

**Российская академия наук
ФИЗИЧЕСКИЙ институт имени П.Н. ЛЕБЕДЕВА**

Препринт Г.А. СОКОЛ, Е.М. ЛЕЙКИН

**Некоторые перспективы исследований
ядерного и электромагнитного взаимодействий
адронов на пучке ускорителя с энергией 2 ГэВ**

В печать, в свет.

**Зам. директора ФИАН
доктор физ.мат.наук**

/ А.А. Гиппиус /

Москва - 2010

Некоторые перспективы исследований ядерного и электромагнитного взаимодействий адронов на пучке ускорителя электронов с энергией 2 ГэВ

Г.А. Сокол - ФИАН, <gsokol@venus.lpi.troitsk.ru>
Е.М. Лейкин - НИИЯФ МГУ, <leikin@sinp.msu.ru>

Аннотация

Приведены обоснования организации в г. Троицке Центра электромагнитных исследований на базе нового ускорителя электронов с энергией 2 ГэВ, создаваемого на основе криогенных ВЧ структур. Ускоритель обеспечит непрерывный во времени высокоинтенсивный пучок электронов. Обсуждается возможность получения меченых по энергии гамма - квантов и короткоживущих изоскалярных мезонов. Одно из основных направлений физических исследований, помимо дальнейшего изучения свойств эта - ядер, связано с изучением влияния ядерной среды на характеристики находящихся в ней адронов

Some perspectives of investigations of nuclear and electromagnetic interactions of hadrons on electron accelerator with energy 2 GeV

G.A. Sokol - LPI, <gsokol@venus.lpi.troitsk.ru>
E.M. Leikin - SINP MSU, <leikin@sinp.msu.ru>

Abstract

Motivations for organization in Troitsk a scientific centre for study of electromagnetic interactions are presented. The centre will be based on a new 2 GeV electron accelerator with a high intensity continuous electron beam and systems of tagged gamma and of shortlived isoscalar mesons. The main direction of physical researches besides a further study of properties of eta-meson nuclei will be

connected with an influence of nuclear medium on hadron properties.



Владимир Иосифович ВЕКСЛЕР
(1907 – 1966) - академик РАН, автор принципа “автофазировки”, позволившего осуществить ускорение релятивистских частиц, лауреат Международной премии “АТОМ для МИРА”(вместе с Э.Макмилланом), лауреат Ленинской и Государственных премий, основатель Эталонной лаборатории ФИАН, руководитель фундаментальных исследований по физике ядра и частиц на созданных им ускорителях электронов с энергиями 30, 280, 600, 1300 МэВ (ФИАН) и на ускорителе протонов (синхрофазотроне) с энергией 10 ГэВ (ОИЯИ. г.Дубна)

1. Введение

В статье рассмотрены перспективы электромагнитных исследований с использованием интенсивных и непрерывных во времени пучков электронов и гамма - квантов от ускорителя электронов на энергию 2 ГэВ.

Одно из фундаментальных направлений этих исследований связано с выяснением влияния ядерной среды на характеристики (массу, время жизни и др.) адронов, что непосредственно затрагивает проблему механизма возникновения массы адронов - одну из центральных проблем современной теории сильных взаимодействий.

В статье рассмотрена также возможность создания ускорителя электронов на базе криогенных ВЧ структур и размещения его в рамках существующего ускорительного комплекса ФИАН “ПАХРА” в г. Троицке.

На базе нового ускорителя предполагается получение меченых по энергии пучков гамма – квантов и короткоживущих η -, ω -, η' - и ϕ - мезонов с целью изучения влияния ядерной среды на характеристики этих мезонов, а также создание современных экспериментальных установок.

Предполагается организация научного сотрудничества ряда институтов : ФИАН - ИЯИ РАН - НИИЯФ МГУ – МИФИ - ЛФВЭ ОИЯИ - ИЯФ ТПУ и других , которое послужит основой Центра электромагнитных исследований (ЦЭМИ) для реализации планов создания ускорителя электронов и проведения на нем фундаментальных исследований.

Затронутые в статье проблемы неоднократно служили предметом обсуждения на семинаре ОФВЭ ФИАН, а также на Совете по электромагнитным взаимодействиям РАН.

2. Сопоставление изучения структуры частиц с помощью электромагнитных излучений и пучков нуклонов и ядер.

Одним из основных направлений фундаментальных исследований, проводившихся в ФИАНе, начиная с 40-х годов, было изучение электромагнитных процессов на базе 4-х поколений электронных синхротронов, область энергий которых простиралась от 30 до 850 МэВ. Эти исследования были инициированы В.И. Векслером и их результаты внесли существенный вклад в формирование современных представлений о механизме ядерных реакций и свойствах фундаментальных частиц.

В настоящей статье рассматриваются перспективы традиционных для ФИАН направлений фундаментальных исследований электромагнитных процессов в области энергий 2 ГэВ.

Успехи квантовой хромодинамики (КХД) - современной теории сильного взаимодействия в описании кварк - глюонной структуры адронов на малых расстояниях ($\hbar < 10^{-15}$ см) - непосредственно связаны с малой величиной константы сильного взаимодействия ($\alpha_{с.вз.} < 1$). КХД в этой области энергий (расстояний) носит характер теории возмущений. Однако, на больших расстояниях ($\hbar > 10^{-14}$ см), подходы на основе теории возмущения не дают надежных предсказаний из-за заметного увеличения константы сильного взаимодействия ($\alpha_{с.вз.} > 1$).

Важным явлением физики сильных взаимодействий является динамическое нарушение киральной симметрии, которое в рамках КХД связано с конденсацией кварк - антикварковых пар в КХД вакууме, аналогичной конденсации куперовских пар в теории сверхпроводимости. Предполагается, что с ростом температуры и плотности среды в КХД вакууме возможен переход в состояние с киральной симметрией. Более того, частичное восстановление киральной симметрии возможно уже в условиях, характерных для внутриядерной среды.

Как известно, в отличие от масс атомов, молекул и ядер, массы адронов возникают динамически и связаны со спонтанным нарушением киральной симметрии. Частичное восстановление киральной симметрии во внутриядерной среде может проявляться в виде модификации свойств адронов.

Интерес к исследованиям электромагнитных взаимодействий в последнее время возник в связи с отмеченными в целом ряде работ определенными преимуществами изучения структуры частиц и ядер с помощью пучков электронов и гамма - квантов по сравнению с исследованиями на пучках мезонов, нуклонов и ядер. При соударениях ультрарелятивистских пучков тяжелых ионов достигаются состояния ядерной материи с высокой плотностью и температурой. Однако, динамика происходящих процессов представляет собой сложную картину превращения ядерного вещества в различных стадиях (предравновесной, равновесной, постравновесной), с различной плотностью и температурой, и в различных состояниях ядерной материи (адронной, кварк-глюонной с последующей адронизацией). Все эти стадии требуют детального описания (неизбежно модельно зависимого) всей сложной динамики, включая гидродинамические подходы [1] (рис. 1).

Преимущество использования для изучения структуры частиц и ядер, а также поведения частиц внутри ядра (в ядерной среде) пучков электронов и гамма – квантов обусловлено сохранением стационарного состояния ядра, а также возможностью исследовать воздействие ядерной материи на характеристики конкретных частиц..

Пучкам электронов и гамма- квантов присущи следующие особенности :

- точечность взаимодействия - размеры электрона оцениваются на уровне 10^{-16} см, что на много порядков меньше размера нуклона (10^{-13} см).
- взаимодействие электронов и гамма- квантов с частицами носит электромагнитный характер и хорошо описывается законами современной электродинамики.
- электромагнитное взаимодействие сравнительно слабо

возмущает объект исследования и, тем самым, позволяет получать достоверные данные о его структуре.

По этим причинам использование электронов и гамма – квантов для исследования структуры частиц и ядер во многих случаях оказывается предпочтительнее использования для этих целей пучков мезонов, нуклонов и ядер.

3. Исследование механизма возникновения массы у элементарных частиц.

Как уже отмечалось (см., например, Е.Л. Фейнберг [2]), одной из центральных проблем физики сильных взаимодействий является выяснения механизма возникновения массы у элементарных частиц и кварков.

Одно из направлений связано с исследованием влияния ядерной материи на характеристики мезонов в ядерном веществе.

Ниже речь пойдет об изучении ядерного взаимодействия изоскалярных η -, ω - , η' - и ϕ - мезонов с использованием пучков электронов и гамма – квантов с энергиями ≈ 2 ГэВ и непрерывных во времени. Непрерывность пучков во времени при минимальном уровне случайных событий ($< 1\%$) обеспечивает работу экспериментальной методики совпадений в достаточно интенсивных пучках электронов и γ – квантов, что позволяет надежно выделить процессы с очень малыми сечениями. Энергия 2 ГэВ выбрана из соображения рождения мезонов в условиях безотдачной кинематики, т.е. с кинетической энергией равной нулю (при $\theta = 0^\circ$ в лаб. системе). Образующийся в таких условиях мезон значительную часть времени жизни будет находиться внутри ядра, таким образом его взаимодействие с ядерной материей будет реализовано максимальным образом.

Выбор изоскалярных мезонов обусловлен тем, что эти мезоны обладают достаточно малой шириной распада и достаточно большой вероятностью (несколько % и выше) распада на 2 гамма - кванта или 2 заряженные частицы.

В Таблице 1 представлены характеристики выбранных мезонов.

Эти условия позволят измерить сдвиг распределения по суммарной энергии частиц распада $E(\Sigma)$ по сравнению со случаем распада свободного мезона. Подобная постановка эксперимента описана в [3]. Попытки определить наличие влияния ядерной материи на характеристики адронов предпринимались неоднократно [4], однако, существующие к настоящему времени данные крайне противоречивы. Для получения достоверных и надежных результатов крайне желательно выполнение следующих условий:

- выбор мезонов с малой шириной и достаточной вероятностью ($> 1\%$) распада на 2 частицы
 - использование энергии частиц пучка и кинематики эксперимента, соответствующих безотдачной кинематике для рождающихся мезонов с тем, чтобы мезон значительную часть своего времени жизни находился внутри ядра. При рождении мезона на ядерном нуклоне условие безотдачной кинематики естественно размывается ферми -движением нуклонов в ядре.
 - предпочтителен выбор мишени, содержащей помимо исследуемого ядра A , также ядра водорода H (типа H_2O , CH_2 , C_3H_8 и др)
- В этом случае суммарный спектр, возникающий от такой мишени, будет содержать узкий спектр, отвечающий рождению мезона на водороде и широкий спектр, отвечающий рождению на нуклоне в ядре A и смещенный относительно рождения на H (рис. 2).

В Таблице 2 и Таблице 3, представлены значения энергий гамма - квантов и протонов в случае рождения мезонов в условии безотдачной кинематики, а также значения пороговых энергий для рождения мезонов на водороде и дейтерии.

Подобные исследования могут быть проведены на ускорителе с энергией пучка электронов 2 – 3 ГэВ и достаточно высокой интенсивностью (10^{15} эл/сек). Модернизация ускорительного комплекса ФИАН в г. Троицке предполагает создание ускорителя электронов с необходимыми параметрами.

4. Принципы создания сильноточных ускорителей электронов с непрерывным во времени пучком электронов

В настоящее время при сооружении ускорителей электронов широко используются криогенные ускоряющие высокочастотные (ВЧ) структуры, что обеспечивает получение практически непрерывного во времени пучка, высокую степень монохроматичности и малую пространственную расходимость пучка. Ускоритель электронов СЕБАФ (Джефферсон. лаборатория, США), был сооружен в 80-е годы прошлого столетия на основе криогенных ВЧ структур с ускорением $\Delta E = 5$ МэВ/м. В настоящее время разработаны ВЧ структуры с ускорением до 70 МэВ/м. Применение ВЧ структур с $\Delta E = 25$ МэВ/м, которые существуют в промышленном выпуске, позволяет создать ускоритель на энергию 2 ГэВ [5] с размещением в существующем ускорительном зале комплекса Отдела физики высоких энергий ФИАН в г. Троицке. При этом 10 ускоряющих структур и 4 магнитных линзы, для обеспечения кругового ускорения электронов, можно разместить вдоль стен ускорительного зала. При 3 – х оборотах электронного пучка будет получена конечная энергия 2 ГэВ.

В будущем, при использовании ВЧ структур с ускорением $\Delta E = 35$ МэВ / м, можно сравнительно легко модернизировать ускоритель и получить электронный пучок с энергией 3 ГэВ.

Планируется рекуперация энергии электронного пучка, что значительно снизит энергозатраты и позволит достичь значительных энергий при относительно большом токе пучка. Ускоренный электронный пучок с конечной энергией 2 ГэВ будет выводиться в экспериментальный зал для получения меченых по энергии гамма – квантов, Далее. гамма – пучок будет направляться на установку, в которой будет происходить образование меченых по энергии короткоживущих мезонов.

. Эти мезоны предназначены для исследования влияния ядерной материи на их характеристики (массу, время жизни).

5. Размещение нового ускорителя электронов и экспериментальных установок в залах ускорительного комплекса ФИАН (г. Троицк)

Схематичный план расположения ускоряющих структур в ускорительном зале и план расположения экспериментальных установок для получения *меченых* γ - квантов и *меченых* по энергии мезонов в экспериментальных залах комплекса 'ПАХРА' представлен на рис.3. (из [6]). Предполагается использовать оба существующих экспериментальных зала. В одном из них намечается получение *меченого* по энергии пучка гамма - квантов на основе выведенного в этот зал пучка электронов. Затем, при использовании *меченых* по энергии гамма - квантов, возможно получение *меченых* по энергии мезонов. Во втором экспериментальном зале планируется получение квазимонохроматических пучков гамма - квантов высокой интенсивности путем применения обратного Комптон - эффекта, а также обычных пучков тормозного излучения. Разрабатывается вариант накопительного кольца диаметром порядка 40 метров с целью создания световых пучков высокой яркости (4-го поколения) на основе ввода пучка электронов из ускорителя в накопитель.

6. Мечение по энергии гамма квантов и мезонов.

В экспериментальной ядерной физике и физике частиц энергетическая зависимость процесса является, как правило, важной характеристикой изучаемого явления. Эту зависимость легко реализовать в случае электронов, энергия которых бывает известна с точностью нескольких процентов и лучше. В случае гамма квантов, создаваемых электронным пучком, возникает непрерывный тормозной спектр с энергией от 0 до $E(\gamma \text{ max}) = E(e)$. Поэтому разработка методов монохроматизации гамма пучка

является одной из главных задач экспериментальной физики.

Основным методом монохроматизации или “мечения” пучка гамма-квантов по энергии, является метод, основанный на рассеянии электрона ядром A с рождением гамма кванта

$$e + A = \gamma + e' + A1) \quad (')$$

Для достаточно тяжелых ядер A (обычно используется вольфрам) энергией отдачи и возбуждения конечного ядра A' можно пренебречь и

$$E(\gamma) = E(e) - E(e2) \quad (')$$

Для измерения энергии рассеянного электрона $E(e')$ используются магниты и системы детекторов, регистрирующие и измеряющие энергию $E(e')$. Точность определения энергии гамма квантов определяется задачами исследований и может достигать долей процента.

С развитием экспериментальной ядерной физики и достижением энергий, при которых возможно рождение π -, K - и более тяжелых мезонов, и для исследования взаимодействия мезонов с нуклонами и ядрами, возникла проблема монохроматизации мезонных пучков. В настоящем проекте решается задача мечення по энергии короткоживущих мезонов, в частности изоскалярных η -, ω -, η' -, ϕ - мезонов. Мечение по энергии короткоживущих мезонов предполагается проводить с использованием меченых по энергии гамма квантов на основе фоторождения мезона на ядерном нуклоне

$$\gamma + N \rightarrow M + N3) \quad (')$$

с регистрацией и измерением энергии ядерного нуклона, на котором произошло рождение. При известной энергии гамма кванта энергия мезона равна

$$E(M) = E(\gamma) - E(N4) \quad (')$$

Для измерения энергии нуклона, как и в случае мечення гамма квантов, используются магнит и система регистрации и измерения энергии нуклона. Система мечення мезона располагается вслед за системой мечення гамма-квантов.

В случае короткоживущих мезонов, которые практически не вылетают из мишени, где они возникли, изучение их взаимодействия с нуклонами ядра возможно путем регистрации

вторичных продуктов реакции.

Создание и использование меченых гамма квантов и мезонов может явится эффективным средством изучения взаимодействия мезонов с нуклонами и ядрами. Оно обеспечит получение энергетических зависимостей первичных процессов взаимодействия элементарных частиц, что пока не удастся реализовать в существующих ускорительных центрах.

7. Эта(η) - мезонные ядра : состояние проблемы и перспективы исследований на ускорителе электронов с энергией 2 ГэВ

Термин “эта(η) - мезонные ядра” был введен в ядерную физику в работе L.C. Liu и Q.Haider [7], в 1985 году, которая явилась первым теоретическим обоснованием возможности существования связанной системы η -мезона и ядра, системы, в которой η -мезон, в отличие от π - и K – мезонов в мезоатомах, удерживался бы в ядре не электромагнитными, а ядерными силами. Поскольку η -мезон - электрически нейтральная частица, то, возможность связи η -мезона с ядром не была очевидна.

Эта - мезонные ядра являются новым типом атомных ядер. Эта – мезонное ядро - это сильно связанная адронная система, тогда как обычные ядра - это чисто барионные системы.

В работе J.C. Peng [8] были сформулированы условия возникновения связанной системы η – мезона и ядра. Они сводились к следующему:

- взаимодействие η – мезона с нуклоном должно иметь характер “притяжения”,
- время пребывания η – мезона в ядре должно быть достаточно длительным, чтобы ηN – взаимодействие успело реализоваться.

Как уже отмечалось, Лиу и Хайдер [7] впервые провели теоретические расчеты для системы, состоящей из η – мезона и ядра A . Их расчеты основывались на существующем в то время значении длины рассеяния $a_{\eta N}$ - амплитуды упругого рассеяния $\eta N \rightarrow \eta N$ при нулевой кинетической энергии η - мезона. Значение $a_{\eta N}$ было равным:

$$a_{\eta N} = (0,27 \pm i \cdot 0,22) \text{ fm} \quad (5)$$

Реальная часть длины рассеяния оказалась положительной. Это означает, что взаимодействие η – мезона с нуклоном в s-состоянии имеет характер притяжения, как и следует из вида линейного потенциала взаимодействия η – мезона с ядром A.

$$U_{\eta A} = -c \cdot a_{\eta N} \cdot \rho(r) \quad (6)$$

Расчеты Лиу и Хайдера показали, что это значение $a_{\eta N}$ оказывается достаточным, чтобы обеспечить существование связанной системы η -мезона и ядра A, начиная с $A = 11$.

В настоящее время известно более 40 расчетов длины рассеяния $a_{\eta N}$, в которых значение реальной части меняется от 0,15 до 1,0, так что возникновения связанного состояния η -мезона и ядра можно ожидать для любого значения A.

В 1991 году в теоретической работе А.И. Лебедева и В.А. Трясучева [9] было рассмотрено образование η -мезонных ядер в фотореакциях (рис.4.).

Возникновение η - мезона в ядре происходит в результате образования $S_{11}(1535)$ резонанса с последующим его распадом

$$S_{11} \rightarrow \eta + N \quad (7)$$

и вылетом нуклона N “вперед“. В этом случае η – мезон будет обладать малой кинетической энергией и с большой вероятностью останется в ядре, образуя η - ядро. Вероятность распада S_{11} -резонанса на ηN - пару составляет около 50%, что означает большую вероятность вторичного образования S_{11} резонанса в результате ядерного взаимодействия η – мезона с одним из нуклонов ядра. При распаде $S_{11} \rightarrow \eta N$ внутри ядра обе частицы, как правило, остаются в ядре, поскольку S_{11} резонанс обладает малой кинетической энергией (на уровне Ферми- импульса) Таким образом в эта - ядре может возникнуть цепочка переходов

$$\eta + N \rightarrow S_{11} \rightarrow \eta + N \rightarrow \dots \rightarrow S_{11} \rightarrow \eta + N \rightarrow S_{11} \rightarrow \dots \quad (8)$$

которая может завершиться распадом S_{11} – резонанса на πN – пару (вероятность распада составляет 50%).

$$S_{11} \rightarrow \pi + N \quad (9)$$

На πN - пару будет приходится энергия $\Delta E \approx 450 \text{ МэВ}$ и обе частицы , как правило, будут вылетать из ядра. Поскольку

распадается практически покоящийся резонанс. то частицы разлетаются под углом 180° с энергиями $T(\pi) \approx 350$ МэВ и $T(N) \approx 100$ МэВ. При этой оценке не учитывается энергия связи резонанса в ядре, что может привести к уменьшению энергий π -мезона и нуклона.

Существует также канал распада эта - ядра, связанный с процессом взаимодействия $S_{11}(1535)$ – резонанса с нуклоном ядра:



В этом случае суммарная энергия равна $\Delta E \approx 600$ МэВ (без учета энергии связи S_{11} в ядре) и оба нуклона будут вылетать под углом $\theta = 180^\circ$ друг относительно друга с энергиями $T_1 = T_2 \approx 300$ МэВ.

Схема образования η – мезонного ядра в γA реакции, его эволюция и распад по NN , πN и $\gamma\gamma$ - каналам представлена на рис.5.

Эта картина соответствует постановке эксперимента по обнаружению эта(η) - мезонных ядер на пучке тормозного излучения синхротрона ФИАН “ПАХРА” [10].

Эксперименты в ФИАНе были начаты в 1994 году и использовали регистрацию πN из реакции (9). Для регистрации и измерения энергии π^+ -мезона и n - нейтрона использовались 2 сцинтилляционных спектрометра, работающих на основе измерения времени пролета Δt частицей расстояния L между “старт” и “стоп” детекторами спектрометра. Экспериментальные данные по времени пролета затем представлялись в зависимости от относительной скорости $\beta = L / c \cdot \Delta t$, где c - скорость света.

Основная трудность в эксперименте состояла в возможности выделения изучаемого процесса (фоторождения эта - ядер) на фоне процесса фоторождения π – мезонов на нуклонах ядра, сечение которого почти на 3 порядка превосходило сечение фоторождения эта - ядер ($\approx 0,5$ мкбарн для ядра ^{12}C по оценкам Лебедева и Трясучева [9]). Именно поэтому постановка эксперимента планировалась с учетом кинематики для этих процессов и с использованием угловых и энергетических корреляций образующихся в процессе частиц.

Схема установки представлена на рис. 6.. Полученные в эксперименте распределения по скоростям β_i регистрируемых частиц необходимо было в ходе последующей обработки преобразовать в распределения по энергиям частиц E_i . Однако, прямой переход от β_i распределений к E_i по формуле

$$E_i = (1 / \sqrt{1 - \beta_i^2} - 1) m_i c^2 \quad (11)$$

был невозможен, поскольку в распределении по β_i имелась нефизическая область с $\beta_i > 1$. Эта область естественно возникала при вычислении β_i вблизи 1 из-за ошибок $\delta(L_i)$ и $\delta(t_i)$, характерных для используемых в эксперименте электронных блоков ФСП и ВЦП, а также из-за некоторых упрощений в процедуре определения координат (x,y). Для получения неискаженного аппаратурой распределения по β_i в пределах $\Delta\beta = [0,1]$ необходимо было решение так называемой “обратной” задачи. Решение обратной задачи было проведено по методу, развитому в [11].

Результаты эксперимента представлены на рис.7 и рис. 8 в виде 2-х распределений по суммарной энергии E_i (π, n), полученного в эксперименте и при распаде свободного S_{11} – резонанса. В предположении, что (π^+ , n) –события возникают в результате распада в ядре S_{11} - резонанса, можно сделать вывод, что экспериментальные данные свидетельствуют об уменьшении массы S_{11} - резонанса, находящегося в ядерной среде.

В 2008- 2009 годах на синхротроне ФИАН были продолжены исследования эта(η)-мезонных ядер и получены результаты, подтверждающие данные 1999-2000 годов [12,13]. Намечается продолжение экспериментов по эта - ядрам на синхротроне ФИАН как для получения большей статистики событий, так и для измерений выходов (π, N), а также ($N_1 N_2$) и ($N_1 N_2 N_3$) - событий для разных ядер и в более широком диапазоне энергий пучка электронов.

Следует отметить одну особенность эта(η) – мезонного ядра. Оно является 2-х уровневой системой возбуждения ядра : с ядерным состоянием, содержащим $S_{11}(1535)$ резонанс, и состоянием, содержащим η – мезон.

Как отметил В.И. Ритус [14] :

“ ...показано экспериментально, что каждое ядро с достаточно большим A может представлять собой двух - уровневый резонатор с нижним уровнем ηN и верхним уровнем $S_{11}(1535)$. При попадании в ядро η - мезона малой энергии образуется ядро-резонатор, которое возбуждается и начинает осциллировать, переходя с нижнего уровня на верхний и обратно: $\eta N \leftrightarrow S_{11}$ с периодом $\approx 10^{-23}$ сек, очень малым по сравнению с временем жизни η -мезона. К сожалению, такие η – ядерные резонаторы обладают плохой добротностью: колебания $\eta N \leftrightarrow S_{11}$ быстро затухают из-за канала распада $S_{11} \rightarrow \pi N$. Тем не менее, эксперименты с такими η – резонаторами дают нетривиальную возможность изучать взаимодействие η - мезона и S_{11} – резонанса с нуклонами. “

Для других мезонов, в частности для ω -, η' -, ϕ - мезонов, такое явление по-видимому не ожидается, поскольку нет соответствующих возбужденных состояний нуклона, которые распадались бы с большой вероятностью на систему мезон – нуклон. Поэтому распад такого мезонного ядра можно будет наблюдать только по распаду мезона.

8. Организация Центра электромагнитных исследований (ЦЭМИ)

Создание ускорителя электронов на энергию 2 ГэВ и систем мечения по энергии гамма – квантов и мезонов, а также проведение экспериментальных исследований, предполагает активное участие физиков ФИАН, а также ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ, ЛФВЭ ОИЯИ, МИФИ, ИЯФ ТПУ и ряда других научно-исследовательских и учебных институтов России.

Организация в г. Троицке Центра электромагнитных исследований (ЦЭМИ) позволит объединить усилия ряда институтов РАН и Министерства образования и науки и будет содействовать активному развитию электромагнитных исследований в ядерной физике и физике элементарных частиц.

9. Заключение

Статья затрагивает одну из фундаментальных проблем физики сильных взаимодействий - проблему возникновения массы у элементарных частиц. Показано, что подход к решению этой проблемы может быть связан с изучением изменения массы мезонов, подвергающихся действию ядерной среды. Рассмотрена возможность экспериментального изучения влияния ядерной среды на характеристики (масса, время жизни) изоскалярных мезонов, возникающих в процессах фоторождения их на ядерных нуклонах. Отмечена особенность процесса фоторождения, обеспечивающая максимально возможное время пребывания мезона внутри ядра и тем самым максимально возможное воздействие ядерной среды на характеристики мезона, связанная с условием безотдачной кинематики в процессе фоторождения. Приведены экспериментальные данные, впервые полученные в ФИАНе [13] по фоторождению эта – мезонных ядер.

Рассмотрены перспективы развития фундаментальных исследований по мезонным ядрам на существующем синхротроне ФИАН “ПАХРА” и на новом ускорителе электронов на энергию 2 ГэВ. Рассмотрена возможность размещения нового ускорителя в ускорительном зале ускорительного комплекса ФИАН в г. Троицке.

Отмечается целесообразность организации в г. Троицке Центра электромагнитных исследований (ЦЭМИ), объединяющего усилия физиков ФИАН, ИЯИ РАН, МИФИ, НИИЯФ МГУ, ЛФВЭ ОИЯИ, ИЯФ ТПУ и ряда других учреждений в исследованиях на новом ускорителе фундаментальных электромагнитных процессов в физике атомного ядра и элементарных частиц.

Благодарности

Авторы выражают благодарность В.И. Ритусу за обсуждение поднятых в статье вопросов и ценные замечания.

Ссылки

- [1] S.V. Akkelin, Yu.M. Sinyukov. PR C. 73 (2006) p.034908
- [2] Е.Л. Фейнберг. Сборник. Физматлит. 2008
- [3] G.A. Sokol , E.M.Leikin arXiv: nucl-ex/ 09021408 v.1.(2009)
. КрСФ ФИАН. 47 (2009)
- [4] M. Kotulla. et al. Phys. Rev. Lett. 100, 192302 (2008)
R.Nasseripour et al. arXiv: nucl-ex/07072324 v.3 Jul 2007
V. Metag. arXiv: nucl-ex/ 0711.4709 v.3 Mar 2008
S. Schadmand. arXiv: nucl-ex/ 0709.2903 v.1 Sep 2007
T. Mertens et al. arXiv: nucl-ex/ 0810.2678 v.1 Okt 2008
M. Hedayati-Poor, H.S. Sharif Phys.Rev. C 76, 055107 (2007)
R. Hayano Nucl.Phys. A 805 (2009).p.295
- [5] V.G.Kurakin et al. Proc.RuPAC 08,Zvenigorod, Russia, (2008), p.107
- [6] V.G. Kurakin et al. Proc.EMIN (2009)
- [7] L.Liu,Q.Haider. PR C.34 (1986) 1845
- [8] J.C. Peng AIP Con.Proc.v.133, p.255 (1985)
- [9] A.I. Lebedev, V.A. Tryasuchev. J.Phys.G.Nucl.Phys. 17, p.1197 (1991)
- [10] Г.А. Сокол. Препринт ФИАН 5 (2005)
- [11] В.П. Павлюченко. ВАНТ, техника физич.эксперимента, т.13, N.1, с.38 (1982)
- [12] G.A. Sokol et al. Fizika B (Zagreb) v.8, 1, p.85 (1999)
- [13] Г.А. Сокол и др. Письма ЭЧАЯ т.5(102), с.71-95 (2000)
- [14] В.И. Ритус - отзыв на диссертацию Г.А.Сокола (2004 г.)

Таблица 1. (Particle Data - 2008)

Мезон	Масса , МэВ	Ширина Γ , МэВ	Распад	%	p МэВ/с
η (547)	$547,85 \pm 0,02$	$1,30 \pm 0,07$ (KeV)	$\gamma\gamma$	$39,31 \pm 0,5$	-
ω (782)	$782,65 \pm 0,12$	$8,49 \pm 0,08$	$\pi^-\pi^+$	$1,53 \pm 0,12$	366
η' (958)	$957,66 \pm 0,24$	$0,205 \pm 0,015$	$\gamma\gamma$	$2,10 \pm 0,12$	479
ϕ (1020)	$1019,51 \pm 0,18$	$4,26 \pm 0,05$	K^-K^+	$49,2 \pm 0,6$	127

Таблица 2. Значения энергии E_γ и кинетической энергии T_p для реакций образования мезона М на водородной и дейтериевой мишенях в условиях безотдачной кинематики

		η 0,547	ω 0,782	η' 0,958	ϕ 1,020
реакция					
$T(p)(\text{кин.}), \text{МэВ}$	$p+p \rightarrow M + p + p$	2,24	7,37	-	-
$T(p)(\text{кин.}), \text{МэВ}$	$p+d \rightarrow M + p + d$	1,04	1,73	2,43	2,74
$E(\gamma), \text{МэВ}$	$\gamma + p \rightarrow M + p$	1,0	3,90	-	-
$E(\gamma), \text{МэВ}$	$\gamma + d \rightarrow M + d$	0,63	0,9	1,20	1,42

Таблица 3. Значения пороговых энергий $E(\gamma)$ и $T(p)$ для реакций образования мезона М на водородной мишени

		η 0,547	ω 0,782	η' 0,958	ϕ 1,020
реакция					
$E(\gamma)(\text{порог}), \text{МэВ}$	$\gamma + p \rightarrow M + p$	0,71	1,11	1,45	1,57
$T(p)(\text{порог}), \text{МэВ}$	$p + p \rightarrow M + p$	1,25	1,89	2,40	2,59

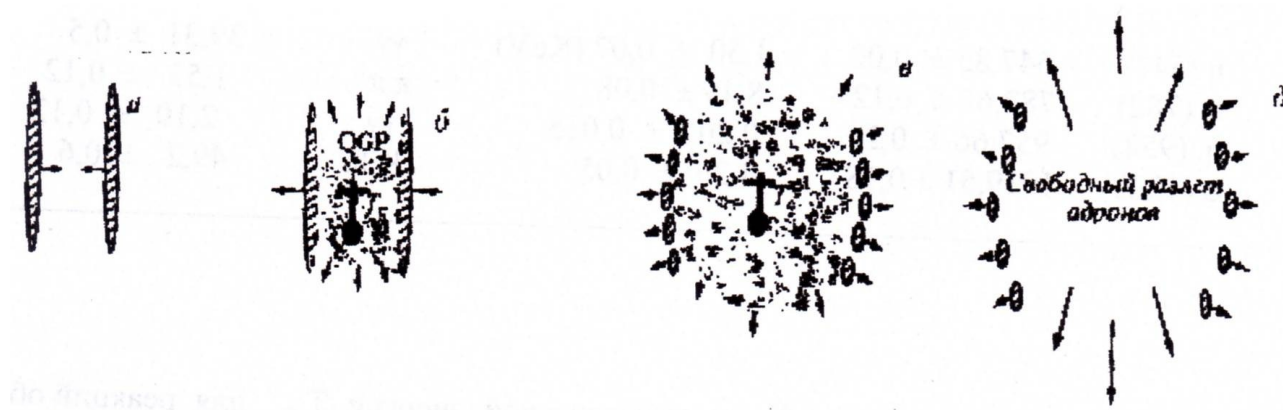


Рис. 1. Схематическое представление последовательных стадий центрального столкновения двух одинаковых тяжелых ядер
 (S. Hands. Contemp.Phys. (2001), v. 42, p. 209)

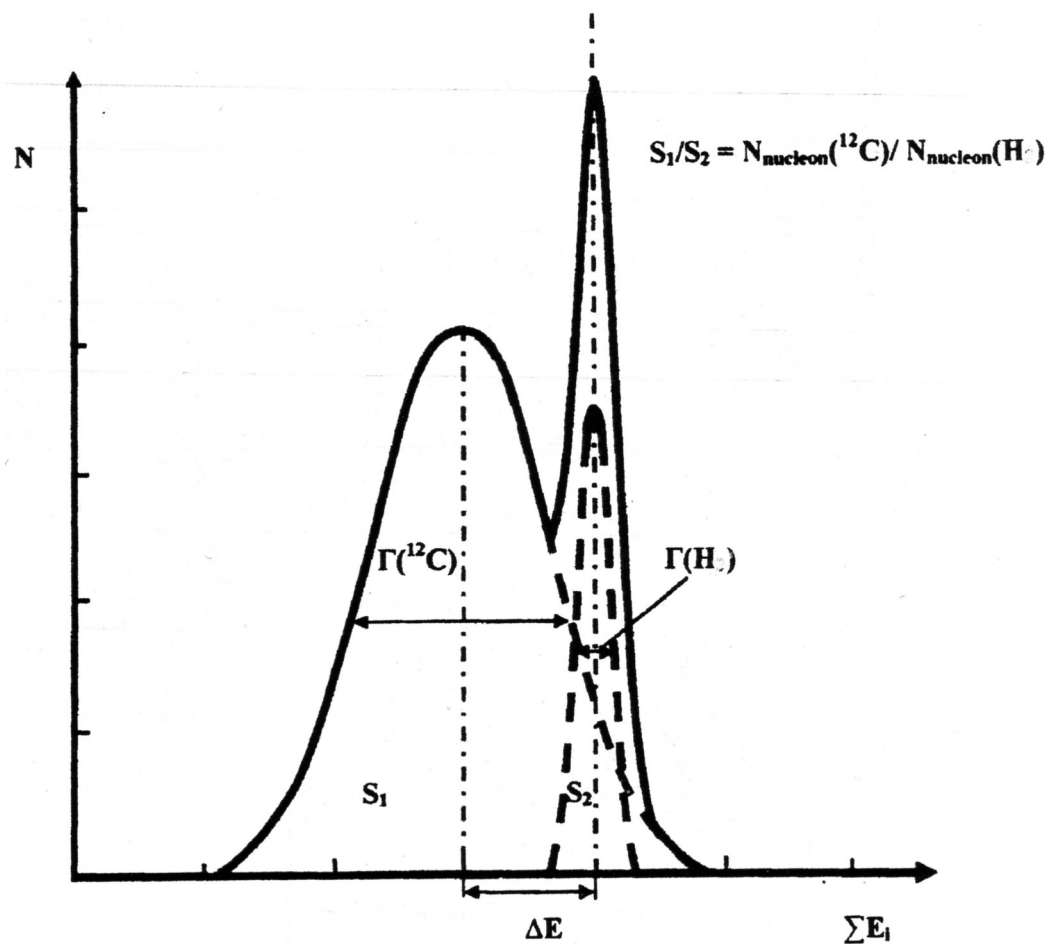


Рис. 2 Ожидаемый энергетический спектр по суммарной энергии ΣE_1 частиц от распада мезона, возникающего в результате рождения на ядерном нуклоне ядра ^{12}C или на ядре H в составной мишени CH_2 (из [3])

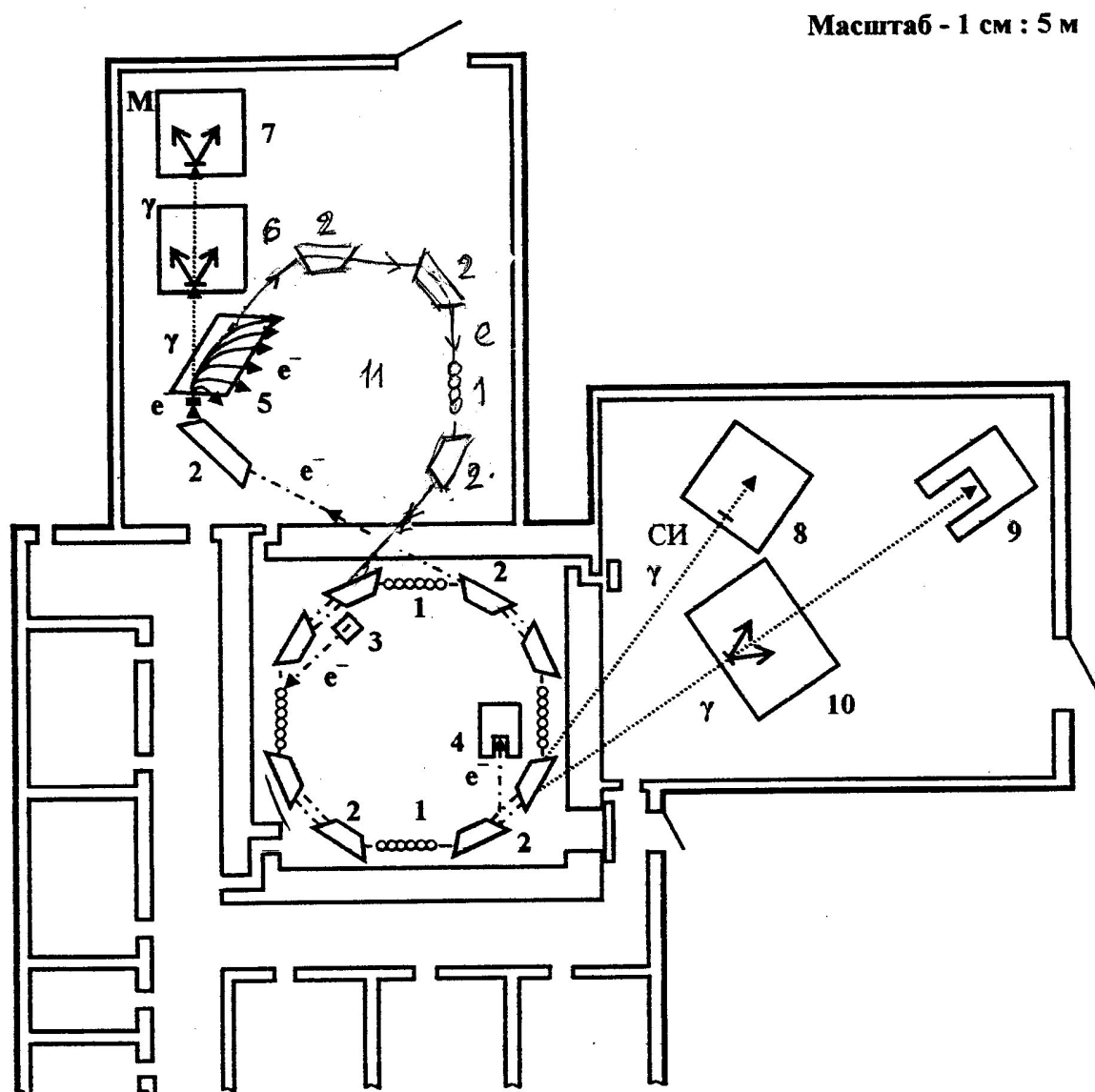


Рис. 3. Схема размещения ускорителя электронов на основе криогенных структур и экспериментальных установок в залах ускорительного комплекса ФИАН в г. Троицке

1- ускоряющие ВЧ структуры, 2- магнитные линзы, 3- инжектор электронов, 4- “могильник” e^- пучка, 5- система мечения γ – квантов, 6- экспериментальная установка, 7- система мечения мезонов, 8- установка для СИ пучков, 9- “могильник” для γ - пучка, 10 - установка для экспериментов с тормозным γ -спектром

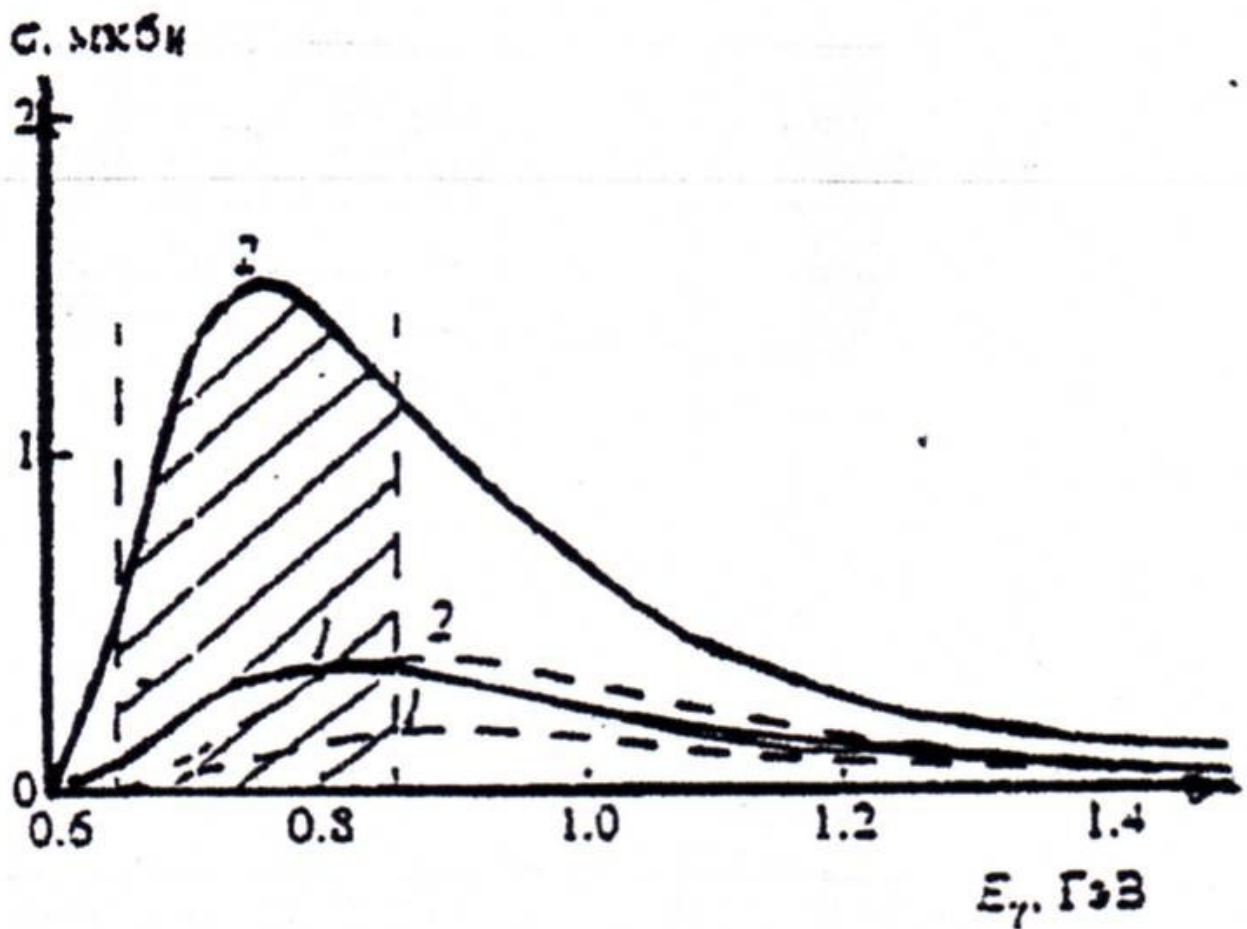


Рис. 4. Зависимость полных сечений фоторождения η - ядер на углеродной (1) и на кислородной (2) мишенях от энергии γ - квантов (из [9])

----- реакция на s – оболочечных нуклонах
 _____ реакция на нуклонах p - оболочки

вероятность

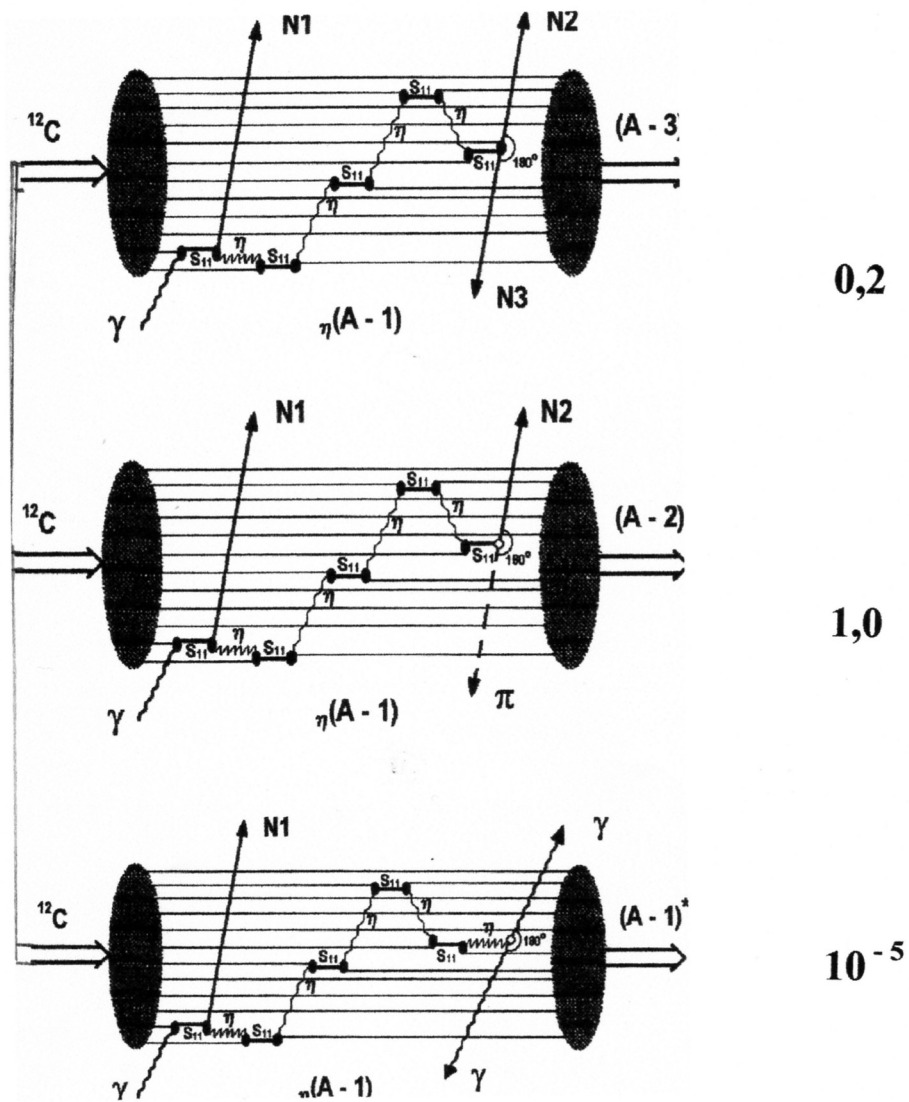


Рис. 5. Схема образования η – мезонного ядра в γA - реакции, его эволюция и распад по NN , πN и $\gamma\gamma$ - каналам

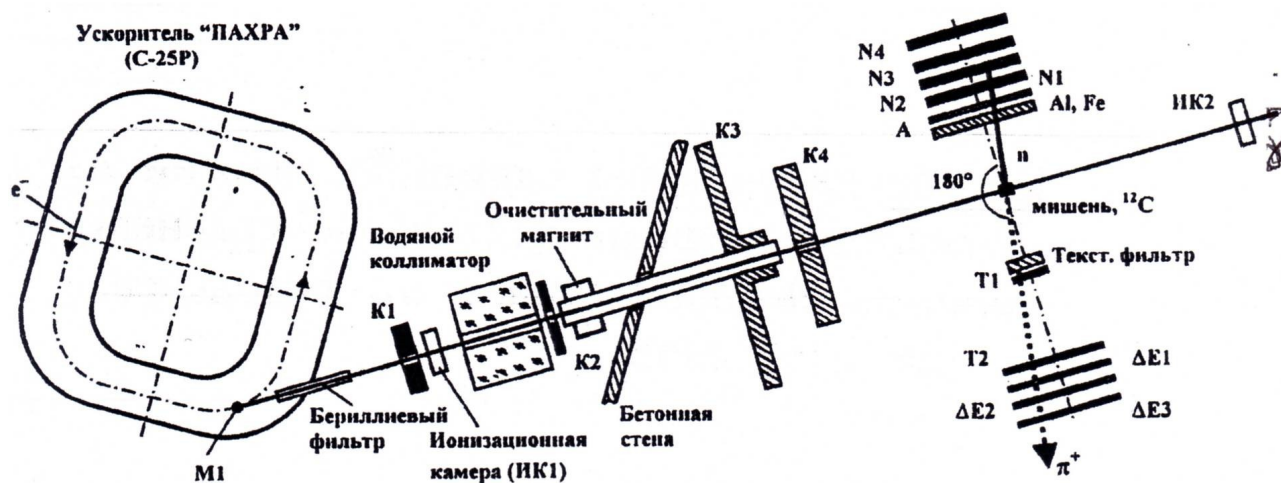


Рис. 6. Схема вывода и пространственного формирования γ - пучка синхротрона ФИАН и схема расположения двухплечевой установки для исследования эта(η)-мезонных ядер.

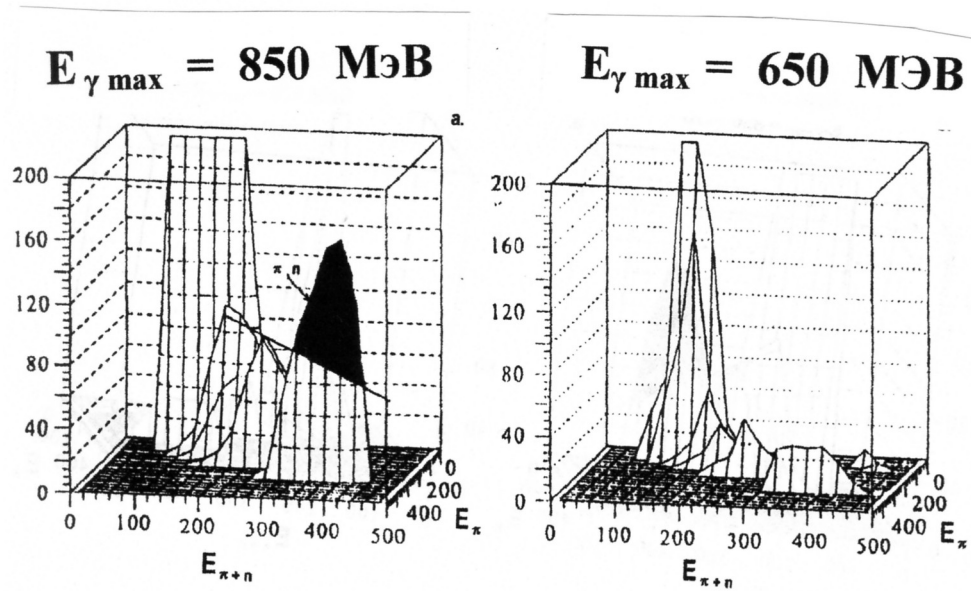


Рис. 7. Двухмерное распределение коррелированных (π^+, n) -пар, возникающих от распада S_{11} -резонанса внутри эта(η)- мезонного ядра, в зависимости от энергий $E(\pi^+)$ и $E(\pi^+ + n)$

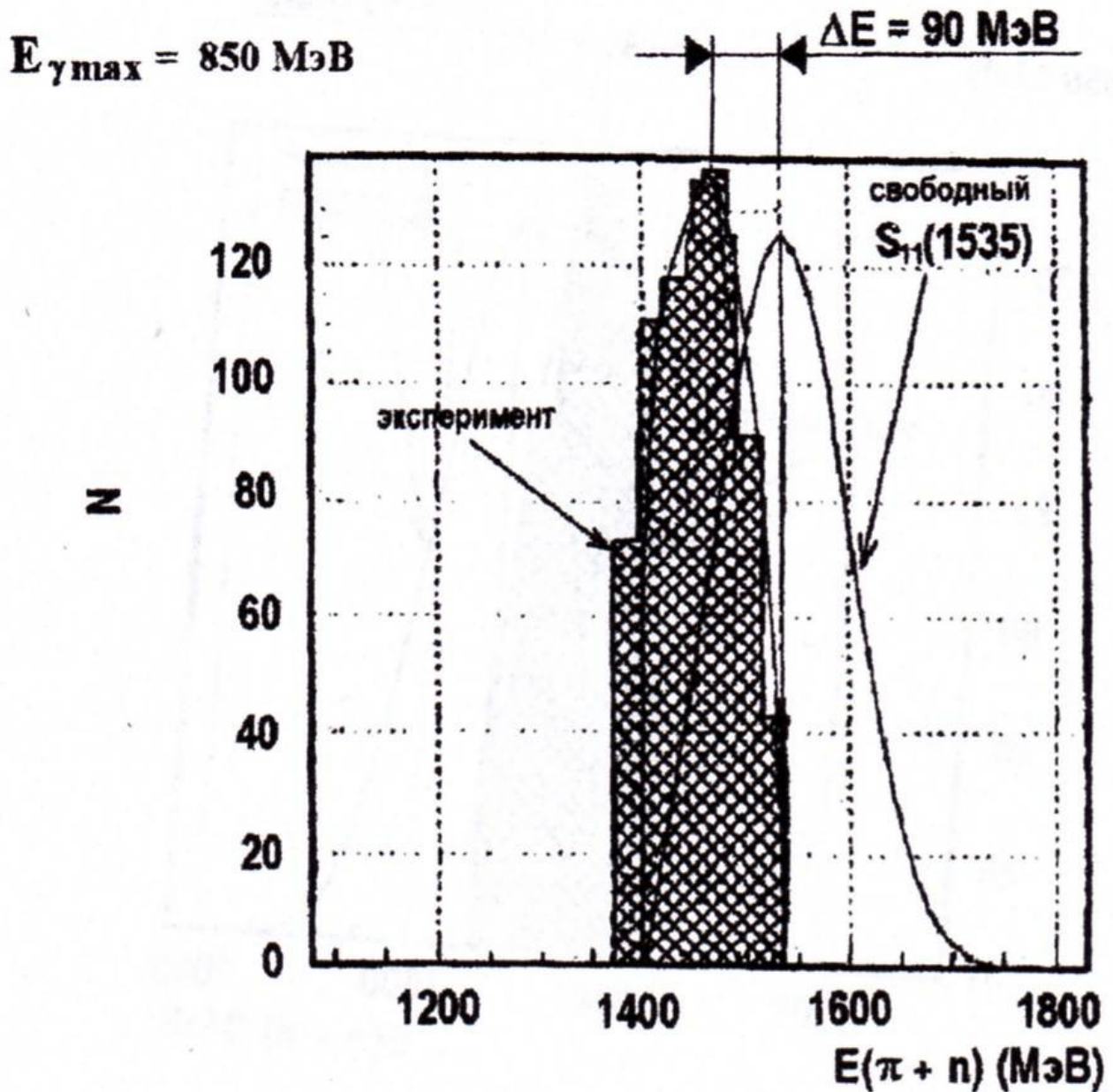


Рис. 8 Экспериментальное распределение по суммарной энергии $E = E_{\pi^+} + E_n$ продуктов распада S_{11} – резонанса внутри эта(η)-мезонного ядра в сравнении с распадом свободного S_{11} – резонанса (результат вычитания спектра при $E_\gamma = 650 \text{ МэВ}$ из спектра при $E_\gamma = 850 \text{ МэВ}$)