



НИЦ «Курчатовский институт»

ФГБУ «Государственный научный Центр Российской Федерации
- Институт теоретической и экспериментальной физики»

АТОМНО-МАСШТАБНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЯДЕРНОЙ ТЕХНИКИ

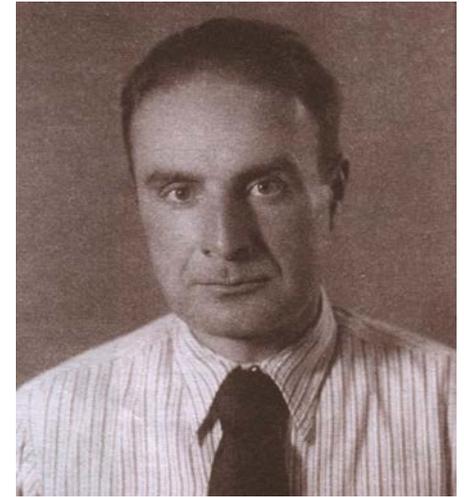
д.ф.-м.н. С.В. Рогожкин



У истоков зарождения ультра-микроскопических исследований в ИТЭФ

Начало 60-х

Г.М. Кукавадзе, руководитель масс-спектрометрической группы Лаборатории №1, принял решение о развитии автоионно-микроскопических исследований в ИТЭФ.



Воплощением этого «проекта» в жизнь занялись аспирант МФТИ В.А. Кузнецов, дипломник МИФИ А.Л. Суворов ...

Декабрь 1966 г. – первый автоионный микроскоп ИТЭФ собран и успешно запущен.



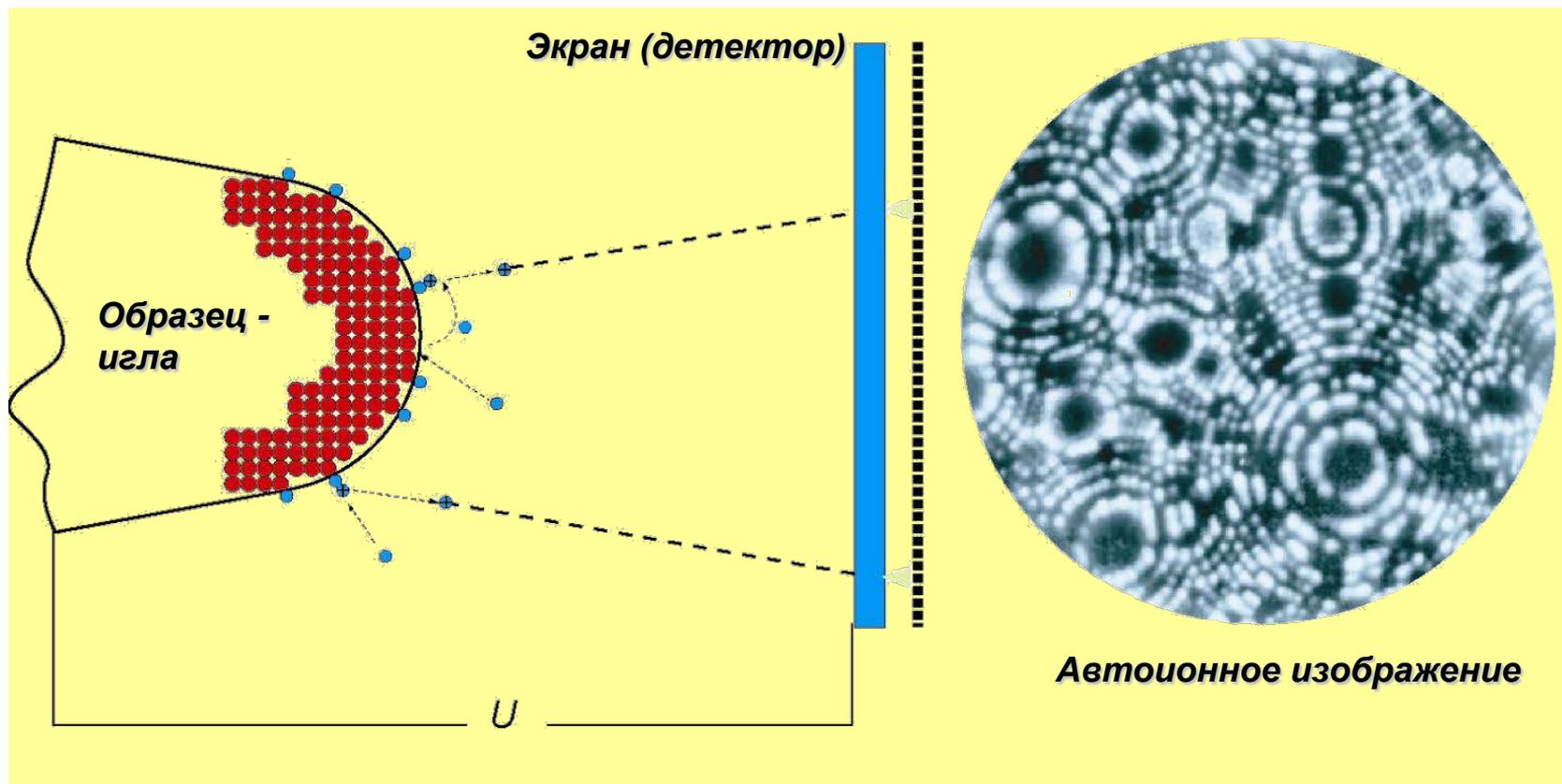
С января 1967 г. – стартовали систематические исследования образцов-игл, облученных дейтронами 5 – 10 МэВ, α частицами 23 МэВ, протонами 24 МэВ.



1970 г. – Обзор работ в журнале Успехи Физических Наук (А.Л. Суворов).



АВТОИОННАЯ МИКРОСКОПИЯ. Первая методика, позволившая «увидеть» отдельные атомы!



Muller E.W., Z. Physic, 1951

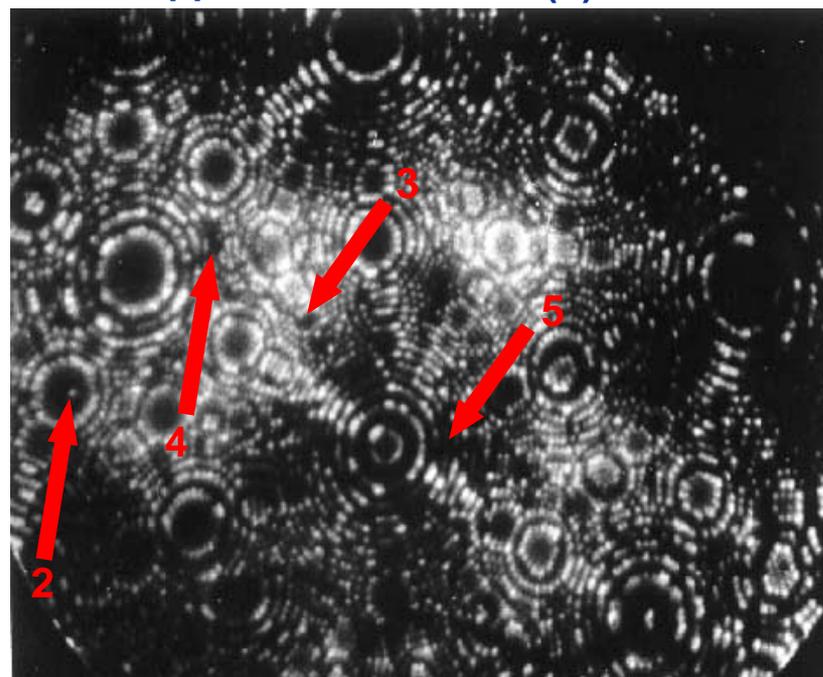
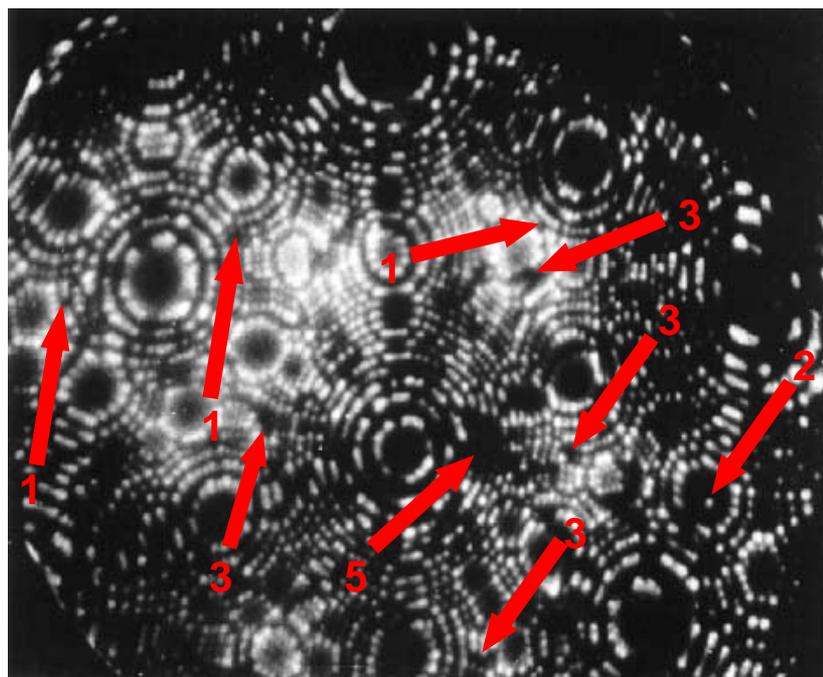
Ученый Совет к 70-летию института



ВОЗМОЖНОСТИ АВТОИОННОЙ МИКРОСКОПИИ



ЕДИНИЧНЫЕ ВАКАНСИИ (1), КОМПЛЕКСЫ СОБСТВЕННЫЙ МЕЖУЗЕЛЬНЫЙ АТОМ – АТОМ ПРИМЕСИ (2), КОМПАКТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ВАКАНСИЙ МАЛОЙ КРАТНОСТИ (3), СЕЧЕНИЕ НЕБОЛЬШОЙ ОБЕДНЕННОЙ ЗОНЫ (4), ДВА СЕЧЕНИЯ ИЗОЛИРОВАННОЙ ОБЕДНЕННОЙ ЗОНЫ (5)



ПОЛУЧЕННЫЕ В ПРОЦЕССЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ИСПАРЕНИЯ ПОЛЕМ АВТОИОННЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ДВУХ ПОВЕРХНОСТЕЙ (С РАЗНИЦЕЙ В ПЯТЬ АТОМНЫХ СЛОЕВ)



Физика наномасштабов – основа реакторного материаловедения

- ❑ Процессы радиационного повреждения материалов проходят на наномасштабах,
- ❑ Изменения на наномасштабах структурно-фазового состояния определяют деградацию конструкционных материалов,
- ❑ Целенаправленное формирование наномасштабной структуры позволяет получить уникальные свойства материалов.



Развитие ультрамикроскопических исследований в ИТЭФ

- Мюонная и позитронная спектроскопия;
- Начало 90-х – старт исследований методами туннельной и атомно-силовой микроскопии;
- 2001 - 2003 – запуск исследований на сканирующем зондовом микроскопе MultiMode NanoScope (Veeco);
- 2003 - 2005 – запуск и успешный старт исследований на Томографическом атомном зонде ECOTAP (CAMECA);
- 2007 – старт исследований материалов, облученных в реакторе (материалы корпусов ВВЭР, перспективные материалы активной зоны реакторов);
- 2009 – старт имитационных исследований реакторных повреждений на пучках тяжелых ионов;
- 2013 - 2016 – разработка и запуск исследований на Прототипе Атомного Зонда с Лазерным испарением для томографического анализа (3D) распределения химических элементов ПАЗЛ-3D (ИТЭФ).



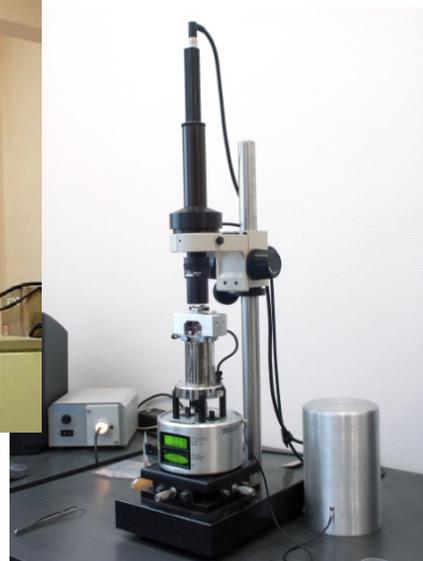
Современная экспериментальная база ИТЭФ для получения информации на нано- и атомных масштабах



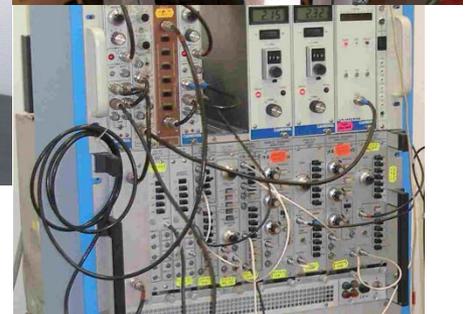
Томографическая атомно-зондовая и автономная микроскопия



Просвечивающая Электронная микроскопия



Сканирующая атомно-силовая и туннельная микроскопия

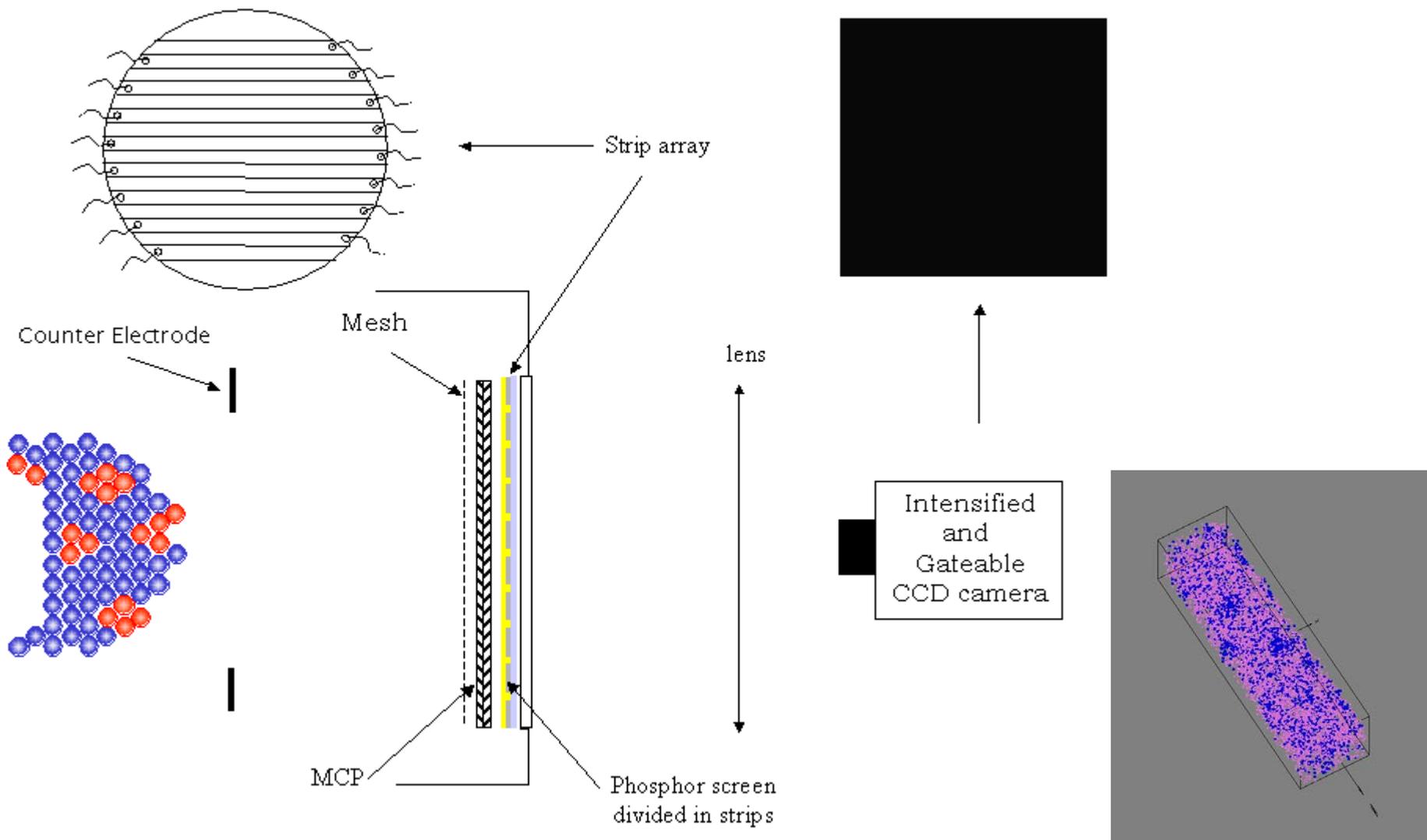


Позитронная аннигиляционная спектроскопия

**Ресурсные центры НИЦ
«Курчатовский институт»**



Томографический атомный зонд – уникальный метод исследования атомно- масштабных особенностей многокомпонентных материалов

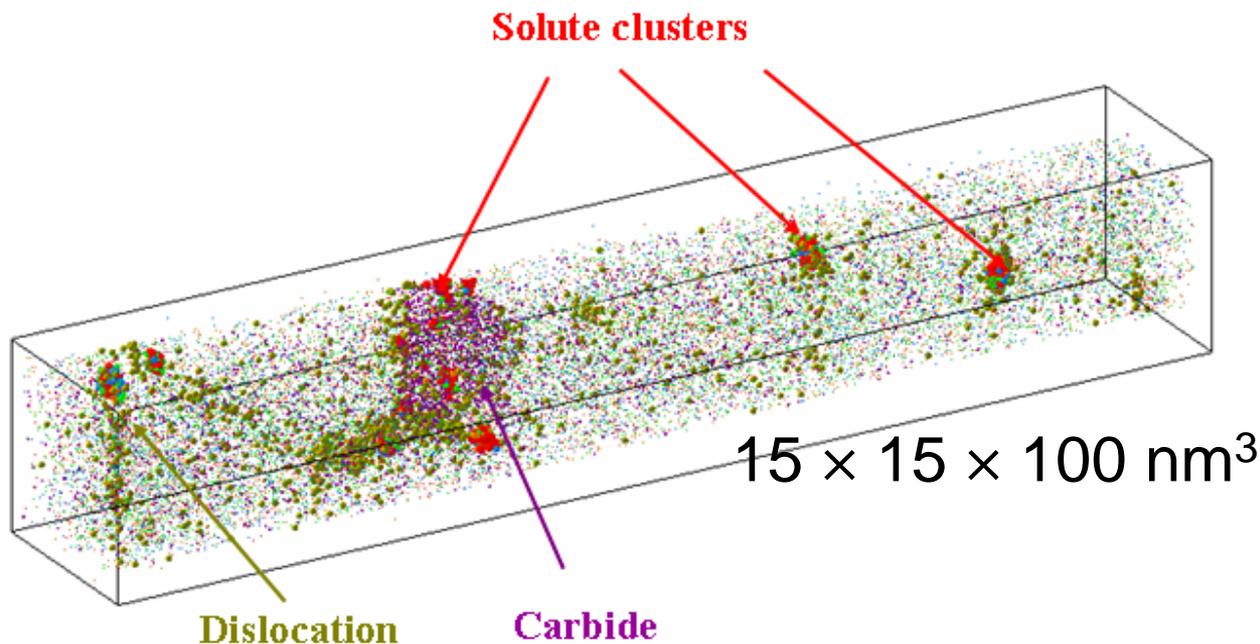




Томографические атомно-зондовые исследования наноразмерных особенностей структуры материалов корпусов реакторов (совместно с «Курчатовским институтом» и ЦНИИ КМ ПРОМЕТЕЙ)

Причиной охрупчивания корпусов реакторов ВВЭР-440 являются Си-кластеры, формирующиеся под облучением

Cu
Si
Mn
Ni
P
C
Fe





Наноструктура перспективных конструкционных материалов ядерных и термоядерных реакторов

совместно с
ОАО ВНИИНМ им. А.А. Бочвара и
Karlsruhe Institute of Technology, Germany

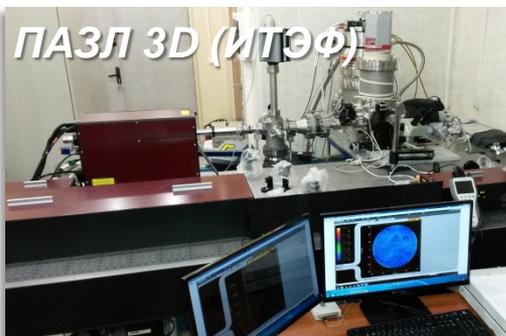
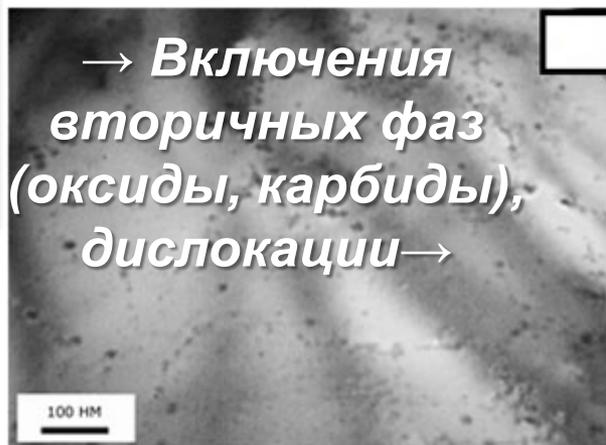
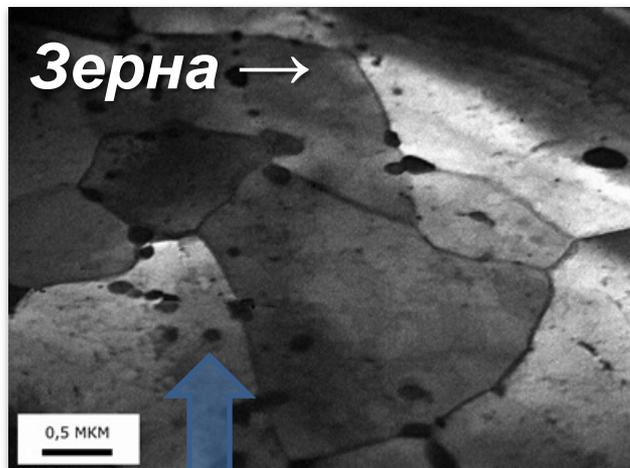
Дисперсионно твердеющие и дисперсно-упрочненные оксидами стали

- ❑ ЭК-181, ЧС-139, Eurofer 97 ..., (дисперсионно твердеющие стали)
- ❑ ЭК-181 ДУО, ЭП-450 ДУО..., ODS Eurofer, ODS 13.5Cr-Ti ...
(упрочненные оксидами стали)
- ❑ сплавы ванадия (V-4Ti-4Cr).

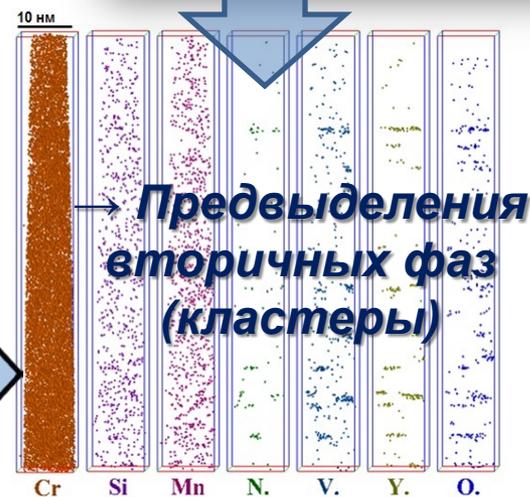
Важнейшая задача – изучение исходной наноструктуры перспективных материалов и ее поведения в условиях облучения!



Стабильность структурно-фазового состояния конструкционных материалов – критерий радиационной стойкости



При проведении исследований контролируется структурно-фазовое состояние на нескольких пространственных масштабах





Имитационные эксперименты на пучках тяжелых ионов

Моделирование реакторных повреждений



Облучение образцов для просвечивающей электронной микроскопии

Облучение образцов для атомно-зондовой томографии



Облучение сталей ионами металлов на Стенде СОРМАТ (Стенд Облучения Реакторных МАТериалов)



Инжектор ионов
ВДИИМ

Вакуум: менее 2×10^{-6} мбар

Температура: 300 - 800 К

“Низкоэнергетичные” ионы:

Fe, Ti, V, Al, ...

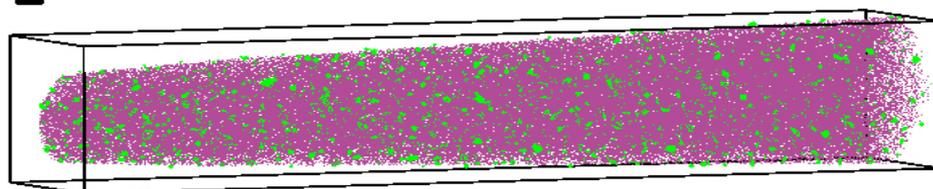
Энергия: 40-100 кэВ/З



«Низкоэнергетичный»
выход (40-100 кэВ/З)

Контроль наноструктуры

10 нм



Ti, V



«Низкоэнергетичный» эксперимент



75 КэВ/З: Fe⁺ (25%), Fe⁺² (68%), Fe⁺³ (7%)

SRIM

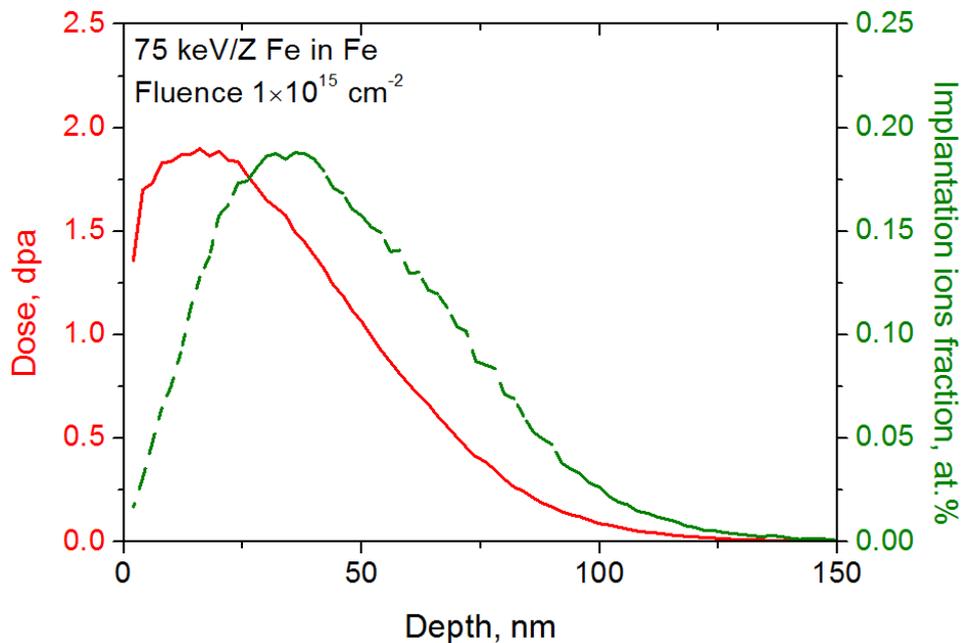
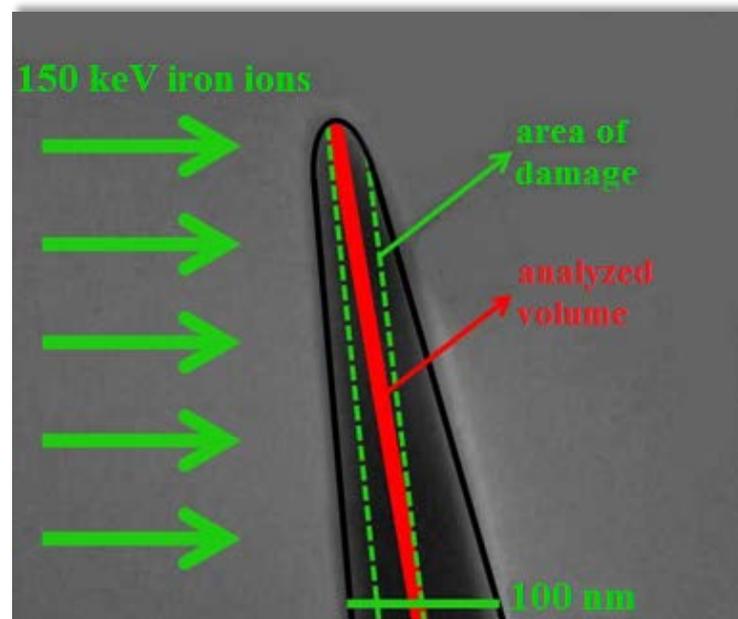


Схема эксперимента с образцами для томографических атомно-зондовых исследований





Облучение сталей ионами металлов на тяжелоионном ускорителе ТИПр-1



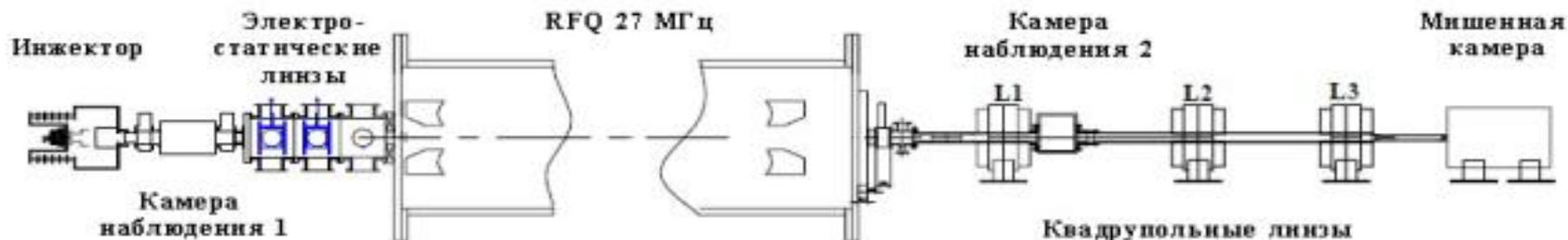
Вакуум: менее 2×10^{-6} мбар

Температура: 300 - 800 К

«Высокоэнергетичные» ионы:

Fe, Ti, V, Al, ...

Энергия: 100 кэВ/нуклон



**Контроль микроструктуры и механических
свойств (нанотвердости)**

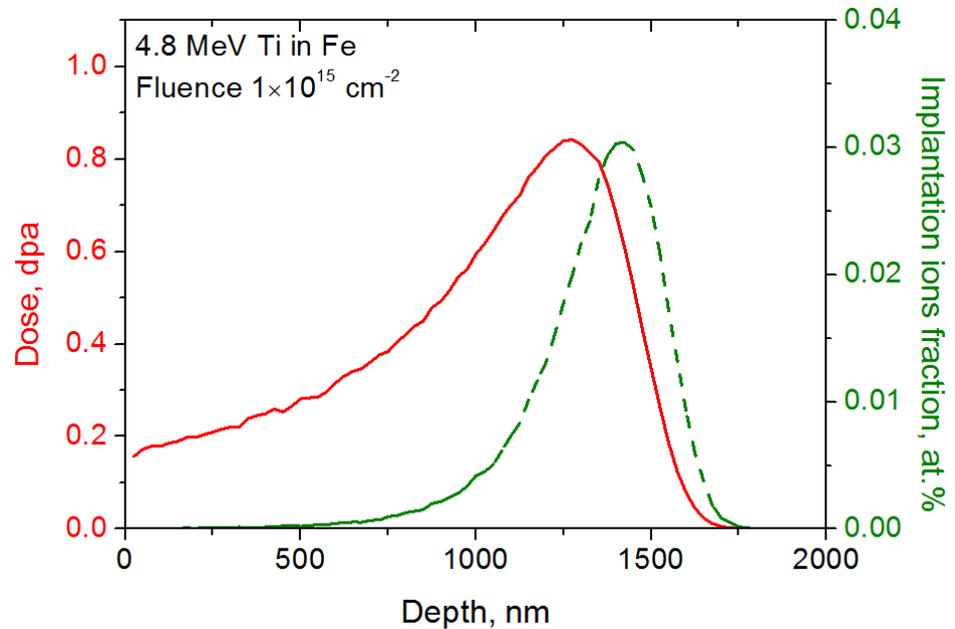
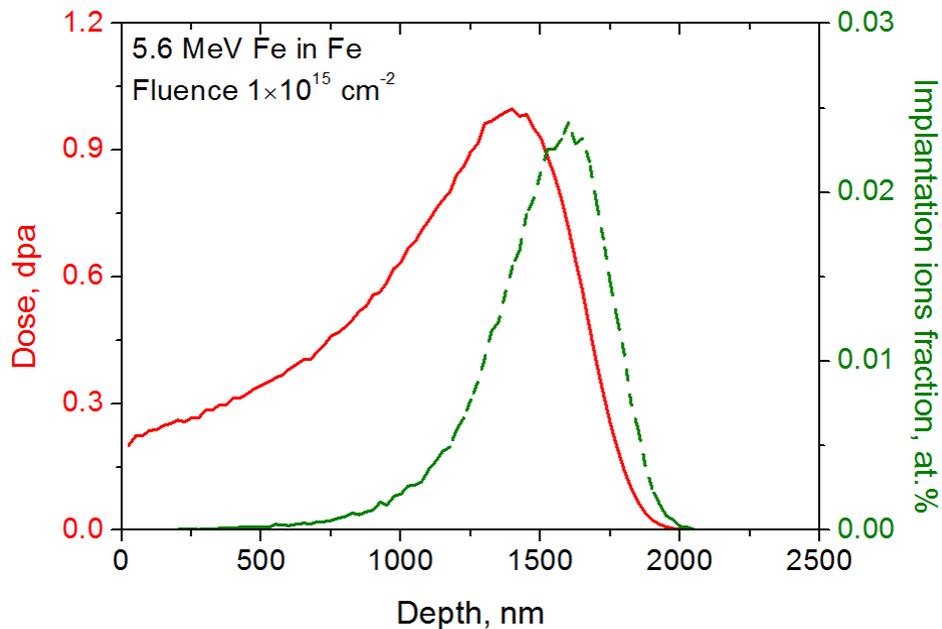


«Высокоэнергетичный» эксперимент



SRIM

100 кэВ/н



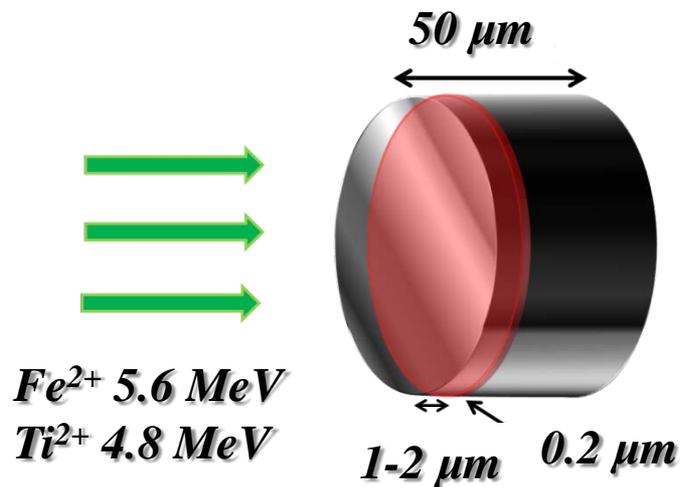
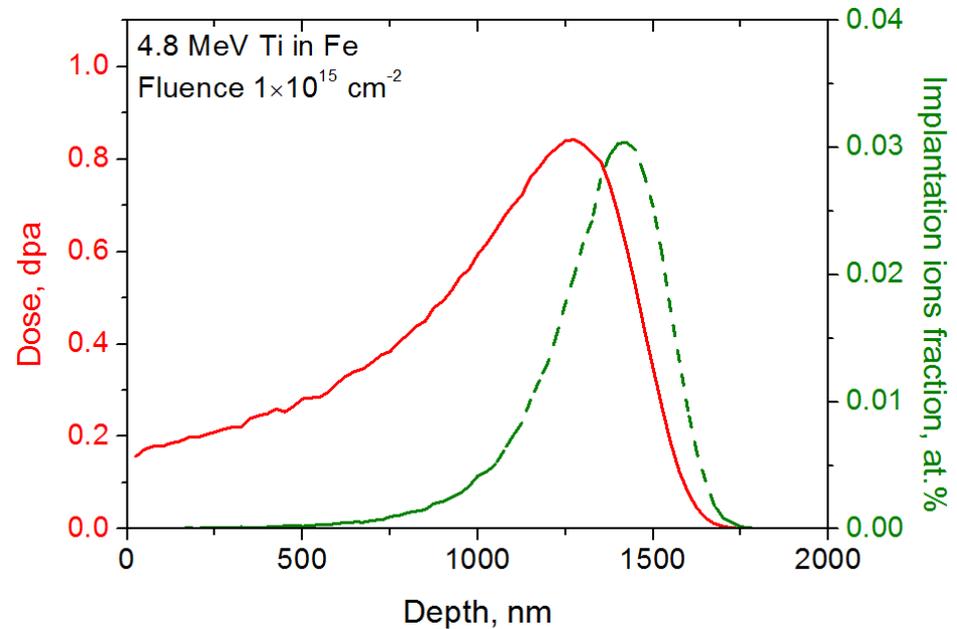
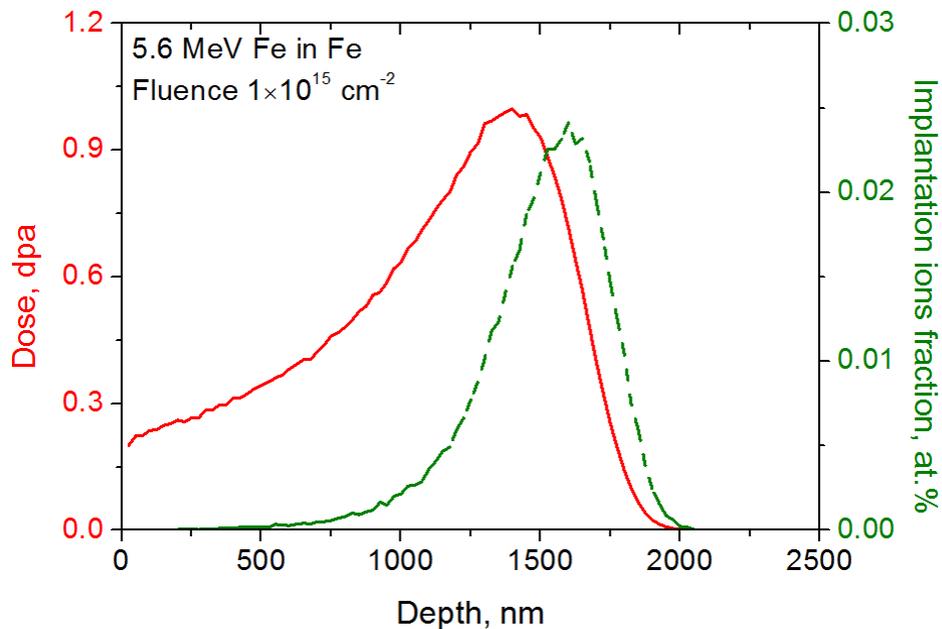


«Высокоэнергетичный» эксперимент



100 кэВ/п

SRIM



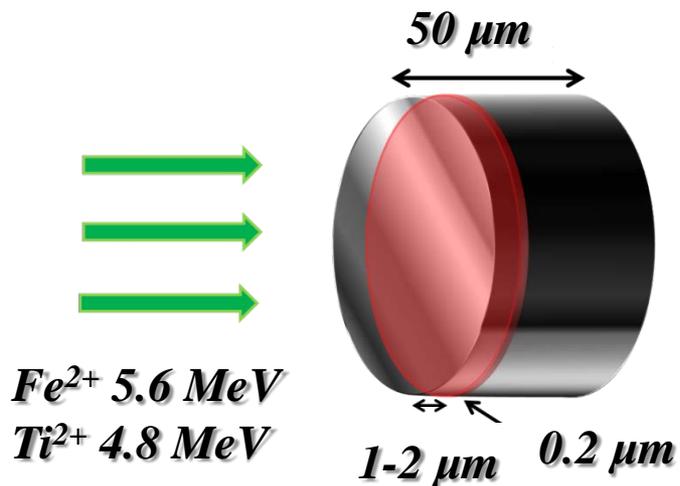
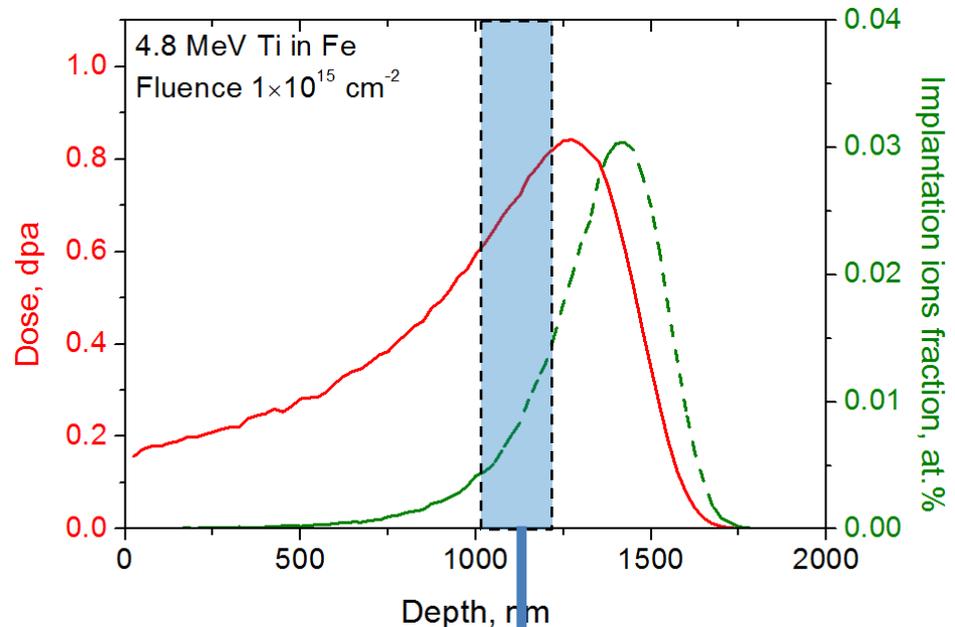
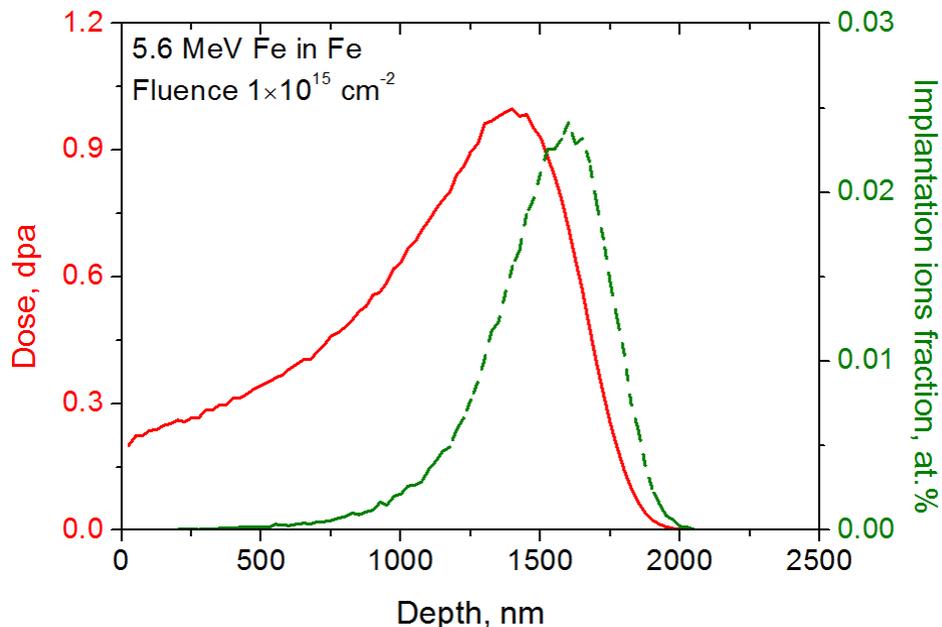


«Высокоэнергетичный» эксперимент

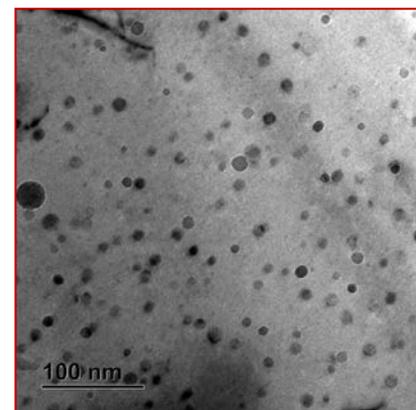


SRIM

100 кэВ/н



Просвечивающая
Электронная
Микроскопия

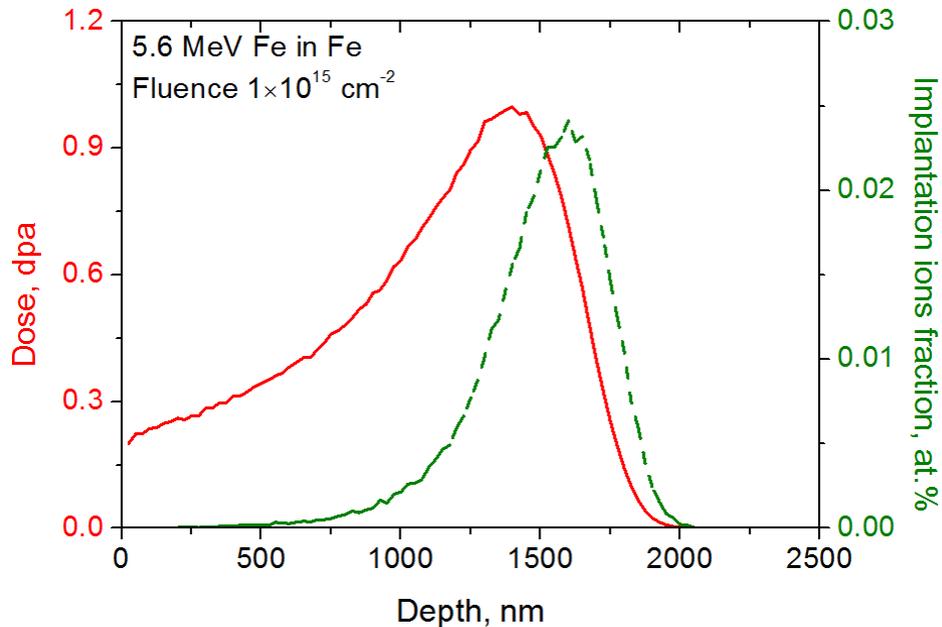




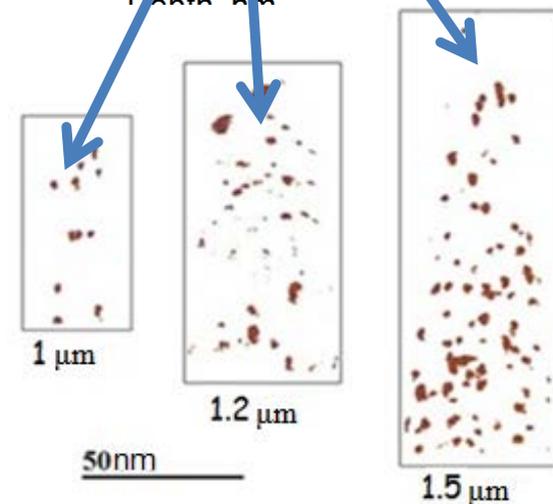
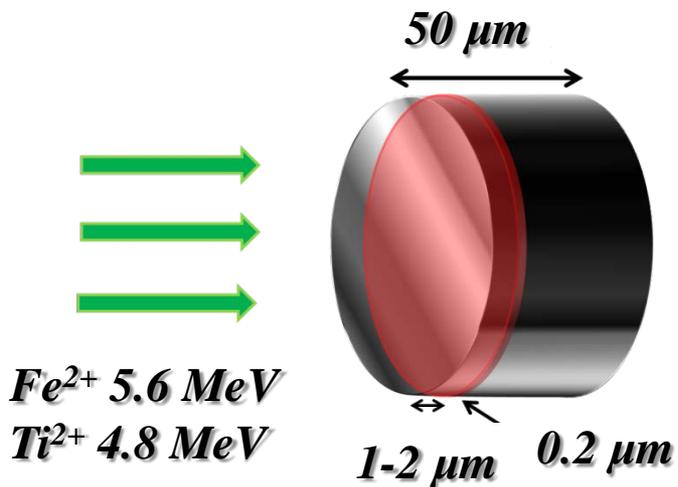
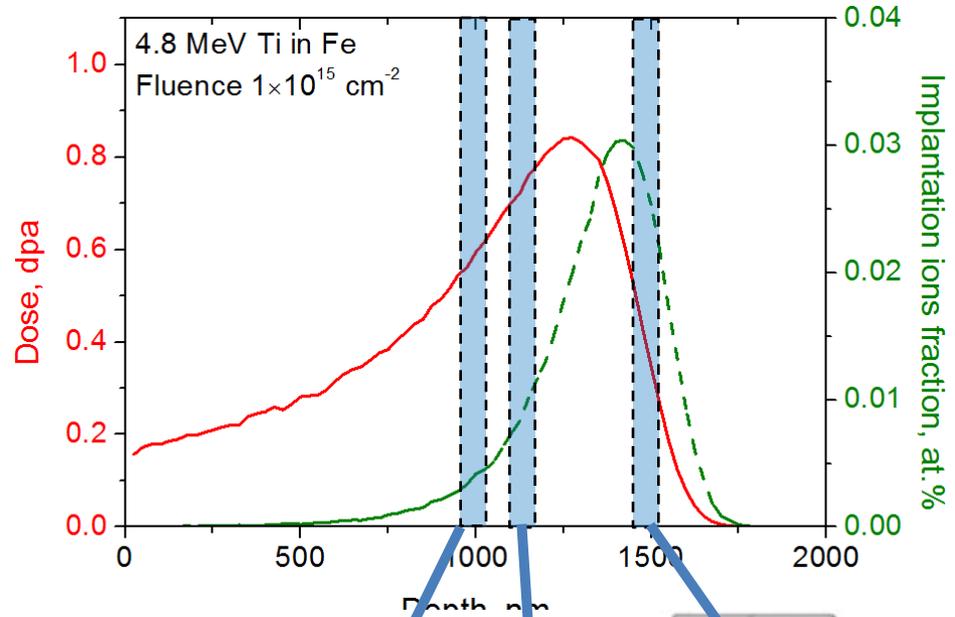
«Высокоэнергетичный» эксперимент



SRIM



100 кэВ/н





Имитационный эксперимент позволяет варьировать различные параметры облучения (дозу, температуру облучения, скорость набора дозы,), и тем самым изучать роль этих характеристик на изменения наноструктуры материалов.

Имитационный эксперимент может служить методикой экспресс анализа радиационной стойкости материалов

Имитационные эксперименты выполнены на:

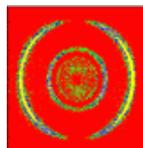
- ферритно-мартенситных сталях ЭК-181 и ЧС-139 (разработки АО ВНИИНМ),**
- дисперсно-упрочненных оксидами сталях: ЭП-450 ДУО (разработки АО ВНИИНМ), ODS Eurofer и ODS 13.5Cr-Ti (разработки Института технологий Карлсруэ).**
- титановых сплавах Ti-Al-V (разработки ГНЦ ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»).**



Развитие приборной базы

Создание Прототипа Атомного Зонда с Лазерным испарением

HIGH AND
ULTRA HIGH
VACUUM
PRODUCTS



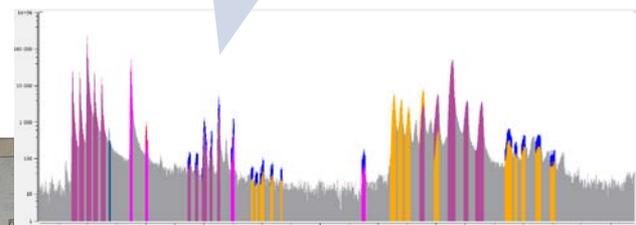
RoentDek

Handels GmbH

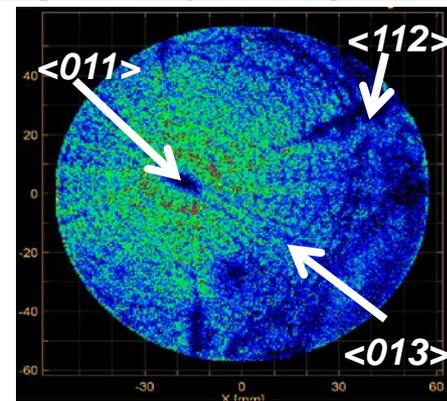
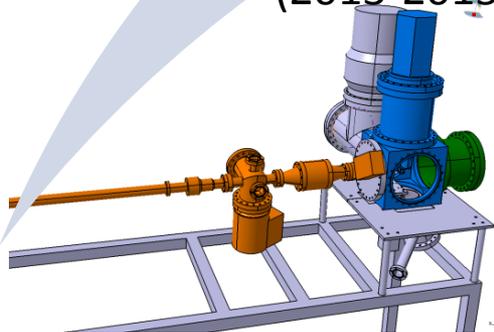
Supersonic Gas Jets
Detection Techniques
Data Acquisition Systems
Multifragment Imaging Systems

Отработка методики эксперимента (2016)

Сборка и запуск (2014-2015)



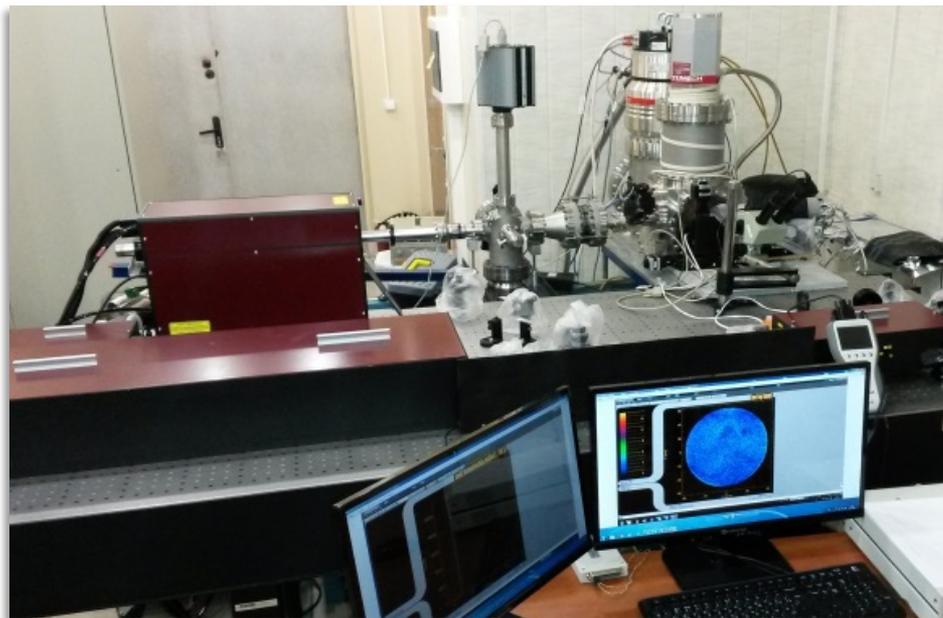
Разработка (2013-2015)



Ученый Совет к 70-летию института



Прототип Атомного Зонда с Лазерным испарением для 3D анализа распределения химических элементов «ПАЗЛ-3D»



- Разрешение по массе 300-800
- Чувствительность 10-200 ppm
- Объем данных $\sim 60 \times 60 \times 1000$ nm
- Латеральное разрешение $< 4 \text{ \AA}$
- Разрешение в глубину $< 1,5 \text{ \AA}$
- Чувствительность ко всем элементам H...Fe...W...U

Лазерная система:

- Длительность импульса: 30-60 фс
- Частота: 1 Гц – 50 кГц
- Длина волны: 1029 ± 1 nm
- Гармоники: 515 nm (металлы, п/п); 343 nm (металлы, п/п, диэлектрики); 247 nm (п/п, диэлектрики)
- Энергия в импульсе: 60 мкДж (для испарения Al необходимо ~ 3 мкДж)
- Средняя мощность: 2,7 Вт (50 кГц)





«Мыслей рой, желаний куча
И немало сил...», А.Л. Суворов 1988 г.



Отдел атомно-масштабных и ядерно-физических методов исследования материалов ядерной техники



А.А. Никитин



С.В. Степанов



С.В. Рогожкин



А.Г. Залужный



А.А. Алеев



Д.С. Звезжинский



А. Богачев



О. Корчуганова



Н. Орлов



Н. Искандаров



А. Лукьянчук



В.В. Хорошилов



С.В. Краевский



М.А. Козодаев



Д. Апарин



О. Разницын



А. Хомич



П. Лямкин



А. Миронов



А. Шутюв



Спасибо за внимание

