

УДК 539.172.4

ПОИСК ДИНЕЙТРОНА ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НЕЙТРОНОВ С ДЕЙТРОНАМИ

С. Б. Борзаков, Ц. Пантелеев, А. В. Стрелков

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлены результаты первой попытки поиска динейтрона во взаимодействии тепловых нейтронов с дейтронами. Измерения сделаны на нейтронном канале реактора ИБР-2. Метод измерений заключался в поиске протонов, возникающих в результате реакции $n + d \rightarrow {}^2n + p$. Факт регистрации протона доказывал бы существование динейтрона, а его энергия связана с энергией связи динейтрона. Для регистрации заряженных частиц использовался пропорциональный счетчик, наполненный D_2 (при $P = 1,5$ атм), Ar (при $P = 0,5$ атм) и 3He (при $P = 10^{-2}$ торр). В результате измерений получена верхняя оценка сечения образования динейтрона (с энергией связи динейтрона B_2 в интервале $2,67 < B_2 < 3,01$ МэВ) $\sigma(n + d \rightarrow {}^2n + p) < 0,2$ мб.

A first attempt to search for the dineutron in the interaction of thermal neutrons with deuterons is presented. Measurements were carried out at a neutron channel of the IBR-2 reactor. The measuring method consists in searching for protons, which can appear as a result of the reaction $n + d \rightarrow {}^2n + p$. The fact of the registration will prove existence of the dineutron and its energy is connected with the dineutron binding energy. A proportional counter filled by D_2 (at $P = 1.5$ atm), Ar (at $P = 0.5$ atm) and 3He (at $P = 10^{-2}$ Torr) was used to detect charged particles. An estimation for cross-section (with the dineutron binding energy B_2 in the interval $2.67 < B_2 < 3.01$ MeV) $\sigma(n + d \rightarrow {}^2n + p) < 0.2$ mb is obtained.

ВВЕДЕНИЕ

Хотя поискам динейтрона были посвящены десятки работ, проблема его существования не решена окончательно. В последнее время появился ряд экспериментальных работ, которые можно трактовать как прямые или косвенные указания на существование динейтрона.

Нейтрон-нейтронное взаимодействие при низких энергиях возможно только в синглетном состоянии [1, 2]. В настоящее время взаимодействие в 1S_0 -состоянии понимается как проявление виртуального уровня, хотя физический смысл его не ясен. Большинство специалистов уверено, что дейтрон также не имеет связанного синглетного состояния, однако этот вопрос до сих пор не исследован экспериментально. Необходимо отметить, что существуют экспериментальные указания на существование резонанса при низкой энергии в протон-протонном рассеянии [3]. В силу принципа изотопической инвариантности должно существовать квазистационарное состояние приблизительно с такой же массой в системах np и nn .

В настоящей работе мы попытаемся показать, что существование динейтрона не противоречит никаким физическим законам сохранения и теоретическим моделям, и представим результаты первой попытки поиска динейтрона в реакции захвата тепловых нейтронов дейтронами. Эти вопросы обсуждаются также в работах [4, 5].

ПРОБЛЕМА ДИНЕЙТРОНА

Если динейтрон существует, то возникает вопрос о его распаде. Возможная энергия связи динейтрона может быть определена из условия β -распада динейтрона на дейтрон, электрон и антинейтрино.

Соотношение между массами нуклонных пар (pp, np, nn) показано на рис. 1.

Масса нейтрона больше массы протона на 1,296 МэВ. Нейтрон и протон образуют связанное состояние — дейтрон с энергией связи $B_d = 2,224$ МэВ, полным спином и четностью $J = 1^+$ и изотопическим спином $T = 0$ [2].

Из этих данных и условия

$$m(^2n) = 2m_n - B_2 > m_d + m_e = m_n + m_p - B_d + m_e, \quad (1)$$

где m_d — масса дейтрона и m_e — масса электрона, можно получить верхнюю оценку для энергии связи динейтрона B_2 :

$$B_2 = 2m_n - m(^2n) \leq m_n - m_p + B_d - m_e = 3,01 \text{ МэВ}. \quad (2)$$

Впервые, видимо, эта оценка была получена в работе [6].

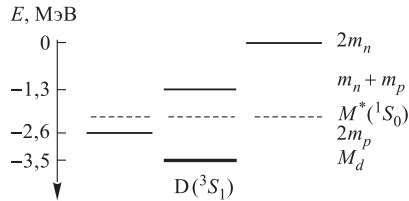


Рис. 1. Массы нуклонных пар в энергетической шкале

Рассмотрим экспериментальные работы, посвященные обсуждаемой теме. Обзор некоторых работ, посвященных поискам динейтрона, можно найти в [7, 8]. В последнее время появился целый ряд новых работ. Авторы работы [3], изучая pp -взаимодействие в конечном состоянии, обнаружили резонанс и определили его положение 0,4 МэВ и ширину 0,15 МэВ. Следуя принципу зарядовой инвариантности, можно сделать вывод, что в np - и nn -взаимодействии должны проявляться резонансы при энергиях ниже порога развала. Их положение показано пунктиром на рис. 1.

В работе [9] изучались распады ядер ${}^6\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^6\text{Be}$ из возбужденных состояний со спином 2^+ . Измерялись спектры α -частиц. В случае ${}^6\text{He}$ и ${}^6\text{Li}$ в спектрах были обнаружены узкие пики, что указывает на распад на две частицы: ${}^4\text{He}$ и nn - или np -пару соответственно. Попытки описать эти пики как проявления взаимодействия двух нуклонов в конечном состоянии приводят к огромным длинам рассеяния (порядка 50–100 фм). Эти результаты можно понять, если предположить распады на α -частицу и синглетный дейтрон (в случае ${}^6\text{Li}$) и α -частицу и динейтрон (в случае ${}^6\text{He}$). Необходимо подчеркнуть, что этот вывод является прямым следствием законов сохранения энергии и импульса.

Для поиска нейтральных частиц часто применяют активационную методику. Суть ее заключается в том, что исследуется наведенная активность, которая появляется при захвате каким-либо стабильным изотопом нейтральной частицы. В эксперименте между источником нейтральных частиц и детектором помещают достаточно толстый фильтр, который поглощает все заряженные частицы, но пропускает нейтральные. Детраз в работе [10] измерял активность, возникающую после бомбардировки ${}^{235}\text{U}$ протонами с энергией 24 ГэВ, и пришел к выводу об испускании нейтральных ядер. Детектором нейтральных ядер служила реакция захвата двух нейтронов:

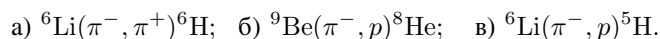


В последующем эти результаты были подвергнуты критике, но не в отношении динейтрона.

Д. В. Александров и др. [11] изучали испускание нейтральных ядер в спонтанном делении. Они использовали в качестве источника ^{252}Cf интенсивностью 10^7 делений в секунду. Активатором служили образцы ^{26}Mg весом от 0,1 до 6 г, располагавшиеся на расстоянии 3 мм от источника. Одно облучение длилось 40–48 часов. Предполагалось, что в реакции $^{26}\text{Mg} ({}^k n, ({}^{k-2}) n) {}^{28}\text{Mg}$ должен образоваться нестабильный изотоп ^{28}Mg с последующим распадом в ^{28}Al и ^{28}Si . γ -кванты регистрировались полупроводниковым детектором из сверхчистого германия объемом 120 см^3 . В результате измерений авторы работы получили верхний предел на вероятность испускания динейтрона 10^{-7} на один акт деления. В делении вероятность испускания динейтрона очень мала, поскольку она сильно зависит от разности между зарядом испускаемой частицы и наиболее вероятным значением заряда, соответствующим максимуму в зарядовом распределении осколков.

Указания на испускание нейтральных ядер были получены в работе [12].

Сет и Паркер изучали взаимодействие мезонов с ядрами ${}^6\text{Li}$ и ${}^9\text{Be}$ [13]. В эксперименте измерялись спектры мезонов и протонов, образующихся в результате следующих реакций:



Измерения проводились при энергии налетающих мезонов 220 МэВ (для реакции (а)) и 125 МэВ (реакции (б) и (в)). Конечным продуктом всех трех реакций являются нестабильные ядра. Выход регистрируемых частиц в зависимости от эффективной массы значительно лучше согласуется с экспериментальными данными, если предположить образование динейтрона. Энергия связи динейтрона предполагалась равной нулю.

В последнее время большой интерес вызывают эксперименты с радиоактивными пучками. В работе [14] исследовалось угловое распределение рассеяния ${}^6\text{He}$ на ${}^4\text{He}$. Результаты показывают, что с большой вероятностью процесс идет с передачей двух нейтронов. Авторы работы делают вывод, что динейтрон существует в связанном состоянии в ядре ${}^6\text{He}$. Этот факт также можно считать указанием на существование динейтрона в свободном состоянии.

Интересно также отметить работу [20], в которой делается попытка объяснить космофизические процессы образования радиоактивных изотопов германия с помощью динейтронного распада ядер после захвата ими нейтрино.

Таким образом, существует ряд экспериментов, в которых получены указания на существование динейтрона. Однако до сих пор не ясно, какова величина его энергии связи.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОИСКА ДИНЕЙТРОНА

Динейтрон может быть обнаружен в реакции взаимодействия нейтронов с дейтронами:



Идея эксперимента с использованием этой реакции впервые обсуждается в работе [15]. Предлагалось искать скачок в сечении рассеяния вблизи порога развала дейтрона, вызванный образованием динейтрона. Как известно, рассеяние нейтронов дейтронами может

происходить с полным спином $1/2$ или $3/2$. В то время не был известен истинный набор длин рассеяния для системы $n + d$. Авторы работы [15] использовали в своих расчетах следующие значения $a_d(J = 1/2) = 8,26$ фм; $a_q(J = 3/2) = 2,6$ фм. Так как динейтрон должен иметь нулевой спин, реакция (3) возможна только в дублетном состоянии. Расчет был приведен для трех значений энергии связи динейтрона: 50, 150 и 300 кэВ. Было показано, что в случае образования динейтрона в сечении рассеяния должна проявляться ступенька порядка 10–15 % при полном сечении рассеяния порядка 2 б. Впоследствии, в результате измерений с поляризованными нейтронами и поляризованной дейтронной мишенью, выяснилось, что верен другой набор длин рассеяния ($a_d = 0,65$; $a_q = 6,35$ фм [16], см. также [17]) и, следовательно, скачок в сечении рассеяния значительно меньше, поскольку рассеяние в дублетном состоянии значительно меньше, чем в квартетном. Оценка сечения образования динейтрона с энергией связи 300 кэВ дает величину порядка 10 мб.

Первая экспериментальная попытка поиска динейтрона в реакции $n + d \rightarrow n + d$ была сделана Глазго и Фостером [18]. Они измерили сечение рассеяния в энергетическом интервале 2,25–15 МэВ (в лабораторной системе) с точностью 1,2–5,6 % и получили верхний предел образования динейтрона 100–1000 мкб.

Поиск динейтрона в реакции (3) можно осуществить, регистрируя протон. Энергия протона связана с энергией налетающего нейтрона и зависит от B_2 :

$$E_p = 2/3(B_2 - B_d + E_n). \quad (4)$$

Если энергия связи динейтрона достаточно велика, реакция (3) возможна с тепловыми нейтронами. В этом случае энергия протона может достигать величины 0,53 МэВ (если $B_2 = 3$ МэВ).

Идея эксперимента состоит в использовании дейтерия в качестве мишени внутри счетчика для детектирования протона. В качестве стандарта можно использовать изотоп с хорошо известным сечением захвата, например ^3He . Число зарегистрированных протонов, появившихся в результате реакции (3), может быть получено согласно следующей формуле:

$$N_p = \Phi_n n_d \sigma_d t \varepsilon, \quad (5)$$

где Φ_n — поток нейтронов; n_d — число дейтронов в мишени; t — время измерений и ε — эффективность детектора. Сечение исследуемой реакции обозначено как σ_d .

Аналогичное выражение можно написать для числа протонов, образовавшихся в результате реакции $n + ^3\text{He} \rightarrow T + p$:

$$N_3 = \Phi_n n_3 \sigma_3 t \varepsilon. \quad (6)$$

Из этих формул легко получить искомое сечение:

$$\sigma_d = \frac{n_3 \sigma_3}{n_d} \frac{N_d}{N_3}. \quad (7)$$

Эксперимент был проведен на нейтронном канале импульсного реактора ИБР-2. Поток нейтронов был равен приблизительно $10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Для регистрации протонов использовался пропорциональный счетчик с газовой смесью, состоящей из D_2 (при $P = 1,5$ атм), Ar (при $P = 0,5$ атм) и ^3He (при $P = 10^{-2}$ торр).

Счетчик имел форму цилиндра длиной 30 см и диаметром 50 мм. Для уменьшения фона нейтроны пропускались через коллиматор размером $1,5 \times 5$ см, так чтобы облучалась только центральная часть счетчика. Детектор был расположен на расстоянии 27 м от активной зоны реактора. Электронное оборудование позволяло записывать в память персонального компьютера коды амплитуды и времени пролета каждого события. Амплитудный спектр, полученный во временном окне, соответствующем тепловым нейтронам, показан на рис. 2.

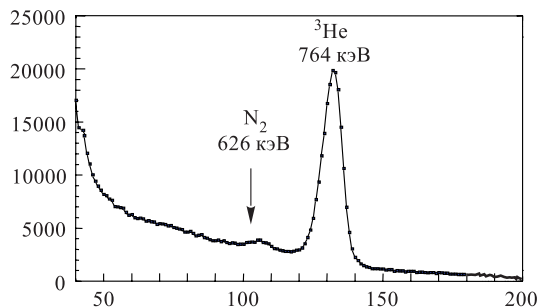


Рис. 2. Амплитудный спектр заряженных частиц, полученный при взаимодействии нейтронов с газовой смесью $D_2 + Ar + ^3He$

Время измерения равнялось приблизительно 120 ч. На рис. 2 хорошо видны пики от 3He (764 кэВ) и от следов азота N_2 (626 кэВ). Пика, соответствующего реакции (3), не обнаружено в пределах экспериментальной точности. Используя известное значение сечения захвата для 3He (5327 б [19]), мы получили верхнюю оценку сечения реакции (3) (в энергетическом интервале $0,3 < E_p < 0,55$ МэВ, что соответствует $2,67 < B_2 < 3,01$ МэВ) $\sigma_d < 0,2$ мб. В заключение необходимо отметить, что в настоящей работе впервые получена верхняя оценка сечения образования динейтронов во взаимодействии тепловых нейтронов с дейтронами.

Авторы работы благодарны В. И. Муромцеву за обсуждение идеи эксперимента, В. Н. Швецову за поддержку данной работы и Ю. В. Григорьеву за предоставление электронной аппаратуры для регистрации амплитудных спектров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика. М.: Наука, 1989.
2. Brown G. E., Jackson A. D. The Nucleon-Nucleon Interactions. North-Holland Publishing Company, 1976.
3. Zhang Ying-ji et al. // Phys. Rev. C. 1992. V. 45, No. 2. P. 528.
4. Борзаков С. Б. Сообщение ОИЯИ Р15-89-430. Дубна, 1989.
5. Борзаков С. Б. // ЯФ. 1994. Т. 57. С. 517.
6. Feather N. // Nature. 1948. V. 162. P. 213.
7. Александров Ю. А. Фундаментальные свойства нейтрона. М.: Энергоатомиздат, 1990.
8. Физика быстрых нейтронов / Под ред. В. И. Стрижака. М.: Атомиздат, 1977.
9. Бочкарев О. В. и др. // ЯФ. 1987. Т. 46. С. 12.
10. Detraz C. // Phys. Lett. B. 1977. V. 66. P. 333.
11. Александров Д. В. и др. // ЯФ. 1991. Т. 52, № 4. С. 933.

50 Борзаков С. Б., Пантелеев Ц., Стрелков А. В.

12. Агеев Ю. А. и др. Препринт КИЯИ 85-4, АН УССР. Киев, 1985.
13. Seth K. K., Parker B. // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 66(19). P. 2448.
14. Ter-Akopian G. M. et al. // Phys. Lett. B. 1998. V. 426. P. 251.
15. Alzetta R., Ghirardi G. C., Rimini A. // Phys. Rev. 1963. V. 131. P. 1740.
16. Alfimov V. P. et al. // Phys. Lett. B. 1967. V. 24. P. 151.
17. Dilg W., Koester L., Nistler W. // Phys. Lett. B. 1971. V. 36. P. 208.
18. Glasgow D. W., Foster D. G. // Phys. Rev. 1967. V. 157. P. 764.
19. Mughabghab S. F. et al. Neutron Cross-Sections. N. Y.; London: Academic Press, 1984. V. 1, part B.
20. Баранов Д. С., Муромцев В. И., Самсоненко Н. В. // XLVIII совещ. по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра: Тез. Междунар. совещ., Москва, 16–19 июня 1998 г. СПб., 1998. С. 276.

Получено 18 апреля 2002 г.