

Лаборатория мезонной физики входит в международную коллаборацию, выполняющую программу "Барионная и гиперонная спектроскопия с использованием детектора Crystal Ball". Эта коллаборация была сформирована окончательно в 1995–1997 гг., она включает 14 университетов и институтов из пяти стран. Эксперименты E913/914/953/958 были выполнены на пучковой линии С6 ускорителя АGS Брукхэйвенской национальной лаборатории и включают в себя:

1. Измерение дифференциальных сечений π^-p -реакций с нейтральными частицами в конечном состоянии ($\pi^-p \rightarrow \eta$, $\pi^-p \rightarrow \pi^0 n$, $\pi^-p \rightarrow \eta n$, $\pi^-p \rightarrow \pi^0 \pi^0 n$) при импульсах налетающих пионов от 150 до 750 МэВ/с – эксперименты E913/958.
2. Измерение дифференциальных сечений K^-p -реакций с нейтральными частицами в конечном состоянии: $K^-p \rightarrow \gamma \Lambda$, $K^-p \rightarrow \pi^0 \Lambda$, $K^-p \rightarrow \eta \Lambda$ и аналогичные реакции с рождением Σ^0 -гиперона – эксперименты E914/953.
3. Изучение редких и запрещённых распадов η -мезона.

Благодаря использованию многофотонного спектрометра полного поглощения Crystal Ball с телесным углом, близким к 4π , сечения всех π^-p -реакций (или K^-p -реакций) с нейтральными частицами в конечном состоянии измерялись одновременно путем детектирования фотонов, образовавшихся непосредственно в этих реакциях или возникших в результате распада родившихся нейтральных мезонов или гиперонов. Детектор состоит из 672 оптически изолированных кристаллов NaI(Tl), изготовленных в форме усеченных треугольных пирамид. Внешний диаметр детектора Crystal Ball равен 132 см, внутренний диаметр слоя кристаллов NaI(Tl) – 50 см. Толщина отдельного кристалла составляет 15,7 радиационных единиц длины. Электромагнитный ливень, образуемый одним фотоном, выделяет свою энергию в нескольких кристаллах – в так называемом кластере. В процессе обработки в кластере находится кристалл с максимальной выделившейся энергией, и к ней добавляется энерговыделение в 12 соседних кристаллах. Направление ливня измеряется с угловым разрешением $\sigma_\theta = 2^\circ - 3^\circ$, $\sigma_\phi = 2^\circ / \sin \theta$. Энергетическое разрешение детектора Crystal Ball равно $\sigma_E/E = 2.0\%/E^{0.36}$ (E в ГэВ).

а) Изучение π^-p -реакций с нейтральными мезонами в конечном состоянии

Цикл экспериментов по изучению реакций $\pi^-p \rightarrow \text{neutrals}$ был выполнен с использованием жидководородной мишени при 22 значениях импульса налетающих пионов в диапазоне от 150 до 750 МэВ/с, захватывающем Δ -резонанс и три N^* -резонанса: $P_{11}(1440)$, $D_{13}(1520)$ и $S_{11}(1535)$. При каждом из импульсов проводились также дополнительные измерения с пустой мишенью.

При изучении π^-p -рассеяния с перезарядкой $\pi^-p \rightarrow \pi^0 n$ двухкластерные события от распадов $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ были использованы для выделения этой реакции и для получения дифференциальных сечений. Для подобных событий вычислялась $\gamma\gamma$ инвариантная масса в предположении, что оба кластера созданы фотонами. Если значение инвариантной массы совпадало с массой π^0 -мезона и выполнялись кинематические соотношения изучаемой реакции, то такое событие считалось вызванным реакцией $\pi^-p \rightarrow \pi^0 n$. Для каждого события вычислялся угол вылета π^0 -мезона в системе центра масс θ^m , и затем весь массив полученных данных был разбит на 20–25 интервалов по $\cos \theta^m$. Из «водородных» данных вычитались затем данные, полученные при измерениях с пустой мишенью, и в каждом угловом интервале вычислялось дифференциальное сечение (необходимое для этих вычислений значение углового акцептанса определялось на основе моделирования эксперимента методом Монте-Карло). Обработка

полученных на π -мезонном пучке данных с целью извлечения из них сечений π^-p -рассеяния с перезарядкой осуществлялась, в основном, силами сотрудников Лаборатории мезонной физики.

При импульсах налетающих пионов, превышающих порог рождения η -мезона, набранные данные были использованы для получения сечений процесса $\pi^-p \rightarrow \eta n$. До настоящего времени существующие экспериментальные данные по сечениям этой реакции очень скудны и противоречивы, особенно вблизи порога. В то же время получение точных экспериментальных данных в околопороговой области очень важно для проверки теоретических моделей, описывающих рождение η -мезона. Такие данные будут также полезны для извлечения длины ηN -рассеяния и понимания свойств $S_{11}(1535)$ -резонанса. Полные и дифференциальные сечения реакции $\pi^-p \rightarrow \eta n$ были определены в интервале импульсов налетающих пионов от порога (685 МэВ/с) до 750 МэВ/с. События, обусловленные реакцией $\pi^-p \rightarrow \eta n$, выделялись путём детектирования фотонов от распадов η -мезона $\eta \rightarrow 2\gamma$ (двухкластерные события) или $\eta \rightarrow 3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$ (6-кластерные события). Полученные новые результаты находятся в общем согласии с данными предыдущих измерений, но значительно превышают их по статистической точности.

В 2002 году ещё один цикл экспериментов был выполнен с использованием полиэтиленовой (CH_2) мишени. Чтобы исключить фон, обусловленный взаимодействием π^- -мезонов с ядрами углерода, содержащимися в мишени, при каждой из энергий проводились дополнительные измерения с использованием углеродной (графитовой) мишени соответствующей толщины. При последующем off-line анализе данные, полученные с углеродной мишенью, вычитались из CH_2 -данных – после необходимой перенормировки мониторинжных чисел. В настоящее время сотрудники Лаборатории мезонной физики завершают обработку и анализ полученных данных с целью извлечь абсолютные дифференциальные сечения реакций $\pi^-p \rightarrow \pi^0 n$ и $\pi^-p \rightarrow \eta n$.

б) Изучение K^-p -реакций с нейтральными частицами в конечном состоянии

В экспериментах по изучению K^-p -реакций отрицательные каоны отделялись от пионов, мюонов и электронов, имевшихся в пучке, с использованием двух $E \times B$ сепараторов и техники времени пролёта. Экспериментальные данные по K^-p -реакциям были получены осенью 1998 г. при двух центральных импульсах налетающих частиц. Низкоэнергетичные и высокоэнергетичные пучки имели центральные импульсы 720 МэВ/с и 750 МэВ/с, соответственно. Проволочные пучковые камеры, входящие в магнитный спектрометр на выходе мезонного канала, применялись для измерения того, насколько импульс каждого K^- -мезона отличается от центрального значения импульса в пучке. Точность определения абсолютного значения импульса составляла $\pm 2,5$ МэВ/с. Как низкоэнергетичный, так и высокоэнергетичный пучок были настроены так, чтобы оптимизировать отношение K/π и положение пучка на мишени. Мы получили около 8×10^4 K^- -мезонов при длительности банча AGS 2,8 сек каждые 5 сек с отношением K/π , равным 1:10.

При изучении реакции $K^-p \rightarrow \eta \Lambda$, конечное состояние идентифицировалось двумя способами: а) через распады $\eta \rightarrow 2\gamma$ и $\Lambda \rightarrow \pi^0 n \rightarrow 2\gamma$ (4-кластерные события); б) через распады $\eta \rightarrow 3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$ и $\Lambda \rightarrow \pi^0 n \rightarrow 2\gamma$ (8-кластерные события). Новые данные имеют гораздо более высокую точность по сравнению с предшествующими измерениями, которые были фрагментарны и противоречивы и не позволяли определить даже форму зависимости полного сечения от импульса.

Существует много общего между реакциями $K^-p \rightarrow \eta \Lambda$ и $\pi^-p \rightarrow \eta n$ в околопороговой области, когда доминирующую роль играет $N(1535)1/2^-$ -резонанс. Эти общие свойства включают в себя:

1. Резкий рост σ_{tot} при открывании η -канала.

2. Доминантность S -волны с близкими параметрами наклона зависимости σ_{tot} от импульса в с.ц.м. η -мезона:

$$\sigma_{tot}(K^-p \rightarrow \eta\Lambda) = (17 \pm 3) (\text{мкбн}/(\text{МэВ}/c)) \times p_\eta^*,$$

$$\sigma_{tot}(\pi^-p \rightarrow \eta n) = (15 \pm 1) (\text{мкбн}/(\text{МэВ}/c)) \times p_\eta^*.$$

3. Большие значения σ_{tot} при импульсах, далёких от η -порога; максимальная величина $\sigma_{tot}(K^-p \rightarrow \eta\Lambda) = 1,5 \pm 0,1$ мбн при $p_\eta^* = 81$ МэВ/с, в то время как для $\sigma_{tot}(\pi^-p \rightarrow \eta n)$ максимальная величина $2,6 \pm 0,3$ мбн достигается при $p_\eta^* = 182$ МэВ/с.

Чтобы понять околопороговое рождение η -мезона, мы предположили, что процесс идет через возбуждение промежуточного $\Lambda(1670)1/2^-$ -резонанса с очень небольшим вкладом состояний $\Lambda(1600)1/2^+$ и $\Lambda(1690)3/2^-$. Для аппроксимации полного сечения была применена унитарная многоканальная параметризация. В результате такой подгонки получена масса $\Lambda(1670)1/2^-$ -резонанса $M = 1673 \pm 2$ МэВ. Это значение массы согласуется с последними результатами, приведенными в таблицах Review of Particle Physics.

в) Изучение редких и запрещенных мод распада η -мезона

За время экспериментов 1998 года с использованием детектора Crystal Ball было набрано около 30×10^6 η -мезонов от реакции $\pi^-p \rightarrow \eta n$ при импульсе налетающих пионов 720 МэВ/с. Важной целью этих экспериментов было улучшить существующие значения относительных вероятностей редких и запрещенных мод распада η -мезона. Были изучены следующие нейтральные моды распада: $\eta \rightarrow 3\gamma$, $\eta \rightarrow \pi^0\gamma$, $\eta \rightarrow 2\pi^0\gamma$, $\eta \rightarrow 3\pi^0\gamma$, $\eta \rightarrow 4\pi^0$, $\eta \rightarrow \pi^0\gamma\gamma$, $\eta \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma\gamma$.

Распад $\eta \rightarrow 3\gamma$ запрещён законом сохранения C -чётности. Кроме того, существуют дополнительные факторы, подавляющие этот распад. Распад на три фотона есть электромагнитное взаимодействие в $3^{\text{ем}}$ порядке, пропорциональное $\alpha^3 \approx 4 \times 10^{-7}$ ($\alpha=1/137$ – постоянная тонкой структуры). Даже в ещё большей степени распад подавлен ограничениями фазового объёма и центробежным барьером. Верхний предел для вероятности этого распада, впервые измеренный в настоящем эксперименте, составляет $BR(\eta \rightarrow 3\gamma) < 4 \times 10^{-5}$ на 90% уровне достоверности. Поиск кандидатов на этот распад осуществлялся в массиве 3-кластерных данных, содержащем $18,4 \times 10^6$ событий. Наиболее существенный фоновый вклад был от распада $\eta \rightarrow 3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$, когда вызванные фотонами ливни перекрывались в детекторе.

Переход спин-0 \rightarrow спин-0 при испускании реального фотона запрещён законом сохранения углового момента. Следовательно, распад $\eta \rightarrow \pi^0\gamma$ должен быть абсолютно запрещён. Более того, распад не разрешён калибровочной и зарядовой инвариантностью. Поиск возможных кандидатов на этот распад проводился в том же самом массиве 3-кластерных данных, который был использован для определения $BR(\eta \rightarrow 3\gamma)$. Процесс $\pi^-p \rightarrow \eta n \rightarrow \pi^0 n \rightarrow 3\gamma$ имеет те же источники фона, что и процесс $\pi^-p \rightarrow \eta n \rightarrow 3\gamma$. Однако число эффективных обрезаний здесь на одно больше, а именно – добавляется масса π^0 -мезона. Полученный верхний предел для вероятности распада $BR(\eta \rightarrow \pi^0\gamma) < 9 \times 10^{-5}$ (на 90% уровне достоверности) примерно в 2 раза больше, чем аналогичный предел для $BR(\eta \rightarrow 3\gamma)$.

Моды распада $\eta \rightarrow 2\pi^0\gamma$ и $\eta \rightarrow 3\pi^0\gamma$ обе строго запрещены зарядово-сопряжённой инвариантностью. Массив 5-кластерных данных, содержащий $5,2 \times 10^6$ событий, использован для поиска кандидатов на распад $\eta \rightarrow 2\pi^0\gamma \rightarrow 5\gamma$. Фон для этого распада определяется, в

основном, событиями от распада $\eta \rightarrow 3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$ в случаях, когда два однофотонных ливня перекрывались или один из фотонов не детектировался спектрометром Crystal Ball. Полученный верхний предел для вероятности этого распада $BR(\eta \rightarrow 2\pi^0\gamma) < 5 \times 10^{-4}$ (на 90% уровне достоверности). С использованием значения $\Gamma(\eta \rightarrow all) = (1.29 \pm 0.07)$ кэВ величина BR была конвертирована в верхний предел для ширины распада $\Gamma(\eta \rightarrow 2\pi^0\gamma) < 0.64$ эВ. До выполнения этой работы распад $\eta \rightarrow 2\pi^0\gamma$ экспериментально никем не изучался. Для поиска кандидатов на распад $\eta \rightarrow 3\pi^0\gamma \rightarrow 7\gamma$ был использован массив 7-кластерных данных, содержащий $0,168 \times 10^6$ событий. Основным источником фона здесь – это события от распада $\eta \rightarrow 3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$, когда 7-ой кластер образован за счёт «расщепления» однофотонного ливня или как случайный кластер от наложения событий. Для подавления этого фона применялись различные обрезания и критерии отбора. В результате получены верхние пределы (на 90% уровне достоверности): $BR(\eta \rightarrow 3\pi^0\gamma) < 6 \times 10^{-5}$ и $\Gamma(\eta \rightarrow 3\pi^0\gamma) < 0.077$ эВ.

Распад $\eta \rightarrow 4\pi^0$ запрещён законом сохранения CP -чётности, так что он представляет собой тест для CP -нарушающей амплитуды сильного взаимодействия вплоть до уровня 10^{-7} , когда уже начинает играть роль слабое взаимодействие. Этот распад требует образования восьми кластеров, которые должны быть реконструированы в четыре π^0 -мезона, имеющие вместе инвариантную массу, равную массе η -мезона. Это позволяет также устранить ожидаемый фон от распада $\eta \rightarrow 3\pi^0$, когда образуются два «лишних» кластера от фотонных ливней, которые «дробятся» между несколькими кластерами. Массив 8-кластерных данных содержал 44289 кандидатов на распад $\eta \rightarrow 4\pi^0$. Эти события были обработаны с помощью кинематического фита в рамках гипотезы $\pi^-p \rightarrow \eta n \rightarrow 4\pi^0 n \rightarrow 8\gamma n$. Ни одного 8-кластерного события, удовлетворяющего этой гипотезе, не было найдено, и в итоге были получены такие верхние пределы (на 90% уровне достоверности): $BR(\eta \rightarrow 4\pi^0) < 6.9 \times 10^{-7}$ и $\Gamma(\eta \rightarrow 4\pi^0) < 8.3 \times 10^{-4}$ эВ.

Все рассмотренные выше распады η -мезона запрещены – в рамках Стандартной Модели – фундаментальными законами сохранения, и стимулом к экспериментальному исследованию вероятностей этих распадов является поиск таких механизмов распадов, которые лежали бы за пределами Стандартной Модели. Однако существует и другая категория распадов (так называемые редкие распады), вероятности которых предсказываются существующими теоретическими моделями, и экспериментальное измерение вероятностей таких распадов важно для проверки этих моделей. К подобного рода распадам η -мезона относятся $\eta \rightarrow \pi^0\gamma\gamma$ и $\eta \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma\gamma$. Амплитуда распада $\eta \rightarrow \pi^0\gamma\gamma$ отсутствует в первом и очень мала во втором порядке в импульсном разложении киральной теории возмущений. Только третий и более высокие порядки дают вклад в амплитуду распада. Таким образом, с теоретической точки зрения, этот распад даёт уникальную возможность проверки точности вычислений вклада высших порядков импульсного разложения в конечную величину амплитуды распада. Экспериментальное определение вероятности распада $\eta \rightarrow \pi^0\gamma\gamma$ представляет собой достаточно сложную задачу – в основном из-за вклада фонов от распада $\eta \rightarrow 3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$ и от реакции $\pi^-p \rightarrow 2\pi^0 n \rightarrow 4\gamma n$. В итоге кропотливой многоступенчатой процедуры обработки массива 4-кластерных данных было получено более 1600 случаев распада $\eta \rightarrow \pi^0\gamma\gamma$. Отсюда определена величина вероятности распада $BR(\eta \rightarrow \pi^0\gamma\gamma) = (3,5 \pm 0,7_{\text{stat}} \pm 0,6_{\text{stat}}) \times 10^{-4}$ и значение ширины распада $\Gamma(\eta \rightarrow \pi^0\gamma\gamma) = 0,45 \pm 0,09_{\text{stat}} \pm 0,08_{\text{syst}}$ эВ. Этот результат хорошо согласуется с теоретически предсказанным значением $\Gamma(\eta \rightarrow \pi^0\gamma\gamma) = 0,47 \pm 0,10$ эВ, но в 2 раза ниже экспериментальных значений, полученных в 1982 году на установке ГАМС.

Для вероятности редкого распада $\eta \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma\gamma$ существуют теоретические предсказания в рамках киральной теории возмущений, однако приводимые теоретиками величины вероятности этого распада слишком малы (на уровне 10^{-7} – 10^{-6}), чтобы быть подтвержденными или опровергнутыми на основании экспериментальных данных. Пока анализ данных, полученных с детектором Crystal Ball, дал только верхний предел для вероятности этого распада $BR(\eta \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma\gamma) < 1,2 \times 10^{-3}$.