

СЗ43
Ш-87



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Лаборатория ядерных проблем

Л.Н. Штарков

798

ФОТОРАСЩЕПЛЕНИЕ ДЕЙТОНА
ПРИ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЯХ
ГАММА-КВАНТОВ

Автореферат диссертации, представленной
на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Научный руководитель -
доктор физико-математических наук
профессор П.А. Черенков

Д у б в а 1961

С 343

Ш-87

Л.Н. Штарков

798

6999
ФОТОРАСЩЕПЛЕНИЕ ДЕЙТОНА
ПРИ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЯХ
ГАММА-КВАНТОВ

Автореферат диссертации, представленной
на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Научный руководитель -
доктор физико-математических наук
профессор П.А. Черенков

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Одной из центральных задач ядерной физики в настоящее время является исследование взаимодействий элементарных частиц, в частности, взаимодействия нуклон-нуклон и взаимодействия нуклон-фотон. Экспериментальные сведения об этих взаимодействиях получают обычно путем исследования характеристик рассеяния соответствующих частиц, так как в этом случае исследуемые взаимодействия реализуются в чистом виде. Дополнительная информация может быть получена путем исследования простейших ядерных реакций, в первую очередь, простейшей фотоядерной реакции - фоторасщепления дейтона. Экспериментальному исследованию реакции фоторасщепления дейтона при энергии гамма-квантов от 50 до 150 Мэв посвящена настоящая работа.

Экспериментальное исследование фоторасщепления дейтона может дать сведения об одном из взаимодействий нуклон-нуклон или нуклон-фотон, если существует удовлетворительная теория другого взаимодействия. В момент постановки настоящей работы считалось хорошо исследованным взаимодействие нуклонов в связанном состоянии - дейтоне. Взаимодействие нуклонов с электромагнитным полем было хорошо исследовано лишь при малых энергиях гамма-квантов /менее 20 Мэв/. В этой области энергий оказалась удовлетворительной простейшая теория фоторасщепления дейтона, основанная на учете взаимодействия фотона только с зарядом протона и статическими аномальными моментами нуклонов и пренебрегающая взаимодействием нуклонов в конечном состоянии. Предполагалось, что эта теория должна давать правильные результаты при увеличении энергии еще в довольно широкой области. В то же время было ясно, что по мере приближения энергии фотонов к порогу фоторождения π -мезонов /около 150 Мэв/ указанная теория должна становиться все более неточной в связи с возможностью мезонного механизма взаимодействия. Вопрос в том, при каких энергиях мезонные эффекты начинают становиться заметными и каков характер их вклада в сечение, предстояло решить экспериментально, что и определило выбор исследованной в работе области энергий фотонов. Предполагалось, кроме того, что в области меньших энергий, где мезонные эффекты еще не дают заметного вклада, экспериментальное исследование фоторасщепления дейтона позволит апробировать сведения о взаимодействии нуклон-нуклон, получаемые в опытах по рассеянию.

Представленная работа состоит из пяти глав: I. Введение, II. Обзор экспериментальных и теоретических работ, III. Постановка эксперимента и методы обработки результатов, IV. Результаты эксперимента и их обсуждение, V. Заключение. Кроме того, в конце работы приводятся два Приложения и полный список оригинальных экспериментальных и теоретических работ, посвященных фоторасщеплению дейтона.

В главе I. "ВВЕДЕНИЕ" указан, как это сделано выше, теоретический интерес настоящей работы в связи с основными задачами ядерной физики, обоснован выбор исследованной области энергий гамма-квантов и приведены сведения о других опубликованных экспериментальных работах, посвященных тому же вопросу.

Глава II. "ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАБОТ" состоит из трех частей.

В первой части обзора кратко изложена история исследований фоторасщепления дейтона. Особо отмечена связь новейших теоретических исследований фоторасщепления с успехами в исследованиях рассеяния нуклон-нуклон.

Во второй, экспериментальной, части обзора проведено сопоставление всех экспериментальных работ, относящихся к энергиям гамма-квантов более 20 Мэв. Приведена сводная таблица всех работ, включающая сведения об использованных методах исследования и об объеме и точности проведенных измерений. Среди всех опубликованных работ отобраны шесть "основных" работ, результаты которых приведены при различных энергиях гамма-лучей в виде параметров функций, использованных для аппроксимации угловых распределений в виде полных сечений. Сопоставление результатов этих "основных" работ показало, что они согласуются между собой в большинстве случаев в пределах $\pm 15\%$, что можно считать удовлетворительным при достигнутых относительной и абсолютной точностях эксперимента. Особо отмечены два случая, когда можно подозревать наличие некоторого расхождения экспериментальных результатов.

Обзор теоретических работ относится только к области энергий гамма-квантов, лежащей ниже порога фоторождения π -мезонов. Кратко рас-

смотрены фундаментальные для теории фоторасщепления работы Рариты и Швингера и завершающие первый период теоретического исследования фоторасщепления работы Шиффа, Маршалла и Гэса^{/5/}. Кратко резюмированы результаты проведенного в свое время сравнения расчетов^{/5/} с экспериментальными данными. Далее указаны два основных направления последующих теоретических исследований: 1/ исследования возможного вклада мезонного механизма фоторасщепления и 2/ исследования, предполагавшие, что мезонный механизм не дает заметного вклада. Работы второго направления^{/6/}, относящиеся в первую очередь к области энергий ниже порога фоторождения π -мезонов, рассмотрены более подробно. В обзоре приведена сводная таблица наиболее полных теоретических работ этого направления, указывающая основные использованные при расчетах предположения. На сводных графиках приведены численные результаты для параметров углового распределения. Подробнее /с численным материалом/ рассмотрены эффекты взаимодействия двуночной системы с излучением, эффекты волновой функции дейтона, эффекты взаимодействия в конечных состояниях и, наконец, вклады в сечение некоторых "неосновных" мультипольных членов.

Глава III. "ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ" распадается по содержанию на две части. В первой части приводится описание постановки эксперимента. Фоторасщепление дейтона исследовалось в работе с пучком гамма-лучей 280 Мэв синхротрона Физического института им. П.Н. Лебедева Академии наук СССР путем регистрации протонов из мишеней из тяжелой и простой воды телескопом пропорциональных счетчиков в заданных, достаточно узких, интервалах углов и энергий. Выход протонов из дейтерия определялся как разность выходов из тяжелой и простой воды. Энергия гамма-квантов, ответственных за регистрируемые акты фоторасщепления определялась по формулам кинематики процесса. Отделение исследуемого процесса фоторасщепления дейтона от основного фонового процесса - фоторождения π -мезонов на нуклонах дейтона - достигалось для каждого угла регистрации протонов соответствующим выбором интервала регистрации протонов по энергиям. Отделение регистрируемых частиц - протонов - от сильного фото-

на электронов я мезонов, всегда существующего вблизи электронных ускорителей, осуществлялось протонным телескопом, принципы работы которого, конструкция, настройка и градуировка рассмотрены несколько подробнее. Телескоп выделял протоны по принципу измерения пробега и удельной ионизации и состоял из двух газовых пропорциональных счетчиков и двух поглотителей /фильтров/, помещаемых перед каждым из счетчиков. В работе приведены соотношения, определяющие интервал энергий регистрируемых протонов и получены соотношения, выполнение которых необходимо для отделения протонов от более легких частиц. Особо подчеркнута необходимость для такого отделения второго /промежуточного/ фильтра. При настройке телескопа учитывались флуктуации потерь энергии в счетчиках, однако, в представленном тексте этот вопрос подробно не излагается. Основной характеристикой изготовленной для работы электронной аппаратуры является точность и стабильность амплитудной калибровки трактов пропорциональных счетчиков не хуже 1%. В процессе работы указанная точность контролировалась по счету от источников альфа-частиц, установленных внутри каждого из счетчиков. Процедура измерений в целом была построена таким образом, чтобы ликвидировать возможность большинства систематических ошибок, в частности, специфических ошибок /разностного/ эксперимента, и иметь возможность контролировать величину остающихся ошибок при последующей статистической обработке измерений.

Во второй части главы III рассматриваются вопросы, связанные с вычислением дифференциального сечения исследуемого процесса и с различными поправками. Наиболее подробно рассмотрен общий подход к вычислению дифференциального сечения по измеренным выходам, позволивший получить общее выражение для функции энергетического разрешения. Общие положения использованы /Приложение 1/ для получения функции энергетического разрешения, связанной с потерями энергии протонами в исследуемых мишенях. Рассмотрены также поправки на многократное рассеяние и ядерные взаимодействия протонов в фильтрах телескопа, на вторичные протоны, создаваемые в фильтрах нейтронами, и поправка на прямоугольность рабочего объема счетчиков.

Глава IV. "РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ" содержит основные результаты работы.

Основным результатом работы являются численные значения дифференциального сечения фоторасщепления дейтона, измеренные для семи углов регистрации протонов в диапазоне приблизительно от 20° до 180° в л.с.к. при шести значениях средней энергии гамма-квантов в области приблизительно от 50 до 150 Мэв. Эти значения приведены в таблице, а также изображены на рисунках в виде угловых распределений в с.и.м. соответствующих шести различным фиксированным значениям средней энергии гамма-квантов. Интегрированием угловых распределений по телесным углам получены численные результаты для полного сечения. Основная неточность полученных результатов связана с неточностью измерения выходов протонов и составляет в среднем около $\pm 10\%$. Неточность определения абсолютного потока гамма-лучей может привести к систематической ошибке в абсолютных значениях сечений не более $\pm 10\%$.

К моменту получения наших окончательных результатов для сечения в литературе были опубликованы результаты очень грубых измерений сечения, проведенных в США. Несмотря на то, что расхождения между результатами этих работ для абсолютной величины сечения достигали нескольких крат, а результаты для углового распределения были очень скудными и также сильно различались между собой, казалось, что в целом эти экспериментальные результаты сильно противоречат результатам лучших по тому времени теоретических расчетов Шиффа-Маршалла-Гэса^{15/}. Появление наших экспериментальных данных /а также данных проведенной одновременно работы Уалина, Шривера и Хансона^{14/}/ позволило впервые количественно сформулировать обнаруженное расхождение эксперимента с теорией: 1/ Экспериментальные полные сечения оказались больше теоретических во всей области средних энергий /20-150 Мэв/; расхождение начиналось в районе 20-40 Мэв, быстро увеличивалось с ростом энергии и становилось приблизительно четырехкратным в районе порога фоторождения π -мезонов. 2/ В угловых распределениях была обнаружена отсутствовавшая в теоретических результатах сильная изотропия компоненты, относи-

тельный вклад которой становился заметным при энергиях около 20 Мэв, быстро возрастал с ростом энергии и доминировал при энергиях выше ~ 60 Мэв. 3/. Сечение для компоненты углового распределения, пропорциональной $\text{Sin}^2\theta$, выделенное из экспериментальных данных, оказалось несколько меньше, чем это предсказывалось теорией. 4/ Была обнаружена очень сильная асимметрия угловых распределений относительно угла 90° , в частности, максимум распределения оказался сильно сдвинутым в сторону малых углов.

Количественная формулировка расхождения теории с экспериментом была на этом этапе исследования фоторасщепления дейтона важным результатом настоящей работы. Последующее развитие теории происходившее, как это отмечено выше, по двум направлениям привело в последнее время к появлению целого ряда подробных и тщательных расчетов фоторасщепления при энергиях ниже порога фоторождения мезонов^{16/}. Результаты этих расчетов были подвергнуты сравнению с экспериментальными результатами настоящей работы.

Во всех опубликованных работах анализ экспериментальных угловых распределений для фоторасщепления дейтона основывался до сих пор на аппроксимации распределений зависимостью вида

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = (a + b\text{Sin}^2\theta)(1 + 2\beta \text{Cos}\theta) \quad /1/ \text{ или вида}$$

$\frac{d\sigma}{d\Omega} = A + B \text{cos}\theta + C \text{cos}^2\theta$ /2/. В нашей работе первое сравнение с теорией также было основано на использовании выражения /1/. Однако позже был проанализирован вопрос о возможной форме угловой зависимости дифференциального сечения. Была проведена последовательная классификация возможных при фоторасщеплении дейтона низших мультипольных переходов с грубой оценкой порядков величины соответствующих членов в сечении. Для трех первых порядков величины была выписана мультипольная структура всех возможных членов сечения. Объединив этот результат с результатами, известными из общей теории угловых распределений, мы получили общее выражение для возможной формы углового распределения фоторасщепления дейтона в области энергий, где еще справедливо мультипольное разложение /по-видимому, приблизительно до 150 Мэв/;

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = a + b\text{Sin}^2\theta + c \text{Cos}\theta + d\text{Sin}^2\theta \text{Cos}\theta. \quad /3/$$

Это выражение было использовано для аппроксимации угловых распределений и были получены результаты для его параметров. Угловое распределение, полученное в новейших теоретических расчетах^{16/}, также, естественно, имеет форму^{13/}. Очень важно для сравнения с теорией, что значения параметров a и b , получаемые при аппроксимации выражениями /1/ или /2/, служат лишь плохой оценкой соответствующих параметров выражения /3/, а значения параметров выражения /3/ c и d при этом вообще не могут быть получены. Поэтому полученные в настоящей работе численные результаты для четырех параметров распределения /3/ при шести исследованных средних значениях энергии гамма-квантов являются первыми и пока единственными результатами, позволяющими произвести корректное и полное сравнение новейших теоретических расчетов с экспериментом.

Непосредственные результаты сравнения, проведенного на основе аппроксимации в форме /3/, и выводы для теории фоторасщепления, которые могут быть сделаны в результате сравнения, можно коротко сформулировать следующим образом:

1. В большей части исследованной области средних энергий, по крайней мере до 100-120 Мэв, экспериментальные результаты для всех четырех параметров углового распределения и, соответственно, результаты для полного сечения в пределах точности эксперимента согласуются с результатами наиболее полных теоретических расчетов^{16/}, что позволяет сделать следующие выводы:

а/ в указанной области энергий, как это было и при меньших энергиях, взаимодействие электромагнитного поля с двунуклонной системой может быть правильно / в пределах точности эксперимента / описано, как взаимодействие с током и магнитными моментами нуклонов, не прибегая в явном виде к учету мезонных эффектов. Гипотезы о большом вкладе мезонных эффектов при энергиях значительно ниже порога фоторождения π -мезонов, выдвинутые в свое время /Королев, Вилсон, Аус-

терн и другие/ по нашим данным не нашли своего подтверждения;

б/ количественное согласие с экспериментом в этой области энергий может быть достигнуто только для теоретических расчетов, последовательно учитывающих целый ряд обстоятельств, роль которых считалась ранее несущественной: переходы в состояние 3F_2 , тензорное взаимодействие нуклонов в конечных состояниях и вклады в сечение от некоторых "неосновных" мультипольных членов;

в/ количественное согласие с экспериментом может быть достигнуто только при использовании в расчетах наборов фаз нуклон-нуклонного взаимодействия в состояниях 3P_1 , соответствующих положительному знаку тензорного потенциала в этих состояниях. Этот результат значительно облегчает фазовый анализ рассеяния нуклон-нуклон при энергиях до 100 Мэв, который, как известно, без использования результатов поляризационных экспериментов не может быть проведен однозначно.

II. В районе наибольших исследованных нами энергий, начиная приблизительно со 100-120 Мэв, экспериментальные результаты для двух компонент углового распределения, изотропной и пропорциональной $\cos \theta$, заметно превышают результаты теоретических расчетов, что требует своего объяснения.

Для объяснения этого расхождения можно сослаться, как это обычно делается, на возможные в этой области энергий виртуальные мезонные эффекты. Однако нам кажется, что прежде всего необходимо навести чистоту в обычных расчетах, не учитывающих мезонные эффекты. С этой целью в представленной работе по материалам новейших теоретических расчетов были проанализированы вклады в сечение от некоторых "неосновных" мультипольных членов, вклады высших членов в разложении амплитуды мультипольных переходов в ряд по степеням $k r$, и, наконец, влияние численных значений фаз нуклон-нуклонного взаимодействия. С той же целью была проведена последовательная классификация возможных при фоторасщеплении дейтона мультипольных членов сечения с оценкой относительного порядка величины членов. На основе этой классификации указаны члены сечения, которые при существующих точностях расчетов и эксперимента могут дать

заметный вклад в сечение, но которые до сих пор еще не были рассчитаны в опубликованных теоретических работах.

В главе У. "ЗАКЛЮЧЕНИЕ" кратко сформулированы основные результаты настоящей работы и приведены рекомендации по возможной постановке последующих экспериментов и по возможным путям уточнения теоретических расчетов для области энергий ниже мезонного порога.

Основные результаты настоящей работы изложены в докладах на Всесоюзных конференциях ^{1/} и ^{2/} и в статье ^{3/}.

Л и т е р а т у р а

1. Н.Б. Делоне, Г.А. Сокол, Л.И. Словохотов, Л.Н. Штарков. Тезисы докладов на Всесоюзной конференции по физике частиц высоких энергий. 1956 г., стр. 96.
2. Ю.А. Александров, Н.Б. Делоне, Г.А. Сокол, Л.И. Словохотов, Л.Н. Штарков. Труды Всесоюзной конференции по ядерным реакциям при малых и средних энергиях 1957 г., стр. 422.
3. Ю.А. Александров, Н.Б. Делоне, Г.А. Сокол, Л.И. Словохотов, Л.Н. Штарков. ЖЭТФ, 33, 814 (1957).
4. Whalin E.A., B.D. Schriever, A.O. Hanson. Phys.Rev. 101, 377, (1956).
5. L.I. Schiff. Phys.Rev. 78, 733 (1950). Marchall J.F., E. Guth. Phys.Rev. 78, 738 (1950).
6. Nicholson. A.F., G.E. Brown. Proc.Phys.Soc. 73, 221 (1959). J.J. De Swart, R.E. Marshak. Physica 25, 1001 (1959). S.H. Hsieh. Progr. Theor. Phys. 21, 585 (1959). W.Zernik, M.L.Rustgi, G.Breit, Phys. Rev. 114, 1359 (1959). J. Iwadare M. Matsumoto, S. Otsuki. R. Tamagaki, W. Watari. Nuovo Cim. 13, 1263 (1959). G.Kramer, C. Wernitz. Phys.Rev. 119, 1627 (1960). G. Kramer Nucl. Physics 15, 60 (1960). G. Kramer. Phys. Rev. Lett. 5, 439 (1960). M.L. Rustgi, W. Zernik, G. Breit, D.J. Andrews. Phys.Rev. 120, 1881 (1960).

Рукопись поступила в издательский отдел

28 сентября 1961 г.