

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ
имени
П.Н.Лебедева



Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

17

Г.А. СОКОЛ, В.А. БАСКОВ,
А.В. КОЛЬЦОВ, А.И. ЛЕБЕДЕВ,
А.И. ЛЬВОВ, Л.Н. ПАВЛЮЧЕНКО,
С.С. СИДОРИН

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭТА(η)-МЕЗОННЫХ
ЯДЕР НА СИНХРОТРОНЕ ФИАН «ПАХРА»
(проект эксперимента)**

МОСКВА 2006

Г.А. Сокол, В.А. Басков, А.В. Кольцов, А.И. Лебедев,
А.И. Львов, Л.Н. Павлюченко, С.С. Сидорин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭТА(η)-МЕЗОННЫХ
ЯДЕР НА СИНХРОТРОНЕ ФИАН "ПАХРА"**

(проект эксперимента)

Москва-2006

Исследование эта(η)-мезонных ядер на синхротроне ФИАН "ПАХРА"

(проект эксперимента)

Г.А. Сокол, В.А. Басков, А.В. Кольцов, А.И. Лебедев,
А.И. Львов, Л.Н. Павлюченко, С.С. Сидорин

Физический институт им. П.Н. Лебедева, РАН

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

Аннотация

Представлен Проект эксперимента по исследованию эта(η)-мезонных ядер на электронном синхротроне ФИАН "ПАХРА". Целью исследований является измерение A -зависимости энергетического сдвига ΔE в положении $S_{11}(1535)$ -нуклонного резонанса вследствие влияния ядерной среды и исследование процесса взаимодействия $S_{11}(1535)$ -резонанса с нуклонами ядра в процессе $S_{11}N \rightarrow NN$.

Study of eta(η)-mesic nuclei at LPI electron synchrotron "PAKHRA"

(project of an experiment)

G.A. Sokol, V.A. Baskov, A.V. Koltsov, A.I. Lebedev,
A.I. Lvov, L.N. Pavlyuchenko, S.S. Sidorin

Lebedev Physical Institute, RAS

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

Abstract

Project of an experiment devoted to investigations of eta-mesic nuclei at the LPI electron synchrotron is presented. Aims of the investigation are to measure A -dependence of the displacement ΔE of the nucleon resonance $S_{11}(1535)$ in the nuclear medium and to study interaction of the $S_{11}(1535)$ -resonance with nucleons $S_{11}N \rightarrow NN$ inside nuclei.

1. Введение

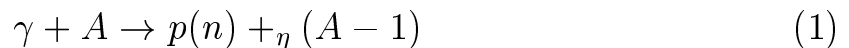
Предлагаемый Проект является продолжением научно-исследовательской работы "Поиск и исследование эта-мезонных ядер в процессах фоторождения", проведенной по плану РАН в 1994-2005 годах и поддержанной рядом грантов РФФИ (начиная с 1994 г по 2004 год), которая привела:

- 1) к обнаружению эта-мезонных ядер (рис. 1) [1]
- 2) к количественной оценке влияния ядерной материи на массу $S_{11}(1535)$ -нуклонного резонанса, находящегося в эта-ядре (рис. 2) [1].

Следует отметить, что обнаружение эта-мезонных ядер и оценка влияния ядерной среды на массу S_{11} -резонанса явились первыми результатами в мировой литературе. Эти результаты были опубликованы в 1999-2000 годах [1, 2, 3] и только в 2003 году появились данные в Майнце на установке МАМИ-2 [4], подтверждающие возможность возникновения эта-мезонных ядер в реакциях фоторождения, причем в Майнце был использован метод идентификации эта-ядер, разработанный в ФИАНе [5].

2. Научные цели проекта

Проектом предусматривается проведение экспериментального исследования на синхротроне ФИАН "ПАХРА" реакции:



где $\eta(A-1)$ обозначает эта-мезонное ядро, т.е. сильно связанную ядерную систему η -мезона и ядра из $(A-1)$ нуклонов. Такое η -мезонное ядро возникает в результате фоторождения η -мезона на одном из нуклонов ядра A , $(\gamma + N \rightarrow S_{11}(1535) \rightarrow p(n) + \eta)$, при котором нуклон вылетает из ядра A , а η -мезон захватывается ядром-остатком $(A - 1)$ [6].

Научными целями проекта являются:

- измерение A -зависимости энергетического сдвига $\Delta E(S_{11})$ (или изменения массы $\Delta m(S_{11})$) в положении по энергетической шкале $S_{11}(1535)$ нуклонного резонанса, возникающего в эта(η)-ядре в результате $\eta + N \rightarrow S_{11}$ -реакции, по сравнению с положением свободного $S_{11}(1535)$ резонанса. Предполагается, что с ростом A сдвиг $\Delta E(S_{11})$ может увеличиваться. Как следует из работы [7] данные о

влиянии ядерной среды на характеристики частиц важны для понимания природы взаимодействия частиц и выяснения природы массы существующих частиц и резонансов.

- исследование процесса взаимодействия возникающего в эта-ядре $S_{11}(1535)$ резонанса с нуклонами ядра, $(S_{11}N)$, и получение оценки вероятности $SN \rightarrow NN$ процесса в эта-ядре (по отношению к процессу распада $S_{11}(1535)$ -резонанса в ядре $(S_{11} \rightarrow \pi N)$). Следует отметить, что в литературе в настоящее время не существует экспериментальной оценки сечения $S_{11}N$ -взаимодействия. Эта-мезонные ядра являются уникальной лабораторией для исследования взаимодействия таких короткоживущих частиц как $S_{11}(1535)$ -резонанс, для которых невозможно создание пучков из-за очень короткого времени жизни ($\tau_{1/2} \sim 10^{-23}$ сек), с нуклонами.

3. Экспериментальная установка

Исследование намечается осуществить с помощью двухплечевой спектрометрической автоматизированной установки, работающей по методу измерения времени пролета t_i частицей базы L_i , что позволяет в дальнейшем осуществить вычисление энергий E_i регистрируемых частиц. Установка содержит два сцинтилляционных спектрометра, с размерами детекторов $(200 \times 200 \times 20)$ мм², $(500 \times 500 \times 50)$ мм³ и $(500 \times 500 \times 100)$ мм³, позволяющих регистрировать частицы с пространственной точностью $\delta x \approx \pm 1,5$ см и с временной точностью $\delta t = \pm 0,05$ нсек. При длине пролета $L_0 = 1,5$ м обеспечивается энергетическое разрешение $\delta E(\pi) = \pm 37$ МэВ, при регистрации π -мезонов с кинетической энергией $E(\pi) \approx 300$ МэВ (рис.6,7). Однако, при определении средней энергии $\langle E_\pi \rangle$ из измеренного распределения по энергии, точность $\delta \langle E_\pi \rangle$ может быть значительно улучшена.

Установка была использована в поисковой работе, завершившейся обнаружением η -мезонных ядер и получением количественного результата о влиянии ядерной среды на характеристики $S_{11}(1535)$ -нуклонного резонанса [1].

В предлагаемом эксперименте внесены некоторые изменения в установку по сравнению с сеансом, когда были получены первые результаты по эта-ядрам [1]:

- 1) В π - спектрометре заменен стартовый счетчик на более тонкий и

меньший по размерам ($200 \times 200 \times 20$ мм³) для улучшения загрузочных характеристик;

2) убран фильтр перед стартовым счетчиком π -спектрометра т.к. он из-за ионизационных потерь ухудшает временные характеристики регистрируемых частиц,

3) По этой же причине ΔE_i детекторы располагаются после "стопового" детектора π -спектрометра;

4) в целях возможности одновременного измерения (π^+n) и (pp) событий, возникающих в двух реакциях ($(S_{11} \rightarrow \pi^+n)$ и $(S^+p \rightarrow pp)$) сигнал с антисчетчика (ВЕТО) нейтронного спектрометра выведен из триггера и подан на запись в регистр в качестве признака заряженной частицы;

5) Результаты моделирования показали, что 300 МэВ-ный протон имеет время пролета и ионизационные потери, которые совпадают с временем пролета и ионизационным потерям для 50 МэВ-ного заряженного π -мезона. Для устранения регистрации 50- МэВ-ного мезона, предлагается после стопового детектора (перед ΔE_i детекторами) разместить 4 см Fe фильтр, который поглотит π -мезоны таких энергий и , таким образом, можно будет регистрировать только 300 МэВ-ные протоны, которые возникают в $S^+p \rightarrow pp$ -реакции.

4. Методика проведения измерений

Метод идентификации эта-мезонных ядер был разработан в соответствии с развитой моделью образования, эволюции и распада эта-мезонного ядра [5] (рис. 3). В ее основе лежит представление о возникновении в эта-ядре цепочки взаимодействий с образованием $\eta N \rightarrow S_{11}$ и распадом $S_{11} \rightarrow \eta N$ резонанса S_{11} , которая, как правило, заканчивается распадом S_{11} -резонанса по πN -каналу:

$$\eta N \rightarrow S_{11} \rightarrow \eta N \rightarrow \dots S_{11} \rightarrow \pi N \quad (*)$$

Существенным обстоятельством для возникновения цепочки переходов (*) является тот факт, что вероятности распада $S_{11}(1535)$ -нуклонного резонанса по каналам $S_{11} \rightarrow \pi N$ и $S_{11} \rightarrow \eta N$ практически одинаковы и равна каждая $\sim 50\%$.

Метод идентификации эта-ядер состоит в регистрации и измерении энергий и угла разлета коррелированных πN -пар от распада $S_{11} \rightarrow \pi N$,

последнего S_{11} -резонанса в цепочке (*). Строго говоря, регистрация (πN) -пары ведет к регистрации S_{11} -ядра, а не с η -ядра. Однако, речь попрежнему идет об η -ядре, поскольку реализуется цепочка переходов (*). По образному замечанию В.И. Ритуса [8] в этом случае можно говорить о "ядерном резонаторе", обладающем двумя уровнями " ηN " и " S_{11} ", между которыми и осуществляются переходы $\eta N \leftrightarrow S_{11}$. Такой ядерный резонатор обладает плохой "добротностью", поскольку после $3 \div 5$ переходов он распадается по πN -каналу и прекращает свое существование. Предполагается, что в случае образования эта-мезонного ядра, возникающие πN -пары будут иметь $\langle \Theta_{\pi N} \rangle \simeq 180^0$, $\langle E_{\pi} \rangle \simeq 300$ МэВ, $\langle E_N \rangle \approx 100$ МэВ. Разброс значений $\Theta_{\pi N}$ происходит, в основном, за счет ферми-движения нуклонов в эта-ядре. Средние значения $\langle E_{\pi} \rangle$ и $\langle E_n \rangle$ получены для средней энергии возбуждения S_{11} -резонанса, а именно $E(S_{11}) = 1535$ МэВ. Разброс значений $\langle E(\pi) \rangle$ и $\langle E(n) \rangle$ связан как с ферми движением нуклонов в ядре, так и, в основном, с изменением энергии возбуждения S_{11} -резонанса.

Измерения предполагается осуществить в следующих позициях:

- позиция "калибровка".

Спектрометры располагаются в горизонтальной плоскости в позиции $\langle \Theta_{\pi} \rangle = \langle \Theta_N \rangle = 50^0$ и энергия конца спектра γ -квантов выбирается равной $E_{\gamma max} = 650$ МэВ. Эта позиция по кинематике соответствует регистрации πN -пар из квазисвободного процесса их образования на нуклоне ядра-мишени. Энергии π и N близки к энергиям π и N из (*) и тем самым будет осуществляться временная настройка спектрометров (рис. 4,5).

- позиция "фон 1".

Оба спектрометра располагаются в горизонтальной плоскости в позиции $\langle \Theta_{\pi} \rangle = \langle \Theta_N \rangle = 90^0$ по обе стороны от γ -пучка, энергия конца спектра тормозного излучения устанавливается $E_{\gamma max} = 650$ МэВ. В этой позиции измеряется уровень возможных фоновых событий (πN -совпадений) в основном за счет реакции двойного фоторождения π -мезонов на ядре мишени ($\gamma A \rightarrow \pi \pi N + (A - 1)$) и за счет реакции фоторасщепления квази-дейтонов в ядре (рис. 8). Следует отметить, что для этой позиции не существует процесса с двухчастичной кинематикой и регистрация (πN) -событий осуществляется

за счет трехчастичной кинематики, а также как результат случайных совпадений.

- позиция "эффект + фон".

Спектрометры сохраняются в позиции "фон 1", но энергия конца спектра γ -квантов устанавливается равной $E_{\gamma max} = 850$ МэВ, т.е. выше порога фоторождения эта-мезона ($E_{пор}(\eta) = 707$ МэВ). В этой позиции, кроме регистрации (πN) -событий из позиций с трехчастичной кинематикой и случайных совпадений, возможна регистрация (πN) -событий за счет регистрации образования медленных η -мезонов и тем самым образования эта-ядер. Возникающие эта-ядра распадаются по схеме: $\eta(A-1) \rightarrow \pi + N + X$, причем (πN) -частицы разлетаются под $\langle \Theta_{(\pi N)} \rangle = 180^0$.

- позиция "фон 2".

В этой позиции спектрометры располагаются попеременно в позиции $\langle \Theta_{(\pi n)} \rangle = 180^0$, но один (или оба) спектрометр выводится из горизонтальной плоскости, так что азимутальный угол $\langle \varphi(\pi N) \rangle \neq 180^0$. Энергия сохраняется: $E_{\gamma max} = 850$ МэВ. В этой позиции нарушены условия регистрации (πN) -событий от распада медленного $S_{11}(1535)$ -резонанса и будут регистрироваться только фоновые события.

В эксперименте предполагается регистрировать (π^+n) события из реакции образования эта(η)-ядер для случая измерения A -зависимости энергетического сдвига $\Delta E(S_{11})$. В случае исследования $S_{11}N \rightarrow NN$ -процесса предполагается измерение (pp) -событий из реакции $S_{11}^+p \rightarrow pp$ и (pn) -событий из реакции $S_{11}^0p \rightarrow np$ и $S_{11}^+n \rightarrow np$. Эти события также коррелированы по энергии регистрируемых нуклонов ($\langle E_{p,n} \rangle \simeq 300$ МэВ) и по углу разлета нуклонов ($\langle \Theta_{pN} \rangle \simeq 180^0$). Разброс значений $\langle E_p \rangle$ и $\langle E_n \rangle$ из реакций $S_{11}^+p \rightarrow pp$, $S_{11}^0p \rightarrow np$ и $S_{11}^+n \rightarrow np$, как и в случае реакции $S_{11} \rightarrow \pi N$, возникает как за счет ферми-движения нуклонов в ядре, так и из-за изменения энергии возбуждения S_{11} -резонанса, а также влияния ядерной материи на массу S_{11} -резонанса.

При исследовании $SN \rightarrow NN$ -реакции предполагается проведение измерений в позициях "фон" при $E_{\gamma max} = 650$ МэВ и в позиции "эффект + фон" при $E_{\gamma max} = 850$ МэВ (рис. 6,7), а также при "сбитом" азимутальном угле одного из спектрометров, т.е. при $\langle \varphi \rangle \neq 180^0$.

5. Ожидаемые выходы (π^+n) и (pp)-событий

Реально измеренные выходы (π^+n)-событий от распада $S_{11}(1535)$ -резонанса в позиции "эффект + фон", полученные в измерениях (1999-2000) годов, составили $\sim Y(\pi^+n) \approx 50$ событий/час при энергии конца спектра тормозного излучения $E_{\gamma max} = 850$ МэВ и когда число действующих γ -квантов в энергетическом интервале $\Delta E_{\gamma} = 150$ МэВ составляло $N_{\gamma} \approx 4 \cdot 10^{11}$ γ /час.

В предлагаемом Проекте эксперимента ожидается такой же выход (π^+n)-событий, поскольку используется практически та же экспериментальная установка, при тех же условиях работы синхротрона.

Выходы (pp)-событий ожидаются близкими к выходу (π^+n)-событий, т.е. $Y(pp) \approx 45$ соб/час (при этой оценке учтена вероятность процесса $S_{11}N$ по отношению к $S_{11} \rightarrow \pi N$ распаду $W(SN/\pi N) \simeq 0,2$, вероятность регистрации нейтронов ($\xi(n) \sim 0,3$), а также то, что в обоих случаях регистрируется только часть πN и NN событий ($N(\pi^+n)/N(\pi N) = 0,25$ и $N(pp)/N(NN) = 0,3$).

$$\begin{aligned} \frac{Y(pp)}{Y(\pi^+n)} &= \frac{W(SN \rightarrow NN)}{W(S \rightarrow \pi N)} \cdot \frac{N(pp)}{N(NN)} \cdot \frac{N(\pi N)}{N(\pi^+n)} \cdot \frac{1}{\xi(n)} = \\ &= 0,2 \cdot 0,3 \cdot \frac{1}{0,25} \cdot \frac{1}{0,3} = 0,8 \end{aligned}$$

Выходы (nr)-событий из процесса $S_{11}N \rightarrow NN$ ожидаются близкими к значению $Y(nr) \approx Y(pp) \cdot 2/0,3 \simeq 45 \cdot 0,7 \approx 30$ соб/час, где используется то, что $W(nr) = 2W(pp)$ и $\xi(n) = 0,3$.

6. Потребность в часах работы синхротрона ФИАН

Для проведения эксперимента требуется:

- для настроечных работ - 75 часов (15 смен)
при $E_{\gamma max} = 650$ МэВ
- набор статистики в позициях "калибровка" и "фон 1" - 75 часов (15 смен)
при $E_{\gamma max} = 650$ МэВ
- набор статистики в позиции "фон 2" и "эффект + фон" - 300 часов (60 смен)
при $E_{\gamma max} = 850$ МэВ

Итого, общая потребность составляет 450 часов (90 смен), что соответствует $\sim 0,5$ года работы на синхротроне, при условии использования синхротрона наряду с другими потребителями.

7. Финансовое обеспечение

Для осуществления эксперимента и последующей обработки результатов необходимо:

- 500 т.руб. - для закупки электроники
- 700 т.руб. - в качестве добавки к зарплате (11 человек на 0,5 года)
- (в среднем ~ 10 т. руб./месяц на человека).

Итого, суммарная потребность составляет 1200 т.руб. на 0,5 года.

Примечание:

Если работа на синхротроне продолжается более 0,5 года, то пропорционально увеличивается сумма для добавки к зарплате.

Участники проекта:

Алексеев В.М.- ведущий электроник

Басков В.А. - к.ф.м.н., ст. н. с.

Горячева Л.И.- техник 1-ой категории

Кольцов А.В. - н.с.

Крутов Ю.И.- инж. электр. 1-ой категории

Лебедев А.И. - д.ф.м.н., г.н.с.

Львов А.И. - к.ф.м.н., в.н.с.

Павлюченко Л.Н. - н.с.

Сидорин С.С. - н.с.

Сокол Г.А. - д.ф.м.н., гл.н.с. - руководитель проекта.

8. Заключение.

С учетом 0,5 года работы на синхротроне и примерно 0,5 года, требующегося на обработку результатов (с учетом решения обратной задачи для получения распределений по энергиям из распределений по скоростям β в течение ~ 1 года можно ожидать получения новых данных по

исследованию η -мезонных ядер.

Благодарности.

Авторы благодарят А.Н. Лебедева и Е.И. Тамма за поддержку работы, А.А. Комара, Е.М. Лейкина и В.И. Ритуса за ценные замечания, высказанные ими после ознакомления с рукописью, В.М. Алексеева и Л.И. Горячеву за помощь при оформлении рукописи к печати.

Ссылки

- [1] G.A. Sokol, T.A. Aibergenov, A.V. Kravtsov, A.I. Lvov, L.N. Pavlyuchenko
Search for η -mesic nuclei in photoproduction processes.
Fizika B (Zagreb), v 8, № 1, p. 85-90 (1999)
- [2] Г.А. Сокол, Т.А. Айбергенов, А.В. Кравцов, А.И. Львов, Л.Н. Павлюченко
Первое наблюдение η -мезонных ядер на синхротроне Физического института им. П.Н. Лебедева
Изв. Академии Наук, серия физическая, т. 64, № 3, 490 (2000)
- [3] Г.А. Сокол, Т.А. Айбергенов, А.В. Кольцов, А.В. Кравцов, Ю.И. Крутов, А.И. Львов, Л.Н. Павлюченко, В.П. Павлюченко, С.С. Сидорин
Обнаружение η -мезонных ядер.
Письма в ЭЧАЯ, № 5 (102), 71, (2000).
- [4] M. Pfeiffer, J. Ahrens et al.
Photoproduction of η -mesic ${}^3\text{He}$
arXiv: nucl-ex/0312011 v. 1, 11 Dec. (2003)
- [5] Г.А. Сокол, В.А. Трясучев
Возможный метод наблюдения η -ядер
КСФ ФИАН, № 4, с. 23 (1991)
- [6] A.I. Lebedev, V.A. Tryasuchev
Cross section for production of η -nuclei by photons
J. Phys. G. Nucl. Part 17, 1197 (1991)
- [7] T. Hatsuda, T. Kunihiro
QCD-phenomenology based on a chiral effective Lagrangian
Phys. Rep. v. 247, 241 (1999)
- [8] В.И. Ритус - частное сообщение.