

Р-344

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

4 - 9699

РЕЗНИК Борис Львович

АНАЛИЗ КВАЗИУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ
ЭЛЕКТРОНОВ И СТРУКТУРА ЯДРА

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра
и космических лучей

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1976

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований и на кафедре
статистической и ядерной физики Дальневосточного государст-
венного университета.

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук В.К. Лукьянов

Официальные оппоненты:
член-корреспондент АН УССР,
доктор физико-математических наук А.Г. Ситенко
кандидат физико-математических наук Н.М. Кабачник

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Харьковский физико-технический институт.

Автореферат разослан "___" _____ 1976 г.

Защита диссертации состоится "___" _____ 1976 г.
на заседании специализированного Ученого совета К-56 лабора-
тории теоретической физики Объединенного института ядерных
исследований г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Объединенного института ядерных исследований.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

В.И. Журавлев

В 1964 году впервые удалось осуществить эксперименты
по выбиванию нуклонов из ядер ультрарелятивистскими электро-
нами^{/1/}. При условии одновременной регистрации рассеянного
электрона и выбиваемой частицы в реакции $^{12}\text{C}(e, e'p)$ были из-
мерены $d^4\sigma$ -сечения и получены данные об энергиях отде-
ления нуклонов и ширине образующихся дырочных резонансов.
Дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования
таких реакций^{/2-8/} показали, что с их помощью можно успешно
изучать импульсное распределение нуклонов в ядре и свойства
глубоких дырочных состояний, в частности, их энергию и шири-
ну.

К настоящему времени накоплен большой экспериментальный
материал по $(e, e'p)$ -реакциям на группе легких и средних
ядер ^6Li , ^9Be , ^{12}C , ^{27}Al , ^{40}Ca и др., включающий как дан-
ные экспериментов на совпадение^{/1, 4-8/} по угловым распреде-
лениям выбиваемых протонов, спектрам возбуждения остаточных
ядер, измеренным в различных кинематических условиях, так
и более простые - по энергетическим спектрам рассеянных
электронов (напр., ^{/9/}).

Теоретический анализ этого материала показывает, что
использование здесь наиболее простых теоретических методов -
борновского приближения с применением оболочечной (часто и
одночастичной) модели дырочных состояний - дает слишком

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

грубые, а иногда и противоречивые результаты. Такая ситуация сложилась при анализе данных $(e, e'p)$ -реакции на ядре ^{40}Ca итальянской^{/4,5/} и японской^{/6/} групп: первая группа давала для энергии $1s$ -оболочки значение 80 МэВ, а вторая - 55-60 МэВ. Известны и другие трудности интерпретации. Например, энергия глубоких уровней уже в средних ядрах оказывается больше глубины ямы, обычно используемой в расчетах по оболочечной модели, а ширина существенно превышает энергетическое разрешение по энергии. Эти и ряд других проблем, возникающих при проведении детального количественного анализа данных эксперимента, требуют совершенствования традиционных теоретических подходов к структурной части задачи.

С этой целью в диссертации рассматривается новый подход, основанный на многочастичной теории, сформулированной в работах^{/10-12/}. Применение полевых методов позволяет учесть влияние динамических корреляций в системе нуклонов, что в конечном итоге приводит к объяснению обнаруженных в эксперименте особенностей в спектрах дырочных возбуждений. Это дает возможность исследовать также роль корреляционных эффектов в $d^2\sigma$ -сечениях в области квазиупругих пиков.

Другой важной задачей, связанной с повышением точности интерпретации эксперимента, является исследование ряда вопросов механизма $(e, e'p)$ -реакций, в частности, разработка методов учета искажений протонных и электронных волн. Влияние искажения протонных волн на характер угловых распределений изучено достаточно подробно, в то же время искажение электронных волновых функций до сих пор практически не исследовалось. В диссертации разрабатывается метод учета таких

искажений, основанный на высокоэнергетическом приближении, $(E \gg V, kR \gg 1)$, которое в задачах упругого рассеяния электронов хорошо себя оправдывает^{/13/}. Проводится расчет соответствующих эффектов, возникающих в $d^4\sigma$ -сечениях квазиупругого выбивания протонов.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и списка литературы.

Первая глава - вводная, в ней рассматривается постановка $(e, e'p)$ -экспериментов и современное состояние экспериментальных исследований. Обсуждаются традиционные теоретические схемы анализа данных по $(e, e'p)$ -реакциям, в которых сечение $d^4\sigma$ рассматривается в первом порядке борновского приближения по электромагнитному взаимодействию электрона с ядерным протоном и имеет вид:

$$\frac{d^4\sigma}{d\varepsilon_1 d\Omega_1 d\varepsilon_p d\Omega_p} = K(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{p}) \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_0 R(\varepsilon, \vec{p}, \vec{q}), \quad (1)$$

где $K\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_0$ - множитель, описывающий указанное взаимодействие, \vec{k}_1 , \vec{k}_2 и \vec{p} - импульсы электрона до и после рассеяния протона в непрерывном спектре, $\vec{q} = \vec{k}_1 - \vec{k}_2$, а $\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 - T_p$, T_p - кинетическая энергия выбитого протона. Вся информация о ядре "сосредоточена" в функции R , описывающей ядерные переходы:

$$R(\varepsilon, \vec{p}, \vec{q}) = \sum_{\nu} A_{\nu}(\varepsilon) P_{\nu}(\vec{p}, \vec{q}), \quad (2)$$

где $A_{\nu}(\varepsilon)$ имеет смысл вероятности обнаружить протон с энергией связи ε в состоянии $\nu = \{n\ell\}$, а

$$P_{nl} = \frac{1}{4\pi(2l+1)} \sum_m \left| \int \varphi_{nlm}(\vec{r}) \chi_p^*(\vec{r}) e^{i\vec{q}\vec{r}} d\vec{r} \right|^2 \quad (3)$$

есть "искаженное" импульсное распределение в состоянии $|nl\rangle$ (φ_{nlm} - волновая функция этого состояния, χ_p - волновая функция протона в непрерывном спектре). В одночастичной модели

$$A_\nu = \delta(\epsilon - \epsilon_\nu), \quad (4)$$

где ϵ_ν - энергия состояния. В реальной же ситуации при достаточно больших энергиях возбуждения, когда возникает взаимодействие с непрерывным спектром, дырочные состояния оказываются довольно сильно сдвинутыми по энергии по сравнению с одночастичным спектром и имеют конечную и, как показывает эксперимент, довольно большую ширину. Выяснению изменений в d^{16} -сечениях, к которым приводят эти эффекты, посвящена следующая, вторая глава диссертации.

В ней излагаются основные идеи и результаты метода решения многочастичной задачи на основе теории функций Грина, где удается установить такие свойства среднего поля, как зависимость его от энергии и комплексность. Приводится основное уравнение, определяющее поведение дырочного состояния в ядре, из которого выбит один из нуклонов:

$$(T_\nu + M(x, \epsilon)) \varphi_\nu(x, \epsilon) = E_\nu(\epsilon) \varphi_\nu(x, \epsilon). \quad (5)$$

Входящий в (5) комплексный оператор M играет роль нового обобщенного динамического потенциала. По своему физическому смыслу он эквивалентен массовому оператору теории поля и

определяет всевозможные взаимодействия частицы или дырки с ядром. Матричный элемент $\varphi_\nu(x)$, можно рассматривать как амплитуду вероятности найти в основном состоянии один нуклон в окрестности точки x , а остальные - в некотором состоянии ядра из $(A-1)$ нуклонов. Далее исследуются решения уравнения (5) на основе феноменологического динамического потенциала, в котором явно выделена зависимость от энергии

$$M(x, \epsilon) = V(x) \cdot F(\epsilon) + i \tilde{M}(\epsilon). \quad (6)$$

Устанавливается связь его мнимой части с оптическим потенциалом взаимодействия частиц с ядрами, который можно определить из соответствующих экспериментов по упругому рассеянию протонов. Уравнение (5) определяет комплексные собственные значения энергии $E_\nu(\epsilon) = \epsilon_\nu(\epsilon) + i/2 \Gamma_\nu(\epsilon)$. Таким образом, связь одноквазидырочного возбуждения с другими степенями свободы приводит к тому, что (4) трансформируется следующим образом:

$$A_\nu(\epsilon) \Rightarrow \frac{\Gamma_\nu(\epsilon)}{(\epsilon - \epsilon_\nu(\epsilon))^2 + \Gamma_\nu^2(\epsilon)/4}, \quad (7)$$

где Γ_ν - полуширина нестационарного уровня, энергия которого определяется действительными корнями уравнения $\epsilon_\nu(\epsilon) = \epsilon$.

Итак,

- 1) из-за появления резонансных множителей сечение (1) приобретает форму ряда накладывавшихся пиков;
- 2) величины ϵ_ν , φ_ν и Γ_ν существенно зависят от энергии возбуждения ядра, поэтому форма пиков оказывается деформированной.

В этой же главе дан ряд методических расчетов. Исследуется решение уравнения Шредингера с динамическим потенциа-

лом и прослеживается ряд качественных эффектов, связанных с "углублением" потенциала, определяемым функцией $F(\epsilon)$. Далее на основе динамического потенциала с вудс-саксоновской радиальной зависимостью проводятся расчеты угловых распределений и спектров возбуждения остаточных ядер в $(e, e'p)$ -реакциях и сравнение с экспериментальными данными. Показано, что "размазывание" состояний конечного ядра и учет зависимости потенциала от энергии позволяют получить хорошее согласие рассматриваемых $d^4\sigma$ -сечений с наблюдаемыми и приводят к ряду новых физических следствий^{/15-17/}. Так, угловое распределение выбитых протонов, измеряемое при переданной энергии $\epsilon \sim \epsilon_0$, нельзя прямо отождествлять с импульсным распределением в этой ν -оболочке. На самом деле они представляют собой суперпозицию импульсных распределений в различных состояниях с весами, определяемыми их шириной^{/15/}. Это позволяет разрешить вопрос "несоответствия" экспериментальных данных^{/4,5/} и^{/6/} по положению наиболее глубоко локализованных уровней в ^{40}Ca ^{/16/}. На основе используемой модели удастся также согласовать ряд данных по упругому и квазиупругому рассеянию электронов высоких энергий на ядре ^{40}Ca , что невозможно сделать в рамках простейших подходов^{/18/}.

Третья глава диссертации посвящена разработке метода учета искажения электронных волн в кулоновском поле ядра и анализу влияния этих искажений на $d^4\sigma$ -сечения реакции $^{40}\text{Ca}(e, e'p)$ ^{/18-19/}. Метод имеет ряд преимуществ по сравнению с прямым численным решением уравнений Дирака. Суть его состоит в том, что в амплитуде реакции вместо плоских волн выступают волновые функции электронов, амплитуда и фаза

которых искажены рассеивающим полем ядра. Это приводит к замене $e^{i\vec{k}\vec{r}}$ в (3) на функцию

$$\Psi_i^+ \Psi_i = g(\vec{r}) e^{i\vec{k}\vec{r} + i\Phi(\vec{r})} \quad (8)$$

В диссертации найден явный вид Φ и g для случая квазиупругого рассеяния, когда $k_e \neq k_{e'}$, и получено соответствующее выражение для амплитуды $(e, e'p)$ -реакции. На основе предложенной методики показывается, что в случае реакции $^{40}\text{Ca}(e, e'p)$ учет искажения электронных волновых функций изменяет сечение на 10-20%. Естественно, что для более тяжелых ядер этот эффект возрастет. В этой же главе исследуется влияние оптического искажения нуклонной волны на характер сечений $d^4\sigma(\epsilon)$, изучается также роль выбора функций дырочных состояний. Оказывается, что взаимодействие выбитого протона с остаточным ядром не меняет форму спектра возбуждения, а лишь уменьшает соответствующее сечение в 3-4 раза, т.е. здесь наблюдается известный из анализа угловых распределений эффект подавления. В то же время при переходе от функций дырочного состояния в прямоугольной яме к функциям вудс-саксоновского потенциала относительное изменение сечений в области 1ρ - и $1s$ -пиков достигает двух-трех раз. Отметим, что в предлагаемой формулировке учета электронных искажений структурную часть задачи можно рассчитывать независимым путем в рамках любой приемлемой модели ядра.

В четвертой главе рассматривается влияние многочастичных эффектов на сечение неупругого рассеяния электронов в области квазиупругих пиков, когда в конечном состоянии регистрируется только рассеянный электрон. Теоретическая

задача сводится к разработке метода интегрирования $d^2\sigma$ - сечений по импульсу вылетающего протона при наличии в них вместо энергетической δ -функции резонансного множителя с конечной шириной. Для этого в диссертации предлагается метод разложения гауссовой функции по производным δ -функции. В результате в $d^2\sigma$ -сечении удается выделить обычную оболочечную часть и член, связанный с корреляционными эффектами /15, 17, 20/:

$$d^2\sigma = d^2\sigma^{(\infty)} + d^2\sigma^{(K)} \quad (9)$$

Соответствующие расчеты и сравнение с данными харьковской группы /9/ по реакции $^{12}\text{C}(\epsilon, \epsilon')$ позволяют оценить роль этих корреляций. Оказывается, что учет ширины дырочных состояний приводит в основном к небольшому сдвигу квазиупругих пиков, слабо изменяя их абсолютные величины. В общем, по сравнению с $d^2\sigma$ -сечениями, эффекты влияния конечной ширины дырочных состояний на $d^2\sigma$ -сечения следует считать слабыми. Это означает, что сами эти сечения мало чувствительны к деталям структуры дырочных состояний.

В заключении резюмируются основные результаты, полученные в диссертации.

Материалы диссертации представлялись и докладывались на XXV (Ленинград, 1975) и XXVI (Баку, 1976) всесоюзных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре ядра, на XIV Международном совещании по ядерной спектроскопии и теории ядра (Дубна, 1975), на Всесоюзном семинаре "Рассеяние электронов и структура ядра" (Владивосток, 1975) и опубликованы в работах /14-21/.

Литература

1. Amaldi V. et al. *Phys.Rev.Lett.*, 1964, v. 13, p. 341.
2. Балашов В.В., Месония Д.В. Изв. АН АрмССР, сер. физ., 1968, т. 3, стр. 122.
Balashov V.V., Kabaohnik N.M., Markov V.I., *Nucl.Phys., A*, 1969, v. 129, p. 369.
3. Ситенко А.Г., Пасичный А.А., Тартаковский В.К. ЯФ, 1970, т. 12, стр. 1208.
4. Amaldi V. et al. *Phys.Lett.*, 1966, v. 22, p. 593; 1967, v. 25B, p. 24.
5. Campos Venuti et al. *Nucl.Phys., A*, 1973, v. 205, p.628.
6. Nakamura K. et al. INS-Report-216, University of Tokyo, 1974; UTPN-36, University of Tokyo, 1974.
7. Антуфьев Д.П. и др. ЖЭТФ, 1972, т. 16, стр. 79; 1972, т. 16, стр. 339.
8. Mongey J. XII-th Int.Winter Meeting on Nuclear Physics, Villars, Switzerland, 1974.
9. Дементий С.В., Афанасьев И.Г. и др. ЯФ, 1969, т. 9, стр. 241; 1970, т. 11, стр. 19.
10. Ваградов Е.М., Калинин Б.Н. ТМФ, 1971, т. 9, стр. 240.
11. Ваградов Г.М., Горчаков В.В. ЭЧАЯ, 1974, т. 5, стр. 308.
12. Gross D., Lipperheide R. *Nucl.Phys., A*, 1970, v.150, p.449.
13. Петков И.Ж., Лукьянов В.К., Поль Д.С. ЯФ, 1966, т. 4, стр. 57; 1966, т. 4, стр. 556.
14. Горчаков В.В., Гой А.А., Резник Б.Л. "Ядерные реакции при высоких энергиях", ДВГУ, 1974, стр. 4.

15. Горчаков В.В., Гой А.А., Резник Б.Л. Программа и тезисы XIУ Международного совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра, ОИЯИ, Д6-8846, Дубна, 1975.
16. Горчаков В.В., Гой А.А., Резник Б.Л. Программа и тезисы XXУ Всесоюзного совещания по ядерной спектроскопии и структуре ядра, Ленинград, 1975.
17. Горчаков В.В., Гой А.А., Резник Б.Л. ЯФ, 1975, т. 22, стр. 987.
18. Горчаков В.В., Гой А.А., Резник Б.Л. Программа и тезисы XXVI Всесоюзного совещания по ядерной спектроскопии и структуре ядра, Баку, 1976.
19. Gorchakov V.V., Lukyanov V.K., Pol'Yu.S., Reznik B.L., Acta Physica Polonica, В6, 1975, v. 6, p. 93; Препринт ОИЯИ, Р4-6997, Дубна, 1973.
20. Горчаков В.В., Гой А.А., Резник Б.Л. "Ядерные реакции при высоких энергиях", ДВГУ, 1974, стр. 66.
21. Горчаков В.В., Гой А.А., Резник Б.Л. "Ядерные реакции при высоких энергиях", ДВГУ, 1974, стр. 33.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 апреля 1976 года.