

Из результатов, полученных учёными и специалистами ИЯИ РАН за последние годы, и важнейших достижений прошлых лет можно отметить следующие:

Сильные и электрослабые взаимодействия.

Созданы мощные методы квантовой теории поля, основанные на теории возмущений. Это позволило выполнить целый ряд рекордных по точности вычислений разнообразных физических величин в теории сильных взаимодействий квантовой хромодинамике и в теории электрослабых взаимодействий. Созданные методы широко применяются как в физике частиц, так и в физике конденсированного состояния.

Разработан метод конечноэнергетических правил сумм в квантовой хромодинамике, на основе которого исследованы свойства лёгких адронов и В-мезонов, распады тау-лептона, другие процессы.

В квантовой хромодинамике установлены связи между характеристиками глубоко-неупругого лептон-нуклонного рассеяния и электрон-позитронной аннигиляции в адроны. Исследованы проявления конформной симметрии и эффекты нарушения этой симметрии, ряд из которых подтверждается экспериментальными данными.

Получены ограничения на массы тяжёлых фермионов и бозона Хиггса, вытекающие из требования стабильности хиггсовского вакуума. Сейчас эти и подобные ограничения широко используются для анализа допустимых областей пространства параметров как Стандартной модели, так и её расширений.

В международном эксперименте на детекторном комплексе Компактный мюонный соленоид на Большом адронном коллайдере (с участием ИЯИ РАН в международной коллаборации CMS) надёжно подтверждено существование бозона Хиггса – новой элементарной частицы, завершающей построение Стандартной модели элементарных частиц (2013).

По результатам эксперимента на CMS при полной энергии 8 ТэВ, группа ИЯИ РАН в коллаборации с университетом г. Миннесота (США) получила лучшие на сегодняшний день ограничения на возможную массу правого W-бозона и тяжёлого майорановского нейтрино – новых частиц, существование которых предсказывается теоретическими моделями (2013).

В LHCb коллаборация, с участием учёных ИЯИ РАН, в спектре распадов частиц были обнаружены структуры, состав которых может быть объяснён только минимальным набором из пяти кварков, это так называемый очарованный пентакварк, предсказуемый в рамках кварковой модели (2015).

Получены аналитические значения ранее неизвестных 4-х-петлевых массовых вкладов квантовой электродинамики в аномальные магнитные моменты электрона и мюона. Вычислено 5-петлевое, рекордное, аналитическое выражение для ренормгрупповой бета-функции в квантовой электродинамике (2012).

Вычислены параметры смешивания нейтральных Bs мезонов. Показано, что вклады мягких очарованных кварков в дифференциальные сечения распадов B мезонов и угловые симметрии представляет источник основной теоретической неопределённости и их

аккуратное вычисление позволяет существенно ограничить существование возможной физики вне рамок Стандартной Модели. Разработан новый метод, позволяющий количественно учесть эффекты квантовой хромодинамики с высокой степенью точности (2011).

Нейтрино.

Создана теория взаимопревращений нейтрино различных типов в веществе (эффект Михеева-Смирнова-Вольфеиштейна). Эта теория сыграла ключевую роль в открытии осцилляций солнечных нейтрино. Она служит основой как интерпретации результатов целого ряда выполненных экспериментов, так и планирования будущих исследований нейтринных осцилляций.

Получен строгий, модельно-независимый верхний предел на потоки космических нейтрино сверхвысоких энергий. Этот предел справедлив и для таких источников нейтрино, как топологические дефекты, сверхтяжёлая тёмная материя и др.

Показано, что взаимодействия нейтрино, испускаемых коллапсирующим ядром звезды, с веществом её оболочки вносит существенный вклад в формирование химического и изотопного состава выбрасываемого вещества. При этом нашли решение проблемы обойденных изотопов и ряда изотопов лёгких элементов. Предложенный механизм нейтринного нуклеосинтеза вошёл неотъемлемой составной частью в современную теорию происхождения химических элементов (совместно с ИПМ РАН).

Расширения Стандартной модели физики частиц.

Предложены методы поиска на Большом адронном коллайдере новых частиц и явлений в различных расширениях Стандартной модели: суперсимметричных моделях с нарушением лептонных чисел; моделях с неуниверсальными массами суперпартнёров; теориях с тяжёлыми стерильными нейтрино и др. Результаты имеют важное значение с точки зрения расширения спектра исследований на Большом адронном коллайдере.

Проанализирована феноменология нейтральных бесспиновых частиц-сголдстино, имеющих в суперсимметричных моделях. Определены направления поиска сголдстино в широком классе экспериментов - от астрономических наблюдений и лабораторных опытов до распадов мезонов и исследований на Большом адронном коллайдере.

В моделях с калибровочным механизмом нарушения суперсимметрии выяснены общие свойства смешивания полей, приводящий к процессам с нарушением ароматов. Показано, что поиск таких процессов (в частности, несохранения лептонных чисел) является наиболее адекватным подходом для данного класса моделей.

Выяснено, что топологические свойства вакуума калибровочных теорий в определённых условиях могут приводить к сильным физическим эффектам. В частности, показано, что во взаимодействиях с участием магнитных монополей происходит интенсивное несохранение барионного числа (монопольный катализ распада протона); продемонстрирована нестабильность сверхплотной холодной фермионной среды в Р-нечётных теориях.

В контексте теорий с дополнительными измерениями пространства предложена конструкция "мира на бране", которая стала популярным подходом к расширению Стандартной модели. Обоснована возможность процессов, связанных с исчезновением частиц с браны, предложены пути поиска таких процессов. В связи с ускоренным расширением Вселенной выдвинута гипотеза о возможности инфракрасной модификации гравитации за счёт перехода гравитона с браны в объемлющее пространство.

Предложена модель с дополнительными измерениями, в которой три фермионных поколения Стандартной модели возникают из одного шестимерного пропоколения. В ее рамках предложен механизм генерации майорановских масс нейтрино. Исследованы феноменологические следствия модели, даны предсказания для экспериментов.

Введено представление о скрученной (warped) геометрии дополнительных измерений. Эта конструкция сегодня активно используется в теоретических построениях, особенно в сочетании с идеей мира на бране и в контексте adS/CFT -соответствия.

Из анализа данных астрономических наблюдений квазара через гравитационную линзу - отсутствие дисперсии по частотам в отклонении фотона в гравитационном поле,- получено новое ограничение сверху на массу фотона - менее $4.1 \cdot 10^{-42}$ грамм на 95% уровне достоверности в межгалактическом масштабе, что важно, поскольку в ряде теоретических моделей масса фотона может быть разной в разных местах Вселенной (2013).

В различных моделях при решении СР-проблемы в рамках Квантовой хромодинамики возникает голдстоуновский бозон – аксион, который может рождаться в результате снятия возбуждения ядра $Kr-83$, присутствующего в Солнце. Эксперимент основан на использовании образца криптона (содержащего изотоп $Kr-83$) в качестве мишени для аксионов, летящих от Солнца, и в тоже время рабочей среды большого пропорционального счётчика. Завершён первый этап измерений с образцом, обогащённым по изотопу $Kr-83$ до 58%. За время измерений 188 суток получен лучший в мире предел на массу адронного аксиона на уровне 100 эВ на 95% уровне достоверности (2015).

Коллаборации LHCb и CMS, с участием учёных ИЯИ РАН, на основе совместного анализа данных 2011 - 2012 гг. опубликовали результаты по первому в мире наблюдению распада $Bs^0 \rightarrow \mu\mu$ и по первому в мире измерению вероятности распада $B^0 \rightarrow \mu\mu$, которые являются особенно чувствительными к теориям расширения Стандартной модели (СМ). Полученные результаты являются самыми точными в мире, статистически не противоречат предсказаниям СМ и позволяют ограничить возможные параметры расширения СМ (2015).

В коллаборации LHCb с участием учёных ИЯИ РАН закончен анализ данных 2011-2012 гг. и получено прецизионное, наиболее точное значение для угла смешивания u и b кварков, которое хорошо согласуется с условием унитарности матрицы смешивания (2015).

Горячая Вселенная.

Предложен реалистический механизм генерации барионной асимметрии Вселенной, основанный на теориях Большого объединения.

Выяснено, что электрослабые процессы с нарушением барионного и лептонных чисел, обусловленные топологическими свойствами вакуума, происходят с большой вероятностью при высоких температурах. Продемонстрирована возможность генерации наблюдаемой барионной асимметрии в процессе электрослабого фазового перехода.

Развит метод анализа динамики вакуумных оболочек в общей теории относительности. Этот метод широко используется для исследования фазовых переходов во Вселенной, физики чёрных дыр и космологии многомерных моделей.

Тёмная материя и тёмная энергия.

Теоретически показано наличие мелкомасштабной кластеризации тёмной материи и потоков в фазовом пространстве. Разработана модель мелкомасштабного распределения тёмной материи в Галактике. Найдены условия, при которых аннигиляция частиц тёмной материи в мелкомасштабных сгустках может приводить, к генерации гамма-излучения, доступного для регистрации современными космическими телескопами.

Предложен способ не прямых поисков стерильных нейтрино как части тёмной материи, на основе которого были получены лучшие ограничения на параметры стерильных нейтрино с использованием данных орбитальных рентгеновских телескопов.

На основе анализа фазовой плотности определена область параметров суперсимметричных моделей с лёгкими гравитино, составляющими тёплую тёмную материю. Показано, что такая возможность будет проверена на Большом адронном коллайдере.

Предложена непротиворечивая модель тёмной энергии с промежуточной фантомной стадией эволюции Вселенной. Модель предсказывает зависимость гравитационной постоянной от времени и наличие длинноволновой тахионной неустойчивости. Изучено влияние последней на анизотропию реликтового излучения, найдены ограничения на параметры тахионного дисперсионного соотношения (совместно с ГАИШ МГУ).

В ЦЕРНе проведён первый сеанс эксперимента P348 по поиску лёгкой тёмной материи, основанного на теоретических и экспериментальных работах сотрудников ИЯИ РАН. Разработка и создание детектора были осуществлены в основном силами российских институтов ИЯИ, ИФВЭ и ОИЯИ в сотрудничестве с научными центрами из Германии, Греции, Швейцарии и Чили. P348 является одним из наиболее конкурентоспособных экспериментов по поиску скрытого сектора, обладающим также значительным потенциалом открытия новых частиц, связанных с $g-2$ аномалией магнитного момента мюона, редкими распадами нейтральных каонов, и другими распадами и реакциями адронов и лептонов (2015).

Инфляция и постинфляционный разогрев.

Предложен подход к поиску гравитационных волн, рождённых при инфляции, по их влиянию на анизотропию реликтового излучения. Вычислена квадрупольная компонента анизотропии, поставлено ограничение на масштаб инфляции. Этот подход успешно используется и сегодня (совместно с ГАИШ МГУ).

Решена задача описания интенсивного рождения материи и разогрева после инфляции. Выявлен ряд эффектов, возможных на этой стадии: генерация барионной асимметрии; генерация гравитационных волн; рождение гравитино; нетепловые фазовые переходы, в результате которых могут образовываться топологические дефекты.

Показано, что рождение сверхтяжёлых частиц за счёт гравитационного механизма в пост-инфляционную эпоху обеспечивает концентрацию этих частиц, необходимую для того, чтобы они являлись кандидатами на роль тёмной материи. Такие частицы могут быть источниками космических лучей сверхвысоких энергий.

В рамках многомерных моделей продемонстрировано, что нарушение Лоренц-инвариантности при высоких энергиях может иметь значительное влияние на первичные возмущения, генерируемые на стадии инфляции («транспланковская проблема»).

Предложен механизм генерации первичных неоднородностей во Вселенной, альтернативный инфляционному и согласующийся с имеющимися наблюдательными данными. Выявлены наблюдаемые следствия, специфические для этого механизма.

Показано, что для механизмов генерации космологических неоднородностей плотности энергии, использующих конформную инвариантность, которая могла иметь место в самой ранней Вселенной, характерны статистическая анизотропия случайного поля первичной неоднородности. Это позволит на основе будущих наблюдений отличить конформные механизмы от других моделей типа модели космической инфляции (2011).

Разработан метод оценки параметров модели ранней Вселенной на основании статистической анизотропии наблюдаемой карты температур реликтового микроволнового излучения. На основании данных семи лет наблюдения спутника WMAP, получено ограничение на параметр самодействия скалярного поля в космологическом сценарии с конформным скатыванием. (2012).

Физика космических лучей.

Разработана модель происхождения и распространения космических лучей сверхвысоких энергий. Наряду с обрезанием спектра (эффект Грейзена-Зацепина-Кузьмина) предсказан провал при энергиях 10^{18} - $4 \cdot 10^{19}$ эВ и накопление перед областью обрезания. Эти особенности подтверждены экспериментально; они свидетельствуют о протонном составе космических лучей. Калибровка детекторов по особенностям в спектре позволила согласовать данные о спектре, полученные всеми существующими экспериментами.

Подтверждено существование обрезания Грейзена-Зацепина-Кузьмина в спектре космических лучей сверхвысоких энергий по данным установки Telescope Array (2011).

Уточнены условия, при которых астрофизический источник способен ускорять заряженные частицы до сверхвысоких энергий, вплоть до ГЗК-обрезания. На основе анализа экспериментальных данных отобраны классы

объектов- кандидатов на роль таких источников. Обоснована гипотеза о том, что мощным источником является Сен А.

Построена модель популяции неодинаковых астрофизических источников космических лучей сверхвысоких энергий, впервые удовлетворяющая как условиям на процесс ускорения частиц в источнике, так и ограничениям на плотность числа источников из отсутствия наблюдаемых кластеров событий. (2012).

Расчитаны температурные коэффициенты дифференциальных потоков мюонов космических лучей, приходящих на уровень моря по вертикальному и горизонтальному направлениям с энергиями 100 - $3 \cdot 10^6$ ГэВ: как источник генерации мюонов в атмосфере рассмотрены распады пионов, каонов и чармированных частиц согласно данных о генерации этих частиц, полученных в экспериментах на ускорителях, и согласно результатам расчётов по моделям квантовой хромодинамики там, где такие данные отсутствуют. Измерение и сравнение с теорией позволит измерить температуру на больших высотах в атмосфере под разными углами при помощи мюонных спектрометров (2011).

Проведён поиск гамма-излучения высоких энергий, связанного с 581 известными гамма-всплесками, находящимися в поле зрения спутника Fermi LAT. При сравнении с ожидаемым фоном числа фотонов с энергией выше 100 МэВ и выше 1 ГэВ, пришедших за первые 1500 секунд с момента регистрации всплеска из той же пространственной области, обнаружено высокоэнергичное излучение от 19 всплесков, четыре из которых наблюдаются в данном энергетическом диапазоне впервые (2011).

Математическая физика.

Открыты новые классы нелинейных интегрируемых систем, свойства которых имеют аналоги в теории сильных взаимодействий и гравитации. Разработаны мощные теоретико-групповые методы исследования таких систем.

Разработан квазиклассический метод описания процессов динамического туннелирования в квантовых системах со многими степенями свободы и теории поля. Предсказано новое явление - туннелирование на вершину барьера. Метод применен, в частности, для анализа инстантонных процессов в столкновениях частиц высоких энергий.

Теория атомного ядра

Разработаны полевые методы микроскопической теории ядра, позволившие объяснить основные свойства ядер (энергия связи, насыщение ядерных сил, ширины «дырочных» состояний) и ядерных реакций.

При исследовании глубоконеупругого рассеяния лептонов на ядрах впервые последовательно объяснены современные экспериментальные данные и установлена связь между традиционными ядерными характеристиками и кварк-глюонной структурой ядер.

Создан метод исследования одноквазичастичных и одноквазидырочных силовых функций в ядрах, имеющих сильные коллективные колебательные состояния – обобщённый метод связанных каналов, позволяющий значительно лучше описывать соответствующие экспериментальные данные, чем существующие модели (совместно с МИФИ).

Предложен и теоретически обоснован новый метод исследования структуры лёгких радиоактивных гало-ядер при помощи кулоновской диссоциации этих ядер, каналированных в кристаллических мишенях с большим атомным номером.

Разработаны и успешно применены универсальные аналитические методы расчёта процессов дифракционного взаимодействия антипротонов, обычных и слабосвязанных ядер с ядрами. Усовершенствована дифракционная теория реакций со слабосвязанными ядрами.

Методами, основанными на уравнениях, аналогичных уравнениям квантовой теории поля, было исследовано прохождение нейтронов очень низких энергий ($\sim 10^{-4}$ эВ) через неоднородные среды. Установлена связь между основными характеристиками взаимодействия таких нейтронов с веществом с корреляционными функциями неоднородностей.

Открытие связанных состояний киральных солитонов (скирмионов) позволило описывать методами эффективной теории поля ряд свойств ядер, в первую очередь энергии связи обычных ядер, а также гиперядер. Ядра или барионные системы с определёнными квантовыми числами в рамках этого подхода возникают как SU(2) или SU(3)-квантованные связанные скирмионы. Предсказан распад ядра ^{18}B , подтверждённый экспериментально.

Рассчитан спектр возбуждений лёгких гиперядер со странностью -1 и барионными числами 2 и, частично, 3 в рамках киральной солитонной модели. Ряд таких состояний может быть интерпретирован как глубоко связанные состояния антикаонов и ядер (2011).

На основе разработанной модели проведён анализ полученных коллаборацией ANKE в рамках совместного российско-германского эксперимента данных по выходу фи-мезонов при энергии первичных протонов 2.83 ГэВ. Впервые извлечены зависимости от импульсов полной ширины фи-мезонов в ядерной среде, а также эффективного сечения фи-N взаимодействия в изученном диапазоне импульсов (2011).

Физика нейтрино и нейтринная астрофизика

На многоканальной подземной установке Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп реализован метод определения направления движения частиц по измерению времени пролёта и измерен вертикальный поток мюонов из нижней полусферы, рождённых под установкой атмосферными нейтрино, получено наиболее сильное для своего времени ограничение на параметры нейтринных осцилляций (1980).

Выдвинуто предложение по изучению природного диффузного потока электронных антинейтрино малых энергий как метода получения экспериментальной информации о плотности вещества во Вселенной, заключенного в нейтронных звёздах и чёрных дырах (1980)

Предложена идея эксперимента по измерению массы электронного антинейтрино в бета-распаде трития при помощи электростатического спектрометра с магнитной адиабатической коллимацией. Такой спектрометр позволял измерять энергию электронов с разрешением в несколько электронвольт за счёт того, что измеряется не непосредственно энергия электронов, а «запирающее» напряжение на электроде (1983г., совместно с ИАЭ им.И.В.Курчатова). Идея реализована в эксперименте Троицк-ню-масс и в Германии – эксперимент в Майнце и проект

KATRIN.

Выполнен эксперимент Троицк-ню-масс по прямому измерению массы нейтрино в бета-распаде трития и получено рекордно низкое ограничение на массу электронного антинейтрино: 2.05 эВ (1994 – 2004). Обработка данных этого эксперимента позволила получить также лучшее в мире ограничение на примесь тяжёлой («стерильной») компоненты к электронному нейтрино в диапазоне масс от 2 до 100 электрон-вольт (2013).

После модернизации установки Троицк-ню-масс было показано, что разрешение спектрометра улучшилось в 3 раза и получены более точные данные для спектра потерь энергии электронов, положения пика возбуждения, ионизации, а также их ширины (2011).

На Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе и одновременно на двух подземных черенковских детекторах KAMIOKANDE II (Япония, США) и IMB (США) был зарегистрирован всплеск нейтринного излучения от вспышки Сверхновой SN1987A в Большом Магеллановом Облаке. Основные параметры зарегистрированного события подтвердили, что общепринятая модель сферически-симметричного гравитационного коллапса вполне удовлетворительно описывает основные черты этого явления. Вместе с тем, регистрация на подземном сцинтилляционном российско-итальянском детекторе LSD (Италия) событий, на 5 часов предшествовавших основной вспышке, может говорить о более сложном характере этого явления и ставит перед теорией вопросы, решение которых, скорее всего, будет возможно лишь при повторном наблюдении подобного события в нашей Галактике. (1987)

В работах по исследованию эффекта двойного бета-распада в подземных низкофоновых лабораториях Баксанской нейтринной обсерватории установлены лучшие для своего времени ограничения на периоды полураспада изотопов ^{76}Ge ; ^{136}Xe ; ^{150}Nd относительно различных каналов 2β -распада. Обнаружен ($2\beta 2\nu$)-распад изотопа ^{100}Mo (1990).

На подземном Галлий-германиевом нейтринном телескопе Баксанской нейтринной обсерватории в российско-американском эксперименте SAGE в период с 1990 года по 2010 год выполнены прецизионные измерения скорости захвата солнечных нейтрино на металлическом галлии. Результаты этих измерений, в совокупности с результатами ряда других экспериментов с солнечными нейтрино, дали однозначное доказательство термоядерной природы энергии Солнца и привели к обнаружению взаимопревращений (осцилляций) нейтрино различных типов. Экспериментальное обнаружение эффекта нейтринных осцилляций и, как следствие, наличия у нейтрино отличной от нуля массы стало одним из наиболее ярких достижений современного естествознания последних лет.

На Галлий-германиевом нейтринном телескопе БНО выполнены два калибровочных эксперимента (1995, 2004) с искусственными источниками нейтрино очень высокой активности ~ 0.5 МКи. Измеренное в этих экспериментах, а также в двух экспериментах коллаборации GALLEX в лаборатории Гран-Сассо (Италия), средневзвешенное отношение измеренной скорости захвата нейтрино к ожидаемой на галлии оказалось несколько ниже единицы $R = 0.87 \pm 0.05$. Этот результат не нашел на сегодня удовлетворительного объяснения, что послужило основанием для предложения эксперимента с искусственными источниками нейтрино на Галлий-германиевом нейтринном телескопе с целью исследования осцилляций электронных

нейтрино на очень коротких расстояниях.

В международной коллаборации Double Chooz, куда входят 7 стран, включая Россию, представленную ИЯИ РАН и Курчатовским институтом, были измерены с высокой точностью фоны детектора в результате большого периода остановки сразу двух реакторов, что позволило существенно уменьшить систематическую погрешность. Получено значение угла смешивания нейтрино, которое описывает превращение электронного нейтрино в таонное: $0.109 \pm 0.030(\text{stat}) \pm 0.025(\text{syst})$. Ненулевое значение этого угла означает асимметрию нейтрино-антинейтрино, что позволяет объяснить отсутствие антиматерии в нашем мире (2012).

Исследован природный поток внеатмосферных нейтрино в области энергий свыше 10ТэВ посредством восстановления параметров ливней, генерируемых нейтрино высоких энергий в рабочем объёме Байкальского глубоководного нейтринного телескопа. Получено одно из двух (второе - в эксперименте АМАНДА на Южном полюсе) наиболее сильных экспериментальных ограничений на интенсивность природного диффузного потока нейтрино всех типов в диапазоне энергий от $2 \cdot 10^4\text{ ГэВ}$ до $2 \cdot 10^7\text{ ГэВ}$. (2008, совместно с ОИЯИ, НИИЯФ МГУ, НИИПФ ИГУ, DESY-Zeuthen)

Осуществлён монтаж и запуск на оз.Байкал в режиме постоянного набора данных кластера из восьми гирлянд оптических модулей, представляющего собой базовый структурный элемент создаваемого глубоководного нейтринного телескопа NT1000 (Baikal-GVD) кубокилометрового масштаба. При работе в автономном режиме эффективный объём кластера составляет 0.04 км^3 для событий от нейтрино с энергией порядка 100 ТэВ , что позволяет рассматривать его как одного из трёх крупнейших в мире действующих нейтринных телескопов в области высоких и сверхвысоких энергий и позволяет начать на нём поиск событий от астрофизических нейтрино, зарегистрированных впервые в эксперименте на детекторе IceCube (2015).

Долговременная стабильная работа Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа на протяжении свыше 30 лет, совместно с данными установок LSD и LVD, созданных в Италии в рамках международных коллабораций, позволили установить наиболее сильное на сегодняшний день экспериментальное ограничение (менее 1 события в 14 лет на 90% доверительном уровне) на частоту гравитационных коллапсов звёзд в нашей Галактике (2009).

По данным работы нейтринных телескопов «Коллапс» Артемовской научной станции и российско-итальянских установок LVD и LSD (Гран Сассо, Италия) в течение 35 лет получено самое сильное экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике: менее 1 события за 15.2 года на 90% уровне достоверности (2012).

С целью улучшения разделения типов нейтрино, регистрируемых при гравитационных коллапсах звёзд проведён эксперимент, в котором показано, что добавление поваренной соли в качестве дополнительной мишени более чем на 6% увеличивает число регистрируемых взаимодействий электронных нейтрино в детекторе LVD (2011).

На статистике 2-х миллионов мюонных событий с помощью детектора LVD (Италия) получены характеристики мюонных групп на глубине 3300 м.в.э. (метров водного эквивалента) и измерено среднее число нейтронов на мюон,

генерируемых одиночными мюонами, мюонными группами и ливнями: 4.1 в 1г/кв.м весовой толщины сцинтиллятора (2011).

Поиск новых частиц и редких процессов

На Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе в эксперименте по исследованию стабильности протона был получен один из лучших для своего времени в мире предел 10^{30} лет для времени жизни протона относительно безнейтринных каналов распада. (1981)

На основе данных нейтринной обсерватории в Сэдбери (SNO) по стабильности дейтерия получено ограничение на время осцилляции нейтрон-антинейтрон в вакууме: больше $1.8 \cdot 10^8$ сек, что вдвое превышает ограничение, полученное в эксперименте с нейтронами от реактора в Гренобле, но меньше результата, полученного из данных по стабильности кислорода в Super-Kamiokande (2011)

В эксперименте GERDA, с участием учёных ИЯИ РАН, измерен с высокой точностью период двухнейтринного бета полураспада ^{76}Ge : $(1.926 \pm 0.095) \cdot 10^{21}$ лет. Получен верхний предел для двухнейтринного двойного бета распада этого изотопа на три возбуждённых уровня: $3.7 \cdot 10^{23}$ лет. Полученный предел превосходит более чем в 100 раз известные из аналогичных экспериментов значения (2015).

В эксперименте по поиску 2К-захвата в ^{78}Kr , в низкофоновой подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН, при сравнении спектра фона низкофонового пропорционального счётчика, заполненного криптоном с различной степенью обогащения изотопом ^{78}Kr , обнаружен избыток событий, который может быть интерпретирован как 2К-захват в ^{78}Kr (с излучением или без излучения нейтрино) с периодом полураспада $(1.4 + 2.2 - 0.7) \cdot 10^{22}$ лет на 90% уровне достоверности (2015).

В аналогичном эксперименте с изотопом ^{136}Xe обнаружен двухнейтринный двойной бета-распад изотопа ^{136}Xe с периодом полураспада $(5.5 + 4.6 - 1.7) \cdot 10^{21}$ лет (2011).

На Байкальском глубоководном нейтринном телескопе и на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе в экспериментах по поиску тяжёлых магнитных монополей получены взаимодополняющие и одни из наиболее сильных ограничений на интенсивность природного потока этих частиц во всем диапазоне их возможных скоростей (1985 – 2008, байкальские результаты - совместно с ОИЯИ, НИИЯФ МГУ, НИИПФ ИГУ, DESY-Zeuthen).

В экспериментах на Байкальском глубоководном нейтринном телескопе и на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе по измеренным потокам нейтрино высоких энергий, приходящих в направлении от центра Земли и от Солнца, получены одни из лучших в мире ограничений на величину эффекта, ожидаемого от аннигиляции массивных частиц тёмной материи, аккумулированных в этих объектах (1996 – 2010, байкальские результаты - совместно с ОИЯИ, НИИЯФ МГУ, НИИПФ ИГУ, DESY-Zeuthen).

Из анализа данных по поиску нейтрино высоких энергий от аннигиляции тёмной материи в Солнце, за 30 лет наблюдений на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе, сотрудниками ИЯИ РАН получено лучшее в

мире ограничение на вероятность рассеяния реликтовых частиц тёмной материи на нуклонах (2013).

Физика космических лучей

Предложен новый метод регистрации ШАЛ сверхвысоких энергий по их черенковскому излучению, отраженному от заснеженной поверхности земли (1972).

Из анализа многостольных ливней оценено сечение генерации струй с большим поперечным импульсом в pp-взаимодействиях при энергии в системе центра масс порядка 500 GeV и показано его соответствие предсказаниям квантовой хромодинамики (1981) на год раньше аналогичного результата коллабораций UA1 и UA2 в ЦЕРНе.

При исследовании взаимодействий космических лучей сверхвысоких энергий в высокогорных и стратосферных экспериментах с рентген-эмульсионными камерами обнаружено появление нетривиальных азимутальных корреляций - компланарной множественной генерации наиболее энергичных вторичных частиц, которая не находит объяснения в рамках стандартных моделей (совместно с ФИАН, НИИЯФ МГУ, коллаборацией Памир).

Выполнено теоретические исследования процессов электромагнитного и фотоядерного взаимодействий мюонов высоких и сверхвысоких энергий с ядрами, результаты которых широко используются мировым сообществом при расчётах прохождения мюонов через плотные среды и при анализе экспериментальных данных больших современных подземных и глубоководных детекторов нейтрино и мюонов (1981).

Анизотропия галактических космических лучей измерена тремя независимыми установками (БПСТ, Ковер и Андырчи) в диапазоне энергий от 1 ТэВ до 100 ТэВ (1980-2000). Разработан метод определения истинной анизотропии космических лучей с энергией выше 10 ТэВ, основанный на анализе нулевой и первой гармоник измеренной интенсивности в звёздном времени и показано, что вектор звёздной анизотропии космических лучей лежит в галактической плоскости (2007).

Открыты и исследованы вариации вторичных космических лучей во время гроз и сопутствующие им эффекты - от генерации элементарных частиц грозowymi облаками до геомагнитных пульсаций. Разработан и изготовлен универсальный всепогодный прибор для измерения электрического поля атмосферы и электрического тока дождя (2000-2010).

Разработан специализированный сцинтилляционный детектор тепловых нейтронов большой площади на основе неорганического сцинтиллятора $\text{ZnS} + {}^6\text{Li}$ для применения в экспериментах по физике космических лучей (новый метод исследования ШАЛ) и геофизике (2001). С его помощью обнаружено новое геофизическое явление: радон-нейтронные приливные волны (2009).

На подземных детекторах мюонов и нейтрино АСД (Украина), LSD и LVD (обе в Италии) исследована кривая поглощения мюонов до глубины 20 км водного эквивалента и детально изучен нейтронный фон до глубин 6 км в.э. Измерены годовые вариации природных потоков мюонов с энергией выше 1.3 ТэВ и нейтронов.

Из анализа каскадов, генерированных в результате глубоко неупругого взаимодействия мюонов на больших глубинах и регистрируемых подземными детекторами мюонов и нейтрино получено полное сечение гамма-адронных взаимодействий в большом диапазоне энергий (1974-2006).

На основе анализа содержания мюонов в широких атмосферных ливнях по данным Якутской установки ШАЛ получены наиболее сильные на сегодняшний день ограничения на поток космических фотонов и долю фотонов в космических лучах при энергиях выше 10^{18} эВ (2009г., совместно с ИКФИА СО РАН)

Каонная физика.

В исследованиях каонных распадов на установке ИСТРА, созданной сотрудниками ИЯИ РАН, ИФВЭ и ОИЯИ, был получен ряд результатов мирового уровня. Впервые с высокой степенью надежности измерено отношение аксиальной и векторной частей слабого взаимодействия, получена модельно независимая величина векторной части этого взаимодействия и указано на возможный вклад тензорного члена в матричный элемент электромагнитного распада пиона. В радиационном распаде положительных каонов $K \rightarrow \pi \mu \gamma$ впервые наблюдается интерференция структурного и внутреннего тормозного излучения. Измерены характеристики ряда редких распадов пионов и каонов.

В эксперименте E787/E949 (Сотрудничество ИЯИ РАН - БНЛ, США) обнаружено семь событий являющегося чувствительным тестом Стандартной Модели сверхредкого распада положительного каона на два нейтрино и положительный пион. Измерен матричный элемент смешивания t и d кварков СКМ матрицы. В эксперименте E865 (БНЛ, США с участием ИЯИ РАН) получено наиболее сильное ограничение на нарушение лептонного числа в каонных распадах и наиболее точно измерен матричный элемент смешивания u и s кварков. В эксперименте E246 (Сотрудничество ИЯИ РАН – КЕК, Япония) получены ограничения на нарушающие Т-инвариантность слабые форм факторы радиационных и полулептонных распадов положительных каонов.

Нейтринные ускорительные эксперименты.

В нейтринном эксперименте с длинной базой K2K (Сотрудничество ИЯИ – КЕК, Япония) подтверждён эффект осцилляций мюонных нейтрино, обнаруженный в СуперКамиоканде, как по дефициту зарегистрированных мюонных нейтрино в дальнем детекторе, так и по искажению формы энергетического спектра мюонных нейтрино. Обнаружен эффект подавления когерентного рождения пионов в нейтринных взаимодействиях. В осцилляционном эксперименте с длинной базой T2K (международная коллаборация из 12 стран с участием ИЯИ РАН) ~~в первом физическом сеансе~~ — с использованием off-axis нейтринного пучка с энергией 700 МэВ зарегистрированы ~~первые~~ нейтринные события в дальнем детекторе СуперКамиоканде, находящемся на расстоянии 295 км от источника нейтрино и обнаружено превращение мюонных нейтрино в электронные нейтрино. Результат T2K был первым наблюдением эффекта появления ~~другого аромата~~ нейтрино, отличающегося от аромата нейтрино в начальном пучке (2013).

В эксперименте OPERA (международного эксперимент в Италии с участием учёных ИЯИ РАН) по измерению параметров осцилляций нейтрино в пучке, передаваемом из ЦЕРН на расстояние более 700 км, обнаружено ~~первое~~ пять событий, являющихся кандидатами на прямой переход мюонного нейтрино в тау нейтрино (по данным 2008 – 2012 гг.), что позволяет утверждать об открытии осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ на уровне 5 стандартных отклонений (2015).

Анализ данных международных экспериментов OPERA и ICARUS, полученных с участием ИЯИ РАН, по поиску стерильных нейтрино позволил поставить новые ограничения на параметры осцилляций мюонных нейтрино в стерильные нейтрино (2013).

Решена возникшая проблема с занижением времени прихода нейтрино в эксперименте с использованием нейтринного пучка ЦЕРН - Гран Сассо: показано, что измеренная скорость нейтрино на установке OPERA по данным 2009 - 2011 годов совпадает со скоростью света с относительной точностью лучше 3.5×10^{-6} на 99% уровне достоверности (2012).

В международном эксперименте NOvA (Фермилаб, США) с участием учёных ИЯИ РАН были получены первые результаты, связанные с исследованием эффектов осцилляций в пучках мюонных нейтрино на расстоянии 810 км. В отсутствие осцилляций нейтрино экспериментаторы ожидали зарегистрировать в дальнем детекторе 201 мюонное нейтрино. Реально было зарегистрировано только 33 события от взаимодействия этих нейтрино. Это является неоспоримым доказательством, что мюонные нейтрино исчезли из пучка из-за осцилляционных переходов в тау и электронные нейтрино. Аналогично, если бы мюонные нейтрино не осциллировали в электронные нейтрино, то в дальнем детекторе ожидалось бы зарегистрировать только одно взаимодействие электронного нейтрино. На самом деле было зарегистрировано шесть таких событий, что подтверждает превращение части мюонных нейтрино в электронные нейтрино. Наличие в Фермилабе самого интенсивного в мире пучка нейтрино, а также то, что только этот эксперимент способен, при некоторых условиях, измерить иерархию масс нейтрино, предоставляет эксперименту NOvA конкурентные преимущества. (2015).

В эксперименте NOMAD (международный эксперимент с участием ИЯИ РАН) в глубоконеупругих нейтринных взаимодействиях впервые наблюдается образование псевдоскалярного резонанса, f_0 -мезона, а также окончательно установлено образование тензорного мезона f_2 . Получено ограничение на параметры осцилляций для разности квадратов масс $> 10 \text{ эВ}^2$.

Релятивистская ядерная физика

На созданной сотрудниками Института многоцелевой установке КАСПИЙ на пучке синхрофазотрона ОИЯИ в конце 80-х – начале 90-х годов выполнены пионерские исследования рождения положительных и отрицательных пионов и каонов и впервые в мире измерения рождения антипротонов при столкновении релятивистских ядер углерода с ядерными мишенями. Обнаружено большое, почти на два порядка, превышение отношения выхода антипротонов к пионам по сравнению с протон ядерным взаимодействием. Для объяснения этого эффекта разработана модель ядерного скейлинга.

В середине 90-х годов выполнен первый полномасштабный эксперимент по исследованию энергетической зависимости рождения пионов на ядрах на протонном пучке Московской мезонной фабрики в диапазоне энергий 330-400 МэВ. Получено подтверждение наличия резонансно-подобной аномалии в зависимости от энергии протонов при энергии 350 МэВ с узкой шириной около 10 МэВ, что может свидетельствовать о значительном изменении свойств дельта изобары в ядерном веществе.

В Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) в рамках эксперимента NA50 впервые получены результаты об аномальном подавлении рождения состояний

чармония при столкновении ядер свинца на ускорителе SPS. Получен большой набор данных по распределению выхода чармония в зависимости от центральности и поперечного импульса. Экспериментальные данные могут быть интерпретированы, как следствие образования кварк-глюонной плазмы при сильном нагреве и сжатии ядерного вещества.

В рамках коллаборации ALICE на протонном пучке большого адронного коллайдера получены первые физические результаты по распределению выхода адронов по быстрой, множественности и поперечному импульсу и двухпионным корреляциям при энергиях 0.9-7 ТэВ в системе центра масс. Наблюдается существенное отличие от экспериментальных данных при максимальной энергии от существующих теоретических оценок. Измерено отношение выхода антипротонов к протонам и показано, что оно стремится к единице с увеличением энергии. С использованием созданной в Институте программы RELDIS разработана методика измерения светимости при столкновении ионных пучков Большого адронного коллайдера по выходу нейтронов при ультрапериферических столкновениях. Для модернизации установки создан прототип черенковского детектора на основе аэрогеля и лавинных фотонных детекторов для идентификации типа частиц.

Сотрудниками ИЯИ РАН в международной коллаборации ALICE на встречных пучках ускорителя LHC CERN впервые получены новые экспериментальные данные по эмиссии нейтронов ядрами индия с энергией 158 А ГэВ в ультрапериферических взаимодействиях с ядрами Al, Cu, Sn и Pb. Полученные данные раскрывают электромагнитную природу процесса. Получено хорошее согласие экспериментальных данных с предсказаниями модели RELDIS, разработанной в ИЯИ РАН. Эти данные могут быть использованы на LHC для оценки светимости коллайдера и потерь в нём. Возможна экстраполяция данных на более высокие энергии (2013).

Получены новые экспериментальные данные на установке ALICE Большого адронного коллайдера (LHC CERN) с использованием уникальных возможностей триггерного и стартового детектора T0, созданного с определяющим вкладом ИЯИ РАН. С помощью времяпролётно-метода измерены спектры идентификационных адронов в pp, p-Pb и PbPb столкновениях (2012).

В комплексе детекторов установки ALICE важную роль играет созданный в ИЯИ РАН стартовый времяпролётный и триггерный детектор T0, который обеспечивает проведение измерений множественности рождённых частиц, мониторингирование и определение светимости, измерение времени пролёта рождённых частиц, диагностику пучка. Детектор имеет рекордное временное разрешение около 25-30 пикосекунд и позволяет идентифицировать пионы, каоны и протоны при значениях поперечного импульса от 0.5 до 2.5 ГэВ/с (2011).

Учёными ИЯИ РАН в эксперименте LHCb впервые измерена вероятность распада $B_s \rightarrow \mu\mu$. Полученное значение подтверждает Стандартную модель элементарных частиц. Измерен угол смешивания СКМ-матрицы, используя распады $B^\pm \rightarrow DK^\pm$; установлен верхний предел на вероятность распада $K_s \rightarrow \mu^+\mu^-$, который в 30 раз меньше предыдущего (2012).

Для исследования коллективных эффектов и ненуклонных степеней свободы в ядрах и переходных процессах в сжатой ядерной материи при столкновениях протонов и тяжёлых ионов с ядрами на установке MPD (NICA, Дубна), разработан и изготовлен полномасштабный прототип модуля калориметра и проведены исследования его отклика (энергетическое разрешение и линейность) на пучках пионов и протонов T10 в

ЦЕРНе с импульсами в диапазоне от 1 до 6 ГэВ/с. Показано, что предложенная концепция и конструкция модуля калориметра обеспечивает необходимое энергетическое разрешение калориметра и может быть использована для калориметров ZDC многоцелевой установки MPD для измерения центральности столкновений и угла плоскости реакции (2012).

При обработке данных эксперимента ИСТРА+ в распадах каонов на лету было получено ограничение на параметр смешивания тяжёлого нейтрино в диапазоне масс от 30 до 80 ГэВ/с, которое закрывает предложенное С.Н.Гниненко объяснение аномалии LSND, при помощи введения нестабильного тяжёлого нейтрино. Произведён поиск тяжёлого нейтрино с массой 300 МэВ/с² в каонных распадах. Найден верхний предел матричного элемента для радиационного распада $K^- \rightarrow \mu^- \nu_h$ в указанном диапазоне масс для майорановского и дираковского нейтрино (2012).

На установке NA61 в ЦЕРНе получены данные по выходу адронов в протон-протонных и протон-ядерных столкновениях в широком интервале энергий несколько десятков МэВ. Данные необходимы для ряда исследований космических лучей, моделирования эксперимента T2K в Японии и для сравнения с будущими экспериментальными данными по поиску фазового перехода и критической точки ядерной материи в ядро-ядерных столкновениях.

Разработан и изготовлен супермодуль адронного калориметра для эксперимента NA61, исследующего адрон-ядерные и ядро-ядерные релятивистские столкновения на ускорителе SPS в ЦЕРНе. В этом калориметре в качестве фотоприемников впервые были использованы микропиксельные лавинные фотодиоды с плотностью пикселей порядка 10000 на квадратный миллиметр и размерами чувствительной области 3*3 кв.мм.

Одной из основных задач эксперимента NA61(SHINE) на ускорителе SPS в ЦЕРН является поиск критической точки сильновзаимодействующей ядерной материи и детальное исследование начала деконфаймента (освобождения кварков), при центральных столкновениях различных ядер и энергиях в диапазоне от 13 до 158 ГэВ на нуклон. В 2011г. проведены первые измерения для столкновений ядер бериллия и впервые в этом эксперименте был использован передний адронный калориметр фрагментов, разработанный и изготовленный в ИЯИ РАН, который обеспечивает точное определение числа спектаторов (всех участников взаимодействия), необходимого для исследования флуктуаций вблизи критической точки (2011).

Завершена сборка, установка и физический запуск переднего адронного калориметра фрагментов эксперимента NA61, исследующего рождение адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях на CERN SPS. Адронный калориметр является важнейшей частью установки и играет ключевую роль в программе экспериментов по поиску критической точки фазового перехода из состояния обычной ядерной материи в состояние кварк-глюонной плазмы (2012).

Завершена разработка концепции модульного калориметра компенсационного типа - переднего адронного калориметра для определения центральности взаимодействия и угла плоскости реакции в ядро-ядерных взаимодействиях в эксперименте CBM на ускорительном комплексе FAIR в ЦЕРНе. Каждый модуль калориметра состоит из 60 слоёв свинцовых и сцинтилляционных пластин. Для детектирования света в калориметре используются микропиксельные лавинные фотодиоды с плотностью пикселей 15000 на квадратный миллиметр, что необходимо для обеспечения линейности отклика калориметра в широком динамическом

диапазоне. Разработка данного детектора является пионерской в применении современных технологий в калориметрии (2011).

В 2007 г. группой учёных ИЯИ РАН проведена сборка, тестирование 300 канального сцинтилляционного годоскопа и интегрирование его в установку HADES (GSI Германия). Исследования выходов дилептонов в дейтрон-протонном взаимодействии при энергиях налетающих дейтронов 1.25 ГэВ на нуклон показал значительное (примерно в 4 раза) усиление выхода дилептонов в области эффективных масс 200 - 500 МэВ по сравнению с выходом дилептонов, основанном на предположении о вкладе в данный спектр дилептонов от распада нейтральных пионов и дельта изобары. Обнаруженный эффект, обусловленный, по-видимому, вкладом тормозного излучения в нейтрон-протонных взаимодействиях, позволяет объяснить так называемый «DLS puzzle» в ядро-ядерных взаимодействиях, который характеризуется значительным усилением выходов дилептонов низких масс и не описывается теоретическими моделями.

Завершен анализ данных по образованию электрон-позитронных пар в нейтрон-протонных взаимодействиях по данным эксперимента по исследованию рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и ядерно-ядерных взаимодействиях на установке HADES (GSI, Германия), полученным в 2007 году на пучке дейтронов с энергией 1,25 ГэВ/нуклон, налетающем на протонную мишень. Обнаружена значительная изоспиновая зависимость выхода электрон-позитронных пар для нейтрон-протонных и протон-протонных столкновений. Полученные данные являются реперными для анализа спектров электрон-позитронных пар в ядро-ядерных столкновениях (2011).

Прецизионные данные по фотоядерным реакциям.

В рамках международной коллаборации GRAAL с участием учёных ИЯИ РАН получены новые прецизионные экспериментальные данные по полным сечениям фотопоглощения на нейтроне и анизотропии реакций фоторождения мезонов в области нуклонных резонансов. Результаты указывают на идентичность полных сечений фотопоглощения на протоне и нейтроне в области нуклонных резонансов. Это приводит к уточнению интегральных сечений фотопоглощения ядер, новым данным по оптической анизотропии нейтронов и протонов.

В рамках коллаборации GRAAL с участием учёных ИЯИ РАН исследованы реакции мультифрагментации ядер углерода под действием фотонов с энергией 700 – 1500 МэВ. Впервые получены данные о вероятности вылета нуклонов различной множественности вплоть до полного развала ядра углерода на отдельные нуклоны. Изучены энергетические и угловые распределения образующихся фрагментов. Показано, что экспериментальные данные хорошо согласуются с расчётами в рамках каскадно-испарительной модели RELDIS (2015).

На пучках монохроматических поляризованных фотонов средних энергий (в области нуклонных резонансов) изучена спиновая структура свободных и связанных нуклонов. В совместных экспериментах ИЯИ РАН с коллаборациями ГРААЛЬ (Гренобль) и МАМИ (Майнц) изучены спиновые асимметрии сечений фоторождения мезонов. Экспериментально установлено, что принцип зарядовой инвариантности в процессах фотоядерных взаимодействий нуклонов справедлив не только в асимптотической области энергий, но и в области нуклонных резонансов. Получено полное сечение фотопоглощения на протоне и нейтроне при энергии фотонов от 0.7 до 1.5 ГэВ (2011).

В рамках международной коллаборации A2 (Майнц) с участием учёных ИЯИ

РАН и ФИ РАН впервые измерена зависимость полного сечения фотопоглощения на дейтроне от спиральности фотона в диапазоне энергий 200 - 800 МэВ, на основании которой получены оценки соответствующего вклада в правило сумм Герасимова-Дрелла-Хирна. Изучена динамика распада эта-мезона при энергии пучка 855 и 1500 МэВ и определена величина неравномерности распределения продуктов распада в фазовом пространстве, которая, в частности, вызывается взаимодействием частиц в конечном состоянии. При поиске запрещённого С-инвариантностью канала распада омега-мезона на эта и пи0-мезоны установлен новый верхний предел вероятности его распада, на порядок меньший известного ранее значения.

Предсказаны новые свойства особенностей излучения Вавилова-Черенкова при движении заряженной частицы вдоль оптической оси одноосного положительного диэлектрического кристалла с резонансной анизотропией: в нерелятивистском приближении мощность генерации опережающих потенциалов и мощность излучения под тупым углом к скорости частицы обратно пропорциональны квадрату скорости частицы. Эти величины могут достигать очень больших значений в пределах применимости макроскопического рассмотрения и при достаточно малом поглощении (2011).

В конце 70х годов впервые новым методом ослабления, разработанным в ЛФЯР, на ускорителе С-3 измерены сечения фотопоглощения ядер вплоть до ^{94}Pu в области гигантского дипольного резонанса. Изучены эффекты оптической анизотропии атомных ядер.

Впервые совместно с ИЯФ СО РАН (Новосибирск) проведены фотоядерные исследования на пучке гамма квантов, полученных методом обратного комптоновского рассеяния лазерных фотонов на электронах накопителя. Обнаружено отличие от универсальной зависимости в полных сечениях фотопоглощения ядер-актинидов.

Впервые совместно с Радиевым Институтом и Харьковским Физико-техническим институтом на линейных ускорителях ЛУЭ-100 ИЯИ РАН, ЛУЭ-300 и 2000 ХФТИ измерены сечения деления ядер-актинидов и сечения образования спонтанно делящихся изомеров. Показана доминирующая роль Е1 фотопоглощения в этих процессах и подтверждено согласие с теорией Вайцекера-Вильямса в рамках однофотонного возбуждения ядер реальными и виртуальными фотонами.

Криостат растворения ^3He в ^4He мишени с замороженными спинами.

Был разработан и создан криостат растворения ^3He в ^4He для новой протонно-дейтронной поляризованной мишени с замороженными спинами для эксперимента на пучке поляризованных меченых фотонов ускорителя МАМІ С (Германия). Одной из главных задач экспериментальной программы новой установки является проверка предсказаний правила сумм Герасимова-Дрелла-Хирна при энергиях фотонов до 1.5 ГэВ. Достигнута рабочая температура 0.03 К, поляризация протонов мишени свыше 90%. Параметры мишени являются лучшими в мире для установок этого типа.

В конце 70х годов впервые методом спиновой ядерной ориентации при сверхнизких температурах (ниже 0.1 К) измерена угловая анизотропия альфа-распада. Получены данные о ядерной деформации и структурных свойствах сильно деформированных тяжёлых трансурановых изотопов (Am , Es , Fm).

Компьютерные программы моделирования взаимодействия частиц с веществом.

Создан и развивается транспортный код SHIELD, российский аналог известных программ FLUKA, Geant4, MCNPX, который является оригинальной программой, основанной на отечественных моделях ядерных реакций, созданных в ОИЯИ и ИЯИ РАН. Код SHIELD в течение многих лет с успехом применяется при расчетах взаимодействия адронов и ядер со сложными макроскопическими мишенями в контексте различных актуальных приложений, таких, как адронная терапия в онкологии, изучение радиационных условий в космосе, электроядерный метод в энергетике и др., а также в фундаментальных исследованиях.

Сильноточный линейный ускоритель Московской мезонной фабрики.

Сооружён единственный в России сильноточный линейный ускоритель протонов и отрицательных ионов водорода на энергию 600 МэВ и средний ток 500 микроампер. Достигнута энергия ускоренных протонов 500 МэВ.

С 1993 года по настоящее время проведено более 100 пучковых сеансов. Линейный ускоритель обеспечивает эффективность работы до 95% при среднем токе пучка до 120 мкА. При работе на программу фундаментальных физических исследований обеспечена работа ускорителя на энергии 209 МэВ, как с интенсивным пучком со средним током до 30 мкА, так и в режиме формирования коротких импульсов, около $1\div 2$ мкс. На комплекс протонной терапии работа ведётся с пучком низкой интенсивности, менее 100 нА.

Общая продолжительность сеансов в 2015 году составила более 1600 часов. Нарботка ускорителя по программе получения радиоизотопов составила свыше 80000 мкА·часов при среднем токе пучка до 120 мкА и энергии 143 МэВ. Впервые за весь период эксплуатации ускорителя была достигнута интегральная наработка за 12-часовую смену свыше 1400 мкА·часов. Осуществлена проводка пучка с энергией 209 МэВ интенсивностью до 1 мкА по модернизированным каналам на нейтронный источник ИН-06 и спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце СВЗ-100. Исследована возможность работы в сильноточном режиме на установку РАДЕКС.

Основные усилия по модернизации ускорительного комплекса были направлены на совершенствование каналов транспортировки пучка до ИН-06 и СВЗ-100, а также на перевод мощных модуляторов системы питания начальной части ускорителя на новые генераторные триоды. Достигнута номинальная ВЧ мощность в ускоряющих резонаторах. Проведены успешные испытания модернизированного оборудования в двух сеансах работы ускорителя (2015).

Новая ускоряющая структура.

Разработана и внедрена на линейном ускорителе Московской мезонной фабрики технология изготовления и методика настройки новой ускоряющей структуры на основе шайб и диафрагм. В Институте изготовлены, смонтированы в туннеле и введены в научную эксплуатацию 110 ускоряющих секций.

Гидродинамическая технология изготовления ускоряющих структур.

В Институте разработана и внедрена в Лаборатории DESY новая гидродинамическая технология изготовления сверхпроводящих ускоряющих структур.

Приборы диагностики параметров пучка.

Разработаны и внедрены в ведущих ускорительных центрах мира оригинальные приборы диагностики параметров пучка ускорителя, в частности измерители фазовой длины сгустка, удостоенные престижной международной премии «Кубок Фарадея».

Источники поляризованных протонов.

Разработаны и внедрены лучшие в мире источники пучков поляризованных протонов.

Введён инжектор и канал транспортировки отрицательных ионов водорода.

Принят Рабочей комиссией и введён в эксплуатацию канал отрицательных ионов водорода линейного ускорителя Московской мезонной фабрики ИЯИ РАН, включающий инжектор ионов H^- и ускорительный тракт до энергии 160 МэВ. Отрицательные ионы водорода могут ускоряться одновременно с протонами, что увеличивает возможности использования пучков ускорителя для физических экспериментов, в Комплексе лучевой терапии и Радиоизотопном комплексе.

Участие в международных и зарубежных ускорительных проектах.

Институт активно участвует в различных ускорительных проектах за рубежом (CERN, DESY, ORNL, BNL, LANL, ANL, KEK, J-PARC, TRIUMF и др.), выполнив к настоящему времени более 100 контрактов и договоров.

Магнитно-токовый канал многооборотной инжекции.

В конце 70х годов впервые разработана и осуществлена система многооборотной инжекции в кольцевой ускоритель с использованием связанных бетатронных колебаний и магнитно-токового канала, что позволило увеличить интенсивность пучка циклических электронных ускорителей в несколько раз.

Экспериментальный комплекс Московской мезонной фабрики.

Разработан, сооружен и введен в эксплуатацию Экспериментальный комплекс, включающий в себя уникальную систему параллельной разводки и транспортировки пучков ионов водорода, позволяющую обеспечить одновременную работу нескольких источников нейтронов и экспериментальных установок.

Нейтронные исследования.

В ИЯИ РАН созданы импульсные нейтронные источники тепловых (ИН-06) и эпитепловых нейтронов и ведется оснащение их нейтронографическими установками и спектрометрами для исследований конденсированных сред, наноматериалов и получения нейтронных данных для ядерной физики и энергетики.

Запущен источник нейтронов на основе электронного пучка линейного ускорителя ЛУЭ-8-5, вольфрам-бериллиевой фотонейтронной мишени и замедлителя-формирователя спектра нейтронов. Оригинальная конструкция источника позволяет проводить как облучение образцов во внутренней камере источника, так и работу с выведенными пучками нейтронов (быстрых - 0.5–5 МэВ, тепловых, или промежуточных). Изменение спектра нейтронов достигается изменением конфигурации бериллиевой мишени и в некоторых случаях применением специальных фильтров. В настоящее время начаты работы по нейтроно-активационному анализу при плотности потока $\sim 10^7$ нейтронов на кв.см в сек, что позволяет, например, определять содержание золота в образце с содержанием 1 г на тонну. Планируемая модернизация источника и работа при максимальной мощности электронного пучка позволит в 10-15 раз увеличить плотность потока нейтронов, и соответственно уменьшить минимально-определяемое содержание элементов в образцах (2015).

Сотрудниками ИЯИ РАН разработан сцинтиляционный детектор нейтронов

нового типа на основе ZnS(Ag)/LiF. Благодаря применению новых принципов съёма сигнала, технологичности и дешевизне, данный детектор имеет высокий потенциал применения для создания детекторных систем новых установок и модернизации существующих установок в условиях общемирового дефицита изотопа ^3He . Новый сцинтилляционный детектор и связанные с ним новые подходы и технологии способны обеспечить создание детектирующих систем с высокой эффективностью и большими телесными углами (2012).

Расчётно-теоретическое обоснование конфигураций нейтронных мишеней spallation-типа. Предложена и обоснована мишень с повышенным выходом нейтронов на основе ^{237}Np , который попутно производится в ядерной энергетике и в настоящее время не находит широкого применения. Показано, что в новой мишени выход нейтронов увеличивается в 4 раза по сравнению с мишенью на основе вольфрама. Рассмотрена и обоснована технологическая возможность производства подобной мишени (2012).

Сотрудниками ИЯИ РАН экспериментально обнаружен рекордный коллапс элементарной кристаллической ячейки на основе церия. В валентно-нестабильном интерметаллиде CeNi происходит фазовый переход первого рода с уменьшением объёма на 21%. Работа выполнена методами дифракции нейтронов, дифракции и спектроскопии с использованием синхротронного излучения, техники высокого давления. Определена пространственная группа и структурный тип фазы высокого давления CeNi , что ранее не удавалось сделать научным группам из США, Франции, Германии, России. Выяснение физического механизма фазовых переходов в соединениях на основе церия — объёмного Кондо-коллапса — до сих пор является одной из главных задач в физике сильнокоррелированных электронных систем и одной из важнейших проблем физики конденсированного состояния (2013).

Защитный комплект пожарного.

Разработан и внедрён оригинальный защитный комплект пожарного АЭС. Совместно с ВНИИ пожарной обороны МЧС РФ, ООО НИИ эластомерных материалов и изделий и ОАО «Пожтехсервис» разработан, внедрен в производство и введен в эксплуатацию приказом МЧС (на основании решения Правительства РФ) не имеющий мирового аналога радиационно-защитный комплекс РЗК. Аварийный комплект РЗК для пожарных предназначен для работы в условиях повышенного радиоактивного облучения и агрессивных сред. Работа отмечена Премией за научно-технические разработки МЧС. В решении о присуждении отмечена роль ИЯИ РАН в разработке физических и медицинских основ создания РЗК.

Комплекс лучевой терапии онкологических заболеваний

В Институте на базе ускорителя протонов и экспериментального комплекса Московской мезонной фабрики разработан, создан и частично введён в эксплуатацию уникальный для России лечебно-исследовательский радиологический центр.

Предложен новый метод конформного формирования дозового поля протонной терапии, который позволяет уменьшить лучевые повреждения здоровых тканей при проведении протонной терапии опухолей. Данная технология применима для т.н. пассивного рассеяния при формировании дозового распределения для протонов и ионов. Для разработки и проверки данного метода была использована авторская программа Монте–Карло SRNA (2011).

Получены активированные образцы новых иттербиевых источников для брахитерапии и совместно с ПИЯФ КИ проведены доклинические испытания

источников с использованием культур раковых клеток. Исследования показали высокую радиобиологическую эффективность иттербиевых источников: наблюдалось отложенное по времени разрушение раковых клеток даже для сверхмалых доз от иттербиевых источников (2012).

Было проведено исследование спектра излучения нового источника для высокодозной брахитерапии на основе изотопа иттербия. Облучение нейтронами проводилось на установке РАДЭКС нейтронного комплекса ИЯИ РАН. Анализ спектра показал его соответствие стандартному спектру излучения Yb-169, что говорит о его применимости для радиотерапии (2012).

Создана не имеющая аналогов технология лазерного производства стартового материала источника излучения для брахитерапии на основе изотопа иттербия 168 и изготовления из этого материала сверхплотных керамических сердечников. Данная работа заняла второе призовое место в совместном конкурсе проектов Сколково - Вариан 2013 года, а проект «Центр лучевой терапии и ядерной медицины», включающий созданную технологию производства данного нового источника для брахитерапии, был награждён в 2013 году Золотой медалью 14-го Международного форума «Высокие Технологии XXI века» (2013).

Инновационные разработки в области ядерной медицины.

В Институте наряду с получением радионуклидов для медицины и разработкой Комплекса лучевой терапии выполнен и внедрён ряд других разработок в области ядерной медицины, таких, например, как лазерный перфоратор, технология наркоза и терапии смесями благородных газов с кислородом, цифровой рентгеновский денситометр и др.

Внедрена новая технология получения стронция-82 на ускорителе ИЯИ РАН при пониженной энергии протонов 100 МэВ и со сканированием пучка. Технология включает также выделение стронция-82 из облученных металлических мишеней в ГНЦ РФ-ФЭИ (Обнинск), а также в научно-медицинском центре ARRONAX (Франция), на основе изобретений ИЯИ РАН. Полученный продукт использовался для зарядки генератора рубидия-82 в РНЦ ПХТ (С-Петербург) и ARRONAX с целью ПЭТ-диагностики кардиологических и онкологических заболеваний в России и Европе (2013).

Успешно завершены работы по внедрению в центре ARRONAX (Нант, Франция) разработанной ИЯИ РАН технологии получения стронция-82 с использованием сорбции из облученного металлического рубидия. В рамках проведенных испытаний мишени из металлического рубидия были облучены высокоинтенсивным током протонов с энергией 70 МэВ, проведена переработка мишеней в горячей камере и получены препараты ^{82}Sr большой активности. Данный метод, запатентованной в России, Европе, Канаде и США и внедренный еще ранее в ГНЦ РФ-ФЭИ, предполагается использовать и в других странах для массового производства этого важнейшего медицинского радионуклида, используемого при проведении позитронно-эмиссионной томографии (2015).

Совместно с французским центром ARRONAX и фирмой LEMER PAX разработаны различные модели генератора и внедрена методика его изготовления с целью проведения в дальнейшем медицинских испытаний с использованием позитронно-эмиссионной томографией во Франции, России и других странах для диагностики кардиологических, а также некоторых онкологических заболеваний. Стронций-82, полученный на ускорителе С70 по технологии ИЯИ РАН, был заряжен в

«горячей камере» центра ARRONAX в генераторы российского и французского образцов (рис. 1 и 2) и исследованы характеристики генератора, которые значительно лучше американского аналога (2015).

Закончена обработка данных эксперимента и определены эффективные кумулятивных сечения образования актиния-225 и тория-227 на ториевой мишени при облучении протонами с энергий 40-140 МэВ. На этой основе совместно с Химическим факультетом МГУ им. М.В.Ломоносова начата разработка технологии производства этих важнейших для медицины радионуклидов (2011).

Сотрудниками ИЯИ РАН совместно с МГУ им. М.В. Ломоносова и НИФХИ им. Л.Я Карпова выполнен цикл исследований по устойчивости ториевой мишени на пучке протонов с энергией 160 МэВ и радиохимических исследований, на основе которых разработана методика получения этого радионуклида. Получено около 5 мКи актиния-225, который используется в исследованиях по радиотерапии онкологических заболеваний (2013).

Совместно с МГУ им. М.В. Ломоносова разработана методика одновременного выделения медицинских терапевтических α -активных радионуклидов ^{225}Ac , ^{223}Ra и ^{230}Pa из мишени металлического тория, облученного протонами средних энергий. Методика включает жидкостную экстракцию, ионообменную и экстракционную хроматографию. Были получены образцы ^{225}Ac , ^{223}Ra и ^{230}Pa из мишени, облученной на ускорителе ИЯИ РАН. Разработана методика меченя гидроксипатита – перспективного биосовместимого носителя, радионуклидами ^{223}Ra , определены кинетические характеристики и оптимальные условия проведения сорбции на различных текстурных формах (2015).

Разработаны и изготовлены микропиксельные лавинные фотодиоды

Разработаны экспериментальные образцы и совместно с заводом «Микрон» изготовлены микропиксельные лавинные фотодиоды с высокой плотностью пикселей 10^4 на кв.мм. и размером рабочей площади элементов от 1×1 до 3×3 кв.мм. Спектральная область чувствительности 250 - 950 нм, квантовый выход на длине волны 500 нм - 70 %, коэффициент усиления фото сигнала 10^5 - 10^6 . Такие детекторы с рекордными параметрами могут быть применены в установках физики высоких энергий, а также в позитрон-эмиссионных и рентгеновских томографах.

Восстановление температурного профиля атмосферы

Предложен метод восстановления среднего температурного профиля атмосферы по измеренным на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе (БПСТ) вариациям потока мюонов высокой энергии. Для реконструкции профиля используются температурные коэффициенты мюонов высокой энергии, ранее полученные по экспериментальным данным БПСТ и измерениям температуры атмосферы в г. Минеральные Воды. Сравнение реконструированной по данным БПСТ средней за год температуры с результатами измерений показывают, что точность предложенного метода не хуже 4°C для рассматриваемого диапазона высот (2012).

Прецизионный солениод с высокой однородностью поля

По соглашению с ЦЕРН разработан, изготовлен и поставлен прецизионный солениод с однородностью поля в центральной части $\pm 2 \cdot 10^{-4}$, который используется в накопителе позитронов для генерации интенсивных импульсных сгустков позитронов низкой энергии в эксперименте AEGIS.

Система отклонения пучка для диагностики продольных характеристик

коротких сгустков электронов

По соглашению с DESY завершены разработка и изготовление, а также выполнен монтаж и испытания оборудования системы отклонения пучка для диагностики продольных характеристик коротких сгустков электронов на установке PITZ, DESY, Zeuthen. Данная система является прототипом полномасштабной системы специальной диагностики пучка в ускорителе международного проекта X-FEL. С учетом испытания прототипа, завершена разработка конструкторской и технологической документации для изготовления оборудования полномасштабной системы для X-FEL (2012).

Резонатор дефлектора для измерений продольных характеристик сгустка электронов

По соглашению с DESY разработана и передана в DESY конструкция резонатора дефлектора для использования в эксперименте REGAE (Relativistic Gun for Atomic Exploration) для измерений продольных характеристик сгустка электронов длительностью до 100 фемтосекунд и эмиттансом 70 нанометров. По сочетанию параметров качества: достижимой точности измерений и эффективности использования ВЧ мощности для поворота пучка, разработанные дефлекторы аналогов в мире не имеют (2012).

Разработка и создание измерителей формы сгустков для ускорителей J-PARC (Япония)

Принцип действия измерителей основан на когерентном преобразовании временной структуры исследуемого пучка в пространственное распределение пучка вторичных низкоэнергетических электронов, выбиваемых из мишени в виде тонкой проволоочки, посредством модуляции высокочастотным полем с частотой равной или кратной частоте следования сгустков. Три измерителя для ускорителя J-PARC, предназначенные для исследований в рамках проекта по увеличению энергии с 181 МэВ до 400 МэВ, были поставлены в J-PARC в феврале 2012 года. Получено фазовое разрешение лучше 1° на частоте 324 МГц. В настоящее время ИЯИ РАН является единственным институтом, разрабатывающим и создающим измерители подобного типа. Аналогов, обладающих требуемым разрешением 1° на частотах сотни МГц, не существует (2012).

Рентгеновский ДЕНситометр для Массового Обследования Населения (ДЕМОН) с целью диагностики костных заболеваний

Прибор состоит из рентгеновского излучателя, денситометрического клина, люминесцентного гадолиниевого экрана размером 240 x 210 мм, короткофокусного объектива и цифровой видеокамеры фирмы «Андор». Информация с видеокамеры считывается в компьютер и обрабатывается специальным программным обеспечением, позволяющим одновременно получать в автоматическом режиме изображение кости и значение плотности костной ткани изучаемого объекта. Эта информация заносится в базу данных и сразу передается ведущим специалистам ЦИТО МЗ РФ для выдачи заключения и (в случае необходимости) назначения лекарств.

Используемая методика определения плотности с помощью денситометрического клина позволяет получить более высокую точность и стабильность при меньшей (в 2,5 раза) стоимости прибора. Это достигается отсутствием сканирования, и, следовательно, более дешевой механикой аппарата, снижением требований к стабильности рентгеновской трубки, отсутствием сложных калибровок (2012).