

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P2-85-196

В.В.Буров, В.К.Лукьянов

УПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ
И КВАРКОВАЯ СТРУКТУРА ЯДРА ${}^3\text{He}$

Направлено в журнал "Physics Letters B"

1985

В предыдущей работе^{/1/} было исследовано влияние шестикварковой примеси на поведение упругого формфактора ${}^3\text{He}$ и показано, что в области переданных импульсов $3 \leq q \leq 6 \text{ фм}^{-1}$ они играют определяющую роль. При этом важное значение имеет интерференция нуклонного и шестикваркового ($6q$) каналов. Однако при $q > 6 \text{ фм}^{-1}$ расхождение с экспериментом^{/2-5/} оставалось.

В данной работе подробно изучена роль $9q$ -примесей в формфакторе ядра ${}^3\text{He}$. Такие примеси вводились и раньше^{/6-10/}, однако учет интерференционных членов, которые, как мы увидим, весьма важны, и совокупный анализ вклада нуклонного, шести- и девятикваркового каналов не проводился.

Запишем волновую функцию ядра ${}^3\text{He}$ в виде^{/1/}:

$$\Psi = \sum_{k=1}^3 C_k \psi_k, \quad /1/$$

где

$$\Psi_1 = \psi_{3q}(\xi_1, \eta_1) \psi_{3q}(\xi_2, \eta_2) \psi_{3q}(\xi_3, \eta_3) \psi(\rho, r), \quad /2/$$

$$\Psi_2 = \psi_{6q}(\xi_1, \eta_1, \xi_2, \eta_2, r/\sqrt{2}) \psi_{3q}(\xi_3, \eta_3) \phi(\rho), \quad /3/$$

$$\Psi_3 = \psi_{9q}(\xi_1, \eta_1, \xi_2, \eta_2, \xi_3, \eta_3, r/\sqrt{2}, \sqrt{2/3}\rho). \quad /4/$$

В Ψ_1 выделены трехкварковые кластеры /нуклонные каналы/, в Ψ_2 - шестикварковые, в Ψ_3 - девятикварковый. C_k - есть амплитуды соответствующих вкладов, ρ и r - координаты Якоби центров нуклонов в ${}^3\text{He}$. Здесь не учтен обмен кварков между кластерами, который, как мы видели на примере дейтрона, весьма мал^{/11-14/}. Факторизация в /2/-/4/ позволяет упростить конечные выражения для формфактора ядра ${}^3\text{He}$, выразив его через формфакторы более простых систем. Используя /1/-/4/, можно получить^{/1/}:

$$F_{3\text{He}} = \sum_{i,j=1}^3 C_i C_j F_{ij}, \quad /5/$$

где

$$F_{11} = F_1(q^2) = F_{3q}(q^2) F_1^p(q^2), \quad /6/$$

$$F_{22} = F_2(q^2) = \frac{2}{3} F_{6q}(q^2) F_1^p(q^2/4), \quad /7/$$

$$F_{33} = F_3(q^2) = F_{9q}(q^2), \quad /8/$$

$$F_{12}(q^2) = \frac{2}{3} F_{12}^q(q^2) F_{12}^q(0) F_1^\rho(q^2/4) F_{12}^r(q^2), \quad /9/$$

$$F_{13}(q^2) = F_{13}^q(q^2) [F_{13}^q(0)]^2 \left\{ \frac{2}{3} F_{13}^r(q^2) F_{13}^\rho(q^2/4) + \frac{1}{3} F_{13}^r(0) F_{13}^\rho(q^2) \right\}, \quad /10/$$

$$F_{23}(q^2) = \frac{2}{3} F_{23}^q(q^2) F_{23}^q(0) F_{13}^r(0) F_{13}^\rho(q^2/4) F_{23}^r(q^2) + \frac{1}{3} [F_{23}^q(0)]^2 F_{13}^q(q^2) F_{13}^\rho(q^2) F_{23}^r(0); \quad /11/$$

и далее

$$F_1^\rho(q^2) = \int |\Phi(\rho)|^2 \exp(i2q\rho/3) d\rho, \quad /12/$$

$$F_{12}^r(q^2) = \int u(r) \tilde{\psi}_{6q}(r/\sqrt{2}) \exp(iq\vec{r}/2) d\vec{r}, \quad /13/$$

$$F_{13}^\rho(q^2) = \int \Phi(\rho) \tilde{\psi}_{9q}(\sqrt{2/3}\rho) \exp(i2q\rho/3) d\rho. \quad /14/$$

Соответствующие выражения для F_{13}^r (F_{23}^r) получаются из /13/ заменой $\tilde{\psi}_{6q} \rightarrow \tilde{\psi}_{9q}$ ($u(r) \rightarrow \psi_{9q}$). Весьма простая и явная форма выражений /5/-/14/ получена в результате того, что волновая функция относительного движения нуклонов в ядре $\psi(\rho, r)$ выбиралась в факторизованном виде

$$\psi(\rho, r) = u(r) \Phi(\rho), \quad /15/$$

где

$$u(r) = \int \psi(\rho, r) \Phi(\rho) d\rho \quad /16/$$

определяется как интеграл перекрытия исходной, например вариационной /15/, функции ядра $\psi(\rho, r)$ и функции $\Phi(\rho)$ движения скоррелированной пары нуклонов относительно третьего нуклона. Кроме того, весьма важно и в то же время естественно было бы предположить, что

$$\phi(\rho) = \Phi(\rho), \quad /17/$$

т.е., что волновая функция движения третьего нуклона относительно первых двух не зависит от того, составляют эти нуклоны $6q$ -систему или нет. Формфакторы собственно мультикварковых систем F_{ij}^q рассчитывались в модели релятивистского гармонического осциллятора /МРГО/ /см. /1,16/. Параметры в F_{ij}^q определяются из анализа электрон-протонного рассеяния /более подробно

но см. /1/. Формфактор нуклонного канала F_1^ρ /6/ мы взяли из /17/, где он рассчитывался численным решением задачи трех тел, при этом учитывались мезонные обменные токи, релятивистские поправки, а также вклады высших конфигураций в трехтелную волновую функцию. При больших q^2 зависимость F_{12}^r , F_{13}^r , F_{13}^ρ от переданного импульса определяется поведением на малых расстояниях функций $\tilde{\psi}_{6q}(r)$, $\tilde{\psi}_{9q}(r)$, $\tilde{\psi}_{9q}(\rho)$. Эти функции представляют собой зависящие от соответствующих переменных части волновых функций $6q$ -, $9q$ -систем, которые возникают в результате факторизации по внутренним координатам исходной функции в модели МРГО. Они быстро спадают с ростом r или ρ . Таким образом, для вычисления /13/-/14/ необходимо знать поведение $u(r)$, $\Phi(\rho)$ на малых расстояниях. В работе /1/ мы выбрали эти функции в виде

$$u(r) = N \exp(-\gamma^2 r^2) [1 - \exp(-\beta^2 r^2)], \quad /18/$$

т.е. учли ястровские корреляции нуклонов $\beta = 1,9 \text{ фм}^{-1}$, см., например, /15/. Наклон этих формфакторов от выбора γ зависит слабо, поэтому последний можно взять из /1/ $\gamma = 0,71 \text{ фм}^{-1}$, где описывалось поведение $F_{3\text{He}}$ при малых q^2 .

Значения $6q$ - и $9q$ -примесей $2C_2^2/3=0,10$ и $C_3^2=0,0054$ выбирались так, чтобы получить наилучшее согласие с экспериментальными формфакторами ${}^3\text{He}$. Они отличаются не более чем на 10-20% от соответствующих значений, полученных из анализа /18-21/ кумулятивных адрон-ядерных реакций при высоких энергиях /22-23/.

На рис.1 показано поведение отдельных /кроме F_1 / слагаемых формфактора /5/ ядра ${}^3\text{He}$. Видно, что в области $q < 6 \text{ фм}^{-1}$ доминирует член F_{12} , а при $q > 6 \text{ фм}^{-1}$ основной вклад дает F_{23} /по крайней мере, вплоть до $q \sim 10 \text{ фм}^{-1}$. Таким образом, именно интерференционные члены играют определяющую роль в интерпретации эксперимента /на рис.2 дано такое сравнение/. При этом существенно, что знак амплитуды C_2 $6q$ -канала надо выбирать отрицательным. Мы еще раньше показали /1/, что в противном случае при $C_2 > 0$ не удастся получить даже качественного согласия с экспериментом, например, не удастся вообще получить минимум формфактора при $q \sim 3,5 \text{ фм}^{-1}$, наблюдаемый экспериментально. Далее нетрудно заметить, что в случае выбора $C_3 < 0$ формфактор ${}^3\text{He}$ будет иметь второй минимум при $q \sim 5 \text{ фм}^{-1}$ вследствие конкуренции $2C_1 C_2 F_{12} < 0$ и $2C_2 C_3 F_{23} > 0$ /рис.1/. Таким образом, оказывается, что согласие с экспериментом получается при выборе $C_2 = -0,3927$ и $C_3 = 0,0736$. Следует подчеркнуть, что в тех работах /6,7,9,10/, где интерференция не учитывается, и в /5/ входят только "прямые" члены $C_1^2 F_1 + C_2^2 F_2 + C_3^2 F_3$, подгонку под эксперимент удастся осуществить лишь формальным приемом: изменением знака перед вторым и /или/ третьим членами; а это значит, что вероятности примесей $6q$ -, $9q$ -каналов оказываются отрицательными величинами C_2^2 , $C_3^2 < 0$. /В самих работах на это обычно не указывается/. Действительно, при подгонке под эксперимент формфактора ${}^3\text{He}$ непосредственной задачей является необходимость усиления вклада

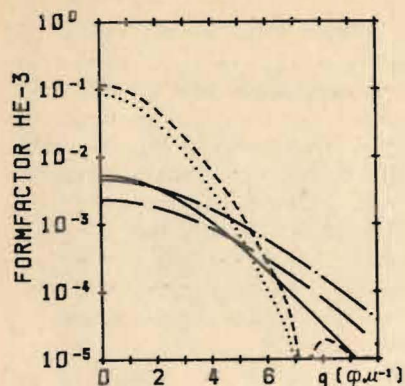


Рис.1. Интерференционные формфакторы в ^3He . Пунктир - $|2C_1C_2F_{12}|/9/$, длинный пунктир - $|2C_1C_3F_{13}|/10/$, штрихпунктир - $|2C_2C_3F_{23}|/11/$, а также формфакторы $6q$ - и $9q$ -примесей, точки - $|C_2^2F_2^2|/7/$ и сплошная - $|C_3^2F_3^2|/8/$.

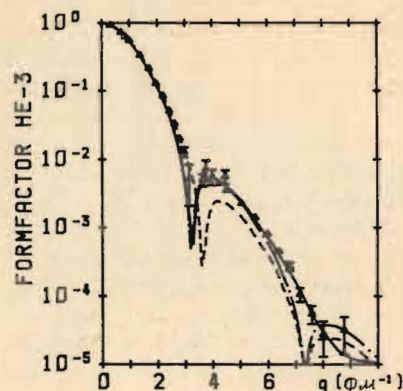


Рис.2. Формфактор ^3He : пунктир - $|F_1|$, рассчитанный при помощи уравнений Фаддеева с учетом мезонных, обменных и релятивистских эффектов^{/17/}, штрихпунктир - $|F_{3\text{He}}|$, вычисленный с учетом $6q$ -примесей / $C_2 = -0,3927$, $C_3 = 0$ / и сплошная - с учетом как $6q$ - так и $9q$ -примесей / $C_2 = -0,3927$, $C_3 = 0,0736$ / . Экспериментальные данные взяты из работ^{/2-5/}.

в области второго максимума $|F_{3\text{He}}|$ при $q > 3,5 \text{ fm}^{-1}$. В этой области F_1 имеет отрицательный знак, поэтому здесь требуется именно отрицательная добавка за счет включения $6q$ -примесей. Но во всех более или менее реалистических моделях прямой формфактор от $6q$ -примеси F_2 является либо всегда положительным, либо не успевает в этой области изменить своего знака на отрицательный. Например, в рассматриваемой нами модели F_2 меняет знак в области $q \sim 8 \text{ fm}^{-1}$. Таким образом, добиться согласия с экспериментом за счет введения одних прямых F_2 или F_3 членов невозможно, требуется учет еще интерференционных $2C_1C_2F_{12}$, $2C_1C_3F_{13}$ и $2C_2C_3F_{23}$ членов, которые могут давать вклад с отрицательным знаком за счет выбора знака амплитуд C_2 и C_3 . Имитация же вклада F_{12} прямым членом F_2^2 /при выборе $C_2^2 < 0$ / оказалась возможной в указанных выше работах лишь потому, что их зависимости от q^2 оказываются весьма близкими друг к другу /см. рис.1/.

Полученные нами значения $C_2^2 \approx 15\%$, $C_3^2 = 0,54\%$ вероятностей $6q$ - и $9q$ -примесей оказываются близкими к тем, что получены в работах^{/8,24-26/}. Следует также отметить, что вклады различных каналов в формфактор ^3He разделены по переданному импульсу. Так,

при $q < 3 \text{ fm}^{-1}$ основной вклад вносит нуклонный канал $C_1^2F_1^2$, при $3 < q < 6 \text{ fm}^{-1}$ - $6q$ -примесь, а при $q > 6 \text{ fm}^{-1}$ - $9q$ -примесь /см. также^{/9/}.

И в заключение отметим, что предположение о существовании в ^3He шести- и девятикварковых систем позволяет с учетом интерференции каналов описать формфактор ^3He во всей области измеренных переданных импульсов.

Авторы благодарят за полезные дискуссии В.А.Николаева, А.И.Титова.

ЛИТЕРАТУРА

1. Burov V.V., Lukyanov V.K., Titov A.I. Z.Phys., 1984, A318, p.67.
2. McCarthy J.S., Sick I., Whitney R.R. Phys.Rev., 1977, C15, p.1396.
3. Bernheim M. et al. Lett.Nuovo Cim., 1972, 5, p.431.
4. Arnold R.G. et al. Phys.Rev.Lett., 1978, 40, p.1429.
5. Dunn P.C. et al. Phys.Rev., 1983, C27, p.71.
6. Chertok B. Phys.Rev.Lett., 1978, 41, p.1155.
7. Namiki M., Okano K., Oshimo N. Phys.Rev., 1982, C25, p.2157.
8. Vary J.P., Coon S.A., Pirner H.J. Proc.Few Body Problems in Physics. (Ed. by B.Zeinitz). 1984, vol.2, p.683.
9. Hoodbhoy P., Kisslinger L.S. Phys.Lett., 1984, 146B, p.163.
10. Maize M.A., Kim Y.E. Preprint PNTG-84-14, Purdue Univ., 1984.
11. Burov V.V. et al. Z.Phys., 1982, A306, p.149.
12. Burov V.V. et al. Z.Phys., 1984, A315, p.205.
13. Обуховский И.Т., Ткаля Е.В. ЯФ, 1982, 35, с.288.
14. Yamauchi Y., Yamamoto R., Wakamatsu M. Phys.Lett., 1984, 146B, p.153.
15. Khanna F.C. Nucl.Phys., 1971, A165, p.475.
16. Kizukuri Y., Namiki M., Okano K. Progr.Theor.Phys., 1979, 61, p.559.
17. Sick I. Lecture Notes in Phys., 1978, 86, p.300.
18. Burov V.V., Lukyanov V.K., Titov A.I. Phys.Lett., 1977, 67B, p.46.
19. Буров В.В., Лукьянов В.К., Титов А.И. Изв.АН СССР, сер. физ., 1978, 42, с.38.
20. Лукьянов В.К., Титов А.И. ЭЧАЯ, 1979, 10, с.815.
21. Буров В.В., Лукьянов В.К., Титов А.И. ЭЧАЯ, 1984, 15, с.1249.
22. Балдин А.М. ЭЧАЯ, 1977, 8, с.429.
23. Ставинский В.С. ЭЧАЯ, 1979, 10, с.946.
24. Greeben J.M., Thomas A.W. Phys.Rev., 1984, C30, p.1021.

25. Ефремов А.В. ЭЧАЯ, 1982, 13, с.614.
26. Pirner H.J., Vary J.P. Phys.Rev.Lett., 1981, 46, p.1376.

В Объединенном институте ядерных исследований начал выходить сборник "Краткие сообщения ОИЯИ". В нем будут помещаться статьи, содержащие оригинальные научные, научно-технические, методические и прикладные результаты, требующие срочной публикации. Будучи частью "Сообщений ОИЯИ", статьи, вошедшие в сборник, имеют, как и другие издания ОИЯИ, статус официальных публикаций.

Сборник "Краткие сообщения ОИЯИ" будет выходить регулярно.

The Joint Institute for Nuclear Research begins publishing a collection of papers entitled *JINR Rapid Communications* which is a section of the JINR Communications and is intended for the accelerated publication of important results on the following subjects:

- Physics of elementary particles and atomic nuclei.
- Theoretical physics.
- Experimental techniques and methods.
- Accelerators.
- Cryogenics.
- Computing mathematics and methods.
- Solid state physics. Liquids.
- Theory of condensed matter.
- Applied researches.

Being a part of the JINR Communications, the articles of new collection like all other publications of the Joint Institute for Nuclear Research have the status of official publications.

JINR Rapid Communications will be issued regularly.



Рукопись поступила в издательский отдел
19 марта 1985 года.