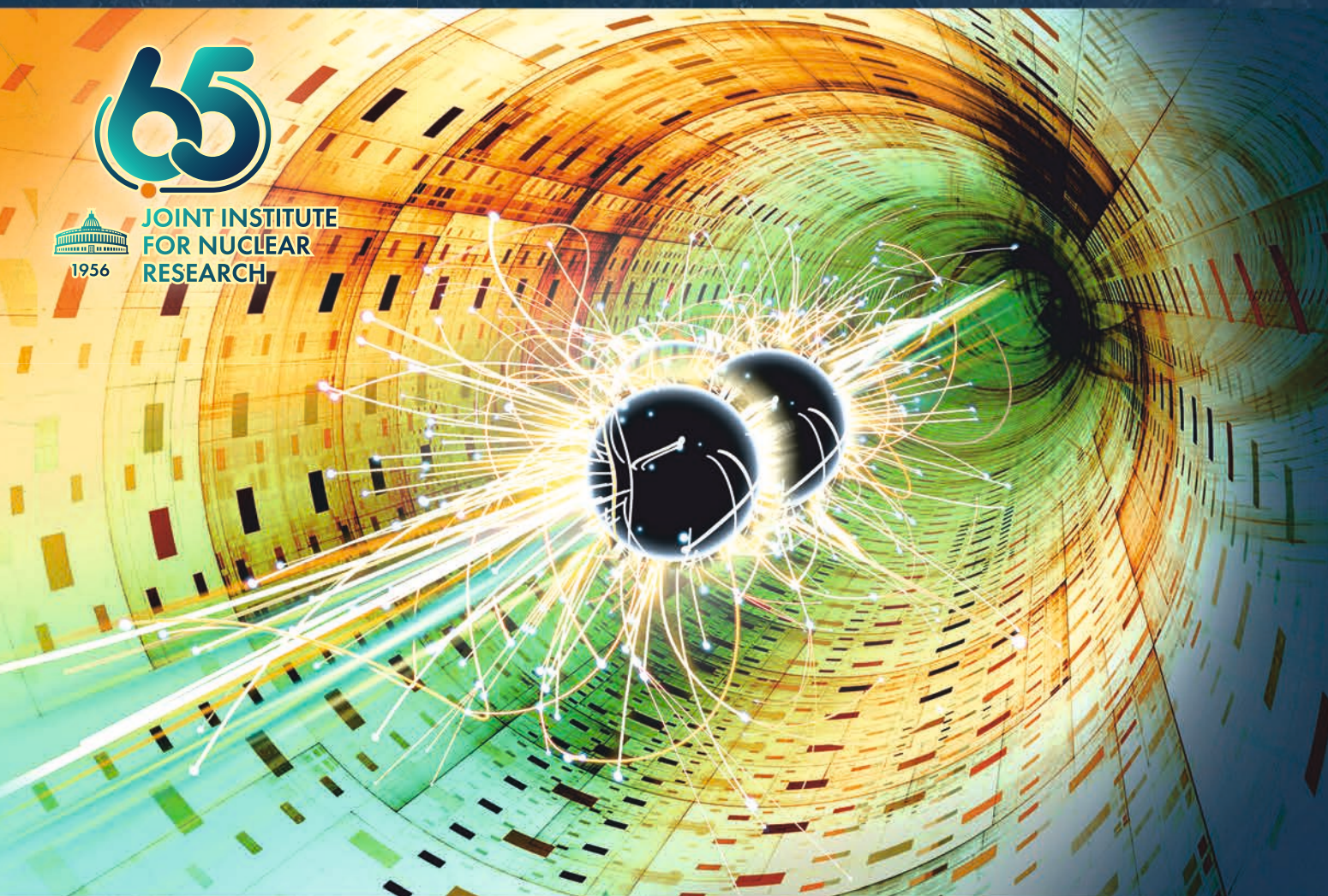


65



JOINT INSTITUTE  
FOR NUCLEAR  
RESEARCH



# УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС **NICA**—

БАЗА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ И  
ИННОВАЦИОННЫХ РАЗРАБОТОК



## О МЕГАПРОЕКТЕ «КОМПЛЕКС NICA»

Проект класса мегасайенс «Комплекс NICA» реализуется в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) в соответствии с планами развития Института и Соглашением между Правительством Российской Федерации и международной межправительственной научно-исследовательской организацией ОИЯИ о создании и эксплуатации комплекса сверхпроводящих колец на встречных пучках тяжелых ионов NICA – комплекса NICA, подписанным в 2016 г. NICA входит в перечень мероприятий Национального проекта «Наука».

Целью проекта является получение новых фундаментальных знаний о ядерной материи, образующейся в столкновениях тяжелых ионов и, возможно, существующей в недрах нейтронных звезд, изучение ее фазовых превращений в экстремальных условиях больших температур и плотностей, а также исследования спиновой структуры протона и нейтрона. Это поможет понять одну из загадок природы – причину связанности кварков в нейтроне и протоне, исследовать механизмы нарушения симметрии, лежащие в основе воз-

никновения Вселенной. «Комплекс NICA» дает ученым возможность проведения таких экспериментов, которые не могут быть выполнены в других исследовательских центрах и результаты которых будут дополнять знания об окружающем нас мире.

В состав комплекса NICA входят (рис. 1): инжекционный блок, цепь ускорителей, включая синхротрон – действующий с 1993 г. и модер-

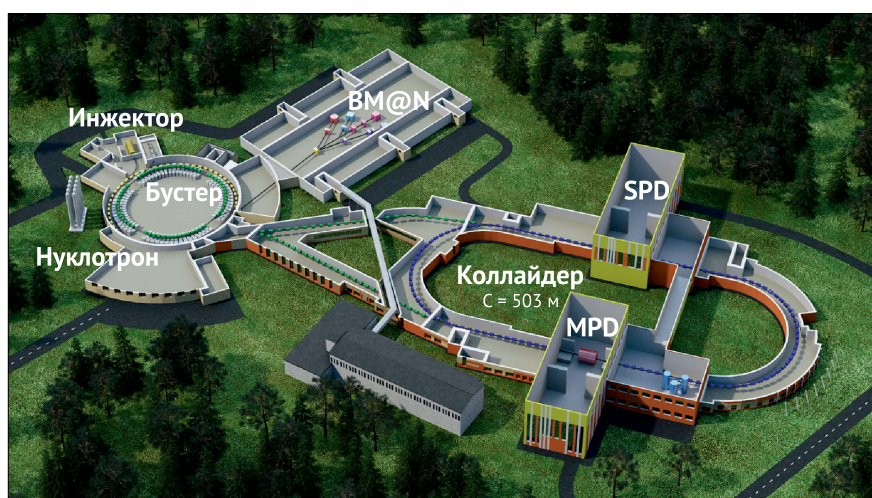


Рис. 1. Объекты комплекса NICA (макет)

низированный Нуклотрон, создаваемые бустер и коллайдер; три исследовательских установки, две из которых – **MultiPurpose Detector (MPD)** и **Spin Physics Detector (SPD)** – будут расположены в точках столкновения пучков коллайдера, а третья – **Baryonic Matter at Nuclotron (BM@N)** – уже работает на выведенных из Нуклотрона пучках; инженерная инфраструктура, в том числе фабрика по производству магнитов и самая производительная в РФ криогенная станция.

Комплекс создается специалистами ОИЯИ с привлечением наиболее авторитетных экспертов из мировых научных центров. Ход реализации проекта контролируется многоуровневой структурой экспертных комитетов, в состав которых входят ведущие ученые (рис. 2) из ЦЕРН, BNL и FNAL (США), GSI (Германия), ИФВЭ и ИТЭФ (Россия) и др.



Рис. 2. Международный комитет по оценке расходов и графика реализации проекта NICA



## УСКОРИТЕЛИ И КОЛЛАЙДЕР

В ходе реализации проекта поэтапно вводится в строй инжекционный блок, включающий электронно-струнный источник тяжелых ионов (до золота  $Au^{+31}$ ) с интенсивностью до  $2,5 \cdot 10^9$  и частотой до 10 Гц, линейный ускоритель HILac,

водство магнитов для бустера, изготовлено 95 % дипольных и 10 % квадрупольных магнитов для коллайдера. Всего к концу 2022 г. будет произведено более 430 магнитов для проектов NICA и FAIR.



*Рис. 3. Студенты с ознакомительной экскурсией на фабрике СП-магнитов*

созданный в сотрудничестве с немецкой компанией Bevatech GmbH, с ВЧ-системой импульсной мощности до 1 МВт для инъекции в бустер тяжелых ионов с энергией 3,2 МэВ/нуклон.

В 2016 г. в Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ запущена в эксплуатацию фабрика по производству сверхпроводящих (СП) уникальных по своим параметрам быстроциклирующих (5 Гц, 4–8 Тл/с) магнитов типа Нуклотрон, разработанных в ОИЯИ (рис. 3). Магниты производятся как для проекта NICA, так и для проекта FAIR в Дармштадте (Германия). К началу 2021 г. завершено произ-

водство магнитов для бустера, изготовлено 95 % дипольных и 10 % квадрупольных магнитов для коллайдера. Всего к концу 2022 г. будет произведено более 430 магнитов для проектов NICA и FAIR.

В ноябре-декабре 2020 г. был успешно проведен первый технологический сеанс на созданном бустере, старт которому дал Председатель Правительства РФ М.В.Мишустин (рис. 4). Высокий уровень проектирования, качество изготовления и сборки всех элементов бустера были подтверждены стабильной циркуляцией пучка, полученной без включения системы коррекции магнитного поля. Были достигнуты основные заявленные параметры: интенсивность ускоренного пучка ( $3 \cdot 10^{10}$ ), максимальное значение магнитного поля (1,8 Тл при темпе роста 1,2 Тл/с) и высокий вакуум (до  $3 \cdot 10^{-10}$  Торр). Запуск бустера стал одним из важнейших достижений ОИЯИ в 2020 г.

В настоящее время идет подготовка к монтажу магнитов и другого оборудования коллайдера, который позволит сталкивать тяжелые ионы в оптимальном для создания максимальной барионной плотности диапазоне энергий до

*Рис. 4. Визит М.В.Мишустина, приуроченный к запуску первого технологического сеанса бустера, 20 ноября 2020 г.*







Рис. 5. На закладке первого камня комплекса NICA А.А. Фурсенко, А.Ю. Воробьев, Д. Гросс, В.Е. Фортвов



Рис. 6. Строительная площадка, апрель 2021 г.

11 ГэВ/нуклон при светимости до  $10^{27}$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Коллайдер и две установки (MPD и SPD) в точках столкновения его пучков будут смонтированы в строящемся здании № 17. Торжественная цере-

мония закладки первого камня этого комплекса состоялась в марте 2016 г. (рис. 5). Строительные работы в основном будут завершены в 2021 г. (рис. 6).

## ДЕТЕКТОРЫ

Фундаментальные исследования на детекторах комплекса NICA ведутся в рамках широкого международного сотрудничества, позволяющего ученым реализовывать общие научные планы путем объединения ресурсов и свободного обмена информацией. В 2018 г. сформированы

и проведены учредительные собрания коллабораций MPD и BM@N (рис. 7). В коллаборации многоцелевого детектора MPD объединились усилия более 500 участников из 40 научных центров из 11 стран. В состав коллаборации BM@N вошли 250 участников из 19 институтов



Рис. 7. Учредительное собрание коллабораций MPD и BM@N, 11 апреля 2018 г.





Рис. 8. Установка BM@N, настройка аппаратуры

10 стран. К созданию установки SPD и проведению экспериментов на ней проявили интерес более 300 ученых и инженеров из 10 стран, идет процесс формирования коллаборации. 253 сотрудника российских институтов, активно участвующих во всех стадиях реализации проекта, поддержаны 36 грантами РФФИ.

Эксперимент на выведенных пучках Нуклотрона – BM@N (рис. 8) – нацелен на изучение свойств барионной материи и ее фазовых превращений в экстремальных условиях больших плотностей ядерной материи, скрытой «странности» нуклона, гиперядер и других экзотических объектов. После присоединения к коллаборации ученых из США, Франции и Израиля

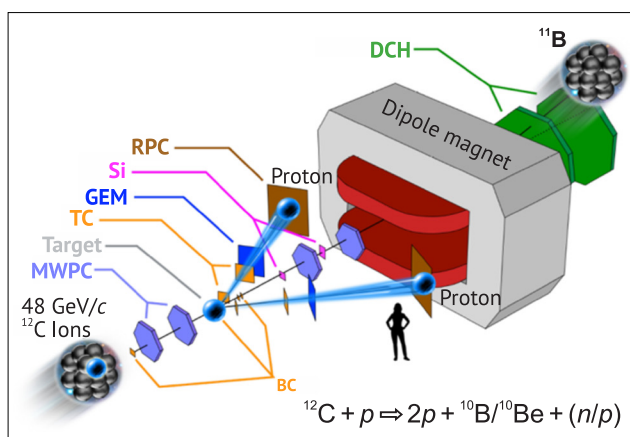


Рис. 9. Схема эксперимента SRC

научная программа была расширена проектом «Изучение короткодействующих корреляций» (SRC) (рис. 9). В 2018 г. установка была создана, успешно проведен первый физический сеанс, в котором зарегистрировано более 200 млн взаимодействий ядер углерода с различными мишенями (почти 20 ТБ данных). Получены первые уникальные научные результаты, которые были представлены на престижных международных конференциях, а результаты анализа SRC опубликованы в престижном журнале «Nature Physics». Продолжается развитие установки BM@N, которая будет дополнена модулями вершинного микрострипового детектора, разрабатываемого совместно с коллегами из GSI (Германия).

Создание детектора MPD идет в соответствии с планами. В экспериментальном павильоне, строительство которого завершилось в 2020 г., начат монтаж самого большого элемента детектора – сверхпроводящего соленоидального магнита, внутри которого разместятся основные детектирующие системы. В ноябре 2020 г. в Дубну доставлен 125-тонный «саркофаг» (рис. 10), в котором находится криостат со сверхпроводящей катушкой магнита, изготовленный по контракту в Италии. Доставка «саркофага» – сложная логистическая операция, которая была осуществлена водным путем по



Рис. 10. «Саркофаг» с криостатом доставлен в зал MPD, ноябрь 2020 г.





маршруту Генуя – Санкт-Петербург – Дубна. Соленоид будет размещен в магнитопроводе массой 600 т, изготовленном в Vitkovice HM (Чехия) и с высокой точностью собранном в зале MPD (рис. 11).

В центральной области магнита будет обеспечена высокая однородность поля (0,03%). Карта поля будет измерена в 8000 точек с помощью системы датчиков, изготовленной в сотрудничестве с ЦЕРН.

При столкновении ядер в коллайдере будет рождаться до 1400 заряженных частиц. Их траектории (треки) будут восстановлены с помощью времяпроекционной камеры (TPC) – основного элемента трековой системы, соответствующей лучшим мировым образцам. Около 70% оборудования уже изготовлено (рис. 12). Данные от TPC совместно с измерением времени пролета частиц системой Time of Flight (ToF) позволят идентифицировать эти частицы. Точность измерения времени пролета частиц системой ToF составляет 60 пикосекунд. Примерно 50% модулей системы ToF, состоящей из многозачерных резистивных плоских камер, изготовлено и проходит испытания на стенде. Впервые в мире для MPD будет создан высокотехнологичный электромагнитный калориметр (ECal) типа «шашлык» с проекционной геометрией, центральная часть которого состоит из 38 тысяч модулей, собранных в единую цилин-



Рис. 11. Сборка яра магнита в зале MPD

дрическую систему массой почти 70 т. Вокруг точки столкновения ядер будет установлено 5 цилиндров вершинного детектора (4,9 млрд пикселей), разрабатываемого на основе передовых CMOS-технологий совместно с ЦЕРН, Китаем и Германией (рис. 13).

Уникальную возможность работать с поляризованными пучками дейтронов при энергиях NICA оценили участники команды, выразившие готовность участвовать в разработке технического проекта экспериментальной установки – SPD, создаваемой для изучения спиновой структуры нуклона и измерения малоизученных поляризованных и неполяризованных глюонных распределений в процессах с открытым «очарованием».

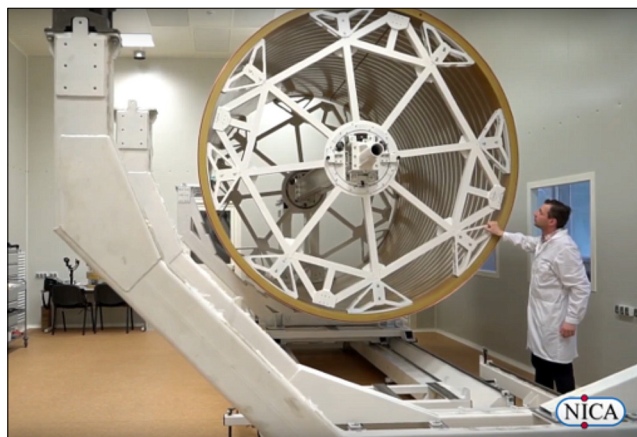


Рис. 12. Сборка TPC

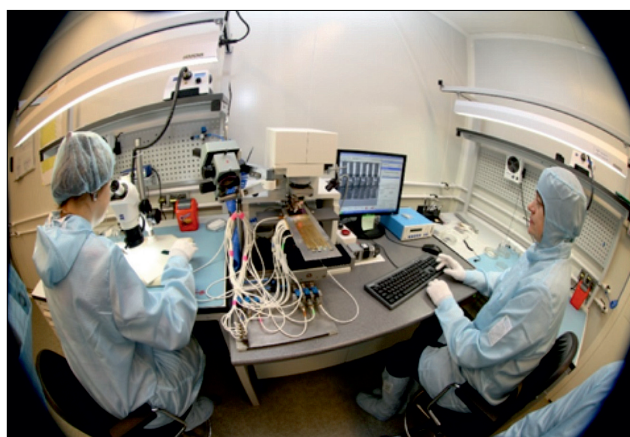


Рис. 13. Сборка вершинного детектора





Рис. 14. Вычислительный кластер NICA и суперкомпьютер «Говорун»

В 2019 г. был введен в эксплуатацию первый кластер вычислительного центра NICA (рис.14), состоящий из 5040 ЦПУ ядер и 10 ПБайт дисковой памяти. Только в 2020 г. на нем было решено свыше 2,5 миллионов задач. Это один из трех кластеров, предназначенных для хранения и анализа экспериментальных данных. Вычислительный центр NICA включает также суперкомпьютер «Говорун» (рис.14). Всего планируется иметь 25000 ядер и обеспечить дисковую память не менее 20 ПБайт. Развитая сетевая компьютерная инфраструктура проекта обе-

спечивает скорость передачи данных 400 Гб/с с возможностью расширения до 1000 Гб/с. Распределенная информационно-вычислительная сеть создается с использованием самых современных технологий, включая технологию GRID, облачную технологию и др. Она позволяет работать с экспериментальной информацией в любое время во всех научных центрах мира, включенных в такую сеть. Дубна является одним из таких центров, наиболее активно и эффективно работающим на территории России.

## ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОГРАММЫ

Инфраструктура комплекса NICA позволит использовать имеющиеся пучки для инновационных и технологических разработок во многих направлениях. На большом наборе выведенных пучков будет реализован ряд междисциплинарных программ прикладных исследований в широком диапазоне энергий.

Уникальные по своим параметрам СП-магниты типа Нуклотрон можно применить в ускорителях для ядерной энергетики и в медицинских установках для радиотерапии (в том числе углеродной). В перспективе бустер комплекса NICA может быть использован для разработки технологий углеродно-лучевой терапии.

Для обеспечения комплекса NICA (10 кВт при 4 К) в Институте работает самый мощный в России оживитель гелия, способный производить 1000 л в час жидкого гелия, с помощью которого

также будут исследовать сверхчистые жидкие и твердые газы (He, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ne, Xe и др.).

Ведутся работы по созданию преобразователя электроэнергии для индуктивного мегаваттного накопителя энергии на базе магнита с обмоткой из высокотемпературного сверхпроводника (30 К) емкостью 3–5 МДж. В рамках инновационного направления «Альтернативная энергетика» создана опытная установка, на которой получают данные, позволяющие разрабатывать рабочие модели и проектировать активные зоны промышленного реактора для переработки и утилизации отработанного ядерного топлива.

Космической отраслью, в частности Государственной корпорацией «Роскосмос», чрезвычайно востребованы исследования микроэлектроники в условиях космического облучения, когда



электронные приборы подвергаются облучению ионизирующими частицами высокой энергии, выводящему их из строя. Соответствующие условия созданы с помощью пучков ускорителя Нуклотрон, где активно проводятся такие иссле-

дования. Радиологические испытания биологических объектов, также ведущиеся на Нуклотроне, позволяют оценить изменения когнитивных способностей астронавтов в длительных космических экспедициях, в том числе на Марс.

## ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА

Необходимым условием для развития современного государства является наличие эффективной образовательной среды. ОИЯИ участвовал в создании «университетского пояса» в Дубне, включающего филиал МГУ, государственный университет «Дубна», филиал МИРЭА и Учебно-научный центр ОИЯИ, где учатся и работают студенты и аспиранты ведущих вузов России (МИФИ, МФТИ и др.) и государств-членов Института.

Проекты класса мегасайенс являются идеальной площадкой для подготовки высокопрофессиональных научных и инженерно-технических кадров. Из 940 сотрудников Института, занятых в реализации проекта NICA, 250 участников моложе 35 лет. В рамках проекта NICA подписаны целевые соглашения с ведущими вузами Российской Федерации и достигнуты договоренности с рядом зарубежных организаций (Германия, Польша) о регулярном проведении зимних и летних школ для молодых ученых, организации студенческих практик для студентов и аспирантов из стран-участниц Института. Совместно с ЦЕРН ОИЯИ проводит ежегодные школы по физике высоких энергий, а также мероприятия, на которых ведущие специалисты знакомят учителей физики и учащихся средних школ с последними достижениями науки (рис. 15). За последние годы поддержку получили сотни студентов, аспирантов и молодых специалистов.

Перспективной является разрабатываемая в ОИЯИ школьная образовательная программа,

построенная на базе интерактивного общения с компьютером. В 2021 г. в Дубне начнет работу физико-математический лицей им. В.Г.Кадышевского, обсуждаются планы создания школы с преподаванием на английском языке для обучения детей иностранных специалистов.

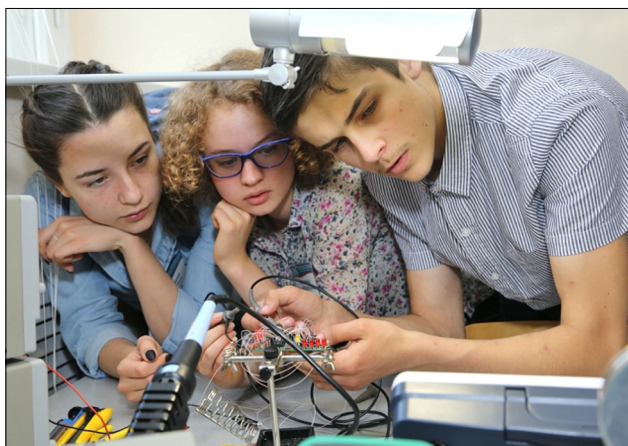


Рис. 15. Школьники в лаборатории

Наличие на территории России международного научно-исследовательского центра и существенное развитие в рамках проекта NICA комплекса современных уникальных установок, нацеленных на решение фундаментальных и прикладных задач на переднем крае современной науки, будет интеллектуальным магнитом для талантливой молодежи со всего мира.

## МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

Проект создания ускорительного комплекса NICA и экспериментальных установок MPD, SPD и BM@N вызывает большой интерес международного научного сообщества. В настоящее время в создании различных подсистем и в разработке

научной программы участвуют ученые и специалисты из институтов и организаций более чем 30 стран. География участников постоянно расширяется. Инфраструктура проекта включает создание центра NICA (рис. 16) для обеспечения





Рис. 16. Архитектурный проект центра NICA

необходимых условий эффективной и комфортной работы большого числа ученых и специалистов из институтов и университетов мира, прибывающих в ОИЯИ для проведения научных исследований и инновационных работ.

В ходе реализации проекта заключены международные соглашения, в том числе с Германией и Китаем, подписаны соглашения о сотрудничестве (MoU) с целым рядом научных организаций, включая ЦЕРН, вклад которого трудно переоценить. ЦЕРН принял участие в разработке и поставке оборудования для ускорительного комплекса, электроники и элементов детекторов, оборудования для криогенных испытаний и многого другого.

Тесная совместная работа приводит к укреплению дружественных отношений, обмену знаниями и технологиями, взаимно обогащает жизнь всех заинтересованных сторон, оказы-



Рис. 17. Доли промышленного возврата по странам

вает положительное влияние, в том числе и на межгосударственные отношения.

Полная стоимость базовой конфигурации ускорительного комплекса NICA составляет около 500 М\$. Доминирующий вклад вносят Российская Федерация и ОИЯИ – основные учредители и исполнители проекта. Доли промышленного возврата по странам (2020 г.) (рис.17), в основном, соответствуют ресурсам, вложенным в проект странами-участницами ОИЯИ и другими странами. В целом объем выполненных работ по созданию базовой конфигурации комплекса NICA на конец 2020 г. составил около 70 %.

Предусмотрено дальнейшее развитие комплекса для достижения высокой конкурентоспособности как в области фундаментальных исследований, так и прикладных работ. Уже начаты работы по развитию при существенных вкладах Германии (25 М\$) и Китая (до 40 М\$).

**Для ознакомления с комплексом NICA лабораторию посещают видные государственные и политические деятели, делегации иностранных государств, представители культуры, бизнеса, руководители различного уровня. Сегодня ОИЯИ – один из ведущих, динамично развивающихся научных центров мира. Успешная реализация мегапроекта NICA надолго обеспечит его конкурентоспособность и дальнейшее интенсивное развитие, что самым положительным образом скажется на повышении престижа России – страны месторасположения ОИЯИ.**



