

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

В. А. Бедняков, Н. А. Русакович

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

ВВЕДЕНИЕ	633
ГЛАВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ. ПОИСК «НОВОЙ» ФИЗИКИ И КХД-СТРУКТУРА АДРОНОВ И ЯДЕР	639
ЗАДАЧИ ОИЯИ В СОВРЕМЕННОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКЕ ЧАСТИЦ	661
ОИЯИ в передовых исследованиях на LHC. Эксперименты ATLAS и CMS	662
ОИЯИ в современной нейтринной физике	665
ОИЯИ в физике флейвора. Косвенный поиск «новой» физики	674
NICA — будущее ОИЯИ в релятивистской физике тяжелых ионов	676
ОИЯИ в исследованиях структуры нуклонов и основ КХД	677
Задача ОИЯИ в физике атомного ядра с точки зрения КХД	681
Задачи ОИЯИ в области физики конденсированного состояния материи	681
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	683
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	684

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

В. А. Бедняков, Н. А. Русакович

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В 2016 г. исполнилось 60 лет со дня основания Объединенного института ядерных исследований в Дубне — международной межправительственной организации, ведущей исследования в области фундаментальной физики элементарных частиц, атомных ядер и конденсированного состояния вещества. Пройден большой и очень результативный путь. Если оглянуться назад, становится ясно, что международность и многоплановость исследований — гарантия успешного развития (и сохранения) фундаментальной науки. Это наблюдение оказалось особенно актуальным в экспериментальной области исследований. В обзоре на основе краткого описания важнейших результатов, достигнутых в ОИЯИ, сделана попытка заглянуть в будущее (на 7–10 лет) и показать место Института в решении важнейших задач физики элементарных частиц — фундаментальной области современного естествознания. Этот взгляд в будущее полон обоснованного оптимизма.

In 2016 the Joint Institute for Nuclear Research in Dubna, an international intergovernmental organization in the field of fundamental physics of elementary particles, atomic nuclei and condensed matter, celebrated 60 years since its foundation. A rather long and very effective route of development was fulfilled, looking back at which it becomes clear that internationality and multidisciplinary of scientific research is the guarantee of successful development (and preservation) of fundamental science. This observation was especially relevant in the experimental field of research. In the review, based on a brief description of the most important results achieved at JINR, an attempt was made to look (7–10 years) into the future and to foresee the Institute's place in solving the important modern problems of elementary particle physics, which is the most fundamental field of modern natural science. This glance into the future is full of reasonable optimism.

PACS: 01.52+g

ВВЕДЕНИЕ

Исследования по ядерной физике в СССР были начаты в годы Великой Отечественной войны по инициативе и под руководством академика И. В. Курчатова. В 1947 г. в 120 километрах от Москвы на берегу Волги

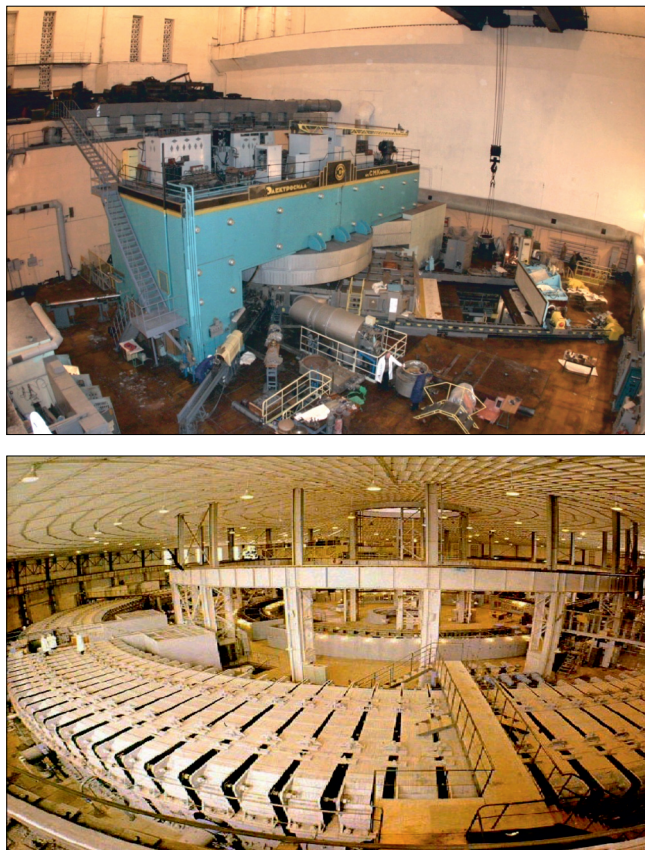


Рис. 1. Синхроциклотрон (вверху) и синхрофазотрон (внизу) — первые ускорители Дубны

началось строительство крупнейшего в то время ускорителя — синхроциклотрона (рис. 1, вверху), который был успешно запущен в декабре 1949 г. На нем под руководством М. Г. Мещерякова и В. П. Желепова были заложены основы современной физики элементарных частиц высоких энергий [1, 2]. На базе синхроциклотрона был создан Институт ядерных проблем АН СССР, ныне Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Желепова [3]. В 1949 г. под руководством В. И. Векслера началось проектирование большого ускорителя протонов — синхрофазотрона (рис. 1, внизу) и была образована Электрофизическая лаборатория АН СССР, ныне Лаборатория физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина [4].

Эти две лаборатории вошли в состав Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) — первой межправительственной научной организации

социалистических государств [5]. Соглашение о создании Объединенного института было подписано 26 марта 1956 г. представителями правительств 11 стран-учредителей. В 1957 г. в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ (директор В. И. Векслер) состоялся успешный запуск синхрофазотрона, на нем начались физические эксперименты. Были созданы три новые специализированные лаборатории: Лаборатория ядерных реакций (директор Г. Н. Флёрв), Лаборатория нейтронной физики (И. М. Франк) и Лаборатория теоретической физики, которую возглавил Н. Н. Боголюбов. В Лаборатории ядерных реакций началось строительство мощного циклотрона для ускорения тяжелых ионов, в Лаборатории нейтронной физики развернулось строительство уникального импульсного реактора на быстрых нейтронах. Эти установки были введены в действие в 1960 г. В 1966 г. в ОИЯИ была создана Лаборатория вычислительной техники и автоматизации (ныне Лаборатория информационных технологий). В 2005 г. была организована Лаборатория радиационной биологии (см., например, [6–8]).

Каждая лаборатория ОИЯИ представляет собой полноценный научно-исследовательский институт (рис. 2) как по численности, так и по вполне специализированному спектру решаемых задач.

Сегодня Объединенный институт ядерных исследований — это международная межправительственная организация 18 стран (рис. 3), в которой ведутся фундаментальные исследования по физике элементарных частиц, атомных ядер и конденсированного состояния вещества (см., например, [9, 10]). Заключены также соглашения о сотрудничестве ОИЯИ с Германией, Вен-



Рис. 2. Лаборатории ОИЯИ — полноценные научно-исследовательские институты



Рис. 3. Флаги стран-участниц ОИЯИ

грией, Италией, Южно-Африканской Республикой, Сербией. Высшим руководящим органом является Комитет полномочных представителей правительств стран-участниц. Он определяет всю деятельность ОИЯИ. На заседании этого органа выбирается руководство Института [7].

За прошедшие 60 лет многое изменилось в мире. Нет социалистического содружества, Организации Варшавского договора, Совета экономической взаимопомощи, великой страны под названием Советский Союз — все это, безусловно, отразилось на жизни Института. Однако в сложные 90-е гг. XX в. ОИЯИ выстоял благодаря усилиям многих видных ученых и государственных деятелей. Как пишет В. Г. Кадышевский, в первую очередь сыграли роль дальновидность и мудрость создателей ОИЯИ, традиции его научных школ, высочайший уровень проводимых исследований, уникальная научная база, самоотверженность и беззаветная преданность науке высококвалифицированного коллектива сотрудников Института [7].

Сегодня ОИЯИ — всемирно известный научный центр, уникальность которого состоит в том, что это, пожалуй, единственная научная организация, где уже 60 лет на самом высоком международном уровне успешно проводятся фундаментальные исследования в беспрецедентно широком спектре актуальных научных направлений [11].

Действительно, ОИЯИ — это передовая ядерная физика сверхтяжелых элементов с ее известным на весь мир «островом стабильности» и новыми элементами Периодической системы Менделеева, прецизионная ядерная спектроскопия и радиохимия, физика новых материалов и конденсированного состояния вещества, фундаментальные и прикладные работы с нейтронами, физика элементарных частиц сверхвысоких энергий, прецизионная нейтринная физика и астрофизика, теоретическая и математическая физика, самые современные информационно-коммуникационные и компьютерные техноло-

гии, передовая методика и техника экспериментов, радиобиология, генетика, биофизика, научно-методические и прикладные работы по протонной (адронной) терапии и т. д.

Во все эти исследования помимо европейских стран-участниц ОИЯИ полноценно вовлечены ученые из стран Африки, Азии и Латинской Америки. Поэтому научные интересы и научная политика ОИЯИ распространяются далеко за рамки Европы и имеют действительно глобальный характер. Здесь максимально широко на практике реализуется известный принцип «наука сближает народы» (см., например, [12, 13]).

Проверенное временем конструктивное триединство фундаментальности, международной и мультидисциплинарности проводимых в Дубне исследований — это та черта, которая существенно отличает ОИЯИ от Европейской организации ядерных исследований — ЦЕРН (см., например, [14, 15] и рис. 4), где, следует признать, в последнее время также взят курс на привлечение ученых не только из стран Европы.

Как известно, именно в силу фундаментальности научных исследований неизбежно возникает *новое* — *совершенно новые* знания, технологии, материалы, приборы и т. п. и улучшается, в конечном итоге, качество и безопасность жизни.

Многолетнюю стабильность успешной научно-исследовательской работы обеспечивают богатый опыт и высокая квалификация исполнителей. Как следствие появляется возможность наиболее эффективной передачи знаний молодому поколению ученых и инженеров, а также гарантируется необычайный потенциал научно-прикладной и инновационной деятельности в широком спектре возможных применений.

Естественно, все это делает ОИЯИ привлекательным для молодых исследователей разных национальностей — каждый всегда может найти для себя интересное дело самой высокой научной значимости. И в этом гарантия успешного будущего развития ОИЯИ.

В современных научных исследованиях, когда от идеи эксперимента до его результата порой проходят десятилетия, мультидисциплинарность обеспечивает постоянство в получении новых научных результатов сотрудниками ОИЯИ. Она связывает воедино все направления исследований на основе общего для всех стандарта ценностей и отношения к работе, единого стремления к фундаментальным знаниям, постоянного обмена опытом, оборудованием, идеями — в рамках открытого международного сотрудничества, необходимости и обязательности которого изначально была записана в основополагающих документах ОИЯИ [10].

Опыт прошедших трудных лет и логика развития науки показывают, что для успешного будущего ОИЯИ необходимо опираться на проверенные временем принципы фундаментальности, международной и мультидисциплинарности научных исследований.

CERN was founded 1954: 12 European States
Today: 20 Member States

- ~ 2300 staff
- ~ 790 other paid personnel
- > 10000 users
- Budget (2010) ~1100 MCHF

20 Member States: Austria, Belgium, Bulgaria, the Czech Republic, Denmark, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Italy, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom.

8 Observers to Council: India, Israel, Japan, the Russian Federation, the United States of America, Turkey, the European Commission and UNESCO

6 new applications for membership: Romania; Cyprus, Israel, Serbia, Slovenia and Turkey

<http://cern.ch/news/highlights>

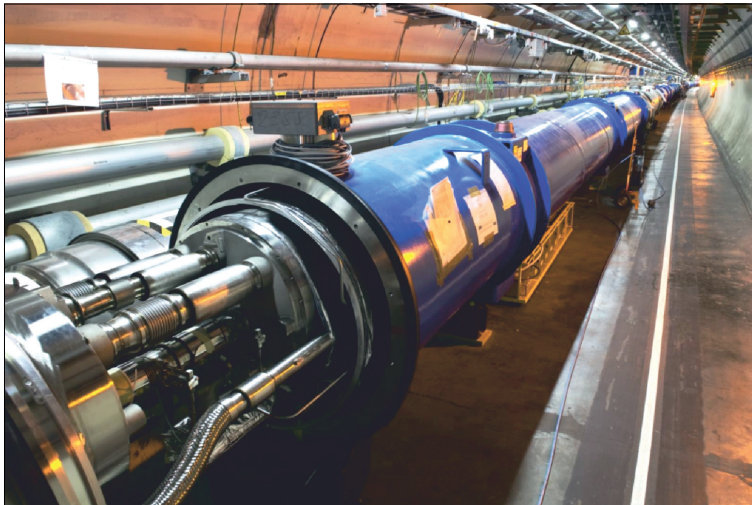


Рис. 4. Флаги стран-участниц Европейской организации ядерных исследований — ЦЕРН (вверху). Фрагмент коллайдера ЛНС — главной «жемчужины» ЦЕРН (внизу)

В связи с 60-летним юбилеем ОИЯИ представляется уместным обсудить в настоящем обзоре роль и значение этого института в современной физике элементарных частиц и атомного ядра, обратив основное внимание на экспериментальную составляющую исследований.

1. ГЛАВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ. ПОИСК «НОВОЙ» ФИЗИКИ И КХД-СТРУКТУРА АДРОНОВ И ЯДЕР

Физика элементарных частиц — наука о самых фундаментальных законах природы. Фундаментальность заложена в само ее основание и простирается от структуры мельчайших частиц материи до астрофизических масштабов космоса. Изучение взаимных превращений внутриатомных частиц дает ключ к пониманию законов, которые управляют всей Вселенной. По этим причинам физика элементарных частиц, являясь основой современной астрофизики и космологии, занимает центральное место на пути поиска совершенно новых знаний, без которых невозможно представить дальнейшее взаимодействие человека с природой. Именно в этой наиболее фундаментальной области, по словам Бруно Понтекорво, заложен огромный потенциал неожиданных открытий [16], способных, как показывает опыт, кардинально улучшать качество жизни. Наконец, как передовая методология, так и уникальная по самой своей сути приборная база физики элементарных частиц своим присутствием обогащают и стимулируют развитие всех сторон современного естествознания.

Стратегическая цель собственно физики элементарных частиц (вместе с астрофизикой и космологией) состоит в формировании нового единого физического мировоззрения, лишенного «недостатков» современной Стандартной модели слабых, электромагнитных и сильных взаимодействий (см., например, [17–20]), которая, в свою очередь, представляет собой выдающееся достижение человеческой мысли [21, 22]. Подтверждением тому служит открытие последнего недостающего элемента Стандартной модели — бозона Хиггса [23, 24] (рис. 5, внизу), а также прецизионное описание многочисленных данных на электрослабом масштабе энергий Большого адронного коллайдера LHC в ЦЕРН (см., например, [25–29]).

Стандартная модель, построенная в рамках квантовой теории поля, согласованно описывает все частицы (рис. 5, сверху) как возбуждения полей, организованных в соответствии с калибровочной симметрией $SU(2)_L \times U(1) \times SU(3)$, которая однозначно определяет характер взаимодействия между этими полями (частицами). Важнейший элемент Стандартной модели — специфическое скалярное поле Хиггса, приводящее к спонтанному нарушению $SU(2)_L \times U(1)$ симметрии (механизм Хиггса) и к возникновению масс у калибровочных W^\pm -, Z^0 -бозонов, кварков и лептонов за счет их взаимодействия с полем Хиггса.

Тем не менее Стандартная модель не может считаться единой непротиворечивой фундаментальной теорией — адекватной основой современного мировоззрения (см., например, [25, 26, 28]). Она лишь «низкоэнергетический предел» какой-то более фундаментальной теоретической концепции, которая

масса = 2.3 МэВ/c ² заряд = 2/3 спин = 1/2	масса = 1.275 ГэВ/c ² заряд = 2/3 спин = 1/2	масса = 1.73.07 ГэВ/c ² заряд = 2/3 спин = 1/2	0 0 1	масса = 126 ГэВ/c ² 0 0
u верхний	c очарованный	t истинный	g глюон	H бозон Хиггса
КВАРКИ	масса = 4.8 МэВ/c ² -1/3 1/2	масса = 95 МэВ/c ² -1/3 1/2	масса = 4.18 ГэВ/c ² -1/3 1/2	0 0 1
d нижний	s странный	b прелестный	γ фотон	
масса = 0.511 МэВ/c ² -1 1/2	масса = 105.7 МэВ/c ² -1 1/2	масса = 1.777 МэВ/c ² -1 1/2	0 0 1	91.2 ГэВ/c ²
e электрон	μ миуон	τ тау	Z Z бозон	
ЛЕПТОНЫ	масса < 2.2 эВ/c ² 0 1/2	масса < 0.17 МэВ/c ² 0 1/2	масса < 15.5 МэВ/c ² 0 1/2	80.4 ГэВ/c ²
ν_e Электронное нейтрино	ν_μ миуонное нейтрино	ν_τ тау нейтрино	W W бозон	КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ

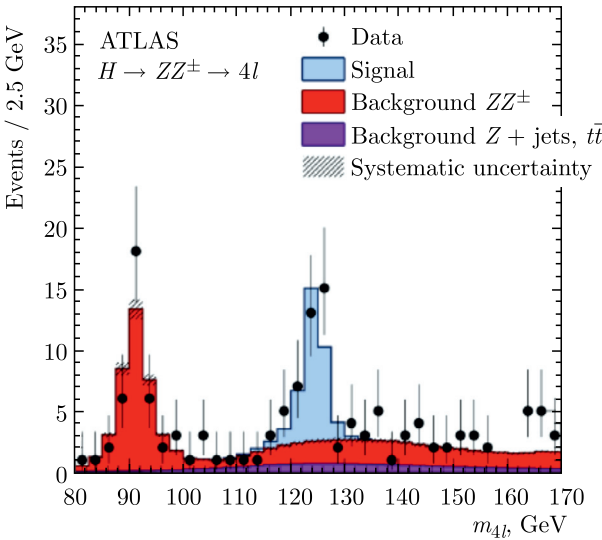


Рис. 5. Частицы, входящие в Стандартную модель (вверху). Первые три столбца — три поколения фермионов. «Открытие» бозона Хиггса (124,5 ГэВ/c²) по его распаду на 4 лептона (внизу)

будет способна «работать» на всех энергетических масштабах, включая, видимо, и астрономически большой масштаб массы Планка (10¹⁹ ГэВ). У Стандартной модели имеется слишком много внешних параметров и внутренних проблем. В частности, отсутствует ясное понимание механизма нарушения электрослабой симметрии, нет объяснения наличия именно трех поколений фермионов [30] и стабильности массы бозона Хиггса (проблема иерархии), гравитация полностью выпадает из этой модели и т. п. (см., например, о нестабильном вакууме Стандартной модели в [25, 28, 31]).

Имеется также ряд экспериментальных данных, которые рассматриваются в настоящее время как указания на «новую» физику за рамками Стандартной модели. Сюда обычно относят крайнюю малость ненулевых (следствие осцилляции нейтрино) значений нейтринных масс, барионную асимметрию [32] и ускоренное расширение Вселенной (темная энергия), в которой обнаружен огромный недостаток вещества (темной материи), а также несколько так называемых «флейворных аномалий» ($H \rightarrow \mu\tau$, $B \rightarrow K\mu^+\mu^-$, $B \rightarrow D^{(*)}\tau\nu$, $B_s \rightarrow \phi\mu^+\mu^-$, $g-2$ и др.), которые, однако, еще недостаточно обоснованы экспериментально (см., например, [25, 26, 28]).

Поэтому на пути создания новой теории элементарных частиц — *новой физической картины мира* — главными источниками решающей информации сегодня считаются [33–40]:

— *прямой поиск «новой» физики* на Большом адронном коллайдере ЛHC (проявлений суперсимметрии, дополнительных размерностей пространства, новых сил, новых частиц и т. п.),

— *нейтринная физика и астрофизика*,

— *выяснение природы темной материи и темной энергии* (космология),

— *прецизионные исследования (крайне) редких превращений лептонов и адронов, нарушающих (флейворную) симметрию поколений (косвенный поиск «новой» физики)*.

Важнейшее значение сохраняет проблема структуры вещества, решение которой сегодня видится в рамках *непертурбативной квантовой хромодинамики*. Эта проблема на первый взгляд не имеет прямого отношения к «новой» физике, но ее разрешение по значимости вполне соответствует открытию самой «новой» физики.

В связи с этим *первая* главная задача нового этапа коллайдерных экспериментов на ЛHC (Run-II и т. д.) состоит в тщательном исследовании свойств бозона Хиггса (рис. 6, вверху) на предмет убедительного доказательства принадлежности (или непринадлежности [41]) его Стандартной модели [25, 42–44]. Решение этой задачи связывают сегодня с будущими линейными электрон-позитронными коллайдерами (CLIC, ILC, FCC-ee) — прецизионными машинами нового поколения (см., например, [45–48]).

Вторая главная задача — получить ответ на вопрос о существовании (или отсутствии) «новой» физики на ТэВ-ном масштабе энергий [49, 50], причем особый интерес (инспирированный результатами Run-I) здесь связан с экспериментальным обоснованием идеи суперсимметрии (рис. 6, внизу) [25, 26, 51–55].

Доказательство как «стандартности» бозона Хиггса, так и существования «новой» физики в форме, скажем, суперсимметрии будет несомненным триумфом современной «физической мысли» и безусловным оправданием создания коллайдера ЛHC. С другой стороны, «нестандартность» этого бозона

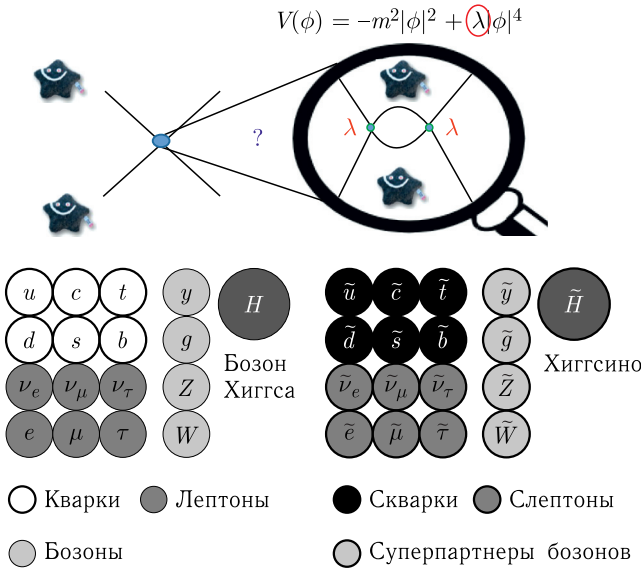


Рис. 6. Главные задачи ЛHC (Run-II): исследование свойств бозона Хиггса Стандартной модели (вверху) и состава частиц минимально суперсимметрично расширенной модели (внизу)

Хиггса и особенно полное отсутствие каких-либо «ТЭВ-ных сигналов» «новой» физики, подрывающее в значительной мере фундамент идеи суперсимметрии, будут представлять собой сильнейший стимул к поиску совершенно иных концепций построения новой картины физического мира.

Остаются, безусловно, также актуальными и другие задачи ЛHC (Run-II), такие как исследования структуры нуклонов [26,29] и электрослабого сектора Стандартной модели [25,56], изучение свойств тяжелых [25,57], в особенности топ, кварков [58–61], поиск и исследование новых эффектов нарушения CP-симметрии (см., например, [25]) и т.д. В целом, есть серьезные основания надеяться на то, что работа коллайдера ЛHC (Run-II и далее) должна дать новые, совершенно неожиданные результаты, которые изменят наш взгляд на фундаментальную физику (см., например, [26,28,29]).

Помимо важнейших задач ЛHC в области физики элементарных частиц сегодня центральной проблемой является выяснение природы нейтрино (см., например, [29,44,62,63]). Под этим понимаются те фундаментальные свойства нейтрино, которые определяют специфичность их взаимодействия: конкретные значения исключительно малых нейтринных масс [64], их иерархия (порядок) [65] и возможность CP-нарушения [63,66–68], характер смешивания (превращения друг в друга), число стерильных нейтрино [69], дираков-

ские они или майорановские частицы [70], имеют ли они электромагнитные или другие «экзотические» свойства [71, 72], как они взаимодействуют с различными формами материи [73, 74] и каковы их природные (космические) источники. Табл. 1 иллюстрирует «вездесущность» нейтрино в контексте источников, потоков, энергий и сечений взаимодействия с веществом. Физика нейтрино — это действительно ключевая междисциплинарная проблема, которая пронизывает всю физику элементарных частиц, космологию и астрофизику [78].

Таблица 1. Свойства известных источников нейтрино и антинейтрино [75, 76]. Энергии и потоки нейтрино варьируются соответственно в рамках 24 и 26 порядков величин [77]

Источник нейтрино (исторический порядок)	Оценка потока, $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$	Оценка энергии, эВ	Оценка сечения, б
Большой взрыв	10^{14}	10^{-4}	$< 10^{-32}$
Вне нашей Галактики	10^{-12}	10^{20}	10^{-4}
Наша Галактика	10^{-10}	10^{15}	10^{-8}
Сверхновые	10^{12}	10^7	10^{-16}
Солнце	10^{10}	10^6	10^{-17}
Недра Земли	10^6	10^4	10^{-21}
Атмосфера	10^2	$10^{7 \div 13}$	$10^{-(16 \div 11)}$
Реактор	10^{13}	10^6	10^{-18}
Ускоритель	10^7	10^{11}	10^{-13}

Наличие ненулевых масс у нейтрино важно для построения современных теорий элементарных частиц, понимания строения Вселенной и образования в ней крупномасштабных структур. Здесь нейтрино играют роль горячей темной материи [69, 79, 80]. Исследование свойств нейтрино (в том числе и электромагнитных) необходимо для решения проблемы дефицита солнечных нейтрино [81], выяснения механизмов взрыва сверхновых [80] и образования энергии в звездах (на Солнце) [80, 81] и в недрах нашей Земли, для понимания причин возникновения космических лучей сверхвысоких энергий [80, 82]. Только благодаря космическим нейтрино можно получить информацию о самых отдаленных уголках космоса [83]. До сих пор не решена проблема реликтовых нейтрино [84, 85], существование которых следует из современной концепции ранней Вселенной [86, 87]. Наряду с фотонами нейтрино — самые распространенные частицы во Вселенной.

Считается, что тяжелые майорановские стерильные нейтрино, распадаясь с нарушением CP-симметрии [67, 79, 88], дают желанный ключ (через асимметрию лептонов, рис. 7) к объяснению барионной асимметрии, т. е. наблюдаемого избытка барионов по отношению к антибарионам во Вселенной [89].

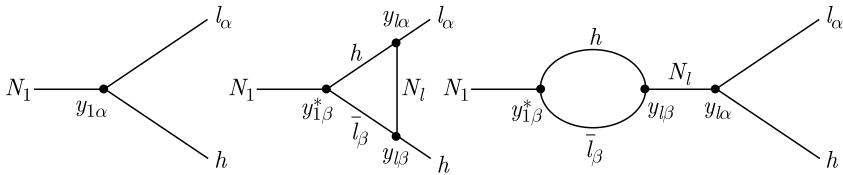


Рис. 7. Примеры диаграмм, дающих вклад в возникновение асимметрии в распадах тяжелых майорановских стерильных нейтрино (лептонов), которая согласно имеющемуся в Стандартной модели механизму [90] переносится в сектор барионов. Из [88]

Сегодня «многоликые» нейтрино (тяжелые, правые, стерильные и т. п.) выдвигаются на первые роли в коллайдерной физике высоких и сверхвысоких энергий [82, 91–93], где с их помощью есть надежда найти ответ, например, на вопрос о происхождении столь малых значений масс активных состояний нейтрино.

Только всепроникающие нейтрино и антинейтрино, благодаря слабости взаимодействия способные зондировать беспрецедентно широкий спектр расстояний и плотностей, позволяют узнать, что происходит внутри Солнца, Земли [78, 94], взорвавшейся сверхновой звезды, кора ядерного реактора АЭС [80, 95, 96] или в самом отдаленном уголке космоса (см., например, рис. 8).

Благодаря наличию в наши дни уникальных по размерам и чувствительности детекторов и доступности высокоинтенсивных источников изначальная слабость и неуловимость нейтрино превратилась в их исключительную силу (информативность). В результате «по степени фундаментальности и мировоззренческой важности, потенциалу новых неожиданных открытий исследованиям по физике нейтрино практически нет конкурентов в современной физической науке» (из решения Нейтринного совета РАН, 2012 г.).

Трудно переоценить перспективы прикладных нейтринных исследований [97]. Недавно были зарегистрированы геонейтрино из недр Земли (см., например, [98, 99]), исследование которых крайне важно для геофизики, понимания процессов, протекающих внутри нашей планеты [100], а следовательно, и возможных причин различных природных катаклизмов и изменения климата (рис. 9). На новый уровень выходят прикладные исследования на ядерных реакторах с помощью антинейтрино [96]. Они вплотную подошли к возможности непрерывного измерения мощности реактора, степени выгорания и томографии выгорания топлива в реальном времени [101]. Идет процесс создания компактных детекторов антинейтрино [95, 102] для дистанционного контроля наработки и несанкционированного отбора плутония в процессе работы реактора и т. п. Показана принципиальная возможность использования нейтринного пучка для передачи информации [103].

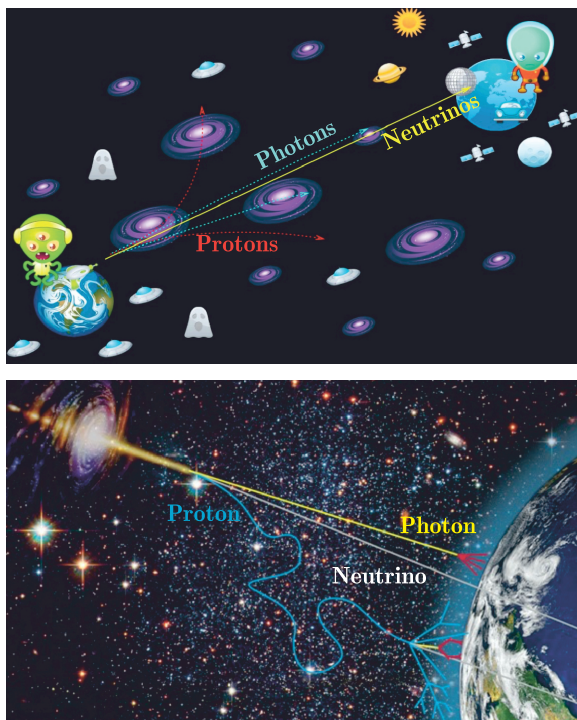


Рис. 8. Видимо, только в нейтринном канале самые далекие инопланетяне будут способны передать нам свой сигнал

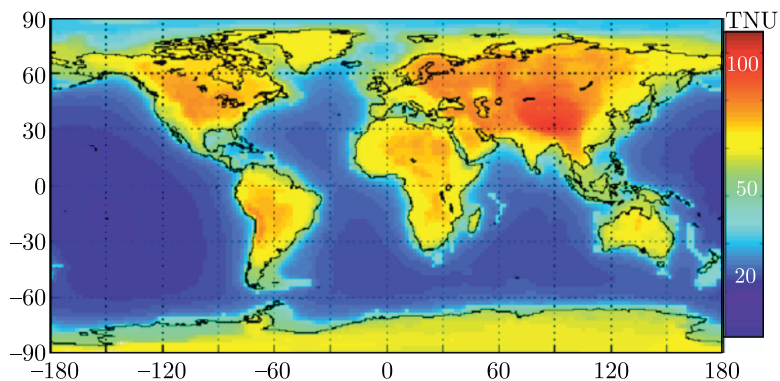


Рис. 9. Вид Земли в «информационном канале» геонейтрино от распадов урана и тория. 1 TNU = 1 событие/ 10^{32} протонов/год. Расчет из [100]

Это ярчайшие примеры практической пользы фундаментальной науки. Для решения внутренних задач физики нейтрино требуется уникальная и не существовавшая ранее аппаратура, на пути создания которой возникают совершенно новые, не менее уникальные технологии, материалы и приборы, которые оказываются востребованными в других областях науки и в повседневной жизни.

Физика нейтрино и слабых взаимодействий теснейшим образом связана с «новой» физикой [104]. Бесспорным примером последней является темная материя [105–108]. О существовании частиц темной материи (рис. 10) в на-

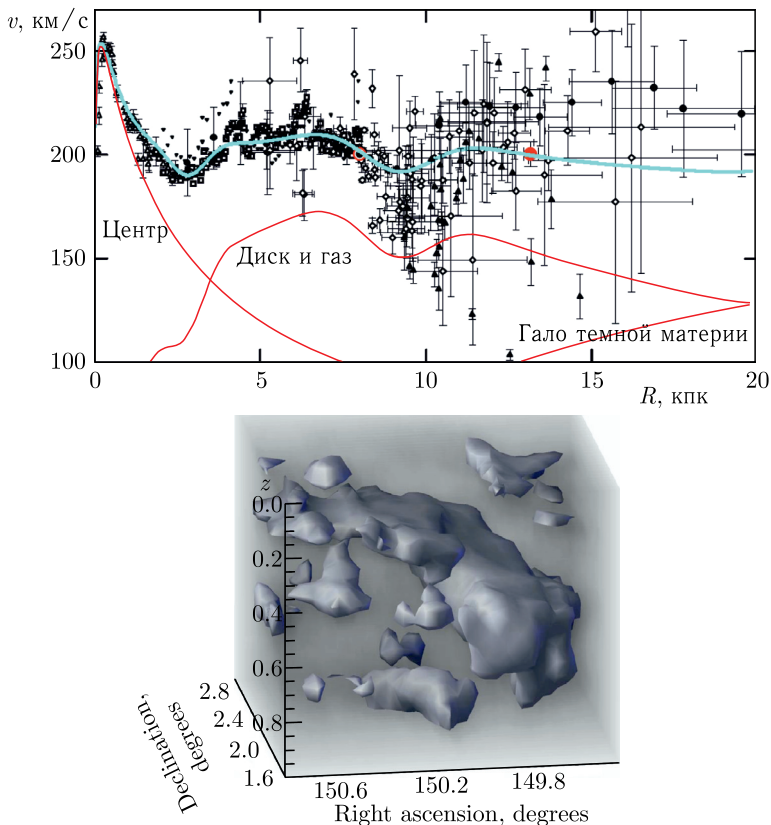


Рис. 10. Вверху: распределение объектов в нашей Галактике по скоростям как функция расстояния — ротационная кривая. Показаны вклады центральной области, звездного диска и межзвездного газа, гало темной материи [109]. Внизу: трехмерная реконструкция распределения темной материи, полученная методом гравитационного линзирования [110]

стоящее время судят по их гравитационному воздействию на различные космические объекты [111]. Многочисленные наблюдения на астрономических и космологических масштабах, а также результаты очень сложных численных расчетов (см., например, [112]) процессов формирования разномасштабных космических структур указывают на наличие этой новой, совершенно невидимой, формы материи во Вселенной (см., например, [113–117]). В частности, из формы ротационной кривой (рис. 10, вверху) можно заключить (рис. 11, слева), что звезды и газовые облака в галактиках и галактики в галактических скоплениях движутся заметно быстрее, чем следовало ожидать на основе гравитационного притяжения только видимой материи [105]. Свет от очень далеких объектов искажается присутствием значительного количества темного вещества на его пути к Земле — эффект гравитационного линзирования (см., например, [110, 118–120] и рис. 10, внизу).

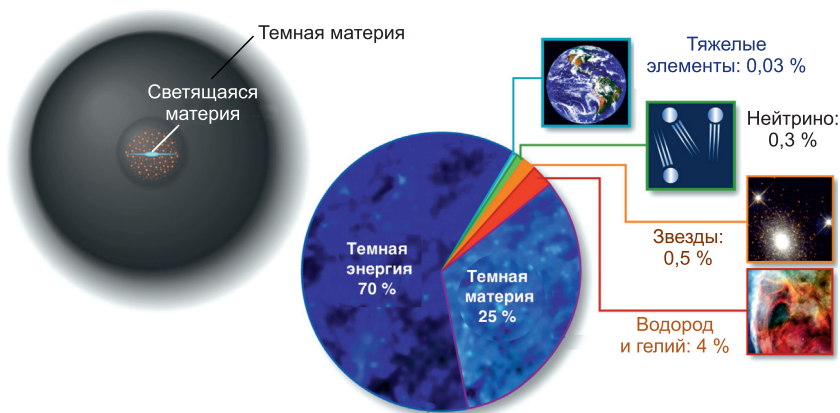


Рис. 11. Темная материя формирует (сферическое) гало галактики и влияет на распределение скоростей вращения светящихся звезд в ней (слева). Субстанционно-энергетический баланс Вселенной (справа)

Распределение крупномасштабных структур во Вселенной в значительной степени определяется наличием именно темной материи, которая составляет около 85 % от *всей массы* Вселенной, остальные 15 % — это видимая материя. При этом вся материя составляет около четверти от общего космического энергетического «бюджета» (см., например, [114, 121] и рис. 11, справа), остальное приходится на темную энергию (рис. 12) — антигравитирующую субстанцию неизвестного происхождения (см., например, [87, 122–124], а также [125, 126]), призванную в рамках ОТО объяснить ускоренное расширение Вселенной. В простейшем случае темная энергия — это космологическая постоянная Эйнштейна.

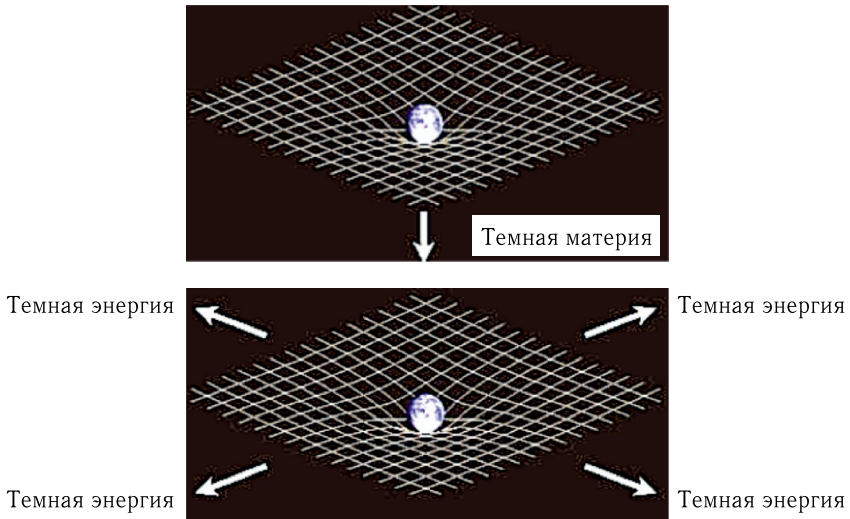


Рис. 12. Темная материя проявляется через гравитационное притяжение (вверху). Темная энергия антигравитирует и обеспечивает ускоренное расширение Вселенной (внизу)

Из концепции формирования ранней Вселенной после Большого взрыва следует необходимость негравитационного взаимодействия темной и обычной материй (см., например, [86, 117]). Оно должно существовать, хотя может быть очень слабым. По этой причине Weakly Interacting Massive Particle (WIMP — слабо взаимодействующая массивная частица) является сегодня главным кандидатом на роль реликтовых частиц темной материи. Будучи электрически нейтральными и слабо взаимодействующими, эти частицы дают «правильную» реликтовую плотность темной материи, при условии, что их массы близки к ТэВ-ному масштабу «новой» физики (см., например, [106, 107, 117, 127]). Последнее обстоятельство объясняет, в частности, большой интерес к поиску таких частиц темной материи (точнее, кандидатов на их роль) в экспериментах ATLAS и CMS (см., например, обсуждение этого вопроса в [115]).

Эти слабо взаимодействующие частицы темной материи не могут быть обычными барионами (мезонами, протонами, нейтронами или стабильными ядрами). Им нет места в Стандартной модели, поскольку тогда, скажем, «хорошо работающий» нуклеосинтез ранней Вселенной (см., например, обзор Particle Data Group [128]) привел бы к неверным предсказаниям для содержания легких элементов (дейтерия, гелия, лития). Далее, чтобы объяснить формирование галактик и их скоплений, эти массивные частицы должны быть нерелятивистскими, в противном случае они своим релятивистским движением

существенно препятствовали бы гравитационному формированию галактик. Последние не имели бы шанса образоваться (см., например, [129]).

Итак, темная материя и темная энергия (см. рис. 12) — это серьезный вызов «холодного» космоса, изучение и понимание которого неизбежно связано с будущей судьбой человечества. Поэтому главная общая цель физики частиц, астрофизики и космологии (здесь они смыкаются воедино [87]) состоит в обнаружении и выяснении природы частиц темной материи, которые формируют массивное невидимое гало нашей Галактики. К сожалению, эта задача исключительно сложна, и для ее решения необходимо использовать все имеющиеся возможности и данные — астрофизические, космологические, модельно-теоретические, ускорительные (рис. 13), при этом решающее значение имеют результаты *прямого* поиска [115, 130] частиц темной материи в лабораторных низкофоновых прецизионных экспериментах [127, 131–135].

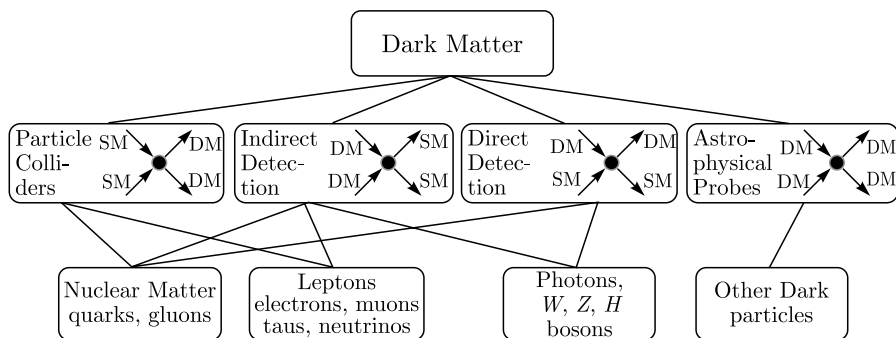


Рис. 13. Идея регистрации частиц темной материи опирается на убеждение, что они могут взаимодействовать негравитационно с ядерной материей и другими частицами [115]

Второй (*косвенный*), но не менее значимый путь поиска «новой» физики сегодня связан с *физикой флейвора* (см., например, [29, 104, 136–139]), где практическая задача состоит в прецизионном исследовании процессов, в которых фермионы одного поколения (кварки и лептоны) превращаются в фермионы другого поколения (флейвора), например, процессов типа $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ [140], когда \bar{s} -кварк превращается в \bar{d} -кварк (на рис. 5, вверху s -кварк из второго столбца переходит в d -кварк из первого столбца). Другой пример из кваркового сектора — распад $B \rightarrow K \mu^+ \mu^-$ [141] или $B \rightarrow X_s \gamma$ [142], где b -кварк превращается в s -кварк (например, как на рис. 14, слева). В секторе заряженных лептонов примером перехода с изменением флейвора является безнейтринный распад мюона в электрон $\mu^- \rightarrow e^- \gamma$ (рис. 14, справа).

В Стандартной модели (глобальная) симметрия между тремя (три первых столбца на рис. 5, вверху) поколениями фермионов (или независимость

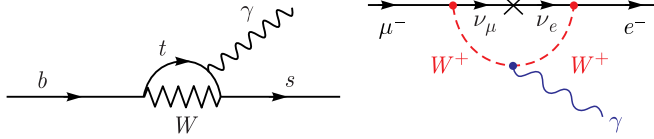


Рис. 14. Переходы с изменением флейвора (поколения) среди кварков: $b \rightarrow s$ (слева) и заряженных лептонов: $\mu \rightarrow e$ (справа). Они возможны только в «петлевом приближении». Крестом отмечен переход мюонного нейтрино в электронное (осцилляции нейтрино)

их друг от друга) нарушается [28, 137] за счет так называемого юкавского взаимодействия их с полем бозона Хиггса H ($SU(2)_L$ -дублет). Это взаимодействие описывается с помощью лагранжиана

$$L_{\text{Yukawa}} = Y_{ij}^e H^\dagger \bar{e}_{iR} l_{jL} + Y_{ij}^d H^\dagger \bar{d}_{iR} q_{jL} + Y_{ij}^u \tilde{H}^\dagger \bar{u}_{iR} q_{jL} + \text{h.c.},$$

где Y_{ij}^e , Y_{ij}^d и Y_{ij}^u — юкавские константы связи заряженных лептонов $e_{iR} - e_{jL}$, нижних $d_{iR} - q_{jL}$ и верхних $u_{iR} - q_{jL}$ кварков, $\tilde{H} = i\tau_2 H^*$. После спонтанного нарушения симметрии, когда поле бозона Хиггса приобретает постоянную составляющую: $H \rightarrow v > 0$ (механизм Хиггса), это взаимодействие обеспечивает возникновение масс у кварков и лептонов:

$$L_{\text{mass}} = -\bar{e}_{iR} M_{ij}^e e_{jL} - \bar{d}_{iR} M_{ij}^d d_{jL} - \bar{u}_{iR} M_{ij}^u u_{jL} + \text{h.c.},$$

где $M_{ij}^e \simeq v Y_{ij}^e$ и $M_{ij}^q \simeq v Y_{ij}^q$ — массовые матрицы (заряженных) лептонов и кварков. В результате фермионы приобретают массы калибровочно-инвариантным путем, однако конкретные значения этих масс, а также углы смешивания определяются юкавскими константами связи Y_{ij}^e и Y_{ij}^q , которые представляют собой произвольные матрицы в 3-мерном пространстве поколений [28].

Диагонализация такого типа матрицы, скажем, в кварковом секторе приводит к матрице смешивания Кабиббо–Кобаяши–Маскавы:

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \simeq \begin{pmatrix} 1 & 0,2 & 0,001 \\ 0,2 & 1 & 0,01 \\ 0,001 & 0,01 & 1 \end{pmatrix},$$

которая успешно аккумулирует всю «флейворную информацию» в терминах трех углов смешивания и одной фазы CP-нарушения [28, 29]. Однако физическая причина именно такой уникальной (иерархической) структуры матрицы смешивания в Стандартной модели остается загадкой. Главные вопросы состоят в том, какова причина наблюдаемого набора масс и углов смешивания

фермионов, почему эти наборы так различаются у кварков (V_{CKM}) и лептонов (V_{PMNS}) [29, 64]:

$$V_{PMNS} = \begin{pmatrix} V_{e1} & V_{e2} & V_{e3} \\ V_{\mu 1} & V_{\mu 2} & V_{\mu 3} \\ V_{\tau 1} & V_{\tau 2} & V_{\tau 3} \end{pmatrix} \simeq \begin{pmatrix} 0,8 & 0,5 & 0,2 \\ 0,4 & 0,6 & 0,7 \\ 0,4 & 0,6 & 0,7 \end{pmatrix},$$

а также имеют ли место отличные от юкавских механизмы перемешивания фермионов разных поколений? Ответы на эти вопросы «скрыты в недрах» «новой» физики [28, 29]. Можно сказать, что конкретные значения масс фермионов, простирающиеся от долей эВ/ c^2 до 175 ГэВ/ c^2 (рис. 15), — прямое указание на необходимость существования «новой» физики.

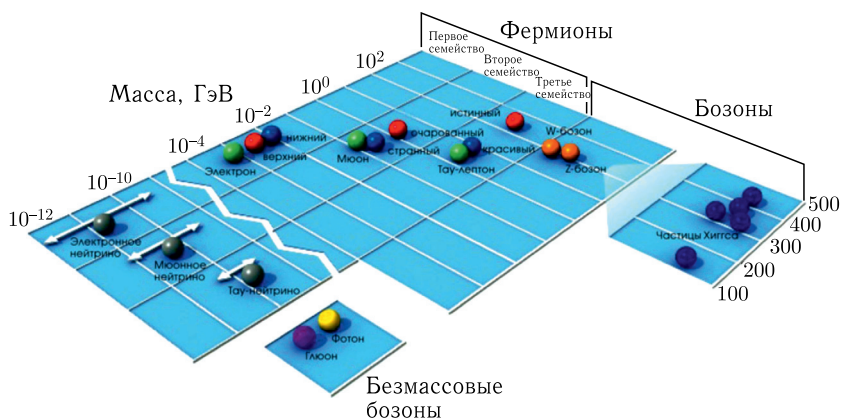


Рис. 15. Спектр масс фундаментальных частиц Стандартной модели — загадка для «новой» физики

Успех описания кварк-флейворной физики в Стандартной модели основан на унитарности матрицы смешивания и ее иерархической структуре, которая существенным образом (механизм ГИМ [143, 144]) подавляет процессы, обусловленные нейтральными слабыми токами, с изменением флейвора (см., например, [25, 28]). Этот исключительно тонкий механизм «подавления» может быть легко разрушен любыми вкладами «новой» физики [28]. Поэтому здесь есть очень строгие ограничения на какие-либо новые варианты нарушения флейворной симметрии, что позволяет зондировать недостижимые для ускорителей масштабы «новой» физики (10^5 ТэВ), а также имеется глубокая внутренняя связь с проблемой абсолютного значения масс нейтрино [28, 29, 93, 137].

За счет матрицы смешивания нейтрино Понтекорво–Маки–Накагавы–Сакаты V_{PMNS} , которая не обладает ярко выраженной иерархической струк-

турой [29, 104], нейтринные осцилляции «гарантируют» (см. рис. 14, справа) безнейтринные переходы между поколениями заряженных лептонов: $\mu \rightarrow e\gamma$, $\mu \rightarrow 3e$, $\mu N \rightarrow eN$, $\tau \rightarrow \mu\gamma$ (см., например, [145]). Однако чрезвычайная малость масс нейтрино полностью исключает практическую возможность таких процессов в Стандартной модели. В результате поиск флейворных переходов среди заряженных лептонов (в отличие от кварков) является наиболее прямым путем зондирования «новой» физики на отмеченных выше уникальных энергетических масштабах. В качестве примера на рис. 16 показаны возможные процессы перехода отрицательных мюонов в электроны при рассеянии их на кварках в рамках суперсимметричных моделей с нарушенной R-четностью (см., например, [146–149]). Иными словами, исследование такого сорта лептонных процессов, получение новых ограничений на их вероятности представляется важным всегда, поскольку позволяет ограничивать или даже исключать те или иные конкретные модели «новой» физики (см., например, [150–152]).

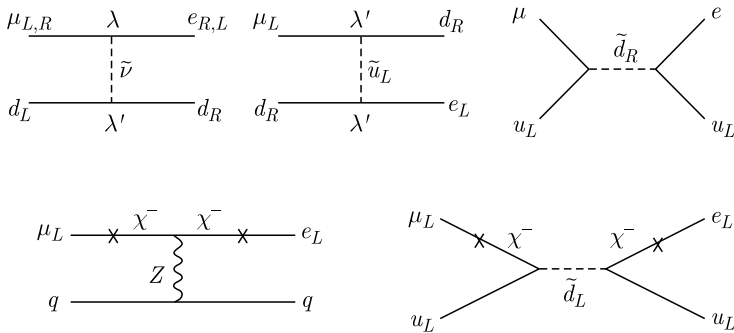


Рис. 16. Варианты $\mu N \rightarrow eN$ в суперсимметричной модели с нарушенной R-четностью. Обмен sneutrино $\tilde{\nu}$ и скварками \tilde{u}_L , \tilde{d}_R , пропорциональный константам R-нарушения λ и λ' , показан вверху. Вклад в μ - e -конверсию смешивания чарджино χ^- с заряженными лептонами (отмечен крестом на лептонной линии) показан внизу. Из [146, 147]

Хотя статистически значимых «флейворных» отклонений от предсказаний Стандартной модели на коллайдере LHC не было обнаружено, именно физика флейвора остается важнейшим средством поиска «новой» физики, будучи, как уже отмечалось, потенциально чувствительной к значительно более высоким масштабам, чем те, которые могут быть достигнуты на будущих ускорителях высоких энергий [28, 29].

Рис. 17 из обзора [136] схематически объединяет энергетические масштабы, теоретические методы анализа и ключевые процессы современной флейворной физики. Как видно, при низких и промежуточных энергиях (меньше массы топ-кварка) главные источники информации — это редкие

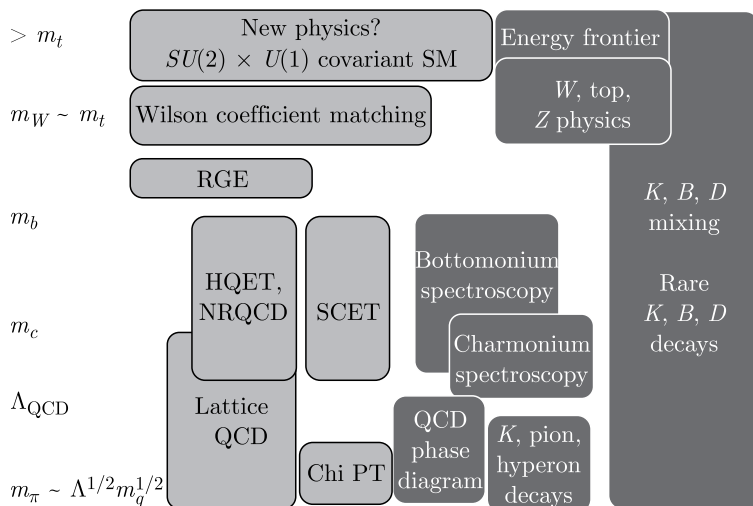


Рис. 17. Энергетические масштабы (слева — от массы пиона до массы топ-кварка), методы исследования (в центре — от киральной теории до совершенно новых теорий) и физические наблюдаемые (справа — спектроскопия и редкие распады), присущие современной (адронной) физике флейвора. Из [136]

распады странных, очарованных и прелестных мезонов, эффекты смешивания и спектроскопия тяжелых кварков. Здесь применяются киральная теория поля, КХД на решетке, ренормгрупповые уравнения, эффективные теории и т. п. Новые горизонты физики флейвора открываются при более высоких энергиях, при которых «главными действующими лицами» становятся калибровочные бозоны и топ-кварк. Не потеряла своей значимости также физика флейвора (очарованные и прелестные кварки, прямое CP-нарушение) на коллайдерах [153–156]). Особый интерес в последнее время связан с возможностью нарушения симметрии лептонного флейвора (μ - e - τ -универсальности) в распадах бозона Хиггса типа $H \rightarrow \mu\tau$ (см., например, [157]).

В целом магистральный путь поиска «новой» физики «проложен» сегодня в «зоне ответственности» слабых (или даже исключительно слабых) взаимодействий, однако важнейшим элементом Стандартной модели является *квантовая хромодинамика* (КХД) — хорошо разработанная квантово-полевая теория сильных взаимодействий (см., например, [158–161] и ссылки в них).

Здесь, в отличие от «слабого сектора» Стандартной модели, имеет место ненарушенная (цветовая) калибровочная $SU(3)$ -симметрия и, как следствие, безмассовость и ненулевой цветовой заряд глюонов — векторных переносчиков сильного взаимодействия.

Кварки (верхние две строки на рис. 5,верху) существуют в трех различных состояниях и условно обозначаются как красный, синий и зеленый, т. е.

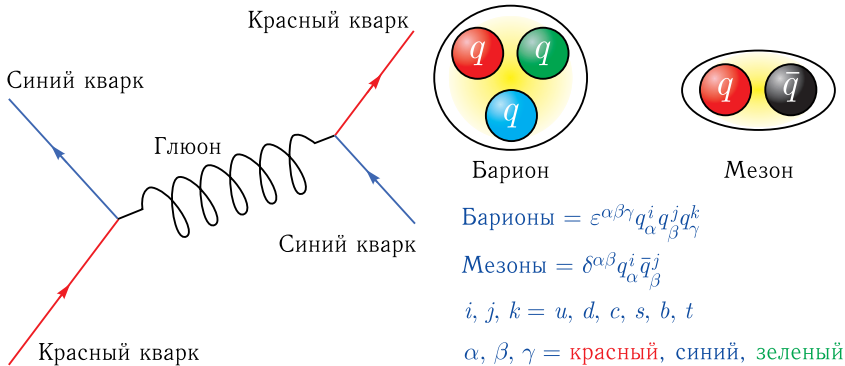


Рис. 18. Частицы материи, имеющие ненулевой цветовой заряд (кварки, дикварки и т. п.), взаимодействуют посредством обмена глюонами (слева). Наблюдаемые адроны (состоящие из кварков) — барионы и мезоны — бесцветны (справа)

они могут иметь три разных значения квантового числа (цвета) и взаимодействуют друг с другом посредством глюонов (рис. 18, слева), изменяя при этом свой цвет. Антикварки, соответственно, несут антицвет. Свободные (цветные) кварки строго локализованы внутри адронов — «конфайнмент» цвета. Сложение квантовых цветов у них дает белый цвет (рис. 18, справа).

$SU(3)$ цветовая симметрия требует наличия восьми разных глюонов, которые имеют двойной цветовой заряд — $g_{\alpha\beta}$. Неабелевый характер ненарушенной (цветовой) калибровочной $SU(3)$ -симметрии кардинальным образом отличает КХД от «электрослабых» элементов Стандартной модели. В отличие от фотонов (тоже безмассовых) глюоны взаимодействуют друг с другом (рис. 19), что приводит к «асимптотической свободе», эффекту «конфайнмента» и обеспечивает динамическое нарушение киральной симметрии (безмассовости кварков), сопровождающееся возникновением масс у адронов [159–163].

В адронных столкновениях при высоких энергиях (например, на коллайдере ЛHC) КХД — главнейший источник образования всех частиц, основа проверки Стандартной модели, и фон для поиска «нового в море старого» неизбежен [25, 158]. Детальное понимание эффектов КХД является необходимым условием для правильной интерпретации любых экспериментальных



Рис. 19. Самодействие глюонов приводит к «асимптотической свободе», эффекту «конфайнмента» и возникновению масс у адронов

данных при высоких энергиях [26, 164]. Благодаря эффекту «асимптотической свободы» — малости константы связи сильного взаимодействия — и обоснованности вследствие этого применения метода теории возмущений, *пертурбативная* КХД [162] является эффективным теоретическим аппаратом, хорошо описывающим кварк-глюонные взаимодействия при больших переданных импульсах («жесткие процессы»). Например, результаты пертурбативных КХД-вычислений для сечений образования адронных струй согласуются с данными LHC на протяжении многих порядков величин (см., например, [25, 26]).

Однако *непертурбативная* КХД [162] — когда нет возможности проводить вычисления в рамках теории возмущений, ответственная за эффект конфайнмента, неизбежно (пусть и «на вторых ролях») присутствует везде при высоких энергиях в виде спиновых эффектов [165], в форме партонных (в том числе поперечно-спиновых TMD [166], ядерных [167] и т. п.) распределений, функций фрагментации и рекомбинации, других «мягких взаимодействий» адронов [158, 159, 168, 169], которые задаются обычно в рамках феноменологических моделей [166, 167].

В упомянутой выше физике флейвова весьма существенна роль непертурбативной КХД, которая представляет собой «неустранимый структурный фактор» (см., например, [29, 170]) или «принимает вид» сигнала «новой» физики, например, в виде необычных валентноподобных (intrinsic) распределений странных, очарованных и прелестных кварков [57, 156, 171], многокварковых конфигураций типа тетра- и пентакварков (рис. 20) [25].

Именно непертурбативная составляющая КХД является той экстраординарной частью Стандартной модели, которая из первых принципов (например, путем сложнейших расчетов «на решетках» [172]) призвана объяснить динамическое нарушение киральной симметрии (в результате которого образуется более 98 % видимой барионной массы Вселенной), эффект конфайнмента и всю ядерную физику [159, 163, 167, 168, 173]. Иными словами, необходимо понять, как на основе кварков и глюонов формируются, взаимодействуя друг

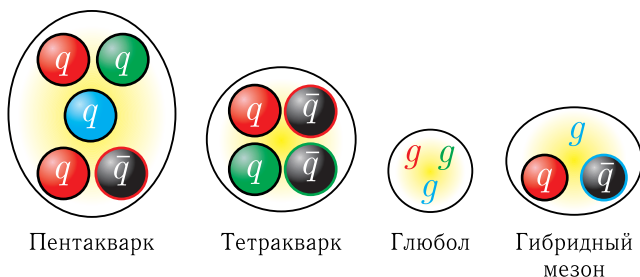


Рис. 20. Примеры мультикварковых и экзотических адроноподобных состояний

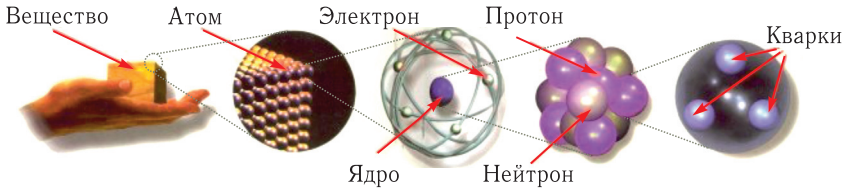


Рис. 21. Все состоит из кварков и глюонов

с другом, адроны — пионы, каоны, протоны, нейтроны [159, 174, 175] и как они образуют все многообразие атомных ядер [161, 168, 172, 173].

Вполне возможно, что ядерная физика не вытекает однозначно из нашего *сегодняшнего понимания* КХД [176], однако очевидно, что она не может не опираться на КХД просто по той причине, что все протоны и нейтроны, все ядра и вся материя «сделаны» из кварков и глюонов (рис. 21).

Эта задача — объяснение ядерной физики на основе КХД — очень сложна, и для существенного продвижения в ее решении нужна любая новая экспериментальная информация, причем особенно важна как раз та, которую можно получить именно из «проблемной области» фазовой диаграммы КХД (рис. 22), где кварки и глюоны превращаются в адроны и ядра (см., например, [160, 177]).

Помимо упомянутых выше мягких непертурбативных КХД-процессов (см., например, [178–180]) сегодня основные надежды связаны с исследованием столкновений тяжелых ионов при (достаточно) высоких энергиях [181], где на *систематической основе* создаются условия для возникновения и существования адронной и горячей кварк-глюонной материи (рис. 23) — перехода конфайнмент–деконфайнмент (см., например, [160, 161, 177, 182–184] или [185]).

Эти исследования важны для понимания эволюции ранней Вселенной после Большого взрыва (см., например, [186]), формирования нейтронных звезд и основных явлений, протекающих при столкновении тяжелых ионов. Действительно, согласно теории Большого взрыва и формирования вещества во Вселенной в длительном процессе ее эволюции неизбежно существовала специфическая фаза, когда кварки и глюоны существовали *еще* без адронов, — кварк-глюонная плазма (рис. 24). Осталось найти ее на Земле и постараться понять природу конфайнмента.

В силу исключительной сложности, скоротечности и многоплановости отмеченных выше процессов важнейшую роль приобретает правильный — адекватный поставленным задачам — набор физических наблюдаемых величин (см., например, [187–190]).

Любая экспериментальная и теоретическая информация о достаточно *стабильных и весьма необычных адронных состояниях* — глоболах, (супер-)

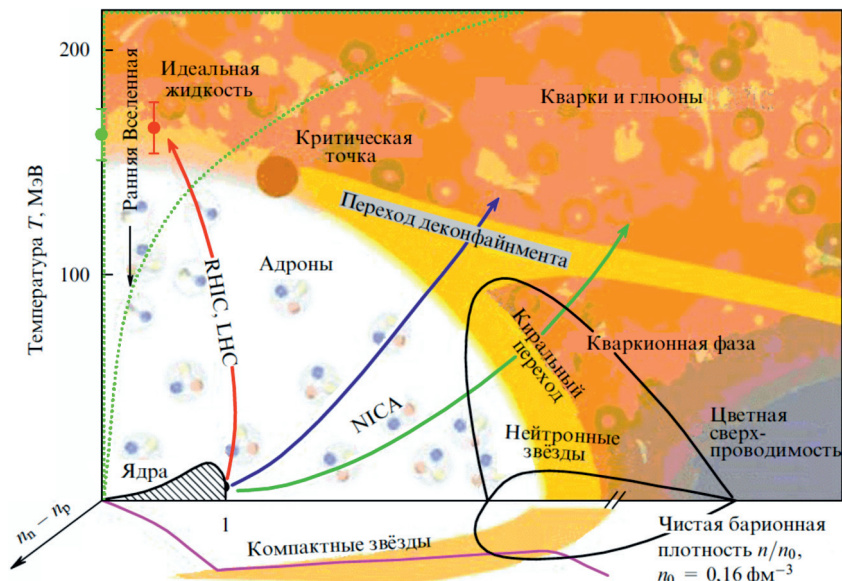


Рис. 22. Фазовая диаграмма сильно взаимодействующей материи [399] — зависимость температуры системы из двух сталкивающихся ядер от чистой барионной плотности (в единицах плотности ядерной материи n_0). При высоких энергиях и малых значениях барионной плотности переход из фазы кварк-глюонной плазмы в фазу адронного газа проходит «практически незаметно» через область так называемого кроссовера (в критической точке) [160]

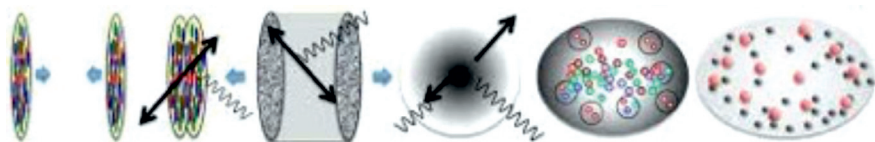


Рис. 23. Эволюция системы в процессе столкновения тяжелых ионов. Показаны также взаимодействия «пробники», способные нести информацию о системе на различных фазах ее эволюции

гиперъядрах, легких ядрах с большим избытком нейтронов, ди(тетра)барионах (см., например, рис. 20) и других нетривиальных кластерных конфигурациях в ядрах — представляется крайне важной [180] для полноценного формирования КХД в ее *непертурбативной области*, а также для выяснения роли этих состояний на стадии ядерного нуклеосинтеза в ранней Вселенной.

Источником такой информации могут служить исследования ядерных реакций, обусловленных пучками стабильных и радиоактивных ионов (экзоти-

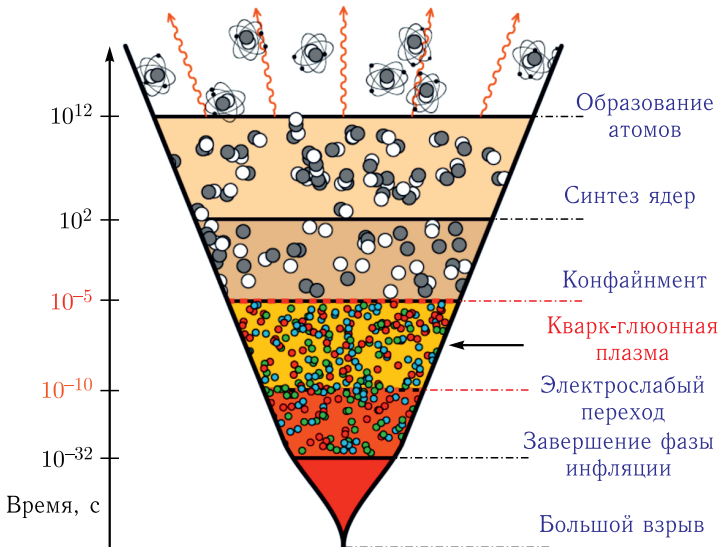


Рис. 24. Схема эволюции Вселенной от Большого взрыва до момента формирования атомов

ческих) легких элементов [191–193], в частности, на комплексе DRIBs [194] Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ (см. также п. 2.6).

В контексте традиций мультидисциплинарности ОИЯИ важнейшим физическим объектом, одинаково важным с точки зрения «новой» физики и структуры адронов, является *нейтрон* — легчайший нейтральный барион, без которого невозможно существование атомных ядер. Он по праву занял свое особое место в физике элементарных частиц. Как известно, предложенный и реализованный на практике Бруно Понтекорво в 1941 г. метод поиска нефти путем *нейтронного каротажа* [195], как пишет сам Бруно Понтекорво, «занимает первое место в хронологии важных практических применений нейтрона» [196]. Нейтрон является важнейшим источником новой информации как с точки зрения фундаментальной проверки Стандартной модели в ее КХД и электрослабом секторах (см., например, [197–199]), так и будучи уникальным инструментом для исследований в физике ядра и конденсированного состояния вещества.

Бета-распад (свободного) нейтрона $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ — это ключевой (ядерный) процесс (рис. 25), представляющий особый интерес для прецизионной проверки Стандартной модели, в частности, в секторе заряженных слабых токов [199, 200].

Измерения с высокой точностью параметров бета-распада нейтрона (времени жизни, угловых корреляций, формфакторов и т. п.) необходимы для

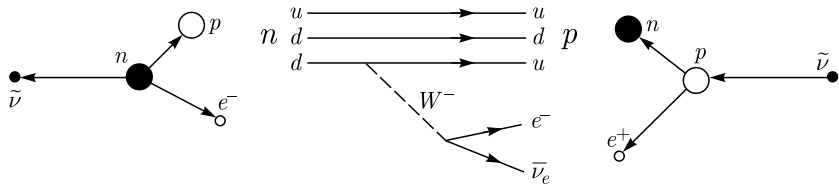


Рис. 25. Распад нейтрона на протон, электрон и антинейтрино (слева), его типичная кварковая диаграмма (в центре). Обратный бета-распад (справа) — поглощение антинейтрино

определения основных характеристик матрицы Кабиббо–Кобаяши–Маскавы и выяснения КХД-структуры этого бариона [201]. Свойства нейтрона и ядерные реакции с его участием играют ключевую роль в ряде астрофизических процессов, таких как генезис легких элементов на ранней стадии развития Вселенной, формирование изотопов более тяжелых элементов в звездах путем захвата нейтронов и т. д. (см., например, [128, 202]). Обратный бета-распад нейтрона $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ (рис. 25, справа) — ключевой процесс регистрации антинейтрино от ядерных реакторов (см., например, [95, 102]).

В силу того, что деление ядер является одним из самых сложных ядерных превращений, связанных с глубоким перераспределением массы и заряда исходного ядра, с образованием деформированных и возбужденных фрагментов, имеющих высокий спин и энергию, достаточную для испускания нескольких нейтронов и γ -квантов, исследование различных характеристик спонтанного и индуцированного деления ядер под действием нейтронов представляет первостепенный интерес [203], особенно при условии наличия современного высокоинтенсивного источника нейтронов (как импульсный реактор ИБР-2М [204] и установка ИРЕН [205, 206] в ОИЯИ).

В 1968 г. в Дубне [210] было положено начало важному направлению фундаментальных исследований — физике ультрахолодных нейтронов (см., например, [207–209]). В частности, здесь можно измерять такие «тонкие» характеристики нейтрона, как прецизионное значение его времени жизни [211], электрический дипольный момент, который является чувствительным зондом «новой» физики на ПэВ-ных масштабах энергии (см., например, [25, 165, 212, 213]), или обнаружить нейтрон-антинейтронные осцилляции — прямой путь проверки СРТ-универсальности (см., например, [214]).

В свете концепции о сводимости ядерной физики к непертурбативной КХД, по-видимому, нельзя не обратить особое внимание на физику сверхтяжелых элементов, или физику тяжелых ионов (см., например, [215]), которая приобрела сегодня статус наиболее интенсивно развивающейся и наиболее успешной области ядерной физики низких и промежуточных энергий (см., например, [216, 217]). Основные экспериментальные достижения — синтез и исследование ядерно-физических и химических свойств транс-

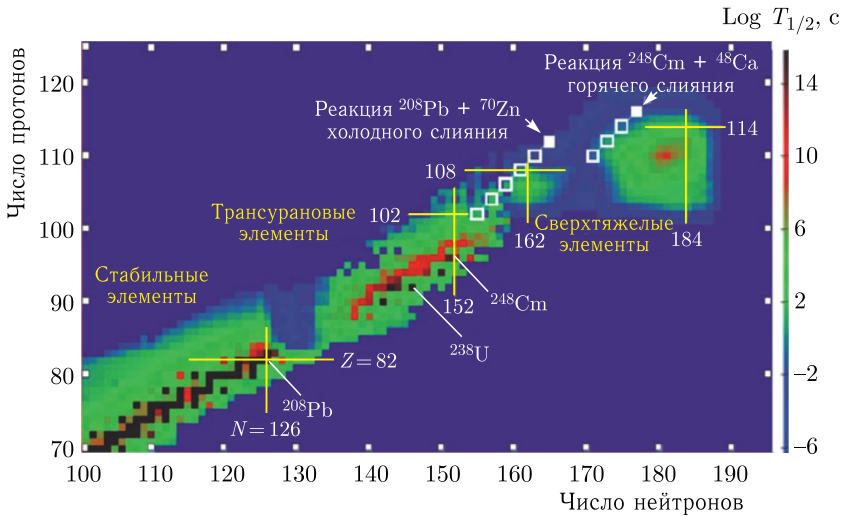


Рис. 26. Карта ядерных изотопов с большими протонными (Z) и нейтронными (N) зарядами вблизи острова стабильности сверхтяжелых элементов. Из [215]

фермиевых ($Z > 100$) и сверхтяжелых элементов [218, 219], формирование и исследование свойств легких экзотических ядер, исследование процессов деления-синтеза и квазиделения во взаимодействиях особенно тяжелых ионов, изучение механизмов реакций с ускоренными ионами стабильных и радиоактивных изотопов и т. д. (см., например, [8, 9, 192, 219]). Наряду с этим фундаментальным достижением микроскопической теории ядра является предсказание существования «острова стабильности» (рис. 26) сверхтяжелых элементов [220–222]. Образование таких элементов представляет собой очень редкое событие, его сечение оценивается на уровне нескольких пикобарн [216, 221]. Более того, предсказания положения и свойств самого «острова» *сильно зависят от конкретной ядерной модели.*

Дальнейшее продвижение в этом направлении связано с необходимостью изучения ядерно-физических свойств уже обнаруженных сверхтяжелых элементов с $Z = 113 \div 118$, а также с синтезом новых изотопов с $Z = 119, 120$. Помимо этого нужны новые данные о структурах ядерных уровней, что позволит уточнить параметры упомянутых выше моделей, а также данные о величинах сечений процессов слияния-деления ядер при малом возбуждении, что важно для определения времени жизни ядер и оптимизации каналов их синтеза.

Впечатляющие результаты последних лет по синтезу сверхтяжелых элементов с $Z = 113 \div 118$, безусловно, имеют непреходящее значение и навсегда останутся в истории человечества в виде заполненных клеточек таблицы Мен-

делева [223–226]. Однако важность этих уникальных исследований состоит еще и в том, что они направлены на проверку и «доведение до совершенства» наиболее перспективных моделей ядерной структуры, которые в конечном итоге должны получить свое обоснование в рамках *непертурбативной КХД*. При этом не исключено, что влияние этой «ядерно-физической информации» вполне может потребовать заметной *модификации основных принципов КХД*.

В завершение этого раздела следует отметить, что комплексная программа международных исследований по отмеченным выше фундаментальным вопросам экспериментальной физики частиц опирается на самые последние достижения в области технологии создания экспериментальных установок и самые передовые методы исследования, которые весьма условно можно сгруппировать по четырем взаимосвязанным направлениям [36–38]. *Первое* направление связано прежде всего с увеличением энергии ускорителей (энергетический передовой «фронт»). Главной характеристикой *второго* направления является существенное увеличение интенсивности ускорителей («фронт» кардинального повышения интенсивности). Суть *третьего* направления составляет значительное увеличение точности неускорительных экспериментов («фронт» максимальной точности измерений). *Четвертое* направление — это астрофизика и космология на базе физики элементарных частиц («фронт» прецизионных космических исследований). Только осмысление всей совокупности данных, полученных с этих «фронтов», способно лечь в основу новой физической картины мира, свободной от фундаментальных проблем Стандартной модели.

2. ЗАДАЧИ ОИЯИ В СОВРЕМЕННОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКЕ ЧАСТИЦ

В данном разделе кратко сформулированы главные задачи нового этапа развития ОИЯИ в 2017–2023 гг., отвечающие решению отмеченных выше наиболее важных проблем физики элементарных частиц и атомного ядра. Основное внимание уделено экспериментальной физике элементарных частиц, поскольку именно она в силу своей фундаментальности занимает центральное место в научной программе ОИЯИ и формирует как мировоззренческую основу, так и методологию всех проводимых в ОИЯИ исследований — от кварков, нуклонов и ядер до молекул и совершенно новых материалов. Физика частиц оказывает стимулирующее влияние на работы сотрудников ОИЯИ в таких смежных областях знаний, как информационно-коммуникационные и вычислительные технологии, радиохимия, физика полимеров, конденсированного состояния вещества и сложных комплексных соединений, радиобиология, генетика и т.д. и т.п. Следует подчеркнуть, что обсуждаемые

ниже цели *новой* программы ОИЯИ не являются случайными. Они — логическое следствие и естественное продолжение всей 60-летней многоплановой и успешной научно-исследовательской работы ОИЯИ на передовых рубежах ядерно-физической науки (см., например, предыдущую семилетнюю программу ОИЯИ [11]). Можно сказать, эти задачи «выстраданы» талантом и трудом нескольких поколений ученых и инженеров ОИЯИ, и сегодня, сохраняя и приумножая это наследие, необходимо приступить к решению этих амбициозных задач. По существу, *научное будущее ОИЯИ — это улучшенное продолжение его настоящего.*

2.1. ОИЯИ в передовых исследованиях на LHC. Эксперименты ATLAS и CMS. Как известно, международные коллаборации ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) [227] и CMS (Compact Muon Solenoid) [228] были созданы специально для проведения многоплановых экспериментов нового поколения, нацеленных на систематическое изучение фундаментальных свойств материи в протон-протонных столкновениях с максимальной энергией 7–14 ТэВ на Большом адронном коллайдере LHC в ЦЕРН. Как уже упоминалось, главнейшими задачами этих исследований было обнаружение бозона Хиггса и поиск эффектов «новой» физики за рамками Стандартной модели.

Детекторы ATLAS и CMS (рис. 27) являются уникальными и беспрецедентными по своей сложности физическими устройствами, которые аккумулируют самые передовые достижения современной науки, техники, технологий, средств обработки и передачи информации. По этим причинам они позволяют исследовать максимально широкий спектр, в том числе и новых, неожиданных физических явлений и гарантируют получение совершенно новых знаний.

Поэтому участие в этих крупномасштабных международных проектах рассматривалось как совершенно необходимое для ОИЯИ — международной научной организации. Решение об участии сотрудников ОИЯИ в экспериментах ATLAS и CMS на коллайдере LHC было официально принято в 1995 г. За прошедшее с тех пор время в ОИЯИ была проделана большая и очень важная работа. Так, руководство коллаборации ATLAS неоднократно подчеркивало, что сотрудники ОИЯИ внесли существенный, а в ряде случаев решающий вклад в разработку, проектирование, производство, монтаж и ввод в эксплуатацию основных подсистем детектора ATLAS — системы детектирования мюонов, электромагнитного и адронного калориметров, трекаera внутреннего детектора, а также системы сбора и первичной обработки данных (см., например, [229–249]). В связи с этим следует особо отметить, что наряду с ОИЯИ только три участника коллаборации ATLAS (Италия, США и ЦЕРН) внесли вклад в разработку и наладку *всех* главных детектирующих систем установки ATLAS. Аналогичная ситуация с участием ОИЯИ в эксперименте CMS (см., например, [24, 228, 250–257]).

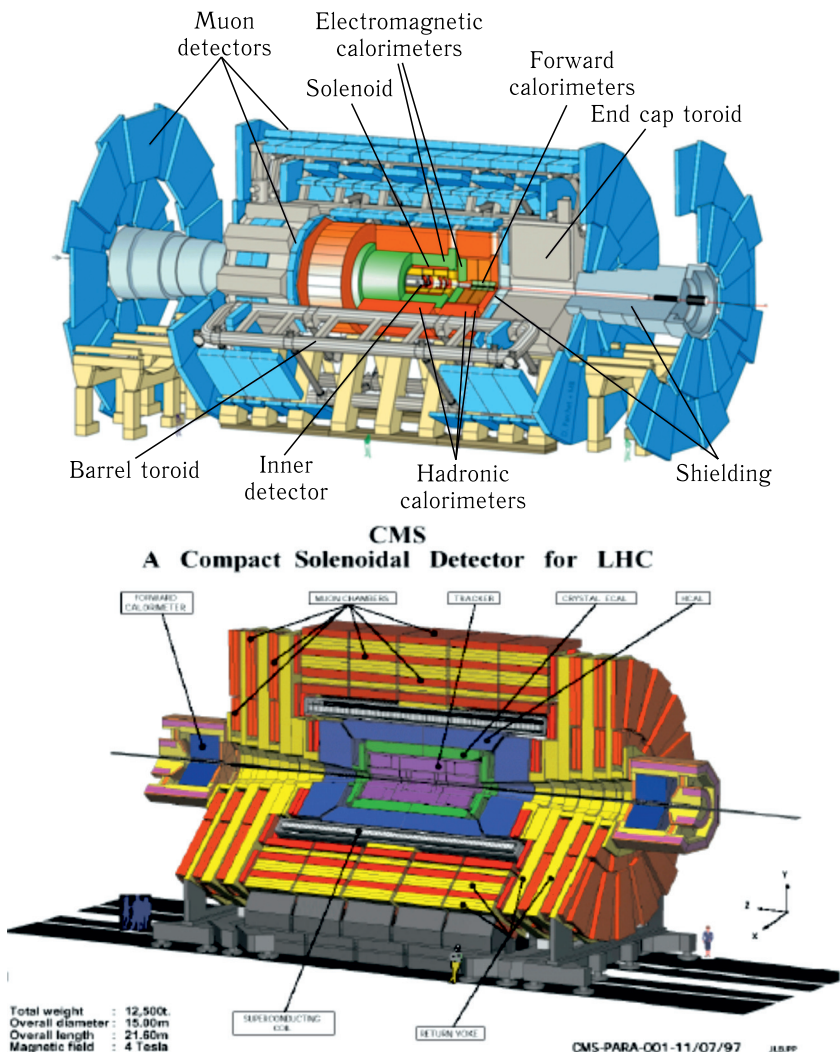


Рис. 27. Общий вид детекторов ATLAS (вверху) и CMS (внизу)

В соответствии с предыдущей семилетней программой ОИЯИ [11] и сформулированными в разд. 1 направлениями развития физики частиц *главная стратегическая задача ОИЯИ* состоит в том, чтобы на основе полноценного участия в международных экспериментах ATLAS и CMS при энергии протонов 13–14 ТэВ (Run-II LHC) получить результаты фундаментальной важности относительно природы бозона Хиггса, структуры и свойств кварк-глюонной

КХД-материи, существования «новой» физики на ТэВ-ном масштабе энергий, такой как суперсимметрия, дополнительные размерности пространства, новые типы частиц и взаимодействий и т. п.

2.1.1. *ATLAS*. Решение главной стратегической задачи будет конкретизировано в виде ряда исследований, предложенных, как правило, сотрудниками группы ОИЯИ в эксперименте ATLAS [258]. В неполный список этих исследований входят: 1) поиск и изучение характеристик дополнительных экзотических (в том числе киральных) Z^* -, W^* -бозонов (рис. 28) в двухструйных, двухлептонных и других процессах [258, 259, 261–268]; 2) поиск возможных проявлений суперсимметрии в конечных состояниях с достаточно большим числом адронных струй, сопровождающихся изолированными лептонами и большой недостающей энергией [269–272]; 3) поиск суперсимметричных заряженных бозонов Хиггса по ряду их конкретных распадов [273–275], а также изучение образования бозона Хиггса Стандартной модели совместно с $t\bar{t}$ -парой; 4) поиск проявлений валентноподобных непертурбативных компонент тяжелых кварков (intrinsic heavy flavor) в протоне на основе различных возможных топологий конечных состояний [276–280]; 5) поиск новых и изучение свойств известных мезонов и барионов, содержащих тяжелые c - и b -кварки [281–286]; 6) всестороннее изучение глюонной структуры протона [287–289]; 7) измерение двухчастичных бозе-эйнштейновских корреляций в протон-протонных столкновениях при больших множественностях и энергиях [290].

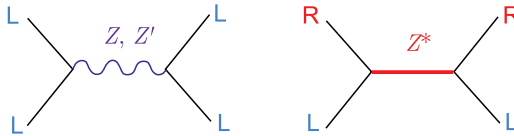


Рис. 28. В отличие от обычных калибровочных бозонов (слева) тензорное взаимодействие фермионов с киральными векторными бозонами не сохраняет киральность (справа), т. е. перемешивает левые и правые фермионы (обозначенные L и R), что приводит к уникальным экспериментальным сигналам [259, 260]

2.1.2. *CMS*. Основные усилия в решении главной задачи будут сосредоточены на традиционных для дубненской группы направлениях. Это исследования процессов рождения пар мюонов и многоструйных событий, цель которых проверка предсказаний Стандартной модели и поиск «новой» физики [291–295]. В более конкретном плане группа ОИЯИ концентрируется на исследовании закономерности образования пар мюонов в процессах Дрелла–Яна. В частности, уже набран большой опыт в измерении дифференциальных и дважды дифференциальных сечений рождения мюонных пар в диапазоне инвариантных масс до $2000 \text{ ГэВ}/c^2$ [253, 257], а также изучена асимметрия вылета мюона «вперед–назад» [296–298]. Другое направление — изучение

свойств бозона Хиггса [299]. Группа продолжит заниматься уточнением значения массы этого бозона и определением его характеристик, которые позволят сделать вывод о принадлежности его к Стандартной модели [254–256].

Помимо участия в этих работах сотрудники ОИЯИ продолжают выполнять свои обязательства в рамках штатной эксплуатации детекторов ATLAS и CMS (обеспечение дежурств, экспертизы, безопасности, поддержка и разработка математического обеспечения, калибровок, контроля качества данных и т. п.), а также в работах по их модернизации.

2.2. ОИЯИ в современной нейтринной физике. Исследования в области слабых взаимодействий, нейтринной физики и астрофизики проводились и проводятся в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова (ЛЯП) силами сотрудников научно-экспериментального отдела ядерной спектроскопии и радиохимии и научно-экспериментального отдела физики элементарных частиц. Родоначальником этого важнейшего сегодня (не только для ОИЯИ) направления был Бруно Понтекорво, который появился в Дубне в 1950 г. [3, 196], где с его непосредственным участием и под его руководством был



Рис. 29. Памятник Бруно Понтекорво (слева) и Венедикту Петровичу Джелепову в Дубне. Б. М. Понтекорво — итальянский и советский физик, академик АН СССР, автор фундаментальных трудов по ядерной физике и физике нейтрино, изобрел метод нейтронного каротажа для поисков нефти. В. П. Джелепов — советский физик, член-корр. АН СССР, первый директор ЛЯП, известен своими достижениями в фундаментальной науке и создании методики лечения опухолей пучками протонов

получен ряд важнейших результатов. Среди них — открытие бета-распада пиона $\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$ [300], обоснование существования мюонного нейтрино и предложение эксперимента по его обнаружению [301, 302], наблюдение отдачи ядра от мюонного нейтрино в реакции $\mu^- + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3\text{H} + \nu_\mu$ и оценка верхнего предела на массу ν_μ [303, 304], подтверждение $V-A$ -варианта и универсальности слабого взаимодействия путем измерения вероятности захвата мюонов протонами [305], измерение спиральности электронного нейтрино от распада ${}^{152m}\text{Eu}$ [306] и мн. др. Как известно, именно в Дубне Б. М. Понтекорво сформулировал идею об осцилляциях нейтрино — превращениях одного типа нейтрино в другой (рис. 30) [307, 308], за экспериментальное подтверждение которой была присуждена Нобелевская премия по физике 2015 г.

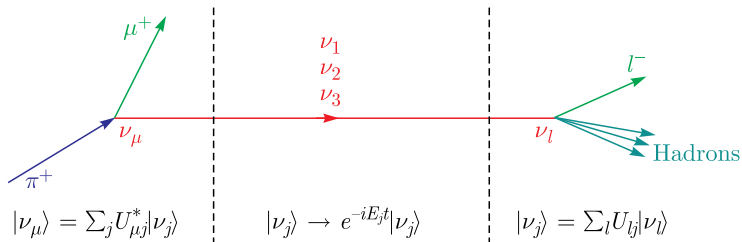


Рис. 30. Пример превращения нейтрино одного типа в нейтрино другого типа (нейтронные осцилляции) на диаграммном уровне. Рождается (слева) нейтрино мюонного типа, распространяются в пространстве массовые состояния нейтрино, детектируется (справа) нейтрино другого (не обязательно мюонного) типа. Из [309, 310]

В настоящее время физики ОИЯИ проводят эксперименты практически со всеми возможными источниками нейтрино. *Солнечные нейтрино* являются предметом тщательного исследования в эксперименте BOREXINO [311], где измерены потоки солнечных бериллиевых, борных, $\nu_{\nu e}$ - и $\nu_{\nu \mu}$ -нейтрино, а также поставлены пределы на эффективный магнитный момент нейтрино, поток солнечных аксионов, нарушение принципа Паули и т. п. [312–314]. Помимо этого уникальный детектор BOREXINO позволил измерить поток *геонейтрино* от распадов естественных радиоактивных изотопов в Земле [98, 99, 314, 315].

Интенсивные пучки *ускорительных* нейтрино (и антинейтрино) используются сотрудниками ОИЯИ в эксперименте NO ν A, нацеленном на определение иерархии нейтринных масс и решение вопроса о CP-нарушении в нейтринном секторе (см., например, [65, 316, 317]). Успешно завершена работа эксперимента OPERA, в котором *впервые* было обнаружено пять штук τ -нейтрино, возникших за счет осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ в пучке ν_μ от ускорителя SPS ЦЕРН [318].

Пучки *реакторных* антинейтрино ($\bar{\nu}_e$ от атомных реакторов) сегодня являются самыми интенсивными из доступных источников нейтрино (табл. 1). По этой причине они постоянно используются (в том числе и сотрудниками ОИЯИ) в целом ряде амбициозных исследований [95].

На Калининской атомной электростанции (КАЭС) таковым является эксперимент GEMMA, где получен лучший предел на магнитный момент анти-

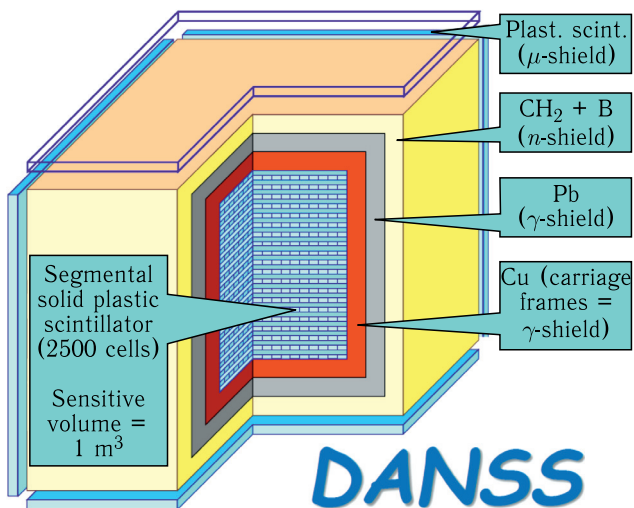


Рис. 31. Типичный вид промышленной атомной станции (вверху) и схема детектора на пластических сцинтилляторах DANSS (внизу)

нейтрино [319,320] и ожидается заметное улучшение этого результата. Второй эксперимент — DANSS [102, 321], задача которого прямое детектирование реакторных антинейтрино с целью мониторингования работы реактора и решения вопроса о существовании легких стерильных нейтрино [69]. В 2016 г. был начат набор данных. Главное преимущество детектора DANSS (рис. 31) состоит в том, что он способен регистрировать до 10 000 антинейтринных событий в сутки благодаря близости к центру реактора. Эти же возможности планируется использовать в эксперименте ν GEN по поиску когерентного рассеяния (анти)нейтрино на ядрах с низкофоновыми и низкопороговыми Ge-детекторами нового поколения [322]. Следует подчеркнуть, что сотрудники ОИЯИ являются ключевыми исполнителями всех перечисленных выше экспериментов на Калининской атомной электростанции.

Как известно, в международном эксперименте Daya Bay (Китай) с реакторными $\bar{\nu}_e$, где участие ОИЯИ оценивается очень высоко, был впервые с высокой точностью измерен угол смешивания θ_{13} [323], что стало одним из самых значимых результатов в физике в 2012 г., а также были получены другие важные результаты [324–326]. Наряду с продолжением анализа данных эксперимента Daya Bay группа ОИЯИ в настоящее время основные усилия сосредоточила на еще более амбициозном международном проекте с реакторными антинейтрино — JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory) [327] (рис. 32), который имеет широкую программу многоплановых экспериментов по физике и астрофизике нейтрино [328]. Для полноценного участия в этом эксперименте в ОИЯИ уже создана совершенно новая инфраструктура, в частности, для проверки, тестирования и паспортизации фотоумножителей.

Атмосферные нейтрино и особенно нейтрино астрофизического (*галактического и внегалактического*) происхождения представляют собой главный объект исследования Байкальского нейтринного телескопа гигатонного масштаба — Baikal-GVD (рис. 33). В этих работах ОИЯИ участвует уже более 25 лет [329–332]. Этот эксперимент приобретает важнейшее значение в свете недавнего обнаружения коллаборацией IceCube космических нейтрино внегалактического происхождения с энергией 10^{15} эВ [333,334], что, по существу, открывает новое направление в современной физике — *нейтринную астрономию*. Модернизированная установка Baikal-GVD должна играть первостепенную роль в данном направлении исследований (рис. 34).

За прошедшие годы отработана технология регистрации нейтрино большими глубоководными детекторами и получен ряд физических результатов, например, измерены потоки атмосферных нейтрино [335]. В 2006–2010 гг. все ключевые элементы и системы GVD (Gigaton Volume Detector) были разработаны, произведены и протестированы. В 2015 г. установлен первый кластер «Дубна» [336]. На масштаб установки Baikal-GVD объемом порядка 1 км^3 [332,337,338] планируется выйти в ближайшие 7–10 лет [339]. Проект

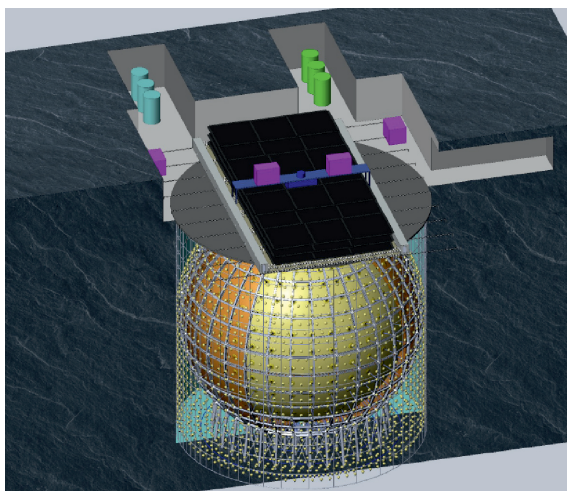
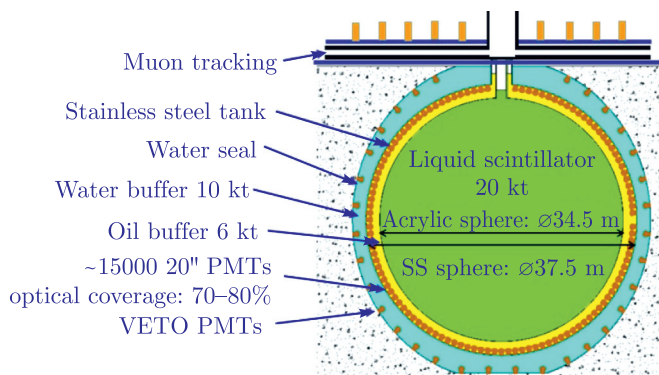


Рис. 32. Схема (вверху) и графический дизайн (внизу) нового многофункционального детектора реакторных антинейтрино JUNO

Baikal-GVD вместе с KM3Net и IceCube включен в единый проект «Глобальная нейтринная обсерватория» [340].

Важными для фундаментальных исследований источниками нейтрино являются слабые ядерные процессы, такие как обычный бета-распад, К-захват электронов, а также двойной бета-распад. Наиболее фундаментальное значение имеет поиск безнейтринного ядерного двойного бета-распада, поскольку последний возможен только в случае явного нарушения закона сохранения лептонного числа ($\Delta L = 2$), а также крайне важен для определения природы нейтрино (Дирака, т.е. $\nu \neq \bar{\nu}$, или Майораны, т.е. $\nu \equiv \bar{\nu}$) и абсолютного масштаба нейтринных масс (рис. 35).

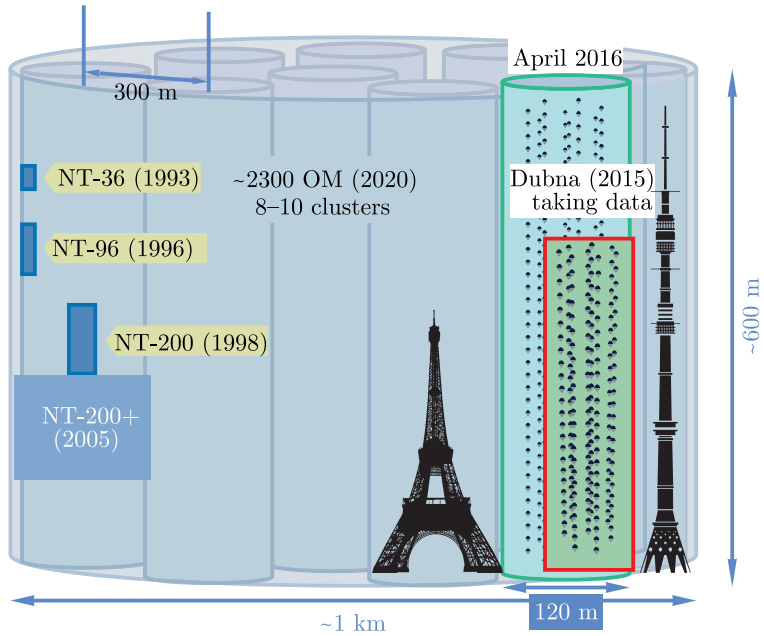


Рис. 33. Этапы и перспективы развития проекта Baikal-GVD кубокилометрового масштаба

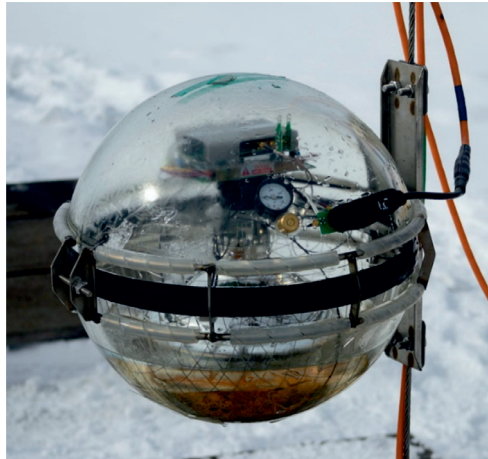
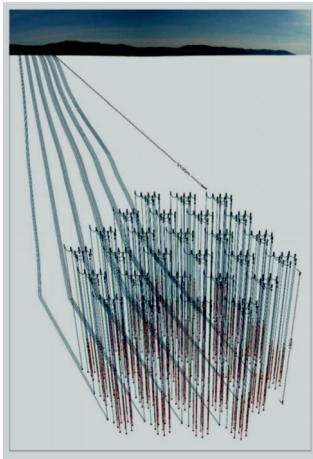


Рис. 34. Схематичный вид полномасштабного нейтринного телескопа Baikal-GVD (слева). Оптический модуль перед погружением под лед (справа). Из [332]

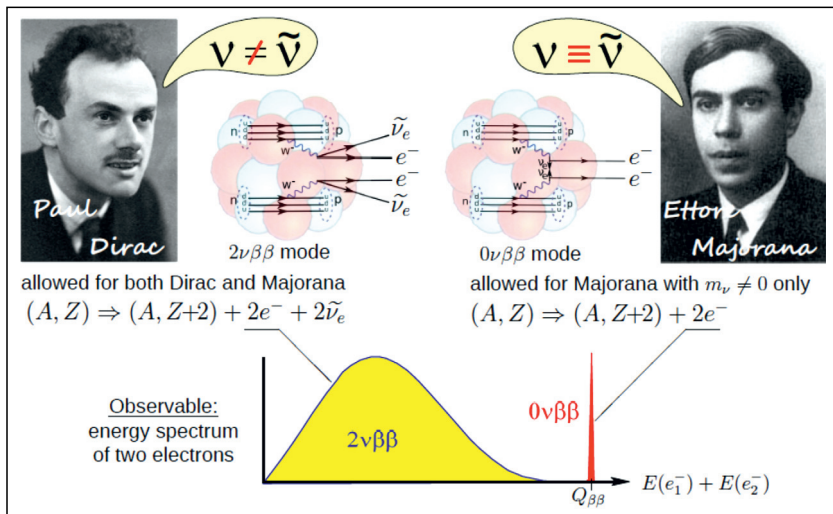


Рис. 35. Две главные моды двойного бета-распада — двухнейтринная $2\nu\beta\beta$ и безнейтринная $0\nu\beta\beta$. Вероятность $0\nu\beta\beta$ -моды зависит от абсолютного масштаба масс нейтрино $m_{ee} = \left| \sum_i m_i V_{ei}^2 \right|$. Рисунок В. Г. Егорова из [339]

ОИЯИ принимает участие в экспериментах SuperNEMO и GERDA (а также MAJORANA) по поиску безнейтринного двойного бета-распада. Коллаборация NEMO-3 (рис. 36, вверху), задача которой состояла в одновременном измерении треков и энергий испускаемых при распаде электронов (детектор \neq источник), закончила свою работу в низкофоновой подземной международной лаборатории LSM (Модан, Франция), частичное финансирование которой осуществляется за счет ОИЯИ. В эксперименте получено много важных результатов, в частности определен новый предел на время жизни ядра ^{100}Mo по каналу безнейтринного двойного бета-распада [341,342]. В настоящее время коллаборация NEMO, сохраняя главную идеологию одновременного трекинга и калориметрии, работает над созданием первого демонстрационного модуля детектора SuperNEMO (рис. 37).

В эксперименте GERDA (рис. 36, внизу), основанном на принципе «детектор = источник», при участии сотрудников ОИЯИ измерено время жизни ядер ^{76}Ge по двухнейтринному каналу двойного бета-распада, получен новый предел на время жизни этого ядра по отношению к двойному безнейтринному бета-распаду [343–345]. Продолжение успешной работы эксперимента GERDA в течение ближайших 5–7 лет позволит с высокой степенью достоверности подтвердить или опровергнуть [346, 347] уникальный результат эксперимента Heidelberg–Moscow [348, 349].

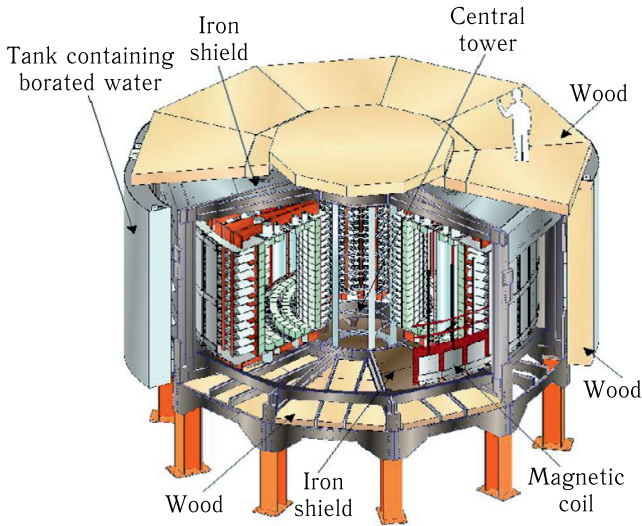


Рис. 36. Детектор NEMO-3 (вверху), работавший в лаборатории LSM (Модан, Франция), и детектор GERDA (внизу) в одном из залов лаборатории Гран-Сассо (Италия)

Здесь следует отметить, что после упомянутых выше выдающихся успехов экспериментов по поиску и исследованию нейтринных осцилляций, которые безусловно надо продолжать как минимум для решения вопроса об иерархии нейтринных масс и характере нарушения CP-симметрии в лептонном секторе,

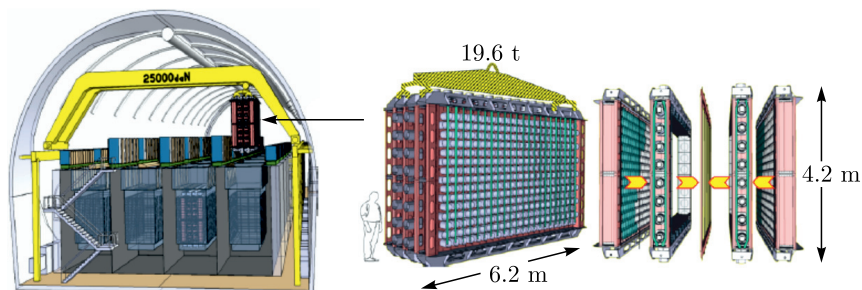


Рис. 37. Первый демонстрационный модуль (справа) нового детектора SuperNEMO уже собран в лаборатории LSM (слева)

сегодня на первый план выдвигаются задачи *определения природы, абсолютного масштаба масс, электромагнитных свойств и космических источников* нейтрино. Именно здесь должны быть приложены дополнительные усилия, и именно в этой сфере следует ожидать наиболее важных экспериментальных результатов.

В Моданской подземной лаборатории сотрудники ОИЯИ вносят значительный вклад в проведение эксперимента EDELWEISS (рис. 38, слева) с набором болометрических сверхчистых германиевых детекторов, задача которого — *прямой поиск темной материи* [350,351]. В рамках упомянутой выше коллаборации BOREXINO группа ОИЯИ принимает участие в эксперименте по поиску темной материи DarkSide (рис. 38, справа) с времяпроекционной камерой на жидком аргоне [352, 353]. Планируемое увеличение количества

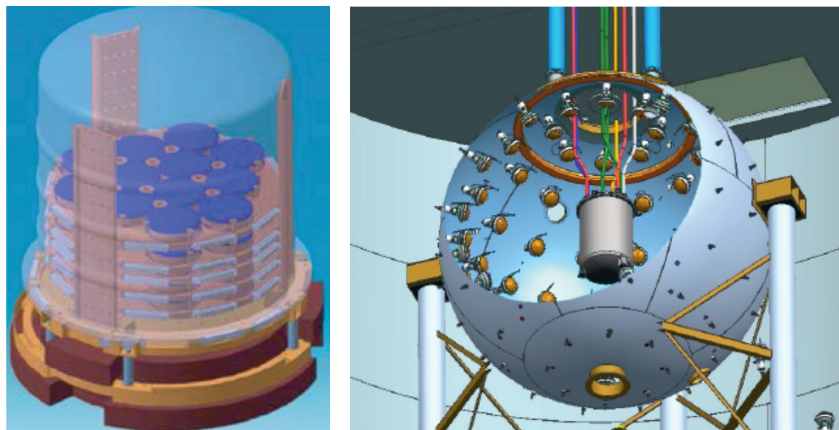


Рис. 38. Криостат детектора EDELWEISS-3 (слева) и детектор DarkSide-50 (справа) [353]

высокоточных германиевых детекторов в эксперименте EDELWEISS представляется стратегически очень важным с точки зрения возможности регистрации годовой модуляции сигнала — отличительной характеристики взаимодействия частиц галактической темной материи [115].

Все описанные в данном разделе проекты составляют основу новой нейтринной программы ОИЯИ (подробности в «Белой книге» [339]). В ее рамках Институт ожидает результатов первостепенной важности в экспериментах как на территории России, так и за рубежом. При этом ОИЯИ считает необходимым участвовать в наиболее перспективных международных проектах в области нейтринной физики, в которых вклад сотрудников ОИЯИ является если не решающим, то крайне важным. Это в первую очередь упомянутые эксперименты JUNO и NO ν A, EDELWEISS и SuperNEMO, а также BOREXINO, GERDA.

Итак, согласно новой нейтринной программе [77, 339, 354] главная задача состоит в том, чтобы *обеспечить ОИЯИ лидирующие позиции в нейтринной физике и астрофизике* как на основе астрофизических исследований на уникальном нейтринном телескопе Baikal-GVD и многоплановых (фундаментальных, прикладных) исследований на пучках антинейтрино Калининской атомной электростанции, так и за счет решающего вклада сотрудников ОИЯИ в наиболее перспективные международные эксперименты (такие как JUNO, EURECA [355] и др.), а также благодаря созданию в Дубне самой передовой исследовательской инфраструктуры.

2.3. ОИЯИ в физике флейвора. Косвенный поиск «новой» физики.

Понятие лептонного числа (различающего заряженные лептоны) возникло [302, 356, 357] фактически благодаря отрицательному результату пионерских работ (1948–1950 гг.) Б. Понтекорво и Э. Хинкса [358, 359] по поиску превращения одного заряженного лептона (мюона) в другой заряженный лептон (электрон) без испускания нейтрино ($\mu \rightarrow e\gamma$).

В дальнейшем по инициативе Б. М. Понтекорво в ОИЯИ были выполнены первые экспериментальные работы по определению вероятностей распадов, запрещенных законом сохранения лептонного числа. Так, на установке АРЕС было достигнуто рекордное ограничение на вероятность распада $\mu \rightarrow 3e$ [360]. В 1957 г. Б. М. Понтекорво высказал идею о возможном существовании переходов мюония (атома, состоящего из двух лептонов, $M \equiv \mu^+e^-$) в антимюоний ($\bar{M} \equiv \mu^-e^+$) [307]. В этом процессе лептонное число меняется на двойку ($\Delta L = 2$), и переход $\mu^+e^- \rightarrow \mu^-e^+$ полностью запрещен в Стандартной модели. На фазотроне ЛЯП в 1993 г. была установлена верхняя граница вероятности перехода $M \rightarrow \bar{M}$ [361, 362].

В настоящее время традиционный для ОИЯИ поиск редких, нарушающих сохранение флейвора переходов между заряженными лептонами продолжается путем участия в соответствующих амбициозных международных

проектах. Среди них — поиск распада $\mu \rightarrow e\gamma$ на рекордном уровне точности в PSI (проект MEG) [363, 364], измерение аномального магнитного момента мюона во FNAL (проект «Муон $g-2$ ») [365], а также высокопрецизионный поиск превращения (конверсии) мюона в электрон на ядерных мишенях $\mu^- A \rightarrow e^- A$ (эксперименты Mu2e [366–368] и COMET [369–371], которые проводятся в разных постановках).

Особый интерес представляет возможность поиска в эксперименте Mu2e конверсии мюона в позитрон $\mu^- A \rightarrow e^+ A$ [372–374], которая полностью запрещена в Стандартной модели, поскольку в ней лептонное число нарушается на две единицы ($\Delta L = 2$). В этом смысле $\mu^- \rightarrow e^+$ конверсия является прямым (ускорительным) аналогом безнейтринного двойного бета-распада $0\nu\beta\beta$ и также чувствительна к абсолютному масштабу масс нейтрино, однако в виде другой комбинации: $m_{\mu e} = \left| \sum_i^3 m_i V_{\mu i} V_{e i} \right|$ (ср. рис. 35).

Начало исследованиям по *адронной* физике флейвора в ОИЯИ было положено работами Б. М. Понтекорво на синхроциклотроне ЛЯП (1951–1960 гг.) по поиску совместного образования каонов и нейтральных гиперонов [375, 376]. В результате возникло понятие «странность» [377]. В дальнейшем сотрудники ЛЯП уделяли много внимания изучению свойств адронов, обладающих этим квантовым числом. Они принимали участие в экспериментах ГИПЕРОН (см., например, [378–381]) и EXCHARM (см., например, [382, 383]) на серпуховском ускорителе [384], а в последнее время — в эксперименте E391a (Япония) по поиску крайне редких распадов нейтральных каонов (см., например, [385–388]).

В Лаборатории высоких энергий ОИЯИ исследования свойств и характеристик распадов нейтральных K -мезонов [389, 390] начались в 60-х гг. XX в. В настоящее время сотрудники этой лаборатории вносят заметный вклад в эксперимент NA62 по изучению особенно важного распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ (рис. 39) на новом уровне точности (см., например, [391–394]).

Кроме изучения «странности» физики ОИЯИ принимали участие в исследованиях редких распадов и превращений очарованных (содержащих c -кварки) и прелестных (содержащих b -кварки) адронов. Например, был выполнен поиск лептонного распада очарованного мезона $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$

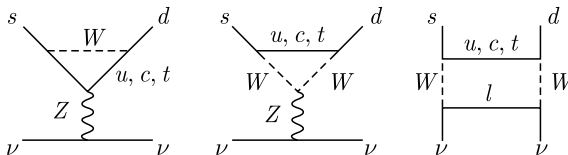


Рис. 39. Примеры диаграмм, дающих вклад в распад $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ в Стандартной модели

в ЦЕРН [395], измерена поляризация Λ - и $\bar{\Lambda}$ -гиперонов в эксперименте NOMAD [396], определена частота переходов в системе $B_s^0 - \bar{B}_s^0$ в эксперименте CDF [397] и др.

Итак, главная задача ОИЯИ в области косвенного поиска «новой» физики состоит в *продолжении* традиционных для ОИЯИ работ по *флейворной физике кварков и лептонов* на основе полноценного участия в таких экспериментах мирового уровня, как исследование редких CP-нарушающих распадов каонов $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, $K^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ [398], а также прецизионный поиск конверсии мюонов в электроны (и позитроны) на ядрах $\mu^- A \rightarrow e^\pm A$.

2.4. NICA — будущее ОИЯИ в релятивистской физике тяжелых ионов.

Фундаментальная, стратегическая *цель* проекта NICA (Nuclotron based Ion Collider Facility, рис. 40) — *получение уникальной информации о КХД (в том числе в непертурбативном режиме)* при проведении экспериментальных исследований горячей и плотной сильновзаимодействующей КХД-материи, поиске проявления смешанной фазы и критической точки фазовой диаграммы КХД (рис. 22) в столкновениях тяжелых ионов (см., например, [399–402]).

Область энергий коллайдера NICA ($\sqrt{s_{NN}} \simeq 5$ ГэВ) считается особенно интересной — она значительно ниже, чем энергия ЛХС, однако как раз соответствует той энергии (рис. 22), при которой плотность барионов в момент их «вымораживания» ожидается максимальной. В этом диапазоне энер-

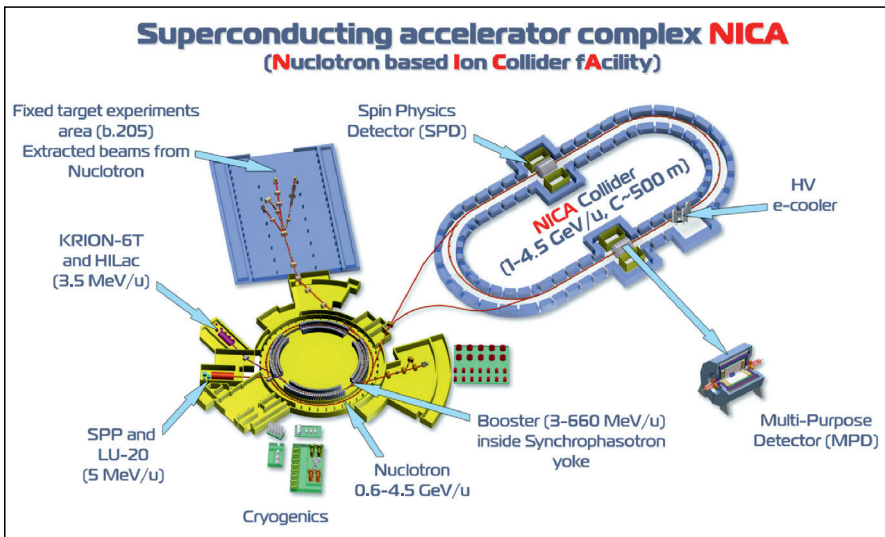


Рис. 40. Схематический вид всего комплекса NICA на территории Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ

гий адронная система занимает максимальный объем пространства-времени в виде смешанной фазы кварк-адронной материи (фазы сосуществования адронов и кварков-глюонов). Область энергии NICA открывает доступ к анализу максимально высокой плотности барионной материи в лабораторных условиях [182, 184, 403–406].

Мегапроект NICA включает в себя два достаточно длительных этапа. Первый и главный (2016–2023 гг.) — это создание всего ускорительно-детекторного комплекса NICA, ввод его в эксплуатацию и доведение коллайдера и детекторов до проектных параметров. В дальнейшем задача физиков ОИЯИ будет состоять в том, чтобы в результате многоплановых исследований в максимально полной мере дать ответы на все те важнейшие вопросы, ради которых был задуман данный комплекс. В конечном итоге надо будет получить совершенно новую информацию, которая позволит лучше понять фундаментальные основы КХД — современной теории сильных взаимодействий.

В ближайшие семь лет, пока будет создаваться комплекс NICA и многофункциональный детектор MPD, в ЛФВЭ ОИЯИ планируется ввод в эксплуатацию установки BM@N (барионная материя на нуклотроне). Эта установка [407–410] не только обещает новые результаты при систематическом исследовании плотной барионной материи, но и позволит сотрудникам приобрести бесценный опыт работы в данной области, который, безусловно, будет необходим на второй стадии реализации проекта NICA. Следует отметить, что сотрудники ЛФВЭ приобретают этот опыт, участвуя в таких экспериментах в области релятивистской физики тяжелых ионов, как ALICE (см., например, [411, 412]) на Большом адронном коллайдере LHC и STAR (см., например, [413, 414]) на коллайдере релятивистских тяжелых ионов (RHIC). Помимо этого ОИЯИ участвует в подготовке нового эксперимента CBM (Compressed Baryonic Matter) по исследованию плотной барионной материи на ускорительном комплексе GSI (см., например, [415–417]). Широко обсуждается программа исследований по спиновой физике на коллайдере NICA, которая также имеет глубокие традиции в ЛФВЭ. В рамках этой программы запланировано создание специализированного детектора SPD для этих исследований (см., например, [418]).

2.5. ОИЯИ в исследованиях структуры нуклонов и основ КХД. Работы в этой области начались сразу с момента запуска синхроциклотрона ЛЯП в 1949 г. и продолжаются (в силу своей фундаментальной важности) по сей день. Достаточно упомянуть, что в первые же годы работы этого ускорителя в опытах по упругому и неупругому нуклон-нуклонному рассеянию была доказана справедливость основных принципов симметрии сильного взаимодействия — зарядовая независимость ядерных сил и их изотопическая инвариантность при высоких энергиях (см., например, [419, 420]). В 1957 г. на синхроциклотроне было обнаружено явление квазиупругого выбивания дейтронов из ядер, которое было интерпретировано Д. И. Блохинцевым на основе

представлений о существовании в ядре флюктуонов — флуктуаций плотности ядерного вещества — и впоследствии стало характерным для релятивистской ядерной физики. Оно было зарегистрировано как открытие (см., например, в [8]). В исследованиях процессов перезарядки π - и K -мезонов в η -мезон на ядерной мишени было обнаружено явление цветовой прозрачности ядер (см., например, [421, 422]). Список достижений в этой области очень значителен (см., например, [9]), упомянем здесь только уникальные работы по «мюонному катализу» [423].

Сегодня в ОИЯИ «главными действующими лицами» этого направления являются участники экспериментов COMPASS, BES-III, PANDA, а также фундаментальных работ по физике (ультрахолодных) нейтронов в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка на модернизированном реакторе ИБР-2М (см., например, [207, 424, 425]).

Научная программа эксперимента COMPASS (на базе ускорителя SPS ЦЕРН) включает в себя изучение (непертурбативной) КХД структуры адронов — обобщенных функций распределения партонов, поляризованных структурных функций, поляризуемостей пионов и каонов, формфакторов адронов и т. п. — на основе систематического исследования широкого спектра инклюзивных и полуинклюзивных процессов рассеяния мюонов и адронов на поляризованных адронных мишенях. В эту программу также входят работы по анализу реакций Примакова (рис. 41), дифракционных процессов, поиск новых связанных состояний кварков и глюонов, в том числе содержащих

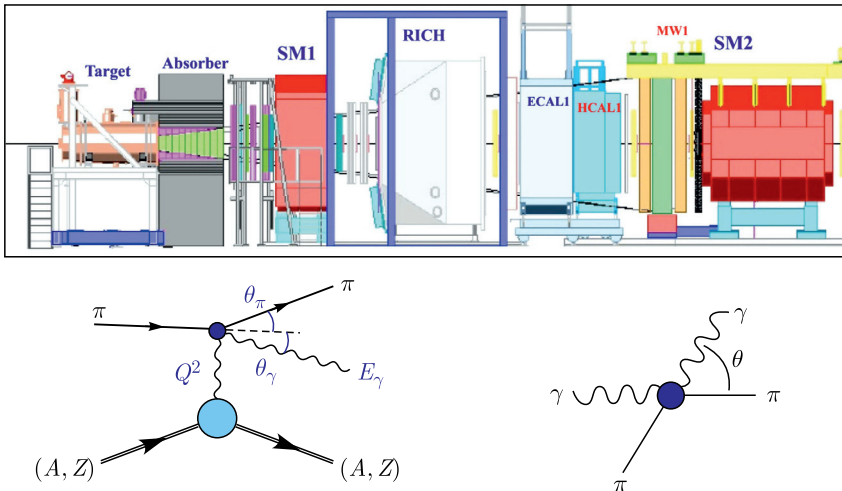


Рис. 41. Схема установки COMPASS (вверху); диаграммы эффекта Примакова, позволяющие измерить поляризуемость пионов (внизу)

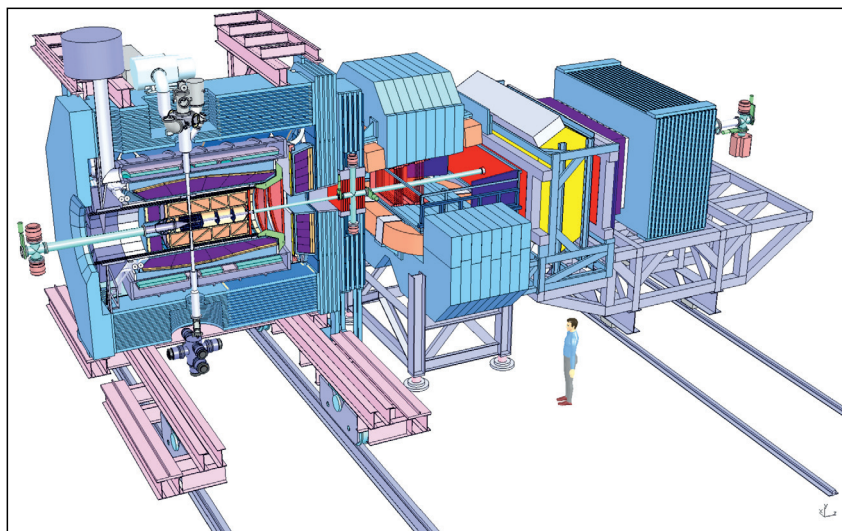
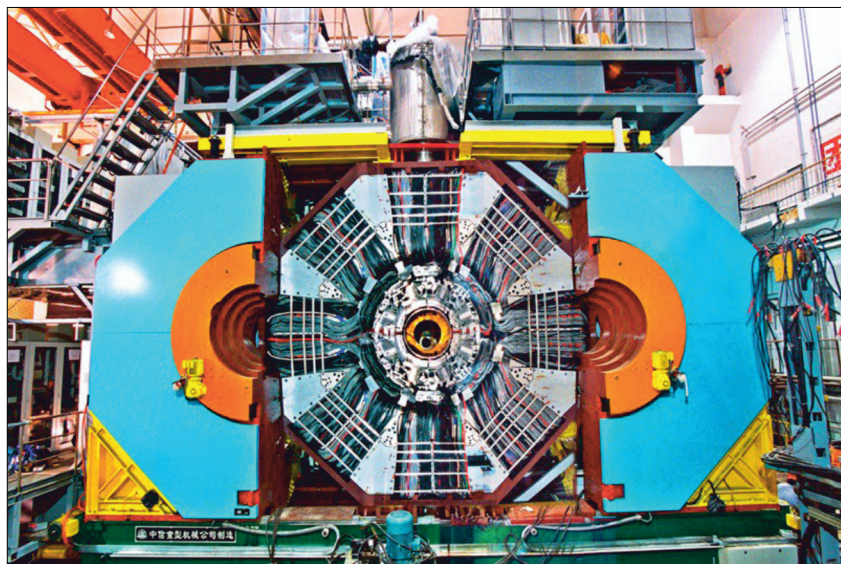


Рис. 42. Установка BES-III (вверху) и схема установки PANDA (внизу)

тяжелые кварки (см., например, [426–430]). Многие из этих задач были предложены коллаборации сотрудниками ОИЯИ.

Основной целью эксперимента BES-III (рис.42, вверху) на электрон-позитронном коллайдере BEPC-II (Пекин) является проведение точных из-

мерений в области рождения пар тау-лептонов и резонансов чармония, поиск экзотических состояний (глюболы, гибриды, мультикварки) и т. п. Фундаментальная цель этих исследований — прецизионная проверка предсказаний КХД и Стандартной модели в лептонных распадах очарованных мезонов (см., например, [154, 431–433]).

Дальнейшее изучение экзотических состояний ядерной материи и структуры нуклонов планируется в эксперименте PANDA (рис. 42, внизу) на ускорительном комплексе FAIR (см., например, [434–436]). В настоящее время идут работы по подготовке этих экспериментов.

В ЛНФ им. И. М. Франка на импульсном реакторе ИБР-2М ведется широкомасштабная программа [425, 437] фундаментальных и прикладных исследований [204, 438, 439] на нейтронных пучках (рис. 43), а также начаты перспективные работы по созданию интенсивного источника нейтронов нового поколения [209, 440].

Таким образом, задачи ОИЯИ в области пертурбативной и непертурбативной КХД — полноценное участие в международных наиболее перспективных экспериментах, нацеленных на исследование адронной, ядерной и спиновой структуры сильновзаимодействующих частиц (таких как COMPASS, BES-III, PANDA и др.); продолжение фундаментальных исследований в обла-

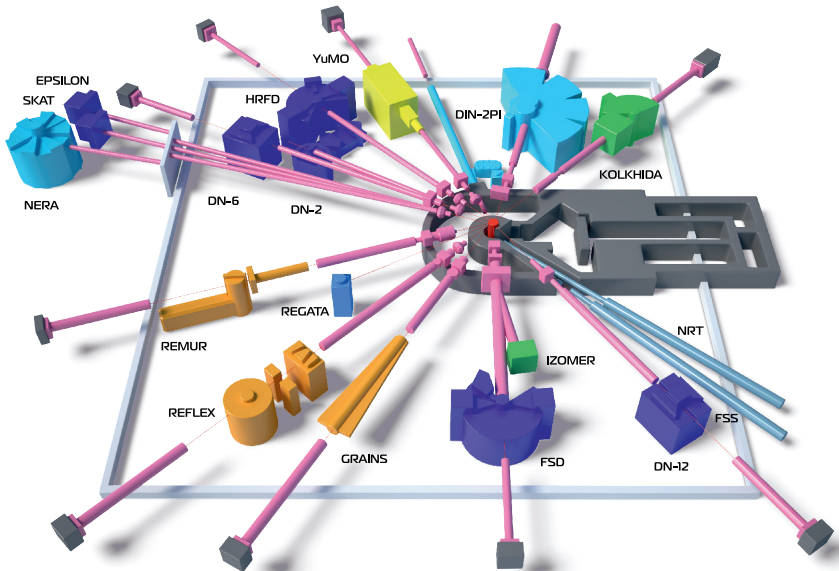


Рис. 43. Расположение спектрометров на пучках импульсного реактора ИБР-2М. Они используются для решения как фундаментальных, так и прикладных задач

сти нейтронной физики, в том числе измерение фундаментальных параметров бета-распада нейтрона, его времени жизни и электрического дипольного момента, а также проверка равенства инерционной и гравитационной масс нейтрона как в рамках международных коллабораций на внешних источниках ультрахолодных нейтронов [441], так и на импульсном реакторе ИБР-2М.

2.6. Задача ОИЯИ в физике атомного ядра с точки зрения КХД.

Общепризнано, что упоминавшиеся ранее результаты синтеза сверхтяжелых элементов с $Z = 113$ – 118 и заполнение 7-й строки таблицы Менделеева [223, 224] были бы невозможны без определяющего вклада сотрудников Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флёрва ОИЯИ. Хотя явная связь этих выдающихся результатов с фундаментальными основами *непертурбативной КХД* пока не прослеживается, следует подчеркнуть, что эта связь, безусловно, существует и выявление ее представляет собой одну из важнейших задач будущего развития физики элементарных частиц. При этом вполне может оказаться так, что именно эта информация будет иметь решающее значение в разгадке проблемы конфайнмента и позволит объяснить, как кварки собираются в нуклоны, а последние неизбежно формируют атомные ядра.

В связи с этим в ближайшие семь лет необходимо сохранить и приумножить *лидерство ОИЯИ в области физики сверхтяжелых элементов* при проведении всесторонних исследований на новой Фабрике сверхтяжелых элементов ОИЯИ. Эти исследования должны включать в себя синтез и изучение ядерно-физических и химических свойств изотопов сверхтяжелых элементов, изучение механизмов реакций со стабильными и радиоактивными ядрами, поиск новых видов распадов атомных ядер и т. д. Помимо этого сотрудникам ЛЯР им. Г. Н. Флёрва предстоит вывести на новый уровень исследования легких экзотических ядер вблизи границы стабильности с помощью дубненского ускорительного комплекса пучков радиоактивных ионов [442].

2.7. Задачи ОИЯИ в области физики конденсированного состояния материи. Помимо физики элементарных частиц и атомного ядра, важнейшим направлением исследований ОИЯИ является физика конденсированного состояния вещества [9, 11]. Проследить связь этой области с фундаментальными задачами физики элементарных частиц еще более сложно, чем в случае ядерной физики. И, видимо, это излишне. Поэтому исключительно для полноты картины, в соответствии с новой семилетней программой ОИЯИ [443], ниже перечислены лишь основные направления исследований в этой сфере.

Стратегически важными в ОИЯИ считаются исследования в таких областях, как физика и химия новых функциональных материалов, которые включают исследование структуры и свойств этих материалов, в том числе и в экстремальных условиях, изучение фундаментальных закономерностей переходных процессов в конденсированных средах, а также компьютерное моделирование физико-химических свойств новых кристаллических и наноструктурированных материалов [444].

Другая область связана с физикой наносистем и наноразмерных явлений, где ведутся исследования магнитных свойств слоистых наноструктур, структуры углерод- и кремнийсодержащих наноматериалов, а также их молекулярной динамики.

Физика и химия комплексных жидкостей и полимеров, где интересы сосредоточены на всестороннем исследовании магнитных коллоидных систем и проведении структурного анализа полимерных нанодисперсных материалов, также представляют большой интерес.

Не менее важной областью считаются молекулярная биология и фармакология, включающие в себя исследование надмолекулярной структуры и функциональных характеристик биологических материалов, свойств липидных мембран и липидных комплексов, а также особенностей взаимодействия наночастиц и функциональных комплексов на их основе с биологическими макромолекулами, влияния структурной и кластерной устойчивости наносистем на биосовместимость сложных растворов. Сюда же можно отнести спектрально-микроскопические исследования мембранных белков, клеток и организмов.

Более прикладной аспект имеют работы в области материаловедения и инженерных наук, где главные интересы сосредоточены на исследованиях структуры и свойств минералов и горных пород, конструкционных материалов, на неразрушающем контроле внутренних напряжений в промышленных изделиях и конструкционных материалах и т. п.

Перспективы дальнейшего развития радиационно-физических и радиоизотопных исследований связаны в настоящее время с решением таких задач, как детальное изучение эффектов, вызываемых тяжелыми ионами в веществе (с целью разработки нанотехнологических приложений пучков ускоренных ионов), радиационная стойкость материалов (включая тестирование микроэлектронных схем космической техники), создание нового поколения трековых мембран и нанообъектов с уникальными заданными свойствами, развитие гибридных нанотехнологий, получение радионуклидов для ядерной медицины и радиоэкологических исследований на пучках γ -квантов, нейтронов, α -частиц и тяжелых ионов [445, 446].

Подготовка экспериментов на ускорителях нового поколения (ILC, CLIC) требует разработки совершенно новых типов детекторов, способных длительно работать в условиях высокой радиационной загрузки и обеспечить при этом требуемую точность и надежность регистрации. Создание таких детекторов важно не только для физики высоких энергий. Будущее биологии, материаловедения, геофизики и медицины сегодня тесно связано с исследованиями с помощью источников синхротронного, рентгеновского излучения и других ядерно-физических методов. Для этого потребуются регистрирующие системы и детекторы изображений с высокой разрешающей способностью [443].

Следует отметить, что именно эти и многие другие (не упомянутые здесь) работы в области *конденсированного состояния материи* являются той основой, на которую опираются прикладные исследования и совершенно *новые разработки, технологии и материалы*, которые, уже в свою очередь, призваны улучшать как качество самой жизни, так и ее безопасность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За 60 лет ОИЯИ пройден весьма успешный путь исследований в области физики элементарных частиц, атомных ядер и конденсированного состояния вещества. Этот путь опирался на заложенные отцами-основателями Института традиции международной, многоплановости и фундаментальности научной политики — триединого базиса стабильного развития фундаментальной науки.

В данном обзоре сделана попытка заглянуть в будущее и показать место ОИЯИ в решении важнейших задач развития самой фундаментальной области современного естествознания — физики элементарных частиц. Действительно, эти главные задачи — поиск новых явлений за рамками Стандартной модели и выяснение КХД-природы сильных взаимодействий — вполне оправдывают само название Института, поскольку общей целью они фактически *объединяют* все многоплановые исследования «под одной крышей» — все лаборатории ОИЯИ вносят свой достойный вклад в решение общей задачи.

Данный обзор носит умышленно «экспериментальный» характер. Этот взгляд на ОИЯИ из «окон Лаборатории ядерных проблем», с одной стороны, вполне оправдан, поскольку именно с многогранности ЛЯП и начался наш Институт. С другой стороны, прославленные работы дубненских теоретиков, а также биофизиков, генетиков, радиобиологов, специалистов по информационным технологиям и многих других, безусловно, должны быть отмечены. За прошедшие 60 лет в этих областях тоже достигнуты важнейшие результаты, которые пока еще ждут своего отдельного описания. Нам же хотелось подчеркнуть главное — успехи и перспективы ОИЯИ именно в экспериментальной области современной физики элементарных частиц и атомного ядра.

Итак, ОИЯИ — уникальная международная организация, ведущая исследования на самом передовом рубеже современной фундаментальной науки. Будущее ОИЯИ вполне оптимистично — почти во всех важнейших направлениях исследований Институт имеет хорошие перспективы внести свой решающий вклад.

Благодарности. В обзоре использованы материалы, подготовленные лабораториями ОИЯИ для новой семилетней программы. Все подробности (научные, финансовые, ресурсные, инфраструктурные и др.) можно найти в специальной брошюре «Научная программа развития ОИЯИ на 2017–2023 гг.» [443].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Джелепов В. П.* Когда Дубны не было на карте // Наука и общество: История советского атомного проекта (40-е – 50-е годы): Междунар. симп. ИСАП-96. М.: ИздАТ, 1997. Т. 1. С. 284–290.
2. История создания синхротрона ОИЯИ (в документах и воспоминаниях) / Под общ. ред. Н. А. Русаковича. Дубна: ОИЯИ, 2014. 257 с.
3. *Bednyakov V. A., Rusakovich N. A., Tyapkin A. A.* Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems at the Turn of the Millennia // Phys. Part. Nucl. 2002. V. 33. P. 259–290 [Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra. 2002. V. 33. P. 514].
4. *Шафранова М. Г.* Объединенный институт ядерных исследований: Информ.-биогр. справ. Дубна: ОИЯИ, 1998. 222 с.
5. История создания ОИЯИ в решениях ЦК КПСС. 1955–1958 гг. Дубна: ОИЯИ, 2015. 56 с.
6. *Кадышевский В. Г.* 40 лет Объединенному институту ядерных исследований // УФН. 1996. Т. 166. С. 921–926.
7. *Кадышевский В. Г., Сисакян А. Н.* Полувековой юбилей Объединенного института ядерных исследований // УФН. 2006. Т. 176. С. 311–318.
8. Дубна — остров стабильности: Очерки по истории Объединенного института ядерных исследований. 1956–2006 гг. / Под общ. ред. В. Г. Кадышевского, А. Н. Сисакяна, Ц. Вылова. М.: Академкнига, 2006. 643 с.
9. Объединенному институту ядерных исследований — 55 лет. Дубна: ОИЯИ, 2011. 249 с.
10. *Matveev V. A.* JINR: The Initiator of Future Discoveries // Phys. Usp. 2016. V. 59, No. 3. P. 217–224.
11. Seven-Year Plan for the Development of JINR 2010–2016. Dubna: JINR, 2009. 37 p.
12. Наука сближает народы: Выставка ОИЯИ–ЦЕРН, Москва, октябрь 2001 г. 44 с.
13. *Mikenberg G.* Particle Physics as a Way to Bring Different Cultures to Work Together in Science // PTEP. 2016. V. 2016, No. 10. P. 102C01; arXiv:1608.06119.
14. 60 Years of CERN Experiments and Discoveries / Ed. by H. Schopper, L. Di Lella // Adv. Ser. Direct. High Energy Phys. 2015. V. 23. P. 23.
15. *Heuer R.-D.* CERN and 60 Years of Science for Peace // AIP Conf. Proc. 2015. V. 1645. P. 430–436.
16. *Понтекорво Б.* Физика элементарных частиц — дорогая вещь! Нужна ли она? // УФН. 1964. Т. 84. С. 729–732.
17. *Butterworth J.* The Standard Model: How Far Can It Go and How Can We Tell? // Phil. Trans. Roy. Soc. London. 2016. V. 374, No. 2075. P. 20150260; arXiv:1601.02759.
18. *Mulders P. J.* The Roots of the Standard Model of Particle Physics. arXiv:1601.00300.
19. *Bednyakov V. A., Giokaris N. D., Bednyakov A. V.* On the Higgs Mass Generation Mechanism in the Standard Model // Part. Nucl. Phys. 2008. V. 39, No. 1. P. 13–36.

20. *Kazakov D. I.* Landscape View at the Edge of a Mystery // 3rd Large Hadron Collider Phys. Conf. (LHCP 2015), St. Petersburg, Russia, Aug. 31 – Sept. 5, 2015. arXiv:1511.09283.
21. *Serman G.* Yang–Mills Theories at High Energy Accelerators // Intern. J. Mod. Phys. A. 2016. V. 31, No. 09. P. 1630005; arXiv:1602.02307.
22. *Altarelli G.* The Higgs and the Excessive Success of the Standard Model // Frascati Phys. Ser. 2014. V. 58. P. 102; arXiv:1407.2122.
23. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson with the ATLAS Detector at the LHC // Phys. Lett. B. 2012. V. 716. P. 1–29; arXiv:1207.7214.
24. *Chatrchyan S. et al. (CMS Collab.)*. Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV with the CMS Experiment at the LHC // Ibid. P. 30–61; arXiv:1207.7235.
25. *Ellis J.* Summary and Outlook: 2015 Lepton–Photon Symposium // PoS. 2016. V. LeptonPhoton2015. P. 054; arXiv:1509.07336.
26. *Ellis J.* The Physics Landscape after the Higgs Discovery at the LHC // Nucl. Part. Phys. Proc. 2015. V. 267–269. P. 3–14; arXiv:1504.03654.
27. *Pich A.* ICHEP 2014 Summary: Theory Status after the First LHC Run // Nucl. Part. Phys. Proc. 2016. V. 273–275. P. 1–10; arXiv:1505.01813.
28. *Pich A.* Status after the First LHC Run: Looking for New Directions in the Physics Landscape // Nucl. Instr. Meth. A. 2015. No. 2; arXiv:1507.01250.
29. *Salam G. P.* Summary of the XXVII Rencontres de Blois: Particle Physics and Cosmology // 27th Rencontres de Blois on Particle Physics and Cosmology, Blois, France, May 31 – June 5, 2015. arXiv:1509.07666.
30. *Ibe M., Kusenko A., Yanagida T. T.* Why Three Generations? // Phys. Lett. B. 2016. V. 758. P. 365–369; arXiv:1602.03003.
31. *Bednyakov A. V. et al.* Stability of the Electroweak Vacuum: Gauge Independence and Advanced Precision // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115, No. 20. P. 1–5; arXiv:1507.08833.
32. *Willmann L., Jungmann K.* Matter–Antimatter Asymmetry — Aspects at Low Energy // Ann. Phys. 2016. V. 528. P. 108–114; arXiv:1506.03001.
33. *Forte S. et al.* The Standard Model from LHC to Future Colliders // Eur. Phys. J. C. 2015. V. 75, No. 11. P. 1–45; arXiv:1505.01279.
34. *Jenni P.* Update of the European Strategy for Particle Physics // Proc. of the 48th Rencontres de Moriond on Electroweak Interactions and Unified Theories. 2013. P. 413–418.
35. *Krammer M.* The Update of the European Strategy for Particle Physics // Phys. Scripta. 2013. V. T158. P. 014019.
36. *Aleksan R. et al. (Eur. Strategy for Part. Phys. Preparatory Group Collab.)* // Physics Briefing Book: Input for the Strategy Group to Draft the Update of the European Strategy for Particle Phys. CERN-ESG-005. Geneva: CERN, 2013.
37. *Ritz S. et al. (HEPAP Subcommittee Collab.)*. Building for Discovery: Strategic Plan for U.S. Particle Physics in the Global Context. USA, NSF, Fermi Nat. Accel. Lab., May, 2014.

38. *Asai S. et al.* The Final Report of the Subcommittee on Future Projects of High Energy Physics. J-PARC Report. KEK, Feb. 11, 2012.
39. *Troitsky S.* Unsolved Problems in Particle Physics // *Phys. Usp.* 2012. V. 55. P. 72–95; arXiv:1112.4515 [*Usp. Fiz. Nauk.* 2012. V. 182. P. 77].
40. *Wilczek F.* Theory Vision, LHCP 2016 // *Proc. LHCP Conf.*, Lund, June 2016. arXiv:1609.06941.
41. *Csaki C., Grojean C., Terning J.* Alternatives to an Elementary Higgs // *Rev. Mod. Phys.* 2016. V. 88, No. 4. P. 045001; arXiv:1512.00468.
42. *Djouadi A.* Higgs Physics // *PoS.* 2015. V. CORFU2014. P. 018; arXiv:1505.01059.
43. *Kramer M., Muhlleitner M.* Higgs Physics // *Nucl. Part. Phys. Proc.* 2015. V. 261–262. P. 246–267; arXiv:1501.06658.
44. *Quigg C.* Particle Physics after the Higgs-Boson Discovery: Opportunities for the Large Hadron Collider // *Contemp. Phys.* 2016. V. 57, No. 2. P. 177–187; arXiv:1507.02977.
45. *Moortgat-Pick G. et al.* Physics at the e^+e^- Linear Collider // *Eur. Phys. J. C.* 2015. V. 75, No. 8. P. 371; arXiv:1504.01726.
46. *Fujii K. et al.* Physics Case for the International Linear Collider. arXiv:1506.05992.
47. *Sefkow F.* The Higgs Physics Programme at the International Linear Collider // *Proc. 20th Intern. Conf. on Part. and Nucl. (PANIC 14)*, Hamburg, Germany, Aug. 24–29, 2014. P. 483–487. arXiv:1410.3246.
48. *Strube J.* The Higgs Physics Program at the International Linear Collider. arXiv:1511.00286.
49. *Spannowsky M., Stoll M.* Tracking New Physics at the LHC and Beyond // *Phys. Rev. D.* 2015. V. 92, No. 5. P. 054033; arXiv:1505.01921.
50. *Gripaios B.* Lectures on Physics beyond the Standard Model. arXiv:1503.02636.
51. *Ellis J.* Prospects for Supersymmetry at the LHC & Beyond // *PoS.* 2015. V. PLANCK2015. P. 041; arXiv:1510.06204.
52. *Nath P.* Supersymmetry after the Higgs // *Ann. Phys.* 2015; arXiv:1501.0167.
53. *Tata X.* Supersymmetry: Aspirations and Prospects // *Phys. Scripta.* 2015. V. 90. P. 108001; arXiv:1506.07151.
54. *Bechtle P., Plehn T., Sander C.* Supersymmetry. arXiv:1506.03091.
55. *Ulmer K.A. (ATLAS, CMS Collab.).* Supersymmetry: Experimental Status // 3rd Large Hadron Collider Phys. Conf. (LHCP 2015), St. Petersburg, Russia, Aug. 31–Sept. 5, 2015. 2016. arXiv:1601.03774.
56. *Cakir A. (ATLAS, CMS Collab.).* Prospects of New Physics Searches Using High Lumi-LHC // Next Steps in the Energy Frontier — Hadron Colliders (NSEFHC14), Batavia, IL, USA, Aug. 25–28, 2014. arXiv:1412.8503.
57. *Lyonnet F.* Intrinsic Bottom and Its Impact on Heavy New Physics at the LHC // *EPJ Web Conf.* 2016. V. 112. P. 03005; arXiv:1601.02856.
58. *Boos E. et al.* The Top Quark (20 Years after Its Discovery) // *Phys. Usp.* 2015. V. 58, No. 12. P. 1133–1158; arXiv:1509.03325 [*Usp. Fiz. Nauk.* 2015. V. 185, No. 12. P. 1241].

59. *Kröniger K., Meyer A. B., Uwer P.* Top-Quark Physics at the LHC // The Large Hadron Collider: Harvest of Run 1 / Ed. by T. Schorner-Sadenius. 2015. P. 259–300; arXiv:1506.02800.
60. *Westhoff S.* LHC Prospects for Asymmetric Top–Antitop Production // PoS. 2016. V. FFP14. P. 129; arXiv:1501.07477.
61. *Nason P.* Theory Summary // PoS. 2016. V. TOP2015. P. 056; arXiv:1602.00443.
62. *Aguilar-Arevalo A., Bietenholz W.* Neutrinos: Mysterious Particles with Fascinating Features, Which Led to the Physics Nobel Prize 2015. arXiv:1601.04747.
63. *Acciarri R. et al. (DUNE Collab.).* Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE). arXiv:1601.05471.
64. *Smirnov A. Y.* Riddle of the Neutrino Mass // Nucl. Part. Phys. Proc. 2015. V. 265–266. P. 1–6; arXiv:1502.04530.
65. *Qian X., Vogel P.* Neutrino Mass Hierarchy // Prog. Part. Nucl. Phys. 2015. V. 83. P. 1–30; arXiv:1505.01891.
66. *Stanco L.* A View of Neutrino Studies with the Next Generation Facilities // Rev. Phys. 2016. V. 1. P. 90–100; arXiv:1511.09409.
67. *Machado P. A. N.* Learning about the CP Phase in the Next 10 Years // Nucl. Part. Phys. Proc. 2015. V. 265–266. P. 174–176; arXiv:1503.03775.
68. *Patterson R. B.* Prospects for Measurement of the Neutrino Mass Hierarchy // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 2015. V. 65. P. 177–192; arXiv:1506.07917.
69. *Giunti C.* Light Sterile Neutrinos: Status and Perspectives // Nucl. Phys. B. 2016. V. 908. P. 336–353; arXiv:1512.04758.
70. *Gomez-Cadenas J. J., Martin-Albo J.* Phenomenology of Neutrinoless Double Beta Decay // PoS. 2015. V. GSSI14. P. 004; arXiv:1502.00581.
71. *Giunti C. et al.* Electromagnetic Neutrinos in Laboratory Experiments and Astrophysics // Ann. Phys. 2016. V. 528. P. 198–215; arXiv:1506.05387.
72. *Giunti C., Studenikin A.* Neutrino Electromagnetic Interactions: A Window to New Physics // Rev. Mod. Phys. 2015. V. 87, No. 2. P. 531–591; arXiv:1403.6344.
73. *Mosel U.* Neutrino Interactions with Nucleons and Nuclei: Importance for Long-Baseline Experiments // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 2016. V. 66. P. 171–195; arXiv:1602.00696.
74. *Harris D. A.* The State of the Art of Neutrino Cross Section Measurements // Proc., Topical Research Meeting on Prospects in Neutrino Phys. (NuPhys2014), London, Dec. 15–17, 2014. 2015. arXiv:1506.02748.
75. *Formaggio J. A., Zeller G. P.* From eV to EeV: Neutrino Cross Sections across Energy Scales // Rev. Mod. Phys. 2012. V. 84. P. 1307; arXiv:1305.7513.
76. *Naumov D. V.* Introduction to Neutrino Physics // Phys. Part. Nucl. Lett. 2011. V. 8. P. 717–742.
77. *Bednyakov V. A.* Neutrino Physics and Astrophysics at Joint Institute for Nuclear Research // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 2013. V. 245. P. 33–40.
78. *Strauss T.* Neutrinos: The Big Question and Physics Opportunities // PoS. 2015. V. FRAPWS2014. P. 003; arXiv:1503.05866.

79. *Drewes M.* Heavy Neutrinos in Particle Physics and Cosmology // *Ibid.* V. EPS-HEP2015. P. 075; arXiv:1510.07883.
80. *Volpe C.* Neutrino Astrophysics: Recent Advances and Open Issues // *J. Phys. Conf. Ser.* 2015. V. 631, No. 1. P. 012048; arXiv:1503.01355.
81. *Maltoni M., Smirnov A. Yu.* Solar Neutrinos and Neutrino Physics. arXiv:1507.05287.
82. *Aloisio R.* Neutrinos at Extreme Energies // *J. Phys. Conf. Ser.* 2016. V. 718, No. 5. P. 052001; arXiv:1601.04867.
83. *Fischbach E., Gruenwald J. T.* NU-SETI: A Proposal to Detect Extra-Terrestrial Signals Carried by Neutrinos. arxiv:1702.03341.
84. *Ringwald A.* How to Detect Big Bang Relic Neutrinos? // Eleventh Intern. Workshop on Neutrino Telescopes, Venezia, Feb. 22–25, 2005. P. 473–491; arXiv:hep-ph/0505024.
85. *Faessler A. et al.* Can One Measure the Cosmic Neutrino Background? // *Intern. J. Mod. Phys. E.* 2017. V. 26, No. 1&2. P. 1740008; arXiv:1602.03347.
86. *Kolb E. W., Turner M. S.* The Early Universe // *Front. Phys.* 1990. V. 69. 547 p.
87. *Rubakov V. A.* Cosmology // *Proc. 2011 Eur. School of High-Energy Phys. (ES-HEP 2011)*, Cheile Gradistei, Romania, Sept. 7–20, 2011. 2014. P. 151–195. arXiv:1504.03587.
88. *Gorbunov D. S.* Sterile Neutrinos and Their Role in Particle Physics and Cosmology // *Phys. Usp.* 2014. V. 57. P. 503–511 [*Usp. Fiz. Nauk.* 2014. V. 184. P. 545].
89. *Fukugita M., Yanagida T.* Baryogenesis without Grand Unification // *Phys. Lett. B.* 1986. V. 174. P. 45–47.
90. *Kuzmin V. A., Rubakov V. A., Shaposhnikov M. E.* On the Anomalous Electroweak Baryon Number Nonconservation in the Early Universe // *Phys. Lett. B.* 1985. V. 155. P. 36.
91. *Deppisch F. F., Bhupal Dev P. S., Pilaftsis A.* Neutrinos and Collider Physics // *New J. Phys.* 2015. V. 17, No. 7. P. 075019; arXiv:1502.0654.
92. *Helo J. C., Kovalenko S. G., Hirsch M.* Heavy Neutrino Searches at the LHC with Displaced Vertices // *Phys. Rev. D.* 2014. V. 89, No. 7. P. 1–7; arXiv:1312.2900.
93. *Abada A.* Neutrino Physics, Lepton Flavour Violation and the LHC // 25th Rencontres de Blois on Part. Phys. and Cosmology, Blois, France, May 26–31, 2013. arXiv:1310.3800.
94. *Rott C., Taketa A., Bose D.* Spectrometry of the Earth Using Neutrino Oscillations // *Sci. Rep.* 2015. V. 5. P. 15225; arXiv:1502.04930.
95. *Vogel P., Wen L. J., Zhang C.* Neutrino Oscillation Studies with Reactors // *Nature Commun.* 2015. V. 6. P. 6935; arXiv:1503.01059.
96. *Adams C. et al.* The Intermediate Neutrino Program // Workshop on the Intermediate Neutrino Program (WINP 2015), Upton, NY, USA, Feb. 4–6, 2015. arXiv:1503.06637.
97. *Bowden N. S. et al.* Applied Antineutrino Physics 2015 — Conference Summary. arXiv:1602.04759.
98. *Agostini M. et al.* Spectroscopy of Geoneutrinos from 2056 Days of Borexino Data // *Phys. Rev. D.* 2015. V. 92, No. 3. P. 12–15; arXiv:1506.04610.

99. *Bellini G. et al. (Borexino Collab.)*. Observation of Geo-Neutrinos // *Phys. Lett. B*. 2010. V. 687. P. 299–304; arXiv:1003.0284.
100. *Fiorentini G., Lissia M., Mantovani F.* Geo-Neutrinos and Earth's Interior // *Phys. Rep.* 2007. V. 453. P. 117–172; arXiv:0707.3203.
101. *Chavez-Estrada M., Aguilar-Arevalo A.A.* Antineutrino Flux from the Laguna Verde Nuclear Power Plant // *Adv. High Energy Phys.* 2015. V. 2015. P. 1–7; arXiv:1508.05069.
102. *Alekseev I. et al.* DANSSino: A Pilot Version of the DANSS Neutrino Detector // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2014. V. 11. P. 473–482; arXiv:1305.3350.
103. *Stancil D.D. et al.* Demonstration of Communication Using Neutrinos // *Mod. Phys. Lett. A*. 2012. P. 10; arXiv:1203.2847.
104. *Alonso R. et al.* Neutrino and Charged Lepton Flavour Today // *Proc. 48th Rencontres de Moriond on Electroweak Interactions and Unified Theories, La Thuile, Italy, Mar. 2–9, 2013*. P. 181–192; arXiv:1311.1724.
105. *Zwicky F.* The Redshift of Extragalactic Nebulae // *Helv. Phys. Acta*. 1933. V. 6. P. 110–127.
106. *Arkani-Hamed N. et al.* A Theory of Dark Matter // *Phys. Rev. D*. 2009. V. 79. P. 015014; arXiv:0810.0713.
107. *Gelmini G.B.* TASI 2014 Lectures: The Hunt for Dark Matter. arXiv:1502.01320.
108. *Bertone G., Hooper D.* A History of Dark Matter // *Rev. Mod. Phys.* 2016 (submitted); arXiv:1605.04909.
109. *Sofue Y., Honma M., Omodaka T.* Unified Rotation Curve of the Galaxy — Decomposition into de Vaucouleurs Bulge, Disk, Dark Halo, and the 9-kpc Rotation Dip // *Publ. Astron. Soc. Japan*. 2009. V. 61. P. 227; arXiv:0811.0859.
110. *Massey R. et al.* Dark Matter Maps Reveal Cosmic Scaffolding // *Nature*. 2007. V. 445. P. 286; arXiv:astro-ph/0701594.
111. *Famaey B.* Dark Matter in the Milky Way. arXiv:1501.01788.
112. *Kuhlen M., Vogelsberger M., Angulo R.* Numerical Simulations of the Dark Universe: State of the Art and the Next Decade // *Phys. Dark Univ.* 2012. V. 1. P. 50–93; arXiv:1209.5745.
113. *Deliyergiyev M.A.* Recent Progress in Search for Dark Sector Signatures // *Open Phys.* 2016. V. 14, No. 1. P. 281–303; arXiv:1510.06927.
114. *McKee C.F., Parravano A., Hollenbach D.J.* Stars, Gas, and Dark Matter in the Solar Neighborhood // *Astrophys. J.* 2015. V. 814, No. 1. P. 13; arXiv:1509.05334.
115. *Bednyakov V.A.* Is It Possible to Discover a Dark Matter Particle with an Accelerator? // *Phys. Part. Nucl.* 2016. V. 47, No. 5. P. 711–774; arXiv:1505.04380.
116. *Davis J.H.* The Past and Future of Light Dark Matter Direct Detection // *Intern. J. Mod. Phys. A*. 2015. V. 30, No. 15. P. 1530038; arXiv:1506.03924.
117. *Bertone G., Hooper D., Silk J.* Particle Dark Matter: Evidence, Candidates and Constraints // *Phys. Rep.* 2005. V. 405. P. 279–390; arXiv:hep-ph/0404175.
118. *Laszlo I. et al.* Disentangling Dark Energy and Cosmic Tests of Gravity from Weak Lensing Systematics // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2012. V. 423. P. 1750; arXiv:1109.4535.

119. *Lubini M. et al.* Probing the Dark Matter Issue in $f(R)$ -Gravity via Gravitational Lensing // *Eur. Phys. J. C.* 2011. V. 71. P. 1834; arXiv:1104.2851.
120. *Heavens A.* Weak Lensing: Dark Matter, Dark Energy and Dark Gravity // *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* 2009. V. 194. P. 76–81; arXiv:0911.0350.
121. *Roos M.* Astrophysical and Cosmological Probes of Dark Matter // *J. Mod. Phys.* 2012. V. 3. P. 1152; arXiv:1208.3662.
122. *Linder E. V.* Theory Challenges of the Accelerating Universe // *J. Phys. A.* 2007. V. 40, No. 25. P. 6697–6705; arXiv:0610173.
123. *Joyce A., Lombriser L., Schmidt F.* Dark Energy versus Modified Gravity // *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 2016. V. 66. P. 95–122; arXiv:1601.06133.
124. *Abbott T. et al. (DES Collab.).* The Dark Energy Survey: More than Dark Energy — An Overview // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2016. V. 460, No. 2. P. 1270–1299; arXiv:1601.00329.
125. *Gibson C. H., Wickramasinghe N. C., Schild R. E.* Primordial Planets Explain Interstellar Dust, the Formation of Life, and Falsify Dark Energy // *J. Cosmol.* 2011. V. 16. P. 7112; arXiv:1112.3630.
126. *Gibson C. H., Schild R. E.* Is Dark Energy Falsifiable? // *Ibid.* V. 17. P. 7345; arXiv:1112.2758.
127. *Bednyakov V., Klapdor-Kleingrothaus H.* Direct Search for Dark Matter — Striking the Balance — and the Future // *Phys. Part. Nucl.* 2009. V. 40. P. 583–611; arXiv:0806.3917.
128. *Olive K. A. et al. (Particle Data Group Collab.).* Review of Particle Physics // *Chin. Phys. C.* 2014. V. 38. P. 090001.
129. *Cyr-Racine F.-Y. et al.* ETHOS — an Effective Theory of Structure Formation: From Dark Particle Physics to the Matter Distribution of the Universe // *Phys. Rev. D.* 2016. V. 93, No. 12. P. 123527; arXiv:1512.05344.
130. *Mayet F. et al.* A Review of the Discovery Reach of Directional Dark Matter Detection // *Phys. Rep.* 2016. V. 627. P. 1–49; arXiv:1602.03781.
131. *Froborg F. (SABRE Collab.).* SABRE: WIMP Modulation Detection in the Northern and Southern Hemisphere // *J. Phys. Conf. Ser.* 2016. V. 718, No. 4. P. 042021; arXiv:1601.05307.
132. *Freese K., Lisanti M., Savage C.* Colloquium: Annual Modulation of Dark Matter // *Rev. Mod. Phys.* 2013. V. 85. P. 1561–1581; arXiv:1209.3339.
133. *Bernabei R. et al. (DAMA Collab.).* Final Model Independent Result of DAMA/LIBRA-Phase1 // *Eur. Phys. J. C.* 2013. V. 73, No. 12. P. 2648; arXiv:1308.5109.
134. *Livio M., Silk J.* Broaden the Search for Dark Matter // *Nature.* 2014. V. 507. P. 29; arXiv:1404.2591.
135. *Bednyakov V.* One Needs Positive Signatures for Detection of Dark Matter // *Phys. Part. Nucl.* 2013. V. 44. P. 220–228; arXiv:1207.2899.
136. *Jäger S.* BEACH 2014 Theory Summary // *J. Phys. Conf. Ser.* 2014. V. 556, No. 1. P. 12077; arXiv:1501.07885v1.

137. *Isidori G.* Flavour Physics and Implication for New Phenomena // Adv. Ser. Direct. High Energy Phys. 2016. V. 26. P. 339–355; arXiv:1507.00867.
138. *Sala F.* Higgs and Flavour as Doors to New Physics // Eur. Phys. J. Plus. 2016. V. 131, No. 4. P. 79; arXiv:1509.08655.
139. *Silvestrini L.* CHARM-2015 Theory Summary // 7th Intern. Workshop on Charm Physics (Charm 2015), Detroit, MI, USA, May 18–22, 2015. arXiv:1510.05797.
140. *Buras A. J. et al.* $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ and $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ in the Standard Model: Status and Perspectives // JHEP. 2015. V. 11. P. 033; arXiv:1503.02693.
141. *Bobeth C. et al.* The Decay $B \rightarrow K \ell^+ \ell^-$ at Low Hadronic Recoil and Model-Independent $\Delta B = 1$ Constraints // JHEP. 2012. V. 01. P. 107; arXiv:1111.2558.
142. *Ishiwata K., Nagata N., Yokozaki N.* Natural Supersymmetry and $b \rightarrow s \gamma$ Constraints // Phys. Lett. B. 2012. V. 710. P. 145–148; arXiv:1112.1944.
143. *Glashow S. L., Iliopoulos J., Maiani L.* Weak Interactions with Lepton–Hadron Symmetry // Phys. Rev. D. 1970. V. 2. P. 1285–1292.
144. *Maiani L.* The GIM Mechanism: Origin, Predictions and Recent Uses // Proc. 48th Rencontres de Moriond on Electroweak Interactions and Unified Theories, La Thuile, Italy, March 2–9, 2013. P. 3–16. arXiv:1303.6154.
145. *Le Dall M., Pospelov M., Ritz A.* Sensitivity to Light Weakly-Coupled New Physics at the Precision Frontier // Phys. Rev. D. 2015. V. 92, No. 1. P. 016010; arXiv:1505.01865.
146. *Faessler A. et al.* Constraints on R-Parity Violating Supersymmetry from Muon Electron Nuclear Conversion. arXiv:hep-ph/9904335.
147. *Kosmas T. S., Kovalenko S.* Lepton Flavor Violation: Constraints from Exotic Muon to Electron Conversion // Phys. At. Nucl. 2000. V. 63. P. 1158–1164; arXiv:hep-ph/0002070 [Yad. Fiz. 2000. V. 63, No. 7. P. 1234].
148. *Simkovic F. et al.* The (μ^-, μ^+) Conversion in Nuclei as a Probe of New Physics // Phys. Rev. D. 2002. V. 66. P. 033005; arXiv:hep-ph/0112271.
149. *Simkovic F. et al.* Neutrino Mediated Muon Electron Conversion in Nuclei Revisited // Phys. Lett. B. 2002. V. 544. P. 121–126; arXiv:hep-ph/0112277.
150. *Davidkov M., Kazakov D. I.* $\mu \rightarrow e \gamma$ Decay Rate in the MSSM with Minimal Flavour Violation // Bulg. J. Phys. 2011. V. 38. P. 309–317; arXiv:1102.1582.
151. *Gutsche T. et al.* New Bounds on Lepton Flavor Violating Decays of Vector Mesons and the Z0 Boson // Phys. Rev. D. 2011. V. 83. P. 115015; arXiv:1103.1317.
152. *Tormo Garcia i X. et al.* Bounds on Majoron Emission from Muon to Electron Conversion Experiments // Ibid. V. 84. P. 113010; arXiv:1110.2874.
153. *Andronic A. et al.* Heavy-Flavour and Quarkonium Production in the LHC Era: from Proton–Proton to Heavy-Ion Collisions // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115, No. 7. P. 072001; arXiv:1506.03981.
154. *Schwartz A. J.* CHARM 2015 Experimental Summary: Step-by-Step towards New Physics. arXiv:1511.04703.
155. *Olsen S. L.* The Role of Flavor Physics in the LHC Era // Proc. 52nd Intern. Winter Meeting on Nucl. Phys. (Bormio 2014), Bormio, Italy, Jan. 27–31, 2014. arXiv:1409.0273.

156. *Brodsky S. J.* Novel Heavy Quark Phenomena in QCD // PoS. 2013. V. Hadron2013. P. 013; arXiv:1401.5886.
157. *Ellis J.* The Beautiful Physics of LHC Run 2 // PoS. 2015. V. Beauty2014. P. 056; arXiv:1412.2666.
158. *Carli T., Rabbertz K., Schumann S.* Studies of Quantum Chromodynamics at the LHC // The Large Hadron Collider: Harvest of Run 1. 2015. P. 139–194; arXiv:1506.03239.
159. *Roberts C. D.* Hadron Physics and QCD: Just the Basic Facts // J. Phys. Conf. Ser. 2015. V. 630, No. 1. P. 012051; arXiv:1501.06581.
160. *Heinz U. et al.* Exploring the Properties of the Phases of QCD Matter — Research Opportunities and Priorities for the Next Decade. arXiv:1501.06477.
161. *Brodsky S. J. et al.* QCD and Hadron Physics. arXiv: 1502.05728.
162. *Deur A., Brodsky S. J., Teramond de G. F.* On the Interface between Perturbative and Nonperturbative QCD // Phys. Lett. B. 2016. V. 757. P. 275–281; arXiv:1601.06568.
163. *Papavassiliou J.* Hadron Phenomenology from First-Principle QCD Studies // Few Body Syst. 2016. V. 57, No. 6. P. 417–423; arXiv:1602.00455.
164. *Grazzini M.* Standard Model Theory for Collider Physics // PoS. 2015. V. EPS-HEP2015. P. 007; arXiv:1512.00647.
165. *Kumano S.* Spin Physics at J-PARC // Intern. J. Mod. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 40. P. 1660009; arXiv:1504.05264.
166. *Boglione M., Prokudin A.* Phenomenology of Transverse Spin: Past, Present and Future // Eur. Phys. J. A. 2016. V. 52, No. 6. P. 154; arXiv:1511.06924.
167. *Accardi A.* PDFs from Nucleons to Nuclei // PoS. 2015. V. DIS2015. P. 001; arXiv:1602.02035.
168. *Montgomery H. E.* A Vision of Nuclear and Particle Physics. arXiv:1509.08417.
169. *Zaslavsky D.* Saturation Physics on the Energy Frontier // Proc. Meet. of the APS Division of Particles and Fields (DPF 2015), Ann Arbor, Michigan, USA, Aug. 4–8, 2015. arXiv:1511.00386.
170. *DeTar C.* LQCD: Flavor Physics and Spectroscopy // PoS. 2016. V. Lepton-Photon2015. P. 023; arXiv:1511.06884.
171. *Brodsky S. J. et al.* The Physics of Heavy Quark Distributions in Hadrons: Collider Tests // Prog. Part. Nucl. Phys. (submitted); arXiv:1612.01351.
172. *Inoue T. (HAL QCD Collab.).* Nuclear Physics from QCD on Lattice // PoS. 2016. V. CD15. P. 020; arXiv:1511.04871.
173. *Bertulani C. A., Hussein M. S.* Current Status of Nuclear Physics Research // Braz. J. Phys. 2015. V. 45, No. 6. P. 730–755; arXiv:1509.00508.
174. *Savushkin L. N.* Relativistic Nuclear Theory — Nucleons and Mesons: Origin, Current Status, and Trends // Phys. Part. Nucl. 2015. V. 46, No. 6. P. 859–890.
175. *Horn T., Roberts C. D.* The Pion: An Enigma within the Standard Model // J. Phys. G. 2016. V. 43, No. 7. P. 073001; arXiv:1602.04016.
176. *Leutwyler H.* On the History of the Strong Interaction // Mod. Phys. Lett. A. 2014. V. 29. P. 1430023; arXiv:1211.6777.

177. *Akiba Y. et al.* The Hot QCD White Paper: Exploring the Phases of QCD at RHIC and the LHC. arXiv:1502.02730.
178. *Brodsky S. J.* Light-Front Holography, Color Confinement, and Supersymmetric Features of QCD // *Few Body Syst.* 2016. V. 57, No. 8. P. 703–715; arXiv:1601.06328.
179. *Brodsky S. J.* Novel QCD Phenomena at JLab // *PoS.* 2015. V. QCDEV2015. P. 003; arXiv:1511.04142.
180. *Lutz M. F. M. et al.* Resonances in QCD // *Nucl. Phys. A.* 2016. V. 948. P. 93–105; arXiv:1511.09353.
181. *Iancu E.* QCD in Heavy Ion Collisions // *Proc. 2011 Eur. School of High-Energy Physics (ESHEP 2011), Cheile Gradistei, Romania, Sept. 7–20, 2011.* P. 197–266. arXiv:1205.0579.
182. *Rafelski J.* Melting Hadrons, Boiling Quarks // *Eur. Phys. J. A.* 2015. V. 51, No. 9. P. 114; arXiv:1508.03260.
183. *Bhalerao R. S.* Relativistic Heavy-Ion Collisions // *Proc. 1st Asia–Europe–Pacific School of High-Energy Physics (AEPSHEP), Fukuoka, Japan, Oct. 14–27, 2012.* 2014. P. 219–239. arXiv:1404.3294.
184. *Aref'eva I. Y.* Holographic Approach to Quark–Gluon Plasma in Heavy Ion Collisions // *Phys. Usp.* 2014. V. 57. P. 527–555 [*Usp. Fiz. Nauk.* 2014. V. 184, No. 6. P. 569].
185. *Glozman L. Y.* No Deconfinement in QCD? arXiv:1512.06703.
186. *Floerchinger S.* Heavy Ion Collisions and Cosmology // *Nucl. Phys. A.* 2016. V. 956. P. 91–98; arXiv:1512.08388.
187. *Asakawa M., Kitazawa M.* Fluctuations of Conserved Charges in Relativistic Heavy Ion Collisions: An Introduction // *Prog. Part. Nucl. Phys.* 2016. V. 90. P. 299–342; arXiv:1512.05038.
188. *Schenke B.* Theory @ Hard Probes 2015 // *Proc. 7th Intern. Conf. on Hard and Electromagnetic Probes of High-Energy Nuclear Collisions (Hard Probes 2015), Montréal, Québec, Canada, June 29–July 3, 2015.* 2016. arXiv:1510.04133.
189. *Nahrgang M.* The QCD Critical Point and Related Observables // *Nucl. Phys. A.* 2016. V. 956. P. 83–90; arXiv:1601.07437.
190. *Hwa R. C., Yang C. B.* Observable Properties of Quark-Hadron Phase Transition at the Large Hadron Collider. arXiv:1601.04671.
191. *Angelis de G. et al. (SPES Collab.).* Nuclear Structure Studies with Stable and Radioactive Beams: The SPES Radioactive Ion Beam Project // *J. Phys. Conf. Ser.* 2015. V. 590, No. 1. P. 012010.
192. *Cizewski J. A., Nunes F. M.* Theoretical and Experimental Perspectives of Nuclear Reaction Studies with Radioactive Ion Beams // *Acta Phys. Polon. B.* 2015. V. 46, No. 3. P. 521.
193. *Angelis G. D. et al.* The SPES Radioactive Ion Beam Project of LNL: Status and Perspectives // *EPJ Web Conf.* 2016. V. 107. P. 01001.
194. *Oganessian R. et al.* The JINR Flerov Laboratory of Nuclear Reactions Radioactive Ion Beam Project with the U400M-U400 Cyclotron Complex // *Proc. 14th Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Applications (Cyclotrons 95), Faure, Cape Town, South Africa, Oct. 8–13, 1995.* 1996. P. M05.

195. *Pontecorvo B.* Neutron Well Logging. A New Geological Method Based on Nuclear Physics // *Pontecorvo B.* Selected Papers: in 2 v. M.: Nauka, 1997. V. 1. P. 27–30 (in Russian).
196. *Pontecorvo B.* Una Nota Autobiografica // *Ibid.* V. 2. P. 137–146 (in Russian).
197. *Abele H.* The Neutron. Its Properties and Basic Interactions // *Prog. Part. Nucl. Phys.* 2008. V. 60. P. 1–81.
198. *Gaponov Yu. V., Mostovoi Yu. A.* Precision Analysis of Experiments Studying the Beta Decay of the Free Neutron: Standard Model and Possibilities of Its Violation // *Phys. At. Nucl.* 2000. V. 63. P. 1356–1376 [*Yad. Fiz.* 2000. V. 63. P. 1432].
199. *Gaponov Yu. V., Shulgina N. B., Spivak P. E.* Neutron Beta Decay and the Right-Handed Current Problem // *Phys. Lett. B.* 1991. V. 253. P. 283–286.
200. *Gaponov Yu. V.* Beta Decay of the Free Neutron and Hypothesis of Intermediate Leptoquark Bosons // *Phys. At. Nucl.* 1999. V. 62. P. 1206–1212 [*Yad. Fiz.* 1999. V. 62. P. 1281].
201. *Bodek K.* Beta-Decay Correlations in the LHC Era // *Acta Phys. Polon. B.* 2016. V. 47. P. 349–356; arXiv:1602.04635.
202. *Serebrov A. P.* Neutron Beta-Decay, Standard Model and Cosmology // *Phys. Lett. B.* 2007. V. 650. P. 321–324; arXiv:nucl-ex/0611038.
203. *Gundorin N. A. et al.* Investigations of Fission Characteristics and Correlation Effects // *Phys. Part. Nucl.* 2016. V. 47, No. 4. P. 681–701 [*Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra.* 2016. V. 47, No. 4. P. 1249].
204. *Balagurov A. M. et al.* Correlation Fourier Diffractometry: 20 Years of Experience at the IBR-2 Reactor // *Phys. Part. Nucl.* 2015. V. 46, No. 3. P. 249–276 [*Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra.* 2015. V. 46, No. 3. P. 453].
205. *Su K. D., Sumbaev A. P., Shvetsov V. N.* 180 MW/180 KW Pulse Modulator for S-Band Klystron of LUE-200 Linac of IREN Installation of JINR // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2014. V. 11. P. 672–674.
206. *Boettcher J. et al.* The LUE-200 Accelerator at the IREN Facility: Current Status and Development // *Ibid.* P. 665–671.
207. *Nesvizhevsky V. V. et al.* Measurement of the Neutron Lifetime in a Gravitational Trap and Analysis of Experimental Errors // *Sov. Phys. JETP.* 1992. V. 75. P. 405–412 [*Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1992. V. 102. P. 740].
208. *Dubbers D.* The Present Status of Particle Physics with Slow Neutrons // *Phys. Procedia.* 2014. V. 51. P. 13–18.
209. *Lychagin E. V. et al.* UCN Source at an External Beam of Thermal Neutrons // *Adv. High Energy Phys.* 2015. V. 2015. P. 547620.
210. *Frank A. I.* Fundamental Properties of the Neutron: 50 Years of Research // *Sov. Phys. Usp.* 1982. V. 25. P. 280–297 [*Usp. Fiz. Nauk.* 1982. V. 137. P. 5].
211. *Serebrov A. P.* Neutron Lifetime Measurement Using Gravitationally Trapped Ultracold Neutrons // *Usp. Fiz. Nauk.* 2005. V. 175, No. 9. P. 905–924.
212. *Aboubrhim A., Ibrahim T., Nath P.* Neutron Electric Dipole Moment and Probe of PeV Scale Physics // *Phys. Rev. D.* 2015. V. 91, No. 9. P. 095017; arXiv:1503.06850.

213. *Schmidt-Wellenburg P.* The Quest for an Electric Dipole Moment of the Neutron // AIP Conf. Proc. 2016. V. 1753. P. 060002; arXiv:1602.01997.
214. *Addazi A.* Neutron–Antineutron Transition as a Test-Bed for Dynamical CPT Violations // Intern. J. Mod. Phys. A. 2016. V. 31, No. 16. P. 1650084; arXiv:1505.02080.
215. *Гангерский Ю. П. и др.* Введение в физику тяжелых ионов. Учеб. пособие / Под ред. Ю. Ц. Оганесяна. М.: МИФИ, 2008. 424 с.
216. *Hamilton J. H., Hofmann S., Oganessian Y. T.* Search for Superheavy Nuclei // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 2013. V. 63. P. 383–405.
217. *Oganessian Y.* Heaviest Nuclei from Ca-48 Induced Reactions // J. Phys. G. 2007. V. 34. P. R165–R242.
218. *Oganessian Yu. T., Utyonkov V. K.* Superheavy Nuclei from ^{48}Ca -Induced Reactions // Nucl. Phys. A. 2015. V. 944. P. 62–98.
219. *Loss R. D., Corish J.* Names and Symbols of the Elements with Atomic Numbers 114 and 116 (IUPAC Recommendations 2012) // Pure Appl. Chem. 2012. V. 84. P. 1669–1672.
220. *Bassichis W. H., Kerman A. K.* Self-Consistent Calculations of Shell Effects Including the Proposed Island of Stability // Phys. Rev. C. 1970. V. 2. P. 1768–1776.
221. *Herzberg R. D. et al.* Nuclear Isomers in Superheavy Elements as Stepping Stones towards the Island of Stability // Nature. 2006. V. 442. P. 896–899.
222. *Seaborg G. T.* Elements beyond 100, Present Status and Future Prospects // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 1968. V. 18. P. 53–152.
223. *Karol P. J. et al.* Discovery of the Elements with Atomic Numbers $Z = 113, 115$ and 117 // Pure Appl. Chem. 2016. V. 88. P. 139.
224. *Karol P. J. et al.* Discovery of the Element with Atomic Number $Z = 118$ Completing the 7th Row of the Periodic Table // Ibid. P. 155.
225. *Hamilton J. H., Oganessian Yu. T., Utyonkov V. K.* Discoveries of Elements 113, 115 and 117 // J. Phys. Conf. Ser. 2012. V. 403. P. 012035.
226. *Oganessian Yu. T. et al.* New Insights into the Am-243 + Ca-48 Reaction Products Previously Observed in the Experiments on Elements 113, 115, and 117 // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. P. 022502.
227. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.).* The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider // JINST. 2008. V. 3. P. S08003.
228. *Chatrchyan S. et al. (CMS Collab.).* The CMS Experiment at the CERN LHC // Ibid. P. S08004.
229. *Boiko I. R., Nikolaev K. V., Shelkov G. A.* A Study of Higgs Boson Decay $H \rightarrow \mu\mu\mu\mu$ Based on Full Simulation of an ATLAS Detector // Phys. Part. Nucl. Lett. 2005. V. 2. P. 67–76 [Pis'ma Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra. 2005. V. 2, No. 2(125). P. 7].
230. *Leitner R. (ATLAS Collab.).* Status of the ATLAS Hadronic Tile Calorimeter // Phys. Part. Nucl. Lett. 2005. V. 2. P. 102–109 [Pis'ma Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra. 2005. V. 2, No. 2(125). P. 60].
231. *Bednyakov V. et al.* Measurement of the Top Quark Charge at the ATLAS Detector // Phys. Part. Nucl. Lett. 2007. V. 4. P. 491–496.

232. *Khramov E. V. et al.* Search for t Anti- t Resonances with the ATLAS Detector. arXiv:0705.2001.
233. *Khramov E. V. et al.* On the Possibility of the Search for Top-Antitop Resonances at LHC // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2008. V. 5. P. 515–519 [*Pis'ma Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra.* 2008. V. 5, No. 6(148). P. 865].
234. *Khramov E. V. et al.* Top Quark from the Tevatron to LHC // *Phys. Part. Nucl.* 2008. V. 39. P. 74–88.
235. *Bednyakov V. A., Rusakovich N. A.* JINR Participation in the ATLAS Physics Program // *Fizika B.* 2008. V. 17. P. 47–56.
236. *Boldyrev A. S. et al.* The ATLAS Transition Radiation Tracker // *Instr. Exp. Tech.* 2012. V. 55. P. 323–334.
237. *Gusakov Yu. V. et al.* ATLAS TRT: Research & Design B-Type Module Mass Production // *Phys. Part. Nucl.* 2010. V. 41. P. 1–26.
238. *Gusakov Yu. V. et al.* Automated Stand Check of “B” type TRT ATLAS Wheel Straw Detectors // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2006. V. 3. P. 206–210 [*Pis'ma Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra.* 2006. V. 3, No. 3(132). P. 111].
239. *Boguslavsky I. V. et al.* Transition Radiation Detectors: “B” Trackers Manufactured at JINR for ATLAS LHC Inner Detector // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2006. V. 3. P. 201–205 [*Pis'ma Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra.* 2006. V. 3, No. 3(132). P. 103].
240. *Davkov V. et al.* Development of High Granulated Straw Chambers of Large Sizes // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2007. V. 4. P. 323–326; arXiv:physics/0701133.
241. *Batusov V. et al.* High Precision Laser Control of the ATLAS Tile-Calorimeter Module Mass Production at JINR // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2001. V. 102. P. 33–40.
242. *Batusov V. Yu. et al.* ATLAS Hadron Tile Calorimeter: Experience in Prototype Construction and Module Mass Production // *Phys. Part. Nucl.* 2006. V. 37. P. 785–806.
243. *Batusov V. Yu., Lyablin M. V., Topilin N. D.* Development and Application of the Complex Hardware/Software System for Controlled Assembly of the ATLAS Hadron Tile Calorimeter // *Phys. Part. Nucl.* 2011. V. 42. P. 438–459.
244. *Adragna P. et al.* Testbeam Studies of Production Modules of the ATLAS Tile Calorimeter // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2009. V. 606. P. 362–394.
245. *Batusov V. et al.* The Module Nuclear Absorber of the ATLAS Hadron Calorimeter (an Experiment of Controlled Assembly on the Surface and Underground) // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2009. V. 6. P. 337–347 [*Pis'ma Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra.* 2009. V. 6, No. 4(153). P. 548].
246. *Adragna P. et al.* Measurement of Pion and Proton Response and Longitudinal Shower Profiles up to 20 Nuclear Interaction Lengths with the ATLAS Tile Calorimeter // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2010. V. 615. P. 158–181.
247. *Abdallah J. et al. (ATLAS Tile Calorimeter Collab.).* Mechanical Construction and Installation of the ATLAS Tile Calorimeter // *JINST.* 2013. V. 8. P. T11001.
248. *Abat E. et al. (ATLAS Collab.).* Study of Energy Response and Resolution of the ATLAS Barrel Calorimeter to Hadrons of Energies from 20 GeV to 350 GeV // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2010. V. 621. P. 134–150.

249. Afonin A. et al. (*ATLAS HiLum Endcap Collab.*). Relative Luminosity Measurement of the LHC with the ATLAS Forward Calorimeter // *JINST*. 2010. V. 5. P. P05005; arXiv:1005.1784.
250. Astakhov N. S. et al. JINR Tier-1 Centre for the CMS Experiment at LHC // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2016. V. 13, No. 5. P. 714–717.
251. Golunov A. O. et al. CMS Remote Center at JINR // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2013. V. 10. P. 81–84.
252. Golutvin I. A., Zarubin A. V. JINR Participation in the CMS Project // *Phys. Part. Nucl.* 2002. V. 33. P. 334–342 [*Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra*. 2002. V. 33. P. 654].
253. Chatrchyan S. et al. (*CMS Collab.*). Measurement of the Differential and Double-Differential Drell–Yan Cross Sections in Proton–Proton Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV // *JHEP*. 2013. V. 12. P. 030; arXiv:1310.7291.
254. Khachatryan V. et al. (*CMS Collab.*). Search for a Standard Model-Like Higgs Boson in the $\mu^+\mu^-$ and e^+e^- Decay Channels at the LHC // *Phys. Lett. B*. 2015. V. 744. P. 184–207; arXiv:1410.6679.
255. Khachatryan V. et al. (*CMS Collab.*). Constraints on the Higgs Boson Width from Off-Shell Production and Decay to Z -Boson Pairs // *Phys. Lett. B*. 2014. V. 736. P. 64–85; arXiv:1405.3455.
256. Khachatryan V. et al. (*CMS Collab.*). Constraints on the Spin-Parity and Anomalous HVV Couplings of the Higgs Boson in Proton Collisions at 7 and 8 TeV // *Phys. Rev. D*. 2015. V. 92, No. 1. P. 012004; arXiv:1411.3441.
257. Khachatryan V. et al. (*CMS Collab.*). Measurements of Differential and Double-Differential Drell–Yan Cross Sections in Proton–Proton Collisions at 8 TeV // *Eur. Phys. J. C*. 2015. V. 75, No. 4. P. 147; arXiv:1412.1115.
258. Bednyakov V. A. et al. Anomalous Interacting Z^* Bosons: An Example of JINR’s Contribution to Physics at LHC // *Phys. Usp.* 2016. V. 59, No. 4. P. 403–410 [*Usp. Fiz. Nauk*. 2016. V. 186, No. 4. P. 425].
259. Chizhov M. V., Bednyakov V. A., Budagov J. A. Proposal for Chiral Bosons Search at LHC via Their Unique New Signature // *Phys. At. Nucl.* 2008. V. 71. P. 2096–2100; arXiv:0801.4235.
260. Chizhov M. V. Theory and Phenomenology of Spin-1 Chiral Particles // *Phys. Part. Nucl.* 2011. V. 42. P. 93–183.
261. Chizhov M. V. et al. Hadron Collider Potential for Excited Bosons Search // *Phys. Part. Nucl.* 2014. V. 45, No. 3. P. 517–528.
262. Chizhov M. V., Bednyakov V. A., Budagov J. A. Hadron Collider Potential for Excited Bosons Search: A Snowmass Whitepaper. arXiv:1307.7274.
263. Aad G. et al. (*ATLAS Collab.*). Search for High-Mass Resonances Decaying to Dilepton Final States in pp Collisions at 7 TeV with the ATLAS Detector // *JHEP*. 2012. V. 11. P. 138; arXiv:1209.2535.
264. Aad G. et al. (*ATLAS Collab.*). Search for High-Mass Dilepton Resonances in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector // *Phys. Rev. D*. 2014. V. 90, No. 5. P. 052005; arXiv:1405.4123.
265. Chizhov M. V. et al. Anomalous Interacting New Extra Vector Bosons and Their First LHC Constraints // *Phys. Part. Nucl.* 2012. V. 43. P. 311–325; arXiv:1110.3149.

266. Chizhov M. V., Bednyakov V. A., Budagov J. A. On Resonance Search in Dilepton Events at the LHC // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2013. V. 10. P. 144–146; arXiv:1109.6876.
267. Chizhov M. V., Bednyakov V. A., Budagov J. A. A Unique Signal of Excited Bosons in Dijet Data from pp -Collisions // *Phys. At. Nucl.* 2012. V. 75. P. 90–96; arXiv:1010.2648.
268. Chizhov M. V., Bednyakov V. A. Signatures of Lower Scale Gauge Coupling Unification in the Standard Model Due to Extended Higgs Sector // *Phys. At. Nucl.* 2016. V. 79, No. 5. P. 721–725; arXiv:1509.07610.
269. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Search for Squarks and Gluinos in Events with Isolated Leptons, Jets and Missing Transverse Momentum at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector // *JHEP.* 2015. V. 04. P. 116; arXiv:1501.03555.
270. Khramov E. (ATLAS Collab.). SUSY Overview at ATLAS // *PoS.* 2013. V. QFTHEP2013. P. 026.
271. Bednyakov V. A. et al. On the LHC Observation of Gluinos from the EGRET-Preferred Region // *Phys. At. Nucl.* 2009. V. 72. P. 619–637.
272. Bednyakov V. A. et al. Lepton Decay Channels of EGRET Gluinos at the LHC // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2008. V. 5. P. 520–530.
273. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Search for Doubly-Charged Higgs Bosons in Like-Sign Dilepton Final States at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector // *Eur. Phys. J. C.* 2012. V. 72. P. 2244; arXiv:1210.5070.
274. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Search for Charged Higgs Bosons Decaying via $H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu$ in Fully Hadronic Final States Using pp Collision Data at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector // *JHEP.* 2015. V. 03. P. 088; arXiv:1412.6663.
275. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Search for Charged Higgs Bosons in the $H^\pm \rightarrow tb$ Decay Channel in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV Using the ATLAS Detector // *JHEP.* 2016. V. 03. P. 127; arXiv:1512.03704.
276. Beauchemin P. -H. et al. Search for Intrinsic Charm in Vector Boson Production Accompanied by Heavy Flavor Jets // *Phys. Rev. D.* 2015. V. 92, No. 3. P. 034014; arXiv:1410.2616.
277. Lykasov G. I. et al. Nucleon Structure and Hard p - p Processes at High Energies // *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* 2013. V. 245. P. 215–222; arXiv:1309.3168.
278. Bednyakov V. A. et al. Searching for Intrinsic Charm in the Proton at the LHC // *Phys. Lett. B.* 2014. V. 728. P. 602–606; arXiv:1305.3548.
279. Lykasov G. I. et al. Forward Heavy Flavour Production in p - p Collisions at LHC and Intrinsic Quark Components in Proton // *Europhys. Lett.* 2012. V. 99. P. 21002; arXiv:1205.1131.
280. Lykasov G., Bednyakov V. Monitoring of Charmed and Beauty Quark Distributions in Proton at LHC // *Fizika B.* 2008. V. 17. P. 293–298; arXiv:0801.2093.
281. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Measurement of $D^{*\pm}$, D^\pm and D_s^\pm Meson Production Cross Sections in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector // *Nucl. Phys. B.* 2016. V. 907. P. 717–763; arXiv:1512.02913.

282. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Measurement of the Branching Ratio $\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0)/\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda^0)$ with the ATLAS Detector // Phys. Lett. B. 2015. V. 751. P. 63–80; arXiv:1507.08202.
283. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Measurement of $D^{*\pm}$ Meson Production in Jets from pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector // Phys. Rev. D. 2012. V. 85. P. 052005; arXiv:1112.4432.
284. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). K_{short} and Λ Production in pp Interactions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 7 TeV Measured with the ATLAS Detector at the LHC // Phys. Rev. D. 2012. V. 85. P. 012001; arXiv:1111.1297.
285. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Measurement of the Λ_b^0 Lifetime and Mass in the ATLAS Experiment // Phys. Rev. D. 2013. V. 87, No. 3. P. 032002; arXiv:1207.2284.
286. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Measurement of the Transverse Polarization of Λ and $\bar{\Lambda}$ Hyperons Produced in Proton–Proton Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV Using the ATLAS Detector // Phys. Rev. D. 2015. V. 91, No. 3. P. 032004; arXiv:1412.1692.
287. Lykasov G. I., Grinyuk A. A., Bednyakov V. A. Saturation of Gluon Density and Soft pp Collisions at LHC // Phys. Part. Nucl. 2013. V. 44. P. 568–572.
288. Bednyakov V. A. et al. Role of Gluons in Soft and Semi-Hard Multiple Hadron Production in pp Collisions at LHC // Intern. J. Mod. Phys. A. 2012. V. 27. P. 1250042; arXiv:1104.0532.
289. Bednyakov V. A., Lykasov G. I., Poghosyan M. G. Gluons in Proton and Soft pp Collisions at High Energies // Workshop on Hadron Structure and QCD: From Low to High Energies (HSQCD 2010), Gatchina, St. Petersburg, Russia, July 5–9, 2010. arXiv:1010.0841.
290. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Two-Particle Bose–Einstein Correlations in pp Collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 7 TeV Measured with the ATLAS Detector // Eur. Phys. J. C. 2015. V. 75, No. 10. P. 466; arXiv:1502.07947.
291. Khachatryan V. et al. (CMS Collab.). Search for Physics beyond the Standard Model in Dilepton Mass Spectra in Proton–Proton Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // JHEP. 2015. V. 04. P. 025; arXiv:1412.6302.
292. Shmatov S. V. Overview of Physics Results from the CMS Experiment at the LHC // Phys. At. Nucl. 2015. V. 78, No. 4. P. 509–520 [Yad. Fiz. 2015. V. 78, No. 6. P. 546557].
293. Konoplyanikov V. F. et al. Uncertainties of Drell–Yan Production Cross Section in pp Collisions at the LHC // Phys. Part. Nucl. Lett. 2014. V. 11, No. 6. P. 722–729.
294. Chatrchyan S. et al. (CMS Collab.). Search for Physics beyond the Standard Model in Opposite-Sign Dilepton Events at $\sqrt{s} = 7$ TeV // JHEP. 2011. V. 06. P. 026; arXiv:1103.1348.
295. Golutvin I. A. et al. Search for New Neutral Gauge Bosons at LHC // Phys. At. Nucl. 2007. V. 70. P. 56–62 [Yad. Fiz. 2007. V. 70. P. 61].
296. Gorbunov I. N., Shmatov S. V. Investigation of Drell–Yan Processes in the CMS at the LHC // Phys. At. Nucl. 2015. V. 78, No. 5. P. 603–607 [Yad. Fiz. 2015. V. 78. P. 647–651].

297. *Chatrchyan S. et al. (CMS Collab.)*. Forward-Backward Asymmetry of Drell–Yan Lepton Pairs in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV // *Phys. Lett. B*. 2013. V. 718. P. 752–772; arXiv:1207.3973.
298. *Khachatryan V. et al. (CMS Collab.)*. Forward-Backward Asymmetry of Drell–Yan Lepton Pairs in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV. arXiv:1601.04768.
299. *Ланев А.* Результаты коллаборации CMS: бозон Хиггса и поиски новой физики // *УФН*. 2014. Т. 184, № 4. С. 996–1004.
300. *Dunaitsev A. F. et al.* Pion Beta-Decay // *Sov. Phys. JETP*. 1965. V. 20. P. 58–62 [*Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1964. V. 47. P. 84].
301. *Pontecorvo B.* Experiments with Neutrinos Emitted by Mesons // *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1960. V. 39. P. 1166.
302. *Pontecorvo B.* Electron and Muon Neutrinos // *Sov. Phys. JETP*. 1960. V. 10. P. 1236–1240 [*Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1959. V. 37. P. 1751].
303. *Zaimidoroga O. A. et al.* Measurement of the Probability of the $\mu^- + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3\text{H} + \nu$ Reaction: Final Results // *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1963. V. 44. P. 389–390.
304. *Zaimidoroga O. A. et al.* Measurement of the Total Muon Capture Rate in He-3 // *Phys. Lett.* 1963. V. 6. P. 100–102.
305. *Bystritskii V. M. et al.* Measurement of the Rate of Muon Capture in Gaseous Hydrogen // *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1974. V. 66. P. 43–60.
306. *Vylov T. et al.* Measuring the Helicity of Neutrinos from the Decay of Eu-152m Using a Ge(Li) Detector // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 1984. V. 48, No. 9. P. 155–164 [*Izv. Ross. Akad. Nauk, Ser. Fiz.* 1984. V. 48. P. 1809].
307. *Pontecorvo B.* Mesonium and Anti-Mesonium // *Sov. Phys. JETP*. 1957. V. 6. P. 429 [*Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1957. V. 33. P. 549].
308. *Pontecorvo B.* Inverse Beta Processes and Nonconservation of Lepton Charge // *Sov. Phys. JETP*. 1958. V. 7. P. 172–173 [*Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1957. V. 34. P. 247].
309. *Naumov D. V., Naumov V. A.* A Diagrammatic Treatment of Neutrino Oscillations // *J. Phys. G*. 2010. V. 37. P. 105014; arXiv:1008.0306.
310. *Naumov D. V., Naumov V. A.* Relativistic Wave Packets in a Field Theoretical Approach to Neutrino Oscillations // *Russ. Phys. J.* 2010. V. 53. P. 549–574 [*Izv. Vuz. Fiz.* 2010. V. 6. P. 5].
311. *Ranucci G. et al.* Overview and Accomplishments of the Borexino Experiment // *J. Phys. Conf. Ser.* 2016. V. 675, No. 1. P. 012036.
312. *Smirnov O. Y. et al.* Measurement of Solar pp -Neutrino Flux with Borexino: Results and Implications // *Ibid.* P. 012027.
313. *Smirnov O. et al.* Solar Neutrinos with Borexino: Results and Perspectives // *Phys. Part. Nucl.* 2015. V. 46, No. 2. P. 304–316.
314. *Bellini G. et al.* Neutrino Measurements from the Sun and Earth: Results from Borexino // *AIP Conf. Proc.* 2015. V. 1666. P. 090002.
315. *Ludhova L. et al.* Geo-Neutrinos and Borexino // *Phys. Part. Nucl.* 2015. V. 46, No. 2. P. 317–330.
316. *Adamson P. et al. (NO ν A Collab.)*. First Measurement of Electron Neutrino Appearance in NO ν A // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 116, No. 15. P. 151806; arXiv:1601.05022.

317. *Bharti S. et al.* Hierarchy Sensitivity of $\text{NO}\nu\text{A}$ in Light of T2K Electron Neutrino Appearance Data. arXiv:1602.03513.
318. *Agafonova N. et al. (OPERA Collab.)*. Discovery of τ Neutrino Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment // *Phys. Rev. Lett.* 2015. V. 115, No. 12. P. 121802; arXiv:1507.01417.
319. *Brudanin V.B. et al.* New Bounds on Neutrino Electric Millicharge from GEMMA Experiment on Neutrino Magnetic Moment // *Intern. Conf. on High Energy Phys. (ICHEP 2014)*, Valencia, Spain, July 2–9, 2014. arXiv:1411.2279.
320. *Beda A.G. et al.* GEMMA Experiment: The Results of Neutrino Magnetic Moment Search // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2013. V. 10. P. 139–143.
321. *Belov V. et al.* Registration of Reactor Neutrinos with the Highly Segmented Plastic Scintillator Detector DANSSino // *JINST.* 2013. V. 8. P. P05018; arXiv:1304.3696.
322. *Belov V. et al.* The νGeN Experiment at the Kalinin Nuclear Power Plant // *JINST.* 2015. V. 10, No. 12. P. P12011.
323. *An F.P. et al. (Daya Bay Collab.)*. Observation of Electron–Antineutrino Disappearance at Daya Bay // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 108. P. 171803; arXiv:1203.1669.
324. *An F.P. et al. (Daya Bay Collab.)*. Independent Measurement of the Neutrino Mixing Angle θ_{13} via Neutron Capture on Hydrogen at Daya Bay // *Phys. Rev. D.* 2014. V. 90, No. 7. P. 071101; arXiv:1406.6468.
325. *An F.P. et al. (Daya Bay Collab.)*. Search for a Light Sterile Neutrino at Daya Bay // *Phys. Rev. Lett.* 2014. V. 113. P. 141802; arXiv:1407.7259.
326. *An F.P. et al. (Daya Bay Collab.)*. New Measurement of Antineutrino Oscillation with the Full Detector Configuration at Daya Bay // *Phys. Rev. Lett.* 2015. V. 115, No. 11. P. 111802; arXiv:1505.03456.
327. *Djurcic Z. et al. (JUNO Collab.)*. JUNO Conceptual Design Report. arXiv:1508.071661508.07166.
328. *An F. et al. (JUNO Collab.)*. Neutrino Physics with JUNO // *J. Phys. G.* 2016. V. 43, No. 3. P. 030401; arXiv:1507.05613.
329. *Avrorin A.V. et al.* Data Acquisition System for the Baikal-GVD Neutrino Telescope // *Phys. Part. Nucl.* 2016. V. 47, No. 6. P. 933–937.
330. *Avrorin A.D. et al.* Neutrino Signal at Baikal from Dark Matter in the Galactic Center // *Ibid.* P. 926–932.
331. *Demidov S.V., Suvorova O.V.* Indirect Searches for Dark Matter at Baksan and Baikal // *Phys. Part. Nucl.* 2015. V. 46, No. 2. P. 222–229.
332. *Avrorin A.D. et al.* Status and Recent Results of the Baikal-GVD Project // *Ibid.* P. 211–221.
333. *Aartsen M.G. et al. (IceCube Collab.)*. Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector // *Science.* 2013. V. 342. P. 1242856; arXiv:1311.5238.
334. *Aartsen M.G. et al. (IceCube Collab.)*. First Observation of PeV-Energy Neutrinos with IceCube // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 111. P. 021103; arXiv:1304.5356.
335. *Avrorin A.V. et al.* Search for Astrophysical Neutrinos in the Baikal Neutrino Project // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2011. V. 8. P. 704–716.

336. *Avrorin A. D. et al.* Baikal-GVD: First Cluster Dubna // Proc. 2015 Eur. Phys. Soc. Conf. on High Energy Phys. (EPS-HEP 2015). 2015. arXiv:1511.02324.
337. *Avrorin A. D. et al. (Baikal-GVD Collab.)*. Status of the Baikal-GVD Project // Proc. 16th Lomonosov Conf. on Elementary Part. Phys.: Part. Phys. at the Year of Centenary of Bruno Pontecorvo. 2015. P. 98–101.
338. *Avrorin A. V. et al.* A Hydroacoustic Positioning System for the Experimental Cluster of the Cubic-Kilometer-Scale Neutrino Telescope at Lake Baikal // Instr. Exp. Tech. 2013. V. 56. P. 449–458.
339. The White Book: JINR Neutrino Program / Ed. by V. A. Bednyakov, D. V. Naumov. Dubna: JINR, 2014. 291 p.
340. *Spiering C.* The Global Neutrino Network Takes Off // CERN Courier. 2014. V. 54, No. 12. P. 10.
341. *Arnold R. et al. (NEMO-3 Collab.)*. Results of the Search for Neutrinoless Double- β Decay in ^{100}Mo with the NEMO-3 Experiment // Phys. Rev. D. 2015. V. 92, No. 7. P. 072011; arXiv:1506.05825.
342. *Arnold R. et al. (NEMO-3 Collab.)*. Search for Neutrinoless Double-Beta Decay of ^{100}Mo with the NEMO-3 Detector // Phys. Rev. D. 2014. V. 89, No. 11. P. 111101; arXiv:1311.5695.
343. *Agostini M. et al.* Results on $\beta\beta$ Decay with Emission of Two Neutrinos or Majorons in ^{76}Ge from GERDA Phase I // Eur. Phys. J. C. 2015. V. 75, No. 9. P. 416; arXiv:1501.02345.
344. *Agostini M. et al. (GERDA Collab.)*. Improvement of the Energy Resolution via an Optimized Digital Signal Processing in GERDA Phase I // Ibid. No. 6. P. 255; arXiv:1502.04392.
345. *Agostini M. et al. (GERDA Collab.)*. Results on Neutrinoless Double- β Decay of ^{76}Ge from Phase I of the GERDA Experiment // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111, No. 12. P. 122503; arXiv:1307.4720.
346. *Klapdor-Kleingrothaus H. V., Krivosheina I. V.* Why Is the Conclusion of the GERDA Experiment Not Justified // Phys. Part. Nucl. Lett. 2013. V. 10. P. 704–709; arXiv:1308.2524.
347. *Klapdor-Kleingrothaus H. V.* Lessons after the Evidence for Neutrinoless Double Beta Decay: The Next Step // Intern. J. Mod. Phys. E. 2008. V. 17. P. 505–517.
348. *Klapdor-Kleingrothaus H. V., Krivosheina I. V.* The Evidence for the Observation of $0\nu\beta\beta$ Decay: The Identification of $0\nu\beta\beta$ Events from the Full Spectra // Mod. Phys. Lett. A. 2006. V. 21. P. 1547–1566.
349. *Klapdor-Kleingrothaus H. V. et al.* Search for Neutrinoless Double Beta Decay with Enriched Ge-76 in Gran Sasso 1990–2003 // Phys. Lett. B. 2004. V. 586. P. 198–212; arXiv:hep-ph/0404088.
350. *Armengaud E. et al. (EDELWEISS Collab.)*. Background Studies for the EDELWEISS Dark Matter Experiment // Astropart. Phys. 2013. V. 47. P. 1–9; arXiv:1305.3628.
351. *Armengaud E. et al.* Axion Searches with the EDELWEISS-II Experiment // JCAP. 2013. V. 1311. P. 067; arXiv:1307.1488.
352. *Alexander T. et al. (DarkSide Collab.)*. DarkSide Search for Dark Matter // JINST. 2013. V. 8. P. C11021.

353. *Agnes P. et al. (DarkSide Collab.)*. First Results from the DarkSide-50 Dark Matter Experiment at Laboratori Nazionali del Gran Sasso // *Phys. Lett. B*. 2015. V. 743. P. 456–466; arXiv:1410.0653.
354. *Bednyakov V. A., Naumov D. V., Smirnov O. Y.* Neutrino Physics and JINR // *Phys. Usp.* 2016. V. 59, No. 3. P. 225–253.
355. *Angloher G. et al. (EURECA Collab.)*. EURECA Conceptual Design Report // *Phys. Dark Univ.* 2014. V. 3. P. 41–74.
356. *Pontecorvo B.* Neutrino Experiments and the Problem of Conservation of Leptonic Charge // *Sov. Phys. JETP*. 1968. V. 26. P. 984–988 [*Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1967. V. 53. P. 1717].
357. *Gribov V. N., Pontecorvo B.* Neutrino Astronomy and Lepton Charge // *Phys. Lett. B*. 1969. V. 28. P. 493.
358. *Hincks E. P., Pontecorvo B.* On the Absence of Photons among the Decay Products of the 2.2-Microsecond Meson // *Can. J. Res.* 1950. V. 28A. P. 29–43.
359. *Hincks E. P., Pontecorvo B.* Search for Gamma Radiation in the 2.2-Microsecond Meson Decay Process // *Phys. Rev.* 1948. V. 73. P. 257–258.
360. *Baranov V. A. et al.* Search for $\mu^+ \rightarrow e^+e^+e^-$ Decay // *Sov. J. Nucl. Phys.* 1991. V. 53. P. 802–807 [*Yad. Fiz.* 1991. V. 53. P. 1302].
361. *Gordeev V. A. et al.* Experimental Study of Muonium Anti-Muonium Conversion at the Phasotron of the Joint Institute for Nuclear Research // *JETP Lett.* 1993. V. 57. P. 270–275 [*Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1993. V. 57. P. 262].
362. *Gordeev V. A. et al.* Analysis of Results of an Experimental Study of the Probability for Muonium Anti-Muonium Conversion and of Background Processes in a Separated Beam of “Surface” Muons of the Phasotron of the Nuclear Reactions Laboratory of the Joint Institute for Nuclear Research // *JETP Lett.* 1994. V. 59. P. 589–595 [*Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1994. V. 59. P. 565].
363. *Venturini M. (MEG Collab.)*. Results and Perspectives of the MEG and MEG II Experiments // *Nuovo Cim.* 2015. V. C038, No. 01. P. 12.
364. *Baldini A. M. et al. (MEG Collab.)*. Measurement of the Radiative Decay of Polarized Muons in the MEG Experiment // *Eur. Phys. J. C*. 2016. V. 76, No. 3. P. 108; arXiv:1312.3217.
365. *Grange J. (Muon g–2 Collab.)*. The New Muon g–2 Experiment at Fermilab // *PoS*. 2015. V. NUFAC2014. P. 099; arXiv:1501.03040.
366. *Atanov N. et al. (Mu2e Collab.)*. Measurement of Time Resolution of the Mu2e LYSO Calorimeter Prototype // *Nucl. Instr. Meth. A*. 2016. V. 812. P. 104–111; arXiv:1509.04468.
367. *Brown D. (Mu2e Collab.)*. The Mu2e Experiment: Searching for Muon to Electron Conversion // *Nucl. Part. Phys. Proc.* 2015. V. 260. P. 151–154.
368. *Bartoszek L. et al. (Mu2e Collab.)*. Mu2e Technical Design Report. arXiv: 1501.05241.
369. *Nakazawa Y. et al. (COMET Collab.)*. COMET Experiment Searching for Muon to Electron Conversion // *PoS*. 2015. V. FPCP2015. P. 058.
370. *Yuan Y. (COMET Collab.)*. Search for Muon to Electron Conversion at J-PARC // *Intern. J. Mod. Phys. Conf. Ser.* 2014. V. 31. P. 1460302.

371. *Cui Y. G. et al. (COMET Collab.)*. Conceptual Design Report for Experimental Search for Lepton Flavor Violating $\mu^- \rightarrow e^-$ Conversion at Sensitivity of 10^{-16} with a Slow-Extracted Bunched Proton Beam (COMET). KEK-2009-10. Japan, 2009.
372. *Ahmad S. et al.* Search for Muon–Electron and Muon–Positron Conversion // *Phys. Rev. D*. 1988. V. 38. P. 2102.
373. *Divari P. C., Vergados J. D., Kosmas T. S.* Exotic Muon to Positron Conversion in Nuclei: Partial Transition Sum Evaluation by Using Shell Model // *Part. Nucl. Lett.* 2001. V. 104. P. 53–70.
374. *Berryman J. M. et al.* On Lepton-Number-Violating Searches for Muon to Positron Conversion. arXiv:1611.00032.
375. *Okun L., Pontecorvo B., Rubbia C.* Four-Lepton Decays of Charged Pions and Kaons and Possible Interactions of Leptons // *Rom. J. Phys.* 1966. V. 11. P. 819–824 [*Yad. Fiz.* 1966. V. 4. P. 1202].
376. *Balandin M. P. et al.* The Possibility of the Formation of Λ^0 -Particles by Protons with Energies up to 700 MeV // *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1955. V. 29. P. 265–273.
377. *Pontecorvo B.* On New Strange Particles // *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1960. V. 38. P. 1654–1656.
378. *Rusakovich N. L., Flyagin V. B.* Measurement of the K Meson Decay Constants at the Hyperon Setup at the Serpukhov Proton Synchrotron U-70 and the Latest World Data // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2004. V. 1. P. 29–33 [*Pis'ma Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra.* 2004. V. 1, No. 1(118). P. 50].
379. *Batusov V. Yu. et al.* Measurement of the Dalitz Plot Slope Parameters for $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$ Decay // *Nucl. Phys. B*. 1998. V. 516. P. 3–12.
380. *Blik A. M. et al.* Upper Limit for the Branching Ratio of $K_s^0 \rightarrow e^+ e^-$ Decay // *Phys. Lett. B*. 1994. V. 334. P. 234–236.
381. *Asmolov A. G. et al. (IFVE–JINR Collab.)*. The Spectrometric Complex HYPERON for Investigation of Rare K Meson Decays // *Instr. Exp. Tech.* 1994. V. 37. P. 263–270 [*Prib. Tekh. Eksp.* 1994. V. 37. P. 13].
382. *Aleev A. N. et al. (EXCHARM Collab.)*. Spin Alignment of $K^{*+}(892)$ -Mesons Produced in Neutron Carbon Interactions // *Phys. Lett. B*. 2000. V. 485. P. 334–340; arXiv:hep-ex/0002054.
383. *Aleev A. N. et al. (EXCHARM Collab.)*. A Measurement of the Transverse Polarization of Λ Hyperons Produced in n C Reactions in the EXCHARM Experiment // *Eur. Phys. J. C*. 2000. V. 13. P. 427–432.
384. *Rusakovich N. L., Flyagin V. B.* The Most Recent Studies of $K^\pm \rightarrow \pi^0 e^\pm \nu(\bar{\nu})$ and $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$ Decays at the IHEP Proton Synchrotron U-70 // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2005. V. 2. P. 82–84 [*Pis'ma Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra.* 2005. V. 2, No. 2(125). P. 29].
385. *Ogata R. et al. (E391a Collab.)*. Study of the $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \nu \bar{\nu}$ Decay // *Phys. Rev. D*. 2011. V. 84. P. 052009; arXiv:1106.3404.
386. *Tung Y. C. et al. (E391a Collab.)*. Search for the Decay $K_L^0 \rightarrow 3\gamma$ // *Ibid.* V. 83. P. 031101; arXiv:1011.4403.

387. Kurilin A. S. *et al.* Search for the $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ Decay at the IHEP U-70 Accelerator: The KLOD Project // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2010. V. 7. P. 21–26.
388. Ahn J. K. *et al.* (E391a Collab.). Experimental Study of the Decay $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ // *Phys. Rev. D.* 2010. V. 81. P. 072004; arXiv:0911.4789.
389. Okonov E. O. Tables of Experimental Data: Mass Differences of K_L and K_S Mesons // *Sov. Phys. Usp.* 1969. V. 11. P. 521.
390. Neagu D. *et al.* Decay Properties of K -2-0 Mesons // *Phys. Rev. Lett.* 1961. V. 6. P. 552–553.
391. Piandani R. (NA48/2, NA62 Collab.). ChPT Test at NA48 and NA62 Experiments at CERN // *Nucl. Part. Phys. Proc.* 2015. V. 258–259. P. 75–79.
392. Lazzeroni C. *et al.* (NA62 Collab.). Test of Lepton Flavour Universality in $K^+ \rightarrow \ell^+ \nu$ Decays // *Phys. Lett. B.* 2011. V. 698. P. 105–114; arXiv:1101.4805.
393. Lazzeroni C. *et al.* (NA62 Collab.). Precision Measurement of the Ratio of the Charged Kaon Leptonic Decay Rates // *Phys. Lett. B.* 2013. V. 719. P. 326–336; arXiv:1212.4012.
394. Ceccucci A. *et al.* Kaon Decay Studies at CERN SPS in the Last Decades // *Phys. Part. Nucl.* 2016. V. 47, No. 4. P. 567–590.
395. Adamovich M. *et al.* (BEATRICE Collab.). Search for the Decay $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ // *Phys. Lett. B.* 1995. V. 353. P. 563–570.
396. Naumov D. V. (NOMAD Collab.). Measurement of Λ_0 and Anti- Λ_0 Polarization in Muon–Neutrino CC in NOMAD // *Acta Phys. Polon. B.* 2002. V. 33. P. 3791–3796; arXiv:hep-ph/0206032.
397. Abulencia A. *et al.* (CDF Collab.). Measurement of the $B_s^0 - \bar{B}_s^0$ Oscillation Frequency // *Phys. Rev. Lett.* 2006. V. 97. P. 062003; arXiv:hep-ex/0606027.
398. Buras A. J., Schwab F., Uhlig S. Waiting for Precise Measurements of $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ and $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ // *Rev. Mod. Phys.* 2008. V. 80. P. 965–1007; arXiv:hep-ph/0405132.
399. Agapov N. N. *et al.* Relativistic Nuclear Physics at JINR: From the Synchrophasotron to the NICA Collider // *Phys. Usp.* 2016. V. 59, No. 4. P. 383–402 [*Usp. Fiz. Nauk.* 2016. V. 186, No. 4. P. 405].
400. Kekelidze V. D. *et al.* NICA Project at JINR // *Springer Proc. Phys.* 2016. V. 174. P. 67–73.
401. Sissakian A. N., Sorin A. S. (NICA Collab.). The Nuclotron-Based Ion Collider Facility (NICA) at JINR: New Prospects for Heavy Ion Collisions and Spin Physics // *J. Phys. G.* 2009. V. 36. P. 064069.
402. Sissakian A. N., Kekelidze V. D., Sorin A. S. (NICA Collab.). The Nuclotron-Based Ion Collider Facility at the Joint Institute for Nuclear Research // *Nucl. Phys. A.* 2009. V. 827. P. 630C–637C.
403. Kharzeev D. E. *et al.* Chiral Magnetic and Vortical Effects in High-Energy Nuclear Collisions — A Status Report // *Prog. Part. Nucl. Phys.* 2016. V. 88. P. 1–28; arXiv:1511.04050.
404. Liao J. Chiral Magnetic Effect in Heavy Ion Collisions // *Nucl. Phys. A.* 2016. V. 956. P. 99–106; arXiv:1601.00381.

405. *Chang N.-b. et al.* Physics Perspectives of Heavy-Ion Collisions at Very High Energy // *Sci. China Phys. Mech. Astron.* 2016. V.59, No.2. P.621001; arXiv:1510.05754.
406. *Shuryak E.* Heavy Ion Collisions: Achievements and Challenges. arXiv:1412.8393.
407. *Suvarieva D. et al.* A Feasibility Study of Hyperon and Hypernuclei Reconstruction at NICA with BM@N Detector // *J. Phys. Conf. Ser.* 2016. V. 668, No. 1. P. 012121.
408. *Yurevich V. I. et al.* Beam Tests of Cherenkov Detector Modules with Picosecond Time Resolution for Start and L0 Trigger Detectors of MPD and BM@N Experiments // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2015. V. 12, No. 6. P. 778–785.
409. *Zinchenko A. (BM@N Collab.)*. Relativistic Heavy Ion Physics at JINR: Status of the BM@N and MPD Experiments // *Proc. 20th Intern. Conf. on Particles and Nuclei (PANIC 14)*. 2014. P. 220–223.
410. *Batyuk P. N. et al.* Feasibility Study of Heavy Ion Physics Program at NICA // *Phys. Part. Nucl.* 2016. V. 47, No. 4. P. 540–566.
411. *Adam J. et al. (ALICE Collab.)*. Azimuthal Anisotropy of Charged Jet Production in $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV Pb–Pb Collisions // *Phys. Lett. B.* 2016. V. 753. P. 511–525; arXiv:1509.07334.
412. *Adam J. et al. (ALICE Collab.)*. Measurement of Jet Suppression in Central Pb–Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV // *Phys. Lett. B.* 2015. V. 746. P. 1–14; arXiv:1502.01689.
413. *Adamczyk L. et al. (STAR Collab.)*. Measurements of Dielectron Production in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV from the STAR Experiment // *Phys. Rev. C.* 2015. V. 92, No. 2. P. 024912; arXiv:1504.01317.
414. *Adamczyk L. et al. (STAR Collab.)*. Observation of D^0 Meson Nuclear Modifications in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // *Phys. Rev. Lett.* 2014. V. 113, No. 14. P. 142301; arXiv:1404.6185.
415. *Kurilkin P. et al.* Compressed Baryonic Matter at FAIR: JINR Participation // *Intern. J. Mod. Phys. Conf. Ser.* 2015. V. 39. P. 1560098.
416. *Malakhov A. I.* Asymptotic Properties of the Nuclear Matter // *PoS.* 2012. V. Baldin-ISHEPP-XXI. P. 053.
417. *Vasiliev T. A., Ladygin V. P., Malakhov A. I.* Study of High $p(T)$ Pion Production with CBM at SIS 100 Energies // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2011. V. 8. P. 1090–1092.
418. *Savin I. A. et al.* Spin Physics Experiments at NICA-SPD with Polarized Proton and Deuteron Beams // *EPJ Web Conf.* 2015. V. 85. P. 02039; arXiv:1408.3959.
419. *Флягин В. Б. и др.* Изучение реакции $n + p \rightarrow \pi^0 + d$ при эффективной энергии нейтронов 600 МэВ и гипотеза зарядовой независимости // *ЖЭТФ.* 1958. Т. 32. С. 854.
420. *Головин Б. М., Джелепов В. П.* Исследование упругого рассеяния нейтронов с энергией 590 МэВ нейтронами // *ЖЭТФ.* 1956. Т. 31. С. 194.
421. *Kopeliovich B. Z.* Effects of Color Screening in Hadron Nucleus Interactions // *Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra.* 1990. V. 21. P. 117–171.
422. *Kopeliovich B. Z. et al.* Dynamics of Color in Hadron Diffraction on Nuclei // *JETP Lett.* 1981. V. 33. P. 595–597 [*Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 1981. V. 33. P. 612].

423. *Filchenkov V. V.* Physical Applications of Muon Catalysis: Muon Capture in Hydrogen // *Phys. Part. Nucl.* 2016. V. 47, No. 4. P. 591–626 [*Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra.* 2016. V. 47, No. 4. P.1091].
424. *Kulin G. V. et al.* Spectrometer for New Gravitational Experiment with UCN // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2015. V. 792. P. 38–46; arXiv:1502.03243.
425. *Lychagin E. V. et al.* Neutron Physics at the JINR: 60 Years of the I.M. Frank Laboratory of Neutron Physics // *Phys. Usp.* 2016. V. 59, No. 3. P. 254–263.
426. *Guskov A. (for the COMPASS Collab.)*. Search for Exclusive Photoproduction of $Z_c(3900)$ at COMPASS // *Proc. 2015 Eur. Phys. Soc. Conf. on High Energy Physics (EPS-HEP 2015)*. 2015. arXiv:1511.02832.
427. *Guskov A. (for the COMPASS Collab.)*. Measurement of the Charged-Pion Polarizability at COMPASS // *Ibid.*; arXiv:1511.02816.
428. *Kouznetsov O. (for the COMPASS Collab.)*. The Spin Physics Results from COMPASS // *AIP Conf. Proc.* 2015. V. 1654. P. 060004.
429. *Peshkxonov D. (for the COMPASS Collab.)*. Longitudinal Spin Physics Results from COMPASS // *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* 2011. V. 219–220. P. 52–55.
430. *Nerling F. (for the COMPASS Collab.)*. Highlights from the COMPASS Experiment at CERN — Hadron Spectroscopy and Excitations. arXiv:1601.05025.
431. *Ablikim M. et al. (BESIII Collab.)*. Study of χ_{cJ} Decaying into $\phi K^*(892)\bar{K}$ // *Phys. Rev. D.* 2015. V. 91, No. 11. P. 112008; arXiv:1503.04699.
432. *Ablikim M. et al. (BESIII Collab.)*. Confirmation of a Charged Charmoniumlike State $Z_c(3885)^\mp$ in $e^+e^- \rightarrow \pi^\pm(D\bar{D}^*)^\mp$ with Double D Tag // *Ibid.* V. 92, No. 9. P. 092006; arXiv:1509.01398.
433. *Ablikim M. et al. (BESIII Collab.)*. Measurement of the Form Factors in the Decay $D^+ \rightarrow \omega e^+\nu_e$ and Search for the Decay $D^+ \rightarrow \phi e^+\nu_e$ // *Ibid.* No. 7. P. 071101; arXiv:1508.00151.
434. *Dutta D. (for the PANDA Collab.)*. Physics Program of PANDA Experiment at FAIR // *Nucl. Phys. A.* 2011. V. 862–863. P. 231–237.
435. *Destefanis M. (for the PANDA Collab.)*. Drell–Yan Studies in $p\bar{p}$ Reactions at FAIR // *Phys. Part. Nucl.* 2013. V. 44. P. 886–889.
436. *Sanchez Lorente A. (for the PANDA Collab.)*. Hypernuclear Physics Studies of the PANDA Experiment at FAIR // *Hyperfine Interact.* 2014. V. 229, No. 1–3. P. 45–51.
437. *Kulikov S. A., Prikhodko V. I.* New Generation of Data Acquisition and Data Storage Systems of the IBR-2 Reactor Spectrometers Complex // *Phys. Part. Nucl.* 2016. V. 47, No. 4. P. 702–710 [*Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra.* 2016. V. 47, No. 4. P.1288].
438. *Aksenov V. L., Balagurov A. M.* Neutron Diffraction on Pulsed Sources // *Phys. Usp.* 2016. V. 59, No. 3. P. 279–303.
439. *Manoshin S. A., Belushkin A. V., Ioffe A. I.* Development of the Methods for Simulating the Neutron Spectrometers and Neutron-Scattering Experiments // *Phys. Part. Nucl.* 2016. V. 47, No. 4. P. 667–680 [*Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra.* 2016. V. 47, No. 4. P. 1228].
440. *Lychagin E. V. et al.* UCN Sources at External Beams of Thermal Neutrons. An Example of PIK Reactor // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2016. V. 823. P. 47–55; arXiv:1511.07770.

441. *Frank A. I.* Ultracold Neutrons and the Interaction of Waves with Moving Matter // *Phys. Part. Nucl.* 2016. V. 47, No. 4. P. 647–666 [*Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra.* 2016. V. 47, No. 4. P. 1192].
442. *Grigorenko L. V. et al.* Studies of Light Exotic Nuclei in the Vicinity of Neutron and Proton Drip Lines at FLNR JINR // *Phys. Usp.* 2016. V. 59, No. 4. P. 321–366 [*Usp. Fiz. Nauk.* 2016. V. 186, No. 4. P. 337].
443. Seven-Year Plan for the Development of JINR 2017–2023. Dubna, 2017. 51 p.
444. *Aksenov V. L., Balagurov A. M., Kozlenko D. P.* Condensed Matter Research at the Modernized IBR-2 Reactor: From Functional Materials to Nanobiotechnologies // *Phys. Part. Nucl.* 2016. V. 47, No. 4. P. 627–646 [*Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra.* 2016. V. 47, No. 4. P. 1154].
445. *Bergin E. A.* Astrobiology: An Astronomer’s Perspective // *AIP Conf. Proc.* 2014. V. 1638. P. 5; arXiv:1309.4729.
446. *Krasavin E. A.* Radiobiological Research at JINR Accelerators // *Phys. Usp.* 2016. V. 186, No. 4. P. 435–443.