

**Программа**  
**развития многоцелевого протон-тяжелоионного**  
**ускорительно-накопительного комплекса ИТЭФ-ТВН**  
**на 2010 – 2020 гг.**

**Цель программы** – создание в России современной экспериментальной базы на основе интенсивных пучков тяжелых ионов для получения фундаментальных научных знаний о природе ядерных сил и практического использования высокозарядных ионов с энергиями в диапазоне 100 – 4000 МэВ/нуклон в инновационных технологиях гражданского, оборонного и ядерно-энергетического применения.

Программа ориентирована на развитие уникального, многоцелевого протон-тяжелоионного ускорительного комплекса ИТЭФ-ТВН и проведения на нем работ по следующим направлениям:

- экспериментальные исследования по физике экстремального состояния вещества при импульсном воздействии тяжелоионным пучком с мощностью до 1ТВт/г, развитие новых методов диагностики состояния вещества и быстропротекающих процессов;
- экспериментальное изучение новых состояний сверхплотной барионной материи, разработка и создание экспериментальных установок и тестирования уникальных детекторов для проведения исследований на тяжелоионных ускорителях ИТЭФ-ТВН (Москва), Нуклотрон и НИКА (Дубна), SIS-18 и SIS-100 (Дармштадт);
- экспериментальное исследование радиационно-индуцированных изменений материалов при воздействии пучков тяжелых заряженных частиц;
- изучение влияния тяжелоионного облучения на живые системы в экспериментах по радиобиологии, космической биологии и радиационной генетике;
- исследование воздействия протонов и тяжелых ионов в широком диапазоне энергий на электронное оборудование, используемое в спецтехнике, космических и летальных аппаратах;
- исследования по физике сильноточных пучков заряженных частиц и разработка перспективных ускорительных, пучковых и смежных технологий, развитие и создание нового поколения ускорительных установок для фундаментальных и прикладных исследований;
- развитие ядерной медицины с использованием перспективных технологий протонной и ионной терапии;
- интеграция научной и образовательной деятельности для подготовки специалистов всех уровней (бакалавров (с фундаментальной базовой подготовкой), специалистов, магистров, аспирантов и докторантов), привлечение и закрепление талантливой молодежи в сфере ускорительной техники и физических исследований, возвращение в Российскую Федерацию ведущих российских ученых и специалистов в сфере физических наук, работающих за рубежом;

- интеграция Российской науки в мировую - участие в глобальных научных сетях, развитие международного сотрудничества, организация и проведение совместных экспериментов в рамках кооперации с зарубежными научными центрами.

В результате выполнения Программы в России будут обеспечены стратегические условия для проведения работ на недоступных ранее актуальных направлениях современной ядерной науки, созданы условия для формирования инфраструктуры инновационной системы знаний, для развития технологий на основе экстремальных ядерно-энергетических процессов, для интеграции образовательных программ высшей школы и обеспечения работы молодых ученых и специалистов на отечественных установках мирового класса.

Основой для реализации Программы является уникальная установка ИТЭФ-ТВН – единственный в мире ускорительно-накопительный комплекс, построенный на многократной перезарядной инжекции тяжелых ионов, позволяющей с высокой эффективностью многократно увеличивать плотность частиц в фазовом пространстве. После физического пуска в 2002 г. на ускорительном комплексе достигнуто рекордное увеличение интенсивности накопленного пучка ядер углерода по отношению к инжектируемому в 70 раз, что позволило развернуть методические, физические и прикладные исследования по многим актуальным направлениям современной науки техники и технологии. Кроме режима накопления ионов с энергией до нескольких сотен МэВ/н, ускорительно-накопительный комплекс ИТЭФ-ТВН используется в режимах ускорения протонов в широком диапазоне энергий (до 10 ГэВ), а также ускорения ионов также в широком диапазоне энергий (до 4 ГэВ/н).

### **1. Разработка и продвижение новых технологий генерации, ускорения и накопления тяжелых ионов как основы создания в Российской Федерации условий для систематических исследований фундаментальных свойств и структуры материи.**

Специализированные ионные ускорители средних энергий (100 – 4000 МэВ/н) до определенного времени не строились. Обычная практика состояла в преобразовании протонных синхрофазотронов и синхротронов в ионные. Таким образом, были преобразованы: Бевалак\* (LBL, Беркли, США), Синхрофазотрон ОИЯИ\* (ОИЯИ, Дубна, Россия), AGS (BNL, Нью Йорк, США), CPS (CERN, Женева, Швейцария), Сатурн\* (С.Е.Н., Сакле, Франция), КЕК\* (Цукуба, Япония). За последние десятилетия в связи с получением обширных экспериментальных данных на протонных и электронных ускорителях, а также развитием и обобщением теоретических представлений о структуре материи, интерес к ускоренным тяжелым ионам в мире постоянно увеличивается. В нескольких физических центрах были построены новые ионные

---

\*Выведен из эксплуатации или не используется для ускорения ионов

ускорительно-накопительных комплексы, к которым относятся: UNILAC/SIS18/ESR (GSI, Дармштадт, Германия), Нуклотрон (Дубна, Россия), Celsius (Лаборатория Сведберга, г. Уппсала, Швеция), LEAR/LEIR (CERN), HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator, Chiba, Япония), CRYRING (Manne Siegbahn Institute of Physics, Stockholm, Швеция), TARN II\* (INS, Токио, Япония) и др. В 1999г. вступил в строй крупнейший ионный коллайдер RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider, BNL, Upton, New York, USA) на энергию 100x100 ГэВ/н. В настоящее время разработан проект и начинается реализация ионного комплекса FAIR (GSI, Дармштадт, Германия), разрабатывается проект коллайдера NICA (ОИЯИ, г.Дубна).

Программы физических исследований, выполняемые на разных ускорителях с использованием ускоренных тяжелых ионов в широком диапазоне масс и энергий, охватывают широкий круг исследовательских задач и включают в себя разделы атомной физики, ядерной физики низких, промежуточных и релятивистских энергий, а также физики кварк-глюонного состояния вещества. Прикладное применение ускоренных тяжелых ионов предполагает радиобиологические исследования, ионную терапию, радиационное материаловедение, развитие трековых технологий, ионную литографию и др. В последнее десятилетие получило развитие новое направление применения сильноточного пучка тяжелых ионов – исследования нестационарных физико-химических процессов при экстремальных состояниях вещества. Параллельно с проводимыми исследованиями развиваются технологии генерации, ускорения и накопления тяжелоионных пучков с качественно и количественно новыми свойствами, на основе которых формируется новое представление о постановке экспериментов и прикладных задачах.

Разработка и продвижение новых технологий генерации, ускорения и накопления сильноточных тяжелоионных пучков основывается на существующей и развиваемой в рамках данного проекта технологической базе, включающей:

- уникальную структуру ускорительно-накопительного комплекса ИТЭФ-ТВН, содержащую все необходимые компоненты для комплексных исследований в области сильноточных протонных и тяжелоионных пучков,
- созданную конфигурацию мощного лазерного ионного источника, способного генерировать сильноточные импульсные пучки высокозарядных тяжелых ионов,
- созданную систему многократной перезарядной инжекции тяжелых ионов, ускоренных в бустерном синхротроне, в накопительное кольцо, позволяющую многократно увеличивать интенсивность накопленного пучка.
- созданные системы группировки накопленного пучка и острой фокусировки выведенного пучка на экспериментальную мишень.

Объектами разработки и исследований в рамках данного проекта являются:

- технология получения в лазерном ионном источнике высокозарядных тяжелых ионов с потенциалом ионизации в несколько кэВ и импульсным током в амперном диапазоне значений;

- сильноточный ионный инжектор на энергию до 5-10 МэВ/н, варьируемое отношение заряда к массе ускоряемых частиц и импульсный ток выше 100 мА;
- технология транспортировки тяжелоионных пучков с доминирующим пространственным зарядом и формирования оптимальной для кольцевого ускорителя пространственно-временной структурой пучка;
- широкодиапазонная по частоте ускоряющая система для кольцевого тяжелоионного ускорителя с максимально низким шунтовым импедансом;
- высокоэффективные системы ввода и вывода пучка на основе прецизионных импульсных высоковольтных магнитных отклоняющих устройств;
- физика, техника и технология высокоэффективной многократной перезарядной инжекции ионов с массовым числом до 100 и выше;
- комплексные исследования и оптимизация режимов получения и формирования пучков тяжелых ионов с предельно высокой пространственной, временной и фазовой плотностью для генерации экстремальной плотности энергии в веществе;
- разработка идеологии организации и компьютерного управления многофункциональным ускорительно-накопительным комплексом для кардинального увеличения эффективности его использования.

Обобщающим результатом проводимых исследований и разработок является концептуальное проектирование тяжелоионных комплексов следующего поколения.

## **2. Обеспечение эффективного функционирования и дальнейшее повышение эксплуатационных параметров уникального ускорительно-накопительного комплекса ИТЭФ-ТВН.**

Ускорительно-накопительный комплекс ИТЭФ-ТВН был создан в 1998-2002 гг. в результате реконструкции протонного синхротрона У-10, и включает в себя в настоящее время четыре ускорительные установки: протонный инжектор И-2 (25 МэВ), ионный инжектор И-3 (4 МВ), синхротрон У-10 (34 Тл·м) и бустерный синхротрон УК (9,8 Тл·м), связанный с кольцом У-10 переводным ионопроводом. Кольцо У-10 используется как протонный синхротрон на энергию до 9,3 ГэВ, либо как ионный синхротрон (доускоритель) или накопитель ионов, предварительно ускоренных в кольце УК. В настоящее время освоено ускорение в УК ионов углерода  $^{12}\text{C}^{4+}$  до энергии 400 МэВ/н (с интенсивностью  $2 \times 10^9$  ионов за цикл ускорения), алюминия  $^{27}\text{Al}^{10+}$  (250 МэВ/н,  $10^8$ ), железа  $^{56}\text{Fe}^{16+}$  (230 МэВ/н,  $10^8$ ), серебра  $^{109}\text{Ag}^{19+}$  (100 МэВ/н,  $2 \times 10^7$ ). Инжектированные в кольцо У-10 ядра углерода, алюминия и железа могут дополнительно ускоряться до релятивистских энергий 2-4 МэВ/н либо накапливаться в кольце У-10 с многократным увеличением интенсивности. Комплекс ИТЭФ-ТВН является в настоящее время единственным в России, способным генерировать перечисленные выше пучки ионов.

По состоянию на 2009 г. максимальная мощность накопленного и

сгруппированного в накопителя пучка оценивается величиной  $\sim 100$  МВт. Повышение интенсивности бустерного синхротрона УК позволит поднять мощность до 1 ГВт. Интенсивность УК с инжектором И-3 может быть увеличена за счет увеличения выхода высокозарядных ионов из лазерного ионного источника (в 2-3 раза), улучшения трансмиссии ионопровода И-3/УК (в 1,5-2 раза) и уменьшения потерь частиц при ускорении в УК за счет улучшения вакуума и увеличения темпа ускорения пучка (в 2-3 раза). Следующий порядок повышения мощности до 10 ГВт может быть получен в результате повышения эффективности вывода пучка из УК и перезарядной инжекции, расширения динамической апертуры накопителя У-10 и увеличения коэффициента продольной компрессии пучка. Дальнейшее повышение мощности будет сдерживаться внутривпучковым рассеянием частиц. Превышение мощности 10 ГВт должно быть получено в результате повышения энергии накапливаемых ионов, улучшения вакуума в кольце У-10, повышения частоты циклов накопления с 0,3 Гц до 1 Гц и запуска создаваемого в настоящее время сильноточного инжектора И-4. Тераваттный уровень мощности достигается увеличением темпа накопления до 20 Гц.

В результате выполнения мероприятий программы: ускорительно-накопительный комплекс ИТЭФ-ТВН выйдет на уровень лидирующих в мире установок данного класса по основным параметрам: характеристикам ускоряемых и накапливаемых тяжелых ионов, функциональным возможностям, надежности, эффективности использования; будет проведена модернизация ускорительно-накопительного комплекса для расширения массового состава ускоряемых и накапливаемых ионов до  $A \sim 200$ , повышена интенсивность ускоренного пучка до  $10^{11}$ - $10^{12}$  нуклонов в секунду и достигнута мощность накопленного пучка  $10^{12}$ - $10^{13}$  Вт.

Ниже приводится детализация намеченных направлений модернизации установки.

### **2.1. Повышение интенсивности и массового состава, ускоряемых ионов**

Интенсивность УК с существующим инжектором И-3 может быть увеличена в  $\sim 10$  раз (до  $>10^{11}$  нуклонов за цикл ускорения), массовый состав ускоряемых ионов может быть расширен до  $A \sim 200$ . Для этого необходимо:

- оптимизировать и довести до эксплуатационного состояния схему генерации лазерного излучения в  $\text{CO}_2$  лазере Л100М в режиме усилителя для повышения плотности энергии излучения в лазерном ионном источнике (ЛИИ) на поверхности мишени до  $10^{13}$ - $10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>,

- оптимизировать схему ЛИИ и временную структуру лазерного излучения на поверхности мишени для снижения рекомбинационных процессов и увеличения выхода высокозарядных ионов,

- провести модернизацию вакуумной системы УК для улучшения вакуума с  $10^{-9}$  Торр до  $10^{-11}$ - $10^{-12}$  Торр за счет внедрения дополнительных средств геттерной откачки и замены участков толстостенной вакуумной камеры на тонкостенную с одновременным улучшением вакуумной гигиены.

- модернизировать ионопровод И-3/УК для повышения его пропускной способности при транспортировке сильнооточного пучка за счет увеличения магнитной жесткости,
- модернизировать систему инъекции пучка из линейного ускорителя И-3 в синхротрон УК для улучшения условий согласования эмиттанса инжектируемого пучка с аксептансом ускорителя,
- расширение апертуры вакуумной камеры в 2-х ускоряющих станциях синхротрона УК для увеличения поперечного аксептанса ускорителя,
- улучшить качество существующей ускоряющей системы синхротрона УК за счет увеличения в 3-5 раз амплитуды ускоряющего напряжения.

## **2.2. Повышение эффективности вывода пучка из синхротрона УК и перезарядной инъекции пучка в кольцо У-10**

Эффективность вывода может быть увеличена вдвое (до 100%) за счет уменьшения переднего фронта импульсов ударных магнитов и предварительной группировки пучка перед выводом, а также увеличения стабильности всей схемы перевода. Для этого необходимо:

- модернизировать 7 высоковольтных модулей системы питания выводного ударного магнита («кикера»);
- создать систему «гимнастики» ВЧ ускоряющего поля, включающую в себя независимое прецизионное управление частотой, амплитудой и фазой ускоряющего напряжения ускоряющих станций;

Для повышения эффективности перезарядной инъекции необходимо:

- модернизировать три высоковольтных модуля системы питания кикеров системы однооборотного смещения накапливаемого пучка на перезарядную мишень для сокращения длительности переднего и заднего фронтов генерируемых импульсов,
- модернизировать систему перезарядной мишени с установкой дополнительных мишенных механизмов со сменяемыми мишенными флажками в двух дополнительных азимутальных точках накопителя,
- модернизировать участок вводного/выводного канала в нейтральном полюсе 504 блока,
- улучшить вакуум в кольцевой камере накопителя с  $10^{-8}$  до  $10^{-9}$  Торр в результате замены вакуумной камеры.

## **2.3. Расширение динамической апертуры накопительного кольца У-10**

Динамическая апертура У-10 может быть увеличена в 3-5 раз за счет улучшения коррекции магнитного поля. Для этого необходимо:

- продолжить работу по симметрированию суперпериодической структуры кольцевого магнита (оптимизация размещения дополнительных экранов, коррекция орбиты перемещением магнитных блоков)
- выполнить коррекцию вертикальных отклонений орбиты в накопительном кольце У-10,
- разработать и реализовать схему коррекции хроматичности магнитной структуры У-10,
- улучшить качество системы питания кольцевого магнита накопителя.

## **2.4. Увеличение коэффициента продольной компрессии пучка в накопителе У10 и мощности выведенного пучка**

Продольную компрессию накопленного пучка можно увеличить вдвое (со 150 нс до 70-80 нс) за счет увеличения амплитуды группирующего напряжения. Для этого необходимо:

- модифицировать четыре ускоряющие станции, установленные на кольце У-10 для использования их в режиме группировки, что позволит увеличить амплитуду группирующего напряжения в 4 раза (в настоящее время для группировки используется одна станция);
- у каждой станции должен быть создан двойной комплект управляющей системы для работы в режимах ускорения пучка и группировки;
- реконструировать выводной канал в 504 блоке для расширения апертуры его в направлении вывода.

## **2.5. Повышение энергии накапливаемых ионов**

Энергия накапливаемых ионов может быть повышена с 200-300 МэВ/н до 700 МэВ/н за счет увеличения отношения заряда к массе (до  $Z/A > 0,4$ ) и увеличения импульса (до  $(3,5-4)Z$  ГэВ/с) для ионов, ускоряемых в УК для инжекции в накопитель У-10.

Для этого необходимо:

- увеличивать мощность лазерного луча на поверхности мишени и оптимизировать конфигурацию лазерного источника для повышения потенциала ионизации и уменьшения вероятности рекомбинационных процессов;
- модифицировать системы генерации магнитных циклов УК, питания ударных магнитов системы вывода УМ1 и магнитных элементов переводного ионопровода УК/У-10 для увеличения максимального тока.

## **2.6. Повышение частоты циклов накопления с 0,3 до 1 Гц**

Повышение частоты циклов накопления в 3 раза (до 1 Гц) позволит в 1,5-2 раза увеличить интенсивность накопленного пучка.

Для этого необходимо:

- освоить режим работы лазерного ионного источника с частотой 1 Гц;
- увеличить мощность и теплосъем ряда систем питания инжектора и магнитных элементов переводного канала.

## **2.7. Создание сильноточного инжектора И-4**

Новый инжектор на энергию 7 МэВ/н и ток ускоренного пучка ~100 мА необходим для увеличения интенсивности УК до уровня  $>10^{12}$  нуклонов за цикл ускорения. В настоящее время создается начальная часть этого ускорителя на энергию 1,5 МэВ/н.

## **2.8. Повышение частоты циклов накопления до 20 Гц**

Увеличение темпа накопления пучка реально необходимо для преодоления ограничений по внутривидовому рассеянию частиц и выходу на тераваттный уровень мощности накопленного пучка. Для этого необходимо:

- создать СО<sub>2</sub> лазер и ионный инжектор на частоту 20 Гц,
- заменить всю вакуумную камеру УК на тонкостенную,

- создать новую систему генерации магнитных циклов УК на частоту 20 Гц,
- установить на кольце УК ~20 дополнительных ускоряющих станций с амплитудой ускоряющего напряжения 10 кВ и перестраиваемых по частоте с коэффициентом  $k=15$ ,
- модернизация систем вывода пучка из УК и перевода в У-10 на частоту 20 Гц.

## **2.9. Повышение эффективности использования многоцелевого комплекса ИТЭФ-ТВН**

Многофункциональный комплекс ИТЭФ-ТВН, способный генерировать протонные и ионные пучки разнообразных элементов в широком диапазоне энергий, может использоваться по многим направлениями фундаментальных и прикладных исследований. Эффективность использования комплекса характеризуется объемом выполняемых исследований и определяется ресурсом его ежегодной эксплуатации за вычетом времени на пусконаладочные и ремонтные работы, а также числом параллельно работающих экспериментальных установок и испытательных стендов. Основные ограничивающие факторы повышения объема выполняемых исследований определяются недостаточным числом систем вывода пучка, а также несовершенным методическим обеспечением управляющей системы, не позволяющей быстро выполнять смену режима работы комплекса.

В настоящее время использование возможностей ИТЭФ-ТВН ограничена выводом пучка только из ускорителя-накопителя У-10 по следующим направлениям:

- 1) внутренние мишени в промежутках 203 и 303 транспортируются в большой экспериментальный зал (БЭЗ);
- 2) быстрый вывод пучка с импульсом до 3Z ГэВ/с в экспериментальный зал 120 корпуса;
- 3) быстрый вывод протонного пучка с энергией до 230 МэВ осуществляется в медицинский корпус;
- 4) медленный вывод пучка с импульсом до 2Z ГэВ/с осуществляется в промежутке 202 в 3-градусное направление в БЭЗ.

**Для повышения эффективности использования комплекса необходимо создать:**

- систему медленного вывода пучка с импульсом до 3Z ГэВ/с из синхротрона УК в экспериментальный зал 120 и медицинского корпусов.
- систему медленного вывода пучка с импульсом до 10Z ГэВ/с из 303 промежутка синхротрона У-10 в 3- градусное направление в БЭЗ,
- систему инъекции протонного пучка из линейного ускорителя И-2 в синхротрон УК.

Поскольку энергия пучков, ускоряемых в синхротроне УК перекрывает практически все потребности прикладных исследований, прямой вывод пучка из этого кольца позволит распараллелить работу синхротронов УК и У-10 и за счет этого многократно расширить прикладные исследования, включая

ионную терапию, радиобиологические исследования и испытания радиационной стойкости электронных компонентов для космических применений.

Создание системы инжекции протонного пучка из инжектора И-2 в синхротрон УК позволит ускорять в этом кольце не только ионы, как это делается в настоящее время, - но и протоны, также представляющие интерес для прикладных исследований. В частности, ускорение протонов в УК и их медленный вывод в медицинский корпус позволит перевести на этот пучок протонную терапию, выполняемую в настоящее время на быстром выводе пучка из кольца У-10, что даст возможность существенно расширить объем выполняемых по этому направлению исследований.

Создание системы медленного вывода пучка с импульсом до  $10^2$  ГэВ/с из 303 промежутка синхротрона У-10 в существующие каналы транспортировки пучка в БЭЗ существенно расширит экспериментальные возможности комплекса по направлению адронной физики и релятивистской ядерной физики. В частности, создание такой системы позволит генерировать и сепарировать в существующей магнитооптической структуре интенсивные пучки радиоактивных ядер, представляющих интерес для фундаментальных исследований.

### **3. Целевые проекты Программы**

#### **3.1. Расширение массового состава ускоряемых ионов до $A \sim 200$**

В настоящее время в ускорительном комплексе ИТЭФ-ТВН могут ускоряться ионы с массовым числом  $A$  до  $\sim 100$ , и такая возможность была продемонстрирована при ускорении ионов серебра  $Ag^{19+}$  до энергии 100 МэВ/н. Для расширения массового состава ускоряемых ионов до  $A \sim 200$  необходимо:

- оптимизировать и довести до эксплуатационного состояния схему генерации лазерного излучения в  $CO_2$  лазере Л100М в режиме усилителя для увеличения плотности энергии излучения в лазерном ионном источнике (ЛИИ) на поверхности мишени до  $10^{13}$ - $10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> и повышения потенциала ионизации генерируемых ионов до 2-3 кэВ,

- провести модернизацию вакуумной системы УК для улучшения вакуума с  $10^{-9}$  Торр до  $10^{-11}$ - $10^{-12}$  Торр за счет внедрения дополнительных средств геттерной откачки и замены 80м толстостенной вакуумной камеры на тонкостенную с одновременным улучшением вакуумной гигиены.

#### **3.2. Создание системы медленного вывода пучка с импульсом до $3Z$ ГэВ/н из синхротрона УК в экспериментальный корпус 120**

В настоящее время в ускорительном комплексе ИТЭФ-ТВН вывод на экспериментальные установки осуществляется только из кольцевой структуры ускорителя-накопителя У-10. Создание системы медленного вывода пучка из синхротрона УК позволит существенно повысить эффективность использования комплекса ИТЭФ-ТВН, так как энергия пучков, ускоряемых в синхротроне УК перекрывает практически все потребности прикладных исследований. Вывод пучка из синхротрона УК позволит распараллелить работу синхротронов УК и У-10 и за счет этого многократно расширить прикладные исследования, включая ионную терапию, радиобиологические исследования

и испытания радиационной стойкости электронных компонентов для космических применений.

### **3.3. Создание системы инжекции протонного пучка из линейного ускорителя И-2 в синхротрон УК**

Создание системы инжекции протонного пучка из линейного ускорителя И-2 в синхротрон УК позволит ускорять в этом кольце не только ионы, как это делается в настоящее время, - но и протоны до энергий, перекрывающих потребности всех направлений прикладных исследований. В частности, ускорение протонов в УК и их медленный вывод из этого кольца в медицинский корпус позволит вывести на качественно новый уровень протонную терапию, выполняемую в настоящее время на быстром выводе пучка из кольца У-10, что даст возможность существенно расширить объем выполняемых по этому направлению исследований.

### **3.4. Создание системы медленного вывода пучка с импульсом до 10Z ГэВ/с из синхротрона У-10 в БЭЗ**

Создание системы медленного вывода пучка с импульсом до 10Z ГэВ/с из 303 промежутка синхротрона У-10 в существующие каналы транспортировки пучка в БЭЗ существенно расширит экспериментальные возможности комплекса по направлению адронной физики и релятивистской ядерной физики. В частности, создание такой системы позволит генерировать и сепарировать в существующей магнитооптической структуре интенсивные пучки радиоактивных ядер, представляющих интерес для фундаментальных исследований.

### **3.5. Формирования пучка тяжелых ионов с мощностью >0.1ТВт.**

Выполнение данного проекта включает в себя следующие задачи:

- создание сильноточной системы генерации магнитных циклов синхротрона УК с амплитудой тока до 4 кА и частотой 20 Гц;
- замену вакуумной камеры УК по частоту магнитных циклов 20 Гц, циклов;
- модернизацию системы вывода УК и перезарядной инжекции пучка в У-10 для увеличения импульса инжектируемого в накопительное кольцо пучка до 4Z ГэВ/с и частоту циклов 20 Гц;
- увеличение амплитуды ускоряющего напряжения УК до 200 кВ на оборот, разработка и создание 20-ти дополнительных ускоряющих станций;
- создание нового ионного инжектора с током пучка >100 мА на энергию 20-30 МВ и частоту циклов до 20 Гц;
- разработку и создание резонатора для группировки пучка с амплитудой группирующего напряжения 100 кВ;
- создание фокусирующего канала сильноточного пучка тяжелых ионов с пятном фокусировки  $<10^{-3}$  см<sup>2</sup>.

### **3.6. Создание установки ТВН-2 для накопления тяжелых ионов с $A>200$ на мощность пучка до 10 ТВт.**

Создание установки ТВН-2 на основе физических и технологических исследований, выполненных при реализации проектов 3.1-3.5 включает в себя следующие этапы:

- разработку и создание сильноточного ионного источника с потенциалом ионизации основной зарядовой компоненты до 5 кэВ;
- разработку проекта накопительного кольца на энергию накопленного пучка 250 кДж;
- создание комплекса из двух сверхпроводящих накопительных колец на суммарную энергию в четырех пучках до 1 МДж;
- создание системы продольной компрессии, вывода и формирования импульса пучка длительностью  $< 50$  нс;
- создание системы формирования встречных пучков с пятном фокусировки с плотностью энергии до  $> 1000$  ТВт/см<sup>2</sup>.

#### **4. Экспериментальные исследования по физике экстремального состояния вещества при импульсном воздействии тяжелоионным пучком с мощностью до 100ГВт, развитие новых методов диагностики состояния вещества и быстропротекающих процессов;**

Интенсивный пучок тяжелых ионов с энергией  $E \sim 100$  МэВ/А позволяет при взаимодействии с веществом обеспечивать быстрое выделение энергии в объеме, ограниченном пятном фокусировки и длиной пробега ионов в исследуемом веществе. Современные и строящиеся мощные ускорители тяжелых ионов обеспечивают интенсивность пучка  $10^{11} - 10^{13}$  частиц за импульс при длительности импульса 50 – 250 нсек. При фокусировке подобного пучка ионов на мишень возникает вещество с плотностью близкой к плотности твердого тела и с температурой  $\geq 1000^\circ\text{К}$ . Короткое время выделения энергии (меньшее, чем время гидродинамического разлета) обеспечивает режим изохорического нагрева. Таким образом, интенсивный ионный пучок является уникальным инструментом для генерации вещества с экстремальными параметрами.

В 2002 г. в ГНЦ ИТЭФ состоялся запуск тяжелоионного ускорительно-накопительного комплекса – ТераВаттного Накопителя (проект ИТЭФ-ТВН). При этом осуществлен физический пуск установки, который доказал работоспособность принципиальной схемы, а также всех ее ключевых элементов и систем. Новая установка способна накапливать тяжелые ионы с энергией несколько сотен МэВ на нуклон с последующей компрессией во времени накопленного пучка для проведения экспериментов по физике высокой плотности энергии в веществе. При выходе на планируемые параметры планируется проведение теоретических и экспериментальных исследований фундаментальных свойств вещества с высокой концентрацией энергии (ВВКЭ) и изучение процессов определяющих взаимодействие интенсивных ионных пучков с веществом в различных агрегатных состояниях.

Существующие экспериментальные методики не обеспечивают необходимую точность измеряемых параметров, многие из параметров недоступны

для измерений из-за малой величины пространственного и временного разрешения методик. Совершенно уникальные возможности исследования фундаментальных свойств вещества предоставляет метод протонной радиографии. Протонная радиография превосходит существующие рентгенографические методы исследований, обладая высоким пространственным и временным разрешением, большой просвечивающей способностью, большим динамическим диапазоном регистрации изображений. Кроме того, имеется возможность многокадровой регистрации динамических процессов, которая позволяет проследить эволюцию исследуемых характеристик состояния вещества. В середине 2005 г. впервые в России на ускорительно-накопительном комплексе ТВН-ИТЭФ методом протонной радиографии с использованием системы построения изображения на основе магнитных квадрупольных линз, была получена экспериментальная информация о линейной плотности сложных статических объектов с пространственным разрешением порядка 500 мкм. Результаты, проведенных экспериментов, показали работоспособность выбранной схемы, однако для улучшения пространственного разрешения необходимо использование ГэВ энергий протонного пучка, что влечет за собой создание новой магнитооптической схемы протонографической установки. Одной из целей предлагаемого проекта разработка и создание экспериментальной установки по протонной радиографии с энергией протонного пучка 9 ГэВ для проведения исследований по ФВПЭ, которая позволит выйти на субмикронное разрешение. Проведение исследований фундаментальных динамических характеристик материи и параметров газодинамических течений в экстремальных условиях ударно-волнового нагружения на созданной экспериментальной установке.

Для решения задач концентрации энергии пучка для получения высокой плотности энергии при цилиндрической геометрии мишени планируется оптимизация работы плазменной линзы с целью формирования полых, трубчатых пучков с использованием нелинейных фокусирующих полей плазменной линзы.

## **5. Исследование сверхплотной барионной материи** состоит из пяти направлений:

### **5.5. Исследование холодной сверхплотной ядерной материи в ядроядерных столкновениях на установке ФЛИНТ.**

Уникальное сочетание наличия в ИТЭФ кадров, участвовавших в открытии и исследовании кумулятивного эффекта и в разработке проектов *ALICE(CERN)* и *CBM(GSI)*, нацеленных на поиск и изучение кварк-глюонной плазмы, а также возможностей ускорительного комплекса ТВН по ускорению ионов до энергий несколько ГэВ/нуклон, позволило сформировать полностью оригинальный подход к исследованию новых состояний вещества и приступить к его практической реализации на установке ФЛИНТ в ИТЭФ.

Суть подхода состоит в том, чтобы используя проявляющиеся в кумулятивных процессах виртуальные локальные многобарионные флуктуации получить, в результате их взаимодействия, холодную сверхплотную и относительно долгоживущую ядерную материю в масштабах, достаточных для проверки ее предсказываемых теорией необычных свойств.

В установке ФЛИНТ, первая очередь которой состоит из электромагнитных калориметров, успешно прошла первый этап испытаний методика отбора редчайших взаимодействий релятивистских ионов друг с другом (на уровне одной миллиардной доли от вероятности обычных взаимодействий), позволяющая получать обогащенный образец событий, в которых доля изучаемых процессов повышена на несколько порядков величины по сравнению с небогащенным образцом. Экспериментальное обнаружение холодной сверхплотной материи в обогащенном образце событий и проверка предсказаний теории относительно ряда ее необычных свойств является конечной целью проекта. Детальное изучение свойств сверхплотной материи, полученной этим методом, предполагается провести на создаваемой установке *CBM(GSI)* и планируемой установке *MPD(NICA)*

Программой предусмотрена всесторонняя апробация предложенного в ИТЭФ метода получения в лабораторных условиях холодной сверхплотной материи. В рамках проекта должны быть достигнуты плотности в несколько десятков раз превышающие стандартную ядерную плотность в объеме порядка кубического фемтометра. Программой предусмотрена экспериментальная проверка предсказаний теории об образовании новых состояний вещества в этой области фазовой диаграммы. Для этого требуется создать и ввести в эксплуатацию ряд новых элементов (нейтронный детектор, систему мониторинга) в действующую установку ФЛИНТ, а также продолжить модернизацию существующих элементов (супермодулей электромагнитного калориметра, системы ВЕТО, светодиодной системы). Эти работы включают в себя развитие электроники и программных комплексов, обслуживающих установку ФЛИНТ.

В результате завершения этих работ на установке ФЛИНТ будут получены уникальные по качеству и объему экспериментальные данные и получены следующие результаты:

- Будет создана современная экспериментальная установка для изучения ион-ионных взаимодействий при энергиях ускорительных комплексов *TBN, SIS-100, NICA*, включающая в себя уникальные компоненты, в частности нейтронный детектор нового типа.
- Будет освоена оригинальная технология обогащения исследуемого образца событий взаимодействиями, приводящими к образованию сверхплотной холодной ядерной материи.
- Будут измерены сечения ядро-ядерных процессов при энергиях несколько ГэВ/нуклон в кинематической области где ожидается доминирование флуктон-флуктонного взаимодействия.

- Будут проведены корреляционные измерения, в которых будет экспериментально определена вероятность образования сверхплотной холодной ядерной материи.
- Будет развита инфраструктура модульной установки ФЛИНТ, элементы которой могут быть использованы на ускорителях *SIS-100*, *NICA*.
- Работы на установке ФЛИНТ позволят повысить до мирового уровень подготовки группы студентов в условиях современного актуального эксперимента.

Особенно следует подчеркнуть глубокую и многоплановую интеграцию эксперимента с созданием ускорителя SIS-100 в *GSI* (Дармштадт) и планируемым проектом *NICA* в *ОИЯИ* (Дубна). По мере введения в строй запланированных комплексов *СВМ(SIS-100)*, *Nuclotron-M*, *MPD(NICA)* ряд экспериментов предложенной программы планируется проводить в Дармштадте и(или) Дубне.

#### **5.6. Создание электромагнитного калориметра, разработка программного обеспечения для триггера первого уровня и инженерная разработка конструкции трекера для детектора СВМ.**

Экспериментальное изучение нового состояния вещества – кварк-глюонной плазмы возможно через систематическое изучение лептонных распадов векторных мезонов и спектра прямых фотонов, образованных на ранних стадиях ядерной реакции, странных частиц, содержащих более чем один странный кварк, мезонов, содержащие очарованные кварки ( $D$ ,  $J/\psi$ ), коллективных потоков всех наблюдаемых частиц, флуктуаций в рождении различных частиц от события к событию. Большинство из перечисленных задач невозможно решить без калориметрической системы. Главной целью предлагаемого проекта является разработка и создание калориметрической системы для физических задач установки СВМ. Размеры будущей калориметрической системы ( $120 \text{ м}^2$ ) определяются угловой апертурой установки СВМ. Физические задачи и бюджетные ограничения проекта диктуют выбор предпочтительной технологии «шашлык». Калориметрические модули представляют собой слоистую структуру, в которой плотный поглотитель чередуется с пластинами органического сцинтиллятора, а сбор света осуществляется спектросмещающими волокнами. Надежная регистрация и идентификация сравнительно низкоэнергетичных продуктов ион-ионных взаимодействий требует хорошего энергетического разрешения, достижимого с тонкими ( $0.5 \text{ мм}$ ) пластинами поглотителя. В то же время необходимо учесть чрезвычайно высокую частоту ( $10^7$  событий в секунду) взаимодействий ионного пучка с мишенью и большую множественность ( $1500$  частиц на одно взаимодействие) вторичных частиц. Такие экспериментальные условия требуют высокой granularity калориметрической системы и минимального поперечного размера электромагнитных (и адронных) ливней в рабочем веществе калориметра для возможности восстановления энергии нескольких соседних частиц. Уменьшение поперечных размеров ливней возможно при использовании тонких ( $1.0 - 1.5 \text{ мм}$ ) пластин сцинтиллятора. Технология производства таких пластин была разработана недавно в ИТЭФ, но экспериментальные испыта-

ния продемонстрировали существенно возросшую неоднородность светосбора, ведущую к ухудшению энергетического разрешения. В настоящий момент нами разработано несколько предложений по улучшению однородности отклика в тонких сцинтилляционных пластинах, ведется подготовка к производству новых пластин и их испытаниям. Для идентификации фотонов и электронов предполагается использовать предливневый детектор, смонтированный непосредственно перед калориметрической секцией и объединённый с ней в единый модуль. Чувствительным элементом детектора также является сцинтилляционная пластина с волоконным съёмом светового сигнала. Для считывания сигнала предлагается использовать лавинные гейгеровские фотодиоды (MRS APD). Для более надежного выделения адронного сигнала (и возможной идентификации мюонов) предполагается изучить возможность разделения калориметрической секцией на два продольных сегмента с независимым съёмом светового сигнала.

Установка CBM планирует набор данных в течение 7-10 лет с пучками разных ионов (от протонов до золота) и на разных энергиях. Для обеспечения стабильности работы калориметрической системы и постоянного контроля уровня радиационного повреждения прибора необходима разработка специальной мониторинговой системы.

Опыт создания предыдущих больших калориметрических систем (HERA-B, LHCb) показал необходимость тщательного контроля качества всех компонентов на стадии массового производства. Поэтому мы планируем разработку и создания комплекса контрольно-измерительных стендов для проверки сцинтилляционных пластин, счетчиков предливневого детектора, элементов мониторинговой и высоковольтных систем и собранных модулей калориметра.

Все вышеперечисленные работы требуют проведения большого объёма компьютерных вычислений. Ещё большие требования предъявляют задачи физического анализа накопленных экспериментальных данных. На сегодняшний день имеющиеся в ИТЭФ вычислительные мощности обеспечивают не более 5% наших потребностей. Поэтому абсолютно необходимо существенное развитие вычислительного центра ИТЭФ с привлечением всех известных технологий: применение суперкомпьютеров, распределённые вычисления в среде GRID и наконец адаптация программ моделирования и анализа к аппаратным возможностям современных графических ускорителей (GPU), позволяющим существенно ускорять расчёты.

#### **5.7. Исследование свойств векторных мезонов в ядерной среде на детекторе ХАДЕС на комплексе SIS-18/100 (GSI) в Дармштадте, Германия.**

Основной целью исследований на установке ХАДЕС - диэлектронный спектрометр, является изучение свойств адронов в ядерной среде при различных значениях плотности и температуры. Эта цель может быть достигнута при исследованиях на ускорителе SIS18, проводимых в настоящее время, и при больших энергиях пучков адронов и ионов вплоть до 10 АГэВ, которые могут быть получены на ускорителе SIS-100. Спектрометр ХАДЕС создан с

использованием самых современных технологий и снабжен высокоэффективным и точным оборудованием. Высокая индукция магнитного поля и высокое разрешение минидрейфовых камер определяют высокое импульсное ( $\sim 0.8\%$ ) и массовое ( $\sim 10\%$ ) разрешение спектрометра..

Использование времяпролетной системы с высоким разрешением ( $\sim 120$  псек) позволяет надежно идентифицировать вторичные частицы. Отличительной особенностью установки ХАДЕС является ее способность регистрировать электрон-позитронные пары (прибор (RICH) в широком телесном угле. Это позволяет изучать распады адронов на электрон-позитронные пары, не испытывающие сильных взаимодействий в ядерной среде.

Переход установки ХАДЕС для работы на ускорителе SIS-100 потребует существенной ее модернизации:

1. проведение расчетов по определению аксептанса узлов установки ХАДЕС на пучках ускорителя FAIR вплоть до энергии 10 АГэВ. Для этой цели будут использованы UrQMD и статистическая тепловая модель, а также программа GEANT. Основное внимание будет уделено расчетам прохождения вторичных частиц через все узлы установки с использованием модернизированной программы GEANT.

2. Участие в изготовлении электромагнитного калориметра.

В то время, как для энергий ускорителя SIS18 данные по рождению нейтральных мезонов и гамма-квантов экспериментально получены на спектрометре TAPS, в области энергий ускорителя SIS-100 таких данных нет. Для регистрации нейтральных мезонов и гамма-квантов установкой ХАДЕС при ее работе на ускорителе SIS-100 планируется замена существующего Pre-Shower детектора на электромагнитный калориметр. В качестве калориметра, площадь которого составляет  $\sim 8$  кв.м., планируется использовать систему типа «ШАШЛЫК».

Предварительные расчеты показывают, что для получения хороших разрешения по энергии порядка  $2\%/\sqrt{E}$  (ГэВ) и геометрической точности, гранулярность калориметра должна быть высокой (площадь ячейки  $4 \times 4$  кв.см., число слоев порядка 300, толщина свинца 1 мм, сцинтиллятора – 0,5 мм). Для изготовления калориметра потребуется выполнение точных расчетов, проведение испытания элементов, конструкторские разработки, изготовление механических конструкций для согласования с существующими узлами установки, изготовление прототипа калориметра и его тестирование, изготовление рабочих блоков. Также необходима разработка систем on-line и off-line контроля и калибровки всего калориметра. Оснащение установки ХАДЕС электромагнитным калориметром существенно расширит круг задач, которые могут быть.

**5.8. Разработка детектора нейтронов и время-пролетного детектора для установки MPD, создаваемой в рамках проекта NICA в ОИЯИ (Дубна).**

Создание детекторов по идентификации частиц методом времени пролета (TOF) в настоящий момент является одной из наиболее бурно развивающихся методик в ядерной физике и физике высоких энергий.

Принципиальный вопрос о достижении временного разрешения  $\sim 100$  пс и эффективности регистрации Минимально Ионизирующих Частиц на уровне 100% для газонаполненных детекторов был решен в 90-х в ходе проведения работ по разработке системы TOF для эксперимента ALICE. Были созданы и запущены как малые (детектор HARP) и так и крупные (детектор ALICE) системы на основе этой методики. Однако, все эти системы имеют малую загрузочную способность и невысокую радиационную стойкость, т.к. основным материалом детекторов является коммерческое полупроводящее стекло.

Группа ИТЭФ в ходе проведения работ по созданию системы TOF для эксперимента ALICE особое внимание уделяла радиационной стойкости и загрузочной способности детекторов. Ей был предложен, испытан и запатентован совместно с фирмой ЦПТА (номер Российского патента №2148283) вариант детектора (ДРПК) на основе радиационно стойких материалов (промышленная керамика, карбид кремния) обеспечивающий высокую загрузочную способность и радиационную стойкость.

С началом работ по созданию новых детекторов на строящемся ускорителе SIS-100 и детектора MVD на ускорителе NICA задача создания систем аналогичных системе ALICE TOF, но, работающих при большей загрузке стала вновь актуальной. За прошедшие годы так и не было получено промышленно выпускаемое стекло с сопротивлением менее  $10^{13}$  Ом\*см. Выпускались лишь экспериментальные образцы, при работе с которым группе ИТЭФ совместно с коллегами из ИЯИ и ИФВЭ удалось протестировать камеру (сопротивлением стекла  $10^{10}$  Ом\*см), работающую до загрузок в  $10$  кГц/см<sup>2</sup>. Однако камера имела высокий собственный счет и особенности во временном спектре, так называемые «хвосты». Попытки наладить массовое производство такого стекла как в России, так и за рубежом окончились неудачей.

Исходя из текущей ситуации, представляется, что единственным кандидатом на использование в детекторах является ДРПК. Кроме того, опыт сборки детектора ALICE TOF показал, что более низкая стоимость стеклянных камер компенсируется более высокими трудозатратами по сравнению с промышленно производимыми керамическими камерами и стоимости опций практически сравниваются.

Конкретной задачей, является создание прототипа время-пролетного идентификатора частиц (TOF), способного работать в условиях сильного магнитного поля при загрузке более  $5$  кГц/см<sup>2</sup> с временным разрешением порядка лучше  $100$  пикосекунд и эффективностью близкой к 100% и обладать высокой радиационной стойкостью. Данная задача невыполнима для широко используемого в настоящее время в качестве электродов коммерческого полупроводящего стекла. Предполагается переход от объемного к поверхностному сопротивлению и использование радиационно стойких материалов.

Система будет реализована на основе одиночных камер, размещаемых на печатной плате специальной конструкции совместно с электроникой считывания. В качестве предусилителя будет использован радиационно стойкий усилитель, вся остальная электроника будет размещена на концах платы в зоне пониженного облучения. Это, наряду со стойкостью камер, должно обеспечить работоспособность при высоких дозах облучения активной области детектора.

Работа будет заключаться в дальнейшей оптимизации параметров ДРПК. Производство тестовых керамических электродов, с нанесением различных величин сопротивления в пределах от  $10^9$  до  $10^{11}$  Ом на единицу поверхности. Затем, проведение пучковых испытаний камер с различной резистивностью для определения величины сопротивления оптимальной с точки зрения нагрузочной способности процента стримерных импульсов и дополнительная оптимизация газовой смеси при работе в условиях низкого сопротивления электродов с целью минимизации процента стримерных импульсов (оптимизация процента электроотрицательной добавки, подбор второго квенчера при использовании фреона  $C_2H_2F_4$  как основного газа).

На втором этапе работ планируется сборка полномасштабного модуля-прототипа и разработка электроники считывания.

Следует отметить, что понимание тупиковости дальнейших работ со стеклянными электродами, уже осознается рядом групп, и группа из Россендорфа (Германия) приступила к разработке радиационной стойкой керамики с низкой объемной резистивностью и получила первые результаты близкие к результатам ДРПК, что требует немедленного начала работ по данной тематике. В противном случае приоритет России в этом направлении будет потерян, несмотря на большой опыт и имеющийся задел.

## **6. Организация научно-образовательного процесса по фундаментальным и прикладным исследованиям с использованием пучков тяжелых ионов.**

Одной из основных ролей, которые должен играть ускорительно-накопительный комплекс - это быть инкубатором для учёных всех дисциплин, включая физиков, химиков, материаловедов и инженеров. Работая в творческой атмосфере, они смогут извлечь для себя большую пользу от общения с исследователями мирового класса. У студентов будет возможность работать во всех областях исследования, участвуя в разработке установки и проведения экспериментах, продолжит и расширит существующие в ИТЭФ зимние школы обучения студентов, работающих с исследовательскими группами.

В рамках развития работ на тяжелоионных ускорителях ИТЭФ ТВН, SIS-18 и в дальнейшем на ускорителях SIS-100 и NICA, чрезвычайно актуально, не только обеспечить интеграцию систем и решений российских участников в общую схему установок и физических исследований международных коллабораций, но и сформировать в российском научном центре разно-

плановую, многофункциональную творческую среду и комплекс соответствующего оборудования для членов научного сообщества и приглашенных ученых, проводящие экспериментальные и теоретические исследования. Для этого представляется необходимым развивать в предлагаемом проекте не только научно-техническую, но и организационную и образовательную компоненты:

- организовывать курсы лекций, симпозиумы, технические совещания и семинары по проблемам связанным с технической и методической базой экспериментов и реализацией физических исследований;
- осуществлять адресную поддержку лучших студентов, аспирантов и молодых кандидатов наук, принимающих активное участие;
- проводить интеграцию научной и образовательной деятельности для подготовки специалистов с высшим образованием всех уровней (бакалавров (с фундаментальной базовой подготовкой), специалистов, магистров, аспирантов и докторантов) и выполнения научных исследований и разработок мирового класса;