



Результаты и состояние дел на ГОЛ-3

В. В. Поступаев



Электронный пучок

энергия $0.5 \div 0.8$ МэВ
 ток ~ 30 кА
 длительность ~ 10 мкс

Магнитное поле

многопробочное
 $B_{max} / B_{min} = 4.8 / 3.2$ Тл
 52 периода гофрировки

Плазма

плотность $10^{13} \div 10^{16}$ см⁻³
 температура $T_e \approx T_i \sim 2$ кэВ
 время жизни до 1 мс

- **Новая интересная физика**

(две основных темы: коллективный нагрев плазмы электронным пучком и удержание горячей плазмы в многопробочной ловушке)

- **Продвижение к термоядерной энергетике**

- работы в поддержку открытой ловушки нового поколения в ИЯФ
- испытания конструкционных материалов для будущего т/я реактора

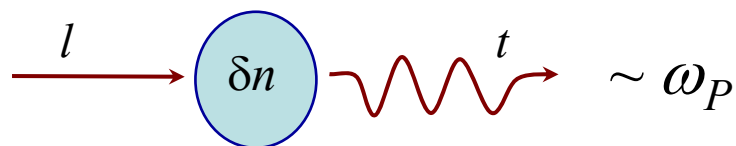
- **Развитие экспериментальной техники и технологий**

- электронные пучки $10 \div 100$ МВт, длительностью ~ 1 мс (*А.В. Бурдаков – завтра*)
- атомарные пучки для ГОЛ-3 ($1 \div 2$ МВт, длительностью ~ 1 мс, *совместно с Л.9*)
- современные промышленные системы контроля и управления установкой
- новая быстрая электроника для систем регистрации (*работа сект. 9-15*)
- быстродействующий нейтронный детектор (*совместно с сект. 9-15*)
- новые и улучшенные методики измерения параметров плазмы

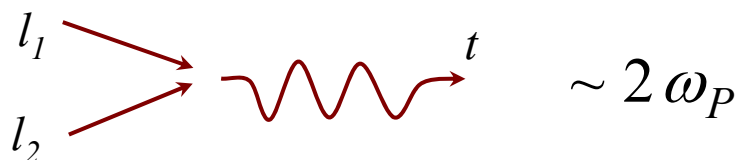
- Интенсивное взаимодействие электронного пучка с плазмой.
- Накачка ленгмюровских колебаний (черенковский синхронизм $\omega_p \approx k \cdot v_{beam}$).
- Ленгмюровские колебания = сильные ВЧ электрические поля в плазме.
- Нелинейная стадия ленгмюровской турбулентности → излучение.
- Характерные частоты: первая и вторая гармоники плазменной частоты,
 $f_p = \frac{\omega_p}{2\pi} = 9 \cdot 10^3 \sqrt{n_e}$ [Гц, см⁻³]; для условий ГОЛ-3 частота ~ 0.1÷1 ТГц.
- **Научные задачи:** астрофизика, генераторы ~ТГц, диагностика плазмы.

Механизмы генерации

а) конверсия плазмона в фотон на флуктуациях плотности

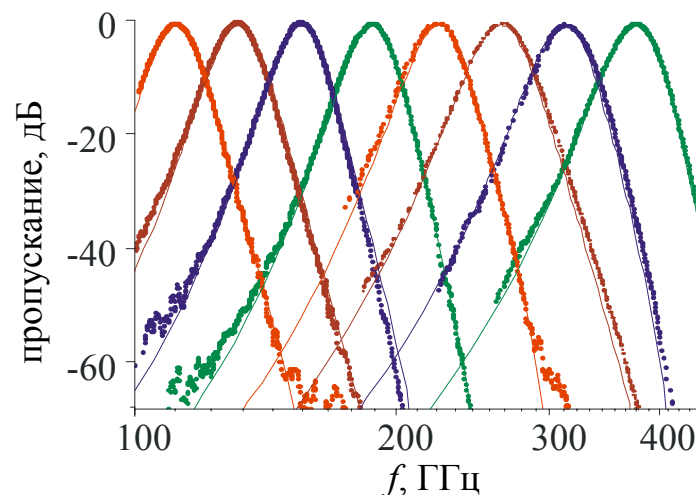


б) аннигиляция двух плазмонов в фотон

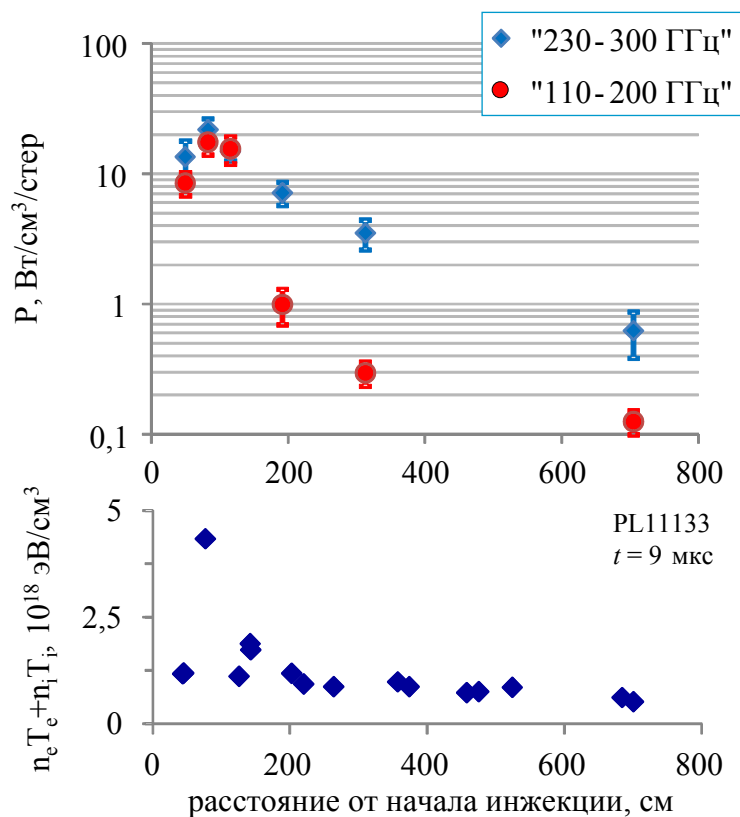


8-канальный спектрометр (2011)

АЧХ каналов, расчёт и измерения

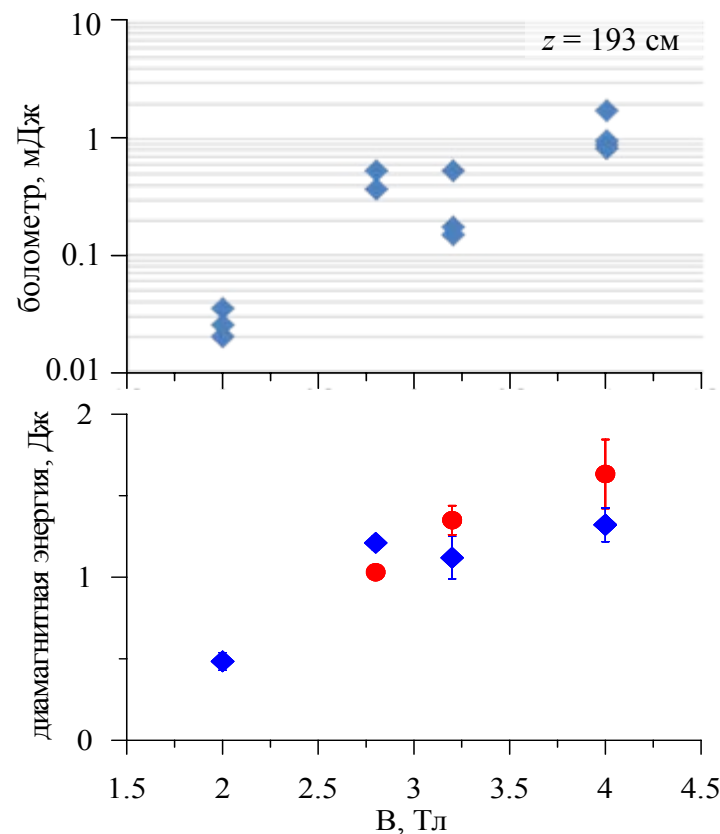


Распределение мощности генерации по длине плазмы



- больше излучает там, где плазма горячее
- спектр излучения широкий
- на разных частотах картина разная

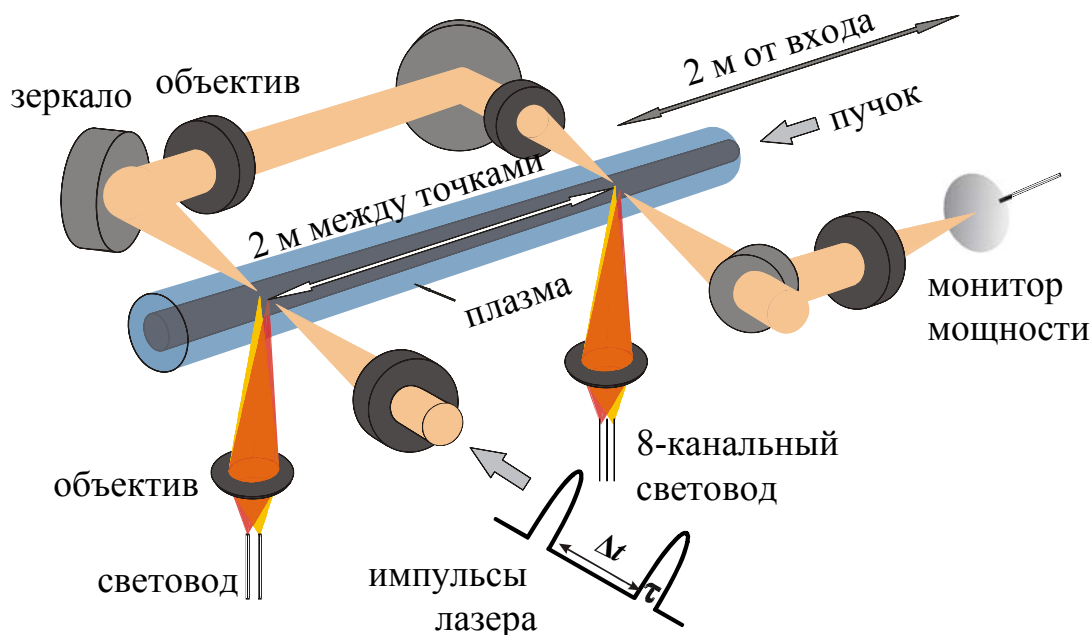
Зависимость мощности от магнитного поля в соленоиде



- падение мощности сигнала с уменьшением магнитного поля очень быстро!

- Некоторые модели турбулентности плазмы предсказывают появление «быстрых» локализованных флуктуаций плотности (каверны Захарова и др.).
- Если такие флуктуации плотности есть, то они могут существенно влиять на плазменные процессы (уменьшение теплопроводности, генерация СВЧ).
- Прямое наблюдение: томсоновское рассеяние света лазера на электронах.
- Измеряется изменение плотности плазмы за короткий период ~ 100 нс.
- Точка наблюдения совмещена с аппаратурой регистрации суб-ТГц спектра.

Схема измерений



Параметры:

2 импульса,
 2 точки по длине,
 8 точек по радиусу
 (4 – в области пучка)

$$\lambda = 1054 \text{ нм}$$

$$\tau = 20 \div 40 \text{ нс}$$

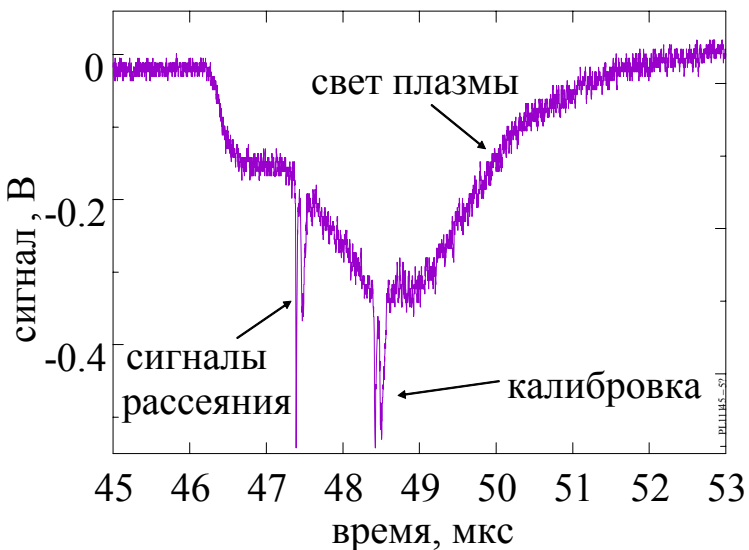
$$E = 2 \times 15 \text{ Дж}$$

$$\Delta t = 0.1 \div 100 \text{ мкс}$$

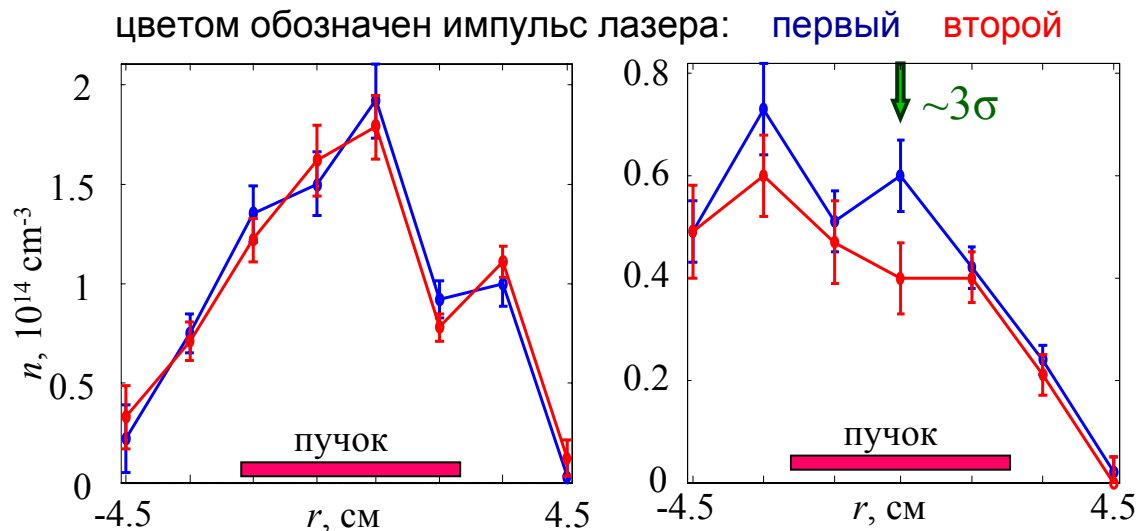
$$\varnothing_{\text{фок}} = 200 \text{ мкм}$$

- Проведена серия из 84 выстрелов (разное время срабатывания и задержка)

Типичный сигнал



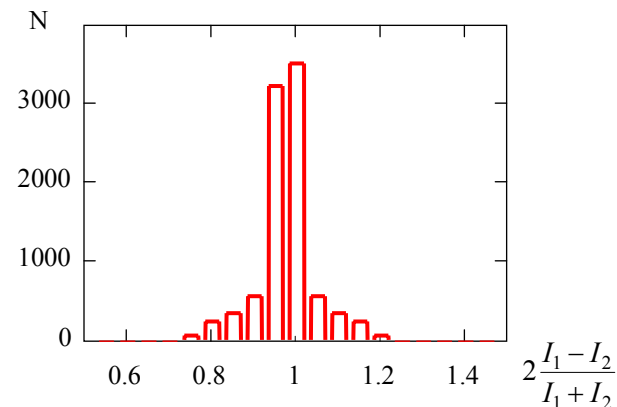
Радиальные профили плотности



Есть события с большим изменением плотности

- Нужна большая статистика (>1000 событий)
- Такая же статистика в контрольных экспериментах
- Улучшение точности и оптимизация диагностики
- Ожидаемое распределение – не Гаусс, форма крыльев зависит от структуры турбулентности

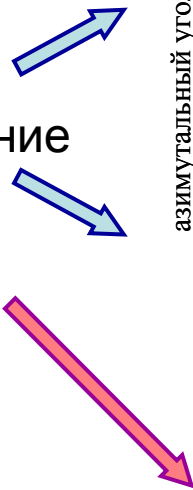
одно из модельных распределений



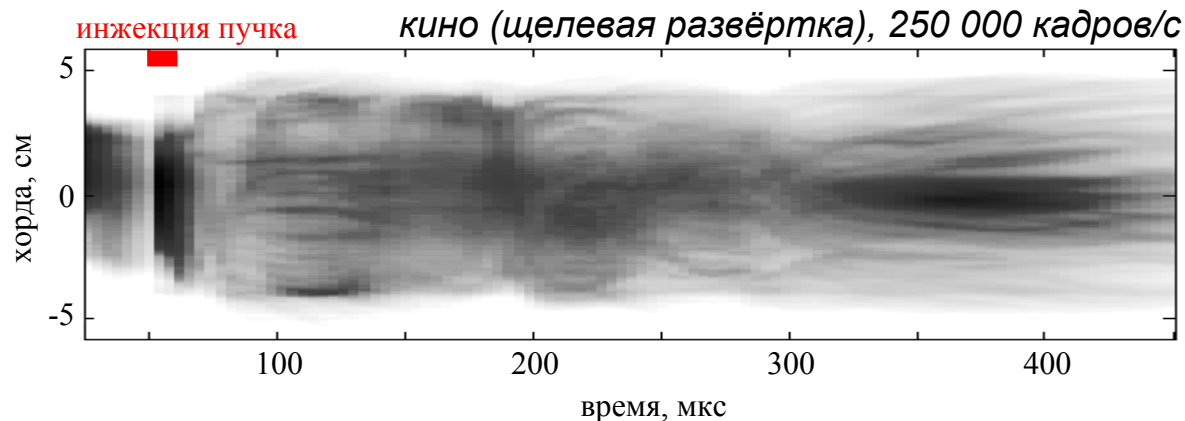
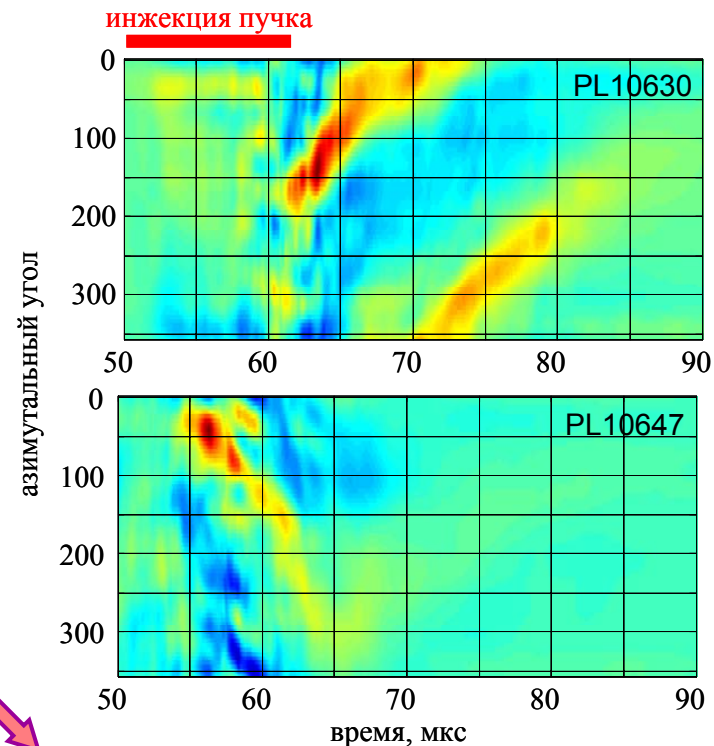
- Плазма в магнитном поле обычно вращается из-за ненулевого собственного потенциала,

для ГОЛ-3:
$$\nu = \frac{V_{E \times B}}{2\pi R} = \frac{cE}{2\pi RB} \sim \frac{cT_e}{2\pi R \delta RB} \sim 10^5 \text{ Hz}$$

- Граница горячей области действительно вращается с такой частотой, но направление вращения зависит от режима!
- Периферия вращается всегда медленно.
- Вращение должно влиять на качество удержания плазмы в ловушке.



магнитные измерения



- Пучки в плазме = физика турбулентности
- Разные масштабы по времени → появление новых физических явлений
- 1960е гг. : пучки малой мощности (много экспериментальных групп)
исследована физика релаксации пучка
- 1970-80е гг. : $\tau \sim 100$ нс; $P \sim 10 \div 100$ ГВт (много экспериментальных групп)
релаксация мощного релятивистского пучка и нагрев плазмы
- 1990-2000е гг. : $\tau \sim 10$ мкс; $P \sim 20$ ГВт (ГОЛ-3)
новая физика: подавление продольной теплопроводности, быстрый нагрев ионов, подавление продольного потока частиц, стабилизация магнитным широм → достигнута субтермоядерная температура

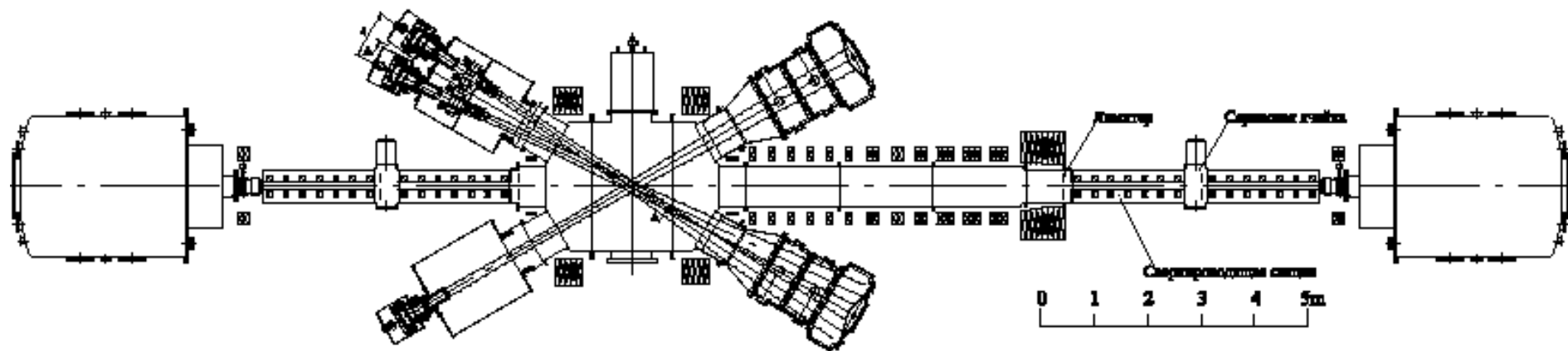
• Куда двигаться дальше?

С реакторной точки зрения интересна работа в стационарном режиме.

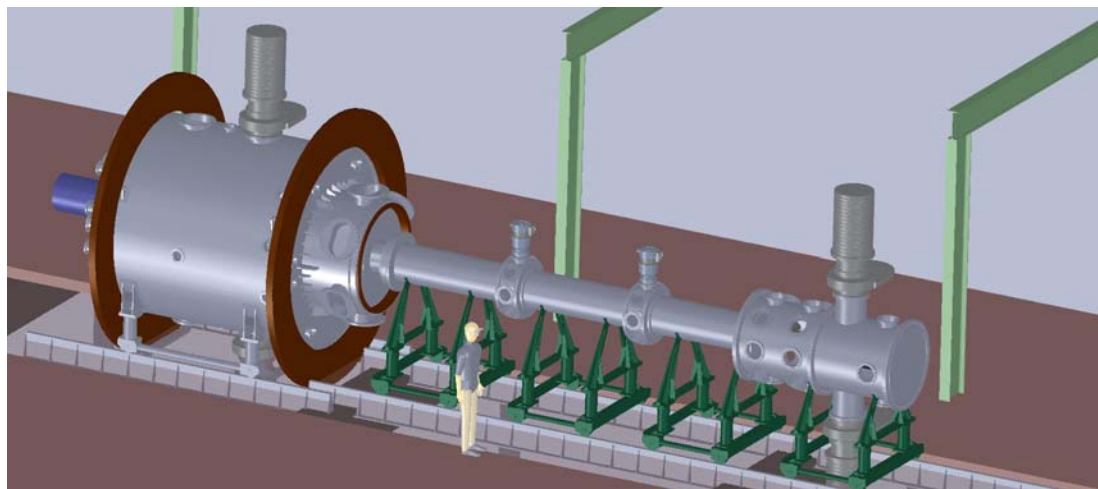
Главное направление: увеличение длительности при снижении мощности

- Цель работ на ГОЛ-3: развитие физики и технологии длинноимпульсных электронных пучков с $E \sim 100$ кэВ, $I \sim 1$ кА, $P \sim 10 \div 100$ МВт, $\tau \sim 1$ с
(подробнее в докладе А.В. Бурдакова завтра)
- 2011 год: первые эксперименты с пучком $\tau > 100$ мкс на ГОЛ-3 и ГДЛ.

был представлен А.Д. Беклемишевым на научной сессии-2011



- установка нового поколения с достойными термоядерными параметрами:
 $n \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $\langle E_i \rangle \sim 20 \text{ кэВ}$, $T_e \sim 0.5 \div 1 \text{ кэВ}$, $\beta \sim 0.2 \div 0.4$, $Q_{\text{ЭКВ.ДТ}} \sim 0.02 \div 0.08$
- интегрировано понимание физики и технологии команд ГОЛ-3 и ГДЛ
- есть консенсус в термоядерном сообществе ИЯФ
- по основным принципиальным трудностям найден «план В»
- проект включает в себя концевые многопробочные секции и квазистационарные электронные пучки (время поддержания плазмы $\sim 1 \text{ с}$)
- несколько этапов строительства (на территории АМБАЛ-М в зд. 20А), в том числе отработка технологий и стационарный стенд испытания материалов

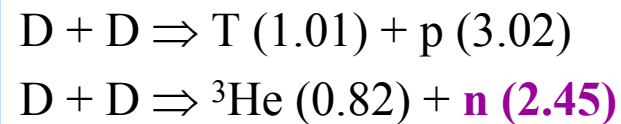
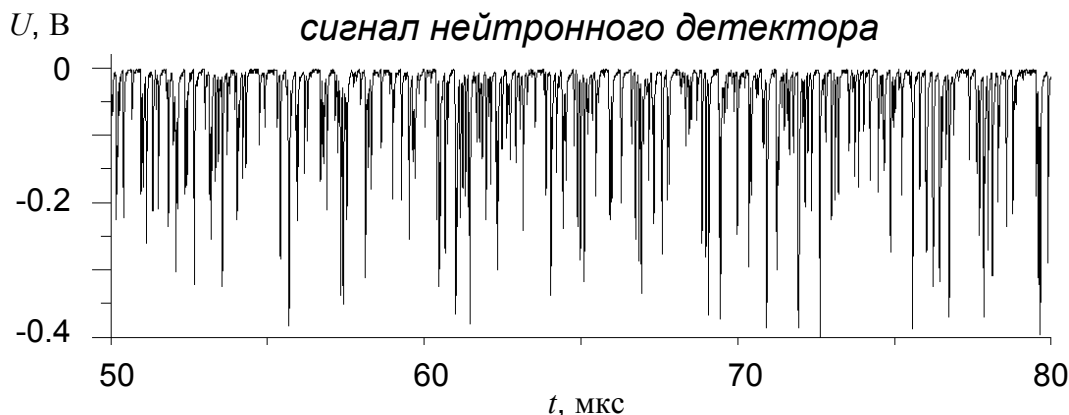


проект первой очереди ГДМЛ:
концевая многопробочная
структура с источником плазмы и
квазистационарным электронным
пучком

- Проведение потока плазмы из плазменной пушки через гофрированное поле;
- Разработка квазистационарных электронных пучков “низкой” мощности;
- **Разработка импульсно-периодического пучка и эффективных схем питания для него;**
- Спектр колебаний плазмы в ячейках и их добротность, возбуждение колебаний парой коротких импульсов;
- Стимуляция коллективного рассеяния ионов в ячейках многопробочной системы при низкой плотности (разными методами, напр. СВЧ),
- Изучение спонтанной “баунс”-турбулентности,
- **Освоение технологии использования сверхпроводящих многопробочных соленоидов совместно с тёплыми магнитами.**

*цитата из выступления А.Д. Беклемишева
на научной сессии-2011*

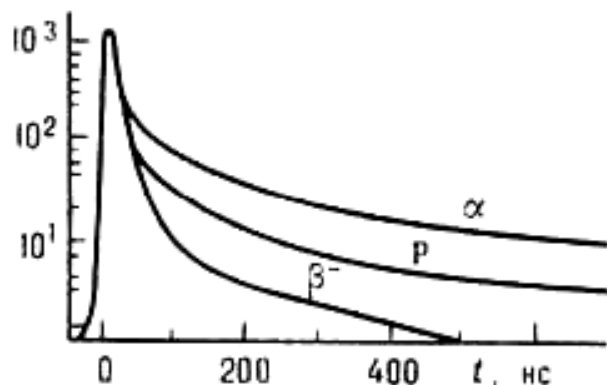
Задача: измерить интенсивность и спектр нейтронного потока на ГОЛ-3



- короткое время измерения
- большой поток частиц (наложение импульсов)
- надо разделять n и γ

Решение: метод цифровой дискриминации n и γ в реальном времени

форма световых вспышек в стильбене зависит от типа поглотившейся частицы

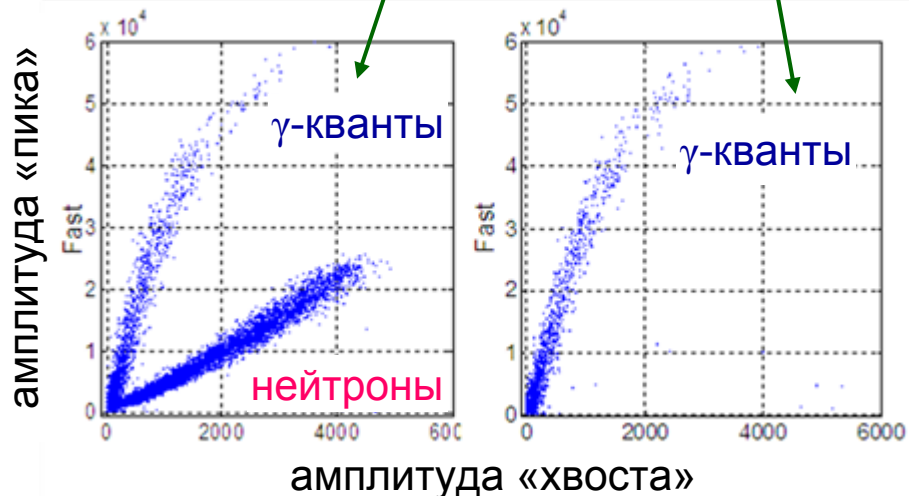
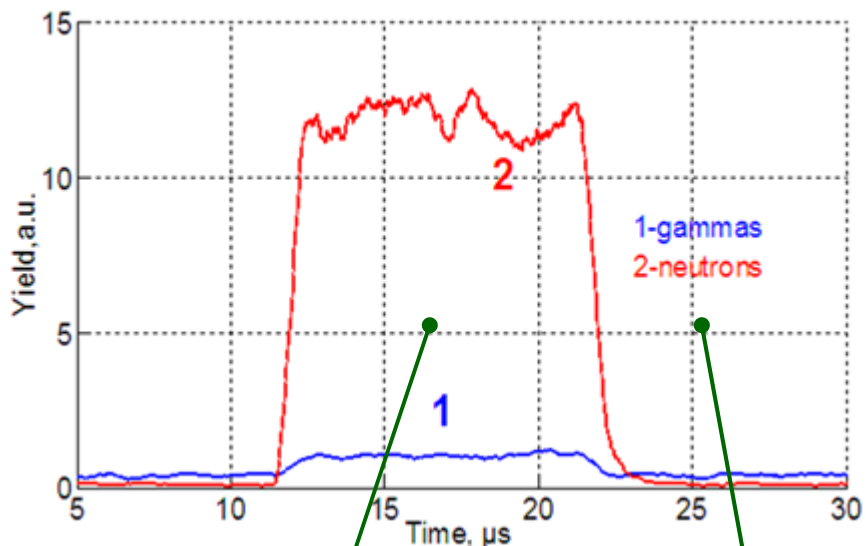


- стильбен $\varnothing 30 \times 30$ мм
- ФЭУ Hamamatsu R6231-100
- обработка в режиме реального времени
- электроника сделана в сект. 9-15

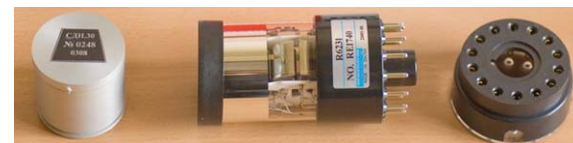
Выгоды:

- высокая скорость счёта
- оптимизированные алгоритмы разделения
- возможность «перепрошивки» программ без изменения аппаратной части

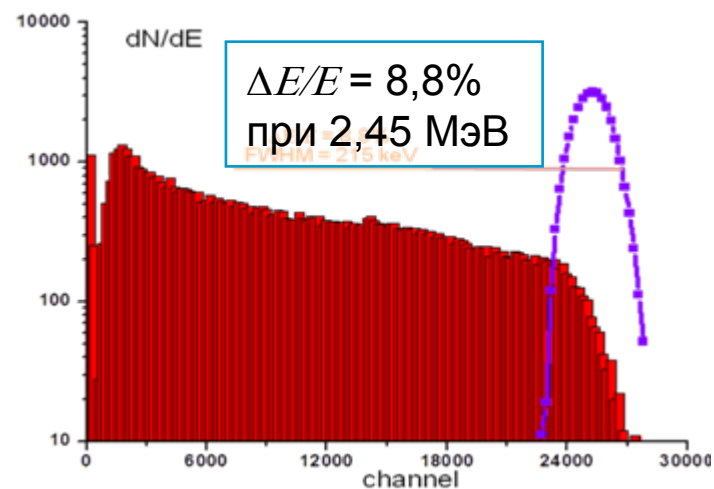
измерения на импульсном источнике D-D нейтронов в лаб. 10



части прибора



спектр протонов отдачи



- Установка работает по нескольким научным программам.
- Есть много новой и интересной физики.
- Мы включились в работу по созданию открытой ловушки нового поколения в ИЯФ (проект ГДМЛ), которая требует верификации ряда новых идей.

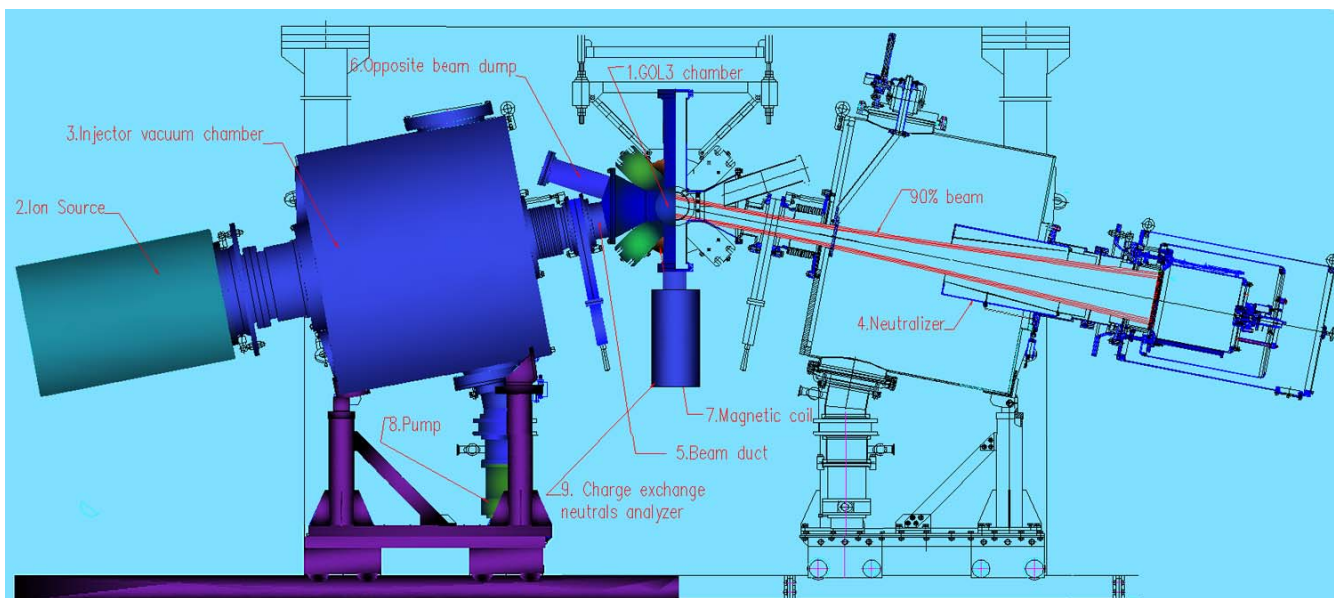
Планы на начало 2012 года

- *(январь)* тренировка генератора длинноимпульсного пучка.
- *(февраль-март)* второй заход с длинноимпульсным электронным пучком.
- *(апрель-май)* возврат к старому 10-мкс пучку:
 - набор статистики по флуктуациям плотности (улучшение точности);
 - серия экспериментов с уменьшением магнитного поля;
 - продолжение работ по генерации суб-ТГц излучения;
 - воздействие плазмы на материалы (госконтракт + Juelich).
- Продолжение создания системы атомарной инжекции для ГОЛ-3 (с Л.9, ЭП).

Докладчик благодарит всех вкладывавших свой труд
в работу установки ГОЛ-3
(лаб. 10, 9-0, 6-1, сект. 9-15, НКО, ЭП, ОГЭ, ОВС
и других хороших людей)

Потребности установки в 2012 году
(не считая работ по ГДМЛ)
производство ~15 тыс. н/ч
ресурсы ~10 млн. руб.

работа производится при экспертном и техническом надзоре Л. 9



Два инжектора быстрых атомов дейтерия с геометрической фокусировкой пучка.

Энергия частиц 25 кэВ, ток 2*30 А, длительность пучка до 5 мс.

Фокусное расстояние 1800 мм, диаметр 5 см (по 50% пучка).

Состояние работ по системе нейтральной инжекции

Конструкторская документация: 100%

Изготовление узлов инжекторов: ~90%, полностью готовы ~70%

Изготовление узлов сопряжения с ГОЛ-3: ~75%, полностью готовы ~30%

Система питания инжекторов: ~60%