

НФО ОФТТ

Лаборатория Нейтронной Физики (ЛНФ)

КЛЮЧЕВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПЕРСПЕКТИВНАЯ ПРОГРАММА

ЛНФ = Группа Нейтронной Физики + Группа Криогенных Мишеней

1. Корешева Елена Ростиславовна, д.ф.-м.н., г.н.с., руководитель ЛНФ
2. Мешков Игорь Владимирович, к.ф.-м.н., с.н.с., зам. руководителя НФО
3. Никитенко Андрей Иванович, к.ф.-м.н., в.н.с.
4. Александрова Ирина Владимировна, к.ф.-м.н., с.н.с.
5. Тимашева Татьяна Петровна, к.ф.-м.н., с.н.с.
6. Поташев Станислав Ильич, к.ф.-м.н., с.н.с.
7. Лапушкин Юрий Алексеевич, инженер 1-й кат.

- Работа ЛНФ нацелена на применение различных нейтронных источников, а также на участие в их создании и оптимизации работы.**
- Применение: фундаментальные исследования, вопросы физики твердого тела, нано- и биотехнологии, ядерная и термоядерная энергетика, медицина, геология, вопросы безопасности, пр.**

Группа Нейтронной Физики (ГНФ)

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Определение параметров кристаллической структуры новых материалов и их взаимосвязи с макро-свойствами и технологиями получения

ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Очень холодные нейтроны (ОХН), ультра холодные нейтроны (УХН) и медленные (тепловые) нейтроны

- НФО ФИАН. Подготовка экспериментального оборудования
- Ловушка ультра холодных нейтронов
- Гравитационный спектрометр ОХН на реакторе ИРТ МИФИ
- Многофункциональный нейтронный спектрометр (МНС) медленных (тепловых) нейтронов, изготовленный на базе импульсного источника нейтронов ИН-06 в ИЯИ РАН
- Импульсный дифрактометр тепловых нейтронов на линейном ускорителе электронов ИЯИ РАН



С.И. Поташев
снс, к.ф.-м.н.



И.В. Мешков
снс, к.ф.-м.н.



Ю.А. Лапушкин
инженер 1-й кат.



Группа Нейтронной
Физики НФО, 2021 г.



Спектрометр ОХН



**Анатолий Дмитриевич
ПЕРЕКРЕСТЕНКО, д.ф.-м.н.**
первый руководитель ГНФ
1974 – 2000 гг.



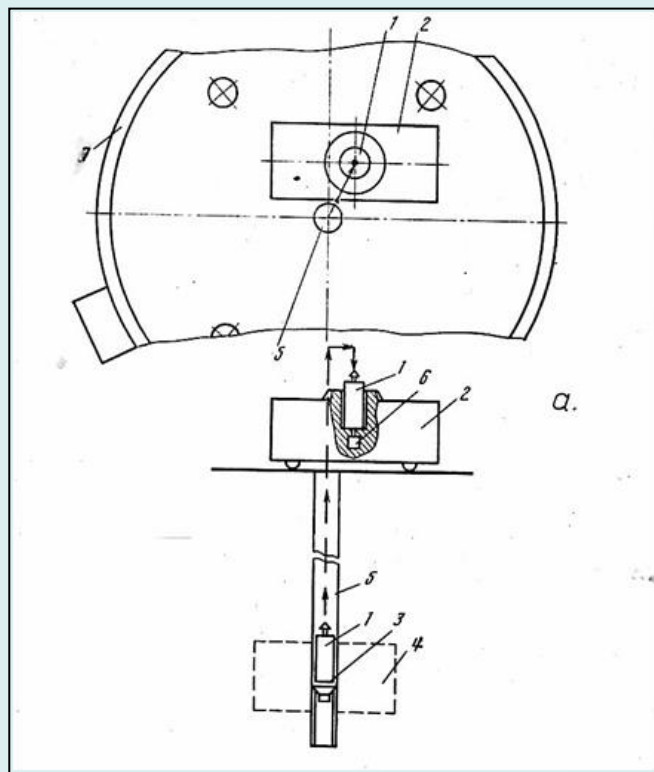
**Сергей Павлович
КУЗНЕЦОВ, к.ф.-м.н.**
руководитель ГНФ
2000 – 2020 гг.



**Игорь Владимирович
МЕШКОВ, к.ф.-м.н.**
руководитель ГНФ, зам. зав. ЛНФ
с 2020 г.

Под температурой нейтрона принято понимать его кинетическую энергию, которая для ультрахолодных нейтронов (УХН) составляет тысячные доли градуса Кельвина. Де-бройлевская длина волны УХН становится уже макроскопической величиной от 100 до 1000 нм, скорость - единицы м/сек. Использование УХН привлекает исследователей возможностью существенного увеличения чувствительности и точности экспериментов по изучению взаимодействия нейтронов с полями и веществом. Например, использование УХН позволило в тысячу раз опустить предел существования электрического дипольного момента нейтрона, более точно измерить время жизни свободного нейтрона до бета-распада.

Эксперимент по транспортировке УХН в замкнутом сосуде



В данном эксперименте бериллиевая «бутылка» с окошком из титановой фольги по измерительному каналу реактора ИТЭФ опускалась в активную зону реактора и через несколько минут переносилась в измерительный блок установки в котором происходило измерение числа УХН вылетающих из ловушки

Эксперименты доказали принципиальную возможность транспортировки УХН в замкнутом сосуде

а) Схема эксперимента. 1 – ловушка УХН; 2 – измерительный блок; 3 – конвертор УХН; 4 – активная зона реактора; 5 – канал реактора; 6 – детектор УХН; 7 – защитный домик. б) Измери-

СПЕКТРОМЕТРИЯ ОЧЕНЬ ХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

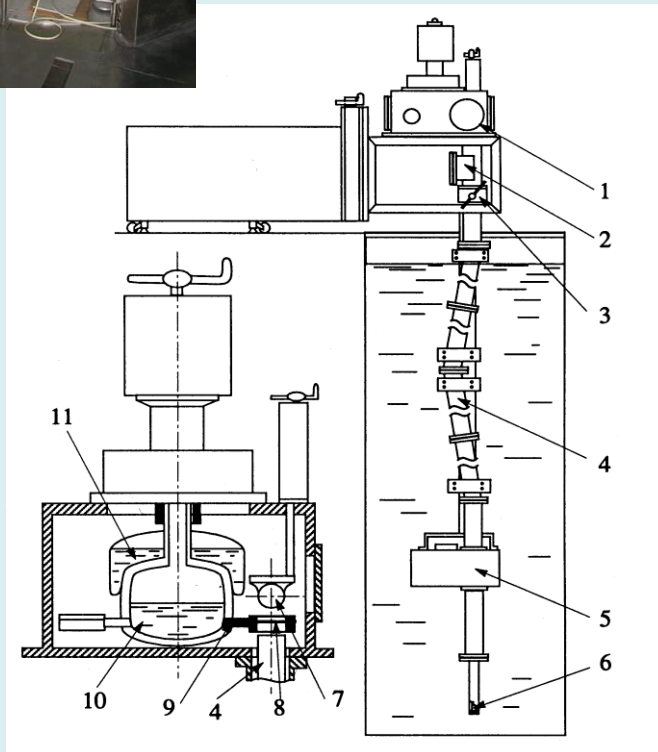
Очень Холодные Нейтроны (ОХН)

Спектрометр ОХН
общий вид (слева) и
схема устройства
(внизу)

- Энергия: $(E) = 2 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-4}$ (эВ)
- Скорость: $(V) = 10 - 100$ (м/сек)
- Модуль волнового вектора: $(k) = 0.06 - 6$ (нм⁻¹)
- Длина волны: $(\lambda) = 1 - 100$ (нм)
- $U = (2\pi\hbar^2/m)\sum_i(N_i b_i)$ – ядерный оптический потенциал.

Для магнитных материалов в потенциал рассеяния входит магнитная составляющая зависящая от величины и размера флуктуаций магнитного поля .

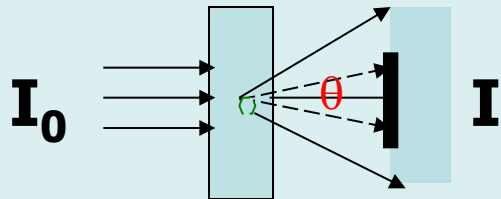
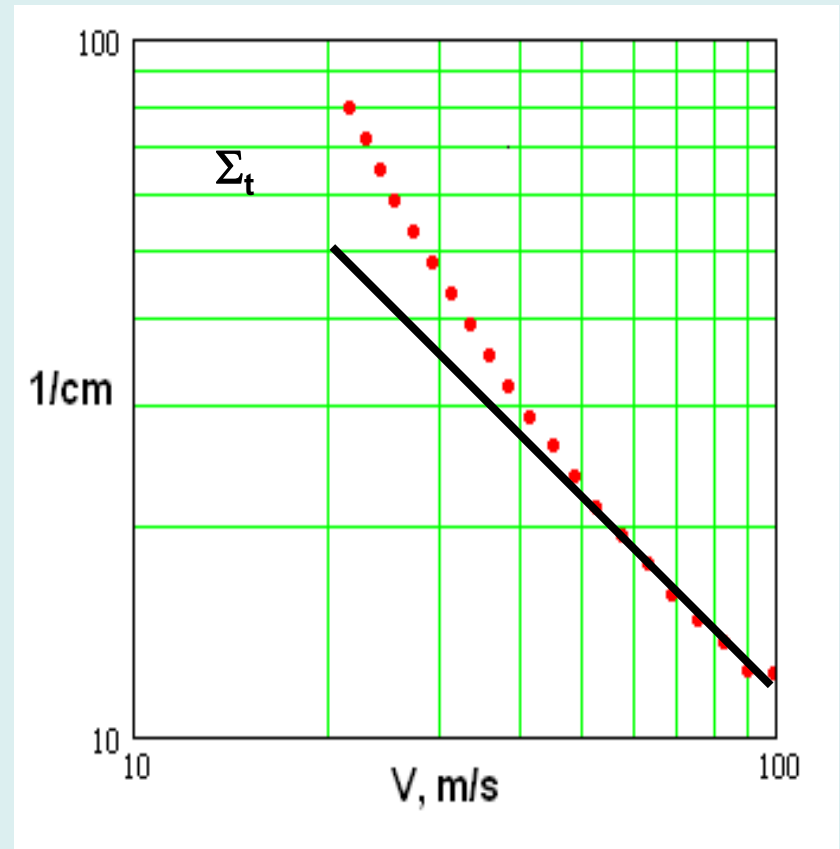
ОХН эффективно рассеиваются на флуктуациях ядерного оптического потенциала с размерами порядка их длины волны, то есть могут с успехом использоваться для исследования наноструктурированных материалов.



1- измерительная камера, 2- вакуумный шибер, 3- монитор, 4- дважды изогнутый вакуумируемый нейтронный волновод, 5- механический прерыватель, 6- конвертор, 7- детектор, 8- держатель образца, 9- хладагентный трубопровод, 10- гелиевая ванна криостата, 11- азотный экран

Исследование надмолекулярной структуры (НМС) пропусканием ОХН через образец

Σ_a , Σ_{is} , Σ_n , Σ_{sms} сечения поглощения, неупругого рассеяния, некогерентного ядерного рассеяния и рассеяния на надмолекулярной структуре (НМС). $\Sigma_a \sim 1/v$, $\Sigma_{is} \sim 1/v$, $\Sigma_n = \text{const}$ (80 барн на ядро водорода). $\Sigma_{sms} \sim 1/v^2$ (4), что позволяет выделить сечение рассеяния на НМС из полного сечения взаимодействия ОХН с веществом (Σ_T)



$$I/I_0 = \exp[-d\Sigma_T], \quad \Sigma_T = \Sigma_a + \Sigma_{is} + \Sigma_n + \Sigma_{sms}$$

Рассеяние ОХН на упорядоченной наноструктуре приводит к появлению Брегговских пиков на зависимостях Σ_T от скорости или длины волны по положению которых можно определить межплоскостные расстояния в наносверхрешетке. Использование дейтериевого контраста позволяет эффективно исследовать водородосодержащие вещества. В экспериментах на спектрометре ОХН наблюдался фазовый переход из гексагональной упаковки цилиндров в раствор сферических мицелл в лиотропном жидком кристалле - растворе додецилоксиэтиленгликоля в тяжелой воде при изменении температуры образца.

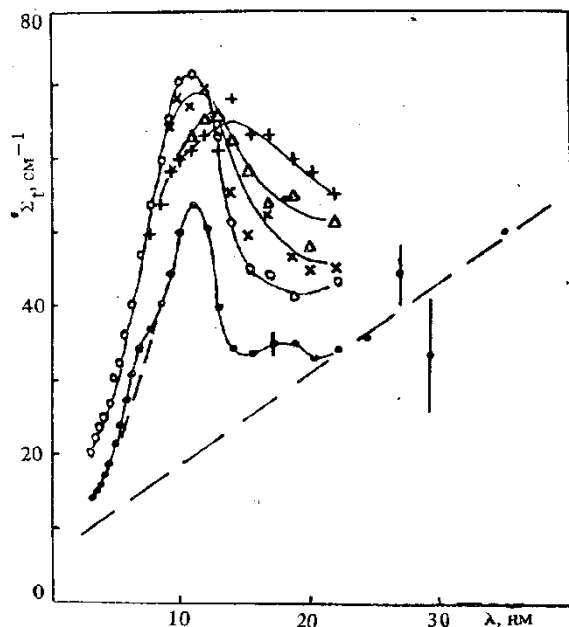


Рис. 1. Зависимости $\Sigma_T(\lambda)$ для системы $C_{12}E_n/D_2O$ при температурах образца $20^\circ C$ (●); $30^\circ C$ (○); $40^\circ C$ (×); $50^\circ C$ (Δ); $60^\circ C$ (+); пунктир – зависимость $\Sigma_T = m\lambda + k$.

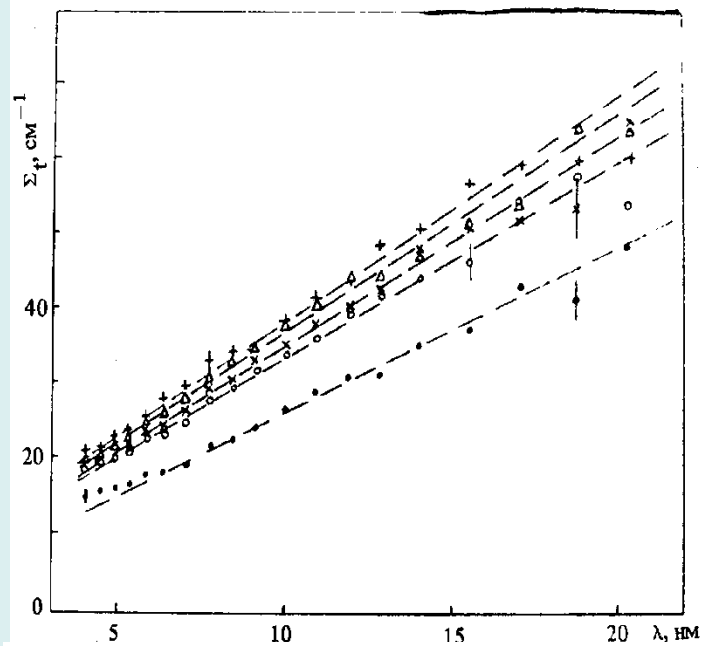
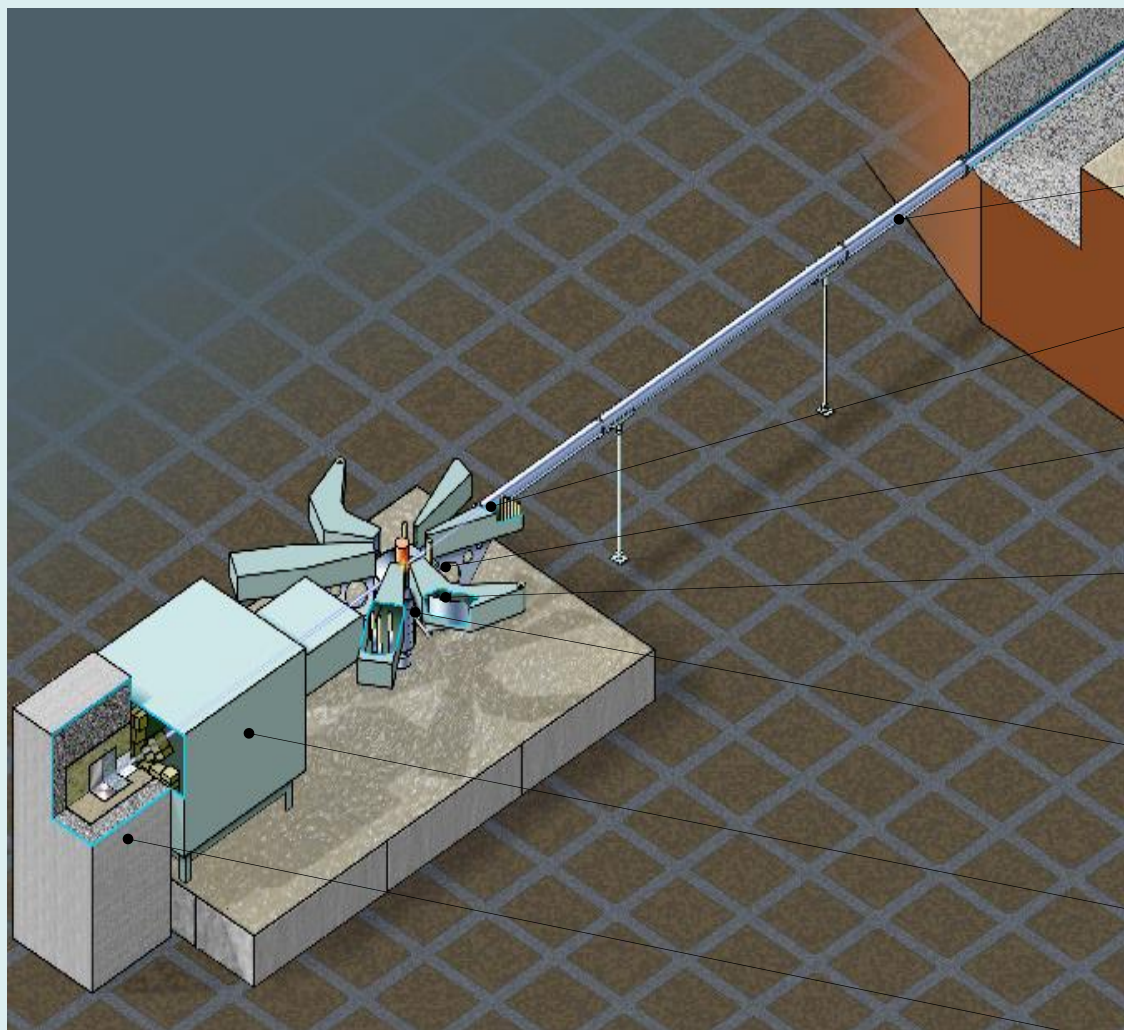


Рис. 2. Зависимости $\Sigma_T(\lambda)$ для системы $C_{12}E_n/H_2O$ при температурах образца $18^\circ C$ (●); $30^\circ C$ (○); $40^\circ C$ (×); $50^\circ C$ (Δ); $60^\circ C$ (+); пунктир – зависимость $\Sigma_T = m\lambda + k$.

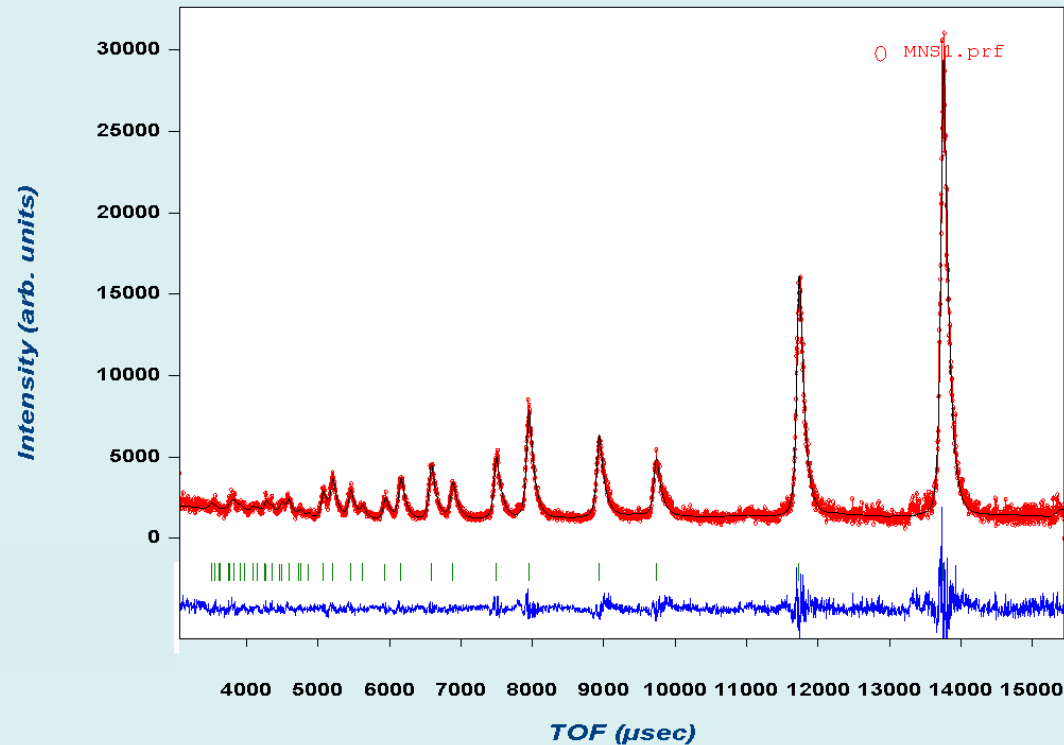


МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ НЕЙТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР (МНС) МЕДЛЕННЫХ (ТЕПЛОВЫХ) НЕЙТРОНОВ НА ИМПУЛЬСНОМ ИСТОЧНИКЕ НЕЙТРОНОВ ИН-06 ИЯИ РАН



- 1 – Нейтроновод
- 2 – Дифрактометр обратного рассеяния
- 3 – Дифрактометр высокой интенсивности
- 4 – Спектрометр квазиупругого и неупругого рассеяния высокой интенсивности
- 5 – Спектрометр квазиупругого рассеяния
- 6 – Спектрометр МУРН
- 7 – Ловушка пучка

Созданный в ФИАНе как элемент МНС дифрактометр обратного рассеяния обладает лучшим разрешением среди аналогичных устройств размещенных в настоящее время на ИН-06



Дифрактограмма порошка искусственных алмазов полученная на дифрактометре обратного рассеяния МНС и нормированная на ванадий.

На рисунке красная линия – экспериментальные данные, черная – теоретическая дифрактограмма, зеленые штрихи - положения брэгговских пиков.



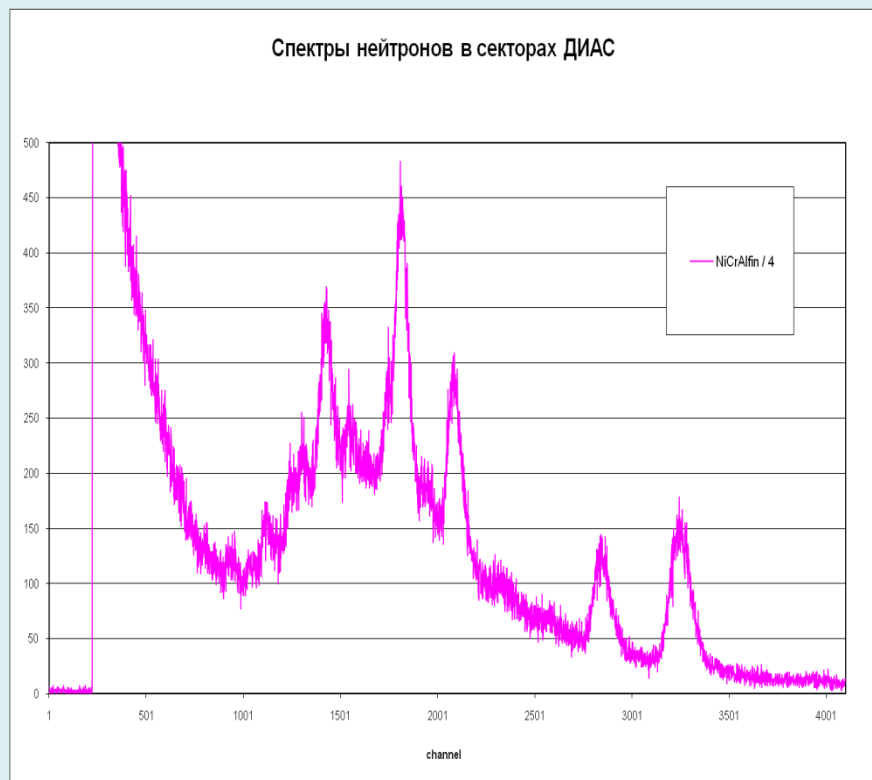
Вольфрамовая мишень импульсного нейтронного источника ИН-06 на базе линейного ускорителя протонов ИЯИ РАН



**Работа по созданию и эксплуатации
блоков МНС осуществлялась совместно
Лабораторией нейтронных
исследований ИЯИ РАН
и**



**Группой нейтронной физики ЛНФ, ФИАН
Запуск МНС осуществлен в 2013 г.**



На пучке МНС были установлены блоки дифрактометров высокой интенсивности, с помощью которых были определены параметры структуры сплава Ni/Cr/Al. Физические и механические свойства таких материалов определяются, в первую очередь, механизмом и температурно-временными условиями процесса распада пересыщенного твердого раствора, в ходе которого происходит выделение частиц новой фазы.

Ключевые результаты, полученные в ГНФ до 2020 г.

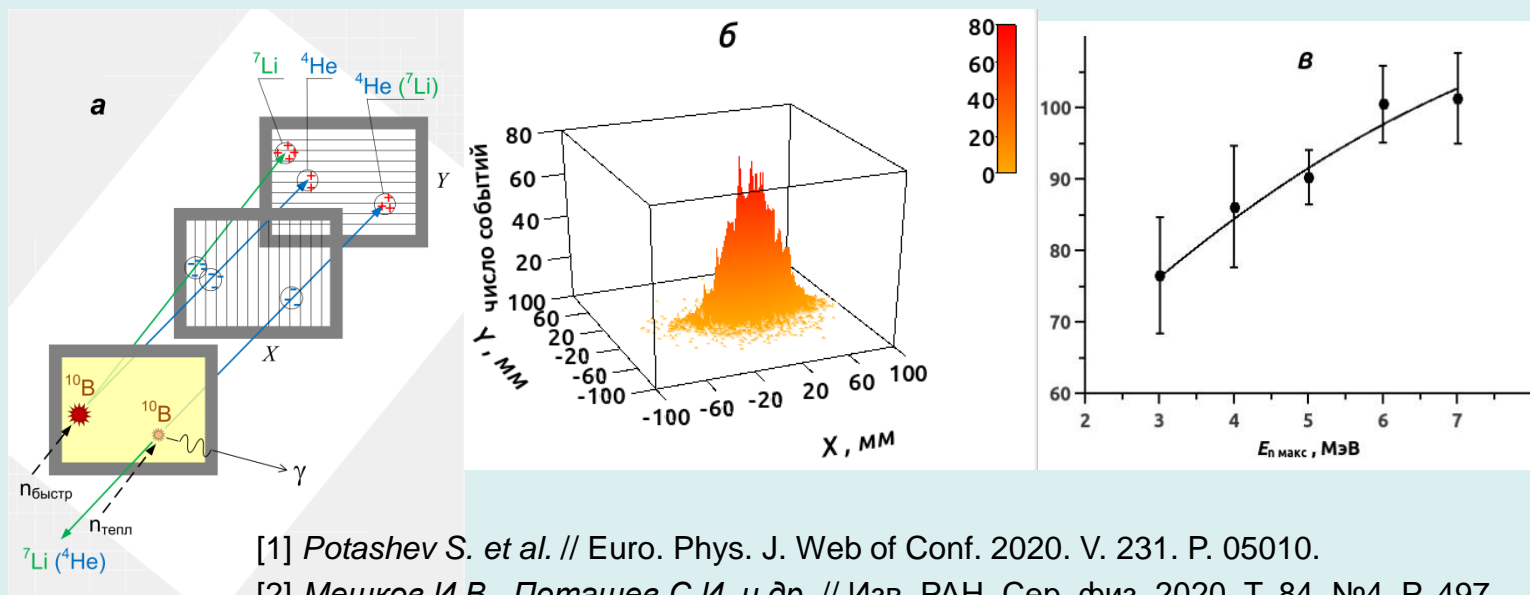
- Доказана принципиальная возможность **транспортировки УХН в замкнутом сосуде**
- Разработан **оригинальный метод рассеяния очень холодных нейтронов (ОХН)**, который существенно дополняет ряд ядерно-физических методов исследования конденсированных сред
- Рассеяние ОХН использовано для создания технологии получения новых полимерных материалов на основе сополимеров олефинов с замещенным норборненом, сочетающих высокие физико-механические свойства: **повышенную теплостойкость, оптическую прозрачность, механическую прочность**
- Впервые в диапазоне энергий $2 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-4}$ эВ определены сечения захвата нейтронов ядрами *Be*, *V*, *Ti*, *Pd*, *U*, *Fe*, *Ni* и пр., которые находятся в удовлетворительном согласии с табличными данными в тепловой области спектра. **Полученные сечения помещены в Международный банк ядерных данных.**
- **На образцах *Fe* и *Ni* впервые получены** параметры статических магнитных неоднородностей в образцах, намагниченных до насыщения, а именно: флуктуации магнитной индукции и длина корреляции (размер магнитной неоднородности).

Работы выполнены в рамках Программ фундаментальных исследований ОФН РАН: «Нейтронные исследования структуры вещества и фундаментальных свойств материи» и «Физика элементарных частиц, фундаментальная ядерная физика и ядерные технологии»

Группа нейтронной физики: яркий результат 2020 года

Позиционно-чувствительный широкодиапазонный детектор нейтронов, измеряющий их энергию с направленной чувствительностью к их потоку

Важнейшей задачей управляемого термоядерного синтеза, нейтронной и ядерной физики, физики конденсированного состояния и дозиметрии является детектирование и измерение энергии нейтронов в мощных нейтронных потоках с высоким фоном рентгеновского и γ -излучения. Впервые создан позиционно-чувствительный детектор нейтронов с определением их энергии от 1 до 14 МэВ в потоках до $10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Принцип работы основан на измерении ионизационных потерь, вызванных ядрами из реакции нейтрона на ядре ^{10}B . Детектор обладает направленной чувствительностью к потоку нейтронов, а также позволяет измерять энергию медленных нейтронов по времени пролета и при этом имеет чрезвычайно низкую чувствительность (менее 10^{-8}) к γ -квантам и рентгеновскому излучению. Материалы детектора слабо искажают измеряемое нейтронное поле. Детектор может применяться в нейтронных экспериментах, например, на установках малоуглового рассеяния и в качестве дозиметра с разделением тепловых и быстрых нейтронов.



а) схема детектора;
б) распределение нейтронов в потоке при $E_{\text{n макс}} = 5.1 \text{ МэВ}$;
в) зависимость положения максимума в спектре ионизационных потерь от $E_{\text{n макс}}$

[1] Potashev S. et al. // Euro. Phys. J. Web of Conf. 2020. V. 231. P. 05010.

[2] Мешков И.В., Поташев С.И. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. №4. Р. 497.

Совещание группы нейтронной физики 06.04.2021

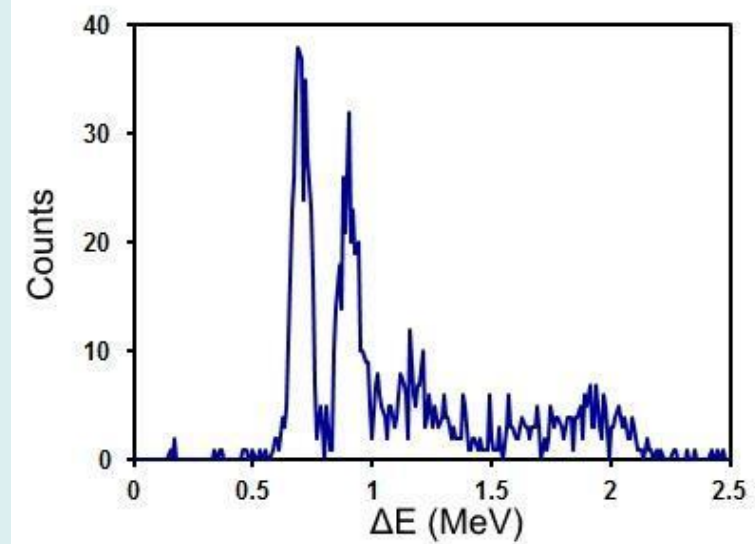
Участники совещания:

И.В.Мешков, С.И.Поташев, А.И.Никитенко, Е.Р.Корешева

Тема совещания: Изучение возможности проведения исследований реакций управляемого термоядерного синтеза с помощью нового позиционно-чувствительного детектора нейтронов, созданного в группе нейтронной физики ЛНФ

Резюме: Уникальный позиционно-чувствительный детектор нейтронов на основе бора-10, созданный в группе нейтронной физики, может служить одновременно мишенью и детектором вторичных ядер, которые идентифицируются, а ионизационные потери и углы вылета которых измеряются. Этот детектор можно также использовать для изучения реакций термоядерного синтеза под действием протонов и других частиц.

Предполагается провести широкий спектр исследований с применением детектора нейтронов в совместном проекте ФИАН-ИЯИ РАН в период 2021-2025 гг.



Спектры ионизационных потерь энергии вторичных ядер в полном газовом зазоре позиционно-чувствительного детектора на основе бор-10 при максимальной энергии нейтронов в потоке из источника $E_{n \text{ макс}} = 5.1$ МэВ

Группа Криогенных Мишеней (ГКМ)

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ: Создание технологии поточного производства и бесконтактной доставки криогенных топливных мишеней (КТМ) в зону лазерного облучения реактора ИТС// Термоядерного Источника Нейтронов (ТИН)

ИНСТРУМЕНТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ (созданы в группе криогенных мишеней):

1. Установка для заполнения массива полых сферических оболочек топливным газом до 1000 атм при 300К
2. Установка для формирования криогенного слоя топлива внутри заполненных оболочек
3. 100-проекционный видео-томограф с разрешением 1 мкм ($\lambda=490$ мкм)
4. Макеты гибридных ускорителей ВТСП-носителя КТМ



ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ: Моделирование (эксп. и теор.) и оптимизация условий заполнения оболочек топливом, формирования и доставки КТМ для организации производственного процесса на будущих реакторах ИТС//ТИН, в т.ч.:

1. Метод FST (или free-standing target = бесподвесные мишени) для поточного производства КТМ
2. Получение новых функциональных структур твердого топливного слоя, обладающих долгоживущими характеристиками качества
3. Бесконтактная доставка КТМ в зону лазерного облучения реактора ИТС//ТИН при использовании эффекта квантовой левитации ВТСП в магнитном поле



Е.Р. Корешева
гнс, д.ф.-м.н.



А.И. Никитенко
внс, к.ф.-м.н.



И.В. Александрова
снс, к.ф.-м.н.



Т.П. Тимашева
снс, к.ф.-м.н.

► В рамках данной программы в период 1989 – 2020 выполнено 12 международных и российских проектов. Результаты НИОКР защищены 3-мя А.С. и 3-мя патентами РФ

Система производства и доставки КТМ – один из основных блоков энергетической станции на основе реактора ИТС

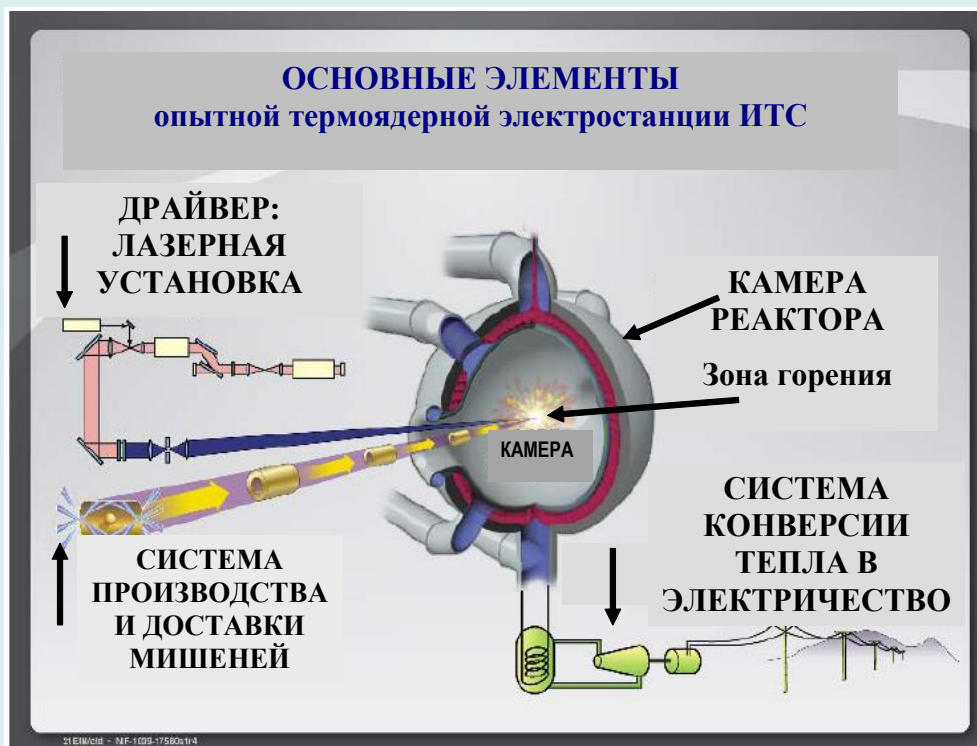
Один из ключевых вопросов при создании энергетической станции на основе реактора ИТС - это демонстрация эффективной, надежной и дешевой (~10 руб) технологии поточного производства бесподвесных КТМ и их частотной доставки.

ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ ПРОИЗВОДСТВА И ДОСТАВКИ МИШЕНЕЙ (по материалам совещаний МАГАТЭ)

Количество КТМ
~ 1 000 000 штук/день

Частота инъекции
1 - 10 Гц

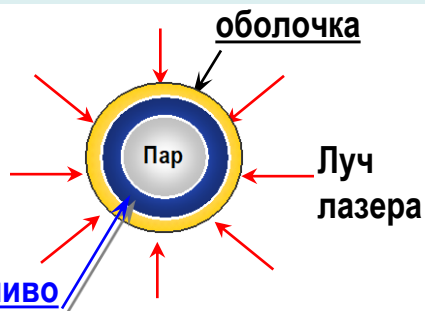
Скорость инъекции
200 - 400 м/сек



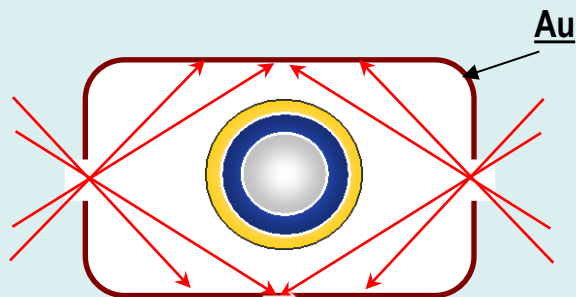
«Большой интерес к нейтронам как к средству воздействия на вещество, инструменту диагностики и исследований указывает на то, что нейтроны сами по себе могут быть конечным продуктом, производимым на установках термо-ядерного синтеза, наряду с энергией и радионуклидами» [Б.В.Кутеев, Физика Плазмы, 2010 г.]

ТЕХНОЛОГИИ СЕГОДНЯШНЕГО ДНЯ

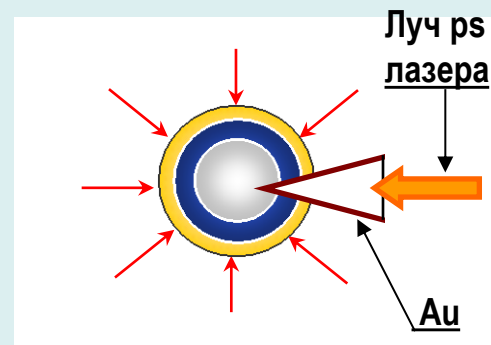
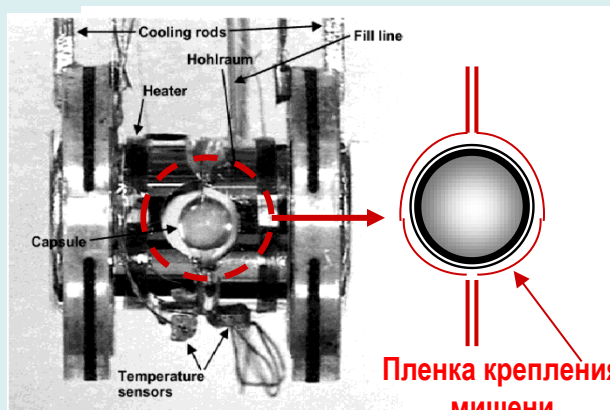
- ⇒ работа с мишенями, закрепленными на подвесе (частотная доставка невозможна)
- ⇒ длительное формирование топливного слоя: 1-7 суток (радиационная опасность)
- ⇒ высокая стоимость производства: > 1000 \$ за 1 криогенную мишень



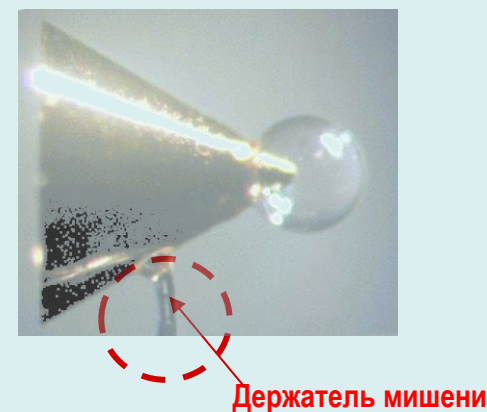
Мишень прямого облучения



Мишень непрямого облучения



Мишень прямого зажигания (fast ignition)



Конструкции топливных мишеней для каждой из перечисленных схем облучения имеют одну общую деталь – сферическое ядро, содержащее твердое топливо. Для эффективной реализации схем ИТС мишень должна быть без какого-либо крепления

Ключевые результаты, полученные в группе криогенных мишеней

1. Технология диффузионного заполнения массива бесподвесных оболочек газообразным топливом (изотопами водорода H_2 , D_2 , D_2+H_2). **Продемонстрировано до давлений заполнения 100—1000 атм (при 300 К) и массива оболочек до 25 шт.**
2. Технология транспортировки массива газонаполненных оболочек при 300 К в модуль формирования криогенного слоя. **Продемонстрировано для массива до 25 шт.**
3. Метод FST для поточного производства бесподвесных КТМ. **Метод запатентован.**
4. Концепция гибридного электромагнитного инжектора для бесконтактного ускорения КТМ, расположенной внутри ВТСП-носителя. Выполнено теоретическое и экспериментальное моделирование в поддержку данной концепции. **Способ ускорения запатентован**
5. Способ диагностики полета инжектированной КТМ в режиме реального времени, основанный на ФУРЬЕ-голографии. **Разработано СПО и проведены компьютерные эксперименты, подтверждающие плодотворность данного подхода.**
6. Результаты экспериментального макетирования условий поточного производства КТМ (**0.1 Гц, 4.2-18 К**) методом FST и их доставки при минимизации рисков разрушения мишени
7. Концепция многоуровневой системы защиты КТМ в процессе доставки

Перспективная задача: техническое перевооружение созданных стендов для работы с мишенями реакторного класса и создание механического макета реактора ИТС (ММР-ИТС)

Инструменты исследований бесподвесных мишеней, созданные в группе в рамках 12-ти проектов

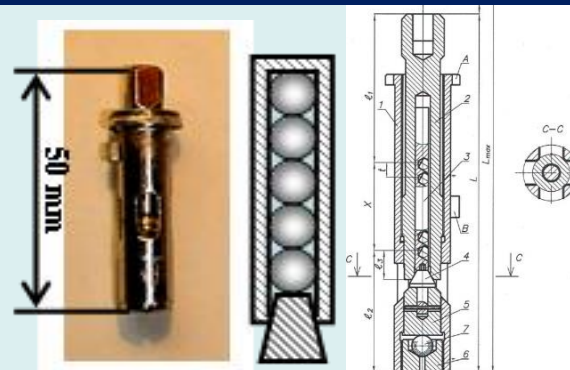


Комплекс для заполнения оболочек топливом до 1000 атм

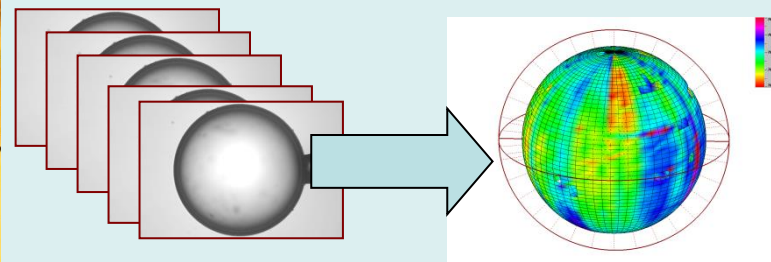


Комплекс для производства КТМ

Модуль формирования основанный на методе FST (формирование топливного слоя внутри движущихся оболочек) + 100-проекционный видео-томограф для диагностики КТМ, разрешение 1мкм на 490 мкм



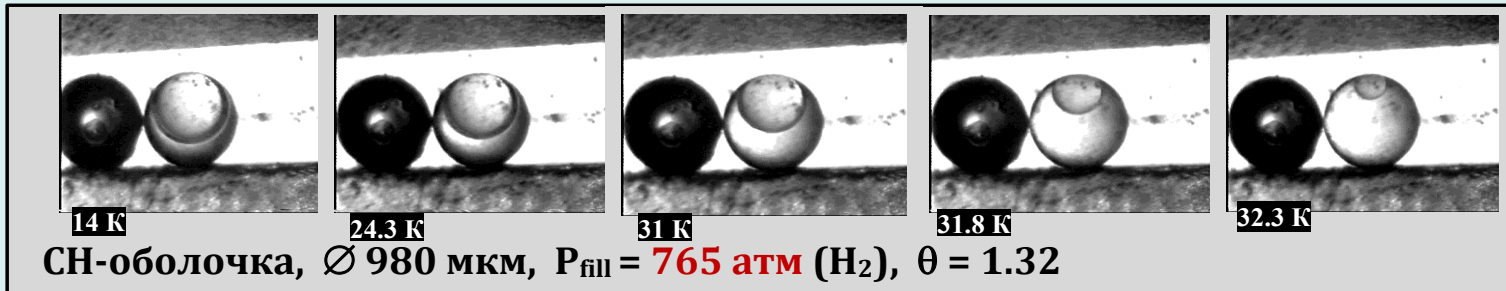
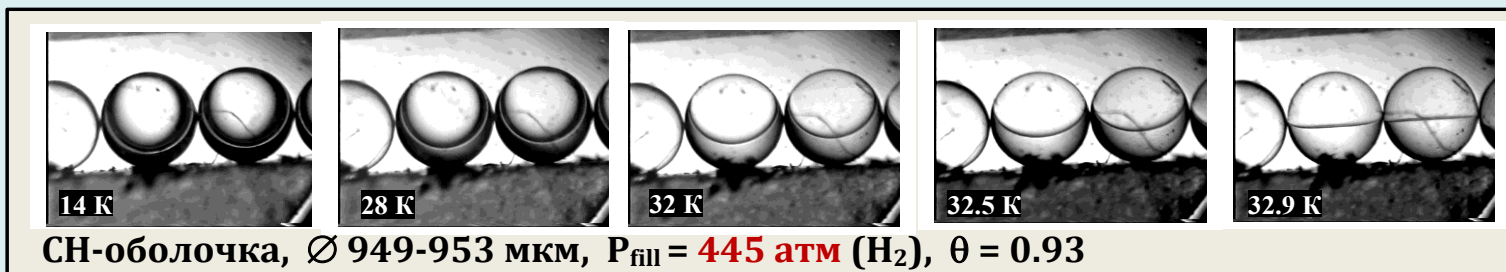
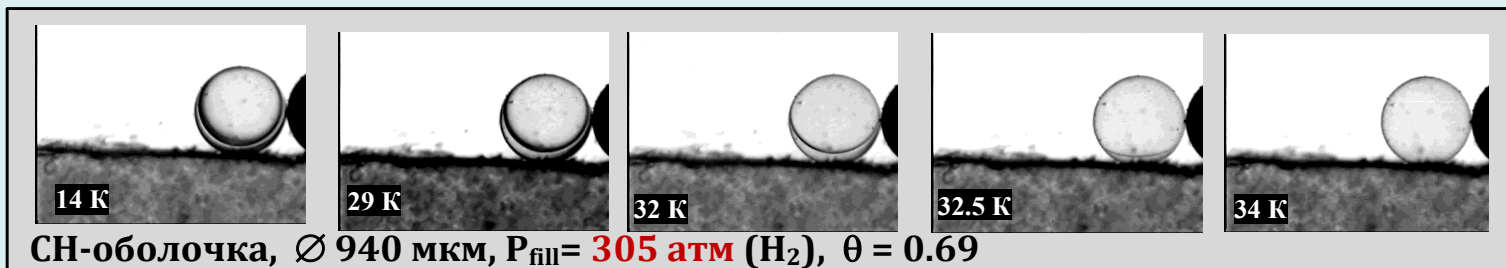
Миниатюрный контейнер для транспорта при 300К массива газонаполненных бесподвесных оболочек в модуль формирования КТМ



Реконструкция поверхности сферической мишени по набору 100 теневых проекций с использованием СПО *Target Studio* (разработка ФИАН)

Установка для диффузионного заполнения бесподвесных оболочек топливным газом до 100-1000 атм при 300 К

Технологии сегодняшнего дня, применяемые в мире, - это заполнение полой оболочки жидким топливом через капилляр, встроенный в оболочку. Наличие капилляра нарушает симметрию облучения КТМ и снижает эффективность схемы ИТС. **Именно поэтому в нашем подходе используется метод диффузионного заполнения оболочек.**



$\rho_{\text{кр}}$
0.03 г/см³
(H_2)
 $T_{\text{кр}}$
33,19 К
(H_2)

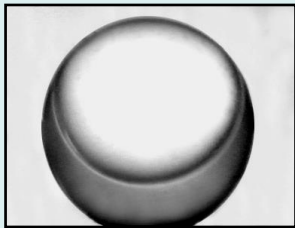
Поведение газового пузыря при нагреве/охлаждении оболочки с жидким топливом различно в зависимости от $\theta = \rho_{\Gamma} / \rho_{\text{кр}}$, т.е. определяется величиной P_{fill}

Технология поточного производства КТМ методом FST

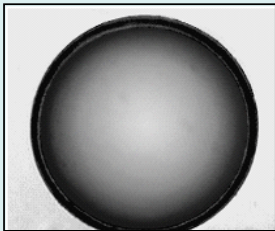
Продемонстрирован для оболочек $\varnothing 0.8 - 1.8$ мм

FST – Free-Standing Target
или **бесподвесная мишень**

■ Метод FST:
исходная мишень
с жидким топливом

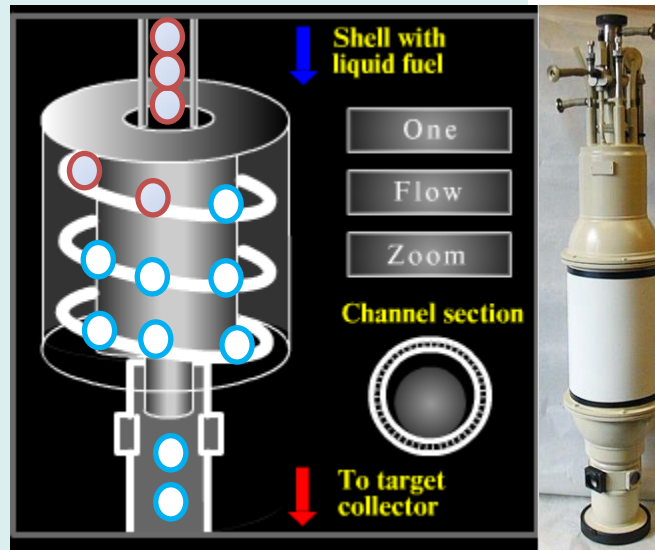


■ Метод FST:
готовая КТМ с твердым
сферическим слоем топлива



Оболочка: $\varnothing 1.23$ мм
Топливный крио слой:
41 мкм, $D_2+20\%$ Ne
 $Nu < 2\%$, $\delta < 0.5$ мкм

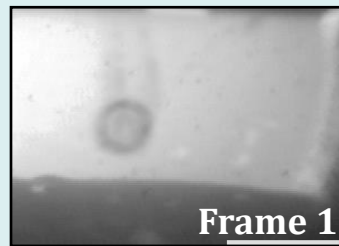
■ Метод FST:
формирование криогенного слоя
внутри движущейся мишени



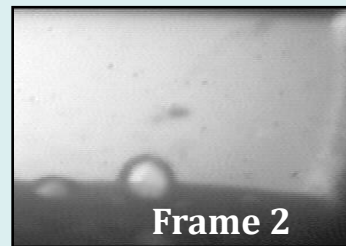
■ Метод FST не имеет аналогов
в мире: Патент РФ + 3 А.С.



**Инжекция КТМ
в тест камеру при $T = 5$ К**

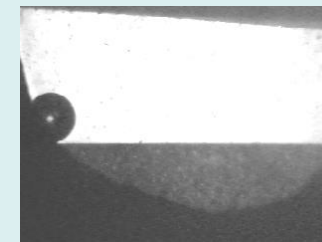


Target in free-fall

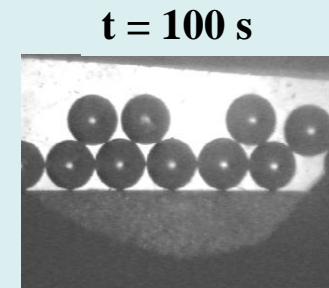


Target landing

**Частотная инжекция при 4.2К,
 $f = 0.1$ Гц**

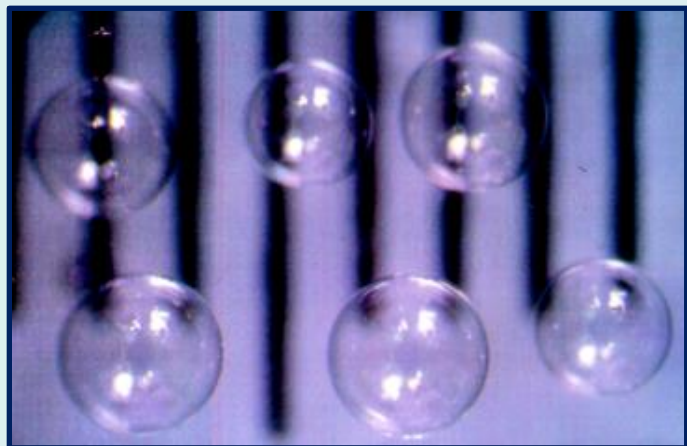


$t = 0$

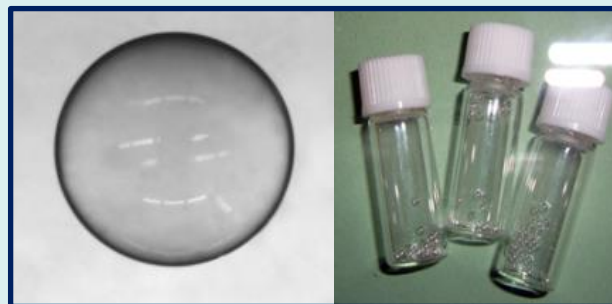


$t = 100$ s

Полимерные оболочки, используемые в наших экспериментах



Оболочки из полистирола,
 \varnothing 1.2–1.8 мм,
производства ФИАН



Полимерные оболочки
(ПАМС) \varnothing 1.8 – 2.2 мм,
Лаб. им. Резерфорда и
Аплтона, Великобритания



Оболочки из полистирола \varnothing 1.0 – 1.2 мм,
Институт Лазерной Техники, Япония

- В исследованиях использованы полимерные оболочки \varnothing 0.8 – 1.8 мм, изготовленные в Лаборатории Термоядерных Мишеней (НФО ОФТТ ФИАН)
- Полимерные оболочки различного диаметра также были предоставлены для наших экспериментов Лабораторией им. Резерфорда и Аплтона (Великобритания) и Институтом Лазерной Техники (Япония)

Перспективная программа работы ЛНФ

□ ПРОГРАММА ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

- **Продолжение работ в рамках Программ фундаментальных исследований ОФН РАН и ГосЗадания, в том числе:**

- Исследования наноматериалов методами нейтронной дифракции и малоуглового рассеяния нейтронов
- Исследований реакций управляемого термоядерного синтеза с помощью уникального позиционно-чувствительного детектора нейтронов на основе бора-10
- Исследования в области бесконтактного ускорения носителя с КТМ

- **Продолжение исследований в области поточного производства КТМ в рамках координационного проекта МАГАТЭ «*Pathways to Energy from Inertial Fusion: Materials Research and Technology Development*» ⇒ работа ведется по новому научному контакту № 24154**

□ ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ПРОЕКТ (пакет документов по проекту находится на утверждении в МОН)

- **Проект «Техническое перевооружение комплекса установок ИТС», включая стенд по производству КТМ + другие элементы механического макета реактора ИТС и объединение стендов в единое устройство ММР-ИТС**

ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА О ПРОЕКТЕ СОЗДАНИЯ ММР-ИТС

- ❑ **Идея ФИАН о необходимости построения механического макета реактора ИТС (ММР-ИТС) для отработки ключевых реакторных технологий впервые обсуждалась на 1-м совещании МАГАТЭ по Мишеням и Камерам для Реактора ИТС в 2000 г. (Мадрид, Испания)**
- ❑ **В период 1989 - 2020 гг., под руководством ФИАН выполнена программа по ГЗ и 12 международных и российских проектов и научных контрактов, в рамках которых исследовались, на малом масштабе, закономерности работы отдельных элементов ММР-ИТС**
- ❑ **Комплекс установок ИТС, включая стенд КТМ и элементы ММР-ИТС, созданный в группе криогенных мишеней ЛНФ НФО в рамках 12-ти проектов, является уникальным. Прямых отечественных и зарубежных аналогов нет.**

10 проектов и 3 научных контракта, в которых проведена разработка и оптимизация основных модулей механического макета реактора ИТС (ММР-ИТС)

ВЫПОЛНЕННЫЕ ПРОЕКТЫ

- ❑ РФФИ № 06-08-01575-а, 2006-2007
- ❑ РФФИ № 15-02-02497, 2015-2017
- ❑ МАГАТЭ №11536 , 13871, 20344, 2001-2019
- ❑ МАГАТЭ №24154, 2020-2023 (текущий проект)
- ❑ МНТЦ № 512, 1557, 2814, 3927, 1996-2011

НАШИ ПАРТНЕРЫ В ПРОЕКТАХ МНТЦ:

МАГАТЭ, США (GA, LLNL, LANL), ГЕРМАНИЯ (GSI), ИТАЛИЯ (ENEA), АНГЛИЯ (RAL, STFC), ЯПОНИЯ (ILE, Gifu Univ.)

КОНТРАКТЫ

- ❑ КОНТРАКТ ФИАН – GSI – HERGENOV (ГЕРМАНИЯ), 2007-2008
- ❑ КОНТРАКТ ФИАН – РФЯЦ-ВНИИЭФ (Саров, РФ) , 2005-2006
- ❑ КОНТРАКТ ФИАН - RAL (АНГЛИЯ), 1989-1991

ФИАН & НПО КРАСНАЯ ЗВЕЗДА (Россия) + ILE (Япония)
совещание в рамках проекта МНТЦ #1557



Для снижения мировых затрат на реакторные исследования, с 2000 года под эгидой МАГАТЭ осуществляется координация научно-технических программ разных стран. В совещаниях координационного проекта МАГАТЭ принимают участие специалисты более чем из 15 стран, в т.ч. из России, США, Англии, Франции, Германии, Италии, Испании, Китая, Японии, и др.

❖ Е.Р. Корешева - представитель ФИАН в МАГАТЭ в период 2000-2021 гг.



Исследования на ММР-ИТС удешевляют стоимость разработок по созданию реактора ИТС//ТИН, поскольку позволяют в пилотном варианте отработать реакторные технологии и выявить проблемные области. Создание ММР-ИТС осуществляется сейчас в Японии и других странах

1. Проект построения экспериментального реактора LIFT действует в Японии с 2012 г. под руководством Conceptual Design Committee (Chair: Y.Kozaki, co-chair T.Norimatsu, S.Fujioka).

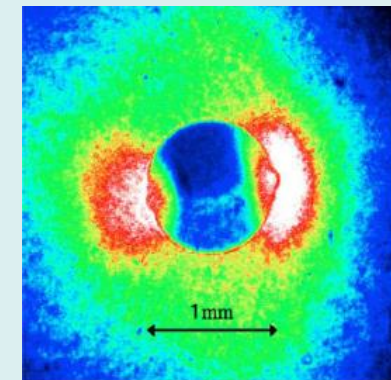
Сценарий частотной сборки носитель/мишень и их ускорения в электромагнитном инжекторе основан на российском схемном решении

2. Проект SANDY стартовал в 2009 г. при финансовой поддержке фирмой HAMAMATSU PHOTONICS (Токио).

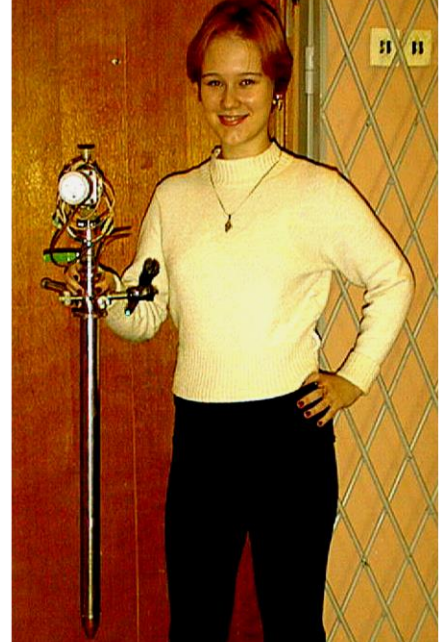
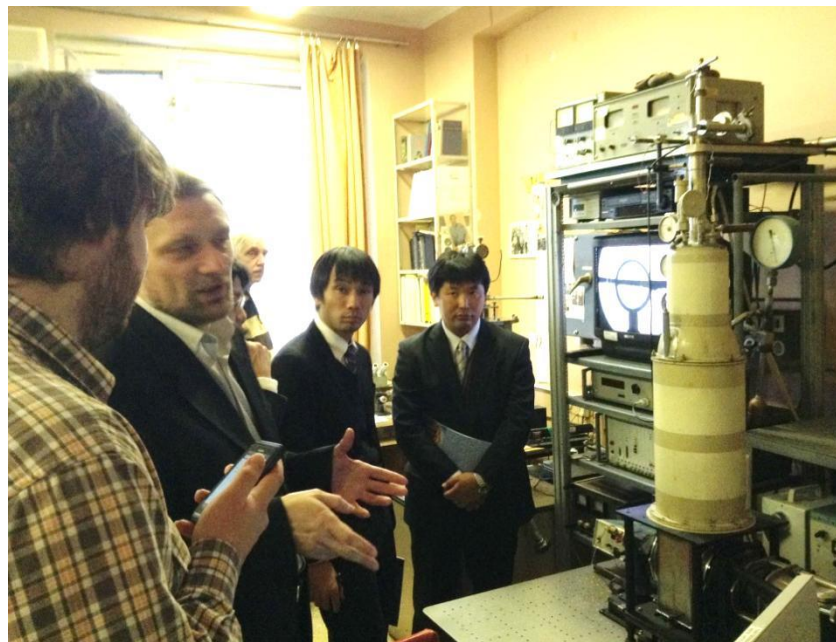
К настоящему времени продемонстрирована технология инъекции при $T = 300$ К сферических дейтерированных оболочек и их лазерного облучения с частотой 1 Гц.



Т. Норимацу и Е.Р. Коршева – участники 7-го совещания МАГАТЭ по Мишеням и Камерам для Реактора (Вена, Австрия, 18-20 марта 2015 г)

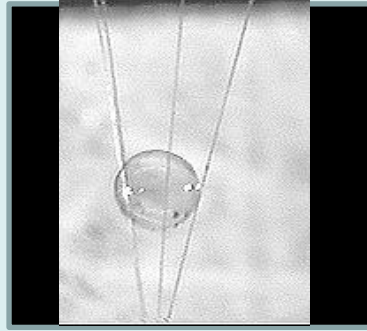
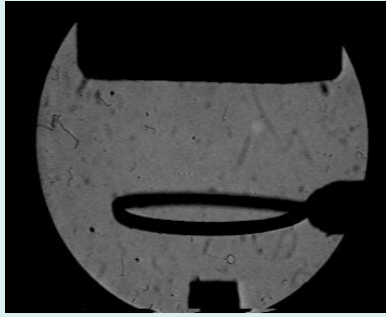


ФИАН предложил использовать систему поточного FST-производства КТМ и их гравитационной инжекции при 18 К (вместо 300К) в камеру мини-реактора CANDY. Состоялся визит участников CANDY в ФИАН с целью разработки стратегии совместных исследований (в рамках проектов МАГАТЭ)



Гравитационный ввод КТМ в центр камеры лазерной установки с энергией $E_{л} \sim 500$ кДж – сочетание бесподвесных технологий с требованием сегодняшнего дня стрелять по укрепленной мишени

- Простая схема гравитационного ввода бесподвесной КТМ из модуля FST-формирования на подвес, заранее размещенный в лазерном фокусе
- Продемонстрировано на макетах с различными подвесами, включая магнитный



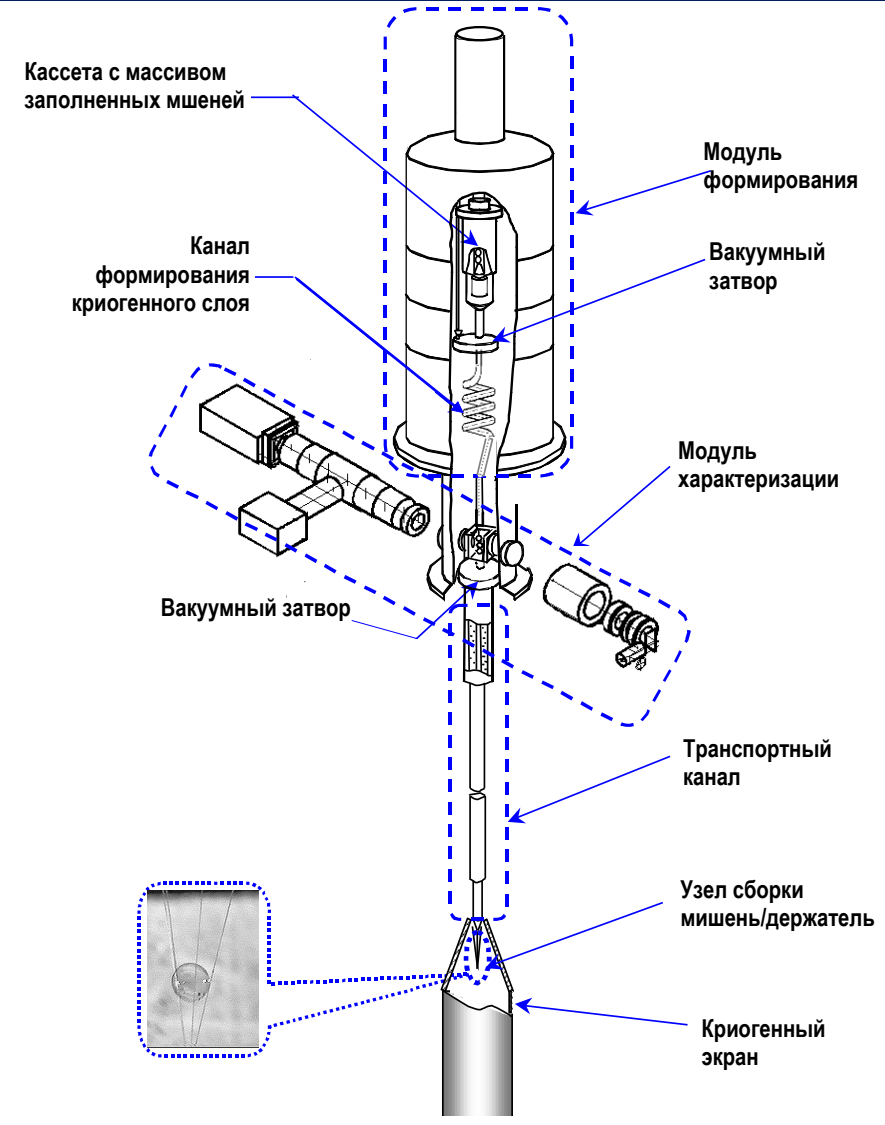
Подвес на триподе



Подвес через убираемое кольцо



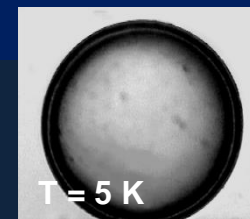
Мишень с ВТСП покрытием в магнитном подвесе



Концепция ММР-ИТС основана на 3-х подходах предложенных и испытанных в ФИАН

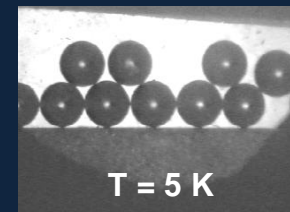
- ❑ **Метод FST** ⇒ для поточного производства криогенного слоя топлива внутри движущихся бесподвесных оболочек [J.Phys.D: Appl.Phys. **37**, 2004], метод запатентован
- ❑ **Эффект квантовой левитации ВТСП** ⇒ для осуществления движения ВТСП-носителя с КТМ без трения и минимизации рисков в процессе доставки [JRLR **35**, 2014], способ доставки запатентован
- ❑ **Фурье голография** ⇒ для *on-line* диагностики качества КТМ и контроля траектории летящей КТМ. [Nucl. Fusion **46**, 2006]

Результаты макетирования, экспериментальных исследований и компьютерного моделирования доказывают перспективность предлагаемой концепции



T = 5 K

Криогенная мишень, сформированная методом FST

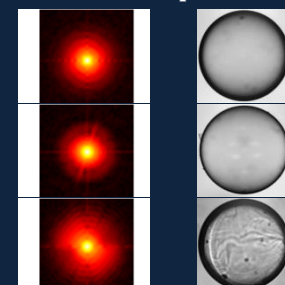


T = 5 K

Инжекция мишеней с частотой 0.1 Гц при 4.2К



ВТСП-носитель КТМ - левитация над магнитным рельсом



Фурье-преобразования изображений оболочек с различными нарушениями качества

Базовые элементы ММР-ИТС, созданные в уменьшенном масштабе и тестируемые ФИАН в контрольных экспериментах



Модуль формирования (МФ):
Метод FST для формирования крио
слоя внутри движущей оболочки



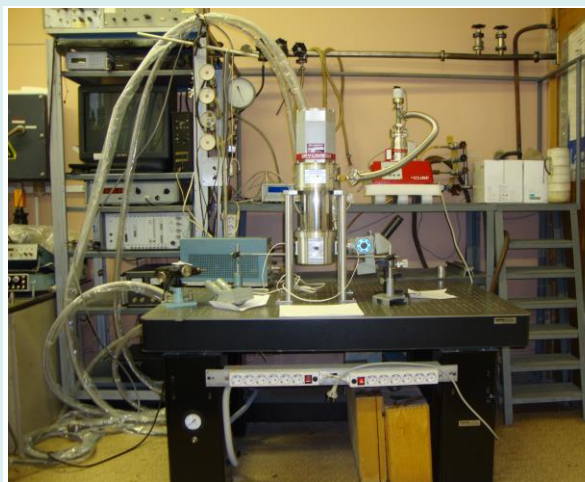
**Запуск установки диффузионного
заполнения массива оболочек**



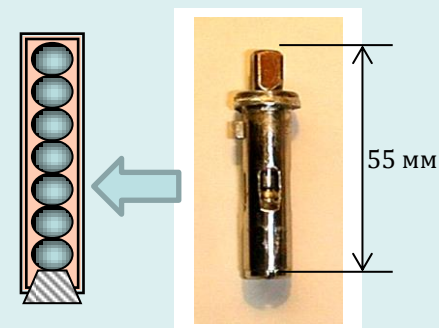
Установка заполнения:
Заполнение оболочек газом
до 1000 атм при 300 К



Характеризация КТМ:
100-проекционный видео-томограф с
разрешением 1 μm (при $\lambda=490\mu\text{m}$)



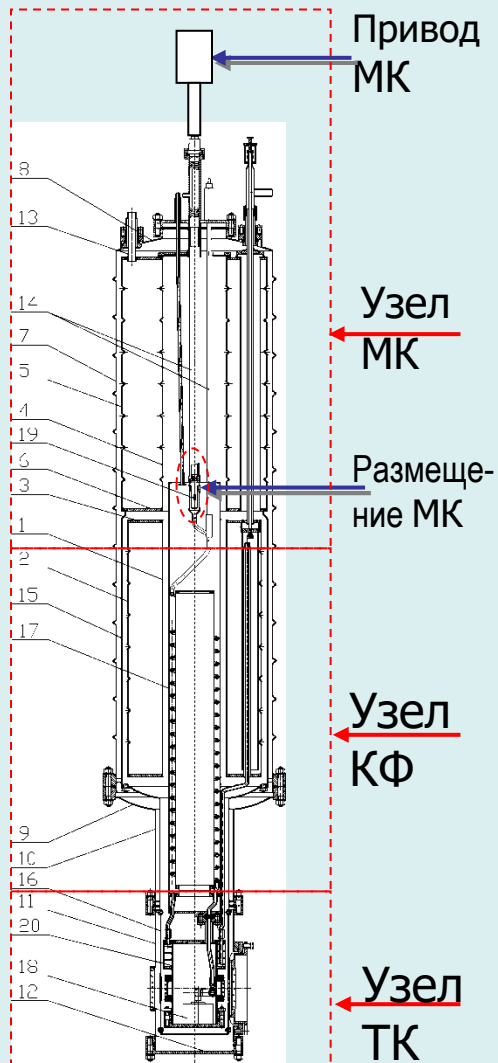
Система транспортировки:
Установка для исследований в области
ВТСП левитации при $T \leq 18 \text{ K}$



Мишенный контейнер (МК)
Для транспортировки
газонаполненных оболочек
в FST-МФ при 300 К

Прототипом модуля FST-формирования для MMP-ИТС может служить модуль, спроектированный для обеспечения криогенными мишенями лазерных экспериментов по программе HiPER ($f \geq 1$ Гц, $E_{л} = 200$ кДж)

Эскиз МФ для HiPER



(1) Полые оболочки



(3) Оболочки с топливом



(4) КФ



(2) МК



(5) ТК



(6) Варианты намотки спиралей для различных КФ

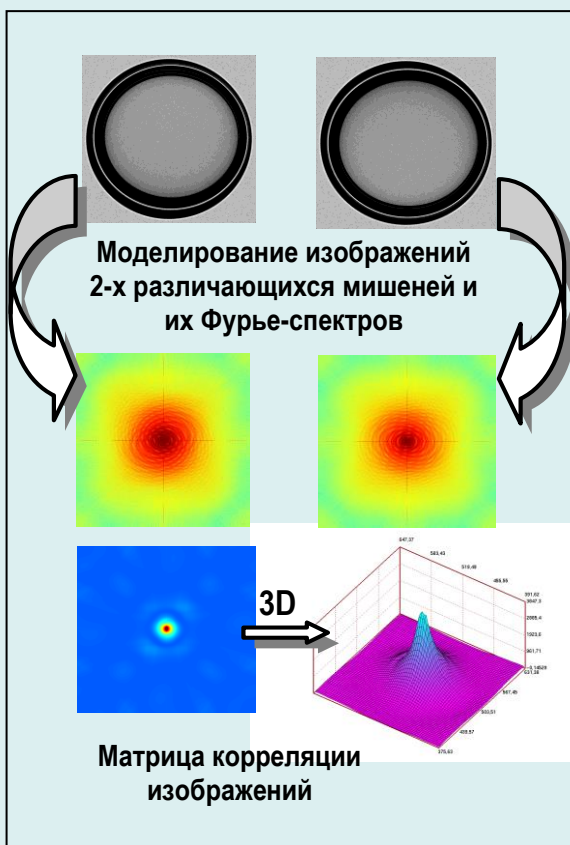
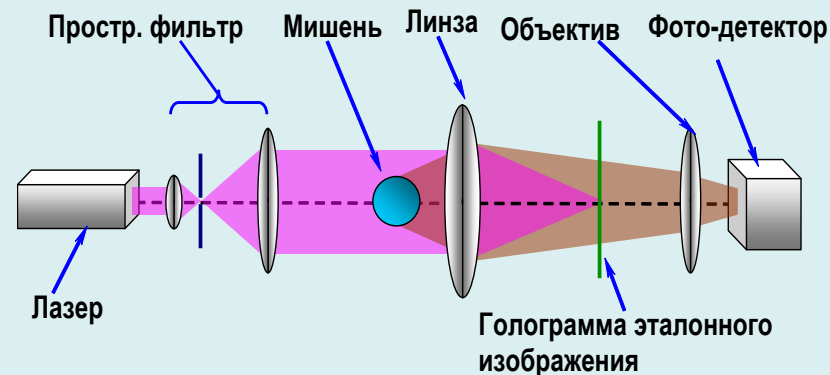


Основные элементы системы поточного производства КТМ

ФУРЬЕ-ГОЛОГРАФИЯ распознавания объектов – возможный путь *on-line* контроля траектории и качества КТМ

[E.R.Koresheva et al. Nuclear Fusion 2006]

- ❑ Уровень сигнала распознавания тем выше, чем больше соответствие между тестируемой и эталонной мишенями
- ❑ Время измерения параметров мишени несколько μ s

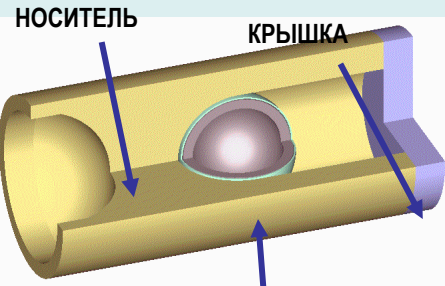


- ❑ Компьютерное моделирование подтвердило перспективность данного подхода

1. Обеспечивает распознавание дефектов слоя топлива в КТМ как в низко- так и в высоко-частотных гармониках
2. Возможность контроля качества как отдельных мишеней, так и их массива
3. Возможность одновременного контроля скорости, траектории и качества инжектированной КТМ

Методы защиты КТМ при доставке в камеру реактора

УСТРОЙСТВО СБОРКИ «НОСИТЕЛЬ + КТМ + ЗК» Работает при $T = 5 - 17\text{ K}$



УСКОРЕНИЕ КТМ В ИНЖЕКТОРЕ

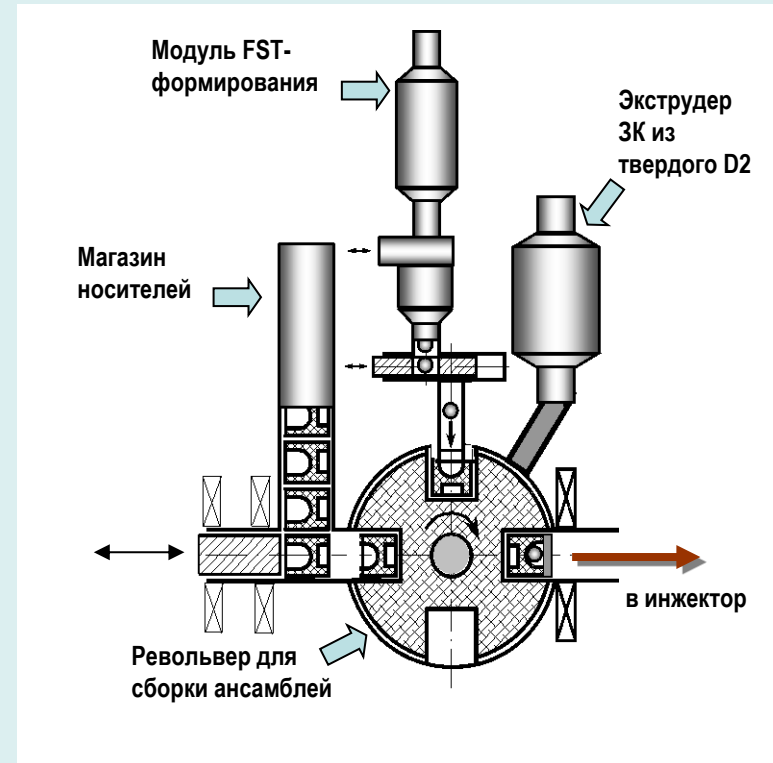
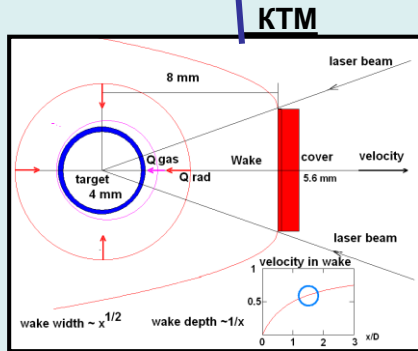
Функции носителя:

- для передачи импульса движения на КТМ
- для защиты КТМ от механического и теплового разрушения в процессе ее ускорения

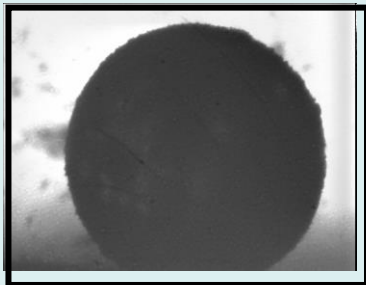
ПОЛЕТ ИНЖЕКТИРОВАННОЙ КТМ В КАМЕРЕ РЕАКТОРА

Функции защитной крышки (ЗК):

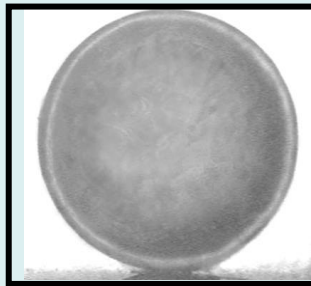
ЗК защищает КТМ от воздействия лобового ветра из остаточных газов при полете КТМ в камере реактора.



* / И.В. Александрова, Е.Р. Корешева, Е.Л. Кошелев. Многоуровневая система защиты криогенной мишени при её доставке в фокус мощной лазерной установки с высокой частотой повторения. ВАНТ, серия Термоядерный синтез, 41(4), 73-85, 2018 г.



КТМ с внешним защитным крио слоем



КТМ с отражающим металлическим слоем

УСКОРЕНИЕ КТМ В ИНЖЕКТОРЕ И ПОЛЕТ В КАМЕРЕ

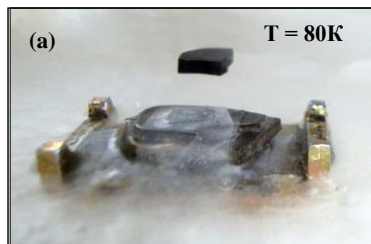
Внешний защитный криогенный слой:

Технология нанесения внешнего слоя из твердого D₂, Xe или Ne для защиты КТМ от перегрева в процессе доставки

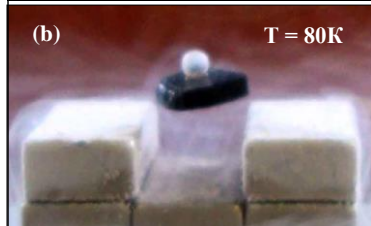
Внешнее отражающее покрытие из металла (технология ФИАН: разработка А.И.Громова)

Использование эффекта квантовой левитации ВТСП для позиционирования и транспорта криогенных мишеней \Rightarrow предложено в ФИАН впервые в мире

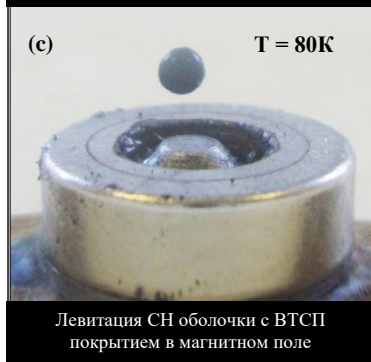
Образцы ВТСП изготовлены в Лаборатории Сверхпроводимости при участии О.М.Иваненко и К.В.Мицена



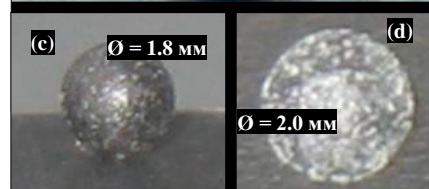
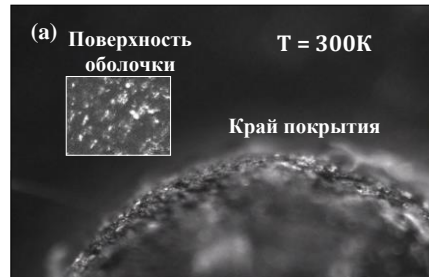
Левитация образца ВТСП в магнитном поле



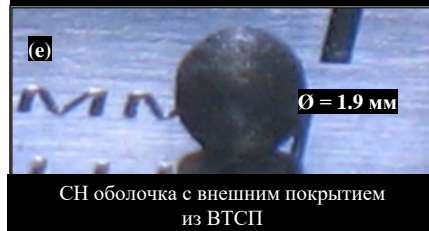
Полимерная оболочка на ВТСП подложке, левитирующая в магнитном поле



Левитация СН оболочки с ВТСП покрытием в магнитном поле

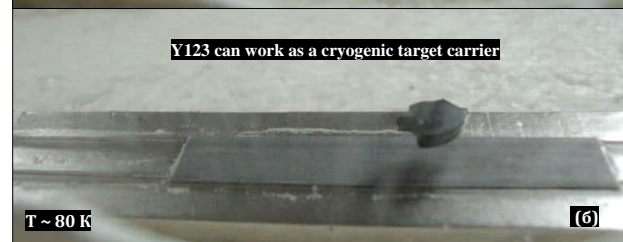
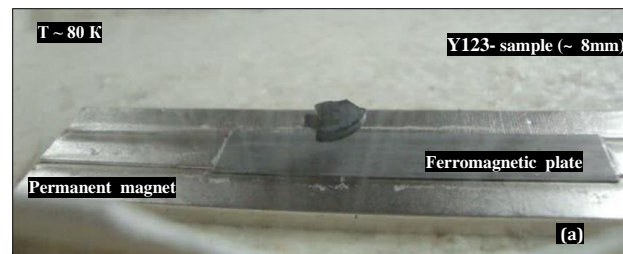


Три СН оболочки с внешним покрытием из ВТСП. Размер микрочастиц ~30–50 мкм

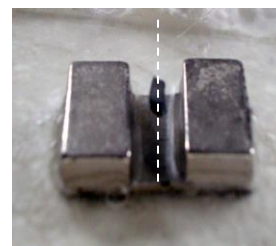


СН оболочка с внешним покрытием из ВТСП

Эксперименты по стабильной левитации образцов из $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Внешний композитный слой из микрочастиц ВТСП ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$)



Движение ВТСП платформы над ферромагнитной пластиной, укрепленной на поверхности магнита, $T=80\text{K}$ (магнит: феррит F0.8, $B \sim 0.2$ Тесла)



Эксперимент: образец ВТСП (8x2x2 мм) ориентируется вдоль линии с min магнитной индукцией между 2-х прямоугольных магнитов, $T=80\text{K}$

Макетные эксперименты по коррекции расположения образца ВТСП в магнитном поле

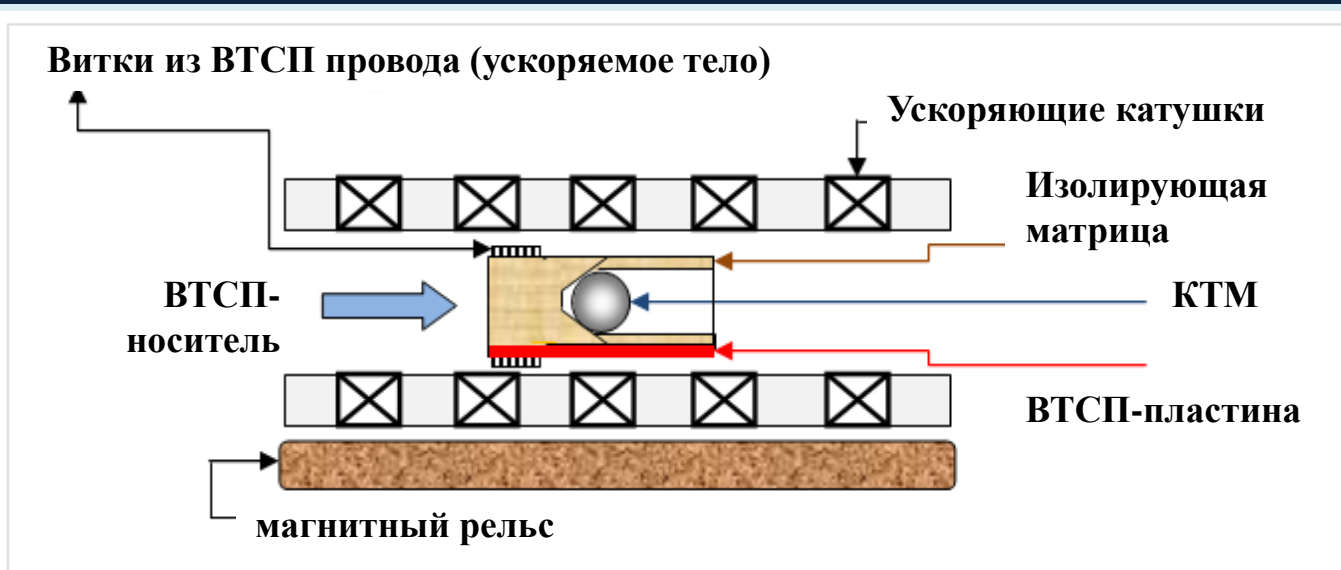
ВТСП \equiv высокотемпературный сверхпроводник

*I.V.Aleksandrova, O.M.Ivanenko, M.G.Klenov, et al. HTSC maglev systems for IFE target transport applications. J. Russian Laser Res. 2014 г.

Предложенная в ЛНФ система бесконтактной доставки представляет собой комбинацию систем линейного электромагнитного ускорения и левитации ВТСП-носителя с КТМ



Метод доставки
Патент РФ № 2635660, 2017 г.



ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОЙ ДОСТАВКИ КТМ

- ❑ Комбинация системы катушек, генерирующих бегущую магнитную волну (ускоритель) и магнитный рельс, обеспечивающий стабильную левитацию ансамбля «ВТСП-носитель + КТМ» в процессе его ускорения
- ❑ ВТСП-носитель, в конструкцию которого входят витки из сверхпроводящего провода (ускоряемое тело), ВТСП-пластины для обеспечения левитации носителя, а также тепло-изолирующая матрица с гнездом для КТМ

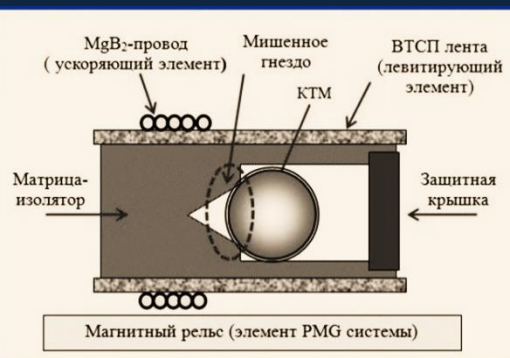
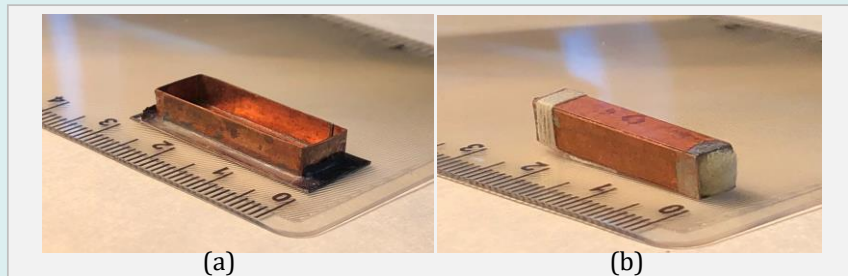


Схема ВТСП-носителя
Патент РФ № 2727925, 2020 г.

Эксперименты в поддержку предложенной схемы доставки



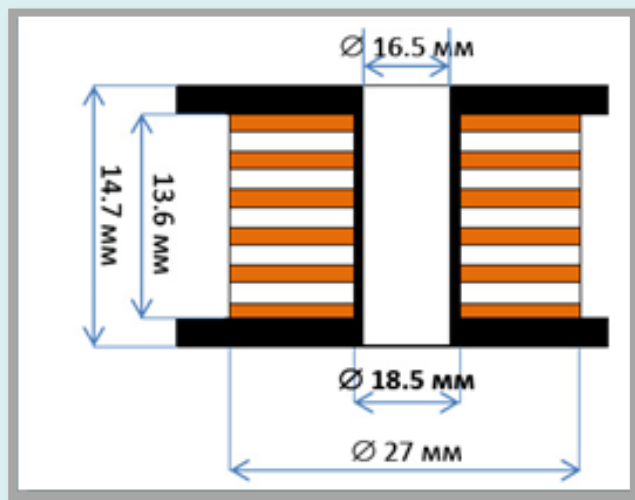
(a)

(b)

(a) ВТСП-носитель №1 «открытый параллелепипед»

(b) ВТСП-носитель №2 «полый параллелепипед»

При изготовлении носителей использована ВТСП лента 2-го поколения (ООО СуперОкс)



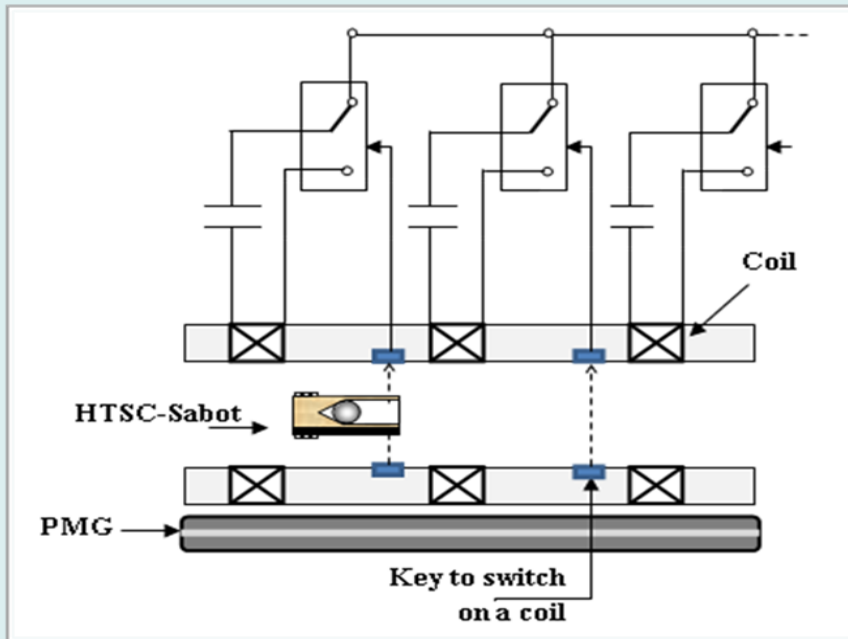
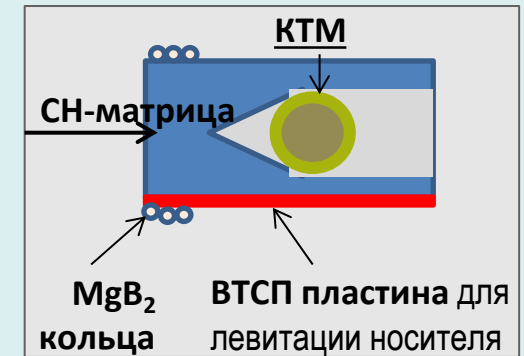
Ускоряющая катушка: 98 витков
ID 18.5 мм, OD 27 мм, H = 13.6 мм
Импульс: 200 А, 1 мкс, $B_{\max} = 0.35$ Тл



Стоп-кадры движения ВТСП-носителя под действием электромагнитного импульса ($T = 300$ К); (a) $v = 0.1$ м/с; (b) $v = 1$ м/с
Линейный ускоритель с 1-й катушкой

Бесконтактное ускорение ВТСП-носителя с КТМ позволяет снизить риски, возникающие вследствие трения и расклинивания носителя в канале ускорения [проект МАГАТЭ №20344]

- Результаты расчетов для линейного ускорителя: использование сверхпроводящих колец из MgB_2 в качестве элементов ускорения ВТСП-носителя позволяет достичь скорости инъекции КТМ 200 м/с при перегрузках 400g на длине ускорения 5 м (число ускоряющих катушек 200)



Линейный ускоритель ВТСП-носителя с КТМ: 200 катушек, длина от 5 м

Один шаг линейного ускорителя ВТСП-носителя в действии.
Такой ускоритель применим для доставки КТМ от узла сборки к инжектору

Макетные исследования показали:

- Применение замкнутого ускорителя позволит существенно уменьшить число ускоряющих катушек и габариты инжектора (по сравнению с линейным ускорителем).
- Использование овального ускорителя повышает эффективность ускорения ВТСП-носителя по сравнению с кольцевым ускорителем.



Вращение ВТСП-носителя в кольцевом ускорителе

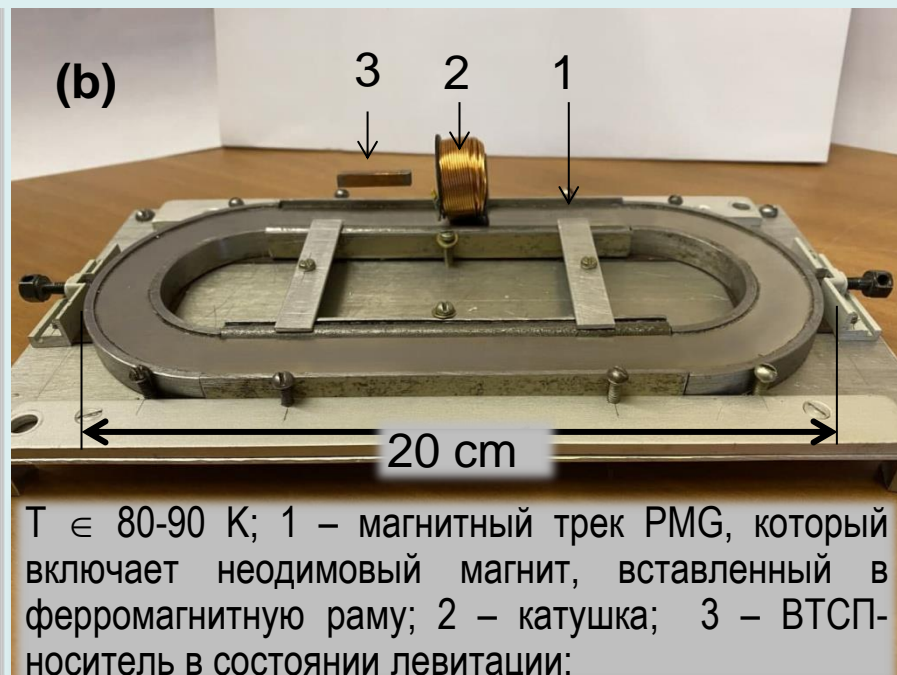
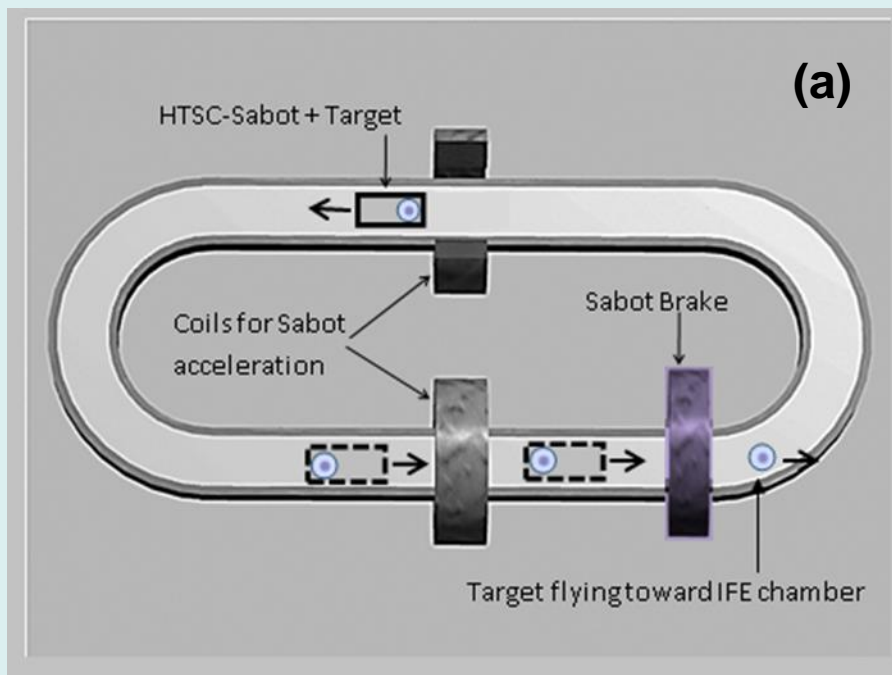
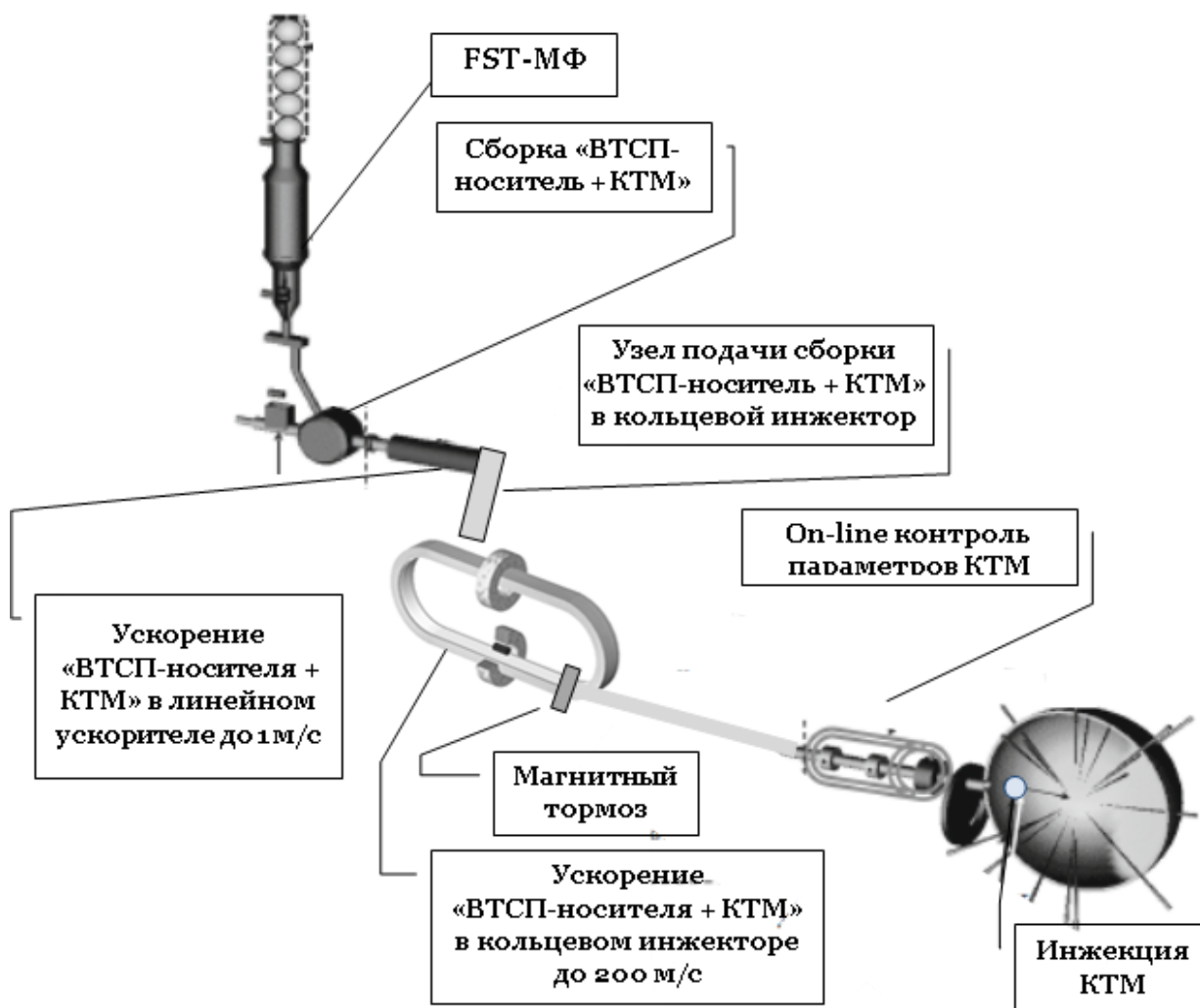


Схема замкнутого овального (кольцевого) ускорителя (а) и его макет (б). В этой схеме ускоряющие катушки размещаются на линейных участках ускорения, так что магнитное поле и ось носителя коллинеарны. Новая система ускорения находится в состоянии патентования

Схематичное решение ММР-ИТС, основанное на 3-х подходах, предложенных и испытанных в ФИАН

1. Метод FST для поточного формирования КТМ, 2. Эффект квантовой левитации для бесконтактной доставки КТМ, 3. Фурье-голография для on-line характеристики КТМ



ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ

1. Заполнение массива бесподвесных оболочек, расположенных внутри мишенного контейнера (МК), топливным газом
2. Перенос МК с массивом заполненных оболочек в модуль формирования FST-МФ



Перспективная программа ЛНФ включает отработку основных технологий по обеспечению топливом реактора ИТС // ТИН

- 1. Поточное (массовое) производство** бесподвесных КТМ реакторного масштаба ($\varnothing \sim 4$ мм, слой топлива ~ 200 мкм)
- 2. Частотная сборка** КТМ с ВТСП-носителями и доставка этой сборки на стартовую позицию в инжектор
- 3. Ускорение носителя** с КТМ, разделение носителя и КТМ, сбор отработанных носителей в накопителе
- 4. Инжекция КТМ** в экспериментальную камеру со скоростью от 200 м/сек и частотой 1-10 Гц
- 5. Контроль и управление траекторией** движения инжектированной КТМ в режиме реального времени
- 6. Синхронизация** прихода КТМ и импульса лазерного излучения в заданную область экспериментальной камеры
- 7. Оптимизация условий производства и доставки КТМ** с целью снижения рисков, минимизации запасов трития, и удешевления технологий ММР-ИТС

Полученные результаты лягут в основу разработки технических требований на создание первой опытной энергетической станции на основе реактора ИТС, работающей в импульсно-периодическом режиме