

M-221

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1 - 8498

МАМЕДОВ
Таир Наги оглы

СПЕКТРЫ НЕЙТРОНОВ ИЗ РЕАКЦИИ МЮ-ЗАХВАТА
И ФОТОВОЗБУЖДЕНИЯ В ТЯЖЕЛЫХ ЯДРАХ

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1974

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований .

Научный руководитель : кандидат физико-математических
наук В.С.Евсеев.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Д.Ф.Зарецкий,
доктор физико-математических наук А.О.Вайсенберг.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Научно-исследовательский институт ядерной физики при
Московском государственном университете им. М.В.Ломоносова

Автореферат разослан " " _____ 1975 г.

Защита диссертации состоится " " _____ 1975 г.

в _____ час. на заседании Ученого совета Лаборатории
ядерных проблем Объединенного института ядерных иссле-
дований, г. Дубна, Московской области, Лаборатория
ядерных проблем ОИЯИ, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

В.А. Батусов

1 - 8498

МАМЕДОВ
Таир Наги оглы

СПЕКТРЫ НЕЙТРОНОВ ИЗ РЕАКЦИИ МЮ-ЗАХВАТА
И ФОТОВОЗБУЖДЕНИЯ В ТЯЖЕЛЫХ ЯДРАХ

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

В настоящее время установлено, что квазистационарные коллективные состояния ядра возбуждаются не только при фотопоглощении, но также в целом ряде других реакций, как, например, при поглощении отрицательных мю-мезонов ядрами, радиационном π^- -захвате и т.д.

Теория коллективного возбуждения ядра при мю-захвате была сформулирована в работах /1,2/. Авторам /1,2/ удалось вычислить значения вероятности мю-захвата в легких ядрах, которые хорошо согласовались с экспериментальными данными. В работе /2/ была установлена количественная связь между вероятностью захвата мю-мезонов ядрами и сечением гигантского дипольного резонанса при фотопоглощении. Другой успех теории коллективного возбуждения ядра при мю-захвате состоит в том, что линейчатая структура спектров нейтронов из мю-захвата в легких ядрах, предсказанная на ее основе с учетом резонансного механизма испускания нейтронов /1/, подтвердилась экспериментальными исследованиями /3/. Линейчатая структура обнаружена и в спектрах фотонейтронов из легких ядер. Исследования спектров нейтронов из мю-захвата в свинце или же в ядрах, отличающихся от ядер свинца зарядом на одну единицу, показали, что в случае тяжелых ядер линейчатая структура не обнаруживается и спектры становятся похожими на испарительные.

Настоящая диссертация посвящена систематическому изучению спектров нейтронов из реакции мю-захвата и фотопоглощения в тяжелых ядрах с целью исследования механизма распада квазистационарных состояний. Результаты исследований были

опубликованы в статьях и препринтах /4-8/, докладывались на Международной конференции по физике высоких энергий и структуре ядра в Уппсала (Швеция, 1973 г.), на Международной конференции по фотоядерным реакциям в Асиламоре (США, 1973 г.) и на сессиях отделения ядерной физики АН СССР в 1973 и 1974 гг.

Диссертация состоит из введения и четырех глав.

Во Введении кратко изложены основные достижения теоретических и экспериментальных исследований процесса ядерного мю-захвата и фотовозбуждения ядер. Сформулирована задача диссертации.

Первая глава представляет собой обзор литературных данных по исследованию спектров и множественности нейтронов из реакции мю-захвата и спектров нейтронов, возникающих при фотовозбуждении ядер. Показано последовательное развитие идеи коллективных возбуждений при фотопоглощении и в ядерном мю-захвате. Приведены результаты исследований выхода заряженных частиц и основные выводы работ по асимметрии нейтронов из реакции мю-захвата.

Вторая глава посвящена описанию методической части работы: обоснованию выбора детектора нейтронов, исследованию его основных характеристик, способу обработки аппаратурных спектров и методике определения абсолютного выхода нейтронов из реакции мю-захвата. Характеристики детектора нейтронов определялись с помощью монохроматических нейтронов с энергией $E_n \approx 3,1$ МэВ и $E_n \approx 14,1$ МэВ, источника нейтронов $Po-Be$ и спектрометрических источников γ -квантов ^{22}Na , ^{24}Na , ^{56}Mn , ^{88}Y и ^{137}Cs . Приводятся основные параметры

детектора нейтронов, полученные на базе этих исследований. Экспериментально, путем определения потока нейтронов, падающих на детектор, при исследовании с монохроматическими нейтронами было получено значение эффективности регистрации нейтронов при энергии $E_n \approx 3,1$ МэВ.

В третьей главе описаны блок-схема установки электроники, условия проведения экспериментов при измерении спектров нейтронов и при измерении выхода нейтронов из реакции мю-захвата. Расположение аппаратуры на пучке μ^- -мезонов и γ -квантов представлено на рис. 1 и 2 соответственно. Счетчики 1, 2, 3 и 4 из пластических сцинтилляторов служат для определения события остановки мю-мезонов в мишени, и сигнал о событии остановки, который определялся совпадением $I234$, управлял регистрацией импульсов из детектора нейтронов ($NE-213$). При измерении спектров фотонейтронов (на рис. 2) детектор нейтронов и мишень располагались в специальном помещении, построенном из парафиновых блоков толщиной 80 см, пучок γ -квантов выводился в экспериментальный зал через отверстие в бетонной стене толщиной 1 м. Ионизационная камера, расположенная за мишенью, служила для контроля потока γ -квантов. В этой же главе представлены результаты измерений и спектры нейтронов, полученные путем дифференцирования спектров протонов отдачи.

В четвертой главе обсуждаются полученные результаты и сравниваются с имеющимися литературными данными, сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

Выход нейтронов из реакции мю-захвата
в ядрах $O(H_2O)$, S , Ca и Pb

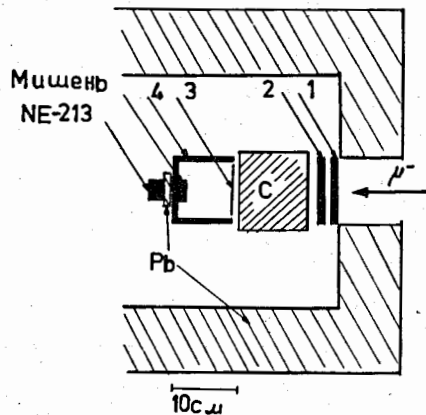


Рис. 1. Расположение аппаратуры на мезонном пучке.

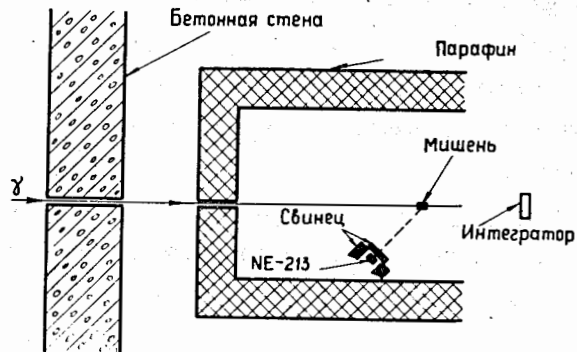


Рис. 2. Расположение аппаратуры на пучке γ -квантов.

Измеренные выходы нейтронов на акт захвата мю-мезона в ядрах O , S , Ca и Pb представлены в таблице I /4/, где они сравниваются с теоретическими и другими экспериментальными данными.

В третьем столбце представлены данные, полученные после построения энергетического спектра в абсолютных единицах по известным значениям выхода нейтронов в некотором его участке, указанном во втором столбце таблицы. В случае свинца спектр был экстраполирован в область малых энергий. Эти значения выхода нейтронов хорошо согласуются с ранее полученными (см. четвертый столбец таблицы) другим методом, в котором нейтронный детектор не имел порога регистрации по энергии /9/.

Для сравнения с теоретическими расчетами по модели коллективных возбуждений наиболее подходящим является ядро ^{16}O , где резонансный механизм испускания нейтронов является преобладающим. Расчетные значения выхода нейтронов /1/ представлены в пятом столбце. В случае ^{16}O наблюдается согласие с нашими данными. В случае Ca из теоретических расчетов приведен выход нейтронов во всем энергетическом интервале, хорошо согласующийся с данными работы /9/. В последнем столбце приведен выход нейтронов для ^{16}O , позднее измеренный другими авторами, который согласуется с нашими данными (в интервале 7,5 - 18 МэВ выход нейтронов для ^{16}O

Т а б л и ц а I

Выход нейтронов из реакции $m\alpha$ -захвата в O , S , Ca и Pb
(на один акт $m\alpha$ -захвата) в интервале энергии нейтронов ΔE_n (МэВ)

I	2	3	4	5	6
O ΔE_n	$0,526 \pm 0,068$ (2,5-7,5)			$0,68$ (2,5-7,5)	$0,54 \pm 0,12$ (2 - 18,2)
S ΔE_n	$0,414 \pm 0,035$ (1,5 - 10)	$0,447 \pm 0,046$ (1,5-12,75)			
Ca ΔE_n	$0,263 \pm 0,033$ (2 - 10)	$0,296 \pm 0,042$ (2 - 13)	$0,706 \pm 0,10$	$0,706$	
Pb ΔE_n	$0,536 \pm 0,031$ (2 - 7)	$1,77$ (0 - 10)	$1,636 \pm 0,343$ $1,709 \pm 0,066$		

незначителен). Эти исследования показывают, что теория коллективного возбуждения при ядерном μ -захвате не только правильно описывает форму спектра, но также дает величину абсолютного выхода нейтронов при μ -захвате, удовлетворительно согласующуюся с экспериментальными данными.

Энергия возбуждения ядер при μ -захвате

В четвертой главе на основе ранее измеренных значений выходов нейтронов определена средняя энергия возбуждения ядер при μ -захвате, что является важным как при вычислении спектров частиц, испускаемых возбужденным ядром, так и при вычислении вероятности захвата μ -мезонов ядрами. На рис. 3 значения средней энергии возбуждения ядра, вычисленные нами, сравниваются с данными, полученными на основе значений вероятности μ -захвата /10/. Учитывая, что точность последних вычислений не лучше 20%, следует полагать, что эти данные хорошо согласуются друг с другом. Как видно из рисунка, средняя энергия возбуждения ядра в широком диапазоне массового числа ядра A в пределах ошибки не меняется (в отличие от случая фотовозбуждения), что обусловлено увеличением вклада монополярных и дипольных переходов с увеличением A .

Спектры нейтронов из реакции μ -захвата в J и Th и фотовозбуждения в Ta, Pb, Bi и Th

На рис. 4,5 в качестве примера представлены спектры нейтронов из реакции μ -захвата и фотовозбуждения в Th /5,8/.

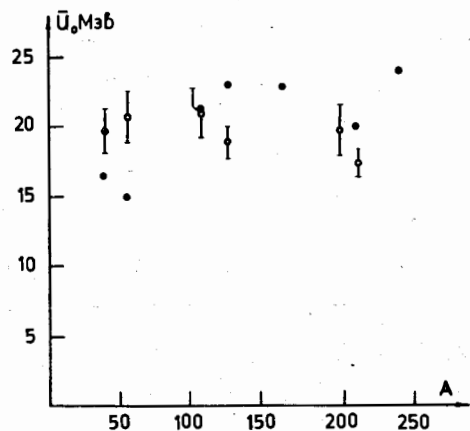


Рис. 3. Зависимость средней энергии возбуждения ядра при мд-захвате от A . \circ - данные, полученные нами на основе выхода нейтронов, \bullet - из расчетов по вероятности захвата мд-мезонов ядрами /10/.

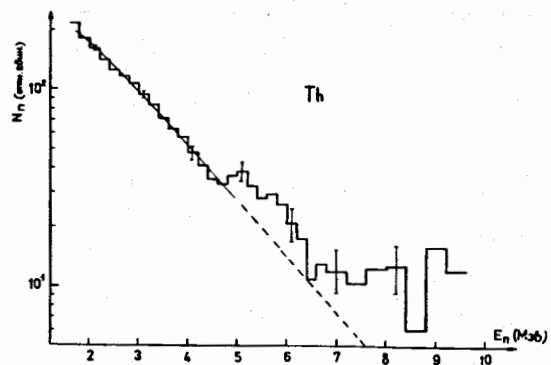


Рис. 4. Энергетический спектр нейтронов из реакции мд-захвата в тории /5/.

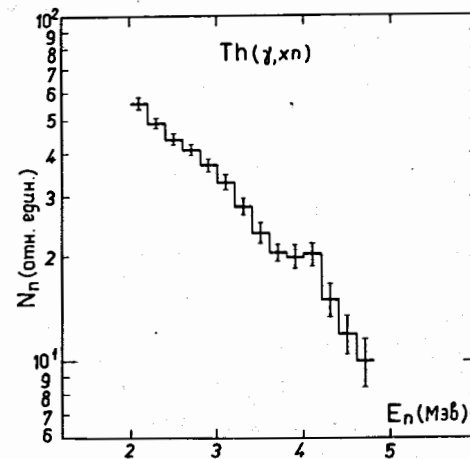


Рис. 5. Энергетический спектр фотонейтронов из Th при облучении γ -квантами тормозного излучения ($E_{\gamma}^{\max} = 31$ MeV).

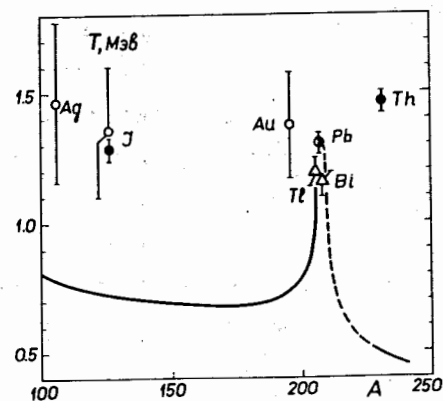


Рис. 6. Зависимость температуры ядра от A . Кривая - усредненные экспериментальные данные по (n, n') реакции /11/; точки - данные по мд-захвату; \circ - из работы /12/; \square - наши данные /5/; \triangle - данные из работы /13/; ϕ - усредненные по данным /3, 13/.

Как и в ранних исследованиях, линейчатой структуры в спектрах не обнаруживается, в то время как ее наличие было бы непосредственным доказательством резонансного механизма испускания нейтронов из квазисвязанных возбужденных состояний ядер в случае больших A (или Z).

Полученные нами спектры нейтронов можно сравнить с предсказаниями статистической теории. С этой целью спектры нейтронов в области $E_n \leq 5$ МэВ аппроксимировали по статистической теории и из этих спектров получали значение температуры ядра T . Аппроксимация проводилась по методу наименьших квадратов с использованием стандартной программы FUMIL (ОИЯИ) на ЭВМ. Обработка показала, что форма низкоэнергетической части спектров нейтронов формально хорошо описывается моделью "испарения". Но при этом полученные значения температуры ядра сильно расходятся с аналогичными данными исследования других реакций, заведомо описываемых этой моделью.

На рис. 6 приводятся значения температуры ядра, полученные на основе спектров нейтронов из реакции $m\alpha$ -захвата, и сравниваются со значением T , полученным из (n, n') . Как видно, сильное расхождение обнаруживается для ядер, отличающихся зарядом на 5-10 единиц от дважды магического ядра свинца.

На рис. 7 представлена зависимость параметра плотности ядерных уровней ρ от A , полученная на основе измеренных спектров нейтронов и средней энергии возбуждения ядра при $m\alpha$ -захвате и фотовозбуждении. Данные по $m\alpha$ -захвату и фото-

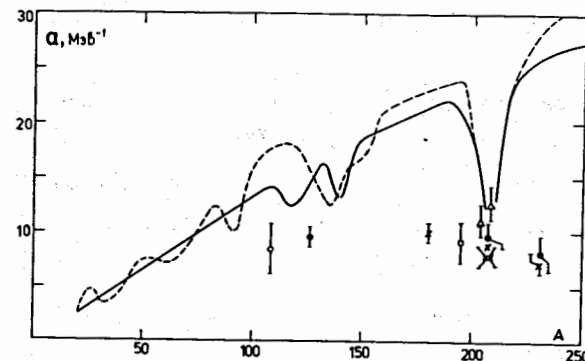


Рис. 7. Зависимость параметра плотности ядерных уровней от A .

Кривые - теоретические ρ (обозначения данных по $m\alpha$ -захвату см. на рис. 6.), $\bar{\rho}$ - наши данные по спектрам фотонейтронов ρ , \times - данные, полученные по значению T для фотонейтронов из работы ρ .

возбуждению в пределах ошибки хорошо согласуются между собой, но сильно расходятся с предсказаниями статистической теории /14/ (на рисунке соответствует двум кривым). Следует отметить, что экспериментальные значения параметра Q из реакции (n, n') , полученные таким же способом, как и в нашей работе, хорошо согласуются с предсказаниями статистической теории и в области дважды магического ядра свинца имеют выделенную особенность. Как было показано /15/, наблюдаемая особенность в области свинца, обусловленная оболочечными эффектами, должна быть существенной до энергии возбуждения 40-45 МэВ.

Сильное расхождение значения параметра плотности ядерных уровней по μ -захвату и фотовозбуждению с предсказаниями статистической теории и отсутствие изменений значений параметра плотности ядерных уровней Q в области свинца показывает, что даже в самых тяжелых ядрах распад квазистационарных состояний, возбуждаемых в этих процессах, не описывается статистической теорией.

Согласие данных по μ -захвату и фотовозбуждению еще раз подтверждает глубокую аналогию между этими реакциями.

Деление ^{239}Pu мюонами

В таких тяжелых мезоатомах, как ^{239}Pu , при каскадных переходах в $1\bar{5}$ -состояние, кроме оже- и радиационных переходов, с определенной вероятностью возможны и безрадиационные переходы /17/. При этом освобожденная энергия не-

посредственно передается ядру, приводя к его возбуждению. В случае ^{239}Pu энергия, соответствующая $2p \rightarrow 1\bar{5}$ - переходу, такова, что может вызывать деление или испускание частиц из ядра. Поэтому зарегистрированные нами нейтроны в интервале энергии 2,6 - 8,6 МэВ, вклад которых на одну остановку мезона равен $\Delta n = 1,15 \pm 0,11$ /7/, необходимо разделить на мгновенные и задержанные. Мгновенные нейтроны обусловлены делением ^{239}Pu при безрадиационном возбуждении ядра, а задержанные - процессом ядерного μ -захвата.

На основе значения Δn и отношения количества мгновенных и задержанных нейтронов определены их вклады в отдельности:

$$\Delta n_{\text{мг}} = 0,16 \pm 0,03; \quad \Delta n_{\text{зад}} = 0,99 \pm 0,12.$$

Путем сравнения $\Delta n_{\text{мг}}$ с выходом нейтронов при делении ^{238}Pu тепловыми нейтронами получен верхний предел для вероятности безрадиационного деления ^{239}Pu на один остановившийся мезон: $0,21 \pm 0,04$, а также верхний предел вероятности деления ^{239}Pu в случае μ -захвата плутонием при двух крайних предположениях о вероятности реэмиссии μ -мезонов после мгновенного деления ядра, вызываемого безрадиационными мезоатомными переходами: $0,74 \pm 0,18$ и $0,94 \pm 0,23$.

Показано, что пределы, определенные для вероятности деления ^{239}Pu ($W_{\text{зад.дел.}}$) при μ -захвате в ^{239}Pu , не противоречат известному отношению Γ_n / Γ_f для изотопов Pu .

Спектры нейтронов из μ -захвата в ^{239}Pu по форме хорошо представляются функцией, которая обычно используется для описания спектра нейтронов деления, и значение параметра $T_{\text{дел.}}$ не противоречит другим данным.

Основные результаты

1. Измерены спектры нейтронов из реакции мю-захвата в ^7Li и ^7Th в интервале энергии $1,6 \leq E \leq 9,6$ МэВ.
2. На основе ранее измеренных выходов нейтронов на акт мю-захвата определены значения средней энергии возбуждения промежуточного ядра при мю-захвате, хорошо согласующиеся со значениями, полученными на основе данных по вероятности мю-захвата.
3. Сравнение полученных значений параметра плотности ядерных уровней с предсказаниями статистической теории ядерных реакций показывает, что эта теория не описывает распада коллективных состояний, возбуждаемых в мю-захвате.
4. Измерен спектр фотонейтронов из Ta , Pb , Bi и Th при возбуждении ядер γ -квантами тормозного излучения с максимальной энергией $E_{\gamma}^{\text{max}} = 3I$ МэВ.
5. Как и в случае мю-захвата, сравнение полученных значений с предсказаниями статистической теории показывает, что она также не описывает распада коллективных состояний типа гигантского дипольного резонанса, возбуждаемых при фотопоглощении.
6. Данные, полученные по спектрам нейтронов из реакции мю-захвата и фотовозбуждения ядер, показывают, что механизмы распада состояний, возбуждаемых в этих процессах, сходны и эти состояния до распада не диссипируют в состояния компаунд-ядра.
7. Измерен абсолютный выход нейтронов на акт мю-захвата в кислороде в интервале энергии от 2,5 до 7,5 МэВ, $\bar{n} =$

$0,52 \pm 0,068$; сере - от 1,5 до 10 МэВ, $\bar{n} = 0,414 \pm 0,035$; кальции - от 2 до 10 МэВ, $\bar{n} = 0,265 \pm 0,033$; свинце - от 2 до 7 МэВ, $\bar{n} = 0,536 \pm 0,031$.

8. Измеренные абсолютные выходы нейтронов при мю-захвате в сере, кальции и свинце позволили сопоставить данные работ ^{/3/} и ^{/18/} по спектрам; установлено, что эти данные в области перекрытия согласуются в пределах ошибки.
9. В случае мю-захвата в кислороде имеется количественное согласие между полученным значением выхода нейтронов и предсказанием резонансной модели. На основе измеренного нами выхода нейтронов авторам работы ^{/3/} удалось оценить интенсивность каждой линии, наблюдаемой в спектре нейтронов из мю-захвата в кислороде, что также согласуется с теоретическими предсказаниями.
10. Измерен спектр нейтронов из мю-захвата в ^{239}Pu в интервале 2,4 - 10 МэВ. Определен абсолютный выход нейтронов на один акт остановки мю-мезона /мгновенные + захватные/ в интервале 2,6 - 8,6 МэВ, $\Delta n = 1,15 \pm 0,11$.
11. Определен верхний предел вероятности мгновенного деления, обусловленного атомными безрадиационными переходами мю-мезона, на один остановившийся мезон: $W_{\text{бр. дел.}} = 0,21 \pm 0,04$, и верхний предел вероятности задержанного деления на акт мю-захвата в плутонии при двух крайних предположениях о вероятности резонансных мю-мезонов после мгновенного деления ^{239}Pu : $0,74 \pm 0,18$ и $0,94 \pm 0,23$.

Литература

1. V.V.Balashov, V.B.Beliaev, R.A.Eramjian, N.M.Kabachnik. Phys.Lett., 2, 168 /1964/.
2. L.L.Foldy, J.D.Walecka. Nuovo Cimento, 34, 1026 /1964/.
3. И.Войтковска, В.С.Евсеев и др. Препринт ОИЯИ, Д15-4088, Дубна /1968/; Phys.Lett., 28B, 553 /1969/; Препринт ОИЯИ, P1-6051, Дубна /1971/; ЯФ 15, 1154 /1972/; M.E.Plett, S.E.Sobotka. Phys.Rev., 63, 1003 /1971/.
4. И.Войтковска, В.С.Евсеев, Т.Козловски, Т.Н.Мамедов, В.С.Роганов. Препринт ОИЯИ, P15-5524, Дубна /1970/; ЯФ 14, 624 /1971/.
5. В.С.Евсеев, Т.Н.Мамедов. Препринт ОИЯИ, P1-7115, Дубна /1973/; ЯФ 18, 968 /1973/; in Proceedings of the Fifth International Conf. on High Energy Physics and Nuclear Structure, Uppsala, Sweden, June 18 - 23, 1973, p. 308.
6. V.S.Evseev, T.Kozlovski, T.N.Mamedov, V.S.Roganov, Z.Sujkowski, J.Wojtkowska and A.Zglinski. Int. Conf. on Photonuclear Reactions and Applications, Asilomar, USA, March 26 - 30, 1973, p. 5D4.
7. В.С.Евсеев, Т.Н.Мамедов. Препринт ОИЯИ, P1-7443, Дубна /1973/; ЯФ 19, 1222 /1974/.
8. В.С.Евсеев, Т.Н.Мамедов, О.В.Семогин. Препринт ОИЯИ, P1-7962, Дубна /1974/.
9. B.MacDonald et al. Phys.Rev., 139, B1253 /1965/.
10. P.Cristillin et al., Phys.Rev.Lett., 31, 1012 /1973/.
11. О.А.Сальников и др. ЯФ 4, 1154 /1966/; Изв.АН СССР, сер. физ., 32, 653 /1968/. / см. также А.В.Малышев.ЖЭТФ 45, 316 /1963//.

12. D.E.Hagge. California Univ. Report, UCRL-10516 /1963/.
13. U.Jahnke et al. Helv. Phys.Acta. 45, 49 /1973/.
14. D.W.Lang. Nucl.Phys., 26, 434 /1961/; /см. также 15/.
15. J.R.Huisenga and L.G.Moretto. Univ. of Calif. Prepr. LBL-662 /1972/.
16. F.T.Kushnir et al. Phys.Rev., 161, 1236 /1967/.
17. D.F.Zaretski. Int.Conf. on Peaceful uses of atomic Energy, vol.15, p.175 /1958/.
18. M.H.Krieger, Ph. D. Thesis Columbia University, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 декабря 1974 года.