

УДК 539.17; 539.14

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И МНОЖЕСТВЕННОГО РОЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ

А. М. Балдин, А. И. Малахов*, А. Н. Сисакян**

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

ВВЕДЕНИЕ	6
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И КВАНТОВАЯ ХРОМОДИНАМИКА	7
ЗАКОНЫ САМОПОДОБИЯ И СИММЕТРИИ В РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ	9
ПРОЦЕССЫ С ВЫСОКОЙ МНОЖЕСТВЕННОСТЬЮ И ИХ СВЯЗЬ С РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКОЙ	14
Рассмотрение множественных процессов в пространстве 4-скоростей	15
Процессы с очень большой множественностью	17
ПОСЛЕДНИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ В ОБЛАСТИ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ СИНХРОФАЗОТРОН–НУКЛОТРОН	20
Развитие ускорительного комплекса	20
Обзор исследований, выполненных на синхрофазотроне, и планы исследований на нуклотроне	22
Эксперименты с релятивистскими ядрами	22
Эксперименты на поляризованных пучках	33
Первые эксперименты на нуклотроне	36
Исследования на внутреннем пучке	37
Исследования на выведенных пучках	38
Асимптотические законы в релятивистской ядерной физике	42
Прикладные исследования на ускорительном комплексе синхрофазотрон–нуклотрон	47

*e-mail: malakhov@lhe.jinr.ru

**e-mail: sisakian@jinr.ru

СОВМЕСТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ В ДРУГИХ НАУЧНЫХ ЦЕНТРАХ	51
Работы в CERN	51
Участие в экспериментах на RHIC	54
Участие в экспериментальной программе GSI	54
Исследования в RIKEN	55
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	55
БЛАГОДАРНОСТИ	56
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ	57
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	60

УДК 539.17; 539.14

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И МНОЖЕСТВЕННОГО РОЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ

А. М. Балдин, А. И. Малахов*, А. Н. Сисакян**

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Обзор посвящен результатам экспериментальных и теоретических исследований в области релятивистской ядерной физики, которые выполнены в Лаборатории высоких энергий (ЛВЭ) и Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова (ЛТФ) Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) в Дубне в течение последних лет. Приведена информация об экспериментах и проектах на ускорительном комплексе синхрофазотрон–нуклотрон. Проекты разработаны коллаборациями, группами и отделами ЛВЭ, а также других лабораторий ОИЯИ, институтов стран-участниц ОИЯИ и ряда других стран.

The review is dedicated to the experimental and theoretical results obtained in the field of relativistic nuclear physics at the Laboratory of High Energies (LHE) and Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics (BLTP) of the Joint Institute for Nuclear Research (JINR) at Dubna during last years. The information is given about the experiments and projects being carried out at the Accelerator Complex: Synchrophasotron–Nuclotron. The projects have been developed by collaborations, groups and divisions of the LHE as well as by other JINR laboratories and institutes from the JINR Member States and some other countries.

ВВЕДЕНИЕ

Релятивистская ядерная физика как новое научное направление зародилась в Дубне (СССР) и Беркли (США) в 70-х годах. В Дубне на синхрофазотроне в 1970 г. были ускорены сначала дейтроны, а позднее и более тяжелые ядра, вплоть до серы с энергией 4,5 ГэВ на нуклон. В Беркли на ускорителе «Bevalac» были получены ядра с энергией до 2 ГэВ на нуклон.

Идея первых экспериментов по наблюдению коллективных эффектов при взаимодействии релятивистских ядер была впервые высказана в работе [1]. Она состояла в том, что при взаимодействии релятивистских ядер возможно наблюдение вторичных частиц с энергией, превышающей энергию на нуклон в налетающем ядре, т. е. во взаимодействии может участвовать группа нуклонов.

*e-mail: malakhov@lhe.jinr.ru

**e-mail: sisakian@jinr.ru

Экспериментально этот эффект был обнаружен в Дубне в 1973 г. группой профессора В. С. Ставинского и получил название ядерного кумулятивного эффекта [2]. Впоследствии кумулятивный эффект был детально исследован как в ОИЯИ, так и в других научных центрах, в частности, в ИТЭФ* (Москва) группой профессора Г. А. Лексина.

Научная программа Лаборатории высоких энергий на собственной ускорительной базе в настоящее время концентрируется на исследованиях взаимодействий релятивистских ядер в энергетической области от нескольких сотен МэВ до нескольких ГэВ на нуклон с целью поиска проявлений кварк-глюонных степеней свободы в ядрах, асимптотических законов для ядерной материи при высокой энергии столкновений, а также на изучении спиновой структуры легчайших ядер [3]. Эксперименты в этом направлении проводятся с использованием ускорительного комплекса синхрофазотрон–нуклотрон.

В последнее время программа исследований переходит в большей степени на нуклотрон, в то время как синхрофазотрон используется практически только для исследований с поляризованным дейтронным пучком. В ближайшем будущем планируется получить поляризованный пучок на нуклотроне.

Программа по релятивистской ядерной физике также нашла свое развитие в других научных центрах, таких как CERN (Швейцария), BNL (США), GSI (Германия) и др., с которыми ОИЯИ тесно сотрудничает.

1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И КВАНТОВАЯ ХРОМОДИНАМИКА

Цель релятивистской ядерной физики — изучение свойств высоковольтбужденных состояний материи на малых расстояниях, которое перешло в исследование релятивистских многочастичных систем. Становится ясно, что эксперименты в этой области имеют прямое отношение к главной проблеме физики сильных взаимодействий — квантовой хромодинамике больших расстояний (или малым относительным четырехмерным скоростям) и проблеме конфайнмента кварков.

Труды международных семинаров «Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика», регулярно проводимых в Дубне, дают полное представление о развитии этой области в различных странах и исследовательских центрах на протяжении последних двадцати пяти лет [4].

Большое число проблем релятивистской ядерной физики концентрируется на одном научном направлении, а именно на поиске закономерностей

*Список используемых аббревиатур приведен в конце статьи.

в поведении релятивистских многочастичных систем. Изучение этих закономерностей очень важно для астрофизики и космологии, для понимания явлений, происходящих в момент образования Вселенной в результате Большого взрыва. Знание этих закономерностей также необходимо для того, чтобы создать системы для электроядерных энергетических установок и решить проблемы уничтожения радиоактивных отходов от атомных электростанций. Для этой цели важно накопить и описать количественно экспериментальные данные по взаимодействиям релятивистских ионов с материей.

Попытка найти фундаментальные законы природы, которые могут объяснить как можно больше явлений, играет весьма прогрессивную роль и является ведущим принципом фундаментальной науки. В результате успеха идеи калибровочной симметрии, определяющей лагранжиан взаимодействия, сложилось устойчивое представление о том, что стандартная модель (СМ) может дать такие законы. В 1970-х годах стало ясно, что все основные понятия субатомной физики (кварки, глюоны, калибровочные поля и взаимодействия между ними) могут быть объяснены и все физические явления могут быть выведены путем простой дедукции, с использованием подходящего лагранжиана. Квантовая хромодинамика (КХД), основанная на принципах современной теории поля, входит в состав СМ и является фундаментальной теорией сильных взаимодействий.

КХД, которая трактует адроны как сложные объекты, состоящие из более фундаментальных конститuentов — кварков и глюонов, должна, в принципе, описывать как асимптотические состояния, так и соответствующие фазовые переходы (например, переход от протон-нейтронной к кварк-глюонной фазе ядра). С экспериментальной точки зрения одним из фундаментальных объектов, изучаемых в КХД, является кварк-глюонная структурная функция адронов и ядер. Однако применение КХД к ядро-ядерным столкновениям затруднено, в частности, в области, где как кварк-глюонные, так и нуклонные степени свободы важны и природа деконфайнмента и, соответственно, переход от обычной (нуклонной) ядерной материи к цветной кварк-глюонной плазме не совсем ясны.

Использование методов как статистической физики, так и квантовой теории поля не проясняет вопрос, применимо ли макроскопическое описание ядерной среды к релятивистским ядерным столкновениям.

Эти вопросы имеют отношение к принципам, с помощью которых создаются математические модели, соответствующие физическим процессам и состояниям. Мы думаем, что описание многочастичных состояний релятивистской ядерной физики в терминах макроскопических переменных (температура, давление, плотность, энтропия и так далее) хотя и привлекательно, но в целом затруднительно. В этой связи следует вспомнить принцип, подчеркнутый Гейзенбергом: физические законы и утверждения должны быть выражены только в терминах наблюдаемых величин.

Настоящий обзор посвящен, в частности, обсуждению основных результатов направления, основанного на применении к релятивистской ядерной физике законов симметрии и подобия и других методов, включая некоторые методы статистической физики, которые не основываются на лангранжевском методе, но позволяют сконструировать модель, исходя из первых принципов [5].

Такой подход, в частности, позволяет следующее:

1. Определить область ядерных столкновений, в которой нуклоны теряют свою идентичность и достигаются асимптотики по энергии.
2. Предсказать существование кумулятивных процессов, демонстрирующих наблюдаемость многочастичных взаимодействий.
3. Дать унифицированное описание глубокоподпороговых, вблизипороговых и кумулятивных процессов.
4. Дать количественное описание конечных состояний ядерных столкновений (множественные процессы) на основе концепции промежуточных асимптотик и принципа ослабления корреляций.
5. Изучить адронные процессы с очень большой множественностью, описание которых не укладывается в рамки пертурбативной КХД. Они представляются принципиально важными как для понимания механизмов генерации вторичных частиц, так и для правильной оценки коллективных эффектов.
6. Обнаружить локальное самоподобие конечных состояний ядерных столкновений.
7. Дать количественное описание образования антиматерии в релятивистских ядерных столкновениях.

Эти аспекты нашего подхода иллюстрируются большим числом экспериментальных данных, которые подтверждают справедливость сделанных утверждений. Однако следует отметить, что необходимы дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования для установления связей между этими утверждениями и КХД. Крайне важным представляется изучение струй на ядерных коллайдерах, что даст ответ на вопрос о связи между релятивистской ядерной физикой и КХД. Особый интерес представляет изучение кумулятивных струй.

2. ЗАКОНЫ САМОПОДОБИЯ И СИММЕТРИИ В РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ

Проблема описания ядерных процессов, как и всех других физических процессов, решается на основе введения пространства определяющих параметров, связывающих реальные физические объекты. Протон-нейтронная ядерная модель, описывающая структуру ядер и релятивистские ядерные процессы, лежит в основе обширной области современной физики. Она в су-

щественной степени основана на законах симметрии и квантовой теории. Однако в релятивистской ядерной физике необходимо ввести концепцию ненуклонных степеней свободы, а также концепцию цветовых степеней свободы в ядрах. Идея о том, что материя состоит из элементарных частиц, претерпела существенные изменения, но идея о том, что основной концепцией физики является концепция пространства, имеет фундаментальное значение. Сравнение пространства определяющих параметров с математическим пространством является существенным моментом в создании математических моделей. Сложность реальных физических ситуаций требует упрощенных описаний и определений области действительности (измеримости) введенных концепций.

Столкновение релятивистских ядер приводит к рождению многих частиц и достаточно сложной картине взаимодействия. Как нуклонные, так и кварк-глюонные степени свободы проявляются в том же самом столкновении. Число параметров задачи является чрезвычайно большим, и очень важным становится отыскание инвариантов.

Здесь весьма плодотворным является применение идей, связанных с использованием законов симметрии, которые дают один из возможных подходов к решению задач релятивистской ядерной физики.

Определим область применимости концепции «элементарная частица». По традиции под элементарными частицами понимают неразложимые структурные конститuentы материи. Эта концепция сформировалась в близкой связи с идеей о дискретной структуре материи на микроскопическом уровне. При создании моделей элементарные частицы подразумеваются абсолютно идентичными и их ансамбли описываются квантовыми полями, которые как раз являются основой математического пространства модели. Однако квантовая теория поля успешно применяется как к частицам, обладающим внутренней структурой, так и к составным объектам, например атомам гелия при низкой температуре.

В атомной физике критерием, который ограничивает применимость такого подхода, является малость кинетической энергии относительного движения по сравнению с энергией первого возбужденного уровня атома. В противном случае взаимодействие атомов с другими атомами приводит к нарушению их идентичности и тогда необходимо увеличивать пространство параметров. Релятивистское обобщение критерия применимости концепции «элементарная частица» может быть, в частности, получено с помощью закона сохранения 4-импульса:

$$(p_1 + p_2)^2 = (p_3 + p^*)^2.$$

Из определения порога для образования возбужденного состояния одной из сталкивающихся частиц имеем

$$(p_1 + p_2)^2 = (p_3 + p^*)^2 = (m + m^*)^2,$$

откуда

$$b_{12} = -(u_1 - u_2)^2 = \frac{m - m^*}{m} \left[4 + \frac{m - m^*}{m} \right] \ll 1. \quad (1)$$

Здесь m — масса идентичных частиц и m^* — масса возбужденного состояния; p_1, p_2, p_3 и p^* — их импульсы, соответственно, $u_i = p_i/m_i$ — 4-скорости.

Пространство четырехмерных скоростей является универсальным для описания релятивистских процессов множественного рождения. Критерий (1) сформулирован в терминах инвариантных безразмерных и измеримых величин, он не включает параметры, подобные размеру частиц, степени точности и т.д. На основе критерия (1) получаем следующую классификацию ядерных систем.

- Область $0 \leq b_{ik} \leq 10^{-2}$ соответствует нерелятивистской ядерной физике. Нуклоны можно точно рассматривать как элементарные частицы.
- Область $b_{ik} \sim 1$ соответствует возбуждению внутренних адронных степеней свободы (изобара, резонансы). Необходимо вводить ненуклонные степени свободы — кванты поля отличаются от нуклонов.
- Область $b_{ik} \gg 1$ соответствует преобладанию кварковых и глюонных полей, т.е. квантов, несущих цвет.

Параметры $b_{ik} \sim 10^{-9}$ характеризуют атомную физику. Здесь, например, атом гелия теряет электроны и преобразуется из бозонов в фермионы. В релятивистской ядерной физике один процесс столкновения включает очень широкий набор относительных скоростей b_{ik} и, соответственно, квантов различного вида.

В физике частиц и ядер используется единая теоретическая основа для того, чтобы описать поведение квантовой системы в квантовой теории поля.

Использование лагранжиана цветового поля на основе калибровочной симметрии приводит к формулировке квантовой хромодинамики. Однако аналогия между квантовой электродинамикой (КЭД) и КХД далека от полной. Дополнительные условия, которые накладываются на решения уравнений Эйлера–Лагранжа, кардинально различаются в КХД и КЭД. Более всего это касается определения кварковых и глюонных асимптотических состояний. Без дополнительных требований на граничные и начальные условия, на кварк-глюонную структуру адронов и на преобразование кварков и глюонов в адронные струи невозможно связать КХД с наблюдаемыми процессами.

При решении дифференциальных уравнений необходимо принимать во внимание свойства пространства в целом. В нелинейных моделях, к которым относится КХД, возникают протяженные локализованные структуры: солитоны, завихрения, инстантоны, скирмеоны и т.д.

В 1930–1940-х гг. Л. С. Понтрягин и другие математики открыли (независимо от рассматриваемых физических моделей) интересные топологические

инварианты, играющие важную роль в современной физике. Слияние областей математики и теоретической физики позволяет надеяться, что на этом пути будет достигнута цель в поиске подхода к непертурбативным решениям задач КХД.

Как теоретические, так и экспериментальные исследования этих структур достаточно важны не только для релятивистской ядерной физики, но также и для физики сильных взаимодействий. В частности, интересно рассмотреть влияние инстантонов на природу нуклонного спина. Эксперименты по спиновой физике широко обсуждались на XIII, XIV и XV международных семинарах «Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика» в Дубне, и ОИЯИ является лидером в этой области [4]. Спиновые параметры были измерены с хорошей точностью. Изучается связь с непертурбативной КХД.

В работе [5] показано, что подход к релятивистской ядерной физике, основанный на геометрии пространства скоростей и гипотезе относительно асимптотической природы законов в этом пространстве, позволяет нам упорядочить огромное количество экспериментальных данных и сделать количественные предсказания. Методы симметрии решений, описанные в этой работе, аналогичны методам механики сплошных сред.

Некоторые из принципов симметрии решений имеют фундаментальный характер и играют решающую роль в построении новых законов природы. В качестве примера можно привести ренормгруппу. Один из авторов описанной выше симметрии (Д. В. Ширков) отнес ренормгруппу к симметрии самоподобия, введя термин «функциональная автомодельность» [6].

В случае релятивистской ядерной физики определяющими параметрами являются сечения, производные от них величины и инвариантные безразмерные интервалы в пространстве относительных 4-скоростей $\mathbf{u}_i = \mathbf{p}_i/m_i$; $u_i^0 = E_i/m_i$:

$$b_{ik} = -(u_i - u_k)^2 = 2[(u_i u_k) - 1] = 2 \left[\frac{E_i E_k - \mathbf{p}_i \mathbf{p}_k}{m_i m_k} - 1 \right]. \quad (2)$$

Так как энергии E_i и импульсы \mathbf{p}_i связаны известным соотношением $E_i^2 - \mathbf{p}_i^2 = m_i^2$, то $(u_i)^2 = (u_0)^2 - (\mathbf{u}_i)^2 = 1$. Вместо четырехмерного пространства скоростей можно ввести трехмерное с четвертой координатой, выраженной через три другие:

$$u_i^0 = \pm \sqrt{1 + u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}. \quad (3)$$

Это уравнение описывает двухполостной гиперboloид. Геометрия на поверхности гиперboloида является геометрией трехмерного пространства Лобачевского, аналогичной геометрии на поверхности сферы.

Весьма продуктивным явилось введение переменных N_I и N_{II} , характеризующих эффективные числа частиц, участвующих в столкновениях ядер I и II. В широком интервале относительных скоростей дополнительные переменные N_I и N_{II} оказались непрерывными и гладкими.

Инвариант, через который выражается большое число закономерностей релятивистской ядерной физики, имеет смысл минимальной массы

$$\min \sqrt{m_0^2(u_I N_I + u_{II} N_{II})^2} = 2m_0 \Pi \quad (4)$$

при условии сохранения 4-импульса

$$m_0 u_I N_I + m_0 u_{II} N_{II} = \sum_i p_i. \quad (5)$$

Здесь u_I и u_{II} — 4-скорости ядер; m_0 — масса нуклона. Введение единого параметра подобия (инварианта)

$$\Pi = \frac{1}{2} \sqrt{(u_I N_I + u_{II} N_{II})^2}$$

позволило количественно описать кумулятивный эффект, глубокоподпороговые и околопороговые явления и образование антиматерии в ядро-ядерных столкновениях. Особенно интересны предсказания на этой основе результатов будущих экспериментов на ядерных коллайдерах.

Уравнение

$$E \frac{d^3 \sigma}{d\mathbf{p}} = C_1 A_I^{\alpha(N_I)} A_{II}^{\alpha(N_{II})} f(\Pi), \quad (6)$$

где A_I и A_{II} — атомные массы сталкивающихся ядер; C_1 — константа, описывает различные ядерные реакции при изменении сечений на восемь порядков величины [5]. Однако для того, чтобы найти пределы области, где описание физических процессов на основе этой модели становится недействительным, требуется некоторая дополнительная работа. Особый интерес представляет предсказание на этой основе результатов планируемых экспериментов на проектируемых в настоящее время ядерных коллайдерах. Для коллайдерных энергий интервал между точками I и II

$$(u_I u_{II}) \gg 1.$$

В соответствии со сформулированным выше критерием для $(u_I u_k) \gg 1$ конечные состояния частиц описываются кварк-глюонными степенями свободы. В этом случае величины $N_I u_I m_0$ и $N_{II} u_{II} m_0$, вводящие определение инварианта Π , должны интерпретироваться как импульсы эффективного числа частиц N_I и N_{II} , участвующих в столкновении. Величины N_I и N_{II} становятся

измеримыми, если Π определяется с помощью закона сохранения 4-импульса в виде

$$(N_I u_I m_0 + N_{II} u_{II} m_0 - m_1 u_1)^2 = (N_I m_0 + N_{II} m_0 + \Delta)^2. \quad (7)$$

Здесь делается существенное приближение: квадрат полного импульса (квадрат массы) всех нерегистрируемых частиц, за исключением регистрируемой частицы 1, берется минимальным. Масса Δ обеспечивает сохранение барионного числа, странности и других квантовых чисел. Для антиядер и K^- -мезонов (случай рождения антиматерии [5]) $\Delta = m_1$, для ядерных фрагментов $\Delta = -m_1$. Для частиц, рождающихся без сопровождающих партнеров (мезоны, некоторые резонансы, струи и т. д.), $\Delta = 0$.

Для большого количества экспериментальных данных при энергиях $2 < (u_I u_{II}) \leq 50$ [5] дифференциальные сечения описываются с помощью параметра самоподобия

$$\frac{d^2\sigma}{m_T dm_T dy} = 2\pi C_1 A_I^{1/3+N_I/3} A_{II}^{1/3+N_{II}/3} \exp[-\Pi/C_2], \quad (8)$$

где $C_1 = 1,9 \cdot 10^4 \text{ мб} \cdot \text{ГэВ}^{-2} \cdot \text{с}^3 \cdot \text{ср}^{-1}$; $C_2 = 0,125 \pm 0,002$.

В широкой области значений переменных y , m_T , $(u_I u_{II})$ и для различных инклюзивных частиц сечение меняется на восемь порядков величины в зависимости от Π , меняющегося в пределах $0,5 \leq \Pi \leq 4$. Важно проверить этот результат в области $(u_I u_{II}) \gg 1$, чтобы доказать упомянутую выше интерпретацию величин N_I и N_{II} и приближение (7). В работе [7] найдено аналитическое выражение для параметра Π в области переменных, типичных для коллайдерных экспериментов.

3. ПРОЦЕССЫ С ВЫСОКОЙ МНОЖЕСТВЕННОСТЬЮ И ИХ СВЯЗЬ С РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКОЙ

Для релятивистской ядерной физики, изучающей взаимодействия многих объектов (нуклоны в ядрах) с рождением большого числа частиц в конечном состоянии, особенно возрастающим с увеличением энергии, является крайне важным понимание множественных процессов [8].

Множественные процессы представляют принципиальный интерес для проблем релятивистской ядерной физики как сами по себе, так и с точки зрения правильной оценки коллективных явлений в столкновении релятивистских ядер. Необходимо отметить, что процессы множественного рождения активно изучались теоретическими и экспериментальными группами ОИЯИ на основе исследований, проведенных на синхрофазотроне, ускорителе У-70 (Протвино), в CERN и других сотрудничающих с ОИЯИ научных центрах.

Результаты этих исследований нашли свое отражение в многочисленных оригинальных и обзорных работах (см., например, [9–13]).

В сотрудничестве с теоретиками ЛТФ ОИЯИ были обнаружены важные свойства множественных процессов:

- универсальность скейлинга по множественности для $\pi^- p^-$, $\pi^- n^-$, $\pi^- C^-$ и pp -взаимодействий;
- корреляции по множественности между нейтральными и заряженными пионами;
- ранний скейлинг в πp - и pp -взаимодействиях в центральной области;
- корреляции в двухчастичных инклюзивных процессах. Показано, что в полуинклюзивных процессах корреляции существенно слабее, чем в инклюзивных;
- доминирующая роль векторных мезонов в инклюзивных процессах при высоких энергиях;
- существование масштабной инвариантности для адрон-ядерных взаимодействий в области фрагментации ядра-мишени вплоть до энергии 40 ГэВ;
- наличие ряда механизмов множественного рождения частиц при высоких энергиях.

3.1. Рассмотрение множественных процессов в пространстве 4-скоростей. Весьма плодотворным явился анализ множественных процессов в пространстве четырехмерных скоростей [9]. Принцип ослабления корреляций*, введенный в этом пространстве, позволил определить понятие изолированной системы. Принцип основан на идее о том, что корреляции между удаленными частями системы практически исчезают, и распределение, характеризующее систему, факторизуется. Принцип ослабления корреляций реализуется при $b_{ik} \rightarrow \infty$, что соответствует малым расстояниям в обычном пространстве $|r_i - r_k| \rightarrow 0$.

Положим, что V_α — средняя точка системы (группы) сильновзаимодействующих частиц, а u_i — 4-скорость i -й частицы, принадлежащей системе, u_k — 4-скорость k -й частицы, не относящейся к системе. Тогда систему можно назвать изолированной, если $b_{\alpha i}$ для всех частиц системы много меньше $b_{\alpha k}$:

$$b_{\alpha k} \gg b_{\alpha i} \leq 1. \quad (9)$$

Согласно принципу ослабления корреляций взаимодействие и корреляции частиц, входящих в систему, с частицами, не входящими в систему, пренебрежимо малы. Важным примером изолированной системы являются

*В квантовой статистике этот принцип был предложен академиком Н. Н. Боголюбовым и развит в ряде теоретических исследований, в том числе теоретиками ОИЯИ.

струи адронов. Струя рассматривается как кластер адронов с малыми относительными скоростями b_{ik} . Ось струи будет определяться единичным вектором

$$V = \sum_i \frac{u_i}{\sqrt{(\sum u_i)^2}}, \quad (10)$$

$$V_0^2 - V^2 = 1.$$

Суммирование выполняется по номерам всех частиц, относящихся к выделенной группе частиц (кластеру).

Теперь можно записать 4-скорость частицы относительно оси струи в виде

$$b_k = -(V - u_k)^2. \quad (11)$$

Приведенное выше определение адронных струй дано в инвариантной форме и этим выгодно отличается от традиционных неинвариантных подходов.

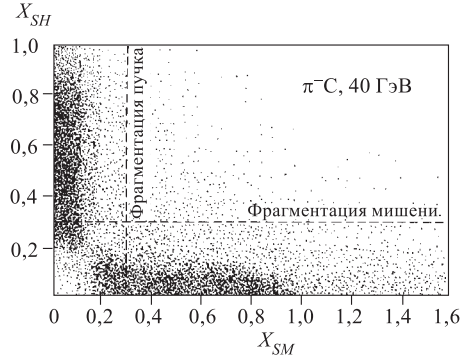


Рис. 1. Распределение вторичных пионов в $\pi^- C$ -взаимодействиях при энергии 40 ГэВ по переменным X_{SH} и X_{SM} (12), характеризующим долю 4-импульсов первичного пиона, уносимых струей

Для определения области образования струй можно использовать релятивистски-инвариантные переменные:

$$X_{SH} = \frac{M_{\alpha(\beta)} V_{\alpha(\beta)} u_{\Pi}}{m_I u_I u_{\Pi}}, \quad (12)$$

$$X_{SM} = \frac{M_{\alpha(\beta)} V_{\alpha(\beta)} u_I}{m_{\Pi} u_I u_{\Pi}},$$

где $M_{\alpha(\beta)}$ — эффективная масса струи α или β ; m_I — масса налетающей частицы; m_{Π} — масса мишени. При таком определении X_{SH} , X_{SM} будут иметь смысл доли 4-импульсов первичных частиц, уносимых струей.

На рис. 1 представлен пример распределения по этим параметрам вторичных пионов в $\pi^- C$ -взаимодействиях при энергии 40 ГэВ. Хорошо видно разделение событий на две области: область фрагментации мишени и область фрагментации пучка.

Распределения пионов по 4-скоростям относительно оси струи в адрон-адронных и адрон-ядерных столкновениях при высоких энергиях оказались удивительно универсальными. Они не зависят ни от энергии взаимодействия, ни от типа фрагментирующей системы (рис. 2).

Обнаруженная универсальность указывает на то, что адронизация кварковых систем определяется динамикой взаимодействия цветного заряда с КХД-вакуумом.

3.2. Процессы с очень большой множественностью. Особый интерес представляют процессы с так называемой очень большой множественностью. Физика этих процессов была разработана в ЛТФ ОИЯИ [14]. Эти исследования были выполнены, чтобы понять природу неупругих высокоэнергетических взаимодействий адронов, когда множественность рожденных адронов значительно превышает соответствующую среднюю множественность.

В настоящем разделе коротко описаны некоторые вопросы рождения частиц с очень большой множественностью при столкновении адронов высоких энергий.

Понимание этих процессов важно с точки зрения разработки научных программ для участия ОИЯИ в экспериментах на новых коллайдерах, таких как RHIC (BNL) и LHC (CERN) (см. разд. 5).

Некоторые проявления исследуемых закономерностей можно ожидать и при изучении событий с $n > \bar{n}^2$ в экспериментах на протонном синхротроне ИФВЭ (Протвино) и нуклотроне.

Основные особенности процессов с очень большой множественностью. Будем рассматривать процессы с множественностью

$$n \gg \bar{n}(s), \quad (13)$$

где $\bar{n}(s)$ — средняя множественность рожденных частиц [15]. Для простоты не будем различать частицы по заряду, массе и т. п. Для того чтобы избавиться от влияния границ фазового объема, положим

$$n \ll n_{\max} = \sqrt{s}/m, \quad (14)$$

где $m \approx 0,2$ ГэВ — типичная масса адрона. Более детальное определение области очень больших множественностей зависит от конкретных условий

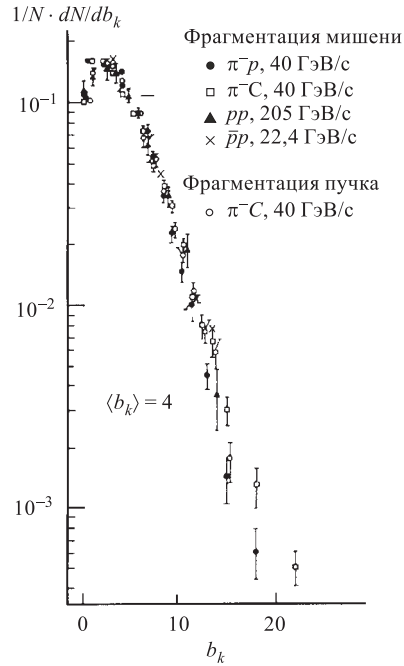


Рис. 2. Распределение вторичных пионов, рожденных в различных адрон-адронных и адрон-ядерных реакциях в области импульсов пучка $22,4 \div 205$ ГэВ/с по параметру b_k (4-скорость вторичных пионов относительно оси струи)

задачи. Введем коэффициент неупругости

$$k = 1 - \varepsilon_{\max}/E, \quad (15)$$

где ε_{\max} — энергия самой быстрой из рожденных частиц в данной системе отсчета и E — полная энергия в той же системе. Тогда область очень большой множественности можно также определить условием

$$1 - k \ll 1. \quad (16)$$

Фактически это означает, что в процессах с очень большой множественностью рождаются относительно медленные частицы и эффект лидирования подавлен.

Следует отметить, что неупругие сечения этих процессов крайне малы ($\leq 10^{-7}\sigma_{\text{tot}}$). Поэтому они могут наблюдаться лишь в том случае, если остальные каналы рождения частиц, которые доминируют при $n \sim \bar{n}(s)$, подавлены триггером с коэффициентом подавления $\sim 10^{-7}$ [16]. Большая множественность — плохо измеримый параметр, и он может быть определен только в результате дополнительной обработки экспериментальных данных. Поэтому результаты необходимо представлять в терминах, не зависящих от множественности, или следует указывать способ, как обойти трудность с измерением множественности. Например, условие (16) может быть положено в основу триггера по отбору событий с очень большой множественностью. Для такого триггера можно использовать калориметры, которыми оснащены большинство современных экспериментальных установок.

Таким образом, нас будут интересовать сильнонеупругие события. Определение (16) распространяется как на адрон-адронные, так и на адрон-ядерные и ядро-ядерные неупругие соударения. Хотя, в основном, здесь будут упомянуты адрон-адронные сильнонеупругие процессы, следует отметить, что некоторые многочастичные (коллективные) эффекты проявляются ярче в ядро-ядерных неупругих соударениях. Этот вопрос требует специального обсуждения.

Главные идеи, используемые при построении рассматриваемой модели процессов с очень большой множественностью, заключаются в следующем:

— энтропия может достигать для данной энергии своего максимума в области очень большой множественности,

— конечные состояния с очень большой множественностью должны быть близки к равновесному.

Чтобы иметь возможность получить модельно-независимые предсказания, был использован подход реально-временной теории S -матрицы при конечных температурах. Это позволило включить в рассматриваемую схему статистические методы и построить феноменологию [17]. Для описания области

очень больших множественностей удобно применить метод, близкий принципу ослабления корреляций Боголюбова.

Рождение частиц вообще, и в рассматриваемом случае в частности, включает две проблемы. Первая проблема связана с динамическим процессом деградации первичной энергии в энергию вторичных частиц, а вторая касается описания конечного состояния. Для второй проблемы существенны статистические методы.

Так как спектры частиц в процессах с очень большой множественностью мягкие, в них важно проявление коллективных эффектов [18].

Существующие модели мультипериферического типа не способны описать область процессов с очень большой множественностью [14], так как области их применимости ограничены, по крайней мере, $n < \bar{n}^2$.

Вопросы к эксперименту. Экспериментально, в первую очередь, желательно проверить выводы, следующие из описанного выше подхода.

1. С ростом множественности процесс должен стать «жестким». Это означает, что должно выполняться следующее неравенство для отношения среднего значения поперечного импульса q_T к среднему значению продольного импульса $q_{||}$:

$$R = q_T/q_{||} > \pi/4.$$

Напомним, что равенство соответствует изотропному распределению, а мультипериферическая кинематика предполагает, что $R < \pi/4$ [19].

2. С ростом множественности система должна «успокаиваться». Количественно это означает, что если энергетические многочастичные корреляторы малы:

$$|K_1(s, n)|^{2/l}/K_2(s, n) \ll 1, \text{ где } l = 3, 4, \dots,$$

то канонически сопряженная энергии величина, а именно температура, полностью описывает систему [20].

3. Предсказывается, что для химического потенциала $\mu(s, n)$ выполняется условие

$$\delta\mu(s, n)/\delta n \leq 0,$$

т. е. начальное состояние процесса рождения адронов становится неустойчивым относительно рождения адронов в области очень большой множественности.

Статус теоретических исследований процессов с очень большой множественностью. Теоретические исследования, проведенные в ЛТФ ОИЯИ, показали, что для процессов с очень большой множественностью:

- идеология главного логарифмического приближения неприемлема,
- реджевское описание имеет ограниченную область применимости,
- теоретико-полевые схемы вычисления не позволяют выйти за область квазиклассического приближения,

— процессы множественного рождения относятся к классу сильнонеравновесных процессов, для которых обычные представления канонического формализма неприемлемы.

По этим причинам был разработан новый подход в теории возмущений [21], который может быть использован для гораздо больших расстояний, на которых теория возмущения КХД в стандартном варианте неприменима. Этот подход не содержит расходимостей, по крайней мере, для векторных полей Янга–Миллса, не содержит так называемых «духов» Фаддеева–Попова и свободен от грибовских неоднозначностей, способен описывать наблюдаемые величины (сечения, корреляционные функции и т. д.). В настоящее время в ЛТФ ОИЯИ (совместно с ЛВЭ и ЛЯП) ведется работа по построению генератора событий, основанного на этом новом подходе.

4. ПОСЛЕДНИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ В ОБЛАСТИ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ СИНХРОФАЗОТРОН–НУКЛОТРОН

4.1. Развитие ускорительного комплекса. Ускорительный комплекс ЛВЭ является основным оборудованием для генерации протонов, поляризованных дейтронов (а также нейтронов и протонов) и многозарядных ионов в энергетической области до 6 ГэВ на нуклон. Общий вид ускорительного комплекса ЛВЭ ОИЯИ представлен на рис. 3.

Нуклотрон создан на основе уникальной технологии сверхпроводящих магнитных систем, которые были предложены и исследованы в лаборатории [22].

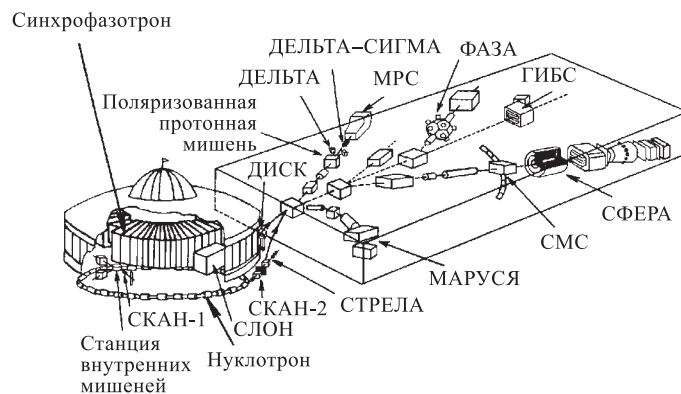


Рис. 3. Схема ускорительного комплекса Лаборатории высоких энергий ОИЯИ

Таблица 1. Некоторые параметры пучков синхрофазотрона и нуклотрона

Интенсивность, частиц за цикл				
Пучок	Синхро- фазотрон	Нуклотрон		
		Имеется	Планируется	
			После модернизации источников	С бустером
p	$4 \cdot 10^{12}$	$2 \cdot 10^{10}$	10^{11}	10^{13}
d	10^{12}	$2 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^{10}$	10^{13}
${}^4\text{He}$	$5 \cdot 10^{10}$	$8 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{12}$
${}^7\text{Li}$	$2 \cdot 10^9$		$2 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^{12}$
${}^{12}\text{C}$	10^9	10^8	$7 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{12}$
${}^{20}\text{Ne}$	10^4		10^8	$5 \cdot 10^9$
${}^{24}\text{Mg}$	$5 \cdot 10^6$	10^6	$3 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^{11}$
${}^{32}\text{S}$	10^3		10^8	10^{10}
${}^{40}\text{Ar}$			$3 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^9$
${}^{56}\text{Fe}$				10^{11}
${}^{84}\text{Kr}$		10^3	$2 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^8$
${}^{96}\text{Mo}$				10^{10}
${}^{131}\text{Xe}$			10^7	$2 \cdot 10^8$
${}^{181}\text{Ta}$				10^8
${}^{209}\text{Bi}$			$3 \cdot 10^6$	10^8
${}^{238}\text{U}$				10^8
n	10^{10}		10^8	10^9
$n \uparrow$	10^6		10^6	$5 \cdot 10^7$
$d \uparrow$	$2 \cdot 10^9$		10^9	$5 \cdot 10^{10}$
t	10^9		10^6	10^{10}
Энергия, $A \cdot \text{ГэВ}$	4,5	5,2	6,0	

Следует особо отметить, что нуклотрон и ряд экспериментальных установок для проведения на нем исследований были созданы в середине 1990-х годов в сложных экономических условиях, в которых находилась Россия и большинство других стран-участниц ОИЯИ. Это стало возможным благодаря богатым научным традициям ОИЯИ и самоотверженному труду инженеров, ученых и специалистов института. Большую работу проделали инженерные подразделения ЛВЭ (ускорительный, криогенный, электротехнологический, электротехнический отделы, конструкторское бюро и цех опытного произ-

водства и ряд других подразделений лаборатории). Значительный вклад в создание нуклотрона внесло Опытное производство и службы снабжения ОИЯИ. Постоянную поддержку этим работам оказывала дирекция ОИЯИ.

До 1999 г. для физических экспериментов использовался только внутренний пучок нуклотрона. В конце 1999 г. был получен выведенный пучок нуклотрона с помощью системы медленного вывода пучка, созданной на основе сверхпроводящих элементов. В настоящее время эксперименты на выведенном пучке нуклотрона вступили в фазу стабильной работы. Некоторые параметры пучков синхрофазотрона и нуклотрона приведены в табл. 1.

Основные направления развития нуклотронного комплекса в течение ближайших лет следующие:

- завершение работ по транспортировке выведенного пучка нуклотрона в большой экспериментальный зал к экспериментальным установкам,
- развитие инжекционного комплекса, включая развитие источников ионов, частичную реконструкцию линейного ускорителя и разработку бустера,
- развитие криогенных систем питания, диагностики и управления.

В ЛВЭ подготовлена программа первых экспериментов на выведенном пучке нуклотрона и разрабатывается программа долгосрочных исследований. В первых сеансах на нуклотроне с выведенным пучком для физических исследований были использованы две установки: СТРЕЛА и СКАН-2. Одновременно продолжают начатые ранее эксперименты на внутреннем пучке нуклотрона.

4.2. Обзор исследований, выполненных на синхрофазотроне, и планы исследований на нуклотроне. В настоящее время на ускорительном комплексе ЛВЭ действуют или подготовлены к физическим исследованиям 12 физических установок. Это такие установки, как СФЕРА, ГИБС, ФАЗА, ДЕЛЬТА-СИГМА, ДЕЛЬТА, ДИСК, СМС, МАРУСЯ, СКАН-1, СКАН-2, СТРЕЛА, СЛОН. Имеется также план использования спектрометра МРС (MRS) из Лос-Аламоса (США) на нашем ускорительном комплексе.

В этом разделе представлен краткий обзор последних результатов, полученных на некоторых действующих установках на синхрофазотроне и планы дальнейших исследований с учетом их постепенного перехода на нуклотрон. Информацию о более ранних работах, выполненных на ускорительном комплексе ЛВЭ ОИЯИ, можно найти в обзоре [23].

4.2.1. Эксперименты с релятивистскими ядрами. Проект СФЕРА. Главной целью проекта является исследование фрагментации релятивистских ядер в геометрии, близкой к 4π .

Проект СФЕРА объединяет большую коллаборацию физиков из ОИЯИ и многих стран-участниц ОИЯИ, таких как Армения (Ереванский физический институт), Азербайджан (Институт физики), Белоруссия (Институт физики), Болгария (Институт ядерных исследований и ядерной энергетики, Вычислительный центр, База развития и внедрения по физике), Казахстан (Институт

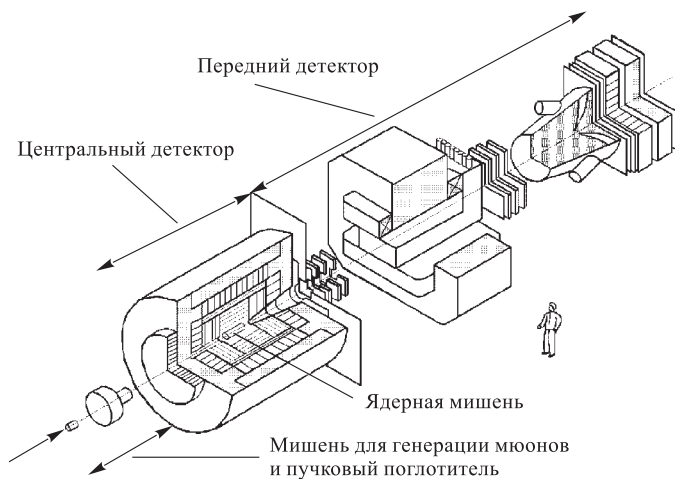


Рис. 4. Общий вид экспериментальной установки СФЕРА

ядерной физики), Монголия (Институт физики и технологии), Польша (Университет, Варшава; Университет, Лодзь; Институт ядерной физики), Румыния (Институт исследования и развития физики и ядерной технологии, Институт оптоэлектроники), Россия (ФИАН, ИЯИ, РНЦ «Курчатовский институт», МГУ), Словакия (Институт физики), Украина (Харьковский государственный университет, Институт теоретической физики), Узбекистан (Институт ядерной физики), Чешская Республика (Институт ядерной физики), а также из Японии (Университет, Нагоя; Университет, Миядзаки).

Общий вид установки СФЕРА приведен на рис. 4. Функционально эта установка состоит из трех частей [24].

1. Центральный детектор, предназначенный для идентификации продуктов фрагментации ядра-мишени. Он включает в себя сверхпроводящий магнит, в центре которого находится ядерная мишень, окруженная координатными детекторами (многослойная цилиндрическая дрейфовая камера), электромагнитными калориметрами и сцинтилляционными счетчиками.

2. Передний детектор, перекрывающий область фрагментации налетающего ядра. Передний детектор состоит из дипольного магнита, спереди и сзади которого расположены сцинтилляционные годоскопы и пропорциональные камеры. Для идентификации частиц используется многоканальный газовый черенковский счетчик. В конце установки расположен электромагнитный калориметр и система регистрации мюонов.

3. Мишень для генерации мюонов и адронный поглотитель для мюонных экспериментов.

На установке СФЕРА был получен ряд новых результатов на синхротронном ускорителе.

1. Наблюдено рождение кумулятивных мюонных пар и впервые оценено сечение этого процесса [25].

2. Исследовано поведение спектров кумулятивных π^- -мезонов в зависимости от множественности сопровождающих заряженных частиц, образующихся при взаимодействии релятивистских дейтронов с углеродной мишенью. Оказалось, что форма спектров пионов слабо зависит от множественности сопровождающих заряженных частиц [26].

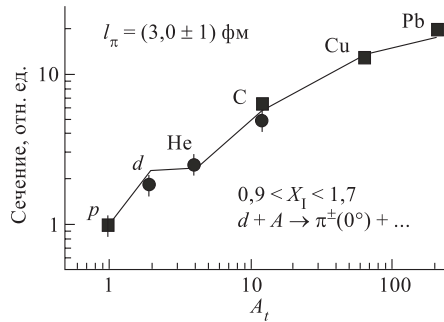


Рис. 5. Сечение рождения кумулятивных пионов как функция атомного номера ядра-мишени A_t

Эта зависимость была описана с учетом взаимодействия рожденных пионов с нуклонами в ядре-мишени. Лучшее описание данных получено в предположении, что длина формирования пиона равна $l_\pi = (3 \pm 1)$ фм [27].

Программа исследований на установке СФЕРА на нуклотроне включает следующие задачи.

1. Изучение множественного рождения кумулятивных частиц в 4π -геометрии, при этом особое внимание будет уделено:

- рождению векторных мезонов в кумулятивной области,
- кварковым экзотическим состояниям,
- динамическим корреляциям вторичных частиц.

2. Исследование ядерных возбуждений в зарядово-обменных реакциях (совместно с коллаборацией ГИБС).

3. Исследование гиперядер (совместно с коллаборацией ГИБС):

- измерение времени жизни гиперядер ${}^3\text{H}_\Lambda$, ${}^4\text{H}_\Lambda$, ${}^6\text{He}_\Lambda$,
- измерение энергии связи гиперядер ${}^3\text{H}_\Lambda$ и ${}^6\text{He}_\Lambda$ и изучение их кулоновской диссоциации.

4. Исследование образования η -ядер.

5. Исследование тензорной анализирующей способности для рождения кумулятивных адронов (см. п. 4.2.2).

3. Измерены инклюзивные спектры и зависимости сечения от номера ядра-мишени A_t для реакции фрагментации ускоренных дейтронов в кумулятивные π^- -мезоны. Показано, что эти спектры подобны для всех использованных мишеней (H, C, Cu и Pb). Зависимость сечения от атомного номера ядра-мишени оказалась периферической для $A_t \geq 12$ и более крутой в районе водородной мишени (рис. 5). Эта зависимость была описана с учетом взаимодействия рожденных пионов с нуклонами в ядре-мишени. Лучшее описание

Проект ГИБС. Установка ГИБС является магнитным спектрометром на основе стримерной камеры с размерами $1,9 \times 0,8 \times 0,6$ м.

В коллаборацию ГИБС наряду с учеными из ОИЯИ входят физики из Болгарии (Институт ядерных исследований и ядерной энергетики), Казахстана (Физико-технический институт), Польши (Радиотехнический институт, Варшава; Университет, Лодзь), России (ФИАН, Санкт-Петербургский государственный университет), Украины (Институт ядерных исследований).

На синхрофазотроне коллаборацией ГИБС были получены новые важные результаты. Один из них — это наблюдение расширения объема, из которого излучаются узкие пионные пары в Mg–Mg-взаимодействиях. Профессор М. И. Подгорецкий предложил метод измерения скорости (и размеров) источника интерференционным методом. Этот метод позволяет получить прямое экспериментальное доказательство нестационарности объема генерации пионов. Это доказательство было впервые получено на установке ГИБС в ЛВЭ для центральных Mg–Mg-взаимодействий при импульсе 4,4 ГэВ/с [28]. Из экспериментальных данных видно, что пионы из различных областей кинематического спектра испускаются различными элементами источника, движущимися относительно друг друга (рис. 6).

На установке ГИБС были также выполнены исследования пионных спектров в зарядово-обменной реакции (t , ${}^3\text{He}$) на мишенях из углерода и магния с использованием вторичного тритиевого пучка синхрофазотрона с импульсами от 2,2 до 3,0 ГэВ/с на нуклон [28]. Экспериментальные спектры продольных импульсов пионов сравнивались с расчетными спектрами для событий с одним вторичным пионом. Из этого сравнения следует, что квазисвободное возбуждение дельта-минус-резонанса в ядре-мишени объясняет только 60–70 % событий. Импульс пионов в оставшейся доле таких событий значительно выше, чем импульс рожденных пионов при возбуждении дельта-резонанса. Был проанализирован возможный вклад от других процессов. Данные указывают на значительную роль когерентного пионного рождения через $N(1440)$ или $N(1520)$ (или их совместный вклад) в ядре-мишени, в то время как часть пионного спектра может быть объяснена возбуждением в налетающем ядре.

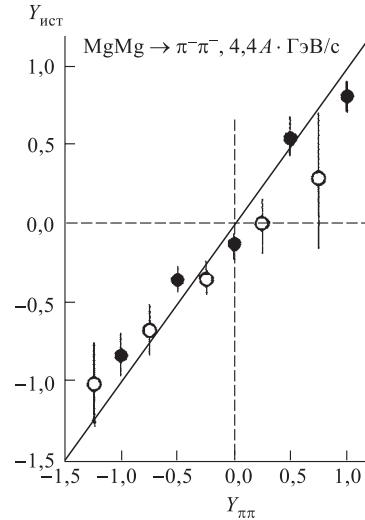


Рис. 6. Корреляция быстрой элемента объема $Y_{\text{ист}}$, излучающего пионы, и быстрой пионных пар $Y_{\pi\pi}$ в продольном (светлые кружки) и поперечном (черные кружки) направлении относительно оси реакции в системе покоя Mg–Mg

Предложено усовершенствовать спектрометр ГИБС для дальнейших экспериментов на нуклотроне. Спектрометр оборудован новой бесфильмовой системой регистрации информации со стримерной камеры, а также пропорциональными камерами для измерения импульсов ${}^3\text{He}$. Стримерная камера будет использоваться в качестве вершинного детектора [30].

На установке ГИБС на пучках синхрофазотрона исследовались рождение и распады гиперядер [31]. Была разработана оригинальная методика выделения редких событий образования релятивистских гиперядер. В серии экспериментов впервые с надежной идентификацией были зарегистрированы релятивистские гиперядра водорода (${}^3\text{H}_\Lambda$ и ${}^4\text{H}_\Lambda$), измерены сечения их образования при двух энергиях и с наилучшей на момент публикации результатов точностью определены их времена жизни. Принципиальной особенностью использованного метода явилось то обстоятельство, что исследования проводились с релятивистскими гиперядрами, образующимися при взаимодействии релятивистских ионов с ядрами-мишенями и имеющими пробег до распада десятки сантиметров. Такой метод открывает принципиально новые возможности в исследованиях по физике гиперядер. Ключевым моментом при постановке эксперимента оказалось создание высокоэффективной триггерной системы быстрого отбора событий с высоким коэффициентом подавления фоновых событий, имитирующих реакцию образования и распада гиперядер.

По аналогии с задачей об ионизации атомов при прохождении релятивистских частиц через вещество проведено теоретическое исследование зависимости эффективного сечения кулоновской диссоциации ядер и гиперядер от их энергии и внутренней структуры [32]. Было показано, что для слабосвязанных ядер и гиперядер сечение кулоновской диссоциации приблизительно обратно пропорционально энергии связи. Таким образом, изучение процесса расщепления релятивистского гиперядра ${}^3\text{H}_\Lambda$ в кулоновском поле тяжелых ядер-мишеней может быть использовано для экспериментального определения энергии связи Λ -частиц в гиперядре.

Эксперименты на синхрофазотроне по изучению гиперядер были приостановлены из-за низкой скорости набора данных. Пучки нового ускорителя — нуклотрона позволяют увеличить скорость набора данных в 10 или более раз. Дополнительное улучшение на фактор 10 будет получено с использованием пропорциональных камер вместо стримерной камеры. Поэтому на нуклотроне время жизни гиперядер может быть измерено с точностью 3–5 пс, что значительно улучшит результаты предыдущих экспериментов. В предлагаемом эксперименте будут образовываться гиперядра с импульсом в несколько ГэВ/с [33]. Это означает, что гиперядра будут распадаться на расстояниях 20–30 см от точки рождения. Таким образом, можно исследовать взаимодействия гиперядер с различными поглотителями. В случае гипертритона этот метод позволит оценить энергию связи Λ -частицы.

Проект ФАЗА. Целью проекта является исследование механизма ядерной мультифрагментации, которая имеет место в ядро-ядерных взаимодействиях при промежуточных и высоких энергиях.

В работе участвуют ученые из ОИЯИ, Германии (Институт ядерной физики и Технический университет, Дармштадт), Польши (Институт ядерной физики), России (РНЦ «Курчатовский институт», ИЯИ), США (Университет, Иова).

На 4π -спектрометре ФАЗА на синхрофазотроне был выполнен ряд экспериментов с пучками протонов с энергией 2–8 ГэВ, альфа-частиц с энергией 14,6 ГэВ и углерода с энергией 22,4 ГэВ, которые взаимодействовали с мишенью из золота. Один из главных результатов, полученных в этих экспериментах, состоит в следующем. Из энергетических спектров фрагментов и корреляции относительных скоростей найдено, что фрагменты испускаются из расширяющегося ядра, плотность которого при этом составляет примерно $1/3$ нормальной ядерной плотности [34]. Этот эффект можно интерпретировать как наблюдение фазового перехода в ядерной материи типа газ–жидкость (рис. 7).

Для проведения измерений на нуклотроне установка ФАЗА дополнена детектором легких заряженных частиц в переднем направлении, который даст возможность отбирать события по прицельному параметру. Кроме этого под-

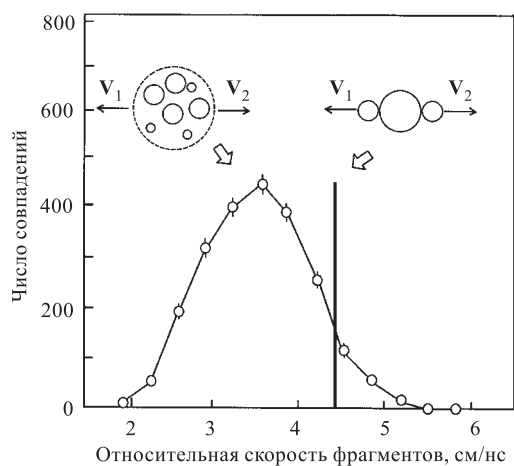


Рис. 7. Распределение относительных скоростей совпадающих фрагментов в $\alpha + Au$ -взаимодействиях, измеренное при углах корреляции $150^\circ \div 180^\circ$. Вертикальная линия показывает ожидаемое положение максимума для испускания фрагментов с ядерной поверхности. Экспериментальное распределение смещено в сторону меньших скоростей, соответствующих объемному распределению для расширяющейся системы

готовлена новая детектирующая система на основе $25 (\Delta E - E)$ -счетчиков, которая позволит лучше измерять угловые корреляции фрагментов. Эта система будет использована в триггере установки. При этом эффективность триггера будет повышена в 6 раз.

Программа исследований коллаборации ФАЗА на нуклотроне направлена на дальнейшее исследование механизма испускания фрагментов в несимметричных ядро-ядерных столкновениях. Наиболее важные ожидаемые результаты:

- новые данные по зависимости времени распада системы от энергии возбуждения и массы налетающего ядра,
- данные по эволюции механизма распада от чисто термальной мультифрагментации к более сложной с ростом массы налетающего ядра.

Проект МАРУСЯ. Этот проект имеет целью исследование переходного режима (переход от нуклонных к кварк-глюонным степеням свободы в ядрах) в релятивистских ядерных столкновениях.

Основными участниками проекта являются ОИЯИ, Институт ядерных исследований (Украина) и Институт ядерной физики (Чешская Республика).

Установка в настоящее время полностью готова к работе на выведенном пучке нуклотрона (рис. 8).

Одним из перспективных направлений исследований природы конфайнмента, происхождения спина нуклона, структуры вакуума в КХД является изучение явлений в переходной области энергий (3–4 ГэВ на нуклон).

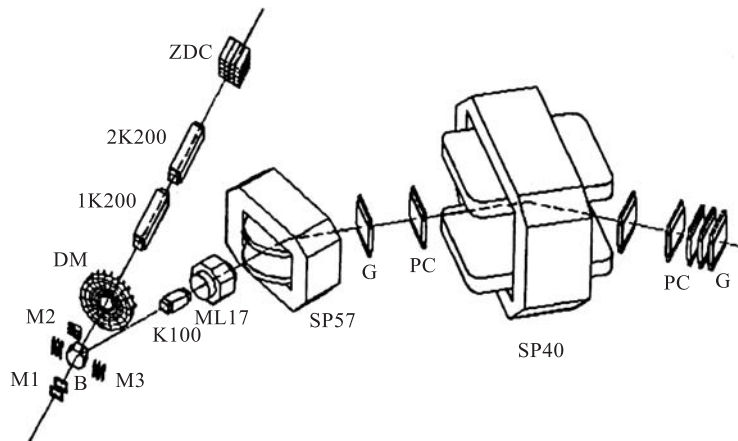


Рис. 8. Схема установки МАРУСЯ: M1, M2 — система мониторингования пучка; K100, ML17 — магнитные линзы; SP57, SP40 — дипольные магниты; B — система окружения мишени; PC — пропорциональные камеры; G — сцинтилляционный годоскоп; DM — детектор множественности; ZDC — адронный калориметр

Асимптотический характер поведения сечений образования кумулятивных частиц, аномально большой выход странных частиц и антипротонов, усиленные A -зависимости наблюдались в широком диапазоне энергий от 1 до 200 ГэВ на нуклон на синхрофазотроне ОИЯИ, «Bevalak» (Беркли), ускорителе ИТЭФ (Москва), AGS (Брукхейвен), SPS (ЦЕРН) и др.

В проекте предлагается проводить исследования редких подпороговых и кумулятивных процессов, в том числе для поляризованных сталкивающихся объектов, и разделять события по степени центральности на основе измерения множественности вторичных частиц.

Планируется изучение выхода антипротонов и отрицательных каонов, интерес к которым вызван их образованием из «морских» кварков.

Рождение антипротонов и антидейтронов изучалось на ускорителе AGS при энергии 13,6 ГэВ на нуклон и на SPS при 158 ГэВ на нуклон. При отборе событий по степени центральности наблюдается большое различие в сечениях образования антиядер в ядро-ядерных взаимодействиях. В переходной области энергий такие данные отсутствуют и их получение также планируется на установке МАРУСЯ.

Проект СМС. Проект СМС (сцинтилляционный магнитный спектрометр МГУ) посвящен исследованию лидирующих частиц в протон-ядерных взаимодействиях. Установка создана группой сотрудников Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. В планы исследований входит выяснение механизмов сильного взаимодействия при энергиях до 10 ГэВ. Экспериментальная установка представляет собой одноплечевой магнитный спектрометр с изменяемой геометрией спектрометрической части [35].

Основными элементами спектрометра являются:

- система сцинтилляционных годоскопов с координатным разрешением около 1 мм, регистрирующая треки налетающих адронов и вторичных лидирующих частиц,
- комплекс сцинтилляционных и твердотельных черенковских детекторов для мониторинга пучка,
- система триггера установки, использующая твердотельные черенковские детекторы и сэндвичи из свинца и сцинтиллятора, которые позволяют отбирать события с данной кинематикой,
- передвижной анализирующий магнит,
- широкоапертурный газовый черенковский счетчик для идентификации лидирующей частицы.

Лидирующие адроны L регистрируются в широком угле испускания и в большом диапазоне импульсов в реакциях $hA \rightarrow L + X$, где X обозначает некоторое конечное состояние с данной кинематической конфигурацией, эквивалентной определенной эффективной массе.

Установка СМС используется для решения двух основных задач.

1. Исследование пространственно-временной структуры адронного взаимодействия.

При решении этой задачи получены результаты для процесса взаимодействия протонов с импульсом 9 ГэВ/с с ядрами Н, С, Al, Cu и Pb, которые могут быть суммированы следующим образом [36]:

- переустройство кварковой структуры в существенно неупругих «мягких» процессах не вызывает наблюдаемых эффектов на уровне свойств частиц, по крайней мере, во временном масштабе $t \geq 0,01 \hbar/m_\pi c^2$,
- некогерентная фрагментация протона на ядрах, вероятно, происходит через промежуточное барионное состояние, которое поглощается в ядерной материи подобно обычному протону и распадается на адроны вне ядрамишени.

В рамках этого пункта дальнейшие исследования на установке СМС будут сфокусированы на проблемах, которые решаются при обработке уже полученных экспериментальных данных:

- выяснение механизмов рождения для лидирующих π -мезонов и протонов в pA - и πA -взаимодействиях: происходит прямое рождение или рождение через промежуточное (барионное или мезонное) состояние?
- какова природа этого промежуточного состояния: резонансная или нерезонансная?

2. Измерение анализирующей способности квазиупругого рассеяния поляризованных протонов на ядрах.

В рамках программы исследования взаимодействий поляризованных протонов с ядрами предлагается измерить односпиновую асимметрию рассеяния поляризованных протонов на внутриядерных нуклонах для сравнения с аналогичным рассеянием на свободных нуклонах в области энергий $1 \div 4$ ГэВ. Главной измеряемой характеристикой является векторная анализирующая способность реакции рассеяния поляризованных протонов на углеродной мишени. Существующие экспериментальные данные (включая полученные ранее на установке СМС [37]) указывают на значительное уменьшение анализирующей способности для рассеяния на внутриядерных нуклонах по сравнению с рассеянием на свободных нуклонах и сильную зависимость этого эффекта от энергии.

Предлагаемый эксперимент на установке СМС подтвердит или опровергнет предполагаемое явление и ответит на вопрос о его физической природе, если оно будет подтверждено.

Исследования в пучках квазимонохроматических нейтронов. После ускорения на синхрофазотроне ЛВЭ дейтронов был создан канал квазимонохроматических нейтронов на однометровую жидководородную камеру ЛВЭ. Для получения пучка нейтронов использовалась реакция стриппинга дейтронов на алюминиевой мишени, размещенной внутри ускорителя [37]. Канал имел

уникальные характеристики ($\Delta P_n/P_n = 2,5\%$, $\Delta\Omega_n = 10^{-7}$ ср, легко регулируемая энергия пучка), что позволило с высокой степенью надежности выделять эксклюзивные каналы реакций np -взаимодействий и изучать их характеристики. Всего проведено 10 сеансов облучения камеры нейтронами, получен богатый (около 1,5 млн событий) статистический материал, на основе которого создается электронный банк данных np -взаимодействий в диапазоне первичных энергий от 0,6 до 5 ГэВ [39].

К настоящему времени получены следующие физические результаты:

1. В зависимости от энергии определены сечения 13 каналов реакций np -взаимодействий, в том числе сечение перезарядки $np \rightarrow pn$, в диапазоне импульсов падающих нейтронов от 1,25 до 5,20 ГэВ/с [40].

2. Обнаружен ряд экзотических резонансов в системах $p\pi^+\pi^+$ ($I = 5/2$) [41], $p\pi^-\pi^-$ ($I = 2$) [42], $\pi^-\pi^-$ ($I = 2$) [43], $pp\pi^+$ ($B = 2$, $I = 2$) [44]. Анализ показывает, что все эти эффекты — результат взаимодействий на больших расстояниях.

3. Обнаружен ряд узких резонансных эффектов в системе $\pi^+\pi^-$ в диапазоне эффективных масс от 0,280 до 1,235 ГэВ/с². Некоторые из этих резонансов могут быть отождествлены с σ -мезонами $0^+(0^{++})$, что подтверждается характеристиками резонансов, определенными авторами. Ширины резонансов не противоречат гипотезе о том, что они содержат большую глюонную компоненту.

Данные о резонансе с массой 0,754 ГэВ/с² занесены в сборник свойств частиц (2000 г.) [45].

На рис. 9 представлено распределение эффективных масс $\pi^+\pi^-$ -комбинаций из реакции $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$ при $P_n = 5,20$ ГэВ/с², взятое из работы [46]. Эффект при массе $M = 0,754$ ГэВ/с² превышает фон на 7,8 стандартных отклонений.

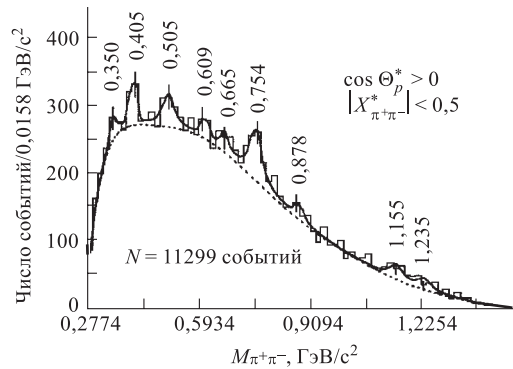


Рис. 9. Распределение эффективных масс $\pi^+\pi^-$ -комбинаций из реакции $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$ при $P_n = 5,20$ ГэВ/с² [46]

Исследования с помощью фотоэмульсионных детекторов с высоким разрешением. Физическая цель исследований состоит в изучении ядерных взаимодействий на пучках ядер ${}^1\text{H}$, ${}^4\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{22}\text{Ne}$, ${}^{24}\text{Mg}$, ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{32}\text{S}$, ${}^{84}\text{Kr}$, ${}^{197}\text{Au}$, ${}^{208}\text{Pb}$, ${}^{209}\text{Bi}$ при энергиях $1 \div 200$ ГэВ. Все измерения проводятся одним методом с помощью фотоэмульсионных детекторов с высоким угловым разрешением в Дубне и на других ускорителях в рамках международной коллаборации ЕМУ01.

В исследованиях, кроме ОИЯИ, участвует большое число различных научных центров, входящих в международную коллаборацию ЕМУ01, из Австралии (Школа физики и Университет, Сидней), Армении (Ереванский физический институт), Германии (Марбургский университет), Индии (Университеты в Джапуре и Джамму), Китая (Институт физики высоких энергий, Шанхайский университет, Китайский университет науки и технологий), Кореи (Сеульский университет), России (ФИАН, Москва; Радиевый институт им. В. Г. Хлопина, С.-Петербург), Румынии (Институт космических исследований), Словакии (Технический университет и Институт экспериментальной физики в Кошице), США (Вашингтонский университет), Узбекистана (Институт ядерной физики и Физико-технический институт), Швеции (Университет, Лунд).

Кроме того, в этих работах участвуют научные центры из Египта (Каирский университет), Польши (Институт ядерных проблем и Институт ядерной физики), России (ИТЭФ, Санкт-Петербургский политехнический институт), Таджикистана (Таджикский государственный университет).

В области энергий в несколько ГэВ облучения эмульсионных детекторов производились на синхрофазотроне ЛВЭ; начаты первые облучения на выведенных пучках нуклотрона. Главная задача исследований состоит в изучении зависимости характеристик множественного рождения частиц, явления фрагментации сталкивающихся ядер, проявлений их структуры и коллективных эффектов от массы, энергии и параметра удара налетающих частиц. Весьма интересным является изучение структуры легких ядер.

На синхрофазотроне с помощью фотоэмульсионной методики был обнаружен ряд интересных явлений, к которым можно отнести, например, эффект полного разрушения ядер [47]. Зависимость количества событий с полным разрушением ядра от энергии и атомного номера сталкивающихся ядер проанализирована, например, в работе [48]. Оказалось, что в области энергий $10 \div 400$ ГэВ доля таких событий не превышает 10–13 %.

Впервые с помощью эмульсий была изучена когерентная диссоциация ядер кислорода в альфа-частицы при $4,5 \text{ A} \cdot \text{ГэВ}/\text{с}$.

Эмульсионную методику планируется использовать на нуклотроне. Кроме традиционного способа облучения эмульсий, предполагается использовать установку СЛОН, которая позволяет получить импульсное магнитное поле в объеме эмульсии до 60 Тл.

Результаты эксперимента КАСПИЙ. Длительное время на синхрофазотроне действовала установка КАСПИЙ (ИЯИ, Москва) по изучению рождения пионов, каонов и антипротонов в реакциях взаимодействия pA , dA , CA и πA . Сравнение полученных данных для C - и d -пучков показывает сильное усиление эффекта рождения каонов по сравнению с рождением пионов.

Впервые было исследовано подпороговое рождение антипротонов в AA -столкновениях и обнаружено достаточно сильное усиление выхода антипротонов. Показано, что сечение рождения в dA - и AA -столкновениях для пионов, каонов и антипротонов может быть выражено универсальной функцией масштабного кварк-партонового параметра. Эффект усиления выхода интерпретируется как указание на коллективные партоновые эффекты [48–56].

В пионном пучке с импульсом до 1,2 ГэВ/с были исследованы рождение протонов и пионная реакция зарядового обмена [58]. В спектрах π^0 -мезонов в реакции (π^- , π^0) был обнаружен пик, соответствующий проявлению дельта-изобары в ядрах, однако оказалось, что он лежит ниже по энергии, чем это имеет место для реакции со свободным протоном [59, 60].

4.2.2. *Эксперименты на поляризованных пучках.* Изучение поляризационных эффектов в столкновениях релятивистских ядер на установке СФЕРА. Главной целью этой программы является изучение спиновой структуры дейтрона на коротких межнуклонных расстояниях с использованием адронных пробников и исследование спиновых эффектов в адронном рассеянии в области энергий несколько ГэВ. Эта программа ориентируется на использование дейтронных пучков с импульсом до 9 ГэВ/с, которые имеются на ускорительном комплексе ЛВЭ ОИЯИ.

Эти пучки до сих пор имеют самую высокую в мире энергию для поляризованных дейтронов.

Проявления ненуклонных степеней свободы в ядрах следует ожидать тогда, когда расстояния между нуклонами становятся сравнимыми с их размерами (≤ 1 фм). В теоретическом плане вопрос описания состояния двух нуклонов на малых расстояниях связан с такими не до конца решенными вопросами, как проблема конфайнмента (КХД больших расстояний) и связанные состояния частиц с релятивистскими импульсами. Из-за нетривиальной спиновой структуры дейтрона (примесь D -волны) эксперименты с поляризованными дейтронами предоставляют богатые возможности по изучению указанных эффектов. Отклонение экспериментальных данных от расчетов может быть связано с проявлением ненуклонных степеней свободы на малых расстояниях. Тензорная анализирующая способность A_{yy} для кумулятивного пионного рождения под разными углами $d \uparrow + {}^{12}\text{C} \rightarrow \pi^\pm (0, 135, 178 \text{ мрад}) + \dots$ была измерена с пучком тензорно-поляризованных дейтронов синхрофазотрона на установке СФЕРА. Эксперимент фокусировался на кумулятивном образовании пионов, которые рождаются вне кинематики нуклон-нуклонных столкновений (рис. 10).

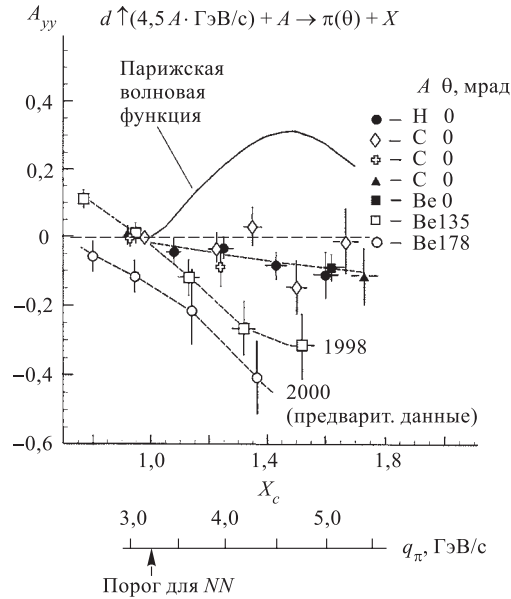


Рис. 10. Зависимость A_{yy} от кумулятивного числа X_c (или импульса пиона q_π) для реакции $d \uparrow + A \rightarrow \pi^-(0, 135, 178 \text{ мрад}) + \dots$

Измеренные величины A_{yy} не согласуются с результатами наших вычислений в рамках импульсного приближения, которые основаны на $NN \rightarrow \pi NN$ -взаимодействии и учитывают внутреннее движение нуклонов в дейтроне [61]. Наблюдается даже противоположный знак эффекта по сравнению с предсказанным.

Таким образом, для больших внутренних импульсов ($k \geq 0,5 \text{ ГэВ/с}$) или малых расстояний ($l \leq 0,4 \text{ фм}$), по-видимому, следует учитывать ненуклонные степени свободы в дейтроне.

Для понимания ненуклонной структуры следует продолжить измерения и получить также данные при фрагментации дейтронов в адроны с отличными от пиона квантовыми числами, например, в K^- -мезоны, состоящие из «морских» кварков.

Исследования будут продолжены на нуклотроне после получения выведенного поляризованного пучка дейтронов достаточной интенсивности.

Проект ДЕЛЬТА–СИГМА. Главная цель проекта состоит в изучении нуклон-нуклонных взаимодействий с использованием вторичного пучка поляризованных нейтронов высокой энергии (3,7 ГэВ), который имеется в настоящее время только на ускорительном комплексе ЛВЭ ОИЯИ.

В реализации проекта участвуют ОИЯИ и научные центры из Болгарии (Институт ядерных исследований и ядерной энергетики), Чешской Республики (Институт ядерных исследований), России (РНЦ «Курчатовский институт», ИЯИ, Петербургский институт ядерной физики), Украины (Харьковский физико-технический институт), Франции (DAPNIA, Сакле).

В проекте предлагается провести детальные измерения энергетической зависимости величин $\Delta\sigma_L(np)$ и $\Delta\sigma_T(np)$, которые представляют собой разности полных np -сечений для антипараллельной и параллельной ориентации спинов нейтронов пучка и протонов мишени, поляризованных в продольном (L) и поперечном (T) направлениях.

На установке ДЕЛЬТА–СИГМА были получены новые результаты для np -спин-зависимой разницы полных сечений $\Delta\sigma_L(np)$ при кинетической энергии нейтронного пучка 1,59, 1,79 и 2,20 ГэВ (рис. 11).

Квазимонохроматический пучок нейтронов получался из ускоренных и выведенных векторно-поляризованных дейтронов синхрофазотрона. Нейтроны проходили через большую поляризованную протонную мишень. Эта американо-французская протонная поляризованная мишень (Аргонн–Сакле) была специально доставлена в Дубну для проведения измерений. После ее реконструкции были начаты эксперименты с пучком поляризованных нейтронов.

Величины $\Delta\sigma_L(np)$ измерялись как разность между полными np -сечениями для параллельных и антипараллельных поляризаций пучка и мишени, ориентированных вдоль импульса пучка. Наблюдался быстрый спад $\Delta\sigma_L(np)$ с ростом энергии выше 1,1 ГэВ [62].

При энергиях ниже 2 ГэВ обычная теория мезонного обмена NN -рассеяния дает энергетическую зависимость для $\Delta\sigma_L(np)$, как это показано на рис. 11. Можно видеть, что эта модель обеспечивает только качественное описание данных при низких энергиях и сильно расходится с данными при

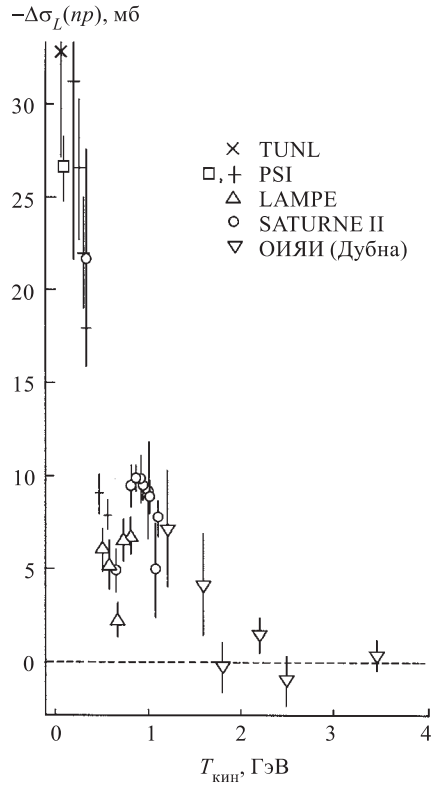


Рис. 11. Энергетическая зависимость $\Delta\sigma_L(np)$

энергии выше 1 ГэВ. В [63, 64] обсуждается модель непертурбативного взаимодействия между кварками, индуцированного сильными флуктуациями вакуумных глюонных полей, т. е. инстантонами. Однако вклад, зависящий от энергии, в $\Delta\sigma_L(np)$ был оценен только на качественном уровне.

Исследуемая энергетическая область соответствует возможной генерации тяжелых дибарионов, и их возможное проявление в энергетической зависимости различных наблюдаемых величин в pp - и np -взаимодействиях также предсказывается различными моделями. Для проверки этих предсказаний требуется проведение дальнейших измерений.

Чтобы завершить измерения энергетической зависимости $\Delta\sigma_L(np)$, необходимо измерить эту величину при 1,4; 1,6; 2,0 и 3,17 ГэВ. Также необходимо измерить энергетическую зависимость $\Delta\sigma_T(np)$ с поперечной поляризацией пучка нейтронов и протонов мишени. Эти эксперименты будут продолжены на нуклотроне.

Проект МРС. Участниками проекта являются сотрудники из ОИЯИ, Болгарии (Институт ядерных исследований и ядерной энергетики), России (ИЯИ), США (Лос-Аламосская национальная лаборатория; Колледж «Вильям и Мэри», Вильямсбург; Университет, Норфолк; Университет, Колорадо), Украины (Харьковский физико-технический институт).

Планируется использовать спектрометр МРС (спектрометр среднего разрешения) из Лос-Аламоса (США) на ускорительном комплексе ЛВЭ ОИЯИ. Это стало возможным после подписания соглашения о научном сотрудничестве между Лос-Аламосской национальной лабораторией, ИЯИ и ОИЯИ. Использование этого спектрометра совместно с поляризованной протонной мишенью (Аргонн–Сакле–ОИЯИ) открывает уникальные возможности для изучения спиновых эффектов в энергетической области до 6 ГэВ на нуклон.

Магнитная система спектрометра МРС состоит из трех основных элементов: квадрупольный фокусирующий магнит, дипольный магнит, отклоняющий центральный пучок вверх на 33° , и второй дипольный магнит, отклоняющий центральный пучок вниз на 15° . Для регистрации координат частиц используется система пропорциональных камер. Наличие квадрупольного фокусирующего магнита обеспечивает большой горизонтальный аксептанс установки ± 60 мрад.

Исследовательская программа включает изучение спиновых эффектов в многочастичных системах, исследование странного содержания нуклона, изучение рождения кумулятивных частиц с использованием поляризованного дейтронного пучка.

4.3. Первые эксперименты на нуклотроне. Сразу же после получения ускоренного пучка в кольце нуклотрона были начаты первые эксперименты на внутренних ядерных мишенях. Была создана станция внутренних мишеней, которая управляет режимом ввода тонких пленочных и нитяных мишеней в область циркуляции ускоренного внутреннего пучка нуклотрона [65]. В

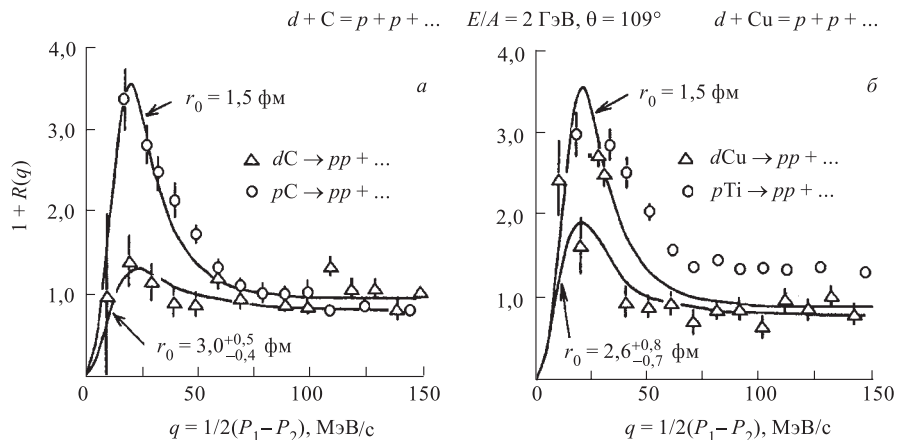


Рис. 12. Корреляционные функции кумулятивных протонов, испущенных с малым относительным импульсом q , для dC - (а) и dCu -реакций (б)

этом разделе описаны некоторые эксперименты, выполняемые на станции внутренних мишеней.

4.3.1. Исследования на внутреннем пучке. Проект СКАН-1. Один из первых экспериментов на внутреннем пучке был реализован на установке СКАН-1 (спектрометр кумулятивных адронов на нуклотроне).

В этом эксперименте участвуют физики из ОИЯИ, Болгарии (Институт ядерных исследований и ядерной энергетики), России (Санкт-Петербургский государственный университет), Словакии (Институт физики).

Установка предназначена для изучения фрагментации ядер-мишени в два кумулятивных протона. Целью эксперимента является измерение поперечного размера области ядро-ядерных взаимодействий. Был использован метод измерения корреляций кумулятивных протонов, испущенных при малых относительных импульсах. Корреляции протонов, испущенных в угловом интервале $106 \div 112^\circ$ в лабораторной системе, изучались в реакциях $d + C \rightarrow p + p + \dots$ и $d + \text{Cu} \rightarrow p + p + \dots$ ($P_d = 2 A \cdot \text{ГэВ}$). В результате этих измерений были получены приблизительно одинаковые радиусы для dC - и dCu -взаимодействий: $r_{dC} = 3,0 \pm_{0,4}^{0,5}$ фм и $r_{dCu} = 2,6 \pm_{0,7}^{0,8}$ фм (рис. 12) [66]. Исследования на установке СКАН-1 продолжаются для других падающих частиц и мишеней.

Коллаборация МАРУСЯ. Группа коллаборации МАРУСЯ начала исследования выхода вторичных фрагментов в результате взаимодействия внутреннего пучка нуклотрона с тяжелыми мишенями с использованием тонких полупроводниковых детекторов. Эта группа получила хорошее разделение вторичных фрагментов с очень низкими энергиями в области от 2 до 25 МэВ в $d + \text{Au}$ -взаимодействии при энергии дейтронов 1,044 ГэВ (рис. 13).

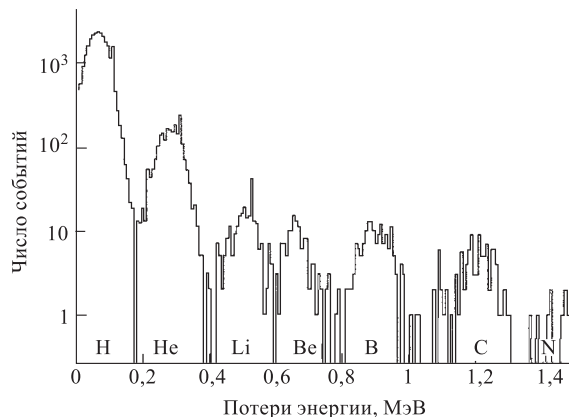


Рис. 13. Разделение вторичных фрагментов для $d+Au$ -реакции при энергии дейтронов 1,044 ГэВ

Эти данные находятся в процессе анализа и будут использованы для изучения эффекта полного разрушения ядер, чему способствует низкая энергия вторичных фрагментов.

4.3.2. *Исследования на выведенных пучках. Проект СТРЕЛА.* Эксперимент СТРЕЛА (рис. 14) предполагает изучение спин-зависимой части нуклонной амплитуды рассеяния в $np \rightarrow pn$ зарядово-обменном процессе на выведенном пучке дейтронов нуклотрона.

Эксперимент выполняется при участии ученых из ОИЯИ, Болгарии (Институт ядерных исследований и ядерной энергетики, Университет химической технологии и металлургии), Польши (Институт ядерных исследований), Словакии (Университет, Кошице).

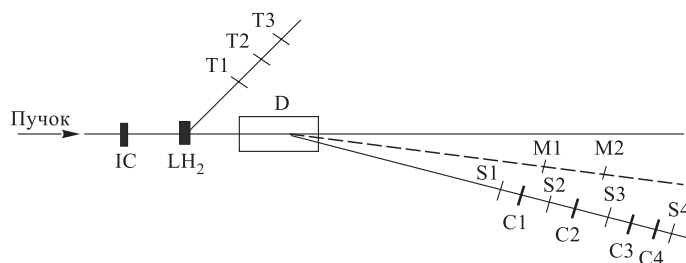


Рис. 14. Схема установки СТРЕЛА: IC — ионизационная камера; LH₂ — жидководородная мишень; D — анализирующий магнит; T1 ÷ T3 и M1, M2 — сцинтилляционные мониторы; C1 ÷ C4 — черенковские счетчики; S1 ÷ S4 — сцинтилляционные счетчики

Планируется измерить сечение рождения двух протонов при малом переданном импульсе в dp -взаимодействиях в области импульсов дейтронов от 3 до 4 ГэВ/с.

Возможность получения дополнительной информации относительно амплитуды элементарной зарядово-обменной реакции $np \rightarrow pn$ с помощью зарядово-обменного процесса $dp \rightarrow (pp)n$ из экспериментов с неполяризованными дейтронами была отмечена Мигдалом и Померанчуком.

Простейшая версия этих двух процессов в рамках импульсного приближения состоит в рассмотрении двух процессов: а) зарядово-обменный процесс $np \rightarrow pn$ и б) реакция $dp \rightarrow (pp)n$, т.е. зарядовый обмен на простейшем ядре — дейтроне (рис. 15). В первом случае (а) обе спиновые ориентации разрешены, в то время как во втором случае (б) при малом угле рассеяния (два протона движутся в переднем направлении с малым относительным импульсом) реакция может проходить, только если спин у рассеянного протона переворачивается (в соответствии с принципом Паули). При нулевом переданном импульсе дифференциальное сечение реакции $dp \rightarrow (pp)n$ определяется частью амплитуды с переворотом спина зарядово-обменного процесса $np \rightarrow pn$.

В 2000 г. была получена первая экспериментальная информация на установке СТРЕЛА на выведенном дейтронном пучке нуклотрона, которая в настоящее время находится в процессе анализа. Предварительные результаты по разделению событий с двумя протонами и одним протоном на установке СТРЕЛА представлены на рис. 16.

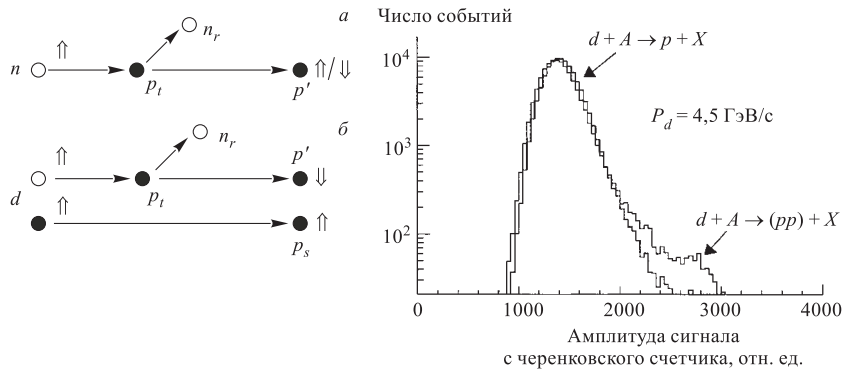


Рис. 15. Элементарная $np \rightarrow pn$ (а) и $dp \rightarrow (pp)n$ (б) зарядово-обменные реакции

Рис. 16. Предварительные результаты эксперимента СТРЕЛА по разделению событий с двумя протонами и одним протоном

Проект СКАН-2. В подготовке проекта приняли участие ученые из ОИЯИ, Болгарии (Институт ядерных исследований и ядерной энергетики), России (Санкт-Петербургский университет), Румынии (Институт исследования и развития физики и ядерной технологии), Словакии (Институт физики).

Предлагается изучать образование протонных пар с малыми относительными импульсами $0 < q < 50$ МэВ/с, которые испускаются под углом 180° в системе центра масс, в реакции $d + p \rightarrow (pp) (180^\circ) + n$.

Будут измерены сечение и тензорная анализирующая способность T_{20} процесса с целью получения информации о спиновой структуре дейтрона на малых внутриядерных расстояниях. Измерения планируется выполнить на выведенном пучке дейтронов нуклотрона с импульсом $P_d = 0,5 \div 6,0$ ГэВ/с.

Изучаемая реакция близка к реакции упругого рассеяния дейтрона назад, но рождение нуклонной пары в синглетном состоянии 1S_0 (близкие относительные импульсы) определяется, главным образом, однонуклонным обменом [67].

Это позволяет получить более прямую информацию о структуре дейтрона на малых расстояниях, чем в случае исследования реакции упругого рассеяния дейтрона назад. Численные оценки для сечения и тензорной анализирующей способности изучаемого процесса проведены в [68]. Показано, что в области энергий нуклотрона эти величины достаточно большие и могут быть измерены в рамках предлагаемого проекта [69]. Оценки показывают, что при интенсивности дейтронного пучка 10^7 с $^{-1}$ и толщине жидководородной мишени 1 г/см 2 можно ожидать примерно одно событие за время сброса пучка на мишень, что обеспечивает статистическую точность измерений около 2% за 20 часов работы ускорителя.

Установка СКАН-2 (рис. 17) включает в себя дипольный отклоняющий магнит и системы мониторинга пучка и сцинтилляционных годоскопов, служащих для координатных и времяпролетных измерений.

Первые измерения планируется выполнить на пучке неполяризованных дейтронов в 2001 г. Программа измерений с поляризованным дейтронным пучком будет выполняться в последующие два года.

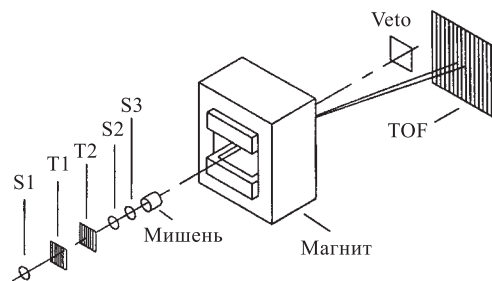


Рис. 17. Схема установки СКАН-2

В 2000 г. уже проведено опробование части аппаратуры установки СКАН-2 на выведенном пучке нуклотрона.

Проект НИС. Проект предложен совместно двумя лабораториями ОИЯИ: Лабораторией высоких энергий и Лабораторией физики частиц (ЛФЧ).

Основной целью проекта является проверка гипотезы о существовании скрытой поляризованной странности в нуклоне [70]. В случае подтверждения этой гипотезы свое естественное объяснение находят как проблема «спинового кризиса» [71], так и кажущееся нарушение правила Окубо–Цвейга–Иизуки (ОЦИ). Необходимо выполнить измерения отношений сечений рождения φ - и ω -мезонов вблизи порога их образования в нуклонных взаимодействиях, т. е. при лабораторных импульсах нуклонов выше 2,7 ГэВ/с. Использование дейтронного пучка даст возможность сравнить сечение рождения φ - мезона в pp - и np -взаимодействиях при одинаковых кинематических условиях.

В обозримом будущем такие измерения возможны только в Дубне на нуклотроне, поскольку максимальная энергия другого протонного ускорителя в этой области энергий (COSY, Германия) соответствует как раз порогу рождения φ -мезона.

Реальность выполнения эксперимента не вызывает сомнения, поскольку аналогичные измерения, но при одной фиксированной энергии, были выполнены недавно коллаборацией DISTO на ускорителе SATURNE во Франции [72].

Обнаружение нарушения правила ОЦИ в протон-протонных взаимодействиях является критическим испытанием для самого представления о скрытой поляризованной странности нуклона. Это нарушение было найдено в антипротон-протонных взаимодействиях, и очень важно подтвердить его существование для случая нуклон-нуклонной системы. В эксперименте НИС будут получены данные о величине эффекта нарушения правила ОЦИ и его энергетической зависимости вблизи порога рождения φ - и ω -мезонов.

Использование дейтронного пучка даст возможность сравнить сечение рождения φ -мезона в pp - и np -взаимодействиях при одинаковых кинематических условиях.

Проект НИС предлагается реализовать на установке СФЕРА, дополнив ее рядом детекторов, необходимых для решения данной задачи (микростриповые детекторы, аэрогельные черенковские счетчики и трековые детекторы больших размеров на основе дрейфовых трубок).

Проект ЛНС. Проект ЛНС подготовлен сотрудниками из ОИЯИ, России (Санкт-Петербургский государственный университет), Болгарии (Институт ядерных исследований и ядерной энергетики, Университет химической технологии и металлургии), Словакии (Институт физики), Японии (RIKEN).

Экспериментальная программа предполагает исследование структуры дейтрона и ${}^3\text{He}$ на малых расстояниях между нуклонами.

Программа включает изучение dp -упругого рассеяния и реакции развала дейтрона в dp -взаимодействии с использованием как неполяризованного, так и поляризованного дейтронного пучка и внутренней мишени нуклотрона, измерение тензорной анализирующей способности реакций $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$ и $d + d \rightarrow {}^3\text{H} + p$ на поляризованном дейтронном пучке в RIKEN (Япония).

Эти измерения обеспечат понимание спиновой структуры многочастичных систем на расстояниях, недостижимых в настоящее время с использованием электромагнитных пробников.

Главная идея проекта состоит в расширении измерений различных наблюдаемых величин в процессах, включающих три нуклонные системы, в новой энергетической и угловой области, где техника Фаддеева все еще работает и, следовательно, сравнение эксперимента и теории может быть проведено с высокой степенью точности.

Экспериментальная программа проекта ЛНС включает три различных эксперимента:

- измерение сечения, векторной A_y и тензорных A_{yy} и A_{xx} анализирующих способностей в dp -упругом рассеянии в области кинетических энергий дейтрона от 300 до 500 МэВ,

- измерение сечения, векторной A_y и тензорной A_{yy} анализирующих способностей в реакции развала дейтрона в dp -взаимодействии в области энергий 300÷500 МэВ в различных конфигурациях (компланарная геометрия, пространственная звезда и т. д.)

- измерение тензорных анализирующих способностей в реакциях $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$ и $d + d \rightarrow {}^3\text{H} + p$ до 270 МэВ.

Первые два эксперимента планируется предпринять, используя неполяризованный и поляризованный дейтронные пучки нуклотрона и внутреннюю мишень. Третий эксперимент был выполнен в RIKEN в ноябре–декабре 2000 г.

4.4. Асимптотические законы в релятивистской ядерной физике. В разделе 2 были использованы принципы симметрии и подобия для получения аналитического выражения для инклюзивного сечения рождения частиц, ядерных фрагментов и антиядер в релятивистских ядерных столкновениях.

Используемые там инвариантные переменные (интервалы в пространстве 4-скоростей) выражаются через быстроту инклюзивной частицы y , ее поперечную массу m_{1T} и быстроту сталкивающихся ядер в системе их центра масс следующим образом:

$$(u_I u_{II}) = \text{ch}(2Y),$$

$$(u_I u_1) = \frac{m_{1T}}{m_1} \text{ch}(-Y - y) = \frac{m_{1T}}{m_1} \text{ch}(Y + y),$$

$$(u_{II} u_1) = \frac{m_{1T}}{m_1} \text{ch}(Y - y).$$

Для центральной области быстрот рожденной инклюзивной частицы $y = 0$ или $(u_I u_1) = (u_{II} u_1)$, что соответствует равностороннему треугольнику Лобачевского.

В этом случае можно получить аналитическое выражение для параметра подобия [7]:

$$\Pi = N \operatorname{ch} Y, \quad (17)$$

где

$$N_I = N_{II} = N = \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\Phi_\delta}{\Phi^2}} \right) \left(\frac{m_{1T}}{m_0} \operatorname{ch} Y + \frac{\Delta}{m_0} \right) \frac{1}{2 \operatorname{sh}^2 Y},$$

$$\frac{\Phi_\delta}{\Phi^2} = \frac{\Delta^2 - m_1^2}{m_{1T}^2} \left[\frac{\operatorname{sh}^2 Y}{(\operatorname{ch} Y + (\Delta/m_{1T}))^2} \right].$$

Эти формулы дают возможность сделать следующие заключения об асимптотическом поведении сечений рождения вторичных частиц в ядерных соударениях с ростом энергии.

1. При возрастании энергии сталкивающихся ядер $(u_I u_{II}) \rightarrow \infty$ существует предельная величина параметра Π :

$$\Pi_\infty = \frac{m_{1T}}{2m_0} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{\Delta^2 - m_1^2}{(m_{1T})^2}} \right]. \quad (18)$$

2. Эффективное число сталкивающихся нуклонов убывает, т. е. $N \rightarrow 0$.

3. Отношение сечений рождения для нуклонов и ядер к соответствующим сечениям рождения антинуклонов и антиядер стремится к единице с ростом энергии. Это следует из того, что в случае рождения нуклонов и ядер величина $\Delta = -m_1$, а для случая рождения антинуклонов и антиядер $\Delta = m_1$ и, таким образом, из (18) следует, что Π_∞ для нуклонов и ядер описывается тем же выражением, что и для антинуклонов и антиядер.

Выражение для параметра подобия в этом случае факторизуется и Π становится пропорциональным массе инклюзивной частицы. Резкое падение сечений рождения для ядер и антиядер с ростом массы является критической проверкой уравнения (17).

4. При $(u_I u_{II}) \rightarrow \infty$ относительный выход странных частиц растет. Для K^- -мезонов величина $\Delta = m_k$ (масса K^- -мезона), в то время как для K^+ -мезонов величина Δ равна разности массы лямбда-гиперона и массы нуклона. Разница сечений K^- - и K^+ -мезонов зависит от величины $(\Delta^2 - m_k^2)/(m_{kT})^2$. Для K^- она равна нулю, в то время как для K^+ она падает с ростом $(m_{kT})^2 = m_k^2 + p_T^2$. Для $p_T \geq m_k$ отношение сечений рождения для K^- и K^+ ожидается близким к единице.

Анализ полученных результатов дает возможность предсказать асимптотическое поведение сечения рождения частиц, ядерных фрагментов и антиядер [73].

Если вычислить отношение выходов античастиц к выходам частиц при взаимодействии релятивистских ядер, используя формулу (8), то эта величина будет зависеть от разностей величин параметров подобия Π для античастиц и частиц.

Из (17) параметр подобия для антинуклонов и антиядер ($\Delta = m_1$) можно записать в следующем виде:

$$\Pi_1 = \left[\frac{m_{1T}}{m_0} \operatorname{ch} Y + \frac{m_1}{m_0} \right] \frac{\operatorname{ch} Y}{\operatorname{sh}^2 Y}.$$

Параметр подобия для нуклонов и ядер ($\Delta = -m_1$)

$$\Pi_2 = \left[\frac{m_{1T}}{m_0} \operatorname{ch} Y - \frac{m_1}{m_0} \right] \frac{\operatorname{ch} Y}{\operatorname{sh}^2 Y},$$

откуда

$$\Pi_1 - \Pi_2 = 2 \frac{m_1}{m_0} \frac{\operatorname{ch} Y}{\operatorname{sh}^2 Y}.$$

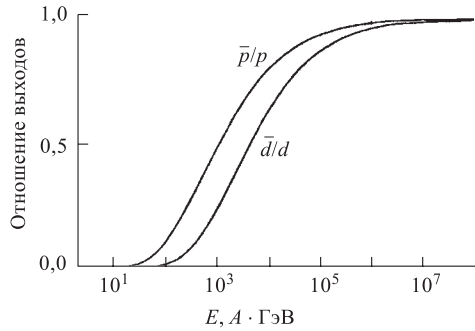


Рис. 18. Предсказания отношений выходов антипротонов к выходам протонов и отношений выходов антидейтронов к выходам дейтронов в ядро-ядерных взаимодействиях в зависимости от энергии столкновения в лабораторной системе координат с использованием представления сечений формулой (8)

Видно, что в этом случае исчезает зависимость от поперечной массы (поперечного импульса) m_{1T} и отношения сечений в зависимости от энергии легко вычисляются. Результаты этих предсказаний в области от энергий нуклотрона до энергий LHC (CERN) представлены на рис. 18. Полученные результаты асимптотического поведения сечения взаимодействия релятивистских ядер находятся в согласии с имеющимися экспериментальными данными.

Для оценки отношений выхода K^- - и K^+ -мезонов, как отмечалось выше, надо учитывать зависимость от поперечной массы m_{1T} .

Сравнение сделанных предсказаний для отношений выходов антипротонов к выходам протонов с данными экспериментов на AGS (Брукхейвен) [74], SPS (CERN) [75] и предварительными данными четырех экспериментов на RHIC [76] приведено на

рис. 19. Видно хорошее согласие предсказаний в широком диапазоне энергий. При энергии RHIC наблюдается некоторое отклонение от предварительных данных. Эти результаты весьма интересны и требуют специального изучения.

Нарушение зависимости (8) наблюдается для $b_{I1} < 1$, где важны нуклонные переменные и устанавливается переходный режим. Абсолютная величина сечений рождения нуклонов и ядерных фрагментов на порядок величины больше, чем предсказывается этой зависимостью. Зависимости от y и m_{1T} также не описываются этой формулой. Для $b_{I1} < 10^{-2}$ рождение инклюзивных фрагментов хорошо описывается плюсным приближением

$$\frac{d\sigma}{db_{I1}} = \frac{C}{\sqrt{b_{I1}}(b_{I1} + \alpha)^2},$$

где $\alpha = 2\varepsilon_{I1}(m_1 - m_1)/m_1m_1$, m_1 и m_1 — массы ядер; ε_{I1} — энергия связи фрагмента 1 в ядре I; C — константа. Для всех процессов ядерной фрагментации $\alpha \leq 10^{-2}$. Эта малость величины обусловлена малой энергией связи на нуклон по сравнению с массой нуклона. Зависимость сечения от массы фрагмента 1 много слабее, чем дается уравнением (8). В области коллайдерных энергий сечения рождения для дейтронов больше на 3–4 порядка величины, чем для ${}^3\text{He}$, в то время как в области $b_{I1} < 10^{-2}$ эта разница существенно меньше. Кроме того, в области $b_{I1} < 0,1$ наблюдаются фрагменты легких ядер вплоть до Si, которые практически невозможно наблюдать с точки зрения формулы (8). Эта формула была установлена на основе большого числа экспериментов в области $(u_1u_{II}) \leq 10$. Был показан асимптотический характер этой закономерности. Однако ее действительность вплоть до области $(u_1u_{II}) \sim 10^4$ (область RHIC) является экспериментальной проверкой гипотезы, основанной на интерпретации переменных m_0N_I и m_0N_{II} как массы групп квантов, участвующих в столкновении. В переходной области $0,1 \leq (u_1u_1) \leq 1$, где зависимость (8) сильно нарушается, необходимы как экспериментальные, так и дальнейшие теоретические исследования.

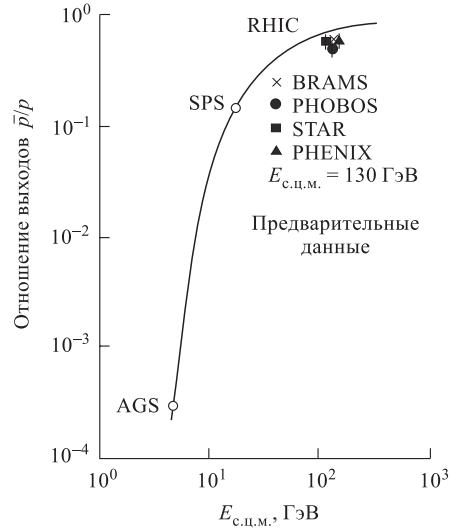


Рис. 19. Сравнение предсказаний, сделанных на основе принципа подобия, с экспериментальными данными. Данные, полученные на RHIC, являются предварительными [76]

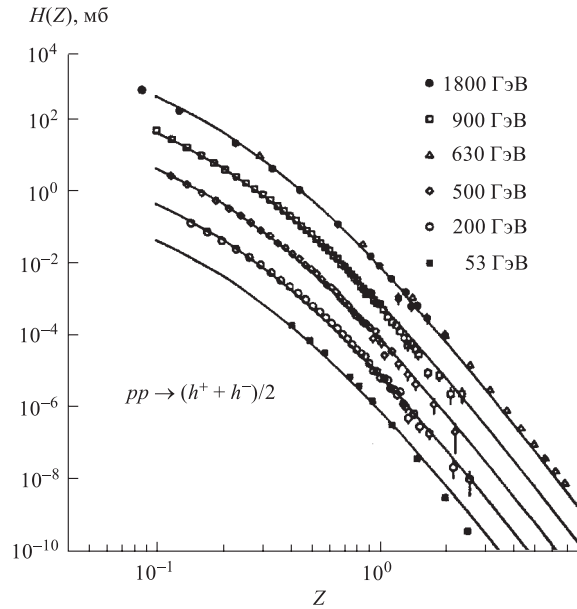


Рис. 20. Скейлинговая функция $H(Z)$ для рождения заряженных адронов в протон-протонных и антипротон-протонных взаимодействиях при $\Theta = 90^\circ$. Точки — экспериментальные данные по инклюзивным сечениям, полученные на коллайдерах SPS и «Tevatron» при энергиях в системе центра масс реакции $53 \div 1800$ ГэВ

Сотрудниками ЛВЭ был проведен интересный анализ экспериментальных данных по рождению частиц в pp -, pA -, AA -взаимодействиях на коллайдерах SPS (CERN) и «Tevatron» (FNAL) в широком диапазоне энергий и переданных импульсов [76–83] и установлена новая закономерность в рождении частиц, так называемый Z -скейлинг (рис. 20).

Как оказалось, эта закономерность также отражает фундаментальные свойства симметрии взаимодействия и образования частиц, такие как самоподобие, локальность и фрактальность. Представление экспериментальных данных в зависимости от параметра Z обнаруживает свойства энергетической и угловой независимости и подтверждает универсальность механизма формирования частиц, описываемого скейлинговой функцией $H(Z)$.

Эта функция имеет физическую интерпретацию плотности вероятности образования реальной частицы на длине формирования Z . Как сама скейлинговая функция, так и параметр Z выражаются через экспериментально измеряемые величины: инвариантное сечение и быструю плотность заряженных частиц, что позволяет проводить модельно-независимый анализ экспериментальных данных.

В области больших Z , которые соответствуют большим поперечным импульсам рожденных частиц, установлен степенной закон поведения скейлинговой функции $H(Z) \sim Z^\alpha$. Эта закономерность проявляется в рождении π^0 -мезонов, прямых фотонов и струй и интерпретируется как проявление фрактальности структуры сталкивающихся адронов, взаимодействия их конститuentов и механизма формирования реальных частиц.

Исследования A -зависимости рождения заряженных и нейтральных адронов в протон-ядерных взаимодействиях в области больших поперечных импульсов показали универсальный характер поведения скейлинговой функции для различного типа ядер от дейтрона до свинца. Влияние ядерной среды на спектры образования адронов описывается функцией, зависящей только от атомного номера ядра A .

Концепция Z -скейлинга используется для предсказаний сечений рождения прямых фотонов, адронов и струй на новом поколении коллайдеров, таких как RHIC и LHC, с целью поиска новых физических эффектов и явлений в тэвной области энергий сталкивающихся адронов и ядер.

4.5. Прикладные исследования на ускорительном комплексе синхрофазотрон–нуклотрон. Синхрофазотрон в течение длительного времени активно используется для проведения прикладных исследований. Результаты этих исследований весьма плодотворны и их продолжение уже нашло место на нуклотроне. Более того, пучки нуклотрона предоставляют новые возможности для проведения исследований в прикладной области и их круг будет расширен.

Исследования в прикладной области, проводимые на ускорительном комплексе ЛВЭ ОИЯИ, включают следующие основные направления:

- радиобиология и космическая биомедицина,
- влияние ядерных пучков на компоненты микроэлектроники,
- трансмутация радиоактивных отходов,
- вопросы электроядерного метода генерации энергии,
- использование пучка углерода для терапии онкологических опухолей и т. д.

Исследования в области радиобиологии особенно важны для длительных космических полетов. Это направление входило в программу исследований с первых полетов беспилотных и пилотируемых космических кораблей. В последние годы в рамках программы этих исследований совместно с Отделом радиобиологических и радиационных исследований (ОРРИ) ОИЯИ и Институтом медико-биологических проблем (Москва) проводятся облучения различными пучками биологических объектов и их компонентов [85].

На рис. 21 приведен пример результата облучения пучком протонов синхрофазотрона с энергией 1 ГэВ хромосомы 1, находящейся в ядре человеческого лимфоцита. В ОРРИ ОИЯИ разработана уникальная методика ана-

лиза результатов таких облучений. На рисунке отчетливо виден отколовшийся фрагмент хромосомы после облучения протонным пучком.

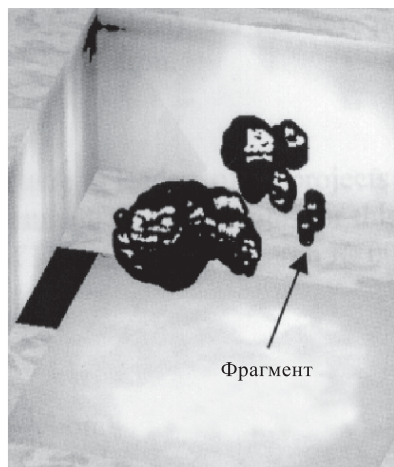


Рис. 21. Хромосома 1 с фрагментом после облучения протонами с энергией 1 ГэВ в ядре человеческого лимфоцита

В настоящее время крайне необходима информация о влиянии излучения на работу элементов электроники. Особенно это важно как для длительных беспилотных, так и для пилотируемых космических полетов. Такие облучения проводились совместно с НПО им. С. П. Королева на синхрофазотроне, а в марте 2001 г. совместно с итальянскими учеными на нуклотроне проведено облучение пучком магния микрочипов, предназначенных для использования в аппаратуре по итальянской космической программе.

В ЛВЭ длительное время проводятся исследовательские работы, связанные с изучением возможности уничтожения ядерных отходов путем облучения их пучками частиц, а также изучаются вопросы использования пучков ускорителей для управления ядерными реакторами с целью разработки более эффективных и безопасных ядерных источников энергии. Эти работы в ЛВЭ впервые инициировал еще в 1950-х годах профессор К. Д. Толстов.

Работы в этой области исследований ведутся в ЛВЭ ОИЯИ на установке ГАММА-2 в рамках большой международной коллаборации научных центров из Австралии (Университет, Сидней), Германии (Исследовательский центр, Юлих; Университет, Марбург), Греции (Университет, Тессалоники), Египта (Университет, Каир), России (ИФВЭ, Протвино), США (LBNL, Беркли), Франции (Центр ядерных исследований, Страсбург).

На рис. 22 приведена схема установки ГАММА-2. Она представляет собой тяжелую мишень, окруженную замедлителем вторичных нейтронов. Имеется возможность расположить

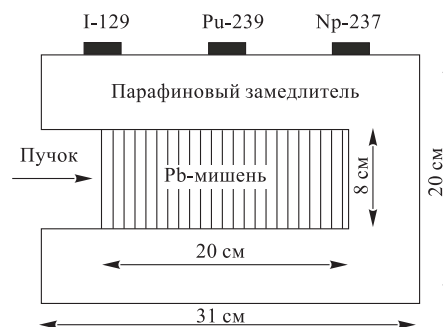


Рис. 22. Схема установки ГАММА-2

в различных точках установки детекторы нейтронов. Образцы радиоактивных изотопов, предназначенных для изучения трансмутации, устанавливаются на наружной поверхности замедлителя.

Целью исследований, проводимых на установке ГАММА-2, является измерение выхода нейтронов в зависимости от энергии пучка, сорта частиц пучка и вещества мишени.

В результате проведенных экспериментов была получена энергетическая зависимость выхода нейтронов при облучении пучками p , d , He и C с кинетической энергией $0,5 \div 7,4$ ГэВ на мишенях из Cu, Hg, Pb и U [86, 87]. Установлена сильная зависимость распределений вторичных частиц от массы налетающего ядра. Проведено облучение с использованием протонного пучка радиоактивных изотопов ^{237}Np , ^{129}I , ^{241}Am , ^{239}Pu и сделаны оценки сечений их трансмутации [88, 89].

Дальнейшее развитие эти работы найдут в новом проекте ЭНЕРГИЯ–ТРАНСМУТАЦИЯ, работы по которому планируется начать уже в 2001 г. В этом проекте предполагается участие большой международной коллаборации. Схема установки приведена на рис.23. В эксперименте планируется использовать сборку из естественного урана общей массой до 3,5 т, которая окружает мишень из тяжелого материала. В зазорах между урановыми блоками будут располагаться активационные и трековые детекторы и образцы трансмутируемых радиоактивных изотопов. Внутри урановой сборки будут помещены термометрические датчики. Уже были проведены первые облучения прототипа установки со сборкой из естественного урана массой около 100 кг и получены первые результаты по калориметрии [90].

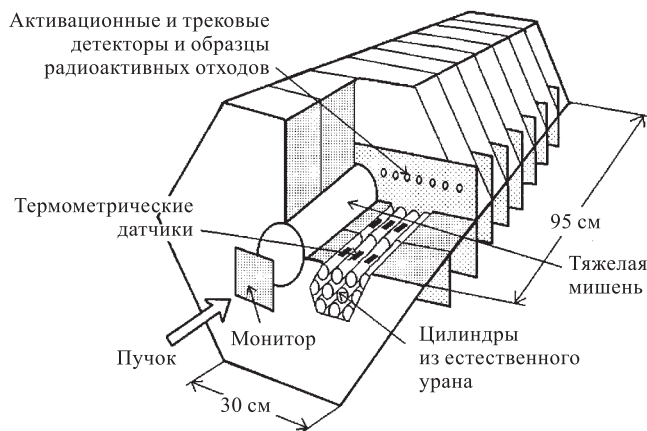


Рис. 23. Схема установки, создаваемой в рамках проекта ЭНЕРГИЯ–ТРАНСМУТАЦИЯ для исследования аспектов электроядерного метода генерации энергии и трансмутации радиоактивных отходов

В ЛВЭ также проработан вариант энергетической системы, включающей подкритический ядерный реактор с тепловой мощностью 3 ГВт и протонный ускоритель (энергия протонов 1 ГэВ, ток пучка 120 мА), создающий мощный поток первичных нейтронов, поддерживающих управляемую реакцию деления [91].

Показано, что наиболее подходящим для этой цели является циклотрон с разделенными орбитами и магнитной системой, состоящей из миниатюрных сверхпроводящих магнитов с железным ярмом [92]. С помощью этой системы удастся экономно разместить в одной установке одновременно несколько (до 10) пучковых каналов. Такая многоканальная система устраняет ограничение интенсивности ускорителя, связанное с пространственным зарядом пучка, и позволяет получить достаточно однородное поле нейтронов в реакторе.

Следует отметить, что в ОИЯИ вопросу разработки энергетической системы на основе подкритического ядерного реактора уделяется большое внимание. В частности, в рамках общеинститутской темы рядом лабораторий ОИЯИ (ЛНФ, ЛЯП, ЛИТ и ЛВЭ) ведется проработка проекта экспериментальной электроядерной установки SAD с мощностью около 20 кВт на основе стандартных тепловыделяющих элементов реактора БН-600, управляемой протонным пучком фазотрона.

В настоящее время проработан проект использования пучка ядер углерода нуклотрона в медицинских целях для терапии раковых опухолей. В ряде случаев использование углеродного пучка для этих целей является высокоэффективным. Планируется создание трех кабин с соответствующим оборудованием для облучения пациентов. Малые пространственные размеры и высокая стабильность пучка нуклотрона позволят успешно реализовать это предложение.

Необходимо отметить, что в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джемелова ОИЯИ уже длительное время развиваются методы и средства лучевой терапии и сопутствующей диагностики на медицинских адронных пучках фазотрона. Проводятся облучения протонными пучками злокачественных опухолей. Использование углеродного пучка нуклотрона для этих целей существенно расширит имеющиеся возможности лечения онкологических заболеваний.

Кроме перечисленных выше прикладных задач с использованием непосредственно пучков ускорительного комплекса, развитие технического сопровождения работ, проводимых в ЛВЭ в области фундаментальной науки, позволило создать ряд направлений, которые имеют выход в прикладную область. Это, прежде всего, уникальные криогенные технологии, координатные детекторы для медицины и кристаллографии, сцинтилляторы различного назначения.

Так, например, опыт создания криогенных мишеней для физических экспериментов позволил нашим конструкторам разработать сосуд для топливного

бака самолета, работающего на жидком водороде. Этот самолет (Tu-155) прошел успешные летные испытания [93]. Водородное топливо является весьма перспективным с точки зрения как доступности, калорийности, так и экологической безопасности (продукт сгорания — чистая вода). Получение жидкого водорода экономически выгодно вблизи атомных электростанций.

В заключение следует отметить, что упомянутые выше прикладные исследования стали возможны только благодаря интенсивному развитию в ОИЯИ фундаментального научного направления — релятивистской ядерной физики.

5. СОВМЕСТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ В ДРУГИХ НАУЧНЫХ ЦЕНТРАХ

Физики ЛВЭ участвуют в программах исследований с тяжелыми ионами на ускорителях других научных центров, таких как CERN (Швейцария), BNL (США), GSI (Германия). Участие в этих программах дает возможность нашим ученым изучить наблюдаемые в ЛВЭ явления при более высоких энергиях и с другим набором сталкивающихся ядер, использовать богатый накопленный опыт в новой области энергий и находиться на самом современном уровне научных исследований.

Довольно успешно также развивается сотрудничество с физическим центром RIKEN (Япония) по программе поляризационных экспериментов. Кроме того, ведутся совместные исследования на установке WASA на ускорителе CELSIUS в Уппсале (Швеция).

5.1. Работы в CERN. Эксперименты на SPS. Физики ЛВЭ ОИЯИ принимают участие в следующих экспериментах с тяжелыми ионами на ускорителе SPS в CERN: NA45 (CERES), NA49 и EMU01 [94]. Ранее наша группа участвовала также в эксперименте WA98, который к настоящему времени завершен.

Сотрудниками ЛВЭ был сделан существенный вклад в создание различного типа детекторов и оборудования для этих установок.

Эксперимент NA45 ориентирован на регистрацию электрон-позитронных пар и прямых фотонов, рождаемых в адронных, адрон-ядерных и ядерных столкновениях. Главной целью этого эксперимента является систематическое изучение спектра электрон-позитронных пар в области масс от $50 \text{ МэВ}/c^2$ до $2 \text{ ГэВ}/c^2$ и рождения ρ -, ω - и φ -мезонов. Благодаря отсутствию взаимодействий в конечном состоянии регистрируемых в этом эксперименте вторичных частиц, эксперимент является уникальным для изучения динамики ультрарелятивистских взаимодействий тяжелых ионов.

В ОИЯИ для установки NA45 были созданы элементы системы быстрого триггера и изготовлен большой магнит для времяпроекционной камеры (TRC).

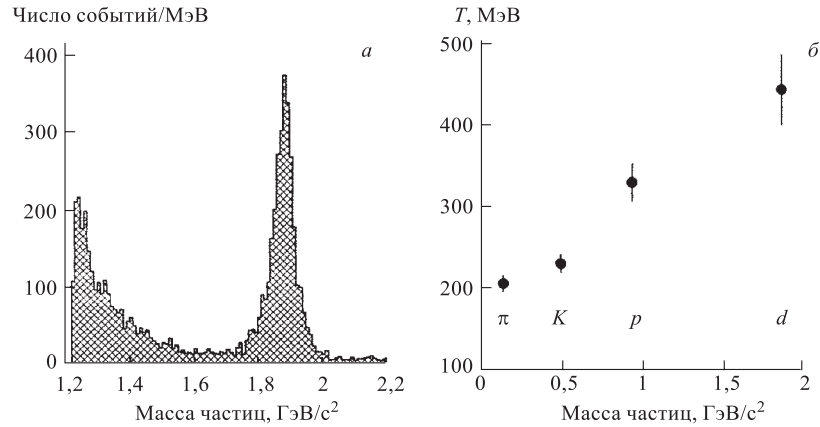


Рис. 24. Распределение по инвариантной массе в области импульсов нуклонов $3 \div 10$ ГэВ/с (*a*) и параметр наклона T спектра поперечных масс в зависимости от массы частиц, образующихся в Pb + Pb-столкновениях при энергии 158 ГэВ на нуклон (*б*)

Эксперимент NA49 предназначен для поиска фазового перехода от адронного состояния ядерной материи к состоянию деконфайнмента кварков и глюонов в Pb + Pb-столкновениях. Установка была оптимизирована для изучения образования вторичных адронов в сильных взаимодействиях нуклонов и ядер с целью получения большого акцептанса и максимально возможной идентификации частиц [95].

Главным вкладом ЛВЭ ОИЯИ в этот эксперимент является создание 900-канального времяпролетного детектора (TOF) с высоким временным разрешением (среднее значение около 80 пс) [96]. Группой сотрудников ЛВЭ был также проведен анализ данных по рождению дейтронов в Pb + Pb-столкновениях при энергии 158 ГэВ на нуклон [97]. На рис. 24 приведен массовый спектр дейтронов и зависимость параметра наклона спектра поперечных масс от массы рождаемых частиц, включая данные для дейтрона.

Некоторые результаты экспериментов NA45, NA49 и WA98 наряду с результатами других установок, работающих на свинцовом пучке с энергией 158 ГэВ на нуклон, были интерпретированы как сигналы об образовании нового состояния материи — повышенный выход странных частиц при взаимодействии ядер свинца по сравнению с неядерными процессами (NA49), усиление выхода дилептонов, который не описывается известными эффектами (NA45), и наблюдение выхода прямых фотонов (WA98).

Будущие эксперименты на LHC. В ЦЕРН в 2005–2006 гг. планируется ввести в строй новый ускоритель — большой адронный коллайдер (LHC) с энергией встречных адронных пучков 7 ТэВ. Предусматривается также уско-

рение тяжелых ядер, в частности свинца, до энергии 2,76 ТэВ на нуклон. Таким образом, открываются новые перспективы исследований по релятивистской ядерной физике в области ультравысоких энергий.

Для исследований на LHC готовится ряд крупных установок, таких как ATLAS, ALICE, CMS, в создании которых и разработке физической программы активно участвует ОИЯИ.

Проекты ALICE и, частично, CMS предусматривают проведение исследований на ядерных пучках этого коллайдера. Физики ЛВЭ активно участвуют в подготовке этих проектов.

Проект ALICE предназначен для изучения Pb + Pb-взаимодействий на LHC при энергии в системе центра масс около 5,5 ТэВ на нуклон. Целью эксперимента является изучение свойств сильновзаимодействующей материи при экстремально высоких плотностях. Основной вклад ОИЯИ в создание установки — это разработка и изготовление ядра дипольного магнита мюонного плеча установки. Рассматривается возможность участия ОИЯИ в разработке и изготовлении элементов системы идентификации частиц на основе детекторов переходного излучения (TRD). Также ведется работа по подготовке физической программы и моделированию процессов, которые планируется исследовать.

Группа из Дубны прорабатывает вопросы, связанные с исследованием рождения векторных мезонов и корреляциям Бозе–Эйнштейна вторичных частиц.

Проект CMS, кроме задач на адронных пучках, содержит программу исследований Pb + Pb-взаимодействий на LHC. В разработке этой программы активное участие принимают физики ЛВЭ. В частности, в рамках модели HIJING были изучены глобальные характеристики ядро-ядерных столкновений для области энергий LHC. Интересным предсказанием модели оказалось указание на наличие широкого максимума в центральной области быстрот на фоне плато в распределении по псевдобыстроте полной поперечной энергии (рис. 25). Этот подъем вызван эффектом гашения струй в плотной ядерной материи. Показано, что калориметр с широким захватом по псевдобыстроте $-5 < \eta < 5$ позволит получить экспериментальную проверку существования такого эффекта [98].

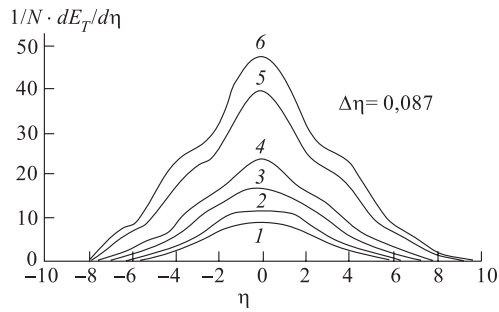


Рис. 25. Распределение полной поперечной энергии $dE_T/d\eta$ (ГэВ) по псевдобыстроте η для 10000 Pb + Pb-столкновений с минимальным триггером при энергиях в системе центра масс 0,1 (1); 0,2 (2); 0,5 (3); 1,0 (4); 3,0 (5); 5,0 (6) ТэВ на нуклон в случае наличия эффекта гашения струй

5.2. Участие в экспериментах на RHIC. В 2000 г. состоялся первый сеанс на новом ядерном коллайдере RHIC (BNL, США). Были получены встречные пучки ядер золота, каждый с энергией 60 ГэВ на нуклон. В дальнейшем планируется увеличить энергию до 100 ГэВ на нуклон в каждом пучке.

Сотрудники ОИЯИ принимают участие в исследованиях на коллайдере RHIC. Одна из групп ЛВЭ активно участвует в работах по проекту STAR, а вторая подключилась к исследованиям на установке PHENIX.

Эксперимент STAR предназначен для изучения сильновзаимодействующей материи при высокой плотности и поиска сигналов ее деконфайнментной фазы. Также планируется исследование спина как фундаментальной КХД-переменной, включая измерения спин-зависящих партонных распределений протонов (глюонов, валентных кварков, морских кварков) [99].

Основной частью установки является большая цилиндрическая времяпроекционная камера (TPC) в соленоидальном магнитном поле 0,5 Тл, перекрывающая примерно 4 единицы быстроты относительно центральной области. Установка также включает кремниевый вершинный трековый детектор и электромагнитные калориметры.

Группа из ЛВЭ ОИЯИ выполнила моделирование pp -, pA - и AA -столкновений, которое было необходимо для разработки детекторов установки. Разработан и изготовлен модуль газового детектора максимума ливня с катодным считыванием. Выполнено также моделирование по программе изучения спиновых явлений. Использован разработанный в ЛВЭ подход (Z -скейлинг) для предсказаний асимптотических свойств pp - и pA -взаимодействий при энергиях RHIC. В настоящее время ведется обработка информации, полученной в первом сеансе. Первые результаты были доложены на международной конференции «Кварковая материя-2001» [76].

5.3. Участие в экспериментальной программе GSI. Установка HADES представляет собой широкоапертурный диэлектронный спектрометр, создаваемый в GSI (Дармштадт) для изучения рождения лептонных пар в столкновениях тяжелых ядер в области кинетических энергий до 2 ГэВ на нуклон. Эта установка способна работать при интенсивностях пучка до 10^8 с^{-1} . Детектор имеет геометрический акцептанс почти 40 % для e^+e^- -пар и разрешение по массам 0,8 % для ρ - и ω -мезонов. Для восстановления треков заряженных частиц предназначены четыре системы дрейфовых камер с малой массой вещества на пути частиц. Сотрудники ЛВЭ разработали и создали 6 модулей второй системы многопроволочных дрейфовых камер. Пространственное разрешение камеры — около 70 мкм [100]. Относительная радиационная длина трековой системы не превышает 0,5 % за счет использования газовой смеси на основе гелия и алюминиевой проволоки при создании катодных и анодных плоскостей.

Группа из ЛВЭ также участвует в подготовке программы физических исследований на установке HADES.

5.4. Исследования в RIKEN. Основной целью совместного ЛВЭ–RIKEN эксперимента R308n(OA) является изучение спиновой структуры ${}^3\text{He}$ (${}^3\text{H}$) на расстояниях, недостижимых в настоящий момент, с использованием электромагнитных пробников посредством измерения угловых зависимостей тензорных анализирующих способностей A_{yy} , A_{xx} , A_{xz} в реакциях $d+d \rightarrow {}^3\text{He}+n$ и $d+d \rightarrow {}^3\text{H}+p$. Эти поляризационные наблюдаемые величины чувствительны к спиновому распределению нейтрона (протона) в ${}^3\text{He}$ (${}^3\text{H}$) на малых расстояниях в рамках приближения однонуклонного обмена [101]. Наблюдается сильная чувствительность этих поляризационных наблюдаемых величин к использованной волновой функции трехнуклонной связанной системы, в особенности при малых углах испускания. С другой стороны, так как ${}^3\text{He}$ и ${}^3\text{H}$ являются зеркальными по зарядовой симметрии, различие в их наблюдаемых величинах может быть интерпретировано в терминах нарушения зарядовой симметрии. Измерение тензорных анализирующих способностей, которые в первом порядке нечувствительны к кулоновским коррекциям, в реакциях $d+d \rightarrow {}^3\text{He}+n$ и $d+d \rightarrow {}^3\text{H}+p$, особенно при больших импульсах, могло бы обеспечить дополнительную информацию о природе нарушения зарядовой симметрии. Коллаборация ЛВЭ–RIKEN провела измерение тензорных A_{yy} , A_{xx} , A_{xz} и векторной A_y анализирующих способностей на пучке поляризованных дейтронов циклотрона на установке SMART осенью 2000 г. Данные наблюдаемые были измерены со статистической погрешностью $\pm 0,02$ при энергиях 270 и 200 МэВ во всем угловом диапазоне для реакции $d+d \rightarrow {}^3\text{H}+p$. Тот же самый набор анализирующих способностей был получен для канала $d+d \rightarrow {}^3\text{He}+n$ при 270 МэВ между 0° и 120° в системе центра масс. Такая высокая точность экспериментальных данных позволит дискриминировать различные модели трехнуклонного связанного состояния до внутреннего импульса нуклона 600 МэВ/с.

Эти исследования планируется продолжить на пучках поляризованных дейтронов ускорительного комплекса ЛВЭ [102].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований подготовлена и реализуется большая программа исследований с релятивистскими ядрами, поляризованными дейтронами и нейтронами, в которой активно участвуют физики из России и других стран-участниц ОИЯИ, а также из ряда других стран. В связи с получением выведенного пучка частиц и ионов из нуклотрона открываются новые перспективы исследований в области релятивистской ядерной физики и прикладной тематики. Создание нуклотрона делает ОИЯИ ведущим международным научным центром исследований по релятивистской ядерной физике и квантовой хромодинамике с

использованием адронных систем. В мире нет других аналогичных действующих установок, играющих потенциально важную роль в этих исследованиях, особенно в переходной области от нуклонных степеней свободы в ядрах к кварк-глюонным степеням свободы.

В настоящее время на повестке дня стоит вопрос о совершенствовании нуклотрона и создании на его базе пользовательского центра для исследований по релятивистской ядерной физике и решения прикладных задач с использованием релятивистских ионов в области энергий несколько ГэВ на нуклон.

Для научной программы в этом направлении также важное значение имеют совместные исследования в других научных центрах, которые позволяют использовать накопленный опыт и осуществить проверку ряда сделанных предсказаний при более высоких энергиях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим руководителей проектов на ускорительном комплексе Лаборатории высоких энергий ОИЯИ С. В. Афанасьева, А. А. Балдина, В. В. Глаголева, П. И. Зарубина, Л. С. Золина, В. А. Карнаухова, Е. А. Красавина, В. А. Краснова, М. И. Кривоустова, Б. А. Кулакова, А. Б. Курепина, В. П. Ладыгина, А. Г. Литвиненко, Ю. Лукстиньша, Н. М. Пискунова, Л. И. Сарычеву, Л. Н. Струнова, Ю. А. Трояна, В. И. Шарова, руководителей экспериментов от ОИЯИ в CERN, BNL и GSI А. С. Водопьянова, И. А. Голутвина, Ю. В. Заневского, Г. Л. Мелкумова, Ю. А. Панебратцева, членов дирекции ЛВЭ В. Н. Пенева, Е. Б. Плеханова, А. Д. Коваленко и И. А. Шелаева за предоставление информации для обзора. Мы благодарим за большую помощь в подготовке раздела по адронным процессам с большой множественностью И. Д. Манджavidзе.

Авторы также благодарят Р. Брандта, В. В. Бузова, С. Б. Герасимова, С. Дубничку, В. Г. Кадышевского, Я. Климана, А. А. Кузнецова, Ф. Легара, В. А. Матвеева, В. А. Никитина, А. Н. Тавхелидзе, С. Таппрогга, А. И. Титова, М. В. Токарева, Э. Томази-Густавсон и Т. Холлмана за многочисленные стимулирующие обсуждения. Выражаем также благодарность руководителям коллабораций в CERN М. Делла Негра, П. Сейботу, И. Стахел, И. Церуе, Р. Штоку, Ю. Шукрафту за постоянную поддержку сотрудничества в рамках коллабораций NA45, NA49, ALICE и CMS.

Авторы выражают благодарность И. И. Мигулиной за большую помощь в подготовке рукописи к публикации.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 00-02-16580 и 00-15-96737.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

Лаборатории и подразделения ОИЯИ и российские институты:

- ИТЭФ — Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва.
 ИФВЭ — Институт физики высоких энергий, Протвино.
 ИЯИ — Институт ядерных исследований РАН, Москва.
 ЛВЭ — Лаборатория высоких энергий ОИЯИ.
 ЛИТ — Лаборатория информационных технологий ОИЯИ.
 ЛНФ — Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.
 ЛТФ — Лаборатория теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова ОИЯИ.
 ЛФЧ — Лаборатория физики частиц ОИЯИ.
 ЛЯП — Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Джелепова ОИЯИ.
 МГУ — Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.
 ОИЯИ — Объединенный институт ядерных исследований, Дубна.
 ОРРИ — Отдел радиационных и радиобиологических исследований ОИЯИ.
 РНЦ «Курчатовский институт» — Российский научный центр «Курчатовский институт», Москва.
 ФИАН — Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва.

Установки и проекты на ускорительном комплексе ЛВЭ ОИЯИ:

- ГИБС — гибридный спектрометр на основе стримерной камеры.
 ГАММА-2 — установка для исследования процессов трансмутации и электроядерного способа генерации энергии.
 ДЕЛЬТА — установка ИЯИ для исследования спиновых явлений в реакциях рождения π^0 - и η -мезонов при рассеянии поляризованных нуклонов.
 ДЕЛЬТА–СИГМА — установка для измерения энергетической зависимости разности полных np -сечений для антипараллельной и параллельной ориентации спинов нейтронов пучка и протонов мишени, поляризованных в продольном и поперечном направлениях.
 ДИСК — установка для изучения кумулятивного рождения частиц и структуры легких ядер.
 КАСПИЙ — установка ИЯИ для изучения рождения каонов, пионов и антипротонов на ядрах.
 ЛНС — установка для изучения спиновой структуры легких ядер (LNS — Light Nuclei Structure).

- МАРУСЯ — установка для исследования переходной области от нуклонных степеней свободы к кварк-глюонным степеням свободы при взаимодействии релятивистских ядер.
- МРС — спектрометр среднего разрешения (MRS — Medium Resolution Spectrometer) для исследования поляризационных явлений в ядерных реакциях.
- НИС — проект для поиска скрытой странности нуклона (NIS — Nucleon Internal Strangeness).
- СКАН-1 — спектрометр кумулятивных адронов на нуклотроне на внутренней мишени.
- СКАН-2 — спектрометр кумулятивных адронов на нуклотроне на выведенном пучке.
- СЛОН — установка для облучения эмульсий в сильном импульсном магнитном поле.
- СМС — сцинтилляционный магнитный спектрометр МГУ для исследования образования лидирующих частиц.
- СТРЕЛА — установка для исследования зарядово-обменных процессов в дейтрон-протонных столкновениях на выведенном пучке нуклотрона.
- СФЕРА — установка для исследования множественного кумулятивного рождения частиц в 4π -геометрии.
- ЭНЕРГИЯ–ТРАНСМУТАЦИЯ — новый проект для изучения процессов трансмутации радиоактивных отходов и электроядерного способа получения энергии.
- ФАЗА — установка ЛЯП для изучения явления ядерной мультифрагментации под действием легких релятивистских ионов.

Другие сокращения:

- AGS — ускоритель релятивистских ядер на энергию до 14 ГэВ на нуклон в BNL (США).
- ATLAS — проектируемая в CERN установка для изучения протон-протонных взаимодействий на LHC.
- ALICE — проектируемая в CERN установка для исследования столкновений тяжелых ионов на LHC.
- BNL — Брукхейвенская национальная лаборатория (США).
- CELSIUS — протонный синхротрон в Уппсале (Швеция) на энергию до 1,36 ГэВ.
- CERN — Европейский центр ядерных исследований (Женева).
- CMS — проектируемая в CERN установка для изучения протон-протонных и Pb–Pb-взаимодействий на LHC.
- COSY — ускоритель на энергию протонов 2 ГэВ в Юлихе (Германия).
- EMU01 — международная эмульсионная коллаборация.

- GSI — исследовательский ядерный центр в Дармштадте (ФРГ) с синхротроном для ускорения тяжелых ионов до 2 ГэВ на нуклон.
- HADES — установка в GSI для изучения взаимодействий ядер с рождением дилептонов.
- LBNL — Национальная лаборатория им. Лоуренса в Беркли (США).
- LHC — большой адронный коллайдер на энергию протонов 7 ТэВ и ядер свинца 2,76 ТэВ на нуклон, создаваемый в CERN.
- NA45 — эксперимент на ядерных пучках SPS в CERN, в котором изучается образование электрон-позитронных пар.
- NA49 — эксперимент на ядерных пучках SPS в CERN для исследований фазового перехода от адронного состояния материи к кварк-глюонному.
- PHENIX — установка на RHIC.
- RHIC — релятивистский тяжелоионный коллайдер в BNL (Au+Au, 100 ГэВ).
- RIKEN — исследовательский ядерный центр в Японии (Токио).
- SMART — магнитный спектрометр на циклотроне в RIKEN для поляризационных исследований.
- SPS — протонный синхротрон в CERN, на котором получены ядра свинца с энергией 158 ГэВ на нуклон.
- STAR — установка на RHIC.
- TEVATRON — протон-антипротонный коллайдер на энергию 1 ТэВ в Национальной лаборатории им. Э. Ферми (FNAL), США.
- WASA — установка для изучения околопорогового рождения легких мезонов на ускорителе CELSIUS.
- WA98 — установка в CERN для исследований рождения фотонов в ядерных столкновениях на SPS (в настоящее время закрыта).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балдин А. М. // Краткие сообщения ФИАН. 1971. № 1. С. 35.
2. Балдин А. М. и др. // ЯФ. 1973. Т. 18, вып. 1. С. 79.
3. Research Program of the Laboratory of High Energies / Ed. A. M. Baldin et al. Dubna, 1999.
4. Proc. of the XIV Intern. Seminar on High Energy Physics Problems «Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics», Dubna, Aug. 17–22, 1998 / Ed. A. M. Baldin, V. V. Burov. Dubna, 2000. V. 1, 2.
5. Baldin A. M., Baldin A. A. // Phys. Part. and Nucl. 1988. V. 29, No. 3. P. 232.
Baldin A. A. et al. // JINR Rapid Commun. 1999. No. 2[94]. P. 20.
6. Ширков Д. В. // ДАН СССР. 1982. Т. 263. С. 64.
7. Baldin A. M., Malakhov A. I. // JINR Rapid Commun. 1998. No. 1[87]. P. 5–12.
8. Baldin A. M. et al. // Proc. of the VIII Intern. Seminar on High Energy Physics Problem. Dubna, 1987. P. 302.
9. Baldin A. M. et al. // Z. Phys. C. 1987. V. 33. P. 363.
10. Гришин В. Г. // ЭЧАЯ. 1976. Т. 7. № 3. С. 595.
11. Матвеев В. А., Мурадян Р. М., Тавхелидзе А. Н. // ЭЧАЯ. 1971. Т. 2. С. 7.
12. Гришин В. Г. // ЭЧАЯ. 1979. Т. 10, № 3. С. 608;
Гришин В. Г. // ЭЧАЯ. 1984. Т. 15, № 1. С. 178.
13. Сисакян А. Н., Скачков Н. Б. // Научное сотрудничество в ядерной физике: Сб. М., 1986. С. 56.
14. Manjavidze J., Sissakian A. JINR Preprint E2-2000-217. Dubna, 2000; Phys. Rep. 2001. V. 346, No. 1. P. 1.
15. Manjavidze J., Sissakian A. // JINR Rapid Commun. 1988. No. 5[31]. P. 5.
16. Chelkov G., Manjavidze J., Sissakian A. // JINR Rapid Commun. 1999. No. 4[96]. P. 35;
Chelkov G. et al. // JINR Rapid Commun. No. 4[96]. 1999. P. 45.
17. Manjavidze J. // Part. At. Nucl. 1985. V. 16. P. 101.
18. Sissakian A. N., Slepchenko L. A. JINR Preprint P2-10651. Dubna, 1977; Sissakian A. N., Slepchenko L. A. // Fizika. 1978. V. 10. P. 21; Mavrodiev S. Ch. et al. // Yad. Fiz. 1979. V. 30. P. 245; Матвеев В. А., Сисакян А. Н., Слеченко Л. А. // ЯФ. 1976. Т. 23, вып. 2. С. 932.
19. Manjavidze J., Sissakian A. // JINR Rapid Commun. 1988. No. 2[81]. P. 13.
20. Manjavidze J., Sissakian A. // Phys. Part. Nucl. 2000. V. 31. P. 7a.
21. Manjavidze J., Sissakian A. // J. Math. Phys. 2000. V. 41. P. 5710; 2001. V. 42. P. 641;
Manjavidze J., Sissakian A. // Th. Math. Phys. 2000. V. 123. P. 776.
22. Kovalenko A. D. // Proc. of the Intern. Symp. «The 50th Anniversary of the Discovery of Phase Stability Principle», July 12–15, 1994 / Ed. A. M. Baldin et al. Dubna, 1996. P. 44–55.
23. Zarubin P. I. // Phys. Part. Nucl. 1995. V. 26, No. 3. P. 221.
24. Anisimov Yu. S. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 367. P. 432.
25. Afanasiev S. V. et al. // Proc. of X Intern. Seminar on High Energy Physics Problems «Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics», Dubna, Sept. 24–29, 1990. Singapore, 1991. P. 349–355.
26. Afanasiev S. V. // JINR Rapid Commun. 1993. No. 1. P. 21.

27. *Anisimov Yu. S. et al.* // Phys. of Atom. Nucl. 1997. V. 60, No. 6. P. 957–963.
28. *Anikina M. Kh. et al.* // Phys. Lett. B. 1997. V. 397. P. 30–36.
29. *Avramenko S. A. et al.* JINR Preprint E1-94-311. Dubna, 1994.
30. *Avramenko S. A. et al.* // Nucl. Phys. A. 1996. V. 596. P. 355.
31. *Avramenko S. A. et al.* // Nucl. Phys. A. 1992. V. 547. P. 95c.
32. *Любошиц В. Л.* // ЯФ. 1990. Т. 51. С. 1013–1022.
33. *Avramenko S. A. et al.* // Nucl. Phys. A. 1995. V. 585. P. 91c–96c.
34. *Карнаухов В. А.* Препринт ОИЯИ Р1-99-193. Дубна, 1999;
Карнаухов В. А. // Природа. 2000. Т. 2. С. 5–12.
35. *Belzer L. I. et al.* JINR Preprint P1-87-591. Dubna, 1987.
36. *Belzer L. I. et al.* // ЯФ. 1990. Т. 52. С. 890.
37. *Anoshina E. V. et al.* // Phys. of Atom. Nucl. 1997. V. 60, No. 2. P. 224–229.
38. *Гаспарян А. П. и др.* // ПТЭ. 1977. Т. 2. С. 37.
39. *Troyan A. Yu. et al.* JINR Preprint D1-96-418. Dubna, 1996.
40. *Бешилу К. и др.* // ЯФ. 1986. Т. 43. С. 888.
41. *Абдвалиев А. и др.* // ЯФ. 1979. Т. 29. С. 1545.
42. *Троян Ю. А., Печенов В. Н.* // ЯФ. 1997. Т. 56. С. 201;
Троян Ю. А. // ЭЧАЯ. 1993. Т. 24. С. 683.
43. *Troyan Yu. A. et al.* // JINR Rapid Commun. 1986. No. 6[80]. P. 73.
44. *Троян Ю. А. и др.* // ЯФ. 2000. Т. 63. С. 1648.
45. *Troyan Yu. A. et al.* // Rev. of Part. Phys. C. 2000. V. 15. P. 405;
Troyan Yu. A. et al. // JINR Rapid Commun. 1998. No. 5[91]. P. 33.
46. *Troyan Yu. A. et al.* // JINR Rapid Commun. 2000. №6[103]. С. 25.
47. *Толстов К. Д., Хошмухамедов Р. А.* Сообщение ОИЯИ Р1-6897. Дубна, 1973.
48. *Бондаренко А. И. и др.* Сообщение ОИЯИ Р1-96-447. Дубна, 1996.
49. *Kurepin A. B. et al.* // JETP Lett. 1988. V. 47. P. 17.
50. *Baldin A. A. et al.* // JETP Lett. 1988. V. 48. P. 127.
51. *Berlev A. I. et al.* // Proc. of the Intern. Seminar «Quarks-88». Singapore, 1988. P. 679.
52. *Baldin A. A. et al.* // Nucl. Phys. A. 1990. V. 519. P. 407.
53. *Pantuev V. S. et al.* // Nucl. Phys. A. 1995. V. 585. P. 13.
54. *Baldin A. A. et al.* // Nuovo Cim. 1995. V. 108. P. 139.
55. *Kurepin A. B.* // Proc. of the XII Intern. Seminar on High Energy Physics Problem. Dubna, 1996.
56. *Kurepin A. B. et al.* // Acta Physica Polonica. B. 1996. V. 27. P. 3077.
57. *Kurepin A. B. et al.* // Genshikaki Kenkyu, Tokyo. 1996. V. 41. P. 177.
58. *Golubeva M. B. et al.* // Phys. Lett. 1989. V. 221. P. 238.
59. *Golubeva M. B. et al.* // JETP Lett. 1990. V. 51. P. 298.
60. *Berlev A. I. et al.* // Izv. AN, ser. fiz. 1990. V. 54. P. 76.
61. *Afanasyev S. et al.* // Phys. Lett. B. 1998. V. 445. P. 14–19.
62. *Sharov V. I. et al.* // Eur. Phys. J. C. 2000. V. 1. P. 255–265.

63. *Adiashevich B. P. et al.* // Zeitschrift für Physik C. 1996. V. 71. P. 65.
64. *Sharov V. I. et al.* // JINR Rapid Commun. 1996. No. 3[77]. P. 13.
65. *Malakhov A. I. et al.* // Nucl. Instr. Meth. 2000. V. 440, issue 2,1. P. 320–329.
66. *Анисимов Ю. С. и др.* // Краткие сообщения ОИЯИ. 1998. № 5[91]. С. 25.
67. *Itambekov O., Uzikov Yu. N.* // Sov. J. Nucl. Phys. 1990. V. 52. No. 5. P. 862.
68. *Uzikov Yu. N.* JINR Preprint E2-2000-149. Dubna, 2000.
69. *Semikh S. S. et al.* JINR Preprint P4-2000-219. Dubna, 2000.
70. *Ellis J. et al.* // Phys. Lett. B. 1995. V. 353. P. 319.
71. *Ellis J., Karliner M.* // Phys. Lett. B. 1995. V. 341. P. 397.
72. *Balestra F. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. P. 4572.
73. *Malakhov A. I.* // Proc. of the 29th Intern. Conf. on High Energy Physics, Vancouver, Canada, July 23–29, 1998. Singapore, 1998. V. II. P. 1497–1500.
74. *Ahle L. et al.* // Nucl. Phys. A. 1996. V. 610. P. 139c.
75. *Arsenescu R. et al.* // Nucl. Phys. A. 1999. V. 661. P. 177c.
76. Proc. of QM2001 Conference, USA, Stony Brook, 2001.
77. *Zborovsky I. et al.* // Phys. Rev. D. 1996. V. 54. P. 5548.
78. *Tokarev M. V.* JINR Preprint E2-97-56. Dubna, 1996.
79. *Zborovsky I. et al.* // Phys. Rev. C. 1999. V. 59. P. 2227.
80. *Tokarev M. V. et al.* // Int. J. Mod. Phys. A. 2001. V. 16. P. 1.
81. *Tokarev M. V., Dedovich T. G.* // Int. J. Mod. Phys. A. 2000. V. 15. P. 3495.
82. *Tokarev M. V., Potrebenikova E. V.* // Comp. Phys. Commun. 1999. V. 117. P. 229.
83. *Tokarev M. V. et al.* // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2000. V. 26. P. 1671.
84. *Tokarev M. V. et al.* JINR Preprint E2-2000-90. Dubna, 2000.
85. *Timoshenko G. N. et al.* JINR Preprint E16-99-47. Dubna, 1999.
86. *Adloff J. C. et al.* // Rad. Measur. 1997. V. 28. P. 313–316.
87. *Shahzad M. I. et al.* // Rad. Measur. 1998. V. 29. P. 445–451.
88. *Wan J.-S.* // Kerntechnik. 1998. V. 63. P. 167–177.
89. *Brandt R.* JINR Preprint E1-99-251. Dubna, 1999.
90. *Кривонустов М. И. и др.* Препринт ОИЯИ P1-2000-168. Дубна, 2000.
91. *Шелаев И. А. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2000. № 6[103]. С. 70.
92. *Шелаев И. А.* // Краткие сообщения ОИЯИ. 1993. № 5[62]. С. 16.
93. *Туполев А.* // Наука и жизнь. 1989. № 1. С. 33.
94. Experiments at CERN in 1999. Geneva, Nov. 1999.
95. *Afanasiev S.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 430. P. 210–244.
96. *Afanasiev S. V.* // JINR Rapid Commun. 1997. No. 5[85].
97. *Afanasiev S. V. et al.* // Phys. Lett. B. 2000. V. 486, Issues 1–2. P. 22–28.
98. *Savina M. V. et al.* // JINR Rapid Commun. 1998. No. 1[87]. P. 45.
99. *Hallman T. J.* // Proc. of the XIII Intern. Seminar on High Energy Physics Problems, Dubna, 1996 / Ed. A. M. Baldin, V. V. Burov. Dubna, 1998. P. 250.
100. *Черненко С. П. и др.* // Краткие сообщения ОИЯИ. 1999. № 5,6[97]. С. 22.
101. *Ladigin V. P. et al.* // Part. Nucl. Lett. 2000. No. 3[100]. P. 74.
102. *Ladigin V. P., Ladigina N. B.* // JINR Rapid Commun. 2000. No. 4[72]. P. 19.