

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



С 346.36

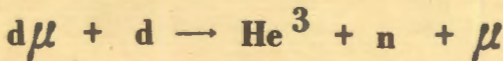
Б-955

4041/273

P1 - 7342

В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, К.О.Оганесян,
М.Н.Омельяненко, С.Ю.Пороховой,
А.И.Руденко, В.В.Фильченков

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ СИНТЕЗА



В ГАЗООБРАЗНОМ ДЕЙТЕРИИ

1973

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

Быстрицкий В.М., Джелепов В.П., Оганесян К.О., Р1 - 7342
Омельяненко М.Н., Пороховой С.Ю., Руденко А.И.,
Фильченков В.В.

Исследование реакции синтеза $d\mu + d \rightarrow He^3 + n + \mu$
в газообразном дейтерии

В опытах с газовой мишенью, заполнявшейся сверхчистым дей-
терием до давления 41 атм, на мюонном пучке синхротрона ОИЯИ
измерены выход и временное распределение нейтронов из реакции
синтеза в мезомолекуле $dd\mu$. На основании этих данных получены
значения скорости $\lambda_{dd\mu}$ образования мезомолекулы $dd\mu$ при $T = 300^\circ K$
и скорости λ_f ядерной реакции в этой мезомолекуле. Найденное
значение $\lambda_{dd\mu} = (0,73 \pm 0,07) \cdot 10^6 \text{ сек}^{-1}$ вместе с нашими ранними
данными для $T = 240^\circ K$ подтверждает существование резонансного
по энергии $d\mu$ -атома механизма образования молекулы $dd\mu$.

Препринт Объединенного института ядерных исследований.
Дубна, 1973

Bystritsky V.M., Dzheleпов V.P., R1 - 7342
Oganesyаn K.O., Omelianenko M.N.,
Porokhovoy S.Yu., Rudenko A.I.,
Filchenkov V.V.

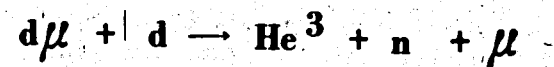
Investigation of the Synthesis Reaction
 $d\mu + d \rightarrow He^3 + n + \mu$ in Gaseous Deuterium

See the Summary on the reverse side of the title page.

P1 - 7342

В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, К.О.Оганесян,
М.Н.Омельяненко, С.Ю.Пороховой,
А.И.Руденко, В.В.Фильченков

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ СИНТЕЗА



В ГАЗООБРАЗНОМ ДЕЙТЕРИИ

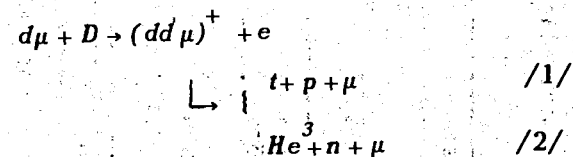
Направлено в ЖЭТО

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

S u m m a r y

The experiments performed with a gas target filled with superpurified deuterium (relative amount of admixtures with $Z > 1$ is not larger than 10^{-8}) at 41 atm and by using the muon beam from the 680 MeV synchrocyclotron JINR allowed the measurement of the yields and the time distribution of neutrons from the fusion reaction in the $dd\mu$ mesic molecule. The analysis of this distribution (851 events) made it possible to obtain the values of the $\lambda_{dd\mu}$ formation rate of the $dd\mu$ molecule in gaseous deuterium with $T = 300^\circ\text{K}$ and the λ_f nuclear reaction rate in this mesic molecule. The obtained value $\lambda_{dd\mu} = (0.73 \pm 0.07) \times 10^6 \text{ sec}^{-1}$ together with our earlier data for $T = 240^\circ$ (obtained by using a diffusion chamber) confirms the existence of the resonance mechanism of the $dd\mu$ molecule formation on the $d\mu$ -atom energy. The first new data have been obtained on λ_f . The experimental value $\lambda_f > 1.8 \times 10^6 \text{ sec}^{-1}$ (with a 90% confidence) agrees with theoretical data.

Ядерные реакции синтеза в мезомолекуле дейтерия



изучались различными группами авторов ¹⁻⁴. При этом реакция /2/ была впервые зарегистрирована нами в опытах с диффузионной камерой ³. Результаты, полученные в работах ¹⁻⁴ для скорости $\lambda_{dd\mu}$ образования системы $(dd\mu)^+$, приведены в таблице 1. Эти данные подробно обсуждались нами в работе ⁴, где, в частности, для объяснения столь резкого различия в значениях $\lambda_{dd\mu}$, измеренных в разных экспериментальных условиях /жидкий дейтерий в работах ^{1,2} и газообразный дейтерий в наших опытах ^{3,4}/, привлекалось предположение о существовании резонансного по энергии $d\mu$ -атома механизма образования системы $(dd\mu)^+$.

В таблице 1 приведены также расчетные значения $\lambda_{dd\mu}$. В работах ⁵ вычисления проводились для механизма образования $(dd\mu)^+$ путем электрического дипольного перехода $E1$ с отдачей энергии связи электрону. Как видно из данных таблицы 1, интерпретация экспериментальных данных ⁴, основанная на этих расчетах, крайне неудовлетворительна.

Таблица 1

Экспериментальные и теоретические значения для скорости образования мезомолекул дейтерия (приведенные к плотности жидкого дейтерия) в единицах 10^6сек^{-1}

Экспериментальные результаты		Расчетные значения	
0,072±0,014	0,75±0,11	0,09 для условий опытов/1,2/	0,85 для условий опытов/3,4/
0,098±0,001	0,73±0,07		
работа: 1	2	4	5
	настоящая работа		6

Таблица 2

Данные измерений выхода нейтронов в экспозициях с дейтерием

Число мюонных остановок $N_{\mu} \times 10^6$	Число зарегистрированных нейтронов N_n	Исправленное число нейтронов событий N_n	Экспериментальный выход нейтронов $\eta \times 10^4$	Эффективный выход нейтронов $\epsilon_n \times 10^2$	Абсолютный выход нейтронов $\eta_n^0 \times 10^2$
3,12±0,10	1148±34	918±61	2,942±0,195	1,43±0,088	2,06±0,18

В работах ^{16/} величина $\lambda_{dd\mu}$ вычислена для механизма образования $(dd\mu)^+$ во вращательном состоянии с моментом $K=1$, когда энергия связи передается на возбуждение колебательных уровней системы, состоящей из $d\mu$ -атома и молекулы дейтерия. Такой механизм должен быть связан с существованием в системе $(dd\mu)^+$ уровня с энергией связи в несколько эв и оказывается резонансным по энергии $d\mu$ -атома. Высказанное в ^{16/} предположение о существовании в $(dd\mu)^+$ возбужденного вращательно-колебательного уровня с малой энергией связи подтверждается расчетами ^{17/}, где для энергии связи этого уровня получено значение 2 эв. Как видно из таблицы 1, вычисления, выполненные в работах ^{16/}, вполне удовлетворительно объясняют всю совокупность экспериментальных данных.

Настоящая работа ставила своей целью с помощью электронной методики в условиях, близких к нашим ранним опытам с камерой ^{13,4/}, осуществить проверку существования резонансного механизма образования мезомолекулы $(dd\mu)^+$ и дополнительно получить непосредственную информацию о скорости λ_f ядерной реакции в этой молекуле на основе измерения временного распределения нейтронов от реакции ^{12/}. Напомним, что прежние данные ^{11-4/} были получены лишь на основе измерения интегральных выходов реакций ^{1/} или ^{2/} в предположении о том, что $\lambda_f \gg \lambda_0$, где $\lambda_0 = 4,55 \cdot 10^5 \text{сек}^{-1}$ - скорость распада свободного мюона.

Работа выполнена на пучке мюонов синхроциклотрона ОИЯИ с применением газовой водородной мишени. Мишень заполнялась сверхчистым дейтерием до давления 41 атм /плотность дейтонов $\rho_D = 2,13 \cdot 10^{21} \text{см}^{-3}$. Относительное содержание в дейтерии примесей с $Z>1$ составляло не более чем 10^{-8} .

Выделение остановок мюонов в газе осуществлялось с помощью сцинтилляторов, расположенных внутри мишени. Нейтроны детектировались расположенными вокруг мишени сцинтилляционными счетчиками с кристаллами стибьбена. Регистрация нейтронов осуществлялась в задержанные временные "ворота", запускаемые сигналом остановки мюона. Аппаратура и электронная логика пол-

ностью аналогичны описанным в нашей работе^{/8/} / μ -захват в водороде/, за исключением следующих особенностей:

1. Ввиду того, что энергия нейтронов в реакции /2/ составляет 2,5 Мэв, т.е. примерно в два раза меньше, чем в реакции захвата мюона протоном, энергетический диапазон регистрации протонов отдачи был смещен в сторону меньших энергий и составлял от 1,6 до 4,6 Мэв, или от 0,3 до 1,5 Мэв в масштабе эквивалентной /по световыходу/ энергии электрона.

2. Была изменена логика включения антисовпадений с электронами распада. В работе^{/8/} в "нейтронных" экспозициях требовалось отсутствие обусловленных электронами импульсов счетчика 5 в большом интервале времени /10 мксек/. Осуществление этого требования в настоящей работе привело бы к существенному подавлению нейтронов из реакции /2/. Поэтому блокировка "электронных" запусков в "нейтронных" экспозициях осуществлялась совпадениями (5,n) с разрешающим временем не более 0,3 мксек. Очевидно, что такая блокировка служит лишь для уменьшения загрузки нейтронных счетчиков и практически не влияет на число запусков. Потери в эффективности регистрации нейтронов, связанные с этой блокировкой, составляли $4 \pm 2\%$.

Процедуры измерений и обработки событий полностью совпадают с описанными нами в работе^{/8/}. Все измерения заняли около 40 часов. Так же, как и в^{/8/}; "нейтронные" экспозиции чередовались с "электронными", периодически проводились калибровочные измерения с помощью γ -источников. Фон случайных совпадений определялся в экспозициях с вакуумированной мишенью, его относительный вклад оказался равным $\sim 10\%$.

На рис. 1 представлено распределение, характеризующее разделение нейтронов и γ -квантов /оно получено с использованием различия формы светового импульса в стильбене для протонов и электронов^{/8,9/}/. Это распределение приводится для одного из нейтронных детекторов в экспозициях с дейтерием.

Полное число мюонных остановок N_μ для "нейтронных" экспозиций с дейтерием приводится в первой ко-

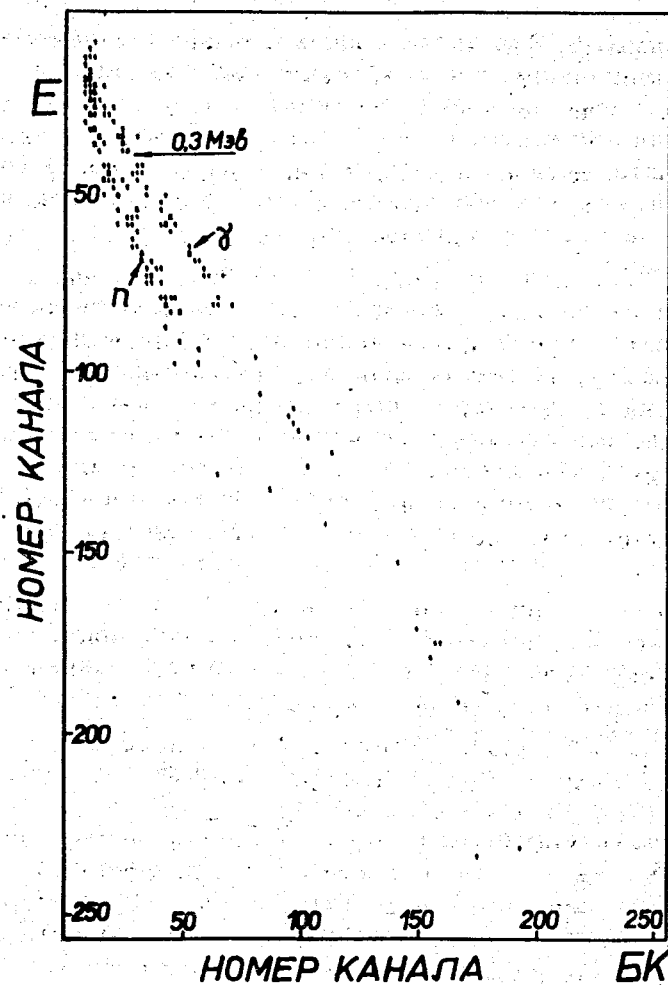


Рис. 1. Распределение, характеризующее разделение нейтронов и γ -квантов, измеренное в "нейтронных" экспозициях с дейтерием для одного из детекторов. Распределение получено с помощью многоканального амплитудного анализатора и ЭВМ Минск-22. По оси абсцисс отложен номер канала для амплитуды сигнала, пропорционального "быстрой компоненте" /БК/ светового импульса в стильбене. По оси ординат - номер канала для амплитуды сигнала, пропорционального полной площади светового импульса или энергии (E).

лонке таблицы 2. Это число найдено, исходя из измеренного в "электронных" экспозициях выхода электронов и рассчитанного на ЭВМ значения эффективности ϵ_e регистрации электронов. Точность величины N_μ определяется статистической точностью измерений выхода электронов, некоторой неопределенностью в расчете значения ϵ_e , а также неточностью значения положения порога в амплитудном спектре электронов.

Полное число (N_n) событий, зарегистрированных в "нейтронных" экспозициях, приводится во второй колонке таблицы 2. В следующей колонке помещено число (\bar{N}_n) событий за вычетом фона и исправленное с учетом параметров разделения нейтронов и γ -квантов. Для определения фона от диффузии $d\mu$ -атомов, а также от фотоядерных реакций в стильбене использовались данные работы /8/. При этом оказалось, что для опытов с дейтерием суммарный уровень этого фона составляет примерно 1%.

На рис. 2 приведено амплитудное распределение протонов отдачи для зарегистрированных нейтронных событий. Распределение дано за вычетом нормированного фона случайных совпадений.

В четвертой колонке таблицы 2 приводится значение экспериментального выхода нейтронов $\eta_n = \bar{N}_n / N_\mu$. Чтобы получить абсолютный выход $\eta_n^0 = \eta_n / \epsilon_n$, необходимо знать эффективность ϵ_n регистрации нейтронов из реакции /2/. Так же, как и в работе /8/, эта эффективность определялась с помощью расчетов методом Монте-Карло на ЭВМ, в ходе которых определялся также вид амплитудного распределения для нейтронов из реакции /2/. Как видно из рисунка 2, наблюдается хорошее согласие между расчетами и экспериментом.

Рассчитанное на ЭВМ значение ϵ_n для энергетического порога 0,3 Мэв и значение абсолютного выхода η_n^0 приводятся в двух последних колонках таблицы 2. Следует указать, что приведенное значение ϵ_n не включает фактора временных "ворот", поэтому величина η_n^0 относится к интервалу времени (T_1, T_2), определяемому положением этих "ворот".

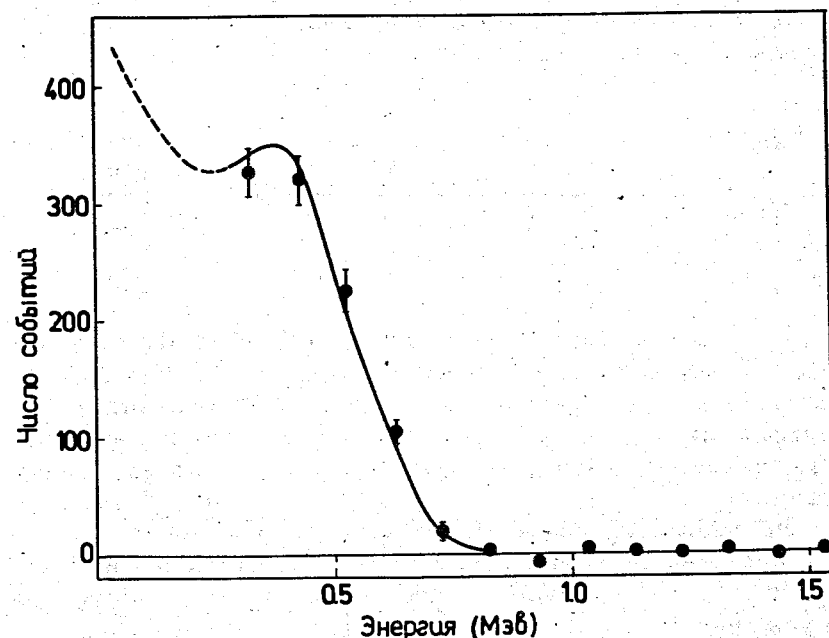


Рис. 2. Экспериментальное амплитудное распределение. По оси абсцисс отложена энергия протонов отдачи /в масштабе эквивалентной энергии электронов/, по оси ординат - число событий в интервале 0,06 Мэв. Линией показана зависимость, рассчитанная на ЭВМ.

Величина η_n^0 связана с $\lambda_{dd\mu}$ соотношением

$$\eta_n^0 = \int_{T_1}^{T_2} f(\lambda_{dd\mu}, \lambda_f; t) dt, \quad /3/$$

где $f(\lambda_{dd\mu}, \lambda_f; t)$ - нормированная функция временного распределения нейтронов из реакции /2/. Эта функция описывается следующим образом:

$$f(\lambda_{dd\mu}, \lambda_f; t) = \frac{\frac{1}{2} \lambda_{dd\mu} \lambda_f}{\lambda_f - \lambda_{dd\mu}} \frac{e^{-(\lambda_0 + \lambda_{dd\mu})t} - e^{-(\lambda_0 + \lambda_f)t}}{\lambda_f - \lambda_{dd\mu}} \left(1 + \frac{\lambda_{dd\mu} \lambda_f t}{\lambda_f - \lambda_{dd\mu}}\right), \quad /4/$$

В этом выражении множитель 1/2 учитывает вклад реакции /1/ в процесс гибели системы $(dd\mu)^+$. При выводе выражения /4/ учитывалась только однократная регенерация мюонов в реакциях /1/ и /2/ и пренебрегалось образованием связанных систем $p\mu$, $t\mu$ или $He^3\mu$ в этих реакциях.

Экспериментальное временное распределение нейтронов приводится на рис. 3. С целью определения величин $\lambda_{dd\mu}$ и λ_f это распределение фитировалось с помощью выражения

$$\frac{dN_n}{dt} = A f(\lambda_{dd\mu}, \lambda_f; t) + C, \quad /5/$$

где $f(\lambda_{dd\mu}, \lambda_f; t)$ соответствует зависимости /4/, C - экспериментально найденный уровень случайных совпадений. При анализе временного распределения использовались значения числа мюонных остановок (N_μ) и абсолютного выхода (η_n^0), приведенные в таблице 2, а также найденный нами уровень фона случайных совпадений. Нормированное значение этого фона составляло 32 ± 13 /мксек, что соответствует отношению фона к эффекту 8% для первого интервала временного распределения.

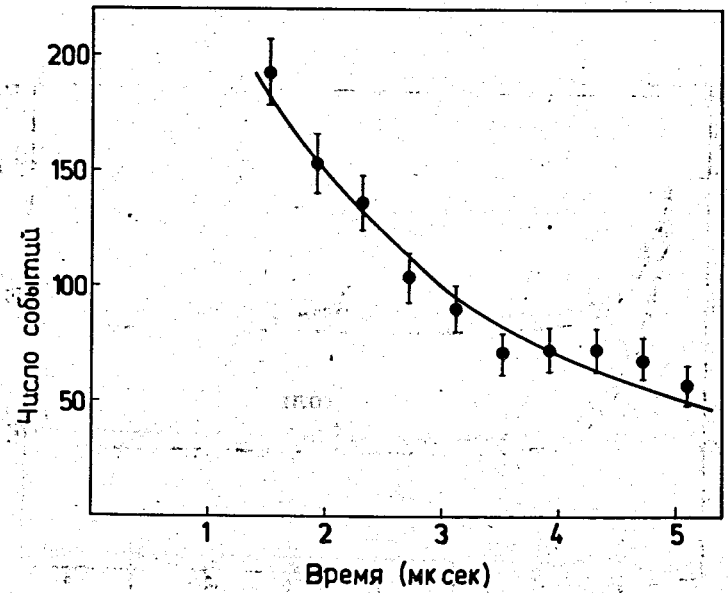


Рис. 3. Временное распределение нейтронов, измеренное в "нейтронных" экспозициях с дейтерием. По оси абсцисс отложено время относительно момента остановки мюона; по оси ординат - число событий в интервале 0,5 мксек. Линия соответствует зависимости /4/ с найденным значением /6/ для $\lambda_{dd\mu}$.

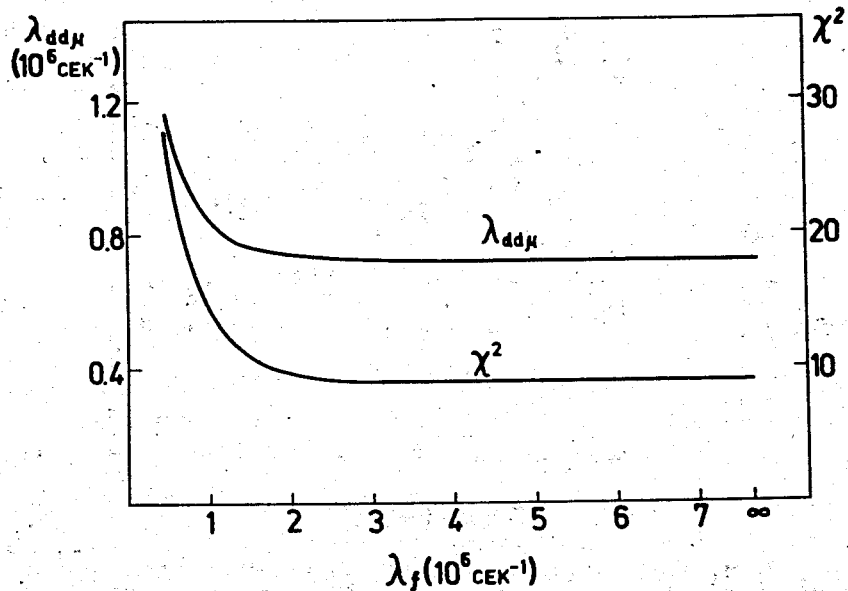


Рис. 4. Результаты χ^2 -анализа временного распределения нейтронов. По оси абсцисс отложено значение скорости λ_f реакции в $(dd\mu)^+$. По оси ординат - значения скорости $\lambda_{dd\mu}$ образования $(dd\mu)^+$ и величины χ^2 . Зависимости построены на основе данных выполненной на ЭВМ оптимизации параметров λ_f и $\lambda_{dd\mu}$ в выражении /4/ при сравнении его с экспериментальным распределением.

Результаты χ^2 -анализа представлены на рис. 4. Как можно видеть, оптимальное значение $\lambda_{dd\mu}^{-1}$ не зависит от значения λ_f при $\lambda_f > 2 \cdot 10^6 \text{сек}^{-1}$, что обусловлено видом зависимости /4/. На 90% уровне достоверности

$$\lambda_f > 1,8 \cdot 10^6 \text{сек}^{-1},$$

что согласуется с предсказаниями теории /5,10,11/.

Для скорости образования системы $(dd\mu)^+$ получено значение

$$\lambda_{dd\mu} = /0,73 \pm 0,07/ \cdot 10^6 \text{сек}^{-1} \quad /6/$$

/в пересчете к плотности жидкого дейтерия/ оно приводится в таблице 1.

На рис. 3 сплошная линия соответствует зависимости /4/ с найденными значениями $\lambda_{dd\mu}$ и λ_f . Как видно из рисунка, согласие этой зависимости с экспериментом вполне удовлетворительное.

Внесение поправок, учитывающих более чем однократную регенерацию мюонов, а также экспериментально найденные в /4/ вероятности образования систем $t\mu$, $p\mu$ или $He^3\mu$, крайне незначительно /примерно на 1%/ изменяет результат. Как видно из данных таблицы 1, найденное нами значение $\lambda_{dd\mu}$ хорошо согласуется с нашими прежними измерениями /3,4/ и подтверждает существование механизма образования $(dd\mu)^+$, который был предположен в работе /6/.

Авторы благодарны С.С.Герштейну, П.Ф.Ермолову и Л.И.Пономареву за обсуждение результатов работы, С.В.Медведю и Е.Б.Озерову за обеспечение бесперебойной работы измерительного центра и ЭВМ, М.М.Кузнецову и Ш.Г.Шамсутдинову - за помощь в измерениях.

Литература

1. J.Fetkovich, T.Fields, G.Yodh, M.Derrick. Phys.Rev.Lett., 4, 570 (1960).
2. J.Doede. Phys.Rev., 132, 1782 (1963).

3. В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, Ю.В.Капышев, В.И.Москалев, В.В.Фильченков, М.Фримл. ЖЭТФ, 46, 2042 /1964/.
Nuovo Cim., 33, 40 (1964).
4. В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, В.И.Москалев, В.В.Фильченков. ЖЭТФ, 50, 1235 /1966/.
5. Я.Б.Зельдович, С.С.Герштейн. УФН, 71, 581 /1960/.
S.Cohen, D.Judd, R.Riddell. Phys.Rev., 119, 397 (1960).
6. Э.А.Весман. Препринт ОИЯИ, Р4-3256, Дубна, 1967.
Э.А.Весман. Письма в ЖЭТФ, 5, 113 /1967/.
7. Л.И.Пономарев, И.В.Пузынин, Т.П.Пузынина. Препринт ОИЯИ, Р4-6919, Дубна, 1973.
8. В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, К.О.Оганесян, М.Н.Омельяненко, С.Ю.Пороховой, В.С.Роганов, А.И.Руденко, В.В.Фильченков. Препринт ОИЯИ, Р1-7300, Дубна, 1973.
9. В.М.Быстрицкий, В.П.Джелепов, П.Ф.Ермолов, К.О.Оганесян, М.Н.Омельяненко, С.Ю.Пороховой, В.В.Фильченков. ПТЭ, 1, 65 /1972/.
10. J.Jackson. *Phys.Rev.*, 106, 330 (1957).
11. Э.А.Весман. Препринт ОИЯИ Р4-3384, Дубна, 1967.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 июля 1973 года.