

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**



*имени
П. Н. Лебедева*

Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

В.А. БАСКОВ, Б.Б. ГОВОРКОВ,
В.А. КАРПОВ, Ю.И. КРУТОВ, В.В. ПОЛЯНСКИЙ

5

**ИЗУЧЕНИЕ ФОТОРОЖДЕНИЯ π^0 -МЕЗОНОВ
НА ЯДРАХ В ОБЛАСТИ ПОРОГОВЫХ ЭНЕРГИЙ
И ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ $\Delta(1232)$ -БАРИОНА**

МОСКВА 2006

ИЗУЧЕНИЕ ФОТОРОЖДЕНИЯ π^0 -МЕЗОНОВ НА ЯДРАХ В ОБЛАСТИ ПОРОГОВЫХ ЭНЕРГИЙ И ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ $\Delta(1232)$ -БАРИОНА

В.А. БАСКОВ, Б.Б. ГОВОРКОВ*, В.А. КАРПОВ, Ю.И. КРУТОВ, В.В. ПОЛЯНСКИЙ

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе представлены основные цели исследований дифференциальных зависимостей фоторождения нейтральных пионов на ядрах в околопороговой области энергий. Приведены характеристики высокоинтенсивной системы мечения фотонов, созданной на выведенном электронном пучке ускорителя ФИАН “ПАХРА”, и характеристики экспериментальной установки.

STUDYING OF π^0 -MESONS PHOTOPRODUCTION ON NUCLEI NEAR THE THRESHOLD AND IN THE REGION OF $\Delta(1232)$ -BARYON ENERGIES

V.A. BASKOV, B.B. GOVORKOV*, V.A. KARPOV,
Yu.I. KRUTOV, V.V. POLIANSKY

A B S T R A C T

In this work basic aims for investigations of differential dependences of neutral pions photoproduction on nuclei in the region of energies near the threshold are presented. Characteristics of the high intensity photon tagging system installed on the extracted electron beam of the Lebedev Institute “PAHRA” accelerator and characteristics of the experimental facilities are given.

* - govorkov@x4u.lebedev.ru

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как показывают расчеты [1,2], в околопороговой области энергий фотонов полное сечение упругого когерентного фоторождения нейтральных пионов на ядрах следует осциляторной зависимости от массового числа A , а дифференциальное сечение - дифракционной зависимости от угла вылета пионов. Измерение таких дифференциальных зависимостей позволит определить как характеристики распределений материи внутри ядра, так и увеличит наше понимание процессов фоторождения нейтральных мезонов в ядерной среде. Особенно интересны сведения об упругом когерентном фоторождении, в котором участвуют одновременно все нуклоны ядра.

В ФИАНе в Отделе физики высоких энергий на ускорителе “ПАХРА” на 64-канальной системе мечения проводится эксперимент по изучению процессов фоторождения нейтральных пионов на ядрах. Энергетическое разрешение и интенсивность фотонного пучка системы мечения при энергии выведенного электронного пучка 350 МэВ составляют 2 МэВ и $\sim 10^6$ фотонов/сек соответственно. Энергетический интервал мечения около 100 МэВ с шагом приблизительно 1,5 МэВ/канал. Применение специального сцинтилляционного годоскопа позволит довести энергетическое разрешение системы мечения до 1 МэВ. Такая система мечения фотонов является единственной в России.

В эксперименте нейтральные π^0 -мезоны, возникающие при взаимодействии фотона с мишенью, регистрируются 2-х плечевой экспериментальной установкой на основе кристаллов NaI(Ta) и сцинтилляционных счетчиков.

Использование в эксперименте системы мечения фотонов тормозного излучения с разрешением по энергии фотонов 2 МэВ [5] и экспериментальной установки, состоящей из составных NaI(Ta) гамма-спектрометров с разрешением каждого 4-5 МэВ [6], позволяет при измерении

дифференциальных и полных сечений разделять процессы упругого и неупругого фоторождения. Различие составляет как минимум энергию связи 8-10 МэВ.

Суть применяемого метода и состоит в энергетическом разделении когерентного упругого и неупругого процессов фоторождения π^0 -мезона. Энергетический порог некогерентного процесса выше когерентного, поэтому используя точное знание энергии первичного фотона и небольшой шаг по изменению его энергии с помощью системы мечения можно отделить исследуемый когерентный процесс фоторождения пиона от некогерентного.

Эксперимент предполагается выполнить на ядрах дейтерия, углерода, лития, бериллия и других в широком интервале энергий первичных фотонов (от порога фоторождения до 250 МэВ).

Сравнительно недавно основным сдерживающим фактором в фотоядерных исследованиях, когда длина волны сравнима с размером нуклона, было отсутствие фотонных пучков с требуемыми параметрами: высокой интенсивностью, высокой степенью поляризации, непрерывностью, низким уровнем фона. Тормозные пучки не обеспечивали этих требований за исключением интенсивности. Использование в экспериментах различных систем мечения фотонов позволило удовлетворить указанные требования и такие системы нашли широкое применение в различных научных центрах Европы, США, Канады, Японии и других стран.

Исследования, подобные изложенным выше, в настоящее время планируются и проводятся в Гренобле на накопителе ESRF (эксперимент GRAAL и др.) с использованием фотонов, возникающих на обращенном Комптоновском рассеянии, в Вирджинии на ускорителе CEBAF с использованием системы мечения и т. д. [1]. Проведение таких экспериментов важно с точки зрения дальнейших исследований физики частиц и атомных ядер.

ВЫВЕДЕННЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК УСКОРИТЕЛЯ “ПАХРА”

Выведенный пучок электронов из ускорителя “ПАХРА” формируется системой медленного вывода и протяженным магнитооптическим каналом (МОК) [3].

Медленный вывод электронов с использованием резонанса радиальных бетатронных колебаний четвертого порядка ($\nu_x = 3/4$) реализован с помощью двух полюсных обмоток ускорителя и двух выводных септум-магнитов. Первый септум-магнит состоит из четырех магнитных блоков, разделенных тремя медными кронштейнами. Зазор магнитопровода имеет высоту 1,2 см и ширину 3,5 см. Напряженность магнитного поля в зазоре - 800 Э. Второй септум-магнит составлен из четырех таких же магнитных блоков, что и первый. Напряженность поля в зазоре этого магнита можно поднять до 4000 Э. Положение обоих магнитов относительно центральной орбиты может меняться с помощью системы перемещения в диапазоне 5 см.

Электронный пучок через выходное окно ускорителя (алюминиевая пластина толщиной 0,2 мм) и воздушный промежуток (0,7 м) вводится в тракт магнитооптического канала (рис. 1). Электронный тракт МОК вакуумирован, диаметр тракта при прохождении линз составляет 38 мм, в межлинзовых промежутках 80 мм. Общая длина тракта от выходного окна ускорителя в ускорительном зале до магнита мечения в экспериментальном зале №1 составляет 34 м. Канал включает 6 линз и один поворотный магнит СП-3 с размером полюса $500 \times 200 \text{ мм}^2$ и межполюсным расстоянием 50 мм в зале ускорителя. Угол поворота пучка составляет $18,5^\circ$ при $H_{\text{СП-3}} = 5250 \text{ Гс}$.

Одним из важных элементов канала является устройство, предназначенное для исключения влияния на электронный пучок краевого магнитного поля магнита ускорителя – компенсатор магнитного поля (КМП). После выхода из ускорителя пучок 0,7 м проходит вблизи полюса магнита ускорителя, краевое поле которого “растягивает” пучок в горизонтальной плоскости. При

попадании пучка в КМП влияние поля прекращается и он без искажений транспортируется к магниту системы мечения. Входной и выходной диаметры КМП составляют 15 мм и 25 мм соответственно, длина устройства 1100 мм. КМП входит в вакуумный канал как один из элементов.

В настоящее время, при энергии электронов $E = 350$ МэВ размер пучка как по горизонтали, так и по вертикали составляет 20 мм, интенсивность $\sim 10^8$ e^- /сек. Интенсивность пучка определяется ускорителем и может достигать $\geq 10^{10}$ e^- /сек. Диапазон выводимых энергий от 200 МэВ до 600 МэВ.

В процессе проводки пучка от выходного окна ускорителя до заданной точки на магните мечения была разработана методика проводки с помощью современных чувствительных видеокамер, которые сразу определяют положение пучка (координаты) на сцинтилляторе и положение пучка относительно других объектов. При работе использовались миниатюрные камеры типа “секьюрити” с чувствительностью 0,1 люкс и углами обзора 28° и 44° . Ниже, в качестве примера, описана процедура проводки пучка от поворотного магнита СП-3 в зале ускорителя до заданной точки на магните мечения

На предполагаемой траектории пучка, находящейся под углом $\varphi = 18,5^\circ$ от траектории выхода пучка из ускорителя относительно центра СП-3, были помещены две платформы с дистанционным управлением. Первая платформа П1 находилась на расстоянии 1,25 м от центра СП-3, вторая П2 на расстоянии 3,25 м. На П1 был помещен сцинтиллятор С1 NaI(Tl) диаметром 40 мм и толщиной 40 мм, а на П2 сцинтиллятор С2 такого же типа диаметром 70 мм и толщиной 40 мм. Сцинтилляторы просматривались видеокамерами К1 и К2, соответственно. Сигнал с К1 контролировался визуально монитором М1 (обычный телевизор) в пультовой ускорителя, а сигнал с К2 монитором М2, находящимся рядом с системой управления СП-3.

Последовательность работы была следующая:

1. Пучок с помощью СП-3 “наводится” на центр С1.
2. Определяется значение поля Н1 магнита СП-3.
3. Платформа с С1 выводится из пучка, а П2 с С2 вводится в пучок так, чтобы он “проходил” через центр С2.
4. В пучок снова вводится С1 на прежнее положение.
5. С помощью лазера определяется примерная траектория пучка, “проходящая” через центры С1 и С2 (при определении положения пучка на С2 С1 убирается).
6. Определяется примерная траектория пучка в экспериментальном зале №1 и его положение на магните мечения.
7. Поле СП-3 увеличивается или уменьшается на $\Delta H = 100 - 200$ Гс и определяется его значение Н2.

В дальнейшем пункты 3-7 повторяются до того момента, когда предполагаемая траектория пучка “определит” его положение на магните мечения.

ВЫСОКОИНТЕНСИВНАЯ СИСТЕМА МЕЧЕНИЯ ФОТОНОВ УСКОРИТЕЛЯ “ПАХРА”

Получение новой и точной информации о электромагнитных процессах, таких как комптоновское рассеяние на нуклонах и ядрах, фоторождение мезонов, полного адронного фотопоглощения и т. д. связано с точностью знания энергии иницирующего реакцию фотона. Реализация жесткого требования определения энергии фотонов возможна при использовании системы мечения фотонов (СМ), созданной на базе выведенного электронного пучка ускорителя “ПАХРА” (рис. 1) [4].

Выведенный пучок электронов с указанной выше энергией с последней квадрупольной линзы магнитооптического канала выводится на медный радиатор толщиной 0,01 – 0,5 мм (0,0007 – 0,035 X_0). Тормозные

фотоны, образующиеся в радиаторе, падают на экспериментальную мишень, а излучившие их электроны отклоняются магнитным полем магнита мечения (ММ) на угол $\sim 180^\circ$ и попадают в годоскоп системы мечения. Интенсивность тормозных фотонов определяется интенсивностью первичного пучка и толщиной радиатора. Она может изменяться в пределах $10^5 - 10^7$ $\gamma/\text{сек}$.

Энергия электронов, отклоненных магнитным полем в годоскоп системы мечения, может изменяться вариацией тока стабилизированного источника питания (ИСТ-500). Точность поддержания величины тока составляет $\sim 0,01\%$. Размер полюсов магнита мечения составляет 110×700 см^2 , зазор между ними 10 см. Энергетический диапазон “отработанных” в радиаторе электронов, регистрируемых годоскопом системы мечения составляет $\Delta E_e = 30 - 130$ МэВ.

Годоскоп системы мечения состоит из двух линий сцинтилляционных счетчиков. Каждая линия включает 64 идентичных счетчика шириной 1,6 см, длиной 10 см и толщиной 1 см. Расстояние между линиями годоскопа составляет $H_1 = 8,5$ см. Годоскоп расположен параллельно полюсам магнита мечения на расстоянии $H_2 = 112$ см. Расстояние от оси выведенного электронного пучка $H_3 = 40$ см. При необходимости размеры H_1 , H_2 и H_3 можно легко менять. Годоскоп, за исключением передней полусферы, окружен свинцовой защитой.

Энергия фотона (E_γ), падающего на экспериментальную мишень определяется, как разность энергий первичного электрона (E_0) и энергии электрона, провзаимодействовавшего в радиаторе и отклоненного магнитом мечения (E_e) в годоскоп: $E_\gamma = E_0 - E_e$.

Рабочий энергетический диапазон меченых γ -квантов при энергия первичного пучка $E_0 = 350$ МэВ составляет $\Delta E_\gamma = 220 - 320$ МэВ. Энергетическое разрешение системы мечения по каналам и соответствующем диапазоне меченых фотонов составляет:

$$\Delta N_1 = 1 - 32 (\Delta E_\gamma = 320 - 240 \text{ МэВ}) \Delta E = 2 - 8 \text{ МэВ}$$

$\Delta N_2 = 33 - 64$ ($\Delta E_\gamma = 240 - 220$ МэВ) $\Delta E = 0,5 - 2$ МэВ.

Не “отработанный” основной пучок электронов отворачивается магнитным полем магнита мечения и поглощается в свинцовом поглотителе (“могильнике”), находящемся непосредственно за магнитом мечения.

Напряженность поля магнита мечения при рабочем токе 200 А составляет 8,4 кГс. Спад напряженности магнитного поля начинается на расстоянии ~ 10 см от края полюса внутри магнита и на расстоянии ~ 50 см от магнита составляет $\sim 10^{-4}$ от максимального значения.

Существуют возможности улучшения энергетического разрешения системы мечения, предусмотренные при создании системы: 1 - изменение расстояний между линейками годоскопа и изменение расстояний между годоскопом и магнитом мечения; 2 - применение дополнительного годоскопа в низкоэнергетической области γ -пучка. Данные методы позволят улучшить энергетическое разрешение системы мечения не менее чем в 1,5 – 2 раза.

Наладка системы мечения фотонов осуществляется при энергии выведенного электронного пучка 350 МэВ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка, регистрирующая π^0 -мезоны, состоит из двух одинаковых плеч (рис. 1). Каждое плечо состоит из набора самостоятельных детекторов, расположенных последовательно друг за другом вплотную на расстоянии 20 – 30 см от мишени (рис. 2) [5].

Первым элементом плеча является сцинтилляционный счетчик диаметром 70 мм и толщиной 5 мм, предназначенный для подавления фона заряженных частиц, идущего с мишени. Он входит в общий триггер как счетчик антисовпадений. За счетчим антисовпадений следует первый кристалл NaI(Ta) диаметром 40 мм и толщиной 40 мм, предназначенный для определения энерговыделения в начальной стадии развития электромагнитного ливня от

гамма-кванта. Далее расположены последовательно годоскоп из 4-х сцинтилляционных счетчиков (каждый счетчик имеет размер $10 \times 40 \times 5$ мм³) и "большой" сцинтилляционный счетчик размером $40 \times 40 \times 5$ мм³. За "большим" счетчиком расположен 2-й кристалл NaI(Ta), предназначенный определять энерговыделение оставшейся части электромагнитного ливня.

Суммарное энерговыделение в 1-м и 2-м кристаллах NaI(Ta) позволяет определить энергию гамма-кванта от распада пиона. Калибровка такой системы на электронных пучках показала, что энергетическое разрешение составляет не более 5%.

Сигналы счетчиков годоскопа подаются на сумматор и выходной сигнал совместно с сигналом от "большого" счетчика и первого счетчика подаются на схему совпадения (первый счетчик включается в режим "антисовпадения").

Сигнал со схемы совпадения является триггером плеча (триггер 1-го уровня). Этот сигнал совместно с сигналом от 2-го плеча подаются на схему совпадения и формируют триггер 2-го уровня. Данный триггер показывает, что произошла регистрация 2-х фотонов, то есть π^0 -мезона. Совпадения плеч установки и годоскопов системы мечения формируют основной "быстрый" триггер.

Энергия π^0 -мезона в околопороговой области определяется энергией фотона системой мечения. С другой стороны, дополнительно энергия пиона определяется с хорошей эффективностью (~100%) составными NaI(Ta) спектрометрами.

Авторы благодарят Е.И. Тамма и Е.И. Малиновского за внимание и поддержку работы; А.В. Верди, А.В. Ким и В.В. Ким за помощь в работе.

Работа поддержана грантом РФФИ: а-05-2-17345

ЛИТЕРАТУРА

1. Bergstrom J.C., Igarashi R., Vogt J.M. Phys.Rev. C, 1997, v.55, 2923-2930;
2. Говорков Б.Б. Ядерная физика, 1967, т.6, вып.1, 116-118;
3. Башмаков Ю.А., Беловинцев К.А., Карпов В.А. "Вывод электронов из синхротрона на резонансе четвертого порядка", Препринт ФИАН, № 87, Москва, 1991;
4. Басков В.А., Башмаков Ю.А., Верди А.В., Говорков Б.Б., Горбов Л.А., Карпов В.А., Ким В.В., Полянский В.В. "Моделирование энергетических характеристик системы мечения гамма-квантов ускорителя "Пахра", Препринт ФИАН, № 12, Москва, 1997;
5. Басков В.А., Башмаков Ю.А., Верди А.В., Говорков Б.Б., Горбов Л.А., Карпов В.А., Ким В.В., Котельников Н.Г., Полянский В.В. "Составной фотон-электронный спектрометр из кристаллов NaI(Tl) и пластических сцинтилляторов", ПТЭ, 1995, т.1, 42-47;

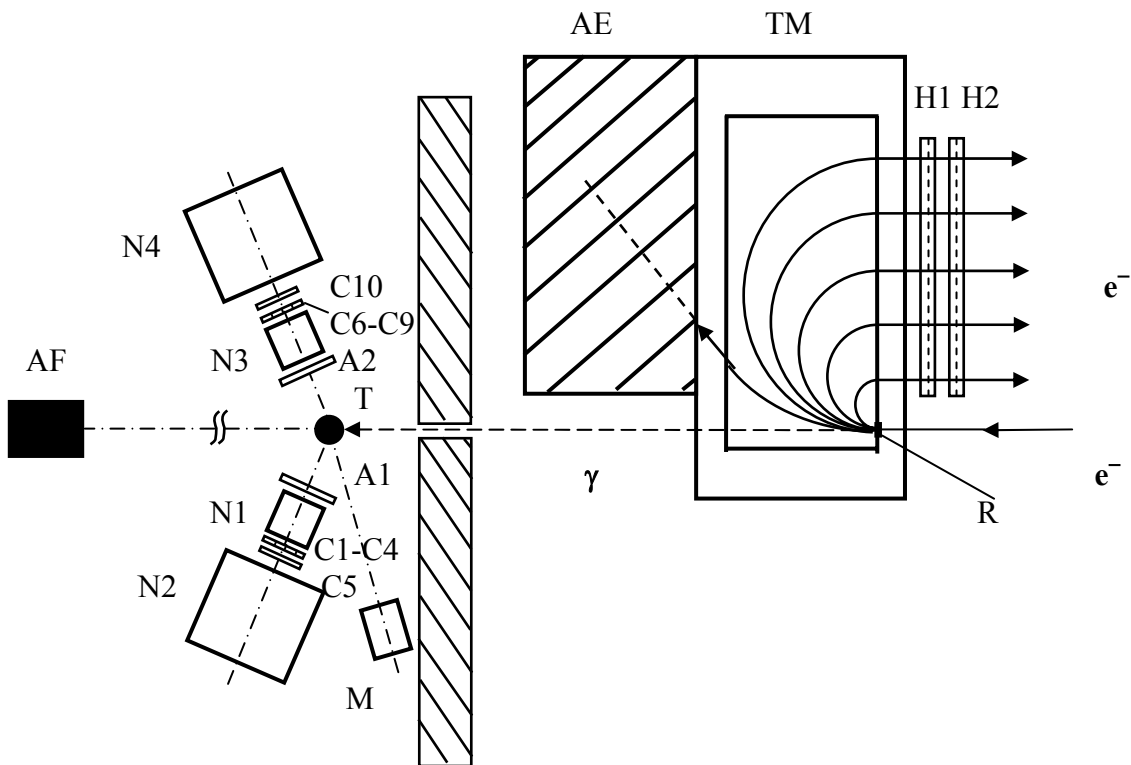


Рис. 1 Система мечения фотонов и экспериментальная установка.
 R – радиатор; H1 и H2 – годоскопы системы мечения;
 T – эксперим. мишень; A1 и A2 – счетчики антисовпадений;
 N1 -N4 – спектрометры NaI(Tl); C1-C4 и C6-C9 – годоскопы плеч;
 C5 и C10 – триггерные сцинтилляционные счетчики; AE и AF – поглотители электронного и фотонного пучков.

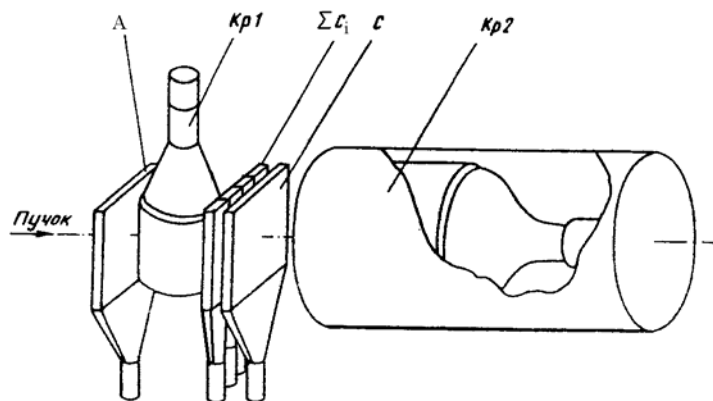


Рис. 2 Схема составного фотон-электронного спектрометра из кристаллов NaI(Tl) и пластических сцинтилляторов.
 A – счетчик антисовпадений; Кр1 – NaI(Tl) размерами $\text{Ø}40 \times 40 \text{ мм}^3$; ΣC_i – сцинтилляционный годоскоп;
 C – триггерный сцинтилляционный счетчик; Кр2 – NaI(Tl) размерами $\text{Ø}200 \times 200 \text{ мм}^3$.