

К 300-ЛЕТИЮ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (РАН)**Важнейшие достижения исследований
фундаментальных проблем ядерной физики
за последние 25 – 30 лет и перспективы их развития**

В.А. Матвеев

Настоящий обзор написан на основе доклада, сделанного 27 мая 2024 года на Научной сессии Общего собрания Отделения физических наук Российской академии наук (ОФН РАН) "300-летие Академии: успехи и достижения физических наук в XXI веке". Доклад был посвящён важнейшим достижениям исследований в области фундаментальной ядерной физики за последние 25–30 лет и перспективам их дальнейшего развития. Основное внимание уделяется вкладу учёных и специалистов нашей страны в общемировые достижения последних десятилетий в исследовании фундаментальных проблем ядерной физики, включая физику элементарных частиц и физику высоких энергий, релятивистскую ядерную физику и физику тяжёлых ионов, физику нейтрино и нейтринную астрофизику, физику космических лучей ультравысоких энергий. И, конечно, нельзя не сказать о достижениях отечественных учёных в области теоретической физики и космологии, в значительной степени определяющих успехи в исследовании фундаментальных свойств материи. Кратко представлен вклад учёных и специалистов России в реализацию крупных международных проектов, в значительной степени определивших их достижения последних десятилетий, в частности открытие бозона Хиггса. Представлен краткий обзор нынешнего состояния и проектов развития исследовательской инфраструктуры отечественных научных организаций. Указывается на важную роль, которую играет развитие и совершенствование ускорительной науки и техники в исследовании фундаментальных проблем ядерной физики. Особое внимание уделено разработке и реализации на территории России крупных ядерно-физических проектов мегасайенс класса, а также намечающимся сдвигам в стратегии развития фундаментальных физических исследований и опирающемуся на их достижения развитию инновационных технологий в интересах экономики, образования и здравоохранения.

Ключевые слова: фундаментальная ядерная физика, теоретическая физика, физика элементарных частиц, Стандартная модель, тяжёлые ионы, ускорители и коллайдеры, физика нейтрино, нейтринная астрофизика, физика сверхтяжёлых элементов, высокопроизводительный компьютеринг, космология, тёмная материя, физика нейтронов, исследования на пучках нейтронов, исследования на пучках синхротронного излучения, протонная терапия

PACS numbers: 12.60.–i, 26.65.+t, 29.20.–c, 87.56.–v

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.05.039792>**Содержание**

1. Введение (1251).
2. Проблемы и вызовы (1251).
3. Итоги международного сотрудничества (1251).
4. Важнейшие достижения учёных России за период 25–30 лет в исследовании фундаментальных свойств материи (1252).

В.А. Матвеев

Институт ядерных исследований РАН,
просп. 60-летия Октября 7а, 117312 Москва, Российская Федерация;
Объединённый институт ядерных исследований,
ул. Жолио-Кюри 6, 141980 Дубна, Московская обл.,
Российская Федерация
E-mail: matveev@jinr.ru

Статья поступила 30 сентября 2024 г.,
после доработки 9 ноября 2024 г.

- 4.1. Физика элементарных частиц и высоких энергий. 4.2. Теоретическая и математическая физика.
5. Состояние действующей исследовательской инфраструктуры в РФ (1255).
6. Достижения исследований на базе ускорительных комплексов (1255).
 - 6.1. Исследования в области фундаментальной ядерной физики. Фабрика сверхтяжёлых элементов. 6.2. Релятивистская ядерная физика. Развитие экспериментальной базы ЛФВЭ ОИЯИ.
 - 6.3. Физика на электрон-позитронных коллайдерах. Развитие комплекса коллайдеров ИЯФ СО РАН. 6.4. Исследования экзотических адронных состояний. Поиски Новой физики в редких распадах К-мезонов. Комплекс адронных ускорителей НИЦ КИ–ИФВЭ. 6.5. Исследования в области ядерной физики промежуточных энергий высокой интенсивности. Многоцелевой комплекс сверхточного линейного ускорителя ионов водорода ОИЯИ РАН. 6.6. Фундаментальная ядерная физика с нейтронами.

7. Физика нейтрино и нейтринная астрофизика (1259).

7.1. Масса нейтрино (антинейтрино). 7.2. Физика солнечных нейтрино. 7.3. Нейтринная астрофизика высоких энергий. 7.4. Параметры осцилляций нейтрино.

8. Физика космических лучей и проблемы астрофизики высоких энергий (1261).

8.1. Структура спектров галактических космических лучей. 8.2. Позитроны в галактических космических лучах. 8.3. Космические лучи предельно высоких энергий.

9. Работы по высокопроизводительному компьютерингу (цифровая физика) (1262).

9.1. Российский GRID для интенсивных операций с данными (РДИГ). 9.2. Комплексы грид в России.

10. Необходимость перехода к новому этапу развития фундаментальной ядерной физики в РФ (1262).**11. Инфраструктура исследований в области физики нейтрино и нейтринной астрофизики (1264).****12. Нейтронные исследования (1265).****13. Развитие ядерно-физической медицины (1266).****14. Выводы и заключение (1267).**

Список литературы (1267).

1. Введение

Сделать обзор важнейших достижений исследований в области фундаментальной ядерной физики — переднего края современного естествознания, включающего в себя физику элементарных частиц и высоких энергий, физику нейтрино, нейтринную астрофизику и астрономию, физику фундаментальных взаимодействий и космологию, физику тяжёлых ионов и релятивистскую ядерную физику, физику и технику ускорителей и крупномасштабных детекторов частиц и ядерных излучений, высокопроизводительный компьютеринг или, как ныне говорят, цифровую физику, а также ряд опирающихся на ядерные технологии прикладных инновационных направлений, таких как ядерно-физическая биология и медицина, за последние 25–30 лет — задача крайне непростая, если вообще возможная.

Тем не менее, опираясь на информацию и предложения Научных советов Секции ядерной физики по курируемым ими направлениям исследований, в этом докладе сделана попытка отдельными мазками нарисовать некоторую пусть не полную, но разноплановую картину важнейших достижений, нынешнего состояния и ближайших перспектив исследований в области фундаментальной и прикладной ядерной физики.

Кажется правильным, прежде чем перейти к изложению важнейших результатов по отдельным научным направлениям, хотя бы кратко охарактеризовать нынешнее состояние, проблемы и перспективы исследований в области фундаментальной ядерной физики в России, опираясь на те главные, основополагающие результаты, которые и определили во многом направления дальнейшего развития.

2. Проблемы и вызовы

Хорошо известен огромный вклад в исследование фундаментальных свойств материи, внесённый учёными и специалистами СССР и конкретно России, который во многом определил состояние и стратегию развития в мире фундаментальных и прикладных исследований в области ядерной физики.

Однако за прошедшие 30 лет наметилась тенденция сокращения доли работ, выполняемых в исследовательских центрах Российской Федерации. В первую очередь это связано с прекращением развития в стране современной экспериментальной базы, обусловленного старением и выводом из эксплуатации установок, построенных ещё во времена Советского Союза. На фоне общего депрессивного состояния фундаментальной науки в стране создание крупных научных ускорительных установок затормозилось.

Это привело к тому, что наметилось существенное отставание в развитии отечественных экспериментальных, и в первую очередь ускорительных, технологий по целому ряду важнейших направлений, и, как следствие, к ощутимым кадровым потерям в ведущих научных центрах. Многие перспективные, молодые талантливые физики уехали на работу в передовые зарубежные научные центры.

3. Итоги международного сотрудничества

Несмотря на это, в данный период российские учёные и специалисты приняли активное участие в экспериментах на крупнейших ускорителях мира: в ЦЕРН (CMS, ATLAS, LHC-b, ALICE на LHC), BNL, JNL (SEBAF), GANIL, в лабораториях RIKEN, JPARC, KEK, FNAL, GSI (FAIR), XFEL и др., а также в проведении исследований в области физики нейтрино на базе крупных зарубежных нейтринных установок: LCNG, Daya Bay, T2K, NOvA и др.

В результате российские учёные внесли значительный вклад в самые выдающиеся достижения фундаментальной ядерной физики последних нескольких десятилетий нобелевского уровня: открытие бозона Хиггса на Большом адронном коллайдере (БАК) (Large Hadron Collider, LHC), ознаменовавшее триумф Стандартной модели (СМ) элементарных частиц, обнаружение гравитационных волн (эксперимент LIGO), нарушения фундаментальной *CP*-чётности в ядерных взаимодействиях, поиски тёмной материи и Новой физики за пределами Стандартной модели элементарных частиц, прецизионное определение фундаментальных свойств нейтрино.

В итоге российские учёные и специалисты смогли реализовать накопленные ими знания и приобрели бесценный опыт в создании передовой исследовательской инфраструктуры, в создании экспериментальных установок, в развитии теории, в сборе и обработке данных на основе современных информационно-компьютерных методов, а также в сфере уникальных инновационных технологий.

Далее мы изложим важнейшие достижения российских учёных и специалистов в исследовании фундаментальных свойств материи, полученные в рамках международного научно-технического сотрудничества.

Примерами наиболее значимых и ярких результатов являются:

- открытие бозона Хиггса;
- синтез новых сверхтяжёлых элементов таблицы Менделеева;
- доказательство существования осцилляций нейтрино, предсказанных в Дубне более 50 лет назад Бруно Понтекорво;
- обнаружение дефицита солнечных нейтрино и прецизионное измерение их потока на Земле;

- открытие топ-кварка и определение его свойств;
- обнаружение образования кварк-глюонной плазмы при столкновении тяжёлых ионов;
- обнаружение прямого нарушения CP -симметрии в ядерных взаимодействиях и процессах нейтринных осцилляций.

Несомненно, открытие в 2012 г. в ЦЕРН предсказанного теорией бозона Хиггса международными коллаборациями в экспериментах на Большом адронном коллайдере LHC [1, 2] явилось триумфом Стандартной модели элементарных частиц, а сама эта теория рассматривается мировым научным сообществом как высочайшее интеллектуальное достижение современной науки [3, 4].

При этом учёными России внесён основополагающий вклад в разработку и триумф Стандартной модели. Отметим, в частности:

- разработку основ теории:
 - квантование неабелевых калибровочных полей;
 - доказательство перенормируемости теории;
 - введение гипотезы цветных кварков;
- создание научного комплекса Большого адронного коллайдера LHC:
 - разработка научной программы исследований взаимодействия адронов при высоких энергиях;
 - участие в создании экспериментальных установок детекторов ATLAS, CMS, ALICE, LHCb;
 - разработка, изготовление, поставка, монтаж и наладка уникального оборудования систем ускорителя LHC;
 - научное и инженерно-техническое обслуживание оборудования установок, проведение исследований;
 - участие в сборе и обработке экспериментальных данных, подготовка научных результатов;
 - создание уникального информационно-вычислительного комплекса TIER-1 на базе технологии ГРИД и его эксплуатация для моделирования событий, сбора и обработки данных детекторов ATLAS и CMS.

4. Важнейшие достижения учёных России за период 25–30 лет в исследовании фундаментальных свойств материи

4.1. Физика элементарных частиц и высоких энергий

Приводя ниже перечень наиболее значимых результатов российских учёных в области физики высоких энергий и физики элементарных частиц, выделим жирным шрифтом достижения и открытия, совершённые исключительно на территории России:

- прецизионная проверка модели электрослабых взаимодействий в экспериментах на LEP, определение числа поколений нейтрино (1989–2000 гг.) на установках в ЦЕРН: DELPHI (ИФВЭ+ОИЯИ); L3 (ИТЭФ+ПИЯФ);

- открытие и исследование t -кварка (1995–2005 гг.) на установках Фермиевской национальной лаборатории (США): CDF + D0 (четыре института РФ);

- открытие и исследование кварк-глюонной плазмы (2005–2023 гг.) в экспериментах STAR + PHENIX (Брукхейвенская национальная лаборатория (США)) и ALICE (ЦЕРН) с участием семи институтов РФ;

- **наблюдение дефицита солнечных нейтрино (1991–2009 гг.) в российско-американском эксперименте SAGE на Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) Инсти-**

тута ядерных исследований (ИЯИ) РАН на Северном Кавказе;

- открытие и исследование бозона Хиггса (2012–2024 гг.) на установках ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере (ЦЕРН) с участием учёных и специалистов 11 институтов и университетов РФ;

- обнаружение прямого нарушения CP -симметрии в ядерной физике в эксперименте NA48 на SPS (1999 г.) (Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ)); прецизионное измерение параметров нарушения в распадах CP -чётности тяжёлых кварков (2000–2023 гг.) в экспериментах BELLE + LHCb (шесть институтов РФ);

- **прецизионное измерение времени жизни нейтрона (2005 г.) (ПИЯФ);**

- **синтез сверхтяжёлых элементов (1994–2010 гг.) на циклотронах Лаборатории ядерных реакторов (ЛЯР) ОИЯИ;**

- обнаружение и исследование экзотических адронов в реакциях с тяжёлыми кварками (2000–2023 гг.) в экспериментах BELLE + LHCb (шесть институтов РФ);

- **прецизионное измерение характеристик реакций образования адронов в e^+e^- -взаимодействиях (2010–2023 гг.) (ИЯФ СО РАН);**

- прецизионное измерение потоков солнечных нейтрино, исследование геонейтрино (2003–2024 гг.) в эксперименте Борексино (Гран Сассо, Италия), с участием ОИЯИ, НИЦ КИ;

- **обнаружение и исследование экзотических адронов в реакциях с лёгкими кварками (1985–2024 гг.) в экспериментах ГАМС + ВЕС на У-70 ИФВЭ;**

- **поиски Новой физики в распадах каонов (1995–2024 гг.) на установке ОКА ИФВЭ с участием трёх институтов РФ;**

- **обнаружение нейтринного сигнала рождения сверхновой 1987a и мониторинг рождения сверхновых на установке ЛСД (БНО, ИЯИ РАН) и российско-итальянских установках LSD (Montblanc) и LVD (Гран Сассо, Италия).**

4.2. Теоретическая и математическая физика

Говоря о выдающихся результатах в экспериментальной физике, коих, как можем видеть, немало, нельзя не продолжить обсуждением вклада учёных России в достижения в области теоретической и математической физики, в частности в физику элементарных частиц и квантовую теорию поля, и опирающийся на них прогресс в изучении законов астрофизических явлений и, в конечном счёте, в понимании природы ранней Вселенной [5–10].

В полной мере осветить этот вклад наших учёных в рамках данного доклада практически невозможно.

Но нельзя не упомянуть, по крайней мере, вклад российских учёных в формирование и успехи Стандартной модели элементарных частиц. В частности, вклад Л.Д. Фаддеева и А.А. Славнова в квантование неабелевых калибровочных полей [11], вклад В.А. Рубакова и А.А. Старобинского в современную космологию [12] (рис. 1).

Сегодня нам всем очень не хватает этих поистине выдающихся учёных, достойнейших преемников научных школ Н.Н. Боголюбова и Л.Д. Ландау, воспитавших немало талантливых учеников.

Я хорошо помню тот день, когда В.А. Рубаков, выступая с докладом, сказал, что с сегодняшнего дня (к сожалению, точный день не помню) космология может



Теоретическая и математическая физика:
 – Квантовая теория поля и квантовая статистика
 – Стандартная модель и её расширения
 – Космология и квантовая гравитация

Рис. 1. Выдающиеся представители научных школ Н.Н. Боголюбова и Л.Д. Ландау, внёсшие со своими учениками основополагающий вклад в развитие теоретической и математической физики, в квантовую теорию поля, космологию и квантовую гравитацию.

считаться точной, экспериментально проверяемой теорией, такой, как Стандартная модель в физике частиц. И если нынешнее состояние космологии обязано во многом работам А.А. Старобинского, В.А. Рубаков внёс огромный вклад в соединение представлений и достижений космологии и Стандартной модели.

Приведём в качестве примера достижений в области теоретической и математической физики некоторые важные результаты в области космологии.

4.2.1. Барийонные акустические (сахаровские) осцилляции.

Хорошо известно, что в корреляционной функции распределения галактик наблюдаются осцилляционные пики, аналогичные пикам в разложении анизотропии реликтового излучения по мультиполям сферических гармоник. Источник их един — звуковые волны (сахаровские акустические осцилляции) в первичной плазме эпохи рекомбинации. Однако описание пиков в спектре галактик существенно затруднено: неоднородности материи придают этой задаче нелинейный характер [13] (рис. 2).

Источник первичных неоднородностей неизвестен. Доминирующим представлением является идея о том, что они возникли в самой ранней Вселенной на инфляционной стадии из квантовых флуктуаций. Первая реалистичная инфляционная модель была предложена А.А. Старобинским [14]. Он же вычислил спектр обра-

зующихся первичных гравитационных волн на этой стадии. В.А. Рубаков, А.В. Верякин и М.В. Сажин [15] обратили внимание, что эти волны могут влиять на анизотропию реликтового излучения. Не наблюдая этого вклада, получаем сегодня сильнейшее ограничение сверху на темп расширения Вселенной в ту эпоху, а значит, на масштаб инфляции.

4.2.2. Барьогенезис и тёмная материя.

Обобщение СМ посредством добавления трёх тяжёлых майорановских фермионов, синглетов по калибровочной группе СМ приводит к появлению масс активных нейтрино и объясняет нейтринные осцилляции. Это объясняет появление барийонной асимметрии посредством лептогенезиса в ранней Вселенной [16].

В работе Е. Ахмедова, Д. Горбунова, В. Рубакова и А. Смирнова [17] была указана возможность создания лептонной асимметрии в осцилляциях стерильных и активных нейтрино в первичной плазме до эпохи электрослабого фазового перехода и была проведена первая численная оценка ожидаемого эффекта (рис. 3).

Обобщения СМ при высоких энергиях, где в ходе эволюции Вселенной происходит образование реликтовых чёрных дыр или гравитационных волн. И те, и другие замечательны тем, что без изменений доживают до наших дней с характеристиками, измерение которых позволяет точно определить динамику высокоэнергетической теории [18, 19].

Барийонные акустические (сахаровские) осцилляции

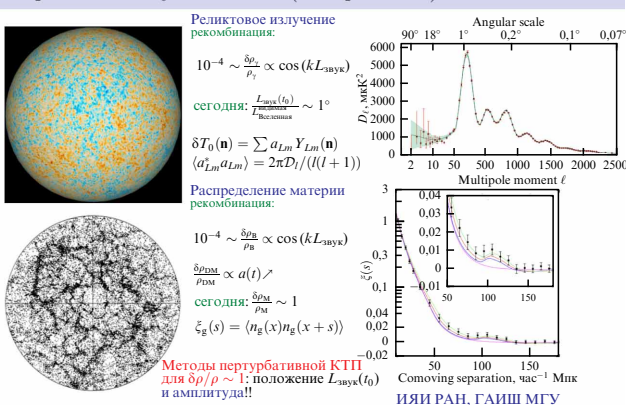


Рис. 2. Барийонные (сахаровские) осцилляции.

Разработка наименее сложных верифицируемых моделей

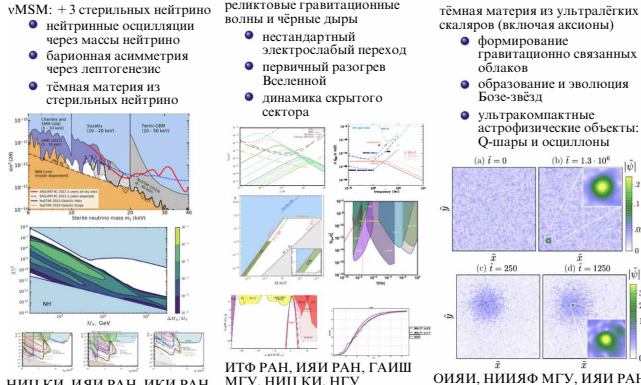


Рис. 3. Барьогенезис и тёмная материя.

Один из самых простых кандидатов на роль тёмной материи — скалярное поле, или конденсат очень лёгких частиц, таких как аксион. Оказалось, что такая тёмная материя может иметь неоднородности на малых масштабах, образовывать облака, гравитационно связанные сгустки и даже очень компактные объекты — так называемые бозе-звёзды [20].

В. Рубаковым и А. Хмельницким было указано на влияние скалярного поля тёмной материи на временную эволюцию сигнала пульсаров, что послужило одним из физических оснований для проведения мониторинга пульсаров [21].

Нельзя не отметить, что проблема тёмной материи, её природы и возможности наблюдения в лабораторных условиях на Земле остаётся одной из важнейших нерешённых проблем современной физики частиц, астрофизики и космологии [22–24].

4.2.3. Инфляция, тёмная материя и "другая" гравитация. Здесь всё просто: первая инфляционная модель ранней Вселенной, до сих пор согласующаяся со всеми наблюдениями, — это модель Старобинского $R + R^2$ (рис. 4) [25].

Он же предложил одну из двух самых популярных моделей инфляции в поздней Вселенной на основе $F(R)$ -модели (названа также его именем) — на основе роли тёмной энергии вместо космологической постоянной [26].

Рубаков вместе с Шапошниковым предложил концепцию "мира на бране в пространстве большей размерности" и указал способ локализации полей в подпространстве меньшей (трёхмерной) размерности [27]. Рубаков показал, как выглядело бы с точки зрения трёхмерного наблюдателя исчезновение электрического заряда и массы [28, 29]. Предложил альтернативы инфляции в этой парадигме (см. рис. 4).

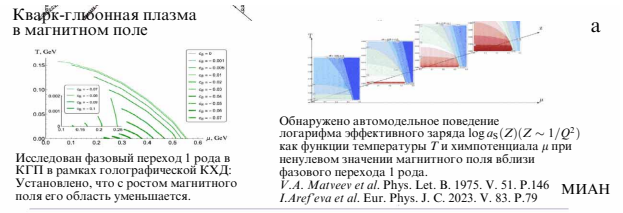
4.2.4. Исследование свойств кварк-глюонной плазмы и квантовой хромодинамики. Теперь, хотя бы коротко, приведём примеры важных результатов в области квантовой хромодинамики (КХД) при описании свойств кварк-глюонной плазмы и её высокоэнергетического поведения, а также примеры рекордных многопетлевых вычислений в задачах физики частиц [30, 31].

На рисунке 5а проиллюстрированы результаты описания фазовых состояний кварк-глюонной плазмы в сильном магнитном поле (МИАН, ОИЯИ).

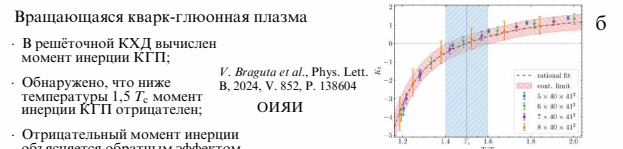
При изучении вращающейся кварк-глюонной плазмы в решёточной КХД вычислен момент инерции плазмы, принимающий при определённых условиях отрицательные значения (ОИЯИ) (рис. 5б).

<p>$F(R)$-модель, вейлевская гравитация и др.</p> <ul style="list-style-type: none"> Инфляция в ранней Вселенной ($R + R^2$, инфляция на поле Хиггса и др.) объясняет, почему Вселенная однородная и плоская; Инфляция в поздней Вселенной (модель Старобинского, $R + (1/R^2 + 1)^n$ и др.) — альтернатива космологической постоянной — доминирующая сегодня субстанция; Модифицированная гравитация на промежуточных масштабах: альтернатива тёмной материи? <p>ТГУ, КГУ, МГУ, ИЯИ, ИТФ, ФИАН, НГУ, НИЦКИ</p>	<p>Дополнительные пространственные измерения:</p> <ul style="list-style-type: none"> Объясняет (?) Иерархию фундаментальных масштабов: электрослабый, $M_W = 10^2$ ГэВ \ll гравитационный $M_{Pl} = 10^{19}$ ГэВ В этих моделях гравитационный масштаб много ниже: компактифицированные измерения; Бесконечные измерения (мир на бране). <p>Дает пример моделей с кажущимся нарушением CPT, электрического заряда и др., что важно для методологии экспериментальных проверок фундаментальных основ КТП</p> <p>НИЦКИ, НИИЯФ, ИЯИ, КГУ</p>	<p>Массивные гравитоны, модели Хорндески и др.</p> <ul style="list-style-type: none"> Модели с большим разрывом, $\rho < \rho_c$ — "всескоростные"; бесузлоное расширение Вселенной. Построение эффективных моделей с такой динамикой; Модели осциллирующей Вселенной, модели с отскоком от сингулярности, модели генезиса. Альтернативные инфляционному решения проблемы однородности и плоскостности Вселенной; Модели с нарушением условий энергодоминантности. Построение решений типа протонных нор. <p>ФИАН, КГУ, НИИЯФ, ИЯИ, МИАН, ОИЯИ</p>
---	---	---

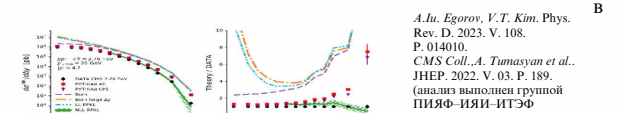
Рис. 4. Прогресс в построении космологических моделей (инфляция, тёмная энергия и другая гравитация).



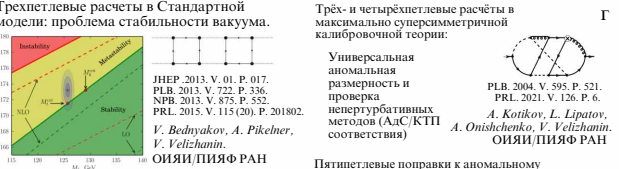
Фазовая диаграмма ускоренной КГП
Обнаружена серия фазовых переходов при температурах T , меньших температуры Унру $T < T_U/n$, $n = 1, 2, \dots$ ($T_U = a/2n$). Установлено, что они аналогичны квантовым фазовым переходам в теории конденсированного состояния, поскольку связаны с сингулярностями отдельных манубаровских мод. Эти переходы также ответственны за адронизацию и быструю термализацию.
G. Prokhorov et al. Phys. Rev. Lett. 2022. V. 129. P.151601 ОИЯИ



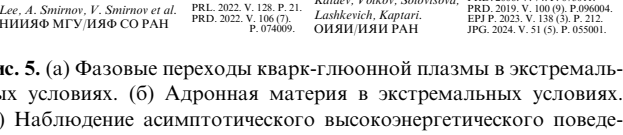
Вращающаяся кварк-глюонная плазма
• В решёточной КХД вычислен момент инерции КГП;
• Обнаружено, что ниже температуры $1,5 T_c$ момент инерции КГП отрицателен;
• Отрицательный момент инерции объясняется обратным эффектом Барнетта: положительный момент импульса КГП направлен противоположно её вращению;
• Ускорители и звёзды
• Установлена связь уравнения состояния ядерной материи, измераемого в соударениях тяжёлых ионов, с зависимостью массы компактных звёзд от их радиуса
E. Kolomeitsev et al. Nucl. Phys. A, 2018. V. 970 ОИЯИ



Эволюция квантовой хромодинамики при высоких энергиях (БФКЛ)
Получена эволюция квантовой хромодинамики в режиме, когда он становится доминирующим при высоких энергиях в приближении Липатова–Фадины–Кураева–Балицкого (БФКЛ) с учётом следующих за ведущим вкладов. Получено, для феноменологических применений, приближение с учётом суммирования вкладов бегущей константы связи.
V.S. Fadin, L.N. Lipatov, 1998. S.J. Brodsky, V.S. Fadin, V.T. Kim, L.N. Lipatov, G.B. Pivovarov, 1999. ПИЯФ-ИЯИ



Трёхпетлевые расчёты в Стандартной модели: проблема стабильности вакуума.
JHEP. 2013. V. 01. P. 017. PLB. 2013. V. 722. P. 336. NPB. 2013. V. 875. P. 552. PRL. 2015. V. 115 (20). P. 201802. V. Bednyakov, A. Pikelner, V. Velizhanin. ОИЯИ/ПИЯФ РАН



Четырёхпетлевые расчёты в квантовой хромодинамике: рождение и распад бозона Хиггса.
Lee, A. Smirnov, V. Smirnov et al. PRL. 2022. V. 128. P. 21. PRD. 2022. V. 106 (7). P. 074009. Катаев, Volkov, Solovitsova, Lashkevich, Kaptari. ОИЯИ/ИЯИ РАН

Пятипетлевые поправки к аномальному магнитному моменту мюона в квантовой электродинамике.
PRD. 2006. V. 74. P. 073011. PRD. 2019. V. 100 (9). P.096004. EPJ Plus. 2023. V. 138 (3). P. 212. JFG. 2024. V. 51 (5). P. 055001.

Рис. 5. (а) Фазовые переходы кварк-глюонной плазмы в экстремальных условиях. (б) Адронная материя в экстремальных условиях. (в) Наблюдение асимптотического высокоэнергетического поведения в КХД на БАК (БФКЛ). (г) Рекордные многопетлевые вычисления в квантовой теории поля.

5. Состояние действующей исследовательской инфраструктуры в РФ

В настоящее время в научных центрах РФ сохранились выдающиеся школы ядерной физики и технологий, действуют крупные физические комплексы, обеспечивающие высокий уровень фундаментальных и прикладных исследований в стране.

В качестве примеров действующих установок и крупных экспериментов в РФ со значимыми результатами и перспективами дальнейшего развития отметим:

- Нуклотрон — ЛФВЭ ОИЯИ;
- Фабрика СТЭ — ЛЯР ОИЯИ;
- Комплекс электрон-позитронных коллайдеров ИЯФ СО РАН;
- экспериментальный комплекс Московской мезонной фабрики ИЯИ РАН;
- Ускорительный комплекс У-70 НИЦ КИ – ИФВЭ;
- Байкальский глубоководный нейтринный телескоп ИЯИ РАН, ОИЯИ;
- Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН;
- астрофизические установки НИИЯФ МГУ, МИФИ, ФИАН, ИЯИ РАН, ИГУ, ОИЯИ.

Важным достижением ускорительного сообщества является сохранение в работоспособном состоянии парка национальных установок различных типов и назначений. На рисунке 6 приведен перечень действующих в настоящее время ускорителей и ускорительных комплексов на территории России.

Действующие ускорительные комплексы обеспечивают высокий уровень фундаментальных и прикладных исследований в стране, сохранение и подтверждение профильных компетенций, освоение новых технологий и методов, обеспечивающих возможность реализации новых ускорительных проектов (НИКА, ЦКП СКИФ, СИЛА и др.)

6. Достижения исследований на базе ускорительных комплексов

6.1. Исследования в области фундаментальной ядерной физики. Фабрика сверхтяжелых элементов

В 2000–2015 гг. в ОИЯИ, используя оригинальную методику слияния ядер трансурановых элементов с

ядрами редкого изотопа кальция-48, были впервые синтезированы самые тяжелые химические элементы с атомными номерами 113–118. Они уже получили признание и свои названия в Таблице элементов. Среди них много русских наименований: флеровий, московий и самый тяжелый из новых элементов — оганесон, названный в честь члена нашего Отделения, осуществляющего научное руководство проводимыми в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ исследованиями по физике сверхтяжелых элементов [32, 33].

Практически все изотопы сверхтяжелых элементов испытывают альфа-распад. Вместе с продуктами распада, новыми изотопами элементов 104–113 (всего было открыто 52 новых нуклида) они демонстрируют удивительную живучесть вблизи границы масс ядер. Их энергии и вероятности распадов являются прямым экспериментальным подтверждением фундаментальных предсказаний микроскопической теории о структуре ядерной материи и роли новых ядерных оболочек в формировании большой зоны острова стабильности тяжелейших ядер, получившей название Дубненского острова стабильности, равно как и само существование сверхтяжелых элементов (рис. 7).

Для исследований физических и химических свойств новых элементов в ОИЯИ в конце прошлого десятилетия был создан новый ускорительный комплекс, получивший название "Фабрика сверхтяжелых элементов" (рис. 8а), оснащенный мощным ускорителем тяжелых ионов (рис. 8б) и экспериментальными установками нового поколения (рис. 8в, г) [34, 35].

Уже три года Фабрика круглосуточно работает на эксперимент, значительно опережая мировой уровень, достигнутый в ведущих лабораториях мира (рис. 9) [36].

За неполные три года в реакциях с Ca-48 были вновь синтезированы элементы 110, 112, 114, 115, наблюдаются распады более чем 40 изотопов сверхтяжелых ядер, найдены их новые изотопы. Идет подготовка к синтезу 120-го элемента.

В Таблице Менделеева новые элементы заполняют 7-й ряд. Впервые на гомологах 6-го и 7-го рядов появляется возможность проверки Периодического закона в условиях возрастающего влияния "релятивистского эффекта" на химические свойства сверхтяжелых элементов [37].

Институт	Название	Тип	Сорт частиц	Энергия, размер
ИЯИ РАН	Сильноточный ЛУ	Линейный резонансный ускоритель	p, H ⁻	600 МэВ (проектная) 300 МэВ (рабочая) L = 450 м
ИЯФ СО РАН	ВЭПП-4М	Электрон-позитронный коллайдер	e ⁻ , e ⁺	1,5–5,5 ГэВ Π = 366,1 м
ИЯФ СО РАН	ВЭПП-2000	Электрон-позитронный коллайдер	e ⁻ , e ⁺	0,2–1 ГэВ Π = 24,4 м
НИЦ КИ – ИФВЭ	У-70	Синхрофазотрон	p, C ⁶⁺	50–60 ГэВ (p), 25–30 ГэВ/u Π = 1483,7 м
НИЦ КИ – ПИЯФ	СЦ-1000	Синхроциклотрон	p	1000 МэВ (1 ГэВ) φ6,85 м (полос)
Институт	Название	Тип	Сорт частиц	Энергия, размер
ОИЯИ	НУКЛОТРОН	Сверхпроводящий синхрофазотрон	p, d, МЗИ (A/Z < 2,5)	12 ГэВ(p), 5,6 ГэВ/u (d) 4,5 ГэВ/u Π = 251,5 м
ОИЯИ	У-400М/У-400	Тандем изохронных циклотронов	МЗИ (A/Z = 2–10)	50 МэВ/u φ400 см (полос)
ОИЯИ	ДЦ-280	Изохронный циклотрон	МЗИ (A < 50)	5–7 МэВ/u φ280 см (полос)
НИЦ КИ	КИСИ–Курчатова	Синхротрон-источник СИ	e ⁻	2,5 ГэВ Π = 124,1 м

Рис. 6. Перечень действующих в настоящее время в России ускорителей и ускорительных комплексов. МЗИ — масс-зарядовый интервал.

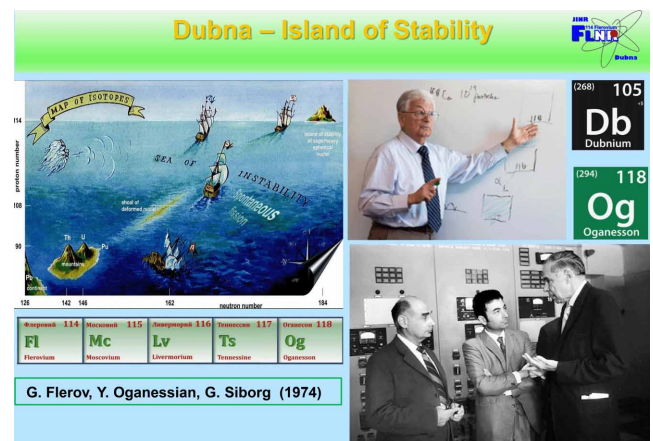


Рис. 7. Поиски большой зоны острова стабильности тяжелейших ядер, получившей название Дубненского острова стабильности, равно как и самого существования сверхтяжелых элементов.

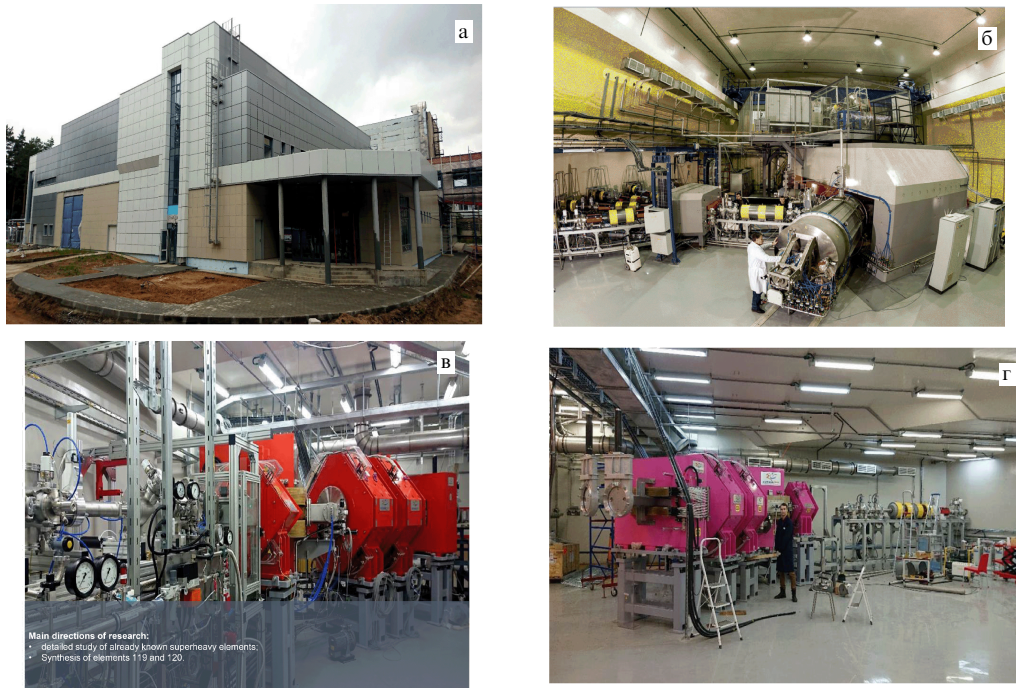


Рис. 8. (а) Фабрика сверхтяжёлых элементов ЛЯР ОИЯИ в Дубне введена в строй в 2018 г. (б) Новый циклотрон DC-280 ЛЯР ОИЯИ. (в) Gas-filled recoil separator — DGFRS-2. Направления исследований: детальное исследование уже известных элементов, а также синтез новых сверхтяжёлых элементов 119 и 120. (г) Gas-filled recoil separator — GRAND (DGFRS-3). Направления исследований: ядерная и масс-спектрометрия сверхтяжёлых элементов и изучение их химических свойств.

Прогресс на Фабрике СТЭ

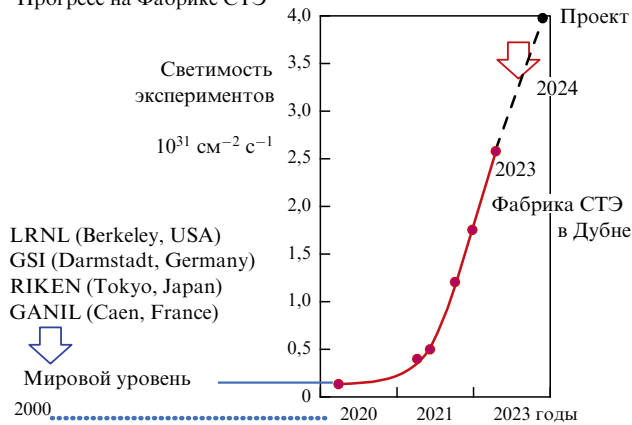


Рис. 9. Уже три года Фабрика сверхтяжёлых элементов круглосуточно работает на эксперимент, значительно опережая мировой уровень, достигнутый в ведущих лабораториях мира.

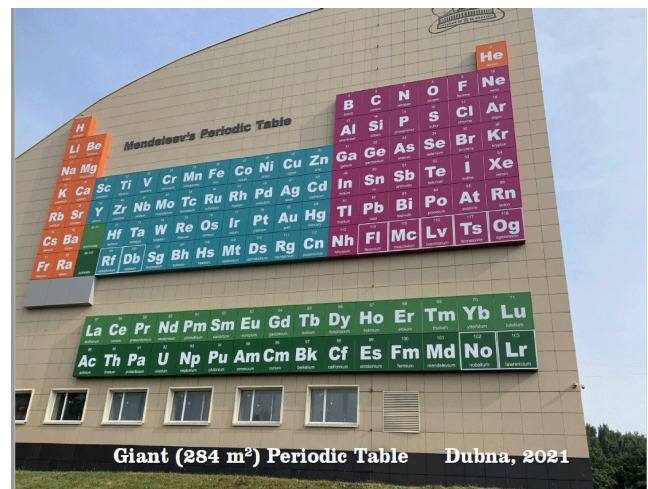


Рис. 10. Самая большая в мире таблица Менделеева на фасаде бассейна "Архимед" в Дубне на правом берегу Волги.

Не могу отказать себе в удовольствии показать самую большую в мире таблицу Менделеева в Дубне, которая хорошо видна туристам с проплывающих по Волге теплоходов (рис. 10).

Следует отметить, что Лаборатория ядерных реакций в Дубне уже 25 лет является мировым лидером в науке о синтезе и исследовании свойств сверхтяжёлых ядер и элементов.

6.2. Релятивистская ядерная физика.

Развитие экспериментальной базы ЛФВЭ ОИЯИ

Исследования в области релятивистской ядерной физики с использованием ускоренных пучков адро-

нов и тяжёлых ядер были инициированы более 30 лет назад в Дубне на базе созданного в ОИЯИ под руководством В.И. Векслера синхрофазотрона с энергией 10 ГэВ и продолжены созданием новой ускорительной базы на основе разработанной в Дубне передовой технологии сверхпроводящих магнитных элементов.

Ниже перечислены основные этапы развития ускорительной базы ФВЭ ОИЯИ.

1993 г.: под руководством акад. А.М. Балдина создан Нуклотрон — первый в мире СП синхротрон тяжёлых ионов (4,5 АГэВ); разработана передовая технология так называемых "дубненских" СП магнитов;

Создание ускорительной базы ФВЭ ОИЯИ:

- 1993: под руководством акад. А.М. Балдина создан Нуклотрон — первый в мире СП синхротрон тяжелых ионов (4,5 АГЭВ); разработана передовая технология т.н. "дубненских" СП магнитов
- 2009: решением КПП ОИЯИ началась реализация проекта NICA — Nuclotron based Ion Collider fAcility;
- 2016: подписано Соглашение между Правительством РФ и ОИЯИ о создании и эксплуатации комплекса NICA
- 2020: запущен в эксплуатацию СП синхротрон — Бустер (578 МэВ/у);



BM@N: 10 стран, 19 институтов, > 250 участников

First observation of the Short-Range Correlations in inverse kinematics: BM@N setup for SRC

$^{12}\text{C} + \text{p} \rightarrow 2\text{p} + ^{10}\text{B} + (\text{n,p})$
 $26 \text{ } ^{10}\text{B} \text{ events} \rightarrow \text{np pair dominance}$
 $3 \text{ } ^{10}\text{B} \text{ events} \rightarrow \text{np pair dominance}$

Paper was published in *Nature Physics*, 17 (2021)



Рис. 11. Состояние работ по сооружению комплекса NICA в 2020 г., запуск Бустера, ввод зоны экспериментов на фиксированной мишени.

- 2018: Мегасайенс проект Комплекс NICA вошел в состав Национального проекта РФ НАУКА
- 2022: запущен в эксплуатацию инжекционный комплекс (Крион, HiLac, Бустер, Нуклотрон, каналы)



Рис. 12. Завершение 1-го этапа создания комплекса NICA, включая монтаж оборудования коллайдера NICA, старт программы экспериментов с фиксированной мишенью.

2009 г.: решением КПП ОИЯИ началась реализация проекта NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) [38 – 40];

2016 г.: подписано Соглашение между Правительством РФ и ОИЯИ о создании и эксплуатации комплекса NICA;

2020 г.: запущен в эксплуатацию СП синхротрон — Бустер (578 МэВ/у), завершено создание зоны экспериментов на фиксированной мишени и введена новая установка — BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron), сформирована международная коллаборация с участием специалистов 19 институтов из 10 стран с общим числом более 250 участников (рис. 11) [40 – 42].

2018 г.: мегасайенс проект Комплекс NICA вошел в состав Национального проекта РФ НАУКА;

2022 г.: запущен в эксплуатацию инжекционный комплекс в составе 5 структурных элементов: Крион, инжектор тяжелых ионов — HiLac, Бустер, Нуклотрон, каналы;

2022 г. — первый сеанс эксперимента SRC (Short Range Correlations) с пучком ионов ^{12}C , 3 АГЭВ;

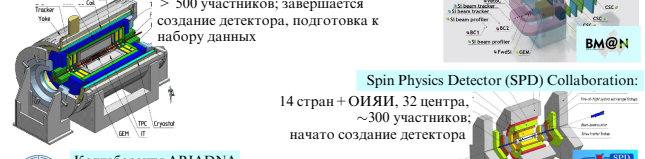
2024 г.: завершение 1-го этапа создания комплекса NICA, включая монтаж оборудования коллайдера NICA, дан старт программы экспериментов с фиксированной мишенью (рис. 12).

Разработана научная программа NICA, нацеленная на исследование в следующих направлениях: КХД диаграммы в малоизученной области большой барионной 2 УФН, т. 194, № 12

Разработана научная программа NICA, нацеленная на исследование: КХД диаграммы в малоизученной области большой барионной плотности, где КХД на решетке не эффективен; спиновой структуры нуклонов; а также широкого спектра прикладных работ.

2018: Начато формирование международных научных коллабораций Baryonic Matter at Nuclotron (BM@N) Collaboration: 5 стран + ОИЯИ, 13 центров, 220 участников;

Multi Purpose Detector (MPD) Collaboration: начаты эксперименты



Коллаборация ARIADNA для прикладных и инновационных работ: 20 центров, > 150 участников; начаты исследования

Рис. 13. Состояние работ по подготовке научной программы фундаментальных и прикладных исследований на комплексе NICA.

Система электронного охлаждения (СЭО) коллайдера NICA ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН – родина электронного охлаждения и фабрика "электронных кулеров",

Впервые осуществлено электронное охлаждение пучка тяжелых ионов (NICA) В.В. Пархомчук, В.Б. Рева (ИЯФ СО РАН); И.Н. Мешков (ЛФВЭ, ОИЯИ)

Параметры кулера	Величина
Энергия электронов, МэВ	0,2 – 2,5
Ток электронных пучков, А	0,1 – 1,0
Длина секции охлаждения, м	6,0
Магнитное поле соленоидов, Тл	0,05 – 0,2
Однородность поля, $\Delta B/B$	$\leq 10^{-3}$

01-05 April 2024, Dubna

Рис. 14. Создание системы электронного охлаждения коллайдера NICA.

плотности, где применение КХД на решетке неэффективно; спиновой структуры нуклонов, а также широкого спектра прикладных работ. Разработаны проекты и активно ведутся работы по созданию двух уникальных установок в двух точках пересечения встречных пучков ионов: MPD (Multi-Purpose Detector) и SPD (Spin Physics Detector), сформированы и ведут активную деятельность соответствующие международные коллаборации. Разработана программа сопутствующих прикладных направлений исследований (рис. 13).

В ЛФВЭ ОИЯИ в сотрудничестве со специалистами ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН впервые осуществлено электронное охлаждение пучка тяжелых ионов (NICA) (рис. 14). В создание Системы электронного охлаждения коллайдера NICA основополагающий творческий вклад внесли В.В. Пархомчук, В.Б. Рева (ИЯФ СО РАН), И.Н. Мешков (ЛФВЭ, ОИЯИ) [43, 44].

6.3. Физика на электрон-позитронных коллайдерах. Развитие комплекса коллайдеров ИЯФ СО РАН

В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера проводятся крупномасштабные эксперименты по физике элементарных частиц на двух единственных работающих в России электрон-позитронных коллайдерах: ВЭПП-4М и ВЭПП-2000. Основное направление исследований — прецизионная проверка СМ и поиски Новой физики.

Начатые ровно 60 лет назад пионерские работы в этом направлении под руководством Г.И. Будкера и его ученика А.Н. Скринского родили новую эру в физике частиц — эру коллайдеров (рис. 15).

Эра электрон-позитронных коллайдеров
(ИЯФ СО РАН, И.Г. Будкер, А.Н. Скринский)
Проверка СМ и поиски "Новой физики"

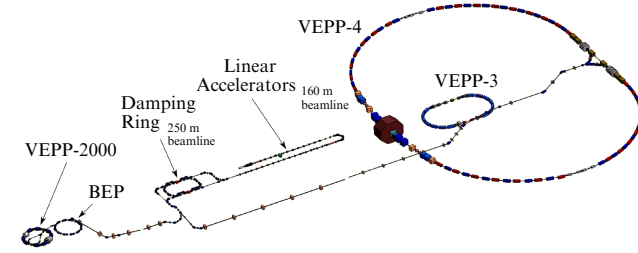


Рис. 15. Коллайдеры ИЯФ СО РАН.

Измерение адронных сечений на ВЭПП-2000

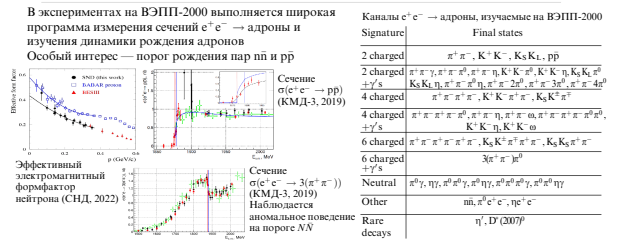


Рис. 17. Измерение адронных сечений на ВЭПП-2000.

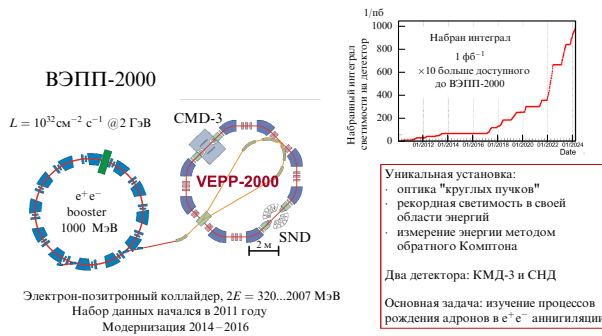


Рис. 16. Коллайдер ВЭПП-2000.

В ряду других электрон-позитронных коллайдеров, которые работают в мире, ВЭПП-2000 "закрывает" нишу самых малых энергий — от порога рождения адронов, приблизительно 300 МэВ в системе центра масс, до 2007 МэВ — немного выше порога рождения пар протон-антипротон и нейтрон-антинейтрон (рис. 16).

Коллайдер ВЭПП-2000 — крайне интересная установка с ускорительной точки зрения. В ней реализована уникальная оптическая схема "круглых" пучков, предложенная в Новосибирске. Благодаря такому решению удалось достичь рекордных параметров встречи и рекордной светимости в одногустковом режиме. Ещё одна особенность ВЭПП-2000 — это система непрерывного измерения и контроля энергии пучков, основанная на прецизионном измерении энергии комптоновских гамма-квантов, рождённых при рассеянии лазерного излучения на электронном пучке. Всё это позволило осуществить прецизионные измерения сечений e^+e^- аннигиляции в адроны, в особенности на пороге рождения $p\bar{p}$ - и $n\bar{n}$ -пар (рис. 17).

Одна из наиболее ярких задач физической программы ВЭПП-2000 связана с измерением адронного вклада в аномальный магнитный момент мюона.

Результаты измерения сечения рождения двух пионов, опубликованные экспериментом КМД-3 в 2023 г., поставили под сомнение наблюдавшееся в течение последних двух десятилетий отличие между расчётным и измеренным значениями аномального магнитного момента мюона. Измерение КМД-3, основанное на рекордной статистике и тщательном анализе данных, согласуется с предсказанием Стандартной модели, что является крайне значимым достижением (рис. 18).

Нельзя хотя бы кратко не отметить выдающиеся достижения ИЯФ СО РАН в технологии электронного



Рис. 18. Работы ИЯФ СО РАН по измерению аномального магнитного момента мюона.



Рис. 19. Работы ИЯФ СО РАН по технологии электронного охлаждения.

охлаждения ускоренных пучков адронов и тяжёлых ядер. В 2024 г. в Новосибирске будет отмечаться 50-летие этого достижения отечественной науки мирового уровня, связанного с именем В.В. Пархомчука и его ближайших коллег (рис. 19).

6.4. Исследования экзотических адронных состояний. Поиски Новой физики в редких распадах К-мезонов. Комплекс адронных ускорителей НИЦ КИ – ИФВЭ

В экспериментах на ускорительном комплексе У-70 на установке ГАМС в 1984–1997 гг. было получено первое указание на существование экзотического адронного состояния — так называемого глюбола — связанной бесспиновой системы глюонов.

В совместном эксперименте ИФВЭ, ИЯИ РАН и ОИЯИ на установке "ОКА", работающей на вторичном

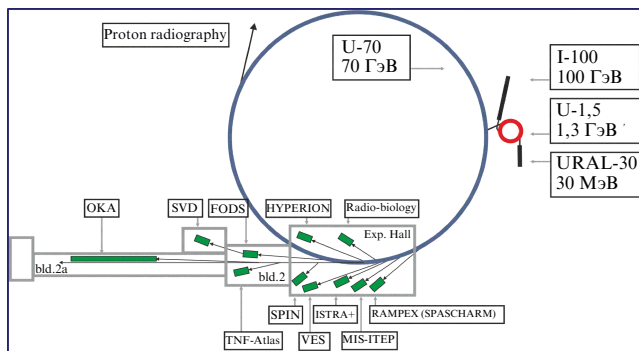


Рис. 20. Комплекс адронных ускорителей НИЦ КИ – ИФВЭ.



Рис. 21. Комплекс сверхточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН.

сепарированном пучке синхротрона У-70, в период 2014–2024 гг. были проведены исследования по поиску Новой физики в распадах заряженных К-мезонов (рис. 20).

6.5. Исследования в области ядерной физики промежуточных энергий высокой интенсивности. Многоцелевой комплекс сверхточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН

За прошедшие 25 лет на установках этого многоцелевого научного комплекса проведено 139 сеансов работы ускорителя общей продолжительностью более 40 тысяч часов с результатами в области ядерной физики, медицинской физики, а также в развитии технологии производства радиоизотопов (рис. 21). Приведена схема комплекса сверхточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН с перечнем основных объектов [45, 46].

6.6. Фундаментальная ядерная физика с нейтронами

Прецизионные измерения времени жизни нейтрона в ПИЯФ с гравитационной ловушкой УХН радикально изменили значение этой фундаментальной величины в 2005 г. и ликвидировали противоречие со Стандартной моделью. В дальнейшем этот результат был подтвержден измерениями ПИЯФ с магнитной ловушкой УХН, а также измерениями в LANL (США).

На реакторе СМ-3 в Димитровграде создана нейтринная лаборатория и выполнен эксперимент по поиску осцилляций антинейтрино в стерильное состояние.

Наблюдён эффект осцилляций нейтрино с параметрами: $\Delta m_{14}^2 = 7,3 \text{ эВ}^2$ и $\sin^2(2\theta_{14}) = 0,36 \pm 0,12_{\text{stat}}$. Если данный эффект будет подтвержден на новом уровне

Прецизионные измерения времени жизни нейтрона и нейтринной асимметрии распада нейтрона в ПИЯФ

Прецизионные измерения времени жизни нейтрона в ПИЯФ с гравитационной ловушкой УХН радикально изменили значение этой фундаментальной величины в 2005 году и ликвидировали противоречие со Стандартной Моделью. В дальнейшем результат был подтвержден измерениями ПИЯФ с магнитной ловушкой УХН, а также измерениями LANL.

Время жизни нейтрона (с):
ПИЯФ – 878,4 (0,4); PDG – 879,4 (0,6)

НЕЙТРИННАЯ ФИЗИКА НА РЕАКТОРЕ СМ-3
поиск стерильных нейтрино

Наблюдён эффект осцилляций нейтрино с параметрами $\Delta m_{14}^2 = 7,3 \text{ эВ}^2$ и $\sin^2(2\theta_{14}) = 0,36 \pm 0,12_{\text{stat}}$

Рис. 22. Направления исследований, проводимых в НИЦ КИ – ПИЯФ, в области фундаментальной ядерной физики с нейтронами.

точности, это будет означать открытие стерильного нейтрино — новой элементарной частицы, выходящей за рамки Стандартной модели.

Для проверки эффекта осцилляций на новом уровне точности (выше пяти стандартных отклонений) на СМ-3 созданы новая установка и вторая нейтринная лаборатория.

На рисунке 22 приведена информация об исследованиях, проводимых в НИЦ КИ – ПИЯФ, по прецизионному измерению времени жизни нейтрона и поиску осцилляций антинейтрино в стерильное состояние [47, 48].

7. Физика нейтрино и нейтринная астрофизика

Кроме ядерно-физических исследований, опирающихся на ускорительную технику, в нашей стране активно развиваются исследования в области физики нейтрино и нейтринной астрофизики на базе отечественных уникальных крупномасштабных нейтринных детекторов: на Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН (ПСТ, ГГНТ, "Ковёр"), на Байкальской глубоководной нейтринной обсерватории ИЯИ РАН, ОИЯИ (Baikal-GVD), а также исследования естественных потоков космических лучей высокой энергии и широких атмосферных ливней (ЯКУШАЛ, КОВЕР, Telescope Array) на уникальных комплексах наземных установок большой площади и высокой чувствительности, и станций мониторинга космических лучей, а также орбитальных детекторах космических аппаратов (НУКЛОН, ТУС, Pamela) и др.

Кроме того, учёные РФ и ОИЯИ внесли значительный вклад в результаты глобальных международных проектов BOREXINO (Италия), Daya Bay (Китай), T2K (Япония), NOvA (США), Telescope Array (США) [49, 50].

7.1. Масса нейтрино (антинейтрино)

Достоверно зарегистрированные переходы между нейтрино разных типов возможны лишь при ненулевой массе, но сама масса, несмотря на все усилия, в лабораторных условиях пока не измерена.

В период 1999–2019 гг. наиболее строгие в мире прямые ограничения на массу электронного антинейтрино были получены в исследованиях на установке ТРОИЦК-ню-масс (ИЯИ РАН) ($m_\nu < 2,05 \text{ эВ}$), созданной под руководством В.М. Лобашева (ИЯИ РАН) и П.Е. Спивака (НИЦ КИ) [51], продолженных совместно в рамках международного сотрудничества на установке



Рис. 23. Экспериментальные установки, позволившие получить наиболее строгие ограничения на массу антинейтрино.



Рис. 24. Экспериментальный зал и реакторы галлий-германиевого нейтринного телескопа в подземной лаборатории БНО ИЯИ РАН.

KATRIN (Германия), с результатом $m_{\nu} < 0,8$ эВ (2022 г.) [52] (рис. 23).

7.2. Физика солнечных нейтрино

Солнечные нейтрино рождаются в термоядерных реакциях в недрах звёзд и напрямую связаны с выделением энергии Солнца. Реакции синтеза могут идти по разным каналам.

Первые эксперименты, регистрирующие солнечные нейтрино, из-за высокого энергетического порога могли изучить лишь $\sim 10^{-5}$ их полного потока.

На **Галлий-германиевом нейтринном телескопе в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН** на Северном Кавказе был (рис. 24) впервые измерен интегральный поток солнечных нейтрино, включающий основной pp-канал, с точностью $\sim 5\%$ [53]. Экспериментально подтверждено, что источником энергии Солнца являются термоядерные реакции, и измерена их скорость. Достоверно показано наличие дефицита полного потока солнечных электронных нейтрино (ИЯИ РАН), объясняемое взаимными превращениями нейтрино разных типов.

Российские учёные внесли важный вклад в исследование солнечных нейтрино в эксперименте Борексино (ОИЯИ, НИЦ КИ, ПИЯФ, НИИЯФ МГУ).

Борексино — уникальный 100-тонный жидко-сцинтилляционный детектор в подземной низкофоновой лаборатории в Гран Сассо (Италия), специально разработанный для регистрации низкоэнергетичных солнечных нейтрино в режиме реального времени, использующий сцинтиллирующую жидкость с рекордно низким уровнем радиоактивных примесей (рис. 25).

Солнечные нейтрино II

Модель Солнца требует уточнения: не удаётся согласовать измерения солнечных нейтрино с результатами гелиосейсмологии и определения химического состава поверхности Солнца. Требуется раздельное измерение потоков нейтрино от разных каналов рождения

Borexino (ОИЯИ, НИЦ КИ, ПИЯФ, НИИЯФ МГУ в составе международного коллектива) — детектор на основе сверхчистого жидкого сцинтиллятора в подземной низкофоновой лаборатории Гран Сассо в Италии

Результат: впервые с помощью одного эксперимента измерены потоки солнечных нейтрино разных каналов. Впервые измерен поток нейтрино, рождённых в CNO цикле реакций. Получены указания в пользу модели Солнца с высокой металличностью

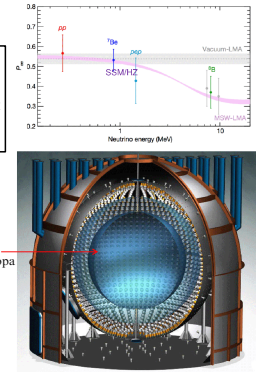


Рис. 25. Установка Борексино — 100-тонный жидко-сцинтилляционный детектор нейтрино в подземной низкофоновой лаборатории в Гран Сассо.

Институты России и ОИЯИ внесли значительный технологический вклад в создание и тестирование установки, а также важный интеллектуальный вклад в проект за счёт анализа данных, включая анализ редких процессов и моделирование физических явлений.

Главные результаты эксперимента:

- Борексино стал первым экспериментом, точно измерившим энергетические спектры нейтрино в pp-цепочке реакций термоядерного синтеза [54], тем самым сделавшим решающий вклад в решение загадки солнечных нейтрино.

- Особое значение имеют открытие и подтверждение теории нейтринных осцилляций и эффекта Михеева – Смирнова – Вольфенштейна [55, 56], ставшие ключом к пониманию процессов, протекающих в Солнце.

- Работа коллаборации впервые дала возможность наблюдения нейтрино от CNO-цикла [57], уточнив механизмы генерации энергии в Солнце. Получены указания в пользу модели Солнца с высокой металличностью.

- Борексино сделал первое достоверное наблюдение геонейтрино.

7.3. Нейтринная астрофизика высоких энергий

Астрофизические нейтрино с энергиями выше 10 ТэВ зарегистрированы IceCube (Южный полюс) в 2014 г. Их источники определить трудно из-за высокого фона событий атмосферного происхождения и низкой точности определения направлений прихода нейтрино во льду.

Российскими учёными (ИЯИ РАН, ОИЯИ, ИГУ, НИИЯФ МГУ, МИФИ) развёрнут крупнейший в Северном полушарии нейтринный телескоп Baikal-GVD кубокилометрового объёма (рис. 26).

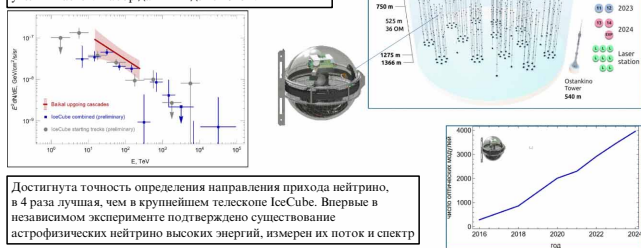
Baikal-GVD (ИЯИ РАН, ОИЯИ, ИГУ, НИИЯФ МГУ и др.) — глубоководный черенковский нейтринный телескоп в озере Байкал. Объём детектора в настоящее время около 0,7 км³ и ежегодно увеличивается. Набор данных идёт с 2018 г.

Достигнута точность определения направления прихода нейтрино, в четыре раза лучшая, чем в крупнейшем телескопе IceCube в Антарктиде [76, 77]. Впервые в независимом эксперименте подтверждено существование астрофизических нейтрино высоких энергий, измерен их поток и энергетический спектр.

Осуществляется программа дальнейшего развития этого уникального нейтринного детектора.

Нейтринная астрофизика высоких энергий

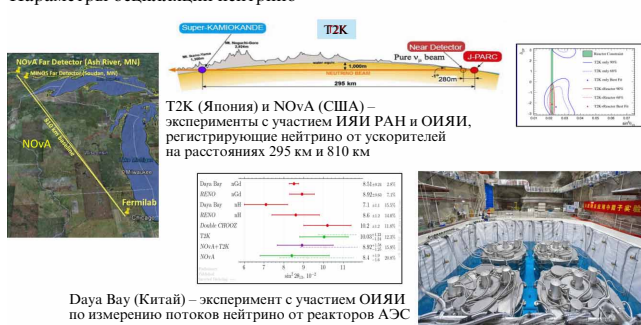
Baikal-GVD (ИЯИ РАН, ОИЯИ, ИГУ, НИИЯФ МГУ, ...) – глубоководный черенковский нейтринный телескоп в озере Байкал, крупнейший в Северном полушарии. Объём детектора около 0,7 км³ и ежегодно увеличивается. Набор данных идёт с 2018 г.



Достигнута точность определения направления прихода нейтрино, в 4 раза лучшая, чем в крупнейшем телескопе IceCube. Впервые в независимом эксперименте подтверждено существование астрофизических нейтрино высоких энергий, измерен их поток и спектр

Рис. 26. График роста числа оптических модулей глубоководного телескопа Baikal-GVD.

Параметры осцилляций нейтрино



T2K (Япония) и NOvA (США) – эксперименты с участием ИЯИ РАН и ОИЯИ, регистрирующие нейтрино от ускорителей на расстояниях 295 км и 810 км

Daya Bay (Китай) – эксперимент с участием ОИЯИ по измерению потоков нейтрино от реакторов АЭС

Рис. 27. Схемы экспериментов по исследованию нейтринных осцилляций на большой базе пролёта, проводимых с участием учёных России и ОИЯИ.

7.4. Параметры осцилляций нейтрино

Переходы нейтрино трёх типов друг в друга (осцилляции) описываются шестью параметрами. Некоторые из них измерены недостаточно точно.

Участие учёных России (ИЯИ РАН, ОИЯИ и др.) в составе международных коллективов в создании и работе лучших мировых установок Daya Bay (КНР), T2K (Япония), NOvA (США) и др. позволило получить наиболее точные измерения параметров осцилляций. Получено указание на нарушение CP-симметрии в процессах с участием нейтрино, что является основой модели лептогенезиса для объяснения барионной асимметрии Вселенной.

На рисунке 27 приведены схемы экспериментов по исследованию нейтринных осцилляций на большой базе пролёта, проводимых с участием учёных России и ОИЯИ.

8. Физика космических лучей и проблемы астрофизики высоких энергий

8.1. Структура спектров галактических космических лучей

Детальное изучение спектров космического излучения в диапазоне 10¹²–10¹⁷ эВ, ставшее возможным благодаря современным инструментам, созданным российскими учёными и специалистами, необходимо для понимания нетепловых процессов в нашей Галактике.

Структура спектров галактических космических лучей

Детальное изучение спектров космического излучения в диапазоне 10¹²–10¹⁷ эВ, ставшее возможным благодаря современным инструментам, необходимо для понимания нетепловых процессов в нашей Галактике



НУКЛОН (МГУ, ОИЯИ, МИФИ) – астрофизический детектор на борту космического аппарата Ресурс-П12

TAIGA (МГУ, ИГУ, ОИЯИ, ИЯИ РАН, ИГУ, АлГУ) – астрофизический комплекс для изучения космических лучей и гамма-астрономии в Тункинской долине

АТИС (НИИЯФ МГУ в международном коллективе) – стратосферный эксперимент в Антарктиде, 2000–2008

Рис. 28. Действующие на территории РФ установки и астрофизические комплексы для изучения спектров космического излучения.

Речь идёт об установках (рис. 28):

АТИС (НИИЯФ МГУ в международном коллективе) – стратосферный эксперимент в Антарктиде (2000–2008 гг.) [74];

НУКЛОН (МГУ, ОИЯИ, МИФИ) – астрофизический детектор на борту космического аппарата Ресурс-П2 [66, 75];

ТАИГА (МГУ, ИГУ, ОИЯИ, ИЯИ РАН, МИФИ, ИГУ, АлГУ) – астрофизический комплекс для изучения космических лучей и гамма-астрономии в Тункинской долине [76].

Первичный энергетический спектр космических лучей был измерен на установке **Tunka-133** [76].

Результаты: открыты существенные отличия спектров галактических космических лучей от степенных, что требует новой астрофизической интерпретации. Впервые проведены орбитальные измерения спектра в диапазоне энергий, позволяющем провести прямую калибровку наземных экспериментов.

8.2. Позитроны в галактических космических лучах

Присутствие антивещества, в частности позитронов, в космических лучах высокой энергии – важный маркер нестандартных астрофизических процессов или новой физики частиц.

Физики МИФИ, ФИАН, ФТИ им. Иоффе РАН в составе международного коллектива внесли вклад в эксперимент PAMELA – орбитальный детектор на борту космического аппарата Ресурс-ДК1 (2006–2016 гг.) [77] (рис. 29).

Результат: открыто существенное отличие спектра космических позитронов с энергиями 10–100 ГэВ от предсказаний астрофизических моделей, что указывает на вклад неизвестных процессов в Галактике или на проявление частиц тёмной материи.

В 2008 г. результат признан одним из главных прорывов года наряду с запуском Большого адронного коллайдера.

8.3. Космические лучи предельно высоких энергий

Космические частицы с энергиями выше 10¹⁸ эВ регистрируются по их взаимодействию с атмосферой. Потоки их быстро падают с энергией, а происхождение пока не установлено.

Большой вклад в изучение этой области энергии космических лучей внесли исследования на детекторах и установках (рис. 30):



Рис. 29. Результаты участия физиков России в астрофизическом эксперименте РАМЕЛА.



Рис. 30. Установки для изучения космических лучей максимально высоких энергий.

ТУС (МГУ, ОИЯИ) — детектор космических лучей с энергиями выше 10^{20} эВ на борту спутника "Ломоносов", регистрирующий флуоресцентное излучение от широких атмосферных ливней;

Telescope Array (штат Юта, ИЯИ РАН в составе международного коллектива) — крупнейшая в Северном полушарии установка, регистрирующая космические лучи.

Наземные установки исследования ШАЛ:
ЯКУШАЛ (ИКФИА СО РАН) [78];
КОВЕР (БНО ИЯИ РАН).

Результат: создан первый в мире орбитальный детектор космических лучей с энергией выше 10^{20} эВ. Проведена кросс-калибровка черенковского и мюонного метода определения состава космических частиц.

Учёными ИЯИ РАН в составе международного коллектива на установке Telescope Array (Юта, США) с помощью флуоресцентного детектора одновременно измерены спектр и компонентный состав космических частиц с энергиями $10^{15.5}$ – 10^{18} эВ. Зарегистрировано уникальное событие с энергией $2,4 \times 10^{20}$ эВ, указывающее на существование близких к Земле астрофизических ускорителей экстремальных энергий [49].

9. Работы по высокопроизводительному компьютерингу (цифровая физика)

9.1. Российский ГРИД для интенсивных операций с данными (РДИГ)

На международном торжестве по поводу открытия бозона Хиггса в ЦЕРН в 2012 г. Генеральный директор

Консорциум Российский ГРИД для интенсивных операций с данными (РДИГ)



Рис. 31. Российский консорциум РДИГ для обеспечения интенсивных операций с данными и полномасштабного участия ОИЯИ и России в экспериментальной программе на Большом адронном коллайдере.

Рольф-Дитер Хойер сказал: "Успех этого открытия обусловлен тремя факторами: ускоритель, детекторы и распределённый компьютеринг!"

В 2003 г. был образован Российский консорциум РДИГ (Российский Грид для интенсивных операций с данными) для обеспечения полномасштабного участия ОИЯИ и России в осуществлении проекта LCG (LHC Computing Grid), основная задача которого — создание глобальной инфраструктуры региональных центров для хранения, обработки и анализа данных физических экспериментов на Большом адронном коллайдере.

9.2. Комплексы грид в России

В 2014 г. было создано два центра грид в России: Tier1 – ОИЯИ для хранения и обработки данных эксперимента CMS LHC и Tier1 – НИЦ КИ для поддержки ALICE, ATLAS, LHCb.

В России реализуется программа масштабных научных проектов, важнейшей частью которых является развитие распределённых гетерогенных компьютерных систем (включая системы с экстремально параллелизмом) для обработки, хранения, анализа экспериментальных данных, разработка и внедрение эффективных методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования физических систем, математической обработки и анализа экспериментальных данных, развитие методов машинного обучения, искусственного интеллекта, квантовых вычислений. Для решения этой масштабной задачи необходимо развивать распределённую компьютерную инфраструктуру, объединяющую ключевые научные и образовательные институты, участвующие в проектах мегасайенс — РДИГ-М.

Созданный в феврале 2024 года консорциум на базе ОИЯИ, НИЦ "Курчатовский институт" и ИСП РАН должен стать ядром для IT-обеспечения исследовательской инфраструктуры класса "мегасайенс" в нашей стране [79] (рис. 31).

10. Необходимость перехода к новому этапу развития фундаментальной ядерной физики в РФ

В Секции ЯФ РАН наметилась новая динамика консолидации физиков-экспериментаторов, теоретиков и разработчиков ускорителей, уникальных детекторов и

мощных информационно-вычислительных средств в выработке ответов на непростые вызовы современного этапа.

Это означает, что физики-ядерщики Секции ЯФ РАН готовы предложить стране новые идеи, новые экспериментальные исследования мирового уровня на основе современной исследовательской инфраструктуры, новых прорывных технологий для детекторов и цифровой обработки данных.

Опубликована Дорожная карта развития фундаментальной ЯФ, опубликован доклад "Развитие ускорителей для фундаментальной науки, медицины и передовых технологий", принято решение Научного совета по физике частиц о разработке Дорожной карты по ФВЭ и физике элементарных частиц.

В основу этой Дорожной карты могут быть положены предложения научных организаций России и ОИЯИ по модернизации, развитию и созданию на территории РФ в 2024–2030 гг. ускорителей и научных комплексов [80, 81].

Перечислим основные из этих ускорительных проектов:

1. Ускорительный комплекс на встречных пучках (NICA – ОИЯИ).

2. Комплекс циклотронов для синтеза сверхтяжёлых элементов, исследований экзотических ядерных состояний (ЛЯР – ОИЯИ).

3. Ускорительный нейтронный комплекс (ИЯИ РАН).

4. Развитие комплекса адронных ускорителей (НИЦ КИ – ИФВЭ).

5. Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000 (ИЯФ СО РАН).

6. Центр коллективного пользования "Сибирский кольцевой источник фотонов" ЦКП СКИФ.

7. Ускорительный комплекс с источником комптоновских гамма-квантов для исследований в области ядерной фотоники в НЦФМ, Росатом.

8. Синхротронный комплекс РФЯЦ ВНИИЭФ.

9. Электронно-позитронный коллайдер "Супер чарм-тау фабрика".

10. Синхротронный источник и лазер на свободных электронах СИЛА – НИЦ КИ.

11. Электрон-ионный коллайдер для ядерной физики — проект DERICA.

Приведём некоторые иллюстрации к упомянутым выше проектам.

Начнём с комплекса NICA, создание которого было начато в 2016 г. в ОИЯИ, основными объектами которого являются (рис. 32а) каскад ускорителей (два инжектора, Бустер, Нуклотрон, Коллайдер) и три исследовательские установки: BM@Nuclotron, MPD, SPD.

О состоянии работ по сооружению комплекса можно судить по имеющейся в моём распоряжении фотографии общего вида комплекса с "птичьего полёта" летом 2024 года (рис. 32б).

Продолжая тему о предлагаемых и уже реализуемых в настоящее время новых проектах в области фундаментальной ядерной физики, начнём с реализуемого в Новосибирске проекта СКИФ (Сибирский Кольцевой Источник Фотонов), источник синхротронного излучения поколения 4+ с энергией пучка 3 ГэВ (рис. 33).

Продолжим развитием комплекса адронных ускорителей НИЦ КИ – ИФВЭ в Протвино (Московская область), проект которого связан с реализацией задач,



Рис. 32. Общий план научного комплекса NICA с его основными структурными объектами.

Сибирский Кольцевой Источник Фотонов
источник синхротронного излучения поколения 4+ с энергией пучка 3 ГэВ

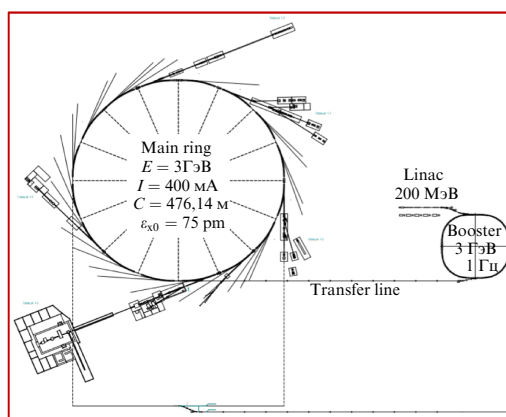


Рис. 33. Схема проекта СКИФ (Сибирский Кольцевой Источник Фотонов).

предусмотренных Постановлением Правительства РФ от 16 марта 2020 г. № 287 об утверждении федеральной научно-технической программы "Развитие синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 годы" в составе Национального проекта "Наука и университеты" (рис. 34), модернизацией Сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ММФ и развитием Мощного Ускорительного Нейтронного Комплекса ИЯИ РАН (МУНК) в г. Троицке (Москва) (рис. 35).

Цель проекта МУНК — создание сверхпроводящего (СП) линейного ускорителя протонов с параметрами 1 МА, 1 ГэВ — и замены им существующего "тёплого" (НП) ускорителя ММФ в ИЯИ РАН.

Назначение сверхпроводящего линака состоит в повышении средней мощности протонного пучка, что

Развитие комплекса адронных ускорителей НИЦ КИ–ИФВЭ
Протвино, Московская область



Рис. 34. Схема ускорительного комплекса НИЦ КИ–ИФВЭ.

Мощный Ускорительный Нейтронный Комплекс ИЯИ РАН

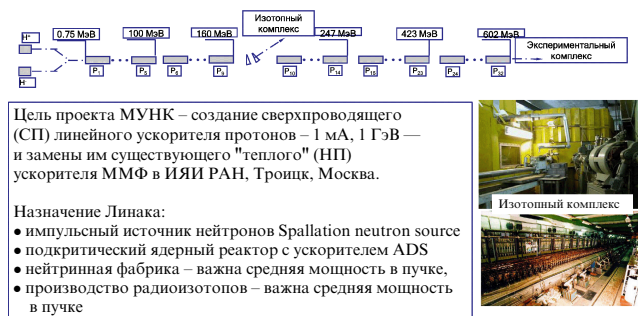


Рис. 35. Схема сильноточного ускорительного комплекса с мощным источником нейтронов ИЯИ РАН.

Синхротронный комплекс РФЯЦ-ВНИИЭФ

для испытаний радиационно-стойкой электронной компонентной базы и радиоэлектронной аппаратуры на стойкость к воздействию ионизирующих излучений космического пространства



Рис. 36. Проект синхротронного комплекса РФЯЦ-ВНИИЭФ.

необходимо для создания импульсного источника нейтронов (Spallation neutron source), создания подкритического ядерного реактора с ускорителем для работ по технологии ADS, создания нейтринной фабрики и для производства радиоизотопов.

Продолжим созданием в Сарове Синхротронного комплекса РФЯЦ-ВНИИЭФ для испытаний радиационно-стойкой электронной компонентной базы и радиоэлектронной аппаратуры на стойкость к воздействию ионизирующих излучений космического пространства (рис. 36).

Отметим проект создания в ИКИ НЦФМ в Сарове Ускорительного комплекса с источником комп-

ИКИ НЦФМ Саров

Основные научные направления:

- Прикладные исследования с монохромным рентгеном (1)
- Ядерная фотоника (2)
- Адронная фотоника (3)
- Излучение ультравысокой интенсивности (4)
- Задачи ВНИИЭФ по Спектметрии (5)
- Фунд. свойства нуклонов (6)

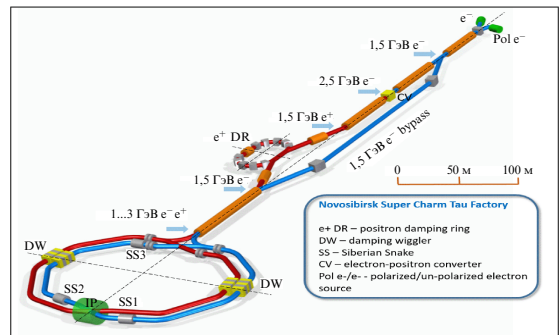
QR code and website information: Сайт проекта ИНОК https://ncphm.ru/inok



источник (квази)монохроматических рентгеновских и γ -квантов, основанный на эффекте обратного комптоновского рассеяния фотонов на релятивистских электронах

Рис. 37. Структура проекта ускорительного комплекса ИКИ НЦФМ с источником комптоновских гамма-квантов. ИНОК — Источник На основе Обратного эффекта Комптона.

Электрон-позитронный коллайдер "Супер Чарм-Тау Фабрика" (ИЯФ СО РАН)



Супер Чарм-Тау Фабрика – коллайдер с энергией в системе центра масс сталкивающихся частиц $\sim 3-7$ ГэВ и со светимостью, существенно превышающей достигнутую на установках в этом диапазоне энергий, для исследований по физике тяжёлых кварков и очарованных мезонов и барионов.

Рис. 38. Схема проекта электрон-позитронного коллайдера "Супер чарм-тау фабрика".

тоновских гамма-квантов для исследований в области ядерной фотоники. Речь идёт об источнике (квази)монохроматических рентгеновских и гамма-квантов, основанном на эффекте обратного комптоновского рассеяния фотонов на релятивистских электронах (рис. 37).

Закончим, наконец, необходимостью реализации давнейшей мечты физиков Новосибирска о создании нового электрон-позитронного коллайдера "Супер чарм-тау фабрика" (ИЯФ СО РАН). Проект этого комплекса оптимизирован для работы с энергией в системе центра масс сталкивающихся частиц $\sim 3-7$ ГэВ и со светимостью, существенно превышающей достигнутую на установках в этом диапазоне энергий (рис. 38). В этом диапазоне рождаются практически все состояния чармония, очарованных мезонов и барионов, содержащих один с-кварк или один с-антикварк.

11. Инфраструктура исследований в области физики нейтрино и нейтринной астрофизики

В ряду амбициозных проектов нового этапа развития фундаментальной ядерной физики нельзя не упомянуть и необходимость развития работ в области физики нейтрино и нейтринной астрофизики, о которых уже говорилось выше, в частности, необходимости дальнейшего



Рис. 39. Торжественный запуск крупнейшего в Северном полушарии глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD.

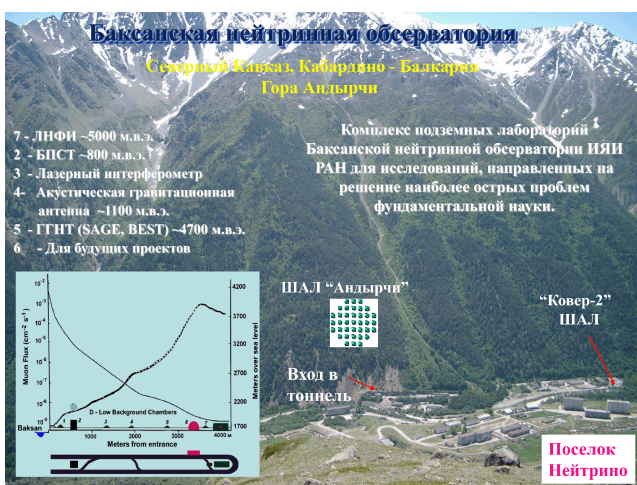


Рис. 40. Комплекс подземных и наземных установок Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН на Северном Кавказе.

наращивания эффективного объёма уникального по своим возможностям глубоководного нейтринного телескопа BAIKAL-GVD вплоть до нескольких кубоклометров и расширения ведущей в этом направлении исследования коллаборации.

Действенную помощь в расширении участвующих в этих исследованиях научных организаций и университетов может играть и Министерство науки и высшего образования РФ. 13 марта 2021 г. в Иркутской области на льду Байкала состоялись торжественный запуск крупнейшего в Северном полушарии глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD и подписание меморандума о взаимопонимании Минобрнауки России и ОИЯИ по развитию байкальского глубоководного нейтринного телескопа (рис. 39).

Учитывая, что наблюдаемые на установках IceCube и Baikal-GVD события при экстремально высоких энергиях нейтрино требуют для их полноценной интерпретации данные подземных детекторов глубокого заложения и наземных установок большой площади, необходимо предусматривать их модернизацию и развитие. В этой связи считаю совершенно необходимым обеспечить развитие Баксанской нейтринной обсерватории на Северном Кавказе — единственного в нашей стране специализированного подземного научного комплекса глубокого заложения (рис. 40).

12. Нейтронные исследования

Следует сказать о нейтронных исследованиях на реакторах и импульсных источниках нейтронов. Однако в этих исследованиях грань между задачами фундаментальной и прикладной физики достаточно размыта, что позволяет мне, учитывая недостаток времени, предельно сократить анализ их результатов и тенденций развития.

Не могу хотя бы кратко не упомянуть совместные с Саровом работы по протонной радиографии на пучках ускорителя У-70 в Протвино, по подготовке программы исследований по физике ультрахолодных нейтронов в Гатчине, а также работы по муонографии, позволяющей на основе анализа степени поглощения космических муонов в изучаемом объекте в зависимости от направления осуществлять поиск внутренних особенностей протяжённых структур (размером от нескольких метров до километров) без нарушения их целостности (рис. 41).

Ну и, конечно, должен сказать об утверждённой Президентом РФ Федеральной научно-технической программе развития синхротронных и нейтронных исследований в интересах науки, отраслевой промышленности и здравоохранения.

В качестве примера планируемых к реализации работ в области нейтронных исследований отмечу проект по формированию Центра нейтронных исследований по физике конденсированных сред в Троицке (рис. 42), по развитию работ на реакторе ИБР-2 и разработке проекта импульсного источника нейтронов третьего поколения в Дубне (рис. 43).

В соответствии с приоритетами Федеральной научно-технической программы выполнены актуальные циклы нейтронных исследований атомной и магнитной структуры и микроскопической динамики новых функциональных материалов, материалов в экстремальных состояниях. Получены важные для практического использования новые данные о сечениях ядерных реакций с нейтронами. Расширяется применение нейтронных и муонных методик для исследования объектов культурного наследия. Существенные достижения реализованы в создании новых типов нейтронных детекторов и новых экспериментальных методик, что значительно расширяет горизонт доступных для изучения научных проблем.

В качестве примера использования нейтронных методов при исследовании объектов культурного наследия



Рис. 41. Примеры работ, проводимых в институтах РФ на реакторных и импульсных источниках нейтронов.



Рис. 42. Создание центра нейтронных исследований ИИИ РАН для физики конденсированных сред.



Рис. 43. Развитие работ на нейтронном комплексе ИБР-2М ЛНФ ОИИИ в Дубне.

отмечу для краткости лишь некоторые результаты использования нейтронов (рис. 44а) и космических мюонов (рис. 44б).

13. Развитие ядерно-физической медицины

Исследования в области ядерной биологии и ядерно-физической медицины — отдельная достаточно обширная область фундаментальных исследований и прикладных работ, опирающихся на подходы и методы ядерной физики, в частности, ускорительную технику, динамику пучков и т.п., чтобы её можно было адекватно обозреть в рамках данного обзора.

Поэтому я лишь кратко коснусь развития ядерно-физической медицины.

Первый в СССР протонный пучок с необходимыми параметрами для терапии онкологических заболеваний был сформирован в 1967 г. в ОИИИ (рис. 45).

В том же году начаты первые в стране радиобиологические и клинические исследования на пучках протонов фазотрона ЛЯП ОИИИ (синхроциклотрон с энергией протонов до 660 МэВ).

В ОИИИ впервые была разработана и успешно применена техника трёхмерного конформного облучения глубоко залегающих опухолей.

За время работы медицинского протонного пучка в Дубне пролечено более 1300 пациентов (менингиомы, хондромы, хондросаркомы, глиомы, астроцитомы и др.).

Развитие исследований в области ядерной медицины в интересах здравоохранения были продолжены в ряде

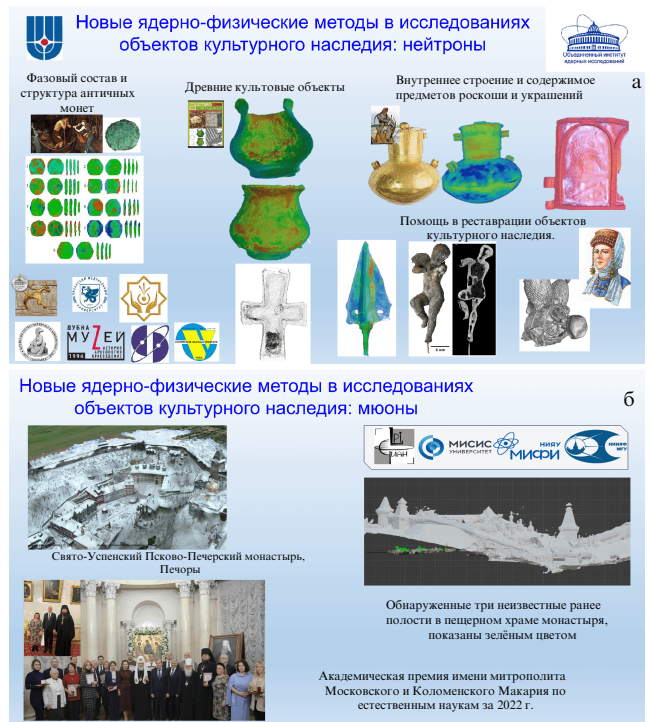


Рис. 44. Новые ядерно-физические методы в исследованиях объектов культурного наследия: (а) нейтроны (ОИИИ, НИЦ КИ), (б) мюоны (МИФИ, МИСИС, ФИАН).



Рис. 45. Примеры развития исследований в РФ в области ядерной медицины.

других институтов: ПИЯФ, ИИИ РАН, ФИАН, НИЦ КИ и др. (рис. 46).

В частности, в ОИИИ разработан новый проект отечественного сверхпроводящего компактного протонного циклотрона MSC-230 с параметрами, превосходящими зарубежные аналоги (рис. 47).

Работы по производству опытного образца ведутся на средства ОИИИ совместно с АО "НИИЭФА" имени Д.В. Ефремова (ГК Росатом).

ОИИИ и ФМБА России совместно разработали общую концепцию создания пилотного научно-клинического центра протонной терапии на базе существующего медицинского центра МСЧ № 9 ФМБА в Дубне.

К участию в этом проекте приглашены все заинтересованные организации. Отделениями физических наук и медицинских наук РАН приняты решения о поддержке этого проекта.



Рис. 46. Опыт Дубны в развитии протонной терапии онкологических заболеваний.



Рис. 48. Размещение проектов мегасайенс класса на территории России.

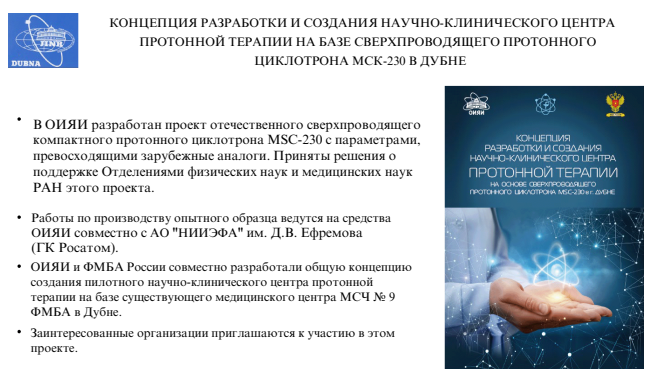


Рис. 47. Проект создания научно-клинического центра протонной терапии в Дубне.

Подытоживая сказанное выше о необходимости перехода к новому этапу развития фундаментальной ядерной физики в РФ, предусматривающему модернизацию действующих и создание новых передовых научных комплексов, относящихся прежде всего к мегасайенс классу, приведу на рис. 48 схему размещения мегасайенс проектов на территории России.

14. Выводы и заключение

В связи с наметившимся поворотом страны к экономике высоких технологий и связанным с этим увеличением государственной поддержки фундаментальной и прикладной науки институты РАН, ОИЯИ и НИЦ КИ, ведущие университеты выступают с предложениями по развитию ряда направлений научных исследований, которые используют ускорители в качестве основного инструмента для экспериментов, а также способны стать локомотивом высокотехнологического развития гражданской, оборонной промышленности, медицины, сельского хозяйства и др.

Предлагаемые физическим сообществом новые амбициозные проекты призваны обеспечить научное и технологическое лидерство в ряде областей ядерной физики и физики частиц и развивающихся на их основе инновационных технологий.

Ожидаемый в результате реализации предлагаемых проектов высокий потенциал научных открытий привлечёт к участию в них международное научное сообщество учёных и специалистов, послужит драйвером разви-

тия фундаментальной науки, высоких технологий и человеческого капитала страны.

В заключение хочу выразить глубокую признательность всем коллегам, внесшим свой вклад в подготовку доклада, прежде всего председателям Научных советов Секции ядерной физики ОФН РАН, моим коллегам — членам бюро Отделения, директорам Институты и руководителям важнейших направлений исследований в области фундаментальной и прикладной ядерной физики.

Мною было получено много важных и интересных материалов, объём которых значительно превышает возможности этого доклада. Понятно, что многие из моих коллег могли ожидать увидеть в докладе отражение или хотя бы упоминание о результатах их институтов и научных коллективов. К сожалению, не всегда это было возможно.

Тем не менее я надеюсь, что данная статья, опирающаяся на присланные мне для доклада материалы, поможет составить представление о нынешнем состоянии и важнейших научных достижениях в области фундаментальной ядерной физики за последние 25–30 лет, а также перспективах их развития, включая основанные на них прикладные направления исследований, разработки инновационных технологий, применения в медицине и в сфере образования.

Искренне благодарен Б.Ю. Шаркову и другим своим коллегам за помощь в подборе материала и определения структуры доклада и настоящей статьи.

Список литературы

1. ATLAS Collab., Aad G et al. *Phys. Lett. B* **716** 1 (2012)
2. CMS Collab., Chatrchyan S et al. *Phys. Lett. B* **716** 30 (2012)
3. Glashow S L *Nucl. Phys.* **22** 579 (1961); Weinberg S *Phys. Rev. Lett.* **19** 1264 (1967); Salam A "Weak and electromagnetic interactions", in *Elementary Particle Theory. Proc. 8th Nobel Symp., 19–25 May 1968, Lerum, Sweden* (Ed. N Svartholm) (New York: Wiley, Stockholm: Almqvist and Wiksell, 1968) p. 367
4. Рубаков В А *УФН* **182** 1017 (2012); Rubakov V A *Phys. Usp.* **55** 949 (2012)
5. Казаков Д И *УФН* **189** 387 (2019); Kazakov D I *Phys. Usp.* **62** 364 (2019)
6. Гинзбург И Ф *УФН* **179** 525 (2009); Ginzburg I F *Phys. Usp.* **52** 495 (2009)
7. Троицкий С В *УФН* **182** 77 (2012); Troitsky S V *Phys. Usp.* **55** 72 (2012)
8. Красников Н В, Матвеев В А *УФН* **174** 697 (2004); Krasnikov N V, Matveev V A *Phys. Usp.* **47** 643 (2004)

9. Красников Н В, Матвеев В А *Открытие бозона Хиггса и поиск новой физики на Большом адронном коллайдере при энергиях 7 и 8 ТэВ* (М.: КРАСАНД, 2015)
10. Боос Э Э и др. *УФН* **185** 1241 (2015); Boos E E et al. *Phys. Usp.* **58** 1133 (2015); Боос Э Э *УФН* **192** 697 (2022); Boos E E *Phys. Usp.* **65** 653 (2022)
11. Славнов А А, Фаддеев Л Д *Введение в квантовую теорию калибровочных полей* (М.: Наука, 1978); Пер. на англ. яз.: Faddeev L D, Slavnov A A *Gauge Fields, Introduction to Quantum Theory* (Reading, MA: Benjamin-Cummings, Advanced Book Program, 1980)
12. Горбунов Д С, Рубаков В А *Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва* (М.: ЛКИ-USSR, 2008) Пер. на англ. яз.: Rubakov V A, Gorbunov D S *Introduction to the Theory of the Early Universe: Hot Big Bang Theory* (Hackensack, NJ: World Scientific, 2017)
13. Blas D, Garny M, Ivanov M M, Sibiryakov S *JCAP* **2016** (07) 052 (2016); *JCAP* **2016** (07) 028 (2016)
14. Starobinsky A A *Phys. Lett. B* **91** 99 (1980); *Phys. Lett. B* **117** 175 (1982); Старобинский А А *Письма в ЖЭТФ* **30** 719 (1979); Starobinsky A A *JETP Lett.* **30** 682 (1979)
15. Rubakov V A, Sazhin M V, Veryaskin A V *Phys. Lett. B* **115** 189 (1982)
16. Asaka T, Shaposhnikov M *Phys. Lett. B* **620** 17 (2005)
17. Akhmedov E Kh, Rubakov V A, Smirnov A Yu *Phys. Rev. Lett.* **81** 1359 (1998)
18. Blinnikov S, Dolgov A, Porayko N K, Postnov K *JCAP* **2016** (11) 036 (2016)
19. Babichev E et al. *Phys. Rev. D* **108** 123529 (2023)
20. Levkov D G, Panin A G, Tkachev I I *Phys. Rev. Lett.* **118** 011301 (2017); *Phys. Rev. Lett.* **121** 151301 (2018)
21. Khmel'nitsky A, Rubakov V *JCAP* **2014** (02) 019 (2014); Докучаев В И, Ерошенко Ю Н *УФН* **185** 829 (2015); Dokuchaev V I, Eroshenko Yu N *Phys. Usp.* **58** 772 (2015)
22. Гниненко С Н, Красников Н В, Матвеев В А *УФН* **191** 1361 (2021); Gninenko S N, Krasnikov N V, Matveev V A *Phys. Usp.* **64** 1286 (2021)
23. Рябов В А, Царев В А, Цховребов А М *УФН* **178** 1129 (2008); Ryabov V A, Tsarev V A, Tskhovrebov A M *Phys. Usp.* **51** 1091 (2008)
24. Горбунов Д С *УФН* **184** 545 (2014); Gorbunov D S *Phys. Usp.* **57** 503 (2014)
25. Starobinsky A A *Phys. Lett. B* **91** 99 (1980)
26. Starobinsky A A *Письма в ЖЭТФ* **86** 183 (2007); *JETP Lett.* **86** 157 (2007)
27. Rubakov V A, Shaposhnikov M E *Phys. Lett. B* **125** 136 (1983)
28. Рубаков В А *УФН* **171** 913 (2001); Rubakov V A *Phys. Usp.* **44** 871 (2001)
29. Dubovsky S L, Rubakov V A, Tinyakov P G *JHEP* **2000** (08) 041 (2000); *Phys. Rev. D* **62** 105011 (2000)
30. Дремин И М, Кайдалов А Б *УФН* **176** 275 (2006); Drem'in I M, Kaidalov A B *Phys. Usp.* **49** 263 (2006)
31. Липатов Л Н *УФН* **178** 663 (2008); Lipatov L N *Phys. Usp.* **51** 631 (2008)
32. Oganessian Yu Ts, Utyonkov V K *Rep. Prog. Phys.* **78** 036301 (2015)
33. IUPAC Press Release: IUPAC Announces the Names of the Elements 113, 115, 117, and 118. Intern. Union of Pure and Applied Chemistry, <https://iupac.org/iupac-announces-the-names-of-the-elements-113-115-117-and-118/>
34. Dmitriev S, Itkis M, Oganessian Yu "Status and perspectives of the Dubna superheavy element factory", in *Proc. of the Nobel Symp. NS 160, Chemistry and Physics of Heavy and Superheavy Elements; EPJ Web Conf.* **131** 08001 (2016)
35. Oganessian Yu Ts et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **1033** 166640 (2022)
36. Oganessian Yu Ts et al. *Phys. Rev. C* **106** L031301 (2022); *Phys. Rev. C* **106** 064306 (2022)
37. Oganessian Yu Ts et al. *Phys. Rev. C* **106** 024612 (2022); *Phys. Rev. C* **108** 024611 (2023)
38. Сисакян А Н *УФН* **173** 328 (2003); Sissakian A N *Phys. Usp.* **46** 320 (2003)
39. Trubnikov G V et al., in *Particle Accelerator. Proc. of the 11th European Conf., EPAC 2008, Genoa, Italy, June 23-27, 2008* (Eds I Andrian, C Petit-Jean-Genaz) (Geneva: CERN, 2008) p. 2581
40. Kekelidze V et al. *Письма в ЭЧАЯ* **9** 521 (2012); *Phys. Part. Nucl. Lett.* **9** 313 (2012)
41. Аверичев А С и др. *Технический проект ускорительного комплекса NICA Т. I* (Под общ. ред. И Н Мешкова, Г В Трубникова) (Дубна: ОИЯИ, 2015) с. 17
42. Бутенко А В и др. *УФН* **193** 206 (2023); Butenko A V et al. *Phys. Usp.* **66** 195 (2023)
43. Диканский Н С и др. *УФН* **188** 481 (2018); Dikanskii N S et al. *Phys. Usp.* **61** 424 (2018)
44. Сидорин А О, Трубников Г В, Шурхно Н А *УФН* **186** 275 (2016); Sidorin A O, Trubnikov G V, Shurkhno N A *Phys. Usp.* **59** 264 (2016)
45. Кравчук Л В *УФН* **191** 1249 (2021); Kravchuk L V *Phys. Usp.* **64** 1186 (2021); Кравчук Л В *УФН* **180** 665 (2010); Kravchuk L V *Phys. Usp.* **53** 635 (2010)
46. Кравчук Л В "Ускорительный нейтронный комплекс ИЯИ РАН", в сб. *7-я Европейская конф. по нейтронному рассеянию, Санкт-Петербурге, 2019, Тезисы докладов*, с. 40
47. Серебров А П *УФН* **189** 635 (2019); Serebrov A P *Phys. Usp.* **62** 596 (2019)
48. Серебров А П *УФН* **185** 1179 (2015); Serebrov A P *Phys. Usp.* **58** 1074 (2015)
49. Троицкий С В *УФН* **191** 1333 (2021); Troitsky S V *Phys. Usp.* **64** 1261 (2021); Троицкий С В *УФН* **194** 371 (2024); Troitsky S V *Phys. Usp.* **67** 349 (2024)
50. Куденко Ю Г *УФН* **181** 569 (2011); Kudenko Yu G *Phys. Usp.* **54** 549 (2011)
51. Ачасов М Н и др. *УФН* **194** 60 (2024); Achasov M N et al. *Phys. Usp.* **67** 55 (2024)
52. Aseev V N et al. *Phys. Rev. D* **84** 112003 (2011)
53. The KATRIN Collab., Aker M et al. *Nature Phys.* **18** 160 (2022)
54. Abdurashitov J N et al. *Phys. Rev. C* **60** 055801 (1999)
55. The Borexino Collab., Agostini M et al. *Nature* **562** 505 (2018)
56. Wolfenstein L *Phys. Rev. D* **17** 2369 (1978)
57. Михеев С П, Смирнов А Ю *Ядерная физика* **42** 1441 (1985); Mikheev S P, Smirnov A Yu *Sov. J. Nucl. Phys.* **42** 913 (1985)
58. The Borexino Collab., Agostini M et al. *Nature* **587** 577 (2020)
59. Allakhverdyan V A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **526** 942 (2023)
60. Allakhverdyan V A et al. (Baikal-GVD Collab.) *Phys. Rev. D* **107** 042005 (2023)
61. An F P et al. *Phys. Rev. Lett.* **108** 171803 (2012)
62. Abe K et al. (T2K Collab.) *Phys. Rev. D* **91** 072010 (2015)
63. Adamson P et al. (NOvA Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **118** 231801 (2017)
64. The T2K Collab., Abe K et al. *Nature* **580** 339 (2020); *Nature* **583** E16 (2020) Correction
65. Chang J et al. *Nature* **456** 362 (2008)
66. Аткин Е и др. *Письма в ЖЭТФ* **108** 5 (2018); Atkin E et al. *JETP Lett.* **108** 5 (2018)
67. Budnev N M et al. *Astropart. Phys.* **117** 102406 (2020)
68. Панов А Д, Подорожный Д М, Турундаевский А Н *УФН* **194** 681 (2024); Panov A D, Podorozhnyi D M, Turundaevskii A N *Phys. Usp.* **67** 639 (2024)
69. Adriani O et al. *Nature* **458** 607 (2009)
70. Klimov P A et al. *Space Sci. Rev.* **212** 1687 (2017)
71. Ivanov A A, Knurenko S P, Sleptsov I Ye *New J. Phys.* **11** 065008 (2009)
72. Abbasi R U et al. *Astrophys. J.* **909** 178 (2021)
73. Telescope Array Collab., Abbasi R U et al. *Science* **382** 903 (2023)
74. Зацепин В И и др. *Изв. РАН. Сер. физическая* **68** 1593 (2004); Zatsepin V I et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **68** 1780 (2004)

75. Кудряшов И А и др. *Изв. РАН. Сер. физическая* **87** 927 (2023); Kudryashov I A et al. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **87** 870 (2023)
76. Budnev N M et al. *Astropart. Phys.* **117** 102406 (2020)
77. Adriani O et al. (Pamela Collab.) *Nature* **458** 607 (2009)
78. Глушков А В, Правдин М И, Сабуров А В *Ядерная физика* **81** 535 (2018); Glushkov A V, Pravdin M I, Saburov A V *Phys. Atom. Nucl.* **81** 575 (2018)
79. Кореньков В В *Ядерная физика* **83** 534 (2020); Korenkov V V *Phys. Atom. Nucl.* **83** 965 (2020)
80. Григоренко Л В и др. *УФН* **189** 721 (2019); Grigorenko L V et al. *Phys. Usp.* **62** 675 (2019)
81. Григоренко Л В (Ред.) "Дорожная карта" в области ядерной физики (М.: РАН, 2021)

The most important achievements in studies of fundamental problems in nuclear physics over the past 25–30 years and their prospects

V.A. Matveev

Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, prosp. 60-letiya Oktyabrya 7a, 117312 Moscow, Russian Federation
Joint Institute for Nuclear Research, ul. Joliot-Curie 6, 141980 Dubna, Moscow region, Russian Federation
 E-mail: matveev@jinr.ru

This review is based on a report delivered on May 27, 2024 at the Scientific Session of the General Meeting of the Physical Sciences Division of the Russian Academy of Sciences, "Tricentennial of the Academy, Achievements of and Progress in Physical Sciences in the 21st Century." It covers the most important achievements in studying fundamental problems in nuclear physics over the past 25–30 years and prospects for further progress in this area. The report is focused on the contribution of Russian researchers to the global advancement that has occurred over recent decades in the study of fundamental problems in nuclear physics, including elementary particle physics and high-energy physics, relativistic nuclear physics and heavy ion physics, neutrino physics and neutrino astrophysics, and the physics of ultra-high-energy cosmic rays. Presented are the achievements of Russian scientists in theoretical physics and cosmology, which largely determine the successes in the exploration of the basic properties of matter. The contribution of Russian researchers to the implementation of major international projects, which has largely been a driver of their progress in recent decades, in particular, the discovery of the Higgs boson, is outlined. The current state and projects for the development of the research infrastructure of Russian research institutions are reviewed. The important role of progress in accelerator science and technology in exploring fundamental problems in nuclear physics is highlighted. Particular attention is paid to mega-science nuclear physics projects currently being developed and implemented in Russia and to emerging update of the strategy for the development of physical research and innovative technologies based on their results, which benefit the economy, education, and health care.

Keywords: fundamental problems, nuclear physics, theoretical physics, particle physics, Standard Model, heavy ions, accelerators and colliders, neutrino physics, neutrino astrophysics, physics of superheavy elements, high-performance computing, cosmology, dark matter, neutron physics, neutron beam research, synchrotron radiation beam research, proton therapy

PACS numbers: **12.60. – i**, **26.65. + t**, **29.20. – c**, **87.56. – v**

Bibliography — 81 references

Received 30 September 2024, revised 9 November 2024

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **194** (12) 1250–1269 (2024)

Physics – Uspekhi **67** (12) (2024)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.05.039792>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2024.05.039792>