



Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт" Институт теоретической и экспериментальной физики



Физика высокой плотности энергии в веществе (ФВПЭ)

Состояние вещества с предельно высокими температурами и давлениями, а следовательно, с необычайно высокими концентрациями энергии, всегда привлекало исследователей возможностью получения в лабораторных условиях экзотических состояний, из которых возникла наша Вселенная в результате Большого взрыва. Кроме того, стимулом таких исследований является практическое применение экстремальных состояний в ядерной, термоядерной и импульсной энергетике, для синтеза сверхтвердых веществ, упрочнения и сварки материалов, противоударной защиты космических аппаратов и т.д.

Ключевой проблемой экспериментальных усилий в области ФВПЭ является генерация в лабораторных условиях состояний с хорошо контролируруемыми параметрами.



Многофункциональная установка ПРИМА

Установка ПРИМА в ИТЭФ

В 2004 году на быстром выводе пучка ускорителя ТВН-ИТЭФ была разработана и создана экспериментальная установка ПРИМА (Протонно-Ионная Многофункциональная установка).

На установке ПРИМА проведены экспериментальные исследования зависимости энерговыделения пучков протонов, ионов углерода и ионов железа с энергией от 50 до 220 МэВ/а.е.м. в пористых медных мишенях, которые планируется использовать в конверторе излучения мишени инерциального термоядерного синтеза.

Плазменная линза фокусировки пучка

На основе квадрупольных линз в ИТЭФ создана новая фокусирующей системы на основе плазменной линзы. Плазма генерируется сильно-точным разрядом до 300 кА с полупериодом 3-5 мкс в газе низкого давления. Фокусировка ионного пучка в плазменной линзе осуществляется аксиально-симметричным азимутальным магнитным полем, создаваемым током разряда. На плазменной линзе

установки ПРИМА осуществлена острая фокусировка пучка ионов углерода с энергией 300 МэВ/а.е.м. в пятно размером 350 мкм.

Радиобиологические исследования на пучках тяжелых ионов

В 2007 году в ИТЭФ на базе ускорительного комплекса ТВН-ИТЭФ были начаты исследования в области радиобиологии с использованием пучков тяжелых ионов. Создана экспериментальная установка и проведены экспериментальные исследования биологической эффективности воздействия ионов углерода и железа на различные объекты, включая культуры опухолевых и нормальных клеток, а также лабораторных животных.

Протонный микроскоп ПУМА

В 2009 году в ИТЭФ создан первый в России протонный микроскоп ПУМА (установка с использованием магнитной оптики), позволяющий, с использованием пучка протонов с энергией 800 МэВ, получать протонно-радиографические изображения исследуемых объектов с увеличением до 8 раз, при этом пространственное разрешение составляет 60 мкм при массовой толщине исследуемых объектов до 20 г/см². На установке ПУМА, совместно с РФЯЦ ВНИИЭФ, ИПХФ РАН, ОИВТ РАН выполнены работы по экспериментальному исследованию ударно-волновых и детонационных процессов в конденсированных и эмульсионных взрывчатых веществах, исследования процессов откольного разрушения и струеобразования при ударно-волновом нагружении металлических образцов, исследования плотной неидеальной плазмы.

Также был проведен ряд уникальных экспериментов по изучению внутренней структуры биологических объектов. Неразрушающим методом были проведены эксперименты по трехмерной реконструкции внутренней структуры объекта - имитатора тепловыделяющего элемента

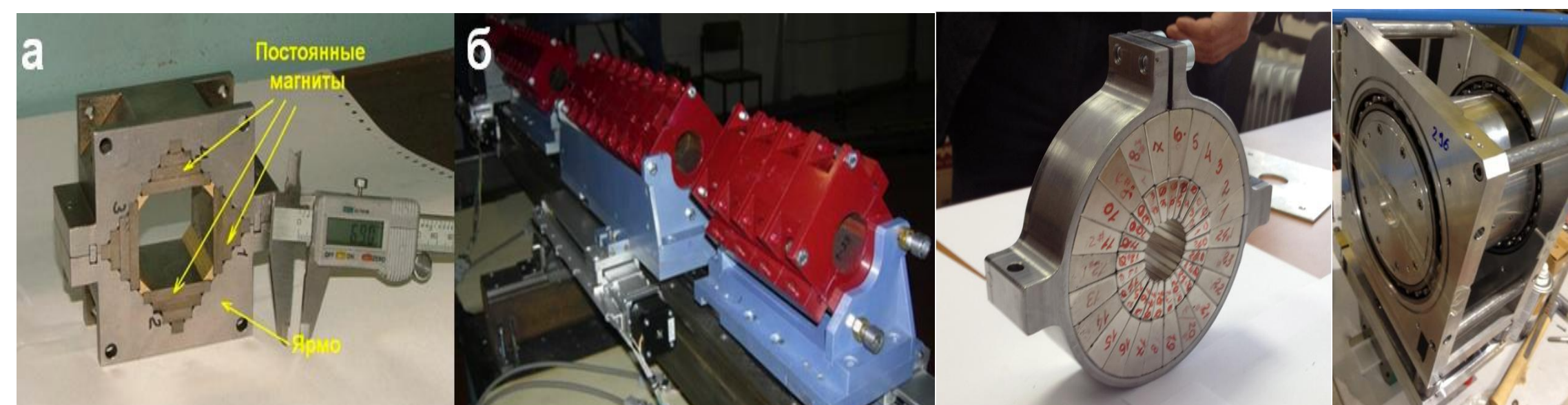
Прототип протонного микроскопа PRIOR в GSI

Высокоточная протонно-радиографическая установка PRIOR (протонный микроскоп для FAIR) будет ключевым диагностическим инструментом для будущих экспериментов по физике высокой плотности энергии в веществе (эксперименты HINEX и LAPLAS предложенные коллаборацией APPA-NEDgeNOV) в проекте FAIR (г. Дармштадт Германия). Прототип установки PRIOR, использующий пучок протонов с энергией до 4.5 ГэВ, создан совместно специалистами ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ» НИЦ «Курчатовский институт», GSI и LANL (Лос-Аламос, США) на базе ускорителя SIS-18 в GSI (г. Дармштадт Германия). В 2014 году осуществлен физический пуск установки с использованием пучка протонов с энергией 3.6 ГэВ. Наилучшее пространственное разрешение составило 30 мкм.

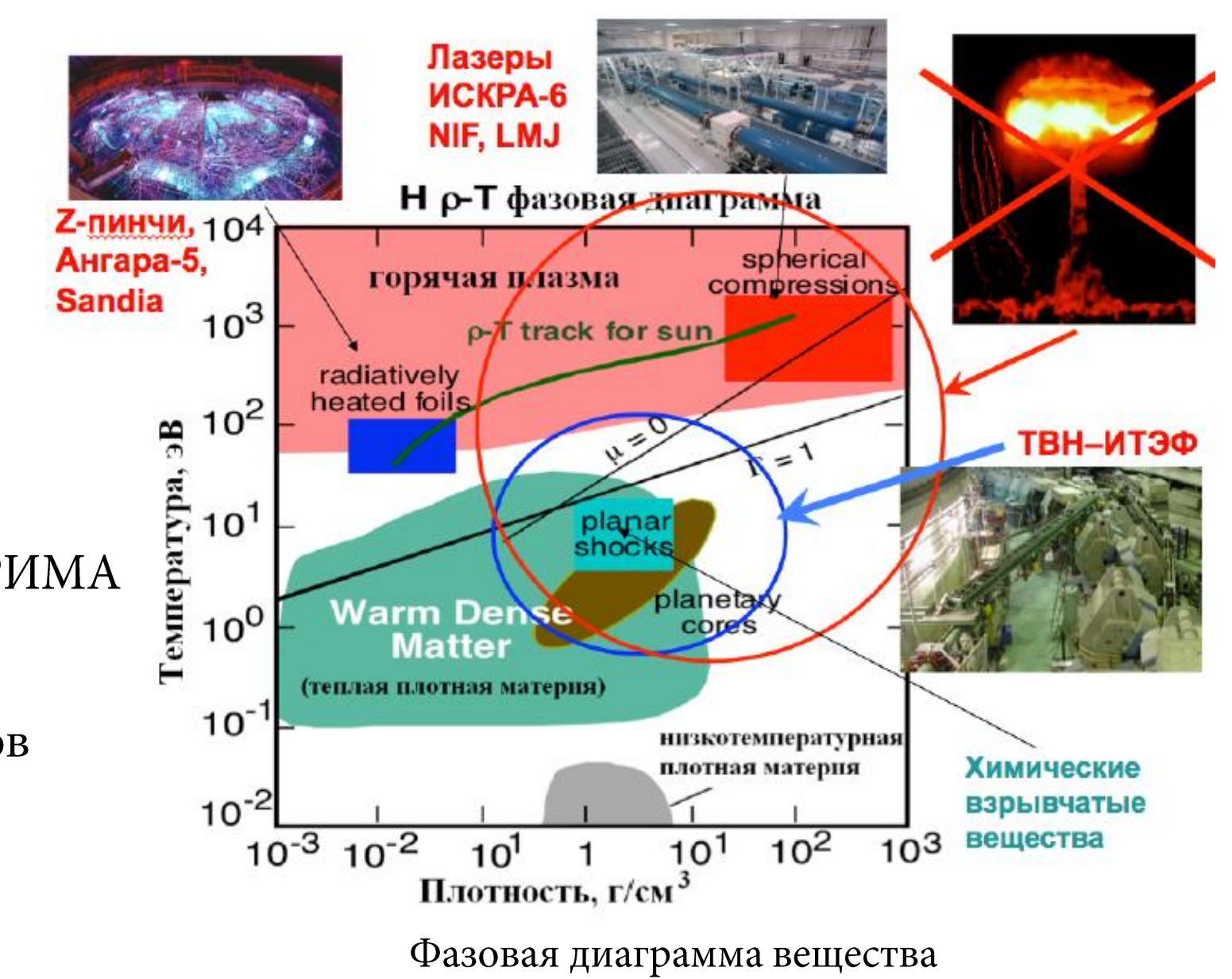
Квадрупольные линзы на постоянных магнитах для протонных микроскопов

Секции формирования изображений протонной микроскопии, ПУМА в ИТЭФ и прототип PRIOR в GSI, содержат четыре квадрупольные линзы, образующие симметричную систему, называемую «русским квадруплетом». Для достижения наилучших характеристик протонного микроскопа в этой секции используют квадрупольные линзы на постоянных магнитах (ПМК). Они имеют меньшую стоимость по сравнению с электромагнитными квадрупольными линзами, не требуют электропитания, весьма компактны.

Для протонного микроскопа ПУМА разработаны и созданы четыре ПМК линзы, две длиной 160 мм, и две 320 мм, апертура линз – 40 мм, магнитное поле на полюсе 0.58 Т. Для прототипа PRIOR разработаны четыре ПМК, две эффективной длиной 144 мм, а две другие – длиной 288 мм. Поле на радиусе апертуры линз составляет 1,77 Т, апертура – 30 мм. Конструкция линз модульная. Каждый модуль имеет двухслойную структуру и содержит трапециевидные магнитные элементы, изготовленные из двух типов высококоэрцитивных сплавов, принадлежащих к группе Nd-Fe-B.



Квадрупольные линзы на постоянных магнитах для установки ПУМА: (а) – отдельный модуль линзы, (б) – готовые ПМК линзы; и установки PRIOR: (в) – отдельный модуль линзы, (г) – готовая ПМК линза



Фазовая диаграмма вещества

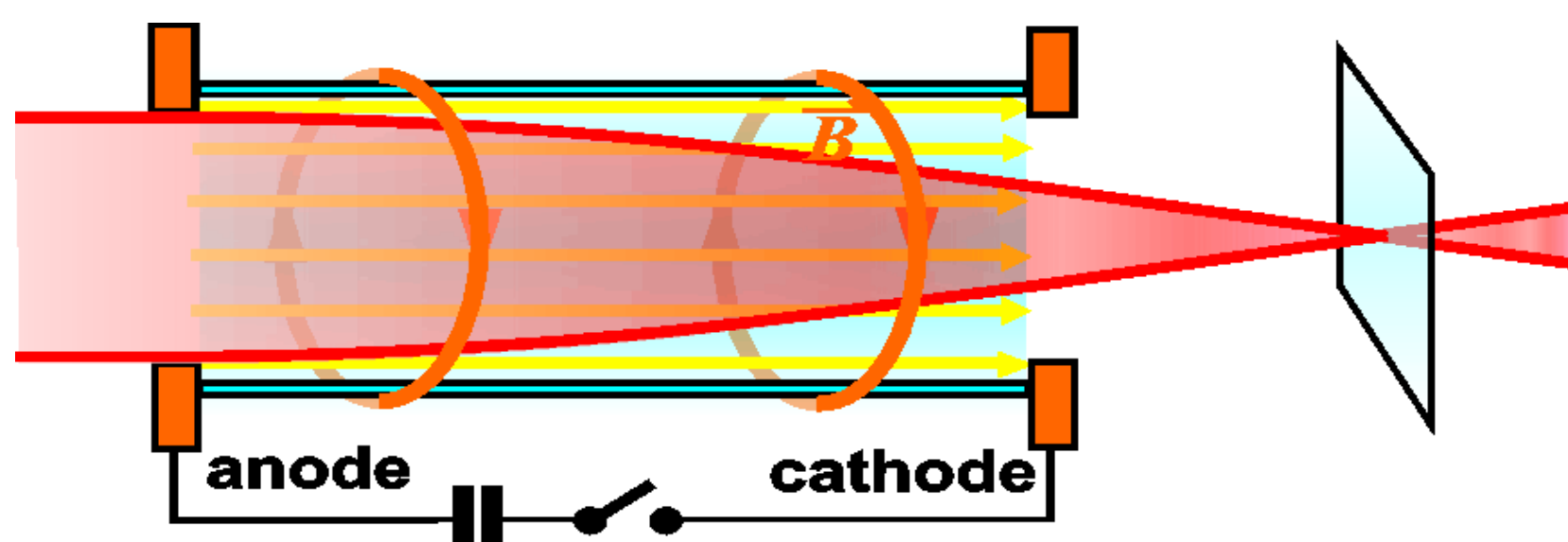
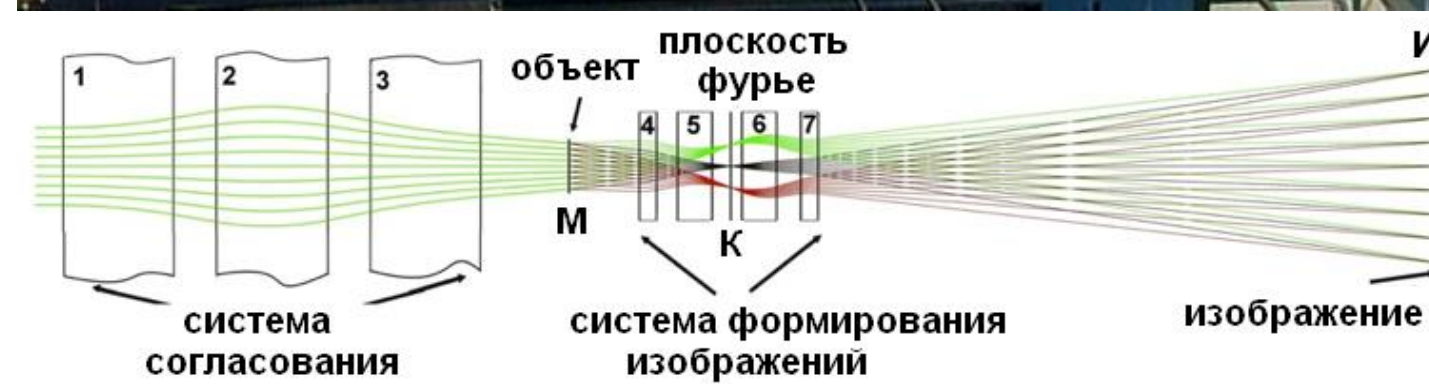


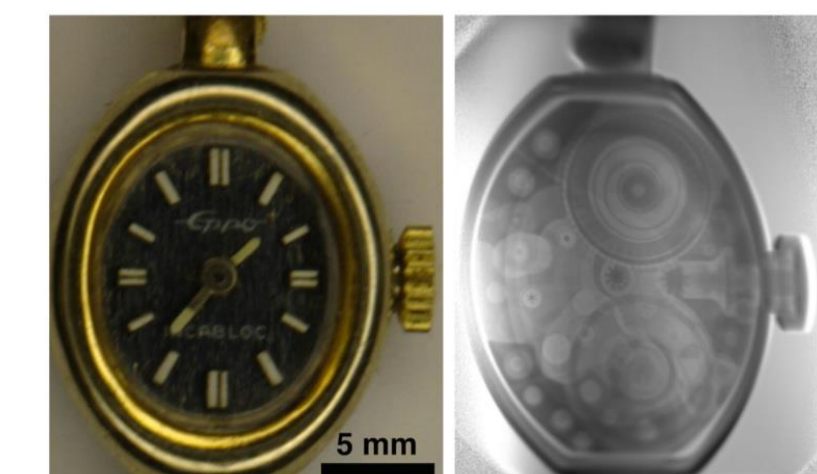
Схема плазменной линзы для фокусировки пучка ионов и изображение сфокусированного пучка ионов углерода



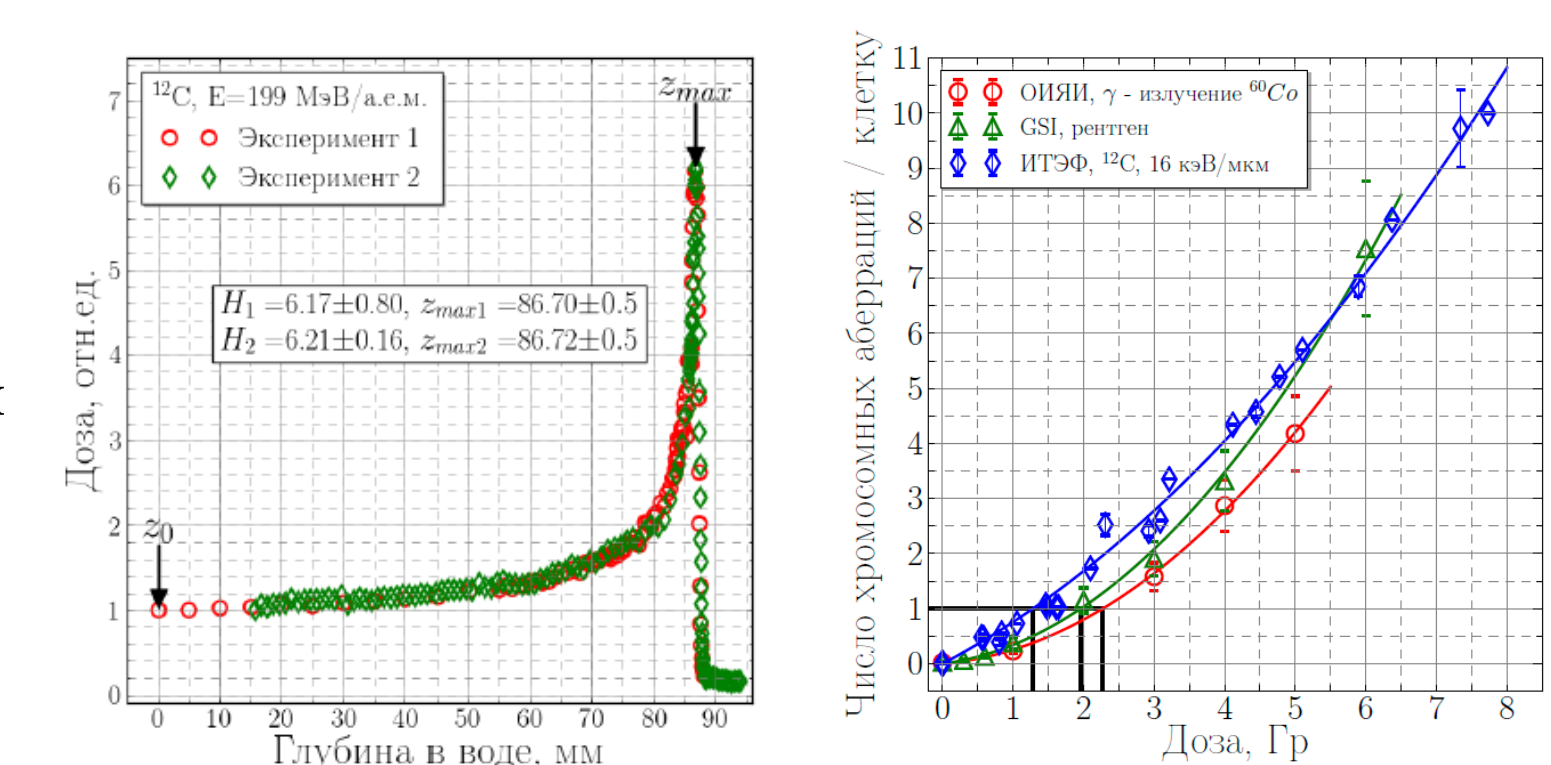
Внешний вид экспериментальной установки для проведения радиобиологических исследований.



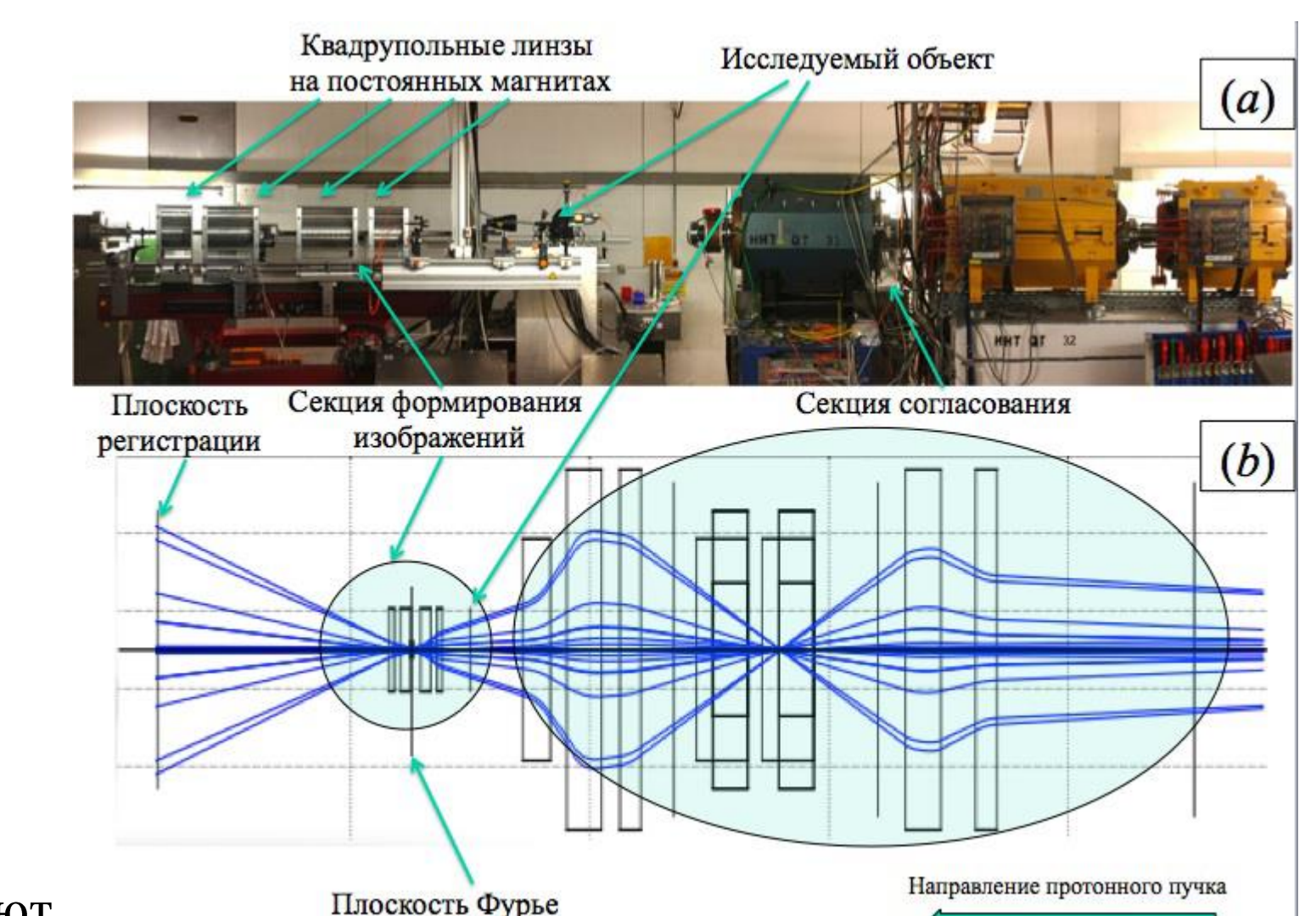
Внешний вид протонного микроскопа ПУМА и его ионно-оптическая схема



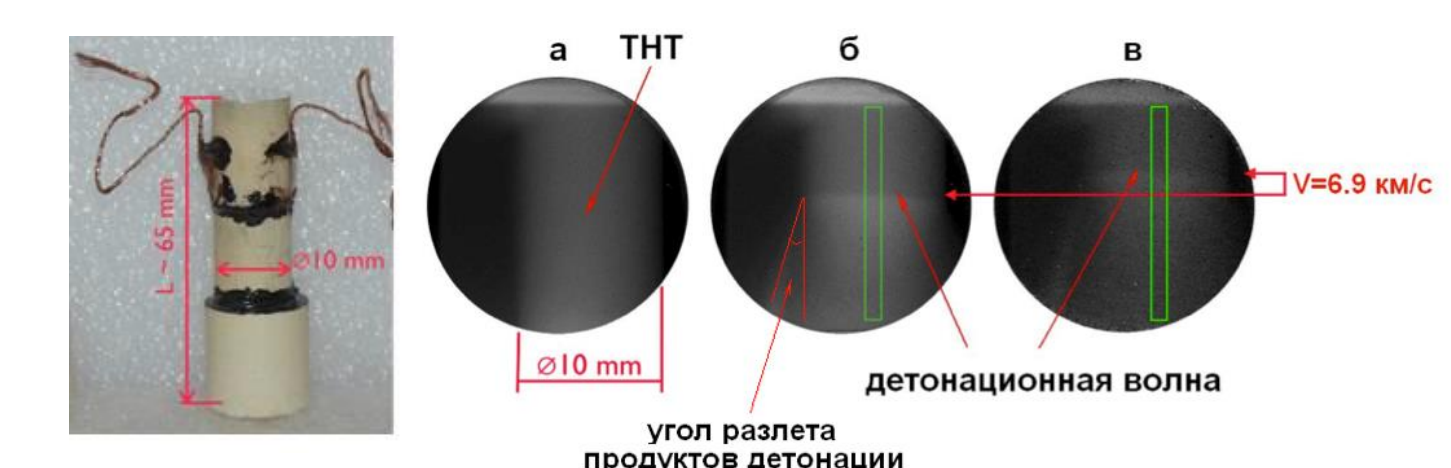
Фотография (слева) и протонно-радиографическое изображение (справа) тестового объекта - часы



Глубинное дозное распределение ионов углерода в воде и результаты анализа хромосомных aberrаций лимфоцитах крови человека



Фотография и ионно-оптическая схема прототипа протонного микроскопа PRIOR в GSI(Германия)



Протонно-радиографическое исследование детонации в заряде тринитротолуола