

2-98-139

На правах рукописи
УДК 539.12.01

М-759
МОЛОЧКОВ
Александр Валентинович

**АНАЛИЗ ГЛУБОКО НЕУПРУТОГО РАССЕЯНИЯ
ЛЕПТОНОВ НА ЛЕГКИХ ЯДРАХ
В ФОРМАЛИЗМЕ БЕТЕ-СОЛПИТЕРА**

Специальность: 01.04.16 — физика ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Общая характеристика диссертации.

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

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор В.В. БУРОВ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук С.В. АКУЛИНИЧЕВ

доктор физико-математических наук В.Ю. НОВОЖИЛОВ

Ведущая организация:

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

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1998 г. на заседа-
нии диссертационного совета К 047.01.01 при Лаборатории теоретической физики
им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, г. Дуб-
на, Московской области

Автореферат разослан " _____ " _____ 1998 г.

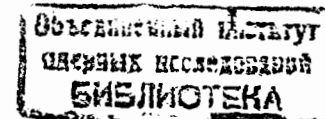
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института
ядерных исследований.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор физико-математических наук


А.Е. ДОРОХОВ

Актуальность темы. Глубоко неупругое рассеяние (ГНР) лептонов на нук-
лонах и ядрах уже долгое время является мощным инструментом исследован-
ия структуры материи. Пионерские эксперименты в конце шестидесятых го-
дов в SLAC, когда была обнаружена масштабная инвариантность и, десять лет
спустя, логарифмическое нарушение масштабной инвариантности, привели к
развитию квантовой хромодинамики (КХД) как теории сильных взаимодействий
и созданию кварк-партоновых моделей адронов. Дальнейшие исследования изо-
спиновой асимметрии в ГНР и эксперименты с участием поляризованных частиц
привели в выводу о возможном нарушении изоспиновой симметрии кварков в
нуклоне и к спиновому кризису, поставив под сомнение справедливость правил
сумм Готтфрида, Бьеркена и Эллиса-Джаффе, тем самым указав на более слож-
ную структуру нуклона, чем это предполагалось ранее.

Все это время считалось, что в качестве нуклонной мишени могут быть
использованы как протоны, так и ядра, при этом ядра рассматривались как
набор квазисвободных нуклонов. Такая картина в большей степени основывал-
ась на предположении, что энергией связи в ядре и ядерными эффектами можно
пренебречь по сравнению с передачей энергии в ГНР. Это представление было
разрушено в 1982 году открытием EMC – эффекта в экспериментах Европейской
Мюонной Коллаборации по исследованию отношения структурной функции
(СФ) железа к структурной функции дейтерия. В результате стало ясно, что
из-за эффектов связности структура нуклона меняется нетривиальным образом.
Позже, на основе богатого экспериментального материала по EMC-эффекту,
полученного коллаборациями NMC (CERN) и E139 (SLAC), было установл-
ено, что качественно структура нуклона меняется одинаковым образом во всех
ядрах при $A > 4$, а количественная эволюция EMC - эффекта с изменением A
в этой области может быть объяснена эволюцией ядерной плотности. Обл-
асть $A \leq 4$, где можно ожидать качественные изменения в поведении отн-
ошения СФ ядра и нуклона, в этом смысле изучена слабо. Поэтому наиболее
интересным представляется анализ эволюции EMC-эффекта при $A \leq 4$. Кро-
ме того, большинство существующих и планируемых экспериментов в SLAC,
CERN и HERA по проверке правил сумм КХД и извлечению СФ нуклона из
данных по ГНР на легких ядрах требуют прецизионного и модельно - незави-



симого анализа эффектов связности в таких процессах.

Таким образом, проблема эффектов связности в ГНР, с одной стороны, интересна как практическая задача выделения информации о структуре нейтрона из ядерных данных, а с другой стороны, — изучение свойств связанного нуклона позволяет глубже понять его структуру и природу нуклон-нуклонного взаимодействия. Особенно интересным в этой связи представляется изучение изменения поляризационных свойств связанного нуклона и эволюции эффектов связности с изменением атомного номера ядра. Решение этой задачи требует разработки релятивистски ковариантного модельно независимого подхода к описанию ГНР в рамках теории поля.

Цель работы состоит в разработке релятивистски ковариантного и модельно-независимого подхода к исследованию реакции глубоко неупругого рассеяния лептонов на легких ядрах в рамках формализма Бете-Солпитера и детальном исследовании эффектов деформации связанного нуклона, проявляющихся в этих процессах с участием поляризованных и неполяризованных частиц, а также анализе эволюции EMC – эффекта с изменением атомного номера ядра.

Научная новизна и практическая ценность. В диссертации предложен релятивистски ковариантный подход для анализа эффектов связности в лептон-ядерном глубоко неупругом рассеянии. Разработанные методы могут быть применены при анализе экспериментальных данных с целью извлечения информации о структуре нейтрона, при проверке правил сумм КХД и анализе экспериментальных данных по ГНР на легких ядрах. Впервые модельно-независимым образом и без введения внешних параметров предсказана эволюция EMC – эффекта при $2 \leq A \leq 4$.

Полученные результаты позволяют глубже понять природу связанного состояния нуклонов на микроскопическом уровне.

Апробация работы. Результаты диссертации неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ, Лаборатории теоретической и ядерной физики ДВГУ, физического факультета Ростовского и Боннского Университетов (Германия), физических факультетах Токийского и Хиросимского Университетов, Университета Хоккайдо, Хиросима, Осака, Кобе, Токийского Института Ядерной Физики (Япон-

ия), а также представлялись и докладывались на Международных симпозиумах “Дейтрон 95” и “Дейтрон 97” (Дубна, Россия, 1995 и 1997), “Релятивистские аспекты малочастичных систем” (Дубна, Россия, 1997), международных рабочих совещаниях “ОИЯИ–Тайвань” (Дубна, Россия, 1995), “Спин–97” (Дубна, Россия, 1997), “Пересечения между мягкими и жесткими взаимодействиями в ГНР” (Гайдельберг, Германия, 1997), “Проблемы малочастичных систем в ядерной физике и смежных областях” (Тренто, Италия, 1997), “Будущие направления в кварковой ядерной физике” (Аделаида, Австралия, 1998), международной конференции “Методы симметрии в физике” (Дубна, Россия, 1995), международной Школе ЮНЕСКО по теоретической физике (С.-Петербург, Россия, 1997), международном семинаре по проблемам физики высоких энергий “Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика” (Дубна, Россия, 1996).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано десять работ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Диссертация представлена на 103 страницах текста, включает 10 рисунков, 7 таблиц, список литературы состоит из 100 наименований.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется предмет и цель диссертации, а также дается краткое описание содержания диссертации.

Первая глава диссертации имеет вводный характер. В ней формулируется постановка задачи и методы решения.

В §1 вводятся основные понятия и определения, используемые при анализе ГНР. Рассматриваются основные теоретические методы и приближения, необходимые для описания ГНР на ядрах. Дается краткий обзор известных в литературе моделей EMC–эффекта, применяемых для анализа ГНР на ядрах.

В §2 рассматриваются основные методы формализма Бете–Солпитера. Проводится анализ матричного элемента от времени-упорядоченного произведения локальных операторов с помощью техники Мандельштама. Приводится вывод

уравнения Бете-Солпитера. Исследуются свойства амплитуды Бете-Солпитера и анализируется разложение по спинорному базису.

Вторая глава посвящена изложению теории ГНР лептонов на дейтроне.

В §1 предлагается модельно-независимый подход к анализу ГНР на дейтроне, основанный на методах формализма Бете-Солпитера. Используя соотношение унитарности:

$$W_{\mu\nu}(P, q) = \frac{1}{2\pi} \text{Im} T_{\mu\nu}(P, q), \quad (1.1)$$

связывающее адронную часть амплитуды ГНР $W_{\mu\nu}(P, q)$ (адронный тензор) с амплитудой комптоновского рассеяния вперед $T_{\mu\nu}(P, q)$ и основные свойства нуклонных функций Грина, выводится выражение для амплитуды ГНР на дейтроне. Показано, что с помощью техники Мандельстама в Бьеркеневском пределе можно провести факторизацию “больших” и “малых” расстояний и выразить амплитуду ГНР в терминах амплитуд внемазового нуклона ($W_{\mu\nu}^{\bar{N}}$) и антинуклона ($W_{\mu\nu}^N$):

$$W_{\mu\nu}^D(P, q) = \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} W_{\mu\nu}^N\left(\frac{P}{2} + k, q\right) f^N(P, k) + \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} W_{\mu\nu}^{\bar{N}}\left(\frac{P}{2} + k, q\right) f^{\bar{N}}(P, k),$$

где $f^{N(\bar{N})}(P, k)$ – функция распределения нуклона (антинуклона) в дейтроне, P – полный импульс дейтрона, k – относительный импульс нуклонов, связанных в дейтроне, q – импульс, переданный дейтрону рассеянным лептоном.

Приводится анализ основных внемазовых эффектов в амплитуде ГНР связанного нуклона:

- нарушения условия калибровочной инвариантности для связанного нуклона;
- вклада антинуклонных степеней свободы;
- зависимости от относительной энергии связанных нуклонов.

В приближении малой относительной энергии нуклонов в дейтроне получено выражение для амплитуды ГНР с учетом внемазовых поправок. Показано, что в этом приближении первыми двумя эффектами можно пренебречь.

Получено выражение для СФ дейтрона $F_2(x)$, выделены вклады ферми-движения, эффекты связности и двухнуклонные эффекты. Аналитически показано, что в релятивистском импульсном приближении выполняются одновременно барионное и энергетическое правила сумм. Приводится связь между этими правилами сумм и условием нормировки для амплитуды Бете-Солпитера. Показано, что выражение, связывающее СФ внемазового нуклона и свободного

нуклона имеет следующий вид:

$$F_2^{\bar{N}}(x) = F_2^N(x) - \frac{M_D - 2E_N}{2E_N} x \frac{dF_2^N(x)}{dx}, \quad (1.2)$$

где $E_N = \sqrt{k^2 + m_N^2}$ – энергия нуклона, $x = -q^2 / (2(P/2 + k) \cdot q)$ – переменная Бьеркена для нуклона. Такой учет внемазовой деформации нуклона позволяет объяснить EMC-эффект в отношении СФ дейтрона и изоскалярного нуклона. Показано, что в нерелятивистском пределе воспроизводятся результаты нерелятивистской мезон-нуклонной модели и модели x -rescaling. На основе этого установлена связь между внемазовой деформацией связанного нуклона и мезонными поправками, получаемыми в нерелятивистской мезон-нуклонной модели.

В §2 получены выражения для СФ дейтрона g_1 и b_1 . Проводится анализ векторной асимметрии связанного нуклона с учетом связи векторной асимметрии и СФ g_1 в бьеркеневском пределе: $A_1^N(x) = 2xg_1^N(x)/F_2^N(x)$. Показано, что внемазовая деформация влияет на векторную асимметрию связанного нуклона. Получено соотношение между векторной асимметрией связанного и свободного нуклонов:

$$A_1^{\bar{N}}(x) = A_1^N(x) - \frac{M_D - 2E_N}{2E_N} x \frac{dA_1^N(x)}{dx}. \quad (1.3)$$

Это выражение показывает как внемазовая деформация меняет поляризационные свойства связанного нуклона. Далее проводится анализ тензорной асимметрии для дейтрона, из которого становится ясно, что изменение поляризационных свойств связанных нуклонов не оказывает влияния на тензорную асимметрию дейтрона.

В §3 анализируется возможность извлечения информации о моментах СФ нейтрона и правилах сумм КХД из ядерных данных. Показано, что используя дейтрон в качестве изоскалярного нуклона для проверки правила сумм Готтфрида, можно извлечь из эксперимента величину, которая связана с истинным значением интеграла Готтфрида следующим образом:

$$I_D = \int_0^1 \frac{dx}{x} (2F_2^p(x) - 2F_2^d(x)) = \int_0^1 \frac{dx}{x} (F_2^p(x) - F_2^n(x)) - \frac{(M_D - 2E_N)_D}{m} F_2^N(0).$$

Поскольку значение СФ нуклона в нуле не известно и, судя по последним экспериментальным данным NMC, быстро растет при x стремящемся к нулю, то извлеченная таким образом величина тем сильнее переоценивает истинное

значение интеграла Готтфрида, чем ближе к нулю берется нижний предел интегрирования x_0 в реальном эксперименте. Поскольку последние эксперименты NMC дают значение $I_D(x_0 = 0.004) = 0.2281 \pm 0.0065$, то можно предсказать, что продвигаясь в область все меньших x можно при некотором $x_0 = x_1$ получить значение, восстанавливающее правило сумм Готтфрида $I_D(x_0 = x_1) = 1/3$, а потом и переоценить его. Таким образом, делается вывод о том, что в экспериментах по ГНР на дейтроне и протоне правило сумм Готтфрида нарушено и что из этих экспериментов невозможно извлечь точное значение интеграла Готтфрида.

В случае поляризованного рассеяния выводится соотношение между первым моментом СФ $g_1(x)$ дейтрона и изоскалярного нуклона:

$$\frac{1}{1 - \frac{3}{2}P_D} \int_0^1 dx g_1^D(x) = \int_0^1 dx g_1^N(x) - \frac{\langle M_D - 2E \rangle_D}{2m} \{xg_1^N(x)\}_{x=0}, \quad (1.4)$$

где P_D – вероятность D -волны в дейтроне. Последние эксперименты коллабораций SMC и E143 по измерению СФ протона g_1 указывают на то, что $xg_1^N(x)$ стремится к нулю при x стремящемся к нулю. Таким образом, можно заключить, что первый момент СФ дейтрона g_1 совпадает с первым моментом СФ изоскалярного нуклона с точностью до фактора деполаризации $1 - \frac{3}{2}P_D$. Извлеченная таким образом из экспериментов по поляризованному ГНР на дейтроне и протоне комбинация моментов СФ дает значение интеграла Бьеркена:

$$S_B = 2\Gamma_1^P - 2\Gamma_1^D \frac{1}{1 - \frac{3}{2}P_D}. \quad (1.5)$$

Последние эксперименты SMC показывают, что такая комбинация моментов воспроизводит значение правила сумм Бьеркена $S_B = 0.195 \pm 0.029$, которое находится в согласии с предсказанием КХД $S_B = 0.186 \pm 0.003$ при $Q^2 = 10 \text{ GeV}^2$. Таким образом, эксперименты по поляризованному ГНР на дейтроне и протоне позволяют заключить, что правило сумм Бьеркена выполняется.

Третья глава посвящена обобщению развитого подхода для анализа ГНР на ядрах ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, а также анализу A - зависимости ЕМС-эффекта.

В §1 приводится обобщение развитого в главе 2 подхода для анализа ГНР на ядрах ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$. Показано, что амплитуда ГНР на более тяжелом, чем

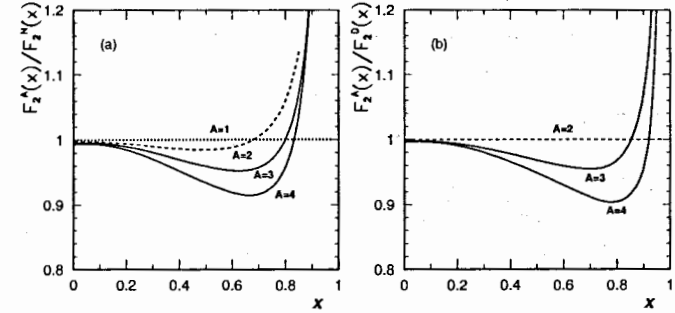


Рис. 1.1. (а) Отношение СФ $F_2^A(x)/F_2^N(x)$. (б) Отношение СФ $F_2^A(x)$ к СФ дейтрона $F_2^D(x)$ ($A = 4$) и к комбинации СФ $(2F_2^D(x) + F_2^P(x))/3$ ($A = 3$). Пунктир на Рис. (а) отображает результат расчетов для дейтрона $A = 2$. Результаты для $A = 3, 4$ показаны сплошными кривыми.

дейтрон ядре выражается не только через нуклонные амплитуды, но и амплитуды ГНР на связанных кластерах из двух и более нуклонов. Приводится вывод явного выражения для адронного тензора легких ядер. Получено выражение для СФ F_2 ядер ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$. Показано, что СФ этих ядер выражены через СФ ядерных фрагментов и трехмерное импульсное распределение этих фрагментов. Это позволило провести численный расчет отношения СФ этих ядер к СФ изоскалярного нуклона и СФ дейтрона не прибегая к решению уравнения Бете-Солпитера для трех- и четырехнуклонной системы. Результаты расчетов приведены на Рис. 1.1 и 1.2. Рисунок 1.1а демонстрирует эволюцию отношения СФ ядра и нуклона. Видно, что в промежутке $2 \leq A \leq 4$ наблюдается нетривиальная A -зависимость для этого отношения, причем, наблюдаемое насыщение A -зависимости воспроизводит насыщение нуклон-нуклонных сил. Численный расчет для отношения СФ ядер к СФ дейтрона, представленный на рисунке 1.1б показывает, что в отличие от тяжелых ядер при $A \leq 4$ картина ЕМС-эффекта существенно меняется. Так, положение точки, где отношение для ${}^4\text{He}$ обращается в единицу сдвинуто в область больших x ($x_3=0.919$) по сравнен-

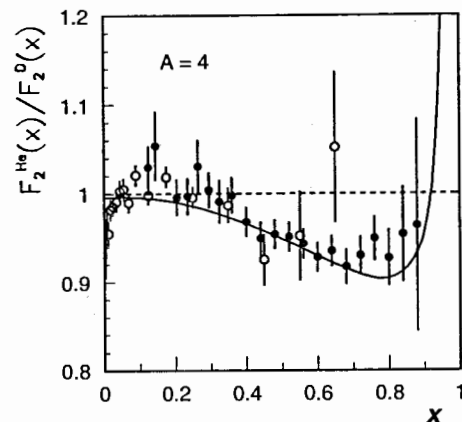


Рис. 1.2. Отношение СФ $F_2^{4\text{He}}(x)/F_2^{\text{D}}(x)$. Экспериментальные данные SLAC E139 изображены черными кружками, данные NMC – пустыми кружками.

ию с тяжелыми ядрами, для которых $x_3 = 0.84-0.86$, в то время, как положение этой точки для ${}^3\text{He}$ ($x_3 = 0.855$) попадает в этот интервал. На рисунке 1.2 показано, что полученное поведение отношения для ${}^4\text{He}$ находится в согласии с имеющимися экспериментальными данными.

Таким образом, качественное предсказание отношения СФ ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$ к СФ дейтрона, проверка которого планируется в TJNAF и HERA, показывает, что EMC-эффект на более тяжелых ядрах можно понимать как деформацию партонного распределения характерного для связанного в ${}^3\text{He}$ нуклона, которое модифицируется эффектами ядерной плотности.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации, представленные к защите.

В Приложение А вынесены параметризации СФ нуклона, использованные для численных расчетов.

В Приложении Б представлен аналитический вид решения уравнения Бете – Солпитера с сепарабельным потенциалом, а также вынесены параметризации

импульсных распределений нуклонов в ядрах ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, использованные для численных расчетов.

На защиту выдвигаются следующие результаты.

1. Разработан подход к описанию ГНР в рамках формализма Бете – Солпитера.
2. Получены структурные функции легких ядер D, ${}^3\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$.
3. Показано, что EMC - эффект определяется зависимостью от относительного времени в амплитудах ГНР связанных нуклонов.
4. Получено хорошее согласие с экспериментом для отношения структурных функций ${}^4\text{He}$ и D.
5. Предсказано поведение отношения структурной функции ${}^3\text{He}$ к комбинации структурных функций p и D.
6. Исследована A^2 - зависимость EMC - эффекта. Показано, что для легких ядер следует ожидать нетривиальной A - зависимости, отображающей насыщение ядерных сил.
7. Исследованы структурные функции дейтрона g_1 и b_2 . Показано, что вследствие деформации связанного нуклона меняются его поляризационные свойства. Установлено соотношение между векторной асимметрией связанного и свободного нуклонов. Получено, что изменение поляризационных свойств связанного нуклона не влияет на тензорную асимметрию дейтрона.
8. Исследована возможность проверки правила сумм Готтфрида и Бьеркена и показано, что значение интеграла Готтфрида не может быть извлечено из дейтронных и протонных данных. Предлагается проверка с помощью данных по ГНР на ${}^3\text{He}$ и ${}^3\text{H}$. Изученные эффекты связности не влияют на извлеченное значение правила сумм Бьеркена.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Братковская Е.Л., Кампфер Б., Молочков А.В., Резник Б.Л., Титов А.И., ЯФ, т.57, н.5 (1994) с. 924-931.
2. Burov V.V. and Molochkov A.V. Chinese Journal of Physics, vol.34 No 3-II, (1996) p. 1015-1020.
3. Burov V.V. and Molochkov A.V. To appear in Nucl.Phys. A, Elsevier Science Preprint No. NUPHA 3962, 15 pages.
4. Burov V.V. and Molochkov A.V. Submitted to Phys. Rev. Lett., American Physical Society E-print No. APS1998MAY10_001, 6 pages.
5. Burov V.V., Molochkov A.V., Smirnov G.I. Submitted to Phys. Rev. Lett., American Physical Society E-print No. APS1998MAY09_001, 6 pages.
6. Burov V.V. and Molochkov A.V. Proceedings of International Symposium Deuteron-95, July 4-7, 1995, Dubna, Ruussia, Ed. A.M. Baldin, Dubna (1996) p.114.
Burov V.V. and Molochkov A.V., Preprint JINR No. E2-95-339.
7. Burov V.V. and Molochkov A.V. Proceedings of VII International Conference "Symmetry Methods in Physics" July 10-16, 1995, Dubna, Russia, Eds. A.N. Sissakian, G.S. Pogosyan, E2-96-224, Dubna (1996) p.78.
8. Burov V.V. and Molochkov A.V. Proceedings of XII International Seminar on High Energy Physics Propblems, "Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics" September 7-12, 1994, Dubna, Russia, Eds. A.M. Baldin, V.V. Burov, E1,2-97-79, Dubna (1997) p.83.
9. Burov V.V. and Molochkov A.V. Proceedings of the VII Workshop on High Energy Spin Physics, July 7-12, 1997, Dubna, Russia, Eds. A.V. Efremov, O.V. Selyugin, E2-97-413, Dubna (1997) p.72.
10. Burov V.V. and Molochkov A.V. Abstracts of the XIV International Conference on Particles and Nuclei, Newport, USA, May 22-28, 1996, Newport 1996, Sect.1, p.84.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 мая 1998 года.