

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2-2001-170

На правах рукописи
УДК 539.12.01; 539.171.016; 539.172.17

РЗЯНИН
Михаил Владимирович

**СТРУКТУРА ЯДЕР В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
И СИЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ**

Специальность: 01.04.16 — физика ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2001

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук,

профессор

В.В. БУРОВ

доктор физико-математических наук,

Г.И. ЛЫКАСОВ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,

Ю.Н. УЗИКОВ (ЛЯП ОИЯИ)

доктор физико-математических наук,

С.В. АКУЛИНИЧЕВ (ИЯИ РАН, г. Москва)

Ведущая организация:

Научно - исследовательский институт ядерной физики Московского государственного университета, г. Москва.

Защита диссертации состоится “___” _____ 2001 г. на заседании диссертационного совета К 720.001.01 при Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

Автореферат разослан “___” _____ 2001 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Ученый секретарь

диссертационного совета



С.И. ФЕДОТОВ

Актуальность темы. Задача извлечения нуклон-нуклонного потенциала из фаз нуклон-нуклонного рассеяния несмотря на большие успехи, достигнутые различными группами в этой области, не является однозначно решаемой. Точное или даже приближенное решение задачи для $N > 2$ взаимодействующих тел сопряжено с рядом трудностей. Кроме того стало ясно, что изучая структуру ядра, необходимо также учитывать структуру нуклонов. Все вышесказанное приводит нас к необходимости поиска реакций, из которых сведения о структуре ядер можно было бы извлечь наиболее простым способом, либо к поиску таких экзотических состояний или реакций, в которых структура ядер проявляется наиболее ярко.

Электромагнитные формфакторы нуклонов характеризуют распределение заряда внутри них ($G_{E(M)}^{p(n)}$ — электрический (магнитный) формфактор протона (нейтрона)). Из этих четырех формфакторов наименее изученным остается электрический формфактор нейтрона, что связано с отсутствием нейтронной мишени. До последнего времени в большей части расчетов этот формфактор полагался равным нулю. Самой простой возможной реакцией, позволяющей изучить его структуру и получить информацию об электрическом формфакторе нейтрона, является упругое электрон-дейтронное рассеяние. Однако полный анализ данного процесса еще далек от завершения.

Рождение частиц на ядрах при энергиях ниже порога рождения на свободных нуклонах (подпороговое рождение) является примером реакции, которая может идти только за счет эффектов, вызываемых структурой ядер. Это один из наиболее многообещающих источников информации о свойствах ядерной материи при высоких плотностях и о нуклон-нуклонных корреляциях на малых NN расстояниях, так как такие частицы рождаются преимущественно в сильно сжатой среде. Подпороговое рождение антипротонов, как способ исследования ядерной структуры, является наиболее привлекательным по следующим причинам. Во-первых, это тяжелая частица, поэтому она требует для своего рождения большой передачи энергии. Во-вторых, уже имеется относительно большое число проведенных

и планирующихся экспериментов по рождению антипротонов в JINR (Дубна), КЕК (Япония), BEVALAC (США) и GSI (Германия). Изучение же рождения подпороговых антипротонов на наиболее легком ядре — дейтроне могло бы дать информацию о ненуклонных конфигурациях в области взаимного перекрытия нуклонов.

Свойства адронов в плотной и горячей ядерной материи вызывают интерес в связи с вопросом о возможности восстановления киральной симметрии в такой среде, где возможно существует новая фаза сильновзаимодействующей материи. В связи с этим особенно интересны свойства векторных мезонов, т.к. дилептонные пары, на которые они могут распадаться, слабо взаимодействуют с ядерной средой. Принимая во внимание то, что спектральная функция ρ -мезона в среде обсуждается уже в течении достаточно длительного времени, свойства ω -мезона в плотной ядерной среде, особенно при относительно маленьких импульсах, вызывают все возрастающий интерес. Как и в случае ρ -мезона свойства ω -мезона при низкой плотности барионов определяются в-основном его взаимодействием с нуклонами. В связи с этим интересно получить какую-либо информацию о сечении ωN рассеяния, которая, за исключением реакции $\pi N \rightarrow \omega N$, недоступна для эксперимента.

“Усиление рождения открытого чарма” в ядро-ядерных столкновениях по сравнению с рА реакциями при той же инвариантной энергии \sqrt{s} , которое наблюдалось коллаборацией NA50 на SPS в реакции Pb+Pb (Abreu M.C. et al., Eur. Phys. J. C, 2000, v. 14, N. 3, p. 443), расценивается многими авторами, как признак фазового перехода в новое состояние — кварк-глюонную плазму. Однако прежде чем с определенностью говорить о регистрации такого нового состояния необходимо тщательно проверить, не может ли такое “усиление” определяться каким-либо из известных процессов.

Целью работы является исследование свойств ядер в упругом электрон-ядерном рассеянии и в реакциях подпорогового рождения антипротонов; определение изменения свойств ω -мезона в ядерной среде и проверка возможности описания наблюдаемого усиления рождения открытого чарма в рамках обычных представле-

ний без привлечения дополнительных предположений о существовании новой фазы ядерной материи.

Научная новизна и практическая ценность. Исследованы структурные функции и тензорная анализирующая способность дейтрона T_{20} в упругом электрон-дейтронном рассеянии в модели мезонных обменных токов. Показано, что важную роль играет учет электрического формфактора нейтрона.

Сделаны предсказания для рождения подпороговых антипротонов в протон- и дейтрон-дейтронных столкновениях, которые позволяют определить вероятность примеси высокоимпульсной нуклонной компоненты в волновой функции дейтрона.

Получено, что столкновительная ширина ω -мезонов при плотности материи, соответствующей ядерной, составляет 40–50 МэВ для покоящегося ω -мезона (по сравнению с 8.43 МэВ для свободного ω -мезона), а с ростом импульса она возрастает до 80–100 МэВ.

Получено возможное объяснение наблюдающемуся усилению рождения открытого чарма в ядро-ядерных столкновениях.

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного Института Ядерных Исследований, а также представлялись и докладывались на международной конференции по структуре ядра и ядерным взаимодействиям при низких и промежуточных энергиях (Дубна, 1992), на девятой зимней школе по ядерной динамике (Кэй Вест, Флорида, 1993), на международной конференции “Physics with GeV-Particle Beams” (Jülich, Germany, 1994), на XII международном семинаре по проблемам физики высоких энергий “Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика” (Дубна, 1994), на конференции по перспективам адронной физики (Триест, Италия, 1997).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 работ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из семи глав и одного приложения общим объемом 203 страницы, включая 12 таблиц, 71 рисунок и список цитированной литературы из 206 наименований.

Первая глава носит вводный характер. В ней обсуждается актуальность работы и мотивация проводимых исследований, дается определение подпорогового рождения и кратко рассматриваются основные кинематические свойства этой реакции, а также приводится краткое содержание диссертации.

Во второй главе исследуется упругое электрон-дейтронное рассеяние в модели мезонных обменных токов в рамках эффективной мезон-нуклонной теории. Проводится анализ структурных функций $A(q^2)$, $B(q^2)$ и тензора поляризации T_{20} , рассчитанных для различных нуклон-нуклонных потенциалов: Боннского полного, Боннского релятивистского, Ньюменген I, Ньюменген II, Ньюменген 93, Рейд 93. Детально изучается зависимость наблюдаемых величин от мезон-нуклонных формфакторов. Также исследуется зависимость от выбора электромагнитных формфакторов нуклонов на примере формфакторов, рассчитанных в рамках модели релятивистского гармонического осциллятора, и феноменологического дипольного формфактора.

Сравнительно недавно по мере уменьшения экспериментальных ошибок стало возможным, выполняя измерения поляризованных и неполяризованных сечений упругого рассеяния электронов на дейтроне при нескольких значениях угла вылета электрона для каждого значения переданного импульса, выделить из наблюдаемых данных электрический формфактор дейтрона $F_C(q^2)$ который характеризует распределение заряда внутри дейтрона: M. Garçon et al., Phys. Rev. C, 1994, v. 49, N. 5, p. 2516 (на рисунке 1 обозначен квадратиками) и новый эксперимент D. Abbott et al. Phys. Rev. Lett., 2000, v. 84, N. 22, p. 5053 (на рисунке 1 обозначен треугольниками, причем следует отметить, что положение минимума формфактора $|F_C|$ обозначенного на рисунке 1 стрелкой, расходится с предыдущим экспериментом). Показано, что модель мезонных обменных токов полностью согласуется с первым экспериментом в рамках теоретических и экспериментальных неопределенностей (см. рисунок 1). Причем различия между разными вариантами модели начинаются только после минимума формфактора. Отличие между различными

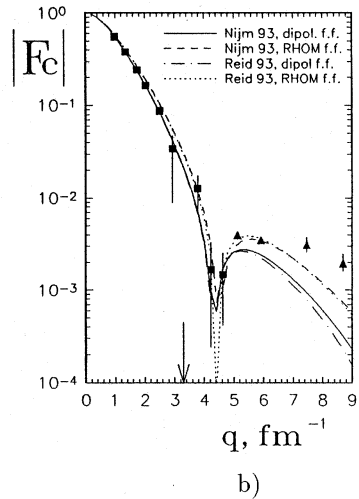
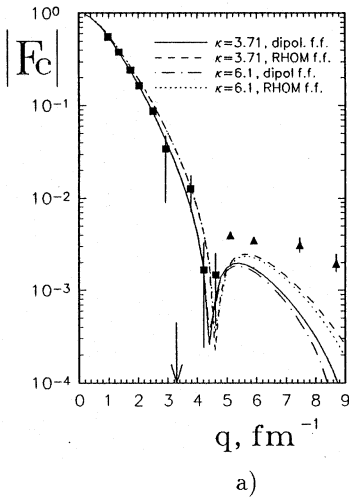


Рис. 1: Зарядовый формфактор $F_c(q)$. а) Боннский релятивистский потенциал с Боннским сильным формфактором. Сплошная и точечнопунктирная кривые — дипольный фит для электромагнитных формфакторов нуклона. Пунктирная и точечная — расчет в рамках модели релятивистского гармонического осциллятора. Сплошная и пунктирная кривые — отношение тензорной константы ρNN связи к векторной $\kappa_V = 3.71$, точечнопунктирная и точечная кривые — $\kappa_V = 6.1$; б) Сплошная и пунктирная кривые — потенциал Ньюменген 93, точечнопунктирная и точечная кривые — потенциал Рейд 93, Сплошная и точечнопунктирная кривые — дипольный фит для электромагнитных формфакторов нуклона. Пунктирная и точечная — расчет в рамках модели релятивистского гармонического осциллятора.

вариантами определяется, в-основном, используемыми электромагнитными формфакторами нуклона. Стоит заметить, что ни в одном из рассмотренных вариантов нет согласия с результатами эксперимента D. Abbott et al. Положение же минимума формфактора в рамках модели мезонных обменных токов слабо зависит от параметров и согласуется с экспериментом M. Garçon et al.

В третьей главе рассматривается упругое рассеяние электронов на изотопах лития. Радиальные распределения ядерной плотности изотопов лития рассчитываются единым образом при помощи метода гиперсферических функций с потен-

циалом Бринка-Баккера. Находятся энергии связи, энергии дыхательной моды и сжимаемость этих изотопов. С плотностью, полученной в рамках метода гиперсферических функций, рассчитываются формфакторы упругого рассеяния электронов на изотопах лития в рамках высокоэнергетического приближения с учетом амплитудных и фазовых искажающих функций для электронных волн в поле ядра. Проводится сравнение формфакторов с аналогичными расчетами для случаев экспоненциального фита для ядерной плотности и симметризованной Ферми-функции.

В четвертой главе исследуется подпороговое рождение антипротонов на ядрах. Обсуждается роль прямого и двухступенчатого каналов рождения. В случае рождения подпороговых антипротонов на дейтроне рассматривается возможность наличия высокоимпульсной ненулевой компоненты в волновой функции дейтрона. Элементарные сечения рождения антипротонов в мезон- и нуклон-нуклонных столкновениях рассчитываются в рамках модели однобозонного обмена для эксклюзивного и, в рамках струнной модели LUND, для инклюзивного каналов. В рамках транспортной модели производится расчет рождения антипротонов на тяжелых ядрах. При этом учитывается изменение свойств частиц в ядерной среде, а также эффекты перерассеяния и поглощения родившихся антипротонов при прохождении ими ядра.

В пятой главе различные каналы ωN реакции анализируются в рамках модели однобозонного обмена и обсуждаются неопределенности, связанные с константами связи и формфакторами. Рассчитывается столкновительная ширина ω -мезона в ядерной среде. Используя полученные элементарные сечения, в рамках транспортной модели рассчитывается рождение ω -мезонов на ядрах.

В шестой главе рассчитывается рождение D -мезонов в рамках модели однобозонного обмена в нуклон- и мезон-нуклонном каналах. Обсуждается рождение открытого чарма в ядро-ядерных столкновениях в связи с возможностью наличия в природе фазы кварк-глюонной плазмы. Рассматривается роль различных каналов в таком рождении.

Показывается, что при учете вторичных процессов, можно объяснить “усиление рождения открытого чарма”, наблюдавшееся коллаборацией NA50 в SPS (см.

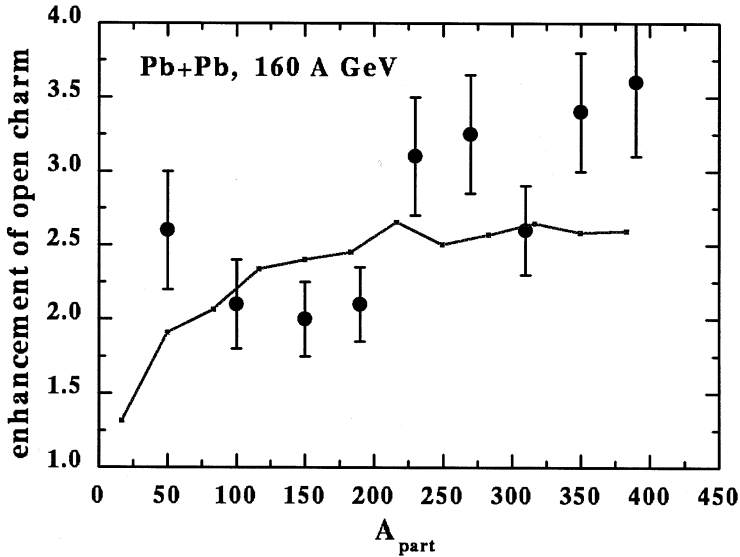


Рис. 2: Коэффициент усиления для рождения всех D , \bar{D} мезонов, полученный в транспортных расчетах для Pb+Pb при 160 А·ГэВ как функция числа прозаимодействовавших нуклонов A_{part} в сравнении с экспериментальными данными.

рисунок 2).

В седьмой главе приведены основные результаты диссертации и сформулированы главные выводы.

В приложении приводятся явные аналитические выражения для отдельных вкладов мезонных обменных токов в формфакторы упругого электрон-дейтронного рассеяния.

На защиту выдвигаются следующие результаты.

1. Впервые проведен наиболее полный анализ упругого электрон-дейтронного рассеяния в рамках модели мезонных обменных токов. Рассчитаны формфакторы, структурные функции и тензор поляризации дейтрона. Рассчитывались вклады импульсного приближения и мезонных обменных

токов: парного, мезонного и токов запаздывания. Рассмотрена зависимость от электромагнитных и сильных формфакторов нуклона. Показана зависимость расчетов от выбора нуклон-нуклонного потенциала (использовались потенциалы: Боннский полный, Боннский релятивистский, Ньюменген I, Ньюменген II; Ньюменген 93, Рейд 93). Получено, что лучшим вариантом входных данных для модели мезонных обменных токов из рассмотренных является Боннский релятивистский нуклон-нуклонный потенциал с сильной вершиной Гари-Каулфусса с электромагнитным формфактором нуклона, рассчитанным в рамках модели релятивистского гармонического осциллятора.

2. Получены радиальные распределения ядерной плотности нейтроноизбыточных изотопов лития при помощи метода гиперсферических функций. Упругий формфактор рассчитан в высокоэнергетическом приближении с учетом амплитудной и фазовой искажающих функций для электронных волн. Показано, что в рамках данной модели удастся описать энергии связи и упругие формфакторы ядер ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ при малых и средних переданных импульсах. Предсказано поведение формфакторов ядер ${}^{8,9,11}\text{Li}$.
3. Исследовано подпороговое рождение антипротонов на ядрах. Показано, что сечение рождения подпороговых антипротонов в протон-дейтронных и дейтрон-дейтронных реакциях (используя полюсную диаграмму и учитывая тот факт, что вклад треугольной диаграммы мал по сравнению с полюсной) очень чувствительно к высокоимпульсной компоненте в волновой функции дейтрона. Проанализированы сечения элементарных процессов рождения антипротонов в мезон-нуклонных и нуклон-нуклонных столкновениях в рамках модели однобозонного обмена и струнной модели LUND. Показано, что в рождении антипротонов на тяжелых ядрах первичный нуклон-нуклонный канал реакции ранее существенно переоценивался, а доминирует вторичный канал с рождением антипротонов в мезон-нуклонных соударениях. Сделаны предсказания для постановки новых экспериментов по подпороговому рождению антипротонов.

4. В рамках модели однобозонного обмена были рассчитаны сечения различных каналов ωN взаимодействия. Показано, что столкновительная ширина ω -мезонов при плотности материи, соответствующей ядерной, увеличивается более, чем в пять раз. Найдено, что из-за сильного поглощения полное сечение рождения ω -мезонов в C+C реакции при энергиях SIS уменьшается в $\simeq 4.5$ раза и в Ni+Ni реакции в $\simeq 10$ раз.
5. Показано, что вторичные процессы существенно увеличивают выход открытого чарма в ядро-ядерных столкновениях. Найдено, что получающийся в рамках теоретических неопределенностей порядок величины сечения рождения открытого чарма совместим с “усилением рождения открытого чарма”, найденным коллаборацией NA50 в SPS, без привлечения каких-либо дополнительных предположений о термическом либо химическом равновесии.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. V.V. Burov, O.V. Deripaska, V.Y. Kamchatnova, H.G. Miller, M.V. Rzjanin, K.V. Shitikova, G.D. Yen. *A microscopic description of the neutron-rich lithium isotopes*. Preprint JINR, E2-93-41
2. O.V. Bepalova, V.V. Burov, B.S. Galakhmatova, H.G. Miller, E.A. Romanovsky, M.V. Rzjanin, K.V. Shitikova, G.D. Yen. *Structure of the neutron-rich lithium isotopes in heavy-ion reactions*. Preprint JINR, E2-93-201
3. V.V. Burov, H.G. Miller, M.V. Rzjanin, K.V. Shitikova, G.D. Yen. *A microscopic description of the neutron-rich lithium isotopes*. ЯФ, 1994, т. 57, н. 12, стр. 2177.
4. Yu.L. Dorodnykh, G.I. Lykasov, M.V. Rzjanin, W. Cassing. *Probing the deuteron structure at small NN distances by subthreshold antiproton production*. Proc. of the Intern. Conf. on Physics with GeV-Particle Beams. Julich. Germany. 1995, p. 350

5. Yu.L. Dorodnykh, G.I. Lykasov, M.V. Rzjanin, W. Cassing. *Probing the Deuteron Structure at small NN Distances by Subthreshold Antiproton Production*. Phys. Lett. B., 1995, v. 346, p. 227
6. Ю.Л. Дородных, Г.И. Лыкасов, М.В. Рзянин, В. Кассинг. *Структура дейтрона на малых NN-расстояниях и подпороговое рождение антипротонов*. ЯФ, 1996, т. 59, н. 3, стр. 417
7. G.I. Lykasov, M.V. Rzjanin, W. Cassing. *Antiproton production in pp, dp and dd collisions close to threshold*. Phys. Lett. B., 1996, v. 387, p. 691
8. Yu.L. Dorodnykh, G.I. Lykasov, M.V. Rzjanin, W. Cassing. *Subthreshold antiproton production on light nuclei and deuteron structure at small intranuclear distances*. Proc. of the XIIth Intern. Seminar on High Energy Physics. Dubna. 1997 т. II, стр. 106
9. G.I. Lykasov, M.V. Rzjanin, W. Cassing. *Probing the deuteron structure at small NN distances by subthreshold antiproton production*. Proc. of the Conf. on perspectives in hadronic physics. ICTP. Trieste. Italy. 1997, p. 221
10. A. Sibirtsev, W. Cassing, G.I. Lykasov, M.V. Rzjanin. *Reanalysis of antiproton production in proton-nucleus and nucleus-nucleus reactions at subthreshold energies*. Nucl. Phys. A, 1998, v. 632, p. 131
11. G.I. Lykasov, W. Cassing, A. Sibirtsev, M.V. Rzjanin. *ωN final state interactions and ω -meson production from heavy-ion collisions*. Europ. Phys. Jour. A, 1999, v. 6, N. 1, p. 71
12. W.Cassing, L.A. Kondratyuk, G.I. Lykasov, M.V. Rzjanin. *Open charm enhancement by secondary interactions in relativistic nucleus-nucleus collisions*. Phys. Lett. B, 2001, v. 513, p. 1.

Рукопись поступила в издательский отдел
9 августа 2001 года.

Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 09.08.2001
Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. л. 0,6
Тираж 100. Заказ 52815

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области