

Б-916

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4 - 11529

БУРОВ
Валерий Васильевич

ЭЛЕКТРОН-ЯДЕРНОЕ РАССЕЯНИЕ
С БОЛЬШОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ
ИМПУЛЬСА И СТРУКТУРА ЯДРА

Специальность 01.04.16 -
физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1978

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

старший научный сотрудник

С.И. ДРОЗДОВ,

кандидат физико-математических наук

С.П. ИВАНОВА

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Харьковский физико-технический институт

Автореферат разослан " " 1978 года

Защита диссертации состоится " " 1978 года на заседании Специализированного ученого совета К-047.01.01 Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета

кандидат физико-математических

наук

В.И. ЖУРАВЛЕВ

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Десять лет назад группой Хофштадтера были измерены сечения упругого рассеяния электронов ядрами $^{40,48}\text{Ca}$ при больших передачах импульса вплоть до $q \sim 3,5$ ферми $^{-1}$ ($E_e = 750$ МэВ) $^{1/}$ и для их интерпретации введены радиальные вариации $\Delta\rho$ распределения плотности заряда (РПЗ). По сравнению с исследованными ранее гладкими плотностями гауссовского или фермиевского типа, введение осциллирующего типа добавок $\Delta\rho$ поставило новые вопросы. Они связаны как с более точным извлечением распределений плотности заряда из эксперимента (разработка методов модельно-независимого анализа факторов), так и с выяснением физической природы их радиальных вариаций. Методы модельно-независимого анализа, в принципе, дают надежную информацию об истинных, "экспериментальных" распределениях плотности заряда в ядрах, - основу для исследования как самих радиальных вариаций, так и других проблем структуры ядра. Так, в диссертации ставится вопрос об извлечении из этих данных истинного асимптотического поведения волновой функции канала отделения протона, что позволяет определить ядерные верхние константы, характеризующие вес одночастичной компоненты в полной ядерной функции. Знание "экспериментальных" плотностей ядра позволяет также пересмотреть задачу упругого рассеяния высокоэнергетичных протонов ядрами, где в расчетах обычно используются гладкие функции распределения нуклонов.

Большой интерес представляет выяснение физической природы самих радиальных вариаций плотности. Первоначально их связывали с проявлением оболочечной структуры ядра, однако расчеты $\Delta\rho$ в модели оболочек $^{2/}$ и методом Хартри-Фока $^{3/}$ не дали окончательного ответа на этот вопрос. В этом плане интересно проанализировать проблему в рамках метода оболочечных поправок $^{4/}$, где в отличие от указанных подходов вычисляется не вся функция РПЗ (с возможными при этом ошибками порядка самих $\Delta\rho$), а только ее радиальные вариации.

Независимо от идей, опирающихся на оболочечную природу ядра (к ним относятся также попытки объяснить поведение при больших q факторов за счет кластеризации ядер $^{5/}$), можно

Объединенный институт
ядерных исследований
Библиотека

искать связь радиальных вариаций с возможным пионным конденсированием в ядрах^{/6/}. В этом направлении сейчас ведутся широкие поиски.

Более близкими по существу задачи являются идеи, связывающие поведение формфакторов при больших q со структурой ядра на малых расстояниях. Так, анализ формфакторов показал^{/7,8/}, что ряд их особенностей вызван корреляциями нуклонов на малых расстояниях. Однако физическая суть этих корреляций и порождаемые ими особенности структуры ядер на малых расстояниях остаются в значительной мере предметом исследования современной ядерной физики.

Цель работы – получение и исследование радиальных вариаций $\Delta\rho$ распределения плотности заряда ряда ядер на основе анализа их формфакторов, использование этих вариаций для анализа других реакций и извлечения характеристик ядерной структуры на больших и малых расстояниях.

Научная новизна и практическая ценность. В диссертации впервые проведен модельно-независимый анализ зарядовых формфакторов большой группы ядер ${}^4\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{24}\text{Mg}$, ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{32}\text{S}$, ${}^{40}\text{Ca}$, ${}^{56}\text{Fe}$, ${}^{58}\text{Ni}$, ${}^{116}\text{Sn}$, ${}^{208}\text{Pb}$ с использованием различных наборов пробных функций распределения плотности заряда. Получены и проанализированы радиальные вариации РПЗ этих ядер.

Разработан метод определения ядерных вершинных констант с учетом радиальных вариаций $\Delta\rho$ и кулоновских эффектов и впервые вычислены ядерные вершинные константы ряда ядер p - и Sd -оболочек.

Исследовано влияние получаемых вариаций плотности на сечение упругого pA -рассеяния при больших энергиях.

В рамках метода оболочечных поправок рассчитаны радиальные вариации $\Delta\rho$ и соответствующие формфакторы ядер.

На основе идеи о возможном существовании флуктуаций сжатия ядерной материи (флуктонов в ядрах) исследован вопрос о связи природы радиальных вариаций со структурой ядер на малых расстояниях. Разработана теория и проведены расчеты формфакторов упругого и глубоконеупругого рассеяния электронов ядрами в области очень больших передач импульса.

Апробация работ. Основные результаты диссертации были доложены на Всесоюзных семинарах во Владивостоке (1974 г.), Ленинграде (1975 г.), на Международной конференции по избранному вопросам структуры ядра в Дубне (1976 г.), на Всесоюзном совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра в Ташкенте (1977 г.).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано семь статей.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 86 страниц машинописного текста, 14 рисунков и библиографический список литературы из 100 названий.

Содержание работы

Введение содержит краткое обсуждение проблемы исследования структуры ядер при помощи упругого рассеяния электронов большой энергии. Вводится понятие радиальных вариаций $\Delta\rho$ распределения плотности заряда ядра, дается краткий обзор методов анализа экспериментальных данных по упругому рассеянию электронов и методов вычисления радиальных вариаций в рамках различных моделей. Сформулированы основные вопросы, рассматриваемые в диссертации.

В первой главе упругое рассеяние электронов ядрами исследуется в наиболее информативной области углов $\vartheta \gg (qR)^{-1}$ с помощью высокоэнергетического приближения^{/9/}, которое выполнено при условиях $qR \gg 1$, $E \gg V_{\text{coul}}$. Это приближение по точности не уступает методу фазового анализа (численному решению уравнения Дирака) и позволяет в явном виде выразить сечение рассеяния через распределение плотности заряда

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Mott}} f_{\text{rec}} |F(q)|^2, \quad (1)$$

где f_{rec} учитывает отдачу ядра, $(d\sigma/d\Omega)_{\text{Mott}}$ – сечение Мотта. Формфактор $F(q)$ записывается^{/9/}

$$F(q) = q^2 \int d\vec{r} \frac{\rho(\vec{r})}{q^2(\vec{r})} \exp\{i(\vec{q}\vec{r} + \Phi(\vec{r}))\} \rho(\vec{r}), \quad (2)$$

где $\rho(\vec{r})$, $\Phi(\vec{r})$ – амплитуда и фаза искажающих функций, \vec{q} – локальный переданный импульс^{/9/}. В борновском приближении

$\tilde{q} = q, \Phi(\tilde{z}) \equiv 0, \varphi(\tilde{z}) \equiv 1$. В § 1 приводятся основные соотношения между $F(q)$ и $\rho(\tilde{z})$ с учетом конечных размеров протона, эффектов движения центра масс ядра и т.д.

В § 2 на основе высокоэнергетического приближения с помощью симметризованной ферми-плотности

$$\rho_{SF} = \rho_0 \frac{\hbar R/b}{\hbar R/b + \hbar r/b}; \quad \rho_0 = \frac{3}{4\pi R^3} \left[1 + \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]^{-1} \quad (3)$$

анализируются зарядовые формфакторы ядер ${}^4\text{He}, {}^6\text{Li}, {}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O}, {}^{24}\text{Mg}, {}^{28}\text{Si}, {}^{32}\text{S}, {}^{40}\text{Ca}, {}^{56}\text{Fe}, {}^{58}\text{Ni}, {}^{66}\text{Zn}, {}^{116}\text{Sn}, {}^{208}\text{Pb}$.

Всюду согласно с экспериментом получается в области $q \leq q_0 \approx 7,7 \text{ A}^{-1/3}$ ферми $^{-1}$. Это позволяет считать ρ_{SF} универсальной гладкой функцией распределения плотности заряда, а q_0 - параметром, разграничивающим области больших и средних значений переданного импульса.

В § 3 вводятся радиальные вариации $\Delta\rho = \rho - \rho_{SF}$, где ρ - плотность, описывающая экспериментальные формфакторы во всей области q , включая $q > q_0$. Сами функции ρ извлекаются из эксперимента на основе так называемого модельно-независимого анализа. В нашем случае этот метод строится следующим образом. Пробные функции ρ выбираются в виде ряда производных от симметризованной ферми-плотности (3)

$$\rho(r) = \rho_0 \sum_{n=0}^N a_n b^n \frac{d^n}{dR^n} \rho_{SF} r^l; \quad \int \rho(r) d\tilde{z} = 1. \quad (4)$$

Тогда формфактор (2) явно выражается через коэффициенты a_n

$$F(q) = \rho_0 \sum_{n=0}^N a_n b^n \frac{d^n}{dR^n} F_{SF}, \quad (5)$$

где

$$F_{SF}(q) = -\frac{4\pi^2 R b}{q \hbar \pi b q} D(q) \left[\cos(qR + \Phi(q)) - \frac{\pi b}{R} \sin(qR + \Phi(q)) \text{chsh} b q \right] \quad (6)$$

Из подгонки под эксперимент выражения (5) определяется набор $\{a_n\}$ для каждого ядра и с его помощью по формуле (4) строятся соответствующие "экспериментальные" плотности. Таким образом были получены радиальные вариации $\Delta\rho$ для каждого из указанной выше группы ядер. В § 3 исследуются также практи-

ческие вопросы использования метода модельно-независимого анализа, в частности, величина и характер неоднозначности "экспериментальных" плотностей.

Во второй главе из полученных "экспериментальных" распределений плотности заряда извлекаются ядерные вершинные константы. В последнее время интенсивно развиваются как методы вычисления этих констант (главным образом для легчайших ядер), так и методы их извлечения из экспериментальных данных по ядерным реакциям и рассеянию (см., например, обзор^[10]). Однако только в работах^[11, 12] делалась попытка извлекать их из экспериментов по рассеянию электронов. Ясно, что эти последние несут важную информацию о границе и периферии ядра. В § 2 для каждого ядра сравнивается асимптотическое поведение "экспериментального" ПЗ с известным поведением квадрата волновой функции в канале отделения протона и таким образом определяется нормировочный множитель C_e :

$$\rho(r) \underset{r \rightarrow \infty}{\sim} \frac{1}{2} C_e^2 |W_{-\eta, l+1/2}(2kr)|^2 / r^2. \quad (7)$$

Здесь η - кулоновский параметр, k - волновой вектор связанного протона. Коэффициент C_e однозначно связан с ядерной вершинной константой G_e . В § 3 показано, что учет радиальных вариаций играет важную роль в определении G_e . (Например, для ${}^{40}\text{Ca}$ это изменяет значение G_e на порядок величины.) Далее показано, что имеющаяся неоднозначность в определении $\Delta\rho$ практически не влияет на величину ядерной вершинной константы, в то время как учет кулоновских эффектов увеличивает ее в γ^{-1} раз, где

$$\gamma \approx (4k\bar{R})^{-2\eta}, \quad (8)$$

а \bar{R} - среднеквадратичный радиус ядра. Для средних ядер это дает $\gamma^{-1} \sim 100$.

В третьей главе в рамках теории многократного рассеяния Глаубера-Ситенко (§ 2)^[13, 14] исследуется вклад $\Delta\rho$ в упругое pA -рассеяние при больших энергиях $E_p \approx 1 \text{ ГэВ}$. В § 3 проводится расчет дифференциальных сечений для ядер ${}^{28}\text{Si}, {}^{32}\text{S}, {}^{40}\text{Ca}$ с $N=Z$. Показано, что учет радиальных вариаций $\Delta\rho$ позволяет в принципе получить согласие рассчитанных сечений с экспериментальными и отказаться, как это делалось раньше (см.,

напр. /15/) при использовании лишь гладких плотностей, от введения различных радиусов в функциях распределения протонов и нейтронов.

В четвертой главе после краткого обзора моделей расчета функций распределения плотности заряда в ядрах (§ I) детально рассматривается метод оболочечных поправок /4/ для вычисления $\Delta\rho$. В духе метода рассчитывается именно оболочечная поправка - в данном случае радиальные вариации распределения плотности заряда:

$$\Delta\rho \equiv \delta\rho^s(\tau) = \rho^s - \tilde{\rho}^s = \sum_{\lambda} |\varphi_{\lambda}^s(\tau)|^2 \delta n_{\lambda}, \quad (9)$$

где $\delta n_{\lambda} = n_{\lambda} - \tilde{n}_{\lambda}$; $\varphi_{\lambda}^s(\tau)$ - одночастичные функции модели оболочек. n_{λ} (\tilde{n}_{λ}) - одночастичные (сглаженные) распределения чисел заполнения, а усредненная сглаженная функция плотности $\tilde{\rho}^s$ берется из эксперимента. В качестве таковой выбрана симметризованная ферми-плотность, подогнанная под эксперимент для всех ядер при $q < q_0 = 7,7 A^{-1/3}$ ферми⁻¹ (см. гл. I). В результате проведенных расчетов оказывается, что в области больших передач импульса для ядер ⁴⁰Ca, ⁵⁸Ni эти поправки улучшают согласие с экспериментом, а для ядра ²⁰⁸Pb действуют в обратную сторону, что связано, видимо, с грубостью оболочечных расчетов $\delta\rho^s(\tau)$.

Таким образом, использование стандартных ядерных моделей не позволяет сделать однозначный вывод о природе $\Delta\rho$. Для этого, с одной стороны, требуется привлекать новый экспериментальный материал по реакциям с очень большой передачей импульса $q \gg q_0$ (например, глубоконеупругое eA- и pA-рассеяние), а с другой - исследовать структуру ядер на очень малых расстояниях.

В пятой главе изложена идея о существовании флюктонов в ядрах /16/ и приведены (§ 2) основные соотношения - вероятности их образования и волновые функции движения центра масс, необходимые для построения формфакторов. Флюктоны есть флуктуации плотности ядерного вещества - временные образования из K нуклонов, возникающих в тот момент, когда нуклоны оказываются на расстоянии друг от друга порядка радиуса коа NN - сил. Вероятность такого события качественно оценивалась в /16/ на основе классической теории флуктуаций газа невзаимодействующих частиц

в малом объеме $V_f \ll A V_0$, где V_0 - объем нуклона

$$\beta_k = \binom{A}{k} \left(\frac{V_f}{V_0}\right)^{k-1} A^{1-k}. \quad (10)$$

Показано /17/, что расчеты β_k в рамках кварковых моделей, основанных на представлении о флюктонах как многобарионных конфигурациях, качественно совпадают с результатом (10).

В § 3 строится теория упругого eD- и eA-рассеяния электронами ядрами при больших $q \gg q_0$ в области, где могут проявлять себя эффекты рассеяния на флюктонах. Формфактор представляется в виде

$$F^A(q) = \sum_{k=1}^A \beta_k B_k F_k \bar{F}_k, \quad (11)$$

где B_k учитывает изотопический состав флюктона, F_k определяется по правилам кваркового счета /18, 19/, \bar{F}_k - формфактор формы движения k-го флюктона

$$\bar{F}_k(q) = (V_0 A)^{k-1} \int \rho^k(\tau) e^{i\vec{q}\cdot\vec{\tau}} d\vec{\tau}. \quad (12)$$

Анализ на этой основе данных по упругому eD-рассеянию при $q \gg 5$ ферми⁻¹ показал, что вероятность $\beta_d \approx (2+12)\%$ дейтрону, находится в состоянии флуктуационного сжатия (шестикварковый объект) согласуется с данными, получаемыми из анализа кумулятивных реакций /20-22/. В этом же параграфе рассматривается упругое рассеяние на ядре ¹²C. Учитывается вклад флюктонов с $K = 2$. Показано, что возможной причиной наблюдаемых особенностей поведения ядерных формфакторов в области $q \geq 4$ ферми⁻¹ является флюктонная структура ядер на малых расстояниях.

В § 4 рассматривается глубоконеупругое eD- и eA-рассеяние. Механизм реакции строится по аналогии с глубоконеупругим ep-процессом, при этом используются партонные представления о структуре нуклонов и флюктонов. На этой основе проведен анализ существующих данных по глубоконеупругому eD-рассеянию, который дает значение $\beta_d \approx 2\%$, совпадающее по порядку величины с β_d , полученным из упругого eD-рассеяния и кумулятивных pA $\rightarrow \pi + \dots$ реакций. Даны предсказания поведения сечений глубоконеупругого рассеяния электронов на ядрах при очень больших передачах импульса. Таким образом, вопрос о проявлении флюктонной структуры ядер на малых расстояниях представляется сей-

час весьма актуальным и требует для своего окончательного решения как новых экспериментов при больших q , так и совершенствования теории рассмотрения этих необычных объектов в ядрах.

В заключении приведены основные результаты диссертации, которые представляются на защиту:

1. На основе пробных симметризованной ферми-функции и ее производных разработан метод модельно-независимого анализа зарядовых формфакторов ядер. На этой основе показано, что область больших передач импульса следует считать $q > q_0 = 7,7 A^{-1/3}$ ферми⁻¹. Получены "экспериментальные" распределения плотности заряда ядер ⁴He, ⁶Li, ¹²C, ¹⁶O, ²⁴Mg, ²⁸Si, ³²S, ⁴⁰Ca, ⁵⁶Fe, ⁵⁸Ni, ⁶⁶Zn, ¹¹⁶Sn, ²⁰⁸Pb, в которых четко проявляются характерные радиальные вариации, проанализированы их физические свойства.

2. Предложен и разработан метод определения ядерных вершинных констант из распределения плотности заряда ядер. При этом выявлена важная роль учета вариаций плотности и кулоновских эффектов. Впервые вычислены ядерные вершинные константы для группы ядер ρ - и sd -оболочки.

3. Показано, что учет радиальных вариаций при рассмотрении упругого ρA -рассеяния позволяет, в принципе получить согласие вычисленных сечений с экспериментальными.

4. Расчет методом оболочечных поправок радиальных вариаций плотности ядер и соответствующих формфакторов показывает, что учет оболочечной структуры ядер не может дать полного объяснения особенностей поведения формфакторов в области больших передач импульса.

5. На основе идеи существования флюктуонов в ядрах разработана теория упругого и глубоконеупругого рассеяния электронов ядрами. Проведены расчеты соответствующих сечений eD -рассеяния и сравнение их с экспериментом, дан ряд предсказаний поведения соответствующих сечений eA -рассеяния в области очень больших передач импульса $q \gg 5$ ферми⁻¹. Проведенные здесь исследования, а также изучение кумулятивных реакций позволяют сделать предположение о глубокой связи радиальных вариаций и флюктуаций плотности ядерного вещества.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. В.В.Буров, Ю.Н.Блдышев, В.К.Лукьянов, Ю.С.Поль. Сб. "Ядерные реакции при высоких энергиях", Владивосток, ДВГУ, 1974 г.; ОИЯИ, Б4-8029, Дубна, 1974.
2. В.В.Буров, В.К.Лукьянов, Ю.С.Поль, ОИЯИ, Р4-9556, Дубна, 1975.
3. В.В.Буров, В.К.Лукьянов, ОИЯИ, Р4-11098, Дубна, 1977; Труды Межд. конф. по избранным вопросам структуры ядра, Дубна, ОИЯИ, Д-9682, т. I, 1976, стр. 154.
4. В.В.Буров, Ф.А.Иванчик, Б.Д.Константинов, ЯФ, 22, 1142 (1975).
5. В.В.Буров, С.М.Елисеев, ЯФ, 26, 1195 (1977); ОИЯИ, Р2-10108, Дубна, 1976.
6. V.V.Burov, V.K.Lukyanov, B.L.Reznik, A.I.Titov, JINR, E2-11091, Dubna, 1978; В.В.Буров, В.К.Лукьянов, А.И.Титов, Труды Межд. конф. по избранным вопросам структуры ядра, Дубна, ОИЯИ, Д-9682, т. I, 1976, стр. 187.
7. V.V.Burov, V.K.Lukyanov, A.I.Titov, Phys. Lett., 67B, 46 (1977) ОИЯИ, Р2-10244, Дубна, 1977.

Л и т е р а т у р а

1. J.V.Bellicard et al., Phys. Rev. Lett., 19, 527 (1967).
2. I.Sick, J.S.McCarthy, Nucl. Phys. A150, 631 (1970).
3. J.W.Negele, Proc. of Conf. on Radial Shapes of Nuclei, Cracow, A.Budzanowski ed., 1976, p. 79.
4. В.М.Коломиец и др. ЭЧАЯ, 3, 392 (1972).
5. Е.В.Инопина, В.К.Лукьянов, Ю.С.Поль, ЯФ, 19, 987 (1974).
6. А.Б.Мигдал, Письма в ЖЭТФ, 19, 539 (1974).
7. C.Ciofi degli Atti Nucl. Phys., A129, 350 (1969).
8. Р.И.Джибути, Р.Я.Кезерашвили, ЯФ, 20, 33 (1974).
9. В.К.Лукьянов, Ю.С.Поль, ЭЧАЯ, 5, 955 (1974).
10. Л.Д.Блохинцев, И.Борбей, Э.И.Долинский, ЭЧАЯ, 8, 1189 (1977).
11. Л.Д.Блохинцев, Письма в ЖЭТФ, 19, 703 (1974).
12. R.D.Violler et al. Nucl. Phys., A206, 498, 513 (1973).
13. R.J.Glauber, Lectures in Theor. Phys. ed by W.E.Brittin, Interscience, 1959.

14. А.Г.Ситенко, УФЖ, 4, 152 (1959).
15. G.D.Alkhozov et al. Preprint LINP 218, Leningrad, 1976.
16. Д.И.Блохинцев, ЖЭТФ, 33, 1295 (1957).
17. В.К.Лукьянов, А.И.Титов, С.М.Доркин. ОИЯИ Р2-11049, Дубна, 1977.
18. V.A.Matveev, R.M.Muradyan, A.N.Tavkhelidze, Nuovo Cim. Lett. 1973, 7, p. 719.
19. Brodsky S. and Farrar G. Phys. Rev. Lett., 31, 1153 (1973); Phys. Rev., D11, 1309, 1975.
20. В.В.Буров, В.К.Лукьянов, А.И.Титов, Труды Межд. конф. по избранным вопросам структуры ядра, т. 2, Дубна, 1976, ОИЯИ, Д-9920, стр. 432.
21. В.В.Буров, В.К.Лукьянов, А.И.Титов, Изв. АН СССР, сер. физ., 42, 38 (1978); ОИЯИ, Б2-10680, Дубна, 1977.
22. В.В.Буров, В.К.Лукьянов, А.И.Титов, ОИЯИ Р2-10927, Дубна, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 апреля 1978 года.