

III

Научно- исследовательская деятельность ОИЯИ

Научные цели. Выбор и развитие научных направлений

Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ) – крупный международный научный многодисциплинарный центр, в котором фундаментальные исследования в области современной физики элементарных частиц и атомного ядра и физики конденсированного состояния вещества с использованием ядерно-физических методов интегрированы с разработками и применением новейших технологий, а также с университетским образованием в соответствующих областях знаний.

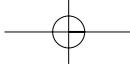
Партнерами ОИЯИ в его 18 странах-участницах являются около 250 научных организаций, в том числе более 70 университетов. Усилия стран-участниц ОИЯИ нацелены на развитие и укрепление научных связей со всеми партнерами, на создание благоприятных условий для проведения исследований в первую очередь на уникальных установках Объединенного института, а также на поддержку экспериментов в других научных центрах, где физики ОИЯИ вносят весомый вклад как в создание научного оборудования, так и в проведение физических исследований. Такой подход способствует развитию и укреплению позиций Объединенного института в научных направлениях, где вклад его ученых всемирно признан. Это свидетельствует о заинтересованности стран-участниц в определении стратегии развития Объединенного института ядерных исследований.

Научная политика ОИЯИ строится таким образом, чтобы находиться в русле мировых научных тенденций. Научная программа исследований нацелена на решение ключевых задач естествознания, в том числе на проверку предсказаний Стандартной Модели, поиск новых явлений и закономерностей, синтез новых элементов и изучение нуклидов на границах нуклонной стабильности, исследования физики поверхности, изучение свойств сильнокоррелированных электронных систем и наноматериалов. При этом исследования актуальных проблем сочетаются с эффективной теоретической, математической и программной поддержкой экспериментов, осуществляемых с участием ОИЯИ.

Основными базовыми установками ОИЯИ являются нуклотрон, реактор ИБР-2, циклотронный комплекс У-400–У-400М и сооружаемые новые установки ИРЕН и DRIBs. После завершения модернизации ИБР-2, запланированной на 2009 год, и создания первой очереди установки ИРЕН, заменяющей выведенный из эксплуатации бустер ИБР-30, в ОИЯИ будут действовать импульсные источники нейтронов мирового класса, не имеющие аналогов в странах-участницах. Создание установки DRIBs укрепит лидирующие позиции ОИЯИ в мире в области физики тяжелых ионов.

Главным резервом увеличения часов работы базовых установок станет внедрение энергосберегающих технологий (например, на нуклотроне – за счет замены традиционных магнитов на сверхпроводящие в каналах транспортировки пучков, а на У-400 – за счет конструктивных изменений магнита).

С целью укрепления научных связей и создания благоприятных условий для проведения экспериментов будет развиваться политика пользователей. Учитывая успешный опыт последних лет по проведению коллаборационных экспериментов на ИБР-2, политика пользователей будет распространена на нуклотрон и циклотроны



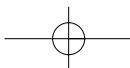
У-400—У-400М. Крупные детекторы, спектрометры и другие экспериментальные установки будут создаваться и реконструироваться с учетом «дистанционных» технологий предоставления данных участникам эксперимента.

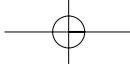
Информационные технологии — ключевые технологии современного физического эксперимента, помогающие делать «физику на расстоянии». За последнее десятилетие достигнут значительный рост пропускной способности внешних компьютерных линий связи, что, однако, не отвечает постоянно возрастающим запросам пользователей Института и темпам развития компьютерных каналов в крупнейших научных центрах мира. На 2009 год намечен переход на технологии передачи данных в 10 Гбит/с для локальной и внешней сетей. Создание на базе ОИЯИ и 10 российских ядерно-физических центров распределенного Tier2 центра, реализующего GRID-технологии на основе высокоскоростных сетей нового поколения и интегрированного в европейскую и мировую GRID-структуры, создаст условия, адекватные требованиям наиболее крупных физических экспериментов, включая эксперименты нового поколения на нуклотроне (ОИЯИ), LHC (CERN), RHIC (BNL), Tevatron (FNAL), HERA (DESY).

Предусмотрено дальнейшее развитие и применение новых наукоемких технологий в смежных областях науки, в том числе развитие прикладных исследований с использованием установок Института. Запланированы работы по оказанию помощи в сооружении новых установок и разработке научных программ для них в странах-участницах (например, циклотронный центр в Братиславе (Словацкая Республика), циклотрон DC-60 в Астане (Республика Казахстан) и др.). При этом используются внебюджетные источники финансирования.

Прилагаются усилия для сокращения разрыва в уровнях финансового обеспечения исследований в ОИЯИ и передовых научных центрах ведущих держав мира. Постоянное увеличение доходной части бюджета должно завершиться своевременными и в полных объемах ежегодными переводами взносов и реструктуризацией задолженностей всеми странами-участницами. Существенный дополнительный прирост доходов может происходить за счет привлечения новых стран-партнеров. Концентрация финансовых ресурсов на приоритетных научных направлениях и оптимизация структуры расходов Института будут постоянно использоваться для повышения эффективности затрат при ограниченном бюджете.

Приоритетной задачей ОИЯИ является обеспечение заработной платы, адекватной квалификации персонала Института и сопоставимой с уровнем зарплаты в западных международных научных организациях. Уровень зарплат персонала, существовавший в последнее десятилетие, примерно соответствовал аналогичным показателям в научных центрах России — стране местонахождения ОИЯИ. Планируется, что рост заработной платы персонала будет опережать темп увеличения доходов бюджета. Одновременно дирекция Института продолжит свой прежний курс на искоренение уравниловки и будет осуществлять постепенное сокращение численности персонала. Предусматриваются мероприятия по социальной защите сотрудников, которые будут проводиться в кооперации с муниципальными властями. Обеспечение молодых специалистов жильем будет решаться за счет внебюджетных средств, ресурсов программы наукограда. Дирекция ОИЯИ, придавая особое значение подготовке научной смены и закреплению молодых специалистов в штате ОИЯИ, осуществляет целевую программу «Молодежь в ОИЯИ».





В течение полувека в ОИЯИ получены первоклассные научные результаты мирового значения, и Институт опирается на мощный фундамент, который представляет собой:

- традиции научных школ, имеющих мировое признание;
- научно-исследовательские базовые установки с уникальными возможностями, позволяющие решать актуальные задачи во многих областях современной физики;
- статус международной межправительственной организации.

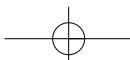
Научная программа ОИЯИ ориентирована на достижение высокозначимых результатов принципиального научного значения.

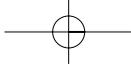
Институт проводит теоретические и экспериментальные исследования в вышеуказанных областях физики с использованием базовых физических установок в ОИЯИ и других ведущих научных центрах мира, обеспечивающих широкие и уникальные возможности для проведения исследований как в области физики высоких энергий, так и физики низких и промежуточных энергий. Активно применяются новейшие информационные технологии и методы вычислительной физики, что в целом содействует обеспечению современного уровня научных исследований.

В своей научной деятельности Институт опирается на достижения современной физики микромира и учитывает мировые тенденции ее развития. Исследовательская программа ОИЯИ формируется и реализуется на основе идей и предложений научных лидеров и коллективов. При этом широко используются как методы исследований, разработанные в научных школах ОИЯИ, так и оригинальные возможности физических установок.

В соответствии с концепцией развития ОИЯИ как научного многодисциплинарного центра будут осуществляться исследования по следующим основным направлениям:

- *Теоретическая физика:*
квантовая теория поля и современная математическая физика; фундаментальные симметрии; Стандартная Модель и ее расширения; астрофизика и космология; структура ядер, далеких от долины стабильности; динамика малочастичных систем; экзотические свойства ядерной материи; сильно коррелированные системы; интегрируемость; самоорганизация; неупорядоченные структуры.
- *Физика элементарных частиц:*
происхождение массы; природа спина; фундаментальные симметрии (киральная симметрия); природа темной материи; масса нейтрино; деконфайнмент; исследование суперсимметрии.
- *Релятивистская ядерная физика:*
непертурбативная КХД; спиновые эффекты в адронных процессах; кварк-глюонные степени свободы; асимптотические законы в ядерных столкновениях; механизм адронизации и конфайнмента; взаимодействия тяжелых ионов; множественные процессы; гиперядра и η -ядра; механизм мультифрагментации; кумулятивные эффекты; структура спина легких ядер; физика резонансов, нуклотрон; технология сверхпроводящих магнитов.





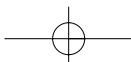
- *Физика тяжелых ионов:*
ядерные реакции, вызываемые стабильными и радиоактивными ядрами; свойства ядер вблизи границ нуклонной стабильности; синтез и свойства трансурановых и сверхтяжелых ядер; химия актинидов и трансактинидов; радиоаналитические исследования; ускорители тяжелых ионов; взаимодействия тяжелых ионов с конденсированным веществом.
- *Физика низких и промежуточных энергий:*
фундаментальные физические явления и процессы в ядерной физике; редкие распады элементарных частиц и ядер; неускорительная физика частиц; природа и свойства нейтрино.
- *Нейтронная ядерная физика:*
нарушение фундаментальной симметрии в реакциях с нейтронами; бета-распад и электромагнитные свойства нейтрона; ультрахолодные нейтроны; ядерные данные для науки и технологий; экологические исследования с использованием нейтронов.
- *Физика конденсированных сред:*
сильно коррелированные электронные системы; системы низкой размерности; гетероструктуры; квантовые источники и точки; квантовые жидкости; хаос; самоорганизация; неупорядоченные системы; полимеры; биополимеры; биомембраны; наноматериалы; физика поверхностей.
- *Радиационные и радиобиологические исследования:*
радиобиология; радиационная генетика; мутагенез; хромосомные aberrации; биофизика фотобиологических процессов; мишенная терапия; радиационная безопасность; дозиметрия; спектрометрия нейтронов; транспорт излучения через вещество.
- *Сети, компьютеринг, вычислительная физика:*
распределенная высокопроизводительная вычислительная инфраструктура; высокоскоростной обмен информацией и высокопроизводительные сети; информационная, алгоритмическая и программная поддержка; моделирование физических систем; обработка данных и аналитические вычисления в задачах физики; GRID-сегмент ОИЯИ и его включение в европейскую и глобальную GRID-структуры.

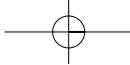
* * *

Путь, пройденный ОИЯИ за полвека своего существования, отмечен многими научными достижениями мирового класса на всех научных направлениях ядерной физики.

Известно, что основной задачей физики на протяжении всей истории ее развития является поиск фундаментальных составляющих материи, поиск новых видов энергии.

К моменту создания ОИЯИ было известно, что вся материя состоит из 92 элементов Периодической системы Менделеева, каждый атом любого элемента состоит из ядра и электронной оболочки, ядро состоит из протонов и нейтронов, их взаимодействие в ядре осуществляется путем обмена π -мезонами. Фотон (или γ -квант) считался переносчиком электромагнитного взаимодействия. Были открыты две пары античастиц: электрон-позитрон и протон-антипротон. Было открыто несколько странных частиц — гиперонов и К-мезонов, но их роль в строении материи была не-





ясна. Максимальной энергии ускорителя хватало лишь для рождения одной пары протон-антипротон. В качестве детекторов частиц использовались фотоэмульсии и счетчики Гейгера.

Уже в то время все взаимодействия делились на сильные, электромагнитные, слабые и гравитационные. Единственной теорией, удовлетворявшей теоретиков, была квантовая электродинамика.

Ситуация в теории элементарных частиц относительно полно отражена, например, в тематике теоретического семинара, проходившего под руководством Абдуса Салама (16 июля – 25 августа 1962 года, Триест). Основные проблемы, обсуждавшиеся на этом семинаре, сводятся к следующим:

- квантовая теория поля в аксиоматической и лагранжевой формулировке;
- свойства симметрии элементарных частиц;
- комплексные угловые моменты и двойные дисперсионные соотношения;
- модели множественного рождения частиц;
- методы устранения инфракрасных расходимостей в КЭД;
- слабые взаимодействия: исследование $K_{\mu 3}$ - и $K_{l 3}$ -распадов.

Сравнивая вышеприведенный перечень основных направлений исследований, которые будут проводиться в ближайшие годы в ОИЯИ, например, с проблематикой семинара в Триесте, мы видим, какую огромную дистанцию прошли ученые ОИЯИ за полвека с 1956 года.

В ОИЯИ за эти годы возникли новые научные направления:

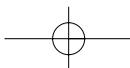
- релятивистская ядерная физика;
- физика тяжелых ионов;
- нейтронная ядерная физика;
- физика ультрахолодных нейтронов;
- физика конденсированных сред;
- радиационные и радиобиологические исследования;
- сети, компьютеринг, вычислительная физика.

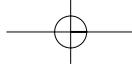
Да и проблемы самой теоретической физики сильно изменились и усложнились.

В докладе директора ОИЯИ члена-корреспондента В.Г.Кадышевского на торжественном заседании КПП и Ученого совета ОИЯИ, посвященного 40-летию со дня основания ОИЯИ, кратко перечислен ряд выдающихся открытий и достижений ученых ОИЯИ, вошедших в золотой фонд мировой науки. В частности, Периодическая система элементов сегодня насчитывает более 115 элементов, в ней 105-й элемент назван именем «дубний» в знак признания выдающегося вклада ученых Дубны в современную физику и химию. Учеными Дубны были синтезированы новые, долгоживущие сверхтяжелые элементы с порядковыми номерами 113, 114, 115 и 116. Ведутся поиски элемента 118. Эти достижения являются важным вкладом в открытие так называемого «острова стабильности» сверхтяжелых ядер.

Другие достижения ученых различных лабораторий Института за полувековой период их деятельности будут перечислены далее.

Возвращаясь к проблеме поиска простейших и неделимых частиц материи, изложим схематично этот путь от момента образования ОИЯИ до сегодняшнего дня.



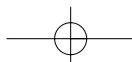


Благодаря широкому фронту исследований в космических лучах и на ускорителях к 1960 году было открыто более трех сотен частиц, кроме протонов, нейтронов, электронов, фотонов, π -мезонов, μ -мезонов и десятка странных частиц. Это «нашествие» частиц и попытки их классификации получили название «зоологии частиц».

В последующих экспериментах надежды на то, что с увеличением энергии сталкивающихся частиц удастся найти более фундаментальные, неделимые части материи, не оправдались. Выяснилось, что при самых разных взаимодействиях, при самых разных энергиях наблюдается только взаимопревращение частиц, но нет «элементарных составляющих». Возникла гипотеза «демократии» частиц – все частицы состоят друг из друга, нет самых элементарных, а для описания явления «демократии» частиц теоретиками был предложен так называемый бутстрап-метод. В различных событиях взаимодействия частиц наблюдается различное число вторичных частиц и их типов. Ограничения накладываются лишь законами сохранения энергии-импульса и ряда квантовых чисел, таких как заряд, барионное число и др. К примеру, на ускорителе со встречными протон-антипротонными пучками с энергией 1 ТэВ в одном событии часто рождается несколько сотен вторичных частиц. То же самое относится к распаду частиц. Многие из них имеют десятки различных каналов распада, причем вторичные частицы не кажутся более элементарными, чем первичные. Это значит, что частицы не извлекаются из недр других частиц, а рождаются в процессе взаимодействия. Природа умеет их чеканить по строго заданным образцам. Все они по критерию неразложимости на составные части могут быть названы элементарными. С другой стороны, экспериментально установлено, что сильно взаимодействующие частицы, называемые адронами, представляют собой протяженные объекты с характерным размером 10^{-13} см = 1 Ф. В них измерено распределение электрического заряда, магнитного момента, оптической плотности. Наблюдается также их поляризуемость, то есть они деформируются в поле падающей зондирующей волны. Ярким проявлением их структуры оказывается резонансный характер сечения взаимодействия с первичной волной. В связи с этим, по аналогии с атомной физикой, говорят о спектроскопии адронов.

Дилемма элементарности и структурности была решена способом, которому нет аналога в истории физики. Сформулировано новое понятие и новые объекты – кварки – фундаментальные фермионы, из которых строятся все адроны. Новизна ситуации состоит в том, что кварки, будучи составными частями адронов, сами в свободном состоянии не существуют. Это нетривиальное свойство называется пленением кварков («тюрьмой» кварков) или конфайнментом. Механизм пленения можно наглядно представить в форме линейно растущего потенциала с ростом расстояния между парой кварков так, что на отрыв одного кварка от другого требуется бесконечно большая энергия. На самом деле, нефизический бесконечный потенциал в теории не фигурирует. Дело в том, что сильное поле, действующее между кварками, поляризует вакуум. При попытке развести кварки на большое расстояние виртуальные кварк-антикварковые пары превращаются в реальные пары, формирующие новые адроны. На это и тратится передаваемая кваркам энергия, а сами они навсегда остаются плененными конститuentами адронов.

Открыто 6 типов кварков и соответствующих им антикварков. Условно эти типы называются ароматами. Кварки обозначаются буквами u , d , s , c , b , t – от английских



слов up (верхний), down (нижний), strange (странный), charm (очарованный), beauty (красивый), truth (истинный). Мы увидим далее, что учеными ОИЯИ (Н.Н.Боголюбов, Б.В.Струминский и А.Н.Тавхелидзе) было введено новое квантовое число для кварков, названное впоследствии цветом. Каждый кварк несет квантовое число $N = 1/3$, называемое барионным числом. Для антикварков $N = -1/3$. Во всех процессах барионное число сохраняется, однако ведутся поиски распада протона, в котором предполагается, что барионное число не сохраняется. Кварки s, c, b, t несут квантовые числа s, c, b, t — странность, очарование, красота, истина (или t — число). Эти числа сохраняются в сильных взаимодействиях, но нарушаются в электромагнитных и слабых. По этой причине частицы, содержащие s, c, b, t -кварки, имеют время жизни $10^{-12} \div 10^{-8}$ с, что значительно больше ядерного времени 10^{-22} с, характерного для времени существования широкого класса частиц, называемых резонансами. Кварк « u » самый легкий. Его масса ~ 5 МэВ. Кварк « t » самый тяжелый. Его масса ~ 176 ГэВ. Кварки u, d формируют так называемые обычные частицы — протоны, нейтроны, π -мезоны и соответствующие возбужденные состояния — резонансы. Частицы, в состав которых входит s -кварк, называются странными и т.д.

Известны два типа адронов — мезоны и барионы. Мезоны состоят из кварка и антикварка. Соответственно их барионное число $N = 0$. Барионы состоят из трех кварков, и их барионное число $N = 1$ (или $N = -1$ — для антибарионов).

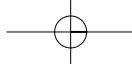
Среди мезонов особое место занимают частицы ϕ (s , анти- s), J/ψ (c , анти- c), Y (b , анти- b), называемые кваркониями. В скобках указан их кварковый состав. Эти частицы сыграли важную роль в становлении новых представлений об адронах. Это аналоги атома водорода в физике частиц. Экспериментальное исследование спектра масс кваркониев позволило восстановить потенциал взаимодействия кварков, несущих цветной заряд сильного взаимодействия, и придать кваркам статус реально существующих объектов.

Существуют смешанные частицы, включающие кварки разных ароматов. Это определяет большое разнообразие адронов. Таблица элементарных частиц насчитывает около 400 частиц и около 300 античастиц. Эксперименты по поиску и исследованию разных типов адронов иногда называют кварковой инженерией.

В 2003 году были получены свидетельства существования барионов, для построения которых необходимо пять кварков — пентакварки. Частицы этого класса называются экзотическими. Их исследование значительно углубит наши представления о кварковой динамике.

Отдельную группу частиц составляют лептоны. Известны три заряженных лептона: e, μ, τ и 3 соответствующие им нейтрино: ν_e, ν_μ, ν_τ . Кварки и лептоны объединяют в три группы, которые называют поколениями. Двенадцать фундаментальных фермионов приведены в таблице.

u	c	t
d	s	b
e	μ	τ
ν_e	ν_μ	ν_τ

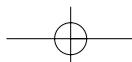


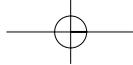
Из фундаментальных фермионов удастся составить все известные частицы и наиболее экономным способом описать многие их свойства. Сами фундаментальные фермионы на данном уровне исследований представляются бесструктурными объектами с размером меньше 10^{-16} см.

Адронные процессы взаимодействия можно разделить на две группы — мягкие и жесткие. Мягкие процессы характеризуются небольшим переданным импульсом вторичным частицам в неупругом столкновении $q \leq h/r \sim 1$ ГэВ/с, здесь r — характерный размер адрона. Мягкие процессы составляют основную часть полного сечения взаимодействия адронов. При высокой энергии столкновения, достигаемой на ускорителях со встречными пучками, выяснилось, что существуют редкие события с большой передачей импульса $q \geq 5$ ГэВ/с. Причем распределение событий по q имеет полиномиальный характер $\sigma(q) \sim 1/q^n$ и $n > 4$ при увеличении q . Тем самым в физике адронов был повторен опыт Резерфорда, который около ста лет назад обнаружил «жесткое» рассеяние α -частиц на атоме и открыл атомное ядро. Важную роль здесь сыграли эксперименты по рассеянию лептонов на протонах и ядрах с большим переданным импульсом. Эти процессы получили название глубоконеупругих. Заряженный лептон обменивается с частицей — мишенью только одним фотоном, что делает возможным достаточно точный теоретический анализ измеренного сечения глубоконеупругого процесса на основе электродинамики. Открытие глубоконеупругих рассеяний лептонов на нуклонах и ядрах, жестких процессов при рассеянии адронов (в том числе струйной топологии многочастичных неупругих событий) позволили определенно утверждать, что адроны являются протяженными объектами, построенными из точечноподобных конstituентов. Последние были идентифицированы как кварки и связывающие их глюоны. Гипотеза кварков была сформулирована в 60-е годы и достаточно успешно решила проблему классификации частиц ($SU(3)$ -симметрия). При этом динамика взаимодействия кварков, приводящая к формированию адронов, оставалась в тени. После открытия процессов с большой передачей импульса и исследования кваркониев настало время сделать очередной большой шаг на пути поиска простейших и фундаментальных (неделимых) частиц всего сущего. Матрешка вещества открылась в очередной раз, и в ней оказались кварки и глюоны. Теория, описывающая взаимодействие адронов как составных и протяженных объектов, называется квантовой хромодинамикой.

Мы уже говорили, что известны четыре вида фундаментальных взаимодействий: сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное. Квантовая теория поля рассматривает частицы и силы, действующие между ними, с единой точки зрения: частицы являются квантами поля, а силы возникают в результате обмена тоже квантами поля. Характер силы определяют два параметра — константа связи g и масса m кванта — медиатора связи. Переносчиками взаимодействия являются бозоны — частицы с целым спином. Источниками бозонов являются фермионы. Величина g задает интенсивность излучения и поглощения бозонов и характерную величину потенциала взаимодействия, m определяет радиус действия силы $r_0 = h/mc$.

Бозон сильного взаимодействия называется глюоном (от английского слова «glue» — клей). Он излучается и поглощается кварками и «склеивает» их в адронах. Известны два класса адронов — мезоны и барионы. Мезоны состоят из пары кварк-антикварк и





имеют целый спин, барионы строятся из трех кварков и имеют полуцелый спин. Заряд сильного взаимодействия, которым обладают кварки, условно называется цветом. Это квантовое число, принимающее 3 значения. Соответственно каждый кварк может находиться в трех состояниях по цвету: он может быть красным, желтым или синим. Заряд-цвет устроен так, что суммарный заряд кварка и антикварка равен нулю. Как известно, в оптике смесь трех базисных цветов дает белое изображение. Аналогично этому три кварка в барионе подобраны по заряду (цвету) так, что вместе образуют нейтральную (бесцветную) систему. Таким образом, глюонное поле является сильным между цветными кварками в адроне и быстро падает на периферии бесцветного объекта, что соответствует хорошо известному свойству короткодействия ядерных сил. Глюон имеет нулевую массу и поэтому порождает дальнедействующий потенциал кулоновского типа. Но это справедливо только для малых расстояний $r < 1 \Phi$ ($1 \Phi = 10^{-13}$ см), где поляризованный вакуум антиэкранирует (ослабляет) заряд сильного взаимодействия. Так, при $r = 10^{-17}$ см безразмерная константа сильного взаимодействия $\alpha_s \sim 0,12$. При $r = 1 \Phi$ $\alpha_s > 1$ и потенциал становится линейно растущим, обеспечивая пленение кварков в адроне.

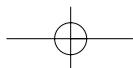
Все адроны, кроме протона, нестабильны. Многие из них трактуются как возбужденное состояние системы кварков. Оно может переходить в основное состояние, излучая адроны. Этот процесс идет за счет сильного взаимодействия и протекает быстро, то есть за ядерное время $\tau \sim 10^{-23}$ с. Соответственно, возбужденное состояние, называемое часто резонансом, имеет ширину $\Gamma = h/\tau = 10-150$ МэВ.

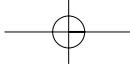
Электромагнитные силы обуславливаются фотоном, который излучается и поглощается электрическим зарядом. Фотон имеет нулевую массу и порождает хорошо известный дальнедействующий кулоновский потенциал e^2/r . Соответствующая безразмерная константа $\alpha_{em} = e^2/hc = 1/129$ при $r = 10^{-17}$ см и $\alpha_{em} = 1/137$ при $r > 1 \Phi$. Зависимость α_{em} от расстояния тоже объясняется поляризацией вакуума. Но в данном случае имеет место экранировка заряда виртуальными парами e^+e^- . Сила взаимодействия возрастает по мере приближения к «голому» заряду. Константа α_{em} на два порядка меньше константы α_s , поэтому и характерное сечение неупругих электромагнитных процессов на два порядка меньше сечения адронных реакций. То же можно сказать о парциальных ширинах распада частиц по электромагнитному каналу.

Слабое взаимодействие реализуется тремя бозонами W^+ , W^- и Z^0 . Их массы ~ 90 см. В слабых взаимодействиях участвуют все частицы (кварки и лептоны). Константа $\alpha_w = g_w/hc = 1/27$ при $r = 10^{-17}$ см. Малость радиуса и константы слабого взаимодействия приводят к малости полного сечения взаимодействия нейтрино с веществом. Здесь упоминается нейтрино, так как оно не участвует в сильных и электромагнитных взаимодействиях и характеризует слабое взаимодействие в чистом виде.

Величины α_s , α_{em} , α_w зависят от радиуса или переданного импульса $q = h/r$, при котором они измерены. Поэтому их называют бегущими константами. Теория предполагает, что при очень большом переданном импульсе $q \sim 10^{15}$ ГэВ/с они сравниваются, и три силы природы объединяются в одну. Экспериментальная проверка этого предсказания сейчас невозможна, но оно имеет большое значение для космологии.

Гравитационное взаимодействие передается гравитоном – бозоном со спином 2 и нулевой массой. Источником гравитонов является любая масса, поэтому в гравитации участвуют все частицы. Константа $\alpha_g = Gm^2/hc$ очень мала. Например, для элек-





трона $\alpha_g \sim 10^{-45}$, что исключает в настоящее время экспериментальное наблюдение гравитационных эффектов в физике частиц.

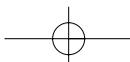
Физика элементарных частиц оперирует обширным экспериментальным материалом о частицах и их взаимодействиях. Совокупность теоретических подходов, применяемых для интерпретации данных, называется Стандартной Моделью (СМ). Перечислим основные компоненты СМ. Все кварки, пионы и лептоны считаются точечными объектами и взаимодействия — локальны.

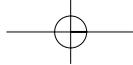
- Квантовая хромодинамика (КХД) — нелинейная квантовая теория поля, описывающая взаимодействие кварков посредством обмена глюонами — калибровочными бозонами.
- Теория электрослабого взаимодействия, описывающая электромагнитное и слабое взаимодействия как единую силу, где медиаторами являются три массивных бозона W^+ , W^- , Z^0 и безмассовый фотон γ .
- Ряд феноменологических моделей, необходимых для описания мягких процессов, где расчеты по теории возмущения КХД неприменимы из-за большой константы взаимодействия $\alpha_s \sim 1$ (на расстояниях $\sim 1 \text{ Ф}$).

СМ весьма успешно описывает большое количество данных о рассеянии, рождении и распаде частиц. Сюда относится весьма точное описание жестких адронных процессов, установление связи между разными электрослабыми реакциями. Один из триумфов СМ — систематика частиц, основанная на унитарных симметриях.

Однако СМ явно неполна. Она содержит около 25 произвольных параметров: массы кварков и лептонов, константы взаимодействия, углы смешивания различных частиц и мультиплетов частиц. В рамках СМ не имеет ответа вопрос о происхождении масс фундаментальных элементов материи — кварков и лептонов. Их массы лежат в диапазоне от 0,1 эВ (массы нейтрино) до 176 ГэВ (масса t -кварка), то есть отличаются на 12 порядков величины. Почему существуют три поколения фундаментальных фермионов? Почему массы частиц в разных поколениях отличаются сильно, а остальные свойства идентичны? Почему в природе существуют, по крайней мере, три очень разные силы: ядерная, электрослабая и гравитационная?

Четкая формулировка этих вопросов свидетельствует о достаточной широте и детальности наших знаний. Они позволяют нам наметить путь развития физики частиц в XXI веке. С другой стороны, очевидно, что за каждым вопросом стоит фундаментальная проблема, для решения которой необходимы дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования. Философский принцип материального единства и познаваемости природы говорит о возможности построения более глубокой теории, которая объединит все силы природы. Вероятно, СМ будет частью и предельным случаем будущей общей теории. В настоящее время наиболее радикальное решение предлагается концепцией суперструн. Релятивистская струна рассматривается как самый элементарный объект природы. Она обладает большим количеством возбужденных состояний (колебательных мод). Образно выражаясь, все наблюдаемые частицы являются отдельными нотами симфонии, исполняемой оркестром суперструн. Все физические поля могут быть представлены на языке суперструн. В частности, есть место и для гипотетического скалярного поля Хиггса. Предполагается, что конденсат этого поля заполняет все пространство. Частицы, погруженные в конден-



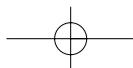


сат, взаимодействуют с ним и приобретают массу. Например, по этой причине стали массивными бозоны слабого взаимодействия W^+ , W^- , Z^0 . Теория также предсказывает существование новой внутренней симметрии частиц, называемой суперсимметрией. Согласно этой идее, каждой частице сопутствует другая частица – суперпартнер, причем фермиону сопутствует бозон, и наоборот. Мир суперчастиц пока не наблюден. Возможно, суперпартнеры имеют большие массы ~ 1 ТэВ. Ожидается их открытие на коллайдерах следующего поколения – ЛНС и линейный коллайдер e^+ , e^- с энергией в с.ц.м. ≥ 1 ТэВ. До сих пор мы рассматриваем все явления в 4-х-мерном пространстве: три координаты x , y , z и время t .

Уравнение движения суперструны имеет решение в пространстве с размерностью не менее 10. Возникает вопрос: как можно проверить это интригующее предсказание о дополнительных измерениях пространства? Если дополнительное пространство имеет макроскопическую протяженность, то известный потенциал гравитационного взаимодействия $U(r) \sim 1/r$ должен модифицироваться, что пока не обнаружено. Возможно, дополнительные измерения компактифицированы, то есть свернуты в микроскопическое многообразие. Его существование должно влиять на массы и другие свойства частиц, что будет предметом поиска на будущих ускорителях.

Замечательной тенденцией исследований последнего времени является сближение астрофизики и физики частиц. Проблемы этих наук оказываются тесно связанными. Теперь ясно, что происхождение и эволюция Вселенной и свойства частиц должны изучаться совместно. Согласно общепринятой космологической концепции, Вселенная образовалась в результате Большого взрыва. В первые мгновения существования она была горячей и плотной. Далее материя расширялась и охлаждалась, проходя серию фазовых переходов, и, наконец, через 14 миллиардов лет достигла современного состояния. Одна из загадок космологии состоит в барионной асимметрии Вселенной. Есть все основания полагать, что в ранней Вселенной вещество и антивещество были представлены в равных количествах. Современные наблюдения не обнаруживают астрофизические объекты, состоящие из антивещества. Как и когда исчезло антивещество? Аннигиляция в ранней Вселенной прошла не полностью. Остался избыток вещества, которое и заполняет видимую часть космоса. В теории переход от частицы к античастице описывается оператором CP -зарядовой и пространственной инверсией. Эксперименты с K - и B -мезонами показали, что операция CP неточна, то есть частицы по некоторым свойствам (вероятностям распада) отличаются на малую величину $\sim 10^{-3}$ от античастиц. Это явление называется несохранением комбинированной четности. Малая величина нарушения CP -четности не позволяет количественно объяснить преобладание вещества во Вселенной. И все-таки это единственный сигнал, полученный на ускорителях, который дает надежду понять одну из загадок космологии. Заметим, что барионная асимметрия является неизменным условием нашего присутствия в мире. В противном случае из-за аннигиляции вещества и антивещества Вселенная была бы заполнена только фотонами и нейтрино.

Астрофизические исследования, начало которых относится к 30-м годам прошлого века, в настоящее время привели к убеждению, что видимая (светящаяся) материя составляет лишь 5% массы метagalктики. Остальные 95% – это так называемые темная материя и темная энергия. Они проявляют себя только по эффекту гравитации.



Без них не могли бы образоваться и существовать галактики. Предполагается, что вклад в темную материю дают частицы, предсказываемые моделью суперсимметрии. Это суперпартнер нейтрино, называемый нейтралино. Они слабо взаимодействуют с веществом. Но все-таки малая передача импульса от этих частиц веществу, в принципе, может быть зарегистрирована в полупроводниковых и сцинтилляционных детекторах. Соответствующие поиски ведутся и планируются в подземных низкофоновых лабораториях. Природа темной энергии еще более загадочна. Она должна быть связана со свойствами вакуума. Темная энергия приводит к наблюдаемому ускоренному расширению Вселенной.

В экспериментах на коллайдере ядер RHIC в БНЛ (США) ставится задача наблюдения материи, которая могла существовать в первую микросекунду жизни Вселенной. Это гипотетическая кварк-глюонная плазма или аналогичные, еще неизвестные формы горячей и плотной адронной материи. Эти данные дадут важную опорную точку для развития космологии.

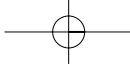
Ситуация в астрофизике подчеркивает важность поисков на ускорителях. Только совместное исследование мега- и микромиров дает шанс понять природу материи, энергии, пространства и времени.

Мы живем накануне великих и, возможно, революционных открытий фундаментальной науки. Речь идет о понимании эволюции мира в целом. Вечный вопрос: кто мы, откуда явились и какова наша судьба сейчас реально входит в программы исследований многих институтов, в том числе и в исследовательскую программу ОИЯИ. Физика превращается в науку о бытии.

Стремление к познанию окружающего мира является глубокой потребностью Homo Sapiens – человека разумного. Оно отнюдь не сводится к приобретению материальных благ. Это есть врожденное стремление к Истине. В теистической философии оно трактуется как конечная цель бытия человека – воссоединение с Абсолютом – источником всего сущего.

Фундаментальные исследования создают базис научного мировоззрения, без которого отдельный человек и человечество слепы. Наука является также основой образования. Хорошие учебники пишутся учеными, где материал подается, можно сказать, от первого лица. В высших учебных заведениях главную роль играют ведущие ученые, известные своим вкладом в фундаментальную науку. Образовательная программа занимает важное место в деятельности ОИЯИ.

Русский философ Владимир Соловьев в основе миропорядка полагал три высшие ценности: благо, красоту, истину. Наука творит благо. Это утверждение особо применимо к ОИЯИ, который 50 лет служит образцом плодотворного сотрудничества ученых, научных школ и целых государств. Наука наиболее полно раскрывает нам красоту мира, восходя от самой его основы. Вселенная имеет сотни причин деградировать в хаос. Однако она с поразительной стабильностью существует 14 миллиардов лет, эволюционируя все более к сложным формам организации материи, включая человеческую цивилизацию. И сейчас физика частиц реально претендует на раскрытие интимных основ этой стабильности и красоты. Истина по Соловьеву ассоциируется с (божественной) способностью человека к познанию и самопознанию, то есть с наукой. Истина наиболее убедительно и полно раскрывается через красоту, что и демонстрирует наука в наши дни.



Что касается таких научных направлений, как релятивистская ядерная физика, физика тяжелых ионов, нейтронная ядерная физика, физика конденсированных сред, радиобиологические исследования, сети, компьютеринг, вычислительная техника, — все они возникли в ОИЯИ уже после его организации и в ряде этих направлений, таких как релятивистская ядерная физика, физика тяжелых ионов, ультрахолодные нейтроны, сверхтекучая модель ядра, ОИЯИ был их родоначальником. Обо всем этом будет идти речь в последующих частях книги.

Грандиозные события происходят в технике эксперимента. За последние два десятилетия скорость регистрации и обработки данных возросла на шесть порядков. Эти революционные изменения в фундаментальной науке влияют на технологию и образ жизни. Приборы, разработанные в физике частиц, нашли применение в медицине и технике: томографы, проволочные камеры для регистрации ионизирующего излучения, широкое использование синхротронного излучения и др. По некоторым оценкам в мире сейчас работает около 15 тысяч ускорителей. Информационные технологии (аппаратура, алгоритмы и математическое обеспечение), предложенные для нужд фундаментальной науки, являются средствами глобального единения человечества. Программа научных исследований ОИЯИ, утвержденная до 2010 года, направлена на решение физических и технических проблем, поставленных перед человечеством историческим ходом развития науки.

