

C - 15

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2 - 12310

САКАЕВ
Раис Ахметович

РАДИАЦИОННЫЙ ЗАХВАТ
 π^- -МЕЗОНОВ ЛЕГКИМИ ЯДРАМИ

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1979

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель -
доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

Р.А.Зрамбян.

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук
доцент

Ю.Ф.Смирнов,

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Г.Г.Бунатян.

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт ядерных исследований АН СССР, Москва.

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1979 г.
на заседании Специализированного ученого совета К 047.01.01
Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований (Московская область, г.Дубна).

Автореферат разослан " _____ " _____ 1979 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

В.И.Журавлев.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одним из главных направлений развития современной ядерной физики является изучение мезон-ядерных взаимодействий при промежуточных энергиях. Исследования в этой области затрагивают широкий круг проблем, непосредственно связанных с природой мезон-нуклонных взаимодействий, ядерной структурой и свойствами мезоатомов.

Изучение мезон-ядерных взаимодействий уже дало ряд важных результатов для ядерной физики. В то же время возникли новые проблемы, требующие своего решения. Особое значение среди процессов такого типа придается радиационному захвату Π^- -мезонов атомными ядрами. Экспериментальное изучение этого процесса занимает важное место в программе исследований на мезонных фабриках и современных ускорителях.

Основной закономерностью процесса (Π^-, γ) является наличие широкого максимума в наблюдаемом спектре гамма-квантов, расположенного в той области возбуждения ядра, в которой локализованы коллективные состояния типа гигантских резонансов. Выяснение роли этих состояний в процессе (Π^-, γ) является одной из важных задач физики мезон-ядерных взаимодействий.

Основная цель работы - основываясь на концепции о доминирующей роли коллективных состояний ядра типа гигантского резонанса, проанализировать основные закономерности возбуждения и распада резонансных ядерных состояний в процессе (Π^-, γ); показать, что используемая модель позволяет описать не только область локализации резонансных состояний, но также gross-структуру экспериментального спектра; исследовать влияние учета фермиевского движения нуклонов и требований калибровочной инвариантности при построении эффективного гамильтониана процесса (Π^-, γ) на скорость радиационного захвата Π^- -мезонов; проанализировать возможности использования корреляционных экспериментов для выявления структуры гигантского резонанса; исследовать влияние различных мезоатомных характеристик на абсолютные скорости радиационного захвата мезонов и на относительный выход гамма-квантов.

Научная новизна и практическая ценность. В данной диссертации проведено систематическое исследование процесса радиационного захвата Π^- -мезонов легкими атомными ядрами. На основе анализа полученных результатов было установлено, что для всех легких ядер (за исключением дважды магических) пики в самой жесткой части спектра первичных гамма-квантов отвечают возбуждению изобар-аналогов $M1$ -резонанса ядра-мишени. Показано, что различный характер возбуждения этих уровней в нечетных, четно-четных и нечетно-нечетных ядрах связан с особенностями структуры волновых функций начального и конечного состояния ядра.

Впервые рассчитаны скорости радиационного захвата и выходы гамма-квантов в процессе (\mathcal{N}^-, γ) на ядрах ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{11}\text{B}$, ${}^{13}\text{C}$, ${}^{14}\text{C}$, ${}^{32}\text{S}$.

Исследовано влияние ядерной структуры на характер возбуждения ядерной системы. Дано объяснение имеющимся экспериментальным данным на основе единого подхода к описанию процесса (\mathcal{N}^-, γ) . Предсказаны квантовые числа главных максимумов и сильное конфигурационное расщепление состояний гигантского резонанса в процессе (\mathcal{N}^-, γ) .

На примере ядра ${}^{16}\text{O}$ впервые проанализировано влияние скоростных нуклонных компонент в эффективном гамильтониане на скорость радиационного захвата Π^- -мезонов.

Рассчитаны парциальные спектры гамма-квантов, связанные с возбуждением резонансных состояний, распадающихся по определенному каналу.

Анализируется возможность использования корреляционных экспериментов для выявления структуры гигантского резонанса.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории теоретической физики ОИЯИ, ЦЕРНа, СИНа (Швейцария), на VI (Санта-фе, 1975 г.) и VII (Цюрих, 1977 г.) Международных конференциях по физике высоких энергий и структуре ядра, на Ломоносовских чтениях в МГУ (1978 г.), представлялись на Международную конференцию по избранному вопросу структуры ядра (Дубна, 1976 г.), на Международный симпозиум по высокоспиновым состояниям и ядерной структуре (Дрезден, 1977 г.).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано восемь работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав основного содержания, заключения и приложения, содержит 161 страницу машинописного текста, 25 рисунков, 31 таблицу и библиографический список литературы из 107 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит краткое обсуждение проблемы радиационного захвата Π^- -мезонов ядрами. Проводится аналогия между закономерностями возбуждения ядра в процессах (\mathcal{N}^-, γ) , μ -захвата, фотопоглощения и электровозбуждения. Сформулированы основные вопросы, рассматриваемые в диссертации. Кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе излагаются основные положения теории радиационного захвата Π^- -мезонов ядрами.

В § 1 рассматривается эффективный гамильтониан процесса (\mathcal{N}^-, γ) , в котором учтены фермиевское движение нуклонов ядра и требования калибровочной инвариантности. Обсуждаются основные отличия этого эффективного гамильтониана от гамильтониана, при выводе которого эти эффекты не были учтены.

В § 2 проводится анализ амплитуды и одночастичных радиальных интегралов процесса (\mathcal{N}^-, γ) с целью выделения доминирующих членов. На основе мультипольного разложения эффективного гамильтониана устанавливается структура оператора перехода и выделяются его лидирующие компоненты. Показано, что в процессе (\mathcal{N}^-, γ) доминируют переходы спин-мультипольного типа.

В § 3 проводится анализ одночастичных матричных элементов, устанавливается ряд общих закономерностей возбуждения ядер и некоторые приближенные правила отбора. Исследуется влияние учета скоростных нуклонных компонент и кинематической перенормировки констант в эффективном гамильтониане на одночастичные матричные элементы процесса (\mathcal{N}^-, γ) .

Вторая глава посвящена обсуждению процессов, непосредственно предшествующих радиационному захвату мезона.

В § 1 исследуется влияние различных мезоатомных характеристик на относительный выход гамма-квантов.

В § 2 приводятся результаты расчета смещений и ширины уровней мезоатомов для различных наборов параметров нелокального

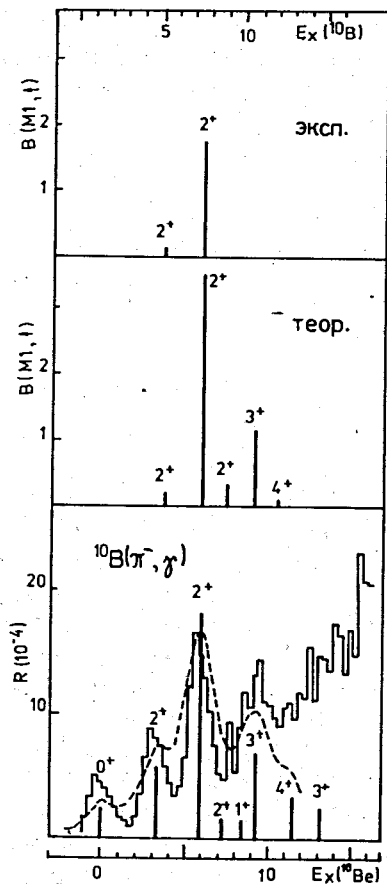


Рис. I Приведенные вероятности электромагнитных $B(M1)$ переходов и выход гамма-квантов в процессе $^{10}\text{B}(\pi^-, \gamma)^{10}\text{Be}$. Пунктирная кривая (результат расчета) получена в предположении, что каждый резонанс имеет брэгг-вигнеровскую форму с шириной 2 МэВ. В виде гистограммы приведен экспериментальный спектр гамма-квантов, взятый из работы Н.В. Ваер et al. Phys.Rev., C12, 921 (1975).

оптического потенциала Кислингера-Эриксона. Полученные таким образом теоретические значения сравниваются с экспериментальными. Показано, что в случае самых легких ядер ^4He , ^6Li , ^7Li , ^9Be для достижения хорошего согласия между экспериментальными и теоретическими значениями смещений и ширин $1s$ -уровней необходимо перенормировать параметры оптического потенциала. Поэтому для $1s$ -состояний мезоатомов производился индивидуальный подбор параметров оптического потенциала по экспериментальным значениям смещений и ширин $1s$ -уровней.

В § 3 рассчитываются факторы коррекции, показывающие степень искажения волновой функции Π -мезона за счет сильного пион-ядерного взаимодействия и конечных размеров ядра. Анализируется влияние неопределенности параметров оптического потенциала на степень искажения пионной волновой функции в мезоатоме.

В третьей главе исследуются парциальные переходы с возбуждением низколежащих состояний ядра ($A, Z - I$).

В § 2 анализируются закономерности возбуждения состояний $M1$ -резонанса в электромагнитных процессах. Выявлена роль ядерной структуры в формировании резонанса. В нечетных ядрах $I\pi$ -оболочки изовекторные $M1$ -переходы оказываются подавленными вследствие запрета по схеме Кнга [1]. Аналогичные переходы в ядре ^{12}C оказываются ослабленными.

В § 3 показано, что в процессе (π^-, γ) высокоэнергетическая часть спектра гамма-квантов формируется преимущественно за счет возбуждения изобар-аналогов состояний $M1$ -резонанса. Расчет проводился для всех ядер $I\pi$ -оболочки. Типичный результат расчета проиллюстрирован на рис. I. Теория в целом удается описать gross-структуру этой части гамма-спектра довольно хорошо. Наиболее сильные резонансы типа $M1$ формируются в ^6Li , ^{10}B , ^{12}C , ^{13}C , ^{14}N . Исследовано влияние учета фермиевского движения нуклонов и требований калибровочной инвариантности при построении эффективного гамильтониана процесса (π^-, γ) на парциальные скорости радиационного захвата Π -мезонов в ядре ^{16}O . Показано, что учет скоростных нуклонных компонент и кинематической перенормировки констант эффективного гамильтониана играет заметную роль только для сильно подавленных переходов.

В четвертой главе на основе концепции о доминирующей роли состояний гигантского резонанса исследованы основные закономер-

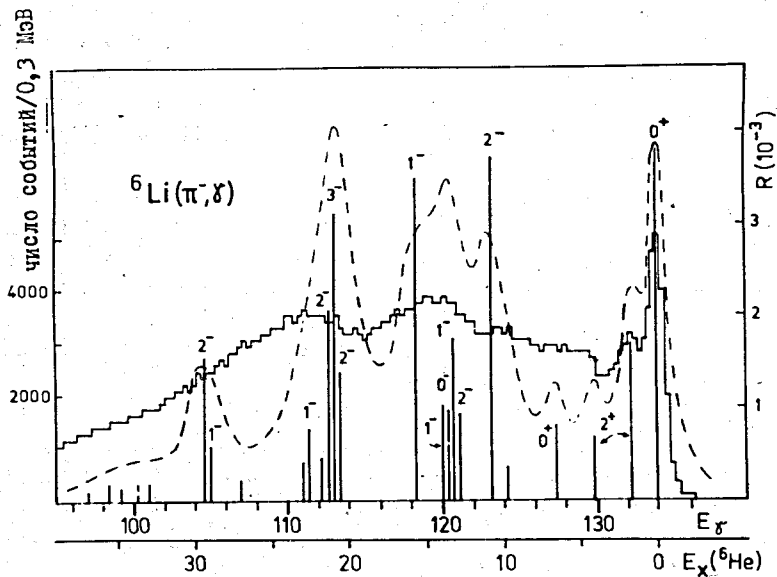


Рис.2 Выход гамма-квантов в процессе ${}^6\text{Li}(\pi^-, \gamma)$. Пунктирная кривая (результат расчета) получена в предположении, что каждый резонанс имеет брейт-виннеровскую форму с шириной 2 МэВ. В виде гистограммы приведен экспериментальный спектр гамма-квантов, взятый из работы J.C.Alder et al. SIN Newsletter, No.9, p.7.

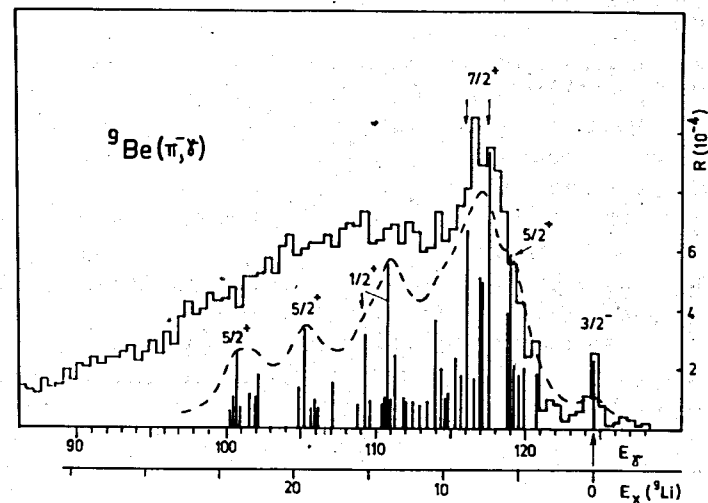


Рис.3 Выход гамма-квантов в процессе ${}^9\text{Be}(\pi^-, \gamma)$. Пунктирная кривая (результат расчета) получена в предположении, что каждый резонанс имеет брейт-виннеровскую форму с шириной 2 МэВ. В виде гистограммы приведен экспериментальный спектр гамма-квантов, взятый из работы P.Tuol. In Proc. of the Int. Topical Conf. on Meson-Nuclear Physics (Carnegie-Mellon University Pittsburgh, Pennsylvania 1976), p.581.

ности возбуждения и распада ядерной системы в процессе (π^-, γ) . Рассмотрение проводится в рамках многочастичной модели оболочек с учетом остаточного взаимодействия нуклонов в ядре.

В § I обсуждается метод построения ядерных волновых функций.

В § 2 приводятся результаты расчета спектра возбуждения ядерной системы в процессе (π^-, γ) . Типичный результат приведен на рисунках 2 и 3.

Гросс-структура спектра возбуждения ядерной системы в процессе (π^-, γ) так же, как это имеет место в фотоядерных реакциях, обусловлена конфигурационным расщеплением гигантского резонанса. В ядрах с незаполненными оболочками существуют две группы переходов. Первая связана с возбуждением валентных нуклонов, вторая — с переходом нуклонов из замкнутой оболочки в валентную. Вследствие их энергетического разделения, которое сохраняется и при учете остаточного взаимодействия, в спектре возбуждения возникают две области локализации переходов, причем низкоэнергетическая часть формируется за счет возбуждения валентных нуклонов, а высокоэнергетическая связана с переходом нуклонов из замкнутой оболочки в валентную. Наиболее ярко этот эффект проявляется в ядрах с частично заполненной оболочкой. По мере заполнения валентной оболочки вклад дырочных возбуждений из-за принципа Паули становится все менее и менее заметным, а положение главного пика гигантского резонанса сдвигается в сторону меньших энергий возбуждения ядра.

В § 3 исследуется структура гигантского резонанса. Предсказаны квантовые числа наиболее интенсивно возбуждающихся резонансов. Выявлена их тесная связь со структурой волновой функции основного состояния ядра-мишени. В результате проведенных исследований было показано, что в спектрах ядер, в которых $1p$ -оболочка только начинает заполняться, наиболее сильным пикам отвечают правила отбора $\Delta J = 1$, а в спектрах ядер, в которых оболочка $1p$ почти заполнена, — $\Delta J = 2$.

В § 4 исследуются интегральные характеристики процесса (π^-, γ) . Установлено, что для случая полного выхода гамма-квантов доминируют переходы с изменением спина начального ядра на единицу ($\Delta J = 1$).

В § 5 исследуется характер возбуждения ядерной системы в процессе (π^-, γ) на типичном ядре $(2s-1d)$ оболочки ^{32}S . Показано, что с ростом массового числа A возрастает роль спи-

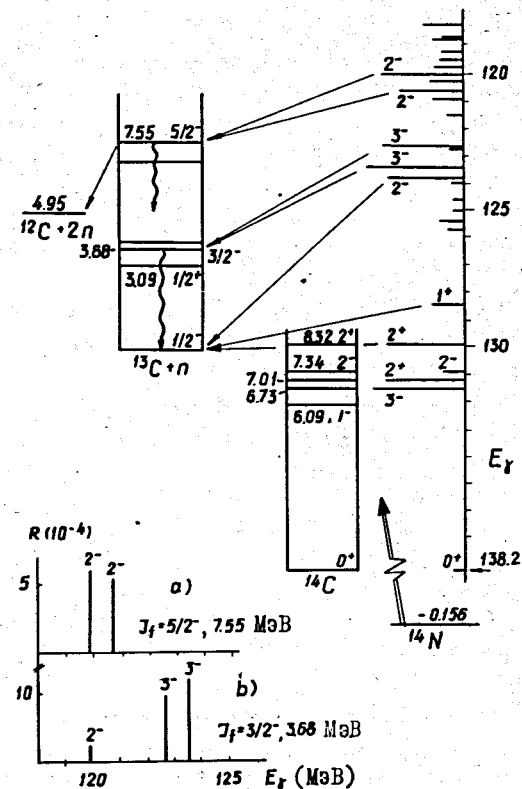


Рис. 4 Схема возбуждения ядерной системы в процессе $^{14}N(\pi^-, \gamma)$, основные каналы распада и спектр жесткого γ -кванта, регистрируемого в совпадении с последующим мягким γ' -квантом с энергией а) $E_{\gamma'} = 7,55$ МэВ и б) $E_{\gamma'} = 3,68$ МэВ.

квадрупольных переходов, приводящих к дальнейшему сглаживанию спектра гамма-квантов. Установлено, что уже для ядер $(2s-1d)$ -оболочки, особенно при поглощении с d -орбит, в ядерной системе возбуждаются резонансы с большими спинами ($J_f = 4, 5$).

В § 6 на примере ядра ^{16}O проанализировано влияние учета фермиевского движения нуклонов ядра и требований калибровочной инвариантности при построении эффективного гамильтониана процесса (π^-, γ) на спектр возбуждения ядерной системы. Установлено, что основное отличие связано с изменением кинематической зависи-

мости скорости процесса (π^-, γ) от энергии гамма-кванта.

В §7 исследуются закономерности распада состояний гигантского резонанса. Основным каналом (за исключением случая легчайших ядер Ir-оболочки) является канал с испусканием нейтрона. Рассчитаны парциальные спектры гамма-квантов, связанные с заселением определенных состояний дочернего ядра ($A - 1, Z - 1$). Показано, что исследование таких характеристик процесса (π^-, γ) позволяет получить дополнительную информацию о возбужденных состояниях промежуточной ядерной системы ($A, Z - 1$). Предлагается программа экспериментальных исследований парциальных спектров гамма-квантов, связанная с проведением экспериментов на совпадении первичного гамма-кванта процесса (π^-, γ) с продуктами развала состояний гигантского резонанса промежуточного ядра ($A, Z - 1$) или с моноэнергетическим γ' -квантом ядерного перехода в дочернем ядре. Исследование таких спектров позволит выделить из полного спектра возбуждения промежуточной ядерной системы ($A, Z - 1$) только те состояния, которые генеалогически связаны с фиксированным уровнем дочернего ядра ($A - 1, Z - 1$). Как правило, таких состояний существенно меньше, что позволяет отчетливее проследить за резонансной структурой спектра. Типичный результат такого расчета приведен на рис.4.

В заключении приведены основные результаты диссертации, которые представляются к защите.

1. Рассчитаны выходы гамма-квантов с возбуждением низлежащих состояний ядра ($A, Z - 1$). Показано, что в этой части спектра доминируют переходы с возбуждением изобар-аналогов состояний MI-резонанса ядра-мишени. Предсказано, что в ряде случаев в области локализации MI-резонансов с заметной интенсивностью возбуждаются состояния другой природы, отвечающие спин-дипольной ветви возбуждения ядра.

2. Установлено, что основной максимум в спектре гамма-квантов для ядер Ir-оболочки связан со спин-дипольной ветвью гигантского резонанса. Указаны квантовые числа (спин и четность) когерентных состояний, формирующих гигантский резонанс. Показано, что в процессе (π^-, γ) так же, как это имело место в фотоядерных реакциях, в спектре возбуждения ядерной системы проявляется конфигурационное расщепление. Вследствие этого результирующий спектр первичных гамма-квантов имеет четко выраженную gross-структуру.

3. Учет фермиевского движения нуклонов ядра и требований калибровочной инвариантности при построении эффективного гамильтониана процесса (π^-, γ) не изменяет качественной картины возбуждения гигантских резонансов. Основное отличие от результатов расчета с традиционной формой гамильтониана обусловлено новым кинематическим фактором, учет которого приводит к уменьшению суммарного выхода гамма-квантов для спин-дипольной ветви возбуждения на 10-15%, для спин-квадрупольной - на 30%. Влияние скоростных нуклонных компонент и кинематической перенормировки констант эффективного гамильтониана процесса (π^-, γ) оказывается заметным только в случае сильно подавленных переходов.

4. На примере ядра ^{32}S было показано, что уже для ядер ($2s-1d$) оболочки, в особенности при поглощении мезона с d -орбит мезоатома, в ядерной системе наряду со спин-дипольными и спин-квадрупольными гигантскими резонансами с высокой интенсивностью возбуждаются коллективные состояния с большими спинами ($J_z = 4, 5$). Тем самым радиационный захват пионов может служить удобным инструментом для исследования основных закономерностей возбуждения гигантских резонансов высокой мультипольности.

5. Выявлены и исследованы основные закономерности распада состояний спин-дипольной ветви гигантского резонанса. Установлено, что доминирующие резонансы, как правило, обладают выделенными нейтронными каналами распада в основное или нижайшие возбужденные состояния дочернего ядра. Показано, что для лучшего понимания механизма процесса и выявления структуры гигантского резонанса важное значение приобретает исследование парциальных спектров гамма-квантов, связанных с возбуждением резонансных состояний, распадающихся по определенному каналу.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Р.А.Сакаев, Р.А.Эрамзян. Сообщение ОИЯИ, P2-9610, Дубна (1976).
R.A.Sakaev, R.A.Eramzhyan. Sixth Int. Conf. on High Energy Physics and Nuclear Structure (Santa Fe and Los Alamos 1975). Contributed Papers, p.191.
2. G.E.Dogotar, R.A.Eramzhyan, H.R.Kissener and R.A.Sakaev. Nucl.Phys., A312, 394 (1978).
Сообщение ОИЯИ, E2-II275, Дубна (1978).
Г.Е.Доготарь, Г.Р.Киссенер, Р.А.Сакаев, Р.А.Эрамзян. Труды

- Международной конференции по избранным вопросам структуры ядра. Краткие сообщения, т. I, стр. 176, Дубна (1976).
- G. E. Dogotar, R. A. Eramzhyan, H. R. Kissener and R. A. Sakaev. Int. Symp. on High Spin States and Nuclear Structure. (Dresden Contributed Paper, 1977), ZFK-336, p. 113.
- G. E. Dogotar, R. A. Eramzhyan, H. R. Kissener and R. A. Sakaev. Seventh Int. Conf. on High Energy Physics and Nuclear Structure (Zürich 1977). Contributed Paper, p. 32.
- М. Гмитро, Г. Е. Доготарь, Г. Р. Киссенер, Г. Я. Коренман, Л. А. Тосунян, Р. А. Эрамжян, В. П. Попов, Р. А. Сакаев. Доклад на научной конференции "Ломоносовские чтения", изд-во МГУ, Москва, 1978, стр. 49.
3. Г. Е. Доготарь, Г. У. Егер, Г. Р. Киссенер, Р. А. Сакаев, Р. А. Эрамжян. Сборник статей "Расчеты структуры ядра и ядерных реакций", изд-во "Птицица", Кишинев, 1977, стр. 19.
4. G. E. Dogotar, R. A. Eramzhyan, H. R. Kissener and R. A. Sakaev. Nucl. Phys., A282, 474 (1977).
Сообщение ОИЯИ, E2-10185, Дубна (1976).
5. G. E. Dogotar, R. A. Eramzhyan, H. R. Kissener and R. A. Sakaev. Nucl. Phys., A302, 523 (1978).
Сообщение ОИЯИ, E2-10509, Дубна (1977).
6. R. A. Eramzhyan, L. Mailing, E. Rizek, R. A. Sakaev. Czech. J. Phys., B28, 1081 (1978).
Сообщение ОИЯИ, E2-11234, Дубна (1978).
R. A. Eramzhyan, L. Mailing, E. Rizek, R. A. Sakaev. Seventh Int. Conf. on High Energy Physics and Nuclear Structure (Zürich 1977). Contributed Paper, p. 42.
7. G. E. Dogotar, R. A. Eramzhyan, H. R. Kissener, R. A. Sakaev. Сообщение ОИЯИ, E2-11296, Дубна (1978).
G. E. Dogotar, R. A. Eramzhyan, H. R. Kissener, R. A. Sakaev. Seventh Int. Conf. on High Energy Physics and Nuclear Structure (Zürich 1977). Contributed Paper, p. 31.
8. М. Гмитро, Г. Я. Коренман, В. П. Попов, Р. А. Сакаев, Л. А. Тосунян. Препринт ОИЯИ, P2-11991, Дубна (1978).

Рукопись поступила в издательский отдел
19 марта 1979 года.