

объединенный
институт
ядерных
исследований
Дубна

5814/83

415152

9/11-83

P1-83-515

В.М.Быстрицкий, Я.Возняк, А.Гула, В.П.Джелепов,
В.Г.Зинов

ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ
ПО ИССЛЕДОВАНИЮ РЕАКЦИЙ СИНТЕЗА
 $t\mu \rightarrow {}^4\text{He} + 2n + \mu^-$ и $dt\mu \rightarrow {}^4\text{He} + n + \mu^-$

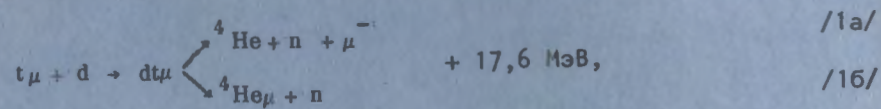
Направлено в журнал
"Acta Physica Polonica"

2 + (Nauka)

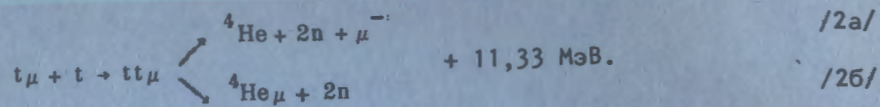
415081

1983

Интерес к изучению явления μ -катализа реакций ядерного синтеза изотопов водорода заметно возрос в последнее время в связи с теоретическими предсказаниями /1-3/ и экспериментальным обнаружением /4/ механизма резонансного образования $dt\mu$ - и $dt\mu$ -молекул. До настоящего времени выполнен только один эксперимент по измерению скорости образования $dt\mu$ -молекул /5/. Большое значение этой величины, несомненно, стимулирует дальнейшее детальное изучение этого явления в плане выяснения возможности его использования как источника ядерной энергии. Однако для определения эффективности мюонного катализа необходимо иметь полную информацию о конкурирующих каналах. Одним из каналов, уменьшающих эффективность мюонного катализа реакций ядерного синтеза



является образование $tt\mu$ -молекул с последующей реакцией синтеза в них:



Поэтому измерение характеристик реакций /1/ и /2/ является весьма актуальной задачей. Так как определение параметров мезомолекулярных процессов основано на анализе выходов и временных распределений нейтронов от реакций /1/ и /2/, необходимо знание эффективности регистрации нейтронов экспериментальной установкой*. В случае реакции /2/ под эффективностью подразумевается эффективность регистрации акта синтеза в $tt\mu$ -молекуле.

На рис.1 приведена принципиальная схема экспериментальной установки /жидкотритиевая мишень и детекторы/, предназначенной для исследований реакций /1/ и /2/. Конструкция жидкотритиевой мишени подробно описана в работе /6/. Регистрация нейтронов осуществляется с помощью трех детекторов нейтронов I-III, выполнен-

* В работе /18/ указано на возможность измерения параметров мезомолекулярных процессов /1/ и /2/ без вычисления эффективности регистрации нейтронов. Однако такой вывод справедлив только для достаточно больших скоростей синтеза ($\lambda_f \gg \lambda_{tt\mu}$) и образования $tt\mu$ -молекул ($\lambda_{tt\mu} \gg 10^6 \text{ с}^{-1}$).

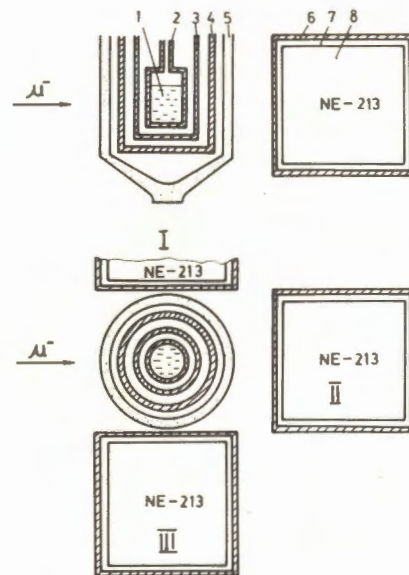


Рис.1. Схема расположения мишени и детекторов экспериментальной установки. 1 - жидкий тритий либо смесь $D_2 + T_2$; 2 - стенка мишени (Fe); 3 - стенка вакуумного кожуха (Fe); 4 - пропорциональная камера; 5 - пластиковый сцинтиллятор; 6 - стенки детекторов (Fe); 7 - кюветы из фторопласта; 8 - жидкий сцинтиллятор NE-213.

ных на основе жидкого сцинтиллятора NE-213. Для регистрации мюонов пучка и электронов от их распада вокруг мишени расположены пропорциональные проволочные камеры и цилиндрический сцинтилляционный детектор /пластический сцинтиллятор/. Мишень представляет

собой сосуд из нержавеющей стали /с $\phi 24$ мм и длиной 70 мм/, заполненный жидким тритием либо смесью $D_2 + T_2$.

Целью настоящей работы являлось вычисление эффективности регистрации нейтронов ϵ от реакций синтеза в $tt\mu$ - и $dt\mu$ -молекулах установкой, показанной на рис.1. В связи с протяженными размерами мишени и детекторов, наличием между мишенью и детекторами большого количества разнообразных веществ вычисление эффективности регистрации нейтронов производилось путем численного моделирования с помощью метода Монте-Карло /7/.

АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Алгоритм вычислений включал в себя следующие этапы:

1. Розыгрыш по объему мишени координат точек, в которых происходит реакция /1/ или /2/. Распределение точек по объему мишени полагалось однородным.
2. Розыгрыш импульсов продуктов реакций /1/ и /2/. Для этих целей была использована модифицированная версия программы FOWL /8/.
3. Моделирование взаимодействий нейтронов с веществом мишени.
4. Моделирование взаимодействий нейтронов с различными веществами, расположенными между мишенью и сцинтиллятором NE-213.
5. Моделирование взаимодействий нейтронов с NE-213.
6. Моделирование процессов перерасеяния нейтронов /нейтроны после взаимодействия со сцинтиллятором NE-213 или со стенками одного из нейтронных детекторов могут быть зарегистрированы другим детектором/.

7. Построение расчетных амплитудных распределений, полученных в результате регистрации нейтронов детекторами I-III.

При моделировании взаимодействия нейтронов со сцинтиллятором NE-213 учитывались следующие возможные процессы:

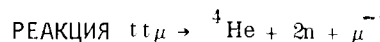
1. Упругое рассеяние нейтронов на водороде.
2. Упругое рассеяние нейтронов на ядрах углерода.
3. Неупругое рассеяние нейтронов на углероде $^{12}\text{C}(n, n' \gamma) ^{12}\text{C}$.
4. Реакции $^{12}\text{C}(n, \alpha) ^9\text{Be}$; $^{12}\text{C}(n, n') ^{12}\text{C}^*(3\alpha)$; $^{12}\text{C}(n, \alpha) ^9\text{Be}^*(n') ^8\text{Be}(2\alpha)$.

Не учитывались процессы взаимодействия γ -квантов с энергией 4,43 МэВ, возникающих в результате неупругого рассеяния нейтронов на ядрах углерода, с NE-213. Кроме того, в случае реакции /2/ не рассматривались реакции $^{12}\text{C}(n, n') ^{12}\text{C}^*(3\alpha)$ и $^{12}\text{C}(n, \alpha) ^9\text{Be}^*(n') ^8\text{Be}(2\alpha)$. Это связано с тем, что вклад от них в результирующую эффективность регистрации пренебрежимо мал.

Учитывая размеры сцинтиллятора NE-213 и значения длины свободного пробега нейтрона в нем, мы принимали в рассмотрение не более двух последовательных столкновений нейтрона с ядрами углерода и водорода /учет тройных и более последовательных взаимодействий приводит к изменению значения эффективности на величину, меньшую чем 1%. В каждом случае определялись энергия и импульсы частиц после взаимодействия, а также вычислялась амплитуда световых выходов сцинтиллятора NE-213 от протонов отдачи, ядер углерода и α -частиц. В случае двукратных взаимодействий результирующая амплитуда световых выходов представляла собой сумму амплитуд от каждого из процессов. Следует отметить, что моделирование взаимодействия нейтронов с веществом мишени ограничивалось также двукратными столкновениями /упругое рассеяние/. Для остальных веществ /стальные стенки, пластический сцинтиллятор, кюветы из тефлона для NE-213/ учитывалось только однократное взаимодействие нейтрона при прохождении через них.

В расчетах использовались усредненные значения сечений взаимодействия нейтронов с водородом, дейтерием, тритием, углеродом, железом, фторопластом /9, 10, 11, 12/. Амплитуда световых выходов от протонов отдачи, ядер углерода, α -частиц определялась на основании экспериментальных зависимостей световых выходов-энергия, приведенных в работах /13, 14, 15/.

Для окончательного определения формы амплитудного распределения для нейтронов реакций /1/ и /2/ в расчетах было использовано амплитудное разрешение нейтронных детекторов I-III, измеренное с помощью источников γ -квантов ^{60}Co , ^{137}Cs , Po-Be .



Учет взаимодействий в конечном состоянии между α -частицей и нейтронами, между двумя нейтронами приводит к трансформации энергетического и углового распределений вторичных частиц по сравнению со спектрами, определяемыми только фазовым объемом

реакции /2/. Это, в свою очередь, в принципе, должно отражаться на расчетном значении эффективности регистрации нейтронов. До настоящего времени реакция /2/ в теоретическом и экспериментальном отношении изучена недостаточно подробно, нет однозначной информации о характере взаимодействия частиц в конечном состоянии /16, 17/. С учетом этого для нахождения неопределенности расчетного значения ϵ , связанной с недостаточной информацией о виде взаимодействия в конечном состоянии, нами выполнены вычисления величины эффективности регистрации нейтронов в трех граничных предположениях.

1. Отсутствие взаимодействия в конечном состоянии /спектр вторичных частиц определяется только фазовым объемом реакции /2//.

2. Наличие только (n-n)-взаимодействия.
3. Наличие только (a-n)-взаимодействия.

Дифференциальное сечение реакции /2/, в которой из трех возникающих частиц две (i, j) сильно взаимодействуют, в упрощенном виде можно представить следующим образом:

$$d\sigma_{123} = \text{const } F_{ij}^2(k_{ij}) dR, \quad /3/$$

где dR - элемент фазового объема реакции, k_{ij} - относительный импульс частиц (i, j), а F_{ij}^2 - фактор усиления /enhancement factor/, описывающий взаимодействие частиц в конечном состоянии. В вычислениях для F_{ij}^2 используются аналитические формулы, приведенные в работе /17/.

В случае (n-n)-взаимодействия фактор F_{ij}^2 описывается функцией Йоста:

$$F_{nn}^2 = \frac{\left(\frac{r_0}{2}\right)^2 \left\{ k_{nn}^2 + \left[-\frac{1}{r_0} + \sqrt{\frac{1}{r_0^2} - \frac{2}{r_0 a_{nn}}} \right]^2 \right\}^2}{k_{nn}^2 + \left[\frac{1}{2} r_0 k_{nn}^2 - \frac{1}{a_{nn}} \right]^2}, \quad /4/$$

где $r_0 = 2,65$ фм - эффективный радиус (n-n)-взаимодействия, $a_{nn} = -17,0$ фм - длина (n-n)-рассеяния.

Для (a-n)-взаимодействий F_{ij}^2 определяется в двух приближениях, которые дают несколько отличающиеся результаты.

Функция Ватсона-Мигдала:

$$F_{an}^2 = \left[k_{an}^2 + \left(\frac{0,04599}{k_{an}^2} + 0,05553 + 0,5890 k_{an}^2 \right)^2 \right]^{-1}. \quad /5/$$

Функция Йоста:

$$F_{an}^2 = \frac{(k_{an}^2 + 0,1342)(k_{an}^2 + 3,018)}{[(k_{an} - 0,2856)^2 + 0,04113][(k_{an} + 0,2856)^2 + 0,04113]}. \quad /6/$$

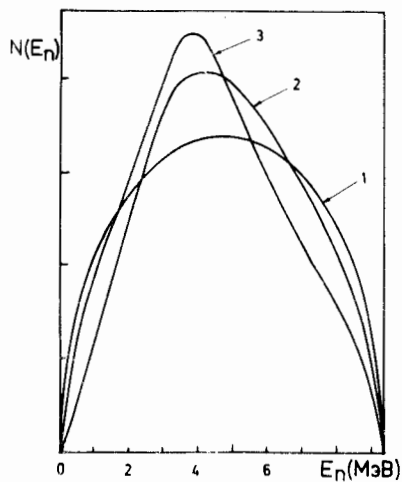


Рис.2. Энергетические спектры нейтронов, возникающих в реакции $/2/$ $/N$ - в относительных единицах/. 1 - отсутствие взаимодействия частиц в конечном состоянии; 2 - $(\alpha-n)$ - взаимодействие; 3 - $(n-n)$ -взаимодействие.

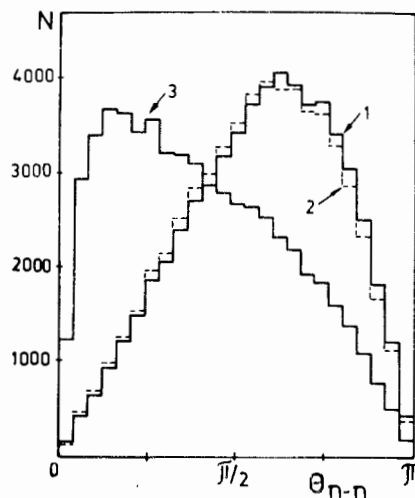
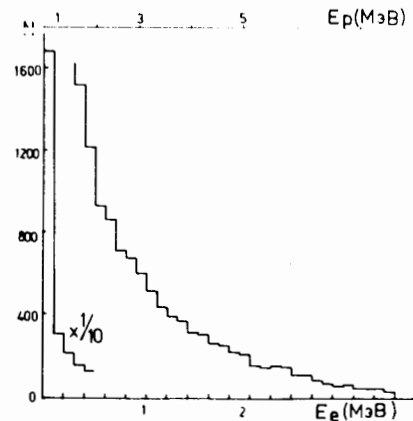


Рис.3. Угловые корреляции между нейтронами реакции $/2/$. 1 - отсутствие взаимодействия; 2 - $(\alpha-n)$ -взаимодействие; 3 - $(n-n)$ -взаимодействие.

Рис.4. Амплитудное распределение, полученное в результате регистрации нейтронов реакции $/2/$ детектором I. Значения амплитуд приведены в единицах, эквивалентных по световыходу энергии электронов E_e или протонов отдачи E_p . N - число событий на интервал амплитуды световыхода, равный 0,1 МэВ.



На рис.2 и 3 приведены начальные энергетические спектры и функции распределения угла между нейтронами для перечисленных типов взаимодействий в конечном состоянии /для $(\alpha-n)$ -взаимодействия использована формула /5//.

На рис.4 приведено амплитудное распределение, полученное в результате регистрации нейтронов реакции $/2/$ с помощью детектора I /значения амплитуды приведены в масштабе эквивалентной

по световыходу энергии электронов E_e /. Следует отметить, что из-за наличия амплитудного порога в канале регистрации нейтронов необходимо корректно учитывать случаи одновременного попадания двух нейтронов в один детектор. Это приводит к трансформации амплитудного распределения, что, в свою очередь, отражается на конечном расчетном значении эффективности регистрации.

Несомненный интерес представляет собой исследование зависимости эффективности регистрации нейтронов от величины энергетического порога регистрирующей аппаратуры для различных вариантов взаимодействий частиц в конечном состоянии. На рис.5 изображены расчетные зависимости эффективности регистрации нейтронов от порога регистрирующей аппаратуры. На рис.6 для $(n-n)$ -и $(\alpha-n)$ -взаимодействий приведены зависимости относительной эффективности регистрации нейтронов ϵ/ϵ_{ps} (ϵ_{ps} - эффективность регистрации нейтронов в случае отсутствия взаимодействия частиц в конечном состоянии) от порога регистрирующей аппаратуры. Как видно, увеличение амплитудного порога приводит к весьма заметной разнице между значениями эффективности для различных вариантов взаимодействия частиц в конечном состоянии. Такая тенденция обусловлена различием по форме как энергетических распределений нейтронов, так и распределений угла между двумя нейтронами. В связи с этим следует отметить, что исследование зависимости эффективности регистрации нейтронов от амплитудного порога может, в принципе, дать информацию о характере взаимодействия частиц в конечном состоянии.

Для определения характеристик реакции $/2/$ при обработке экспериментальных данных необходимо использовать усредненное по различным моделям взаимодействия частиц значение эффективности регистрации нейтронов. При этом "модельная" неопределенность величины эффективности для значений амплитудного порога, меньших чем 1 МэВ, не превышает 6%. Заметим, что увеличение расстояния от мишени до детекторов I-III приводит к уменьшению "модельной" неопределенности значения эффективности регистрации нейтронов.

Неопределенность расчетного значения эффективности регистрации нейтронов ϵ определяется следующими факторами:

- а/ погрешностями табличных значений сечений взаимодействий нейтронов с различными веществами;
- б/ неопределенностью зависимости "световыход-энергия" для протонов отдачи, α -частиц и ядер углерода;
- в/ неопределенностью, обусловленной неоднозначной информацией о характере взаимодействия частиц в конечном состоянии;
- г/ статистической ошибкой;
- д/ геометрической неопределенностью расположения детекторов относительно мишени;
- е/ неточностью, связанной с упрощением алгоритма моделирования.

Для оценки ошибки значения ϵ , связанной с неопределенностями а/ и б/, нами были выполнены вычисления эффективности регистра-

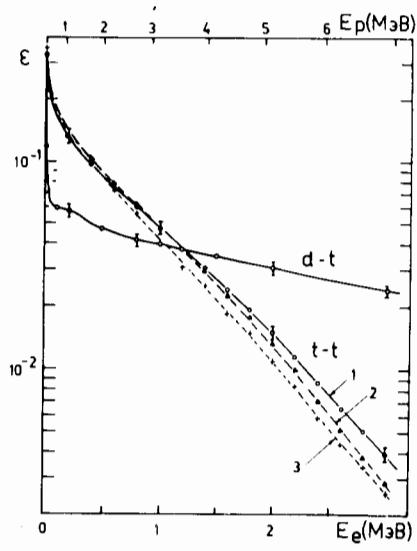


Рис.5. Зависимости вычисленной эффективности регистрации нейтронов реакций /1/ и /2/ от амплитудного порога регистрирующей аппаратуры /шкала - как на рис.4/. 1 - отсутствие взаимодействия частиц в конечном состоянии; 2 - (α-n)-взаимодействие; 3 - (n-n) -взаимодействие.

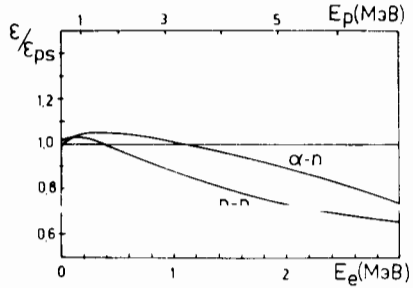
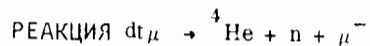


Рис.6. Зависимости относительной эффективности регистрации нейтронов реакции /2/ ϵ/ϵ_{ps} (ϵ_{ps} - эффективность в случае отсутствия взаимодействия частиц в конечном состоянии) от амплитудного порога /шкала - как на рис.4/.

ции нейтронов с измененными на два стандартных отклонения значениями сечений и световых выходов. Оказалось, что данная неопределенность лежит в пределах статистической ошибки /статистическая ошибка значения ϵ для нулевого амплитудного порога в нашем случае составляла 0,5%. Ошибка, связанная с неопределенностью расположения детекторов относительно мишени, равна 5%. Неопределенность значения ϵ , обусловленная пунктом e/ϵ , составляет $\approx 4\%$. Полная относительная ошибка величины ϵ для значений амплитудного порога меньше чем 1 МэВ не превышает 9%.



В результате реакции /1/, в отличие от реакции /2/, образуются моноэнергетические нейтроны с энергией 14,1 МэВ. Угловое распределение нейтронов изотропное. Алгоритм расчета эффективности регистрации нейтронов реакции /1/ аналогичен описанному в предыдущем разделе.

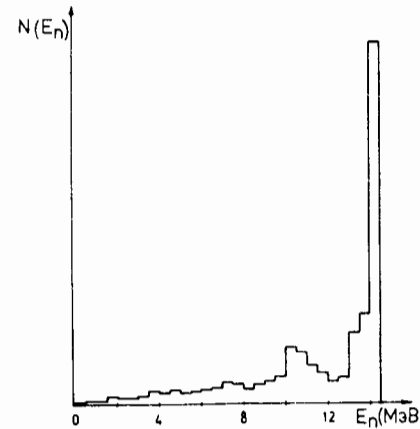
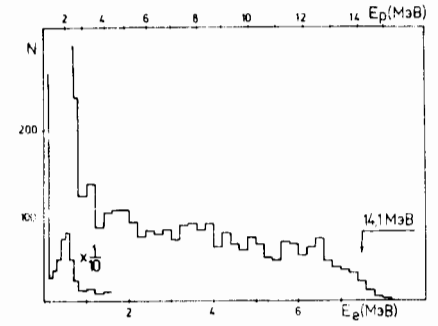


Рис.8. Амплитудное распределение для нейтронов реакции /1/ /шкала - как на рис.4/.

Рис.7. Энергетический спектр нейтронов реакции /1/, падающих на сцинтилляторы NE-213.



На рис.7 приведен энергетический спектр нейтронов, падающих на сцинтиллятор NE-213 после прохождения полного набора веществ, расположенных между мишенью и нейтронными детекторами. Пик в области энергий нейтронов $E_n \approx 10$ МэВ возникает за счет процессов неупругого рассеяния нейтронов на ядрах железа и углерода. На рис.8 изображено амплитудное распределение, полученное в результате регистрации нейтронов реакции /1/. Наличие пика в области энергий электронов $0,4 \pm 0,6$ МэВ обусловлено регистрацией α -частиц реакций ${}^{12}\text{C}(n, \alpha) {}^9\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}(n, n') {}^{12}\text{C}^*(3\alpha)$ и ${}^{12}\text{C}(n, \alpha) {}^9\text{Be}^*(n) {}^8\text{Be}(2\alpha)$.

На рис.5 приведена зависимость эффективности регистрации нейтронов реакции /1/ от энергетического порога регистрирующей аппаратуры. Вычисление неопределенности значений величины ϵ производилось так же, как и в случае реакции /2/.

В заключение следует отметить, что вычисленные с помощью метода Монте-Карло значения эффективности регистрации нейтронов реакций /1/ и /2/ позволяют определять с необходимой точностью параметры мезоатомных и мезомолекулярных процессов.

Авторы выражают благодарность Л.С.Вертоградову, М.Газдзицкому, С.Паржицкому за полезные дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Весман Э.А. Письма в ЖЭТФ, 1967, 5, с.113.
2. Gerstein S.S., Ponomarev L.I. Phys.Lett., 1977, 72B, p.80.

3. Виницкий С.И. и др. ЖЭТФ, 1978, 74, с.849.
4. Быстрицкий В.М. и др. ЖЭТФ, 1979, 76, с.460.
5. Быстрицкий В.М. и др. ЖЭТФ, 1981, 80, с.1700.
6. Быстрицкий В.М. и др. ОИЯИ, 13-82-378, Дубна, 1982.
7. Быстрицкий В.М., Вертоградов Л.С., Фильченков В.В. ОИЯИ, 1-7527, Дубна, 1973.
8. Бережнев С.Ф., Вертоградов Л.С. ОИЯИ, P11-6175, Дубна, 1971.
9. Атлас нейтронных сечений. Издание второе. Атомиздат, М., 1958.
10. Neutron Cross Sections. BNL-325 2nd Edition, Supplement No.2. (Physics-TID-4500), 1966.
11. Schmidt J.J. Neutron Cross Sections for Fast Reactor Materials, Part II: Tables KfK 120. (EANDC-E-35U, 1962.
12. Del Guerra A. Nucl.Instr. and Meth., 1976, 135, p.337.
13. Stener M.F. Nucl.Instr. and Meth., 1965, 33, p.131.
14. Pieroni N., Rusch D. Nucl.Instr. and Meth., 1974, 115, p.317.
15. Verbinski V.V. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1968, 65, p.8.
16. Kühn V. et al. Nucl.Phys., 1972, A183, p.640.
17. Larose-Poutissou R., Jeremie H. Nucl.Phys., 1974, A218, p.559.
18. Зинов В.Г., Сомов Л.Н., Фильченков В.В. ОИЯИ, P15-82-478, Дубна, 1982.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 августа 1983 года.

Быстрицкий В.М. и др. P1-83-515
Вычисление эффективности регистрации нейтронов
в экспериментах по исследованию реакций синтеза
 $tt\mu \rightarrow {}^4\text{He} + 2n + \mu^-$ и $dt\mu \rightarrow {}^4\text{He} + n + \mu^-$

Приводятся результаты расчета методом Монте-Карло эффективности регистрации нейтронов ϵ в экспериментах по исследованию реакций синтеза $tt\mu \rightarrow {}^4\text{He} + 2n + \mu^-$ и $dt\mu \rightarrow {}^4\text{He} + n + \mu^-$. Получены амплитудные распределения для нейтронов данных реакций и зависимости эффективности регистрации от амплитудного порога регистрирующей аппаратуры. В случае реакции синтеза в $tt\mu$ -молекуле вычислены значения ϵ для трех различных вариантов взаимодействия частиц в конечном состоянии.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Bystrinsky V.M. et al. P1-83-515
Calculation of Neutron Registration Efficiency
in the Experiments on the Study of Synthesis Reactions
 $tt\mu \rightarrow {}^4\text{He} + 2n + \mu^-$ and $dt\mu \rightarrow {}^4\text{He} + n + \mu^-$

Neutron registration efficiency in experiments on muon-catalysed fusion reactions $tt\mu \rightarrow {}^4\text{He} + 2n + \mu^-$ and $dt\mu \rightarrow {}^4\text{He} + n + \mu^-$ is calculated. The dependence of light output response of the detectors on energy threshold of the registration apparatus is obtained. For fusion reaction in the $tt\mu$ -molecule the values of registration efficiency are determined for several types of final-state interaction between the reaction products.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод авторов