

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

90 947

3-87-381

УДК 539.172.4

Фунг Ван Зуан

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ (n,p)
НА РАДИОАКТИВНЫХ ЯДРАХ

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1987

Научная новизна. В данной работе впервые удалось экспериментально получить зависимость сечения реакции (n, p) на радиоактивном ядре ${}^7\text{Be}$ от энергии падающих нейтронов вплоть до 0,5 кэВ. Экспериментально получено ранее неизвестное сечение реакции (n, p) на тепловых нейтронах для радиоактивного ядра-мишени ${}^{36}\text{Cl}$. По нейтронной реакции с вылетом протонов для ранее не исследованного радиоактивного ядра-мишени ${}^{88}\text{Y}$ удалось получить первую информацию об усредненном сечении в области энергий нейтронов $E_n \approx (30 - 800)$ эВ, а также аргументы о возможности двухступенчатой реакции ${}^{88}\text{Y}(n, \gamma p)$.

Практическая ценность. Разработанная и реализованная методика идентификации и спектрометрии низкоэнергетических заряженных частиц на основе ионизационной камеры с двумя сетками может заменить традиционный метод телескопа (работающего на основе ΔE - и E -детекторов) в ряде случаев, когда требуются большая светосила, высокая эффективность регистрации, и в условиях плохого энергетического разрешения детектора, в частности, для исследования ядерных реакций с малым выходом заряженных частиц, в том числе и реакции (n, p) в области медленных нейтронов на радиоактивных ядрах. Полученная при помощи представленной методики экспериментальная информация о реакции (n, p) на радиоактивных ядрах ${}^7\text{Be}$, ${}^{36}\text{Cl}$ и ${}^{88}\text{Y}$ в области медленных нейтронов способствует расширению исследования протонного канала распада компаунд-состояний ядер, экспериментальные данные о котором еще крайне скудны. Полученное сечение реакции ${}^{36}\text{Cl}(n, p)$ на тепловых нейтронах представляет также практический интерес - оно открывает принципиально новую возможность определения соотношения концентрации изотопов ${}^{36}\text{Cl}/{}^{35}\text{Cl}$, что может быть использовано в некоторых случаях для датировки образцов и изотопной хронологии.

На защиту выносятся:

1. Разработанная методика с использованием ионизационной камеры с двумя сетками для идентификации и спектрометрии низкоэнергетических заряженных частиц с близкой энергией, но различным значением произведения их массы на заряд.

2. Реализованные два варианта разработанной методики. Вариант с полной схемой измерительной аппаратуры позволяет проводить многомерные измерения и гибкую обработку накопленной экспериментальной информации с помощью ЭВМ. Упрощенный вариант позволяет применять методику при использовании самых распространенных блоков электроники, не требуя ни сложных измерительных модулей во время накопления информации, ни ЭВМ для ее обработки, что делает методику подходящей и для тех мест, где работают в скромных условиях.

3. Результат исследования реакции (n, p) на радиоактивном ядре ${}^7\text{Be}$ в области энергий нейтронов E_n вплоть до 0,5 кэВ.
4. Результаты исследования реакции (n, p) на тепловых нейтронах для радиоактивного ядра-мишени ${}^{36}\text{Cl}$.
5. Результаты исследования нейтронной реакции с вылетом протонов для радиоактивного ядра-мишени ${}^{88}\text{Y}$ в области энергий $E_n < 1$ кэВ.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на У Всесоюзном семинаре "Программа экспериментальных исследований на мезонной фабрике ИЯИ АН СССР" (Звенигород, 1987), на ученом совете по физике низких энергий ОИЯИ, были представлены на ХХХУП Собрании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Юрмала, 1987), отправлены в качестве докладов на 7-ю Всесоюзную конференцию по нейтронной физике (Киев, сентябрь, 1987).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 6 работ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав и выводов. Работа изложена на 134 страницах машинописного текста, включая 18 рисунков, 4 таблицы и список литературы из 170 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении отмечена актуальность исследования реакции (n, p) на медленных нейтронах, сформулированы цели работы и перечислены основные результаты.

В первой главе дан краткий обзор исследований протонного распада радиоактивных ядер и компаунд-состояний. Излагаются основные моменты в изучении протонного распада радиоактивных ядер. Анализирована роль реакции (n, p) при решении практических задач в ядерной технике и при рассмотрении вопроса о моделях ядерной реакции, а также потребность в исследовании протонного распада нейтронных резонансов для изучения структуры атомного ядра. Рассмотрены основные особенности протонного распада компаунд-состояний, образуемых при взаимодействии нейтронов с ядрами. Проанализирована обстановка в экспериментальном исследовании реакции (n, p) на медленных нейтронах. Уделено большое внимание вопросам изучения усредненной приведенной протонной ширины и протонной силовой функции, которые пока мало исследованы.

Вторая глава посвящена разработанной нами методике идентификации и спектрометрии низкоэнергетических заряженных частиц на основе ионизационной камеры с двумя сетками (ИКС).

Проанализированы основные трудности при использовании радиоактивных ядер-мишеней и традиционных методов идентификации и спектро-

метрии низкоэнергетических заряженных частиц для исследования реакции (n, p) на радиоактивных ядрах с помощью медленных нейтронов. Отсюда следует потребность в разработке новой методики для идентификации и спектрометрии протонов из исследуемых реакций (n, p) .

Изложена основа методики с использованием ИКДС для идентификации и спектрометрии низкоэнергетических заряженных частиц, в том числе и протонов. Получены формулы для расчета амплитудного спектра сигналов, снимаемых с мишени, помещенной на катоде ИКДС. Показана характерная форма этого спектра с мишени. Для иллюстрации на рис. I представлены экспериментальные спектры с мишени ИКДС для тритонов с энергией 2,73 МэВ (кривая 1) и α -частиц с энергией 2,05 МэВ (кривая 2) из реакции ${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ на тепловых нейтронах. (Спектры были получены при энергетическом разрешении детектора ≈ 200 кэВ для тритонного пика). Максимум у левого края кривой 1 является характерным для случая, когда пробег заряженных частиц R больше, чем расстояние d между мишенью и дополнительной сеткой, расположенной между катодом и экранирующей сеткой камеры. При этом чем больше отношение R/d , тем больше доля частиц, амплитуда сигнала с мишени для которых попадает в область характерного максимума. На кривой 2 относительно узкое распределение является характерным для случая, когда $R < d$; причем чем меньше отношение R/d , тем уже оно становится. Такая характерная форма спектра с мишени используется в методике: измерив два амплитудных спектра в режиме совпадений - один снятый с мишени, а

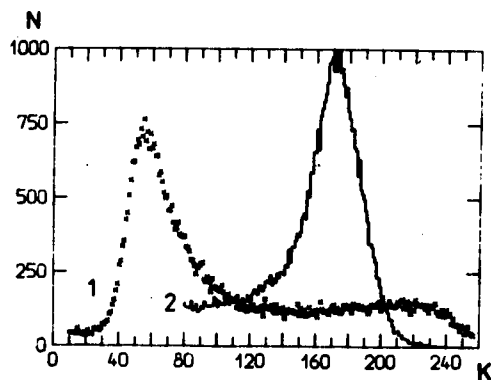


Рис. I. Амплитудные спектры с мишени (катод) ИКДС для тритонов (1) и α -частиц (2) из реакции ${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$. N и K (на всех рисунках) - число отсчетов и номер канала соответственно.

другой с коллектора ИКДС, и затем, обрабатывая амплитудный спектр с коллектора в подходящем "окне" спектра с мишени, соответствующем определенным потерям энергии частиц в объеме между мишенью и дополнительной сеткой, можно идентифицировать низкоэнергетические заряженные частицы с близкой энергией, но различным значением произведения их массы на заряд, а также существенно подавить фон, улучшить отношение эффекта к фону и осуществлять отбор частиц по их углу вылета из мишени.

Описаны изготовленный двухсекционный детектор, состоящий из двух идентичных плоских ИКДС с общим катодом, и варианты реализации методики. Вариант с полной схемой измерительной аппаратуры позволяет проводить многомерные измерения и гибкую обработку накопленной экспериментальной информации с помощью ЭВМ для получения временных и амплитудных спектров при различных условиях отбора частиц. Упрощенный вариант позволяет применять методику при использовании самых простых и распространенных блоков электроники (а именно: быстрый интегральный дискриминатор, быстрый формирователь прямоугольного сигнала, линейные ворота и амплитудный анализатор), не требуя ни сложных измерительных модулей, ни ЭВМ при накоплении и обработке информации. Именно это делает методику подходящей и для тех мест, где работают в скромных условиях.

Показаны перспективность и эффективность работы методики с использованием ИКДС для идентификации и спектрометрии низкоэнергетических заряженных частиц. В качестве иллюстрации на рис. 2 (а, б, в) представлены амплитудные спектры с коллектора ИКДС, полученные при

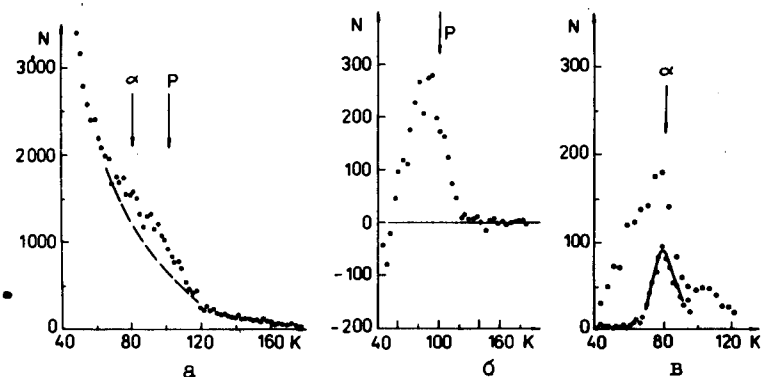


Рис. 2. Амплитудные спектры с коллектора (анод) ИКДС, полученные в разных окнах (а, б, в) спектра с мишени при исследовании реакции ${}^{36}\text{Cl}(n, p){}^{36}\text{S}$. Стрелки P и α показывают положения пиков протонов (P) и α -частиц (α).

исследовании реакции (n,p) на радиоактивном ядре-мишени ^{36}Cl в области энергий нейтронов $E_n < 0,5$ эВ с помощью полного варианта измерительной аппаратуры соответственно: а) в "полном окне" спектра с мишени (т.е. без отбора); б) в "протонном окне", которое охватывает характеристический максимум в спектре с мишени для протонов с энергией 1,88 МэВ из реакции $^{36}\text{Cl}(n,p)^{36}\text{S}$; в) в окнах α -частиц из реакции (n,α) на микропримеси изотопа ^{10}B в веществе мишени ^{36}Cl : светлые кружки - достаточно широкое окно, включающее отсчеты от всех α -частиц, независимо от угла вылета из мишени; черные точки - узкое окно около характеристической максимальной амплитуды $V_{\text{max}} \sim E_\alpha = 1,47$ МэВ, которое включает только отсчеты от α -частиц, вылетающих из поверхностного слоя мишени почти под скользким углом ($\theta \approx 90^\circ$). Видно, что угловой отбор с помощью узкого окна амплитудного спектра с мишени позволяет установить положение пика и получить энергетическое разрешение как и для случая тонкой мишени, хотя и использовалась толстая мишень.

На рис.3 показаны амплитудные спектры заряженных частиц из реакции $^6\text{Li}(n,t)^4\text{He}$, полученные с помощью упрощенного варианта в режиме работы без отбора (а) и с отбором (в) соответственно за одинаковое время измерения. Очевидно, в режиме с отбором (в) отсчеты

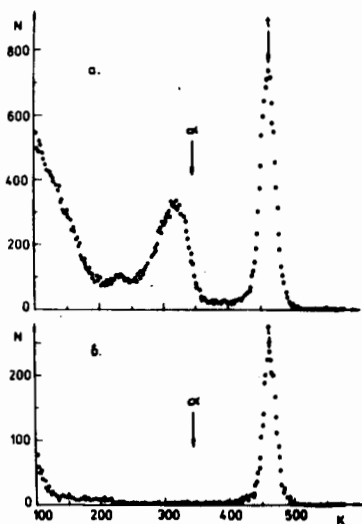


Рис.3. Амплитудные спектры заряженных частиц из реакции $^6\text{Li}(n,t)^4\text{He}$, полученные при использовании упрощенного варианта в режиме работы без отбора (а) и с отбором частиц (в) соответственно.

α -частиц с энергией $E_\alpha \approx (1-2)$ МэВ полностью подавлены и фон значительно снизился, а эффективность регистрации тритонов уменьшилась только в 3 раза. В случае, когда нужно подавить отсчеты α -частиц с энергией $E_\alpha \geq 1,5$ МэВ, эффективность регистрации тритонов (или протонов) можно повысить путем расширения окна спектра с мишени.

Вопросу определения эффективности регистрации с отбором частиц уделено большое внимание; приведены приближенные формулы, которые являются полезными и удобными для экспериментаторов при планировании эксперимента и обработке экспериментальной информации.

Представленная методика позволяет осуществлять измерения почти в 2π -геометрии на мишени большой площади (≈ 500 см² в нашей ИКДС), что особенно важно в исследовании реакции с использованием нейтронных пучков большого сечения при малом выходе заряженных частиц. Она может заменить традиционный метод телескопа (который работает на основе ΔE - и E -детекторов) в ряде случаев, когда требуются большая светосила, высокая эффективность регистрации, и в условиях плохого энергетического разрешения.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию реакции (n,p) на трех радиоактивных ядрах ^7Be , ^{36}Cl и ^{88}Y с помощью разработанной нами методики. Приведены принципы выбора ядер-мишеней для исследования реакции (n,p) на медленных нейтронах. Описаны эксперименты, представлены их результаты и обсуждения.

Исследование реакции (n,p) на ядрах ^7Be и ^{88}Y было выполнено на импульсном реакторе ИБР-30 в ЛНФ ОИЯИ (Дубна), а реакции $^{36}\text{Cl}(n,p)^{36}\text{S}$ - на стационарном реакторе ВВР-М в ИЯИ АН УССР (Киев).

Для сечения реакции $^7\text{Be}(n,p)^7\text{Li}$ при переходах составного ядра ^8Be в основное и первое возбужденное состояния остаточного ядра ^7Li получены значения $\sigma_{p_0} = (5 \pm 1) \cdot 10^4$ барн и оценка $\sigma_{p_1}/\sigma_{p_0} \leq 10^{-2}$. Впервые получена зависимость сечения реакции $^7\text{Be}(n,p)$ от энергии падающих нейтронов E_n вплоть до 0,5 кэВ. Она представлена на рис.4. В области $E_n < 140$ эВ сечение подчиняется закону $1/v$, где v - скорость нейтронов. В районе $E_n \approx (140-200)$ эВ в двух независимых измерениях наблюдалось отклонение сечения от закона $1/v$. Это отклонение можно интерпретировать как указание на возможность наличия узкого резонанса на нейтронах, по-видимому, с орбитальным моментом $l \neq 0$. Исследование распада составного ядра ^8Be связано с проблемой несохранения пространственной четности в ядерной реакции. При этом важным остается выяснение вопроса о том, что вблизи энергии возбуждения составного ядра ^8Be , равной энергии связи нейтрона, нет состояний со спином и четностью $J^\pi = 2^+$, которые могут образоваться

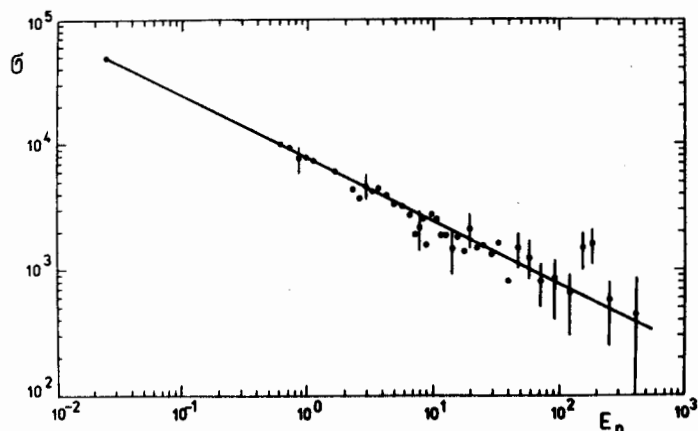


Рис.4. Зависимость сечения реакции ${}^7\text{Be}(n,p){}^7\text{Li}$ σ (барн) от энергии падающих нейтронов E_n (эВ). Точки - эксперимент; сплошная линия - расчетная кривая согласно закону $1/v$.

при захвате ядром-мишенью ${}^7\text{Be}$ нейтронов с нечетным значением орбитального момента l . Результаты обсуждены совместно с имеющейся сейчас скудной информацией о высоковозбужденных состояниях составного ядра ${}^8\text{Be}$ в области энергии связи нейтрона.

При исследовании реакции ${}^{36}\text{Cl}(n,p){}^{36}\text{S}$ был применен упрощенный вариант методики с использованием ИКДС. На рис.5 представлен амплитудный спектр с коллектора ИКДС с мишенью ${}^{36}\text{Cl}$ на катоде. Впервые получено сечение данной реакции на тепловых нейтронах. Этот результат открывает принципиально новую возможность определения с помощью реакции (n,p) соотношения концентрации изотопов ${}^{36}\text{Cl}/{}^{35}\text{Cl}$, что может быть использовано в некоторых случаях для датировки образцов и изотопной хронологии. Полученные результаты по реакции ${}^{36}\text{Cl}(n,p){}^{36}\text{S}$ на медленных нейтронах могут быть полезны для исследования процессов ядерных превращений и объяснения изотопного состава химических элементов в астрофизических объектах, а также при рассмотрении вопроса об источнике нейтронов для s - и r -процессов нуклеосинтеза, что представляет интерес в ядерной астрофизике.

Исследование реакции (n,p) на радиоактивном ядре-мишени ${}^{89}\text{Y}$ было проведено впервые. Получена предварительная информация об усредненном сечении реакций с вылетом протонов, которое, по-видимому, слабо меняется в области энергий нейтронов $E_n \approx (30-800)$ эВ, $\langle \sigma_p \rangle \sim 3 \cdot 10^{-2}$ барн, а также об усредненном параметре $A_p^* = \overline{E_p} / \overline{E} \sim (0,2-4) \cdot 10^{-2}$ эВ в этой области E_n . Обсуждаются аргументы о возможном усилении каналов распада составного ядра ${}^{89}\text{Y}$.

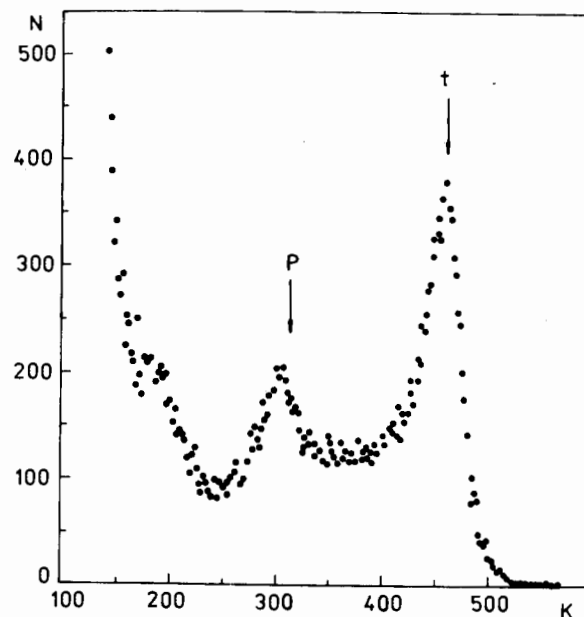


Рис.5. Амплитудный спектр, полученный при исследовании реакции ${}^{36}\text{Cl}(n_{th},p){}^{36}\text{S}$ с помощью упрощенного варианта методики. Стрелки P и t показывают положения пиков протонов (P) исследуемой реакции и тритонов (t) из реакции (n_{th},t) на микропримеси изотопа ${}^6\text{Li}$.

испусканием протонов и о возможности двухступенчатой реакции $(n,\gamma p)$ на ядре-мишени ${}^{88}\text{Y}$. Предложен эксперимент по обнаружению двухступенчатой реакции $(n,\gamma p)$, которая практически еще не исследована, но в то же время может служить одним из источников экспериментальной информации о силовой функции мягких γ -переходов между компаунд-состояниями - информации, особенно важной для проверки некоторых моделей о механизме ядерных реакций, а также для проведения более реалистических расчетов и анализа возможного влияния лазерного излучения на протекание ядерных реакций.

Выводы представляют собой основные результаты выполненной работы, которые выносятся на защиту:

I. Разработана методика с использованием ионизационной камеры с двумя сетками для идентификации и спектрометрии низкоэнергетических заряженных частиц с близкой энергией, но различным значением произведения их масс на заряд, а также для существенного подавления фона.

По сравнению с традиционным методом телескопа (на основе ΔE - и E -детекторов) представленная методика может уступать по разрешающей способности, но зато выигрывает по светосиле в десятки (или даже в сотни) раз (благодаря большой площади используемой мишени), и в несколько раз выигрывает по эффективности регистрации (благодаря 2JТ-геометрии измерения, что крайне трудно делать с помощью традиционного телескопа).

2. Предложены и осуществлены два варианта схемы используемой измерительной аппаратуры в сочетании с двухсекционным детектором, состоящим из двух идентичных плоских ионизационных камер с двумя сетками, имеющих общий катод. Вариант с полной схемой позволяет проводить многомерные измерения и гибкую обработку накопленной экспериментальной информации с помощью ЭВМ для получения разных амплитудных и временных спектров при различных условиях отбора частиц. Упрощенный вариант позволяет применять методику для отбора заряженных частиц при использовании распространенных блоков электроники, не требуя ни сложных измерительных модулей во время накопления информации, ни ЭВМ для ее обработки.

3. Впервые получена энергетическая зависимость сечения реакции ${}^7\text{Be}(n,p){}^7\text{Li}$ в области энергий нейтронов E_n вплоть до 0,5 кэВ. При $E_n < 140$ эВ сечение подчиняется закону $1/v$ (где v - скорость нейтронов). В области $E_n \approx (140-200)$ эВ получено указание на отклонение сечения от закона $1/v$, которое, вероятно, можно интерпретировать как наличие узкого резонанса на нейтронах с отличным от нуля орбитальным моментом.

4. Впервые измерено тепловое сечение реакции ${}^{36}\text{Cl}(n,p){}^{36}\text{S}$ $\sigma_p = (0,4 \pm 0,1)$ барн. Этот результат открывает принципиально новую возможность определения с помощью реакции (n,p) соотношения концентрации изотопов ${}^{36}\text{Cl}/{}^{35}\text{Cl}$, что может быть использовано в некоторых случаях для датировки образцов и изотопной хронологии.

5. Получены оценки усредненного по резонансам сечения реакции ${}^{88}\text{Y}(n,p){}^{88}\text{Sr}$, слабо меняющегося в области энергий нейтронов $E_n \approx (30-800)$ эВ.

6. Обсуждается возможность реакции $(n,\gamma p)$ на ядре-мишени ${}^{88}\text{Y}$. Предложен эксперимент по обнаружению этой двухступенчатой реакции, которая может служить одним из источников небогатой пока экспериментальной информации о силовой функции мягких γ -переходов между компаунд-состояниями.

Работы, положенные в основу диссертации:

1. Антонов А.Д., Гledenov Д.М., Квиткова Н.И., Митриков М.П., Митрикова Р.С., Островная Т.М., Тишин В.Г., Фунг Ван Зуан. Методика идентификации низкоэнергетичных заряженных частиц на осях ионизационной камеры с двумя сетками. - Дубна, 1986. - 8 с. (Сообщение / Объед.ин-т ядерн.исслед.: P3-86-344).
2. Гledenov Д.М., Зварова Т.С., Митриков М.П., Митрикова Р.С., Попов Д.П., Салацкий В.И., Фунг Ван Зуан. Исследование реакции ${}^7\text{Be}(n,p){}^7\text{Li}$ в области энергии нейтронов от 0,025 до 500 эВ. - В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, № 17-86, Дубна, 1986, с.36-40.
3. Гledenov Д.М., Зварова Т.С., Квитек И., Митриков М.П., Митрикова Р.С., Попов Д.П., Салацкий В.И., Фунг Ван Зуан. Исследование распада ${}^8\text{Be}$, возбужденного до энергии связи нейтрона. - В кн.: Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. (Тезисы докладов XXXУП Совещания). - Л.: Наука, 1987, с.298.
4. Гledenov Д.М., Квиткова Н.И., Митриков М.П., Митрикова Р.С., Тишин В.Г., Фунг Ван Зуан. Использование ионизационной камеры с двумя сетками для спектрометрии протонов из реакции (n,p) на медленных нейтронах. - В кн.: Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. (Тезисы докладов XXXУП совещания). - Л.: Наука, 1987, с.404.
5. Гledenov Д.М., Квиткова Н.И., Митриков М.П., Митрикова Р.С., Тишин В.Г., Фунг Ван Зуан. Идентификация и спектрометрия низкоэнергетичных заряженных частиц при помощи ионизационной камеры с двумя сетками. - Дубна, 1987. - 8 с. - (Препринт / Объед.ин-т ядерн.исслед.: I3-87-150).
6. Анджеевски Д., Вертебный В.П., Гledenov Д.М., Гребнев А.В., Зварова Т.С., Митриков М.П., Попов Д.П., Пшеничный В.А., Салацкий В.И., Фунг Ван Зуан. Измерение теплового сечения реакции ${}^{36}\text{Cl}(n,p){}^{36}\text{S}$. - Дубна, 1987. 8 с. - (Сообщение / Объед.ин-т ядерн.исслед.: P3-87-319).

Рукопись поступила в издательский отдел
3 июня 1987 года.