

к 50-ЛЕТИЮ ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН

Институт ядерных исследований Российской академии наук: годы, люди, дела*

1. Задачи и люди

Институт ядерных исследований Российской академии наук образован согласно Постановлению Президиума Академии наук СССР от 24 декабря 1970 года № 1051 на основе решения СМ СССР, принятого по инициативе Отделения ядерной физики АН СССР, в целях создания современной экспериментальной базы и развития исследований в области физики элементарных частиц, атомного ядра, физики космических лучей и нейтринной астрофизики.

Можно без преувеличения назвать отцом-основателем Института выдающегося учёного, академика-секретаря Отделения ядерной физики АН СССР Моисея Александровича Маркова, чьи идеи комплексного подхода к изучению физики микро- и макромира (физики частиц и фундаментальных взаимодействий, астрофизики частиц и космологии) легли в основу программы направлений фундаментальных исследований вновь создаваемого Института. Его идеи в области физики элементарных частиц, методов детектирования в подземных, глубоководных и других детекторах заложили основу создания уникальных экспериментальных комплексов и установок Института.

М.А. Марков в своих научных и публицистических статьях неоднократно обосновывал необходимость создания экспериментальных установок для проведения исследований в области нейтринной физики и астрофизики, а также физики высоких интенсивностей. В частности, в статье "Будущее науки (Ускорители элементарных частиц следующих поколений)" он писал: "Астрофизика стала в большей степени, чем раньше, экспериментальной наукой. Это обстоятельство связано с тем, как справедливо формулирует Гинзбург, что в настоящее время астрофизика становится всеволновой. ... А впереди многообещающая нейтринная астрономия и астрофизика гравитационных волн... Далее небезынтересно заметить, что астрофизика в каком-то смысле становится ближе к микрофизике. Ведь нейтронные звёзды — это, в сущности, грандиозные атомные ядра". И ещё: "Специфические особенности эффектов, которые характерны для физики высоких энергий, при низких энергиях слабо проявляются. Но слабые проявления этих эффектов (малые сечения) могут быть, однако, детектированы в пучках частиц высокой интенсивности... Типичными представителями физики высоких интенсивностей являются так называемые мезонные фабрики..., которые имеют также почти беспредельные возможности для практического применения в технике, в медицине,



Фото 1. (Слева направо) Альберт Никифорович Тавхелидзе, Николай Николаевич Боголюбов и Моисей Александрович Марков

в народном хозяйстве" (см. журнал *Успехи физических наук* (УФН) 111 719–742 (1973)).

Активно поддерживал и развивал эти идеи, так же как и необходимость организации нового Института, выдающийся физик, директор Лаборатории теоретической физики Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна) Николай Николаевич Боголюбов. Первым директором ИЯИ был с момента образования Института до 1987 г. тогда сравнительно молодой (в декабре 1970 г. ему исполнилось 40 лет) теоретик из ОИЯИ, доктор физико-математических наук, впоследствии академик РАН Альберт Никифорович Тавхелидзе (фото 1).

* В декабре 2020 г. исполнилось 50 лет со дня образования Института ядерных исследований (ИЯИ) РАН. Данная статья написана на основе доклада, сделанного Л.В. Кравчуком на конференции 3 декабря 2020 г., посвящённой 50-летнему юбилею ИЯИ РАН. В статье кратко описана история создания Института и люди, внесшие основной вклад в его становление и развитие. Представлено краткое описание уникальных экспериментальных комплексов и установок Института, участие в международных научных проектах и экспериментах, а также некоторые результаты, полученные Институтом в последние годы. (Примеч. ред.)



Фото 2. Участники создания Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН (1972 год). В первом ряду (слева направо): 1, 2 — представители руководства строительством БНО, 3 — Президент АН СССР М.В. Келдыш, 4 — А.Н. Тавхелидзе, 5 — А.Е. Чудаков. Во втором ряду: 6 — первый директор БНО А.А. Поманский; научные сотрудники БНО: В.В. Алексеенко (7), В.А. Кузнецов (8), Г.Т. Зацепин (9), Е.Н. Алексеев (10).



Фото 3. Первое заседание Нейтринного совета АН СССР (1974 г.). Директор ИЯИ А.Н. Тавхелидзе (слева) и Президент АН СССР Анатолий Петрович Александров (справа).

На основе этих идей при создании Института были поставлены две главные задачи: сооружение первой в мире специализированной подземной лаборатории — Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) в Кабардино-Балкарии (ныне поселок Нейтринно Эльбрусского

района КБР) и сооружение Московской мезонной фабрики на базе сильноточного линейного ускорителя протонов в Научном центре АН СССР в Красной Пахре, ныне городской округ Троицк, Москва.

Большую поддержку в организации и становлении Института оказывали Президенты АН СССР академики М.В. Келдыш (фото 2), а затем А.П. Александров (фото 3).

Для начала Институту были переданы три лаборатории ФИАН: Лаборатория атомного ядра под руководством И.М. Франка; Лаборатория фотоядерных реакций, руководимая Л.Е. Лазаревой, и Лаборатория нейтрино под руководством Г.Т. Зацепина и А.Е. Чудакова.

Большую роль в создании Института также сыграли выдающиеся ученые:

И.М. Франк, лауреат Нобелевской премии за объяснение черенковского излучения, возглавлял Лабораторию атомного ядра. Ему принадлежит целый ряд теоретических и экспериментальных исследований в различных областях атомной физики, в том числе и реализованный в Институте метод спектрометрии по времени замедления нейтронов в свинце.

В.И. Векслер, открывший принцип автофазировки, стоял у истоков Лаборатории фотоядерных реакций, где работали созданные под его руководством ускорители электронов и протонов, в том числе и прототип первого отечественного протонного синхротрона.



Фото 4. В.А. Рубаков, В.А. Матвеев, Л.В. Кравчук. Вручение Виктору Анатольевичу Матвееву премии им. М.А. Маркова (2017 г.).

Г.Т. Зацепин, автор открытий электрон-ядерных ливней и других процессов в космических лучах, научный руководитель сооружения и программы Баксанской нейтринной обсерватории.

А.Е. Чудаков, автор открытия радиационного пояса Земли, руководитель экспериментальных исследований космических лучей в атмосфере и космосе.

В.М. Лобашёв, руководивший экспериментами по исследованиям нарушения пространственной чётности, поляризационных явлений в физике частиц, получения ультрахолодных нейтронов, прямого измерения массы нейтрино; научный руководитель экспериментальной программы Московской мезонной фабрики.

С.К. Есин, видный специалист по ускорителям заряженных частиц, участник сооружения и пуска фазotronа ОИЯИ, руководитель сооружения электронного синхротрона в Ереванском физическом институте, научный руководитель сооружения сильноточного линейного ускорителя протонов и отрицательных ионов водорода Московской мезонной фабрики.

Как уже упоминалось, директором Института до 1987 г. был академик А.Н. Тавхелидзе, затем более четверти века, до 2012 г., Институтом ядерных исследований руководил академик В.А. Матвеев (с 2012 по 2020 гг. — директор ОИЯИ) и затем по 2020 г. — член-корреспондент РАН Л.В. Кравчук (фото 4). В настоящее время директором ИЯИ РАН является доктор физико-математических наук, профессор РАН М.В. Либанов.

Заместителями директора по научной работе в разное время были В.Д. Бурлаков, В.А. Рубаков, Л.В. Кравчук, Л.Б. Безруков, Э.А. Коптелов. В настоящее время — А.Г. Панин, Г.И. Рубцов и А.В. Фещенко.

В Институте работали известные учёные — члены РАН: академики Г.Т. Зацепин, В.М. Лобашёв, А.Е. Чудаков, члены-корреспонденты РАН В.А. Кузьмин, О.Г. Ряжская; в настоящее время работают академики

В.А. Матвеев, В.А. Рубаков, И.И. Ткачёв; члены-корреспонденты РАН В.Н. Гаврин, Д.С. Горбунов, Г.В. Домогацкий, Л.В. Кравчук, С.В. Троицкий. Среди научных сотрудников Института четыре профессора РАН, около 50 докторов и около 120 кандидатов наук.

Около тысячи сотрудников работают на четырёх площадках Института в Москве; в городском округе Троицк, Москва; в Кабардино-Балкарии, поселок Нейтринно (БНО) и в Байкальской нейтринной обсерватории. В научно-образовательном центре (НОЦ) Института трудятся около ста студентов и аспирантов в основном с трёх базовых кафедр и аспирантуры ИЯИ РАН, Московского физико-технического института (МФТИ), Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ), Московского инженерно-физического института (МИФИ) и др.

Основные направления исследований в Институте:

- физика частиц, физика высоких энергий, теория калибровочных полей и фундаментальных взаимодействий, космология;

- физика нейтрино и астрофизика частиц; нейтринная, гамма- и гравитационно-волновая астрономия, физика космических лучей, физика и техника нейтринных телескопов в низкофоновых подземных и подводных лабораториях;

- физика атомного ядра, релятивистская ядерная физика;

- физика и техника ускорителей, физика пучков заряженных частиц;

- физика конденсированных сред, радиационное материаловедение, нейтронная физика, физика и техника источников нейтронов;

- междисциплинарные исследования, прикладная ядерная физика, радиоизотопные исследования, ядерная медицина, электроядерная трансмутация делящихся материалов, информационные технологии в экспериментальной и теоретической физике и др.

2. Уникальные научные комплексы и установки

Баксанская нейтринная обсерватория

19 июня 1963 года было принято постановление Президиума Академии наук о строительстве подземной станции и создании в ФИАН лаборатории "Нейтрино" (заведующий — Г.Т. Зацепин, зав. сектором — А.Е. Чудаков). Место для будущей обсерватории было выбрано недалеко от горы Эльбрус, в Баксанском ущелье, находящемся в Кабардино-Балкарской Автономной Республике СССР. К 1967 году было закончено научное обоснование и разработан проект нейтринной станции, в том же году начато строительство. Проект предусматривал строительство двух параллельных горизонтальных туннелей в горе Андырчи (высота горы более 4000 м), вдоль которых предполагалось разместить физические установки. Одновременно предусматривалось строительство необходимых инженерных и хозяйственных сооружений и жилого посёлка для сотрудников. С 1971 г. проект сооружения БНО был передан ИЯИ, который и обеспечил его реализацию. С 1973 г. по настоящее время в БНО проводятся научные исследования, программа которых расширялась по мере ввода в научную эксплуатацию новых установок. Схема подземной части обсерватории представлена на рис. 5, внешний вид БНО — на фото 6.

Основные направления научных исследований:

- Физика элементарных частиц, физика высоких энергий, космология.
- Нейтринная астрофизика, нейтринная и γ -астрономия, физика космических лучей, проблема солнечных нейтрино.
- Разработка и создание нейтринных телескопов в низкофоновых подземных лабораториях для исследования природных потоков нейтрино и других элементарных частиц.
- Двойной бета-распад.
- Поиск тёмной материи.

В состав БНО входят следующие установки.

Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (БПСТ) — многоцелевая подземная установка, предназ-



Фото 6. Внешний вид Баксанской нейтринной обсерватории (БНО).

наченная для решения большого круга задач астрофизики, физики элементарных частиц и космических лучей, была введена в строй в 1978 году. БПСТ находится на высоте 1700 м над уровнем моря в подземной выработке под склоном горы Андырчи, на расстоянии 550 м от

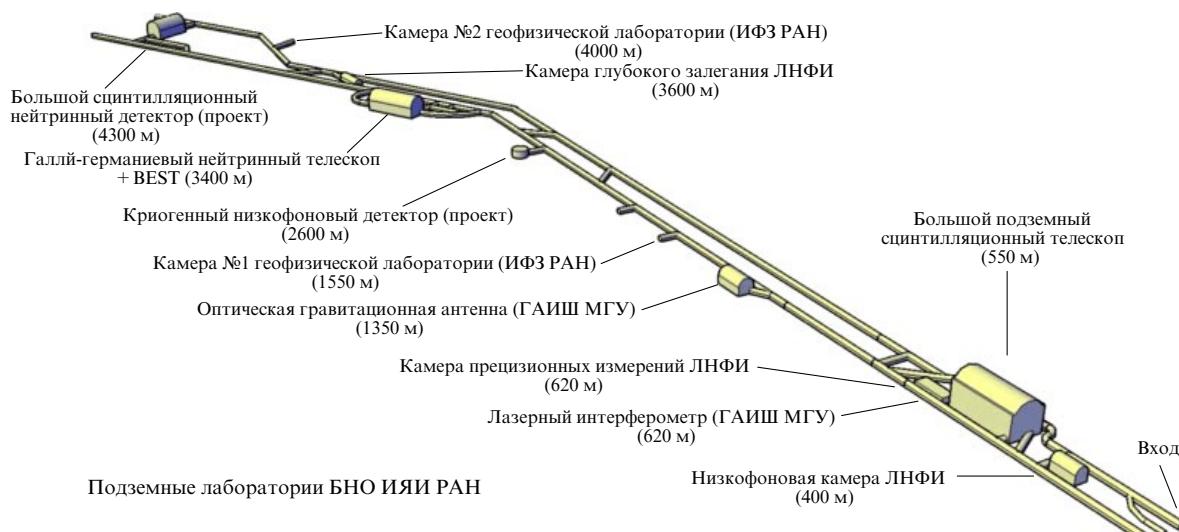


Рис. 5. Схема подземной части Баксанской нейтринной обсерватории.

входа в штоллю. Эффективная толщина грунта над телескопом соответствует эффективной пороговой энергии мюонов 220 ГэВ. Установка состоит из четырёх горизонтальных и четырёх вертикальных плоскостей, на которых расположено около 3200 сцинтилляционных счётчиков. На телескопе получен целый ряд важных результатов: измерен поток мюонов, рождённых атмосферными нейтрино космических лучей; получены ограничения на параметры осцилляций нейтрино; получено ограничение на поток нейтрино высоких энергий от локальных источников из плоскости Галактики; измерен энергетический спектр мюонов космических лучей в диапазоне энергий 1–30 ТэВ; измерено сечение фотоядерного взаимодействия при энергиях фотонов в диапазоне от 0,9 до 10 ТэВ и др.

Установка "Андырчи", предназначенная для регистрации атмосферных ливней с энергией более 1 МэВ, начала свою работу в 1996 г. Установка размещена на пологом участке склона горы Андырчи и состоит из 37 стандартных сцинтилляционных счётчиков на основе пластмассовых сцинтилляторов площадью 1 м². Центральный счётчик установки расположен над БПСТ. Расстояние по вертикали составляет 350 м. Такое расположение установки позволяет проводить изучение высокоэнергетичной мюонной компоненты широких атмосферных ливней (ШАЛ) в ливнях от первичных частиц. По совместным данным установок БПСТ и "Андырчи" проводятся исследования в различных областях астрофизики частиц.

Установка "Ковёр" модернизирована в 1998 г., когда была введена в строй первая очередь большого мюонного детектора (МД). Над подземными туннелями находится слой скального грунта толщиной 2 м (5 м водного эквивалента), который служит поглотителем мягкой компоненты. Использование информации с МД установки "Ковёр-2" позволило: существенно увеличить чувствительность эксперимента по поиску локальных источников γ -квантов сверхвысоких энергий; начать исследования химического состава первичных космических лучей с $E > 10^{14}$ эВ; изучать вариации мюонов с энергиями более 1 ГэВ. В настоящее время проводится модернизация установки до версии "Ковёр-3". Для этого площадь МД уже доведена до 410 м², а число наземных ливневых пунктов будет увеличено до 39. В новой конфигурации установка будет иметь наилучшую чувствительность к потоку первичных гамма-квантов с энергиями в диапазоне 100 ТэВ–1 ПэВ. В настоящее время эксперимент завершён, выполняются обработка и анализ данных.

Галлий-германиевый нейтринный телескоп (ГГНТ) предназначен для проведения измерений потока солнечных нейтрино. Данные о потоке содержат уникальную информацию о протекании термоядерных реакций в центральных областях Солнца и о свойствах нейтрино. Исследования на ГГНТ (руководитель В.Н. Гаврин) проводятся с 1986 г. в рамках российско-американского эксперимента SAGE. Принцип работы телескопа основан на реакции захвата нейтрино (ν_e) ядром ^{71}Ga с образованием ядра ^{71}Ge и электрона. Достоинством данного метода детектирования, предложенного в 1965 г. В.А. Кузьминым, является низкий энергетический порог реакции, который составляет 0,233 МэВ. Благодаря этому галлиевый нейтринный телескоп имеет возможность регистрировать pp-нейтрино, дающие наи-

больший вклад в полный поток солнечных нейтрино. На основе результатов SAGE получена оценка величины потока pp-нейтрино, достигающих Земли в своём первоначальном электронном аромате, и полного потока нейтрино от pp-реакций в Солнце, достигающих Земли в виде различных ароматных состояний, возникающих как результат осцилляций.

Лаборатория низкофоновых исследований предназначена для решения задач поиска различных мод двойного бета-распада ряда изотопов, поиска частиц-кандидатов на "тёмную" массу Вселенной, проверка закона сохранения электрического заряда и др. В Обсерватории эти исследования проводятся в трёх специально созданных подземных низкофоновых лабораторных помещениях (камерах): низкофоновой камере (НИКА) на расстоянии 385 м от входа; камере прецизионных измерений (КАПРИЗ) на расстоянии 620 м от входа; низкофоновой лаборатории глубокого заложения на расстоянии 3670 м от входа.

Эксперимент BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions) — поиск переходов электронных нейтрино в стерильное состояние. Для выполнения этого эксперимента была создана установка с двухзонной галлиевой мишенью ГГНТ для облучения мощным источником нейтрино двух галлиевых мишеней, расположенных на разных расстояниях от источника. Были разработаны и созданы также калориметрическая и спектрометрическая системы для измерения интенсивности источника. Впервые в мировой практике был изготовлен искусственный источник нейтрино с интенсивностью $3,41 \pm 0,02$ МКи и достигнута точность измерения этой активности менее одного процента. В период с 5 июля по 13 октября 2019 г. проведено 10 девятидневных экспозиций 50-тонной металлической галлиевой мишени, разделённой на две, внутреннюю и внешнюю, зоны. В настоящее время выполняется завершающий этап эксперимента — калибровка счётчиков и обработка полученных данных.

В 1998 г. коллектив сотрудников Института был удостоен Государственной премии Российской Федерации "За создание Баксанской нейтринной обсерватории и исследования в области нейтринной астрофизики, физики элементарных частиц и космических лучей". Достижения, полученные на ГГНТ в области исследований потока нейтрино от Солнца, удостоены Международной премии им. Б.М. Понтекорво, и за выдающийся вклад в исследование солнечных нейтрино и открытие нейтринных осцилляций присуждена золотая медаль имени Д.В. Скobelцина.

Проект создания в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН подземного детектора (НБНТ) большого объёма (10 килотонн сверхчистого жидкого сцинтиллятора) является частью мегапроекта — Многоцелевой нейтринной обсерватории — и представляется естественным и крайне важным планом развития БНО.

Комплекс сильноточного линейного ускорителя протонов (Московская мезонная фабрика), расположенный в Москве, в городском округе Троицк, включает в себя:

- сильноточный линейный ускоритель протонов и отрицательных ионов водорода с проектной энергией до 600 МэВ и средним током пучка до 0,5 мА;
- экспериментальный зал с каналами первичных и вторичных частиц различной энергии, экспериментальными установками, системой диагностики пучков;

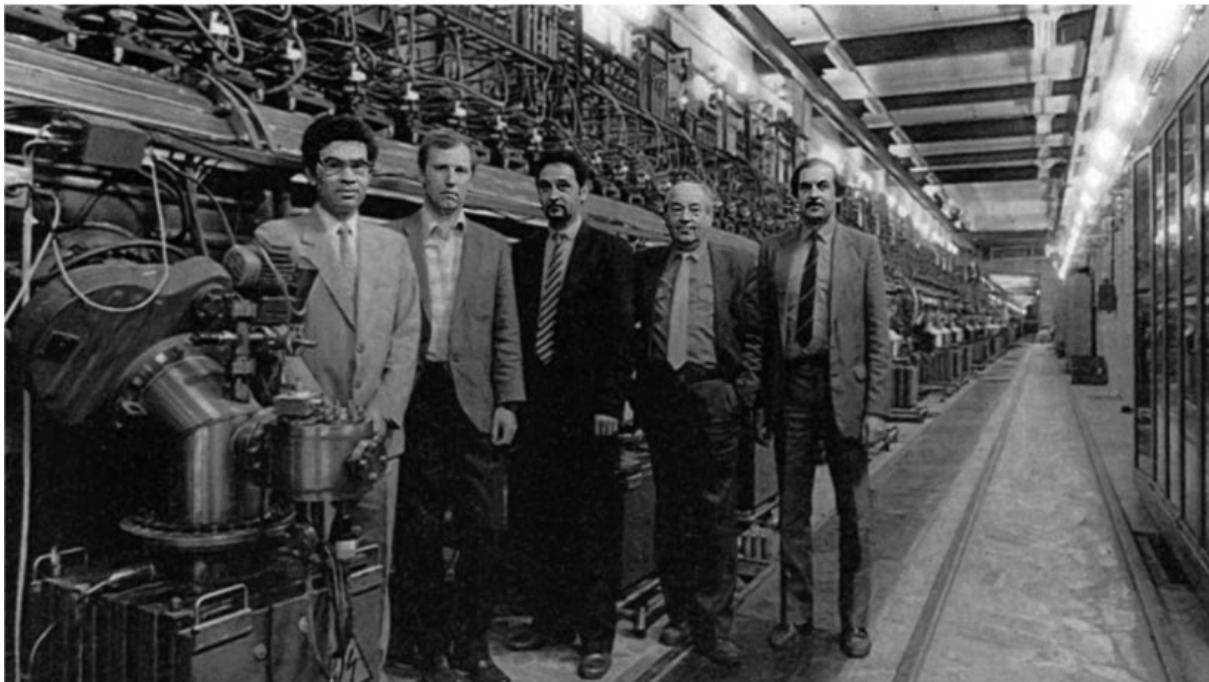


Фото 7. После пуска начальной (100 МэВ) части ускорителя в 1990 г. П.Н. Остроумов, А.В. Фещенко, В.Л. Серов, С.К. Есин, Л.В. Кравчук.



Фото 8. Ускоряющие резонаторы (а) и галерея ВЧ-питания (б) основной (600 МэВ) части ускорителя.

• нейтронный комплекс, включающий в себя импульсные источники нейтронов ИН-06, РАДЭКС и СВЗ-100, комплекс нейтронографических и рентгеновских установок, мёссбауэровский спектрометр для исследования материалов;

• комплекс по производству радиоактивных изотопов для медицины и промышленности на участке промежуточного вывода протонного пучка с энергией 160 МэВ;

• комплекс лучевой терапии, включающий рентгеновский томограф, рентгеновскую облучательную установку, электронный ускоритель для гамма-облучения, канал протонного пучка.

На выходе ускорителя также создан стенд облучения, предназначенный для исследования воздействия уско-ренных протонов на узлы радиоэлектронной аппарата-туры и иные изделия и материалы.

Сильноточный линейный ускоритель ионов водорода является уникальной научной установкой национального и международного значения. Это единственный в России ускоритель данного класса и до настоящего времени самый крупный линейный ускоритель ионов водорода в Евро-Азиатском регионе. На основе сильноточных линейных ускорителей ионов водорода такого класса в США работают Лос-Аламосский центр ней-

тронных исследований LANSCE и самый мощный в настоящее время источник нейтронов испарительного типа ORNL SNS. В Японии запущен сильноточный линейный ускоритель ионов H^- , являющийся основой исследовательского ускорительного комплекса J-PARC. Завершается сооружение ускорителя Европейского нейтронного комплекса ESS в Швеции.

Ускоритель ИЯИ РАН состоит из инжекторов ионов H^+ и H^- с соответствующими каналами транспортировки пучка, начальной части ускорителя до энергии 100 МэВ (фото 7) и основной части ускорителя до энергии 600 МэВ (фото 8).

Регулярная работа ускорителя на физические и прикладные задачи была начата в 1993 г. С тех пор проведено более 140 сеансов общей продолжительностью свыше 50 тыс. ч. Ускоритель сооружён в полном объёме на энергию протонного пучка 600 МэВ, однако максимальная достигнутая энергия была 502 МэВ, и затем значительное время работа велась с энергией до 209 МэВ вследствие остановки производства высокочастотных генераторов — клистронов. В последние годы ускоритель работает с энергией до 305 МэВ.

Нейтронный комплекс на базе ускорителя протонов ИЯИ РАН включает в себя:

- импульсный источник тепловых нейтронов ИН-06 для исследований конденсированных сред;

- импульсный источник эпипелловых нейтронов с времепролётными спектрометрами на базе установки РАДЭКС (исследования нейтрон-ядерных взаимодействий, отработка нейтронных методик исследования материалов);

- спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце СВЗ-100 (исследования нейтрон-ядерных взаимодействий).

Основное преимущество нейтронных источников на основе вторичных пучков нейтронов, генерируемых уско-ренными протонами в мишениях из тяжёлого металла в



Фото 9. Протонная лучевая установка. В центре заведующий лабораторией медицинской физики д.ф.-м.н. С.В. Акулиничев.

каскадно-испарительных ядерных процессах (spallation neutrons), состоит в следующем:

- ядерная безопасность;
- широкий спектр энергий нейтронов от холодных до нескольких сотен МэВ;
- возможность использования в экспериментах времяпролётной методики для сепарации нейтронов по энергиям и изменение временных и частотных характеристик пучков нейтронов в широких пределах;
- использование ускорителя для решения широкого круга задач и реализации нескольких разноплановых научных программ одновременно (например, проведение исследований в области физики конденсированного состояния, ядерной и нейtronной физики, исследований в области физики промежуточных энергий — мезонных и нейтринных исследований, исследований в области ядерной энергетики — разработки электроядерных источников энергии и трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов ядерной энергетики, исследований в области медицинской физики и производства нейтронно-дефицитных радиоактивных изотопов и т.д.);
- достаточно длительный срок работы мишени источника в интенсивных потоках ускоряемых частиц и их дешевизна по сравнению с атомной зоной реактора;
- низкое энерговыделение в расчёте на один произведённый нейтрон в реакциях взаимодействия протонов средних и высоких энергий с материалом мишени (spallation-процесс) по сравнению с реакцией деления.

Такие источники получают всё более широкое распространение в мире. При этом следует заметить, что советским учёным принадлежит существенный вклад в разработку основополагающих принципов развития многоцелевых исследовательских комплексов на базе сильноточных ускорителей ионов водорода, в том числе патент США 1975 г., одним из авторов которого был сотрудник ИЯИ РАН видный учёный профессор

Ю.Я. Стависский. Основные идеи были реализованы под его руководством при создании импульсного источника тепловых нейтронов ИН-06 Московской мезонной фабрики.

В настоящее время в составе источника нейтронов ИН-06 работают различные инструменты — спектрометры, рефлектометры, дифрактометры, такие как МНС, "Горизонт", "Геркулес", "Кристалл" и др.

В Лаборатории нейтронных исследований также осуществляются расчётно-теоретические исследования процессов взаимодействия частиц и ядер средних и высоких энергий со сложными макроскопическими мишнями, включая процессы генерации и переноса нейтронов и других частиц, энерговыделения в мишнях, образования и трансмутации радионуклидов, воздействия облучения на материалы, для чего разработан универсальный адронный транспортный код SHIELD.

Установка по облучению радиоизотопных мишеней протонным пучком линейного ускорителя была создана в 1993 г. и успешно используется для получения радиоизотопов медицинского и технического назначения.

На сегодняшний день эта установка является одной из крупнейших в мире по аккумулированной для получения изотопов энергии и регулярно используется для получения целого ряда ценнейших радионуклидов: стронция-82, актиния-225, изомера олова-117m, палладия-103, герmania-68 и др.

Важнейшим из получаемых изотопов является стронций-82 (период полураспада 25,5 сут.), используемый для ПЭТ-диагностики (ПЭТ — позитронно-электронная томография). В ИЯИ РАН разработан собственный медицинский генератор стронций-82/рубидий-82, превосходящий по основным характеристикам американский аналог. Генератор прошёл в России клинические испытания для кардиологии и нейроонкологии, и на него получено регистрационное удостоверение. Одним из новых мно-

гообещающих проектов является получение актиния-225 (период полураспада 10 сут.) из металлического тория, облучённого протонами средних энергий. Этот альфаизлучающий радионуклид и короткоживущий продукт его распада висмут-213 (46 мин) перспективны для лечения различных онкологических заболеваний методами радиоиммунной терапии. За один 10-дневный сеанс облучения на линейном ускорителе ИЯИ РАН можно получать актиний-225 в количестве 1–2 Ки, что сравнимо с мировым производством за год. В Институте разработана также новая технология получения радионуклида олово-117m, перспективного для диагностики и одновременно терапии (тераностики) ряда онкологических, а также сосудистых заболеваний. Более подробно о перспективах получения радиоизотопов на линейном ускорителе протонов ИЯИ РАН написано в статье заведующего Лабораторией радиоизотопного комплекса, д.х.н. Б.Л. Жуйкова в данном выпуске журнала УФН (см. с. 1387).

Комплекс лучевой терапии (первая очередь) был построен в 2009 г. как реализация направления исследований в области ядерной медицины на линейном ускорителе протонов ИЯИ РАН, изначально предполагаемого в программе исследований на мезонной фабрике для отработки методик использования пучка ускоренных протонов для терапии злокачественных новообразований. В состав этого комплекса вошли следующие генерирующие установки: протонная лучевая установка, медицинский ускоритель электронов СЛ-75-5-МТ, близкофокусный рентгенотерапевтический аппарат РЕНТГЕНТА-02 и рентгеновский компьютерный томограф Toshiba Aquilion LB-16. Протонная лучевая установка используется для проведения исследований, а конвенциональные установки практически сразу начали применяться и для лечения, и для диагностики (фото 9).

Одновременно продолжаются научные исследования по следующим направлениям: методы брахитерапии с использованием новых изотопов, лазерное разделение иттербия и производство источников излучения для медицины, повышение конформности протонной лучевой терапии, радиобиологические эксперименты с культурами клеток. В последние годы особый интерес привлекли исследования по протонной фланш-терапии, в которой используется облучение новообразований с экстремально высокими значениями мощности дозы. В этом случае возможно разрушение новообразований лучевым воздействием без ущерба для здоровых тканей. Ускоритель протонов ИЯИ РАН предоставляет уникальные возможности для такого вида терапии за счёт рекордной мощности его пучков протонов. В указанных направлениях Лаборатория медицинской физики ИЯИ РАН активно сотрудничает с ведущими радиологическими центрами России.

Байкальский глубоководный нейтринный телескоп

Ещё в 1960 г. М.А. Марков в своём выступлении на Рочестерской конференции сказал: "Мы предлагаем установить детекторы в подземном озере или глубоко в океане, чтобы определять направление движения заряженных частиц с помощью черенковского излучения" (Марков М.А. "On high energy neutrino physics" Proc. 10th ICHEP, Rochester, 1960, p. 578].

Реализация этого предложения в нашей стране началась в 1980 г., когда в ИЯИ была образована Лаборато-

рия нейтринной астрофизики высоких энергий (зав. лаб. Г.В. Домогацкий) и начались исследовательские и проектно-изыскательские работы по созданию и размещению в озере Байкал (предложение А.Е. Чудакова) первого глубоководного нейтринного телескопа НТ-200. Разработке проекта предшествовали длительные, на протяжении 10 лет, исследования гидрооптических, гидрофизических и гидрологических условий проведения экспериментов на озере Байкал, был разработан ряд конструкторских и технических решений, разработан и создан отечественный высокочувствительный гибридный фотоприёмник Квазар-370 с диаметром фотокатода 370 мм и решена задача изготовления герметичных стеклосфер, обеспечивающих необходимые условия длительной работы измерительной аппаратуры на байкальских глубинах до 1400 м.

В течение ежегодных зимних экспедиций 1993–1998 гг. был осуществлён монтаж и началась регулярная работа по сбору данных. Регистрирующая аппаратура телескопа НТ-200 расположена на глубине около 1100 м на расстоянии 3,6 км от берега и связана с береговым центром управления и сбора данных донными линиями связи. Телескоп представляет собой трёхмерную решётку из оптических модулей (ОМ), размещенных на вертикальных грунтонесущих кабель-тросах, нижние концы которых прикреплены к донным якорям, а верхние — к буям. Каждый вертикальный кабель-трос с оптическими модулями формирует структурную единицу телескопа — гирлянду ОМ. Телескоп содержит 192 ОМ, размещенных на восьми гирляндах длиной 68 м каждая. Вокруг центральной гирлянды равномерно вдоль окружности радиусом 21,5 м расположены периферийные гирлянды. Оптический модуль содержит гибридный фотоприёмник Квазар-370, размещённый в корпусе из низкорадиоактивного стекла (фото 10).

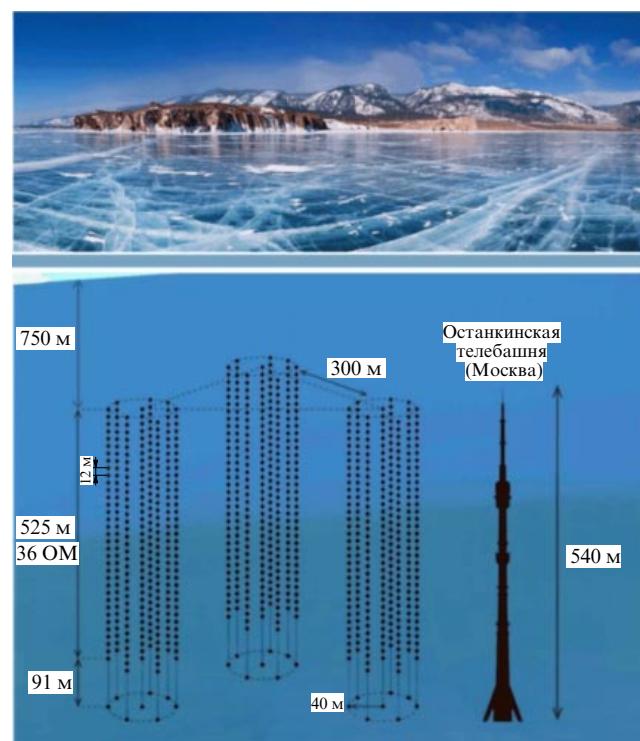


Фото 10. Глубоководный нейтринный телескоп Baikal-GVD.

Удачное сочетание природных факторов наряду с хорошей изученностью места проведения работ и накопленным опытом развертывания и эксплуатации нейтринного телескопа первого поколения НТ-200 создали необходимые предпосылки для начала работ по проектированию и изготовлению на озере Байкал глубоководного нейтринного телескопа НТ1000 с эффективным объёмом масштаба кубического километра. Работа выполнялась в период с 2008 по 2011 гг.

Глубоководный нейтринный телескоп НТ1000 предназначен для решения широкого круга задач астрофизики, космологии и физики элементарных частиц: поиска локальных нейтринных источников, исследования диффузного потока нейтрино, поиска проявлений тёмной материи, поиска магнитных монополей и других гипотетических частиц. Он представляет собой экспериментальный комплекс для исследования природных потоков нейтрино в области энергий выше 10 ТэВ посредством регистрации черенковского излучения вторичных мюонов и ливней, генерируемых в нейтринных взаимодействиях.

Базовая конфигурация каждого из 12 кластеров НТ1000 включает в себя восемь гирлянд по 24 ОМ каждая (две секции на гирлянде), расположенных на расстоянии 60 м друг от друга. Расстояние между соседними кластерами составляет 300 м. Кластеры гирлянд связаны с Береговым центром комбинированными электрооптическими кабелями длиной ~ 6 км. Каждый кластер НТ1000 является функционально закрытым детектором, способным работать как в составе единой установки, так и в автономном режиме. Это обеспечивает простоту наращивания телескопа и возможность ввода в эксплуатацию его отдельных частей по мере развертывания НТ1000.

Свои современные очертания кластер приобрёл к 2016 году после серии натурных испытаний и внесения соответствующих коррекций по итогам ежегодных зимних экспедиций и выделения событий астрофизической природы на детекторе Ice Cube — выросла длина гирлянд с 24 до 36 оптических модулей, с 40 м до 60 м возросло расстояние от гирлянд до центра кластера. Сам проект НТ-1000 стал восприниматься мировым сообществом как Baikal-GVD (Gigaton Volume Detector).

Очень серьёзный импульс развитию Baikal-GVD придало вступление в активную работу по проекту Объединённого института ядерных исследований (Дубна). С апреля 2020 г. нейтринный телескоп работает в составе семи кластеров (фото 10), и общий эффективный объём установки в задаче регистрации ливневых событий от нейтрино высоких энергий ($E \geq 100$ ТэВ) достиг значения $\sim 0,35$ км³, что позволяет надеяться на регистрацию и выделение трёх-четырёх таких событий в течение года.

В начале марта 2021 г. в ходе визита министра науки и высшего образования РФ В.Н. Фалькова состоялся официальный ввод в эксплуатацию Байкальского глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD в составе восьми кластеров глубоководных гирлянд (2304 оптических модуля). При анализе данных, полученных при работе детектора в конфигурациях 2018, 2019 и 2020 гг., были выделены 10 кандидатов на события, инициированные нейтрино высоких энергий астрофизической природы. Это означает, что в задаче поиска ливневых событий от нейтрино высоких энергий астрофизической природы байкальский детектор находится уже на расстоянии одной-двух успешных экспедиций до Ice Cube, где средний темп счёта таких событий (в зависимости от энергетического порога регистрации) составляет четыре-шесть в год.

Установка "Троицк-ню-масс"

С 1983 года в Отделе экспериментальной физики ИЯИ РАН под руководством академика В.М. Лобашёва проводились исследования по поиску эффективной массы электронного антинейтрино в β -распаде трития. Последовавшее вскоре обнаружение эффектов нейтринных осцилляций надёжно продемонстрировало отличие от нуля массы нейтрино и позволило измерить расщепление их массовых состояний. При этом абсолютная шкала масс остаётся неизвестной. Знание абсолютной шкалы массовых состояний нейтрино имеет важнейшее значение как для физики частиц (поскольку само существование массы у нейтрино указывает на новую физику за пределами Стандартной модели), так и для космологии, где сумма масс всех типов нейтрино играет заметную роль в эволюции крупномасштабной структуры Вселенной.

Новый тип спектрометра электронов из β -распада трития — электростатический спектрометр с адиабатиче-



Фото 11. Внешний вид установки "Троицк ню-масс".

ской магнитной коллимацией — был реализован в установке "Троицк ню-масс" (фото 11), на которой в 1994–2003 годах был получен рекордный верхний предел на эффективную массу нейтрино 2,05 эВ.

Для последующего улучшения чувствительности эксперимента было необходимо увеличить интенсивность источника трития минимум на два порядка. Реализовать такой источник оказалось возможным в рамках международного проекта KATRIN (Карлсруэ, Германия). Общая компоновка установки KATRIN повторяет схему "Троицк ню-масс". Для создания установки KATRIN понадобилось 17 лет. В 2019 г. на установке KATRIN с участием сотрудников ИЯИ РАН начались сеансы набора данных. После их обработки предел на эффективную массу электронного антинейтрино был снижен до уровня 1,1 эВ.

После завершения в Троицке основной программы по измерению эффективной массы электронного антинейтрино было решено расширить диапазон измерения энергии электронов из β -распада трития. Такая постановка эксперимента позволяет заняться поисками теоретически предсказываемых частиц — стерильных нейтрино. Стандартная модель физики частиц неполна, о чём свидетельствуют ненулевая масса обычных нейтрино и существование тёмной материи во Вселенной. Оба явления могут быть объяснены в рамках одного предположения о существовании стерильных нейтрино с массой порядка 0,1–8 кэВ. Для решения этой важнейшей задачи фундаментальной физики и астрофизики частиц установка "Троицк ню-масс" модернизирована для прецизионного измерения бета-спектра от распадов трития с целью поиска стерильных нейтрино в диапазоне масс до 7 кэВ при отсутствии дополнительных систематических эффектов.

3. Международное сотрудничество

Институт давно и успешно сотрудничает со многими ведущими лабораториями, центрами и университетами мира в области упомянутых выше фундаментальных и прикладных исследований. В их числе можно выделить следующие.

Сотрудники Института принимают активное участие в экспериментах в ЦЕРН на Большом адронном коллайдере (Large Hadron Collider — LHC) практически с самого начала его создания. ИЯИ РАН входит в коллегиации CMS, LHCb и ALICE. Сотрудники Отдела физики высоких энергий — соавторы статьи "Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC" в журнале *Physics Letters B* об открытии бозона Хиггса, одном из самых ярких открытий в физике высоких энергий, отмеченном в 2013 году Нобелевской премией.

Институт принимает участие в создании и проведении эксперимента LHCb, отвечая, в частности, за разработку и сооружение передней части электромагнитного калориметра. К основным результатам, полученным в этом эксперименте, относятся открытие СР-нарушения в распадах очарованных D0-мезонов, открытие тетракварка, открытие новых барионов. С середины 1990-х гг. сотрудники Отдела экспериментальной физики принимали участие в создании, а затем начали работу в эксперименте ALICE, для которого в ИЯИ РАН создан детектор T0, играющий ключевую роль в формировании триггера

и идентификации частиц по времени пролёта, в мониторинге светимости. Для работы с увеличенной более чем в 10 раз светимостью коллайдера для исследования ранее недоступных редких процессов потребовалась модификация установки ALICE. В ИЯИ был разработан фронтальный интеллектуальный триггерный детектор (FIT — Fast Interaction Trigger) и создаётся считывающая и триггерная электроника нового поколения на основе FPGA-процессоров. Детектор FIT является основным триггерным детектором эксперимента ALICE после его модернизации в 2019–2020 гг. и используется для точного определения момента столкновения, множественности вторичных частиц, центральности и положения плоскости реакции в ядро-ядерных столкновениях, а также для измерения светимости.

С участием сотрудников Института получены оценки интенсивности потоков аксионов, возникающих от конверсии гамма-квантов высокой энергии в протяжённых межгалактических магнитных полях (CAST), проводится изучение нейтринных осцилляций на нейтринном пучке ЦЕРН – Гран-Сассо в экспериментах OPERA и ICARUS, а также поиск нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд (ICARUS), проводятся измерения ускорения свободного падения свободных атомов антиводорода (AEgIS).

Особо следует отметить эксперимент NA64 в ЦЕРН, в котором определяющая роль принадлежит сотрудникам ИЯИ РАН (споуксмэн — сотрудник Института С.Н. Гниленко). Основной целью эксперимента является поиск рождения лёгкой тёмной материи в распадах "тёмных" фотонов A'invisible.

В эксперименте NA61/SHINE на SPS в ЦЕРН недавно завершены измерения выходов заряженных частиц в столкновениях лёгких и тяжёлых ядер с фиксированными мишнями при энергиях налетающих ядер в диапазоне от 13 до 150 ГэВ на нуклон. Для этого эксперимента в ИЯИ РАН разработан и изготовлен передний адронный калориметр, обеспечена его эксплуатация, выполнена калибровка и анализ данных. Для новой программы исследований эксперимента NA61/SHINE по рождению D-мезонов в столкновениях ядер свинца в Институте проведена модернизация калориметра. Это позволит проводить исследования при более высоких интенсивностях начиная с 2022 г.

Институт имеет давнюю историю сотрудничества с Лабораториями KEK, J-PARC и Университетом Токио (Япония). Прежде всего, это участие в коллегиациях экспериментов по поиску осцилляций нейтрино — эксперименты K2K, а затем T2K.

Сотрудники Института (Отдел физики высоких энергий (ОФВЭ), руководитель д.ф.-м.н., профессор Ю.Г. Куденко) принимали непосредственное участие в разработке, создании и обслуживании детекторов мюонного пробега (SMRD) ближнего детектора ND280, в проведении эксперимента, в моделировании и анализе данных T2K.

В 2017 г. началась работа по модернизации ближнего детектора ND280, завершение которой планируется в 2022 г. В результате ожидается значительно улучшить чувствительность эксперимента T2K к осцилляционным параметрам нейтрино, в том числе и к СР-нарушению. Как ожидается, модернизированный ближний детектор ND280 с 2027 г. станет частью нейтринного эксперимента следующего поколения — Гипер-Камиоканде.

Институт активно участвует в экспериментах по исследованиям ядерной физики, например, в экспериментах E949 в Брукхейвенской национальной лаборатории (БНЛ, США) и NA62 (ЦЕРН) по поискам сверхредких распадов. Сотрудники ОФВЭ также разработали методы анализа и получили наиболее чувствительные ограничения на параметры массивных (стерильных) нейтрино в диапазоне масс до 500 МэВ в экспериментах E949, T2K, OKA и NA62.

Неотъемлемой частью интенсивных линейных ускорителей адронов становится разработанный в Отделе ускорительного комплекса (ОУК) прибор для измерения продольного распределения заряда в ускоряемых сгустках ионов, обеспечивающий разрешение по фазе лучше одного градуса. Такие приборы разработаны под руководством д.ф.-м.н. А.В. Фещенко и созданы в ИЯИ РАН для ускорителей ЦЕРН; DESY, GSI (Германия); ESS (ЕС, Швеция); KEK, J-PARC (Япония); SSC, SNS, LANSCE, FRIB (США); MIRRA (Бельгия) и др. Группа разработчиков прибора — сотрудников ИЯИ РАН — в 2021 г. удостоена Премии РАН им. В.И. Векслера.

В ОУК предложена ускоряющая структура, превосходящая существующие аналоги по ряду параметров, которая в сотрудничестве с лабораторией DESY (Германия) апробирована в долговременной эксплуатации на пучках электронов установки PITZ. В результате дальнейших исследований, расширивших область применимости, структура рекомендована для модернизации первого резонатора основной части ускорителя ИЯИ РАН.

Для определения характеристик продольного распределения частиц в коротких сгустках лазеров на свободных электронах разработаны отклоняющие структуры, применённые в ускорителе Европейского лазера на свободных электронах XFEL. В ОУК сформировано направление создания специализированных отклоняющих структур для диагностики продольных распределений частиц в сгустках сверхвысокой яркости.

В последние годы резко возрос интерес и к столкновениям ядер меньших энергий, чем в LHC. Это связано с тем, что при меньших энергиях открывается возможность исследовать менее разогретую ядерную материю, но при этом имеющую плотность барионов (нуклонов), в 5–10 раз превышающую плотность в ядрах в обычном состоянии. Предполагается, что такая относительно холодная форма материи существует внутри нейтронных звёзд. Такие исследования направлены на поиск начала деконфайнмента, критической точки фазового перехода из обычной ядерной материи в кварк-глюонную плазму. В настоящее время действуют установки BM@N в ОИЯИ, NA61/SHINE в ЦЕРН и HADES в GSI, на которых изучаются взаимодействия лёгких и тяжёлых ядер с фиксированными мишенями при энергиях от 1 до 158 ГэВ на нуклон. Для продолжения таких исследований в будущем сооружаются два новых ускорительных комплекса: NICA в ОИЯИ (Дубна) и FAIR в GSI (Дармштадт, Германия). Отдел экспериментальной физики (ОЭФ) ИЯИ РАН участвует во всех этих экспериментах.

Сотрудники ОЭФ активно участвуют в международном эксперименте GERDA-II по поиску двойного безнейтринного бета-распада германия-76. Установка, на которой идёт эксперимент GERDA-II, расположена в подземной Национальной лаборатории Италии Гран-Сассо (LNGS INFN). Существование такого распада

предсказывают теоретические модели, содержащие новые свойства материи, которые могут проявляться на малых расстояниях. Начата разработка эксперимента LEGEND, который будет продолжением эксперимента GERDA. Институт является участником международного эксперимента по измерению параметра осциляций реакторных антинейтрино θ_{13} Double Chooz (Франция), а также международного эксперимента JUNO (Китай) — многозадачного нейтринного эксперимента в области неускорительной физики частиц. Эксперимент будет проводиться в 53 км от двух реакторных комплексов в подземной лаборатории на глубине ~ 700 м.

В 1984 г. Международным научным комитетом был принят к реализации проект установки LVD (Large Volume Detector) в создаваемой подземной лаборатории Гран-Сассо (Италия). Проект LVD был разработан совместно сотрудниками ИЯИ РАН (ОЛВЭНА, Лаборатория электронных методов детектирования нейтрино, руководитель О.Г. Ряжская) и Института космогеофизики Италии. Монтаж сцинтилляционных счётчиков в Гран-Сассо был начат в 1990 г., в 2000 г. была закончена третья башня. Всего в ИЯИ РАН было изготовлено около 700 сцинтилляционных счётчиков. Установка LVD на сегодня является крупнейшим сцинтилляционным детектором, обладающим уникальными возможностями для исследований в области подземной физики, на котором получен ряд важнейших фундаментальных результатов. Также в рамках международного проекта CNGS (CERN Neutrinos to Gran Sasso), направленного на изучение свойств нейтрино, Институт участвует в эксперименте OPERA, позволяющем отличить нейтрино от антинейтрино по заряду мюона в тау-мюонных распадах. По мюонным данным детектора LVD был проведён мониторинг характеристик пучка мюонных нейтрино из CERN в рамках эксперимента OPERA.

Лаборатория фотоядерных реакций Института участвует в ряде международных коллабораций, включая A2 на микротроне в Майнце, BGOOD на ускорителе ELSA в Бонне, NUSTAR в GSI (Дармштадт, Германия). Для проведения поляризационных экспериментов в Майнце и Бонне сотрудниками Института совместно с ОИЯИ разработана и создана уникальная поляризованная мишень с рекордными на мировом уровне рабочими характеристиками. В этих экспериментах получен ряд пионерских результатов, в частности, впервые в мире выполнены измерения спиновых поляризумостей протона. На BGOOD с участием Лаборатории фотоядерных реакций (ЛФЯР) выполнен цикл экспериментов по фоторождению странных мезонов в области энергий фотонов до 4 ГэВ. Начаты первые эксперименты по исследованию эксклюзивных реакций фоторождения мезонов и мультифрагментации ядер.

Перечень и описание нескольких десятков международных проектов и экспериментов, в которых участвует ИЯИ РАН, можно продолжать, однако это не может быть сделано в рамках данной статьи.

4. Настоящее и перспективы

За последние годы Институтом получен ряд важнейших результатов исследований, признанных научной общественностью. Сотрудниками Института публикуется около 450 научных статей в год в ведущих научных журналах России и мира, делается около

60 докладов на крупных международных и российских конференциях.

Институт организует и проводит широко известные в России и мире конференции, в том числе международные семинары по физике высоких энергий QUARKS, Международные школы "Частицы и космология", Международные семинары "Электромагнитные взаимодействия ядер при малых и средних энергиях", Марковские чтения, целый ряд других международных и внутрироссийских семинаров и совещаний.

Широко известны и признаны в мире теоретические исследования учёных Института в области физики высоких энергий, в разработке методов теории возмущений в квантовой теории поля, изучении основного состояния (вакуума) в калибровочных теориях, в разработке методов исследования динамики сильных взаимодействий адронов вне рамок теории возмущений, исследовании процессов, выходящих за рамки Стандартной модели элементарных частиц, разработке теории образования барионной асимметрии Вселенной и изучении взаимосвязи физики частиц и космологии, в построении моделей тёмной материи и тёмной энергии. Эти работы были отмечены многочисленными наградами. В 2020 г. академик В.А. Рубаков был награждён престижной Гамбургской премией по теоретической физике за важнейшие продвижения в раскрытии загадки происхождения Вселенной.

Получены новые экспериментальные данные по ядерным реакциям с участием протонов и нейтронов средних энергий, по фотоядерным реакциям, в том числе исследована спиновая структура протона с помощью активной поляризованной мишени, наблюдены новые эффекты при столкновениях релятивистских ядер, дано начало новому научному направлению, получившему название "ядерная фотоника".

В Институте существует развитая система подготовки научных кадров, много лет действует Научно-образовательный центр, организующий учёбу и работу более ста студентов и аспирантов, в том числе на базовых кафедрах Института в МФТИ "Фундаментальные взаимодействия и космология" и МГУ "Физика частиц и космология". Сотрудники Института обучают студентов ряда других кафедр МГУ и МИФИ, сотрудничают с Иркутским, Кабардино-Балкарским, Южным Федеральным университетами. На Северном Кавказе созданы две совместные научно-исследовательские лаборатории для обучения и работы студентов и аспирантов на базе Баксанской нейтринной обсерватории, студенты и аспиранты принимают участие в ежегодных научных экспедициях на озеро Байкал для работы на Байкальском глубоководном нейтринном телескопе. Ежегодно совместно с МФТИ проводятся школы-семинары студентов и аспирантов "Фундаментальные взаимодействия и космология". Успешно работающие аспиранты и студенты имеют возможность выезжать на молодёжные школы в ЦЕРН и участвовать в научных исследованиях в зарубежных колаборациях. В ИЯИ работают аспирантура и советы по защите диссертаций. Ежегодно защищаются докторские и кандидатские дис-

сертации по самым актуальным и перспективным проблемам современной физики.

Наряду с созданием уникальных научных установок Институт внёс значительный вклад в строительство и развитие города Троицка (сейчас — городской округ Москвы), несколько сотрудников Института избраны почётными гражданами Троицка; построил в Приэльбрусье научный поселок Нейтрино для сотрудников Баксанской нейтринной обсерватории.

Будущее научных исследований ИЯИ РАН связано с проектами класса мега-сайенс.

Планируется завершить строительство Байкальского нейтринного телескопа Baikal-GVD с эффективным объёмом 1 кубический километр. Такой объём позволит регистрировать нейтрино астрофизического происхождения с такой же чувствительностью, как в эксперименте Ice Cube в Южном полушарии, и установить их происхождение.

Подготовлено предложение создания Нового Баксанского нейтринного телескопа (НБНТ). В качестве рабочего вещества НБНТ планируется использовать 10 килотонн сверхчистого жидкого сцинтиллятора. Такой телескоп сможет зарегистрировать нейтрино СНО-цикла термоядерных реакций в Солнце. Чувствительность эксперимента позволит подтвердить одну из нескольких существующих моделей Солнца. Завершение этих проектов позволило бы создать в России многоцелевую нейтринную обсерваторию, входящую в глобальную нейтринную сеть GNN (Global Neutrino Network).

Подготовлено физическое обоснование проекта модернизации Линейного ускорителя протонов в Троицке путём замены части ускоряющей структуры в существующем туннеле ускорителя сверхпроводящими резонаторами. Проект предполагает достичь энергии 1 ГэВ и мощности пучка 1 МВт, что позволит развить существующий импульсный источник нейтронов ИН-06 в установку мирового класса. На базе Ускорительного комплекса в Троицке также планируется создание Центра ядерной медицины, включающего в себя компактный линейный ускоритель протонов для лучевой терапии и радиохимическую лабораторию для производства радиофармпрепаратов для диагностики и терапии сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний.

Наличие высококвалифицированного научного персонала, созданных в Институте уникальных научных установок, тесного творческого сотрудничества с ведущими научными организациями России и мира, развитой системы подготовки научных кадров позволяет Институту успешно решать на высоком мировом уровне фундаментальные и прикладные проблемы современной физики.

Более подробно об истории создания Института ядерных исследований РАН, работе его подразделений и установок, о полученных результатах, наградах, премиях и др. можно прочитать в буклете, выпущенном Институтом к своему 50-летнему юбилею.

Директор ИЯИ РАН в 2014–2020 гг.
Леонид Владимирович Кравчук