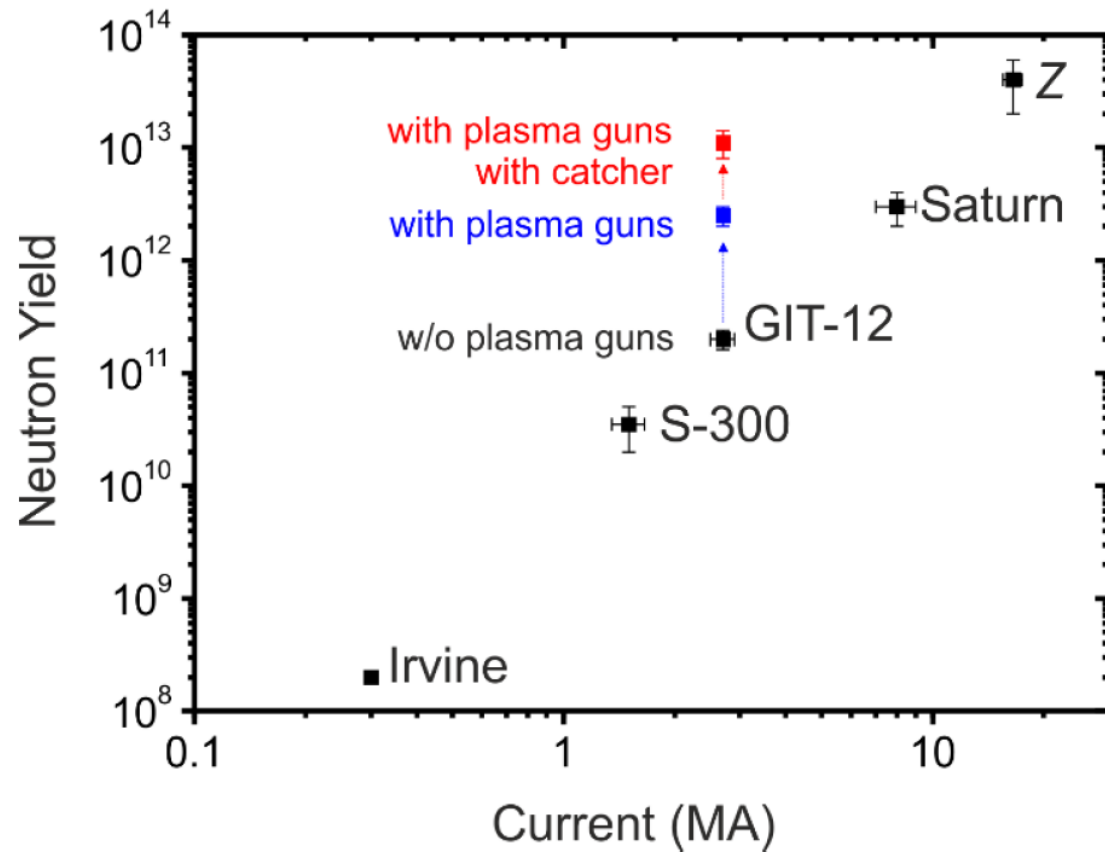
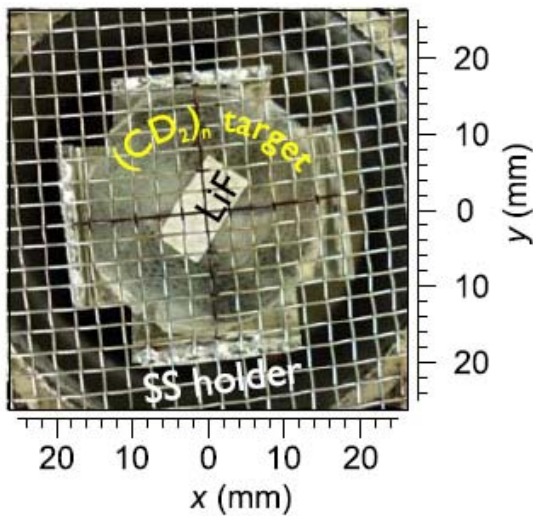
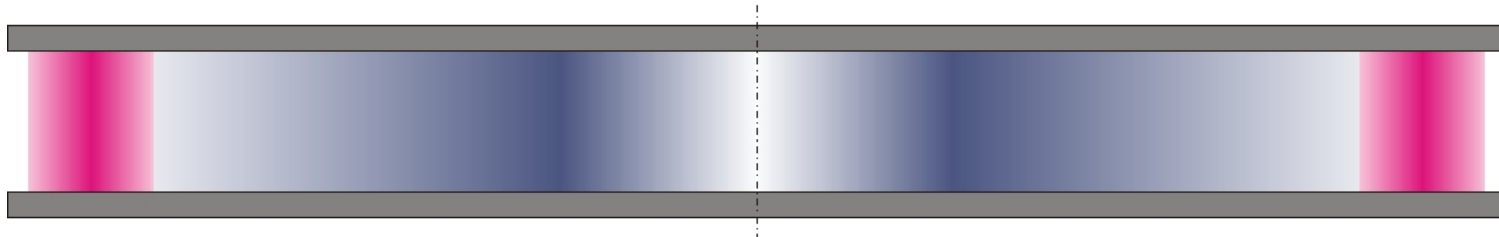
$$E_{dep}(\text{Дж} / \text{см}) = 2000 \times I_0^2(\text{МА}), R_f = 0.1 \text{ см}$$

$$E_{dep}(\text{Дж} / \text{см}) = 2400 \times I_0^2(\text{МА}), R_f = 0.05 \text{ см}$$

$$E_{dep}(\text{Дж} / \text{см}) = 1600 \times I_0^2(\text{МА}), R_f = 0.2 \text{ см}$$

Дейтериевый газовый лайнер

D2 single gas puff + outer plasma shell



D. Klir, et al., Physical Review Letters, 112, 095001, 2014.

D. Klir, et al., New J. Phys. 20, 053064, 2018.