

4. 3. 1964

С 346.3  
Д-40



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

---

В.П. Джелепов, П.Ф. Ермолов, Ю.В. Катышев, В.И. Москалев,  
В.В. Фильченков, М. Фримл

Д-1551

КАТАЛИЗ ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ МЮОНАМИ  
ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ СИНТЕЗА  $d + d \rightarrow He + n$

ЖЭТФ, 1964, т. 46, в. 6, с. 2042-2045.  
 Nuovo Cim., 1964, v. 33, n. 1, p. 40-44.

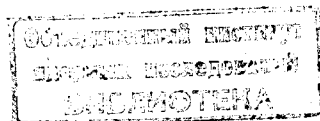
Дубна 1964

В.П. Дзепеп, П.Ф. Ермолп, Ю.В. Катшеп, В.И. Москалеп,  
В.В. Фильченков, М. Фримл

Д-1551

КАТАЛИЗ ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ МЮОНАМИ  
ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ СИНТЕЗА  $d + d \rightarrow He^3 + n$

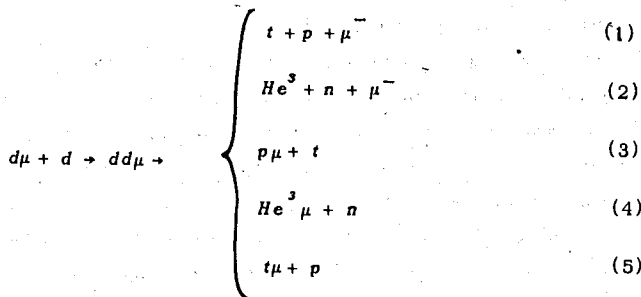
Направлено в ЖЭТФ и *Nuovo Simele*



Дубна 1964

2287/3 48

Известно, что отрицательные мюоны, останавливаясь в дейтерии, образуют  $d\mu^-$  мезоатомы, а затем в результате образования мезомолекулярных ионов  $dd\mu^-$  могут катализировать ядерные реакции синтеза<sup>x)</sup>:



В ряде экспериментальных работ<sup>/1-4/</sup> были получены сведения о выходе реакции (1).

Целью настоящей работы, продолжающей цикл исследований мезоатомных процессов в газообразном водороде<sup>/3,5/</sup>, являлось обнаружение не наблюдавшейся ранее реакции (2). Условия опыта позволяли также регистрировать реакцию (1) и получить некоторые оценки выходов реакций (3) и (4). Оценки выхода реакции (5) требуют дополнительной обработки и будут опубликованы позднее.

Как и ранее, опыт проводился с помощью диффузионной камеры диаметром 380 мм, помещенной в магнитное поле 7.000 гс.<sup>xx)</sup> Так как заряженные продукты реакций (2-4) имеют низкие энергии (несколько Мэв), давление газа в камере (94%  $D_2$  + 6%  $H_2$ ) для увеличения длины пробегов было снижено до 7,2 атм. Используемый газ был очищен от примеси трития до концентрации  $5 \cdot 10^{-14}$  атомных долей, а также от возможных примесей других газов до концентрации  $< 0,01\%$ . В качестве рабочей жидкости применялся нормальный пропиловый спирт  $C_3H_7OH$ , который обеспечивал суммарную концентрацию атомов углерода и кислорода в чувствительном объеме камеры менее 0,1%.

При двукратном просмотре 33800 стереофотографий было найдено 3330 остановок отрицательных мюонов. При этом был зарегистрирован 21 случай реакции (1). Случаи этой реакции легко идентифицировались по пробегам тритона и протона,

<sup>x)</sup> Вероятность этих реакций без промежуточной стадии образования мезомолекулярного иона  $dd\mu^-$  согласно<sup>/6/</sup> должна быть существенно меньше.

<sup>xx)</sup> 0,7 тесла.

а также по углу разлета  $t$  и  $p$ , который с точностью до ошибок измерения был равен  $180^\circ$  <sup>x)</sup>. Только в 5 случаях реакции (1) из точки, где произошла ядерная реакция, выходил четкий след электрона распада. Это связано с тем, что из-за низкой плотности паров пропилового спирта эффективность регистрации электронов от распада мюонов в этом опыте составляла лишь 33%.

Ввиду относительно низкой эффективности регистрации электронов случаи реакций (2-4) могут часто иметь только след одной вторичной заряженной частицы и, следовательно, выглядеть так же, как однолучевые звезды от захвата мюона ядрами С или О. Поэтому для выделения интересующих нас случаев двухчастичных реакций (2-4), имеющих строго определенный пробег заряженных частиц, было построено распределение однолучевых звезд по пробегам вторичных частиц (рис. 1а). В распределении использовались только те случаи, у которых длина проекции следа вторичной частицы была больше 1 мм, а угол между направлением следа мюона в точке останова и следом вторичной частицы заключен в пределах  $20 - 160^\circ$ . В распределение внесены также 4 случая, у которых, кроме следа тяжелой вторичной частицы, наблюдается и след электрона распада.

Для учета фона однолучевых звезд от захвата мюонов ядрами С и О были использованы данные другого опыта, когда камера наполнялась водородом до давления 5 атм и число остановок мюонов было таким же, как и в настоящем опыте (с дейтерием). На рис. 1б приведено распределение по пробегам вторичных частиц, пересчитанным к давлению 7,2 атм, в однолучевых звездах в опыте с водородом. Поскольку полные числа звезд с видимыми лучами от захвата мюонов ядрами в обоих опытах близки друг к другу (21 и 17 в опытах с  $D_2$  и  $H_2$  соответственно <sup>xx)</sup>, то для учета фона можно воспользоваться процедурой вычитания распределений (1б) из распределения (1а). Полученное таким образом распределение по пробегам показано на рис. 1в. Стрелками здесь указаны расчетные значения пробегов  $He^3$  для реакции (2),  $(He^3\mu)^+$  для реакции (4) и  $t$  для реакции (3). Из рис. 1в видно, что с учетом экспериментального разрешения линия  $He^3$  20 случаев с пробегом вторичной тяжелой частицы около 2,5 мм могут быть отнесены к реакции (2). В это число входят и упомянутые выше 4 случая с электроном распада. Для иллюстрации фотографии одного такого случая реакции  $d + d \rightarrow He^3 + n$ , катализированной мюоном, приведена на рис. 2.

x) Из-за относительно слабой связи мюона в системе  $dd\mu$  почти вся энергия реакции распределяется между тяжелыми частицами  $t$  и  $p$  (или  $He^3$  и  $n$  в реакции (2)) и поэтому обе эти реакции могут рассматриваться с большой точностью как двухчастичные.

xx) В эти числа звезд входят наряду с многолучевыми только те однолучевые звезды, у которых пробег вторичной частицы превышает 8 мм.

Отношение выходов реакций (1) и (2) после внесения поправки на эффективность регистрации случаев реакции (2) составляет, как и ожидалось, величину, близкую к единице:

$$\frac{w(dd\mu \rightarrow He^3 + n + \mu^-)}{w(dd\mu \rightarrow t + p + \mu^-)} = 1,20 \pm 0,37.$$

В мезомолекуле  $dd\mu$  реакции (1) и (2) идут при малых энергиях, и наблюдаемое отношение выходов находится в согласии с данными по относительному выходу реакций  $D(d, n)He^3$  и  $D(d, p)H^3$ , полученными на ускорительных трубках при минимальных исследованных энергиях дейтронов  $\sim 4-20$  кэВ <sup>/7/</sup>.

На основании экспериментального распределения по пробегам можно оценить также верхние пределы для выходов реакций (3) и (4). Считая, что число случаев для каждой из этих реакций не превышает единицы, как это видно из рис. 1в, с 90%-вероятностью можно установить:

$$\frac{w(dd\mu \rightarrow He^3\mu + n)}{w(dd\mu \rightarrow He^3 + n + \mu^-)} < 0,13,$$

$$\frac{w(dd\mu \rightarrow p\mu + t)}{w(dd\mu \rightarrow t + p + \mu^-)} < 0,13.$$

Теоретические оценки <sup>/6,8/</sup> дают для этих отношений соответственно  $\sim 0,13$  и  $\sim 0,01$ .

Следует отметить, что выход реакции (1), определенный в настоящей работе с учетом вероятности перехода мюона от дейтронов к сложным ядрам, составляющей 35%, согласуется с найденным нами ранее выходом этой реакции при давлении дейтерия в камере 18 атм <sup>/3/</sup>. Однако выходы реакций (1) и (2) в наших экспериментах примерно на порядок выше, чем те, которых можно ожидать на основании данных о выходе реакции (1) в жидком дейтерии <sup>/2,4/</sup> (в предположении 100% вероятности ядерной реакции в мезомолекуле  $dd\mu$ ). Пока мы не нашли удовлетворительного объяснения этого различия.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить С.С.Герштейна за полезные обсуждения и интерес к работе.

Л и т е р а т у р а

1. L.W. Alvarez, H. Bradner, F.S. Crawford, J.A. Crawford, P. Falk-Vairant, M.L. Good, J.D. Gow, A.H. Rosenfeld, F. Solmitz, M.C. Stevenson, H.K. Ticho and R.D. Tripp. Phys. Rev., 105, 1127 (1957).
2. J.D. Felkovich, T.H. Fields, G.B. Yodh, and M. Derrick. Phys. Rev. Lett., 4, 570 (1960).
3. V.P. Dzheleпов, M. Friml, S.S. Gershtein, Yu.V. Katyshev, V.I. Moskalev, P.F. Yermilov. Proceedings of the 1962 International Conf. on High-Energy Physics at CERN (CERN Scientific Information Service, Geneva, 1962), p. 484; В.П. Дзелепов. Атомная энергия, 14, вып. 1, 27 (1963).
4. J.H. Doede. Phys. Rev., 132, 1782 (1963).
5. В.П. Дзелепов, П.Ф. Ермолов, Е.А. Кушниренко, В.И. Москалев, С.С. Герштейн. ЖЭТФ, 42, 439 (1962).
6. Я.Б. Зельдович, С.С. Герштейн. УФН, 71, 581 (1980).
7. В.А. Давиденко, А.М. Кучер, И.С. Погребов, Ю.Ф. Тутуров. Ядерные реакции на легких ядрах. Атомиздат, М., 1957; W.R. Arnold, J.A. Phillips, G.A. Sawyer, E.J. Stovall, Jr., and J.L. Tuck. Phys. Rev., 93, 483 (1954); A. von Engel and C.C. Goodyear. Proc. Roy. Soc., A 264, 445 (1961).
8. J.D. Jackson. Phys. Rev., 106, 330 (1957).

Рукопись поступила в издательский отдел  
29 января 1984 г.

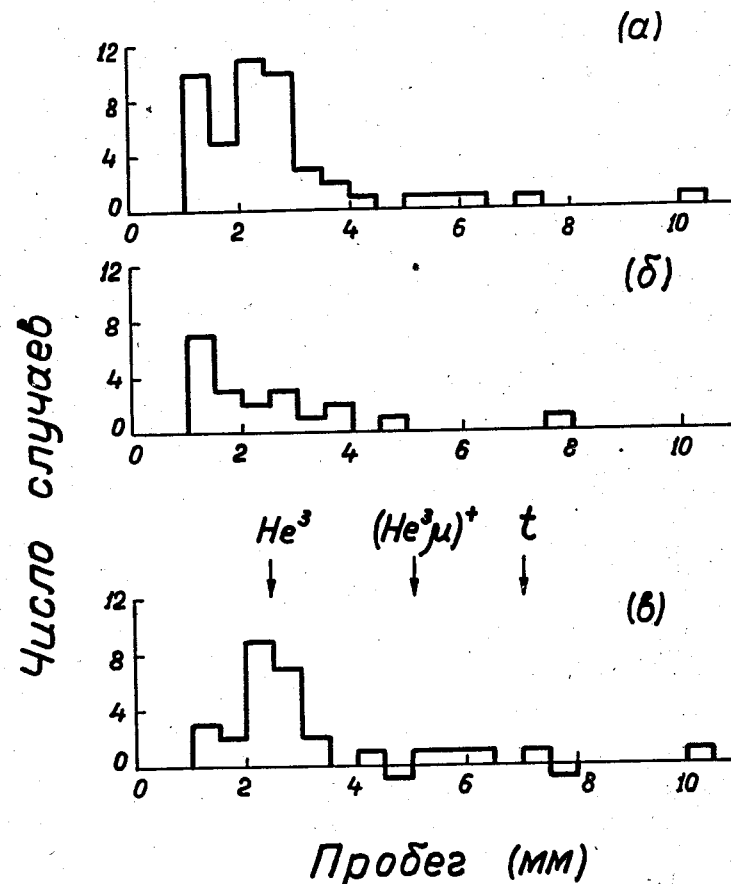


Рис. 1.

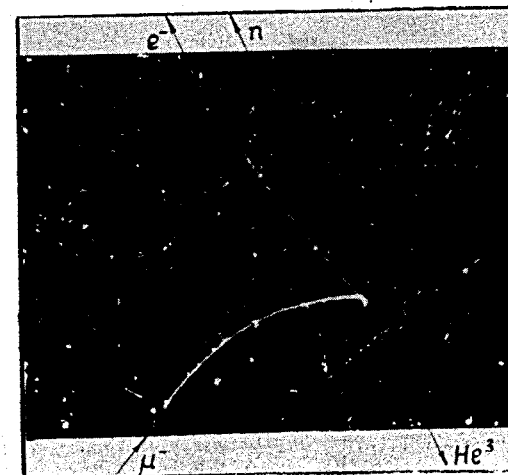


Рис. 2.