

Эксперименты с сильной гофрировкой поля на установке ГОЛ-3

представляет В. В. Поступаев



План выступления

1. Введение. Мотивация работы.
2. Модернизация установки ГОЛ-3.
3. Нагрев и удержание плазмы в режиме сильной гофрировки:
 - Диаманитные измерения
 - Поперечные потери
 - Томсоновское рассеяние
 - Нейтронные измерения
4. Заключение.

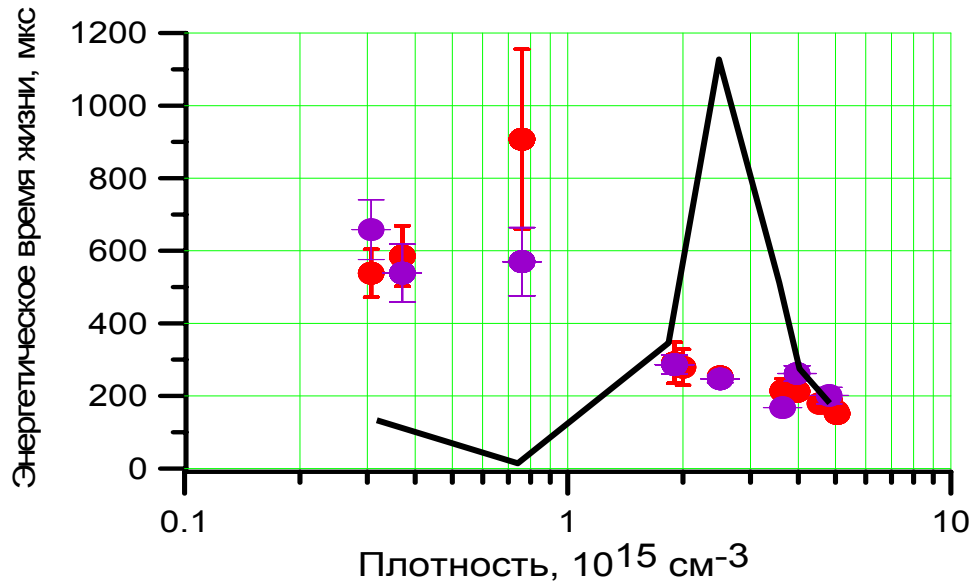
Результаты и планы сезона - 2004

- на установке ГОЛ-3 проведены эксперименты в «стандартном» режиме многопробочного удержания при $R = 1.5$ ($N_{\text{макс}}/N_{\text{мин}} = 4.8/3.2$ Тл);
- достигнута макроскопическая стабильность пучка и плазмы;
- достигнут эффективный нагрев плазмы пучком;
- обнаружен и объяснён механизм быстрого нагрева ионов;
- зарегистрировано нейтронное излучение от D-D реакции;
- обнаружена неустойчивость пролётных частиц вблизи торца установки;
- достигнуто энергетическое время жизни плазмы до 1 мс при плотности $(0.5-1) \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$ (что соответствует прогнозам теории).

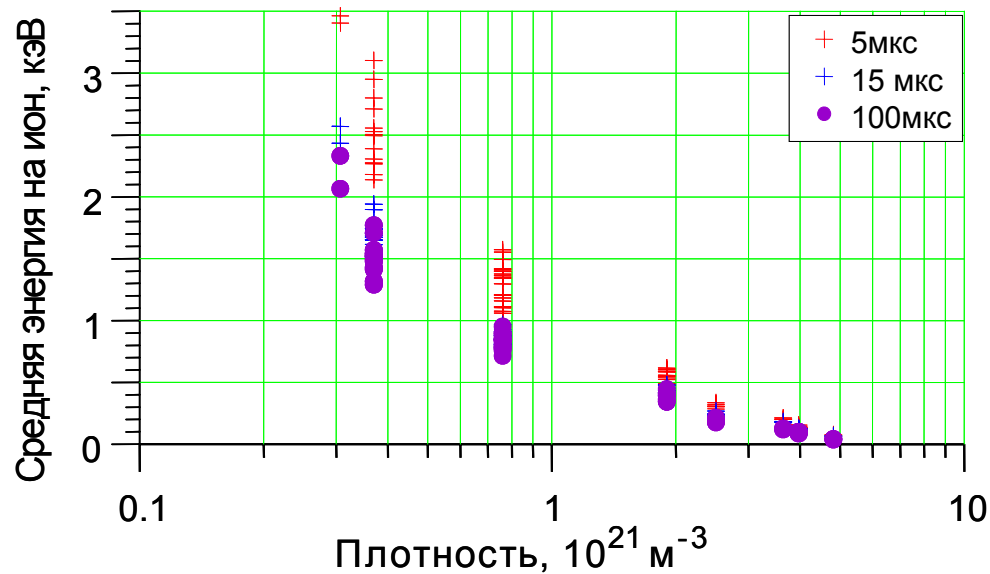
Возможности для продвижения дальше:

- интересно углубить понимание физики (новые диагностики);
- нужно создавать предсказательную физическую базу знаний (скейлинги);
- на установке давно назрели некоторые изменения отдельных узлов;
- *очень хочется ставить новые рекорды, но нужны ресурсы и уверенность.*

Скейлинг времени жизни - 2005



точки – эксперимент
 линия – классическая теория
 (И.А.Котельников)



Проблема: плазменные параметры не независимы

Диапазон рабочих параметров ГОЛ-3

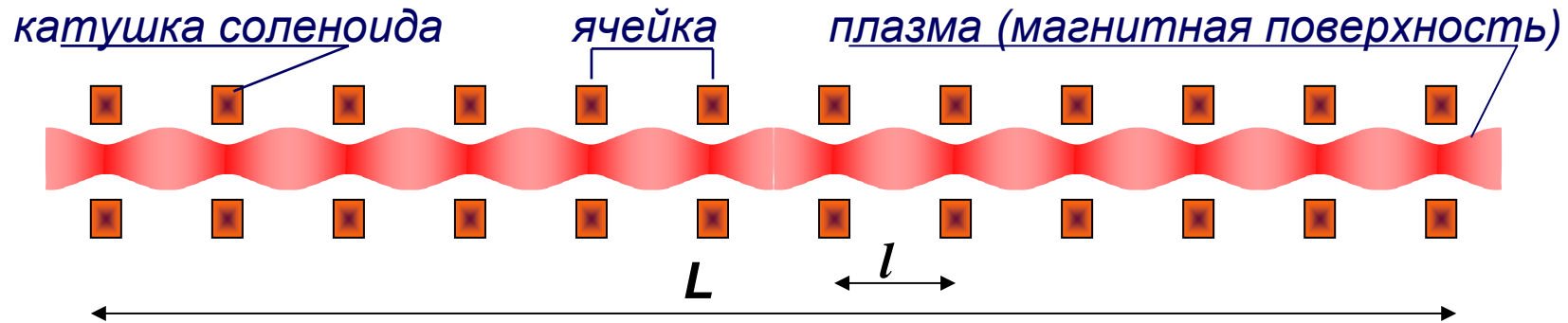
Напряжённость магнитного поля	<i>Фиксирована</i>	4.8 / 3.2 Тл	●
Энергия электронов	<i>Почти фиксирована</i>	~0.9 МэВ	●
Энергозапас в пучке	<i>Варьируется слабо</i>	~100 кДж	●
Плотность плазмы	<i>Варьируется широко</i>	10^{20} - 5×10^{21} м ⁻³	●
Профиль плотности по длине	<i>Варьируется</i>		●

- ➤ инженерное ограничение
 ● ➤ физическое ограничение

- при таком сочетании «ручек управления» оказывается, что при оптимальном сценарии основные параметры плазмы (электронная и ионная температура, время жизни и устойчивость жёстко связаны с начальным распределением плотности по длине);
- опыт работы достаточно велик и оптимальные режимы находятся быстро.

Существенно новая информация может быть получена при переходе к другой конфигурации магнитного поля

Многоячейочное удержание



Условие удержания в гофрированном поле:

$$l \sim \lambda_i \ll L$$

L - полная длина соленоида

λ_i - длина свободного пробега ионов

l - длина ячейки соленоида

$$\tau \simeq R^2 \frac{L^2}{\lambda_i v_{Ti}} = R^2 \frac{L}{\lambda_i} \tau_0$$

$$R = \frac{B_{\max}}{B_{\min}}$$

- Расширение плазмы становится диффузионным (частица «забывает» направление движения при временном захвате в одну из ячеек).
- Выигрыш по сравнению с «прямым» полем ~ 100 для условий ГОЛ-3.

Представляет интерес переход к более сильной гофрировке

Сильная гофрировка – вариант



- $R \sim 1.5$,
- $N \sim 50$,
- $l = 22$ см
- 1998-2005

- $R \sim 3$,
- $N \sim 25$,
- $l = 44$ см

Переход к сильной гофрировке

- Необходим поиск быстрого и простого решения в рамках существующей инфраструктуры и конструкции установки.
- Основная идея: перекоммутация катушек соленоида и секций питания.
- Переход к сильной гофрировке потребовал некоторых других изменений ГОЛ-3.

Ожидавшиеся неприятности:

- Ухудшение эффективности нагрева плазмы (градиенты).
- Ухудшение устойчивости пучка и плазмы (условия протекания обратного тока).
- Ухудшение удельных параметров плазмы (большой объём плазмы).
- Неясно, будут ли работать изученные на ГОЛ-3 коллективные процессы.

Решение: провести перевод ГОЛ-3 на сильную гофрировку поэтапно

План выступления

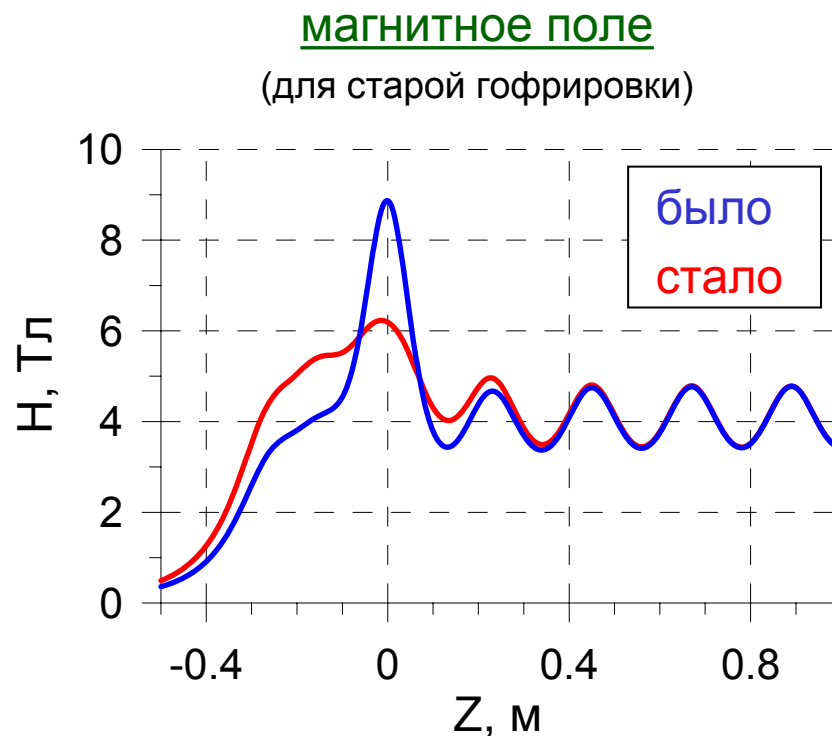
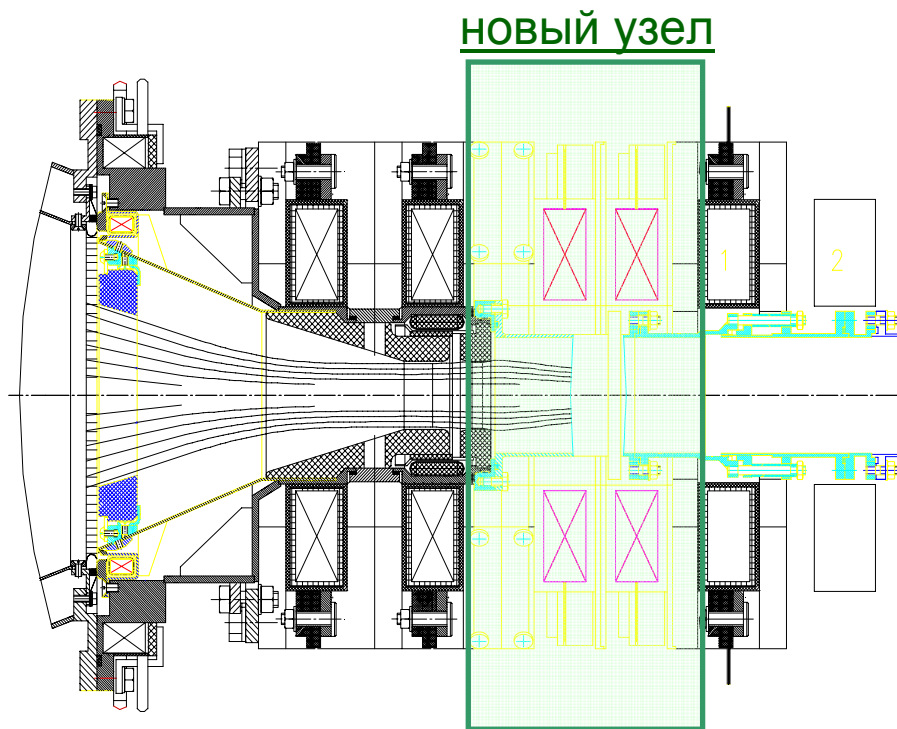
1. Введение. Мотивация работы.
- 2. Модернизация установки ГОЛ-3.**
3. Нагрев и удержание плазмы в режиме сильной гофрировки
 - Диаманитные измерения
 - Поперечные потери
 - Томсоновское рассеяние
 - Нейтронные измерения
4. Заключение.

Модернизация установки ГОЛ-3

- Произведена полная замена входного пробочного узла на новый.
- Уменьшен диаметр электронного пучка в плазме, для чего изменён катодный узел ускорителя У-2.
- Произведена перекоммутация части катушек соленоида в режим сильной гофрировки.
- В обсуждаемой серии экспериментов длина секции с сильной гофрировкой составила 2,2 м.

Модернизация пробочного узла

- Фактически вынужденный шаг из-за деградации пробочной катушки.
- Вместо пробочной установлена сдвоенная катушка соленоида.
- Диаметр камеры увеличен с 75 до 100 мм, устранены опасные места.
- Устранён узел смены входных фольг (не использовался с 1998 года).
- Поле в пробке уменьшилось.
- Изменились условия распространения газа при импульсном напуске.

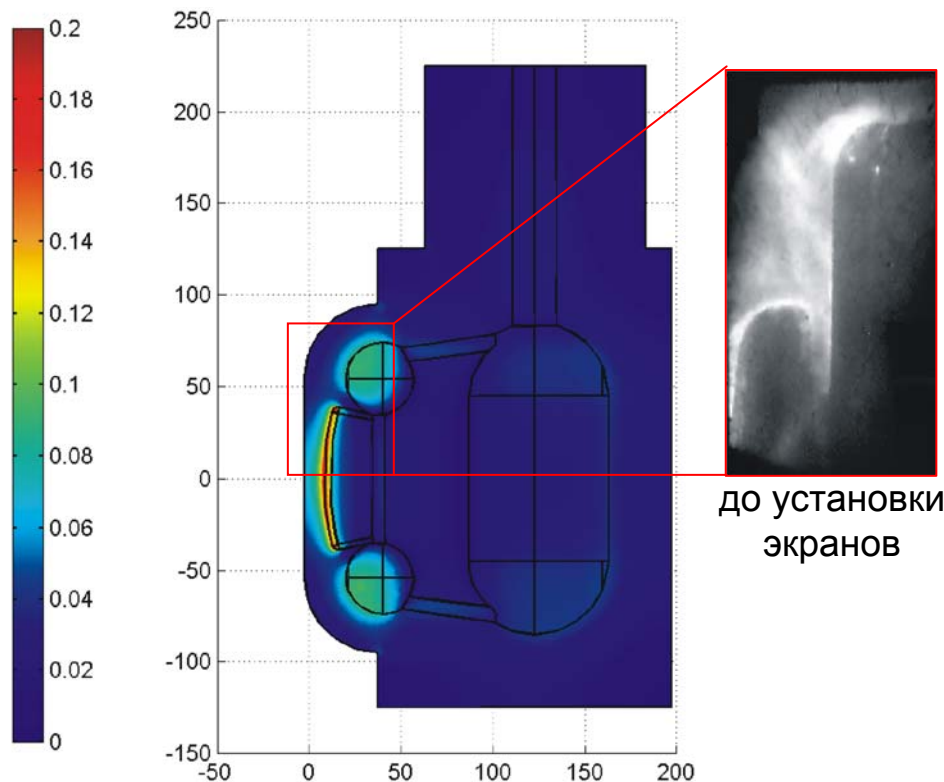


Модернизация генератора пучка

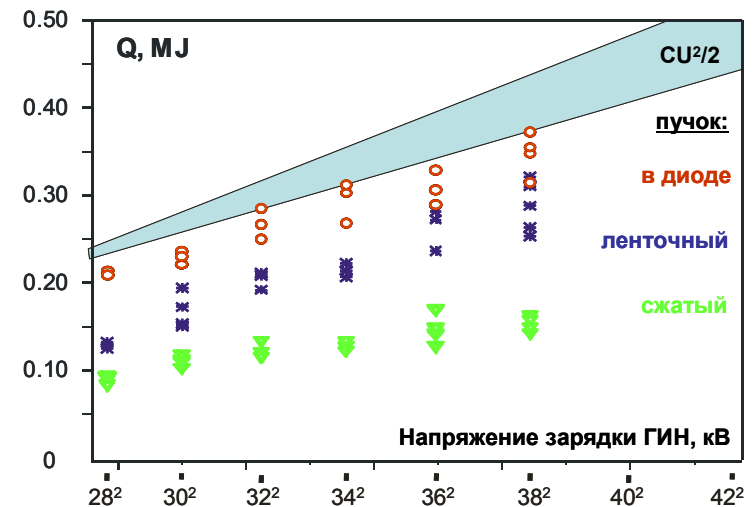
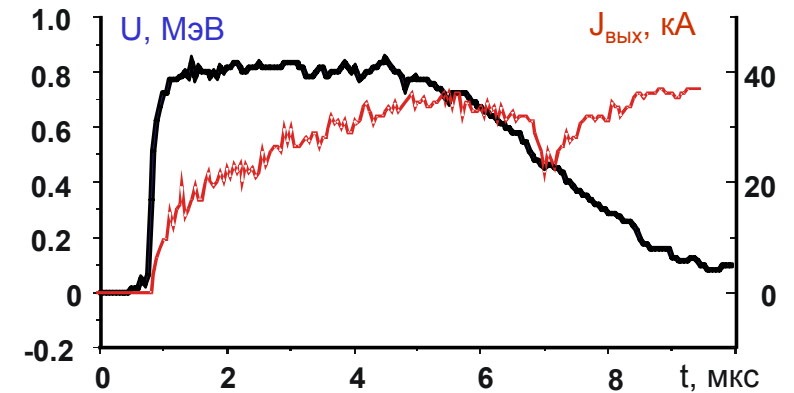
- Увеличение удельной плотности энергии = уменьшение диаметра пучка.
- Высота катода уменьшена со 140 до 70 см, проведена модификация диода.
- Уменьшение катода потребовало серьёзной модификации диода У-2.

НОВЫЙ ДИОДНЫЙ УЗЕЛ И ДИОДНАЯ ПЛАЗМА

(показана напряжённость электрического поля в МВ/см)

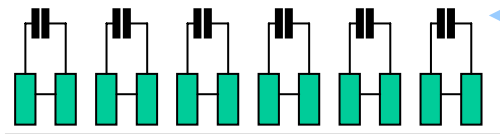


ПАРАМЕТРЫ ПУЧКА




Метод создания гофрировки

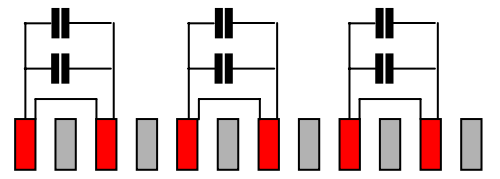
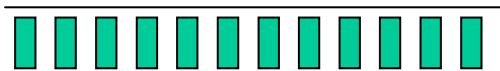
- перекоммутация катушек соленоида и секций конденсаторной батареи
- операция полностью обратимая и не требует затрат
- проблемы возникают на стыках секций с разным типом питания



Однородное поле:

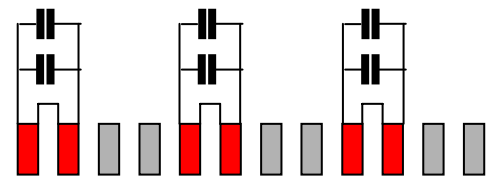
$B = 4.8$ Тл, $J = 6$ кА

 - секция конденсаторной батареи



Слабая гофрировка (схема 1+1):

$B = 4.8/3.2$ Тл, шаг 22 см, $J = 10.3$ кА



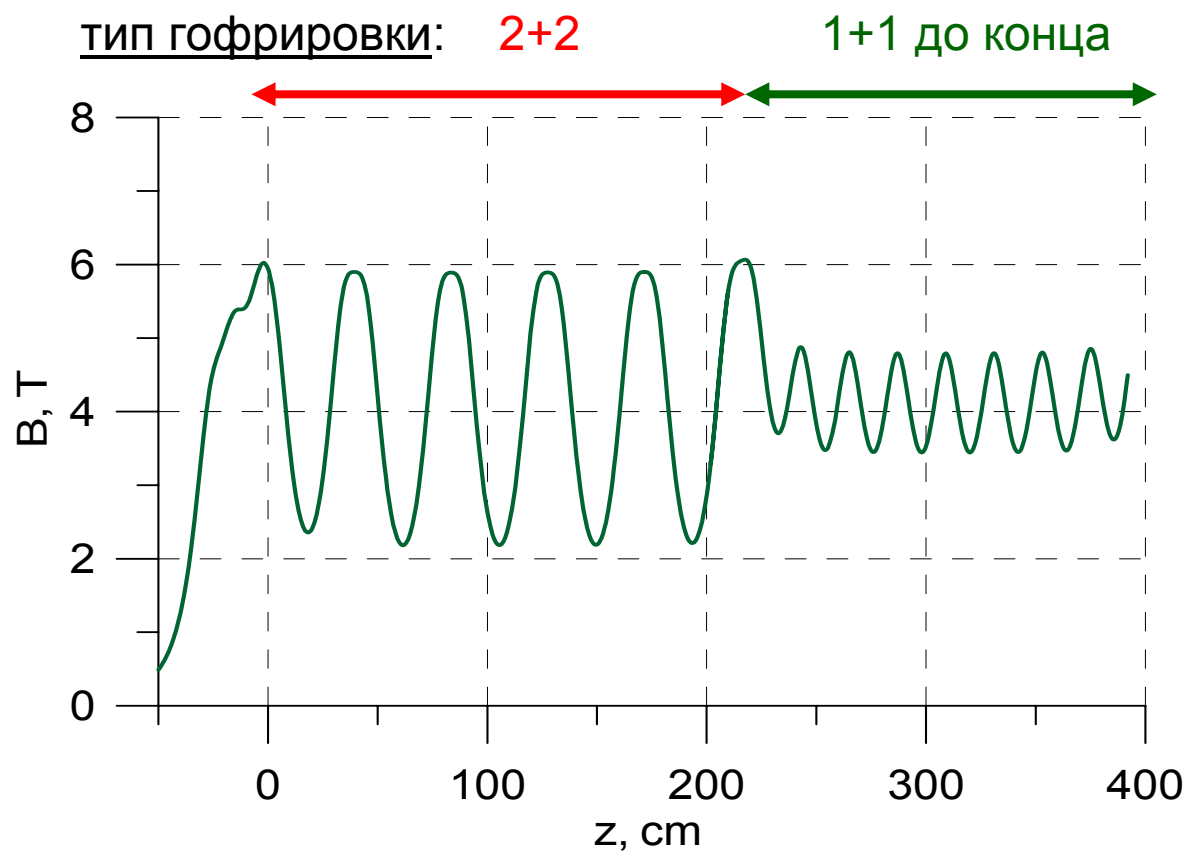
Сильная гофрировка (схема 2+2):

$B = 6.0/2.2$ Тл, шаг 44 см, $J = 10.3$ кА



Поле с сильной гофрировкой

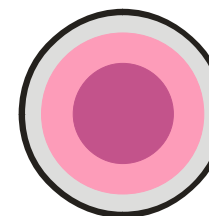
- в режим сильной гофрировки переведено 20 катушек соленоида (2.2 м) от входа
- шаг и глубина гофрировки фиксированы и задаются геометрией катушек
- повысились нерасчётные нагрузки на включённые катушки
- входная пробка фактически отсутствует



сечение плазмы

мин. 2.2 Т
d = 49.5 мм

макс. 6.0 Т
d = 30 мм

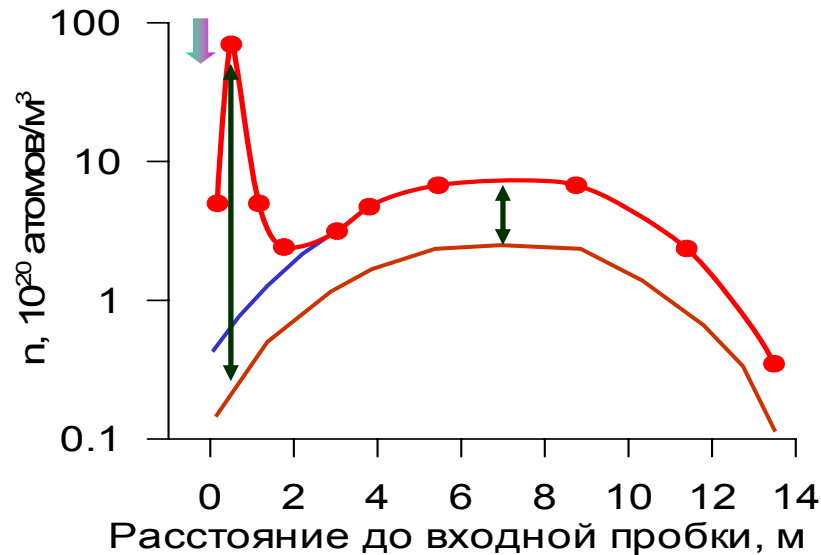


вакуумная камера d = 100 мм

План выступления

1. Введение. Мотивация работы.
2. Модернизация установки ГОЛ-3.
- 3. Нагрев и удержание плазмы в режиме сильной гофрировки**
 - Диамагнитные измерения
 - Поперечные потери
 - Томсоновское рассеяние
 - Нейтронные измерения
4. Заключение.

Условия экспериментов



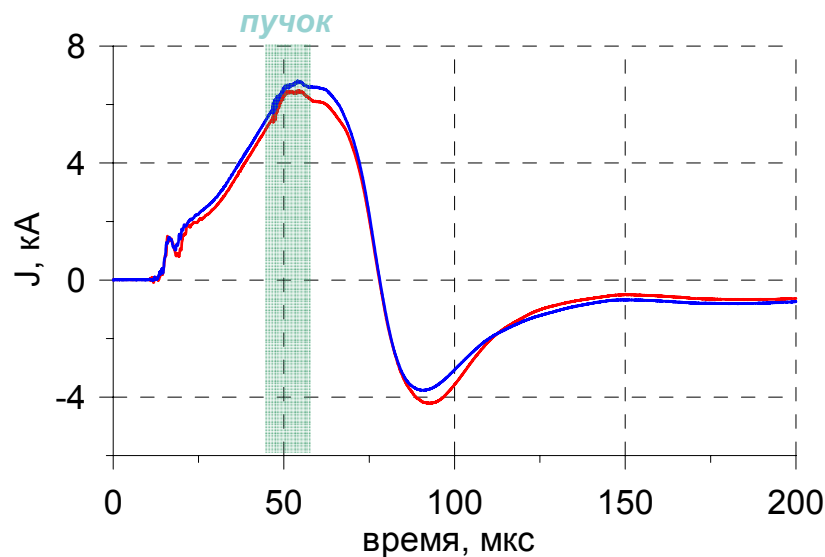
Начальная плотность газа:

- режим типа «колокол»
- пик плотности у пробки ($Z = 45$ см)

↕ диапазон изменения параметров D_2

↓ напуск газа в область компрессии
(Kr на $Z = -39$ см и D_2 на $Z = -22$ см)

Транспортировка пучка по плазме и ток разряда



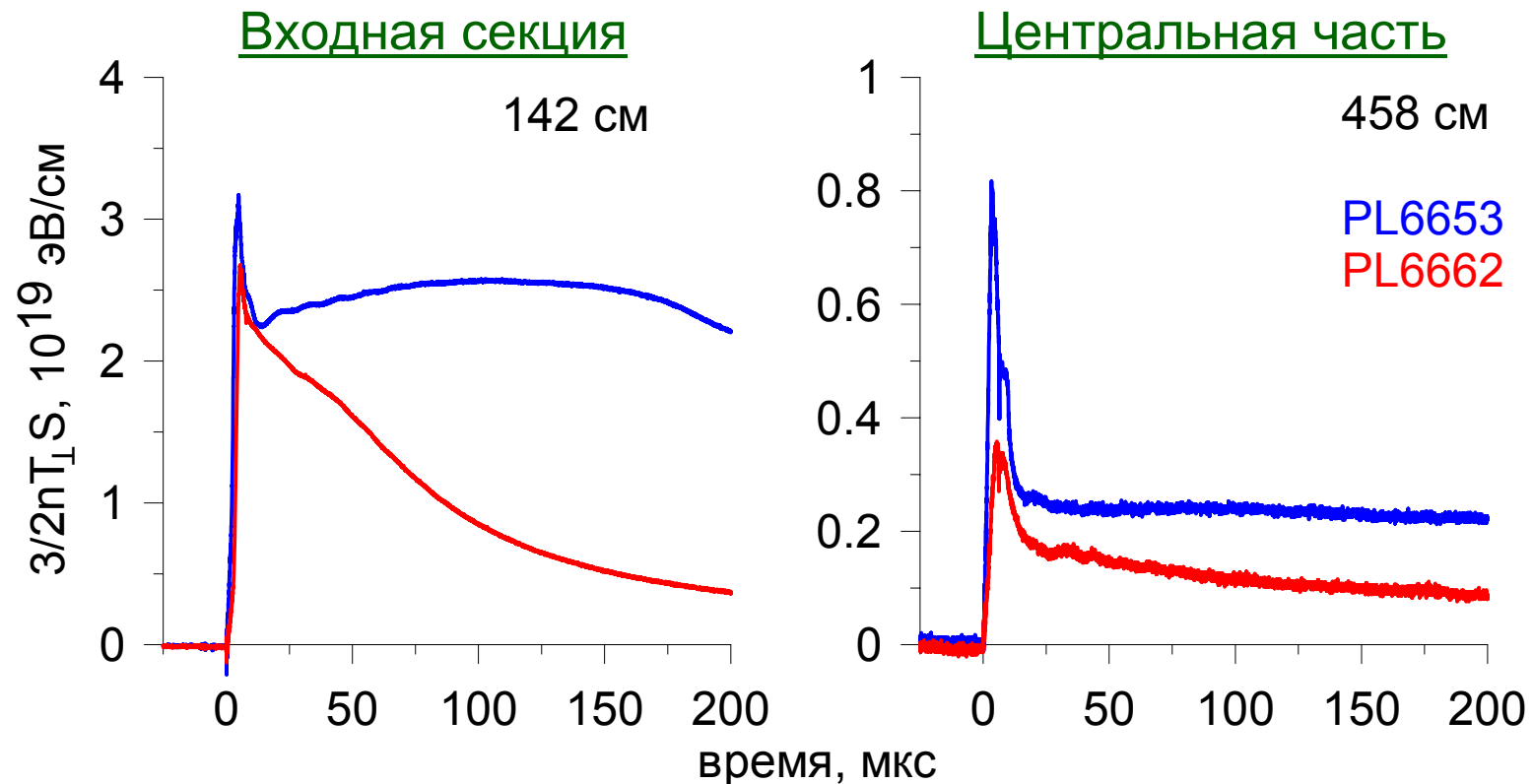
- только слабая гофрировка
- участок сильной гофрировки

Амплитуда тока хорошая,
Компенсация тока пучка полная

Нагрев плазмы – диамагнетизм

Сравниваются два выстрела в одинаковом режиме

- PL6653 – слабая гофрировка везде (последний день старого режима)
- PL6662 – секция сильной гофрировки на входе (первый день нового)
- напуск газа: $n_{\max} \sim 8 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, колоколообразное распределение



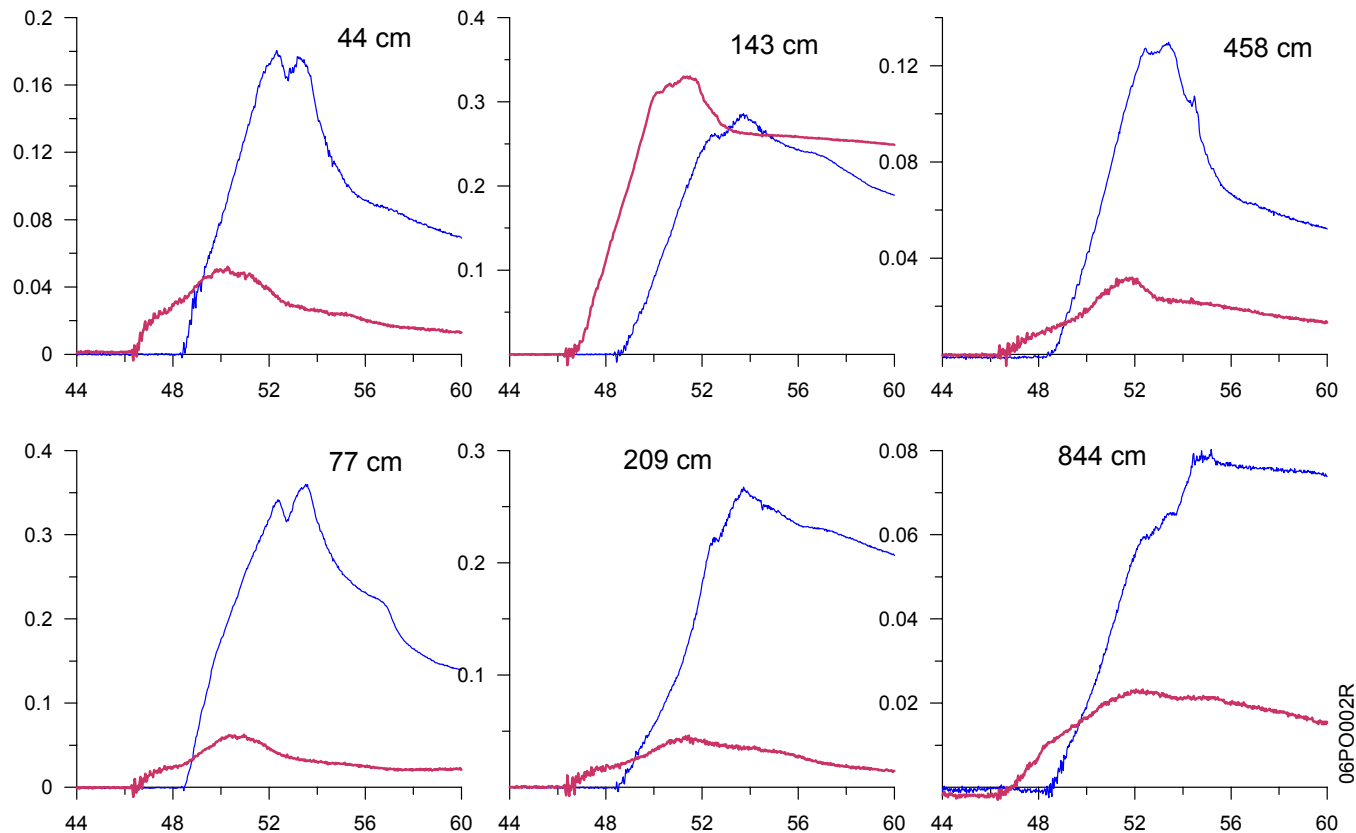
Вывод: есть отличия как в темпе нагрева, так и в удержании

Нагрев плазмы – уровень

Сравниваются новый и рекордный старый режимы (типичные выстрелы)

- PL5802 – типичный представитель рекордного сезона зима-2004
- PL6720 – типичный представитель сезона зима-2006 (секция 2+2)
- напуск газа: $n_{\max} \sim 7 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, короткий пик до 10^{22} м^{-3} на 45 см

$$U \sim nT_{\perp}S$$

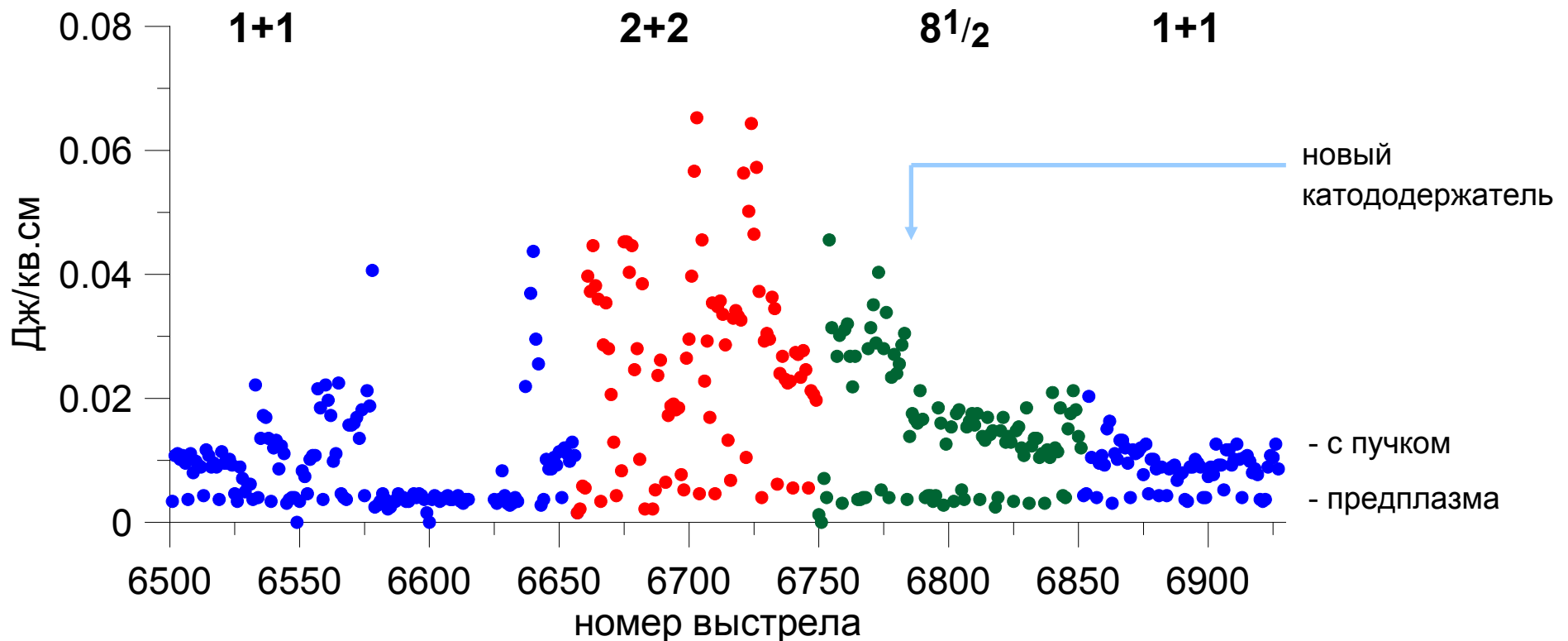


по горизонтальным осям - время в мкс, по вертикальным осям - сигнал в вольтах

Поперечные потери

Данные стеночного калориметра на $Z = 117$ см (без отбраковки)

- типичные потери энергии на стенку за импульс ~ 0.03 Дж/см²
- полные потери поперёк магнитного поля $0.03 \times \pi \times 10 \times 1000 \sim 1$ кДж
- диамагнитная энергия плазмы в максимуме нагрева ~ 1 кДж
- **в этом режиме преобладают поперечные потери**
- **плотность плазмы была снижена** по сравнению с гофрировкой 1+1



«Полупрямое» поле на входе

- рабочая гипотеза: сильные градиенты поля на входе приводят к плохой релаксации пучка в глубине плазменного столба
- был сформирован короткий отрезок почти однородного поля.

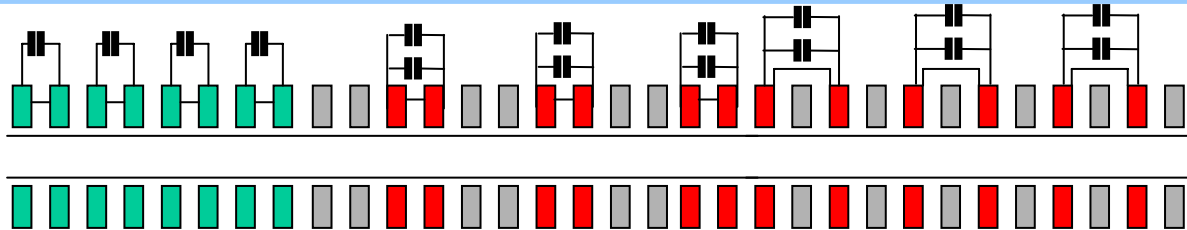
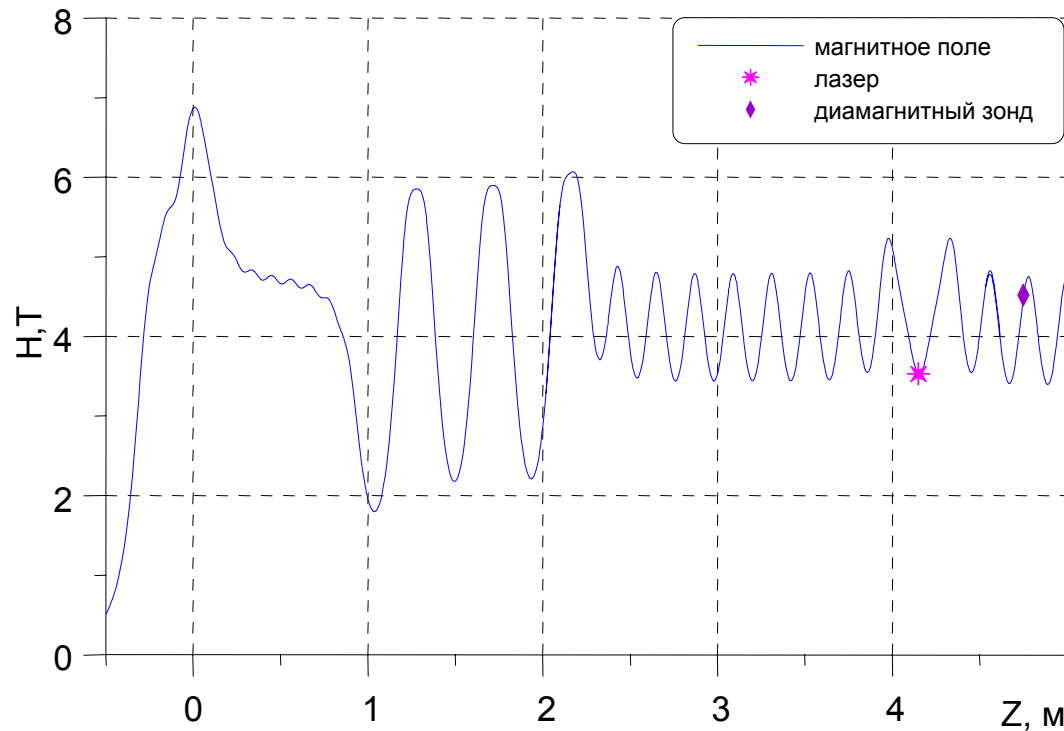


схема подключения

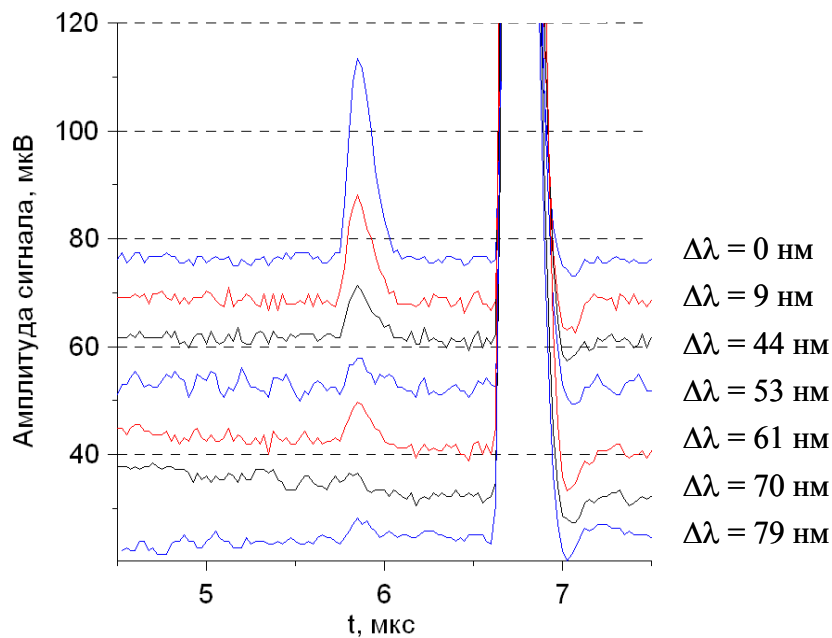


конфигурация « $8\frac{1}{2}$ »

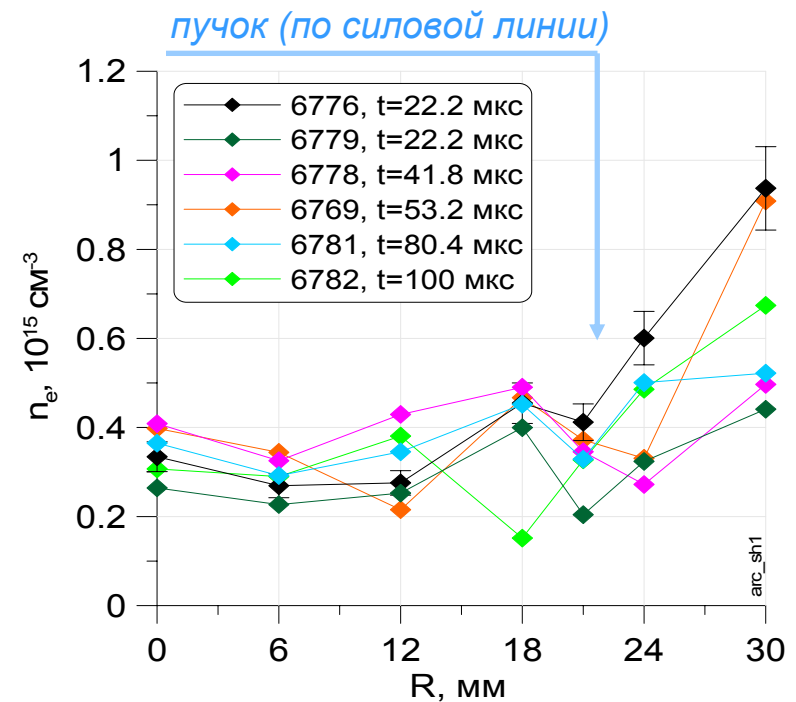
Томсоновское рассеяние

- **Лазер:** Nd⁺, 40 Дж, 1058 нм, 15нс на Z = 415 см
- **Регистрация:** 7 каналов, оптоволоконные линии, лавинные фотодиоды + A1225
- **Режимы:** радиальный профиль плотности, спектр по энергии (температура)

сигналы рассеяния в «температурном» режиме



радиальный профиль плотности

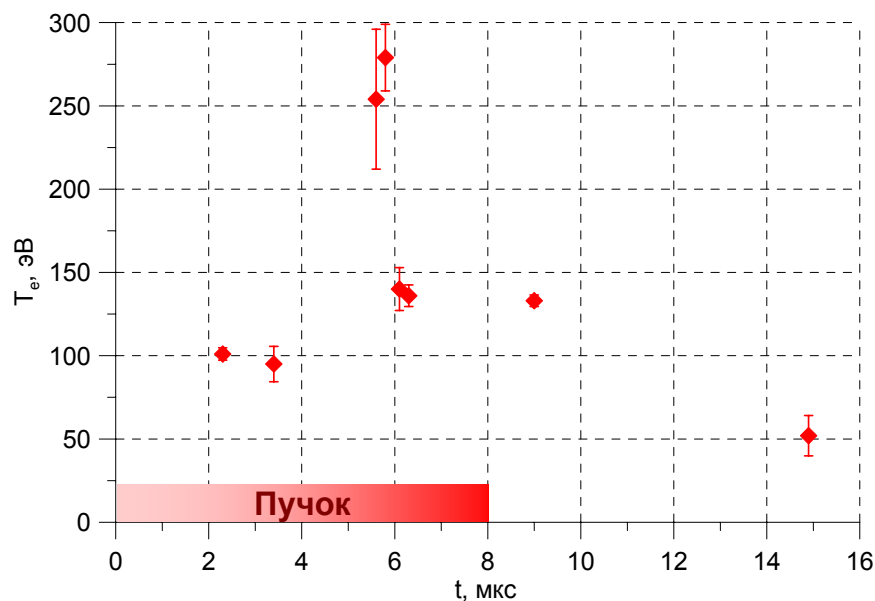


Результаты измерения температуры

- В этом режиме система томсоновского рассеяния с новой системой регистрации только запускалась, поэтому надёжно измеренных данных немного (с учётом того, что на установке не было длинных серий в одном режиме).
- Температура плазмы на $Z=4.15$ м доходила до 0.3 кэВ.
- На стадии нагрева «диамагнитное» и «лазерное» энергосодержание были близки, затем начиналось заметное расхождение

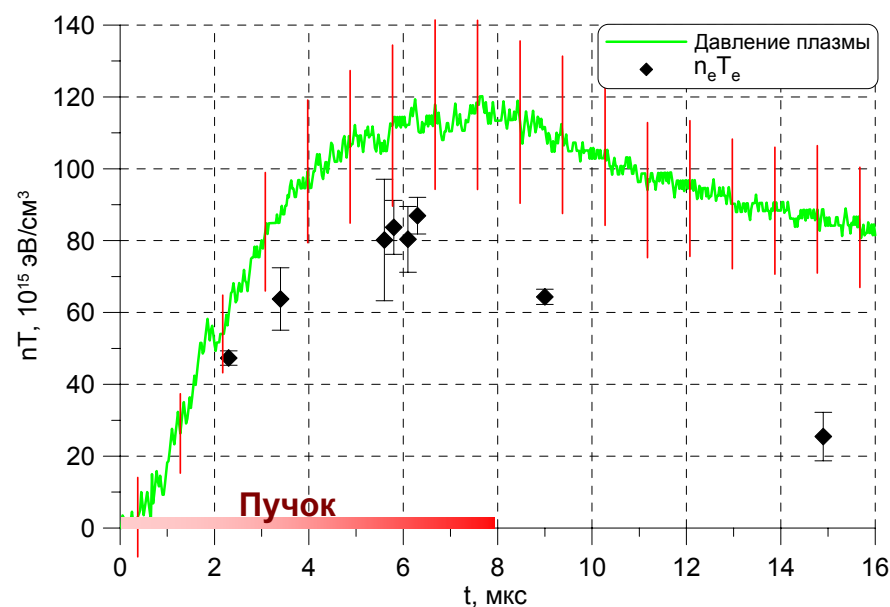
Динамика температуры

- у выстрелов при $t \sim 6$ мкс разная плотность
- точек мало потому, что их мало



Сравнение с диамагнетизмом

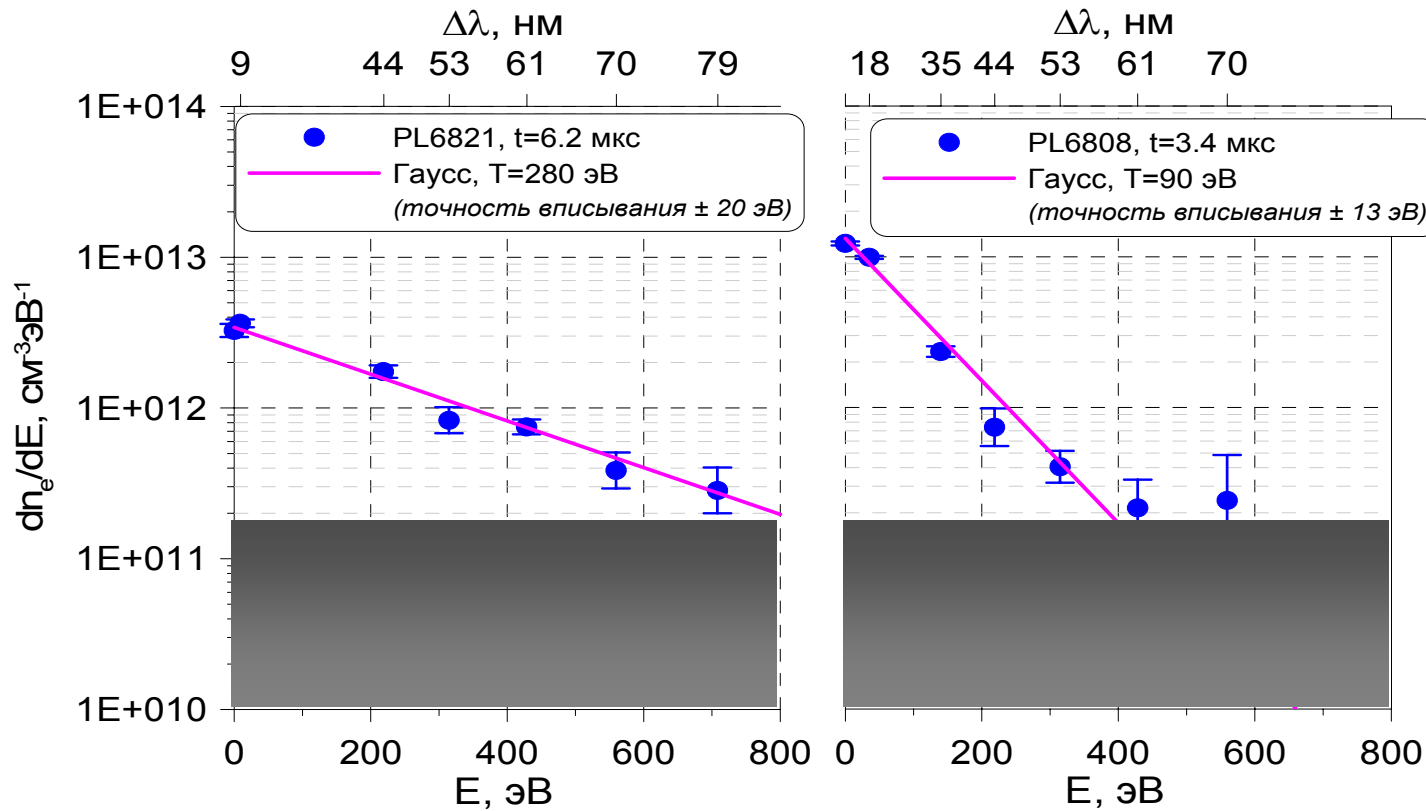
- зонд на $Z = 4.57$ м, лазер на $Z = 4.15$ м
- штриховка красным: разброс диамагнетизма



Отличие томсона от диамагнетизма

- Расхождение при $t \sim 6$ мкс лежит в пределах точности калибровок.
- При обработке не учитывался радиальный профиль плотности.
- Возможно существование надтепловых электронов.
- После $t \sim 6$ мкс начинается расхождение из-за нагрева ионов.

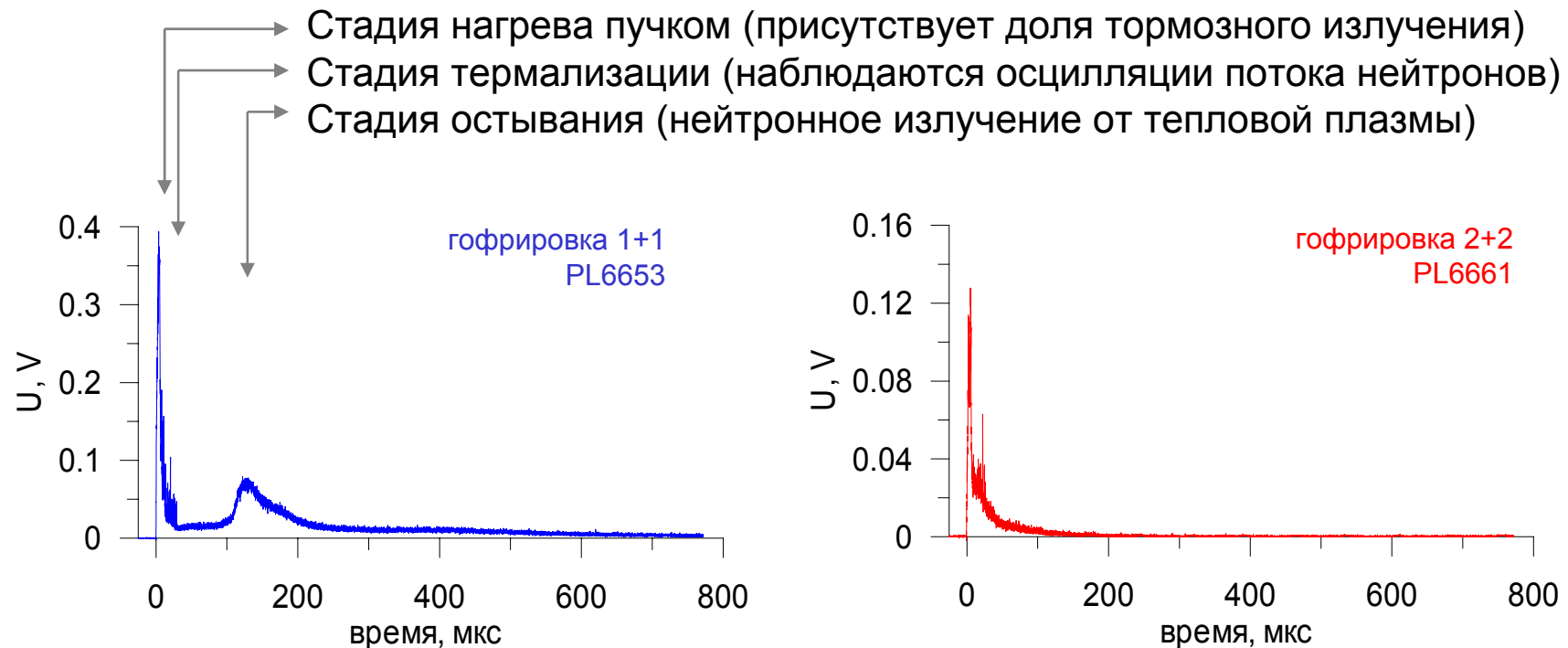
Спектры рассеянного излучения



Нейтронные измерения

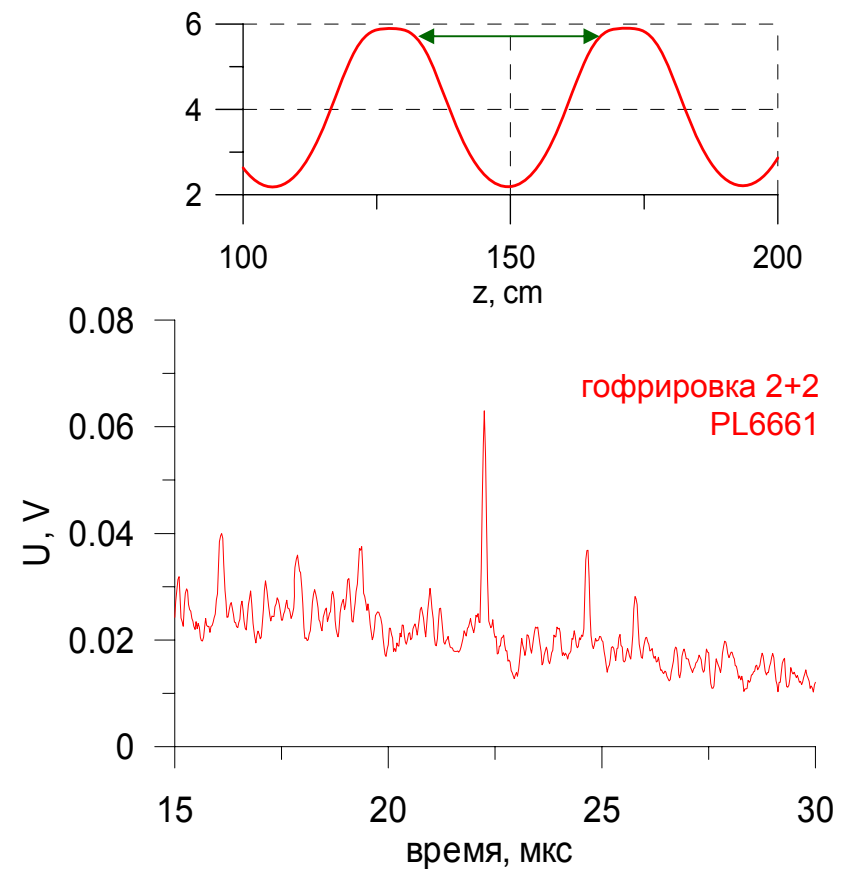
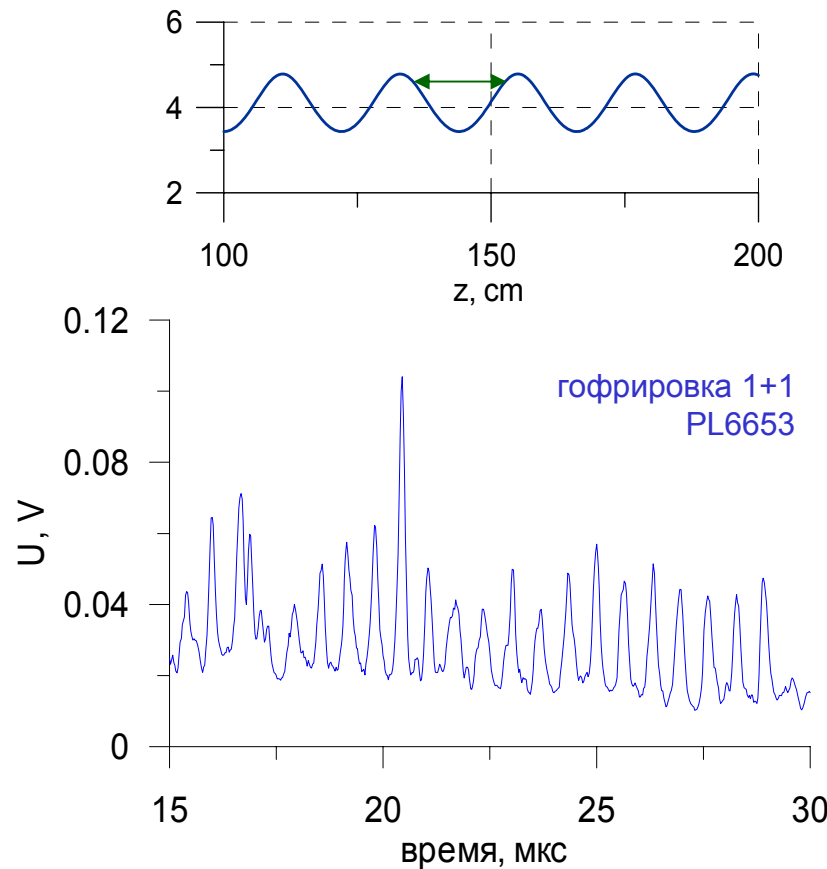
- Используется набор из нескольких компактных сцинтилляционных датчиков - «локальные детекторы»
- Датчик состоит из небольшого сцинтиллятора, непосредственно прикреплённого к гибкому оптоволокну. В пультовой – ФЭУ и АЦП с источником питания.
- Датчики располагались прямо у вакуумной камеры. Катушки соленоида служили конструктивной защитой от «чужого» нейтронного/гамма-излучения.

Сигналы локальных нейтронных детекторов



Нейтроны: осцилляции потока

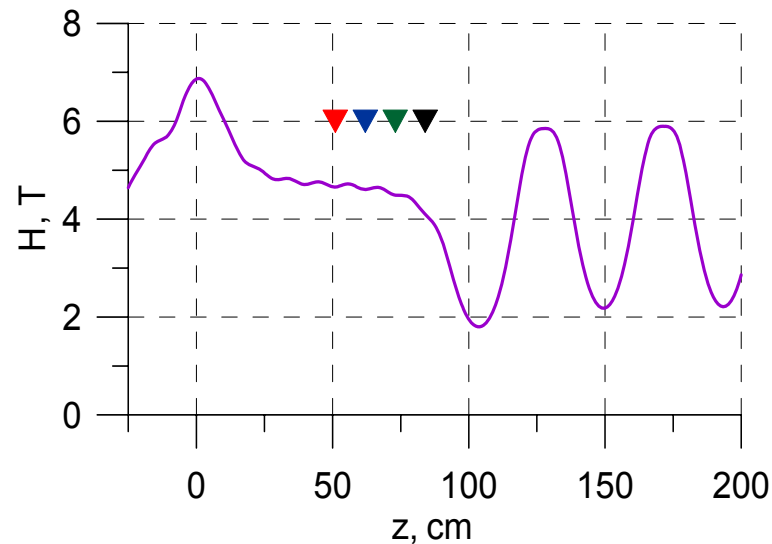
- на стадии термализации плазмы наблюдаются осцилляции потока нейтронов.
- осцилляции объясняются возникновением неустойчивости баунс-колебаний пролётных ионов («свисток», теоретическое рассмотрение Беклемишева).
- период осцилляций зависит от ионной температуры и шага гофрировки.



Нейтроны: осцилляции в режиме $8\frac{1}{2}$

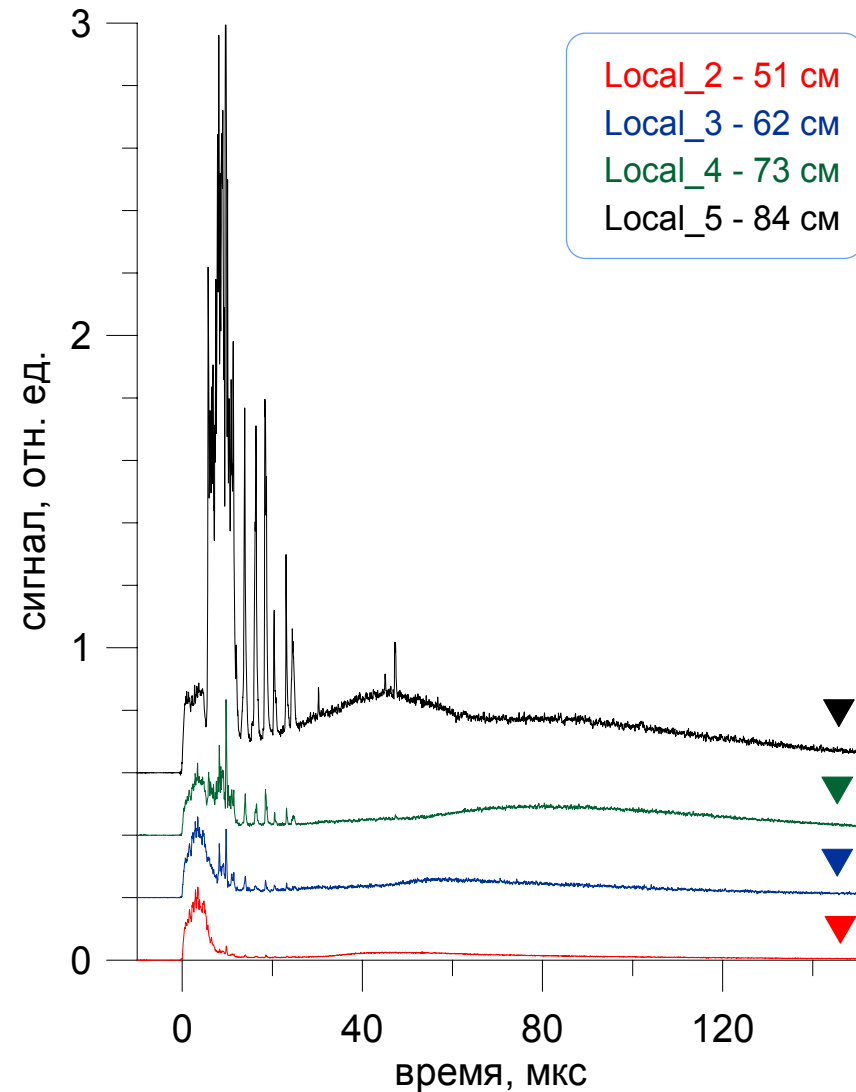
- В конфигурации с коротким участком однородного поля образуется длинная «супергофра». Соответственно, период колебаний должен вырасти.
- На однородном участке установлено четыре локальных детектора.

Расположение детекторов



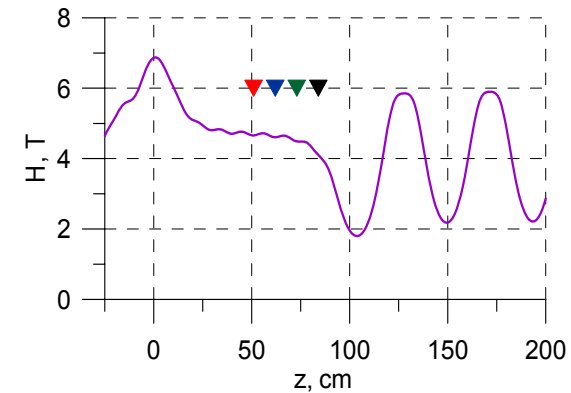
Сигналы локальных детекторов

грубая нормировка при $t \sim 5$ мкс



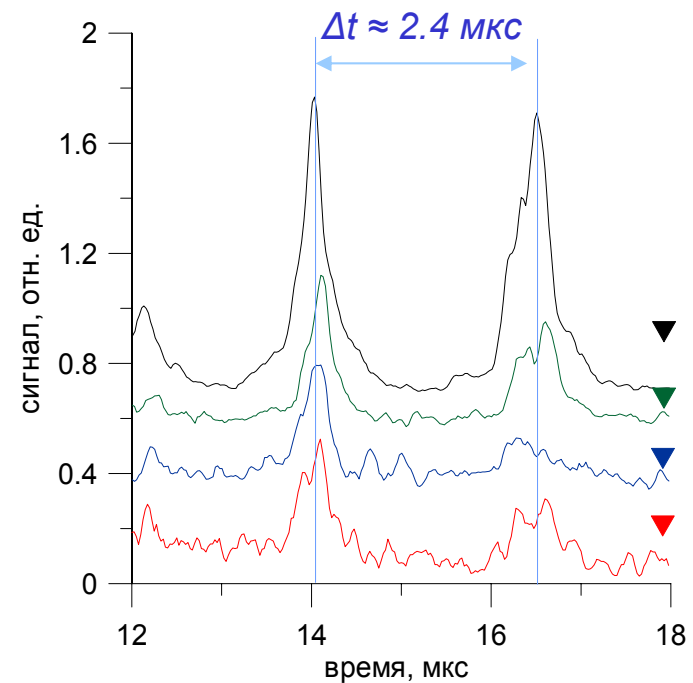
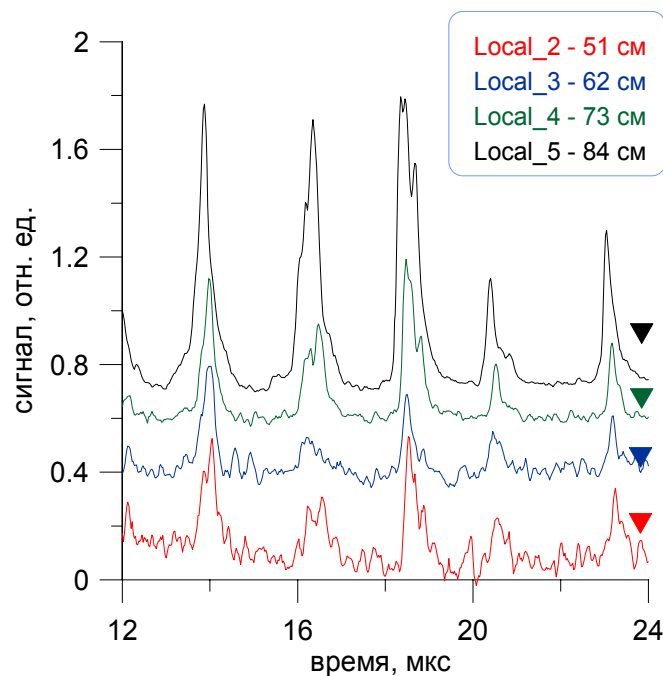
Нейтроны: осцилляции в режиме 8½

- В конфигурации с коротким участком однородного поля образуется длинная «супергофра».
- На однородном участке установлено четыре локальных детектора.



Сигналы локальных детекторов

грубое выравнивание амплитуд пиков, развёртка синхронизована по излучению пучка



План выступления

1. Введение. Мотивация работы.
2. Модернизация установки ГОЛ-3.
3. Нагрев и удержание плазмы в режиме сильной гофрировки
 - Диаманитные измерения
 - Поперечные потери
 - Томсоновское рассеяние
 - Нейтронные измерения
- 4. Заключение.**

Заключение

- на установке ГОЛ-3 проведены эксперименты с участком сильной гофрировки магнитного поля (5 ячеек по 44 см, $R \sim 3$);
 - получены устойчивая транспортировка пучка и нагрев плазмы, однако абсолютные значения плотности и температуры были низкими;
 - обнаружено, что поперечные потери составляют значительную долю полных потерь энергии в этом режиме;
 - период осцилляций нейтронного потока изменился в соответствии с ожиданиями, что в принципе подтверждает интерпретацию этих осцилляций как баунс-неустойчивость пролётных ионов, но распространения волны «горения» не замечено.
-
- продолжение экспериментов с сильной гофрировкой целесообразно при более высоких параметрах плазмы (плотности и температуры).

Спасибо за внимание

Плазма у входной пробки (12 метров от источника)