

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ГОС.КОМИТЕТА ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР

На правах рукописи

ГРИГОРЯН ЕЛЕНА ОГАНЕСОВНА

УДК 539.172.3:539.173.3

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИЙ ФОТОРАСЩЕПЛЕНИЯ ЛЕГКИХ  
И СРЕДНЕТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР КОГЕРЕНТНЫМ И НЕКОГЕРЕНТНЫМ  
ПУЧКАМИ ФОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ ДО 4,5 ГэВ

О1.04.16 - Физика атомного ядра  
и элементарных частиц

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

ЕРЕВАН - 1985

Работа выполнена в Ереванском государственном университете.

Научные руководители: доктор физико-математических наук,  
академик АН Арм.ССР ВАРТАПЕТЯН Г.А.  
кандидат физико-математических наук  
ДЕМЕХИНА Н.А.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
РАНЖК Ю.Н. (ХФТИ)  
кандидат физико-математических наук  
БАЯТЯН Г.Л. (ЕФИ)

Ведущая организация: НИИ ЯФ при Томском политехническом институте.

Защита состоится "29" март 1985 г. в 14<sup>00</sup>  
часов на заседании Специализированного совета Д.034.03.01  
при Ереванском физическом институте (г.Ереван-36, ул. Мар-  
каряна 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ере-  
ванского физического института.

Автореферат разослан "26" апрель 1985 г.

Ученый секретарь  
Специализированного совета,  
кандидат физико-математических  
наук

ШАХБАЗЯН В.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Ядерные реакции при высоких энергиях в настоящее время представляют собой один из наиболее быстро развивающихся разделов физики. Эта обширная и весьма информативная область получила толчок в развитии после того, как было выяснено, что ядерная физика высоких энергий имеет важное практическое применение: в расчетах радиационной защиты высотных самолетов и космических кораблей, при рассмотрении радиостойкости материалов, получении радиоактивных изотопов с целью использования их в медицине и в народном хозяйстве, в ряде вопросов радиобиологии, радиационной дефектоскопии и т.д.

Исследования в этой области показали, что изучение явлений, возникающих при столкновениях высокоэнергетических частиц с ядрами, является важным, а во многих случаях, уникальным средством получения сведений, относящихся как к элементарным частицам, так и к физике атомного ядра. Электромагнитные взаимодействия с ядрами занимают особое положение в этой области. Свойства электромагнитного поля, как и механизм передачи энергии хорошо изучены, поэтому в реакциях такого типа можно получить более надежную информацию о строении ядра, чем в процессах с сильным взаимодействием, где трудно отделить эффекты проявления структуры ядра от механизма его возбуждения. Одним из важных моментов исследования электромаг-

нитных взаимодействий ядер является изучение фотоядерных реакций.

В этой области исследований можно выделить два направления:

1. рождение и превращение элементарных частиц в процессе взаимодействия;

2. состояние и свойства ядерной материи, претерпевшей столкновение.

Это две стороны одного процесса. И, несмотря на различные методы и параметры, измеренных в экспериментах, в целом они вместе должны воссоздать картину взаимодействия фотонов с ядром.

Как показали исследования фотоядерных реакций, механизм взаимодействия фотонов с ядром существенным образом зависит от длины волны фотона. Ранние исследования относились к области "гигантского резонанса". С вводом ускорителей на большие энергии, появилась возможность продолжить измерения в сторону более высоких энергий. и получить новые данные о других каналах реакций, обусловленных большим количеством освобожденных из ядра нуклонов ("высоким порогом"). Изучение реакций указанного типа затруднено малой величиной выхода и играет существенную роль в понимании механизма взаимодействия высокоэнергетических фотонов с ядрами.

Диссертационная работа посвящена изучению реакции фоторасщепления ядер в области высоких энергий. Максимальная энергия фотонных пучков тормозного излучения, которыми облучались мишени в массовой области  $27 + 93$ , составляла  $4,5 \text{ ГэВ}$ . Изучались реакции, протекавшие под действием фотонных пучков когерентного и некогерентного тормозного излучения.

Цель работы. Исследование реакций фоторасщепления ядер в массовой области  $27 + 93$  под действием пучков когерентного и некогерентного тормозного излучения с максимальной энергией  $4,5 \text{ ГэВ}$ .

Изучение реакций с малым выходом, сопровождающихся вылетом большого числа нуклонов из ядра. Получение новых данных о выходах и сечениях реакций образования отдельных продуктов, зарядовых и массовых распределениях ядер - остатков.

Основные защищаемые положения:

1. Совокупность экспериментальных данных по изучению реакций расщепления ядер фотонами высоких энергий - выходы, зарядовые и массовые распределения продуктов расщепления ниобия, выходы продуктов расщепления легких мишеней в массовой области  $27 + 40$ .

2. Метод измерения выходов реакций фоторасщепления ядер квазиоднохроматическими фотонными пучками и расчета сечений с использованием стандартной программы, предназначенной для решения системы линейных алгебраических уравнений, по методу регуляризации А.Н.Тихонова.

3. Совокупность расчетных значений сечений ряда реакций расщепления в интервале энергий фотонов от порога реакций до  $4,5 \text{ ГэВ}$  для мишеней в массовой области  $27 + 64$ .

4. Обнаружение резонансной структуры в энергетической зависимости сечения фоторасщепления в области  $340-400 \text{ МэВ}$  и  $720-800 \text{ МэВ}$ .

Научная новизна. Впервые изучались реакции расщепления фотонами тормозного излучения с максимальной энергией  $4,5 \text{ ГэВ}$ , а также выходы некоторых продуктов из легких мишеней с массами в области  $27 + 40$ .

Впервые в исследованиях реакции фоторасщепления использовались пучки когерентного тормозного излучения с пиковыми значениями энергий 0,44–1,54 ГэВ при максимальной энергии спектра 3,75 ГэВ.

Расчеты сечений реакций, проведенные по методу регуляризации А.Н.Тихонова, позволили впервые получить функции возбуждения некоторых реакций фоторасщепления и установить их резонансный характер выше порога образования мезонов.

Практическая ценность. Полученные данные по фоторасщеплению легких и среднетяжелых ядер в массовой области  $27 + 93$  при высоких энергиях позволяют проверить и уточнить модельные представления о механизме взаимодействия частиц высоких энергий с ядрами, а также планировать дальнейшие исследования в области фотоядерных реакций. Представленные экспериментальные результаты могут быть использованы при систематизации выходов различных ядер в реакциях фоторасщепления и учтены при проектировании защиты космических кораблей и ускорителей, в исследованиях по радиобиологии, в радиационной медицине, при изучении радиационной стойкости материалов и т.д.

Предложенный метод исследования фотоядерных реакций квазимонохроматическими фотонными пучками дает возможность измерения выходов и вычисления сечений фоторасщепления ядер в зависимости от энергии падающих фотонов. При этом необходимый набор экспериментальных данных, включающий выходы реакций, соответствующие различным спектрам фотонных пучков, получается путем изменения пиковой энергии в спектре простым вращением кристаллического радиатора, избегая таким образом многократной перестройки режима работы ускорителя.

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертационной работы докладывались на IX Международной конференции

по физике высоких энергий и структуре ядра в Версале (Франция, июнь 1981 г.), на научных сессиях профессорско-преподавательского состава физического факультета ЕГУ (Ереван, 1980, 1982, 1983 г.г.), а также на семинарах Ереванского физического института.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 11 статей в союзных и республиканских журналах.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Содержит 151 страницу, в том числе 43 рисунка, 20 таблиц и 150 литературных ссылок.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность проблемы исследования фотоядерных реакций, в частности, реакций фоторасщепления, определяется круг основных вопросов, изучению которых посвящена данная диссертационная работа.

В первой главе описана методика измерения наведенной активности с использованием  $Ge(Li)$  детекторов, способ регистрации и обработки спектров. Отмечено преимущество и недостатки использования активационной методики в исследованиях реакций расщепления ядер. Приведены данные, характеризующие линейность системы, эффективность регистрации, а также свойства ядер продуктов и мишеней. Рассмотрены различные способы получения пучков фотонов когерентного и некогерентного тормозного излучения, а также методика измерения спектров.

Расчет функций возбуждения с высокой достоверностью является важной задачей в исследовании ядерных реакций, вызванных фотонами тормозного излучения, когда продукты реакций не выделяются кинематически. Большое внимание в первой главе

уделяется описанию различных способов вычисления сечений по результатам измерения выходов.

Связь между сечением и выходом реакций выражается следующим образом:

$$\sigma_q(E_{\text{макс}}) = \frac{1}{Q} \int_{E_{\text{пор}}}^{E_{\text{макс}}} \sigma_k(E) N(E, E_{\text{макс}}) dE \quad (I)$$

где  $Q$  определяет число эквивалентных квантов в спектре с максимальной энергией  $E_{\text{макс}}$ ,  $\sigma_q(E_{\text{макс}})$  - выход реакций на один эквивалентный квант,  $\sigma_k(E)$  - сечение реакции, отнесенное к реальному фотону с энергией  $E$ , а  $N(E, E_{\text{макс}})dE$  - число фотонов в спектре в энергетическом интервале  $E, E+dE$ ,  $E_{\text{пор}}$  - значение энергии, соответствующее порогу реакций.

Единственный способ определения поперечных сечений сводится к решению уравнения (I) и выделению величины  $\sigma_k(E)$ . Основная трудность такого рода задач состоит в неустойчивости получаемых решений, что является следствием погрешностей экспериментальных измерений. Неустойчивость решений сводится к тому, что как угодно малый разброс выходов может приводить к сколь угодно большому разбросу в сечениях. В таких условиях решение уравнения (I) в математике относится к числу некорректно поставленных задач. Различные методы решения этого уравнения не снимают проблемы, связанной с неустойчивостью решений. В математическом аспекте проблема решения некорректно поставленных задач была изучена в работах А.Н.Тихонова и др. Авторы ввели понятие регуляризирующего оператора, посредством которого выражается решение уравнения и предложили способ его определения. Этот метод применялся нами в расчетах сечений реакций расщепления. Программа, использованная нами при реше-

нии уравнения (I), была составлена Меченовым и имеется в библиотеке стандартных программ для ЭЭСМ-6. Применение этой программы для нашей задачи предполагает проведение следующей процедуры. Уравнение (I) заменяется системой линейных алгебраических уравнений, путем разбиения всего спектра на отдельные участки и задания сечений, относящихся к каждому энергетическому интервалу. Число уравнений определяется полным числом измерений, каждое из которых дает информацию о выходе реакций с соответствующей экспериментальной ошибкой при заданном спектре падающего фотонного луча. Точность определения функции возбуждения существенно зависит от величины шага в разбиении спектра, для получения более достоверного решения необходимо проведение большого количества измерений. Использование этой программы позволило рассчитать сечения целого ряда реакций фоторасщепления и получить полную картину энергетической зависимости в широкой области от порога реакций до максимальной энергии спектра.

Использование квазимонохроматического пучка фотонов имеет преимущество ввиду того, что решение интегрального уравнения (I) особенно нестабильно, когда ядро имеет слабую зависимость от энергии, как в случае непрерывного спектра фотонов при некогерентном тормозном излучении. Ошибки расчетов сечений обусловлены статистической погрешностью измеренных выходов, спектров фотонных пучков, а также точностью метода расчета ( $\sim 20-30\%$ ).

Во второй главе приведен краткий обзор работ по фоторасщеплению ядер, выполненных на фотонных пучках некогерентного тормозного излучения в области высоких энергий. Экспериментальные результаты, представленные в этой главе, относятся к измерениям выходов продуктов фоторасщепления  $Al, Si, S$ ,

$P$ ,  $Ca$  и  $Nb$  с использованием фотонов некогерентного тормозного излучения с максимальной энергией пучка 2-4,5 ГэВ. В табл. I приведены результаты измерения выходов продуктов фоторасщепления  $Nb$ . В области легких мишеней были получены новые данные по фотообразованию  $^{22}Na$  и  $^{18}F$  в диапазоне энергий  $E_{\text{макс}} = 2+4,5$  ГэВ, а также уточнены результаты ранее проведенных измерений.

Анализ продуктов расщепления  $Nb$  проводился путем изучения свойств кривых зарядового распределения изобар ( $CD$ -кривых) в различных массовых областях. При построении этих кривых использовались средние значения массовых чисел, объединяющие определенные области остаточных ядер:  $\bar{A} = 87(90 - 84)$ ,  $79(83 - 75)$ ,  $69(74 - 65)$ . Экспериментальные данные с удовлетворительной точностью аппроксимировались кривыми гауссовой формы. На рис. I приведены экспериментальные и расчетные данные выходов продуктов расщепления  $Nb$  для трех массовых областей. Для проведения более полного анализа использовались ранее измеренные нами выходы реакций фоторасщепления  $Cu$ ,  $Mn$  и  $V$ , а также данные по расщеплению этих ядер протонами,  $\alpha$ -частицами, и расчеты каскадно-испарительной модели для протон-ядерного расщепления  $Nb$ .

Результаты показали, что основные свойства зарядовых распределений остаточных ядер не зависят от сорта налетающих частиц: изобары (с массовым числом  $\bar{A}$ ), характеризующиеся максимальной вероятностью образования, в области тяжелых продуктов относятся к нейтронодефицитным ядрам и по мере уменьшения  $\bar{A}$ , максимум распределения смещается к долине стабильности. Указанная закономерность подтверждается расчетами каскадно-испарительной модели для протон-ядерных реакций, удовлетворительное согласие с моделью достигается и при сравнении ширины  $CD$ -кривых.

Выходы изобар, рассчитанные в рамках каскадно-испарительной модели для протон-ядерного расщепления существенно превосходят данные по фоторасщеплению.

Подобие характеристики  $CD$ -кривых, относящихся к расщеплению ядер частицами разного сорта, является указанием на слабую зависимость распределения остаточных ядер от сорта взаимодействующих частиц. В рамках каскадно-испарительной модели это свойство свидетельствует о существенном вкладе испарительной стадии в процесс формирования продуктов расщепления среднетяжелых элементов.

В табл. I приведены оценки выходов продуктов фоторасщепления  $Nb$ , вычисленные с использованием пятипараметрической формулы Рудстама, применяемой обычно при описании реакций расщепления. Удовлетворительное согласие с экспериментальными данными наблюдается для большинства продуктов, за исключением процессов, сопровождающихся вылетом более 40 % нуклонов из первоначального ядра, а также простых реакций.

Расщепление легких мишеней изучалось в области  $E_{\text{макс}} = 2 + 4,5$  ГэВ. Выходы хорошо согласуются с данными, известными в литературе при более низких энергиях и могут быть представлены как их логическое продолжение.

Наблюдалось постоянство выходов в пределах статистической точности измерений во всей области от 2,0 до 4,5 ГэВ, что является указанием малости сечений этих реакций в исследуемом энергетическом интервале. Выходы  $^{22}Na$  больше по абсолютной величине для всех исследуемых мишеней по сравнению с  $^{24}Na$ . Этот факт объясняется близостью изотопа  $^{22}Na$  к долине стабильности.

Наряду с общей закономерностью реакций расщепления, ка-

характеризующиеся опадом выходов по мере роста числа вылетающих нуклонов, в измеренных выходах  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{18}\text{F}$  наблюдались определенные нерегулярности, обусловленные нуклонным составом ядер, участвующих в реакции (отношением  $N/Z$  мишени и ядра-остатка). Сравнение с аналогичными данными протон-ядерных реакций показало, что указанные свойства не зависят от сорта частиц, инициирующих реакцию. В представлении двухступенчатой каскадно-испарительной модели реакции этот факт подтверждает гипотезу о вероятности формирования продуктов расщепления на стадии испарения как в среднетяжелых, так и в легких мишенях.

В третьей главе обсуждаются экспериментальные результаты исследования реакций фоторасщепления с использованием квази-монохроматических пучков когерентного тормозного излучения. Указанная методика, как показали измерения, является удобным и практически более выгодным способом получения необходимой экспериментальной информации для решения уравнения (I), включающей многократные измерения выходов реакций при различных спектральных составах фотонного пучка. Основная задача состояла в получении сечений реакций фоторасщепления и исследовании их энергетической зависимости. В главе приводится краткий обзор работ по исследованию фотоядерных реакций квазимонохроматическими фотонными пучками.

Приведены результаты проведенных измерений по фоторасщеплению мишеней  $\text{Al}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{S}$  и  $\text{Cu}$  квазимонохроматическими фотонными пучками с пиковыми энергиями 0,44; 0,545; 0,724; 0,834; 0,900; 1,050; 1,220 и 1,540 ГэВ при максимальной энергии спектров 3,75 ГэВ. Исследуемые реакции относились к фотообразованию  $^{24}\text{Na}$  и  $^{18}\text{F}$  в мишенях  $\text{Al}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{S}$  и ядер  $^{57}\text{Ni}$ ,  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{56}\text{Mn}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{52}\text{Mn}$ ,  $^{44m}\text{Sc}$ .

$^{43}\text{K}$ ,  $^{42}\text{K}$  и  $^{24}\text{Na}$  в  $\text{Cu}$ .

Для более полного представления энергетической зависимости сечений в блок входных данных при решении уравнения (I) вводились результаты измерений, полученные нами на некогерентном фотонном пучке, а также данные других работ, относящиеся к измерениям в области более низких энергий.

Результаты расчетов дают полную картину энергетического хода сечений от порога до максимальной энергии спектра фотонов с точностью 20-30%. Достоверность полученных результатов оценивалась по величине  $\chi^2$  при сравнении расчетных и экспериментальных выходов. Величина  $\chi^2$  колебалась для различных данных в области  $0,5 \leq \chi^2 \leq 1,5$ . Функции возбуждения некоторых реакций приведены на рис. 2-5.

В отличие от реакций адрон-ядерного расщепления, характерным для всех исследуемых сечений явилось наличие широкого максимума в области 340-400 МэВ и нечетко выраженного пика при энергии 720-800 МэВ. Аналогичная картина наблюдалась при исследовании фотоделения и полного фотопоглощения на ядрах. Сравнение с результатами измерений сечений полного фотонуклонного поглощения дает основание предполагать, что при расщеплении ядра первичный акт взаимодействия фотонов протекает через фотонуклонное поглощение, в рамках импульсного приближения, с учетом ферми движения нуклонов внутри ядра. Пик в области 340-400 МэВ можно отнести к процессу рождения одиночных  $\pi$ -мезонов на нуклонах ядра через  $\Delta$ -изобарный механизм ( $P_{33}$  резонанс). Пик в области энергий 720-800 МэВ проявляется более четко в реакциях с высокими пороговыми энергиями (например,  $^{44m}\text{Sc}$ ,  $^{43}\text{K}$ ,  $^{42}\text{K}$  и  $^{24}\text{Na}$  из  $\text{Cu}$ ,  $^{18}\text{F}$  из  $\text{S}$ ). Его можно считать проявлением второй резонансной области в сечении фотонуклонного взаимодействия ( $D_{13}$  резонанс).

В четвертой главе проводится систематизация выходов и сечений реакций фоторасщепления с помощью полуэмпирических формул в массовой области мишеней  $24 \leq A_m \leq 93$  и в энергетической области максимальной энергии фотонов 0,3–5,0 ГэВ.

Приведен обзор работ, в которых используются различные аппроксимирующие функции для оценки и предсказания сечения и выходов расщеплений в адрон-ядерных и фотоядерных реакциях.

В области среднетяжелых ядер  $51 \leq A_m \leq 93$  рассмотрена формула Рудстама, модернизированная для фотоядерных реакций, внесены поправки на случай вылета большого числа нуклонов (более 40 %) из ядра мишени, а также учитывающие соотношение нейтронов и протонов внутри ядра. В этой же области мишеней рассмотрена другая формула, основанная на чисто статистическом представлении реакции расщепления. Упомянутые формулы с некоторыми поправками успешно применены к фотоядерным реакциям. Методом фитирования получены наборы параметров, позволяющие рассчитать сечения и выходы реакций фоторасщепления с удовлетворительной точностью.

Для систематизации продуктов фоторасщепления легких ядер использовалась формула, учитывающая роль изоспинов ядра мишени и продуктов образования. Методом фитирования получен необходимый набор параметров, позволяющий рассчитать с удовлетворительной точностью выходы и сечения продуктов из мишеней от Mg до Ca. Степень согласия расчетных данных с экспериментальными находятся в пределах коэффициента 2 + 3.

Проведенными исследованиями показано, что известные в литературе полуэмпирические формулы, используемые для аппроксимации сечений образования остаточных ядер в адрон-ядерных реакциях могут быть применены с удовлетворительной точностью для оценок и предсказаний выходов и сечений реакций

фоторасщепления в области  $E_{\text{макс}} \leq 5$  ГэВ.

Сравнение соответствующих параметров в протон-ядерных и фотоядерных аппроксимирующих формулах позволяет выявить с одной стороны общие свойства всех реакций, с другой стороны отличия, связанные с природой взаимодействующих частиц.

В заключении кратко сформулированы основные результаты диссертационной работы, которые заключаются в следующем:

1. На базе полупроводниковых германиево-литиевых детекторов с чувствительным объемом 30 и 63 см<sup>3</sup> была собрана и построена спектрометрическая установка, состоящая из Ge(Li) детектора, малошумящего предусилителя и усилителя (системы "Лангур"), 4000-канального анализатора (типа DIDAC-4096) и ЭВМ (MULTI-8 или EC-1022).

2. Впервые проведено исследование фоторасщепления Nb, получены выходы большого количества (41) остаточных ядер.

3. Проведен анализ данных по фоторасщеплению мишеней в массовой области 51 + 93 на основе зарядового и массового распределения остаточных ядер, а также сравнения с данными адрон-ядерных реакций и расчетами каскадно-испарительной модели.

Результаты анализа показали, что определение характеристики реакций расщепления, проявляющиеся в зарядовом распределении ядер остатков, нечувствительны к природе взаимодействующих частиц. Это свойство в рамках каскадно-испарительной модели объясняется тем, что процесс формирования зарядовых распределений относится к испарительной стадии и не зависит от типа частиц, вызывающих реакцию.

4. Изучение массового распределения ядер остатков показало, что возбуждение послекаскадного ядра оказывается существенно ниже, чем предсказания каскадно-испарительной модели

для протон-ядерных реакций при той же энергии.

5. Получены новые данные по фоторасщеплению легких мишеней в массовой области  $27 + 40$  с образованием  $^{22}\text{Na}$ .

6. Проведен анализ зависимости относительных выходов  $^{22}\text{Na}$  и  $^{18}\text{F}$  от нуклонного состава мишени и остаточного ядра. Сравнение с данными протон-ядерных реакций показало, что основные характеристики процесса расщепления, обусловленные структурой ядер, слабо зависят от природы взаимодействующих частиц. Этот факт в каскадно-испарительной модели свидетельствует о роли испарения при образовании продуктов расщепления легких ядер.

7. Впервые измерены выходы реакций расщепления  $\text{Al}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{S}$  и  $\text{Cu}$  использованием квазимонохроматических фотонных пучков с пиковыми энергиями в области  $0,44\text{--}1,54$  ГэВ.

8. Предложен метод расчета сечений реакций фоторасщепления, основанный на применении известного в математике метода регуляризации, предложенного А.Н.Тихоновым для решения некорректно поставленных задач. Расчет сечений производился с использованием стандартной программы решения указанным способом системы линейных алгебраических уравнений, к которой сводится искомое интегральное уравнение. Таким способом впервые получены сечения фоторасщепления в энергетическом интервале от порога реакций до максимального значения фотонной энергии в спектре  $4,5$  ГэВ.

9. Обнаружена резонансная структура в сечении всех исследуемых реакций в мишенях  $\text{Al}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{S}$  и  $\text{Cu}$  в энергетической области выше порога образования мезонов на ядре. Первый резонанс расположен в области  $340\text{--}400$  МэВ, второй, менее четко выраженный, при энергии  $720\text{--}800$  МэВ. Относительный вклад второй резонансной области увеличивается по мере усложнения

реакций за счет вылета большого числа нуклонов.

10. Наблюдаемая структура хорошо согласуется с картиной полного фотоадронного поглощения на ядре и свидетельствует о существенном вкладе в выход реакций фоторасщепления процессов резонансного поглощения фотонов. Исходя из анализа данных по сечениям фотонуклонного взаимодействия, можно считать, что в первой резонансной области, в основном, участвует  $\text{P}_{33}$  резонанс, а вторая область характеризуется преобладающим вкладом  $\text{D}_{13}$  резонанса.

11. Проведен анализ полуэмпирических формул, предложенных в ряде работ для вычисления сечений образования остаточных ядер в протон-ядерных реакциях на легких и среднетяжелых мишенях с целью применения их при оценке выходов и средних сечений реакций фоторасщепления в массовой области  $27 + 93$  и получены соответствующие параметры в рассматриваемых энергетических областях ( $0,3\text{--}1,0$  ГэВ и  $2,0\text{--}4,5$  ГэВ).

Таблица I  
Остаточные продукты фоторасщепления  $^{93}\text{Nb}$

Оста- точное ядро	Тип вы- хода	Эксперимент $\sigma_q$ (мб)	$\sigma_{\text{экс.}}$ $\sigma_{\text{расч.}}$	Оста- точное ядро	Тип вы- хода	Эксперимент $\sigma_q$ (мб)	$\sigma_{\text{экс.}}$ $\sigma_{\text{расч.}}$
$^{92m}\text{Nb}$	I	$48,8 \pm 4,90$	9,56	83	Rb	$2,10 \pm 0,30$	2,11
$^{91m}\text{Nb}$	C	$6,80 \pm 0,70$	0,91	$^{82m}\text{Rb}$	I	$1,16 \pm 0,15$	0,65
$^{90}\text{Nb}$	C	$4,47 \pm 0,50$	0,90	81	Rb	$1,97 \pm 0,49$	1,06
$^{89}\text{Nb}$	C	$0,32 \pm 0,10$	0,17	79	Rb	$0,33 \pm 0,15$	1,00
$^{88}\text{Nb}$	C	$0,39 \pm 0,07$	0,57	77	Br	$1,18 \pm 0,20$	1,13
$^{89}\text{Zr}$	C	$6,42 \pm 0,70$	1,31	76	Br	$0,78 \pm 0,30$	0,95
$^{88}\text{Zr}$	C	$4,47 \pm 0,50$	0,97	75	Br	$0,36 \pm 0,04$	1,00
$^{87}\text{Zr}$	I	$2,24 \pm 0,40$	1,03	75	Se	$1,21 \pm 0,15$	1,79
$^{86}\text{Zr}$	I	$0,70 \pm 0,07$	0,90	73	Se	$0,38 \pm 0,08$	1,07
$^{90m}\text{Y}$	I	$0,21 \pm 0,05$	0,94	72	Se	$0,30 \pm 0,03$	2,36
$^{88}\text{Y}$	I	$1,33 \pm 0,27$	0,85	74	As	$0,29 \pm 0,06$	1,40
$^{87m}\text{Y}$	I	$0,86 \pm 0,17$	1,19	72	As	$0,51 \pm 0,05$	0,87
$^{87}\text{Y}$	I	$2,70 \pm 0,60$	0,95	71	As	$0,36 \pm 0,08$	1,06
$^{86m}\text{Y}$	I	$1,66 \pm 0,12$	2,44	67	Ga	$0,40 \pm 0,03$	1,45
$^{86}\text{Y}$	I	$2,67 \pm 0,44$	0,93	66	Ga	$0,28 \pm 0,13$	2,15
$^{85m}\text{Y}$	C	$1,97 \pm 0,90$	2,44	65	Zn	$0,43 \pm 0,05$	1,89
$^{85}\text{Y}$	C	$3,35 \pm 0,55$	0,93	58	Co	$0,40 \pm 0,12$	4,40
$^{84}\text{Y}$	C	$0,79 \pm 0,08$	0,93	57	Co	$0,44 \pm 0,3$	10,50
$^{83}\text{Sr}$	C	$2,17 \pm 0,30$	1,03	54	Mn	$0,12 \pm 0,04$	2,40
$^{82}\text{Sr}$	C	$2,08 \pm 0,21$	2,32	46	Sc	$0,14 \pm 0,05$	15,40
$^{84}\text{Rb}$	I	$0,52 \pm 0,06$	1,21				

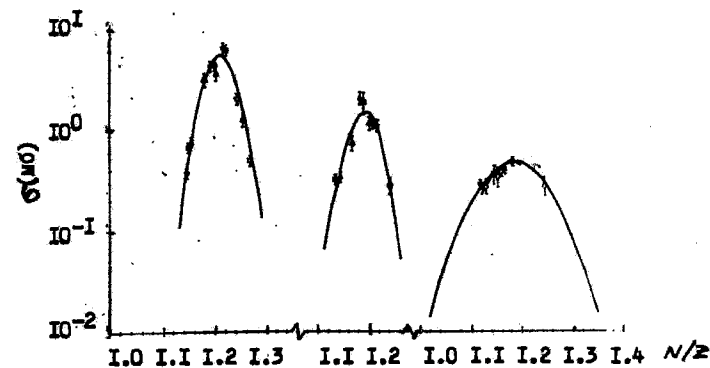


Рис. I. Кривые зарядового распределения продуктов фотоядерных реакций  $\text{Nb} + \gamma$  для массовых интервалов: 90 - 83 ( $\bar{A} = 87$ ), 82 - 75 ( $\bar{A} = 79$ ), 74 - 65 ( $\bar{A} = 69$ ). Точки:  $\bullet$  - Nb,  $\blacksquare$  - Zr,  $\blacktriangle$  - Y,  $\circ$  - Sr,  $\square$  - Rb,  $\triangle$  - Br,  $\nabla$  - Se,  $\dagger$  - As,  $\diamond$  - Ga,  $\times$  - Zn,  $\nabla$  - Co.

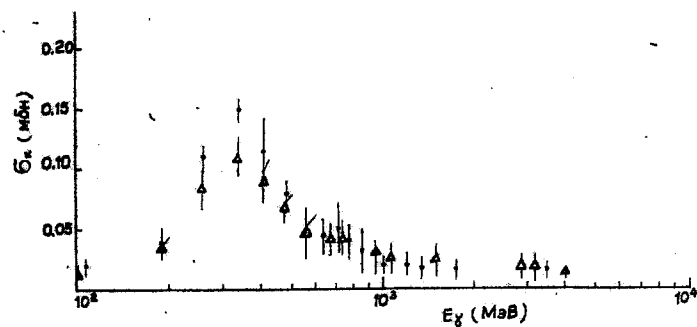


Рис. 2. Функция возбуждения реакции  $Si - {}^{24}Na$ . Расчетные значения получены по формуле (I),  $\Delta$  - по нашим экспериментальным данным,  $\bullet$  - по дополнительным данным из работ с  $E_{\text{макс}} = 0,3-1,0$  ГэВ.

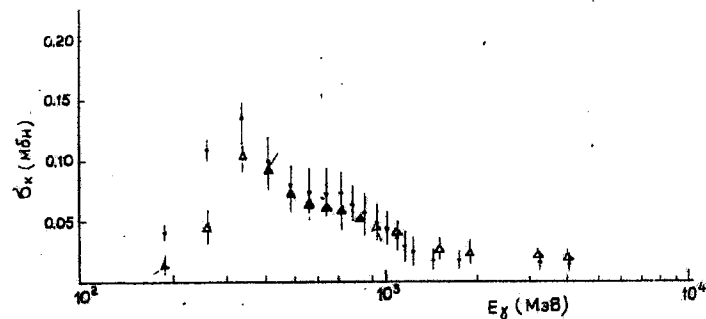


Рис. 3. Функция возбуждения реакции  $S - {}^{18}F$ . Обозначения те же, что на рис. 2.

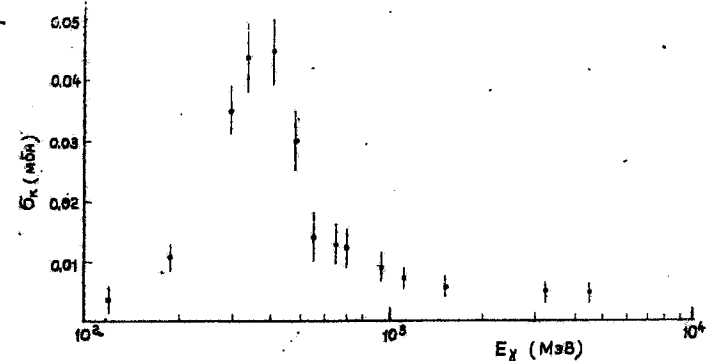


Рис. 4. Функция возбуждения реакции  $Cu - {}^{57}Ni$ , рассчитанная по формуле (I).

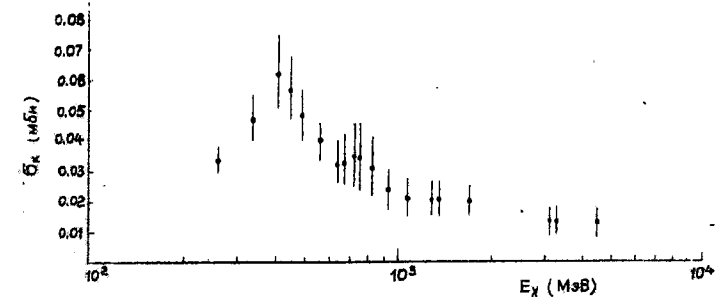


Рис. 5. Функция возбуждения реакции  $Cu - {}^{42}K$ , рассчитанная по формуле (I).

Основное содержание диссертационной работы  
отражено в следующих публикациях:

1. Бахшецян Р.А., Вартапетян Г.А., Григорян Е.О., Данагулян А.С., Демехина Н.А., Худавердян А.Г., Чатрчян Д.С. Исследование взаимодействия фотонов высоких энергий с ядрами  $^{51}\text{V}$  и  $^{55}\text{Mn}$ , Си. - Препринт БФН-146(75), Ереван, 1975. - 41 с.
2. Вартапетян Г.А., Демехина Н.А., Худавердян А.Г., Григорян Е.О., Данагулян А.С. Расщепление ядра  $^{55}\text{Mn}$  фотоном с максимальной энергией от 2 до 5 ГэВ. - Ядерная физика, 1975, т. 22, с. 433-439.
3. Вартапетян Г.А., Григорян Е.О., Данагулян А.С., Демехина Н.А., Худавердян А.Г., Чатрчян Д.С. Расщепление  $^{51}\text{V}$  фотонами с максимальной энергией от 2 до 5 ГэВ. - Изв. АН Арм.ССР, 1975, 10, с. 251-257.
4. Асатурян Е.М., Григорян Е.О., Вартапетян Г.А., Данагулян А.С., Демехина Н.А., Худавердян А.Г. Реакции в легких ядрах под действием тормозных фотонов при максимальных энергиях от 2 до 4,5 ГэВ. - Ядерная физика, 1977, т. 25, вып. 6, с. 1133-1139.
5. Вартапетян Г.А., Григорян Е.О., Данагулян А.С., Демехина Н.А., Худавердян А.Г. Зарядовое распределение остаточных ядер при фоторасщеплении  $^{93}\text{Nb}$ . - Ядерная физика, 1981, т. 34, вып. 2(8), с. 289-298.
6. Григорян Е.О., Демехина Н.А. Зарядовые распределения средне-тяжелых ядер фотонами в области  $E_{\gamma} \leq 4,5$  ГэВ. - Препринт БФН-476(19)-81, Ереван, 1981. - 19 с.

7. Григорян Е.О., Демехина Н.А. Расчет выходов и сечений реакций фоторасщепления с помощью полуэмпирических формул. I. Мишени в области  $51 \leq A_z \leq 93$ . - Ученые записки ЕГУ, 1984, 1(155), с. 66-72.
8. Григорян Е.О., Демехина Н.А. Расчет выходов и сечений реакций фоторасщепления с помощью полуэмпирических формул. II. Мишени в области  $27 \leq A_z \leq 49$ . - Ученые записки ЕГУ, 1984, 2(156), с. 60-66.
9. Авакян А.Р., Вартапетян Г.А., Григорян Е.О., Демехина Н.А. Фоторасщепление легких ядер когерентным и некогерентным тормозным излучением от электронов высоких энергий. - Препринт БФН-764(79), Ереван, 1984. - 21 с.
10. Авакян А.Р., Вартапетян Г.А., Григорян Е.О., Демехина Н.А. Энергетическая зависимость сечений некоторых реакций фоторасщепления меди под действием когерентных и некогерентных фотонных пучков. - Препринт БФН-765(80), Ереван, 1984, 18 с.
11. Григорян Е.О., Худавердян А.Г., Безвержкая А.П., Демехина Н.А. Исследование функций возбуждения реакций фотообразования  $^{24}\text{Na}$  и  $^{18}\text{F}$  из мишеней Al, Si, S с использованием квазимонохроматического пучка фотонов. - Изв. АН Арм.ССР, 1985, т. 20, вып. 2, с. 69-74.

Технический редактор А.С.Абрамян

---

Подписано в печать 19.04.85г.

Офсетная печать ВФ-0894

Заказ № 182

Формат 60x84/16

Тираж 170 экз.

---

Отпечатано в Ереванском физическом институте  
Ереван 36, Маркаряна 2