

**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ИМ Б.И. СТЕПАНОВА  
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ**

УДК 539.172

**Левчук Михаил Иванович**

**ПРОЦЕССЫ РАССЕЯНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ  
ФОТОНОВ ДЕЙТРОНАМИ И  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СТРУКТУРА НУКЛОНОВ**

**01.04.23 — физика высоких энергий**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук**

**Минск — 2000**

Работа выполнена в Институте физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси.

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук, профессор Кувшинов В.И., доктор физико-математических наук, профессор Кураев А.А., доктор физико-математических наук, профессор Максименко Н.В.

**Оппонирующая организация:** НИИ ядерных проблем при БГУ, г. Минск

Защита состоится 4 июля 2000 г. в 14 часов на заседании Совета по защите диссертаций Д01.05.02 в Институте физики НАН Беларуси (220072, проспект Ф. Скорины 70, тел. (017) 284-17-17).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики НАН Беларуси.

Автореферат разослан " 2 " ИЮНЯ 2000 г.

Ученый секретарь Совета,  
доктор физ.-мат. наук



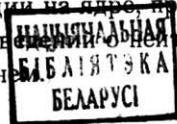
(Ю.А. Курочкин)

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** На протяжении многих десятилетий электромагнитные взаимодействия (ЭМВ) являются одним из основных источников наших знаний о структуре нуклонов и ядер. Классическим процессом, исследование которого позволяет пролить свет на многие детали ЭМВ ядер, является фоторасщепление дейтрона (ФД)  $\gamma d \rightarrow np$  (или обратный процесс радиационного захвата  $np \rightarrow \gamma d$ ). Уже в течение 65 лет ФД является одним из наиболее интенсивно исследуемых процессов ядерной физики низких и средних энергий. ФД вместе с упругим и неупругим  $ed$ -рассеянием служат уникальным инструментом проверки различных теоретических подходов, претендующих на описание ЭМВ связанных систем. Это обусловлено тем, что, во-первых, дейтрон — это простейшее и поэтому наиболее надежно рассчитываемое ядро, во-вторых, электромагнитное взаимодействие хорошо понято и, в-третьих, оно достаточно слабое, что дает возможность пользоваться теорией возмущений. Изучение ФД дало надежные доказательства проявлений мезонных и изобарных степеней свободы в дейтроне. Оно позволяет получить дополнительную информацию о нуклон-нуклонном взаимодействии, в частности, изучать роль релятивистских эффектов и возбуждений нуклонных резонансов в ядре. Не удивительно, что изучению ФД посвящены десятки теоретических и экспериментальных работ.

Среди этих работ особое место занимают работы Лаже, основанные на использовании диаграммного подхода. В отличие от всех других методов, в ДП не делается т.н. преобразование Зигерта, и вклады, обусловленные взаимодействием фотона как с отдельными нуклонами в дейтроне, так и с  $\pi$ -мезонами, связывающими нуклоны, учитываются явным образом. Казалось бы, что такой подход вполне обоснован и его результаты должны быть согласованными с предсказаниями других подходов и удовлетворительно описывать экспериментальные данные. Оказалось, однако, что это не так. В некоторых случаях результаты Лаже совершенно не описывают данные, так что был сделан вывод о том, что диаграммный подход Лаже не может быть использован для описания ФД. Причины, по которым метод Лаже давал плохое описание ряда экспериментальных данных, так и оставались невыясненными в течение нескольких десятилетий.

Данными о внутренней структуре ядра не исчерпывается информация, которая может быть получена в его ЭМВ. Вследствие отсутствия свободной плотной нейтронной мишени реакции на ядро, прежде всего — на дейтрон, служат основным источником сведений о нейтроне и "элементарных" амплитудах взаимодействия на нейтроне.



В последнее время значительный интерес проявляется к изучению комптоновского рассеяния на протоне и нейтроне в области низких и средних энергий. Это связано с тем, что в указанных процессах могут быть определены фундаментальные структурные постоянные нуклонов – их электрическая ( $\bar{\alpha}$ ) и магнитная ( $\bar{\beta}$ ) поляризуемости. Они содержат важную информацию о структуре нуклонов на средних и больших расстояниях, в частности, о радиусе кваркового кора, о мезонной шубе, о вкладе в мезонную шубу коррелированных  $\pi\pi$ -пар или  $\sigma$ -мезона и т.д.

Эксперименты по рассеянию фотонов на протонах, выполненные при энергиях ниже порога фоторождения пионов с использованием как тормозных, так и меченых фотонов, позволили измерить электрическую поляризуемость протона с точностью до 10%, а магнитную – с точностью около 50%.

Что касается поляризуемостей нейтрона, то здесь ситуация гораздо хуже, несмотря на то, что эксперименты по определению  $\bar{\alpha}_n$  начались раньше, чем для протона. Основные трудности при измерении поляризуемостей нейтрона связаны с отсутствием плотной нейтронной мишени и с малостью дифференциального сечения комптоновского рассеяния на нейтроне. Вследствие этого до сих пор  $\bar{\alpha}_n$  измерялись в экспериментах по рассеянию медленных нейтронов в электрических полях тяжелых ядер. Единственное, чего удалось достичь за 40 лет экспериментов, это установить область возможных значений электрической поляризуемости  $\bar{\alpha}_n = 0 - 20$  (в единицах  $10^{-4}$  Фм<sup>3</sup>). Что касается магнитной поляризуемости нейтрона  $\bar{\beta}_n$ , то до сих пор нет никакой экспериментальной информации об ее величине, кроме той, которая может быть получена при совместном использовании "измеренной" электрической поляризуемости и предсказания т.н. правила сумм Балдина для нейтрона.

В самое последнее время неожиданно возникла еще одна проблема в теории комптоновского рассеяния на нуклоне. Известно, что в разложении амплитуды рассеяния по степеням энергии фотона, наряду с поляризуемостями во втором порядке, появляются четыре новые структурные постоянные в третьем порядке разложения, которые носят название спиновых поляризуемостей (два таких параметра под названием "гирации" были введены еще в 1977 г. в работе Л.Г. Мороза и Н.В. Максименко, а в 1985 г. были даны первые численные оценки этих параметров, которые находятся в хорошем согласии с результатами современных расчетов). В случае рассеяния назад амплитуда зависит от т.н. "backward" спиновой поляризуемости нуклона  $\gamma_\pi$ . Недавно был выполнен ряд теоретических расчетов  $\gamma_\pi$ , которые привели к близким значениям  $\gamma_\pi = -37 \pm 2$  (в единицах  $10^{-4}$  Фм<sup>4</sup>). Оказалось, однако, что эти значения для протона

находятся в большом противоречии с результатом совместного анализа данных по комптоновскому рассеянию и фоторождению пионов, полученных на установке LEGS (г. Брукхевен, США):  $\gamma_{\pi}^{(p)} = -27.1 \pm 2.2_{2.4}^{+2.8}$ . Для объяснения противоречия, было сделано предположение о существовании новых вкладов от "непертурбативной спиновой структуры нуклона". Причина возникновения таких вкладов, однако, не вполне ясна. Поэтому представляется очень важным иметь независимые подтверждения указанного результата.

Очень богатая информация о структуре нуклона может быть извлечена и в реакции фоторождения пионов на нуклонах. Неудивительно, что этот процесс привлекает пристальное внимание как теоретиков, так и экспериментаторов в течение уже многих десятилетий. Отметим, что, как и в случае комптоновского рассеяния, знание амплитуд фоторождения пионов на нуклоне имеет большое значение при интерпретации данных по фоторождению пионов на ядрах.

Несмотря на то, что экспериментальное изучение фоторождения пионов на нуклонах имеет длинную историю, экспериментальная ситуация не так удовлетворительна, как это обычно представляется. В качестве примера можно упомянуть расхождения, существующие между результатами мультипольных анализов реакций  $\gamma N \rightarrow \pi N$ . Даже большая магнитная дипольная  $M_{1+}$ -амплитуда вблизи  $\Delta$  резонансного пика отличается в этих анализах на 2-3%. Такая неопределенность может существенно влиять на теоретические предсказания для наблюдаемых не только в самом фоторождении пионов, но также и для других процессов. Это относится, в частности, к комптоновскому рассеянию. Использование разных парциальных анализов для расчета дисперсионных интегралов выявило существенную зависимость теоретического дифференциального сечения комптоновского рассеяния на нуклоне от выбора анализа.

В настоящее время возрос интерес к изучению амплитуды  $\pi^0$ -фоторождения, что вызвано попытками определить отношение мультиполей  $E_{1+}/M_{1+}$  в  $\Delta$ -резонансной области. Указанное отношение характеризует относительную амплитуду квадрупольного  $E2$ -возбуждения  $\Delta$ -резонанса в присутствии доминирующего дипольного  $M1$ -перехода. Различные теоретические модели предсказывают, что это отношение довольно мало (от -0.9% до -6% с некоторым предпочтением величины -2.5%). Следовательно, требуется высокая экспериментальная точность для измерения отношения  $E_{1+}/M_{1+}$ . Благодаря сильно подавленному нерезонансному фону в реакции  $\gamma N \rightarrow \pi^0 N$ , по сравнению со случаем фоторождения заряженных пионов, первая выглядит более привлекательной для определения отношения  $E_{1+}/M_{1+}$ . Данные по амплитуде реакции

$\gamma n \rightarrow \pi^0 n$  вместе с данными по реакции  $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$  были бы также весьма полезными для мультипольного анализа изоскалярных амплитуд, которые до настоящего времени известны с очень большими неопределенностями.

Таким образом, несмотря на долгую историю изучения процессов поглощения и рассеяния дейтронами фотонов малых и средних энергий, остается много нерешенных проблем. Новое поколение установок, работающих, как правило, с пучками меченых фотонов достаточно большой интенсивности ( $\sim 10^5 - 10^6$  фотонов в секунду), позволяет в значительной степени преодолеть трудности, связанные с малостью сечений таких процессов, и открывает новые возможности для получения более прецизионных данных. При этом на ряде установок появились возможности проведения и поляризационных экспериментов. Однако, одновременно требуется и дальнейшее развитие теоретической базы, которая позволила бы достичь более глубокого осмысления этих данных.

**Связь работы с научными программами и темами.** Диссертационная работа выполнялась в рамках республиканских научно - исследовательских программ "Частица" (1979-1993 гг.), "Кварк" (1996-1998 гг.), а также в рамках тем, финансируемых Фондом фундаментальных исследований Республики Беларусь (проекты № Ф 94-072 и 042-40).

**Целью работы** являются обоснование, разработка и апробация оригинальной методики определения поляризуемостей нуклонов, а также предложений по постановке принципиально новых экспериментов для измерения этих характеристик, включая создание соответствующего математического обеспечения. Для достижения поставленных целей в диссертации решаются следующие задачи:

- усовершенствование диаграммного подхода и обоснование его применимости к описанию фоторасщепления дейтрона при энергиях фотона  $E_\gamma \leq 140$  МэВ, основанное на анализе причин и устранении некорректностей известных расчетов Лаже;
- построение последовательной модели комптоновского рассеяния на дейтроне при энергиях ниже порога фоторождения пионов с использованием усовершенствованного диаграммного подхода и установление на ее основе возможностей применения этого процесса для экспериментального определения усредненных по изоспину поляризуемостей нуклона;
- разработка метода изучения комптоновского рассеяния на нуклоне в реакции  $\gamma d \rightarrow \gamma np$  и построение адекватной модели этого процесса в области энергий от 100 до 400 МэВ; создание математичес-

кого обеспечения для проведения соответствующих экспериментов на установках MAMI-A, MAMI-B, SAL и LEGS;

- расчет в рамках диаграммного подхода и детальный анализ наблюдаемых в реакции  $d(\gamma, \pi^0 n)p$  в области энергий до 400 МэВ.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является простейшая нейтрон-протонная система – дейтрон (ядро атома дейтерия). Предмет исследования – проявления внутренней электромагнитной структуры нуклонов, обусловленные взаимодействием дейтрона с фотонами в процессах их поглощения и рассеяния.

**Методология и методы проведенного исследования.** Описание исследуемых процессов и расчеты наблюдаемых величин проводились в рамках хорошо известного диаграммного подхода. В диссертации этот подход был существенно модифицирован за счет учета мезонных обменных токов, сегаллов и взаимодействия нуклонов в конечном состоянии, что привело к значительному расширению области его применимости и обеспечению адекватного описания исследуемых реакций.

**Научная новизна и значимость полученных результатов** состоит прежде всего в том, что

1. Предложены и обоснованы новые методы измерения поляризуемостей нейтрона. Один из них заключается в возможности получения информации о  $\gamma n$ -рассеянии из данных по упругому рассеянию фотонов на дейтроне. Впервые построена согласованная модель указанной реакции, включающая учет резонансных диаграмм и сегалльных вкладов, а также основных релятивистских поправок. Детально проанализированы кинематические области, наиболее подходящие для извлечения информации о поляризуемостях нейтрона.
2. Впервые разработан метод изучения  $\gamma n$ -рассеяния в реакции квазиупругого рассеяния на дейтроне. В построенной модели учтены наиболее важные полюсные и однопетлевые диаграмм. Найдены те кинематические области, где основной вклад в амплитуду реакции дает полюсная диаграмма, отвечающая квазисвободному рассеянию фотона на нейтроне. Впервые исследована возможность использования данной реакции как метода, альтернативного по отношению к изучению комптоновского рассеяния на свободном протоне.
3. Впервые построена самосогласованная модель фоторасщепления дейтрона в диаграммном подходе, т.е. в подходе, в котором не делается преобразование Зигерта. Устранены существенные недостатки,

которыми страдали хорошо известные расчеты Лаже, за счет того, что впервые полностью учтены вклады не только пионных обменных токов, но и токов, обусловленных обменами тяжелыми мезонами. При этом вклады всех мезонных обменных токов рассчитаны как для плосковолнового конечного  $np$ -состояния, так и с учетом взаимодействия в конечном состоянии.

4. Впервые детально проанализирован метод исследования "элементарной" амплитуды фоторождения нейтральных пионов на нейтроне в реакции  $d(\gamma, \pi^0 n)p$ .

**Практическая значимость полученных результатов.** Развитые в диссертации подходы к изучению процессов поглощения и рассеяния фотонов на дейтроне нашли широкое применение при планировании и проведении многих экспериментов и анализе полученных данных. Так, например, результаты наших расчетов по фоторасщеплению дейтрона применялись при обработке данных, полученных в Институте ядерной физики (г. Новосибирск) и Ереванском физико-техническом институте. Предложенный в диссертации метод извлечения информации о комптоновском рассеянии на нейтроне из данных по реакции  $d(\gamma, \gamma' n)p$  реализован в экспериментах на установках MAMI-A (г. Майнц, Германия) и SAL (г. Саскатун, Канада). В настоящее время этот метод используется в эксперименте на установке LEGS (г. Брукхевен, США) и будет реализован в еще одном эксперименте на MAMI-B. Аналогичный подход был применен также при изучении реакции  $d(\gamma, \gamma' p)n$  в кинематике квазиупругого рассеяния на протоне в эксперименте на MAMI-B. Построенная в диссертации модель комптоновского рассеяния на дейтроне была использована как базовая при обработке данных, полученных на SAL. Применяется она и в MAX-lab (г. Лунд, Швеция), где в 1997 г. началось экспериментальное исследование реакции  $\gamma d \rightarrow \gamma d$  при энергии 60 МэВ. В настоящее время рассматривается возможность использования предложенного метода извлечения информации об амплитуде фоторождения нейтральных пионов на нейтроне из данных по реакции  $d(\gamma, \pi^0 n)p$  на установках MAMI-B, LEGS и SAL. Данная реакция в кинематике, где фоторождение нейтральных  $\pi$ -мезонов происходит на протоне, исследована в эксперименте на MAMI-B. Все вышеперечисленные экспериментальные группы используют также соответствующие компьютерные программы, написанные нами для проведения численных расчетов амплитуд реакций и наблюдаемых.

### Основные положения, выносимые на защиту.

1. Усовершенствованный диаграммный подход и обоснование его применимости к описанию фоторасщепления дейтрона при энергиях фотона  $E_\gamma \leq 140$  МэВ, основанное на анализе причин появления и устранении некорректностей, присущих известным расчетам Лаже, что обеспечило заметное улучшение согласия полученных теоретических результатов с экспериментальными данными как в случае неполяризованных, так и поляризованных частиц.
2. Последовательная модель комптоновского рассеяния на дейтроне при энергиях ниже порога фоторождения пионов с использованием усовершенствованного диаграммного подхода и установление на ее основе возможности использования этого процесса для определения усредненных по изоспину поляризуемостей нуклона.
3. Новый метод изучения комптоновского рассеяния на нейтроне в реакции  $d(\gamma, \gamma'n)p$  и адекватная модель этого процесса в области энергий от 100 до 400 МэВ; их практическая апробация в эксперименте на установке МАМИ-А и получение на этой основе лучшего на сегодняшний день, включенного в Particle Data Group, ограничения сверху на величину электрической поляризуемости нейтрона

$$\bar{\alpha}_n = 10.7_{-10.7}^{+3.3}$$

а также установление знака ( $F_{\pi^0\gamma\gamma} < 0$ ) постоянной распада  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ .

4. Метод изучения комптоновского рассеяния на протоне в процессе  $d(\gamma, \gamma'p)n$ , который был положен в основу эксперимента на установке МАМИ-В и впервые привел к определению величины разности электрической и магнитной поляризуемостей квазисвободного протона

$$\bar{\alpha}_p - \bar{\beta}_p = 9.1 \pm 1.7 \pm 1.2,$$

согласующейся с усредненным по всем предыдущим экспериментальным данным значением для свободного протона ( $\bar{\alpha}_p - \bar{\beta}_p = 10.0 \pm 1.5 \pm 0.9$ ); он позволил установить отсутствие новых вкладов в "backward" спиновую поляризуемость протона.

5. Метод изучения амплитуды фоторождения нейтральных пионов на нейтроне в реакции  $d(\gamma, \pi^0n)p$  в области энергий до 400 МэВ, использованный в эксперименте на установке МАМИ-В для оценки величины фоновых вкладов в процесс  $d(\gamma, \gamma'p)n$ .

**Личный вклад соискателя.** Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают личный вклад диссертанта. Автору принадлежит инициатива проведения детального изучения применимости диаграммного подхода к фоторасщеплению дейтрона [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. В работе [9], выполненной совместно с Л.Г. Морозом, автору принадлежит постановка задачи и проведение всех расчетов. Автором проведены основные расчеты наблюдаемых в реакции фоторождения  $\pi^0$ -мезонов на дейтроне [10]. В работах [11]-[22], выполненных совместно с А.И. Львовым и В.А. Петрунькиным, постановка задач возникла при совместном обсуждении соответствующих проблем. Расчеты выполнялись либо параллельно, либо каждый из соавторов выполнял свою часть вычислений. Во всех этих случаях вклад автора в получение конечных результатов работ был равным вкладу соавторов. В работах [23, 24, 25], выполненных совместно с физиками-экспериментаторами Ф. Виссманом и М. Шумахером, практически все расчеты были выполнены автором.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались на семинарах ЛФВЭ и ЛТФ Института физики им. Б.И. Степанова АНБ и ОФВЭ и ОЯФ Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, на Сессиях ОЯФ АН СССР в г. Москве (1984-1992 гг.), Совещаниях по физике ядра в г. Москве (1984-1992 гг.), Семинаре по электромагнитным взаимодействиям адронов в г. Харькове (1987 г.), на 4-й, 6-й и 7-й международных конференциях "Мезоны и легкие ядра" в г. Праге (Чехия, 1988, 1995 и 1998 гг.), на международной конференции "Мезоны и ядра при промежуточных энергиях" в г. Дубне (1994 г.), Гордоновской конференции "Фотоядерные реакции" в г. Тилтоне (США, 1996 г.), международном рабочем совещании "Программа исследований по ядерной физике с реальными фотонами с энергией ниже 200 МэВ" в г. Лунде (Швеция, 1997 г.), на 4-й и 5-й летних международных школах по физике высоких энергий и релятивистской ядерной физике в г. Гомеле (1997 и 1999 гг.), на международной конференции PANIC99 в г. Уппсала (Швеция, 1999 г.), на 16-й международной конференции "Проблемы физики малочастичных систем" в г. Тайпей (Тайвань, 2000 г.).

**Опубликованность результатов.** Результаты диссертации опубликованы в 14 журнальных статьях, 7 статьях в трудах международных конференций и 4 препринтах ИФ НАНБ и ФИ РАН; всего 25 публикаций. Опубликованные материалы составляют 278 страниц.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 152 страницы, включая 46 иллюстраций и три таблицы. Список использован-

ных литературных источников содержит 230 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В начале кратко описывается современное состояние теории электромагнитных взаимодействий ядер (прежде всего, дейтрона) и нуклонов, указывается круг проблем, нуждающихся в изучении и решении, определяются конкретные направления исследований в диссертационной работе. Основной упор делается на истории и обсуждении современной ситуации в области определения электромагнитных поляризуемостей нейтрона, проблемы существующего большого разногласия между теоретическими предсказаниями и экспериментальным значением для т.н. "backward" спиновой поляризуемости протона, а также проблем, связанных с получением информации о фоторождении нейтральных пионов на нейтронах.

В Главе 1 исследуется процесс фоторасщепления дейтрона (ФД)



при энергиях ниже порога фоторождения пионов в рамках диаграммного подхода (ДП). Рассмотренные в диссертации диаграммы показаны на Рис.1.

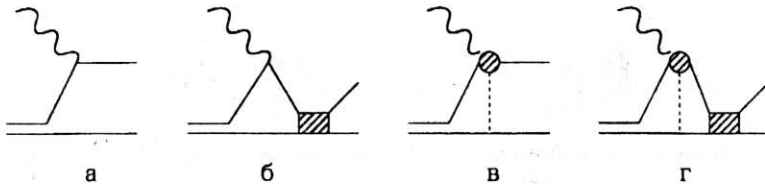


Рис. 1. Диаграммное представление амплитуды фоторасщепления дейтрона.

Во введении (разд. 1.1) детально проанализировано современное состояние теоретических подходов к описанию ФД; при этом особое внимание уделяется обсуждению недостатков известных работ Лаже, посвященных изучению ФД в ДП. Указываются на такие существенные пробелы в этих работах: не обеспечена калибровочная инвариантность модели, не учитывается диаграмма 1г, которая соответствует вкладам мезонных обменных токов (МОТ) с нуклон-нуклонным взаимодействием в конечном состоянии.

В разд. 1.2 приведены используемые в дальнейшем выражения через амплитуды реакции для наблюдаемых: полного и дифференциального сечения, асимметрии фотона, поляризации нуклонов, тензорных асимметрий.

Затем (раздел 1.3) обсуждаются вклады нуклонных степеней свободы в амплитуду ФД. Оператор однонуклонного тока берется в виде суммы электрической  $\mathbf{j}_{[i]}^e$  и магнитной частей  $\mathbf{j}_{[i]}^m$ :

$$\mathbf{j}_{[i]}(\mathbf{p}, \mathbf{k}) = \mathbf{j}_{[i]}^e + \mathbf{j}_{[i]}^m = e \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{1 + \tau_i^z}{2} \frac{\mathbf{p}_i}{m} + i \frac{\mu_i}{2m} \boldsymbol{\sigma}_i \times \mathbf{k} \right\}. \quad (2)$$

Здесь  $e$  и  $m$  – заряд и масса нуклона,  $\mathbf{p}_i$  – 3-импульс  $i$ -го нуклона,  $\mu_i$  – магнитный момент  $i$ -го нуклона ( $\mu = 2.793$  для протона и  $\mu = -1.913$  для нейтрона).

Расчет амплитуды ФД требует знания дейтронной волновой функции (ДВФ) и амплитуды  $NN$ -рассеяния наполовину вне массовой поверхности. Последние были получены путем численного решения уравнения Липпмана-Швингера для нерелятивистских версий боннского потенциала однобозонного обмена (для потенциалов в диссертации используется аббревиатура 'ОВЕР', заимствованная из оригинальных работ боннской группы). В качестве решения указанного уравнения для связанного состояния (дейтрона) получают дискретные наборы  $S$ - и  $D$ -волновых функций,  $u(q_i)$  и  $w(q_i)$ , в гауссовых узлах  $q_i$  ( $i=1, \dots, N$ , мы взяли  $N=40$ ). Для практических расчетов использовались аналитические аппроксимации этих наборов, аналогичные тем, которые были введены парижской группой:

$$u(q) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{i=1}^{n_u} \frac{C_i}{q^2 + m_i^2}, \quad w(q) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{i=1}^{n_w} \frac{D_i}{q^2 + m_i^2}. \quad (3)$$

Массы  $m_j$  были взяты в виде  $m_j = \alpha + (j-1)m_0$  ( $\alpha = \sqrt{\Delta m}$ , где  $\Delta = 2.224$  МэВ – энергия связи дейтрона) с  $m_0 = 0.9$  Фм<sup>-1</sup> и  $n_u = n_w = 11$ . В диссертации приведены таблицы численных значений для коэффициентов  $C_i$  и  $D_i$ .

Амплитуда  $NN$ -рассеяния наполовину вне массовой поверхности определяется через парциальные амплитуды наполовину вне массовой поверхности  $R_{L'L}^{JS}(q', q)$  (здесь  $J$  и  $S$  – полные момент и спин  $NN$ -системы,  $L$  и  $L'$  – угловой момент до и после рассеяния и  $q$  и  $q'$  – относительный импульс  $NN$ -пары до и после рассеяния), которые были также получены путем численного решения уравнения Липпмана-Швингера.

Расчет вклада в амплитуду ФД от оператора однонуклонного тока (2) сводится к суммированию по поляризациям промежуточного нуклона в случае диаграммы 1а или к суммированию по поляризациям

промежуточных нуклонов и 3-кратному интегрированию по нуклонному 3-импульсу в случае диаграммы 16. Все указанные процедуры проведены численно.

В разделе 1.4 рассчитываются вклады от МОТ (диаграммы в и г на Рис. 1). Операторы МОТ должны быть построены таким образом, чтобы они удовлетворяли уравнению непрерывности

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{j}_{\text{МОТ}} = V(\mathbf{p}'_1, \mathbf{p}'_2; \mathbf{p}_1 + \mathbf{k}, \mathbf{p}_2) \rho_{[1]}^1 - \rho_{[1]}^1 V(\mathbf{p}'_1 - \mathbf{k}, \mathbf{p}'_2; \mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) + (1 \leftrightarrow 2), \quad (4)$$

где  $\rho_{[1]}^i = e(1 + \tau_i^z)/2$  – одночастичная плотность заряда, а  $V(\mathbf{p}'_1, \mathbf{p}'_2; \mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)$  – потенциал  $NN$ -взаимодействия, который используется для нахождения ДВФ и амплитуды  $NN$ -рассеяния. Так как ОВЕРР представляет собой сумму потенциалов однобозонных обменов  $V^\alpha$  ( $\alpha = \pi, \delta, \rho, \eta, \omega, \sigma$ ), то, согласно (4), в расчете амплитуды ФД все соответствующие операторы МОТ должны быть учтены. Такие операторы были построены с использованием диаграммного метода. При этом была учтена модификация МОТ, обусловленная присутствием зависящих от импульсов форм-факторов в бозон-нуклон-нуклонных вершинах.

Рассмотрены также вклады от токов, которые непосредственно не генерируются из  $NN$ -потенциала. Таковыми, в частности, являются токи, связанные с возбуждением  $\Delta$ -изобары, а также с  $\gamma\pi\omega$ - и  $\gamma\rho\pi$ - взаимодействиями. Эти токи являются модельно зависимыми в том смысле, что их вид не определяется потенциалом  $NN$ -взаимодействия и уравнением непрерывности (4).

В разделе 1.5 проводится детальное сравнение результатов разработанной модели ФД с экспериментальными данными и предсказаниями других подходов. Показано, что после введенных модификаций ДП дает вполне удовлетворительное описание как в случае поляризационных, так и неполяризационных наблюдаемых при энергиях фотона до 140 МэВ. Особо подчеркивается, что модель хорошо воспроизводит дифференциальное сечение вперед в области энергий от 10 до 30 МэВ и поляризацию нейтрона при 100 и 140 МэВ, для которых имелось полное расхождение с предсказаниями ДП в его первоначальной версии Лаже.

В заключении Главы (разд. 1.6) кратко обсуждаются возможные причины для остающегося некоторого расхождения предсказаний ДП с экспериментальными данными.

**В Главе 2** построена модель для описания упругого комптоновского рассеяния на дейтроне

$$\gamma d \rightarrow \gamma d \quad (5)$$

при энергиях ниже порога фоторождения пионов в рамках диаграммного подхода.

Во введении (разд. 2.1) излагаются преимущества, которые дает метод извлечения поляризуемости нейтрона из данных по реакции (5), дается краткий экскурс в историю теоретических подходов к изучению этого процесса и современное состояние теории.

В разд. 2.2 приведены выражения через амплитуды реакции для рассматриваемых в данной Главе двух наблюдаемых: дифференциального сечения и асимметрии фотона.

В разд. 2.3 детально изложен метод учета т.н. резонансных вкладов в амплитуду реакции. Резонансная амплитуда связана с промежуточными возбуждениями дейтрона и соответствует двухступенчатому процессу между поглощением и испусканием фотонов. Работая в области энергий до 100 МэВ, мы можем ограничиться только двухнуклонными промежуточными состояниями. В таком случае имеем диаграммное представление для резонансной части амплитуды, изображенное на Рис. 2. Здесь диаграмма 2а отвечает свободному промежуточному  $NN$ -состоянию, а диаграмма 2б –  $NN$ -взаимодействию в промежуточном состоянии.

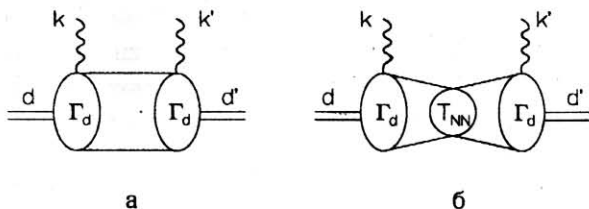


Рис. 2.: Резонансные вклады в амплитуду дейтронного комптоновского рассеяния без перерассеяния (а) и с перерассеянием (б) в промежуточном состоянии. Перекрестные диаграммы подразумеваются.

Требуемые в расчетах вклады диаграмм 2а и б амплитуды фоторасщепления дейтрона были взяты из Главы 1. Единственное отличие состояло в том, что был учтен вклад спин-орбитального взаимодействия в оператор полного тока. Чтобы избежать необходимости проведения 12-кратного интегрирования при расчете вклада в амплитуду от диаграммы 2б, "off-shell" амплитуда  $NN$ -рассеяния была взята в сепарабельном виде для парижского потенциала. Такая процедура, разумеется, не вполне согласована. Тем не менее, это не имеет принципиального значения в рассматриваемой области энергий (50–100 МэВ), поскольку, как показано в разд. 2.4, вклад диаграммы 2б в указанной области весьма мал.

В разд. 2.4 излагается метода учета сегалльных вкладов в амплитуду реакции. Одночастичный сегалл включает в себя: 1) томсоновский член; 2) вклады от дипольных, спиновых, квадрупольных и дисперсионных поляризуемостей нуклонов; 3) вклад от спин-орбитального взаимодействия.

Операторы двухчастичных сегаллов, которые, как и МОТ, возникают из-за взаимодействия фотонов с потенциальными (виртуальными) мезонами, были построены с помощью диаграммного метода. Следует подчеркнуть, что, как и в случае МОТ, набор диаграмм, который нужно учесть, не является произвольным, а обязан быть согласован с нуклон-нуклонным потенциалом. Построены вклады в сегалльные операторы от всех мезонов, включенных в ОВЕРР потенциал. Была учтена модификация сегаллов, обусловленная присутствием форм-факторов в бозон-нуклон-нуклонных вершинах. Полученные операторы сегаллов  $S_{ji}^\alpha$  удовлетворяют уравнению непрерывности

$$S_{ji}^\alpha k_i = j_j^\alpha(p'_1, p'_2; p_1 + k, p_2)\rho_1^{[1]} - \rho_1^{[1]}j_j^\alpha(p'_1 - k, p'_2; p_1, p_2) + (1 \leftrightarrow 2) \quad (6)$$

с соответствующими МОТ  $j^\alpha$ , построенными в Главе 1, и с одночастичной плотностью заряда.

Учтены также поправки к операторам двухчастичных сегаллов, обусловленные возбуждением  $\Delta$ -изобары и эффектами запаздывания (в случае пионного сегалла).

В разд. 2.5 проведен детальный анализ результатов выполненных расчетов. Основные выводы состоят в следующем:

1. Запаздывание заметно увеличивает сечение. Например, при 100 МэВ это увеличение составляет около 5 – 7% для всех углов. Изменение амплитуды вследствие запаздывания можно представить в виде

$$\langle m'_d \lambda' | S_{ret}^\pi(k', k) | m_d \lambda \rangle \simeq 4\pi\omega^2 \langle m'_d \lambda' | \left[ \Delta\alpha_{ret} e_\lambda \cdot e_{\lambda'}^* + \Delta\beta_{ret} s_\lambda \cdot s_{\lambda'}^* + \Delta\alpha'_{ret} \left( \mathbf{S} \cdot e_{\lambda'}^* \mathbf{S} \cdot e_\lambda + \mathbf{S} \cdot e_\lambda \mathbf{S} \cdot e_{\lambda'}^* - \frac{4}{3} e_\lambda \cdot e_{\lambda'}^* \right) \right] | m_d \lambda \rangle, \quad (7)$$

где  $s_\lambda = e_\lambda \times \hat{\mathbf{k}}$  и  $\mathbf{S}$  – оператор спина 1. Численно получено, что

$$\Delta\alpha_{ret} = -0.7, \quad \Delta\beta_{ret} = 0.3, \quad \Delta\alpha'_{ret} = -1.3 \quad (8)$$

в единицах  $10^{-4} \text{ Фм}^3$ .

2. Полный вклад спин-орбитального взаимодействия (в резонансной амплитуде и в сегалльной части) при нулевом угле составляет –4% и –15% для 50 МэВ и 100 МэВ, соответственно. В области 90° эффект этого взаимодействия мал и составляет +0.8% при 50 МэВ и –0.2% при 100 МэВ; при 180° – +4% и +8% для 50 и 100 МэВ, соответственно.

3. Эффекты от возбуждения  $\Delta$ -изобары в рассматриваемой области энергий малы.

4. Полный сегалльный вклад в дифференциальное сечение составляет более 70%.

5. Перерасеяние имеет малое влияние на сечение. Результаты подтверждают вывод других работ о том, что перерасеяние уменьшает сечение при передних углах, и это уменьшение составляет от 7% до 12% в области энергий от 50 до 100 МэВ. Соответствующий эффект для  $180^\circ$  составляет 7% при 50 МэВ и 3% при 100.

Проведен фит имеющихся в настоящее время данных по дифференциальному сечению, полученных в Урбане (при 50 и 70 МэВ) и в Саскатуне (при 94.2 МэВ). Получено значение для суммы усредненных по изоспину поляризуемостей нуклона

$$\bar{\alpha}_N + \bar{\beta}_N = 17.1 \pm 1.6, \quad (9)$$

которое находится в удовлетворительном согласии с теоретическим предсказанием  $15.0 \pm 0.5$ , и для разности поляризуемости

$$\bar{\alpha}_N - \bar{\beta}_N = 4.0 \pm 1.5. \quad (10)$$

Полученные значения, взятые совместно с экспериментальными данными для протона, привели к следующим значениям для поляризуемостей нейтрона:

$$\bar{\alpha}_n = 9 \pm 3, \quad \bar{\beta}_n = 11 \pm 3. \quad (11)$$

В то время, как полученная сумма поляризуемостей нейтрона  $\bar{\alpha}_n + \bar{\beta}_n = 20 \pm 3$  находится в удовлетворительном согласии с теоретическим значением  $15.8 \pm 0.5$ , для разности  $\bar{\alpha}_n - \bar{\beta}_n = -2 \pm 3$  имеем заметное расхождение с протонным случаем ( $10.0 \pm 1.0$ ) и с теоретическими предсказаниями, которые дают  $\bar{\alpha}_n - \bar{\beta}_n \simeq \bar{\alpha}_p - \bar{\beta}_p$ . Тем не менее, уже эти первые измерения диф. сечения комптоновского сечения на дейтроне показывают, что такой метод измерения поляризуемостей нейтрона обеспечивает лучшую точность, чем достигнутая за много лет измерений в методе рассеяния нейтронов тяжелыми ядрами.

В заключении (разд. 2.6) кратко суммируются полученные в Главе 2 результаты и обсуждаются наиболее перспективные, по нашему мнению, кинематические области для будущих экспериментов.

**В Главе 3** исследуется квазисвободное комптоновское рассеяние на нейтроне в реакции

$$\gamma + d \rightarrow \gamma' + n + p. \quad (12)$$

Во введении (разд. 3.1) излагаются отличия в применении ДП к процессу (12) по сравнению с реакциями, рассматривавшимися в двух предыдущих главах, а также преимущества и недостатки такого метода исследования комптоновского рассеяния на нейтроне по сравнению с методом, который обсуждался в Главе 2.

Кинематика реакции (12) рассматривается в разд. 3.2. Особенно детально проанализирована область т.н. нейтронного квазиупругого пика (НКУП), где протон имеет малый импульс и является зрителем.

В следующих трех разделах (3.3–3.5) подробно описаны детали отбора наиболее важных диаграмм реакции (12) и методы их расчетов. В разд. 3.3 рассмотрены вклады полюсных диаграмм в амплитуду реакции.

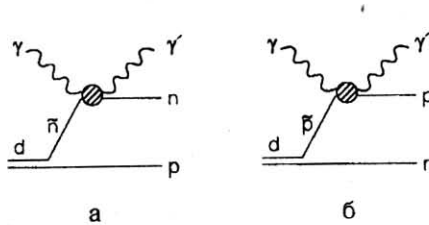


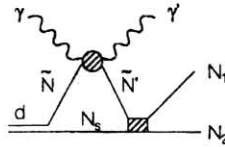
Рис. 3. Полюсные диаграммы реакции  $\gamma d \rightarrow \gamma' n p$ .

Сделанные оценки показывают, что при энергиях фотона  $\geq 50$  МэВ достаточно учесть только полюсные диаграммы, показанные на Рис. 3. Из вида диаграммы 3а, следует, что амплитуда, соответствующая этой диаграмме, определяется ДВФ, которая ведет себя как  $\sim 1/(p_p^2 + \alpha^2)$  ( $p_p$  – импульс протона) Отсюда следует, что диаграмма 3а имеет полюсную сингулярность по кинетической энергии протона  $E_p$  при  $E_p = -\Delta/2 \approx -1.1$  МэВ. В пределе, когда импульс протона-зрителя  $|p_p| \rightarrow 0$ , мы подходим близко к этой сингулярности, и вклад диаграммы становится максимальным. Это и есть область НКУП, которая представляет наибольший интерес.

При расчете вкладов от диаграмм 3а и б требуется знание амплитуд комптоновского рассеяния на нуклонах. Они были взяты из известных дисперсионных расчетов Львова, Петрунькина, Старцева и Шумахера. Поляризуемости входят в эти амплитуды в качестве параметров, которые могут быть найдены путем фитирования экспериментальных данных.

В разд. 3.4 рассмотрены вклады в амплитуду реакции однопетлевых диаграмм с  $np$ -перерассеянием. Показано, что в областях НКУП существенна только диаграмма Рис. 4.

Новый блок, по сравнению с полюсными диаграммами, необходимый для расчета этой диаграммы – это амплитуда  $np$ -рассеяния наполовину

Рис. 4. Однопетлевая диаграмма с  $pr$ -перерасеянием.

вне массовой поверхности. Она была взята точно такой же, как и при расчетах в Главе 1.

Однопетлевые диаграммы с МОТ и изобарными конфигурациями (ИК) (Рис. 5) рассмотрены в разд. 3.5.

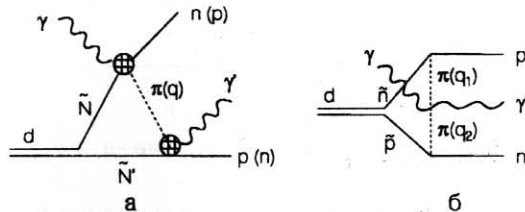


Рис. 5. Однопетлевые диаграммы с МОТ и ИК.

В разд. 3.6 проведен анализ полученных результатов. Расчеты показали, что основная поправка к сечению от нейтронной полюсной диаграммы За в области НКУП возникает из-за  $pr$ -перерасеяния (диагр. 4). Так, при  $E_\gamma = 100$  МэВ и  $\Theta_\gamma = 135^\circ$  перерасеяние уменьшает вклад нейтронной полюсной диаграммы на  $\approx 27\%$  в области НКУП. Чем больше энергия  $E_\gamma$ , тем меньше роль  $pr$ -перерасеяния. Например, при 400 МэВ и  $\Theta_\gamma = 135^\circ$  оно уменьшает сечение только на 7%. Вклад МОТ и ИК составляет  $\approx -7\%$  при  $E_\gamma = 100$  МэВ и  $\Theta_\gamma = 135^\circ$  и тоже уменьшается с ростом энергии.

Детально проанализирована чувствительность наблюдаемых к величине поляризуемостей нейтрона. Показано, что предсказываемые сечения почти неразличимы для  $\bar{\alpha}_n = 0$  и 10. Следовательно, при энергиях ниже пионного порога очень трудно, хотя и не невозможно, получить ограничение снизу на поляризуемость нейтрона, если величина  $\bar{\alpha}_n$  близка к 10, как это предсказывается многими теоретическими расчетами. При энергиях выше 200 МэВ эта трудность исчезает. Сечение здесь очень чувствительно к величине  $\bar{\alpha}_n$ . Например, при изменении  $\bar{\alpha}_n$  от 7 до 15 в этой области энергий сечение изменяется более, чем на 30%.

Проанализированы источники теоретических неопределенностей, возникающих из-за выбора различных моделей  $NN$ -взаимодействия, разных мультипольных анализов фоторождения пионов на нуклонах. Суммарная неопределенность при теоретическом извлечении величины  $\bar{\alpha}_n$  оценена в  $\pm 2$ .

Предложенный метод был реализован в эксперименте на установке МАМИ-А, в котором получено сильное ограничение сверху на величину электрической поляризуемости нейтрона

$$\bar{\alpha}_n = 10.7_{-10.7}^{+3.3} \quad (13)$$

и установлен знак  $F_{\pi^0\gamma\gamma}$  постоянной распада  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  ( $F_{\pi^0\gamma\gamma} < 0$  - в согласии с предсказаниями алгебры токов). Метод использован также в эксперименте на установке SAL и позволил извлечь электрическую и магнитную поляризуемости нейтрона:

$$\bar{\alpha}_n = 13.6_{-6}^{+10}, \quad \bar{\beta}_n = 1.6_{+6}^{-10}. \quad (14)$$

Имеется очевидный способ проверить экспериментально, насколько надежно проведен расчет эффектов, связанных с  $np$ -перерасеянием, МОТ и ИК. Для этого следует выбрать кинематику таким образом, чтобы спектатором был не протон, а нейтрон. Так как поляризуемости протона, или, если быть более точным, амплитуды  $\gamma p$ -рассеяния известны намного лучше, чем в случае нейтрона, то можно измерить сечение в области протонного квазиупругого пика (ПКУП) и сравнить его с сечением комптоновского рассеяния на свободном протоне.

Предложенный метод был реализован в недавних экспериментах на установках МАМИ-В и SAL. Анализ полученных данных с использованием построенной в Главе 3 модели дал следующие результаты для разности поляризуемостей квазисвободного протона:

$$\bar{\alpha}_p - \bar{\beta}_p = 9.1 \pm 1.7 \pm 1.2 \text{ (МАМИ-В)}, \quad \bar{\alpha}_p - \bar{\beta}_p = 14.7_{-4.0}^{+4.6} \text{ (SAL)}, \quad (15)$$

которые находятся в согласии с усредненным по всем предыдущим экспериментальным результатам значением для свободного протона ( $\bar{\alpha}_p - \bar{\beta}_p = 10.0 \pm 1.5 \pm 0.9$ ). Сделан вывод об отсутствии новых вкладов в "backward" спиновую поляризуемость протона.

В заключении (разд. 3.7) кратко суммируются полученные в Главе 3 результаты.

**В Главе 4** исследуется фоторождение нейтральных пионов на нейтронах в реакции

$$\gamma + d \rightarrow \pi^0 + n + p \quad (16)$$

в области  $\Delta$  резонанса.

Во введении (разд. 4.1) указываются возможные методы получения информации о фоторождении пионов на нейтронах; отмечается, что в случае нейтральных пионов использование реакции (16) является, по сути дела, единственно возможным способом.

Кинематика реакции (16) рассматривается в разд. 4.2. Получены соотношения, позволяющие восстановить кинематику при заданных направлениях вылета пиона и нейтрона, а также – энергиях фотона и нейтрона. Если положить массу пиона равной нулю, то можно получить, как и следовало ожидать, соответствующие соотношения из предыдущей Главы. Приводятся также выражения для наблюдаемых через амплитуды реакции.

В разд. 4.3 строится теоретическая модель реакции (16). Учитываемые диаграммы показаны на Рис. 6.

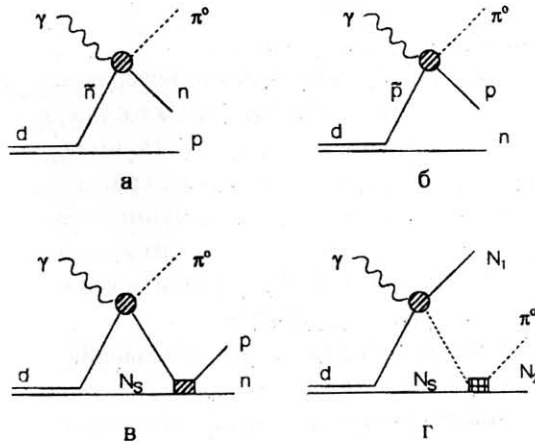


Рис. 6. Диаграммное представление амплитуды реакции  $\gamma d \rightarrow \pi^0 n p$ .

Поскольку поставленная цель – это исследование “элементарного процесса”  $\gamma n \rightarrow \pi^0 n$ , то следует работать в кинематике, где доминирует диаграмма ба. Как отмечено в предыдущей Главе, такой кинематической областью является область НКУП, где импульс протона-спектатора мал. Все другие диаграммы дают фоновый вклад, и должны быть учтены в качестве поправок.

Единственный новый блок, который имеется во всех диаграммах Рис. 6 по сравнению с теми, которые использовались в предыдущих Главах, это амплитуды фоторождения пионов на нуклонах. Они были позаимст-

нованы из хорошо известной модели Бломквиста-Лаже. Эта модель очень удобна в практических расчетах, поскольку, во-первых, она справедлива с точностью до членов порядка  $(p/m)^2$  в любой системе отсчета и, во-вторых, она довольно проста и, тем не менее, дает удовлетворительный фит экспериментальных данных. Явные выражения для амплитуд  $T_{\gamma N \rightarrow \pi N}$  были взяты из классических работ Бломквиста-Лаже. Унитаризованная версия модели Бломквиста-Лаже имеет свободный параметр  $\alpha$ , пропорциональный отношению  $E_{1+}$ - и  $M_{1+}$ -мультиполей. Все результаты данной Главы были получены для  $\alpha = 0.8$  (это значение соответствует  $E_{1+}/M_{1+} = -4\%$ ), так как именно при таком  $\alpha$  модель Бломквиста-Лаже дает удовлетворительное описание экспериментальных данных для четырех возможных каналов рождения пионов.

В разд. 4.4 приводятся результаты расчетов и их анализ. Показано, что в области НКУП как протонная полюсная диаграмма бб, так и диаграмма бг с  $\pi N$ -перерассеянием дают очень малый вклад в дифференциальное сечение. Основной фоновый вклад идет от  $n\bar{p}$ -перерассеяния (диаграмма бв). Например, при  $E_\gamma = 250$  МэВ и  $\Theta_\pi = 45^\circ$  последнее уменьшает сечение на 36%. Когда угол пиона увеличивается, этот вклад уменьшается, составляя, например, -12% при  $\Theta_\pi = 135^\circ$ . Эти результаты находятся в полном соответствии с выводами, сделанными в предыдущей Главе относительно диаграммы с  $n\bar{p}$ -перерассеянием, как основной поправки к вкладу нейтронной (протонной) полюсной диаграммы в области НКУП (ПКУП).

В разд. 4.4 проведен также анализ вкладов различных диаграмм в асимметрию  $\Sigma$ . При 250 МэВ, даже в области НКУП, обнаружен заметный эффект не только диаграммы бв, но и диаграммы бг и даже, частично, диаграммы бб. Фоновые вклады уменьшаются с ростом пионного угла. Тем не менее, они остаются заметными на 'хвостах' распределения, т.е. вне области НКУП. Выше 300 МэВ имеются кинематические области, где диаграммы бб-г дают заметный вклад в асимметрию. Однако в области НКУП они менее важны, и их полный вклад не превышает 4%. Только при  $E_\gamma = 300$  МэВ и  $\Theta_\pi = 45^\circ$  фоновые эффекты составляют около 10%.

Проанализированы также вклады различных диаграмм в сечения  $d\sigma^P$  и  $d\sigma^A$ , где символы  $P$  ( $A$ ) отвечают реакции (16), когда фотоны поляризованы параллельно (антипараллельно) спину дейтрона. Все выводы, сделанные выше для дифференциальных сечений с участием неполяризованных частиц, остаются в силе и в этом случае.

В заключении (разд. 4.5) суммируются полученные в Главе 3 результаты, обсуждаются вопросы о том, как можно распространить построенную модель на области энергий  $\leq 200$  МэВ и  $\geq 400$  МэВ. Кратко об-

суждены первые экспериментальные измерения сечений и асимметрии в реакции (16).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение перечислим основные результаты диссертации и выводы, сделанные на их основе.

1. Впервые построена согласованная модель реакции фоторасщепления дейтрона в диаграммном подходе, которая включает в себя: построение мезонных обменных токов, согласованных с ОБЕРП потенциалами нуклон-нуклонного взаимодействия; учет мезонных обменных токов с  $NN$ -взаимодействием в конечном состоянии; учет состояний с  $L \leq 10$  в амплитуде  $np$ -рассеяния [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. В результате достигнуто значительное улучшение описания экспериментальных данных по сравнению с известными работами Лаже. Показано, что после таких усовершенствований имеющееся в литературе и основанное на результатах Лаже утверждение о том, что диаграммный метод не может служить моделью для описания фоторасщепления дейтрона, не соответствует действительности.

2. Разработан метод исследования комптоновского рассеяния на нейтроне в упругом процессе  $\gamma + d \rightarrow \gamma' + d'$  [11, 12, 13, 14, 15]. Построена модель для описания реакции в рамках усовершенствованного диаграммного подхода, которая включает в себя: учет резонансных диаграмм как с плосковолновым промежуточным  $NN$ -состоянием, так и со взаимодействием в промежуточном состоянии; построение и учет сгаллов, согласованных с потенциалом  $NN$ -взаимодействия; учет релятивистских поправок к операторам токов и сгаллов, а также вкладов от поляризуемостей нуклонов.

На этой основе дано удовлетворительное описание экспериментальных данных по дифференциальному сечению комптоновского рассеяния на дейтроне в области энергий 50–100 МэВ, полученных в университете г. Иллинойса и на установке SAL. Фит данных с использованием построенной модели привел к следующим значениям для поляризуемостей нейтрона:

$$\bar{\alpha}_n = 9 \pm 3, \quad \bar{\beta}_n = 11 \pm 3,$$

которые заметно превосходят по точности предыдущие экспериментальные значения, полученные с использованием метода рассеяния нейтронов на тяжелых ядрах. В настоящее время разработанный метод используется в эксперименте на установке MAX-lab.

3. Предложен и разработан метод изучения комптоновского рассеяния на нейтроне в неупругом процессе  $d(\gamma, \gamma'n)p$  [12, 13, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23]. На основе использования диаграммного подхода построена модель, которая включает учет полюсных и однопетлевых диаграмм с *pp*-перерассеянием, мезонными обменными токами и изобарными конфигурациями. С помощью предложенного метода в эксперименте на установке MAMI-A получено сильное ограничение сверху на величину электрической поляризуемости нейтрона

$$\bar{\alpha}_n = 10.7_{-10.7}^{+3.3}$$

и установлен знак  $F_{\pi^0\gamma\gamma}$  постоянной распада  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  ( $F_{\pi^0\gamma\gamma} < 0$  - в согласии с предсказаниями алгебры токов). Метод использован также в эксперименте на установке SAL и позволил извлечь электрическую и магнитную поляризуемости нейтрона:

$$\bar{\alpha}_n = 13.6_{-6}^{+10}, \quad \bar{\beta}_n = 1.6_{+6}^{-10}.$$

В настоящее время этот метод используется в экспериментах на установках LEGS и MAMI-B.

4. Разработан аналогичный метод изучения комптоновского рассеяния на протоне в том же процессе  $\gamma(d, \gamma'p)n$  и реализован в экспериментах на установках MAMI-B и SAL. Эксперименты позволили впервые провести измерение величины разности электрической и магнитной поляризуемостей в случае квазисвободного протона

$$\bar{\alpha}_p - \bar{\beta}_p = 9.1 \pm 1.7 \pm 1.2 \text{ (MAMI-B)}, \quad \bar{\alpha}_p - \bar{\beta}_p = 14.7_{-4.0}^{+4.6} \text{ (SAL)},$$

которые находятся в согласии с усредненным по всем предыдущим экспериментальным результатам значением для свободного протона ( $\bar{\alpha}_p - \bar{\beta}_p = 10.0 \pm 1.5 \pm 0.9$ ); сделан вывод об отсутствии новых вкладов в "backward" спиновую поляризуемость протона.

5. Разработан метод изучения амплитуды фоторождения нейтральных пионов на нейтроне в реакции  $\gamma + d \rightarrow \pi^0 + n + p$  [10]. В диаграммном подходе учтены вклады полюсных и однопетлевых диаграмм с  $NN$ - и  $\pi N$ -взаимодействием в конечном состоянии. Вычислены поправки на фоновые эффекты, которые должны учитываться при извлечении амплитуды фоторождения  $\gamma n \rightarrow \pi^0 n$ . Полученные результаты расчетов были использованы в эксперименте на MAMI-B для оценки величины фоновых вкладов в процесс  $d(\gamma, \gamma'p)n$ .

Компьютерные программы, разработанные для проведения численных расчетов, использовались и используются в настоящее время при

подготовке и проведении экспериментов на установках ИЯФ СО РАН, МАМИ-А, МАМИ-В, МАХ-lab, LEGS и SAL.

### СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Levchuk M.I. Deuteron photodisintegration below pion threshold in the diagrammatic approach // Contrib. papers to Symp. "Mesons and Light Nuclei", Belyne - 1988. - P. 20.
2. Levchuk M.I. On the deuteron photodisintegration in a diagrammatical approach // 17th International Symposium "Nuclear physics at intermediate energies": Abstracts, Tokyo, Nov. 15-17 1988 - P. 64-69.
3. Levchuk M.I. On the deuteron photodisintegration in a diagrammatical approach. - Minsk, 1990. - 42p. - (Препринт / Акад. наук Беларуси. Ин-т физики; № 576).
4. Levchuk M.I. Polarized deuteron photodisintegration in a diagrammatical approach. - Minsk, 1990. - 25p. - (Препринт / Акад. наук Беларуси. Ин-т физики; № 609).
5. Левчук М.И. Фоторасщепление дейтрона выше порога фоторождения в диаграммном подходе // Вопр. атомн. науки и техн. - 1991. - Т. 5(23) - С. 56-59.
6. Levchuk M.I. On nonrelativistic versions of the Bonn OBE-potential. - Minsk, 1994. - 25p. - (Препринт / Акад. наук Беларуси. Ин-т физики; № 689).
7. Levchuk M.I. On deuteron photodisintegration in the diagrammatical approach // International Conference "Mesons and nuclei at intermediate energies": Book of abstracts, Dubna, May 3-7 1994 - P. 97.
8. Levchuk M.I. Deuteron photodisintegration in the diagrammatic approach // Few-Body Syst. - 1995. - Vol. 19, No. 1 - P. 77-108.
9. Левчук М.И., Мороз Л.Г. К теории комптоновского рассеяния на нуклоне // Вести АНБ, сер. физ.-мат. наук - 1985. - Вып. 5, С. 78-84.

10. Levchuk M.I., Petrun'kin V.A., Schumacher M.  $\pi^0$  photoproduction on quasi-free neutrons in the reaction  $\gamma d \rightarrow \pi^0 np$  in the  $\Delta$  region // Z. Phys. - 1996. - Vol. A355, No. 3 - P. 317-326.
11. Levchuk M.I., L'vov A.I. Elastic  $\gamma d$  scattering // Few-Body Syst. Suppl. - 1995. - Vol. 9, P. 439-443.
12. Levchuk M.I., L'vov A.I., Petrun'kin V.A. On possibilities to study polarizabilities of the neutron in elastic and inelastic photon scattering by the deuteron below pion threshold // Proceedings of the MAX-lab Workshop, Lund, March 10-12, 1997 - P. 7-16.
13. Levchuk M.I. Elastic and inelastic photon scattering by the deuteron below pion threshold as tools to study polarizabilities of the neutron // Proceedings of international school-seminar "Actual problems of particle physics", August 8-17, 1997 Gomel. Dubna, 1998 - P. 260-269.
14. Levchuk M.I., L'vov A.I. Deuteron Compton scattering below pion photoproduction threshold // Proceedings of the 7th Conference "Mesons and Light Nuclei '98", Prague-Pruhonice - 1998. - P. 86-89.
15. Levchuk M.I., L'vov A.I. Deuteron Compton scattering below pion photoproduction threshold // nucl-th/9909066; Nucl. Phys. - 2000. - Vol. A674, No. 3,4 - P. 335-385.
16. Левчук М.И., Львов А.И., Петрунькин В.А. Неупругое фотон-дейтронное рассеяние и поляризуемости нейтрона // Кратк. сообщ. по физике - 1985. - Вып. 2, С. 3-7.
17. Левчук М.И., Львов А.И., Петрунькин В.А. Неупругое рассеяние фотонов на дейтронах,  $\gamma n$ -рассеяние и поляризуемости нейтрона - Москва, 1986. - 31с. - (Препринт / Академия наук СССР. ФИАН; № 86).
18. Левчук М.И., Львов А.И., Петрунькин В.А. Асимметрия фотона в реакции  $\gamma d \rightarrow \gamma np$  и поляризуемости нейтрона, Вопр. атомн. науки и техн. - 1987. - Т. 2(38),3(39), С. 95-96.
19. Левчук М.И., Львов А.И., Петрунькин В.А. Поляризуемости нейтрона и мезонные обменные токи в реакции  $\gamma d \rightarrow \gamma np$ , Вопр. атомн. науки и техн. - 1987. - Т. 2(38),3(39), С. 96-97.
20. Levchuk M.I., L'vov A.I., Petrun'kin V.A. Inelastic photon- deuteron scattering and neutron polarizabilities // 17th International Symposium

- "Nuclear physics at intermediate energies": Abstracts, Tokyo, Nov. 15-17 1988 - P. 76-79.
21. Левчук М.И., Львов А.И., Петрунькин В.А. Неупругое фотон-дейтронное рассеяние,  $\gamma n$ -рассеяние и поляризуемости нейтрона // Вопр. атомн. науки и техн. - 1991. - Т. 5(23) - С. 60-64.
  22. Levchuk M.I., L'vov A.I., Petrun'kin V.A. Photon scattering on quasi-free neutrons in the reaction  $\gamma d \rightarrow \gamma' np$  and neutron polarizabilities // Few-Body Syst. - 1994. - Vol. 16, No. 2 - P. 101-125.
  23. Wissmann F., Levchuk M.I., Schumacher M. On approaches to measure the electromagnetic polarizabilities of the neutron // Eur. Phys. J. - 1998. - Vol. A1, No. 2 - P. 193-200.
  24. Wissmann F., ..., Levchuk M.I. e.a. Compton scattering from the free and bound proton at backward angles above  $\pi$ -threshold // Nucl. Phys. - 1999. - Vol. A660, No. 2 - P. 232-245.
  25. Wissmann F., ..., Levchuk M.I. e.a. Compton scattering from the free and bound proton above  $\pi$ -threshold // Nucl. Phys. - 2000. - Vol. A662-663, No. 1-4 - P. 397-400.

## РЕЗЮМЕ

**Резюме.** М.И. Левчук "Процессы рассеяния и поглощения фотонов дейтронами и электромагнитная структура нуклонов".

**Ключевые слова:** диаграммный подход, фоторасщепление, комптоновское рассеяние, фоторождение, электромагнитные поляризуемости, спиновые поляризуемости, дейтрон, нейтрон, мезоны, мезонные обменные токи, сегаллы.

Построена согласованная модель реакции фоторасщепления дейтрона в диаграммном подходе. Достигнуто значительное улучшение описания экспериментальных данных по сравнению с известными работами Лаже. Разработан метод исследования комптоновского рассеяния на нейтроне в упругом  $\gamma d$  процессе. Построена модель для описания реакции в рамках усовершенствованного диаграммного подход. Построены и учтены сегаллы, согласованные с Боннским потенциалом  $NN$ -взаимодействия. Учтены релятивистские поправки к операторам токов и сегаллов, а также вклады от поляризуемостей нуклонов. Дано удовлетворительное описание имеющихся экспериментальных данных по дифференциальному сечению комптоновского рассеяния на дейтроне в области энергий 50-100

МЭВ. Проведен фит данных с использованием построенной модели и получены значения поляризуемостей нейтрона  $\bar{\alpha}_n = 9 \pm 3$  и  $\bar{\beta}_n = 11 \pm 3$  (в единицах  $10^{-4}$  Фм<sup>3</sup>). Предложен и разработан метод изучения комптоновского рассеяния на нейтроне в неупругом процессе  $d(\gamma, \gamma'n)p$ . На основе использования диаграммного подхода построена модель, которая включает учет полюсных и однопетлевых диаграмм с  $np$ -перерассеянием, мезонными обменными токами и изобарными конфигурациями. Метод был реализован в эксперименте на установке MAMI-A и дал для электрической поляризуемости нейтрона значение  $\bar{\alpha}_n = 10.7_{-10.7}^{+3.3}$ . Был также установлен знак  $F_{\pi^0\gamma\gamma}$  постоянной распада  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  ( $F_{\pi^0\gamma\gamma} < 0$  - в согласии с предсказаниями алгебры токов). В эксперименте на установке SAL были получены следующие результаты:  $13.6_{-6}^{+10}$  для  $\bar{\alpha}_n$  и  $1.6_{+6}^{-10}$  для  $\bar{\beta}_n$ . Разработан аналогичный метод изучения комптоновского рассеяния на протоне в том же процессе  $\gamma(d, \gamma'p)n$ . Метод реализован в экспериментах на установках MAMI-B и SAL и позволил впервые провести измерения величины разности электрической и магнитной поляризуемостей в случае квазисвободного протона:  $\bar{\alpha}_p - \bar{\beta}_p = 9.1 \pm 1.7 \pm 1.2$  (MAMI-B) и  $\bar{\alpha}_p - \bar{\beta}_p = 14.7_{-4.0}^{+4.6}$  (SAL), которые находятся в согласии с усредненным по всем предыдущим экспериментальным результатам значением для свободного протона ( $\bar{\alpha}_p - \bar{\beta}_p = 10.0 \pm 1.5 \pm 0.9$ ); сделан вывод об отсутствии новых вкладов в "backward" спиновую поляризуемость протона. Разработан метод изучения амплитуды фоторождения нейтральных пионов на нейтроне в реакции  $d(\gamma, \pi^0n)p$ . В диаграммном подходе учтены вклады полюсных и однопетлевых диаграмм с  $np$ - и  $\pi N$ -взаимодействием в конечном состоянии. Показано, что основной фоновый эффект обусловлен  $np$ -взаимодействием в конечном состоянии.

**Summary.** M.I. Levchuk "Processes of scattering and absorption of photons by the deuteron and the electromagnetic structure of nucleons".

**Key words:** diagrammatic approach, photodisintegration, Compton scattering, photoproduction, electromagnetic polarizabilities, spin polarizabilities, deuteron, neutron, mesons, meson exchange currents, seagulls.

A consistent model of deuteron photodisintegration in the framework of the diagrammatic approach is built. Considerable improvement in description of experimental data in comparison with the well known papers by Laget has been obtained. A method to investigate neutron Compton scattering in elastic  $\gamma d$  scattering is developed. The latter is considered in the framework of the nonrelativistic diagrammatic approach. Seagull operators consistent with the Bonn potential of  $NN$ -interaction have been built. Relativistic corrections to current and seagull operators as well as dipole and higher

order polarizabilities of the nucleons are taken into account. It has been found that the model gives satisfactory description of the experimental data on the differential cross section in the energy region from 50 to 100 MeV. A fit to the data with the use of the built model has given the values for the neutron polarizabilities  $\bar{\alpha}_n = 9 \pm 3$  and  $\bar{\beta}_n = 11 \pm 3$  (units are  $10^{-4} \text{ fm}^3$ ). A method to study neutron Compton scattering in the inelastic process  $d(\gamma, \gamma'n)p$  has been proposed and developed. A model including contributions from pole and one loop diagrams with  $np$ -rescattering, meson exchange currents and isobar configurations has been built. The proposed method has been realized in an experiment at MAMI-A and gave the value of  $\bar{\alpha}_n = 10.7_{-10.7}^{+3.3}$  for the electric polarizability of the neutron. It has been found that the sign of the  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  decay constant is negative in accordance with a prediction of current algebra. Along the same method the following results have been obtained at SAL:  $13.6_{-8}^{+10}$  for  $\bar{\alpha}_n$  and  $1.6_{+6}^{-10}$  for  $\bar{\beta}_n$ . An analogous method to investigate proton Compton scattering in the reaction  $\gamma(d, \gamma'p)n$  has been also developed. It has been realized in experiments at MAMI-B and SAL and allowed, for the first time, one to measure the difference of the electric and magnetic polarizabilities of the quasi-free proton,  $\bar{\alpha}_p - \bar{\beta}_p = 9.1 \pm 1.7 \pm 1.2$  (MAMI-B) and  $\bar{\alpha}_p - \bar{\beta}_p = 14.7_{-4.0}^{+4.6}$  (SAL), which are in agreement with world averaged value for the free proton ( $\bar{\alpha}_p - \bar{\beta}_p = 10.0 \pm 1.5 \pm 0.9$ ). A conclusion has been made that there are no new contributions to the backward spin polarizability of the proton. The possibility of obtaining information about the reaction  $\gamma n \rightarrow \pi^0 n$  in the  $\Delta$  resonance region from the reaction  $d(\gamma, \pi^0 n)p$  has been analyzed. The diagrammatic model of the reaction has been built. The contributions from the pole diagrams and one-loop diagrams both with  $np$  and  $\pi N$ -rescattering are taken into account. It has been shown that the main background effect is due to  $np$ -rescattering.

**Резюме.** М.І. Ляўчук "Электрамагнітная структура нуклонаў у працэсах расейвання і паглынання фатонаў дэйтронамі".

**Ключавыя словы:** дыяграмны падыход, фотарасщчаплянне, комптанаўскае расейванне, фотанараджэнне, электрамагнітныя палярываванасці, спінавыя палярываванасці, дэйтрон, нейтрон, мезоны, мезонныя абменныя токі, сегалы.

Пабудавана самаўзгодненая мадэль рэакцыі фотарасщчапляння дэйтрона ў дыяграмным падыходзе. Дасягнута значнае паляпшэнне апісання эксперыментальных дадзеных у параўнанні з вядомымі працамі Лажэ. Распрацаваны метады даследавання комптанаўскага расейвання на нейтроне ў пругкім  $\gamma d$  працэсе. Пабудавана мадэль для апісання рэакцыі ў межах удасканаленага дыяграмнага падыходу. Пабудаваны і ўлічаны се-

галы, узгодненыя з Бонскім патэнцыялам  $NN$ -узаемадзеяння. Улічаны рэлятывісцкія папраўкі да апэратараў токаў і сегалаў, а таксама ад палярызаванасцей нуклонаў. Дадзена здавальняючае апісанне наяўных эксперыментальных дадзеных па дыферэнцialsнаму сячэнню комптанаўскага рассеявання на дэйтоне ў вобласці энэргій 50–100 МэВ. Праведзены фіт дадзеных з выкарыстаннем пабудаванай мадэлі і атрыманы значэнні для палярызаванасцей нейтрона  $\bar{\alpha}_n = 9 \pm 3$  і  $\bar{\beta}_n = 11 \pm 3$  (у адзінках  $10^{-4}$  Фм<sup>3</sup>). Прапанаваны і распрацаваны метады вывучэння комптанаўскага рассеявання на нейтроне ў няпругкім працэсе  $d(\gamma, \gamma'p)n$ . На падставе выкарыстання дыяграмнага падыходу пабудавана мадэль, якая ўключае ў сябе ўлік палюсных і аднапетлявых дыяграм з  $np$ -перарасеяваннем, мезоннымі абменнымі токамі і ізабарнымі канфігурацыямі. Метады быў выкарыстаны ў эксперыменце на ўстаноўцы MAMI-A і даў для электрычнай палярызаванасці нейтрона значэнне  $\bar{\alpha}_n = 10.7_{-10.7}^{+3.3}$ . Быў таксама ўстаноўлены знак  $F_{\pi^0\gamma\gamma}$  пастаяннай распаду  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  ( $F_{\pi^0\gamma\gamma} < 0$  - згодна з прадказаннямі алгебры токаў). У эксперыменце на ўстаноўцы SAL былі атрыманы наступныя вынікі:  $13.6_{-6}^{+10}$  для  $\bar{\alpha}_n$  і  $1.6_{+6}^{-10}$  для  $\bar{\beta}_n$ . Распрацаваны аналагічны метады вывучэння комптанаўскага рассеявання на пратоне ў няпругкім працэсе  $d(\gamma, \gamma'p)n$ . Метады быў рэалізаваны ў эксперыментах на ўстаноўках MAMI-B і SAL і дазволіў упершыню правесці вымярэнні велічыні рознасці электрычнай і магнітнай палярызаванасцей квазісвабоднага пратона:  $\bar{\alpha}_p - \bar{\beta}_p = 9.1 \pm 1.7 \pm 1.2$  (MAMI-B) і  $\bar{\alpha}_p - \bar{\beta}_p = 14.7_{-4.0}^{+4.6}$  (SAL), якія ўзгоднены з сярэдняй па ўсім папярэднім эксперыментальным вынікам велічыней для свабоднага пратона ( $\bar{\alpha}_p - \bar{\beta}_p = 10.0 \pm 1.5 \pm 0.9$ ); зроблена выснова аб адсутнасці новых укладаў у "backward" спінавую палярызаванасць пратона. Распрацаваны метады вывучэння амплітуды фотанараджэння нейтральных  $\pi$ -мезонаў на нейтроне ў рэакцыі  $d(\gamma, \pi^0n)p$ . У дыяграмным падыходзе ўлічаны палюсныя і аднапетлявыя дыяграмы з  $np$ - і  $\pi N$ -узаемадзеяннем у канчатковым стане. Паказана, што галоўны фоны эфект выкліканы  $np$ -узаемадзеяннем ў канчатковым стане.



Левчук Михаил Иванович

**ПРОЦЕССЫ РАССЕЯНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ  
ФОТОНОВ ДЕЙТРОНАМИ И  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СТРУКТУРА НУКЛОНОВ**

---

Подписано к печати 24.05. 2000 г. Формат 60 × 90 1/16  
Тип бумаги — типографская. Печать офсетная. Печ. л. 1.85  
Уч. изд. л. 1.5 Тираж 100 экз. Заказ 25 Бесплатно

---

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси  
220072 Минск, пр. Ф. Скорины, 70.  
Отпечатано на ризографе Института физики им. Б.И. Степанова  
НАН Беларуси  
Лицензия ЛП № 20 от 20.08.1997 г.

2Ag 41967



8000000 199858 1