

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**



*имени
П. Н. Лебедева*

Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

Г.А. СОКОЛ

21

**ФИЗИКА η -МЕЗОННЫХ ЯДЕР:
ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА**

МОСКВА 2005

Физика η -мезонных ядер: вчера, сегодня, завтра*)

Г.А. Сокол

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

e-mail:gsokol@sgi.lpi.msk.su

Аннотация

Представлен обзор состояния экспериментальных исследований η -мезонных ядер - нового типа ядерно-связанной системы адронов.

Physics of η -mesic nuclei: Yesterday, today, tomorrow

G.A. Sokol

Lebedev Physical Institute RAS

e-mail:gsokol@sgi.lpi.msk.su

Abstract

Status of experimental investigations of η -mesic nuclei, a new kind of nuclear bound systems of hadrons, is given.

*) Доклад, представленный на Рабочем совещании по проекту "Поиск и исследование η -мезонных ядер в pA - реакции на Нуклотроне ЛВЭ ОИЯИ", Дубна, ЛВЭ ОИЯИ, 26 мая 2005 года.

1. Введение

Работа посвящена, в основном, η -мезонным ядрам и лишь кратко будут упомянуты исследования, связанные с обнаружением K^- и ω -ядерно-связанных состояний.

Возникновение нового направления исследований в ядерной физике, физики мезонных ядер, связано, условно, с работой R.S. Bhalerao и L.C. Liu [1], в которой впервые было рассчитано значение $a_{\eta N}$ -длины рассеяния η -мезона и нуклона. Реальная часть длины рассеяния $\text{Re}a_{\eta N}$ оказалась положительной и это означало притяжение между η -мезоном с $E_{\text{кин}} = 0$ и нуклоном. В дальнейшем было показано [2], что притяжение реализуется и для η -мезонов со значениями кинетической энергии $E_{\text{кин}}(\eta)$ до 50 МэВ.

Таким образом, η -мезонные ядра, ${}_{\eta}A$, - это ядерно-связанная система медленного η -мезона ($T_{\eta} \leq 50$ МэВ) и ядра A .

То, что медленный η -мезон и нуклон могут образовывать ядерно-связанную систему, свидетельствует и существование $S_{11}(1535)$ нуклонного резонанса. Известно, что $S_{11}(1535)$ -резонанс имеет полную ширину $\Gamma(S_{11}(1535)) \approx 150$ МэВ и время жизни его равно:

$$\tau(S_{11}) \approx \frac{2\hbar}{\Gamma} = \frac{2 \cdot 6,58 \cdot 10^{-25} [\text{ГэВ} \cdot \text{сек}]}{150 \cdot 10^{-3} [\text{ГэВ}]} = 0,88 \cdot 10^{-23} \text{ сек}$$

$S_{11}(1535)$ распадается по $S_{11} \rightarrow \eta N$ или $S_{11} \rightarrow \pi N$ каналам с примерно равной вероятностью ($\approx 50\%$) (см. Data Table [3]).

Особенностью $S_{11}(1535)$ -резонанса является то, что значение энергии, соответствующее сумме масс η -мезона и нуклона, $E_{\text{min}}(\eta N) = m_{\eta} + m_N$, расположено внутри резонанса (по энергетической шкале).

Поэтому можно предположить, что медленный η -мезон, находясь в ядре будет образовывать $S_{11}(1535)$ -резонанс в результате $\eta N \rightarrow S_{11}$ -реакции за время $\tau(\eta N \rightarrow S_{11}) \approx 1,7 \cdot 10^{-23}$ сек (для $\Gamma(\eta N \rightarrow S_{11}) = 75$ МэВ). За такое же время $S_{11}(1535)$ -резонанс может распасться по $S_{11} \rightarrow \eta N$ -каналу.

Таким образом, с учетом образования и распада $S_{11}(1535)$ -резонанса внутри ядра η -мезонное ядро следует рассматривать как ядерную систему, в которой присутствует либо η -мезон, либо S_{11} -резонанс (рис. 1).

Как отметил В.И. Ритус [4], в этом случае η -мезонное ядро можно рассматривать как "ядерный резонатор", совершающий колебания (переходы $S_{11} \leftrightarrow \eta N$). Такой ядерный резонатор обладает "плохой" добротностью, т.к. вскоре после нескольких ($3 \div 5$) переходов $S_{11} \leftrightarrow \eta N$ S_{11} -резонанс в ядре обязательно распадется по $S_{11} \rightarrow \pi N$ каналу и "резонатор" прекратит свое существование.

Время жизни такого η -мезонного ядра может составить

$$\tau(\eta A) \approx 1,7 \cdot 10^{-23} \cdot 10 \approx 17 \cdot 10^{-23} \text{ сек}$$

(если предположить, что реализуется 5 колебаний $S_{11} \leftrightarrow \eta N$). Это время почти в 20 раз превышает так называемое "ядерное время" ($\tau_{\text{яд}} \approx 10^{-23}$ сек) - время пролета релятивистской частицы через ядро.

Однако, несмотря на то, что η -мезон и $S_{11}(1535)$ -резонанс "присутствуют" в ядре примерно одинаковое время, в литературе такая ядерная система попрежнему носит название "эта-мезонное ядро", предложенное в [5].

2. Проблемы

Можно сформулировать ряд основных проблем физики эта-мезонных ядер:

- Какова сила взаимодействия η -мезона с нуклоном?
- Какова сила взаимодействия η -мезона с ядром?
- Могут ли существовать η -мезонные ядра ${}_{\eta}A$, и начиная с какого минимального A ?
- Каково влияние ядерной материи на характеристики η -мезона и $S_{11}(1535)$ резонанса в ядре (эффективная масса, вероятность распада)?
- Как определить из эксперимента характеристики ηN и ηA взаимодействия и характеристики собственно η -мезона и S_{11} -резонанса в ядре (уровни энергий $E_g(\eta)$ и $E_g(S_{11})$ и их

ширины $\Gamma(\eta)$ и $\Gamma(S_{11})$)?

Эти и другие вопросы сразу возникли при первом обращении физиков (теоретиков и экспериментаторов) к проблеме η -мезонных ядер.

В работе J.C. Peng [6] было отмечено, что для образования η -мезонных ядер необходимо выполнение по крайней мере 2-х условий:

- $a_{\eta N}$ - длина ηN -рассеяния - должна иметь $\text{Re } a_{\eta N} > 0$, что означает, что потенциал ηA -взаимодействия $V_{\eta A}(r)$ будет обладать характером притяжения:

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

где c - положительная величина (рис. 2)

- время пребывания η -мезона в ядре должно быть достаточно длительным, в несколько раз больше $\tau_{\text{яд}}$ (10^{-23} сек), чтобы взаимодействие смогло реализоваться. Это означает, что в образовании η -ядер участвуют в основном медленные η -мезоны.

Измерить $a_{\eta N}$ непосредственно в $\eta N \rightarrow \eta N$ -процессе не представляется возможным, т.к. из-за чрезвычайно малого времени жизни η -мезона ($\tau_{\eta} \sim 5 \cdot 10^{-19}$ сек), нельзя создать η -мезонные пучки.

Определение $a_{\eta N}$ возможно и осуществляется из анализа элементарных процессов рождения π и η мезонов на нуклонах и учета взаимодействия ηN в конечном состоянии этих реакций. В настоящее время существует около 20 работ, в которых вычислялись значение $a_{\eta N}$. В результате имеется широкий спектр значений $a_{\eta N}$, где $\text{Re } a_{\eta N}$ различаются в 3÷4 раза (от 0,27 - до 1,0 fm) (Таблица $a_{\eta N}$).

Чрезвычайно важной является проблема выяснения влияния ядерной среды на характеристики адронов. Результаты прямо связаны с проблемой выяснения природы происхождения масс элементарных частиц и широко дискутируются в различных работах, связанных с киральной симметрией [7].

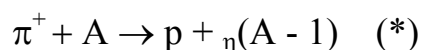
После первых теоретических работ по η -мезонным ядрам стало ясно, что необходим эксперимент по обнаружению η -мезонных

ядер и определения характеристик η N-взаимодействия, а также исследование изменения характеристик η -мезона и S_{11} -резонанса в ядерной среде.

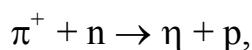
3. "Вчера"

В этой части доклада рассмотрим кратко результаты экспериментальных и некоторых теоретических работ, выполненных по тематике η -мезонных ядер за прошедшие 20 лет со дня публикации работы [1].

В 1986 году появилась работа Лиу, Хайдера [5], посвященная теоретическому обоснованию возможности формирования η -мезонных ядер в π^+A -реакции:



В этой работе рассматривался элементарный процесс



для которого при $E(\pi^+) \approx 700$ МэВ реализовывалось условие безотдачной кинематики, т.е. $\bar{p}_\eta = 0$.

Расчет проводился со значением длины рассеяния $a_{\eta N} = [(0,27 + i \cdot 0,22)]\text{fm.}$, имеющимся в литературе к тому времени.

В этой работе Лиу, Хайдера был предложен эксперимент по обнаружению η -мезонных ядер. В эксперименте предлагалась регистрация протонов p из реакции (*) под углом $\langle \Theta \rangle = 15^\circ$. Утверждалось, что в случае образования связанного состояния η -мезона и ядра A в эксперименте должен наблюдаться кинематический пик для таких протонов. Ширина кинематического пика p ($\Gamma_p \sim 9$ МэВ) должна была характеризовать ширину уровня η -мезона в η -ядре.

Следует отметить, что в работе [5] не учитывалось ферми-распределение нуклонов в ядре мишени и его влияние на энергию и ширину пика протонов.

Сразу же после появления работы [5] был выполнен первый эксперимент по поиску η -ядер в 1988 году, проведенный в Брукхейвене (BNL) на π^+ -пучке [8], а также эксперимент в Лос-Аламосе, (который не был окончен) [9].

Эксперимент в BNL дал отрицательный результат: ни для какой мишени (Li, C, O, Al) кинематический пик протонов под $\theta_p = 15^\circ$ не был обнаружен.

Авторы эксперимента [8] сделали из своих измерений заключение, что η -мезонные ядра не существуют, хотя реально они не были обнаружены в этом эксперименте из-за очень малого соотношения эффект/фон, ($\ll 1$) и сильной возможной "размазке" пика из-за ферми-распределения нуклонов в ядре-мишени.

В 1991 году появилась теоретическая работа А.И. Лебедева и В.А. Трясучева [10], где была дана оценка сечения фоторождения η -ядер в γ A-реакции для ^{12}C и ^{16}O -ядер. Величина полного сечения σ_t оказалась равной $\sigma_t \sim 1$ мкбн и сечение имело резонансный характер по энергии (рис. 3).

В 1991 году была выполнена работа Г.А. Сокола, В.А. Трясучева [11], в которой предлагалась модель формирования, эволюции и распада η -мезонных ядер. Модель основана на предположении о возникновении нескольких последовательно образующихся и затем распадающихся $S_{11}(1535)$ -резонансов в η -мезонном ядре :



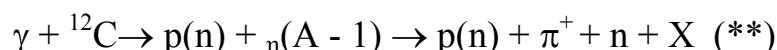
Эта последовательность заканчивается распадом на πN -пару.

На основе развитой модели был предложен метод наблюдения и идентификации η -мезонных ядер. Метод состоял в регистрации πN -пар от распада $S_{11}(1535)$ -резонанса ($S_{11} \rightarrow \pi N$) в ядре. Характерная особенность предложенного метода состояла в том, что (πN)-пары оказывались коррелированными по энергиям и углу разлета компонент пары:

$$\langle E_\pi \rangle = 300 \text{ МэВ}, \quad \langle E_N \rangle = 100 \text{ МэВ}, \quad \langle \Theta_{\pi N} \rangle = 180^\circ$$

поскольку происходил распад покоящегося S_{11} -резонанса (рис. 4, 5, 6).

В 1994 году в ФИАНе началась подготовка эксперимента по обнаружению η -мезонных ядер и в 1998-1999 годах был получен положительный результат по поиску η -мезонных ядер в процессе фоторождения, в реакции:



Обнаружение η -мезонных ядер в реакции (**) явилось первым результатом в этой новой области мезон-ядерной физики.

Эксперимент был осуществлен на тормозном γ -пучке 1 ГэВ синхротрона ФИАН [12, 13]. Измерения велись при 2-х энергиях

края спектра тормозного излучения $E_{\gamma\max}$ 650 и 850 МэВ, ниже и выше порога фоторождения η -мезонов на нуклоне ($E_{\gamma\text{порог}} = 710$ МэВ). Для $E_{\gamma\max} = 850$ МэВ был обнаружен резонансный пик в выходе $(\pi^+ n)$ -пар для $\langle\Theta_{\pi n}\rangle = 180^\circ$. Пик отсутствовал при $E_{\gamma\max} = 650$ МэВ и при $\langle\Theta_{\pi n}\rangle = 100^\circ$ (рис. 7).

Оценивая работу [12] можно сказать, что кроме самого факта обнаружения η -ядер, в ней впервые были образованы $S_{11}(1535)$ -резонансы в результате взаимодействия η -мезонов с нуклонами ($\eta N \rightarrow S_{11}$). Такое взаимодействие можно рассматривать как аналог прямой реакции $\eta N \rightarrow S_{11}$. Такой процесс невозможно реализовать в обычных стандартных условиях из-за отсутствия пучков η -мезонов и реализация его оказалось возможным только в η -ядрах.

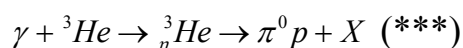
В этом же эксперименте впервые было обнаружено влияние ядерной среды на изменение эффективной массы S_{11} -резонанса. Эффективная масса $S_{11}(1535)$ резонанса в ядре, измеренная путем регистрации $(\pi^+ n)$ -пары, возникающей в результате распада $S_{11} \rightarrow \pi^+ n$, оказалась меньше значения $\Sigma m = m_\eta + m_N = 1485$ МэВ на 40 ± 15 МэВ (рис. 8). Этот результат прямо указывает на уменьшение эффективной массы системы взаимодействующих частиц, η -мезона и нуклона, что свидетельствует об их ядерном взаимодействии.

В планах ФИАН намечено продолжение экспериментов на тормозном пучке синхротрона ФИАН "ПАХРА" по физике эта-мезонных ядер. Предполагается измерение A -зависимости сдвига $\Delta E(S_{11})$ для ядер ^{16}O , ^{27}Al , ^{64}Cu .

Другим направлением исследований предполагается изучение $S_{11} \cdot N \rightarrow NN$ -реакции в η -ядре. Эта-ядра рассматриваются в этом случае как уникальная естественная лаборатория для изучения взаимодействия короткоживущей частицы (S_{11} -резонанса) с нуклоном. В предлагаемом эксперименте может быть реализована реакция $S_{11}^+ + p \rightarrow p + p$, для которой $\langle E_p \rangle \approx 300$ МэВ и $\langle\Theta_{pp}\rangle = 180^\circ$.

Весьма интересная трактовка возникновения $S_{11}(1535)$ резонанса как квази-связанное К Σ -КЛ состояние, изложена в работе [23].

В **2003** году был получен положительный результат (второй в физике η -ядер) по обнаружению η -мезонных ядер в реакции:



Эксперимент был проведен на установке МАМИ-2 (Майнц) [14].

В эксперименте был использован метод идентификации η -ядер, разработанный в ФИАНе [11]: регистрировались $(\pi^0 p)$ -события под углом $\langle \Theta_{\pi^0 p} \rangle \approx 170^\circ$, возникающие при распаде $S_{11}(1535)$ резонанса в ${}^3_\eta\text{He}$ -ядре (рис. 9).

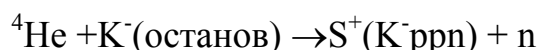
Эксперименты в ФИАНе и Майнце имеют принципиальное различие:

- в ФИАНе регистрируется распад **покоящегося** η -ядра и поэтому выбирается $\langle \Theta_{\pi^0 p} \rangle = 180^\circ$.
- в Майнце регистрация $\pi^0 p$ -пар происходит для **движущегося** ${}^3_\eta\text{He}$ -ядра и поэтому $\langle \Theta_{\pi^0 p} \rangle \approx 170^\circ$.

Такое различие возникает вследствие того, что в реакции (***) весь импульс γ -кванта \vec{p}_γ передается возникающему ${}^3_\eta\text{He}$ -ядру. Формфактор $F(g)$ для ${}^3\text{He}$ при этом составляет 10^{-2} и это обуславливает малый выход реакции (***)

В ФИАНе, в реакции (**) импульс γ -кванта \vec{p}_γ уносится вылетающим из η -ядра нуклоном и $F(g) \approx 1$.

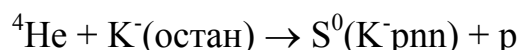
В **2003** году появилось сообщение [20] о наблюдении сильно связанной каонной системы (K^-ppn), возникающей в реакции с остановившимся K^- -мезоном:



Тринуклон S^+ возникал в виде резонансного пика в спектре недостающей массы при измерении энергии вылетающих нейтронов.

Энергия связи K^- -мезона в таком странном трибарионе S^+ оказалась равной $B_{K^-ppn} \approx 170$ МэВ.

В **2004** году появились данные о наблюдении нейтрального странного трибариона $S^0(K^-ppn)$ в реакции:

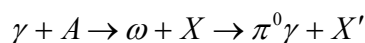


Здесь также наблюдался резонансный пик при измерении энергии протонов.

Эксперимент проводился в КЕК (Япония) на пучке K^- -мезонов [21], [22] (рис. 10).

В 2005 году появилось сообщение о первом наблюдении влияния ядерной среды на характеристики ω -мезона. Эксперимент был проведен на установке Crystal Barrel/TAPS с мечеными γ -квантами в ELSA Bonn-центре (Германия)[15].

Изучалась реакция



для жидководородной LH_2 и Nb-мишеней.

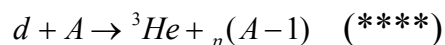
Для Nb-мишени наблюдался сдвиг в эффективной массе ω -мезона, измеренной по $\pi^0 \gamma$ распаду. Значение эффективной массы оказалось равным: $M_{\text{среда}}(\omega) = 722 \pm 2$ МэВ для ω -мезонов с импульсом $\vec{p}_\omega < 500$ МэВ/с. Табличное значение $M(\omega) = 782 \pm 0,3$ МэВ. Этот результат можно рассматривать как первое наблюдение ω -ядер (рис. 11).

Заканчивая этот раздел, можно сказать, что появившиеся к настоящему времени экспериментальные работы [12, 13, 14, 15] дают неоспоримое свидетельство существования не только η , но и ω - и K-мезонных ядер. Это обстоятельство стимулирует появление как новых предложений по эксперименту не только с γ -, но и с пучками частиц, а также появление новых теоретических работ по мезонным (σ , K, η , ω , η')-ядрам.

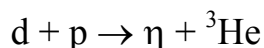
4. "Сегодня"

В этой части работы рассмотрим предложения по поиску η -мезонных ядер на пучках частиц.

- Существует проект по поиску η -ядер в (d , ${}^3\text{He}$) реакции в Дармштадте, на SGI-установке (Германия) [16]:



Для формирования η -ядер используется условие безотдачной кинематики в элементарном процессе:



Для $E_d = 3,6$ ГэВ η -мезон рождается с $\vec{p}_\eta = 0$ в лаб. системе и остается в ядре. Падающий дейтрон "подхватывает" протон, на котором рождается η -мезон, и образует ${}^3\text{He}$ -ядро, которое вылетает из ядра-мишени и регистрируется соответствующей системой.

Следует отметить, что условие безотдачной кинематики будет нарушаться при взаимодействии дейтона с ядерным протоном из-за ферми распределения нуклонов в ядре. Это приводит к "размазке" возникающего ${}^3\text{He}$ по углу вылета и по импульсу.

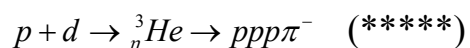
Проект предложен в 1998 году но до сих пор в литературе нет результатов.

В этом проекте намечалось определение $a_{\eta N}$ путем сравнения получаемых в эксперименте энергетических распределений ${}^3\text{He}$ -ядер с теоретическими распределениями для разных значений $a_{\eta N}$ (рис. 12).

Вполне возможно, что эксперимент пока не дал результатов из-за трудности выделения событий реакции (****) на очень большом фоне других реакций. Одной из таких фоновых реакций является диссоциация падающего пучка дейтронов (примерно в $\sim 30\%$ случаев от полного числа дейтронов $N(d)$). Возникающий при этой диссоциации протон обладает импульсом $\vec{p}(p) = \vec{p}({}^3\text{He})$ и практически не может быть отделен от ${}^3\text{He}$ с помощью магнитной системы. Именно поэтому в [16] для выделения ${}^3\text{He}$ -ядер предполагается использовать масс-сепаратор.

Реализация эксперимента [16] осложняется очень малой величиной сечения реакции (****), поскольку она проводится в условиях безотдачной кинематики, что требует значительных энергий первичного пучка дейтронов. При этих энергиях $E(d)$ роль $S_{11}(1535)$ резонанса практически не проявляется, а сечение "подхвата" очень мало.

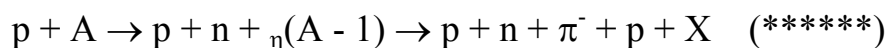
- Существует проект по поиску η -ядер в реакции:



предложенный в 1999 году [17]. Эксперимент планируется выполнить в Юлихе на установке COSY (рис. 13).

В литературе пока нет результатов этого эксперимента.

- В 2004 году в Дубне предложен проект по поиску η -ядер в реакции:



Эксперимент предполагается осуществить на внутреннем протонном пучке нуклотрона ЛВЭ ОИЯИ [18]. Проект одобрен Програмным Комитетом ОИЯИ и намечено его поэтапное осуществление в 2005-2007 годах (рис. 14).

Отметим особенности этого Проекта:

- триггером является регистрация 4-х частиц и это создает уверенность в идентификации (*****) процесса и возможность его выделения на достаточно высоком уровне фона,
- проведена экспериментальная оценка фона случайных совпадений на р-пучке нуклотрона в рА-реакции для выбранного триггера,
- проведено моделирование фоновых процессов и эффективности регистрации (*****) процесса в зависимости от числа регистрируемых частиц в триггере,
- осуществлена оценка вклада случайных событий исходя из данных по $p^{12}\text{C}$ -реакции в пропановой камере. Эта процедура была предложена С.А. Хорозовым. По этой оценке получено верхнее значение интенсивности исходного р-пучка нуклотрона: интенсивность не должна превышать $I_n \leq 10^9$ р/цикл, что обеспечивает работу всех детекторов без перегрузок.

Предполагается проведение эксперимента при энергиях р-пучка E_p в области $\Delta E(p) = (1,0 \div 2,0)$ ГэВ, т.е. в области возникновения $S_{11}(1535)$ резонанса в 1-ой стадии формирования η -ядер в результате элементарного процесса $pn \rightarrow S_{11}^0 p \rightarrow \eta p$. Это обстоятельство увеличивает сечение процесса в ~ 5 раз по сравнению с тем, когда используется энергия $E_p \sim 3$ ГэВ и $S_{11}(1535)$ резонанс не проявляется. В Проекте Дубны [18] учитывается, что сечение рождения η -мезонов в рп-взаимодействии значительно больше, чем в рр-взаимодействии. Именно поэтому в триггере события (*****)-реакции используются (рп)-частицы (рис. 15).

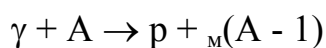
Как следует из вышеуказанного материала в настоящее время имеется по крайней мере 4 центра (Дармштадт, Юлих, Дубна, Бонн), где могут быть получены результаты по обнаружению и исследованию η -ядер на пучках частиц уже в ближайшее время.

5. "Завтра"

В этом разделе отметим работы, в основном теоретического характера, в которых отмечаются возможности изучения различных мезонных ядер как в γA , так в рА или dА-реакциях.

- Отметим предложение по изучению мезонных ($2\pi(\sigma)$, η , η' , ω) ядер в (γp)-реакции в OSAKA (Япония) на установке Spring-8 [19].

Предлагается регистрация только протонов p из реакции образования мезонных ${}_M(A-1)$ ядер:



в условиях безотдачной кинематики (как в BNL [8]). Для каждого мезона (M), естественно, используется своя энергия γ -квантов, необходимая для реализации условия безотдачной кинематики.

Такая постановка эксперимента характеризуется относительно малым сечением (поскольку реакция осуществляется вне области $S_{11}(1535)$ -резонанса) и высоким фоном, т.к. регистрируется только 1 частица. Как показывает опыт BNL [8] необходимо иметь более сильный триггер для выделения случаев образования мезонных ядер.

- Выше уже отмечались результаты по изучению ω -ядер в ELSA/Bonn центре [15] с использованием Crystal Barrel/TAPS установки. В этом центре предполагается продолжение изучения влияния ядерной среды на другие мезоны.

- Предполагается развитие исследований η -ядер в dA -реакции в ЛВЭ (Дубна) на Нуклотроне ОИЯИ. Переход к d -пучку может обеспечить увеличение выхода в 2 раза при тех же условиях проведения эксперимента, поскольку будут реализованы как ($p n$), так и ($n p$) каналы взаимодействия первичных нуклонов d -пучка с нейтронной и протонной частью ядра-мишени.

- Интересным направлением может оказаться экспериментальное исследование двойных $\eta\eta A$ -ядер в $A_1 A_2$ -реакции на внутреннем пучке Нуклотрона ОИЯИ (Дубна).

Оценка дает выход двойных $\eta\eta$ -ядер $Y(\eta\eta A) \approx 20$ соб/час для реакции ${}^{64}\text{Cu} + {}^{64}\text{Cu} - \text{с } (\pi^- p)\text{-детектором с } \Omega(\pi^-, p) \approx 1 \text{ sterad}$ и толщиной $\text{Cu-мишени } \Delta x = 100 \mu\text{к}$, при интенсивности первичного $\text{Cu-пучка } \text{Int}(\text{Cu}) = 10^9 \text{ ядер/цикл}$.

Экспериментальная оценка амплитуды $f(\eta\eta)$ - $\eta\eta$ -взаимодействия важна для уточнения эффективного Лагранжиана нуклон-нуклонного взаимодействия.

- Двойные $\eta\eta A$ -ядра можно попытаться выделить в уже имеющихся данных по ядро-ядро взаимодействиям при энергиях \sim

(1-2) ГэВ/нуклон. Выделение таких случаев можно осуществить путем наблюдения коррелированных по углу $\langle\Theta_{\pi N}\rangle$ и энергиям E_{π} и E_N компонент πN -пары, как это осуществлялось в работе [12, 13].

В итоге можно сделать вывод о возросшем интересе к проблеме мезонных ядер в последние несколько лет и о расширяющихся перспективах проведения экспериментальных исследований в этой новой области мезон-ядерной физики.

Автор благодарен С.В. Афанасьеву, М.Х. Аникиной, А.И. Лебедеву, А.И. Львову, Е.М. Лейкину, А.И. Малахову, Л.Н. Павлюченко, В.И. Ритусу, А.П. Юдину и С.А. Хорозову за плодотворные обсуждения и замечания по ряду вопросов, затронутых в настоящем обзоре, а также Л.И. Горячевой за помощь в подготовке текста.

Литература.

- [1] R.S. Bhalerao and L.C. Liu
Off-shell model for threshold pionic η -production on a nucleon and for ηN -scattering.
Phys. Rev. Lett. 54, № 9, 865 (1985)
- [2] A.M. Green and S. Wycech
The η -nucleon scattering length and effective range
Phys. Rev. C 55, R2167, (1997)
- [3] Review of particle physics
C. Caso et al. The European Physical Journal C3 (1998)
- [4] В.И. Ритус - частное сообщение
- [5] L.C. Liu and Q. Haider
Signature for the existence of eta-mesic nuclei
Phys. Rev. C 34, № 5, 1845 (1986)
- [6] J.C. Peng
Experiments on η -meson production
AIP Conference Proceedings, № 133, 255-271 (1985)
- [7] T. Hatsuda and T. Kunihiro
QCD-phenomenology based on a chiral effective lagrangian
Phys. Rep. V. 247, 241 (1999)

- [8] R.E. Chrien et al.
Search for bound states of the η -meson in light nuclei
Phys. Rev. Lett. 60 № 25, 2595 (1988)
- [9] B. Lieb, L.C. Liu
Search for nuclear bound states of the η -meson
LA-11670-PR, Progress Report (1988), Progress of LAMPF.
- [10] A.I. Lebedev, V.A. Tryasuchev
Cross section for production of η -nuclei by photons
J. Phys. G. Nucl. Part. Phys. 17, 1197 (1991)
- [11] Г.А. Сокол, В.А. Трясучев
Возможный метод наблюдения η -ядер
КСФ ФИАН [Sov. Physics - Lebedev Institute Report]
№ 4, 23 (1991)
- [12] G.A. Sokol et al.
Search for η -mesic nuclei in photoproduction processes
Fizika B (Zagreb) 8 № 1, 85-90 (1999)
- [13] Г.А. Сокол и др.
Обнаружение η -мезонных ядер
Письма в ЭЧАЯ № 5 (102), 71 (2000)
- [14] M. Pfeiffer et al.
Photoproduction of η -mesic ^3He
arXiv: nucl-ex/0312011
- [15] D. Trnka et al.
First observation of in-medium modifications of the ω -meson
arXiv: nucl-ex/0504010 v.2 13 Apr. 2005
- [16] R.S. Hayano, S. Hirenzaki, A. Gillitzer
Formation of η -mesic nuclei using the recoilled (d, ^3He) reaction
arXiv: nucl-th/9806012 1998
- [17] M. Betigeri et al.
Measurement of $p d \rightarrow ^3\text{He} \eta$ in the S_{11} -resonance
arXiv: nucl-ex/9912006 v.2 1999
- [18] M.Kh. Anikina et al.
Search for and study of η -mesic nuclei in pA-collisions at
JINR LHE nuclotron
arXiv: nucl-ex/0412036 v.2 23 Dec. 2004
- [19] H. Nagahiro, D. Jido and S. Hirenzaki
Formation of mesic nuclei by (γp) reaction
arXiv: nucl-th/0504081 v.1 2005
- [20] M. Iwazaki et al.
Evidence for a strongly bound kaonic system
 K^-ppn in the ^4He (stopped K^- , n) reaction.
arXiv: nucl-ex/0310018 v1 2003

- [21] M. Iwazaki et al.
Indication of a strange tribarion S^+ from the ^4He
(stopped K^- , n) reaction.
arXiv: nucl-ex/0310018 v2 2004.
- [22] T. Suzuki et al.
A search for deeply bound kaonic states
arXiv: nucl-ex/0501013 v1 2005
- [23] N. Kaiser, P.B. Siegel, N. Weise
Chiral dynamics and the $S_{11}(1535)$ nucleon resonance
Phys. Letters B 362, 23 (1995)

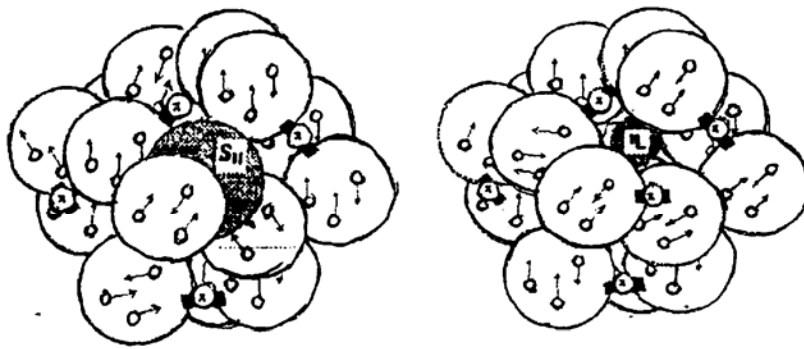


Рис. 1 Два состояния η -мезонного ядра: с η -мезоном в ядре (справа) или $S_{11}(1535)$ нуклонным резонансом внутри ядра (слева). Оба состояния переходят друг в друга за время $\Delta\tau \cong 0,8 \cdot 10^{-23}$ сек вследствие процесса $\eta N \rightarrow S_{11} \rightarrow \eta N$.

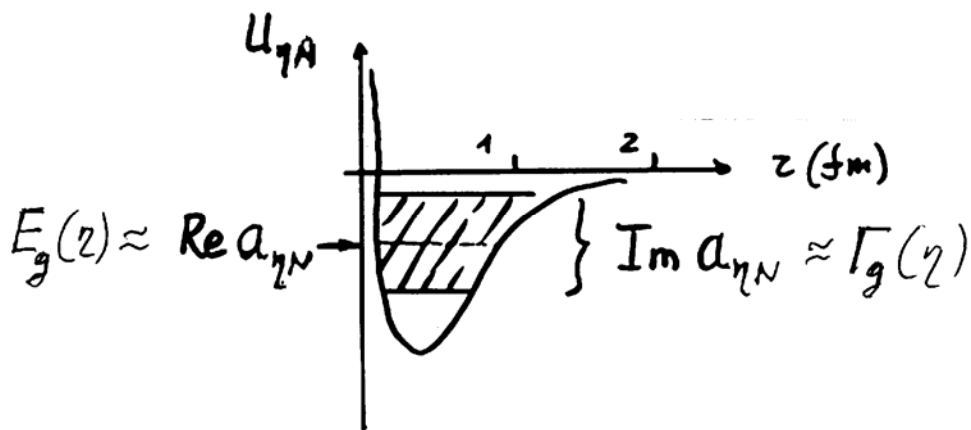


Рис. 2. Схематическое представление оптического потенциала $U_{\eta A}$ для ηA -взаимодействия в зависимости от радиуса r .

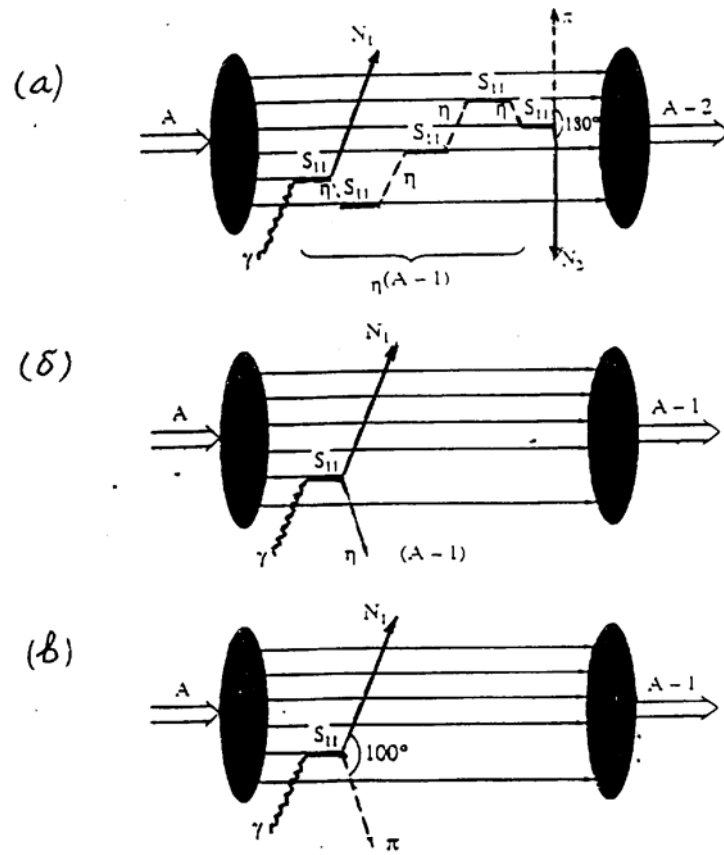


Рис. 3 Процесс образования в фотореакции η - мезонного ядра (а),
рождения η - мезона без образования η - ядра (б)
и рождение π - мезона (в).

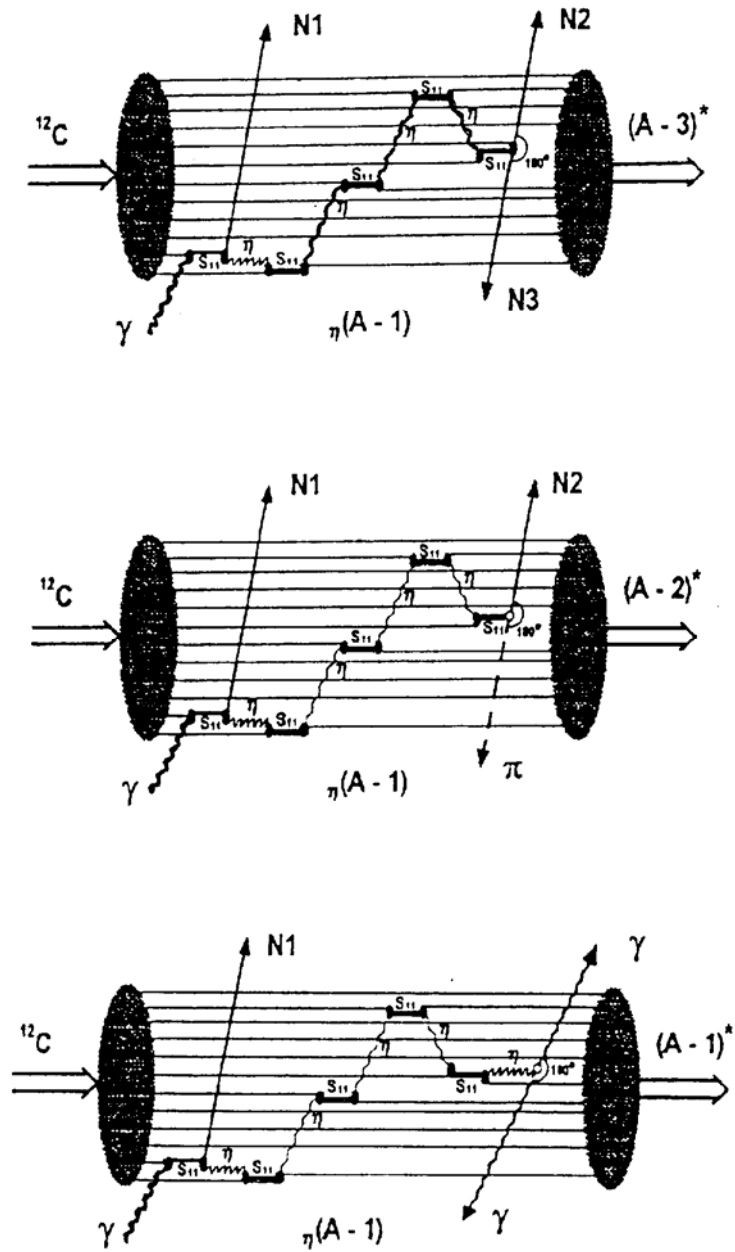


Рис.4.. Схема образования η -мезонного ядра в γA -реакции, его эволюция и распад по $(N_1 N_2)$, $(N\pi)$ и $(\gamma_1 \gamma_2)$ -каналам.

N	$a_{\eta N}(fm)$	Reference
1.	$0,270 + i \cdot 0,220$	R.S. Bhalerao, L.C. Liu Phys. Rev. Lett. 54, 865 (1985)
2.	$0,280 + i \cdot 0,190$	ibid
3.	$0,281 + i \cdot 0,360$	B. Krusche Proceed. II TAPS Workshop 1993, Guadamar
4.	$0,430 + i \cdot 0,394$	ibid
5.	$0,579 + i \cdot 0,399$	ibid
6.	$0,476 + i \cdot 0,279$	L. Tiator et.al. Nucl. Phys. A 580, 455, (1994)
7.	$0,500 + i \cdot 0,330$	C. Wilkin Phys. Rev. C 47, R 938, (1993)
8.	$0,510 + i \cdot 0,210$	Ch. Sauerma et.al. Phys. Lett. B 341, 261 (1995)
9.	$0,550 + i \cdot 0,300$	Ch. Sauerma et.al. Phys. Lett. B 409, 51 (1997)
10.	$0,620 + i \cdot 0,300$	V.V. Abaev, B.M. Nefkens Phys. Rev. C 53, 385 (1996)
11.	$0,680 + i \cdot 0,240$	N. Kaiser et.al. Phys. Lett. B 362, 23 (1995)
12.	$0,750 + i \cdot 0,270$	A.M. Green, S. Wycech Phys. Rev. C 55, R 2167 (1997)
13.	$0,870 + i \cdot 0,270$	A.M. Green, S. Wycech Phys. Rev. C 60, 035208 (1999)
14.	$1,050 + i \cdot 0,270$	ibid
15.	$0,404 + i \cdot 0,343$	M. Batinic, I. Slaus et.al. Phys. Rev. C 51, 2310 (1995)
16.	$0,876 + i \cdot 0,274$	M. Batinic et.al. Few-Body Systems 20, 69 (1996)
17.	$0,886 + i \cdot 0,274$	ibid
18.	$0,968 + i \cdot 0,281$	M. Batinic et.al. Phys. Rev. C 52, 2188 (1995)
19.	$0,980 + i \cdot 0,370$	M. Arima et.al. Nucl. Phys. A 543, 613 (1992)

Таблица 1. Значения длины рассеяния $a_{\eta N}$ процесса $\eta N \rightarrow \eta N$, полученные в различных работах.

ОБРАЗОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИЯ РАСПАД. ВЕРОЯТНОСТЬ

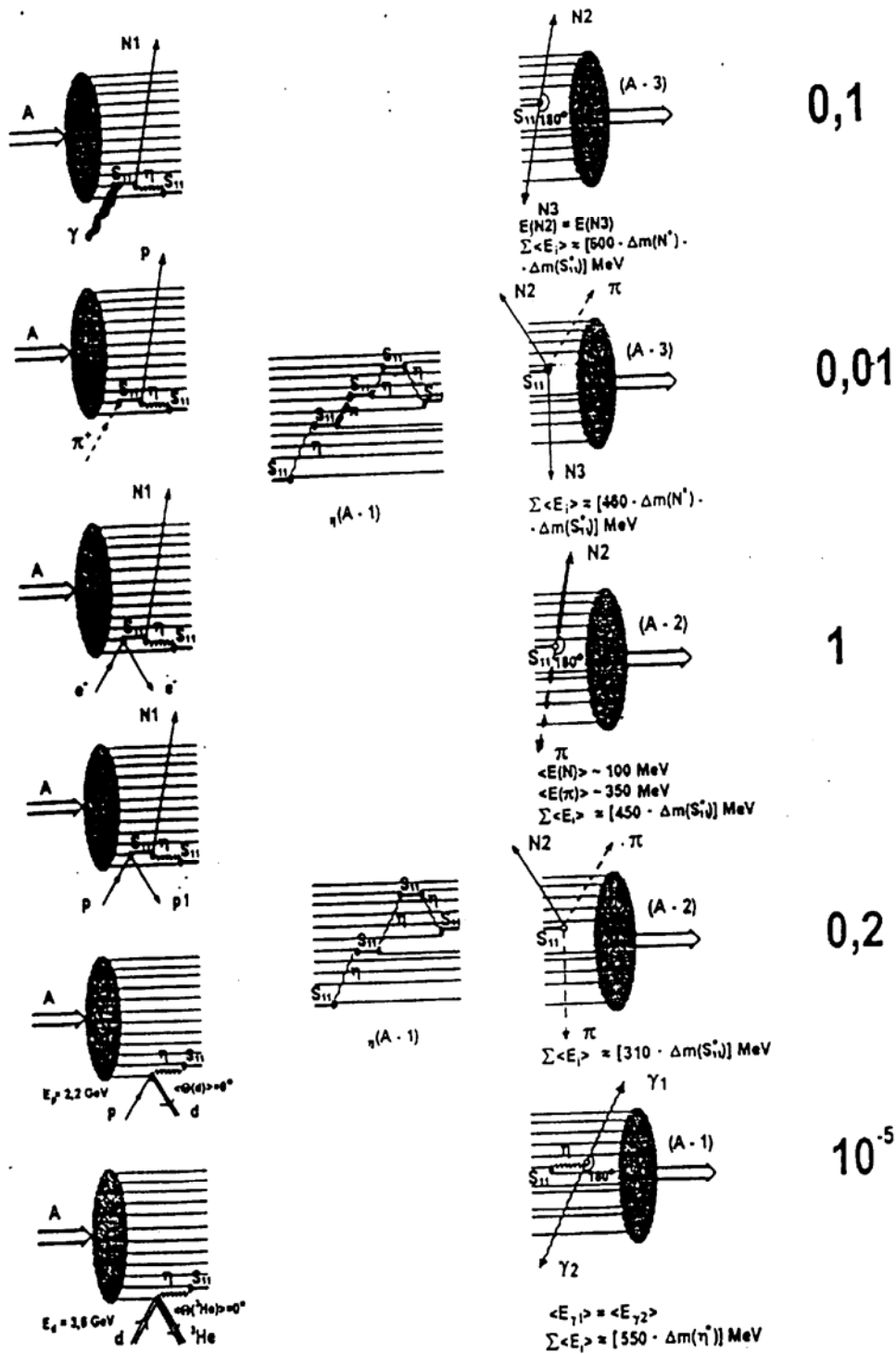


Рис. 5. Схемы формирования, эволюции и распада η -мезонных ядер с использованием γ -, e^- -, π^+ -, p - и d -пучков частиц

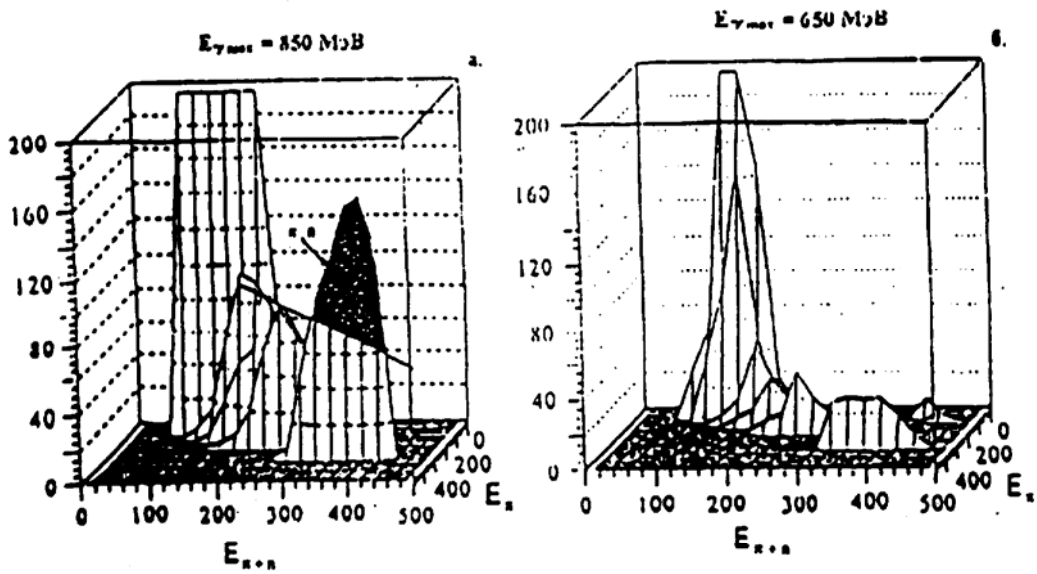


Рис 6. Двухмерные распределения по суммарной кинетической энергии $E = (E_{\pi^+} + E_n)$ (π^+ , n)-пары и кинетической энергии π^+ -мезона $E(\pi^+)$ для двух энергий $E_{\gamma_{max}}$ конца спектра тормозного излучения : 850 и 650 МэВ. [12]

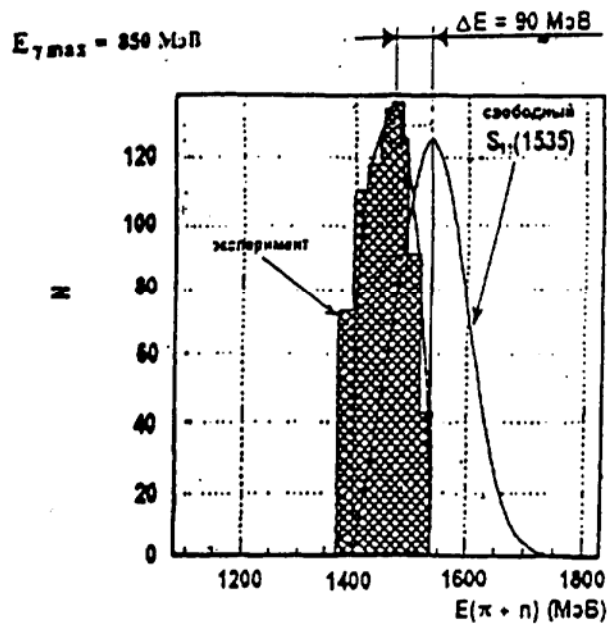


Рис. 7. Экспериментальное распределение по суммарной энергии $E = (E_{\pi^+} + E_n)$, (π^+ , n)-частиц от распада $S_{11}(1535)$ -резонанса внутри η -ядра в сравнении с распределением для распада свободного $S_{11}(1535)$ -резонанса. [12]

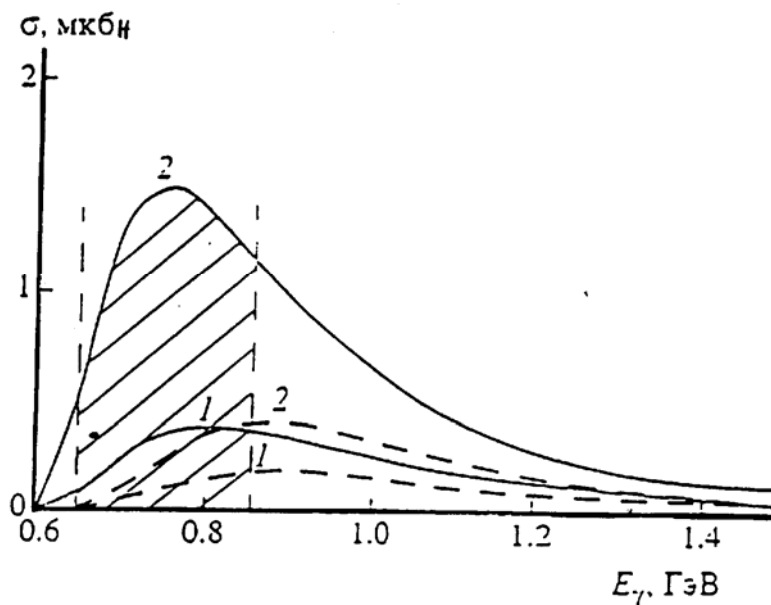


Рис. 8. Зависимость полных сечений фоторождения η -ядер на углероде (1) и кислороде (2) : штриховые линии – реакция на π -оболочечных нуклонах; сплошные линии – реакция на p -оболочечных нуклонах. Вертикальными штриховыми линиями выделена область сечения реакции в интервале энергий $\Delta E_\gamma = 850 - 650$ МэВ. [10]

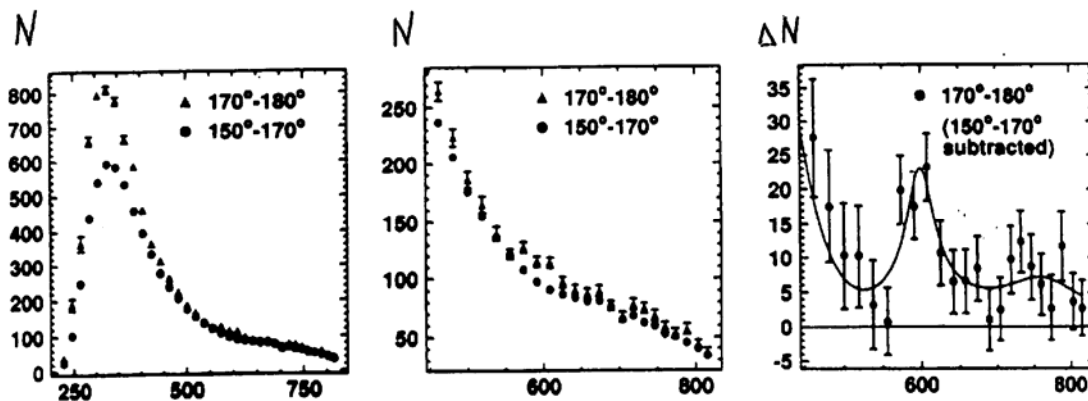


Рис. 9. Функции возбуждения для $(\pi^0 p)$ -конечного состояния реакции $\gamma + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3_\eta\text{He} \rightarrow \pi^0 + p + X$ (слева, в центре) и разность распределений (справа), аппроксимируемая Брайт-Вигнерской зависимостью [14].

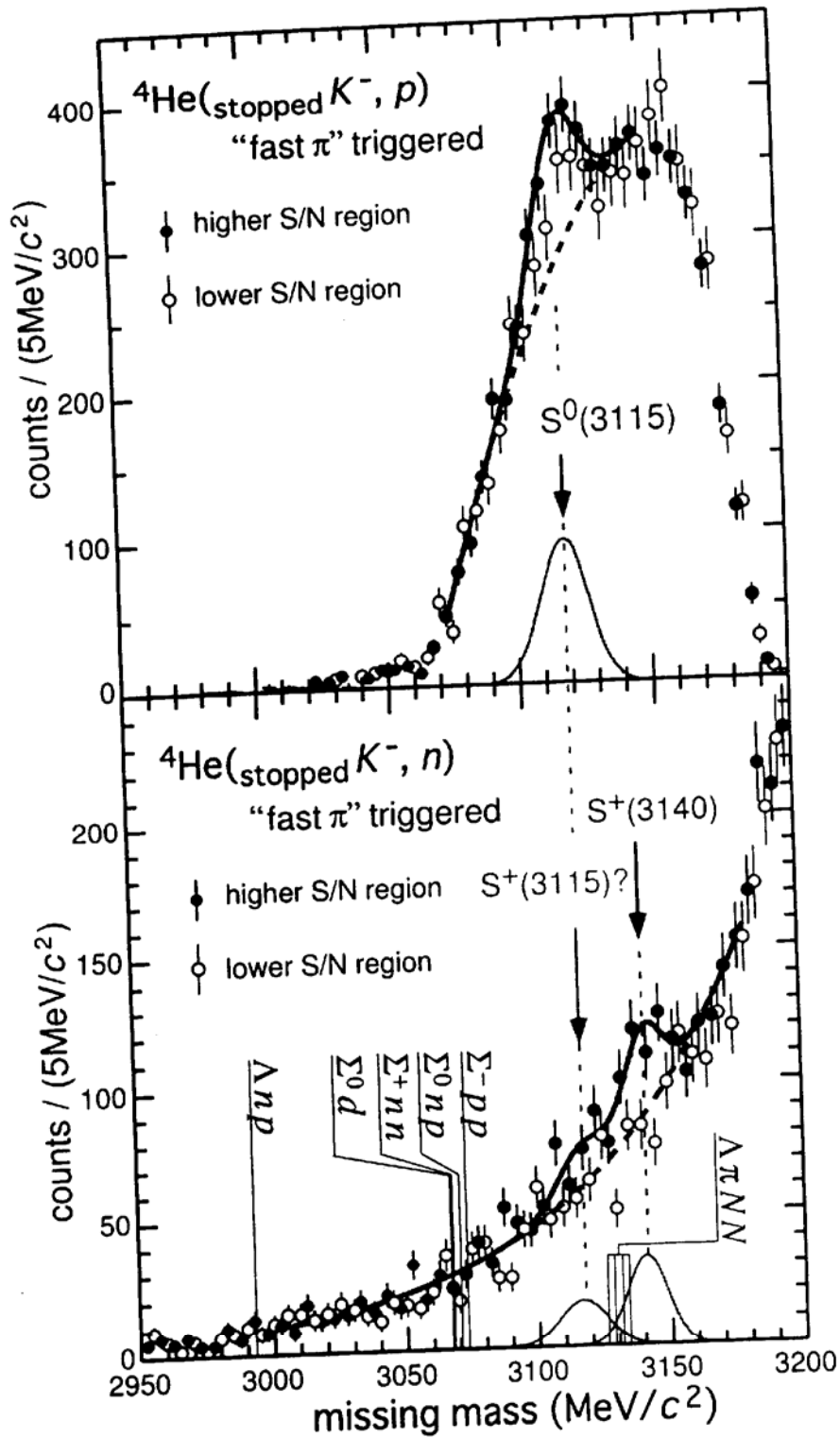


Рис. 10. Спектр недостающей массы для ${}^4\text{He}$ (останов K^-, p) реакции (вверху) и ${}^4\text{He}$ (останов K^-, n) реакции (внизу) [20, 21].

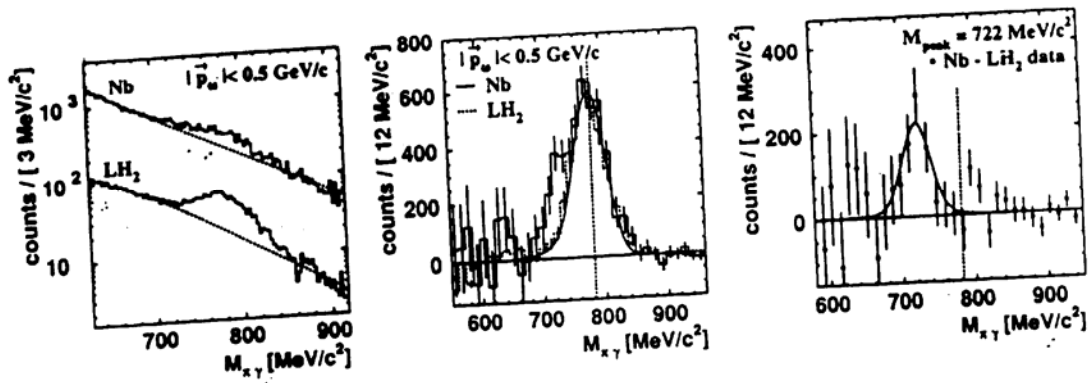


Рис. 11. Спектр инвариантной массы для распада ω -мезона по каналу $(\pi^0 \gamma)$ реакции $\gamma + A \rightarrow \omega + X \rightarrow \pi^0 \gamma + X'$ для импульса $|\vec{p}_{\omega}| < 0,5$ ГэВ/с (слева), спектр после вычитания фона (центр) и разностный спектр (справа) [15].

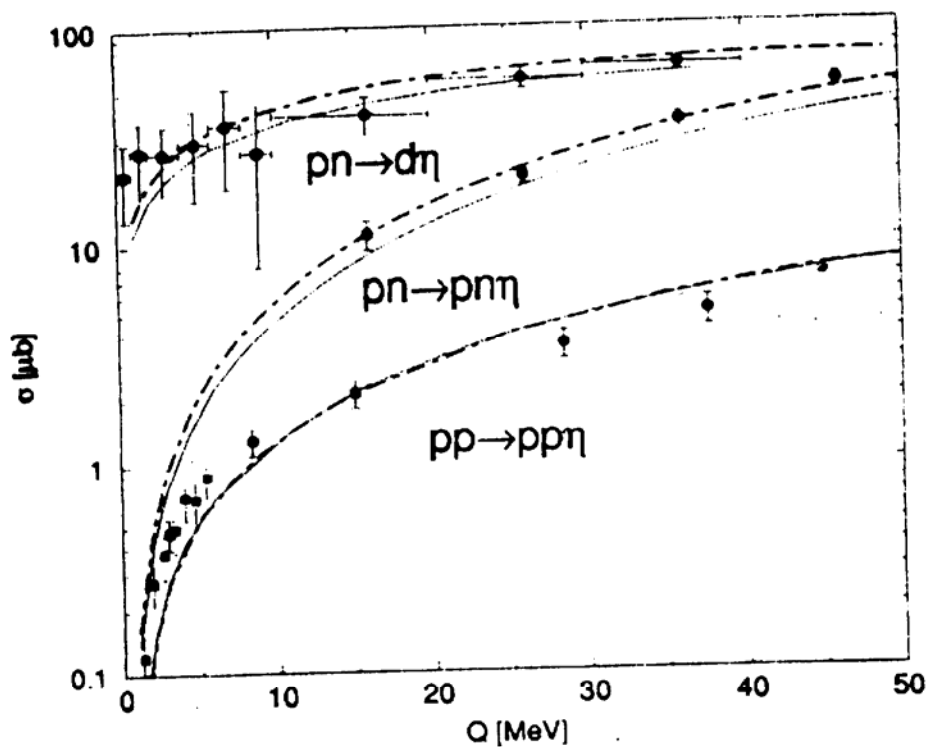


Рис. 12. Сечения образования η -мезонов

в $pp \rightarrow pp\eta$; $pn \rightarrow pn\eta$ и $pn \rightarrow dn\eta$ реакциях
(Юлих, Германия [17])

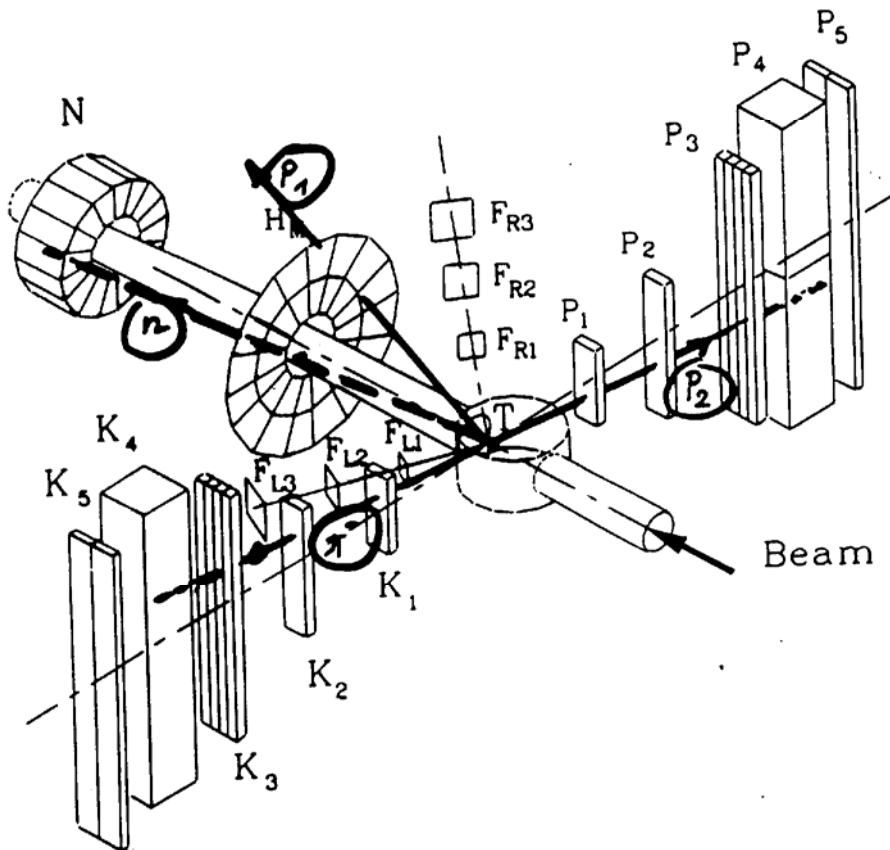
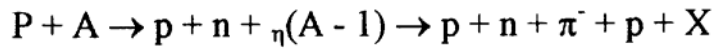


Рис.13. Схема экспериментальной установки по поиску и исследованию η -ядер в p-A-реакции на НУКЛОТРОНЕ ЛВЭ ОИЯИ (Дубна). [18]

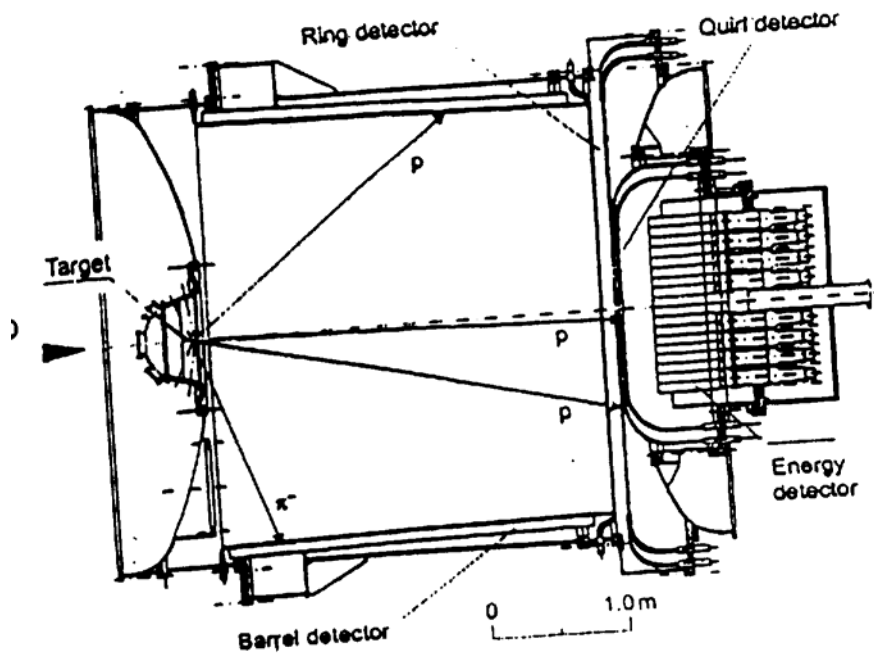


Рис. 14. Схема TOF-детектора для регистрации заряженных частиц, возникающих в реакции:
 $p + d \rightarrow {}^3_0\eta + p + p + p + p + \pi^-$
 $\bar{p}_p = 1,56 \text{ ГэВ/с}$ (COSY, Юлий [17])

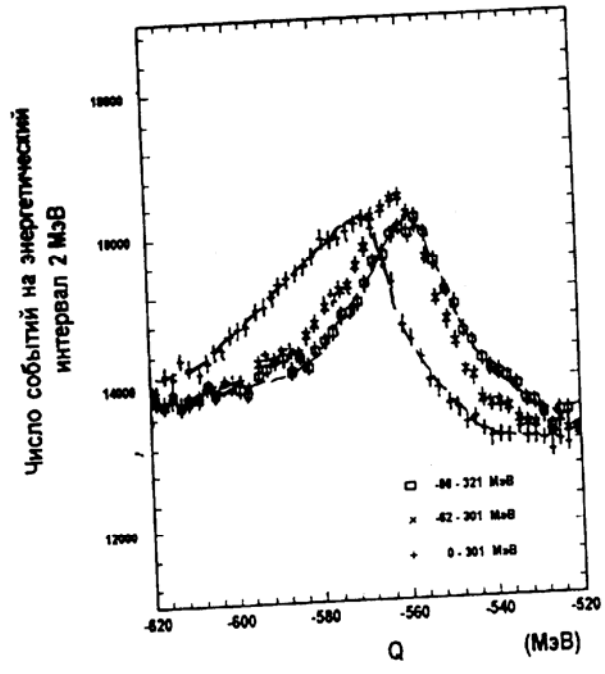


Рис. 15. Ожидаемая величина энергии Q для реакции ${}^7\text{Li}(d, {}^3\text{He})$ вблизи порога фоторождения η за 100 часов набора статистики на GSI [16]