

P2-2002-173

Ю. А. Александров

**О ВАЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛИНЫ
НЕЙТРОН-ЭЛЕКТРОННОГО РАССЕЯНИЯ**

Доложено на 52-й Международной конференции
по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра,
Москва, июнь 2002 г.,
и направлено в «Известия Академии наук. Серия физическая»

Хотелось бы еще раз обратить внимание на важные следствия, вытекающие из результатов измерений величины длины рассеяния нейтрона на электроне, проводимых при рассеянии низкоэнергетических нейтронов на ядрах.

Теоретические исследования интересующего вопроса с учетом всех существенных эффектов были, видимо, впервые проведены в 1952 г. Фридом [1]. Им было показано, что потенциал взаимодействия между нейтроном и электроном состоит из двух частей. Одна из них пропорциональна аномальному магнитному моменту нейтрона μ , другая зависит от протяженности распределения электрического заряда в нейтроне. Примерно в то же время Фолди было показано [2,3] (см. также [4]), что наблюдаемое в низкоэнергетическом эксперименте взаимодействие между нейтроном и электроном должно содержать сумму двух членов: магнитного, который может быть рассчитан, и другого, связанного с внутренним распределением электрического заряда, возникающего вследствие виртуального распада нейтрона, согласно теории Юкавы, на протон и отрицательный π -мезон и имеющего пространственную протяженность порядка $\eta/(m_\pi c) \approx 1,4 \times 10^{-13}$ см. Таким образом, согласно Фолди, любая нейтральная частица, даже если такой частице нельзя приписать никакого распределения заряда, и, следовательно, ее формфактор Дирака, описывающий пространственное распределение заряда, $F_1(q^2) = 0$ при всех переданных четырехмерных импульсах q все-таки будет взаимодействовать с электрическими зарядами, если она обладает аномальным магнитным моментом. Такое взаимодействие никоим образом не связано со взаимодействием магнитного момента с движущимся зарядом (так наз. Швингеровским взаимодействием). Оно просто не зависит от относительной скорости движения и является в этом смысле лишь контактным.

Математическое выражение для длины рассеяния нейтрона на электроны, полученное Фолди из обобщенного уравнения Дирака, имеет вид

$$a_{ne} = \frac{2Me}{\eta^2} \left[\varepsilon_1 + \mu e \left(\frac{\eta}{2Mc} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где ε_1 описывает радиальную протяженность распределения электрического заряда в нейтроне, а второй член представляет собой вклад аномального магнитного момента μ .

В работе Фолди

$$\varepsilon_1 \sim \frac{1}{6} \int r^2 \rho(r) d^3r = \frac{e}{6} \langle r_{E,in}^2 \rangle, \quad (2)$$

где $\langle r_{E,in}^2 \rangle$ - средний квадрат радиуса распределения заряда и, как пишет Фолди, «...знак пропорциональности, а не равенства, т.к. существует некоторая неоднозначность в связи релятивистских коэффициентов с физически протяженным статическим распределением заряда» $\rho(r)$.

Однако в предельном случае низких энергий, а именно при таких энергиях экспериментально определяется величина a_{ne} , можно показать [5], что

$$\varepsilon_1 = \frac{e}{6} \langle r_{E,in}^2 \rangle. \quad (3)$$

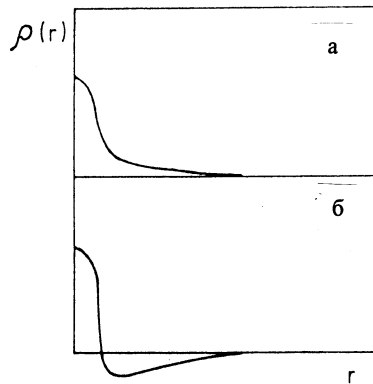
Итак, при низких энергиях

$$a_{ne} = \frac{2Me^2}{\eta^2} \left[\frac{1}{6} \langle r_{E,in}^2 \rangle + \mu \left(\frac{\eta}{2Mc} \right)^2 \right] = a_e + a_F. \quad (4)$$

Вклад второго члена в величину a_{ne} можно рассчитать. Он равен $a_F = -1,468 \times 10^{-3}$ фм и обычно называется длиной рассеяния Фолди.

Знак первого члена, определяемый знаком величины $\langle r_{E,in}^2 \rangle$, зависит от измеряемой в эксперименте длины рассеяния a_{ne} . Стоит заметить, что в принципе знак среднего квадрата электрического радиуса $\langle r_{E,in}^2 \rangle$ (см. (2)) в целом нейтральной не имеющей заряда частицы может быть как положительным, так и отрицательным. Такой знак должен определяться знаком заряда, расположенного на периферии. Действительно, поскольку ожидаемое распределение электрического заряда в нуклоне, представленное

на рисунке, для случая нейтрона имеет отрицательно заряженный «хвост», величина $\langle r_{E,in}^2 \rangle$ для нейтрона должна быть отрицательной. Вид кривых на рисунке непосредственно связан с мезонной теорией Юкавы [6]. Из нее следует, что благодаря основному положению Юкавы, объяснившего происхождение ядерных сил, как результат обмена мезонами, имеющими по сравнению с нуклонами более легкую массу, нейтрон часть времени должен проводить в виртуальном состоянии: протон плюс отрицательно заряженный π -мезон. Полный заряд нейтрона равен нулю, однако величина $\langle r_{E,in}^2 \rangle$, согласно соотношению (2), должна быть отрицательной.



Ожидаемое распределение электрического заряда в нуклоне:
а) для протона, б) для нейтрона

Результаты наиболее точных измерений длин рассеяния a_{ne} приведены в таблице. Как следует из нее, в настоящее время экспериментальные данные можно разделить на две группы. Результат одной из них $\langle a_{ne} \rangle = (-1,58 \pm 0,03) \times 10^{-3}$ фм приводит к $\langle r_{E,in}^2 \rangle < 0$, что соответствует теории Юкавы, другой же $\langle a_{ne} \rangle = (-1,30 \pm 0,03) \times 10^{-3}$ фм приводит к $\langle r_{E,in}^2 \rangle > 0$, что противоречит теории Юкавы. Либо последние экспериментальные данные неверны, либо вышеизложенный подход (а может быть, и теория Юкавы) где-то имеют существенные погрешности. Во всяком случае новые измерения длин нейтрон-электронного рассеяния крайне желательны.

Таблица

Авторы, год	Метод	Мишень	Величина эффекта	$-a_{ne}[10^{-3} \text{ фм}]$
В.Хавенс и др, 1947-51	Энергетическая зависимость полного сечения	Свинец и висмут	$\Delta\sigma_{ne}/\sigma_{tot} \approx 1,5\%$	$1,91 \pm 0,36$ [7]
Д.Юз и др, 1952-53	Отражение нейтронов	Зеркало O_2 -Bi	$\Delta\theta/\theta \approx 50\%$	$1,39 \pm 0,13$ [8]
Е.Мелконьян и др., 1959	Энергетическая зависимость полного сечения	Висмут	$\Delta\sigma_{ne}/\sigma_{tot} \approx 1,5\%$	$1,56 \pm 0,05$ [9]
В.Крон, Г.Ринго 1966-73	Асимметрия рассеяния	Благородные газы	$\Delta\sigma_{ne}/\sigma_{tot} \approx 0,5\%$	$1,33 \pm 0,03$ [10]
Л.Кестер и др. 1976-95	Энергетическая зависимость полного сечения и измерение длин рассеяния	Висмут, свинец и свинец-208	$\Delta\sigma_{ne}/\sigma_{tot} \approx 1,2\%$	$1,32 \pm 0,03$ [11]
Ю.Александров и др., 1985	Энергетическая зависимость полного сечения	Висмут	$\Delta\sigma_{ne}/\sigma_{tot} \approx 1,2\%$	$1,55 \pm 0,11$ [12]
Ю.Александров и др., 1974-85	Дифракция нейтронов	Вольфрам-186, монокристалл	$\Delta\sigma_{ne}/\sigma_{tot} \approx 20\%$	$1,60 \pm 0,05$ [13]
С.Копецкий и др. 1994-97	Энергетическая зависимость полного сечения	Свинец -208 Висмут	$\Delta\sigma_{ne}/\sigma_{tot} \approx 1,2\%$	$1,33 \pm 0,03 \pm 0,03$ $1,44 \pm 0,03 \pm 0,06$ [14]
Т.Еник и др., 1995	Энергетическая зависимость полного сечения	Свинец - 208	$\Delta\sigma_{ne}/\sigma_{tot} \approx 1,2\%$	$1,67 \pm 0,16$ [15]
А.Лаптев и др. 1988-99	Энергетическая зависимость полного сечения	Свинец -208 Висмут	$\Delta\sigma_{ne}/\sigma_{tot} \approx 1,2\%$	$1,78 \pm 0,25$ $1,75 \pm 0,27$ [16]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fried B.D.- Phys.Rev. 1952, v. 88, p. 1142
2. Foldy L.L.- Phys.Rev. 1952, v. 87, p. 693
3. Foldy L.L.- Rev.Mod.Phys. 1958, v. 30, p. 471
4. Drell S.D. and Zachariasen F. - *Electromagnetic Structure of Nucleons*. Oxford University Press, 1961
5. Alexandrov Yu.A.. - *IV Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-4)*, Dubna, April 27-30, 1996, JINR, E3-96-336, p.365, Dubna, 1996; Phys.Part.Nucl. 1999, v. 30, p. 29
6. Yukawa H.- Proc.Phys.-Math.Soc. (Japan), 1935, v. 17, p. 48
7. Havens W., Rabi I., Reinwater L.- Phys.Rev. 1951, v.82, p.345
8. Hughes D.J., Harvey J.A., Goldberg M.G., Stafne M.J. - Phys.Rev. 1953, v.90, p.497
9. Melkonian E., Rustad B.M., Havens, Jr.,W. - Phys.Rev. 1959, v.114, p.1571
10. Krohn V., Ringo G. - Phys.Rev. 1973, v.D8, p.1305
11. Koester L., Waschkovski W., Mitsyna L.V. et al.- Phys.Rev.C, 1995, v.51, p.3363
12. Alexandrov Yu.A., Vrana M., Manrique Garcia J. et al. -Sov.J.Nucl.Phys. 1986, v.44, p.900
13. Alexandrov Yu.A., Vavra J, Vrana M. et al. -Sov.Phys.JETP 1985, v.62, p.19
14. Kopecky S., Riehs P., Harvey J.A., Hill N.W. - Phys.Rev.Lett. 1995, v.74, p.2427

15. Enik T.L., Mitsyna L.V., Nikolenko V.G. et al. - *III Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-3)*, Dubna, April 26-28, 1995, JINR E3-95-307, p.238, Dubna, 1995
16. Laptev A., Alexandrov Yu., Guseva I. et al. Report to *Intern. Conf. on Nucl. Data for Science and Technology*, Tsukuba, Japan, Oct. 7-12, 2001

Получено 15 июля 2002 г.

О важности измерений длины нейтрон-электронного рассеяния

Из мезонной теории Юкавы следует, что нейтрон должен иметь пространственное распределение заряда и, поскольку «хвост» распределения обусловлен виртуальным отрицательно заряженным пионом, $\langle r_{E,in}^2 \rangle$ — средний квадрат радиуса распределения заряда — нейтрона должен иметь отрицательное значение. Измеряя при низких энергиях нейтронов длину нейтрон-электронного рассеяния, связанную с $\langle r_{E,in}^2 \rangle$, можно получить информацию о его величине и знаке и сопоставить ее с выводами теории Юкавы.

Среди многих проведенных измерений имеется ряд экспериментов (Крон и Ринго, 1973; Кестер и др., 1995; Копецкий и др., 1997 и др.), приводящих к положительному знаку $\langle r_{E,in}^2 \rangle > 0$ и, следовательно, противоречащих основному положению теории Юкавы, объясняющей ядерные силы как результат пионного обмена.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2002

Перевод автора

On the Significance of the Neutron-Electron Scattering Length Measurements

According to Yukawa meson theory the neutron has to possess a spatial charge distribution. The «tail» of this distribution has to be negative since virtual negative pion is the reason of the tail. Therefore the neutron mean square intrinsic charge radius $\langle r_{E,in}^2 \rangle$, has also to be negative. From the measurements of the neutron-electron scattering length at low energy one can obtain the information about the value and the sign of $\langle r_{E,in}^2 \rangle$.

But there are series of experiments (Krohn and Ringo, 1973; Koester et al., 1995; Kopecki et al., 1997; and others) obtaining $\langle r_{E,in}^2 \rangle > 0$, in contradiction with Yukawa theory.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Редактор *М. И. Зарубина*
Макет *Н. А. Киселевой*

ЛР № 020579 от 23.06.97.

Подписано в печать 09.08.2002.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,37. Уч.-изд. л. 0,45. Тираж 425 экз. Заказ № 53466.

**Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.**