



Федеральное
государственное
бюджетное
учреждение
науки

**Институт ядерных исследований
Российской академии наук**

Институт ядерных исследований
(ИЯИ АН СССР — ИЯИ РАН)
1970 — 1991 — 2020



Федеральное
государственное
бюджетное
учреждение
науки

**Институт ядерных исследований
Российской академии наук**

Коллективный
труд
к пятидесятилетию
со дня основания
ИЯИ РАН

Москва
2021

В декабре 2020 года Федеральному государственному бюджетному учреждению науки Институту ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) исполняется 50 лет.

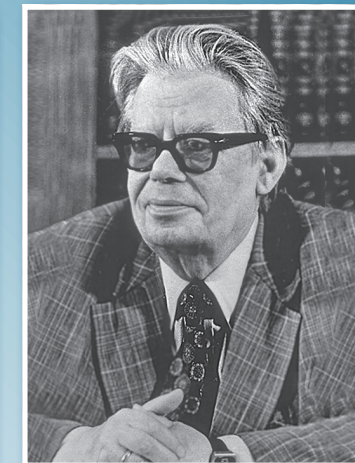
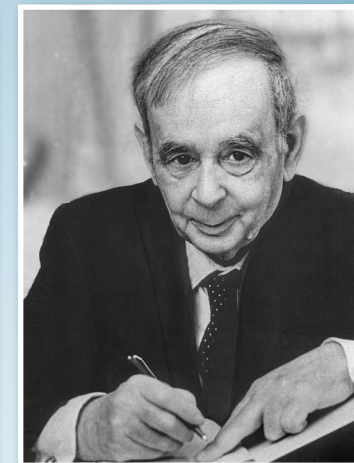
Институт ядерных исследований РАН сегодня — крупный центр физики частиц с широкой сетью проектов международного сотрудничества. В ИЯИ РАН ведутся работы по космологии, нейтринной физике, астрофизике, физике высоких энергий, ускорительной физике и технике, нейтронным исследованиям и ядерной медицине. В ИЯИ РАН действует ряд широко известных уникальных научных установок, включая **Комплекс сильноточного линейного ускорителя ионов водорода** в Троицке, **Баксанская нейтринная обсерватория** (Приэльбрусье, Кабардино-Балкарская Республика), **Байкальский нейтринный телескоп** (озеро Байкал, Иркутская область) и эксперимент **«Троицк ню-масс»** (Троицк, Москва).

Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) образован 24 декабря 1970 г. (тогда ИЯИ АН СССР) постановлением Президиума АН СССР в соответствии с решением Совета Министров СССР.

Решающую роль в создании Института ядерных исследований сыграл академик **Моисей Александрович Марков** совместно с выдающимися советскими физиками: лауреатом Нобелевской премии академиком **Ильей Михайловичем Франком** и академиком **Николаем Николаевичем Боголюбовым**. Благодаря влиянию **М.А. Маркова** в институте сформировались два направления исследований: физика микромира — физика элементарных частиц, а также физика больших масштабов — наука о происхождении и эволюции Вселенной, космология. Пионерские идеи **М.А. Маркова** легли в основу создания современных уникальных установок и программы фундаментальных научных исследований Института.

Три лаборатории ядерного профиля Физического института Академии наук СССР им. П.Н. Лебедева стали основой создания Института ядерных исследований:

- ◆ лаборатория атомного ядра, возглавляемая лауреатом Нобелевской премии академиком **И.М. Франком**;
- ◆ лаборатория фотоядерных реакций, под руководством **Л.Е. Лазаревой**, у истоков которой стоял академик **В.И. Векслер**;



- ◆ лаборатория нейтрино, широко известная благодаря трудам академик **Г.Т. Зацепина** и **А.Е. Чудакова**.

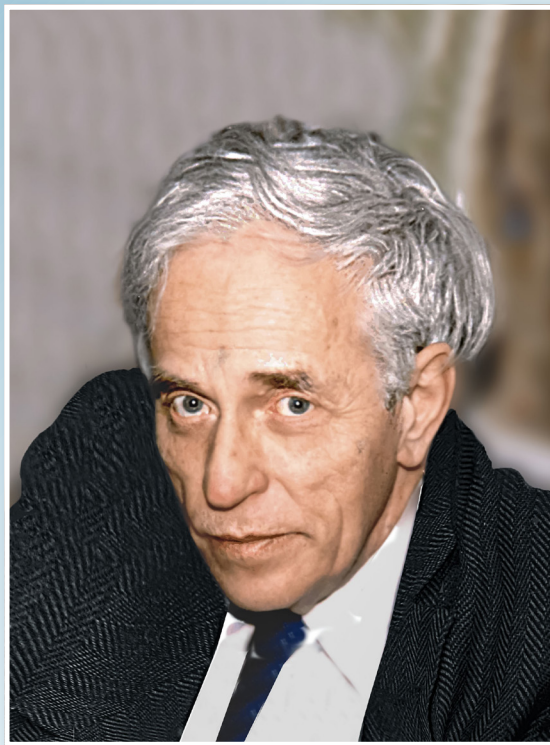
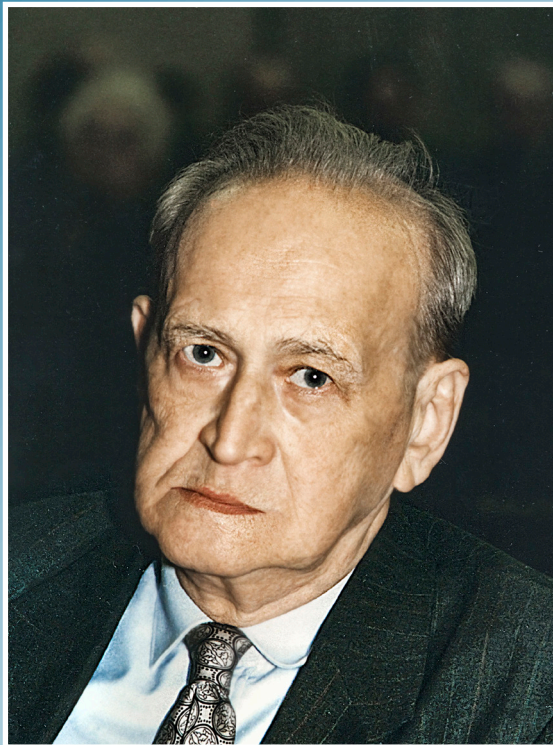
▲
Академики (слева направо):
М.А. Марков, И.М. Франк, Н.Н. Боголюбов

В разные годы ИЯИ РАН руководили:

- ◆ академик РАН **Альберт Никифорович Тавхелидзе**, с момента основания Института в 1970 г. по 1987 г.
- ◆ академик РАН **Виктор Анатольевич Матвеев**, с 1987 г. по 2014 г.
- ◆ член-корреспондент РАН **Леонид Владимирович Кравчук**, с 2014 г. по 2020 г.
- ◆ профессор РАН **Максим Валентинович Либанов**, с 2020 г. по настоящее время.

С момента основания ИЯИ РАН в течение всей его истории основное внимание было сфокусировано на создании и развитии уникальных научно-исследовательских установок и центров коллективного пользования, среди которых можно выделить:

1. Самый мощный в Евро-Азиатском регионе линейный ускоритель протонов (Троицк, Москва), обеспечивающий проведение фундаментальных и прикладных исследований в области ядерной и нейтронной физики, конденсированного состояния вещества, разработку технологий производства широкого спектра радиоизотопов, работу комплекса лучевой терапии и многих других приложений.



▲
Академики (слева направо):
Г.Т. Зацепин, А.Е. Чудаков

2. Баксанская нейтринная обсерватория (пос. Нейтрино, Кабардино-Балкарская Республика) с комплексом крупномасштабных подземных нейтринных телескопов и наземных установок большой площади для исследований в области физики солнечных нейтрино, физики космических лучей и нейтринной астрофизики. На Баксанском галлий-германиевом нейтринном телескопе выполнены прецизионные измерения скорости захвата солнечных нейтрино ядрами галлия, которые, 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. Начиная с середины 2019 года проводится новый эксперимент BEST (Baksan Experiment for Sterile Transition). Цель эксперимента — исследование осцилляций нейтрино на рекордно коротких расстояниях и возможное обнаружение нейтрино нового типа, так называемого стерильного нейтрино. В лаборатории низкофоновых исследований получены лучшие в мире ограни-

чения на вероятность двойного К-захвата в ядрах ^{78}Kr , ^{124}Xe и двойного бета-распада ряда элементов. Эксперимент Ковер-3 с крупнейшим в мире компактным мюонным детектором направлен на достижение рекордной чувствительности к диффузному гамма-излучению с энергией выше 100 ТэВ.

3. На озере Байкал (Иркутская область) Институтом ядерных исследований РАН в коллаборации с ОИЯИ создан уникальный нейтринный телескоп, входящий в Глобальную нейтринную сеть (GNN) как важнейший элемент сети в Северном полушарии Земли. Нейтринный телескоп Baikal-GVD предназначен для регистрации и исследования потоков нейтрино сверхвысоких энергий от астрофизических источников. Эффективный объем установки в задаче регистрации ливневых событий от нейтрино составляет 0,35 кубического километра. Одновременно с набором данных продолжается наращивание телескопа до объема 1 кубический километр.

4. Установка по измерению массы электронного антинейтрино в бета-распаде трития «Троицк-ню-масс». Полученное на этой установке ограничение на массу нейтрино оставалось лучшим в мире в течение 15 лет. Рекорд «Троицк-ню-масс» был побит в 2019 году. Это удалось осуществить на установке KATRIN в Германии, с участием ученых ИЯИ РАН. Дизайн установки KATRIN представляет собой увеличенную модель эксперимента «Троицк-ню-масс», изначально предложенную академиком **В.М. Лобашевым**.

В ИЯИ РАН создан ряд инновационных высокотехнологических разработок. Разработаны технологии производства широкого спектра радиоактивных изотопов для диагностики и терапии в медицине и технических целей, включая стронций-рубидиевый генератор для ПЭТ.

Создается центр лучевой терапии, в котором проведено лечение первых групп больных. Разработаны инновационные приборы и методики медицинского и технического применения, в числе которых, комплекты радиационной защиты для МЧС России, исследовательский денситометр, оборудование ксенонового наркоза для хирургической практики.

В ИЯИ РАН разработана ускоряющая структура, используемая при создании ускорителей J-PARK в Японии и PITZ



в центре DESY в Германии. Разработанный в ИЯИ РАН под руководством **Л.В. Кравчука** и **А.В. Фещенко** монитор формы сгустков установлен во всех ведущих международных ускорительных центрах, включая SSC, CERN, DESY, KEK, J-PARK, SNS, LANSCE, FRIB, GSI, ESS и ОИЯИ.

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

Широко известны результаты теоретических исследований ученых Института в области физики высоких энергий, элементарных частиц и космологии, в том числе: разработка методов теории возмущений в квантовой теории поля, изучение

▲
Директора ИЯИ РАН (слева направо):
А.Н. Тавхелидзе, В.А. Матвеев, Л.В. Кравчук, М.В. Либанов

▲
Академики и члены-корреспонденты РАН
(слева направо, сверху вниз):
В.А. Рубаков, В.А. Кузьмин, В.М. Лобашев, Г.В. Домогацкий, В.Н. Гаврин, О.Г. Ряжская, И.И. Ткачев, Д.С. Горбунов, С.В. Троицкий

основного состояния (вакуума) в калибровочных теориях, разработка методов исследования динамики сильных взаимодействий адронов вне рамок теории возмущений, исследование процессов, выходящих за рамки Стандартной модели элементарных частиц, создание первых моделей мира на бране, разработка принципов и поиск механизмов образования барионной асимметрии Вселенной, изучение взаимосвязи физики частиц, астрофизики и космологии, построение моделей темной материи и темной энергии. Эти работы были отмечены многочисленными наградами. В 2020 году, академик **В.А. Рубаков** был награжден престижной Гамбургской премией по теоретической физике за важнейшие продвижения в раскрытии загадки происхождения Вселенной. В честь ученых ИЯИ РАН названы два эффекта в астрофизике частиц. Эффект высокоэнергетического обрезания спектра космических лучей ультравысоких энергий назван в честь Кеннета Грейзена (США), академика **Г.Т. Зацепина** и члена-корреспондента РАН **В.А. Кузьмина**. Эффект осцилляций нейтрино в веществе назван в честь **С.П. Михеева**, **А.Ю. Смирнова** и **Линкольна Вольфенштейна** (США).

Ученые ИЯИ РАН сотрудничают со многими ведущими лабораториями, институтами и университетами мира, принимают активное участие в работе целого ряда крупных международных экспериментов в ЦЕРН (Швейцария), ОИЯИ (Россия), Германии, Японии, Италии, США, Китае, Франции, Испании и других стран. Институт ведет образовательную деятельность, имея собственную аспирантуру и базовые кафедры в МФТИ, МГУ, МИФИ, КБГУ, сотрудничая с другими университетами России.

Будущее научных исследований ИЯИ РАН тесно связано с проектами класса мега-сайенс. Планируется завершить строительство Байкальского нейтринного телескопа Baikal-GVD с эффективным объемом 1 кубический километр. Такой объем позволит регистрировать нейтрино астрофизического происхождения с такой же чувствительностью, как в эксперименте IceCube в Южном полушарии и позволит установить их происхождение. Подготовлен проект модернизации Линейного ускорителя протонов в Троицке с использованием сверхпроводящих резонаторов. Проект позволит достичь энергии 1 ГэВ и мощности пучка 1 МВт. На базе Линейного ускорителя протонов

планируется строительство крупного центра ядерной медицины. Подготовлено предложение создания Нового Баксанского нейтринного телескопа (НБНТ). В качестве рабочего вещества НБНТ планируется использовать 10 килотонн сверхчистого жидкого сцинтиллятора. Этот эксперимент сможет зарегистрировать нейтрино CNO-цикла термоядерных реакций в Солнце. Чувствительность эксперимента позволит подтвердить одну из нескольких существующих моделей Солнца.

Сильноточные ускорители на средние энергии предназначены для проведения как фундаментальных, так и прикладных исследований в области физики атомного ядра и элементарных частиц, нейтронной физики, ядерной энергетики, материаловедения, медицины и в иных областях. Ускорители входят в состав исследовательских комплексов, которые помимо собственно ускорителей включают экспериментальные установки, а также другую научную и инженерную инфраструктуру. Линейный ускоритель ионов водорода ИЯИ РАН является основой комплекса, получившего в свое время название — **Московская мезонная фабрика**. В настоящее время, в связи с изменением научных задач, используется другое название — **Комплекс сверхточного линейного ускорителя протонов и отрицательных ионов водорода ИЯИ РАН**

Исследовательский комплекс расположен в Москве в городе Троицке и включает в себя:

- ◆ сверхточный линейный ускоритель протонов и отрицательных ионов водорода, с проектной энергией до 600 МэВ, средним током пучка до 0,5 мА, импульсным током до 50 мА;
- ◆ экспериментальный зал с каналами первичных и вторичных частиц различной энергии, экспериментальными установками, системой диагностики пучков;
- ◆ нейтронный комплекс, включающий импульсные источники нейтронов ИН-06 и РАДЭКС, спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце, комплекс нейтронографических, рентгеновских установок, мессбауэровский 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 ускоренных протонов на узлы радиоэлектронной аппаратуры и иные изделия и материалы.



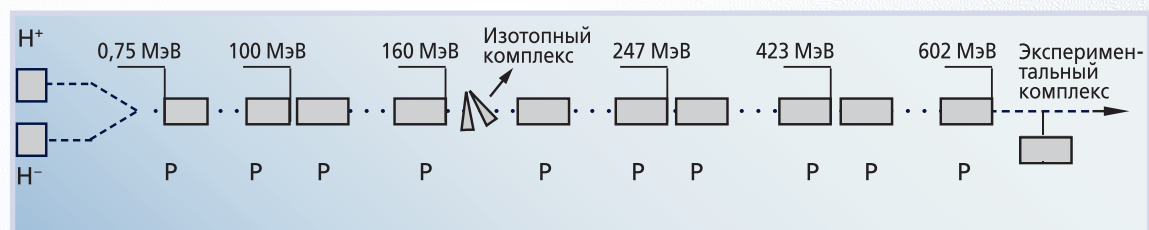
Комплекс сверхточного линейного ускорителя

История создания ускорителя

Сооружение сверхточного линейного ускорителя ионов водорода на энергию 600 МэВ и средний ток 0,5 мА являлось одной из главных задач при создании Института ядерных исследований АН СССР (ныне РАН). Постановление правительства СССР и ЦК КПСС о создании Института и сооружении линейного ускорителя в Троицке было принято в 1970 году.

Разработка проекта такой уникальной электрофизической установки проводилась в СССР во взаимодействии ведущих НИИ и НПО в области физики и техники электрофизических установок, мощных ВЧ приборов и др. Главным разработчиком проекта являлся Радиотехнический (впоследствии Московский радиотехнический) институт. Системы инъекции и фокусировки пучка разработаны и изготовлены в НИИЭФА им. Д.В.Ефремова. Мощные усилительные ВЧ приборы разрабатывались и изготавливались в НПО «Светлана» и НИИ «Титан». Проекты строительной части комплекса и систем энергоснабжения выполнены ГСПИ и ВНИПИ ТПЭП.

Созданный сверхточный 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 Евразийском



Структурная схема сильноточного линейного ускорителя ИЯИ РАН

регионе. На основе сильноточных линейных ускорителей ионов водорода такого

класса в США работают Лос-Аламосский центр нейтронных 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 включает:

- ◆ комплекс инжекторов с инжекторами ионов H^+ и H^- , с соответствующими инжекционными трактами.
- ◆ начальную часть ускорителя до энергии 100 МэВ,
- ◆ основную часть ускорителя до энергии 600 МэВ:

В инжекторе ионов H^+ в качестве источника используется дуоплазматрон, работающий с частотой повторения импульсов до 100 Гц при длительности импульсов до 200 мкс и импульсном токе до 100 мА. В инжекторе ионов H^- применен поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов водорода с рядом Пеннинга. Ускоряющее напряжение 400 кВ формируется с помощью высоковольтного импульсного трансформатора.

Начальная часть ускорителя состоит из бустерного ускоряющего резонатора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой и пяти ускоряющих резонаторов с трубками дрейфа, работающих на частоте 198,2 МГц.

Корпуса резонаторов выполнены по уникальной технологии из титаналюминидов. Система высокочастотного питания ускоряющих резонаторов включает семь каналов усиления, один из которых резервный, с выходной импульсной мощностью до 3 МВт.

В ускоряющей системе основной части ускорителя, работающей на частоте 991 МГц, используется ускоряющая структура с шайбами и диафрагмами. Система имеет общую длину около

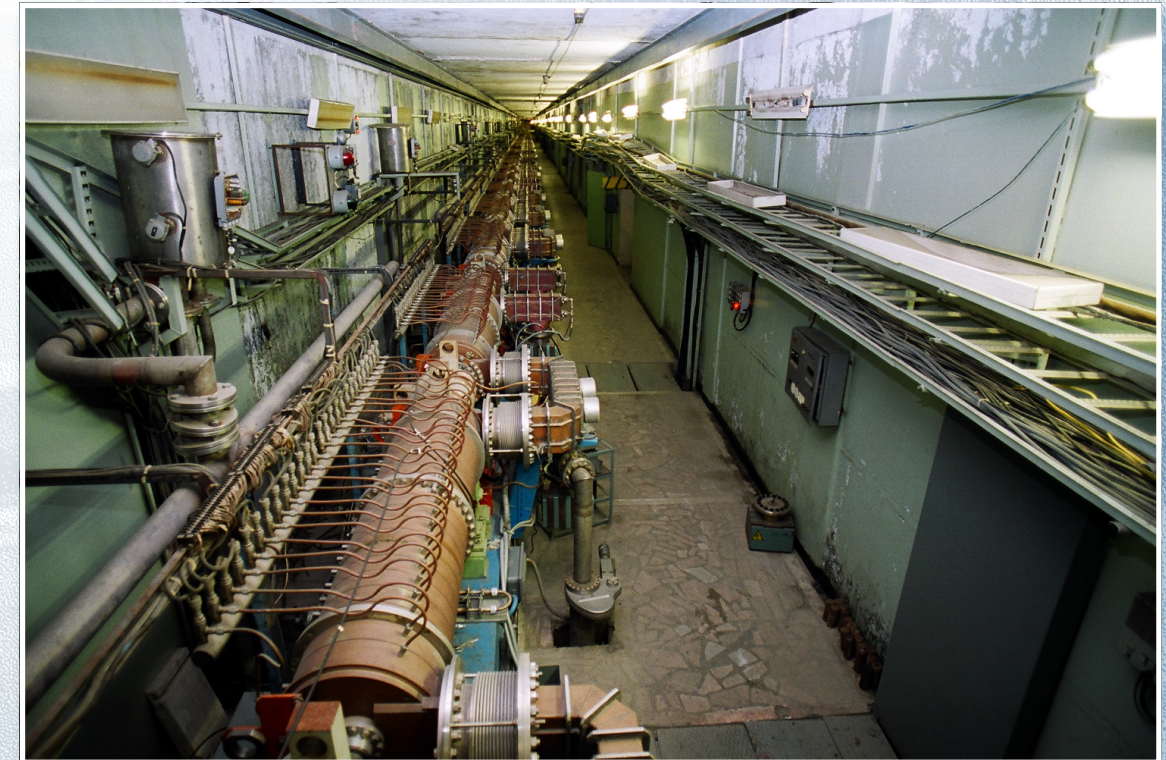
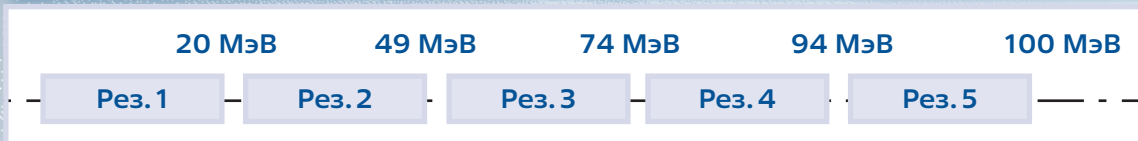
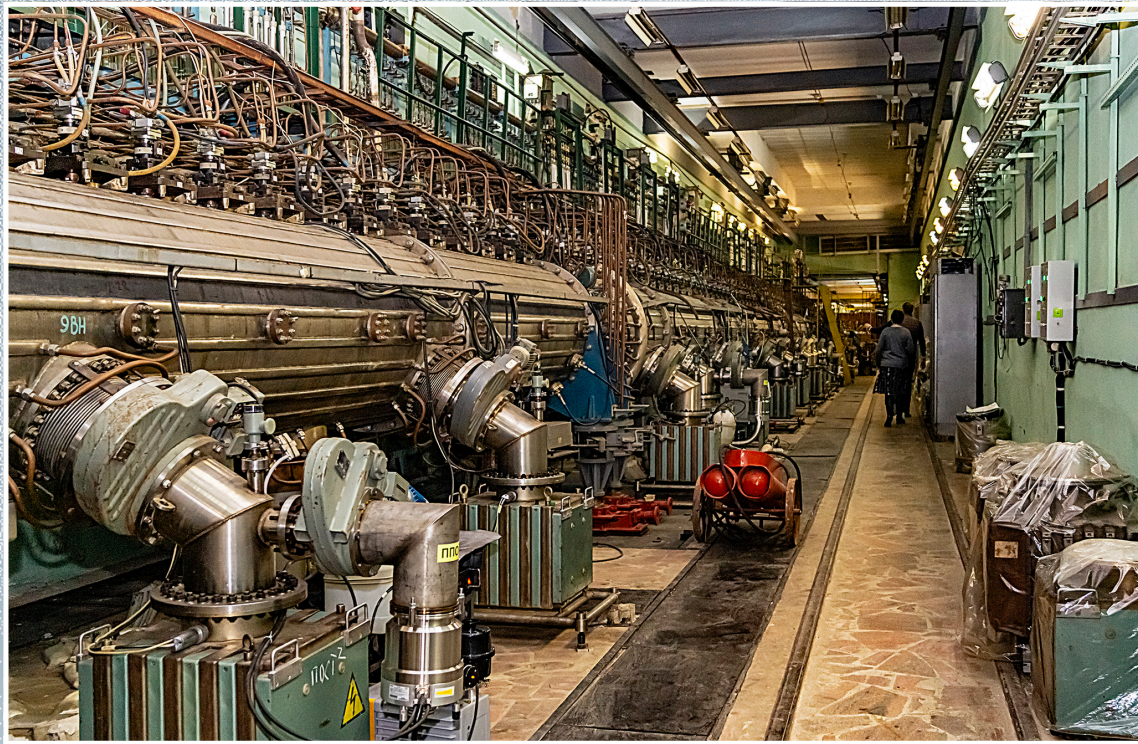


Слева: инжектор ионов H^+ ; справа: инжекционные тракты протонов и H^-

300 метров, и состоит из 27 четырехсекционных ускоряющих и одного двухсекционного согласующего резонатора. Весь объем работ по созданию ускоряющей системы основной части, начиная с точной механической обработки модулей и высокотемпературной пайки секций и заканчивая радиотехнической настройкой, ВЧ тренировкой и запуском системы с пучком в целом, был выполнен сотрудниками Института. Система высокочастотного питания основной части включает 31 канал усиления, на основе клистронов КИУ-40 с выходной импульсной мощностью 4,7 МВт. Управление ускорителем осуществляется с центрального пульта.

Первый ускоренный до энергии 20 МэВ пучок был получен в 1988 году. Энергия 100 МэВ была получена в 1990 году, 160 МэВ в 1991 году, 250 МэВ в 1992 году. Регулярная работа ускорителя на физические и прикладные задачи была начата в 1993 году. С тех пор проведено 140 сеансов общей продолжительностью свыше 50 тысяч часов. Основные проектные, достигнутые и текущие параметры ускорителя приведены в таблице.

Параметр	Проект	Достигнуто	Состояние на 2020 год
Энергия, МэВ	600	502	268
Импульсный ток, мА	50	16	12
Частота повторения, Гц	100	50	50
Длительность импульса, мкс	100	0,3÷200	0,3÷200
Средний ток, мкА	500	150	120



▲
Начальная часть ускорителя с энергией до 100 МэВ

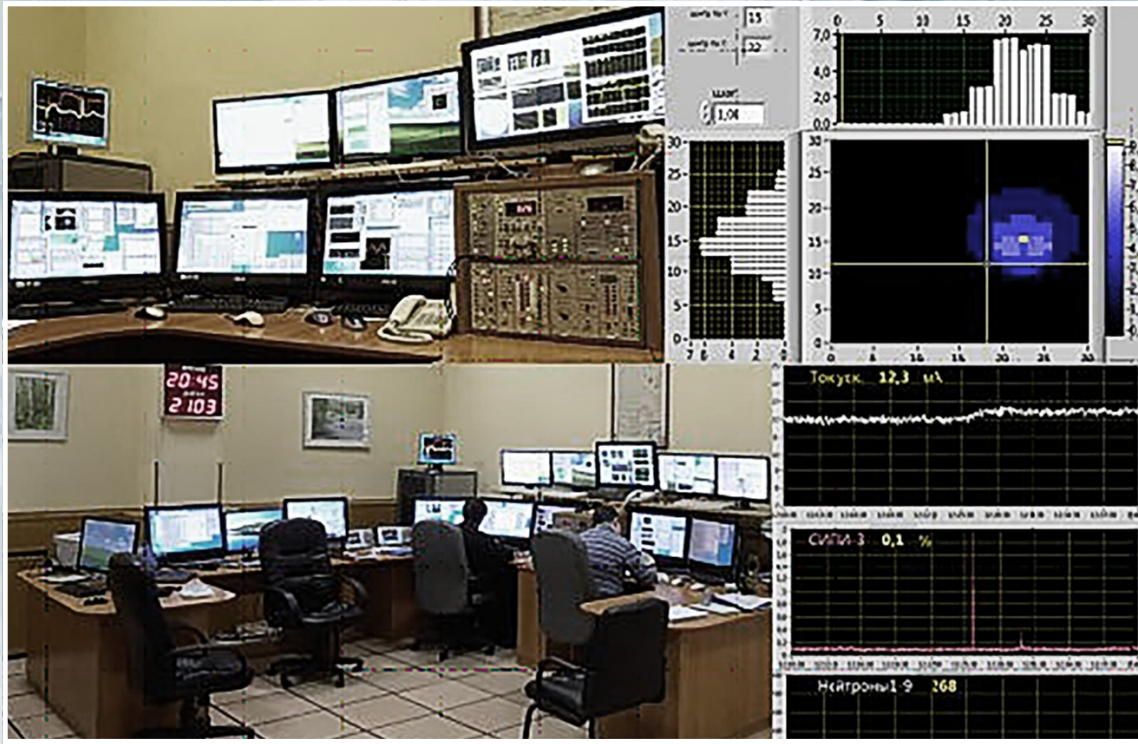
▶
Основная часть ускорителя:
Галерея ВЧ питания основной части ускорителя (вверху)

Ускоряющие резонаторы основной части ускорителя (внизу)

В основном работы на ускорителе ведутся с пучком протонов. В 2020 году реализован экспериментальный режим совместного ускорения двух пучков ионов H^+ и H^- . Ускорение осуществляется в одном ВЧ импульсе со сдвигом по времени сгустков частиц с разными знаками заряда.

Эксплуатацию и постоянную модернизацию ускорителя и каналов транспортировки пучков на экспериментальные установки обеспечивает отдел ускорительного комплекса (ОУК). Функционирование инженерной инфраструктуры обеспечивается службами главного инженера Института.

Первым руководителем ОУК являлся доктор технических наук, профессор *Сергей Константинович Есин*, уже имевший опыт участия в сооружении крупных ускорителей. *С.К. Есин*



Центральный пульт управления ускорителем
(фотомонтаж)

внес определяющий вклад в работы по сооружению и физическому пуску линейного ускорителя ИЯИ РАН. С 1998 по 1999 гг. отдел возглавлял доктор физико-математических наук **Петр Николаевич Остроумов**, а с 1999 года и по настоящий день отделом руководит доктор физико-математических наук **Александр Владимирович Феценко**. Главным инженером ОУК с 1975 года является **Валерий Львович Серов**. Следует также отметить, что доктор технических наук, член-корреспондент РАН **Леонид Владимирович Кравчук** (директор Института с 2015 по 2020) долгие годы являлся сотрудником ОУК и непосредственно внес существенный вклад в сооружение и развитие ускорителя.

Сейчас в ОУК трудятся свыше 70 высококвалифицированных специалистов, в том числе 4 доктора и 5 кандидатов наук. В процессе сооружения, запуска, эксплуатации и модернизации ускорителя коллективом отдела достигнут уникальный уровень понимания процессов и опыта решения практических задач. В ОУК выросли признанные эксперты мирового уровня в области физики и техники линейных ускорителей.



Лауреаты премии Правительства РФ после награждения в Доме Правительства.
Слева направо: **А.П. Федотов, Е.Д. Лебедев, С.К. Есин, В.А. Матвеев, Б.И. Бондарев, А.Н. Тавхелидзе, Н.И. Уксусов, Л.В. Кравчук, О.Д. Пронин, В.Л. Серов**

Результаты сотрудников ОУК обеспечили как признание их авторитета, так и применение их разработок не только в ИЯИ РАН, но и в ведущих ускорительных научных центрах России и всего мира.

В 2001 премия Правительства РФ в области науки и техники присуждена за разработку и сооружение ускорителя. В числе награжденных — сотрудники ОУК **С.К. Есин, Л.В. Кравчук, В.Л. Серов, О.Д. Пронин**.

В 1992 году за создание прибора для измерения с пикосекундным разрешением продольного распределения заряда в сгустках ускоренного пучка премия Международного совещания по диагностике пучка — Кубок Фарадея — присуждена **А.В. Феценко**.

В 2006 г. премия РАН им. В.И. Векслера за выдающиеся работы по физике ускорителей присуждена кандидату физико-математических наук **А.С. Белову** и доктору физико-математических наук **А.Н. Зеленскому** за цикл работ «Создание высокоинтенсивных источников поляризованных ионов для ускорителей».



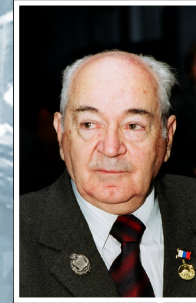
Вручение премии Кубок Фарадея
(Беркли, США, 1992 год)

В 2008 году за большой вклад в развитие физики и техники ускорителей, создание и развитие сильноточного линейного ускорителя — основы комплекса Московской мезонной фабрики, премией имени академика М.А. Маркова награждены **С.К. Есин**, **Л.В. Кравчук** и **А.В. Фещенко**.

В 2015 году премия РАН имени В.И. Векслера за выдающиеся работы по физике ускорителей присуждена **Л.В. Кравчуку** и доктору физико-математических наук **В.В. Парамонову** за цикл работ «Исследование, разработка, сооружение и запуск ускоряющих структур».

В ОУК разработан источник поляризованных ионов H^+ , H^- , D^+ и D^- , использующий впервые предложенный и изученный в ИЯИ РАН метод их генерации. Используется реакция резонансной перезарядки в плазме между поляризованными атомами и неполяризованными ионами. В сотрудничестве ИЯИ РАН и лаборатории IUCF, USA такой источник реализован на ускорителе IUCF. В сотрудничестве с ОИЯИ создан источник поляризованных дейтронов и протонов с использованием накопления поляризованных атомов в области перезарядки.

Неотъемлемой частью интенсивных линейных ускорителей адронов становится разработанный в ОУК прибор для измерения продольного распределения заряда в ускоряемых сгустках ионов, обеспечивающий разрешение по фазе лучше одного гра-



Сотрудники ОУК — лауреаты премии им. академика М.А. Маркова: (**С.К. Есин**, **Л.В. Кравчук**, **А.В. Фещенко**) и лауреаты премии им. В.И. Векслера (**А.С. Белов**, **В.В. Парамонов**, **Л.В. Кравчук**)

дуса. Принцип действия прибора основан на когерентном преобразовании временной микроструктуры исследуемых сгустков в пространственное распределение вторичных электронов, выбиваемых из мишени — тонкой проволоки, вводимой в пучок на время измерений, посредством поперечной модуляции электронов по импульсу с помощью высокочастотного отклоняющего поля. Такие приборы разработаны и созданы в Институте для ускорителей ЦЕРН, DESY, GSI, ESS, KEK, J-PARC, SSC, SNS, LANSCE, FRIB.

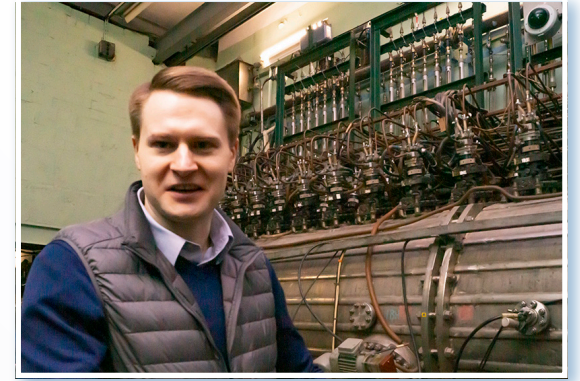
Для ускорения частиц со скоростями, близкими к скорости света, в ОУК предложена ускоряющая структура, превосходящая существующие аналоги по комплексу параметров. В сотрудничестве с лабораторией DESY структура апробирована в долговременной эксплуатации на пучках электронов установки PITZ. В результате дальнейших исследований, расширивших область применимости, структуры 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, примененные в ускорителе комплекса European XFEL. В ОУК сформировано направление создания специализированных отклоняющих структур для диагностики продольных распределений частиц в сгустках сверхвысокой яркости. С минимизированным уровнем собственных aberrаций структуры вносят минимальные искажения в измеряемое распределение и при этом обладают повышенной ВЧ эффективностью. Первая такая структура применена для диагностики ультракоротких сгустков электронов длительностью до 20 фемтосекунд в установке REGAE DESY.



В отделе ускорительного комплекса ведутся работы по подготовке кадров молодых научных специалистов и популяризации науки. Для этого проводятся экскурсии на наш ускоритель. На рисунках слева участники школы-семинара студентов и молодых ученых на такой экскурсии.

Список всех публикаций сотрудников ОУК представлен на сайте ОУК <http://www.inr.ru/~ouk/Biblio.htm>.



▲
А.С. Гаврилов рассказывает о работе ускорителя

▲
Экскурсия на ускоритель для участников школы-семинара студентов и молодых ученых

▼
Коллектив отдела ускорительного комплекса (фото начала XXI века)



Отдел физики высоких энергий (ОФВЭ) был создан в 2002 году.

Основные подразделения отдела:

- ◆ лаборатория физики электрослабых взаимодействий (заведующий **Ю.Г. Куденко**);
- ◆ лаборатория физики элементарных частиц (заведующий **В.Н. Болотов**);
- ◆ лаборатория моделирования физических процессов (общее руководство **Н.В. Красников** — до 2014 г.);
- ◆ группа БАК;
- ◆ в 2006 году в отдел была включена лаборатория новых методов детектирования нейтрино и элементарных частиц (заведующий **И.М. Железных**)

Отдел занимается исследованиями в области физики высоких энергий и нейтринной физики. Основные эксперименты с участием сотрудников отдела проводятся на ускорителях LHC и SPS в ЦЕРН, на протонном ускорителе J-PARC в Японии и ускорителе У-70 в Протвино.

Премии и награды сотрудников отдела:

- ◆ премия им. М.А. Маркова (**В.Н. Болотов, И.М. Железных, Ю.Г. Куденко**)
- ◆ премия «За достижения в области фундаментальной физики» — 2016 г. (Breakthrough Prize in Fundamental Physics) (**Ю.Г. Куденко, Н.В. Ершов, О.В. Минеев, М.М. Хабибуллин, А.Н. Хотянцев, А.О. Измайлов**, в составе коллабораций K2K и T2K)
- ◆ награда коллаборации СМС (ЦЕРН) — 2010 г., за руководство командой лаборатории ЛФД (лавинных фотодиодов) ЦЕРН (**Ю.В. Мусиенко**)
- ◆ премия коллаборации СМС (ЦЕРН) — 2016 г., за исследования по радиационной стойкости электроники для адронного калориметра СМС (**Д.А. Тлисов**)
- ◆ премия Правительства Москвы молодым ученым — 2019 г. (**А.О. Измайлов, А.Т. Шайхиев**)
- ◆ премия для молодых ученых им. А.Н. Тавхелидзе — 2018 г. (**А.О. Измайлов, А.Т. Шайхиев**)

Основные результаты, полученные сотрудниками отдела, представлены ниже.

Лаборатория физики электрослабых взаимодействий (ЛФЭСВ)

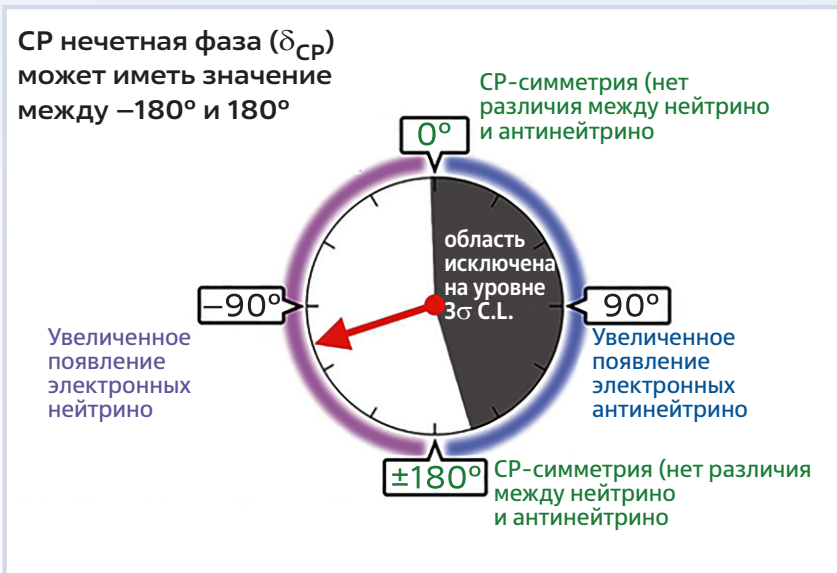
Сотрудники лаборатории занимаются исследованиями свойств одной из самых интересных и загадочных элементарных частиц — нейтрино. Исследования осцилляций нейтрино проводились в первом ускорительном эксперименте с длинной базой K2K (KEK-to-Kamioka), Япония, в котором в качестве источника нейтрино использовался протонный синхротрон с энергией 12 ГэВ к КЕК, а расстояние до дальнего детектора Супер-Камиоканде составляло 250 км. В эксперименте были подтверждены осцилляции мюонных нейтрино с «атмосферными» параметрами. Одновременно началась подготовка к следующему эксперименту — T2K (Tokai-to-Kamioka), который начал набор данных в 2010 г. В этом эксперименте нейтрино образуются в ускорительном комплексе J-PARC, в Токай. На территории J-PARC, в 280 метрах от мишени, установлены комплексы ближних детекторов INGRID и ND280, а в качестве дальнего детектора, как и в случае K2K, но на расстоянии 295 км, используется водный черенковский детектор Супер-Камиоканде. Сотрудники ЛФЭСВ 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 2011 г.



Ю.Г. Куденко

Общая схема эксперимента T2K: нейтрино из протонного ускорителя J-PARC в Токай направляются в сторону дальнего детектора Супер-Камиоканде, расположенного в 295 км под горой Икенояма





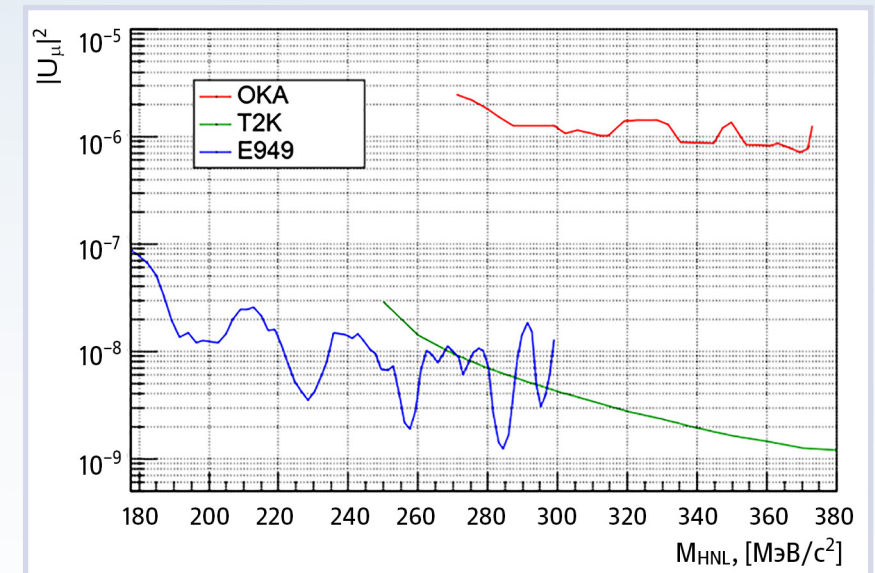
Область возможных значений CP нечетной фазы δ_{CP} . Стрелка указывает на наиболее вероятное значение фазы, полученное в эксперименте T2K

эксперимент T2K впервые продемонстрировал, что в пучке мюонных нейтрино на расстоянии 295 км появляются нейтрино электронного типа. В 2016 г. участники пяти нейтринных экспериментов, в том числе K2K и T2K, включая сотрудников ЛФЭСВ, были удостоены премии «За достижения в области фундаментальной физики» — за исследования нейтринных осцилляций.

В 2019 году в эксперименте T2K были получены наилучшее в настоящее время ограничения на параметр нарушения фундаментальной CP-симметрии (комбинации зарядовой и пространственной четности) в лептонном секторе Стандартной модели и получено указание на максимальное CP нарушение, которому соответствует значение параметра, CP нечетной фазы δ_{CP} , около -90 градусов.

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 CP-нарушению.

Как ожидается, модернизированный ближний детектор ND280 с 2027 г. станет частью нейтринного эксперимента следующего поколения — Гипер-Камиоканде, в подготовке кото-



Верхний предел (90% CL) на параметр смешивания нейтрального лептона (массивного нейтрино) и мюонного нейтрино, полученные в экспериментах OKA, E949 и T2K

рого принимают участие сотрудники лаборатории, а также аспиранты и студенты МФТИ и МИФИ.

Сотрудники ЛФЭСВ и лаборатории физики элементарных частиц занимаются исследованиями в области каонной физики. При их активном участии в эксперименте E949 в БНЛ (США) с остановленными каонами был обнаружен сверхредкий распад $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, а затем первые события этого распада были обнаружены в распадах каонов на лету в эксперименте NA62 (ЦЕРН). Сотрудники отдела 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. Ограничения, полученные в экспериментах OKA, E949 и T2K показаны на рисунке.

Лаборатория моделирования физических процессов (МФП)

Лаборатория моделирования физических процессов при высоких энергиях была образована в начале 2003 года в целях обеспечения участия ИЯИ РАН в долгосрочной программе совместных исследований в рамках международного проекта БАК (LHC) и других совместных проектов Европейского

центра ядерных исследований (ЦЕРН, Женева) в соответствии с Соглашением о сотрудничестве Россия — ЦЕРН и взятыми обязательствами, организации работ по физическому обеспечению программ экспериментальных исследований на пучках Большого адронного коллайдера (БАК). Сотрудники лаборатории МФП принимают активное участие в эксперименте CMS (Compact Muon Solenoid), проводимом на БАК, а также в экспериментах CAST (CERN Axion Solar Telescope), ICARUS (Imaging Cosmic And Rare Underground Signals), AEGIS (Antihydrogen Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy) и NA64 (CERN SPS experiment for the search for the $A' \rightarrow \text{invisible}$ decays). С участием сотрудников лаборатории получены оценки интенсивности потоков аксионов, возникающих от конверсии гамма-квантов высокой энергии в протяженных 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 звезд (ICARUS), проводятся измерения ускорения свободного падения свободных атомов антиводорода (AEGIS),

получены рекордные ограничения на константу смешивания бозона A' и фотонов (NA64).

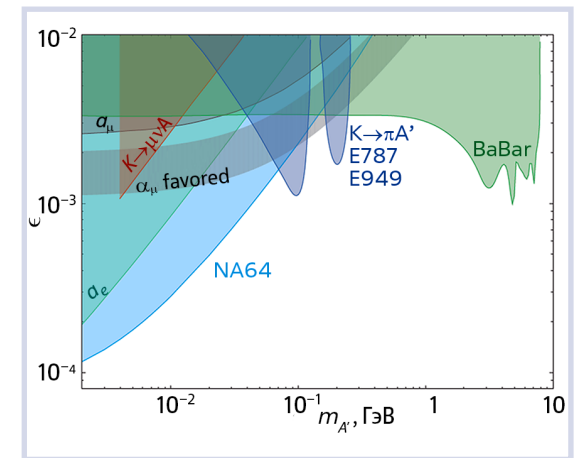
Сотрудники лаборатории МФП — Ю. Андреев, А. Дерменев, С. Гниненко, А. Корнеев, М. Кирсанов, Н. Красников, Д. Тлисов, А. Торопин — соавторы статьи «Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC» в журнале Physics Letters B об открытии бозона Хиггса, одном из самых ярких открытий в физике высоких энергий, отмеченном в 2013 году Нобелевской премией.

Основной целью эксперимента NA64, ЦЕРН, в котором определяющая роль принадлежит сотрудникам лаборатории моделирования физических процессов, является поиск рождения легкой темной материи в распадах «темных» фотонов $A' \rightarrow \text{invisible}$. На рисунке показана область параметров A' , исключенная в эксперименте NA64. В частности, этот результат исключает невидимые A' с массой менее 100 МэВ для объяснения мюонной $g-2$ аномалии.

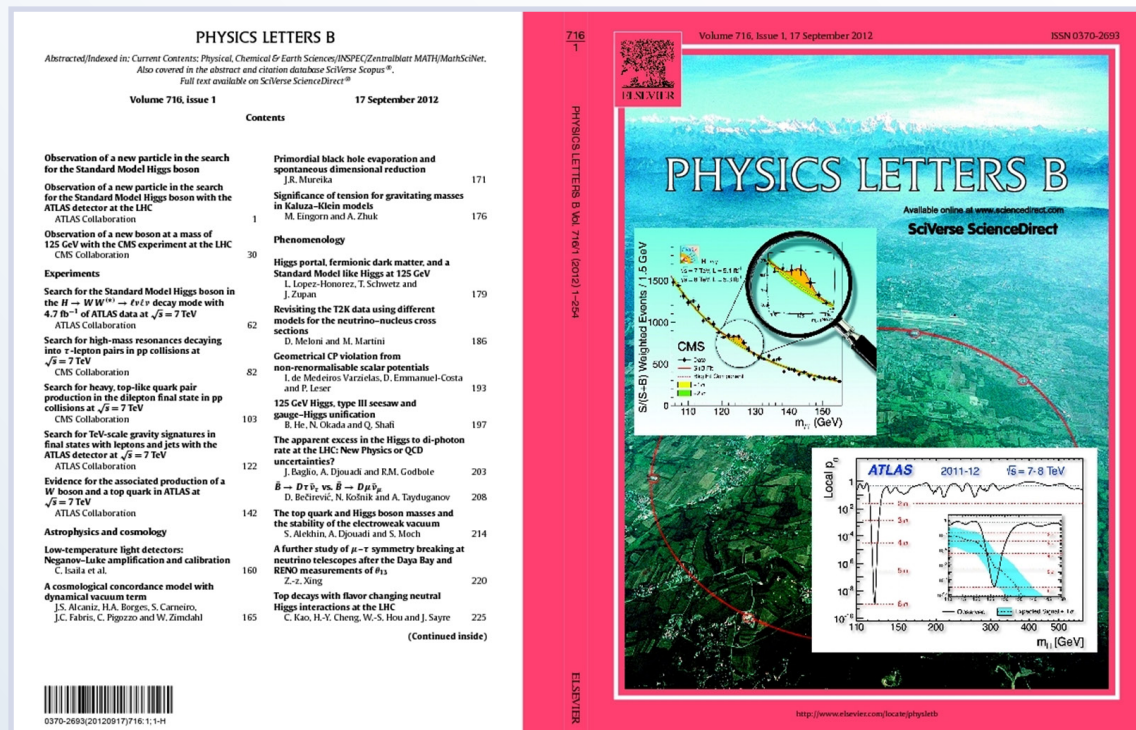
Сотрудники отдела принимают участие в эксперименте LHCb. К основным результатам, полученным в этом эксперименте, относятся открытие CP нарушения в распадах очарованных D0 мезонов, открытие тетракварка, состоящего из двух очарованных кварков и двух очарованных антикварков, открытие новых барионов, состоящих из c , s и d кварков и др.

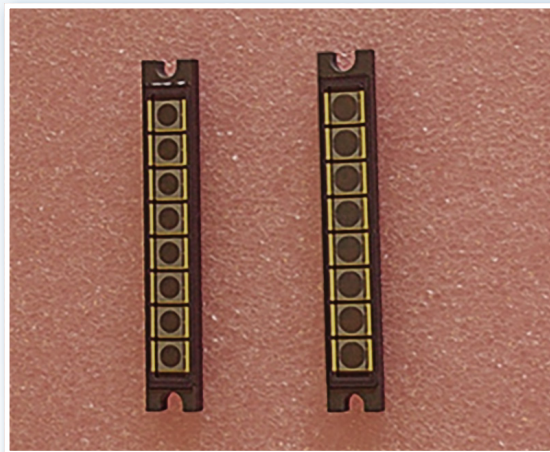
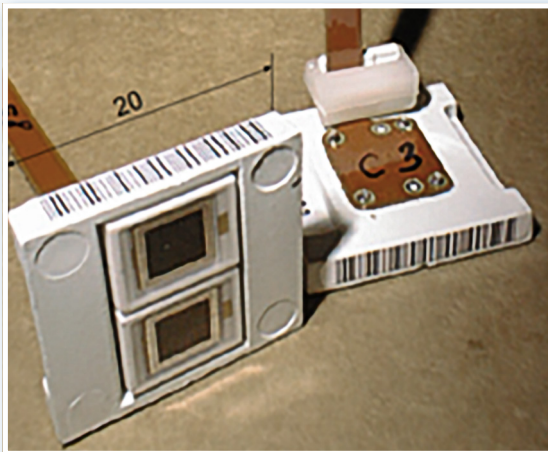
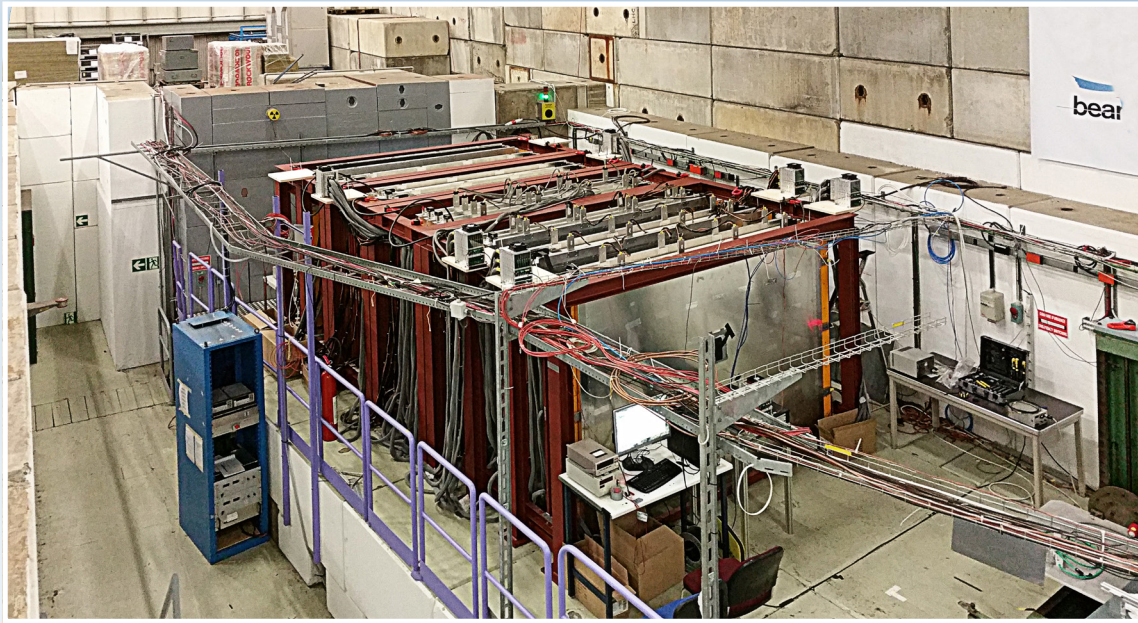
Сотрудники отдела внесли значительный вклад в разработку и создание детекторов для коллайдерных и нейтринных экспериментов. На рисунке показан магнитный детектор Baby-MIND, который был разработан и изготовлен ИЯИ РАН, Университете Женевы и ЦЕРН для эксперимента T2K. Детектор установлен в J-PARC на нейтринном канале T2K и начал набор статистики с пучками мюонных нейтрино и антинейтрино в 2018 г.

В 1998 году руководством эксперимента CMS было принято решение о создании в ЦЕРНе лаборатории лавинных фотодиодов (ЛФД) для разработки радиационно-стойких кремниевых



Область исключенных на уровне 90% доверительной вероятности параметров темного фотона $m_{A'}$ и ϵ в эксперименте NA64





Вверху: детектор Baby-MIND во время теста на канале T9 в ЦЕРН

В нижнем ряду: ЛФД электромагнитного калориметра (слева), 8-канальные линейки КФЭУ для адронного калориметра CMS (справа)

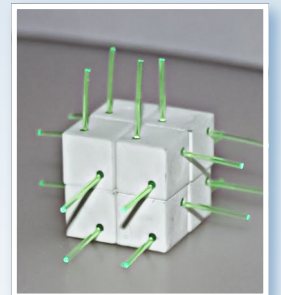
ЛФД для электромагнитного калориметра CMS. В создании и работе лаборатории принял активное участие сотрудник ОФВЭ Ю.В. Мусиенко. Были проведены исследования различных структур ЛФД и измерения параметров около 140000 ЛФД для электромагнитного калориметра CMS, которые показаны на рисунке.

В последующие годы была проведена разработка радиационно-стойких кремниевых фотоэлектронных умножителей (КФЭУ) для модернизации адронного калориметра CMS. Были



проведены измерения более 24 000 КФЭУ. В настоящее время в лаборатории ведутся работы по созданию КФЭУ способных работать в потоках быстрых нейтронов до 2×10^{14} частиц/см². КФЭУ будут использованы в сверхбыстром времяпролетном детекторе, а также в модернизированном переднем адронном калориметре CMS.

В ОФВЭ разработан и создается 3D сегментированный сцинтилляционный детектор нейтрино. Детектор размером $2 \times 2 \times 0,6$ м³ и массой 2 тонны состоит из 2 миллионов сцинтилляционных кубиков, каждый объемом 1 см³ с тремя ортогональными отверстиями, в которые вставлены спектросмещающие волокна для переизлучения и транспортировки сцинтилляционных сигналов к микропиксельным лавинным фотодиодам. Этот детектор будет установлен на нейтринном канале J-PARC вблизи пионерожающей мишени для исследований нейтринных осцилляций в эксперименте T2K с дальним детектором Супер-Камиоканде, а затем в эксперименте T2HK с дальним детектором Гипер-Камиоканде.



Плоскости сегментированного сцинтилляционного детектора (вверху); сцинтилляционные кубики со спектросмещающимися волокнами (внизу)

Отдел экспериментальной физики (ОЭФ) образован в 1976 году путем разделения отдела Мезонной фабрики на два: экспериментальной физики и ускорительного комплекса. С момента образования ОЭФ и до 2011 года им руководил выдающийся физик — академик РАН **Владимир Михайлович Лобашев**. С 2012 года отделом руководит **Игорь Иванович Ткачев**. ОЭФ по первоначальному замыслу был ориентирован на эксперименты на Мезонной фабрике. Благодаря огромной проектной интенсивности ускорителя перед отделом открывались перспективы прецизионных экспериментов в области ядерной физики и поиск редких процессов. Среди последних — конверсия мюона в электрон с нарушением лептонного числа и измерение упругого рассеяния нейтрино на электроны. Кроме того, проектируемый ускоритель должен был иметь большое прикладное значение.

Мезонная фабрика по не зависящим от института обстоятельствам строилась дольше, чем планировалось и была введена в эксплуатацию с параметрами, уступающими проектным. Сотрудникам отдела, тем не менее, удалось добиться выдающихся научных результатов. Проблемы со строительством Мезонной фабрики удалось компенсировать интенсивным сотрудничеством: лаборатории отдела ставили сложнейшие эксперименты во многих российских (ОИЯИ в Дубне, ИФВЭ в Протвино) и зарубежных (в частности, ЦЕРН, DESY, GSI, BNL, КЕК) центрах на трех континентах. Более того, непосредственно в ОЭФ были созданы другие важные установки, и поставлены уникальные эксперименты, главным из которых стал знаменитый эксперимент по прямому измерению массы нейтрино, давший рекордное ограничение на эту фундаментальную физическую величину. Этот рекорд продержался двадцать лет, а схема эксперимента стала классической. Она без изменений использована в новой гигантской международной установке KATRIN, на которой продолжен фактически тот же самый эксперимент, причем с активным участием сотрудников отдела. Наконец, удалось максимально эффективно использовать прикладные возможности запущенной Мезонной фабрики: создать одну из крупнейших в мире установок по получению радиоизотопов и открыть производство препаратов медицинского назначения, конкурентоспособное на международном уровне.



▲
Академик РАН **И.И. Ткачев** (слева)
Академик РАН **В.М. Лобашев** (справа)

Более подробно история, современное состояние и перспективы исследований ОЭФ изложены в разделах, посвященных его лабораториям.

«Троицк Нью-масс»

Поиск массы нейтрино в β -распаде трития

С 1983 года в отделе экспериментальной физики ведутся исследования по поиску эффективной массы электронного антинейтрино в β -распаде трития. Последовавшее вскоре обнаружение эффектов нейтринных осцилляций, надежно продемонстрировало отличие от нуля массы нейтрино и позволило измерить расщепление их массовых состояний. При этом абсолютная шкала масс остается неизвестной. Знание абсолютной шкалы массовых состояний нейтрино имеет важнейшее значение как для физики частиц, поскольку само существование массы у нейтрино указывает на новую физику как за пределами Стандартной модели, так и для космологии, где сумма масс всех типов нейтрино играет заметную роль в эволюции крупномасштабной структуры Вселенной. Поэтому, спустя почти сорок



лет, поиск эффективной массы нейтрино находится на переднем крае фундаментальной науки.

Начало работ в ИЯИ РАН было положено статьей *В.М. Лобашева* и *П.Е. Спивака*, в которой был предложен новый тип спектрометра электронов из β -распада трития, — электростатический спектрометр с адиабатической магнитной коллимацией. Предложенная конструкция позволяет получить рекордно высокое разрешение независимо от размера источника трития.

Новый метод был реализован в установке «Троицк ню-масс», 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, образованного в 2001 году в исследовательском центре в Карлсруэ, Германия, который имеет лицензию на работу с 40 г трития (примерно 400 ТБк). Общая компоновка установки KATRIN повторяет схему «Троицк ню-масс».

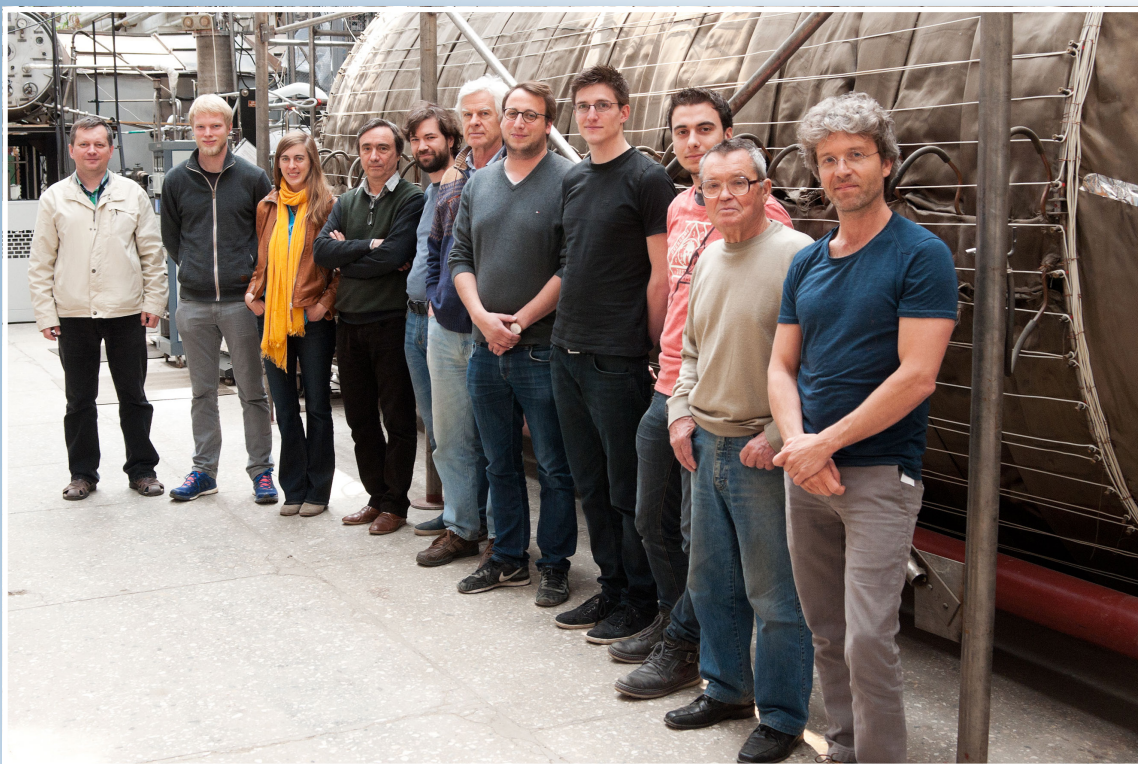
Для создания установки KATRIN понадобилось 17 лет. В 2018 году был осуществлен первый напуск трития в систему, которому была посвящена «Инаугурация KATRIN», состоявшаяся 11.06.2018. Весной 2019 г. на установке KATRIN, с участием сотрудников ОЭФ, начались сеансы набора данных. После их обработки предел на эффективную массу электронного антинейтрино был снижен до уровня 1,1 эВ.

Прямой поиск кэВ-ных стерильных нейтрино на установке «Троицк ню-масс»

После завершения в Троицке основной программы по измерению эффективной массы электронного антинейтрино было решено расширить энергетический диапазон измерения электронов из β -распада трития. Такая постановка эксперимента позволяет заняться поисками теоретически предсказываемых частиц — стерильных нейтрино. Незначительная примесь

В.М. Лобашев с участниками совещания по проекту KATRIN, которое проводилось в ИЯИ РАН в 2004 году (вверху)

Общий вид установки «Троицк ню-масс». Сотрудники ОЭФ вместе с немецкими и французскими коллегами после первых измерений в рамках международного сотрудничества по поиску стерильных нейтрино (внизу)



стерильных нейтрино должна искажать спектр электронов и может проявить себя как изгиб в энергетическом спектре. Актуальность поиска стерильных нейтрино определяется несколькими факторами. Стандартная модель физики частиц неполна. Об этом свидетельствуют ненулевая масса обычных нейтрино и существование темной материи во Вселенной. Оба явления могут быть объяснены в рамках одного предположения о существовании стерильных нейтрино с массой порядка 0,1–8 кэВ. Таким образом, поиск таких нейтрино является фундаментальной задачей как для физики элементарных частиц, так и для космологии и астрофизики.

В 2013 году, в рамках программы поиска стерильных нейтрино, были обработаны данные, набранные в 1994–2003 гг. на установке «Троицк ню-масс» на верхнем конце энергетического спектра электронов. Получены лучшие в мире ограничения на параметры тяжелых нейтрино с массой до 100 эВ.

В последующие годы продолжился набор статистики в более широком интервале энергий и в 2017 году были усилены ограничения на существование стерильных нейтрино в диапазоне до 3 кэВ.

Дальнейшее продвижение в область больших масс стерильных нейтрино связано с существенным развитием приборной базы и улучшением параметров детектора электронов. В сторону значительного улучшения энергетического разрешения детектора электронов. Для создания и использования нового типа детектора — кремниевого дрейфового детектора (SDD), было заключено соглашение о международном сотрудничестве между ИЯИ РАН и Институтом физики имени Макса Планка в Мюнхене — Германия, проект TRISTAN.

В 2017–2018 годах на установке «Троицк ню-масс» в рамках этого международного сотрудничества проведено несколько сеансов измерения спектра электронов в распаде трития в диапазоне 12–18,5 кэВ, что расширяет программу поиска стерильных нейтрино на еще более широкий диапазон масс в перспективе с большей чувствительностью.

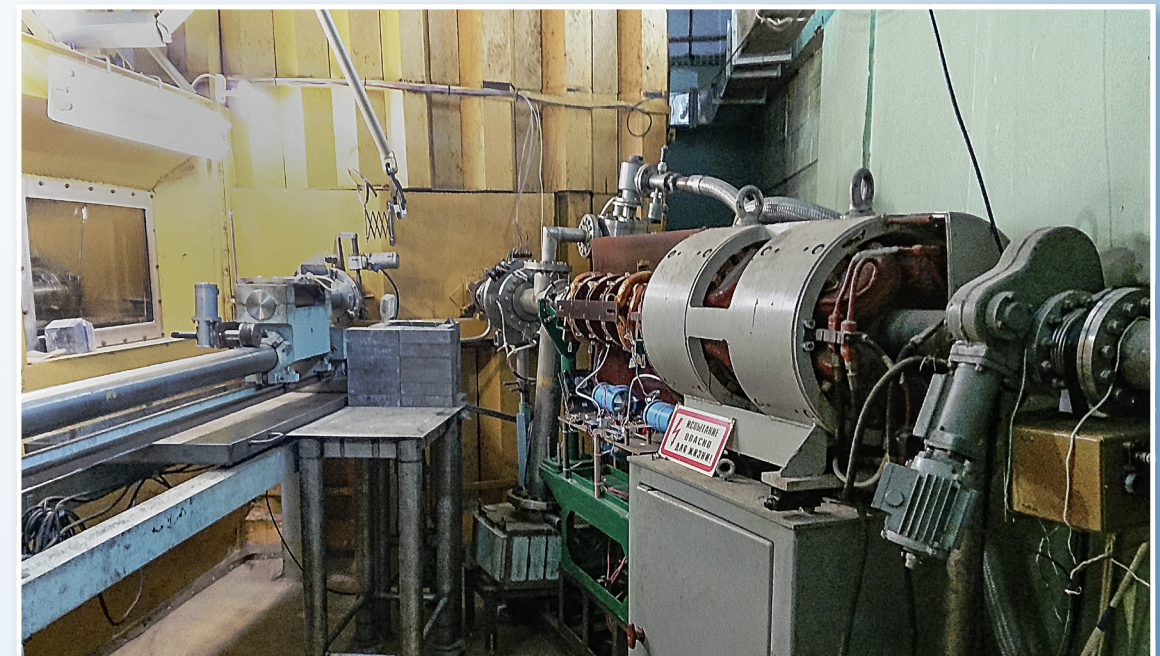
Лаборатория радиоизотопного комплекса

Лаборатория радиоизотопного комплекса была создана в 1989 году для проведения фундаментальных и прикладных исследований, связанных с производством и изучением различных радиоактивных изотопов. Работа лаборатории дает убедительный пример того, как систематические фундаментальные исследования обеспечивают успешное развитие инновационных технологий, которые внедряются и находят широкое применение. Установки лаборатории используются одновременно как для проведения исследований по ядерной физике и радиохимии, так и для наработки большого количества радиоизотопов для нужд медицины и техники.

Установка по облучению радиоизотопных мишеней протонным пучком линейного ускорителя Московской мезонной фабрики (Троицк) была создана в 1992 году и успешно используется для получения радиоизотопов медицинского и технического назначения.

На сегодняшний день эта установка является одной из крупнейших в мире по аккумулярованной для получения изотопов энергии и регулярно используется

Установка по облучению радиоизотопных мишеней протонным пучком линейного ускорителя Московской мезонной фабрики (г. Троицк)



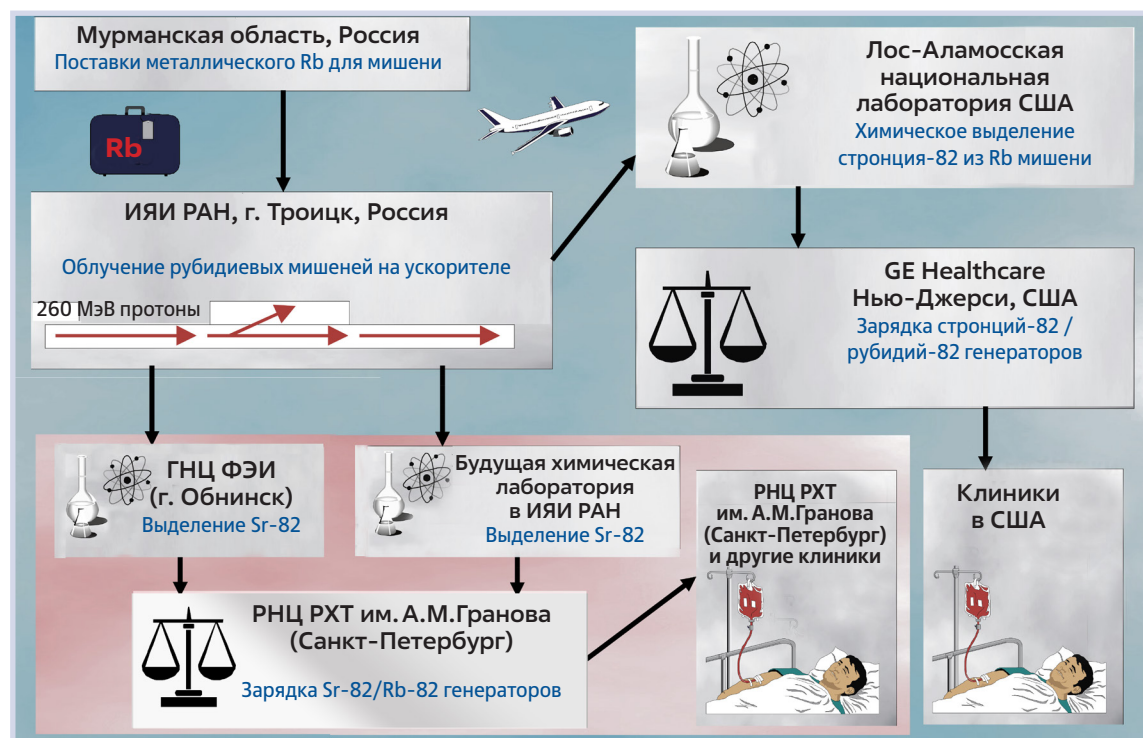
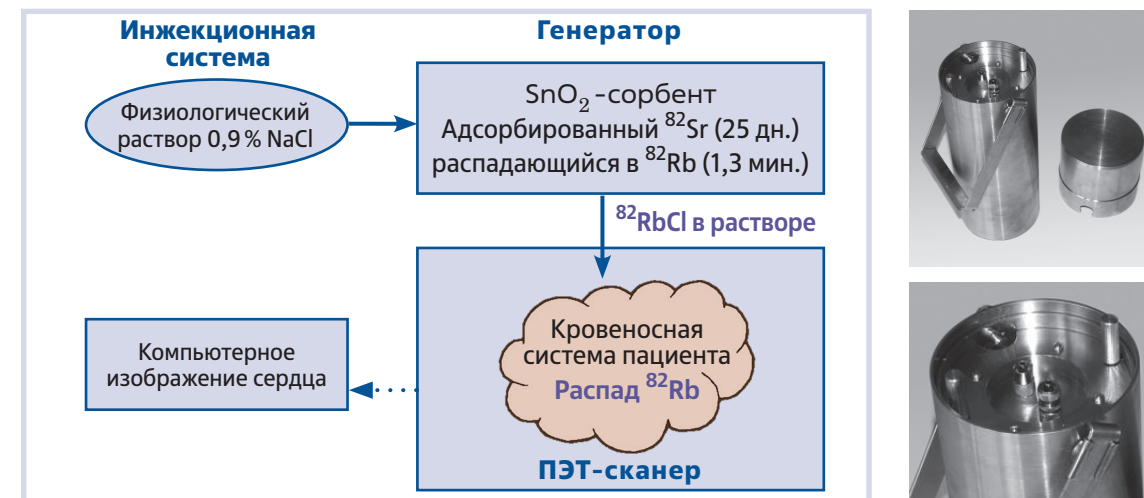


Схема производства, транспортировки и потребления стронция-82

для получения целого ряда ценнейших радионуклидов: стронция-82, актиния-225, изомера олова-117m, палладия-103, германия-68, и др.

Важнейшим из получаемых изотопов является стронций-82 (период полураспада 25,5 дней). Первые мишени со стронцием-82 были облучены на установке в 1993 году, а с 1997 года начались регулярные крупномасштабные поставки наработанных радионуклидов для нужд ядерной медицины. В течение многих лет облученные на ускорителе мишени поставлялись в Лос-Аламосскую национальную лабораторию (США), где стронций-82 выделяли радиохимически в «горячих» камерах по технологии ИЯИ РАН. В дальнейшем выделенный радионуклид отправляют для зарядки в генераторы короткоживущего рубидия-82 (период полураспада 1,3 мин.), который используется для кардиологической диагностики с помощью позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ). Новые оригинальные технологии по получению изотопов, разработанные в ИЯИ РАН, используются также во Франции на циклотронном медицинском комплексе ARRONAX (г. Нант, Франция),



в компании CURIUM (Индиана, США) и в других крупнейших центрах.

В ИЯИ РАН разработан собственный медицинский генератор рубидия-82, превосходящий по основным характеристикам американский аналог. Генератор прошел в России клинические испытания для кардиологии и нейроонкологии. На это медицинское изделие получено регистрационное удостоверение, и оно внедрено в медицинскую практику в крупнейшем медицинском центре РНЦ Радиологии и хирургических технологий им. А.М. Гранова Минздрава РФ (Санкт-Петербург). В дальнейшем предполагается широкое использование генератора по всей России и за рубежом, что позволит поднять на новый уровень ПЭТ-диагностику кардиологических и некоторых онкологических заболеваний, при этом можно обойтись без дорогостоящих циклотронов в клиниках, производящих короткоживущие изотопы на месте.

Одним из новых многообещающих проектов является получение актиния-225 (период полураспада 10 дней) из металлического тория, облученного протонами средних энергий. Этот альфа-излучающий 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

Генератор рубидия-82 для ПЭТ-диагностики кардиологических и онкологических заболеваний ^{82}Sr (25,5 дн.) \rightarrow ^{82}Rb (1,3 мин.)
 Слева: принцип работы стронций/рубидиевого -82 генератора; справа: генератор ГР-1 ИЯИ РАН (общий вид и фрагмент)

в количестве 1–2 кюри, что сравнимо с мировым производством за год. В ИЯИ РАН разработана радиохимическая технология выделения актиния-225 из облученных ториевых мишеней, которая в скором времени будет использована в «горячих камерах» других организаций. В ИЯИ РАН также разрабатываются новые высокоэффективные медицинские генераторы актиний-225/висмут-213 для терапии различных заболеваний.

В Институте при участии Брукхейвенской национальной лаборатории (США) и ГНЦ РФ ФЭИ им. А.И. Лейпунского разработана также новая технология получения радионуклида олово-117m, перспективного для диагностики и одновременно терапии (тераностики) ряда онкологических, а также сосудистых заболеваний. Препараты на основе олова-117m проходят клинические испытания в США.

ИЯИ РАН имеет свыше 20 российских и зарубежных патентов в области получения радионуклидов. Уже более 350 000 пациентов получили медицинскую помощь с помощью изотопов, произведенных именно в ИЯИ РАН, а миллионы — с помощью разработанных здесь технологий. Эти работы удостоены многих престижных премий, дипломов и медалей.

На установке также исследуются фундаментальные проблемы ядерной физики. Изучаются взаимодействия протонов с ядрами, исследуются высокоспиновые изомеры различных элементов. Получаются радиоактивные изотопы, необходимые для исследований нейтрино, поиска темной материи и для других экспериментов.

Дальнейшие перспективы связаны с сооружением лаборатории с «горячими камерами» для радиохимической переработки облученных мишеней и выделения радионуклидов на территории ИЯИ РАН. Проектирование этой лаборатории уже было завершено.

Также рассматривается сооружение нового циклотрона в уже действующем здании 25 института, специально ориентированного на эффективное получение больших количеств разных медицинских изотопов. Энергия протонов на этом ускорителе должна быть около 120 МэВ. Получаемые на нем изотопы позволят провести диагностику и лечение миллионов пациентов в России и за рубежом.

Исследования свойств ядерной материи в ядро-ядерных столкновениях в отделе экспериментальной физики

История исследований взаимодействий частиц с ядрами и ядер с ядрами в ИЯИ РАН начинается с 1974 г., когда в институте (тогда ИЯИ АН СССР) был создан сектор мезоядерных взаимодействий. В 1986 году на его основе была создана лаборатория мезоядерных взаимодействий. В 2011 году, в связи с обновлением и расширением тематики лаборатории она была переименована в лабораторию релятивистской ядерной физики. Первым руководителем лаборатории мезоядерных взаимодействий с 1986 по 2011 год, а затем и руководителем ЛРЯФ (с 2011 по 2017 г.) был доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки **Алексей Борисович Курепин**.

Установка КАСПИЙ

Установка КАСПИЙ была первой крупной экспериментальной установкой лаборатории. Она была создана для работы на пучках синхрофазотрона лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна) и дала возможность обнаружить значительное усиление рождения каонов по отношению к пионам в столкновениях ядер углерода с различными ядрами по сравнению с взаимодействиями дейтронов с такими ядрами. Впервые было исследовано подпороговое рождение антипротонов в ядро-ядерных столкновениях и обнаружено заметное усиление выхода антипротонов, указывающее на коллективные партонные эффекты. В 1992–1994 гг. на Московской мезонной фабрике (ММФ) были созданы установки CLAMSUD и PLASMAS. На установке CLAMSUD проведен первый на ММФ международный эксперимент по рождению заряженных пионов с участием физиков из Института ядерной физики Италии (INFN), отделения г. Катании. В эксперименте была обнаружена



Установка CLAMSUD в конце туннеля линейного ускорителя Московской мезонной фабрики (ММФ, 1992 год).

Часть участников эксперимента: **Ф. Риджи (F. Riggi), Т. Каравичева, М. Голубева**

аномальная зависимость сечения рождения пионов от энергии протонов. Установка PLASMAS (Plastic and Semiconductor Multiarm Spectrometer) была разработана и изготовлена в сотрудничестве с МИФИ для исследования процессов рождения пионов в глубокоподпороговой области энергий протонов (менее 200 МэВ).

С середины 1990-х годов новой страницей в истории лаборатории стали работы в составе больших международных коллабораций столкновений по изучению релятивистских ядер на установках Европейского центра ядерных исследований (ЦЕРН, Женева, Швейцария), Центра по исследованиям с тяжелыми ионами (GSI, Дармштадт, Германия). Проведение экспериментов, в которых изучаются столкновения ядер, является одним из важнейших направлений современной ядерной физики и физики высоких энергий. В зависимости от энергии сталкивающихся ядер, ядерная материя проявляет разные свойства. Эксперименты дают возможность исследовать ядерное вещество в условиях экстремальных температур и плотности, позволяют наблюдать его переход в состояние кварк-глюонной плазмы (КГП), воссоздавая, таким образом, условия ранней Вселенной в земных условиях.

Одним из сигналов образования КГП является подавление выходов J/ψ -мезонов в центральных столкновениях тяжелых ядер по сравнению с их выходами в холодной ядерной материи, характерной для периферических взаимодействий ядер. В эксперименте NA50 на суперсинхротроне SPS в ЦЕРН с участием сотрудников лаборатории было обнаружено подавление рождения J/ψ -мезонов для центральных взаимодействий ядер свинца с энергией 158 ГэВ/нуклон с фиксированными мишенями. Величина подавления выходов J/ψ -мезонов достигала 40%, что указало на образование КГП в центральных столкновениях тяжелых ядер высоких энергий. В других экспериментах на SPS сотрудниками лаборатории были измерены выходы нейтронов вперед от электромагнитной диссоциации ядер индия и свинца. Была также разработана модель RELDIS для моделирования событий электромагнитной диссоциации ядер методом Монте-Карло.

С середины 90-х годов сотрудники лаборатории принимали участие в создании, а затем начали работу на одной из самых крупных в мире ядерно-физических установок — в экс-

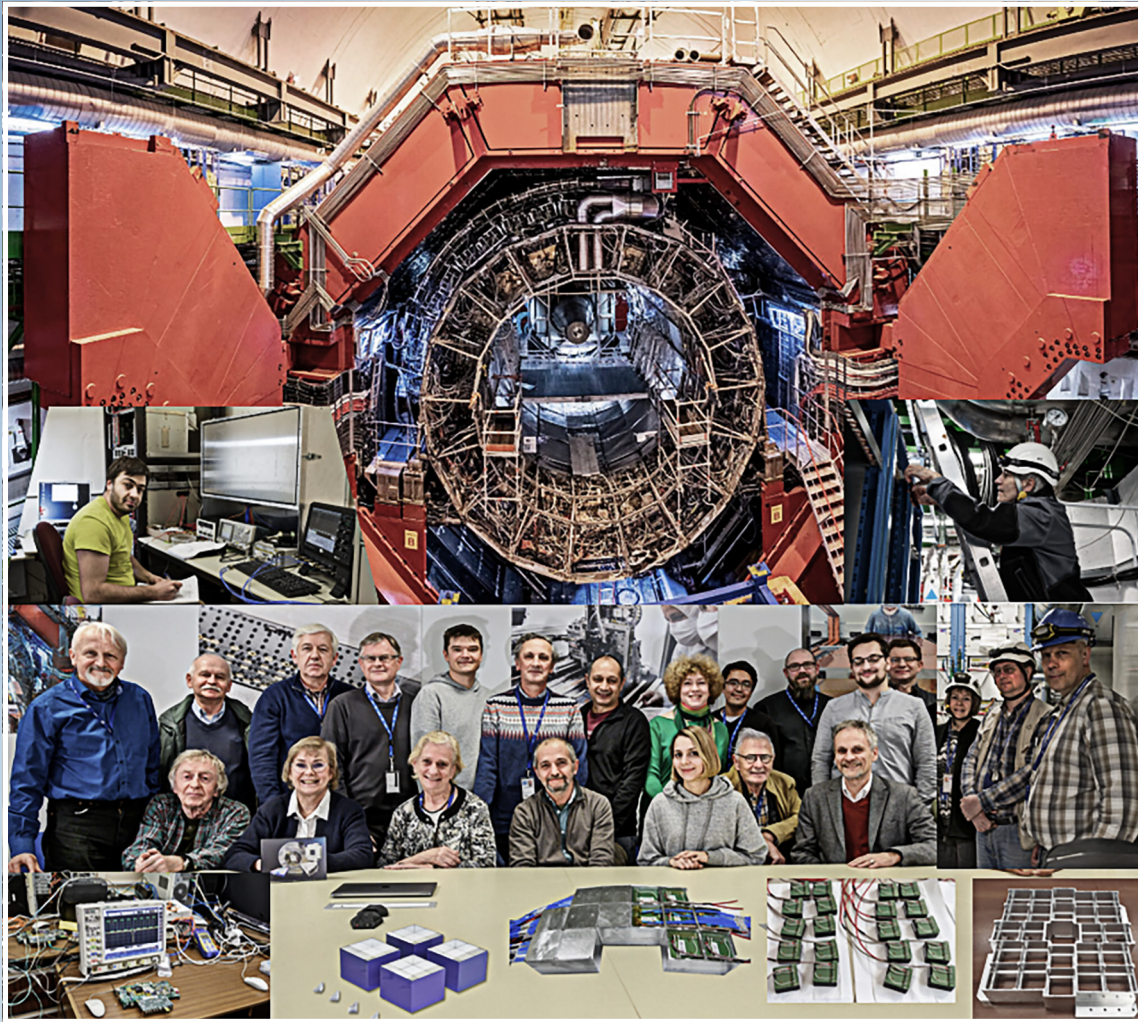


перименте ALICE (A Large Ion Colliding Experiment) на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРН. Для этого эксперимента в ИЯИ РАН создан детектор T0, играющий ключевую роль в формировании триггера и идентификации частиц по времени пролета, мониторинге светимости.

▲
Детектор T0 на установке ALICE и сотрудники ЛРЯФ в ходе его монтажа и работы с ним (фотомонтаж)

T0 является уникальной системой детектирования релятивистских частиц с временем разрешения, не превышающим 40 пикосекунд и мертвым временем менее 25 наносекунд.

В эксперименте ALICE было получено подтверждение образования кварк-глюонной плазмы (КГП) в ядро-ядерных столкновениях. КГП характеризуется рекордной температурой, но вместе с тем весьма низкими коэффициентами вязкости и относительно большим временем жизни. КГП считают новым состоянием вещества, образующимся только при достаточно больших плотностях энергии и высоких температурах. На основе уникальных результатов ALICE, полученных в 2010–2019 годах, были предложены новые направления исследований КГП, предусматри-



Подготовка к установке детектора ФИТ
в экспериментальную зону ALICE
(фотомонтаж)

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 (ФИТ или FIT — Fast Interaction Trigger) и создается считывающая и триггерная электроника нового поколения на основе ПЛИС (FPGA) процессоров.

Детектор FIT явится основным триггерным детектором эксперимента ALICE после его модернизации в 2019–2020 годах и будет использоваться для точного определения момента стол-

вающие увеличение энергии ядро-ядерных столкновений и их интенсивности (светимости). Для работы с увеличенной

кновения, множественности вторичных частиц, центральности и положения плоскости реакции в ядро-ядерных столкновениях, а также для измерения светимости. Начиная с 2017 года лабораторией релятивистской ядерной физики руководит кандидат физико-математических наук **Татьяна Львовна Каравичева**.

Несмотря на то, что в экспериментах на БАК получены разнообразные данные о свойствах горячей ядерной материи, образующейся в столкновениях ядер высоких энергий, в последние годы резко возрос интерес и к столкновениям ядер меньших энергий. 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 превышающую плотность в ядрах в обычном состоянии. Предполагается, что такая относительно холодная форма материи существует внутри нейтронных звезд. Такие исследования направлены на поиск начала деконфайнмента, критической точки фазового перехода из обычной ядерной материи в кварк-глюонную плазму. Кроме этого, в столкновениях ядер небольших энергий могут образовываться экзотические гиперядра, включающие один или несколько странных барионов. В настоящее время действуют установки BM@N в ОИЯИ, NA61/SHINE в ЦЕРН и HADES в GSI, на которых изучаются взаимодействия легких и тяжелых 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, в Дармштадте (Германия). ИЯИ РАН участвует во всех этих экспериментах. Для этого в 2017 в ОЭФ создана отдельная научная группа под руководством кандидата физико-математических наук **Федора Фридриховича Губера**.

Одним из старейших экспериментов, в котором участвует ученые ИЯИ РАН, является эксперимент HADES на синхротроне SIS18 в GSI, Германия. В 2019 г. он отметил свое 25-летие. На широкоапертурном магнитном спектрометре HADES был выполнен целый ряд важных экспериментов по поиску и исследованию явлений, связанных со спонтанным нарушением киральной симметрии — фундаментальной симметрии сильных взаимодействий. Такие явления проявляются в изменении массы и ширины нестабильных частиц — адронных резонансов,

рожденных в ядро-ядерных столкновениях. Их свойства изучаются посредством детектирования распадов с испусканием электрон-позитронных пар. ИЯИ РАН внес большой вклад в разработку и создание целого ряда ключевых детекторов установки — времяпролетных детекторов, электромагнитного калориметра и переднего сцинтилляционного годоскопа, в анализ полученных экспериментальных данных. В 2019 г. коллаборация HADES опубликовала статью по результатам исследований в Nature Physics.

Важнейшей характеристикой геометрии каждого ядро-ядерного столкновения является центральность столкновения, которая определяет степень перекрытия сталкивающихся ядер и непосредственно определяет достигаемую в нем максимальную плотность энергии. Для определения центральности и плоскости реакции в каждом событии в этих экспериментах используются или будут использоваться передние адронные калориметры, разработанные и изготовленные в ИЯИ РАН. Такие калориметры позволяют не только определять геометрию ядро-ядерных столкновений, но и исследовать свойства спектаторной материи — фрагментов и свободных нуклонов, не участвующих в столкновениях.

В эксперименте NA61/SHINE на суперпротонном синхротроне SPS в ЦЕРН недавно завершены измерения выходов заряженных частиц в столкновениях легких и тяжелых ядер с фиксированными мишенями при энергиях налетающих ядер

в диапазоне от 13 до 150 ГэВ на нуклон. Для этого эксперимента ИЯИ РАН разработал и изготовил передний адронный калориметр, обеспечил его эксплуатацию, выполнил калибровку и анализ данных этого калориметра. Для новой программы исследований эксперимента NA61/SHINE по рождению D-мезонов в столкновениях ядер свинца, ИЯИ РАН провел модернизацию калориметра. Это позволит проводить исследования при более высоких интенсивностях, начиная с 2021 г. При создании калориметра был использован целый ряд новых техноло-

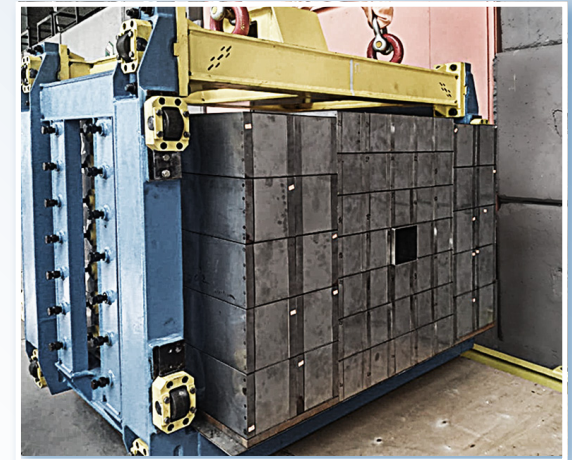
Модернизированный калориметр ИЯИ РАН установки NA61/SHINE с отверстием для прохождения пучка. На заднем плане виден новый дополнительный калориметр, перекрывающий область пучка



гий с применением спектросмещающих оптоволокон для сбора и передачи света со сцинтилляционных пластин модулей калориметра на фотодетекторы, в качестве которых были использованы новейшие микропиксельные лавинные фотодиоды. Модульная конструкция калориметра, сбор и регистрация света с продольных секций модулей оказалась настолько удачной, что и другие эксперименты — BM@N и MPD в ОИЯИ, CBM на ускорительном комплексе FAIR в GSI (Дармштадт) теперь также используют подобные передние адронные калориметры. Модули калориметров для этих экспериментов были разработаны и изготовлены в ИЯИ РАН с учетом специфики каждого конкретного эксперимента. С этой целью в ИЯИ РАН был создан специальный участок по сборке модулей калориметров и тестированию их на космических мюонах на котором ведутся работы по развитию аналоговой и считывающей электроники, разработке методов калибровки калориметров.

Основные физические задачи экспериментов BM@N и CBM состоят в исследовании рождения странных мезонов в ядерной среде, подпорогового рождения гиперонов, азимутальных корреляций и потоков адронов, поляризационных эффектов, уравнения состояния ядерной материи. Эксперимент BM@N является действующим экспериментом на ускорителе Нуклотрон в ОИЯИ и первой стадией мегапроекта NICA для изучения ядро-ядерных столкновений при энергии налетающих легких ядер до 4,5 ГэВ на нуклон. В настоящее время ведутся работы по модернизации этой установки для подготовки к экспериментам на пучках тяжелых ядер, начиная с 2021 г.

Эксперимент CBM создается на ускорительном комплексе FAIR в Дармштадте, Германия, и эксперименты начнутся в 2025 г. В этом эксперименте будут проводиться исследования ядро-ядерных столкновений при энергии налетающих тяжелых ядер до 12 ГэВ на нуклон и интенсивностях пучка в 100 раз больше, чем на BM@N. ИЯИ РАН разработал и изготовил для



Новый передний калориметр установки BM@N, созданный в ИЯИ РАН

этих экспериментов передние адронные калориметры. На фотографии показан уже собранный калориметр для эксперимента $BM@N$, в котором временно используются и часть модулей, предназначенных для калориметров CBM.

В настоящее время, в рамках Мегапроекта NICA в ОИЯИ, (Дубна) ведутся работы по созданию детектора MPD (Multi Purpose Detector), запуск которого планируется в 2022 г. Программа экспериментов на NICA ориентирована на исследования свойств сильно взаимодействующей ядерной материи с большой барионной плотностью, ее фазовой диаграммы. Одной из важнейших детекторных систем установки MPD является передний адронный калориметр FHCAL, предназначенный для измерения геометрии ядро-ядерных столкновений. В ИЯИ РАН, под руководством кандидата физико-математических наук **Александра Павловича Ивашкина**, уже разработаны и изготовлены модули для этого калориметра, ведутся работы по их тестированию и подготовке к установке на MPD в начале 2021 года.

Таким образом, в ИЯИ РАН в последние годы создано новое направление по исследованию горячей и плотной ядерной материи в ядро-ядерных столкновениях при достаточно низких энергиях сталкивающихся ядер. Исследования ведутся в рамках ряда международных коллабораций и российского Мегапроекта NICA с привлечением студентов и аспирантов ведущих вузов России. Эти исследования поддерживаются несколькими грантами РФФИ, грантом CREMLINplus Европейского Союза, рядом международных и российских контрактов.

Лаборатория гамма-астрономии и реакторных нейтрино (ЛГАРН)

Лаборатория гамма-астрономии и реакторных нейтрино ОЭФ была создана в конце 2014 года для проведения фундаментальных исследований в области физики гамма-астрономии, реакторных нейтрино, в других областях современной экспериментальной физики и астрофизики. Лаборатория сотрудничает с ведущими российскими и зарубежными институтами и университетами Германии, Италии, Китая, Финляндии, Франции, Швейцарии, Японии, с международной организацией ОИЯИ, г. Дубна.

Поиск двойного безнейтринного бета распада германия-76 в эксперименте GERDA-II

Лаборатория ГАРН ОЭФ (совместно с ОЛВЭНА и Баксанской нейтринной обсерваторией) участвует в международном эксперименте GERDA-II по поиску двойного безнейтринного бета-распада германия-76. Установка, на которой идет 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

Коллектив лаборатории гамма-астрономии и реакторных нейтрино



расстояниях. Для поиска столь редкого распада нужно большое количество материала — изотопа германия-76 и длительное время наблюдения. Также необходимо обеспечить, чтобы события в детекторе от других источников не были похожи на искомый распад. В эксперименте достигнута экспозиция 82,4 кг/лет и получен нижний предел на период полураспада $T_{1/2}^1 > 0,9 \times 10^{26}$ лет. Этот важный результат опубликован в 2019 году в журнале Science. Начата разработка эксперимента LEGEND, который является продолжением эксперимента GERDA и будет состоять из двух фаз. Первая из них (LEGEND-200) с 200 кг детекторов из обогащенного германия-76 будет проводиться на базе модифицированной установки GERDA.

Измерение параметра осцилляций реакторных антинейтрино θ_{13} в эксперименте Double Chooz

Во Франции поводится международный эксперимент Double Chooz, в котором изучаются свойства антинейтрино от атомных реакторов. Поток таких антинейтрино регистрируется двумя большими сцинтилляционными детекторами, расположенными на разных расстояниях от реакторов. Измеряется параметр, называемый углом смешивания θ_{13} , который характеризует изменения в пучке антинейтрино, известных как нейтринные осцилляции. В 2019 году в рамках эксперимента Double Chooz был измерен угол смешивания 13 по полному поглощению нейтрона в детекторе, как на гадолинии, так и на водороде. Получено улучшенное по точности значение угла смешивания θ_{13} : $\sin^2 2\theta_{13} = 0,105 \pm 0,014$. Завершен анализ данных по измерению сечения взаимодействия антинейтрино с протоном. Значение сечения находится в согласии с данными других экспериментов $(5,71 \pm 0,6) \times 10^{-43}$ см²/деление. Эти результаты опубликованы в Nature Physics.

Эксперимент Тунка/TAIGA. Гамма астрономия высоких энергий

ИЯИ РАН участвует в работе международной коллаборации TAIGA, целью которой является поиск точечных источников космического гамма-излучения с энергией выше 100 ТэВ. Эксперимент выполняется в России, в долине Тунка, получены следующие результаты:

1. Произведен физический запуск второй очереди черенковской широкоугольной установки TAIGA-HiSCORE. Количество оптических станций доведено до 54. Общая площадь установки составляет 0,5 км²; энергетический порог — 80–100 ТэВ (40–50 ТэВ для гамма-квантов высоких энергий); угловое разрешение — $\sim 0,1^\circ$. Измерен спектр первичных космических лучей в диапазоне энергий 10^{14} – 10^{17} эВ.

2. Начаты измерения на втором атмосферном черенковском телескопе изображения TAIGA-IACT. Ведутся совместные наблюдения двух телескопов изображения TAIGA-IACT и установки TAIGA-HiSCORE за локальными источниками гамма-квантов высоких энергий. Наблюдается точечный источник космического гамма-излучения в созвездии Краба.

3. При помощи установки Tunka-133 площадью 3 км² измерен энергетический спектр и массовый состав первичных космических лучей в диапазоне энергий 10^{15} – 10^{18} эВ.

Международный нейтринный эксперимент JUNO (The Jiangmen Underground Neutrino Observatory)

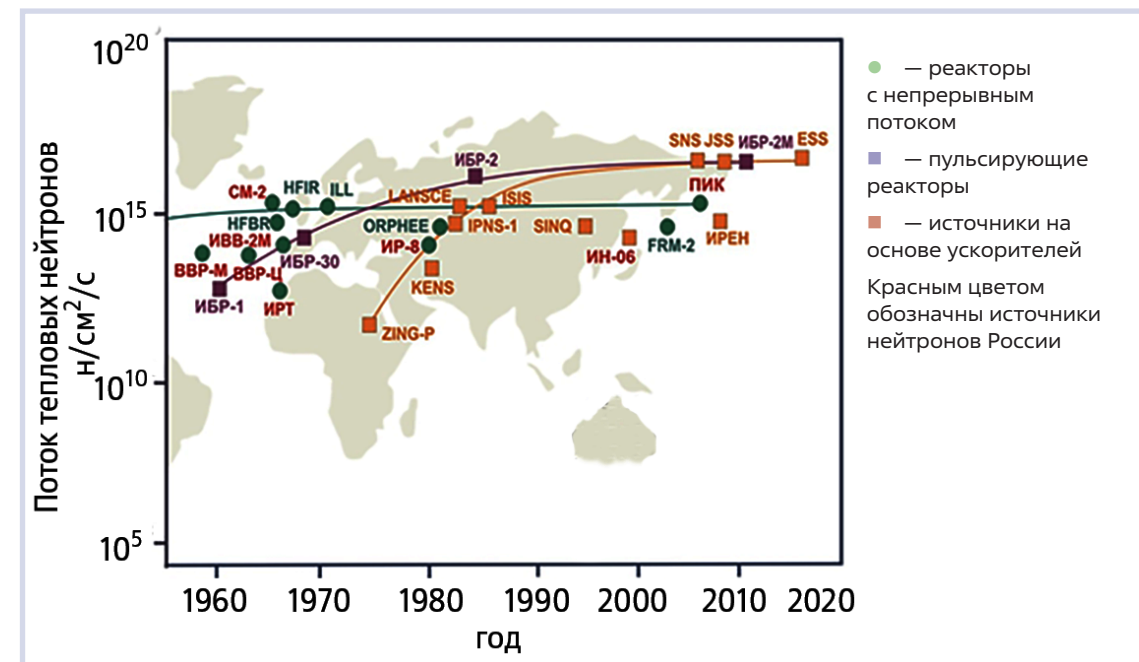
Эксперимент JUNO — это многозадачный нейтринный эксперимент в области неускорительной физики частиц. Эксперимент будет расположен в 53 км от двух реакторных комплексов Янгджанг (Yangjiang) и Тайшань (Taishan). Специально для эксперимента JUNO создается подземная лаборатория на глубине ~ 700 м.

Основная активность группы ИЯИ РАН в эксперименте JUNO связана с работами по фотодетекторам. Разработка 3-х дюймового фотоумножителя для этого эксперимента выполняются сотрудниками ИЯИ РАН совместно с HZC Photonics (Китай) и ООО МЭЛЗ ФЭУ (Россия) и является одним из ключевых моментов для успеха всего эксперимента. Проводится разработка методов и средств тестирования, отбора и измерения параметров фотодетекторов, разработка калибровочных систем эксперимента.

При создании многоцелевого исследовательского комплекса Московской мезонной фабрики были заложены возможности развития нейтронных исследований на основе вторичных пучков нейтронов, генерируемых ускоренными протонами в вольфрамовых мишенях в каскадно-испарительных ядерных процессах (spallation neutrons). Это было время, когда научным сообществом была осознана ограниченность наращивания мощности нейтронных источников реакторного типа, а перспективы развития и расширения круга решаемых научных и технологических задач связывали с нейтронными источниками, драйверами которых являются интенсивные пучки ионов водорода.

Импульсные источники нейтронов нового поколения на основе сильноточных ускорителей протонов средних энергий (0,45–1,3 ГэВ) становятся одними из важнейших инструментов исследования вещества, конденсированных сред (~95% времени работы ускорителей), ядерной физики (~2–3%) и работ прикладного характера (~2%). Основное преимущество нейтронных источников такого типа состоит в следующем:

- ◆ ядерная безопасность;
- ◆ широкий спектр энергий нейтронов от холодных до нескольких сотен мегаэлектронвольт;
- ◆ возможность использования в экспериментах времяпролетной методики для сепарации нейтронов по энергиям и изменения 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 нейтронной физики, исследования 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 мишеней источника в интенсивных потоках ускоряемых частиц и их дешевизна в сравнении с активной зоной реактора;



- ◆ низкое энерговыделение в расчете на один произведенный нейтрон в реакциях взаимодействия протонов средних и высоких энергий с материалом мишени (spallation процесс) по сравнению с реакцией деления.

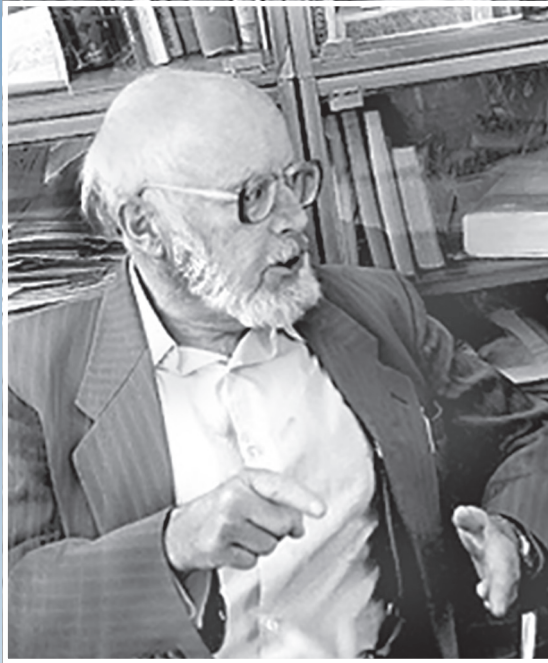
Место российских источников нейтронов в общей картине развития нейтронных центров в мире [«Исследования наносистем и материалов с использованием синхротронного излучения и нейтронов в России. Современное состояние и перспективы развития». Научный совет Роснауки по использованию синхротронного излучения и нейтронов в нанонауках и материаловедении. 2006 г.]

Советским ученым принадлежит существенный вклад в разработку основополагающих принципов развития многоцелевых исследовательских комплексов на базе сильноточных ускорителей ионов водорода.

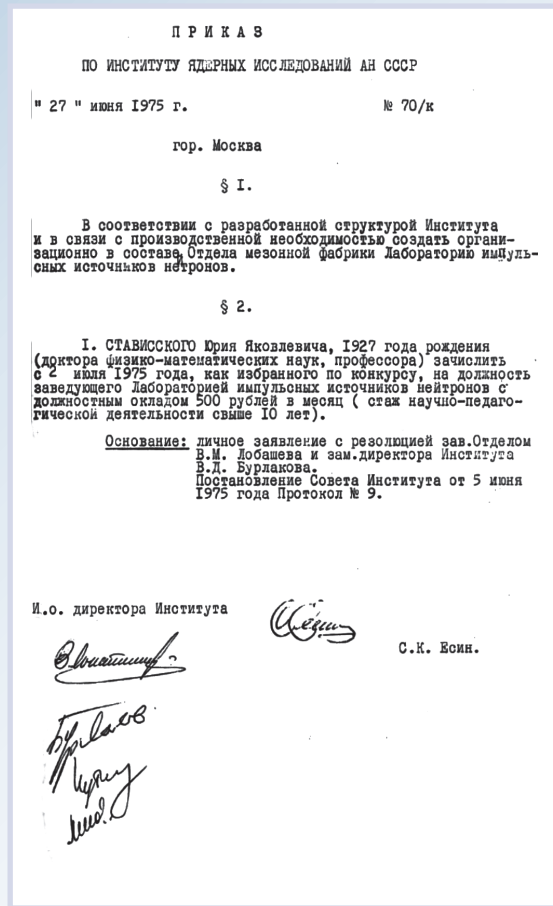
Основные идеи были реализованы при создании импульсного источника тепловых нейтронов ИНИ-06 Московской мезонной фабрики.

Для осуществления научного руководства по созданию ИНИ-06 и подготовки нейтронных исследований была организована лаборатория импульсных источников нейтронов в составе отдела мезонной фабрики на основании приказа №70/к от 27 июня 1975 года.

Возглавил лабораторию доктор физико-математических наук, профессор **Юрий Яковлевич Ставиский**.



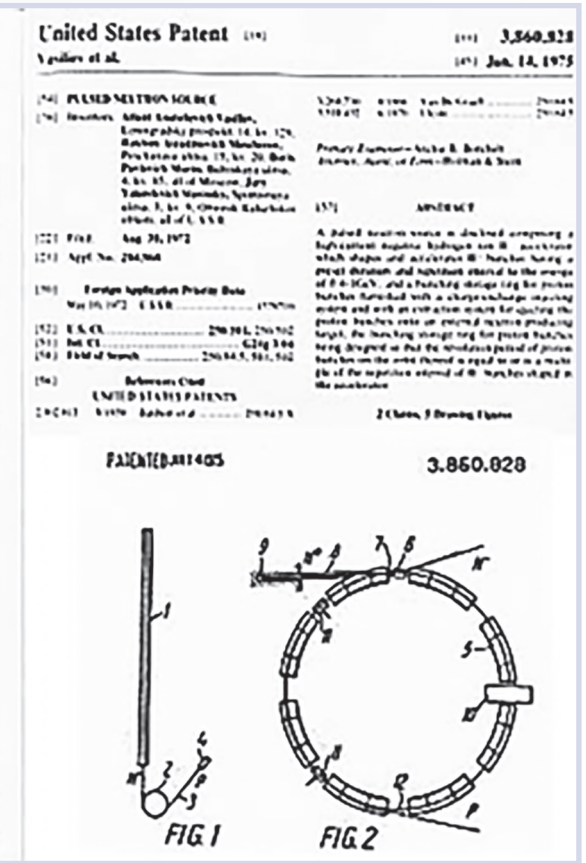
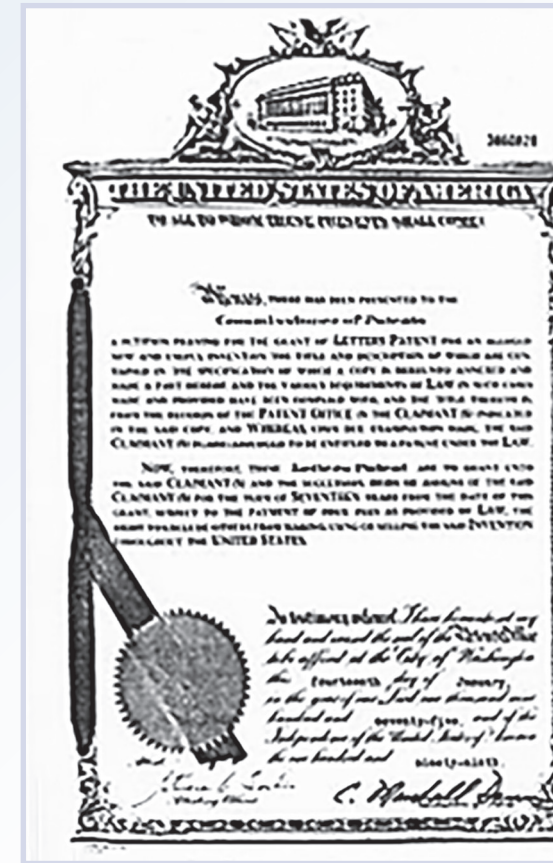
Ю.Я. Ставицкий — известный советский ученый. В 1975 г. перешел в Институт ядерных исследований АН СССР из ФЭИ им. А.И. Лейпунского. Внес решающий вклад в создание уникального нейтронного комплекса института на базе линейного протонного ускорителя «Московская мезонная фабрика»



Проблемы, решению которых посвящены основные труды Ю.Я. Ставицкого:

- ◆ разработка теории пульсирующих реакторов на быстрых нейтронах,
- ◆ осуществление научного руководства, создание и пуск реактора ИБР-30 в ОИЯИ (Дубна).

В целях повышения ответственности за обеспечение работ по завершению сооружения, пуско-наладке и подготовке к вводу в научную эксплуатацию импульсного источника нейтронов ИН-06 в составе пускового комплекса экспериментального комплекса Московской мезонной фабрики ИЯИ РАН, а также в целях подготовки программы первоочередных экспериментов на пучках нейтронного источника и облучательного устройства мишенно-ловушечного узла, развития нейтронных исследований и прикладных работ, на базе лаборатории импульсных



источников нейтронов была образована **лаборатория нейтронных исследований (ЛНИ)** — самостоятельное научное подразделение (приказ № 186-к от 28 июня 1975 г).

А.А. Васильев, Р.А. Мещеров, Б.П. Мурин, Ю.Я. Ставицкий
Патент США №3860828. 1975, выданный советским ученым, с описанием линейного ускорителя ионов водорода H⁻ на энергию 1 ГэВ (1), накопительного кольца (2) с двухшаговой перезарядкой и бомбардируемой протонами нейтронообразующей мишенью (4)

Направления исследований:

- ◆ Нейтронная физика.
- ◆ Технология интенсивных источников нейтронов.
- ◆ Исследование конденсированных сред.
- ◆ Математическое моделирование взаимодействия частиц с веществом.
- ◆ Радиационное материаловедение.

С 1998 по 2006 годы лабораторию возглавлял доктор физико-математических наук **А.Д. Перекрестенко**



▲
А.Д. Перекрестенко (слева)
Э.А. Коптелов (справа)

▶
На странице справа: **Н.М. Соболевский,**
С.Ф. Сидоркин, А.А. Алексеев, Р.В. Садыков



С 2006 года и по настоящее время общее руководство лабораторией осуществляет доктор физико-математических наук **Эдуард Алексеевич Коптелов**.

Состав лаборатории

Расчетно-теоретическая группа. Руководитель — доктор физико-математических наук главный научный сотрудник, профессор **Николай Михайлович Соболевский**.

Сектор импульсных источников нейтронов. Зав. сектором — и.о. ведущего научного сотрудника, кандидат физико-математических наук **Станислав Федорович Сидоркин**.

Группа нейтрон-ядерных взаимодействий. Научный сотрудник — **Андрей Алексеевич Алексеев**.

Сектор конденсированных сред (образован в 2006 году). Зав. сектором — и.о. ведущего научного сотрудника, кандидат физико-математических наук **Равиль Асхатович Садыков**.

Всего в составе ЛНИ 23 сотрудника, в том числе 2 доктора и 9 кандидатов наук.

В настоящее время **нейтронный комплекс ИЯИ РАН** включает в себя следующие объекты:

- ◆ импульсный источник тепловых нейтронов ИН-06 для исследований конденсированных сред;
- ◆ импульсный источник эпитепловых нейтронов с времяпролетными 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).

Физический пуск ИН-06 и модифицированной установки РАДЭКС был проведен в конце 1998 года при энергии протонного пучка 209 МэВ, среднем токе не более 0,1 мкА, длительности протонного импульса 60 мкс и частоте 1 Гц.

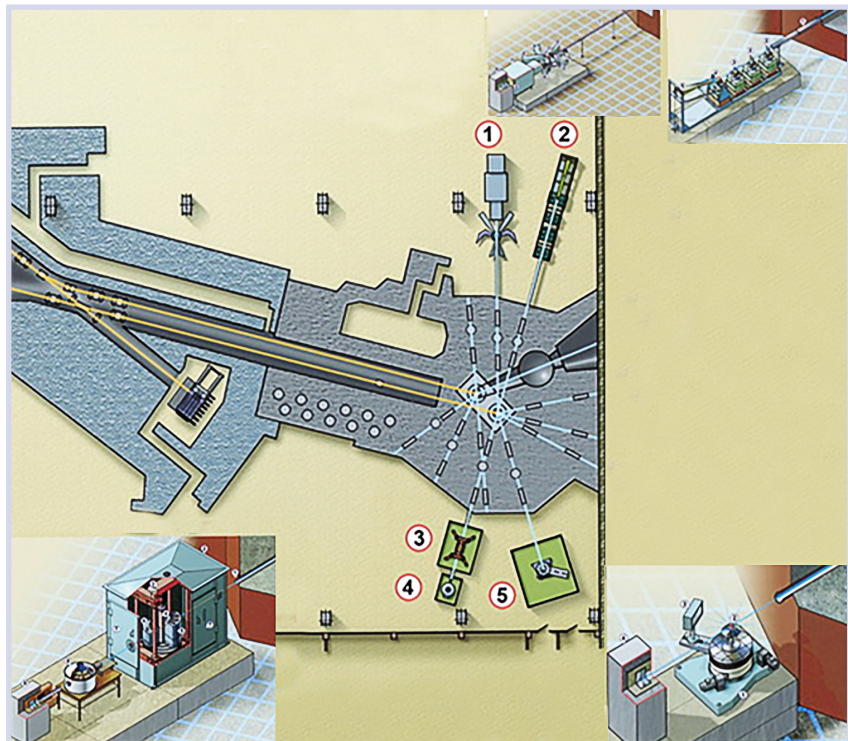
В декабре 2000 года успешно запущен 100-тонный высокоинтенсивный СВЗ.

Исследования конденсированных сред

Источник ИН-06 предназначен для развития нейтронных исследований конденсированных сред и активно развивающейся области исследований наносистем и материалов. С этой целью созданы первые нейтронографические установки, каждая из которых имеет свою схему коллимации и сбора нейтронов: коллиматоры, нейтронноводы и нейтронные концентраторы прямого пучка. Проведены тестовые измерения нейтронограмм и определены виды спектров в зависимости от типа нейтронооптической схемы коллимации и сбора нейтронов каждой нейтронографической установки. Предполагается, что каждая из установок имеет свой нейтронный спектр. В настоящее время в ИЯИ РАН формируется направление нейтронных исследований конденсированных сред и наносистем на основе нейтронографических установок первой очереди, созданных совместно с РНЦ-КИ, ФИАН, ПИЯФ, ИФВД.

В ноябре 2010 года осуществлен физический пуск нейтронографических установок «Горизонт» (ИЯИ-ПИЯФ), «МНС» (ФИ РАН-ИЯИ), «Геркулес» (ИЯИ-ИФВД-РНЦ КИ) на импульсном источнике нейтронов ИН-06 ИЯИ РАН, и получены первые спектры. Ввод в строй многоцелевых установок





Размещение нейтронографических установок на ИН-06 (бетонные стенки биологической защиты вокруг установок не показаны)

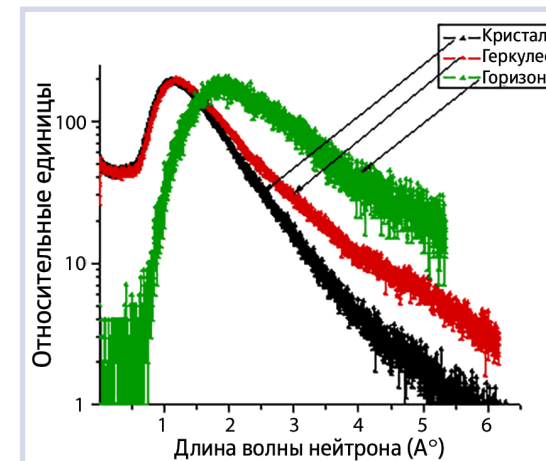
1. «МНС» — многоцелевая установка для определения структуры с блоком детектирования методом фокусировки по времени пролета (ФИАН).
2. «Горизонт» — малоугловой спектрометр-рефлектометр с вертикальной плоскостью рассеяния нейтронов для исследования поверхностей и наноструктур (ПИЯФ).
3. «Геркулес» — дифрактометр для исследования веществ при высоком давлении до 100кбар, включая наводороживания образцов in situ и (РНЦ-КИ, ИФВД).
4. «Кристалл» — дифрактометр для исследования структуры монокристаллов при различных температурах и давлений

коллективного пользования на каналах данного экологически чистого импульсного источника нейтронов, не содержащего делящегося вещества и работающего под управлением сильноточного ускорителя протонов, существенно расширяет возможности совместных исследований российских ученых в области конденсированного состояния и наноматериалов [Важнейшие научные достижения РАН за 2010 год].

Каждая установка имеет свои особенности и возможности. Не вдаваясь в детали, приведем спектры нейтронов, измеренные на разных установках.

Развиваются комплементарные методы исследований (Н.Г. Гаврилюк, Ю.Б. Лебедь).

В дополнение к нейтронным спектрометрам, в секторе конденсированных сред развивается база исследований конденсированных сред при высоких давлениях на образцах,



Сравнение спектров нейтронов от длины волны нейтрона для каналов различных установок ИН-06 нормированных на максимум пиков

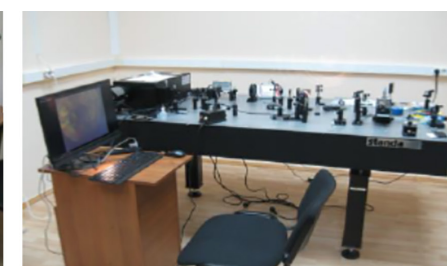


Подготовка к вводу в эксплуатацию спектрометра-рефлектометра «Горизонт». В.С. Литвин, В.А. Матвеев



Лабораторная установка для рентгеновской дифракции под давлением (слева). Мессбауэровский спектрометр с криосистемой (справа)

Рамановский спектрометр высокого пространственного разрешения





Общий вид экспериментального зала с нейтронными источниками и установками

при высоких и криогенных температурах, сильных магнитных полях. Главные направления исследований: синтез и изучение свойств высокотемпературных сверхпроводников и природы фазовых переходов в экстремальных условиях в сложных системах, в том числе с сильной корреляцией электронов, экспериментальное наблюдение перехода изолятор-металл и др.

Работа ведется в содружестве с российскими и зарубежными коллегами. Получен и опубликован ряд результатов мирового уровня.

Исследование нейтрон-ядерных взаимодействий

В совместной работе ИЯИ РАН и ГНЦ РФ «Физико-энергетический институт» получен ряд выдающихся результатов мирового уровня. На нейтронном спектрометре по времени замедления в свинце (СВЗ100) измерено сечение деления ^{236}U в области энергии нейтронов 0,1–20 кэВ с высокой точностью. Определены величины резонансного интеграла для резонансов при энергии 5,45 эВ и 1,28 кэВ и оценены их делительные ширины. Подтверждена известная промежуточная структура в сечении подбарьерного деления $^{236}\text{U}(n, f)$. [Научные достижения Российской академии наук в 2007 году. Отчетный доклад Президиума Российской академии наук. С.29]. Завершен комплекс измерений сечений деления резонансными нейтронами всех изотопов америция и кюрия, точные данные о которых необходимы для проблемы трансмутации младших актини-

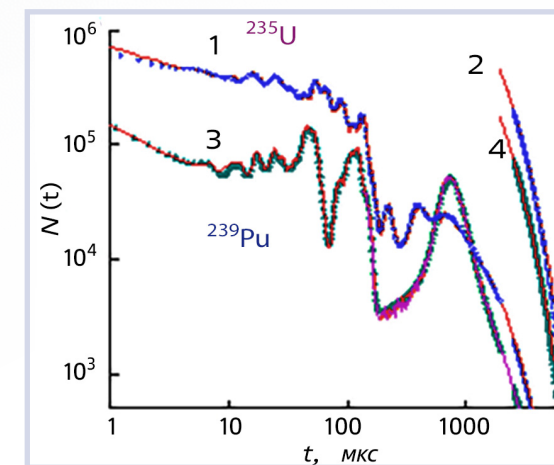
дов — наиболее радиотоксичных отходов ядерной энергетики. [Важнейшие научные достижения РАН за 2009 год. С.108]. Получена информация о структуре барьеров деления, уникальная информация о средних сечениях деления младших актинидов $^{243,244,246,247,248}\text{Cm}$, ^{241}Am , ^{243}Am , $^{242\text{m}}\text{Am}$ — ключевая информация для развития технологии переработки отработанного ядерного топлива на основе сильноточных ускорительных комплексов для проектов безопасной ядерной энергетики будущего. Полученные данные имеют важное значение для физики атомных реакторов и занесены в международную базу данных ENDF/B-VII National Nuclear Data Center Брукхейвенской лаборатории США (<http://www.nndc.bnl.gov>) и МАГАТЭ.

Математическое моделирование процесса взаимодействия адронов и ядер с веществом является необходимым этапом широкого круга исследований в фундаментальной и прикладной ядерной физике. Работы по этому направлению ведутся в расчетно-теоретической группе (РТГ, ранее до 2017 года и с момента организации лаборатории — расчетно-теоретическом секторе, РТС). В том числе, осуществляются расчетно-теоретические исследования процессов взаимодействия частиц и ядер средних и высоких энергий со сложными макроскопическими мишенями, включая процессы генерации и переноса нейтронов и других частиц, энерговыделения в мишенях, образования и трансмутации радионуклидов, воздействия облучения на материалы. РТГ/РТС осуществляет развитие теории, алгоритмов и методов математического моделирования указанных процессов, включая теорию и модели ядерных реакций при



Подготовка к измерениям на спектрометре по времени замедления в свинце (СВЗ-100).
А.А. Алексеев

Пример результатов измерений на СВЗ-100: спектры событий деления $N(t)$ $^{235}\text{U}(n, f)(1, 2)$ и $^{239}\text{Pu}(n, f)$. Данные при $t > 2000$ мкс увеличены в 100 раз





В секторе исследования конденсированных сред средних и высоких энергиях. Обеспечивает, при необходимости, адаптацию доступных программных средств стороннего происхождения для проведения вышеперечисленных исследований.

В РТС/РТГ разработан универсальный адронный транспортный код SHIELD <https://www.inr.ru/shield>. За время своего существования и развития код SHIELD применялся, в соответствии с научными планами Института, в различных областях ядерной физики, в том числе для расчетов ядерно-каскадных процессов в тяжелых мишенях под действием пучка ускорителя, ADS систем, взаимодействия пучков протонов и легких ионов с тканеэквивалентными средами (адронная терапия в онкологии), воздействия космического излучения на космические аппараты и природные объекты, фоновых условий в подземных низкофоновых экспериментах, моделирования элементов тракта транспортировки пучка ускорителей тяжелых ионов, оптимизации пинообразующих мишеней, моделирования детекторов экспериментальной физики, первичных радиационных повреждений материалов под действием пучка ускорителя.

В области адронной терапии в 2017 году учрежден международный проект «SHIELDHIT12A» <http://www.shieldhit.org>. Программа SHIELDHIT12A распространяется согласно коммерческой и некоммерческой лицензиям. За 2017–2020 годы было выдано 9 лицензий.



В издательстве «ФИЗМАТЛИТ» в 2017 году опубликована монография Н.М. Соболевского «Метод Монте-Карло в задачах о взаимодействии частиц с веществом» (ISBN 978-5-9221-1723-4).

В 2016 году ИЯИ РАН получил доступ к программам и данным Банка данных NEA OECD (NEA Data Bank). Контактным лицом по связи с NEA Data Bank назначен руководитель РТС/РТГ **Н.М. Соболевский**. За 2016–2020 годы было запрошено и получено 27 компьютерных программ для сотрудников ИЯИ.

Сотрудники ЛНИ активно печатаются в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus. Результаты также ежегодно докладываются на российских и международных конференциях.

Области применения нейтронных методов исследования

[Социально-экономические последствия нейтронных исследований в расширении наших знаний о природе, в развитии техники и технологий, повышения качества жизни. Отчет European Strategy Forum on Research Infrastructure Neutron Working Group. 2003. (http://www.cordis.lu/era/infrastructures_forum.htm)]

С самого начала создания Московской мезонной фабрики ИЯИ РАН одним из направлений исследований в этом ядерном центре была лучевая терапия и ядерная медицина. Предполагалось использовать пучки ускоренных протонов линейного ускорителя и других частиц для радиотерапии злокачественных новообразований. Для проведения таких исследований в 2005 году была создана **лаборатория медицинской физики (ЛМФ)** ИЯИ РАН, которую возглавил доктор физ.-мат. наук **Сергей Всеволодович Акулиничев**. В 2009 году при научно-техническом сопровождении ЛМФ было завершено строительство первой очереди **Комплекса лучевой терапии (КЛТ)** ИЯИ РАН. В состав этого комплекса вошли следующие генерирующие установки: протонная лучевая установка, медицинский ускоритель электронов СЛ-75-5-МТ, близкофокусный рентгенотерапевтический аппарат РЕНТГЕН-ТА-02 и рентгеновский компьютерный томограф Toshiba Aquilion LB-16. Протонная лучевая установка продолжила проходить испытания а все конвенциональные установки практически сразу начали использоваться для лечения и диагностики. Причем ученые ИЯИ РАН вывели эти установки в число лучших по Московской области, к которой в то время относился г. Троицк. Например, на ускорителе электронов были впервые для такого ускорителя применены методы повышения качества лучевой терапии за счет точной фиксации облучаемых органов пациентов с использованием термопластиковых масок и вакуумных матрасов. Для рентгенотерапевтического аппарата был впервые составлен атлас глубинных доз для предотвращения нежелательного облучения здоровых органов. В целом, за время работы КЛТ с участием больницы РАН в г. Троицке в нем были проведены курсы высококачественного лечения и диагностики для более 300 пациентов.

ЦЛТ в Троицке получил известность как один из лидеров в использовании передовых методов лучевой терапии и диагностики. Одновременно с практическим лечением продолжались научные исследования на самом высоком мировом уровне 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. Работы ученых ЛМФ



С.В. Акулиничев (слева)

В.В. Мартынова в радиобиологической лаборатории (справа)

в этом направлении широко известны во всем мире, а по некоторым направлениям, например, по новым источникам для брахитерапии, лаборатория является мировым лидером.

В последние годы особый интерес привлекли исследования ученых ЛМФ

Клинический ускоритель электронов





Рентгеновский компьютерный
томограф-симулятор

по протонной флэш-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 счет рекордной мощности его пучков протонов. В указанных направлениях медицинской физики ЛМФ ИЯИ РАН активно сотрудничает с ведущими радиологическими центрами России.



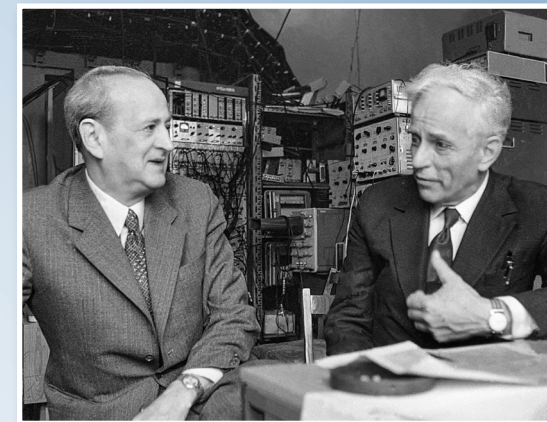
Протонная лучевая установка

После экспериментов Ф. Райнеса и К. Коэна (1958 г.), впервые зарегистрировавших нейтрино от реактора, **М.А. Марковым** была высказана идея о возможности регистрации нейтрино космических лучей. Первые эксперименты были проведены и первые результаты были получены в глубоких шахтах Индии и Южной Африки в 1965 г. для потока горизонтальных мюонов, рожденных нейтрино. В 1967 г. Р. Дэвис начал известный хлор-аргонный эксперимент по регистрации солнечных нейтрино, основанный на предложении Б.М. Понтекорво, сделанном еще в 1946 г. Неудивительно, что именно эти два человека, **Б.М. Понтекорво** и **М.А. Марков**, сумели доказать важность нейтринной тематики руководству Академии наук СССР и инициировали создание лаборатории Нейтрино в ФИАН им. П.Н. Лебедева. Главой этой лаборатории стал **Г.Т. Зацепин**, а группу в этой лаборатории возглавил **А.Е. Чудаков**. Тем самым два выдающихся ученых-теоретика нашли не менее выдающихся экспериментаторов для реализации намеченной программы нейтринных исследований. Программа эта естественным образом разбивалась на два направления: солнечные нейтрино (общее руководство осуществлялось **Г.Т. Зацепиным**) и атмосферные нейтрино и мюоны (**А.Е. Чудаков**). Многие в структуре будущего отдела сложились еще в период пребывания в ФИАН. Не только решение о строительстве нейтринной станции было принято тогда, но и было выбрано место для ее строительства на северном Кавказе. И само строительство началось в этот период. Напомним, что директором ФИАН в это время был еще Д.В. Скобельцын, и, следовательно, этот патриарх и основатель исследований в области физики космических лучей в нашей стране, фактически открывший космические лучи, доказав их корпускулярную природу, также стоял у истоков ОЛВЭНА.

При создании нового института, когда сложившаяся внутри лаборатории «Нейтрино» структура была транслирована в отдел, получивший название **отдел лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики** (ОЛВЭНА), естественным образом возникли четыре лаборатории: лаборатория радиохимических методов детектирования нейтрино (рук. **В.Н. Гаврин**); лаборатория электронных методов детектирования нейтрино (рук. **О.Г. Ряжская**); лаборатория лептонов высоких энергий (рук. **А.Е. Чудаков**) и лаборатория нейтринной астрофизики,

заведующим которой стал **Г.Т. Зацепин**, будучи одновременно заведующим отделом. Эта структура отдела сохранилась до настоящего времени, хотя многое изменилось даже в темах исследований, не говоря уже о научном и техническом персонале.

Кроме того, из лаборатории Нейтрино выделилась также нейтринная станция, первым руководителем которой стал **Александр Александрович Поманский**. Нейтринная станция довольно скоро получила статус самостоятельного отдела Института и впоследствии стала именоваться Баксанской нейтринной обсерваторией.



▲
Г.Т. Зацепин, А.Е. Чудаков
БНО, 1979 г.

Лаборатория нейтринной астрофизики

Лаборатория нейтринной астрофизики была основана академиком **Георгием Тимофеевичем Зацепиным** (1917–2010), одним из трех ученых, предсказавших существование знаменитого эффекта Грейзена-Зацепина-Кузьмина (т.н. GZK effect), автором множества выдающихся работ по физике космических лучей и нейтринной астрофизике, создателем уникальных научных установок.

В начале своей научной деятельности в конце 1940–1950 гг. **Г.Т. Зацепин** занимался на Памире исследованием т.н. широких атмосферных ливней (одновременной регистрацией множества заряженных частиц несколькими детекторами). По результатам исследований им были сделаны такие важные для того времени выводы, как заключение об адронной основе развития ШАЛ в атмосфере и их происхождении от первичных протонов, а не электромагнитных частиц (как считалось в то время), а также вывод о приблизительном постоянстве неупругого сечения взаимодействия адронов при высоких энергиях (что противоречило господствовавшему в то время мнению о падении сечения с ростом энергии).

Начиная с 1972 г. **Г.Т. Зацепин** участвовал в международном эксперименте «Памир» по исследованию фрагментационной



В.С. Березинский, С.П. Михеев

области взаимодействия адронов при сверхвысоких энергиях с помощью регистрации наиболее энергичных частиц в стволах ШАЛ с помощью рентгеноэмульсионных камер (РЭК).

Позднее научные интересы **Г.Т. Зацепина** сместились в нейтринную физику. При его активном участии была организована Баксанская нейтринная обсерватория (БНО) ИЯИ РАН — одна из двух функционирующих сегодня в мире крупномасштабных подземных лабораторий,

включающих комплекс уникальных установок для междисциплинарных исследований на стыке фундаментальной физики, астрофизики и геофизики.

За свои работы **Г.Т. Зацепин** был удостоен Сталинской (1951) и Ленинской премий (1982), награжден орденом «За заслуги перед Отечеством» IV степени (1997).

В ЛНА также работали всемирно известные ученые:

- ◆ **С.П. Михеев** (1940–2011) — соавтор эффекта нейтринных осцилляций в веществе, известного как эффект Михеева-Смирнова-Вольфенштейна. **С.П. Михеев** был награжден премиями им. Б.Понтекорво (2005), М.А.Маркова (2008), Сакураи Американского физического общества (2008).
- ◆ **В.С. Березинский** — выдающийся физик-теоретик, автор ряда пионерских работ по физике космических лучей и астрофизике, один из создателей научного направления «Astroparticle physics» (Физика астрочастиц), предсказавший существование космогенных нейтрино и дипа в спектре космических лучей сверхвысоких энергий; награжден премиями им. А.Гумбольдта (1990) и М.А.Маркова (2010), медалью О'Келли (2007).

В лаборатории осуществляется международное сотрудничество, в том числе, с Национальной лабораторией Гран-Сассо (Италия) и Университетом Париж-Юг (Франция).

В настоящее время сотрудники ЛНА проводят и участвуют в исследованиях мирового уровня по следующим направлениям.

Разработка экспериментальной техники

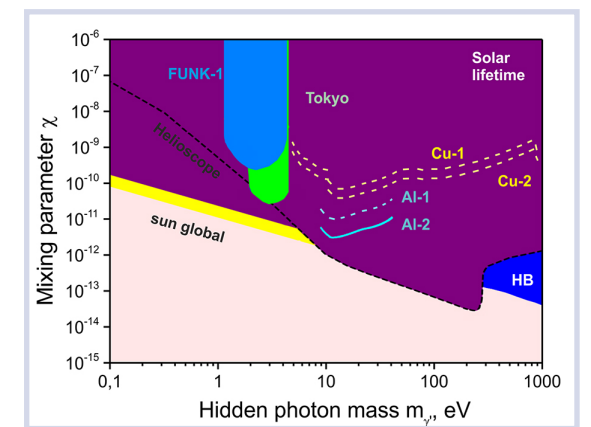
Поиск скрытых фотонов с помощью мультикатодного счетчика <http://felex.inr.ru/>

Разработан и изготовлен мультикатодный счетчик усовершенствованной конструкции с алюминиевым катодом и фокусирующими электродами. В прямых измерениях достигнута рекордно низкая скорость счета одиночных электронов $(0,33 \pm 0,7) \cdot 10^{-6}$ Hz/cm⁻².



Справа: общий вид счетчика;
слева:
внизу: ограничения на величину константы смешивания

Получены новые ограничения на константу смешивания скрытого фотона полученные с помощью мультикатодного счетчика с медным (Cu-1, Cu-2) и алюминиевым (Al-1) катодом со смесью Ag+CH₄, а также алюминиевым (Al-2) катодом и смесью Ne+CH₄. Важно, что в данном методе мишенью являются свободные электроны вырожденного электронного газа металла и эффект пропорционален площади поверхности катода.





Поиск безнейтринного двойного бета распада

Одной из основных тем лаборатории является поиск безнейтринного двойного бета-распада ($0\nu 2\beta$). Эта проблема связана с определением природы массы нейтрино (Дираковской или Майорановской) и возможным нарушением лептонного числа. Решение этих задач будет иметь фундаментальные следствия как для физики частиц, так и для космологии.

Были разработаны и созданы детекторы на основе сцинтилляционных кристаллов и органических сцинтилляторов. Начиная с 2004 г. на основе накопленного опыта лаборатория в составе международной коллаборации GERDA (The GERmanium Detector Array) приступила к работе по созданию детектора нового поколения для поиска $0\nu 2\beta$ распада изотопа ^{76}Ge . Принципиальное преимущество проекта состоит в использовании жидкого аргона в качестве пассивной и активной защиты от внешнего радиационного фона. В установке использовались 36 кг Ge, обогащенного по изотопу ^{76}Ge (86%), произведенного в России. В 2010 г. работа по созданию и наладке установки была завершена, начаты измерения.

В 2013 г. закончена первая фаза эксперимента. Используемые в анализе данные были получены в период ноябрь 2011 — май 2013 с полной экспозицией 21,6 кг·год. Из отсутствия сигнала получен верхний предел для периода $0\nu 2\beta$ распада ^{76}Ge $T_{1/2} > 2,1 \cdot 10^{25}$ лет (90%).

В течение 2016 г. полностью введена в строй вторая фаза эксперимента с существенным усовершенствованием параметров установки. В результате использования анализа формы сигнала детекторов и антисовпадений с сцинтилляционным сигналом от окружающего жидкого аргона индекс фона понижен в 10 раз по сравнению с фазой 1 и достиг величины $10^{-3}/\text{кэВ} \cdot \text{кг} \cdot \text{год}$, что является уникальным достижением. На июнь 2018 г. на основе экспозиции 82,4 кг·год был достигнут верхний предел $T_{1/2} > 9,0 \cdot 10^{25}$ лет (90%) и предел для эффективной массы майорановского нейтрино 0,07–0,16 эВ. К декабрю 2019 г. была закончена вторая фаза эксперимента. В результате получен новый верхний предел для искомого распада — $T_{1/2} > 1,8 \cdot 10^{26}$ лет. Результат является наилучшим мировым достижением

Вверху: **Р.А. Мухамедшин, С.И. Григорьева, Л.В. Волкова**

Справа: **И.Р. Барабанов, Ю.С. Копысов, В.Л. Дадыкин**

для аналогичных экспериментов. В настоящее время ведется подготовка 3-й стадии эксперимента с использованием 200 кг Ge. Планируется достичь верхнего предела для $0\nu 2\beta$ распада ^{76}Ge на уровне 10^{27} лет.

Физика космических лучей

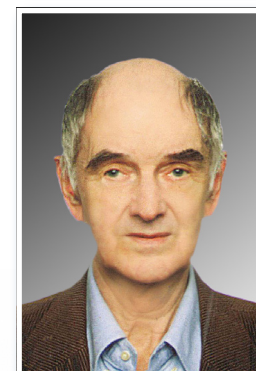
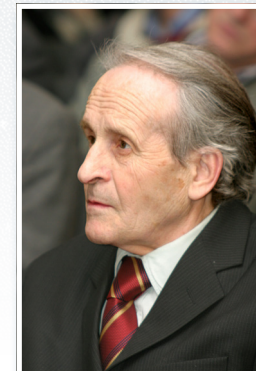
Начиная с 1972 г. ИЯИ РАН участвовал в высокогорном эксперименте «Памир» по исследованию взаимодействия адронов при сверхвысоких энергиях с помощью регистрации наиболее энергичных частиц в стволах ШАЛ (т.н. гамма-адронных семейств) с помощью рентгеноэмульсионных камер (РЭК). Сотрудники ЛНА участвовали как в проведении эксперимента, так и в моделировании ядерно-электромагнитных каскадов (ЯЭК) в атмосфере.

Были получены важные результаты, давшие толчок развитию модели кварк-глюонных струн, учитывающей плавное нарушение скейлинга в фрагментационной области генерации адронов. Был обнаружен эффект т.н. компланарности самых энергичных подстволов ШАЛ на мишенной плоскости, качественно объясняемый компланарной генерацией наиболее энергичных вторичных частиц при энергиях взаимодействий выше $\sim 10^{16}$ эВ (выше ~ 5 ТэВ в системе центра масс), но до сих пор не имеющий теоретического объяснения.

По результатам анализа гамма-адронных семейств с наблюдаемой энергией выше 500 ТэВ и содержащих т.н. «гало» (центральная область с наибольшим выделением энергии в стволе ШАЛ) показал, что суммарная доля протонов и ядер гелия при энергиях выше $\sim 10^{16}$ эВ (т.е. за т.н. «коленом») остается значительной.

Для расчетов развития ЯЭК в ЛНА были разработаны программы FANSY 1.0 и FANSY 2.0 моделирования ядерных взаимодействий в диапазоне энергий от ~ 100 ГэВ до ~ 1 ЭэВ.

Проект комплексного исследования первичных космических лучей (ПКЛ) и их взаимодействий на высотах гор в рамках Международного научно-исследовательского центра «Памир-XXI» будет реализовываться в соответствии с Планом практических действий проведения совместных российско-таджикских астрофизических исследований на Восточном Памире на 2019–2022 гг., разработанным Минобрнауки РФ во



исполнение поручений 16-го заседания Межправительственной комиссии по экономическому сотрудничеству между Российской Федерацией и Республикой Таджикистан от 20.03.2019 г.

Комплексные установки ШАЛ, являющиеся основным инструментом для определения энергетического спектра ПКЛ, их массового состава и анизотропии в области энергий $E_0 \sim 1$ ПэВ и выше, должны включать в себя системы из пространственно разнесенных детекторов разных типов, а именно: наземных детекторов заряженных частиц (для изучения электронно-фотонной и мюонной компонент), подземных детекторов заряженных частиц (для мюонов высоких энергий), центральных калориметров (для адронов высокой энергии в составе стволов ШАЛ), оптических детекторов различных типов (для регистрации черенковского излучения, либо флуоресцентного света), радио-детекторов и пр.

Появление коллайдеров очень высоких энергий (SPS, Tevatron, RHIC, LHC) не привело к прекращению исследований на установках ШАЛ адронных взаимодействий сверхвысоких энергий, поскольку специфика коллайдерных экспериментов не позволяет изучать важные особенности взаимодействий адронов, связанные с рождением вторичных частиц в переднем конусе ('forward physics'), в кинематической области фазового пространства, имеющей название области фрагментации налетающей частицы. Единственным способом решения этой проблемы являются эксперименты с РЭК или РЭК+ШАЛ на высотах гор. Это позволит уточнить достаточно сильно различающиеся модели адронных взаимодействий, претендующие на адекватное описание адрон-ядерных взаимодействий при сверхвысоких энергиях, различие которых приводит к существенно разным выводам о природе изломов спектра и массовом составе ПКЛ.

Еще одной целью новой установки является изучение диффузного гамма-излучения сверхвысокой энергии ($E_\gamma > 30$ ТэВ) во всей доступной полусфере (Северном полушарии), а также поиск точечных γ -источников для их последующего более детального изучения с помощью стереоскопических систем атмосферных черенковских гамма-телескопов (типа HESS, VERITAS, CTA, AGIS и пр.).

Предлагается создание в горах Восточного Памира на высоте 4260 м н.у.м. комплексной установки ШАЛ нового поколения.

В основу проекта «Памир-XXI» площадью ~ 1 км² которой закладываются два оригинальных подхода:

- ◆ новая технология регистрации черенковского света ШАЛ, использующая:
 - а) стереоскопическую систему из нескольких (оптимально, четырех) оптических растровых телескопов с площадью зеркала около 4 м², углом обзора не менее 30° и размером пикселя $\sim 0,8^\circ$, различающие ШАЛ от разных (по массе) групп первичных ядер,
 - б) сеть из быстрых широкоугольных оптических детекторов (40–50°) с размером шага сетки 25 м, которые смогут определять направление прихода ШАЛ с высокой точностью ($\sim 0,1^\circ$), а также положение оси ШАЛ и энергию первичной частицы;
- ◆ новый тип центрального гибридного калориметра в сочетании с РЭК, позволяющей изучать характеристики отдельных высокоэнергичных адронов в составе столов ШАЛ, и толчковой установкой.

Наземная ливневая система заряженных частиц установки «Памир-XXI» будет иметь традиционную конструкцию, оптимизированную для наблюдения ШАЛ на высоте 4260 м н.у.м., приблизительно соответствующей максимуму развития протонного ливня в атмосфере при $E_0 \sim 10^{15}$ эВ, где минимальны флуктуации, связанные с развитием ШАЛ.

Установка «Памир-XXI» будет обладать следующими характеристиками:

- ◆ диапазон изучаемых первичных энергий $E_0 \approx 3 \cdot 10^{13} - 10^{18}$ эВ с
- ◆ неопределенность для первичной энергии $\delta E_0 / E_0 \approx 15\%$;
- ◆ точность определения направления прихода частицы — не хуже $0,1^\circ$;
- ◆ точность определения положения оси ливня — не хуже 1 м;
- ◆ погрешности разделения первичных протонов/ядер азота и ядер азота/железа $\approx 10\%$;
- ◆ высокая эффективность выделения легких ядер (протоны, протоны + ядра гелия);
- ◆ отбор гамма-квантов ультравысокой энергии позволит сохранить около 30% истинных гамма-квантов и подавить

при этом не менее 99% первичных ядер, составляющих фон;

- ♦ структура центрального калориметра позволит изучать область фрагментации адронов в адрон-ядерных взаимодействиях при энергиях $E_0 > 1$ ПэВ ($\sqrt{s} > 2$ ТэВ) и получать дополнительную информацию по отношению к данным экспериментов на ЛНС.

В ЛНА проводятся теоретические исследования по физике черных дыр и темной материи и по различным аспектам эйнштейновской и модифицированной теории гравитации. **В.И. Докучаев** и **Ю.Н. Ерошенко** изучают сверхмассивные черные дыры в ядрах галактик, роль первичных черных дыр в эволюции ранней Вселенной, взаимодействие черных дыр с темной материей, образование сгустков из частиц темной материи и их возможные наблюдательные проявления. Проводятся исследования аннигиляции темной материи и вычисление потоков гамма-квантов, нейтрино, и других частиц, которые могут давать вклад в наблюдаемые на Земле потоки космических лучей.

Лаборатория электронных методов детектирования нейтрино

Научная тематика работ, проводимых в **лаборатории электронных методов детектирования нейтрино**, продолжает исследования, начатые в лаборатории «Нейтрино» ФИАН под руководством **Г.Т. Зацепина**. В 1971 году это была группа, возглавляемая **О.Г. Ряжской** и состоявшая из сотрудников лаборатории «Нейтрино», на базе которой был образован отдел лептонов высокой энергии и нейтринной астрофизики (ОЛВЭНА) только что созданного Института ядерных исследований АН СССР.

Основной задачей исследований, стоявшей перед сотрудниками группы, было в то время изучение роли мюонов космических лучей в образовании фона планировавшихся подземных низкофоновых экспериментов. С этой целью изучался поток мюонов под землей, их взаимодействия с ядрами грунта и характеристики ядерно-активной компоненты, генерируемой мюонами в грунте.

Детектор АСД «Коллапс»

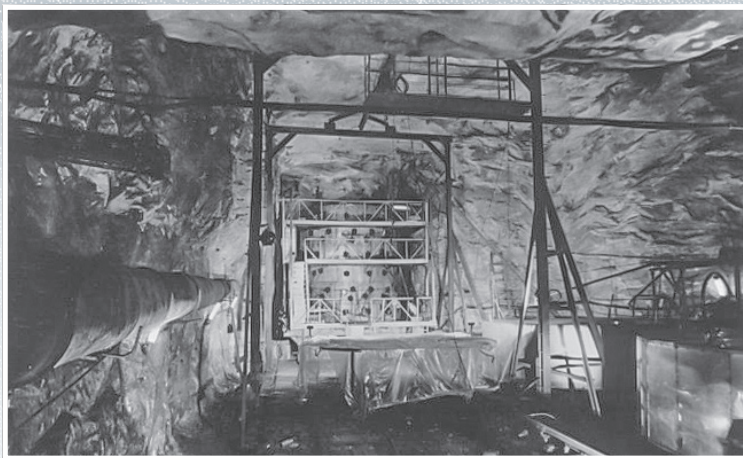
Для решения этих задач в соляных шахтах г. Карло-Либкнехтовска (ныне г. Соледар, Донецкая область, Украина) сотрудниками группы (с 1973 г. — сектора, с 1986 г. — лаборатории) в период с 1967 по 1978 г. были созданы установки, которые составили экспериментальную базу первого в СССР (1967 г.) подземного научного комплекса по исследованию космических лучей.

В 1974 г. на глубине 316 м.в.э. было закончено строительство шеститонной сцинтилляционной установки, начатое в 1969 г. Установка включала в себя полутонный нейтронный детектор, сцинтиллятор которого содержал соль гадолиния для увеличения эффективности регистрации нейтронов. С помощью этой установки было измерено сечение неупругого рассеяния мюонов на ядрах Na и Cl в области энергий до ~ 1 ТэВ.

В 1972 году был сделан принципиально важный шаг в развитии электронных методов детектирования потока электронных антинейтрино от коллапсирующих звезд с энергиями больше нескольких МэВ. Была обоснована возможность создания жидкостных сцинтилляционных детекто-

Соледар.
Сотрудники Артемовской научной станции:
В. Якушев, Л. Шаповалов, О. Очкас,
Г. Кочеткова, В. Фомин, Р. Еникеев, Н. Ярош,
В. Кузнецов, А. Ярош





Установка «Коллапс» Артемовской научной станции. Снимок 1979 г. (слева)



Установка «Коллапс» Артемовской научной станции. Снимок 2016 г. (справа)

ров большой массы, способных с высокой эффективностью выделять акт взаимодействия $\bar{\nu}_e$ со свободными протонами (ядрами водорода, входящего в состав сцинтиллятора) по характерной сигнатуре реакции обратного β -распада ($\bar{\nu}_e p \rightarrow n e^+$): появлению двух, разнесенных во времени, импульсов. Первый импульс, амплитуда которого приблизительно соответствует энергии $\bar{\nu}_e$, соответствует позитрону. Второй, задержанный относительно первого на характерное время $t \sim 200$ мкс, связан с регистрацией нейтрона по захватному ($np \rightarrow d \gamma$) гамма-кванту с энергией 2,23 МэВ. Высокая прозрачность сцинтиллятора, разработанного *О.Г.Ряжской, В.Л.Дадыкиным* и *А.В.Воеводским* и большие размеры детектора обеспечивают эффективную регистрацию гамма-квантов низких энергий выше ~ 1 МэВ. С другой стороны, большие размеры детектора позволяют измерять энергию высокоэнергичных частиц, электромагнитных и адронных каскадов по их полному энерговыделению, т.е. придать ему свойства калориметра. Таким образом, детектор такого типа позволяет проводить эксперименты в экстремально широком диапазоне энерговыделений от единиц МэВ до сотен ГэВ.

Эти физические принципы были использованы при создании 100-тонного сцинтилляционного детектора следующего поколения («Коллапс»), монтаж которого был закончен в 1977 году в соляной шахте на глубине 570 м в.э. Эксперименты, проводимые на установке «Коллапс», охватывали широкий круг проблем сформировавшегося к тому времени нового направ-

ления исследований — подземной физики, включающей поиск нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звезд, изучение потока мюонов космических лучей и их взаимодействий, поиск редких процессов, предсказываемых теорией.

В период с 1978 г. по 1989 г. сотрудниками ЛЭМДН в экспериментах на установке «Коллапс» были получены следующие результаты:

- ◆ измерен спектр мюонов космических лучей до энергий 10 ТэВ;
- ◆ изучено сечение неупругого рассеяния мюонов на средних ядрах до энергий ~ 5 ТэВ и показано, что его характеристики хорошо описываются моделью векторной доминантности;
- ◆ показано, что каскады, генерируемые мюонами в грунте и развивающиеся в веществе детектора, с высокой точностью разделяются на адронные и электромагнитные по количеству содержащихся в них нейтронов;
- ◆ измерена зависимость множественности нейтронов и пионов от энергии электромагнитных и адронных каскадов вплоть до 3 ТэВ;
- ◆ измерен энергетический спектр изолированных нейтронов до энергий 100 МэВ.

На детекторе «Коллапс» была экспериментально отработана методика поиска нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звезд в Галактике, которая затем использовалась на установках LSD и LVD.

Детектор LSD

В 1977 году сотрудники лаборатории начали разработку новой сцинтилляционной установки LSD (Liquid Scintillation Detector) в рамках международного сотрудничества СССР – Италия по исследованиям в области астрофизики. Выбранное расположение установки в транспортном туннеле под Монбланом в подземной лаборатории Института космогеофизики Национального исследовательского совета Италии на глубине 5200 м. в.э. обеспечивало уникальные фоновые условия.

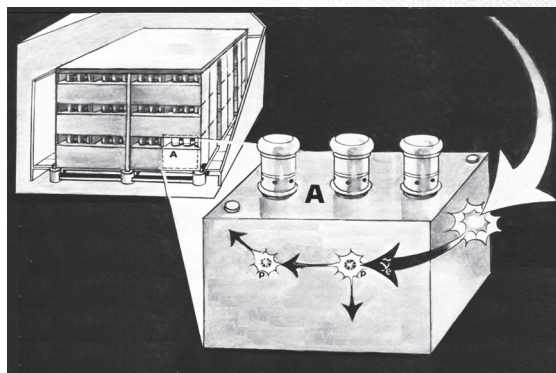
В лаборатории ЭМДН был разработан сцинтилляционный счетчик — модуль объемом $1,5 \text{ м}^3$, оснащенный тремя фотоумножителями с диаметром фотокатода 15 см и обладающий высокой эффективностью регистрации нейтронов $\sim 70\%$.



Сцинтилляционный счетчик LSD-LVD

Форма счетчика — прямоугольный параллелепипед $1,5 \times 1,0 \times 1,0 \text{ м}^3$ — позволяет смонтировать установку любого объема, размеры которой ограничиваются лишь размерами помещения

Группа LSD рядом с установкой, 1987 г.
Последний ряд: **А.С. Мальгин, В.Ф. Якушев**



Снимок из статьи журнала итальянского «Еросса», посвященной установке LSD под Монбланом

В левом углу — рисунок детектора, справа — рисунок основного модуля — сцинтилляционного счетчика



Е.Н. Алексеев, О.Г. Ряжская, О. Сааведра, В.А. Матвеев

Вручение премии им. М.А. Маркова 2007 г. за разработку методики, создание экспериментальных установок и регистрацию нейтринного сигнала от гравитационного коллапса массивной звезды SN1987A и выдающийся вклад в развитие фундаментальных исследований в области «подземной нейтринной физики»

Для установки LSD сотрудниками лаборатории были изготовлены 72 сцинтилляционных счетчика. Монтаж установки, проводившийся вместе с сотрудниками Института космогеофизики, был закончен в 1984 году. LSD содержит около 200 тонн вещества мишени, из них 90 тонн — сцинтиллятор, около 110 тонн — железо. Детектор экранирован защитой из свинца и борированного парафина. Энергетический порог для триггера — 5 МэВ, для регистрации нейтронов — 0,7 МэВ. Фон установки в нейтронном канале — около 500 Гц на один счетчик. Основной задачей LSD является поиск нейтринных всплесков от коллапсирующих звезд. LSD послужил прототипом сцинтилляционной установки следующего поколения — детектора большого объема.

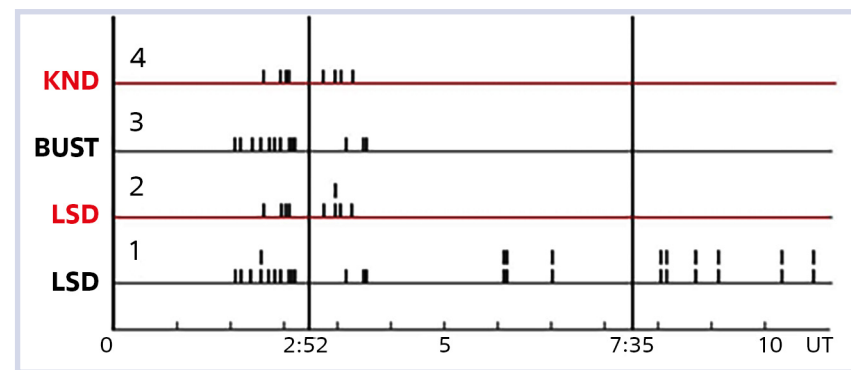
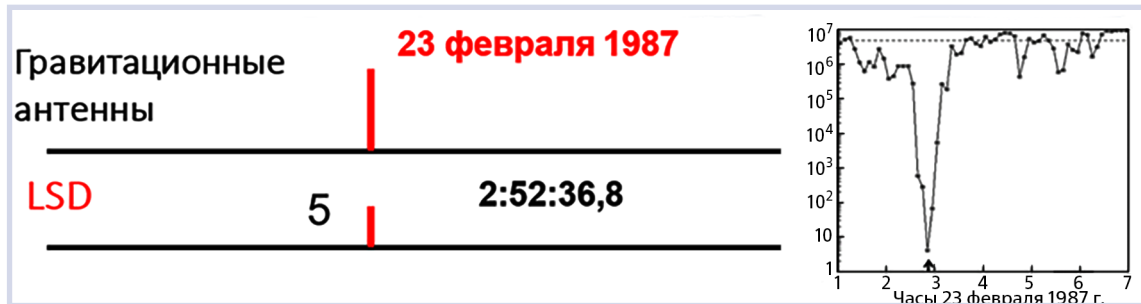
Результаты, полученные на установке LSD:

- ◆ получена величина потока нейтронов от мюонов на глубине 5200 м в.э., которая вместе со значениями для глубин 25, 316 и 570 м в.э. согласовалась с расчетной зависимостью;
- ◆ получены ограничения на потоки диффузных нейтрино низких энергий;
- ◆ установлены ограничения на потоки $\bar{\nu}_e$ в моменты гамма-вспышек;
- ◆ установлено ограничение на поток $\bar{\nu}_e$ от Солнца с энергией более 5 МэВ;

- ◆ 23 февраля 1987 г. в 2 часа 52 минуты UT перед обнаружением вспышки Сверхновой SN1987A в оптическом диапазоне зарегистрировано экстремально редкое событие; время этого события совпало с сигналом гравитационной антенны GEOGRAV (Рим).

Регистрация события от вспышки Сверхновой SN1987A:

Детектором LSD 23.02.87 г. в 2ч 52 м 36 с UT был зарегистрирован редкий сигнал во время вспышки Сверхновой SN1987A в Большом Магеллановом Облаке. В течение 7 с были зафиксированы 5 событий с амплитудами от 7 до 11 МэВ. Корреляция такого сигнала со вспышкой Сверхновой случайно может



Корреляция данных LSD и гравитационных антенн в течении двух часов, центр которой совпадает со временем сигнала LSD. Вероятность того, что эти корреляции являются случайными, имеет порядок $p_i: 10^{-6}-10^{-5}$

Временная диаграмма событий детекторов LSD-BUST (1-3) и LSD-KND (2-4), совпадающих в пределах 1 с, а также двойных импульсов в LSD за период с 0 до 10 часов UT 23 февраля 1987 г.

реализоваться один раз в ~ 1000 лет. Помимо совпадения сигнала LSD с сигналами Гравитационных антенн в Риме (Италия) и в Мериленде (США) было обнаружено совпадение событий LSD в интервале 2-х часов с событиями в детекторах KND и BUST.

Основные результаты эксперимента LSD

1. M. Aglietta, G. Badino, G. Bologna et al., (LSD Collaboration). On the Event Observed in the Mont Blanc Underground Neutrino Observatory during the Occurrence of Supernova 1987a // *Europhys. Letters*, 3, (1987) 1315, DOI: 10,1209/0295-5075/3/12/011
2. M. Aglietta, G. Badino, G. Bologna et al., (LSD Collaboration). Correlation Analysis of the Data Recorded by the Baksan, Kamioka, and Mont Blanc Detectors during SN 1987A // *Annals of the New York Academy of Sciences* 571(1):584-593, DOI: 10,1111/j.1749-6632.1989.tb50545.x
3. M. Aglietta, G. Badino, G. Bologna et al., (LSD Collaboration). Comments on the Two Events Observed in Neutrino Detectors during the Supernova 1987a Outburst // *Europhys. Letters*, 3, (1987) 1321, DOI: 10,1209/0295-5075/3/12/012
4. Имшенник В.С., Рязжская О.Г. Вращающийся коллапсар и возможная интерпретация нейтринного сигнала LSD от SN 1987A // *Письма в Астрономический журнал: Астрономия и космическая астрофизика*. 2004. Т. 30. № 1. С. 17-36.
5. Badino G., Bologna G., Castagnoli et al., The 90 ton liquid scintillation detector in the Mont Blanc laboratory // *Il Nuovo Cimento C*. 1984. Т. 7. № 6. С. 573-590.
6. Aglietta M., Badino G., Bologna G. et al. Analysis of the data recorded by the Mont Blanc neutrino detector and by the Maryland and Rome gravitational-wave detectors during SN1987A // *Il Nuovo Cimento C*. 1989. Т. 12. № 1. С. 75-103.
7. Aglietta M., Badino G., Bologna G. et al. Neutron flux generated by cosmic-ray mouns at 5200 hg/cm² s.r. underground. Depth-neutron intensity curve // *Il Nuovo Cimento C*. 1989. Т. 12. № 4. С. 467-477, <https://doi.org/10,1007/BF02525079>
8. Aglietta M., Castagnoli C., Castellina A., et al. Limits on low-energy neutrino fluxes with the Mont Blanc liquid scintillator detector // *Astroparticle Physics*. 1992. Т. 1. № 1. С. 1-9., [https://doi.org/10,1016/0927-6505\(92\)90004-J](https://doi.org/10,1016/0927-6505(92)90004-J)

Детектор LVD

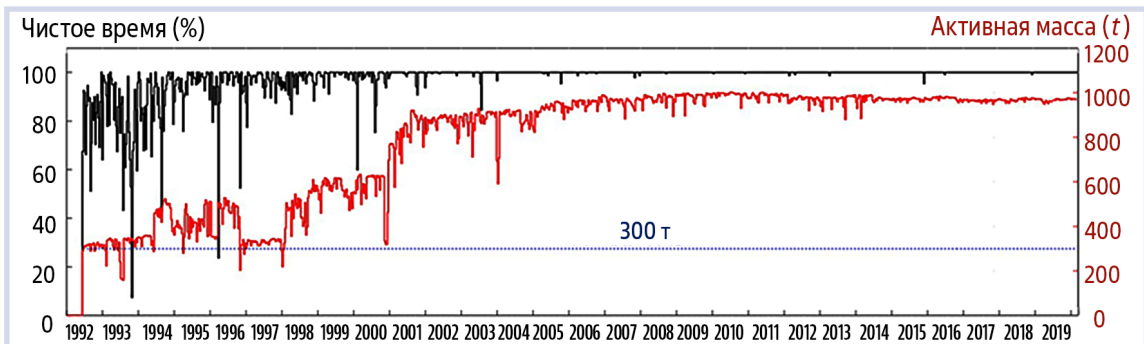
В 1984 году Международным научным комитетом был принят к реализации проект установки LVD (Large Volume Detector) в создаваемой подземной лаборатории Гран-Сассо (Италия). Проект LVD был разработан совместно сотрудниками лаборатории ЭМДН и Института космогеофизики Италии, его сцинтилляционная часть являлась расширенным вариантом LSD.

Строительство установки регламентировалось Соглашением между Национальным институтом ядерной физики Италии (INFN) и Российской академией наук, а также между INFN и ИЯИ РАН на основе межправительственного договора об исследованиях в области астрофизики.

Монтаж сцинтилляционных счетчиков в Гран-Сассо был начат в 1990 году. В 2000 году была закончена третья башня. Всего сотрудниками лаборатории ЭМДН было изготовлено около 700 сцинтилляционных счетчиков; поставлены фотоумножители для всего детектора вместе с комплектующими: кожухами и делителями напряжения.

Фотография детектора LVD в подземном зале лаборатории LNGS





▲ Рабочий цикл LVD (чёрная кривая) и активная масса (красная кривая) как функция времени с 1992 по 2019 гг.

LVD находится на глубине 3300 м в.э. Это сцинтилляционно-трековый детектор, состоящий из трех башен. Каждая башня

содержит 280 сцинтилляционных счетчиков, следовательно, полное количество счетчиков в установке — 840. Полная масса установки — 2100 тонн, из них сцинтиллятора 1000 тонн. Плоскости трековой системы образуют большие грани прямоугольного параллелепипеда с размерами, приблизительно, $2 \times 6 \text{ м}^2$ и $1 \times 6 \text{ м}^2$, внутри которого находятся 8 сцинтилляционных счетчиков. Трековая система представляет собой ячеистую структуру, пронизывающую весь объем установки. Точность определения точки входа частицы в плоскость трековой системы — $\pm 1 \text{ см}$, угловая точность — около $0,5^\circ$. Энергетические триггерные пороги наружных и внутренних счетчиков составляют, соответственно, 8 и 4 МэВ; пороги регистрации нейтронов — 0,8 и 0,4 МэВ. Средний темп счета фоновых импульсов в нейтронном канале $\sim 200 \text{ Гц}$ на один счетчик. Установка LVD на сегодня является крупнейшим сцинтилляционным детектором, обладающим уникальными возможностями для исследований в области подземной физики.

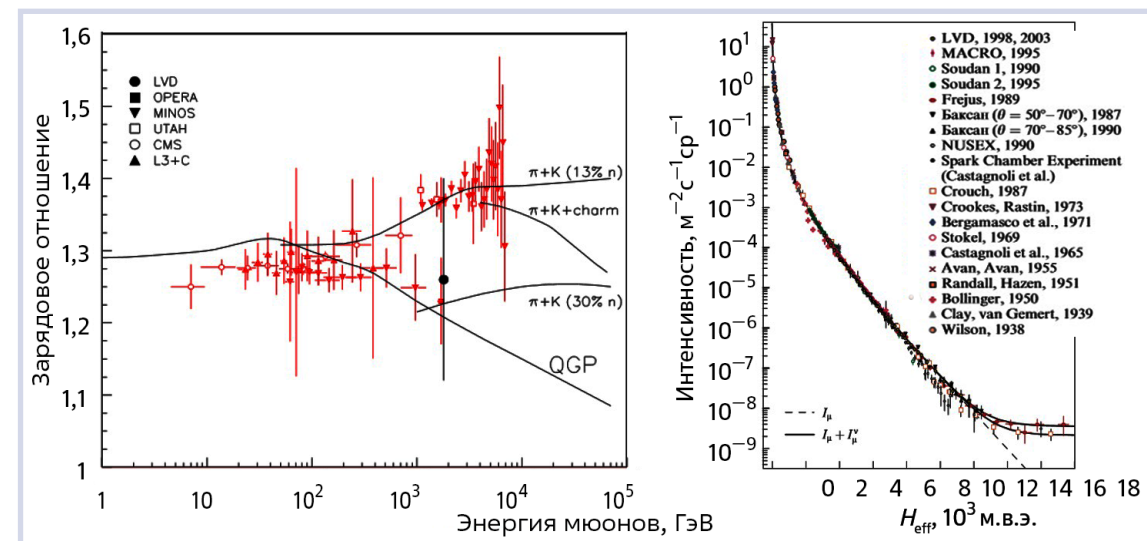
Фундаментальные результаты, полученные на установке LVD:

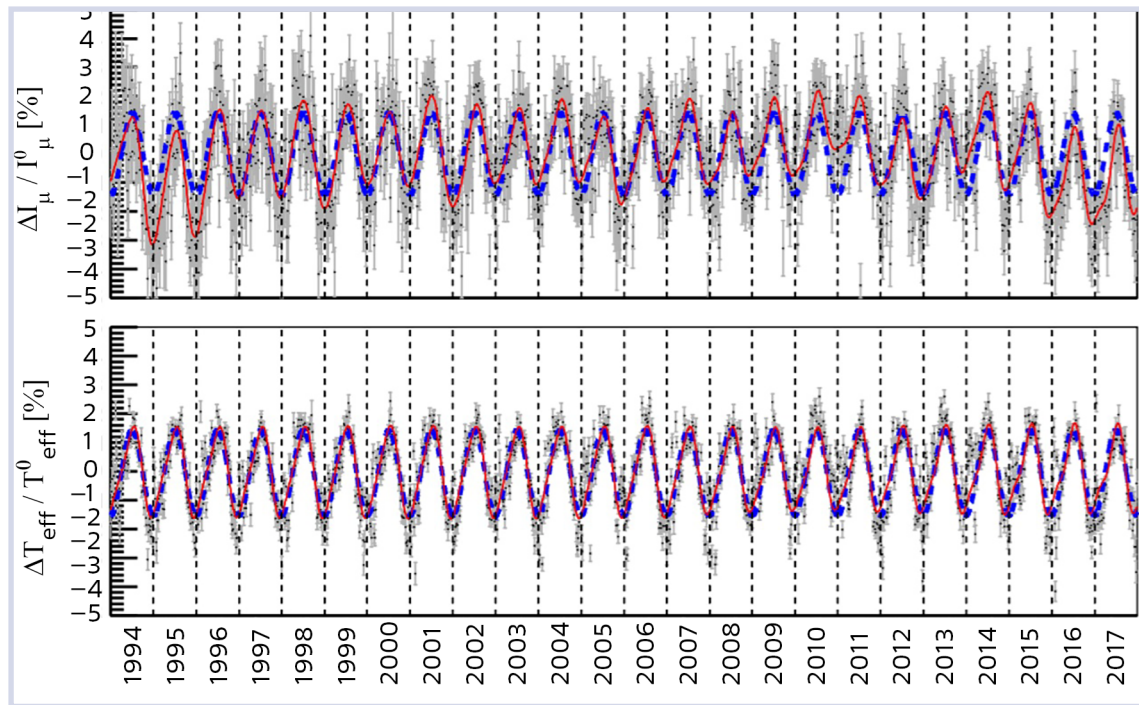
- ◆ получен предел для отношения R каналов быстрой (через чармированные частицы) и обычной (π , K-распад) генерации в области энергий $E_\mu > 10^{13} \text{ эВ}$: $R < 2 \times 10^{-3}$ на уровне достоверности 95%;
- ◆ при совместном анализе данных LVD и EAS-TOР впервые определена зависимость средней энергии высокоэнергетических мюонов ($E_\mu > 10^{12} \text{ эВ}$) в стволах ШАЛ от размера ШАЛ;

показано, что измеренная зависимость, чувствительная к составу первичного космического излучения, лучше согласуется со смешанным составом;

- ◆ определен с высокой точностью показатель спектра нуклонов первичного космического излучения в области энергии $10^{13} - 4 \times 10^{14} \text{ эВ}$: $\gamma = 2,78 \pm 0,05$;
- ◆ впервые на больших глубинах получены энергетические характеристики потока адронов в области 20–200 МэВ, являющегося основным источником фона в низкофоновых подземных экспериментах по изучению редких событий; экспериментальные характеристики хорошо согласуются с расчетами, выполненными с помощью универсального пакета программ SHIELD;
- ◆ установлен верхний предел на поток солнечных электронных антинейтрино, который мог бы возникнуть при конверсии борных нейтрино, на 90% уровне достоверности равный $1,0 \times 10^5 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$; верхний предел на отношение потоков электронных антинейтрино к нейтрино равен 1,7 %;
- ◆ по данным работы нейтринного телескопа LVD за 27 лет работы, получено экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звезд в Галактике: менее 1 события за 11,7 г. на 90% уровне достоверности.

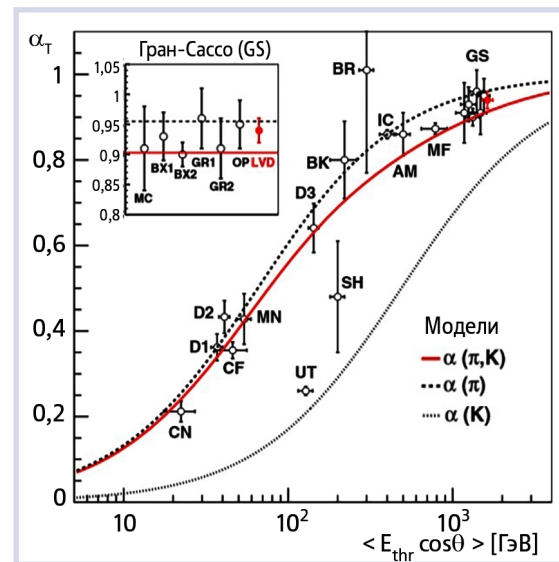
▲ Слева: результаты измерений зарядового отношения мюонов космических лучей. Чёрный кружок — результат эксперимента LVD. Справа: кривая глубина — интенсивность. Чёрные точки — данные LVD





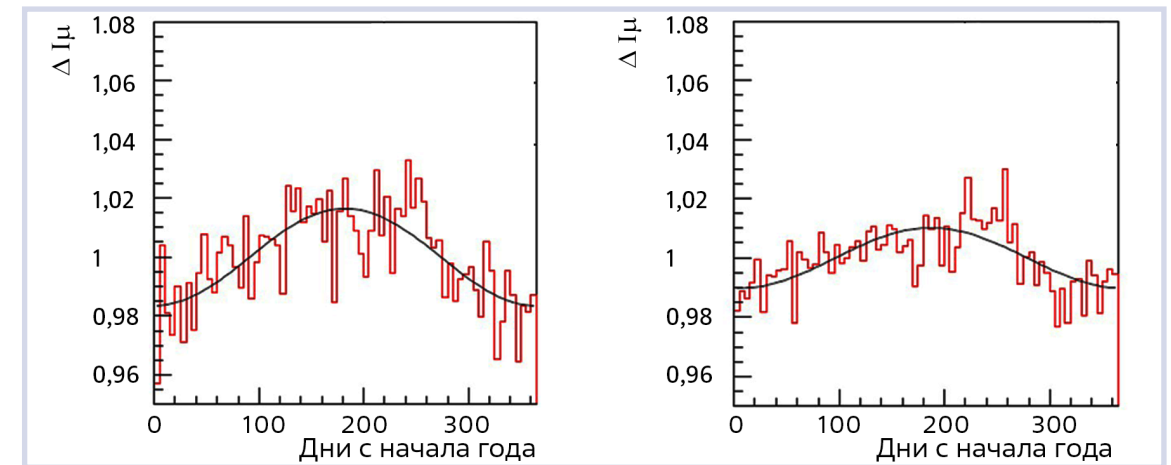
Временные ряды потока мюонов (верхняя панель) и эффективной температуры (нижняя панель)

Сравнение экспериментальных значений α_T с моделями, учитывающими распады пионов и каонов (сплошная красная линия), только для распадов пионов (пунктирная черная линия) и только для распадов каонов (пунктирная черная линия)



Основные результаты по физике космических лучей последних лет:

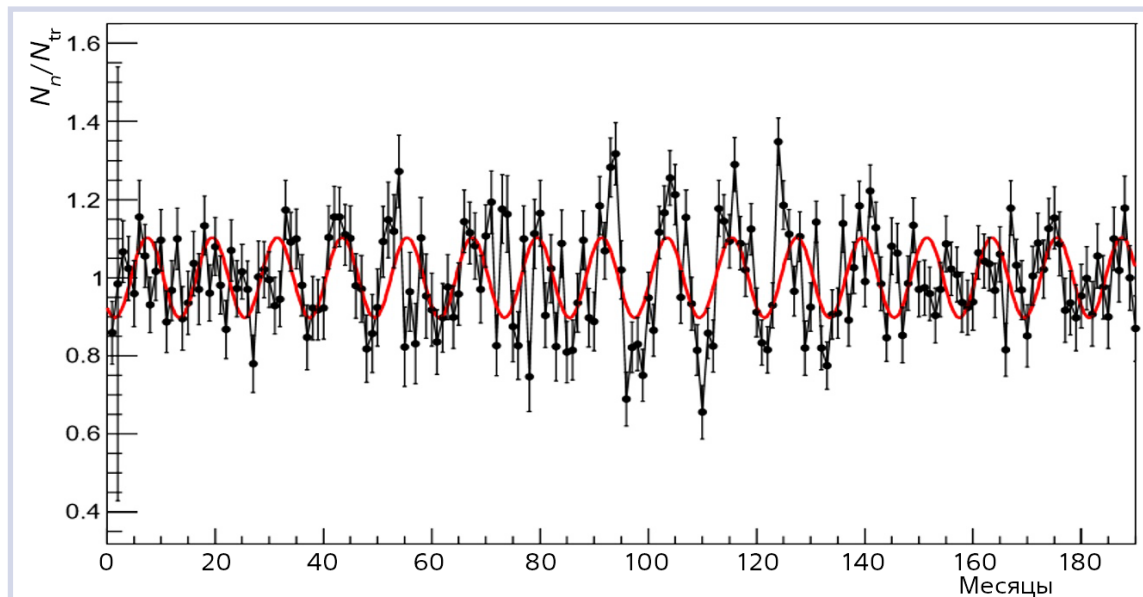
- с целью поиска возможных точечных источников проведен анализ мюонов со средними энергиями на уровне моря 1,7 ТэВ, 4,1 ТэВ и 8,9 ТэВ; для этих диапазонов энергий ана-



Вариации темпа счета горизонтальных (слева) и вертикальных (справа) мюонов, метод наложения эпох. Бин – 5 дней. Кривые – аппроксимация $f(t) = 1 + P1\cos(2\pi(t-P2)/365)$

лизировалось превышение наблюдаемого количества мюонов; значимого статистического превышения не установлено;

- по данным 9×10^6 мюонов, прошедших через LVD, определено зарядовое отношение мюонов космических лучей с энергиями $E > 1,3$ ТэВ на уровне моря: $\mu^+/\mu^- = 1,26 \pm 0,11 \pm 0,04$;
- по временным рядам более пятидесяти миллионов мюонов, зарегистрированных в детекторе LVD за 24 года, под землей был измерен средний поток мюонов $I_\mu = (3,35 \pm 0,0005 \text{ стат} \pm 0,03 \text{ сист}) \times 10^{-4} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$; поток подземных мюонов сезонно модулируется из-за изменений температуры в стратосфере; определен эффективный температурный коэффициент $\alpha_T = 0,94 \pm 0,01 \text{ стат} \pm 0,01 \text{ сис}$;
- в результате анализа интенсивности мюонов, зарегистрированных в детекторе LVD с 2001 по 2018 года, выделено $1,9 \times 10^6$ событий в горизонтальном направлении от 70° до 90° и 8×10^6 событий в вертикальном направлении от 0° до 20° ; были получены величины сезонных вариаций интенсивности мюонов $\delta I_\mu^{\text{hor}} = 1,7 \pm 0,3 \%$ и $\delta I_\mu^{\text{ver}} = 1,0 \pm 0,2 \%$ для горизонтальных и вертикальных мюонов, соответственно;
- проведен анализ сезонных модуляций нейтронов, генерированных мюонами космический лучей в подземном детекторе LVD (LNGS, Италия). На основе данных трех башен LVD в течение 16 лет определены параметры вариаций нейтронов. Измерение удельного числа нейтронов (число



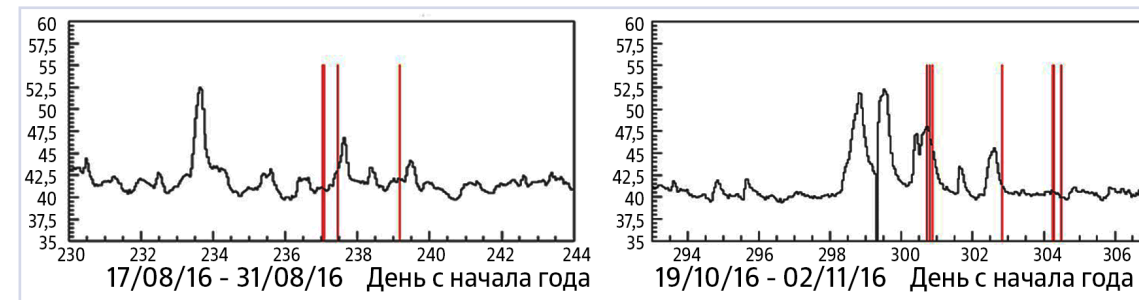
▲
 Вариации удельного числа нейтронов в месяц. Начало — 1 января 2001 года. Точки — экспериментальные данные LVD, кривая — аппроксимация законом $N(t) = 1 + \delta N_n/N_n \times \cos[2\pi(t - t_0)/T]$

нейтронов на мюон) в летние и зимние периоды позволило определить величину модуляции энергии мюонов $\Delta E_\mu \sim 10\%$;

- ◆ по данным измерений генерации нейтронов мюонами получен выход (удельное число нейтронов) в сцинтилляторе: $(3,3 \pm 0,3) \times 10^{-4} n/\mu/(\text{г}\cdot\text{см}^{-2})$, в железе: $(15 \pm 2) \times 10^{-4} n/\mu/(\text{г}\cdot\text{см}^{-2})$, и в свинце: $(55 \pm 20) \times 10^{-4} n/\mu/(\text{г}\cdot\text{см}^{-2})$; получена универсальная формула, связывающая выход нейтронов со средней энергией мюонов и атомным номером вещества: $Y_n = 4,4 \times 10^{-7} E_\mu^{0,78} A^{0,95} n/\mu\text{он}/(\text{г}/\text{см}^2)$;
- ◆ обнаружена корреляция между темпом счета в низкоэнергетическом канале установки LVD (выше 0,4 МэВ) и толчками во время землетрясений в Центральной Италии и Юго-Восточном Средиземноморье; данный факт может быть объяснен регистрацией распадов дочерних ядер радона, выходящего из горных пород перед и во время землетрясений.

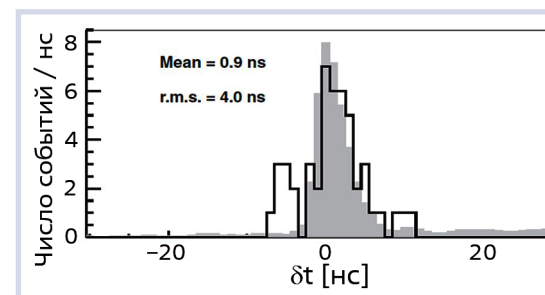
Помимо проведения экспериментальной работы в лаборатории была выполнена серия расчетов. Показано, что:

- ◆ основным механизмом генерации мюонов высокой энергии ($E_\mu > 2$ ТэВ) в электромагнитных ливнях, инициированных первичными γ -квантами, является процесс прямой генерации мюонных пар;



▲
 Темп счета установки по низкоэнергетическому поругу во время землетрясений. Время в днях с начала года. Светлыми линиями обозначены время землетрясений с магнитудой больше 4 баллов.
 а) 24 августа 2016 г. — 237 день года;
 б) 26 октября 2016 г. — 300 день года
 2016-10-30 07:40:17, 2016-10-28 22:02:43,
 2016-10-26 21:18:05

- ◆ рассмотрена роль электромагнитных процессов в генерации мюонов; получено, что в атмосфере мюоны с $E_\mu > 3000$ ТэВ образуются, в основном, благодаря рождению мюонных пар γ -квантами электронно-ядерных ливней; получено, что под землей примерно 50% узких мюонных пучков с малой множественностью объясняются процессом создания мюонных пар мюонами в грунте;
- ◆ предложен метод детектирования мюонных и τ -нейтрино и связанный с ним метод поиска осцилляций в нейтринных потоках от коллапсирующих звезд;
- ◆ показано, что коллапс звезды всегда сопровождается γ -всплеском; используя связь между зарегистрированным γ -всплеском и сигналами подземных детекторов можно определить направление на звезду, сколлапсировавшую без сброса оболочки;
- ◆ для изучения нейтронного фона в подземных экспериментах проведены расчеты генерации нейтронов мюонами для различных ядер, которые обычно входят в состав окружающей породы и защиты экспериментальных установок.



▲
 Распределение δt разности времени-пролета нейтрино и времени-пролета световых фотонов

Измерение скорости нейтрино на LVD

Для измерения скорости нейтрино на LVD была создана новая система измерения точного времени, сигнал от которой мог подаваться всем экспериментам лаборатории LNGS. Во время



▲
Е.А. Добрынина

работы пучка с новой структурой (короткие «банчи» пучка нейтрино, 10–24 мая 2012 г.) установка LVD работала в полном объеме и зарегистрировала 190 событий. Для определения скорости нейтрино были отобраны 79 событий, в которых мюоны от нейтрино прошли через все три башни и через счетчики со светодиодами. 48 из них, имеющие большие энерговыделения, были отобраны визуально. В результате для 48 зарегистрированных мюонных событий от ней-

трино из ЦЕРН со средней энергией 17 ГэВ была определена величина разности времени пролета нейтрино и времени прохождения света $\delta t = -0,3 \pm 0,6$ (стат) $\pm 3,2$ (сист) нс. Величина относительного отклонения скорости нейтрино от скорости света по данным пучка нейтрино из ЦЕРН с короткими банчами составила $3,3 \cdot 10^{-6} < (v_\nu - c)/c < 3,5 \cdot 10^{-6}$. С использованием средней энергии нейтринного пучка ($E_\nu = 17$ ГэВ) получено ограничение на массу мюонного нейтрино: $m_\nu < 44$ МэВ/ c^2 на 99% уровне достоверности.

Основные результаты эксперимента LVD

1. Aglietta M., Antonioli P., Badino G., et al. The Most powerful scintillator supernovae detector: LVD // Nuovo Cimento della Societa Italiana di Fisica A. 1992. Т. 105. № 12. С. 1793-1804.
2. Antonioli P., Bari G., Basile M., et al., Muon Depth 'intensity' relation measured by LVD underground experiment and cosmic ray muon spectrum at sea level // Physical Review D: Particles and fields. 1998. Т. 58. № 9. С. 920051-920056.
3. Agafonova N.Yu., Boyarkin V.V., Kuznetsov V.V., et al. On-line recognition of supernova neutrino bursts in the LVD // Astroparticle Physics. 2008. Т. 28. № 6. С. 516-522.
4. Agafonova N.Yu., Boyarkin V.V., Kuznetsov V.V., et al. Study of the effect of neutrino oscillation on the supernova neutrino signal with the LVD detector // Astroparticle Physics. 2007. Т. 27. № 4. С. 254-270.
5. Bari G., Basile M., Benelli A., et al. Neutrino-induced and atmospheric single-muon fluxes measured over five decades of intensity by LVD at Gran Sasso Laboratory // Astroparticle Physics. 1995. Т. 3. № 4. С. 311-320.
6. M. Aglietta et al. (EAS-TOP and LVD Collaboration) First observation of high-energy cosmic-ray events obtained in coincidence between EAS-TOP and LVD at Gran Sasso // Il Nuovo Cimento A105 1993, 1815-1823.
7. А.С. Мальгин, О.Г. Ряжская. Нейтроны от мюонов под землей // Яд. физ., т. 71 № 10 с. 1800–1811, 2008.
8. N.Yu. Agafonova et al. (LVD Collaboration). Measurement of the Velocity of Neutrinos from the CNGS Beam with the Large Volume Detector // Phys. Rev. Lett. 109, 070801 (2012).
9. N. Agafonova (LVD and OPERA Collaborations). Determination of a time-shift in the OPERA set-up using the horizontal muons in the LVD and OPERA detectors // Eur. Phys. J. Plus 127 (2012) 71.
10. N.Y. Agafonova et al. (LVD Collaboration). Implication for the core-collapse supernova rate from 21 years of data of the Large Volume Detector" The Astrophysical Journal, 802:47 (9pp), 2015.
11. N. Agafonova et al. (LVD Collaboration). Characterization of the varying flux of atmospheric muons measured with the Large Volume Detector for 24 years // Phys. Rev. D 100, 062002 (2019), DOI: 10.1103/PhysRevD.100.062002.

Детектор OPERA

Международный проект CNGS (CERN Neutrinos to Gran Sasso) направлен на изучение свойств нейтрино и имеет фундаментальное значение для физики элементарных частиц, астрофизики и космологии. Специфические особенности этой частицы делают ее объектом, чрезвычайно трудным для экспериментального изучения. Трудности экспериментов с нейтрино привели к тому, что до сих пор не определены многие важнейшие характеристики нейтрино, такие, например, как массы различных сортов («ароматов») нейтрино, углы смешивания, природа массивных нейтрино и т. п.

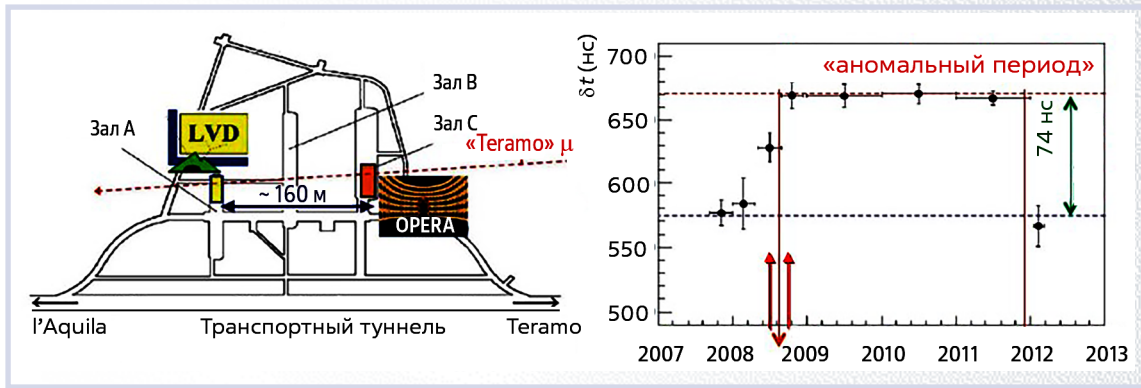
После открытия первого появления тау нейтрино в 2015 году, имеющего значение $5,1\sigma$, было найдено десять кандидатов в ν_τ с ожидаемыми фоновыми событиями $2,0 \pm 0,4$. Открытие $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ осцилляций подтверждаются с улучшенной значимостью $6,1\sigma$.

Характеристики отобранных событий OPERA и фона

Канал	Ожидаемый фон				ν_τ ожидаемое	Наблюдаемое число событий
	Чарм	Повторные взаимодействия адронов	Рассеяния мюонов на большой угол	Всего		
$\tau \rightarrow 1h$	0,15±0,03	0,28±0,38	—	1,43±0,39	2,96±0,59	6
$\tau \rightarrow 3h$	0,44±0,09	0,09±0,03	—	0,52±0,09	1,83±0,37	3
$\tau \rightarrow \mu$	0,008±0,002	—	0,016±0,008	0,024±0,008	1,15±0,23	1
$\tau \rightarrow e$	0,035±0,007	—	—	0,035±0,007	0,84±0,17	0
Total	0,63±0,10	1,37±0,38	0,016±0,008	2,0±0,4	6,8±0,75	10

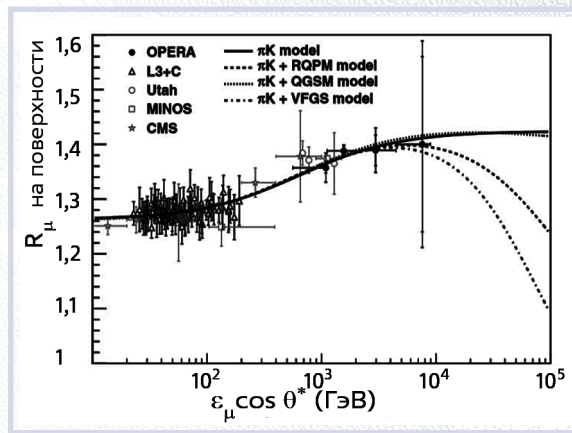
Также эксперимент OPERA позволил отличить нейтрино от антинейтрино по заряду мюона в τ -мюонных распадах. Этот заряд был определен как отрицательный на уровне $5,6\sigma$ для кандидата $\tau \rightarrow \mu$. Проведя специальный анализ, который включал также фон от 2% -ного загрязнения пучком, было получено первое прямое доказательство лептонного числа τ -нейтрино со значением $3,7\sigma$.

В эксперименте OPERA получено зарядовое отношение атмосферных мюонов. Наблюдаемое поведение μ^+/μ^- как функция энергии от 1 до 20 ТэВ не показывает отклонения от модели включающей только вклад пионов и каонов в быструю компоненту мюонного потока.



Определение временного сдвига между LVD и OPERA с помощью горизонтальных мюонов, проходящих через эти установки

В эксперименте OPERA получено зарядовое отношение атмосферных мюонов. Наблюдаемое поведение μ^+/μ^- как функция энергии от 1 до 20 ТэВ не показывает отклонения от модели включающей только вклад пионов и каонов в быструю компоненту мюонного потока



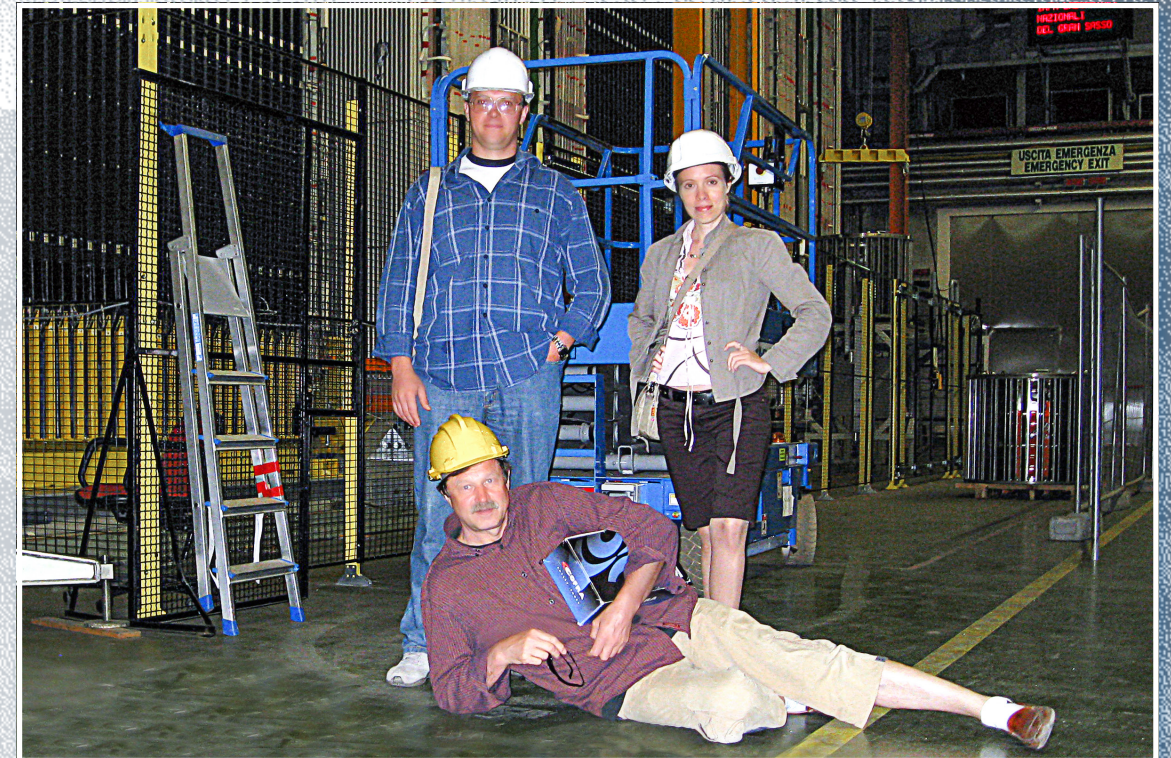
Совместный анализ данных LVD – OPERA

По мюонным данным детектора LVD был проведен мониторинг характеристик пучка мюонных нейтрино из CERN в рамках эксперимента OPERA — проект CNGS. Кроме этого, в результате анализа горизонтальных мюонов космических лучей, прошедших расстояние 160 м между установками LVD и OPERA была получена разница времен срабатывания часов $\delta t_{\text{LVD-OPERA}}$. Было установлено, что с середины 2008 г. по конец

2011 г. разница превышает время пролета мюона на $\Delta t = 73 \pm 9$ нс. Это помогло найти ошибку измерения скорости нейтрино в эксперименте OPERA.

На странице справа: фотографии детектора OPERA.

Вверху слева: фронтальный вид на мюонный туннель и эмульсионно-свинцовый блок; справа: «iron-box» — комната для хранения свинцовых блоков с кандидатами на взаимодействие; внизу: дежурные в зале с детектором — Н. А. Ярош, Н. Ю. Агафонова, А. С. Мальгин





На странице слева:
 В Италии: **В.А. Матвеев, Р.В. Матвеева,**
П. Спилантини, А.Н. Тавхелидзе, О.Г. Ряжская
 (вверху)

На плато Кампо Императоре
 над Лабораторией Гран-Сассо: **Л.Б. Безруков,**
А.П. Ярош, А.С. Мальгин, Е.О. Бабичев (внизу)

Вверху:
 В Италии: **А.С. Мальгин, Н.Ю. Агафонова,**
Л.В. Чернышев

внизу
 В Италии: **В.И. Докучаев, Н.Ю. Агафонова,**
А.С. Мальгин, Е.А. Янович



▲
 В Москве (в здании Президиума РАН)
 Н.Ю. Агафонова, А.С. Мальгин, Р.И. Еникеев,
 О.Г. Ряжская, В.Ф. Якушев

Основные результаты эксперимента OPERA

1. Adam T., Adam T., Agafonova N. Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam et al. // Published: 2012 in Journal of High Energy Physics. DOI: 10.1007/JHEP10(2012)093.
2. Acquafredda R., Adam T., Agafonova N. et al. The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino beam", Published: 2009 in Journal of Instrumentation, DOI: 10.1088/1748-0221/4/04/P04018.
3. Agafonova N., Aleksandrov A., Altinok O. et al. Observation of a first $\nu(\tau)$ candidate event in the OPERA experiment in the CNGS beam // Published: 2010 in Physics Letters B. DOI: 10.1016/j.physletb.2010.06.022.
4. Acquafredda R., Agafonova N., Ambrosio M. et al. First events from the CNGS neutrino beam detected in the OPERA experiment // Published: 2006 in New Journal of Physics, DOI: 10.1088/1367-2630/8/12/303.
5. Agafonova, N., Aleksandrov, A., Anokhina A. et al. Discovery of tau Neutrino Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment // Published: 2015 in Physical Review Letters, DOI: 10.1103/PHYSREVLETT.115.121802.
6. Agafonova N., Aleksandrov A., Anokhina A. et al. Evidence for $\nu(\mu) \rightarrow \nu(\tau)$ appearance in the CNGS neutrino beam with the OPERA experiment // Published: 2014 in Physical Review D, DOI: 10.1103/PHYSREVD.89.051102.
7. Agafonova N., Aleksandrov A., Anokhina A. et al. Observation of tau neutrino appearance in the CNGS beam with the OPERA experiment // Published: 2014 in Progress of Theoretical and Experimental Physics, DOI: 10.1093/PTEP/PTU132.

За 50 лет сотрудниками лаборатории ЭМДН опубликовано около 500 научных статей.

Лаборатория радиохимических методов детектирования нейтрино

Согласно существующим представлениям, основным источником энергии звезд, находящихся, как и наше Солнце, на главной последовательности, служат термоядерные реакции, в результате которых четыре протона превращаются в ядро гелия. Начиная с середины 60-х годов прошлого столетия, для проверки этой гипотезы активно в основном рассматривались радиохимические методы регистрации нейтрино.

Научная тематика лаборатории включает разработку радиохимических методов регистрации и измерения потока нейтрино, образующихся в результате термоядерных процессов на Солнце, а также от других природных и искусственных источников.

Разработка нейтринных экспериментов потребовала создания подземных лабораторий, обеспечивающих существенное снижение (в несколько миллионов раз) уровня фона космических лучей, и специальных низкофоновых материалов для защиты детекторов от радиационного излучения окружающей среды. Появилось новое направление — подземная физика. В нашей стране началось в 1966 году сооружение **Баксанской нейтринной обсерватории**.

Исследование нейтринного излучения Солнца

В первоначальном проекте Баксанской нейтринной обсерватории планировалось создать лабораторию глубокого заложения с размещением в ней, согласно предложенной **Г.Т. Зацепиным** программе нейтринной спектроскопии Солнца, единого комплекса из трех радиохимических нейтринных телескопов на основе Cl, Li и Ga, имеющих различные чувствительности к нейтрино, рождаемых в разных реакциях, протекающих в Солнце. Совокупность этих трех экспериментальных установок обещала дать важные сведения о внутреннем строении Солнца и звезд вообще.

Хлор-аргоновый и литий-бериллиевый методы

В лаборатории РХМДН был разработан метод регистрации солнечных нейтрино, основанный на использовании реакции $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$, и методы измерения величины фоновых

эффектов. На основе результатов этих работ в ИЯИ АН СССР планировался Cl-Ar эксперимент по регистрации солнечных нейтрино. Результаты исследования процесса извлечения аргона из жидкости легли в основу технического проекта хлор-аргоновой установки, содержащей 3000 тонн перхлорэтилена.

Также были начаты работы по изучению возможности создания радиохимического литий-бериллиевого детектора солнечных нейтрино.

Однако в США в первом солнечном нейтринном эксперименте с хлорным детектором, имевшем мишень 610 тонн перхлорэтилена, было наблюдеено значительно меньшее количество нейтрино по сравнению с расчетной величиной Стандартной солнечной модели. Это разногласие, подтвержденное результатами эксперимента Камиоканде в Японии, получило название широко известной «проблемы солнечных нейтрино», на решение которой ушло более 30 лет.

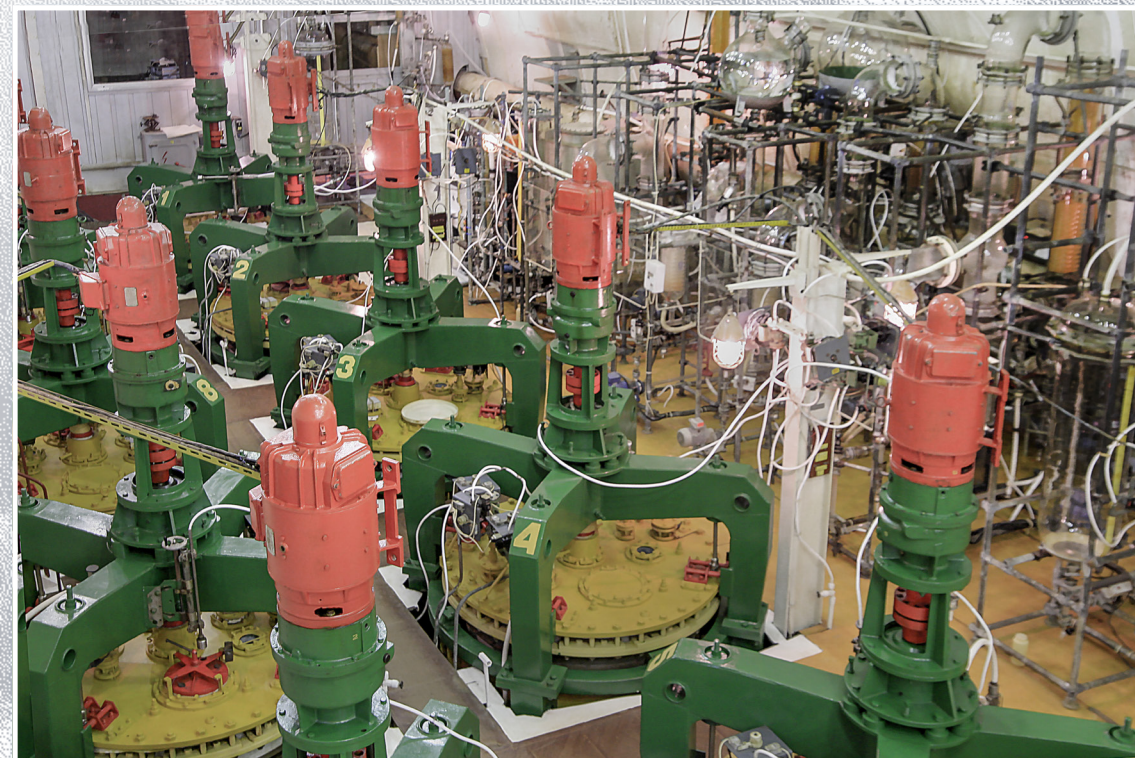
В сложившейся ситуации важным стало определить поток низкоэнергетических нейтрино, рождаемых в доминирующей в Солнце протон-протонной (pp) реакции.

Эксперимент SAGE

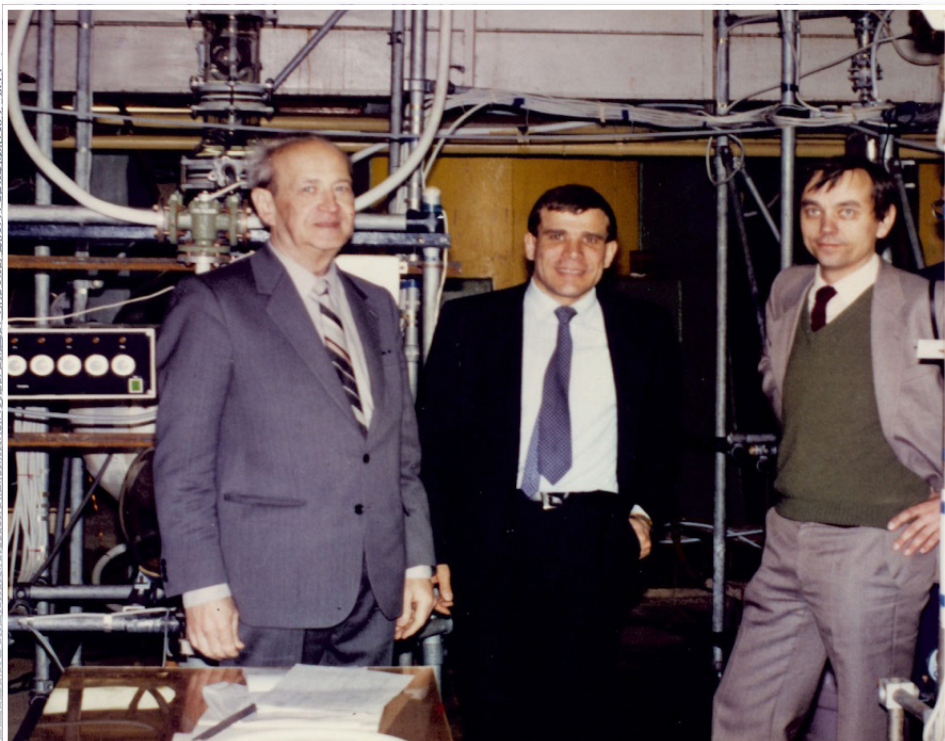
Такую возможность мог дать радиохимический эксперимент на основе реакции $^{71}\text{Ga}(\nu_e, e^-)^{71}\text{Ge}$ захвата нейтрино на ядрах ^{71}Ga , которая была предложена **В.А. Кузьминым** в 1963 году. Исследования по созданию галлиевого эксперимента начались в лаборатории РХМДН в 1975 году.

В 1977 году в связи с возросшей актуальностью получения экспериментальных данных в низкоэнергетической области спектра солнечных нейтрино, было принято решение в первую очередь приступить к строительству в Баксанской нейтринной обсерватории отдельной лаборатории **Галлий-германиевого нейтринного телескопа**.

Была разработана методика извлечения германия из многих тонн расплавленного металлического галлия, разработан метод счета единичных атомов ^{71}Ge и рассчитаны и измерены скорости образования германия-71 от различных фоновых процессов (от мюонов космических лучей, от альфа-частиц от внутренних радиоактивных примесей и внешних быстрых нейтронов).



▶
Реакторный зал Галлий-германиевого
нейтринного телескопа



▲
Г.Т. Зацепин, В.Н. Гаврин, Вольфганг Хампел
 (ключевой участник западноевропейской
 коллаборации GALLEX).
 Троицк, пилотная установка

В 1985 году в ИЯИ АН СССР в Троицке была создана пилотная установка, содержащая 7,5 тонн металлического галлия, на котором обрабатывалась методика извлечения единичных атомов ^{71}Ge .

В 1986 году комплекс Галлий-германиевого нейтринного телескопа (ГГНТ) с мишенью, содержащей 60 тонн металлического галлия, был принят в эксплуатацию, и для выполнения на нем галлиевого эксперимента была создана Советско-Американская коллаборация SAGE (Soviet-American Gallium Experiment).

Комплекс лаборатории ГГНТ размещен на расстоянии 3600 м от устья горной штольни, где в толще горного массива (4700 м водного эквивалента) интенсивность мюонов от горных пород практически достигает минимума. Глобальная интенсивность мюонов в месте расположения ГГНТ составляет $(3,03 \pm 0,10) \times 10^{-9} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Результаты первых измерений SAGE (1990–1992 гг.) показали значительное подавление потока солнечных нейтрино во всем энергетическом диапазоне и исключили возможность

решение проблемы солнечных нейтрино в рамках только физики Солнца, и дали доказательство изменения ароматов (осцилляций) нейтрино на их пути из центра Солнца к Земле. Результаты эксперимента SAGE стали основополагающим вкладом в решение проблемы солнечных нейтрино.

Величина скорости захвата солнечных нейтрино на $\text{Ga } 65,4^{+4,0}_{-4,1} \text{ SNU}^*$ (снэ — солнечные нейтринные единицы), полученная в SAGE на основании 168 измерений (январь 1990–декабрь 2007), составляет около 50% от величины, предсказанной Стандартной солнечной моделью. В западноевропейских галлиевых экспериментах результаты получены очень близкие к результатам SAGE, $73,1^{+7,1}_{-7,3} \text{ SNU}$ в GALLEX и в $62,9^{+5,5}_{-5,3} \text{ SNU}$ в GNO.

Для проверки правильности результатов, полученных на ГГНТ в эксперименте SAGE, были проведены эксперименты с искусственными источниками нейтрино. Галлиевые мишени были облучены источниками нейтрино на основе изотопов ^{51}Cr и ^{37}Ar , полученных в ядерных реакторах.

Средневзвешенное значение отношения измеренной скорости образования ^{71}Ge к ожидаемой величине, вычисленной на основе мощности источников, оказалось неожиданно низким, более чем на два стандартных отклонения меньше единицы. Этот результат получил название «галлиевая аномалия».

* SNU — Solar Neutrino Unit (солнечная нейтринная единица).

1 SNU = 1 взаимодействие в секунду в мишени, содержащей 10^{36} атомов взаимодействующего с нейтрино изотопа.



▲
В.Н. Гаврин (заведующий лабораторией РХМДН),
А.Н. Тавхелиде (первый директор ИЯИ РАН),
Р. Дэвис (США, руководитель хлор-аргонового
 эксперимента в Хоумстейке),
В.А. Матвеев (директор ИЯИ РАН) в подземной
 лаборатории Галлий-германиевого нейтринного
 телескопа. 1990 год

Эксперимент BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions)

Следующим этапом научной программы лаборатории РХМДН стало исследование причин «галлиевой аномалии» — разработка методик и выполнение на ГГНТ эксперимента BEST — 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 года выполнено на ГГНТ 10 девятидневных экспозиций 50 тонной металлической галлиевой мишени, разделенной на две,

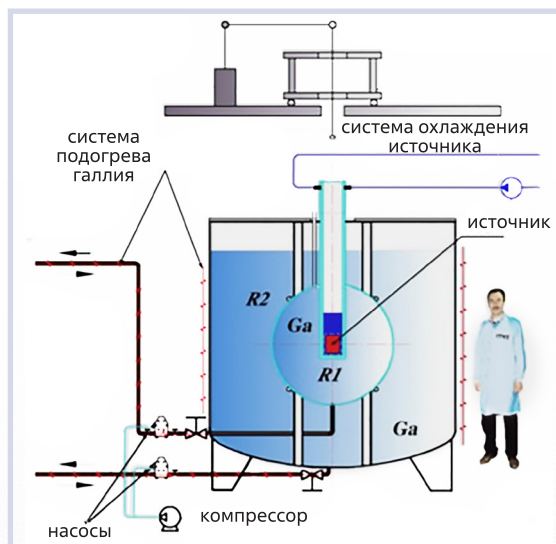
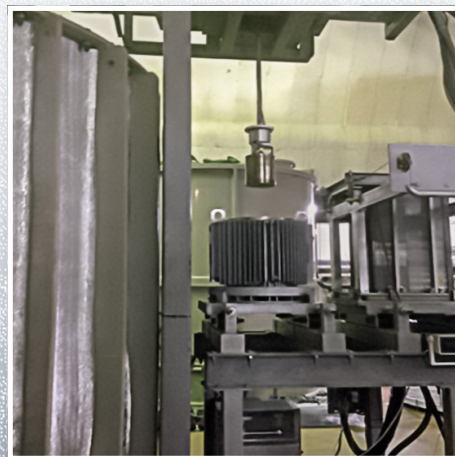


Схема 2-х зонной галлиевой мишени
в эксперименте BEST

Слева: источник опускается в калориметр,
В.В.Горбачев контролирует перемещение
источника
справа: источник перемещается в Ga мишень



внутреннюю и внешнюю, зоны. В настоящее время выполняется завершающий этап эксперимента — калибровка счетчиков и обработка полученных данных.

Планы развития лаборатории

Дальнейшая научная программа лаборатории РХМДН включает разработку и создание в БНО сцинтилляционного детектора нового поколения для исследований в области нейтринной гео- и астрофизики.

На начальном этапе эта задача включает разработку методов определения и измерения фоновых потоков нейтронного и гамма-излучений от естественной радиоактивности, а также методов и средств разделения черенковских и сцинтилляционных сигналов на прототипе создаваемого детектора.

«За создание Баксанской нейтринной обсерватории и исследования в области нейтринной астрофизики, физики элементарных частиц и космических лучей» в 1998 году коллектив сотрудников Института был удостоен Государственной премии Российской Федерации. В 2001 году достижения, полученные лабораториями РХМДН и ГГНТ в области исследований потока нейтрино от Солнца, удостоены Международной премии им. Б.М.Понтекорво, и в 2009 году за выдающийся вклад в исследование солнечных нейтрино и открытие нейтринных осцилляций присуждена золотая медаль имени Д.В. Скобельцына.

Эксперимент BEST



Лаборатория лептонов высоких энергий

Лаборатория лептонов высоких энергий возникла из группы **Чудакова** в лаборатории Нейтрино ФИАН возглавлявшейся **Г.Т. Зацепиным** при переходе последней во вновь образованный Институт ядерных исследований АН СССР. Лаборатория при этом была преобразована в отдел лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики (ОЛВЭНА), а группа Чудакова стала лабораторией лептонов высоких энергий. Руководитель новой лаборатории **Александр Евгеньевич Чудаков** (1921–2001) был к этому времени уже всемирно-известным ученым. На его счету были такие достижения, как создание первого в мире гамма-телескопа, пионерские исследования черенковского излучения широких атмосферных ливней (ШАЛ) космических лучей, открытие (совместно с **С.Н. Верновым**) внешнего радиационного пояса Земли, описание и измерение эффекта Чудакова (уменьшение суммарной ионизации частиц при рождении электрон-позитронных пар из-за интерференции волновых функций), предложение флуоресцентного метода регистрации широких атмосферных ливней космических лучей, и многое другое.

Лаборатория **Чудакова** во вновь созданном институте занималась разработкой и созданием на Баксанской нейтринной обсерватории крупных установок для регистрации космических мюонов и нейтрино и для исследований в области физики космических лучей. Работа эта велась в тесном сотрудничестве с лабораторией БПСТ БНО под общим руководством **А.Е. Чудакова**. Еще при его жизни в строй были введены установка «Ковер» (1974), Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (БПСТ, 1977) и установка для регистрации широких атмосферных ливней космических лучей «Андырчи» (1995). Все эти установки до сих пор находятся в эксплуатации, хотя неоднократно модернизировались. **А.Е. Чудаков** прекратил исполнять функции заведующего, когда был избран членом Президиума РАН. Вместо него заведующим стал **Александр Владимирович Воеводский**. К сожалению, последний внезапно скончался в 1999 г в возрасте 57 лет. С этого момента и вплоть до настоящего времени функции заведующего лабораторией исполняет **Александр Сергеевич Лидванский**. После ухода Чудакова работа лаборатории была связана с новыми направлениями исследований на прежних



установках БНО и с созданием новых установок в других местах. **О.Б. Щеголев, Ю.В. Стенькин, А.С. Лидванский** (слева направо)

Установки

Установки, создававшиеся на Баксанской нейтринной станции (в последствии, обсерватории) строились и эксплуатировались совместно лабораторией ЛВЭ и сотрудниками БНО. Поэтому, чтобы избежать ненужных повторов здесь приводятся краткие сведения об этих установках, которые будут дополнены в разделе, посвященном БНО.

Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп

Телескоп представляет собой четырехэтажное здание размером 17×17 м и высотой 11 м, стены и перекрытия которого собраны из 3200 жидкостных сцинтилляционных детекторов. Полное количество сцинтиллятора в установке — около 330 тонн. Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (БПСТ) расположен в горной выработке объемом $12\,000\text{ м}^3$ на расстоянии 550 м от начала горизонтального тоннеля.

Эффективная глубина, на которой находится телескоп, составляет $850\text{ гт} \cdot \text{см}^{-2}$. Этот детектор мюонов и нейтрино является одним из первых детекторов так называемой подземной физики. БПСТ с самого начала был создан как комбинированный

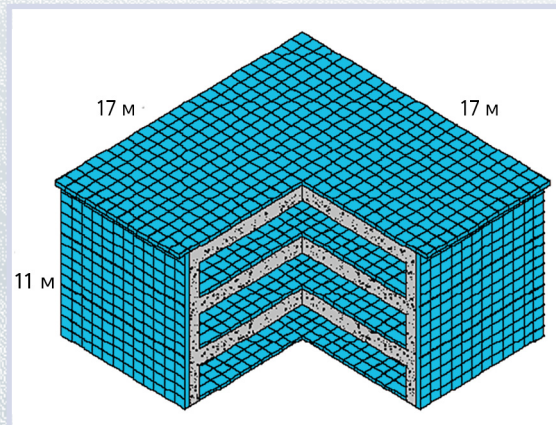
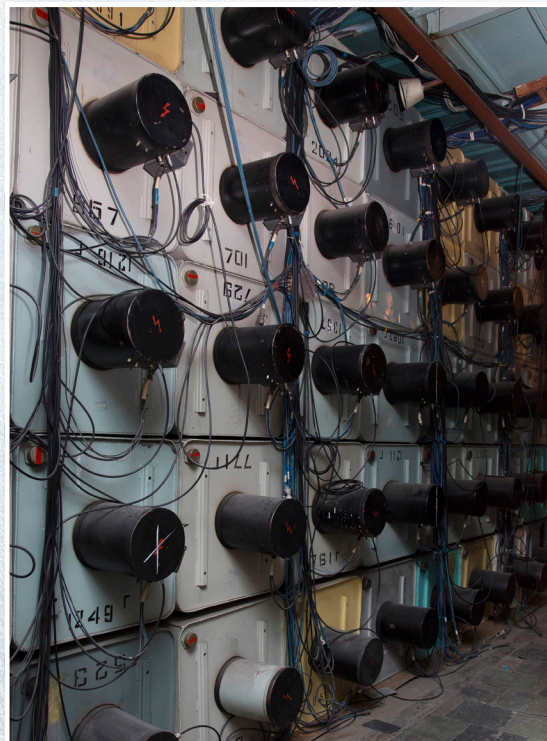


Схема БПСТ

Вертикальные модули БПСТ

Горизонтальная плоскость (один из ярусов) БПСТ



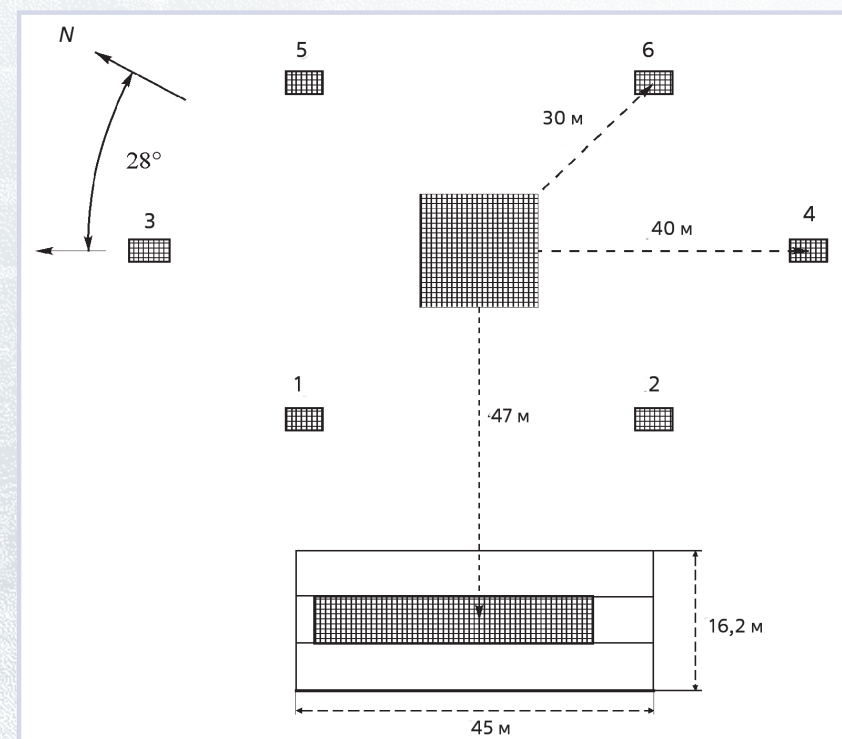
прибор для исследований в области физики нейтрино, астрофизики, и физики космических лучей.

Установка «Ковер»

Установка «Ковер» вступила в строй раньше других. В первоначальной конфигурации она состояла из 400 сцинтилляционных детекторов образующих квадрат площадью 200 м^2 , окруженный шестью выносными пунктами на расстояниях 30 и 40 метров от центра. В каждом из выносных пунктов размещались по 18 сцинтилляционных счетчиков (полная площадь во всех 6 пунктах 54 м^2) и по набору счетчиков Гейгера для калибровочных измерений. К этому первоначальному набору в разное время были добавлены нейтронный монитор, мюонный детектор, детектор черенковского света, измеритель электрического поля атмосферы, детекторы тепловых нейтронов.

Для эксперимента по изучению вариаций космических лучей во время гроз с целью наблюдения за свечением высотных разрядов на расстояниях 1 км и 75 км были установлены

План установки «Ковер» (первоначальная конфигурация плюс первая очередь мюонного детектора)





▲ Вид центральной части установки «Ковер»

видеокамеры. Весь этот комплекс разнообразных приборов позволял проводить исследования широчайшего диапазона, от гамма-астрономии до геофизики. В настоящее время реализуется проект «Ковер-3», в котором расширенный набор наземных детекторов в сочетании с мюонным детектором большой площади (400 м^2 на первом этапе) будут использованы для наблюдения первичных гамма квантов сверхвысоких энергий методом отбора бедных мюонами ливней.

Установка «Андырчи»

Установка «Андырчи» расположена на склоне одноименной горы над Баксанским подземным сцинтилляционным телескопом (БПСТ) и состоит из 37 пластиковых сцинтилляционных детекторов площадью 1 м^2 каждый. Общая площадь установки $5 \times 10^4 \text{ м}^2$, ее центр находится на высоте 2050 м над уровнем моря. Установка способна работать как самостоятельный детектор ШАЛ, и в комбинации с БПСТ для определения энергии ливней, ассоциированных с группами мюонов высокой энергии под землей.

Проект «Призма»

В лаборатории ЛВЭ Ю.В. Стенькиным был разработан и впервые применен новый метод изучения ШАЛ с помощью регистрации сопровождающих их тепловых нейтронов (проект PRISMA). Для этой цели был создан сцинтилляционный детектор нового типа — эн-детектор, способный регистрировать сразу две основные компоненты ШАЛ: электро-магнитную (э) и адронную (нейтронную, н). В настоящее время в рамках проекта PRISMA в содружестве с МИФИ и с ИНЕР (Пекин, КНР) созданы и работают 3 установки: 2 на уровне моря (Москва, МИФИ): PRISMA-32 и УРАН и одна в Тибете на высоте 4300 м над уровнем моря PRISMA-16-УВJ. Отдельные эн-детекторы были размещены в МИФИ, МГУ, Обнинске, и лаборатории Гран-Сассо (Италия) для изучения вариаций. В настоящее время работают 5 вариационных установок, расположенных в разных географических и геофизических условиях, как под землей, так и на поверхности: в Москве, на БНО, в Тибете и на Камчатке. Так что фактически создана глобальная сеть детекторов тепловых нейтронов, которая дает новые возможности для исследований в области геофизики.



▲ Установка «Адырчи»

Проект LHAASO и установка ENDA

Из эн-детекторов создается также установка ENDA, которая является частью крупнейшего проекта LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory, <http://english.ihep.cas.cn/ic/ip/LHAASO/>), большой комплексной высокогорной установки, площадью более 1 кв. км в Тибете на высоте 4400 м над уровнем моря для изучения космических лучей и наблюдений в области гамма-астрономии.

Особенно следует отметить, что лаборатория ЛВЭ не просто вошла в коллаборацию LHAASO, а вошла со своим проектом, ради



▲ Вид установки LHAASO с уже развернутыми частично детекторами (апрель 2019 г.)

которого первоначально планировавшаяся конфигурация проекта LHAASO была изменена. Установка ENDA (Electron-Neutron Detector Array) как часть проекта LHAASO предполагает создание ковра из эн-детекторов, размером $100 \times 100 \text{ м}^2$ вблизи центральной части LHAASO для измерения двух компонент ШАЛ — электронной и адронной (нейтронной).

Основные направления исследований и научные достижения

С момента создания лаборатории основными темами исследований были:

- ◆ атмосферные мюоны и нейтрино,
- ◆ поиск новых частиц и редких процессов,
- ◆ широкие атмосферные ливни,
- ◆ вариации космических лучей и их анизотропия,
- ◆ гамма-астрономия.

В последнее время все большее место в плане работ лаборатории занимает геофизика. Из полученных за 50-летие лаборатории результатов в качестве наиболее значительных можно выделить следующие.

На БПСТ впервые в мире был измерен вертикальный поток нейтрино из нижней полусферы. Первое нейтрино «от антиподов» пересекшее весь земной шар было зарегистрировано 14 декабря 1978 г. в 08:31:10 по местному времени.

На основе анализа многостольных ШАЛ на установке «Ковер» было оценено сечение генерации струй с большими поперечными импульсами в адрон-адронных взаимодействиях и показано, что оно соответствует предсказаниям квантовой хромодинамики. Это первое экспериментальное подтверждение КХД было повторено коллаборациями UA1 и UA2 на SPS коллайдере в ЦЕРН через 1,5 года.

Нижний предел на время жизни протона, полученный на БПСТ составил $1.25 \cdot 10^{30}$ лет (на 90% доверительном уровне) для всех безнейтринных мод распада, что было в течение некоторого времени наилучшим в мире ограничением.

В течение 20 лет предел БПСТ на поток сверхтяжелых магнитных монополей был лучшим в мире.

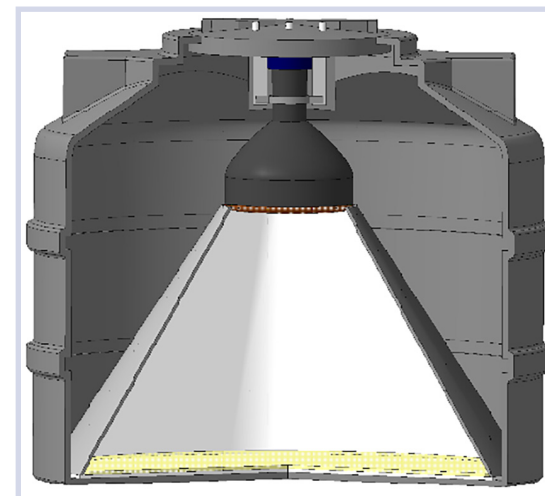
БПСТ оказался в числе четырех детекторов, зарегистрировавших сигнал от сверхновой SN1987A в Большом Магеллановом Облаке в феврале 1987 г.

На установке «Ковер» была зарегистрирована вспышка в Крабовидной туманности 23 февраля 1989 г. при энергии 100 ТэВ.

На основе метода кратных взаимодействий по данным БПСТ получены оценки энергетического спектра мюонов космических лучей в широкой области энергий — от нескольких единиц ТэВ до сотен ТэВ. Информация о поведении спектра мюонов в области энергий выше 100 ТэВ получена впервые в мире.

В результате измерений, проводимых с помощью разработанного в лаборатории ЛВЭ сцинтилляционного детектора тепловых нейтронов, было обнаружено новое геофизическое явление: радон-нейтронные приливные волны.

По измерениям суточной волны интенсивности в звездном времени анизотропия космических лучей была измере-



▲ Стандартный эн-детектор в разрезе

на на трех установках БНО при трех разных энергиях: БПСТ (2.5 ТэВ), «Ковер» (10 ТэВ) и «Андырчи» (100 ТэВ)

Разработан метод определения истинной анизотропии космических лучей с энергией выше 10^{12} эВ, основанный на анализе нулевой и первой гармоник измеренной интенсивности в звездном времени. Результаты применения этого метода на установке «Ковер» свидетельствуют в пользу того, что вектор звездной анизотропии космических лучей лежит в галактической плоскости.

В эксперименте по исследованию вариаций космических лучей во время гроз открыто сразу несколько новых эффектов (генерация элементарных частиц грозowymi облаками, корреляции между вариациями космических лучей во время гроз и возмущениями геомагнитного поля, новый вид высотного разряда). Эти эксперименты положили начало целому направлению, которому уже посвящены ежегодные конференции серии ТЕРА (Thunderstorm Elementary Particle Acceleration). Начало этой активности было положено пионерским экспериментом Чудакова в 1985 г.

Создание мировой сети установок на базе эн-детекторов для изучения природного потока тепловых нейтронов позволило открыть ряд новых геофизических эффектов: отклик этого потока на землетрясения, запаздывающий пампинг-эффект для подземного потока нейтронов, нелинейный запаздывающий пампинг-эффект для подземного гамма-фона, всплески концентрации радиоактивных аэрозолей, связанные с резкими повышениями уровня воды в горных реках.

Награды и премии

Работы **А.Е. Чудакова** были высоко оценены. Он был избран академиком и членом Президиума РАН, стал лауреатом Ленинской (1960) и Государственной (1998) премий, награжден орденом «За Заслуги перед Отечеством IV степени» и орденом Трудового Красного Знамени.

Из других сотрудников лаборатории Государственной премии 1998 года был удостоен **А.В. Воеводский**.

Многих премий был удостоен также **С.П. Михеев**, который начал работать под руководством Чудакова, но, проработав в лаборатории почти 20 лет, уехал работать в Италию и вернулся в ИЯИ уже в другую лабораторию. **С.П. Михеев** стал ши-

роко известен благодаря предсказанному им (во время работы в ЛВЭ) совместно с **А.Ю. Смирновым** эффекту нейтринных осцилляций в веществе, известному как МСВ эффект (эффект Михеева-Смирнова-Вольфенштейна). **С.П. Михеев** был награжден премиями им. Б.М. Понтекорво (2005), М.А. Маркова (2008), и премией Сакураи Американского физического общества (2008).

Международное сотрудничество

В разное время лаборатория ЛВЭ вела совместные работы оформленные договорами или совместными грантами и обменом сотрудниками со следующими иностранными исследовательскими центрами:

- ◆ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Torino, Italia
- ◆ Dipartimento di Fisica Generale dell' Universita, Torino, Italia
- ◆ Laboratorio Nazionale del Gran Sasso, L'Aquila, Italia
- ◆ Department of Physics, University of Durham, Durham, DH1 3LE, England, UK
- ◆ Instituto de Geofisica - UNAM, Mexico, D.F., Mexico
- ◆ Soltan Institute of Nuclear Studies, Lodz, Poland
- ◆ Institute of High Energy Physics, BeiJing, China
- ◆ Tibet University, Lhasa, China
- ◆ Hebei Normal University, Shijiazhuang, China.

Ближайшие перспективы лаборатории

Прежде всего, это продолжение долговременных экспериментов (например, слежение за нейтринными вспышками в Галактике на БПСТ и набор статистики грозowych событий на Ковере) на существующих установках. Продолжится и радикальная модернизация некоторых из них с целью расширения возможностей (проект «Ковер-3»). И, наконец, будет продолжаться участие в создании новых установок (проект LHAASO).

Филиал Баксанская нейтринная обсерватория (БНО ИЯИ РАН) — первая (работает с 1973) и одна из двух функционирующих сегодня в мире крупномасштабных подземных лабораторий, включающих комплекс дополняющих друг друга уникальных установок для междисциплинарных исследований на стыке фундаментальной физики, астрофизики и геофизики. Вторая подобная обсерватория с комплексом подземных установок расположена в Гран-Сассо (Италия; с 1989); остальные подземные лаборатории в мире решают более частные задачи.

Только в лабораториях, расположенных глубоко под землей, может быть достигнут чрезвычайно низкий уровень радиационного фона, необходимый для большинства ключевых исследований в области нейтринной физики и экспериментов, направленных на поиск редких событий в физике элементарных частиц. Подземные лаборатории могут обеспечить условия для создания ультранизкофоновых гамма-спектрометров для определения следовых количеств радиоактивных примесей в материалах, используемых в низкофоновых экспериментах. В последние несколько десятилетий подземная физика получила интенсивное развитие во всем мире. Практически все развитые страны имеют и в настоящее время интенсивно создают новые или расширяют существующие подземные лаборатории.

Идеи о создании специализированного подземного комплекса для проведения фундаментальных исследований в области нейтринной астрофизики и физики космических лучей появились в конце 50-х годов. В нашей стране работы в этой области проводились под руководством академика **М.А. Маркова**, по инициативе которого были выполнены теоретические расчеты и начались поиски подходящих горных выработок глубокого заложения, пригодных для размещения экспериментальных установок.

Создание обсерватории неразрывно связано с именами таких известных ученых как **М.А. Марков**, **А.Н. Тавхелидзе**, **В.А. Матвеев**, **А.Е. Чудаков**, **Г.Т. Зацепин**, **А.А. Поманский** и др.

В 60-е годы академик **М.А. Марков** предложил исследовать в подземных экспериментах слабые взаимодействия с помощью нейтрино космических лучей. Предложенный им метод осно-



▲
Лабораторный корпус БНО

ван на регистрации мюонов, рожденных при взаимодействии нейтрино с нуклонами вещества в недрах Земли.

Другим направлением подземных исследований стала разработка методов регистрации и измерения потока нейтрино, идущих от Солнца. Согласно современным представлениям, основным источником энергии звезд, находящихся, как и наше Солнце, на главной последовательности, служат термоядерные реакции, в результате которых четыре протона превращаются в ядро гелия. На первой стадии процесса слияния двух протонов с образованием ядра дейтерия генерируется наибольшая часть солнечных нейтрино. Поскольку нейтрино обладают огромной проникающей способностью, они выходят из внутренних областей Солнца и их поток достаточно велик на орбите Земли. Он может быть зарегистрирован специальными детекторами. Регистрация этих нейтрино позволила бы проверить правильность наших представлений о процессах, происходящих внутри Солнца, или, образно говоря, заглянуть внутрь звезды.



Было принято решение объединить оба эти направления и создать единый комплекс подземных лабораторий.

19 июня 1963 года было принято постановление Президиума Академии наук о строительстве подземной станции и создании в ФИАН лаборатории «Нейтрино» (заведующий — **Георгий Тимофеевич Зацепин**, заведующий сектором — **Александр Евгеньевич Чудаков**).

Место для будущей обсерватории было выбрано недалеко от горы Эльбрус, в Баксанском ущелье, находящемся в Кабардино-Балкарской Республике. К 1967 году было закончено научное обоснование и разработан проект нейтринной станции, в том же году начато строительство. Проект предусматривал строительство двух параллельных горизонтальных тоннелей в горе Андырчи (высота горы более 4000 м), вдоль которых предполагалось разместить физические установки. Подземное расположение установок связано с тем, что фон от космических лучей (поток мюонов) снижается по мере углубления под землю и в конце тоннеля почти в 107 раз ниже, чем на поверхности. Одновременно предусматривалось строительство необходимых инженерных и хозяйственных сооружений, и жилого поселка для сотрудников.

Реализацией этих замыслов явилось создание Баксанской нейтринной обсерватории. Программа исследований обсерватории расширялась по мере введения в строй новых наземных и подземных сооружений. В процессе развития на БНО возник комплекс уникальных научных сооружений, отвечающий всем современным требованиям.

Создание комплекса научных установок позволило:

- ◆ начать непосредственное исследование внутреннего строения и эволюции Солнца, звезд, ядра Галактики и других объектов Вселенной путем регистрации их нейтринного излучения и гамма-излучения;
- ◆ осуществить поиск новых частиц и сверхредких процессов, предсказываемых современными теориями элементарных частиц на недоступном другим методам уровне чувствительности;

Фото 1972 года (вверху, слева направо): первый заведующий БНО **А.А. Поманский**, **В.В. Алексеенко**, **В.А. Кузнецов**, академик АН СССР **Г.Т. Зацепин**, академик АН СССР, президент АН СССР **М.В. Келдыш**, **Е.Н. Алексеев**, академик, директор ИЯИ АН СССР **А.Н. Тавхелидзе**, член-корреспондент АН СССР **А.Е. Чудаков**

Фото 1974 г. (внизу, слева направо, стоят): **Е.Л. Ковальчук**, **В.В. Кузьминов**, **А.А. Поманский**, **В.А. Кузнецов**, **Ф. Райнес**, **В.В. Алексеенко**, **В.Я. Марков**, **В.А. Догужаев**, **В.А. Кузьмин**; сидят: **Д.Д. Джаппуев**, **В.И. Парамонов**, **Ю.В. Маловичко**, **В.А. Тизенгаузен**, **Б.Б. Татьяна**, **М.Д. Гальперин**



- ◆ исследовать взаимодействия нейтрино и мюонов с веществом в области высоких и сверхвысоких энергий, лежащих за пределами возможностей ускорительной техники.

В 1998 году коллектив сотрудников Института и Обсерватории был удостоен Государственной премии Российской Федерации «За создание Баксанской нейтринной обсерватории и исследования в области нейтринной астрофизики, физики элементарных частиц и космических лучей»:

- ◆ **Евгений Николаевич Алексеев**, заведующий отделом;
- ◆ **Александр Владимирович Воеводский**, заведующий лабораторией;
- ◆ **Владимир Николаевич Гаврин**, заведующий лабораторией;
- ◆ **Георгий Тимофеевич Зацепин**, академик, заведующий отделом;
- ◆ **Виктор Анатольевич Матвеев**, академик, директор;
- ◆ **Альберт Никифорович Тавхелидзе**, академик, заведующий отделом;
- ◆ **Александр Евгеньевич Чудаков**, академик, главный научный сотрудник;
- ◆ **Александр Александрович Поманский** (посмертно).

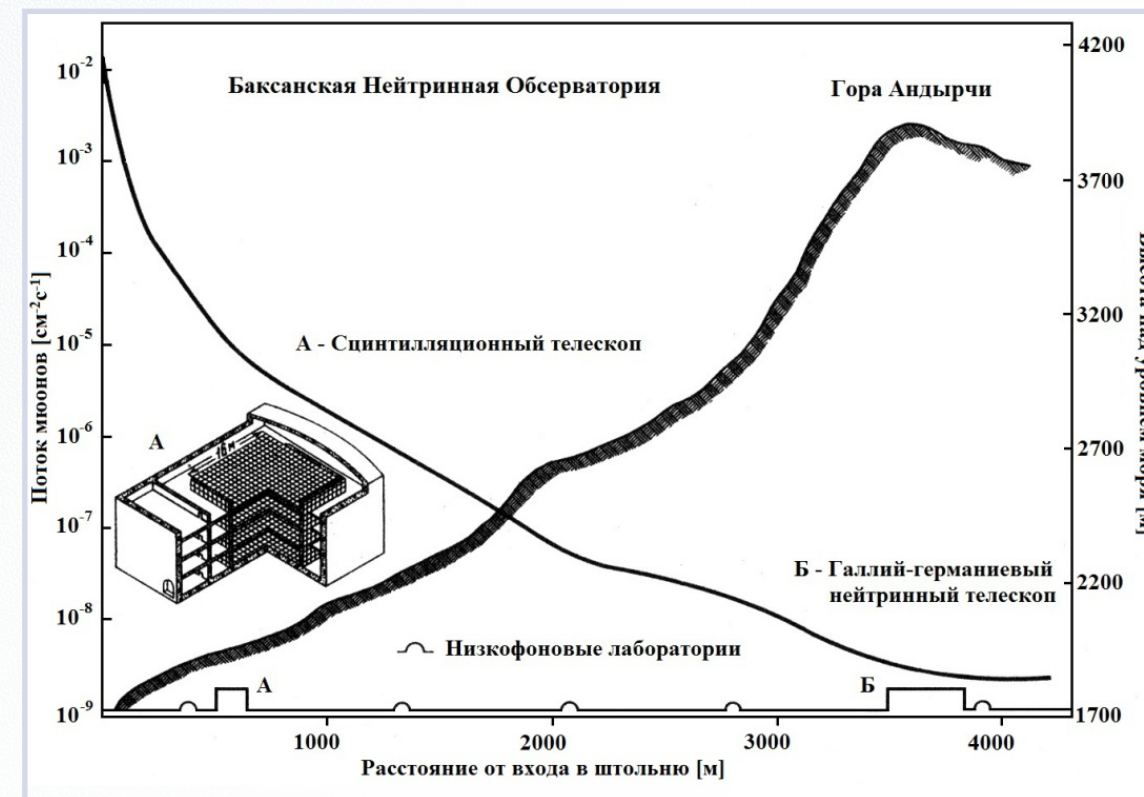


В 2000 году за выдающийся вклад в исследования солнечных нейтрино галлий-германиевым методом в Баксанской нейтринной обсерватории были удостоены Международной премии им. Б.М.Понтекорво **Георгий Тимофеевич Зацепин**, **Владимир Николаевич Гаврин**.



Баксанская нейтринная обсерватория (Приэльбрусье, Кабардино-Балкария) состоит из комплекса подземных сооружений, расположенных вдоль двух параллельных горизонтальных штолен в толще горы Андырчи (высота горы свыше 4 км; длина штолен около 4 км), и комплекса наземных лабораторий. БНО является градообразующим предприятием: комплекс инженерно-хозяйственных сооружений и жилья для сотрудников составил новый населенный пункт — пос. Нейтрино. Общая схема подземной части обсерватории приведена на странице справа, общий вид наземных сооружений — на следующем развороте.

Заведующие БНО в разные годы (сверху вниз):
Е.Н. Алексеев, В.В. Кузьминов, В.Б. Петков

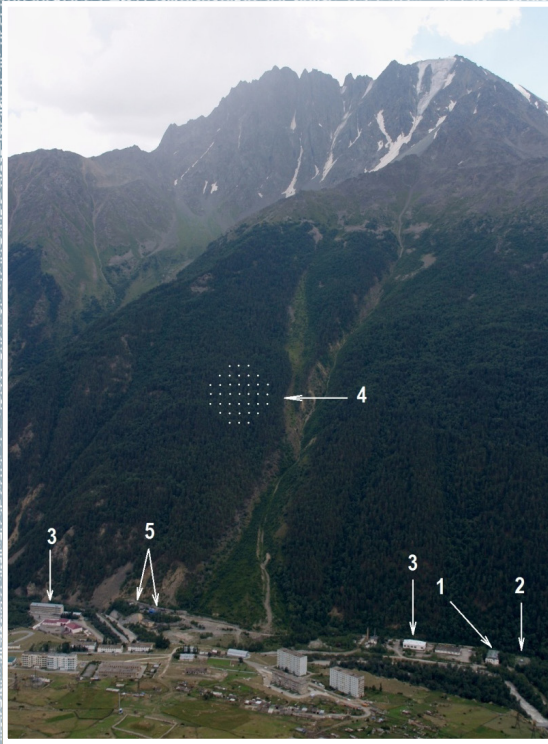


В структуру БНО входят три лаборатории:

Продольный разрез подземного комплекса лабораторий БНО

- ◆ лаборатория — Галлий-германиевый нейтринный телескоп;
- ◆ лаборатория подземного сцинтилляционного телескопа;
- ◆ лаборатория низкофоновых исследований.

Первым заведующим станцией был назначен **Александр Александрович Поманский**, профессор, доктор физико-математических наук. Он участвовал в создании Баксанской нейтринной обсерватории и возглавлял ее по 1993 год. Внес большой вклад в разработку теории ядерных каскадов в атмосфере, руководил разработкой прототипа хлор-аргонового детектора солнечных нейтрино, первым экспериментально продемонстрировал возможность галлий-германиевого метода детектирования нейтрино, предложил метод экстракции ^{71}Ge из раствора хлорида галлия, использованный затем в эксперименте GALLEX, автор пионерских работ по литий-бериллиевому методу детектирования солнечных нейтрино, выдвинул



▲ Вид на пос. Нейтрино и гору Андырчи
Наземные сооружения БНО:
1 — установка «Ковер», 2 — мюонный детектор,
3 — лабораторные корпуса, 4 — установка
«Андырчи», 5 — входы в штольни

идеи таллиевого и бром-криптонового методов регистрации нейтрино. Возглавлял работы по развитию низкофоновых исследований: изучению механизмов образования долгоживущего космогенного изотопа ^{81}Kr в атмосфере (получил рекордное ограничение на вероятность его электронного распада), определению космогенных изотопов в лунном грунте, поиску сверхплотных ядер. Под его руководством получены первые положительные результаты по поиску двухнейтринного бета распада и рекордные ограничения на вероятности безнейтринного двойного бета распада для ряда ядер. Инициировал эксперимент в Германии, в котором получено рекордное ограничение на нарушение принципа Паули. Инициировал эксперименты по поиску конверсии атомного электрона в позитрон на ядре ^{78}Kr , безнейтринного двойного бета распада ^{76}Ge , поиску тяжелых слабозаимодействующих частиц.

До 1999 года Баксанской нейтринной обсерваторией руководил доктор физи-

ко-математических наук **Евгений Николаевич Алексеев**. При его непосредственном участии были сооружены и запущены в физическую эксплуатацию крупные научно-исследовательские установки «Ковер» и Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп, он внес значительный вклад в развитие других установок и сооружений Баксанской нейтринной обсерватории. Вместе с сотрудниками им получены уникальные данные по поиску сверхтяжелого магнитного монополя, поиску нейтрино от коллапса звезд в нашей галактике. Он является одним из организаторов известной международной школы «Частицы и космология», регулярно проводящейся на базе Баксанской нейтринной обсерватории в течении многих лет.

С 1999 г. по 2020 г. Обсерваторией руководил доктор физико-математических наук **Кузьминов Валерий Васильевич**. Из-

вестный в мире физик-экспериментатор в области исследований редких процессов с помощью газовых детекторов в условиях низкого фона естественной радиоактивности и космических лучей в подземных лабораториях БНО. Внес большой личный вклад в создание одной из лучших в мире подземной низкофоновой лаборатории. Под его руководством и при непосредственном участии было получено лучшее в мире ограничение на время жизни изотопа Xe-136 относительно двухнейтринного двойного бета-распада.

С 2020 года руководителем БНО является доктор физико-математических наук **Петков Валерий Борисович**. Под его руководством и при непосредственном участии была разработана и создана ливневая установка «Андырчи», и проведены исследования спектра и массового состава космических лучей в диапазоне энергий 10^{13} – 10^{16} эВ на комплексе установок БПСТ — «Андырчи». Вместе с сотрудниками им была разработана экспериментальная методика поиска транзиентов интенсивности космического излучения в широком диапазоне энергий и длительностей, которая была применена для поиска всплесков космического гамма-излучения в диапазоне энергий 1 ГэВ–100 ТэВ на установках БПСТ, «Андырчи» и «Ковер-2». Он является одним из организаторов серии международных конференций, посвященных фундаментальным проблемам современной астрофизики, проводимых совместно БНО и САО РАН.

Лаборатория — Галлий-германиевый нейтринный телескоп

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 проводятся с 1986 года 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 (e^-): $^{71}\text{Ga}(\nu_e, e^-)^{71}\text{Ge}$. Достоинством данного метода детектиро-

вания, предложенного в 1965 году **В.А. Кузьминым**, является низкий энергетический порог реакции, который составляет 0,233 МэВ. Благодаря этому галлиевый нейтринный телескоп имеет возможность регистрировать *pp*-нейтрино, дающие наибольший вклад в полный поток солнечных нейтрино.

Изотоп ^{71}Ge является радиоактивным. Он распадается путем электронного захвата с периодом полураспада $T_{1/2} = 11,4$ дня. Распады атомов ^{71}Ge могут быть зарегистрированы и таким образом будет определено число произошедших реакций и рассчитан поток нейтрино.

В телескопе в качестве мишени используется около 50 тонн расплавленного металлического галлия, находящегося в 7 химических реакторах. Для извлечения единичных атомов ^{71}Ge из мишени была разработана уникальная технология, которая является одним из основных технологических процессов телескопа. Периодичность извлечения составляет ~ 30 дней.

Регистрация редких распадов атомов ^{71}Ge в ПС продолжается в течение ~ 4 месяцев, затем не менее 2 месяцев измеряется фон. Полный цикл операций облучения мишени, извлечения продуктов и счета распадов атомов ^{71}Ge называется ран.

Комплекс лаборатории ГГНТ размещен на расстоянии 3600 м от устья горной штольни, где в толще горного массива (4700 м водного эквивалента) интенсивность мюонов от горных пород практически достигает минимума. Глобальная интенсивность мюонов в месте расположения ГГНТ составляет $(3,03 \pm 0,10) \times 10^{-9} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Общий вид реакторного зала ГГНТ приведен на [стр. 101](#).

Результаты первых измерений SAGE (1990–1992 гг.) показали значительное подавление потока солнечных нейтрино во всем энергетическом диапазоне и исключили возможность решение проблемы солнечных нейтрино в рамках только физики Солнца, и дали доказательство изменения ароматов (осцилляций) нейтрино на их пути из центра Солнца к Земле.

Результаты эксперимента SAGE стали основополагающим вкладом в решение проблемы солнечных нейтрино. Величина скорости захвата солнечных нейтрино на Ga $65,4^{+4,0}_{-4,1}$ SNU (SNU — солнечные нейтринные единицы, 1 взаимодействие в секунду в мишени, содержащей 10^{36} атомов изотопа, взаимодействующего с нейтрино), полученная в SAGE на основании

168 измерений (январь 1990–декабрь 2007), составляет около 50% от величины, предсказанной Стандартной солнечной моделью. В западноевропейских галлиевых экспериментах результаты получены очень близкие к результатам SAGE, $73,1^{+7,1}_{-7,3}$ SNU в GALLEX и в $62,9^{+5,5}_{-5,3}$ SNU в GNO.

За период с января 1990 года по декабрь 2016 года в итоговую информацию эксперимента SAGE вошли данные 259 завершенных ранов. Объединенный результат этих данных составляет $(64,7^{+3,5}_{-3,7})$ SNU, что соответствует 51% от величины $(127,9^{+8,1}_{-8,2})$ SNU, предсказанной по Стандартной солнечной модели (CCM) BPS08 без учета осцилляций.

Основываясь на данном результате SAGE, а также на результатах экспериментов SNO, Homestake и KamLAND получена оценка: 1) величины потока *pp*-нейтрино, достигающих Земли в своем первоначальном электронном аромате $[(3,40^{+0,46}_{-0,47}) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}]$; 2) полного потока нейтрино от *pp*-реакций в Солнце, достигающих Земли в виде различных ароматных состояний, возникающих как результат осцилляций $[(5,95 \pm 0,06) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}]$.

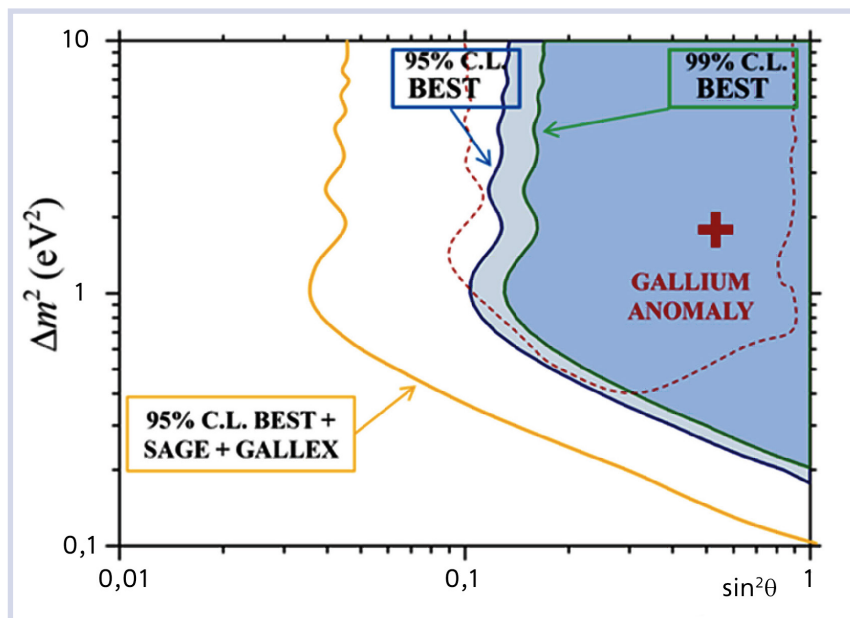
Калибровочный эксперимент с источником ^{51}Cr

Для проверки правильности результатов, полученных на ГГНТ в эксперименте SAGE, были проведены эксперименты с искусственными источниками нейтрино. Галлиевые мишени были облучены источниками нейтрино на основе изотопов ^{51}Cr и ^{37}Ar , полученных в ядерных реакторах. ^{51}Cr интенсивностью $1,91 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$ (517 кКи), испускающего нейтрино с энергией ~ 750 кэВ (90%) и ~ 430 кэВ (10%), ^{37}Ar , испускающим нейтрино с энергией 811 кэВ и интенсивностью $1,51 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$.

Средневзвешенное значение отношения измеренной скорости образования ^{71}Ge к ожидаемой величине, вычисленной на основе мощности источников, оказалось неожиданно низким, более чем на два стандартных отклонения меньше единицы. Этот результат получил название «галлиевая аномалия».

Эксперимент BEST

В поисках объяснения галлиевой аномалии, как и аномалий, наблюдаемых в ускорительных и реакторных нейтринных экспериментах внимание мирового научного сообщества сконцен-



▲
Оценка чувствительности эксперимента BEST для проверки галлиевой аномалии в терминах параметров осцилляций электронного нейтрино в стерильное. Красным цветом показан наилучший фит (крест) и 95% CL допустимая область (штриховая линия) по результатам SAGE и GALLEX, зеленая и синяя кривые — 99% CL и 95% CL чувствительность BEST, оранжевая кривая — чувствительность совместного анализа BEST и предыдущих экспериментов. Аналогичная аномалия, называемая реакторной, существует в секторе антинейтрино и соответствует несколько меньшим углам смешивания; она будет проверяться в реакторных экспериментах

трировано на гипотезе существования стерильных нейтрино — гипотетических частиц, взаимодействие которых с веществом осуществляется через смешивание с обычными (т.е. активными) нейтрино. Задача поиска стерильных нейтрино настолько актуальна, что в последние годы в мире предложено и активно обсуждается множество возможных подходов к ее экспериментальному решению. Обнаружение стерильных нейтрино не только

приведет к расширению Стандартной модели, но будет иметь многочисленные следствия для астрофизики и космологии.

В эксперименте BEST предполагается провести исследование осцилляционных переходов электронных нейтрино от компактного высокоинтенсивного искусственного источника в стерильные нейтрино на очень коротких расстояниях, недоступных для других проектов. Для этого планируется поместить нейтринный источник ^{51}Cr активностью ~ 3 МКи в центр металлической Ga мишени телескопа, разделенной на две концентрические зоны, внутреннюю и внешнюю, обеспечивающие в среднем одинаковые длины пробега нейтрино в мишенях.

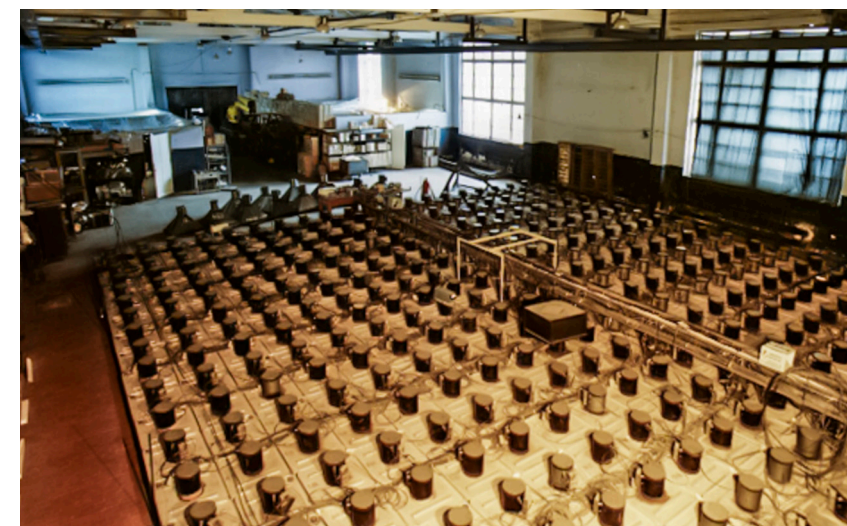
Статистически значимое отличие в скорости захвата нейтрино в двух зонах может дать прямое доказательство реального физического эффекта исчезновения электронных нейтрино, обусловленного возможным переходом активных нейтрино в стерильные состояния (рисунок на стр. справа). Реализация эксперимента BEST не только приведет к решению актуальной проблемы, находящейся на переднем фронте фундаментальной науки, но и подтвердит позиции России как одного из мировых лидеров в области физики нейтрино и нейтринной астрофизики. В настоящее время эксперимент готов к установке нейтринного источника.

Лаборатория подземного сцинтилляционного телескопа

Наземный комплекс установок

Первый научный объект Обсерватории — наземный экспериментальный зал «Эллинг» с установкой «Ковер» из 400 типовых сцинтилляционных счетчиков (ТСЧ) — был введен в эксплуатацию в 1973 году. ТСЧ представляет собой алюминиевый бак размерами $70 \times 70 \times 30$ см³, заполненный жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита. Сцинтиллятор просматривается фотоэлектронным умножителем (ФЭУ-49).

▼ Вид установки «Ковер»



Эта установка с непрерывной площадью регистрации $\sim 200 \text{ м}^2$ представляет собой точную копию одного из слоев Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа (БПСТ). На ней, в частности, решался ряд задач по отработке методики проведения экспериментов на БПСТ. Однако основное назначение прибора состояло в исследовании первичных космических лучей (к.л.) в диапазоне $5,7 \cdot 10^9 - 1 \cdot 10^{16}$ эВ, в изучении механизмов и характеристик их взаимодействия с веществом земной атмосферы путем регистрации одиночной вторичной компоненты и широких атмосферных ливней (ШАЛ), образующихся в результате таких взаимодействий.

Основные направления исследований на установке «Ковер» и наиболее значительные результаты приведены ранее в разделе «Лаборатория лептонов высоких энергий». Здесь будет описана только эволюция этой установки, пережившей несколько модернизаций, ее настоящее состояние и планы дальнейшего развития.

Установка «Ковер-2 (3)»

Характеристики установки «Ковер» улучшились после ее модернизации в 1998 году, когда была введена в строй первая очередь большого мюонного детектора (МД). Данная конфигурация установки получила название «Ковер-2». Первая очередь МД расположена в средней секции трех-секционного подземного зала общим размером $3 \times (6 \times 48 \times 2,5 \text{ м}^3)$, на расстоянии ~ 48 м от центра «Ковра» и состоит из 175 сцинтилляционных счетчиков площадью 1 м^2 , изготовленных из пластмассового сцинтиллятора толщиной 5 см. Над подземными туннелями находится слой скального грунта толщиной 2 м (5 м водного эквивалента — м в.э.), который служит поглотителем мягкой компоненты к.л. Использование информации с МД установки «Ковер-2» позволило: 1) существенно увеличить чувствительность эксперимента по поиску локальных источников γ -квантов сверхвысоких энергий; 2) начать исследования химического состава первичных к.л. с $E^3 \cdot 10^{14}$ эВ; 3) изучать вариации мюонов с энергиями больше 1 ГэВ.

В настоящее время проводится модернизация установки до версии «Ковер-3». Для этого площадь МД детектора уже доведена до 410 м^2 , 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.

Установка «Андырчи»

Установка «Андырчи», предназначенная для регистрации атмосферных ливней с энергией больше 10^{14} эВ, начала свою работу в 1996 г.

Установка размещена на пологом участке склона горы Андырчи и состоит из 37 стандартных сцинтилляционных счетчиков на основе пластмассовых сцинтилляторов площадью 1 м^2 . Каждый счетчик помещен в защитный хаузинг.

Счетчики расположены на площади $\sim 4,5 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ с шагом ~ 40 м. Центральный счетчик установки расположен над БПСТ. Расстояние по вертикали составляет 350 м. Такое расположение установки позволяет проводить изучение высокоэнергичной мюонной компоненты ШАЛ в ливнях от первичных частиц с энергией выше 10^{14} эВ. По совместным данным установок БПСТ и «Андырчи» проведены исследования спектра и массового состава космических лучей в интервале энергий $10^{14} \cdot 10^{16}$ эВ. На установке проводятся исследования в различных областях астрофизики частиц, в том числе: 1) проведены исследования в области γ -астрономии высокой и сверхвысокой энергии, включая поиск γ -всплесков с жестким спектром излучения; 2) проведен поиск высокоэнергичного гамма-излучения от испаряющихся первичных черных дыр; 3) измерена анизотропия первичных космических лучей в области энергий выше 10^{14} эВ.

Подземный комплекс

Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп

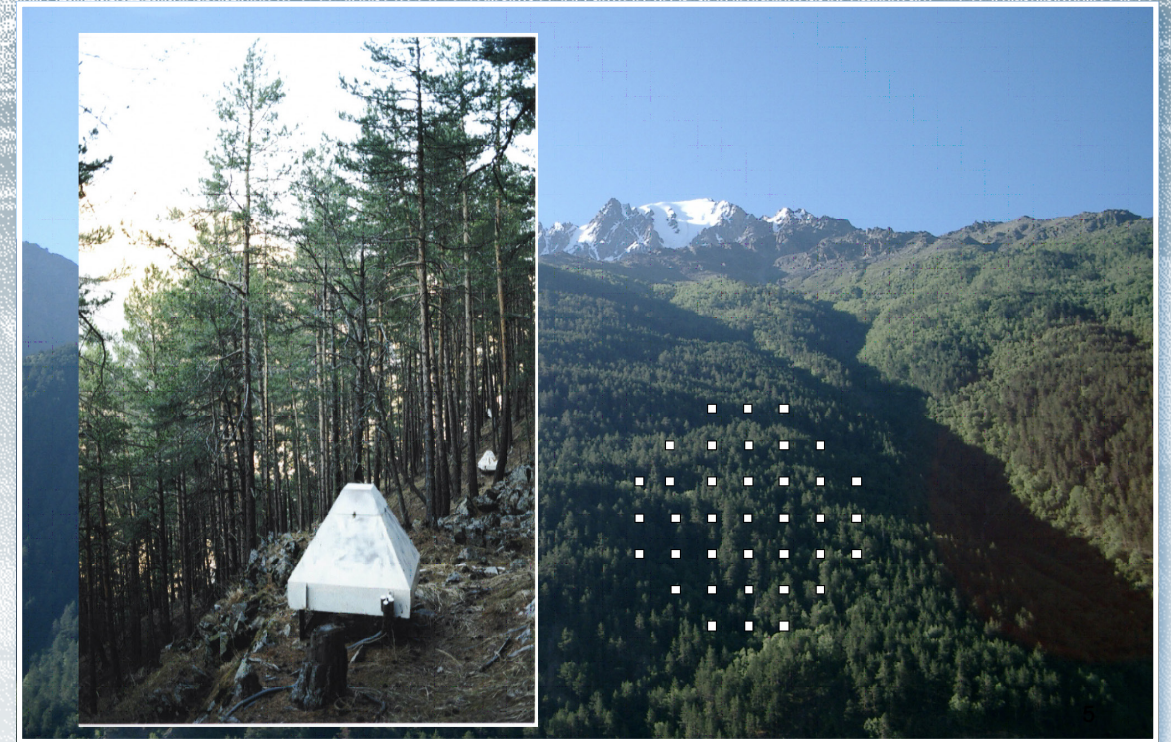
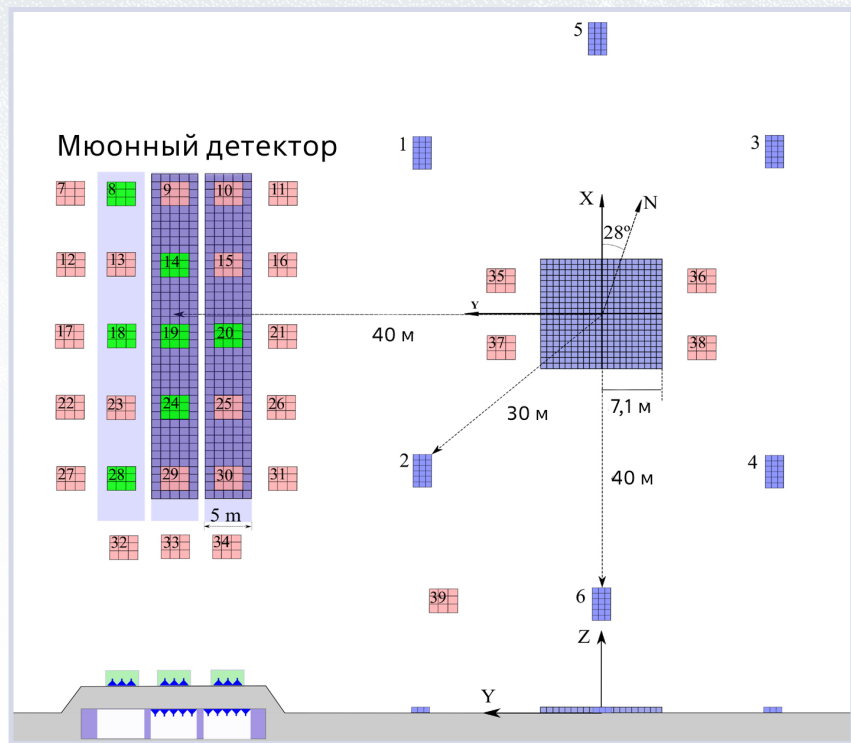
БПСТ — многоцелевая подземная установка, предназначенная для решения большого круга задач астрофизики, физики элементарных частиц и космических лучей, была введена в строй в 1978 году.

БПСТ находится на высоте 1700 м над уровнем моря в подземной выработке объемом $24 \times 24 \times 16 \text{ м}^3$ под склоном горы



Мюонный детектор установки «Ковер-2»

Схема расположения детекторов установки «Ковер-3»



Мюонный детектор установки «Ковер-2».

Андырчи, на расстоянии 550 м от входа в штольню. Эффективная толщина грунта над телескопом равна 850 г/см^2 , что соответствует эффективной пороговой энергии мюонов 220 ГэВ. Установка состоит из четырех горизонтальных и четырех вертикальных плоскостей, которые образуют параллелепипед размером $16,7 \times 16,7 \times 11,1$ м. Все плоскости сплошь покрыты типовыми сцинтилляционными счетчиками. Верхняя горизонтальная плоскость содержит 576 счетчиков (квадрат 24×24), а три нижние по 400 счетчиков (20×20). Расстояние по вертикали между горизонтальными сцинтилляционными слоями равно 3,6 м. Полное число ТСЧ в телескопе 3184, масса сцинтиллятора 330 тонн. Толщина каждого слоя сцинтиллятора составляет 24 г/см^2 . Полная толщина одного горизонтального слоя телескопа (слой сцинтиллятора плюс перекрытие) 165 г/см^2 (эти толщины демонстрируют калориметрические способности установки). За счет применения низко радиоактивных материалов при создании установки удалось снизить радиоактивный фон примерно в 50 раз в области энергий (2 – 2.5) МэВ и примерно в 3 раза для

энергий γ -квантов выше 5 МэВ. Виды горизонтальной и вертикальной плоскостей БПСТ представлены на [стр. 108](#).

Атмосферные космические лучи — проникающая компонента

Относительно небольшая толщина горных пород над местом расположения телескопа снизила фон атмосферных к.л. в $\sim 3,6 \cdot 10^3$ раз (темп счета одиночных мюонов с энергией больше 0,2 ТэВ составляет 12 с^{-1}). С одной стороны, этого оказывается достаточно для решения задачи регистрации редких процессов (измерение потока мюонов, рожденных нейтрино высоких энергий; поиск нейтринных всплесков, сопровождающих коллапс звезд в Галактике). С другой стороны, остаточная интенсивность к.л. позволяет с хорошей статистической обеспеченностью решать большой круг задач в области физики к.л. (анизотропия лучей с энергией больше 1012 эВ, химический состав первичных к.л. с энергией в диапазоне 1012 - 1016 эВ, взаимодействие с веществом мюонов с энергией больше 1 ТэВ и др.).

Основные результаты экспериментов на БПСТ

На телескопе получен целый ряд важных результатов. Некоторые из них:

- ◆ измерен поток мюонов, рожденных атмосферными нейтрино космических лучей [$\Gamma_{\mu}^V \approx (2,45 \div 2,75) \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$];
- ◆ получены ограничения на параметры осцилляций нейтрино;
- ◆ получены ограничения 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;
- ◆ измерено полное сечение фотон-нуклонного взаимодействия в области энергий $\sqrt{s} = 40 - 250 \text{ ГэВ}$;
- ◆ методом парметра получены данные об энергетическом спектре мюонов космических лучей в области энергий $\sim 100 \text{ ТэВ}$;
- ◆ на БПСТ был развит и реализован в эксперименте метод регистрации групп мюонов с множественностью $n_{\mu} > 1800$. Этот метод использует калориметрические свойства БПСТ и позволяет избежать ограничений, связанных с пространствен-

ным разрешением установки. Кроме того, метод позволяет изучать мюонную компоненту в стволе ШАЛ, что невозможно при использовании других методов регистрации мюонов;

- ◆ получено наилучшее в мире ограничение на поток медленных тяжелых магнитных монополей;
- ◆ измерена амплитуда $[(12,3 \pm 2) \cdot 10^{-4}]$ и фаза $[1,6 \pm 0,8]$ первой гармоники анизотропии к.л. в звездном времени;
- ◆ с 30 июня 1980 на БПСТ практически в непрерывном режиме ведется наблюдение за Галактикой в поисках нейтринных всплесков от Сверхновых звезд с коллапсом ядра. Для увеличения надежности регистрации сигнала, для увеличения «радиуса чувствительности» Rs БПСТ в эксперименте «Коллапс» используется одновременная регистрация событий в двух независимых частях установки — внутренних плоскостях и внешних (суммарная масса мишени 240 тонн).

С 2017 в БНО реализован режим квази-online поиска различных редких событий, в том числе и нейтринных всплесков. Организована выработка алерта для коллаборации БПСТ о регистрации кластера большой множественности. Важным преимуществом использования двух независимых детекторов является практически полное исключение выработки ложного алерта о регистрации нейтринного всплеска — БПСТ может уверенно зарегистрировать нейтринный всплеск от сверхновой в Млечном Пути.

За период с 30.06.1980 по 31.12.2019 чистое время наблюдения составило 33,95 лет. За это время не было зарегистрировано ни одного события — кандидата на нейтринную вспышку. Это приводит к значению верхней границы средней частоты гравитационных коллапсов звезд в Галактике 6,8 в столетие на 90% уровне достоверности.

- ◆ одновременно с установками США, Италии, Японии зарегистрирован поток нейтрино от коллапса звезды SN 1987A в Большом Магеллановом Облаке.

Лаборатория низкофоновых исследований

Для решения ряда задач, в которых исследуются чрезвычайно редкие реакции и распады с энерговыделением, не превышающим $\sim 4 \text{ МэВ}$, требуются условия, в которых не только фон к.л. снижен до максимально возможного уровня, но одновременно



до предела снижен фон ионизирующих излучений от распада естественных радиоактивных элементов в окружающей среде. Результат достигается экранированием экспериментальной подземной установки комбинированным слоем высокочистых защитных материалов, поглощающих эти излучения, и использованием высокочистых материалов в конструкции самой установки. К данному направлению исследований относятся задачи поиска различных мод двойного бета-распада ряда изотопов, поиск частиц-кандидатов на «темную» массу Вселенной, проверка закона сохранения электрического заряда и др. В Обсерватории эти исследования проводятся в трех специально созданных подземных низкофоновых лабораторных помещениях (камерах): 1) нзкофоновая камера (НИКА) на расстоянии 385 м от входа; 2) камера прецизионных измерений (КАПРИЗ) на расстоянии 620 м от входа; 3) низкофоновая лаборатория глубокого заложения на расстоянии 3670 м от входа

Поток к.л. в помещениях снижен в $\sim 2 \cdot 10^3$; $\sim 8 \cdot 10^3$; $\sim 1 \cdot 10^7$ раз, соответственно.

За годы существования и развития комплекса низкофоновых лабораторий был выполнен ряд методических и исследовательских работ. Некоторые из них:

- ◆ исследование распределения космогенных радиоактивных изотопов в образцах лунного грунта, доставленного космическими аппаратами Луна-16, -20, -24;
- ◆ измерение содержания космогенного изотопа ^{81}Kr в атмосферном криптоне и образцах, облученных на реакторе и ускорителе; получение подтверждения гипотезы о постоянстве средней интенсивности космических лучей на протяжении последних нескольких сот тысяч лет;
- ◆ поиск 2β -распада изотопов ^{150}Nd и ^{100}Mo . Для последнего изотопа впервые в мире был обнаружен ($2\beta 2\nu$)-распад;
- ◆ на различных газовых детекторах с возрастающей чувствительностью проведен ряд экспериментов по поиску 2β -распада изотопа ^{136}Xe ;
- ◆ на различных газовых детекторах выполнен поиск 2K -захвата ^{78}Kr и ^{124}Xe , а также $2\beta^+$ - и $e\beta^+$ -распадов ^{78}Kr ;
- ◆ выполнен совместный (Испания-Россия-США) эксперимент IGEX по поиску 2β -распада ^{76}Ge ;

- ◆ проведен один из первых экспериментов по поиску сигнала от WIMP на Ge-детекторах;
- ◆ ведется поиск гипотетических частиц — аксионов, которые могут рождаться в ядерных реакциях на Солнце.

Организации-участники

БНО функционирует как междисциплинарная лаборатория, предоставляющая уникальные условия для проведения экспериментов в физике частиц, астрофизике частиц и геофизике. Эти условия используют ученые из различных научных организаций. В экспериментах SAGE и BEST участвуют исследователи из США; в работе установки Ковер. принимали участие коллеги из Польши и Финляндии, а также из МИФИ и НИИЯФ МГУ. БНО является участником международной сети разработанных в ИЯИ детекторов нейтронов. Данные нейтронного супермонитора БНО включены в мировую сеть нейтронных мониторов и выставляются в режиме реального времени на сайте ИЗМИРАН. Специалисты из БНО участвуют в международных коллаборациях AMoRE и GERDA по поиску двойного безнейтринного бета-распада основные установки этих экспериментов расположены в Корее и в Германии, но ряд ключевых работ выполняется на БНО. Проект «ЭГО» разрабатывается совместно с ФТИ им. Иоффе РАН при участии астрофизиков из Армении и Германии. Коллективом с участием исследователей из ГАИШ МГУ и ИЛФ СО РАН создана и готовится к вводу в эксплуатацию оптоакустическая гравитационная антенна ОГРАН, предназначенная для регистрации гравитационно-волнового излучения от коллапсирующих звезд в Галактике и ее окрестностях; разрабатывается проект многоцелевого кольцевого лазерного интерферометра. В штольнях БНО расположены три геофизические лаборатории (ГАИШ МГУ, ИФЗ им. О.Ю.Шмидта РАН, Геофизическая служба РАН), позволяющие, наряду с проведением фундаментальных исследований, отслеживать обстановку в глубинных слоях Земли в окрестностях спящего вулкана Эльбрус и прогнозировать возможные изменения его состояния.

Лаборатория НЛГЗ-4900
и некоторые низкофоновые установки
лаборатории низкофоновых исследований

Краткая история

Отдел теоретической физики ИЯИ РАН был образован в 1976 году. Первым заведующим отделом стал директор Института академик **Тавхелидзе Альберт Никифорович**. Первоначально сотрудниками отдела были как маститые ученые — **П.Н. Боголюбов, Г.М. Ваградов, В.А. Кузьмин, Ю.С. Вернов**, так и молодые физики-теоретики — **В.А. Березин, К.Г. Четыркин, Н.В. Красников**. Постепенно отдел увеличивал численность. В настоящее время сотрудниками отдела являются примерно 35 человек, из них 27 научных сотрудников, включая совместителей, в том числе 2 академика РАН и 2 члена-корреспондента РАН, 12 докторов физико-математических наук. С самого начала образования отдел проводил исследования в широком спектре разделов современной теоретической физики, включая теорию элементарных частиц, квантовую теорию поля, теорию гравитации, астрофизику и космологию, физику космических лучей и нейтрино, теорию атомного ядра. Работы сотрудников в этих областях во многих случаях являлись пионерскими и дали толчок к развитию новых направлений исследований.

Основные достижения отдела теоретической физики

Под руководством академика **А.Н. Тавхелидзе** и с участием сотрудников отдела **К.Г. Четыркина, Н.В. Красникова, А.А. Пивоварова** и других был разработан метод конечноэнергетических правил сумм в квантовой хромодинамике, который был успешно применен для изучения сильных взаимодействий и вычисления многих параметров сильновзаимодействующих частиц — адронов.

Были получены пионерские результаты в проблеме объяснения барионной асимметрии Вселенной (**А.Ю. Игнатьев, В.А. Кузьмин, Н.В. Красников, А.Н. Тавхелидзе, М.Е. Шапошников, В.А. Рубаков**). В частности, была разработана теория генерации барионной асимметрии в моделях Великого объединения всех взаимодействий. Было также показано, что даже при сравнительно небольших (электрослабых) температурах во Вселенной интенсивно происходили процессы с нарушением барионного числа; этот результат открыл путь к формулировке новых подходов к решению вопроса о происхождении барион-



Ю.С. Вернов, Г.М. Ваградов, В.А. Кузьмин
(слева направо)

ной асимметрии, в том числе механизма электрослабого бариогенезиса и механизма перекачки лептонной асимметрии в барионную (лептогенезиса). Были предложены конкретные модели электрослабого бариогенезиса и лептогенезиса (**Д.С. Горбунов, С.В. Демидов**).

Было предсказано, что в присутствии магнитных монополей с большой вероятностью происходят процессы распада протона (эффект Рубакова-Каллана).

Сотрудниками отдела (**К.Г. Четыркин, Ф.В. Ткачев, А.Л. Катаев, С.А. Ларин**) были разработаны новые методы вычисления многопетлевых диаграмм в квантовой теории поля (метод полиномов Гегенбауэра, метод интегрирования по частям и его первая компьютерная реализация, R^* -операция и др.). С помощью этих методов были выполнены рекордные многопетлевые вычисления в квантовой хромодинамике и теории фазовых переходов, в частности, вычисления трехпетлевых и четырехпетлевых вкладов в сечение e^+e^- аннигиляции в адроны, четырехпетлевая поправка в бета-функцию квантовой хромодинамики, трехпетлевые поправки для аномальных размерностей глубококонечного лептон-адронного рассеяния.

Сотрудник отдела **Ф.В. Ткачев**, частично совместно с другими сотрудниками отдела (**Г.Б. Пивоваров** и др.), разработал метод асимптотических разложений, который вместе с методом интегрирования по частям лег в основу современной мировой индустрии вычислений высших поправок в различных квантово-левых моделях. Результаты этих вычислений принципиально



*Н.В. Красников (слева)
И.И. Ткачев, А.Л. Катаев (справа)*



В.А. Березин



*М.Е. Шапошников, А.Н. Тавхелидзе, В.А. Рубаков,
В.А. Матвеев (слева направо)
Маковские чтения*



*С.А. Кулагин, Х.С. Ниров (слева);
В.А. Рубаков, П.Г. Тиняков (справа)*

*Д.В. Семикоз, К.В. Птицына (Журавлева)
(внизу)*

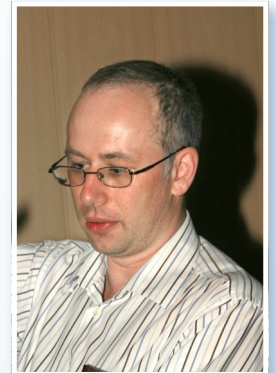
важны как для более точного определения фундаментальных параметров Стандартной модели, так и для поиска новой физики на Большом адронном коллайдере и других экспериментальных установках.

Сотрудник отдела **А.Л. Катаев** внес большой вклад в исследование конформного предела в КХД и в других теориях. В частности, он обобщил т.н. соотношение Крютера на случай реальной КХД, что послужило отправной точкой для двух активно развивающихся подходов к решению проблемы схемной зависимости предсказаний КХД — принципа максимальной конформности и бета-разложения (последнее также предложено **А.Л. Катаевым** с соавторами).

Сотрудниками отдела теоретической физики (**С.В. Акулиничев, Г.М. Ваградов, С.А. Кулагин**) разработаны методы учета ядерных эффектов в глубоконеупругих лептон-ядерных взаимодействиях; эти методы с успехом применены ими при обработке экспериментальных данных, в частности, для объяснения ЕМС-эффекта как следствия связанности ядер.

Следует отметить также пионерские расчеты по влиянию «пузырей» нового вакуума на динамику развития Вселенной и протекания в ней фазовых переходов (**В.А. Березин, В.А. Кузьмин, И.И. Ткачев**). Предложенный в этих работах метод тонких оболочек стал одним из основных методов теоретического исследования сложных динамических процессов с учетом гравитационных взаимодействий.

Сотрудники отдела **Х.С. Ниров, А.А. Овчинников** получили ряд новых важных результатов в исследованиях свойств точно решаемых моделей математической физики.





Слева направо, сверху вниз
С.В. Троицкий, Д.С. Горбунов, Г.И. Рубцов
 (в верхнем ряду)
С.В. Демидов, А.А. Пивоваров, С.А. Ларин
 (в нижнем ряду)

На правой странице сверху вниз
В.В. Белокуров, С.В. Акулиничев

Были выполнены важные работы, связанные с формированием программы исследований по поиску новой физики на Большом адронном коллайдере, эксперимент CMS — «Компактный мюонный соленоид» (**В.А. Матвеев, Н.В. Красников**). Разработки ученых отдела (поиск нарушения лептонной флейворной симметрии, поиск тяжелого нейтрино) вошли в официальную программу исследований указанного крупномасштабного эксперимента.

Сотрудниками отдела (**Н.В. Красников, В.А. Матвеев**) был предложен эксперимент в ЦЕРН по поиску темного фотона

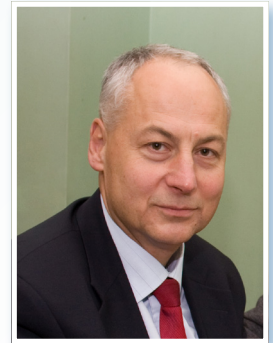
и легкой темной материи. В настоящее время этот эксперимент под названием NA64 успешно работает в ЦЕРН и уже получил рекордные ограничения на параметры легкой темной материи и темного фотона. Сотрудники отдела (**Д.В. Кирпичников, Н.В. Красников, В.А. Матвеев**) участвуют в обработке данных и теоретическом сопровождении эксперимента.

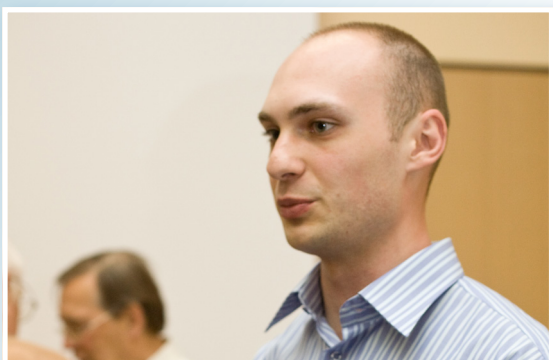
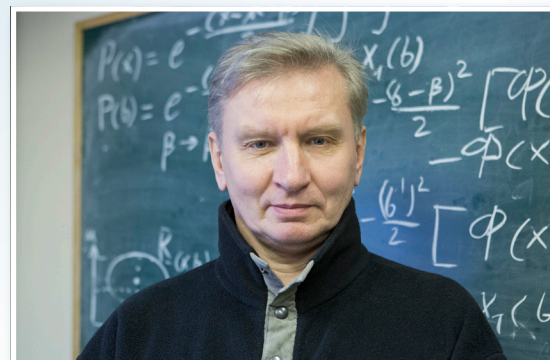
Сотрудником отдела Ф.В.Ткачевым был разработан новый подход к статистической обработке экспериментальных данных — метод квазиоптимальных весов, успешно примененный для анализа результатов двух ведущих экспериментов по определению массы нейтрино: «Троицк ню-масс» (ИАИ РАН) KATRIN (Технологический институт Карлсруэ).

Сотрудники отдела (**Д.С. Горбунов, Г.И. Рубцов, П.Г. Тиняков, И.И. Ткачев, С.В. Троицкий** и др.) внесли важный вклад в разработку предложений и создание научных программ многих крупных экспериментов в области физики нейтрино (BEST, DUNE и др.), будущих ускорительных экспериментов (SHiP, MATHUSLA и др.), экспериментов в области астрофизики частиц (Telescope Array, IAXO, «Ковер» и др.).

Сотрудниками отдела выполнены многочисленные, хорошо известные работы по построению моделей физики элементарных частиц, выходящих за рамки Стандартной модели, в том числе по суперсимметричным теориям, теориям с расширенным хиггсовским сектором и др. (**Д.С. Горбунов, С.Л. Дубовский, С.В. Троицкий, С.В. Демидов**). Сотрудники отдела (**В.А. Рубаков, М.Е. Шапошников**) являются авторами идеи «мира на бране» в пространстве с дополнительными измерениями, ставшей весьма популярной как возможное расширение Стандартной модели и получившей важное развитие в более поздних работах (**Д.С. Горбунов, С.Л. Дубовский, В.А. Рубаков, С.М. Сибиряков, П.Г. Тиняков**). Оригинальная реализация этой идеи, позволившая объяснить наличие трех поколений частиц в природе, также предложена сотрудниками отдела (**М.В. Либанов, Э.Я. Нугаев, С.В. Троицкий**).

Сотрудником отдела Н.В.Красниковым была предложена нелокальная модель квантовой гравитации и показана суперперенормируемость модели. Сотрудником отдела **С.М. Сибиряковым** была предложена перенормируемая модель квантовой гравитации с нарушенной лоренцевой симметрией.





▲
 На этой странице (слева направо, сверху вниз):
**Г.Б. Пивоваров, Д.Г. Левков, М.В. Либанов,
 Д.В. Кирпичников, П.С. Сатунин,
 С.А. Миронов, А.Г. Панин
 А.А. Овчинников**

▶
 На правой странице (слева направо, сверху вниз):
**С.М. Сибиряков, Э.Я. Нугаев;
 Ф.В. Ткачев, О.Е. Калашев
 Е.В. Соколова, А.В. Невструева и А.А. Токарева
 К.Г.Четыркин, Ф.Л. Безруков**



Были выполнены первоклассные исследования по физике космических лучей, в частности, по изучению эффекта Грейзена-Зацепина-Кузьмина и его экспериментальному поиску, построению моделей происхождения космических лучей и нейтрино высоких энергий, разработке методов экспериментального исследования анизотропии направлений прихода и состава первичного космического излучения экстремальных энергий (**В.А. Кузьмин, И.И. Ткачев, С.В. Троицкий, Г.И. Рубцов, О.Е. Калашев, П.Г. Тиняков, Д.В. Семикоз, К.В. Птицына**). Группа сотрудников отдела вошла в состав крупнейшего в Северном полушарии эксперимента по регистрации космических лучей Telescope Array, принимает активное участие в анализе его результатов, в частности, разработала и применила новые методы обработки больших объемов данных на основе машинного обучения.

Важную роль сыграли работы сотрудников отдела по теории генерации различных гипотетических типов темной материи и исследованию их свойств, а также исследованию проявлений в астрономических наблюдениях и наземных экспериментах (**Д.С. Горбунов, С.В. Демидов, В.А. Рубаков, А.А. Хмельницкий**).

Был внесен крупный вклад в теорию космических аксионов. В частности, предсказано существование аксионных звезд (**И.И. Ткачев, Д.Г. Левков, А.Г. Панин**), изучены проявления аксионоподобных частиц в астрофизических данных (**Г.И. Рубцов, С.В. Троицкий, М.В. Либанов**).

Были предложены и исследованы новые модели космологической инфляции, такие как инфляция на поле Хиггса, теории с легким инфлатоном и другие; сделаны предсказания эффектов, которые могут отличать эти модели от предыдущих (**Ф.Л. Безруков, Д.С. Горбунов, А.А. Токарева, М.Е. Шапошников**).

Были выполнены пионерские работы по формулировке моделей ранней Вселенной, альтернативных инфляции, исследованию самосогласованности этих моделей, получению характерных предсказаний, допускающих экспериментальную проверку (**В.Е. Волкова, М.В. Либанов, С.А. Миронов, С.Р. Рамазанов, Г.И. Рубцов, В.А. Рубаков**).

Были созданы новые квазиклассические методы исследования процессов за рамками теории возмущений, происходящих

в физике элементарных частиц при высоких энергиях, а также в квантовой механике многих степеней свободы (**Ф.Л. Безруков, А.Н. Кузнецов, Д.Г. Левков, А.Г. Панин, В.А. Рубаков, С.М. Сибиряков, П.Г. Тиняков, Д.Т. Шон**). Выполненные на основе этих методов вычисления инстантонных процессов в электрослабой теории являются рекордными.

Сотрудниками отдела выпущено свыше 10 монографий по физике высоких энергий, квантовой теории поля, космологии.

В отделе было защищено 14 диссертаций на соискание ученой степени доктора физико-математических наук и свыше 30 кандидатских диссертаций.

Сотрудники отдела активно занимаются педагогической деятельностью — преподают на кафедрах на физическом факультете МГУ и в МФТИ. Сотрудник отдела академик **В.А. Рубаков** является заведующим кафедрой на физическом факультете МГУ. **М.В. Либанов** — заведующий кафедрой МФТИ.

Сотрудники отдела каждые два года организуют и проводят престижные международные конференции серии «Кварки» по физике высоких энергий и смежным направлениям.

Все вышеперечисленные достижения были бы невозможны без самоотверженной работы бесменного секретаря отдела — **Али Васильевны Невструевой**.

Сотрудники отдела являются лауреатами различных престижных премий. Перечислим некоторые из них:

Березин В.А. — премия им. М.А. Маркова.

Горбунов Д.С. — премия Президента России для молодых ученых, премия им. М.А. Маркова.

Красников Н.В. — премия им. М.А. Маркова, премия МАИК.

Кузьмин В.А. — премия им. А.А. Фридмана, премия им. М.А. Маркова, премия им. И.Я. Померанчука.

Матвеев В.А. — премия имени Ленинского Комсомола, Ленинская премия, Государственная премия Российской Федерации, премия им. М.А. Маркова, премия МАИК.

Рубаков В.А. — премия им. А.А. Фридмана, премия им. Ю. Весса, Ломоносовская премия, премия им. Н.Н. Боголюбова, Демидовская премия, Гамбургская премия по теоретической физике.

Тавхелидзе А.Н. — Государственная премия СССР, Ленинская премия, Государственная премия Российской Федерации, премия им. М.А. Маркова.

Днем рождения лаборатории нейтринной астрофизики высоких энергий можно считать 1 октября 1980 года, когда состоялось заседание ученого совета Института ядерных исследований АН СССР, на котором было принято предложение **Моисея Александровича Маркова** о создании в институте лаборатории для разработки метода глубоководной регистрации элементарных частиц и ориентирующейся на озеро Байкал как место для создания испытательного полигона для прототипов планируемых в мире глубоководных крупномасштабных нейтринных телескопов. Годом ранее афганская авантюра лишила советских физиков возможности сохранения их участия в международном проекте создания гигантского черенковского детектора нейтрино в Тихом океане вблизи Гавайских островов (проект DUMAND). Как реакция на возникшую ситуацию родилось предложение **Александра Евгеньевича Чудакова** начать исследовательские работы на Байкале, приступить к разработке методики и созданию действующих относительно небольших детекторов, а там и посмотреть, что получится.

На том же заседании ученого совета Института 1 октября 1980 года лаборатория получила своего заведующего (**Г.В. Домогацкий**), а немного времени спустя, первых, перешедших из ОЛВЭНА сотрудников (**Л.Б. Безруков** и **Э.В. Бугаев**), и современное название. Последовавшими решениями Госплана СССР и Государственного комитета по науке и технике СССР это направление получило государственную поддержку в организационной и финансовой формах, лаборатории были выделены первые штатные единицы и средства на проведение работ. На работу были приняты первые молодые научные сотрудники (**Ж-А.М. Джилкибаев**, **А.И. Панфилов**, **Л.Н. Степанов**), К периоду 1984–1986 годов сложился коллектив лаборатории, содержащий перешедшего от И.В. Штраниха опытного инженера-электронщика (**А.М. Клабуков**), пришедших из производства инженеров-хозяйственников (**В.П. Науменко**, **Н.И. Пидгурский**, **Б.И. Глузман**), опытного экономиста (**Н.А. Айрапетова**) и группу молодых выпускников МИФИ, МГУ, ОГУ (**И.А. Белолопников**, **Б.А. Борисовец**, **М.Д. Гальперин**, **А.А. Дорошенко**, **С.И. Климушин**, **Б.К. Лубсандоржиев**, **И.А. Сокальский**). Лаборатория стала ядром создаваемой Байкальской коллаборации университетов, ВУЗов и научно-исследовательских институтов СССР.

«We propose setting up apparatus in an underground lake or deep in the ocean in order to separate charge particle directions by Cerenkov radiation». Markov M.A., 1960, On high energy neutrino physics.» [Proc. ICHEP, Rochester, p.578]

«Мы предлагаем установить детекторы в подземном озере или глубоко в океане, чтобы определять направление движения заряженных частиц с помощью черенковского излучения». Марков М.А., 1960, On high energy neutrino physics. [Proc. 10th ICHEP, Rochester, p. 578]



Моисей Александрович Марков

Вся сорокалетняя история развития лаборатории и Байкальского проекта допускает достаточно четкое ее разделение на три периода.

Восьмидесятые годы — от осмысления задачи до проекта НТ200

Основываясь на опыте и результатах многолетних исследований Байкала сотрудниками Лимнологического института СО АН СССР, было определено конкретное место развертывания работ — акватория озера, примыкающая к 106-му км Кругобайкальской железной дороги (КБЖД).

Разработке проекта первого глубоководного нейтринного телескопа НТ-200 предшествовали длительные, на протяжении около десяти лет, исследования гидрооптических, гидрофизических и гидрологических условий проведения экспериментов на оз. Байкал, где неоценимую помощь сотрудникам лаборатории в освоении культуры работ на Байкале оказывали такие известные исследователи озера как Г.И. Галазий и П.П. Шерстянкин. При этом был открыт эффект



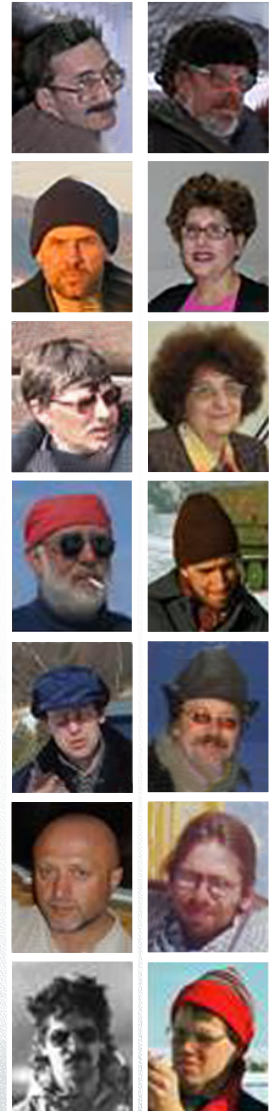
▲
Коллаборация БАЙКАЛ, 1990 г.

собственного свечения глубинных вод озера, обусловленный однофотонным излучением, сопровождающим некоторые реакции окисления органики. Была осуществлена постановка на длительную эксплуатацию пилотных глубоководных черенковских детекторов, использующих фотоэлектронные умножители ФЭУ-49Б, на которых не только отработывалась методика, но и выполнялись первые физические эксперименты. В частности, был установлен верхний предел на интенсивность потока сверхтяжелых магнитных монополей по эффекту катализа распада барионов, находившийся на уровне наиболее сильных из существовавших в то время теоретических и экспериментальных ограничений. Совместно с ОКБ «Экран» (Новосибирск) и под общим руководством **Л.Б. Безрукова** специально для Байкальского нейтринного телескопа был разработан высокочувствительный гибридный фотоприемник 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). Талантливым молодым инженером-конструктором лаборатории **А.И. Панфиловым** были сформулированы основные принципы построения глубоководных несущих конструкций на оз. Байкал и спуско-подъемных механизмов, необходимых для монтажа глубоководного оборудования с ледового покрова озера. **Специалистами** лаборатории РАЛСНЕМГ (разработка льда, снега и мерзлого грунта) Горьковского политехнического института разработан специализированный комплекс оборудования, обеспечивающий прокладку со льда донных кабельных линий, связывающих глубоководную аппаратуру с береговым центром питания и управления. Активно включилась в работу группа немецких физиков во главе с **Кристианом Шпирингом**, взявших на себя задачу создания глубоководного калибровочного источника света на основе газового лазера и внесшая значительный вклад в создание системы обработки и мониторинга данных. С деятельным участием группы сотрудников НИИЯФ МГУ во главе с **Л.А. Кузьмичевым** разработана концепция и архитектура системы сбора данных глубоководного телескопа НТ200. Другими словами, к концу 80-х годов были созданы необходимые предпосылки для разработки проекта первого нейтринного телескопа НТ-200, что и было завершено в 1989 году.

Значительную роль в становлении Байкальского проекта сыграл выход 17 июля 1987 года постановления Правительства СССР «Развитие материально-технической базы исследований в области физики высоких энергий», предусматривавший как одну из задач создание Байкальского глубоководного нейтринного телескопа. Постановлением были определены генеральный проектировщик и генеральный подрядчик строительства объектов инфраструктуры в Иркутской области, решены вопросы землеотвода, предусмотрены средства на сооружение объектов капитального строительства в городах Иркутске, Слюдянке и Байкальске, определены объемы финансирования закупок материалов и научного оборудования для исследовательских работ и комплектации создаваемой установки.

Заключая рассказ об этом периоде развития Байкальского проекта необходимо подчеркнуть, что в этот период работа лаборатории протекала в тесном и весьма продуктивном взаимодействии с коллективом НИИПФ ИГУ, возглавлявшимся



▲
И те, кого нет на левом снимке

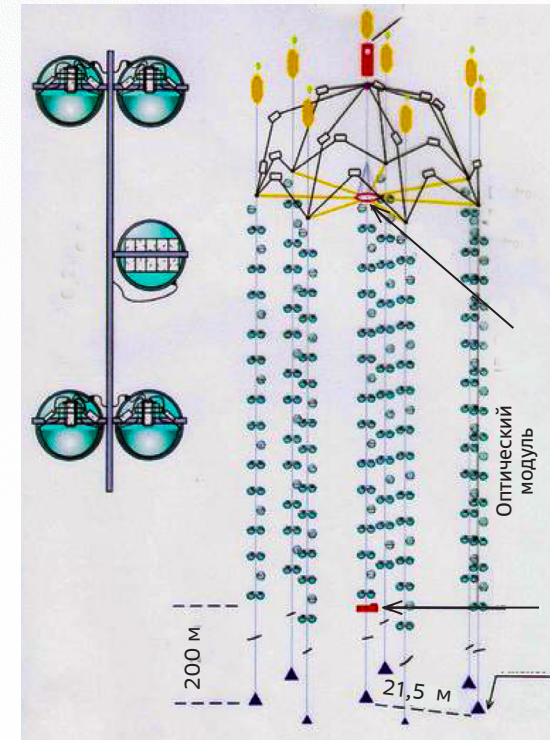


▲
Кристиан Шпиринг, Г.В. Домогацкий,
1993 г.

такими яркими людьми, как **Ю.В. Парфенов** и **Н.М. Буднев**. И последний, но весьма немаловажный итог периода 80-х годов: в рамках лаборатории было сформировано байкальское подразделение — Байкальский технический стационар, с задачей обслуживания и ремонта технических средств зимних экспедиций, обустройства береговой базы, постоянного обслуживания и поддержки системы энергопитания установки.

Первый глубоководный нейтринный телескоп НТ200/НТ200+

В начале 90-х были уже завершены необходимые расчеты и выполнены проектные работы, налажено производство глубоководных оптических модулей детектора на основе умножителей «Квазар-370», разработаны и испытаны все комплектующие элементы телескопа и всей системы глубоководных кабельных коммуникаций, и в зимние экспедиции 1991, 1992 гг. был выполнен монтаж несущего каркаса, а в 1993-м во-первых гирлянд оптических модулей детектора НТ200. Монтаж гирлянд выполнялся поэтапно, в 1993–1998 гг. в условиях ежегодных зимних экспедиций на Байкал. В работах участвовало практически все мужское население лаборатории и групп других организаций — участников Байкальской коллаборации. Время для

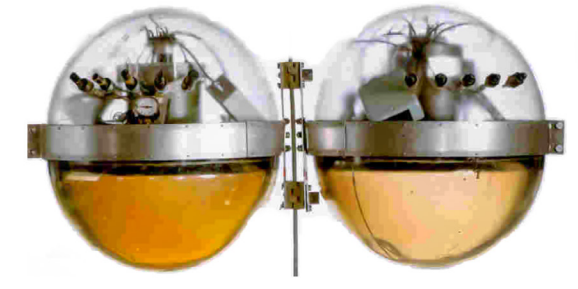


8 гирлянд ОМ: 72 м
192 оптических модуля
96 измерительных каналов
калибровка — Т-лазеры
временная точность ~ 1 нс
дин. диапазон ~1000 ф.эл.

Эфф. площадь: 1 ТэВ ~ 2000 м²
Эфф. объем (каскады): 10 ТэВ ~ 0,2 Мт

Высота × диаметр = 70 м × 40 м, V = 10⁵ м³

Квазар: d = 37 см



▲
Нейтринный телескоп НТ200

реализации в России проекта создания крупномасштабной установки, основанной практически полностью на отечественных комплектующих (кроме глубоководных калибровочных лазерных источников, сделавшихся в Германии, и транспьютеров), было не самое располагающее. Проблемой постепенно становилось все, вплоть до продуктов питания в экспедиции. И неизвестно, на сколько лет могла бы затянуться работа по созданию детектора, если бы не решительная позиция немецкого участника проекта — DESY, руководство которого нашло возможность резко увеличить свой вклад в финансовую поддержку Байкальского проекта в эти самые трудные для проекта годы.

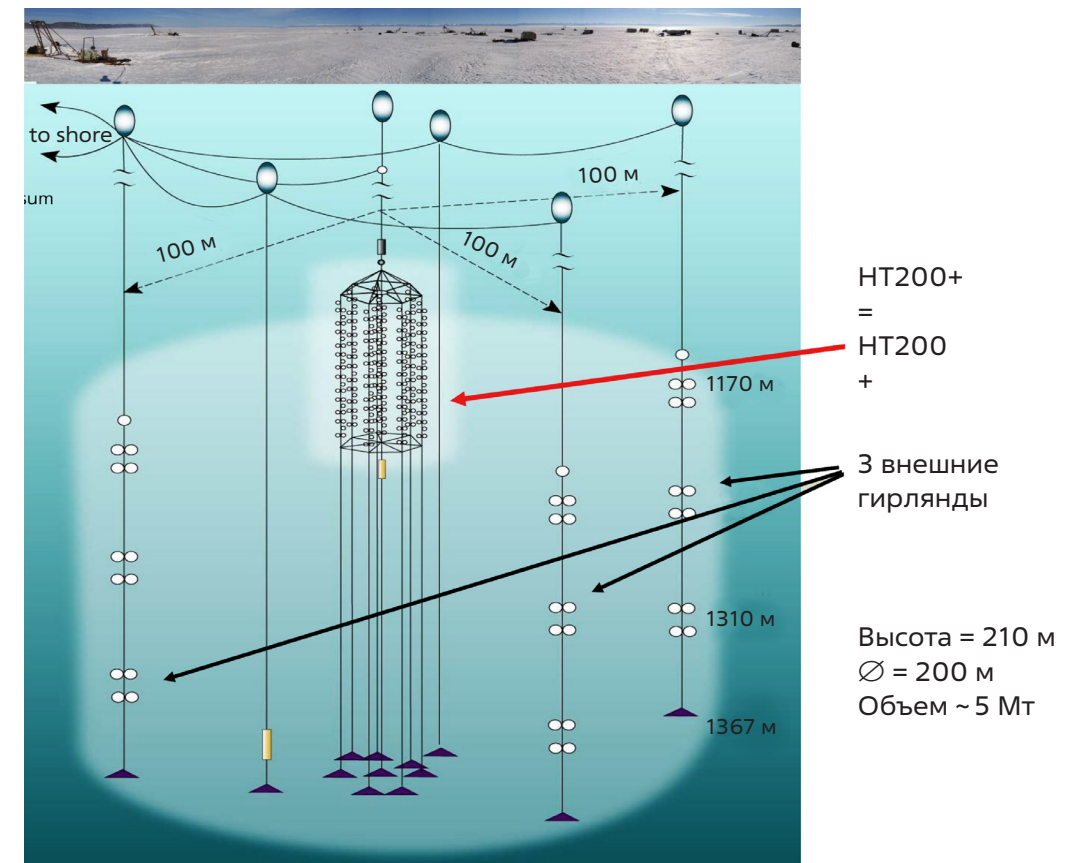
Регистрирующая аппаратура телескопа НТ200 расположена на глубине около 1100 м на расстоянии 3,6 км от берега и связан с береговым центром управления и сбора данных донными линиями связи. Телескоп представляет собой трехмерную решетку из оптических модулей (ОМ), размещенных на вертикальных грузонесущих 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 8 гирляндах длиной 68 м каждая. Вокруг центральной гирлянды равномерно вдоль окружности с радиусом 21,5 м расположены периферийные гирлянды.

Оптический модуль содержит гибридный фотоприемник Квazar-370, размещенный в корпусе из низко-радиоактивного стекла. С целью подавления темного темпа счета ФЭУ и фонового свечения глубинных вод озера оптические модули объединены в пары и включены по схеме совпадения регистрируемых сигналов во временном окне порядка 15 нс. Две пары ОМ имеют общий электронный системный модуль (СМ) и образуют функциональную единицу гирлянды — «связку». В состав СМ входят два блока выработки локального триггера, блок преобразования амплитуды, запуска светодиодов и блок управления. На выходе СМ формируются выходные сигналы (локальные триггеры) двух каналов «связки», длительность которых пропорциональна входным зарядам, а передний фронт определяет время срабатывания канала.

Локальные триггеры со всех системных модулей гирлянды поступают в блоки электроники гирлянды БЭГ. В состав БЭГ входят шесть измерительных каналов, контроллер и модемы каналов данных и управления. Каждая гирлянда имеет два БЭГа, соединенных с блоком электроники детектора (БЭД). В БЭГе информация каждого измерительного канала оцифровывается, вырабатывается локальный триггер и формируется сигнал запроса в БЭД. Если в БЭДе накоплено достаточное количество сигналов запроса с БЭГов в интервале 500 нс, формируется сигнал «подтверждение», поступающий во все БЭГи. После этого, в БЭГах событию присваивается номер и накопленные данные передаются в береговой центр сбора данных и управления.

С целью повышения эффективности регистрации нейтрино высоких энергий в 2004–2005 гг. телескоп НТ200 был модернизирован. Новая установка получила название НТ200+ и обеспечила как увеличение эффективного объема для регистрации каскадов от нейтрино, так и существенное повышение энергетического разрешения телескопа в целом. Детектор НТ200+ явился начальной версией базовой структурной еди-



ницы будущего Байкальского нейтринного телескопа с эффективным объемом порядка кубического километра.

Нейтринный телескоп НТ200+

Телескоп состоял из центральной части (НТ200) и трех внешних гирлянд, расположенных на расстоянии 100 м от центральной части детектора. На каждой внешней гирлянде размещалось по 12 ОМ, сгруппированных попарно, аналогично ОМ телескопа НТ200. Расстояния между каналами внешних гирлянд составляло 20, 50, 20, 30 и 20 м, считая от верхнего канала.

В то время как оптические модули, системные модули и измерительные каналы каждой внешней гирлянды полностью идентичны аппаратуре НТ200, электроника контроллера БЭГ потребовала существенной модернизации. Каждый измерительный канал БЭГ содержит преобразователь время-код, преобразователь длительность-код и схему записи номера события. Сигнал «запрос гирлянды» формируется контроллером

БЭГ при условии двойных совпадений сигналов «запрос канала» во временных воротах 0,5 мкс. Запросы от всех внешних гирлянд передаются в центральный коммутационный модуль установки (DAQ-центр) где формируется сигнал «подтверждение», который возвращается ко всем внешним гирляндам. При наличии сигнала «подтверждение» информация о каждом локальном триггере (время, амплитуда, номер события, номер измерительного канала и глобальный номер события) передается через контроллер БЭГ в DAQ-центр. DAQ-центр обеспечивает объединение потоков данных и трансляцию всей полученной информации в береговой центр.

Байкальский глубоководный нейтринный телескоп НТ-200 стал одним из двух крупнейших (наряду с детектором AMANDA, создававшимся на Южном полюсе примерно в эти же годы) детекторов нейтрино высоких энергий. К существенным результатам первых работ по проекту НТ-200 следует отнести результаты анализа данных, полученных на промежуточных установках, который проводился как с точки зрения изучения параметров детекторов, так и по программам исследования потока атмосферных мюонов, выделения событий от нейтрино, поиска магнитных монополей. В экспериментах на детекторе НТ36 и были зарегистрированы первые в мире глубоководные события от нейтрино (анализ *Ж.А.М. Джилкибаева*), и установлено одно из наиболее сильных для своего времени ограничений на поток мюонов от эффекта аннигиляции массивных частиц темной материи (нейтралино) в центре Земли и ограничение на интенсивность природного потока нейтрино сверхвысоких (свыше 10 ТэВ) энергий. Наиболее значимые результаты были получены в 2005–2008 гг., когда на основе анализа экспериментальных данных были установлены новые, одни из наиболее сильных для своего времени, ограничения на величину природного потока быстрых ($v/c > 0,8$) магнитных монополей — $4,6 \cdot 10^{-17} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$ (анализ *Э.А. Осиповой*), на потоки мюонов, сопровождающих процесс аннигиляции массивных частиц темной материи (нейтралино) в центре Земли — $4,2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и в центре Солнца — $3 \cdot 10^3 \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ в области масс нейтралино выше 500 ГэВ, на поток нейтрино от гамма-всплесков в интервале энергий вплоть до 10^7 ГэВ, на поток нейтрино от локальных Галактических источников, располо-

женных на южной небесной полусфере, зависимости от склонения — $E^2 F < 5 \cdot 10^{-10} \text{ ТэВ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и, наконец, на интенсивность природного диффузного потока нейтрино, которое в диапазоне энергий от $2 \cdot 10^4$ ГэВ до $2 \cdot 10^7$ ГэВ для величины суммарного потока нейтрино всех типов составил $E^2 F < 2,9 \cdot 10^{-7} \text{ ГэВ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$ и находился в области теоретически предсказываемых значений. Получено также наиболее сильное для своего времени ограничение на поток электронных антинейтрино в области резонанса с энергией $6,3 \cdot 10^6$ ГэВ, которое составило $F < 3,3 \cdot 10^{-20} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1} \text{ ГэВ}^{-1}$. Реализация проекта создания детектора НТ200+ позволила примерно в 3 раза повысить чувствительность эксперимента по поиску природного диффузного потока нейтрино и начать исследование их энергетического спектра вплоть до энергий 10^{18} эВ.

Другими словами, метод глубоководной регистрации элементарных частиц (и его ледовая модификация) доказал свою эффективность в исследовании природных потоков нейтрино высоких энергий. Уровень знаний о диффузном потоке нейтрино в диапазоне энергий (10^{13} – 10^{18}) эВ, о локальных источниках нейтрино с энергией свыше 10 ГэВ, о природном потоке быстрых магнитных монополей и о проявлениях массивных частиц темной материи определялся, главным образом, результатами экспериментальных исследований на Байкальском нейтринном телескопе НТ200/НТ200+, на детекторе AMANDA на Южном полюсе и, начиная с 2009 года, на детекторе ANTARES в Средиземном море. Ожидавшийся в 2011 г. ввод в строй кубокилометрового детектора IceCube на Южном полюсе позволял надеяться, что в ряде задач чувствительность экспериментальных исследований будет поднята еще на один-два порядка величины.

На повестку дня вышла задача создания в Северном полушарии детектора, способного вести изучение центра нашей Галактики на уровне чувствительности, соизмеримой с детектором IceCube.

От проекта НТ-1000 до нейтринного телескопа BAIKAL-GVD

Удачное сочетание природных факторов, наряду с хорошей изученностью места проведения работ и накопленным опытом развертывания и эксплуатации нейтринного телескопа

первого поколения НТ200/НТ200+, создали необходимые предпосылки для начала работ по проектированию и созданию глубоководного нейтринного телескопа с эффективным объемом масштаба кубического километра НТ1000 на оз. Байкал. Работа выполнялась в период с 2008 по 2011 гг., и определяющую роль в ней сыграли сотрудники лаборатории *Ж.-А.М. Джилкибаев, В.М. Айнутдинов* и сотрудник ОИЯИ/ИЯИ *И.А. Белоланников*.

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 темной материи, поиска магнитных монополей и других гипотетических частиц. Он будет представлять собой экспериментальный комплекс, предназначенный для исследования природных потоков нейтрино в области энергий выше 10 ТэВ посредством регистрации черенковского излучения вторичных мюонов и ливней, генерируемых в нейтринных взаимодействиях.

Концепция НТ1000 базировалась на ряде достаточно очевидных требований, предъявляемых к конструкции и организации регистрирующей системы нового детектора: максимально возможном использовании преимуществ монтажа регистрирующей системы с ледового покрова оз. Байкал, наращиваемости установки и обеспечении ее эффективной эксплуатации уже на первых стадиях развертывания, возможности реализации различных вариантов компоновки и плотности фотодетекторов в рамках одной измерительной системы.

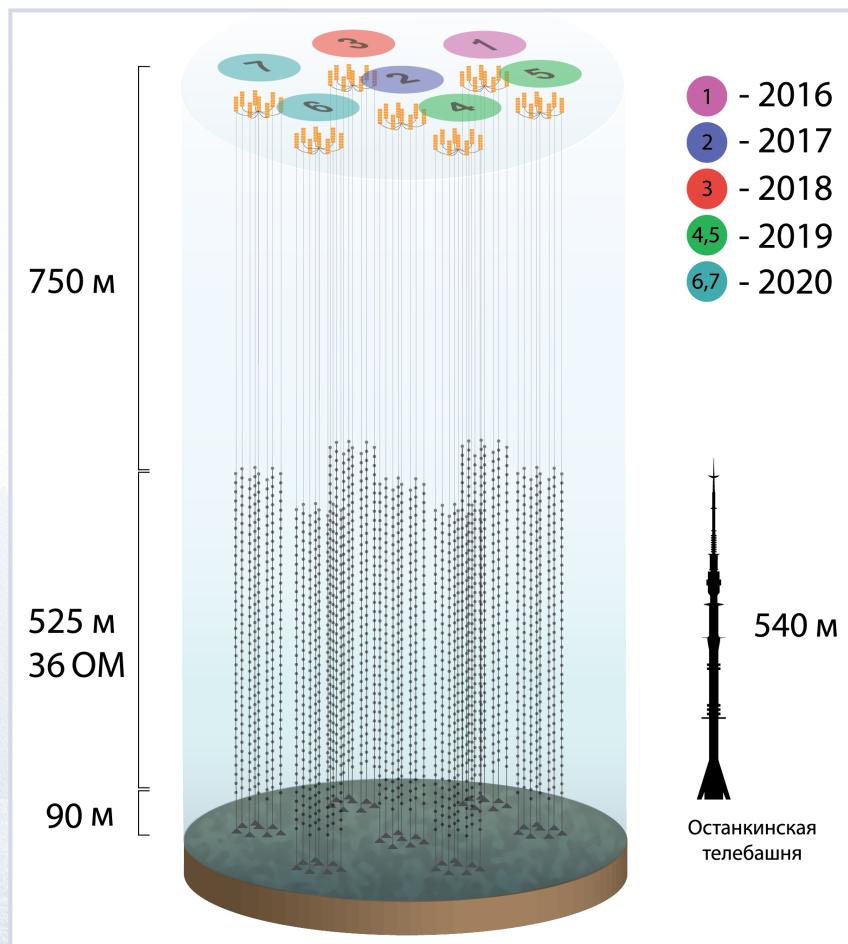
Нейтрино астрофизической природы еще не были выделены в то время на детекторе IceCube и задача создания в Северном полушарии нейтринного телескопа, способного стать инструментом нейтринной астрономии высоких энергий, допускала лишь интуитивное решение. И для проектирования базовой конфигурации детектора было принято значение 2304 общего количества ФЭУ Hamamatsu-7081HQE с полусферическим фотокатодом диаметром 250 мм как основной параметр, определяющий базовую конфигурацию установки.

С учетом перечисленных выше требований, а также на основании оценок светосилы и разрешающей способности НТ1000,



базирующихся на результатах полномасштабного моделирования отклика телескопа на черенковское излучение мюонов и ливней, была разработана архитектура измерительных и коммуникационных систем и определена базовая конфигурация телескопа. ФЭУ вместе с управляющей электроникой размещаются в глубоководных стеклянных корпусах, образуя оптические модули. Оптические модули размещаются на вертикальных кабель-тросах и формируют гирлянды ОМ. Основной структурной единицей гирлянды является секция оптических модулей. Секция представляет собой функционально законченный узел детектора, включающий в себя системы регистрации излучения, обработки сигналов, калибровки, формирования триггера и передачи данных. Секция содержит 12 ОМ, расположенных на расстоянии 15 м вдоль гирлянды, центральный модуль (ЦМ) и служебный модуль (СМ). Аналоговые сигналы со всех ОМ секции передаются в ЦМ по коаксиальным кабелям. По этим же кабелям к оптическим модулям подводится низковольтное питание. В ЦМ осуществляется преобразование аналоговых сигналов оп-

▲
Зимняя экспедиция, 2017 г.



▲
Нейтринный телескоп BAICAL-GVD, 2020 год.
Эффективный объем детектора составляет
 $0,35 \text{ км}^3$ для каскадных событий от нейтрино
в области энергий 100 ТэВ – 10 ПэВ

тических модулей в цифровой код и передача полученной информации по линии Ethernet. Служебный модуль предназначен для калибровки временных каналов установки, определения положения гирлянды и электропитания ОМ. Местоположение гирлянды определяется гидроакустической системой измерения координат ГАСИК. Каналы синхронизации, электропитания и передачи данных секций объединяются в коммутационном модуле гирлянды (КМ), который связан с центральным блоком управления кластера.

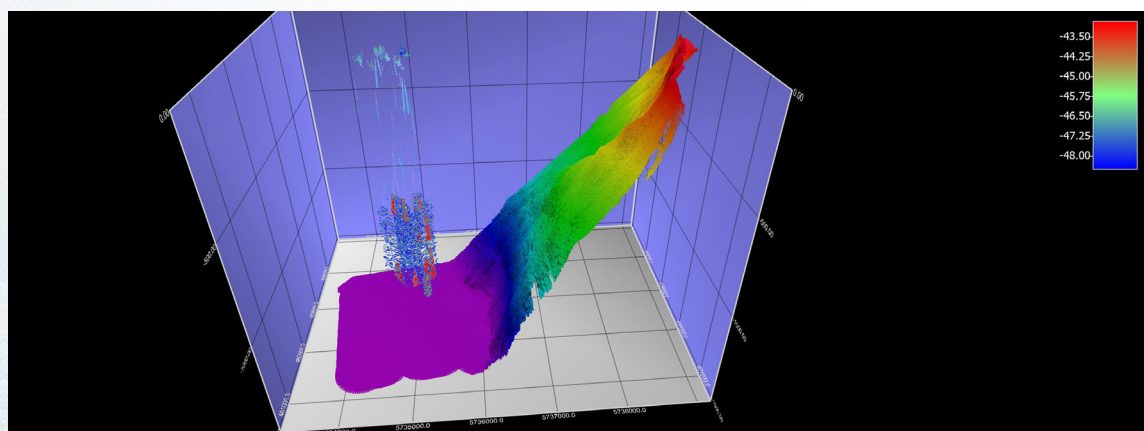
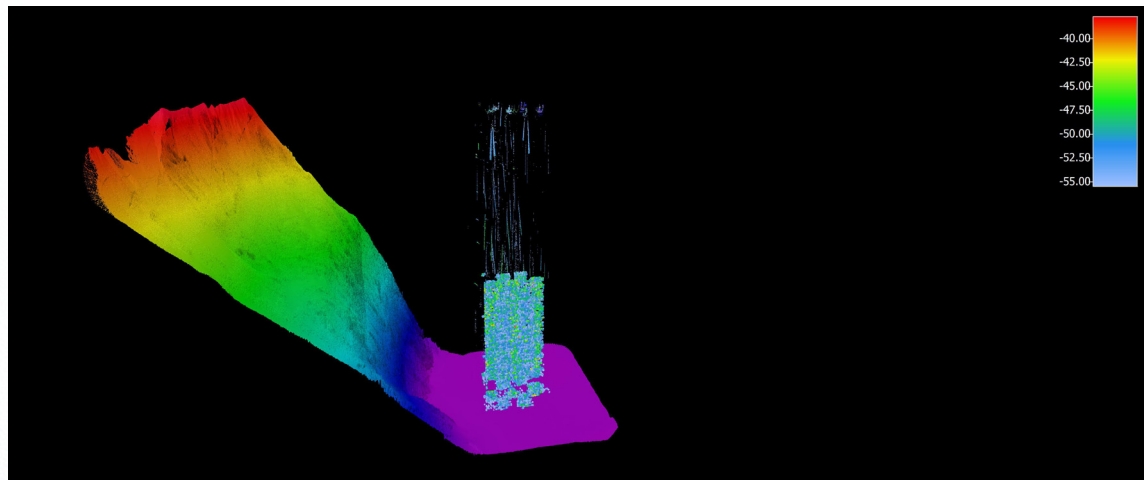
Базовая конфигурация каждого из 12 кластеров НТ1000 включает в себя восемь гирлянд по 24 ОМ каждая (две секции на гирлянде), расположенных на расстоянии 60 м друг от друга. Расстояние между соседними кластерами составляет 300 м.

Кластеры гирлянд связаны с Береговым центром комбинированными электро-оптическими кабелями длиной ~6 км. Каждый кластер НТ1000 является функционально законченным детектором (с чувствительным объемом масштаба НТ200+ или ANTARES), 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.

Базовая конфигурация телескопа обеспечивает эффективный объем для регистрации ливней порядка $0,2-0,7 \text{ км}^3$ в интервале энергий 10^5-10^9 ГэВ и эффективную площадь для регистрации мюонов порядка $0,2-0,5 \text{ км}^2$ в диапазоне энергий 10^4-10^6 ГэВ. Точность восстановления направлений мюонов составляет $0,4-0,6$ градуса, а направлений ливней — $5-7$ градусов. Относительная точность восстановления энергии ливня составляет 20–35%.

Долговременные натурные испытания аппаратуры секции НТ1000 были успешно проведены в оз. Байкал с 2008 по 2010 гг. В 2010 г. был создан и испытан в лабораторных условиях прототип кластера НТ1000, который был развернут в оз. Байкал в период зимней экспедиции 2011 г. Свои современные очертания кластер приобрел к 2016 году после серии натурных испытаний и внесения соответствующих коррекций по итогам ежегодных зимних экспедиций и выделения событий астрофизической природы на детекторе IceCube — выросла длина гирлянд с 24-х до 36-ти оптических модулей, с 40 м до 60 м возросло расстояние от гирлянд до центра кластера, внедрена новая, разработанная исследовательской фирмой Evologic (Германия), высокоэффективная система определения текущего положения оптических модулей, установлены новые калибровочные источники света, на основе твердотельных лазеров, специально разработанных для настоящего проекта ООО МПЦ «ЭЛС-94», да и сам проект НТ-1000 стал восприниматься мировым сообществом как BAICAL-GVD (Gigaton Volume Detector).

Очень серьезный импульс развитию BAICAL-GVD придало вступление в активную работу по проекту Объединенного института ядерных исследований (Дубна), где под руководством известного физика-экспериментатора **В.Б. Бруданина**



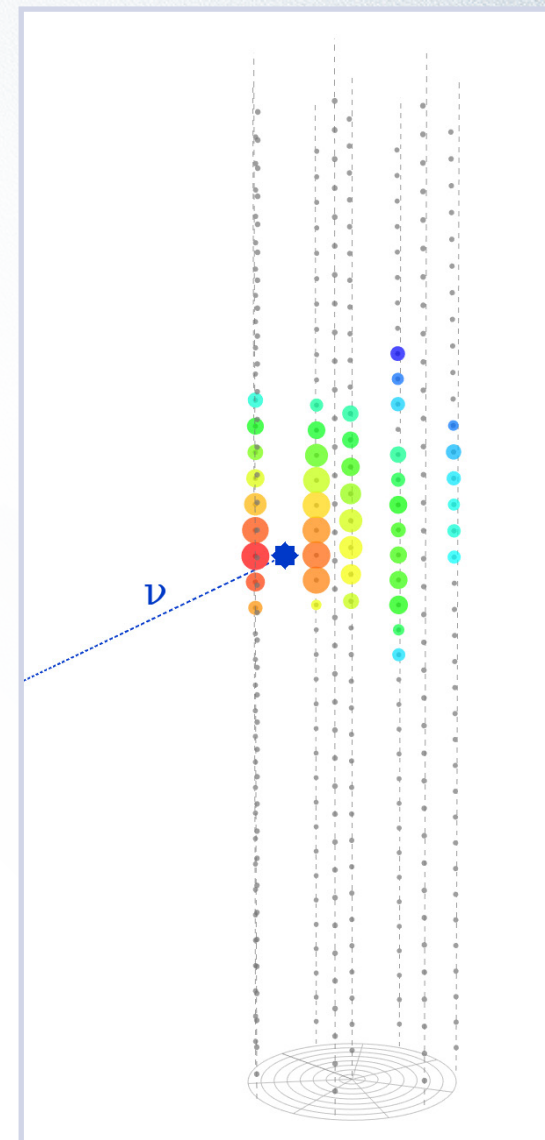
Нейтринный телескоп BAIKAL-GVD, как его видел многолучевой эхолот ИРННТУ в июле 2020 года

было сформировано байкальское подразделение ЛЯП, ядро которого составили молодые воспитанники лаборатории, выпускники МИФИ и МФТИ **И.А.Белолаптиков, Б.А.Шайбонов, Е.Н.Плисковский и К.В.Конищев**. Подразделение стало эффективным партнером лаборатории НАВЭ ИЯИ РАН и взяло на себя монтаж и подготовку оптических модулей детектора, систем сбора, накопления и первичного анализа данных, и вносит, в целом, весьма существенный вклад в работу по анализу данных и получению физических результатов. Благодаря целевому вкладу ОИЯИ произошло значительное развитие береговой инфраструктуры телескопа на 106-км КБЖД и в г.Байкальске, осуществлявшееся под общим руководством пришедшего из ИЯФ СО РАН опытного специалиста, физика-экспериментатора

А.В.Аврорина. На новый уровень технической оснащенности перешел и коллектив Байкальского технического стационара ИЯИ РАН, пополнившийся последние годы рядом специалистов хорошего уровня (руководитель — пришедший из производства горный инженер **Г.Б.Попов**).

С апреля 2020 года нейтринный телескоп работает в составе семи кластеров и общий эффективный объем установки в задаче регистрации ливневых событий от нейтрино высоких энергий ($E \geq 100$ ТэВ) достиг значения $\sim 0,35$ куб.км. что позволяет надеяться на регистрацию и выделение трех-четырёх таких событий в течение года. В рамках этой задачи выполнен предварительный анализ данных 2015, 2016, 2018 и, частично, 2019 года, позволивший выделить первые шесть событий в области энергии 100 ТэВ, где поток астрофизических нейтрино уже превалирует над фоном атмосферных нейтрино. 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 IceCube, где средний темп счета таких событий (в зависимости от энергетического порога регистрации) составляет четыре-шесть в год.

По состоянию на июль 2020 года общее число сотрудников лаборатории составляет 41 человек, в том числе 23 сотрудника Байкальского технического стационара. В составе лаборатории — 1 член-корреспондент РАН, 3 доктора физико-математических наук, 5 кандидатов физико-математических наук.



Один из первых кандидатов на событие от нейтрино астрофизической природы в BAIKAL-GVD. Энергия 93 ТэВ. Дата 23.05.2019 год. Первый кластер

Лаборатория атомного ядра является одной из трех лабораторий ФИАН, на основе которых создавался Институт ядерных исследований

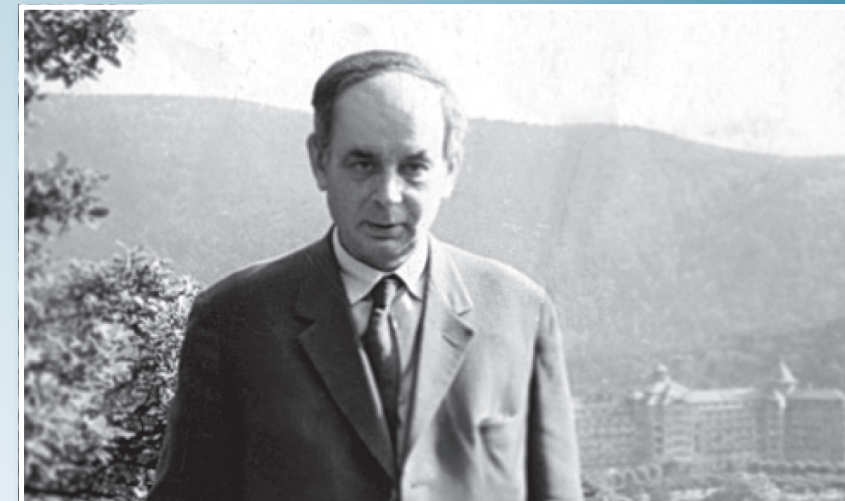
Лаборатория атомного ядра была образована в составе Физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР 1 апреля 1946 года под руководством **Ильи Михайловича Франка** (академика АН СССР, лауреата Нобелевской премии). В те годы атомная проблема поставила перед нейтронной физикой и ядерной физикой низких энергий ряд новых и трудных задач, решение части которых было возложено на лабораторию атомного ядра. За выполнение этих задач сотрудники лаборатории получили государственные награды: 7 человек стали лауреатами Сталинской премии, 11 сотрудников получили ордена, 10 — медали. После окончания работ по атомной проблеме в 1954 г. основное место стали занимать исследования по ядерной физике низких энергий, явившиеся естественным развитием исследований, связанных с атомной проблемой. В 1957 году лаборатория переехала в отдельное здание — корпус 10 на территории ФИАН. Корпус лаборатории атомного ядра был построен по специальному проекту ГИПРОНИИ.

Численность ЛАЯ в 1960-е годы ~120 чел.

В корпусе ЛАЯ размещались: три стационарных нейтронных генератора, спектрометр нейтронов по времени замедления в свинце (120 тонн свинца в сборке), три электростатических генератора Ван де Графа (ЭГ-2, ЭГ-2,5, ЭГ-5), каскадный генератор-ускоритель прямого действия на 4 МВ, имплантатор тяжелых ионов MV-500.

В работе лаборатории принимали участие научные учреждения: ФИАН, ОИЯИ, МГУ, ФЭИ, ГИРЕДМЕТ, ГосИФТП, НИИА Минатома, ВНИИПО МЧС, НИИЭМИ.

В 1971 г. в жизни лаборатории атомного ядра произошло весьма значительное событие: она перешла в состав вновь образованного Института ядерных исследований. В связи с этим период после 1971 г. характеризуется развертыванием исследований в области ядерной физики промежуточных энергий. В частности, были разработаны предложения по программе исследования нуклон-нуклонных и нуклон-ядерных взаимодействий на мезонной фабрике ИЯИ, проводилось изготовление установок и начаты эксперименты на пучках нейтронов и про-



Илья Михайлович Франк (1908–1990), академик АН СССР (1968). Руководил лабораторией атомного ядра в 1946–1990 гг.

тонов ММФ; проведены теоретические исследования взаимодействия нуклонов промежуточной энергии и пионов с ядрами, рождения пионов в нуклон-нуклонных столкновениях. Численность ЛАЯ в 1971 г. — 90 чел.

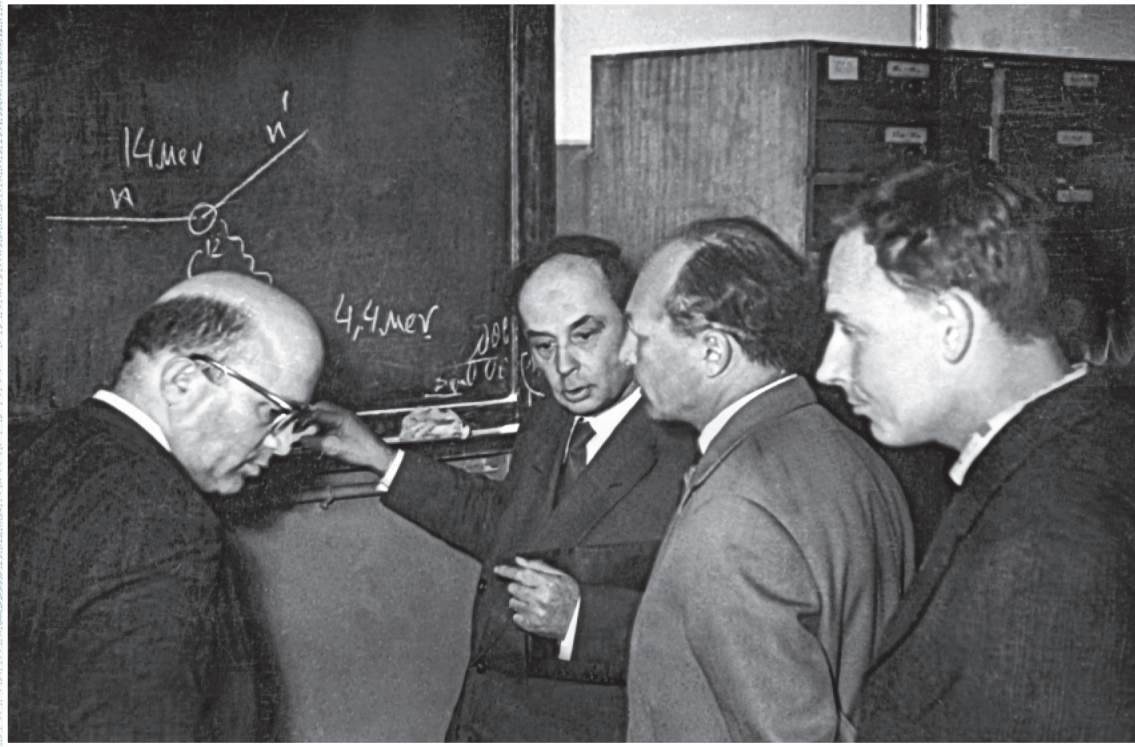
В 2009 г. состоялся переезд ЛАЯ с территории ФИАН на Питомник. При этом только один нейтронный генератор был демонтирован и перевезен в ИЯИ в 2011 году. Численность ЛАЯ тогда составляла 18 чел.

Важнейшие работы, выполненные в ЛАЯ

Детальные измерения сечения dt -реакции. Эти работы были опубликованы в 1958 г. в сборнике «Ядерные реакции на легких ядрах» (Атомиздат). Там были опубликованы наши работы (**И.М. Франк, И.Я. Барит** и др.) и еще ряд работ, которые были ранее секретными отчетами. (dt)-реакция — это важная реакция и с точки зрения термояда и с точки зрения астрофизики. Ее до сих пор измеряют. В 1987 г. была опубликована американская статья о сечениях этой реакции в тех же диапазонах, с той же точностью. В этой работе дается точность измерения сечения 1,5%, в нашей работе, которая закончена в 1953 г. — 2%.

Спектрометр нейтронов по времени замедления в свинце (СВВ).

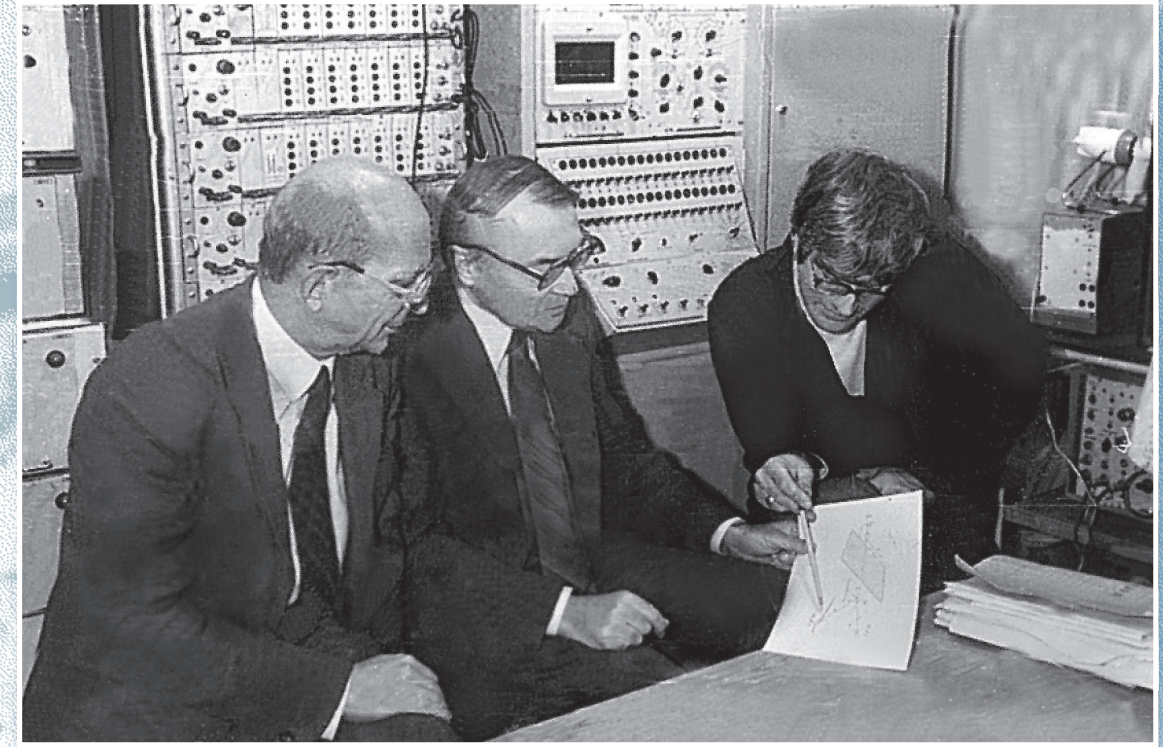
В лаборатории создан оригинальный спектрометр нейтронов по времени замедления в свинце, который был использован



Обсуждение работы на генераторе Кокрофта-Уолтона.
Г. Палевский, И.М. Франк, Ф.Л. Шапиро
и Б.А. Бенецкий

для проведения большого цикла исследований. Были выполнены прецизионные измерения энергетической зависимости сечений реакций ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$, ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$, ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$ и ${}^{14}\text{N}(n,p){}^{14}\text{C}$ в области энергии нейтронов от тепловой до 30 кэВ (**Ф.Л. Шапиро, А.А. Бергман**). Эти измерения в числе других результатов привели к обнаружению не отмечавшегося ранее общего свойства реакций на медленных нейтронах — наличия постоянной отрицательной составляющей в сечении, т.е. отклонения от закона « $1/v$ ».

Метод спектрометрии нейтронов по времени замедления в свинце, разработанный в лаборатории, сохранил свое значение до сих пор. Позднее у нас в стране (в Курчатовском институте) и в ряде других стран (США, Япония) на базе более мощных импульсных источников нейтронов были построены спектрометры, аналогичные СВЗ №1, созданному в лаборатории. В 1995–1996 гг. был сооружен СВЗ на протонном пучке Мезонной фабрики ИЯИ — установка «Питон». Эта установка на 3 порядка превосходит по светосиле существующие спектрометры такого типа.

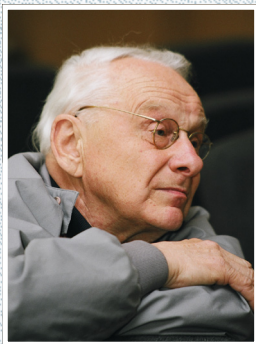


Р.М. Мусаэлян, В.И. Попов и Е.С. Конобеевский
в пультовой ЭГ-2,5

В 2003 году на «Большом кубе» — новом СВЗ, превосходящем подобные спектрометры не менее чем на пять порядков, были получены первые результаты. Наблюдалась резонансная структура в сечении подбарьерного деления тория, обладающего высоким барьером деления (**А.А. Бергман** совместно с ЛНИ).

Фотоэмульсионный метод в ядерной физике. В лаборатории атомного ядра под руководством **И.Я. Франка** были организованы ядерные исследования с использованием фотоэмульсионного метода. **И.Я. Франк** возглавил также и работу по созданию и производству ядерных фотоэмульсий на базе института НИКФИ.

Было исследовано деление ядер урана под действием медленных π -мезонов и различных частиц (γ -кванты и нейтроны) большой энергии (до 400 МэВ). Впервые установлена возможность деления (**Г.Е. Беловицкий**) ядер урана медленными π -мезонами и выяснен механизм деления ядер урана под действием частиц высокой энергии. В частности, установлено, что делению



предшествует эмиссия нескольких нейтронов и заряженных частиц (p, d, α).

Исследовался механизм деления ядер урана посредством наблюдения электронов внутренней конверсии, испускаемых в процессе деления. Обнаружено испускание электронов до или в момент деления с вероятностью 10^{-2} на акт деления.

Разработка электроники для ядерных исследований. Проводились работы в области регистрирующей электроники. Была предложена и внедрена стандартизация блоков и их стоечная компоновка, нашедшая затем повсеместное широкое применение в других институтах. Дальнейшим развитием работ являлось создание многоканальных систем регистрации распределения импульсов во времени (амплитудные и временные многоканальные анализаторы).

Были созданы одни из первых в стране многоканальные амплитудные анализаторы типа БПА с поканальной регистрацией на лампах с холодным катодом и выпущена их малая промышленная партия. Группа электроники лаборатории (*И.В. Штраних, И. Мурын, А.Н. Волков, А.М. Клабуков*) обеспечила научную разработку ядерной электроники не только для ЛАЯ, но и для ИЯИ.

Разработки в области ускорительной техники. Был построен и запущен циклотрон на 300 кэВ по дейтронам с магнитом, состоящим из трех блоков. Впервые в ускорительной практике осуществлена и исследована внешняя инжекция пучка в медианной плоскости циклотрона. Было показано, что пучок без потерь интенсивности может быть захвачен в режим ускорения (*Л.Н. Кацауров, В.А. Гладышев, Л.П. Нечаева, Е.М. Мороз*).

Фотоядерные реакции. За работы по ядерному фотоэффекту *Ю.К. Хохлову* (совместно с группой сотрудников других институтов) присуждена Государственная премия СССР 1977 года.

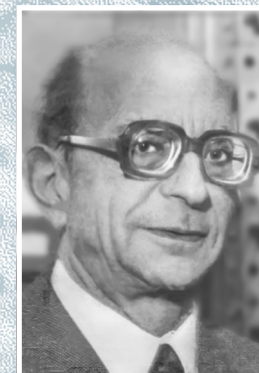
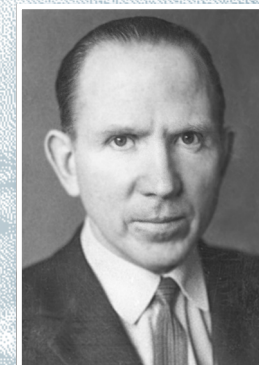
Термализация нейтронов и прохождение нейтронов через неоднородные среды. Развита общая аналитическая теория прохождения нейтронов через неоднородные среды. Выведено урав-

нение для макроскопического (усредненного по пространству) нейтронного потока. Получено решение этого уравнения в ряде практически важных случаев. Предложенный метод позволяет выйти за рамки односкоростного приближения в стационарной проблеме, которым ограничивалось большинство авторов, и дает возможность исследовать в аналитической форме прохождение немоноэнергетических нейтронов от импульсного источника в гетерогенной среде. Общее уравнение теории, полученное в этих работах, использовано для исследования гетерогенных систем с произвольной структурой, что представляет не только научный, но и существенно прикладной интерес (в теории ядерных реакторов) (*А.В. Степанов*).

Кроме того, в серии работ предложены и обсуждены различные методы получения и хранения ультрахолодных нейтронов (*М.В. Казарновский* и др.).

Рассеяние нейтронов в кристаллах. В числе других результатов можно отметить метод расчета сечений неупругого рассеяния нейтронов в кристаллах и вероятности эффекта Мессбауэра непосредственно из данных о теплоемкости кристаллической решетки без промежуточного восстановления спектра частот колебаний решетки, что позволяет заметно снизить погрешности подобных расчетов и оценить их величину (*М.В. Казарновский*). Была развита общая теория резонансного рассеяния частиц на произвольных атомных системах, позволяющая выразить сечения рассеяния через функции пространственно-временных корреляций положений рассеивающих ядер (*М.В. Казарновский, А.В. Степанов*). В дальнейшем эта теория была обобщена на случай резонансного рассеяния пионов на ядрах в области Δ_{33} -резонанса, процессов рождения эта-мезонов в ядро-ядерных столкновениях при промежуточных энергиях, описание реакций с участием гало ядер (*В.П. Заварзина, А.В. Степанов*).

Теория излучения при движении заряженной частицы в средах. Проводились исследования по оптике сверхсветовых скоростей заряженных частиц. Начало этого нового, важного направления исследования было положено основателем лабо-



И.Я. Барит, А.А. Бергман, Р.М. Мусаелян
(сверху вниз)

А.В. Степанов

ратории *И.М. Франком* (совместно с *И.Е. Таммом*) работой «Когерентное излучение быстрого электрона в среде», в которой была вскрыта и количественно исследована природа излучения Вавилова-Черенкова, наблюдающегося при прохождении быстрых электронов через вещество. В 1958 г. *П.А. Черенкову, И.Е. Тамму и И.М. Франку* была присуждена Нобелевская премия «За открытие и истолкование эффекта Черенкова».

И.М. Франком (совместно с *В.Л. Гинзбургом*) было предсказано и теоретически исследовано излучение заряженной частицы при пролете через границу раздела двух сред, получившее название «переходного». В дальнейшем было рассмотрено переходное движение ультрарелятивистской частицы (*В.Е. Пафомов*). Оказалось, что с ростом энергии частицы спектр переходного излучения обогащается все более жесткими квантами и энергия переходного излучения линейно растет с увеличением энергии частицы.

Взаимодействие нейтронов с энергией ~14 МэВ с изотопами свинца. При измерениях с высокой точностью полных нейтронных сечений (*Б.А. Бенецкий, В.В. Нефедов, И.В. Штраних*) для изотопов свинца в области 13–17 МэВ был обнаружен резонанс на ^{208}Pb при энергии нейтронов 16,8 МэВ с шириной $\Gamma \sim 100$ кэВ. Полученные данные, во-первых, ставят вопрос о пересмотре представления об отсутствии резонансной структуры в этой области (за исключением широких резонансов формы). Во-вторых, дают указания на необычно большое отношение Γ_n/Γ для высоковозбужденных уровней.

Спин-флип при различных механизмах неупругого рассеяния протонов. В начале 70-х г.г. были выполнены измерения вероятности спин-флипа и дифференциальных сечений неупругого рассеяния протонов на легких ядрах ^{24}Mg и ^{28}Si в области энергий (2–4 МэВ), где резонансный механизм рассеяния является определяющим (*А.Б. Курепин, В.Н. Лихошерстов, Н.С. Топильская* и др.). Было показано, что одновременное измерение энергетической и угловой зависимости вероятности спин-флипа и дифференциального сечения рассеяния позволяет ответить на вопрос, является ли резонанс изолированным, и определить его квантовые числа, амплитуды парциальных ши-



рин, а также одночастичные компоненты волновой функции резонансного состояния и параметры фоновой амплитуды.

50 лет ЛАЯ (1996 г.)

Вопросы теории взаимодействия пионов, нуклонов, антинуклонов и ядер с ядрами. В пионерских работах, выполненных в первой половине 70-х годов, получены выражения для сдвига положения и ширины Δ_{33} -резонанса в полном сечении взаимодействия пионов с ядрами (*Г.М. Ваградов, М.В. Казарновский, А.В. Степанов*). Был подвергнут тщательному теоретическому анализу методами квантовой теории многих тел вопрос о воздействии ядерной среды на динамику дельта-изобары (*Г.М. Ваградов*). Метод эйконального разложения применен для вычисления по оптической модели полных сечений и сечений реакций для взаимодействия резонансных пионов и каонов с ядрами; показана хорошая сходимость метода (*В.П. Заварзина, В.А. Сергеев, А.В. Степанов*). В рамках того же подхода были проведены расчеты амплитуды рассеяния и поляризационных характеристик упругого нуклон-ядерного рассеяния при энергиях

100–1000 МэВ; указаны области энергий и ядер, где эти величины наиболее чувствительны к параметрам нуклон-нуклонного взаимодействия и проявляют аномалии в зависимости от угла рассеяния и энергии. Эти особенности были интерпретированы в терминах теории катастроф. Аналогичный анализ проведен для взаимодействия ядер и антиядер с ядрами (*В.П. Заварзина, А.В. Степанов*).

Для важного класса инклюзивных ядерных процессов сформулировано соотношение, которое позволяет определять вклады прямого и более сложных процессов в наблюдаемые величины. Вычислены характеристики испускания из ядра пиона и позитрона, образующихся при инклюзивном процессе распада связанного в ядре протона по каналу $p \rightarrow \pi^0 + e^+$, предсказываемого теорией «великого объединения» (*В.П. Заварзина, В.А. Сергеев, А.В. Степанов*).

Исследования взаимодействий нейтронов с ядрами в области энергий до 2 МэВ. В 1970–1978 гг. проведены детальные исследования неупругого рассеяния нейтронов с возбуждением нижних коллективных состояний ядер. Обнаружена промежуточная структура в массовой зависимости сечений и дана ее интерпретация как эффектов связи одночастичных и коллективных степеней свободы ядра.

Развитием этих работ явились комплексные исследования упругого и неупругого рассеяния нейтронов (1980–1989 гг.). Теоретическое описание полученных экспериментальных данных проведено в рамках обобщенной оптической модели. Выявлена существенная роль механизма прямой реакции при неупругом рассеянии нейтронов низкой энергии. Получена информация о вкладе в резонансы составного ядра конфигураций типа частица — фонон (*В.И. Попов, Р.М. Мусаелян, Е.С. Конобеевский, И.В. Суркова, Ю.Г. Куденко, В.М. Скоркин, В.П. Ефросинин*).

Взаимодействие мезонов с нуклонами. Кварковые модели адронов. Различными способами определено значение пион-нуклонного сигма-члена, представляющего собой количественную меру нарушения киральной $SU(2) \times SU(2)$ симметрии (*В.П. Ефросинин, Д.А. Заикин*)

Рождение пионов в нуклон-нуклонных взаимодействиях. Диаграммным методом проведено теоретическое описание околорогового рождения пионов в реакциях $pp \rightarrow d \pi^+$ и $pp \rightarrow pp \pi^0$ (полные сечения, угловые распределения, анализирующие способности) и предложен соответствующий эксперимент на мезонной фабрике (*В.П. Ефросинин, Д.А. Заикин, И.И. Осипчук*).

Диффузия тепловых нейтронов. В 1988 году Госкомитетом по изобретениям и открытиям зарегистрировано открытие «Закономерность изменения температуры тепловых нейтронов при диффузии» (*И.М. Франк, А.В. Антонов, А.И. Исаков, В.И. Попов, К.Д. Толстов*). Эта закономерность сформулирована на основе результатов исследований стационарной и нестационарной диффузии нейтронов, полученных ранее в лаборатории атомного ядра. Открытие стимулировало дальнейшее развитие теории переноса нейтронов, существенно расширило возможности метода нестационарной диффузии как средства изучения замедляющих сред.

Реакции на ядрах с $A \leq 4$ под действием заряженных частиц и свойства малонуклонных систем. В рамках R -матричной теории исследовано несохранение изоспина в реакциях с каналами $p+{}^3\text{H}$, $n+{}^3\text{H}$, $d+d$ из-за смешивания нескольких уровней составной системы с изоспинами 0 и 1. Наблюдаемая зарядовая асимметрия dd -реакций объяснена внутренним кулоновским смешиванием в предположении о существовании выше порога $d+d$ уровней ${}^4\text{He}$ с малыми нуклонными ширинами (*В.А. Сергеев*).

На электростатическом генераторе ЭГ-5 выполнены измерения сечений рассеяния дейтронов с энергией $0,8 \div 1,43$ МэВ на протонах (*И.Я. Барит, Ю.Г. Балашко, Л.С. Дулькова, В.П. Заварзина*). С помощью фазового анализа этих и других данных найдена энергетическая зависимость квартетных



Директор ИЯИ РАН академик *В.А. Матвеев* и заведующий лабораторией атомного ядра (1992–1995) *В.И. Попов*. 1994 г.

и дублетных s - и p -фаз pd -рассеяния при $E_d < 6$ МэВ — важных характеристик трехнуклонной системы (И.Я. Барит, Л.С. Дулькова, Е.В. Кузнецова, Н.М. Соболевский).

Для дальнейшего уточнения поведения p -фаз осуществлялись измерения поляризационных наблюдаемых в $d^4\text{He}$ -рассеянии с использованием разработанного в лаборатории компактного источника поляризованных ионов, который размещен в кондукторе электростатического генератора ЭГ-5.

На циклотроне У-240 ИЯИ АН УССР совместно с сотрудниками этого института были выполнены измерения дифференциальных сечений ряда реакций на ядрах ^6Li и ^7Li , вызываемых протонами и дейтронами, соответственно с энергиями $E_p = 29 \div 62$ МэВ, $E_d = 18 \div 36$ МэВ. Указано на возможное существование высоковозбужденных состояний ядер ^7Be и ^8Be (И.Я. Барит, С.В. Зуев и др.).

Механизмы взаимодействия адронов и ядер с ядрами при промежуточных энергиях. Проведено теоретическое исследование процесса кулоновского возбуждения ядер, пролетающих через кристаллическую мишень в режиме каналирования (В.П. Заварзина, А.В. Степанов). Такая постановка эксперимента позволяет полностью подавить вклад сильного взаимодействия и исключить многофотонные кулоновские возбуждения, существенно затрудняющие интерпретацию данных. Впервые предложен и теоретически обоснован метод исследования структуры легких нестабильных ядер типа ^{11}Li при помощи кулоновской диссоциации этих ядер, каналированных в кристаллических мишенях с большим атомным номером.

В интервале энергий 50-2000 МэВ для ядер от ^{20}Ne до ^{208}Pb в рамках микроскопической оптической модели со связанными каналами вычислены сечения аннигиляции антипротонов в ядрах как непосредственно из входного канала, так и после квазисвободного столкновения антипротона с нуклоном ядра-мишени (В.П. Заварзина, А.В. Степанов). Показано, что сечение процессов аннигиляции, следующих за квазисвободным столкновением, оказывается очень чувствительным к величине параметра наклона элементарной амплитуды NN -рассеяния. Эти акты аннигиляции происходят в глубине ядерного вещества. Вычисленные значения сечений таких процессов находят-

ся в хорошем согласии с найденными экспериментально (LEAR, PS-179). Тем самым верхняя граница величины вклада необычных механизмов аннигиляции антипротонов внутри ядра понижена в несколько раз.

Неупругое рассеяние нейтронов малых энергий на ядрах и оболочечная структура ядра. Проведен теоретический анализ всеобъемлющей совокупности экспериментальных данных по неупругому рассеянию нейтронов с энергиями от 100 кэВ до 2 МэВ на ядрах с $56 \leq A \leq 206$ с возбуждением первых уровней 2^+ , большая часть которых была получена в лаборатории в предыдущие годы. Подтверждена гипотеза о существовании новых магических (или «полумагических») чисел $N, Z = 38; 64$. Показано, что их наличие определяется квадрупольным (np)-взаимодействием, приводящим к появлению дополнительной энергетической щели в системе одночастичных уровней четно-четных ядер (Д.А. Заикин, И.В. Суркова).

Поиск сверхузких дибарионных резонансов на Московской мезонной фабрике ИЯИ РАН. В 2000–2002 гг. завершен этап исследования процесса $pd \rightarrow pX$ на линейном ускорителе ИЯИ. Анализ результатов этого процесса указал

на возможное существование узких резонансов в области масс 1900–1910 МэВ/ c^2 . В спектрах недостающей массы наблюдались пики при 1904 ± 2 , 1926 ± 2 , и 1942 ± 2 МэВ. Анализ угловой зависимости вылета протонов от распадов показал, что наблюдаемые пики с большой вероятностью соответствуют распадам сверхузких дибарионных резонансов (СУД). Распад СУД на два нуклона запрещен принципом Паули, что определяет малую ширину резонансов. В спектре недостающих масс реакции $pd \rightarrow ppX$ обнаружены три состояния, значения которых соответствуют распаду вышеупомянутых СУД по $NN\gamma$ -каналу. Совокупность этих признаков позволяет предположить, что эти состояния являются изовекторными СУД, существование которых ранее предсказывалось. К сожалению, в 2003 г. экспериментальная зона в конце ускорителя ИЯИ была разуконплектована и дальнейшие исследования pd -взаимодействия были приостановлены (Е.С. Конобеевский, М.В. Мордовской, В.М. Скоркин, С.И. Поташев, Ю.М. Бурмистров).



▲
Б.А. Бенецкий

Измерение ядерных констант на спектрометре нейтронов по времени замедления в свинце. Проведено прецизионное измерение отношения сечения радиационного захвата нейтронов к сечению деления для ядра ^{239}Pu в области энергии до 35 кэВ. Данные использованы для проектирования реакторов на быстрых нейтронах (А.А. Бергман, А.Н. Медведев, А.Е. Самсонов, В.Б. Челноков и сотр. ФЭИ).

Для нужд реакторостроения в 1977–1989 гг. проводились измерения сечений деления и сечений радиационного захвата нейтронов с энергиями до 35 кэВ для ряда ядер актинидов. В том числе получены с высокой точностью сечения деления для ^{235}U и сечения радиационного захвата для ^{238}U , подтвержденные впоследствии в других лабораториях; сечения радиационного захвата для высокоактивного ^{237}Np , необходимые также для контроля над распространением ядерного оружия (А.А. Бергман, А.Н. Медведев, А.Е. Самсонов и сотрудники ФЭИ).

Разработка методов экологического контроля и создание средств индивидуальной защиты. Была сформулирована концепция парциальной индивидуальной защиты от сочетанного облучения и требования к материалам и средствам индивидуальной защиты (СИЗ), которые впервые в мире были реализованы в специальной защитной одежде для пожарных, охраняющих АЭС, типа СЗО–1. Она была разработана совместно с ЦКБ Правительственного медицинского центра РФ, НИИ текстильных материалов, ВНИИ пожарной обороны и другими соисполнителями. 25 декабря 2006 года в соответствии с Решением Правительства РФ № 789 от 22 декабря был издан приказ №779 МЧС о внедрении в эксплуатацию комплекта одежды для пожарных типа «РЗК» (ТУ 8570-047-38996367-2004). Работа была отмечена премией МЧС за разработку и освоение производства аварийных изолирующих костюмов для тушения пожаров и ликвидации аварий при воздействии ионизирующих излучений и агрессивных сред (Б.А. Бенецкий и др.)

Метод ядерного и ионного микроанализа. Методами ядерного и ионного микроанализа (Ion Beam Analysis) изучена термическая и радиационно-ускоренная диффузия (D_{red}) углерода в оливинах (Л.Е. Кузьмин). Полученное значение $D_{\text{red}} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ превышает коэффициент термодиффузии при 300 К на ~ 7 порядков величины. На основании этих результатов выдвинута гипотеза о радиационной природе миграции углерода в кристаллах оливинов метеоритов при низких температурах

Основные направления научной деятельности

В настоящее время основными направлениями научной деятельности ЛАЯ являются:

- ◆ исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и легкими ядрами;
- ◆ исследование структуры и механизмов взаимодействия слабосвязанных ядер с ядрами при средних энергиях;
- ◆ исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с возбуждением коллективных степеней свободы.

Прикладные исследования

- ◆ разработка методов экологического контроля, изучение радиационных поражений и создание средств индивидуальной защиты;
- ◆ разработка ядерно-физических методов неразрушающего контроля с использованием источников быстрых и тепловых нейтронов;
- ◆ разработка аппаратуры для регистрации заряженных частиц и нейтронов.

1. Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и легкими ядрами

Е.С. Конобеевский, М.В. Мордовской, С.В. Зувев, А.А. Каспаров, Ю.М. Бурмистров, С.И. Поташев, В.В. Мицук, А.А. Афонин

Экспериментальное и теоретическое исследование реакций с тремя и более частицами в конечном состоянии позволяет исследовать как низкоэнергетические параметры NN -взаимодействия, так и влияние $3N$ -сил на извлекаемые параметры. Такими реакциями являются реакции вызываемые нейтронами $n+^2\text{H}\rightarrow p+n+n$, $n+^3\text{H}\rightarrow ^2\text{H}+n+n$, а также реакции, вызываемые дейтронами — $d+^2\text{H}\rightarrow p+p+n+n$, $d+^1\text{H}\rightarrow p+p+n$.

1.1. Исследование взаимодействия нейтронов с малонуклонными системами на установке ДС-1

Для исследования реакций, вызываемых нейтронами, в частности реакции $n+^2\text{H}\rightarrow p+n+n$, на нейтронном канале РАДЭКС создана экспериментальная установка двухплечевой спектрометр ДС-1. Установка позволяет проводить исследование реакций, вызванных быстрыми нейтронами в широкой области энергий 10–100 МэВ. Расположение установки ДС-1 на канал РАДЭКС показано на рисунке.

В качестве источника нейтронов для установки ДС-1 используется ловушка пучка протонов с энергией 200–300 МэВ. Образованные в вольфрамовой мишени нейтроны имеют сплошной спектр энергий вплоть до энергии равной энергии протонного пучка. Однако измерение энергий вторичных частиц реакции позволяет, для каждого события определять первичную энергию нейтрона. Таким образом, данные о выходе реакции могут быть получены в широком диапазоне энергий нейтронов, а разброс

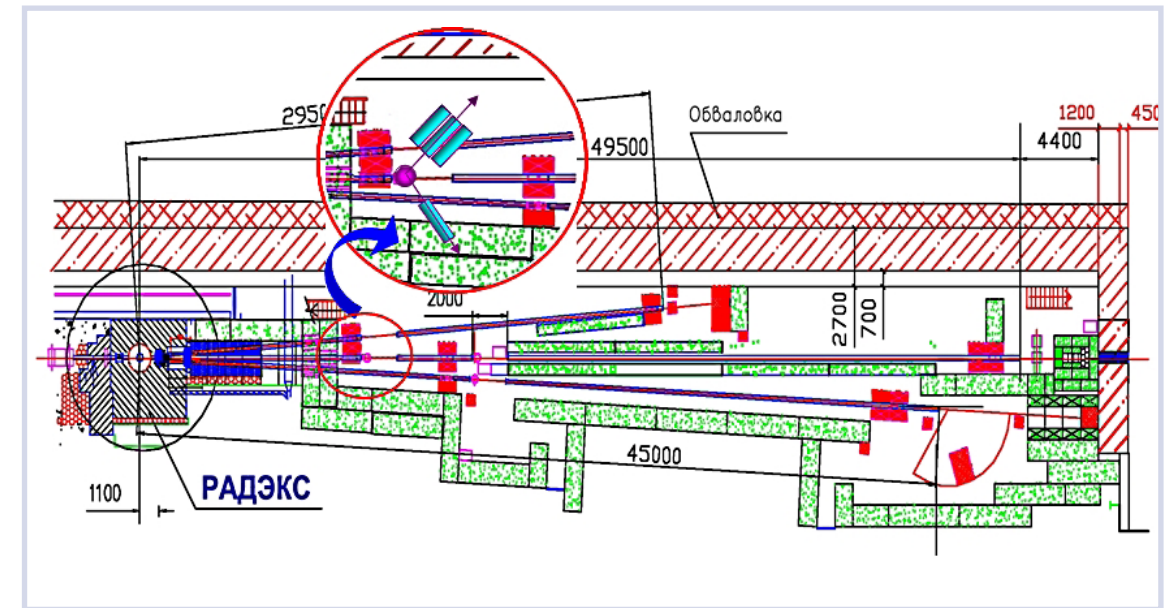


Схема расположения установки ДС-1 на нейтронном канале РАДЭКС

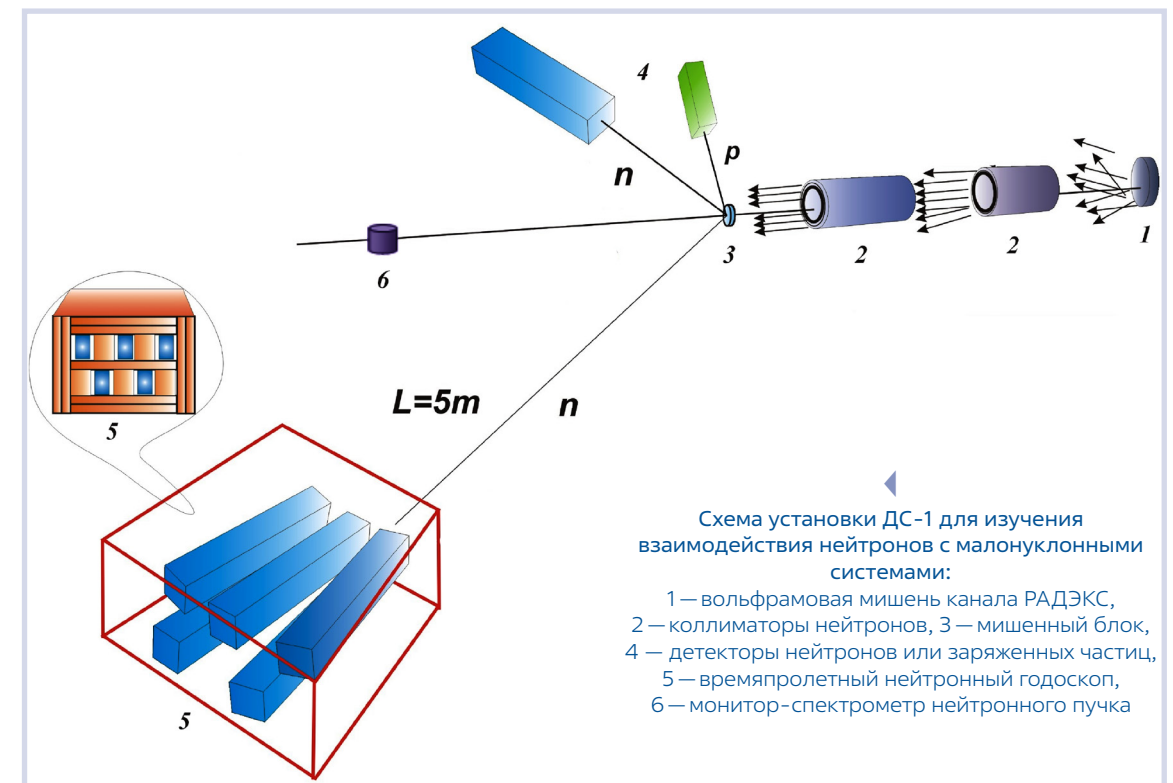
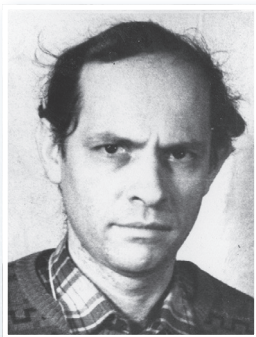


Схема установки ДС-1 для изучения взаимодействия нейтронов с малонуклонными системами:

- 1 — вольфрамовая мишень канала РАДЭКС,
- 2 — коллиматоры нейтронов, 3 — мишенный блок,
- 4 — детекторы нейтронов или заряженных частиц,
- 5 — времяпролетный нейтронный годоскоп,
- 6 — монитор-спектрометр нейтронного пучка



энергий будет определяться только шириной энергетического интервала суммирования событий. Возможность проведения измерений в широкой области энергии нейтронов, является большим преимуществом нейтронного канала РАДЭКС.

В последние годы на этой установке были получены новые данные о нейтрон-нейтронной длине рассеяния в реакции $nd \rightarrow pnn$ при энергии первичных нейтронов 40 МэВ и 60 МэВ. Значение длины рассеяния было получено из сравнения экспериментальной зависимости выхода реакции nd -развала от относительной энергии nn -пары с результатами моделирования.

1.2. Исследование малонуклонных реакций, вызываемых заряженными частицами на установке ДС-2

Для исследования реакций, вызываемых заряженными частицами ускорителя У-120 НИИЯФ МГУ была создана установка ДС-2 (двухплечевой спектрометр). Вторичные заряженные частицы детектируются телескопом кремниевых детекторов, при этом DE-E- информация используется для идентификации типа заряженной частицы (p, d, t, \dots). Нейтроны детектируются во втором плече установки жидководородным детектором. Энергия нейтронов определяется по времени пролета, при этом возможно выделение событий вызванных нейтронами от событий вызванных гамма-квантами. На установке ДС-2 получены данные о nn -длине рассеяния, извлеченные в реакции $d+{}^2\text{H} \rightarrow n+n+p+p$ при энергии дейтронов 15 МэВ.

Анализ данных о нейтрон-нейтронной длине рассеяния, полученных в реакции $nd \rightarrow pnn$ на установке ДС-1 и в реакции $dd \rightarrow ppnn$ на установке ДС-2 в совокупности с экспериментальными значениями длины рассеяния a_{nn} из других работ, показал, что все данные о nn -длине рассеяния хорошо аппроксимируются функцией $a_{nn} = b \cdot \exp(-V/c) + a$, при этом первый член отвечает за вклад $3N$ -сил, зависящий от скорости разлета nn -пары и третьей частицы (V) в разных экспери-

ментах, а постоянный член определяет асимптотическое значение a_{nn} и должен быть свободным от вклада $3N$ -сил. В результате χ^2 -анализа экспериментальных данных определено значение параметра

С.И. Поташев, М.В. Мордовской (сверху вниз)

На странице справа: В.П. Заварзина, И.В. Суркова, М.Н. Лифанов, (сверху вниз)

$a \equiv a_{nn}(V/c \rightarrow 1) = -15,9 \pm 0,15$ Фм. Полученное нами значение $a_{nn} = -16,3 \pm 0,5$ Фм при энергии нейтронов 60 МэВ близко к значению параметра a , что свидетельствует о приближении к значению длины рассеяния, не зависящему от влияния $3N$ -сил. Ясно, что чем больше скорость разлета фрагментов, тем быстрее фрагменты покидают область действия $3N$ -сил, и тем меньше должно быть их влияние на параметры nn -взаимодействия, извлекаемые из эксперимента.

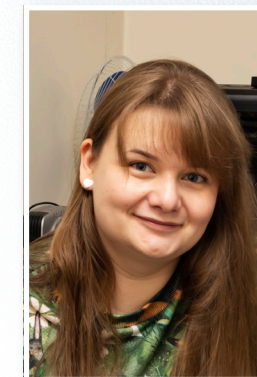
Можно предположить, что и значения протон-протонной длины рассеяния a_{pp} и энергии виртуального 1S_0 уровня E_{pp} , извлеченные из экспериментов с тремя или четырьмя частицами в конечном состоянии будут отличаться от значений, полученных в свободном pp -рассеянии. Для проверки этого предположения в ЛАЯ проводится исследование реакции $d+{}^1\text{H} \rightarrow p+p+n$ на установке ДС-2, получены предварительные экспериментальные данные при энергии первичных дейтронов 15 МэВ.

2. Исследование структуры и механизмов взаимодействия слабосвязанных ядер с ядрами при средних энергиях

Е.С. Конобеевский, В.П. Заварзина, С.В. Зувев, М.В. Мордовской, А.А. Каспаров, Ю.М. Бурмистров, А.С. Курлович, В.В. Мицук, А.А. Афонин

Работы в рамках темы посвящены решению фундаментальной проблемы ядерной физики — исследованию кластерной структуры ядер. В рамках темы предложено исследование реакции подхвата кора из двухнейтронных гало-ядер ${}^6\text{He}$ и ${}^{11}\text{Li}$. В эксперименте NN -корреляции в гало-ядре будут оценены по энергии квазисвязанного состояния NN -пары. В результате кинематического моделирования реакции ${}^6\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li} + (nn) \rightarrow {}^6\text{Li} + n + n$ показано, что энергия nn -квазисвязанного состояния может быть определена по форме энергетического спектра нейтронов, вылетающих при развале этого состояния, определены параметры планируемого эксперимента.

Большой интерес представляют также, так называемые Бороминовские (Borromean) ядра, состоящие из трех кластеров, при этом удаление любого из кластеров приводит к неустойчивой (распадающейся) структуре. Характерными бороминовским ядром является ядро ${}^9\text{Be}$, развал которого может происходить



на кластеры $\alpha + \alpha + n$ или через нестабильные промежуточные ядра: ${}^8\text{Be}$ или ${}^5\text{He}$. Для определения кластерной структуры возбужденных состояний ядра ${}^9\text{Be}$ предложен эксперимент с регистрацией неупруго-рассеянных частиц (α или d) в совпадении с частицей, испускаемой при распаде этих состояний.

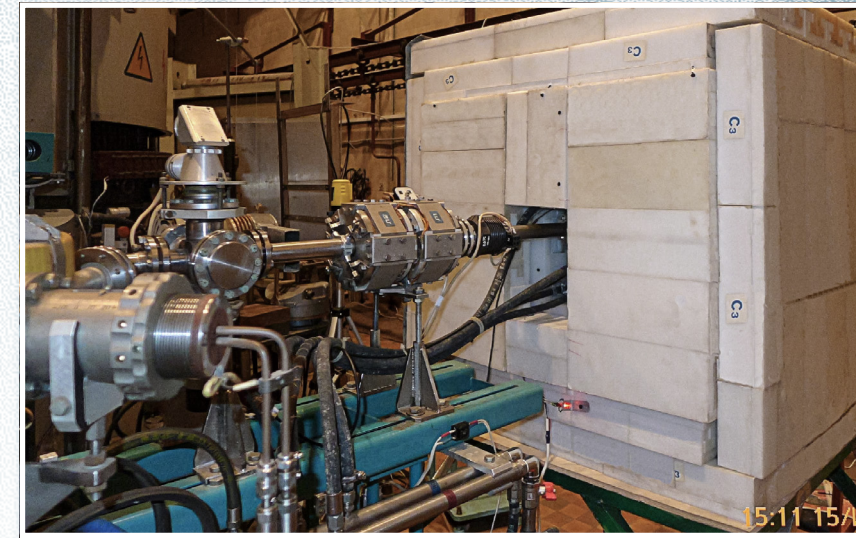
Проведенное в рамках темы кинематическое моделирование реакции неупругого рассеяния дейтронов и альфа-частиц на ядрах ${}^9\text{Be}$ показало, что регистрация рассеянной частицы (дейтрона или альфа-частицы) в совпадении с частицей от развала определенного возбужденного состояния ${}^9\text{Be}$ с определением энергетического спектра «развальной» частицы позволит определить вклад различных кластерных конфигураций в структуру этих состояний.

Экспериментальное исследование кластерной структуры ${}^9\text{Be}$ проводится на установке ДС-2 при энергии налетающих дейтронов 15 МэВ и альфа-частиц 30 МэВ. Модернизированный вариант экспериментальной установки позволяет детектировать рассеянные частицы (d или α -частицы) в совпадении с распадной частицей (нейтроном). Для разделения нейтронных и гамма-сигналов в жидководородном сцинтиляторе используется метод $n-\gamma$ разделения по форме импульса. Показано, что в эксперименте с регистрацией в совпадении альфа-частиц и нейтронов нерезонансный фон значительно подавлен, и можно выделить события, соответствующие определенным возбужденным состояниям ядра ${}^9\text{Be}$, и получить энергетические спектры нейтронов от развала различных возбужденных состояний. Как показали результаты моделирования, в этом случае возможно определение кластерной структуры этих состояний.

3. Исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с возбуждением коллективных степеней свободы

И.В. Суркова, М.В. Мордовской, В.П. Заварзина, С.И. Поташев, С.Л. Сабинин, В.М. Скоркин

Цель работы — исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с возбуждением коллективных степеней свободы. Продолжены работы по анализу имеющихся экспериментальных данных по нейтрон-ядерному взаимодействию для изотопов в широкой области массовых чисел в рамках оптиче-



ской модели со связью каналов. В рамках модели исследовались промежуточные структуры в рассеянии быстрых нейтронов на изотопах Se. В двухфонном варианте модели исследовалась спиновая зависимость p -волнового рассеяния нейтронов на сферических ядрах. Для подготовки экспериментов проведены исследования возможности вывода нейтронов из фотонейтронного источника IN-LUE, формирования пучка нейтронов различных энергий, разработаны методики и созданы установки для нейтронных измерений. Проведены измерения спектров нейтронов, производимых в Be-мишени фотонейтронного источника ускорителя ЛУЭ-8. Проведены измерения геометрии пучка медленных и тепловых нейтронов с использованием различных нейтронных детекторов: активационных, времяпролетных и позиционно-чувствительных.

4. Разработка ядерно-физических методов неразрушающего контроля с использованием источников быстрых и тепловых нейтронов

А.В. Андреев, С.В. Зуев, Ю.М. Бурмистров, М.В. Мордовской, А.А. Афонин, С.И. Поташев, С.Л. Сабинин, В.М. Скоркин

В рамках работы по разработке методов и аппаратуры низкофонных измерений гамма-излучений в ИЯИ РАН в 2015 году создан компактный фотонейтронный источник IN-LUE

на основе промышленного электронного ускорителя ЛУЭ-8-5 с энергией электронов 5–10 МэВ, вольфрамовой тормозной мишени-конвертера, фотонейтронной бериллиевой мишени и замедлителя быстрых нейтронов. Плотность потока тепловых нейтронов в области облучения образцов во внутренней полости источника — 10^7 – 10^8 см⁻²·с⁻¹.

Источник совместно с гамма-спектрометром на базе детектора из особоочищенного германия, смонтированного в низкофоновой камере, образуют активационно-измерительный комплекс, позволяющий решать задачи высокочувствительного неразрушающего определения методом нейтронно-активационного анализа содержания микро- и нанопримесей различных элементов в материальных объектах. На источнике ведутся работы по определению элементного состава атмосферных

Коллектив лаборатории атомного ядра.
Сентябрь 2020 г.



аэрозолей, биологических объектов, содержания золота, рения и других редких элементов в горных породах.

Активационно-измерительный комплекс используется также при изучении фотоядерных реакций с возбуждением изомерных состояний и реакций фотоделения. Получены новые экспериментальные результаты по фотовозбуждению спиновых изомеров Cd и In реальными и виртуальными фотонами (электронами) в области пороговой энергии и результаты измерения выхода реакции фотоделения для ядер-актинидов в оклопороговой области энергии.

5. Разработка методов экологического контроля, изучение радиационных поражений и создание средств индивидуальной защиты

М.Н. Лифанов, Ю.М. Бурмистров, В.М. Скоркин, С.И. Поташев

Продолжаются работы, которые проводились в ЛАЯ с 1985 г. под руководством Б.А.Бенецкого по изучению радиационных поражений и созданию средств индивидуальной защиты от ионизирующих излучений (совместно с ЦВМУ Минобороны, ЦКБ Медцентра при УД Пезидента, НИИ текстильных материалов РИА, ФИАН, ВНИИ пожарной обороны МВД). Были определены параметры композиционных материалов и принципы конструирования защитных средств. Создана и внедрена в эксплуатацию не имеющая мировых аналогов защитная одежда для пожарных на АЭС и работников аварийно-спасательных служб. В 2006 г. работа была отмечена премией МЧС.

В рамках темы ведутся работы по совершенствованию средств и методов аварийной радиационной защиты и поиски способов повышения радиационной безопасности при пожарах и авариях на радиационно-опасных объектах. В процессе исследований создан испытательный стенд для проверки радиационно-защитных свойств материалов при облучении гамма-излучением от радионуклидного источника, испытана гамма-спектрометрическая аппаратура. Проводятся измерения радиационно-защитных свойств образцов защитного композиционного материала с использованием гамма источника ⁵⁷Со.

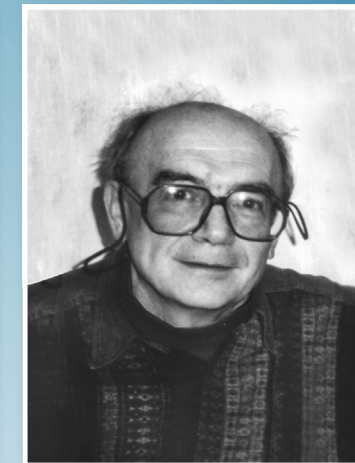
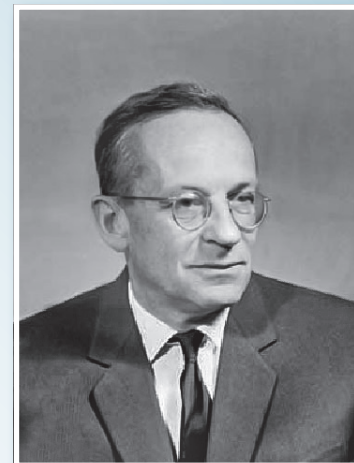
Лаборатория фотоядерных реакций была одной из трех лабораторий ФИАН, на базе которых в 1970 году образовался Институт ядерных исследований. У истоков ЛФЯР стоял академик **Владимир Иосифович Векслер** (1907–1966). Открытый им в 1944 году принцип автофазировки стал основой создания первого в Советском Союзе (и третьего в мире) электронного синхротрона С-3 на энергию 30 МэВ, на базе которого сформировалась эталонная, а затем фотоядерная лаборатория. Работу возглавил **В.И. Векслер**, к ней подключился **Б.С. Ратнер**. В конце 1948 – начале 1949 г. с участием **Б.С. Ратнера** была выполнена первая физическая работа на ускорителе С-3 — исследование формы тормозного спектра от мишени синхротрона.

Через два года, в 1949 году, в эталонной лаборатории вошел в строй еще один ускоритель электронов (С-25) на энергию 250 миллионов электрон-вольт.

Первым руководителем лаборатории фотоядерных реакций в 1959 году стала **Любовь Ефремовна Лазарева**. Ее имя неразрывно связано с развитием мировой фотоядерной науки. Она — автор основополагающих работ по фотоядерным реакциям, ставших классическими. Л.Е. Лазаревой был предложен прямой метод измерения полных сечений фотопоглощения, который оказался чрезвычайно плодотворным и до сих пор широко используется в ведущих лабораториях мира.

После перехода ЛФЯР в Институт ядерных исследований в 1970 году, под руководством **Л.Е. Лазаревой** была проведена коренная модернизация ускорительной базы лаборатории. По ее инициативе и при непосредственном руководстве был сооружен линейный ускоритель электронов, что позволило существенно расширить диапазон физических исследований. В сооружении, запуске, наладке, обеспечении эксплуатации ускорителя и его дальнейшей модернизации активную роль сыграли **М.В. Карпов, В.В. Петренко, В.Н. Пономарев, М.А. Жаренов** и др.

Значительный вклад в создание на пучках ускорителя экспериментальных установок внесли **Л.З. Джилавян, Р.Л. Кондратьев** и др. Впервые в стране были получены пучки квазимонохроматических фотонов от аннигиляции позитронов на лету, проведены измерения сечений рассеяния электронов



В.И. Векслер

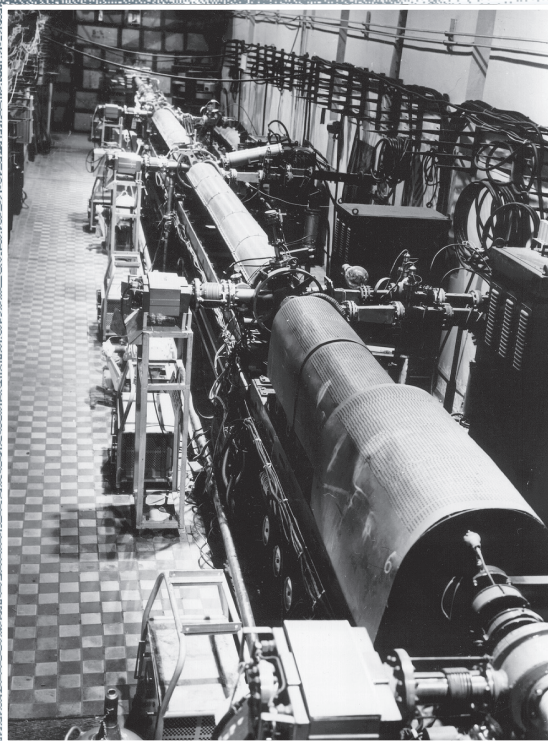
Л.Е. Лазарева — организатор и бессменный (до 1986 года) руководитель лаборатории фотоядерных реакций ФИАН им. П.Н. Лебедева (затем ИЯИ АН СССР, ИЯИ РАН), ведущей в СССР и России в этой области исследований
Р.А. Эрамбян — руководитель лаборатории (1986–1998)

на ядрах (порядка 10^{-32} см^2) с рекордным разрешением (0,1%) на созданном в лаборатории магнитном спектрометре. Проводились исследования высокоспиновых состояний ядер (с обнаружением вклада изовекторного $E2$ гигантского резонанса) в (γ, γ') и (γ, n) реакциях, изучение фото- и электроделения ядер, включая изомерию формы ядер-актинидов под действием электронов и фотонов.

Выполнен ряд исследований, в том числе и прикладных, совместно с научными центрами страны (ИЯФ СО АН, МИФИ, ХФТИ, Саратовский государственный университет и др.).

Среди физических результатов, вошедших в учебники и монографии, следует отметить измерение полного сечения фотопоглощения для ядра ^{16}O и ряда других легких ядер (**Б.С. Долбилкин, Ф.А. Николаев, В.И. Корин** и др.). Впервые были изучены полные сечения фотопоглощения для деформированных ядер и показано, что ширина гигантского резонанса в этих ядрах увеличивается за счет сдвига максимумов кривых Лоренца в зависимости от деформации.

В 80-х годах при поддержке Научного совета РАН по электромагнитным взаимодействиям (председатель академик **А.М. Балдин**) и Отделения ядерной физики АН (академик-секретарь **М.А. Марков**) был выполнен большой цикл работ (**Л.Е. Лазарева, В.Г. Недорезов** и др.) в содружестве с Институтом ядерной физики СО АН СССР (**Г.Я. Кезерашвили,**



▲
Линейный ускоритель электронов ЛУЭ -100 МэВ

Ю.М. Шатунов и др.). Впервые в мире на пучке гамма-квантов, полученных методом обратного комптоновского рассеяния лазерных фотонов на электронах накопителя, выполнены совпадательные эксперименты по делению ядер-актинидов фотонами. Среди важных результатов — обнаружение нелинейного квантово-электродинамического эффекта — несоблюдения принципа зарядовой инвариантности в полных сечениях фотопоглощения ядер-актинидов (отклонение на 20% от универсальной кривой) в области нуклонных резонансов. Этот эффект позднее был подтвержден в лаборатории Джефферсона (США). Позднее разработанный метод обратного комптоновского рассеяния успешно применялся и применяется до сих пор в различных мировых научных центрах. Сотрудники ЛФЯР на этой основе участвовали в коллаборации GRAAL на накопителе

электронов ESRF (Гренобль, Франция). По этой тематике, начиная с 1971 года, опубликовано около ста печатных статей, 2 монографии, защищено 6 кандидатских и одна докторская диссертации.

В 1986 году лабораторию возглавил талантливый физик-теоретик профессор **Рудольф Амаякович Эрамжян**. Его научные интересы концентрировались вокруг предсказанного и экспериментально обнаруженного в НИИЯФ МГУ масштабного явления — конфигурационного расщепления гигантского дипольного резонанса. **Р.А. Эрамжян** одним из первых осознал универсальный характер этого явления.

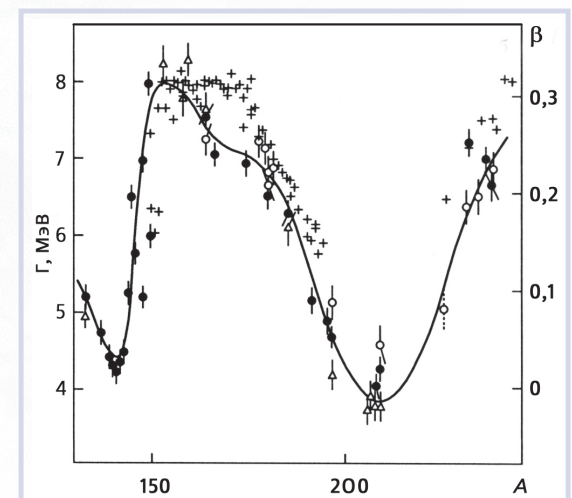
Как руководитель лаборатории **Р.А. Эрамжян** затратил много сил на поддержание и развитие традиций лаборатории, заложенных Л.Е. Лазаревой.

В лаборатории под руководством **Г.М. Гуревича** были разработаны и созданы установки для спиновой ориентации атомных ядер (НОРД и НОРД-2) с рекордными на мировом уровне

рабочими характеристиками (базовая температура ниже 10 мК, магнитное поле 8 Т). Получены значения параметров углового распределения альфа-частиц, характеризующие амплитуды и фазы альфа-частичных волн с разными орбитальными моментами ($L=0, 2, 4$). Определена величина сверхтонкого магнитного поля на ядрах Es в матрице железа. Впервые в мире измерено значение ядерного магнитного момента ^{254}Es .

Практически с момента создания лаборатории в ней велись исследования различных аспектов теории фотоядерных реакций. В шестидесятые годы в сотрудничестве с фотомезонной лабораторией ФИАН (А.М. Балдин, С.Ф. Семенко) **Б.А. Тулуповым** изучались предсказанные А.М. Балдиным эффекты оптической анизотропии атомных ядер. Они способствовали пониманию механизма образования гигантского дипольного резонанса в деформированных и переходных ядрах и связанных с ним процессов: фотопоглощение, рассеяние фотонов на поляризованных и ориентированных ядрах и т.п. Позднее в сотрудничестве с МИФИ (М.Г. Урин и др.) **Б.А. Тулуповым** был создан метод для исследования одноквазичастичных силовых функций в ядрах, имеющих сильные коллективные колебательные состояния — обобщенный метод связанных каналов (ОМСК).

В работе ЛФЯР важное внимание всегда уделялось прикладным исследованиям. Среди них — разработка для использования в медицинской практике детекторов рентгеновского излучения (**В.Г. Недорезов, Н.В. Руднев, А.А. Туринге** и др.), позволяющих на порядок снизить радиационную нагрузку на пациента при рентгенографических исследованиях. Накоплен значительный опыт применения такой аппаратуры. Разработка защищена патентом РФ. Проводятся исследования в интересах и совместно с предприятиями Росатома, направленные на применение радиационных методик для повышения эффективности извлечения урана из трудно



▲
Эволюция ширин ГР для деформированных ядер в зависимости от атомного веса и параметры деформации
(по работам Л.Е. Лазаревой, Г.М. Гуревича, Г.В. Солодухова и др.)

вскрываемых руд (*Г.В. Солодухов, В.И. Пономарев* и др.). Сотрудники лаборатории активно участвуют в разработке методики и аппаратуры для обнаружения несанкционированного перемещения взрывчатых и делящихся веществ. За разработку медицинского денситометра «Денис» ИЯИ РАН отмечен золотой медалью и дипломом 5-го Московского международного салона инноваций и инвестиций «Инновации-2011», золотой медалью Международной выставки в Германии (Нюрнберг-2001), дипломом Экспоцентра на Международной выставке «Эффективность-2004».

Современный статус. Основные текущие направления фундаментальных исследований ЛФЯР (на 2020 г.)

Программа работ ЛФЯР на ближайшие годы сконцентрирована по нескольким основным направлениям.

Ядерная фотоника

На одном из первых мест стоит новое научное направление, получившее название «Ядерная фотоника». Совместные эксперименты (*В.Г. Недорезов, А.М. Лапик, А.В. Русаков, А.А. Туринге* и др.) ведутся на фемтосекундной лазерной установке в МЛЦ МГУ им. М.В. Ломоносова (*А.Б. Савельев-Трофимов, И.Н. Цымбалов* и др.). Ключевыми словами, определяющими суть этого направления, являются гамма-источники нового поколения, полученные на основе метода обратного комптоновского рассеяния, которые благодаря своим уникальным параметрам позволяют решать ряд важных фундаментальных и прикладных задач. При этом лазерно-плазменные источники не конкурируют с традиционными (ускорительными), а дополняют их. Традиционные установки используют пучки с большим коэффициентом заполнения, близким к 100%, что позволяет эффективно исследовать механизмы реакций методом совпадений, в то время как лазерные источники обладают очень высокой импульсной мощностью, что дает возможность изучать различные нелинейные квантово-электродинамические эффекты, например в комптоновском рассеянии.

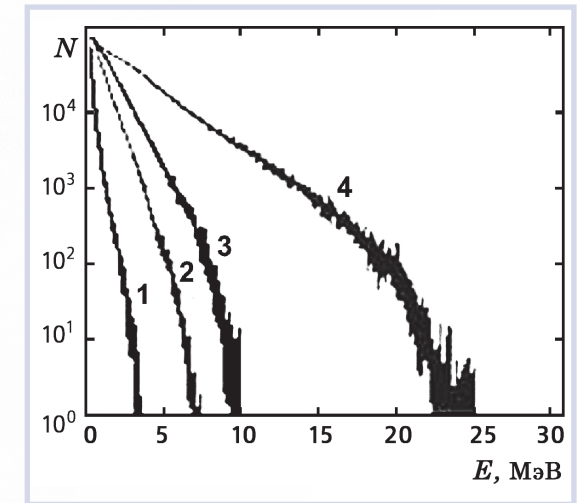
Параметры установки в МЛЦ МГУ: длина волны 800 нм, длительность импульса 50 fs, частота повторения импульсов

10 с^{-1} , энергия в импульсе 50 mJ, диаметр фокуса 4 мм. Интенсивность лазерного излучения на мишени 10^{19} W/cm^2 , квазitemпература пучка электронов $\sim 1\text{ МэВ}$. Показано, что основным процессом генерации таких пучков является захват и ускорение электронов лазерным полем. Измерение параметров пучков в каждом лазерном выстреле проводилось с помощью магнитного спектрометра и сцинтилляционного детектора LANEX, а также детектора Medipix. В результате получены пучки релятивистских электронов с малой угловой расходимостью.

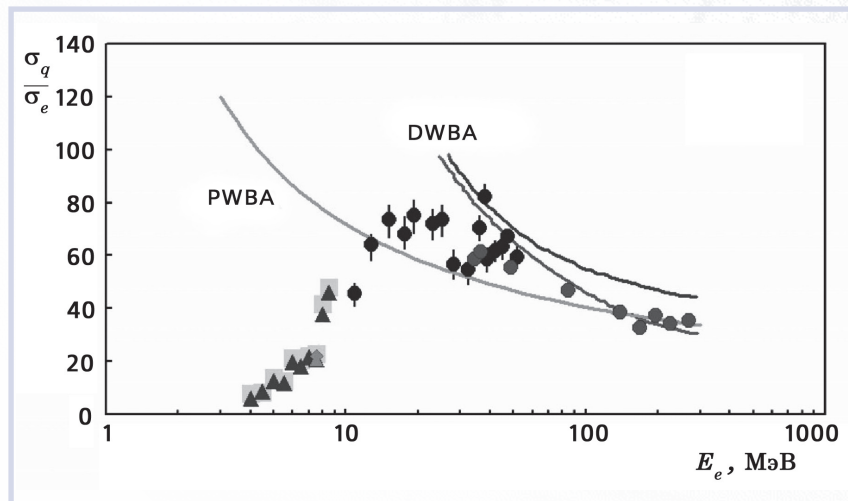
Полученные пучки релятивистских электронов были использованы для изучения фоторасщепления бериллия и дейтерия с регистрацией образующихся нейтронов в околопороговой области энергий.

Пигми-резонанс

В последние годы в мире заметно возрос интерес к изучению фотоядерных реакций вблизи порога. Актуальность таких исследований связана с возможностью получения новых фундаментальных знаний о природе ядерной материи, а также возможностью решения различных прикладных задач. Среди фундаментальных направлений можно отметить исследование коллективных возбуждений ядер (пигми-резонансов) в ядрах, у которых согласно теоретической интерпретации, проявляются новые моды колебаний типа тороидальных, компрессионных, «ножничных» и др. Новизну в исследование пигми-резонанса на современном этапе внесли инклюзивные эксперименты по рассеянию электронов на линейном ускорителе электронов ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН (*В.Г. Недорезов, А.М. Лапик, А.В. Русаков, А.А. Туринге* и др.). При энергии электронов ниже 10 МэВ возбуждение ядер происходит под действием виртуальных фотонов, спектр которых отличается более высокой мультипольностью взаимодействия по сравнению с реальными фотонами.



▲
Спектры электронов, полученные на лазерно-плазменном источнике МЛЦ МГУ. Кривые 1–3 соответствуют мощности лазера 10^{18} Wt/cm^2 , $5 \times 10^{18}\text{ Wt/cm}^2$, и 10^{19} Wt/cm^2 , соответственно). Кривая 4 — результат моделирования по программе 2D3V PIC при мощности лазера $5 \times 10^{19}\text{ W/cm}^2$



▲
 Отношение сечений фотовозбуждения ядер ^{111m}Cd (ромбы), ^{113m}In (треугольники), ^{115m}In (квадраты) реальными и виртуальными фотонами с энергией до 10 МэВ. Точки при болеевысоких энергиях — литературные данные. Кривые — результат расчета в рамках борновского приближения плоских (PWBA) и искаженных (DWBA) волн

Измерения на линейном ускорителе ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН впервые позволили установить, что результаты эксперимента принципиально отличаются от модельных предсказаний, выполненных как в плосковолновом (PWBA), так и в приближении искаженных волн. Это впервые указывает на изменение мультипольности фотопоглощения в области пигми-резонанса. Возможно, это связано с коллективными возбуждениями ядер экзотической природы (тороидальные, ножничные, компрессионные моды колебаний), предсказываемыми в рамках существующих моделей.

Международное сотрудничество

В настоящее время ЛФЯР участвует в ряде международных коллабораций, включая A2 на микротроне в Майнце, BGO-OD на ускорителе ELSA в Бонне, NUSTAR в GSI в Дармштадте (Германия).

Для проведения поляризационных экспериментов в Майнце и Бонне сотрудниками ЛФЯР (Г.М. Гуревич и др.) 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 поляризуемостей протона.



▲
 Подпись

На BGO-OD с участием ЛФЯР (В.П. Лисин, А.Л. Полонский и др.) 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. Особенностью установки BGO-OD является наличие широкоапертурного BGO-OD калориметра и открытого дипольного магнита OD, что позволяет эффективно исследовать фоторождение адронов с ненулевой странностью. ЛФЯР участвует в экспериментальной работе, отвечая за создание порогового черенковского детектора, который повысит эффективность разделения каонов от других частиц. Первые результаты указывают на высокие технические характеристики установки и высокое разрешение спектров масс нуклонов отдачи при фоторождении странных мезонов.

В течение многих лет ЛФЯР поддерживает плодотворные контакты с ведущими зарубежными научными центрами, регулярно проводит международный семинар по электромагнитным



▲
Коллективная фотография. Международный семинар «Электромагнитные взаимодействия ядер» (EMIN). 2018 г.

взаимодействиям ядер (EMIN), последний из которых, 15-й по счету, состоялся в 2018 году.

По результатам работ ЛФЯР опубликованы сотни научных статей, монографии, обзоры в ведущих российских и зарубежных изданиях.

В настоящее время в штате лаборатории работает 21 человек, в том числе 15 научных сотрудников, среди них 3 доктора и 8 кандидатов физико-математических наук. За последние 5 лет в лаборатории успешно прошли обучение 8 студентов и 4 аспиранта.

Подробная информация о результатах работы ЛФЯР, включая публикации за последние годы, находится на сайте лаборатории (см.сайт www.inr.ru).