

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАНА

НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА

им. М. УЛУГБЕКА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

На правах рукописи

УДК 539.122 + 546.45

МАХМУДОВ СИРОЖИДДИН КОМИЛЕВИЧ

СПЕКТР ГАММА ЛУЧИ ИЗ РЕАКЦИИ $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$

5A140205 – физика атомного ядра и элементарных частиц, ускорительная
техника

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание степени

Магистра

Научный руководитель:
д.ф.-м.н., с.н.с.И.Холбаев

Ташкент – 2018

АННОТАЦИЯ

При энергиях налетающих протонов до $E_p=2,0$ МэВ были определены энергии и выход резонансов в реакциях радиационного захвата протонов $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ на пучке электростатического ускорителя ЭГ-2 Сокол НУУз. Установлено γ -распад 53 резонансов и 15 нерезонансных уровней, из них четыре уровни с энергиями $E_{\gamma p} = 9793,8 \pm 2,0$, $10513,5 \pm 1,0$, $10884,1 \pm 2,0$ и $11778,8 \pm 1,5$ кэВ новые. Установлено, что уровень при $E_{\gamma p} = 11,43$ МэВ является дублетом. Угловые распределения гамма-лучей измерялись при углах 0° , 45° и 90° .

ANNOTATION

At energies of incident protons up to $E_p = 2.0$ MeV, the energies and the yield of resonances in the reactions of radiative capture of protons $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ on the beam of the EG-2 electrostatic accelerator Sokol of the National University of Uzbekistan were determined. The γ decay of 53 resonances and 15 nonresonance levels is established, of which four levels with energies $E_{\text{level}} = 9793.8 \pm 2.0$, 10513.5 ± 1.0 , 10884.1 ± 2.0 and 11778.8 ± 1.5 keV are new. It is established that the level at $E_{\text{level}} = 11.43$ MeV is a doublet. Angular distributions of gamma rays were measured at angles 0° , 45° and 90° .

РЕЗЮМЕ

Ўзбекистон Миллий университети Сокол русумли ЭГ-2 электростатик тезлатгичи ионлари дастасида энергияси 2,0 МэВ гача бўлган протонларнинг радиациявий ютилиш реакцияси $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ ўрганилди. Натижада 53 резонанс ва 15 норезонанс тарзида ҳосил бўладиган энергетик ҳолатларнинг гамма-парчаланиши аниқланган. Улардан энергияси $E_{\text{ҳолат}} = 9793,8 \pm 2,0, 10513,5 \pm 1,0, 10884,1 \pm 2,0$ и $11778,8 \pm 1,5$ кэВ бўлганлари биринчи маротаба аниқланган. Энергияси $E_{\text{ур}} = 11,43$ МэВ бўлган ҳолат дублет эканлиги аниқланган. Гамма нурларнинг фазовий тақсимоти $0^\circ, 45^\circ$ ва 90° бурчакларда ўлчанган.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
ГЛАВА I. ОСОБЕННОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГАММА ЛУЧЕЙ В РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ	11
1.Гамма излучение.....	11
1.2.Гамма спектроскопия.....	14
1.3.Выводы к 1 части.....	14
ГЛАВА II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ	17
2.1.Электростатические ускорители.....	17
2.2.Электростатический ускоритель ЭГ-2 СОКОЛ НУУз.....	21
2.2.1.Конструкция и характеристики электростатического ускорителя ЭГ – 2 СОКОЛ НУУз.....	22
2.2.2.Камера для измерения спектров гамма – лучей и их угловых распределений индуцированных ионным пучком ускорителя	28
2.2.3.Гамма спектрометр	29
2.2.4. Выводы к 2 части.....	30
ГЛАВА III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ	31
3.1.Калибровка энергетической шкалы ускорителя ЭГ-2 СОКОЛ НУУз.....	31
3.2.Гамма-лучи и их угловое распределение из реакции $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$	32
3.2.1. Введение.....	32
3.2.2. Экспериментальные результаты.....	35
3.2.3. Результаты измерений угловых распределений гамма-лучей.....	44
3.2.4. Сравнение некоторых экспериментальных результатов с расчетами.....	47
3.2.5. Выводы к 3 части.....	48
Заключение	49
Цитированная литература	51

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. В большинстве ядерных реакциях помимо образования разных вторичных частиц, такие как протоны, нейтроны, и альфа-частицы, остаточные ядра во многих случаях находятся в возбужденных состояниях, которые разряжаются испусканием гамма-лучей. Существует отдельный класс ядерных реакций, в которых поглощение падающей частицы в ядре-мишени, сопровождается испусканием гамма-излучения. Например, реакции (p,γ) и (n,γ) . Эти ядерные реакции известны как реакции радиационного захвата и формируют важный класс ядерных реакций по двум главным причинам. Во-первых, реакция радиационного захвата - одна из самых важных реакций для формирования различных разновидностей элементов во Вселенной. Во-вторых, их изучение позволяет получить важную информацию о свойствах большого числа возбуждаемых ядерных состояний.

Исследование захвата заряженных частиц важно для определении свойств ядерных состояний по следующим причинам [1]:

- Энергия реакции Q для радиационного захвата протонов и альфа частиц положительная и изменяются в широких пределах 1 - 17 МэВ в легких ядрах и 5 - 8 МэВ в более тяжелых ядрах. Это означает, что составное ядро сильно возбуждается в легких ядрах, а в тяжелых ядрах ожидается высокая плотность резонансных состояний. Современная аппаратура для исследования процесса радиационного захвата частиц позволяет получать информации о большом разнообразии резонансных ядерных состояний.
- Захват заряженных частиц от хорошо коллимированного пучка часто возбуждают в ядре мишени сильно ориентированные резонансные состояния, обусловленное, тем что орбитальный угловой момент частицы в ионном пучке и ядро-мишени

находятся под прямым углом к направлению движения ионного пучка. Следовательно, проекция орбитального углового момента вдоль направление движения равна нулю. В самом простом случае захвата альфа-частиц четно-четными ядрами в резонансе с угловым моментом J , заселяются только подсостояния с магнитным квантовым числом $M_J=0$. Такая сильная заселения часто приводит к заметному изменению углового распределения гамма-излучения радиационного захвата, которые имеют большое значение для определения квантовых чисел и других свойств ядерных состояний. В более сложной ситуации, когда если ядро мишень и налетающая частица имеют спин отличный от нуля может наблюдается сильная заселения резонансного состояния.

- Энергия E и энергетический разброс ΔE ионных пучков от электростатических ускорителей может иметь значения $E/\Delta E > 10^4$. Это позволяет проводить более точные исследования многих близко лежащих не связанных возбужденных состояний ядер, чем, например, исследования ядерных реакций с применением магнитной спектрометрии заряженных частиц на пучках. Узкие резонансы шириной Γ при энергии бомбардирующих частиц E со значениями $E/\Gamma > 10^4$ встречаются часто и они представляют большой теоретический интерес. Известно, что ядерные состояния с высоким моментом или изоспином часто имеют большие значения E/Γ . В случае перекрывающихся резонансов, изучение интерференционных эффектов может быть плодотворным источником дополнительной информации, касающихся свойств близко лежащих несвязанных состояний (например, относительные фазы, ширины, четности), которые не доступны с другими методами.
- В дополнение к изучению резонансных ядерных состояний, представляющих особый интерес, с большими значениями E/Γ ,

имеются большое количество других наблюдаемых резонансных состояний свойство которых необходимо изучать. Это позволяет получить дополнительную информацию к данным по изучению гамма-лучей после бета-распада ядер. Ядерные состояния, возбуждаемые при бета-распаде, часто ограничены правилами отбора по угловому моменту и четности, а в процессе радиационного захвата могут заселяться резонансные состояния помимо указанных правил отбора, представляющие особый интерес.

Основная трудность в использовании радиационного захвата для изучения свойств ядерных состояний заключается в низком значении сечения процесса, связанной со слабостью электромагнитных сил по сравнению с ядерными силами.

Распад возбужденных ядерных состояний путем испускания частицы того же типа, что захвачен, или испусканием какого-либо другого типа частиц, часто в 10^3 - 10^6 раз более вероятен, чем распад гамма-излучения. Это означает, что для сопоставимых скоростей счета при изучении реакции радиационного захвата в экспериментах должны использоваться более высокие токи ионных пучков, чем при исследовании ядерного распада с испусканием нуклонов или альфа-частиц.

В настоящее время высокие ионные токи доступны, так что трудности проведения экспериментов при низких энергиях ионного тока обычно заключается в организации и учета рассеивании тепловой мощности выделяемой в мишенях.

При более высоких энергиях пучка излучение нуклонов и альфа-частиц с возбужденных ядерных состояниях находится в сильной конкуренции с вылетом гамма лучей и создает повышенный фон, что делает изучение более слабого излучения из процесса захвата

затруднительным и обычно применение больших ионных токов пучка, невыгодным.

Цель исследования. Получение спектроскопической информации о свойствах резонансных возбужденных состояний при изучении реакции радиационного захвата $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$.

Объект и предмет исследования. Изучение энергетического и углового распределения гамма-лучей возникающих при захвате протонов с энергией 0,3-2,0 МэВ в ядре ^{27}Al на протонном пучке электростатического ускорителя ЭГ-2 Сокол НУУз и извлечения информации о спектре возбужденных состояний ядра ^{28}Si , об их спинах и мультиполностях гамма переходов разряжающих эти состояния.

Задачи исследования. Прецизионные исследования спектра углового и энергетического распределения гамма лучей из реакции $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ на протонном пучке электростатического ускорителя с использованием гамма-спектрометра со сверхчистым полупроводниковым детектором HPGe с энергетическим разрешением 1,8 кэВ на линии 1332 кэВ изотопа ^{60}Co для извлечения информации об изучаемой реакции важной для уточнения схемы возбужденных уровней ядра ^{28}Si для интерпретации природы этих состояний и возможности их практического применения.

Новизна. Прецизионно изучены спектры энергетического и углового распределения гамма лучей из реакции радиационного захвата протонов $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ в энергетическом диапазоне налетающих протонов 0,3-2,0 МэВ. Установлено γ -распад 53 резонансов и 15 нерезонансных уровней, из них четыре уровни с энергиями $E_{\text{ур}} = 9793,8 \pm 2,0$, $10513,5 \pm 1,0$, $10884,1 \pm 2,0$ и $11778,8 \pm 1,5$ кэВ новые. Установлено, что уровень при $E_{\text{ур}} = 11,43$ МэВ является дублетом. Угловые распределения гамма-лучей измерялись при углах 0° , 45° и 90° .

Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка 53 цитированной литературы, изложена на 55 страницах, содержит 11 рисунков и 8 таблиц.

С участием автора диссертации опубликованы и направлены на опубликования 8 работ на Республиканских научно-практических конференциях 5 работ в РИАК-IX, РИАК-X и РИАК-XI и 2 работы в журнале Вестник НУУз и 2 работы направлены в Доклады АН РУз. Из них 2 работы по теме диссертации.

ГЛАВА I. ОСОБЕННОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГАММА ЛУЧЕЙ В РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

1. Гамма излучение

Гамма излучение – электромагнитное излучение, принадлежащее наиболее высокочастотной (коротковолновой) части спектра электромагнитных волн [2,3]. В таблице 1 приведена классификация электромагнитных волн:

Таблица 1. Классификация электромагнитных волн

Название	Длина волны, м	Частота, Гц
Радиоволны	$3 \cdot 10^5 - 3$	$10^3 - 10^8$
Микроволны	$3 - 3 \cdot 10^{-3}$	$10^8 - 10^{11}$
Инфракрасное излучение	$3 \cdot 10^{-3} - 8 \cdot 10^{-7}$	$10^{11} - 4 \cdot 10^{14}$
Видимый свет	$8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{14} - 8 \cdot 10^{14}$
Ультрафиолетовое излучение	$4 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^{14} - 10^{17}$
Рентгеновское излучение	$3 \cdot 10^{-9} - 10^{-10}$	$10^{17} - 3 \cdot 10^{18}$
Гамма-излучение	$< 10^{-10}$	$> 3 \cdot 10^{18}$

На шкале электромагнитных волн гамма-излучение соседствует с рентгеновскими лучами, но имеет более короткую длину волны. Первоначально термин “гамма-излучение” относился к тому типу излучения радиоактивных ядер, который не отклонялся при прохождении

через магнитное поле, в отличие от α - и β -излучений. Условно верхней границей длин волн гамма-излучения, отделяющей его от рентгеновского излучения, можно считать величину 10^{-10} м. При столь малых длинах волн первостепенное значение имеют корпускулярные свойства излучения. Гамма-излучение представляет собой поток частиц - гамма-квантов или фотонов, с энергиями $E = h\nu$ (h – постоянная Планка, равная $4.14 \cdot 10^{-15}$ эВ·с, ν – частота электромагнитных колебаний). Условно, фотоны с энергиями $E > 10$ кэВ относятся к гамма-квантам. Между длиной волны λ гамма-излучения и его частотой ν существует то же соотношение, что и для других типов электромагнитных волн: $\nu \cdot \lambda = c$ (c – скорость света).

Частота гамма-излучения ($> 3 \cdot 10^{18}$ Гц) отвечает скоростям электромагнитных процессов, протекающих внутри атомных ядер и с участием элементарных частиц. Поэтому источниками гамма-излучения могут быть атомные ядра и частицы, а также ядерные реакции и реакции между частицами, в частности аннигиляция пар частица-античастица. И наоборот, гамма-излучение может поглощаться атомными ядрами и способно вызывать превращения частиц. Изучение спектров ядерного гамма-излучения и гамма-излучения, возникающего в процессах взаимодействия частиц, дает важную информацию о структуре этих микрообъектов.

Гамма-излучение может также возникать при торможении быстрых заряженных частиц в среде (тормозное гамма-излучение) или при их движении в сильных магнитных полях (синхротронное излучение). Источниками гамма-излучения являются также процессы в космическом пространстве. Космические гамма-лучи приходят от пульсаров, радиогалактик, квазаров, сверхновых звёзд.

Гамма-излучение ядер испускается при переходах ядра из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией, и энергия испускаемого гамма-кванта с точностью до незначительной энергии отдачи ядра равна разности энергий этих состояний (уровней) ядра.

Энергия ядерного гамма-излучения обычно лежит в интервале от нескольких кэВ до нескольких МэВ и спектр этого излучения линейчатый, т. е. состоит из ряда дискретных линий. Изучение спектров ядерного гамма-излучения позволяет определить энергии состояний (уровней) ядра.

При распадах частиц и реакциях с их участием обычно испускаются гамма-кванты с большими энергиями - десятки-сотни МэВ.

Гамма-излучение, образующееся при прохождении быстрых заряженных частиц через вещество, вызывается их торможением в кулоновском поле ядер вещества. Тормозное гамма-излучение имеет сплошной, спадающий с ростом энергии спектр, верхняя граница которого совпадает с кинетической энергией заряженной частицы. На ускорителях заряженных частиц получают тормозное гамма-излучение с энергиями до нескольких десятков ГэВ и более.

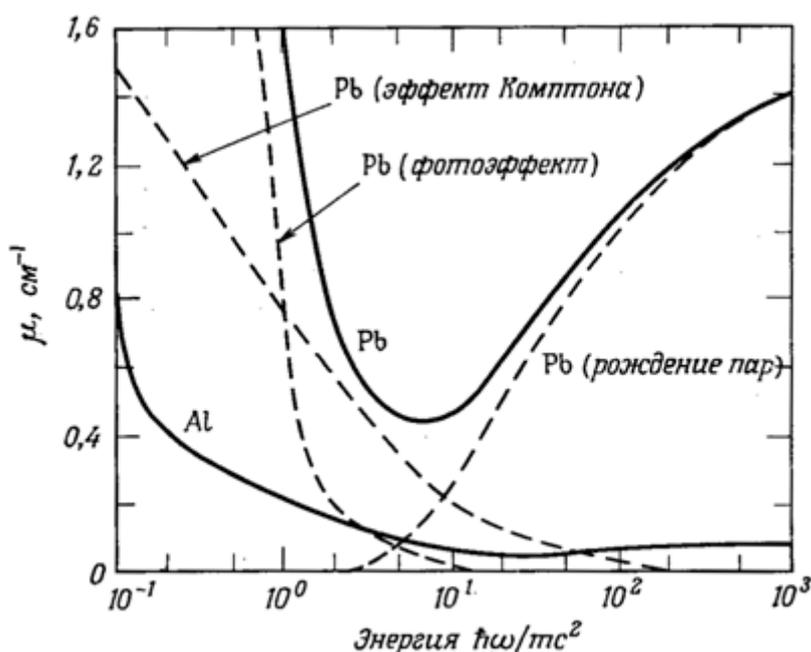


Рис.1. Зависимость полного коэффициента поглощения гамма-излучения в свинце и алюминии от энергии (сплошные линии). Поглощение за счёт фотоэффекта в алюминии пренебрежимо мало при рассматриваемых энергиях. Пунктирные линии — отдельные вклады, вносимые в полный коэффициент поглощения фотоэффектом, комптоновским рассеянием, рождением пар для свинца.

Гамма-излучение можно получить при соударении электронов большой энергии от ускорителей с интенсивными пучками видимого света,

создаваемых лазерами. При этом электрон передает свою энергию световому фотону, который превращается в гамма-квант. Аналогичное явление может иметь место и в космическом пространстве в результате соударений фотонов с большой длиной волны с быстрыми электронами, ускоренными электромагнитными полями космических объектов.

Гамма-излучение обладает большой проникающей способностью, т. е. может проходить сквозь большие толщи вещества. Интенсивность узкого пучка моноэнергетических гамма-квантов падает экспоненциально с ростом проходимого им в веществе расстояния. Основные процессы взаимодействия гамма-излучения с веществом - фотоэлектрическое поглощение (фотоэффект), комптоновское рассеяние (комpton-эффект) и образование пар электрон-позитрон (Рис.1). При фотоэффекте гамма-квант выбивает из атома один из его электронов, а сам исчезает. При комптон-эффекте гамма-квант рассеивается на одном из слабо связанных с атомом или свободных электронов вещества. Если энергия гамма-кванта превышает 1.02 МэВ, то возможно его превращение в электрическом поле ядер в пару электрон-позитрон (процесс обратный аннигиляции).

Гамма-излучение используется в технике (например, дефектоскопия), радиационной химии (для инициирования химических превращений, напр., при полимеризации), сельском хозяйстве и пищевой промышленности (мутации для генерации хозяйственно-полезных форм, стерилизация продуктов), в медицине (стерилизация помещений, предметов, лучевая терапия) и др.

1.2. Гамма-спектроскопия

Гамма-спектроскопия – раздел физики атомного ядра, посвященный исследованию энергетических спектров гамма γ - излучения (зависимостей числа γ -квантов от их энергии), испускаемого атомными ядрами в распадах и реакциях [3]. В более широком смысле гамма-спектроскопия включает в себя исследование всех характеристик γ -излучения, испускаемого не

только ядрами, но и атомами и элементарными частицами. К таким характеристикам испускаемых γ -квантов, помимо их энергии, относятся времена (или вероятности) их испускания, их моменты количества движения (мультипольности), тип (электрический или магнитный), поляризация (преимущественная направленность спина γ -кванта), зависимость вероятности испускания от угла вылета γ -кванта и некоторые другие.

Гамма-спектроскопия является одним из наиболее точных методов определения характеристик микрообъектов (прежде всего атомных ядер), поскольку за испускание γ -квантов ответственно электромагнитное взаимодействие, свойства которого изучены лучше, чем свойства других фундаментальных взаимодействий (сильного, слабого, гравитационного). Поэтому интерпретация экспериментальных данных, полученных методами гамма-спектроскопия, является наиболее простой и однозначной.

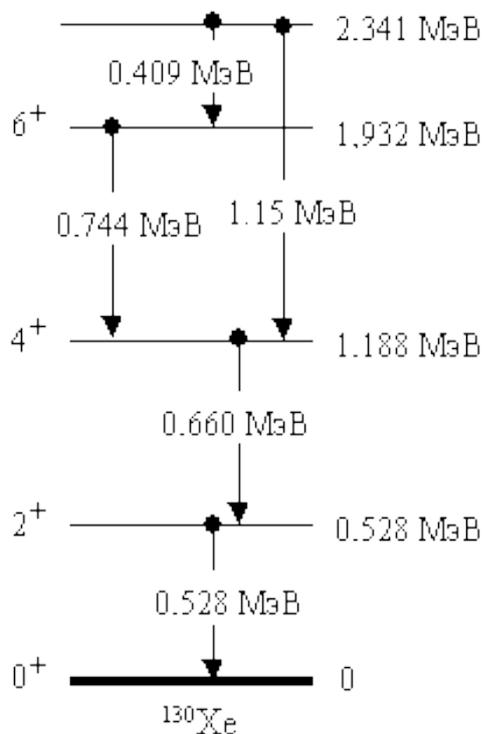


Рис.2. Схема γ -переходов между уровнями ядра ^{130}Xe . Нижний уровень – основное состояние ядра. Энергии возбужденных уровней относительно основного состояния

указаны справа от уровня. Слева от уровней даны их спины и четности. Стрелки – γ -переходы. Их энергии даны слева от стрелки.

Поскольку γ -кванты, испускаемые атомными ядрами (или другими микрообъектами), возникают при переходах из состояний (уровней) с большей энергией в состояния (уровни) с меньшей энергией, то по линиям в спектрах γ -квантов можно установить схемы энергетических уровней ядер (Рис.2). По ширинам этих линий можно установить времена жизни уровней и вероятности их распада. Знание вероятности вылета γ -квантов под различными углами позволяет найти их мультипольность и тип (электрический квант или магнитный) и, тем самым, определить спины и четности ядерных уровней, участвующих в γ -переходе. Кроме того, по характеристикам γ -переходов возможно определение электрических квадрупольных и магнитных дипольных моментов ядер, т.е. распределений зарядов и токов в ядрах в различных состояниях.

Одними из наиболее информативных методов ядерной гамма-спектроскопии являются метод угловых корреляций γ -квантов и ядерная резонансная флуоресценция. В первом из них исследуются корреляции между углами вылета последовательно испускаемых ядром γ -квантов. Во втором ядро резонансно поглощает внешний γ -квант известной энергии и исследуется энергетический спектр вторичных γ -квантов, испущенных этим ядром. В исследованиях гамма-спектроскопии используются гамма-спектрометры.

Выводы к 1 части

1. Рассмотрены механизм образования гамма лучей в различных физических процессах и места гамма излучения в шкале электромагнитных волн.

ГЛАВА II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

2.1. Электростатические ускорители

Почти все исследования гамма-лучей от реакций захвата заряженной частицы выполняются с использованием пучком ионов электростатических ускорителей типа Ван де-Графа дающих ионов постоянного тока [8,9]. Последние годы для этих целей применяются также ускорители типа Уолтона - Кокрофта, ускорители типа Динамитрон и типа Пеллетрон.

Для исследования реакций радиационного захвата заряженных частиц ускорители и ионно-транспортная система должны обладать следующими основными характеристиками:

- Из-за низких сечений реакций радиационного захвата протонов и альфа-частиц необходимо ионные токи этих частиц порядка несколько микроампер, при энергиях выше 5 МэВ можно использовать меньшие ионные токи из-за возбуждения интенсивных гамма-лучей из конкурирующих реакций.
- Из-за сложности зависимости сечения реакции от энергии пучка ионов в области энергий меньше или равна 1 кэВ трудно провести измерений, особенно трудным является в области меньше, чем 100 эВ из-за уширения обусловленного тепловым движением атомов мишени.
- Энергия ионного пучка должна быть легко изменена с шагом 100 эВ при энергии ионов в нескольких МэВ. Шаги, меньшие 100 эВ, требуют разработки и применения специальных целевых методов учитывающих теплового движения атомов-мишеней.

- Ионный пучок должен хорошо коллимироваться с четко определенной огибающей пучка. Поперечное сечения ионного пучка на поверхности мишени должна быть около 4 мм^2 . Эта особенность имеет большое значение, когда используются газовые мишени с дифференциальной накачкой. В случае необходимости широкого ионного пучка, его можно всегда расфокусировать.
- Импульсные ионные пучки для исследования гамма-лучей радиационного захвата являются предпочтительными по сравнению с методикой, когда заряженная частица предварительно получается в реакциях с быстрыми нейтронами. Эта методика является пригодной для изучения более долгоживущих ядерных состояний.

Современные электростатические ускорители отвечают этим требованиям и обсуждение этих вопросов можно найти в литературе.

Ниже описано установка, созданной на ионном пучке электростатического ускорителя СОКОЛ в Научно-исследовательском институте прикладной физики Национального университета Узбекистана им М.Улугбека [7]. Установка позволяет в одном эксперименте три различные спектры: мгновенных гамма-квантов из ядерных реакций, позитронов из распада радиоактивных ядер образующихся в реакциях и совпаденческий спектр аннигиляционных гамма-квантов.

Установки были созданы для получения более полной информации об астрофизически значимых ядерных реакциях радиационного захвата при низких энергиях налетающих протонов т.е. при энергиях протонов в области 200 кэВ до 2000 кэВ. Ранее информация об сечениях указанных реакций получались из измерений энергетических и пространственных спектров мгновенных гамма-лучей ядерных реакций и рассеянных протонов из ядер мишени. На установке помимо указанных экспериментов запланированы измерения спектров излучений радиоактивных ядер нарабатываемых в результате облучения ядер мишени протонном пучке

электростатического ускорителя СОКОЛ, что позволяет получить более прецизионные значения сечений изучаемых реакций и следовательно из них о величинах астрофизических S – факторов и скоростей реакций. Как правило, для проверки существующих астрофизических моделей требуются данные с абсолютными погрешностями не хуже 4 – 5%. Поэтому для корректной оценки и уменьшения систематических погрешностей целесообразно одновременное использование разных методов измерения сечений и выходов реакции в одном эксперименте. При теоретическом расчете сечений ядерноастрофизических реакций проблемой являются неоднозначности в информации о структуре взаимодействующих ядер. Такая ситуация не позволяет проводить однозначную экстраполяцию S - факторов в область очень малых энергий, при которых происходит нуклеосинтез в звездах, что кардинально меняет предсказываемые сценарии эволюции астрофизических объектов. Задачей исследователей является получение более прецизионных, нежели существующие, экспериментальные данные за счет усовершенствований методики, и уменьшение неоднозначностей в экстраполяционных расчетах, базирующихся на этих данных, за счет получения более надежной спектроскопической информации о взаимодействующих ядрах.

Этот подход можно применить к некоторым астрофизически важным реакциям радиационного захвата протона с образованием β^+ - активных ядер. Принципиальным моментом повышения прецизионности является создание методики для измерения сечений и выходов этих реакций в одном эксперименте разными способами. Целью создания установки является получение прецизионных данных о сечениях (S -факторах) и скоростях реакций синтеза в циклах звездного горения водорода, гелия и т.д. Такие данные могут быть получены либо прямыми измерениями в области энергий, соответствующих звездным температурам (что редко достижимо), либо путем экстраполяции S -факторов от более высоких энергий в эту область. Основные трудности в экспериментальном плане –

экспоненциальное уменьшение сечений реакций с участием заряженных частиц при уменьшении энергии, и связанное с этим резкое увеличение погрешностей. Как показывает анализ имеющихся экспериментальных данных, в них часто содержатся неконтролируемые систематические погрешности. Например, в двух сериях экспериментальных данных по реакции $\{\alpha+{}^3\text{He}\rightarrow{}^7\text{Be}+\gamma\}$, недавно выполненных разными методами [10,11], экстраполируемые по энергии средние значения сечений отличаются существенно больше, чем приведенные погрешности в каждом из экспериментов.

На установке запланированы получения экспериментальной информации о сечениях и астрофизических S-факторах ядерно-астрофизических реакций при достаточно низких энергиях (\sim до 200 кэВ по протонам) по регистрации сопутствующих гамма-квантов («prompt» - метод), и получать достаточно полную информацию, необходимую для экстраполяции скоростей реакций в область сверхнизких астрофизически важных энергий. На установке также проводятся исследования реакций радиационного захвата протонов в интересах спектроскопической науки и ее практических применений.

2.2. Электростатический ускоритель ЭГ-2 СОКОЛ НУУз.

Разработка и создание электростатических ускорителей горизонтального типа в странах СНГ выполняется в ННЦ ХФТИ [12,13]. Между НИИПФ НУУз и ННЦ ХФТИ был заключен научно-технический договор по созданию в НИИПФ НУУз электростатического ускорителя ЭГ-2 с параметрами соответствующими мировым стандартом. Детали ускорителя были изготовлены в ННЦ ХФТИ и на предприятиях Узбекистана в 1985-1987 гг. Однако, строительство здание для ускорителя начатое в 1984г., завершилось с существенными недостатками в 1995 году. Недостатки были устранены благодаря включения работ по монтажу и запуску электростатического ускорителя ЭГ-2 СОКОЛ в НИИ прикладной физики НУУз в межгосударственный Договор об экономическом сотрудничестве на 1999- 2008 гг. между Республиками Узбекистан и Украина (раздел 2.10. Научно-техническое сотрудничество, п. 2.10.23). В 2002-2004 гг. в рамках совместного с ННЦ ХФТИ гранта № 1571 УНТЦ была произведена полная расконсервация, ревизия, монтаж ускорителя, выполнены пусконаладочные работы в полном объеме, осуществлен его рабочий запуск [8] и приобретены детекторы ядерного излучения фирмы CANBERRA типа SL30165 - для регистрации рентгеновского излучения и PDP-12-100 и PDP-14-100 - для регистрации заряженных частиц с необходимой электронной аппаратурой и программным обеспечением GENIE-2000 для накопления и обработки ядернофизической информации. Отметим, что, исследовательские Центры Университетов и технологические линии ведущих промышленных фирм развитых стран обеспечены ускорителями этого класса производимых специализированными фирмами США и Европы – High Voltage

Engineering Corporation (HVEC), National Electrostatics Corporation (NEC) и General Ionex Corporation(GIC).

2.2.1. Конструкция и характеристики электростатического ускорителя ЭГ – 2 СОКОЛ НУУз

Электростатические ускорители были разработаны в начале 30-х годов XX в. и благодаря сочетанию:

- возможности ускорения любых ионов - начиная от самых легких- 1_1H до самых тяжелых- ${}^{238}_{92}U$;
- плавного изменения и поддержания их энергий в диапазоне ~ 0.05 – 15 МэВ с монохроматичностью до $\sim 10^{-4}$ при токах ионного пучка от 10^{-9} до 10^{-3} А, при этом сечение пучка может быть доведено до ~ 1 мкм²;
- экспресности исследований, т.к. они приводятся в режиме **on-line** непосредственно на пучке ускоренных ионов;
- относительно низкой стоимости и простаты управления,
- продолжают оставаться популярным инструментом ядерной физики низких и средних энергий. Причем, в последние десятилетия они всё шире используется для решения фундаментальных и прикладных задач во многих других областях науки (химия, биология, геофизика, материаловедение, экология и т.д.) и производства (модификация свойств поверхностных слоев различных объектов, стерилизация различных материалов и продуктов, лучевой терапии и др.).

Ускорительный комплекс [8] расположен в бункерном помещении корпуса ускорителей НУУз.- рис.3. Он включает в себе ускоритель, экспериментальные камеры, спектрометры X, γ - излучений и заряженных частиц. На рис.4 показан схематический разрез ускорителя. Он состоит из следующих основных узлов:

- высоковольтной (ВВ) изолирующей колонны;
- ускоряющей трубки ;
- высоковольтного (ВВ) электрода с размещенным в нем оборудованием для питания и управления ионным источником;
- транспортера зарядов с ведущим валом и натяжным устройством;
- системы охлаждения;
- сосуда высокого давления;
- системы газоснабжения.

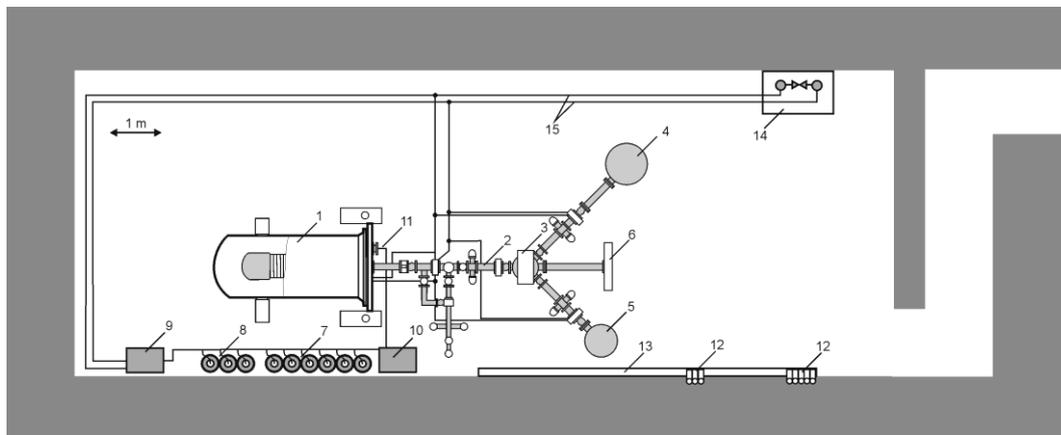
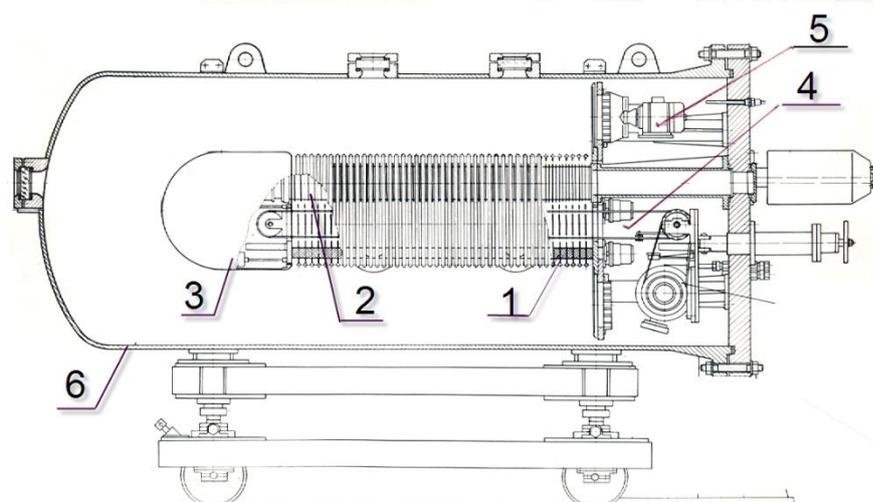


Рис.3. Схема расположения ЭСУ ЭГ-2 СОКОЛ в машинном зале



1 – высоковольтная колонна, 2 – ускоряющая трубка, 3 – высоковольтный электрод, 4 – транспортер зарядов, 5 – система охлаждения, 6 – сосуд высокого давления.

Рис.4.Схематический разрез ЭСУ ЭГ - 2

Элементы, перечисленные в первой пяти пунктах установлены на крышке сосуда высокого давления и находится в среде электроизолирующего газа при давлении до $1.5 \cdot 10^6$ Па.

Ускоритель снабжен системой измерения высокого напряжения и энергии заряженных частиц, а также системой стабилизации высокого напряжения.

Системы охлаждения и газоснабжения относятся к вспомогательным системам и обеспечивают получение чистого и сухого азота, наполнение сосуда высокого давления электроизолирующим газом ($70\% \text{N}_2 + 20\% \text{CO}_2 + 10\% \text{SF}_6$) до давления $1.5 \cdot 10^6$ Па, откачку газа из сосуда и его осушку.

Высоковольтная изолирующая колонна [14] является одним из основных узлов электростатического ускорителя и удовлетворяет требованиям высокой механической и электрической прочности. Колонна изготовлена из ультра-фарфоровых изоляторов квадратного сечения 6×6 см., листового титана и тонкостенных трубок из нержавеющей стали. Колонна состоит из 44 промежутков с шагом 25 мм; ее диаметр (по обрамляющим эквипотенциальным кольцам) – 420 мм, длина колонны - 1100 мм.

Ускоряющая трубка ускорителя определяет его важные параметры: предельную энергию частиц и длину всего ускорителя. Она изготовлена из ультрафарфоровых колец диаметром 122 мм, толщиной 12 мм и титановых электродов, которые имеют центральные вставные конические элементы, полностью экранирующие ионный пучок от поверхности изоляторов; центральное отверстие трубки имеет диаметр 88 мм; имеются также фигурные боковые отверстия, обеспечивающие полное продольное перекрытие через один изолирующий промежуток (всего имеется 88 промежутков с шагом 12,5 мм) и служащие для байпасной вакуумной откачки. Сборка элементов высоковольтной колонны и ускоряющей трубки осуществлена клеем БФ-4.

Транспортер зарядов ускорителя изготовлен из четырех – или шести-слойной перкалевой ленты (ширина 200 мм) и приводится во вращение приводом ведущего вала. Линейная скорость перемещения транспортера до 20 м/с. Ведущий вал транспортера зарядов расположен на подвижной траверсе и их взаимное положение регулируется дополнительным приспособлением с эксцентриком, поворот эксцентрикового приспособления осуществляется с помощью малооборотного двигателя РД-09, наклон вала относительно траверсы ведет за собою перемещение ленты по валику в ту или иную сторону. Двигатель РД-09 включен в схему системы автоматического регулирования положения ленты по валу, датчик системы регулирования состоит из двух комплектов осветителей и фотоспротивлений, установленных по обе стороны ленты и её краев. При отходе ленты от среднего положения открывается один световой луч и включается двигатель РД-09 с тем, чтобы изменить наклон вала и привести ленту в нормальное положение. Для натяжения ленты имеется винтовое натяжное устройство [15] с центральным натяжным стержнем и блоком измерения силы натяжения ленты с тензометрическими датчиками.

Высоковольтный электрод изготовлен из алюминия, имеет размеры: диаметр цилиндрической и сферической частей – 430 мм, длина – 470 мм. В электроде размещены: ведомый вал ленточного транспортера зарядов, который одновременно является однофазовым генератором переменного напряжения 220 В (частота 400 с⁻¹, мощность -300 ВА), система управления и питания высокочастотного ионного источника.

Высокочастотный источник ионов должен удовлетворять следующим требованиям:

- компактность и простота конструкции;
- минимальное потребления энергии;
- минимальный расход рабочего вещества (газа);
- стабильность и надежность в работе;

- достаточный срок непрерывной работы и максимальный срок службы;
- по возможности ионный пучок должен быть определенного состава, т.к. присутствие других компонентов в пучке увеличивает токовую нагрузку ускоряющей трубки;
- источник и система формирования пучка должны обеспечить эмиттанс пучка, согласованный с аксептансом трубки.

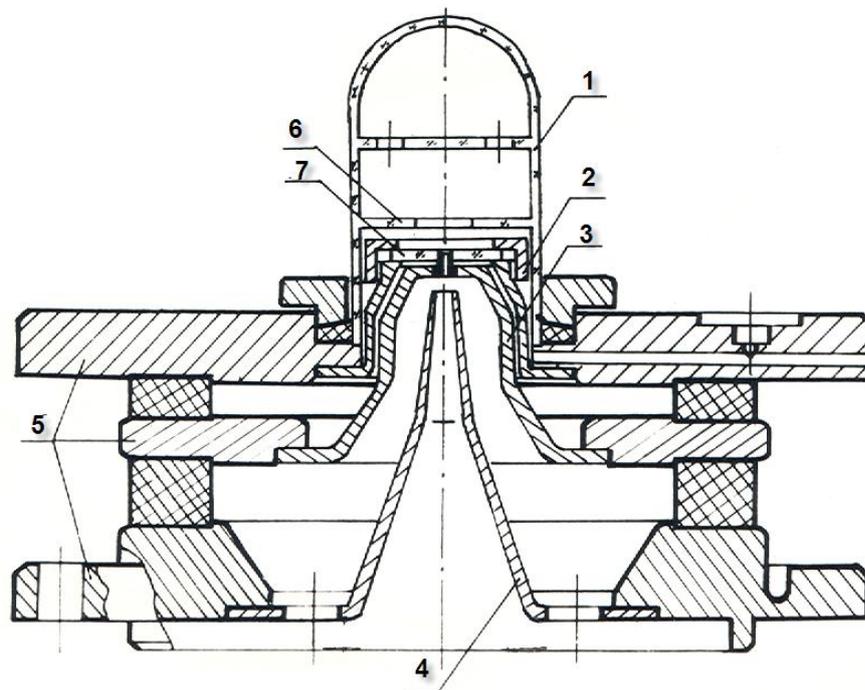


Рис.5. Конструкция источника ионов

В качестве источника ионов для данного электростатического ускорителя разработан высокочастотный источник ионов с кольцевым разрядом и поперечным магнитным полем [16,17]. Конструкция источника показана на рис.8. Корпус состоит из металлических фланцев и колец из ультрафарфора, склеенных между собой клеем БФ-4. Пластины экранируют металлические части анода и катода от плазмы, что уменьшает концентрацию молекулярных ионов. Ускоряющий электрод предназначен для ускорения и фокусировки пучка извлекаемых из источника ионов и согласования ионно-оптических характеристик пучка и ускорительной

трубки. Ускоряющий электрод совместно с источником образует инжектор электростатического ускорителя. Для возбуждения высокочастотного разряда в ионизационной камере источника используется высокочастотный генератор, построенный по двухтактной схеме на лампе ГУ-29.

Конструктивные и технико–эксплуатационные характеристики ускорителя приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Конструктивные и технико–эксплуатационные характеристики ЭГ -2
СОКОЛ

Диаметр сосуда высокого давления	1000 мм
Длина сосуда	2500 мм
Масса ускорителя с сосудом	1700 кг
Объем сосуда	1,9 м ³
Состав изолирующего газа	N ₂ +SF ₆ (5%)
Давление изолирующего газа	(4 -10)·10 ⁵ Па
Влажность изолирующего газа	мене 0,5%
Диаметр высоковольтного электрода	430 мм
Длина высоковольтного электрода	470 мм
Диаметр высоковольтной колонны	420 мм
Длина ускорительной трубки	1100 мм
Высота ускорителя	1715 мм
Энергия ускоренных протонов	0.3 - 2.0 МэВ
Сорт ускоряемых ионов	протоны и ионы гелия
Ток пучка ускоренных ионов	10 ⁻³ – 10 мкА
Моноэнергетичность и стабильность энергии	0,07%
Расход рабочего газа (водород, гелий)	2- 3 см ³ час ⁻¹

2.2.2. Экспериментальная камера для измерения спектров гамма – лучей и их угловых распределений индуцированных ионным пучком ускорителя

Камера установлена на левом 45-градусном канале для проведения экспериментальных исследований угловых распределений гамма- квантов, образующихся в реакциях радиационного захвата (p,γ) и (α,γ). Она изготовлена из нержавеющей стали в виде цилиндра (рис.6) с размерами: $\varnothing 80$ мм, высота 100мм, толщина стенок 1.5мм. На ее верхней крышке установлено смотровое окно и съемный вакуумный разъем, сквозь который проходят медные трубки – держатели мишени с водяным охлаждением. В боковой стенке смонтирован выдвигающийся шток с закрепленным на его конце кварцевым стеклом для получения светящегося изображения пучка на месте расположения мишени. Камера реакций с охлаждающими медными трубками и участок ионопровода до металлокерамического соединения изолированы от земли и от остальной части установки, и служат в качестве цилиндра Фарадея для сбора заряда, накопленного в мишени. Подавление потерь вторичных электронов во время облучения мишени осуществляется приложением потенциала -300В к коллиматору ($\varnothing 10$ мм), расположенному между метало–керамическими фланцами. Пучок протонов фокусируется на мишени, расположенной на расстоянии 80см от коллиматора в пятно размером ~ 3 мм.

Заряд ионного пучка, попадающего на мишень, измеряется цифровым микроамперметром (прибор Щ 300) подключенным к цилиндру Фарадея в режиме измерения тока. Количество частиц, попавших в мишень, определяется интегрированием на программном счетчике Ф5007 сигналов с прибора Щ 300 с частотой следования импульсов, соответствующей измеряемому току.

Камера реакций установлена соосно с лимбом и вращающейся платформой корреляционного спектрометра.

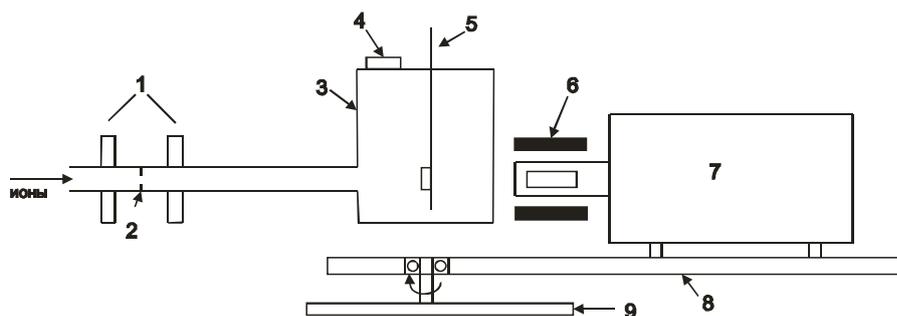
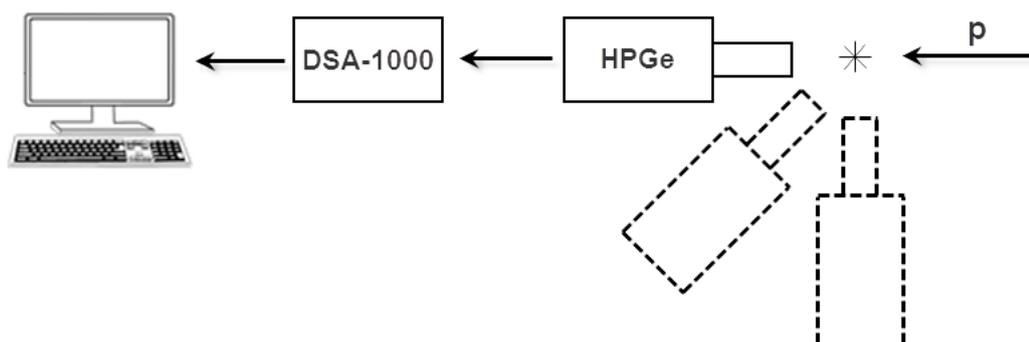


Рис.6.Камера реакций для экспериментов по измерению угловых распределений γ -квантов 1- металл–керамическое изоляционное соединение, 2-коллиматор, 3- камера реакций, 4- смотровое окно, 5- мишень с охлаждаемой медной трубкой, 6- свинцовая защита толщиной 15 мм, 7- HPGe- детектор, 8- подвижная платформа, 9- лимб.

На платформе на расстоянии 5см от мишени установлен HPGe – детектор со свинцовой защитой толщиной 20мм. Платформа вращается относительно центра мишени в диапазоне 0° - 165° с точностью установки угла $\sim 0.1^{\circ}$.

Высокий вакуум (10^{-5} Па) в камере поддерживается с использованием безмасляных магниторазрядного и турбомолекулярного насосов.

2.2.3. Гамма спектрометр



D - HPGe -детектор, DSA - 1000 - настольный многоканальный анализатор гамма спектров

Рис.7. Блок-схема установки для измерения гамма-спектров.

Измерения гамма спектров производились с помощью гамма-спектрометра (см.рис.7) с детектором из сверхчистого германия HPGe типа

GC4018 с энергетическим разрешением 1,8 кэВ на линии 1332 кэВ изотопа ^{60}Co [18] и настольного многоканального анализатора гамма спектров DSA-1000 цифровым сигнальным процессором производства фирмы САНБЕРРА (США) [19]. Накопление и обработка гамма-спектров осуществлялись с помощью программы GENIE-2000 фирмы САНБЕРРА (США) [20].

Выводы к 2 части

1. Обсуждается преимущество применения электростатических ускорителей для исследования реакций радиационного захвата.
2. Описаны электростатический ускоритель ЭГ-2 Сокол НУУз и гамма-спектрометр с HPGe –детектором примененный в экспериментах.

ГЛАВА III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Калибровка энергетической шкалы электростатического ускорителя ЭГ-2 Сокол

Калибровка ускорителя по энергии для левого и правого 45-градусных каналов на выходе масс-анализатора ускорителя производилась с помощью сильных резонансов $E_p = 632,773$ и 992 кэВ реакции радиационного захвата $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ («толстая» мишень). Гамма-спектры регистрировались на правом канале NaJ(Tl) детектором, на левом канале - HPGe детектором.

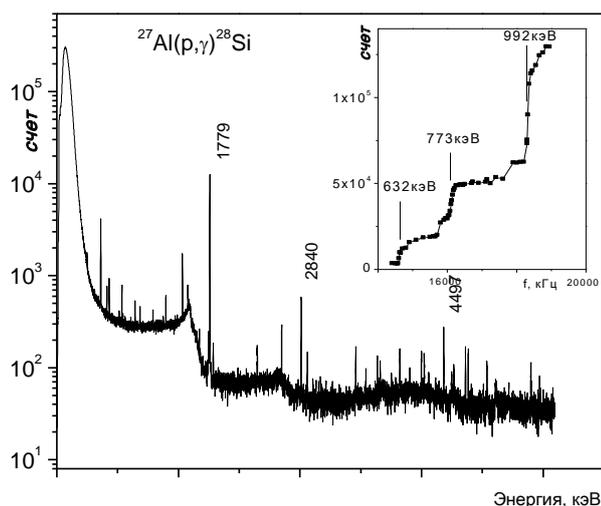


Рис.8. Гамма спектр реакции $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ измеренный при энергии протонного пучка 1000 кэВ и токе 0.8 мкА. На вставке приведена калибровочная кривая ускорителя

На рис.8 приведен гамма спектр этой реакции, измеренный на левом канале. На вставке показана зависимость выхода γ - квантов от частоты ЯМР магнитного поля масс-анализатора (т.е. от энергии налетающих протонов) – калибровочная кривая. Отметим, что калибровочные кривые построены по интенсивностям как пиков полного поглощения переходов $E_\gamma = 1779, 2839$ и 4497 кэВ, так и интегрального спектра после вычета фона.

По калибровочным кривым определено энергетическое разрешение ускорителя, равное 0.1%.

3.2. Гамма-лучи и их угловое распределение из реакции $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$

3.2.1. Введение

Возбужденные состояния ^{28}Si ранее изучены с помощью реакции $^{27}\text{Al}(p, \gamma)$ в работах [21-31]. Во всех этих экспериментах использовались Ge(Li) детекторы, и была получена информация об энергиях, соотношениях ветвления и временах жизни возбужденных состояний в ^{28}Si .

Накопленные материалы собраны в компиляционном издании [52]. Схема уровней ядра изученной разными авторами приведена на рис.9 [53].

Целью настоящего эксперимента было устранение некоторых неопределенностей в опубликованных работах с применением имеющего более высокое энергетическое разрешение HPGe детектора (примерно 2 раза лучше) чем применялись ранее и использованием относительно более высокого значения тока протонного пучка до 25 мкА.

В настоящем эксперименте (p, γ) резонансы реакции $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ изучались в интервале энергий $E_p = 0,3-2,0$ МэВ. Наблюдались четыре новых нерезонансных уровня и была получена дополнительная информация об энергиях, коэффициентах ветвления уровней ^{28}Si . Спины наблюдаемых резонансов определялись с помощью измерений углового распределения гамма-лучей при углах 0° , 45° и 90° . Получена дополнительная информация о выходе резонансов.

Эксперименты проводились с пучком протонов с током 10-20 мкА на электростатическом ускорителе ЭГ-2 Сокол НУУз имени М.Улугбека в энергетическом интервале 0,3-2,0 МэВ.

Гамма-лучи были регистрировались с помощью HPGe детектора модели GC4018 производство компании КАНБЕРРА (США) с

34 reactions
 ≈ 75 additional levels above 10.945 MeV.

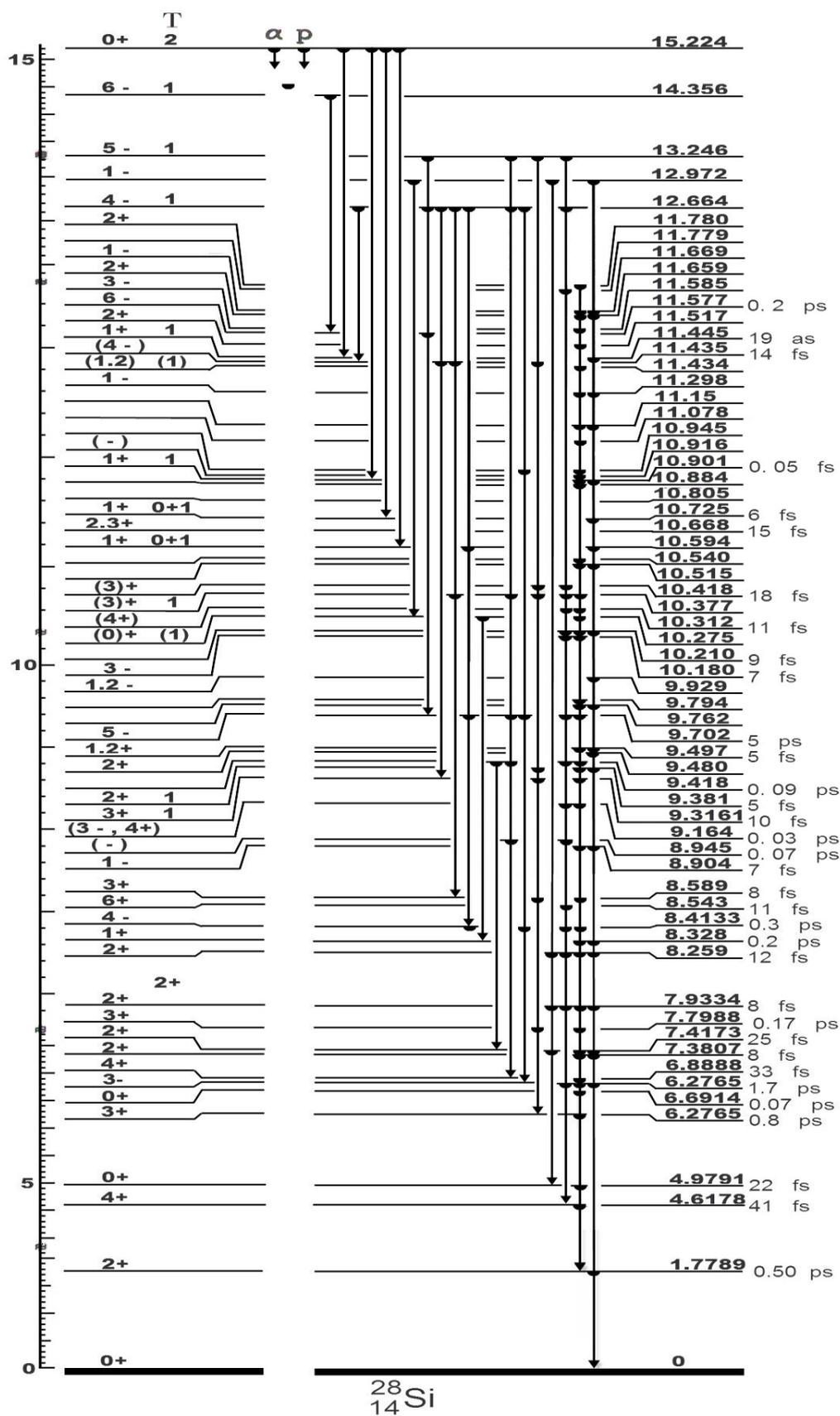


Рис.9. Схема уровней ядра ^{28}Si [52].

эффективностью регистрации 40% и энергетическим разрешением 1,8 кэВ при энергии 1,33 МэВ на гамма-линии ^{60}Co . Накопление спектрометрической информации производилось на спектрометре DC-1000, а обработка спектров: калибровка по энергии и эффективности и вычисление площадей фотопиков с помощью пакета программы GENIE-2000 на компьютере.

Кривые эффективности HPGe детектора определялись с использованием радиоактивных источников и данных резонансов с известным γ -распадом.

В качестве мишени использовалась фольга чистого алюминия толщиной 20 мкм на медной подложке с водяным охлаждением.

В результате проведенных исследований подтверждены существование 53 резонансных (таблица 3), 15 нерезонансных уровней (таблица 4) и установлены гамма-распад (коэффициенты ветвления) резонансных и нерезонансных уровней (таблица 3 и 4) ядра ^{28}Si возбуждаемые в реакции $^{27}\text{Al} (p,\gamma)$ в энергетическом интервале налетающих протонов 0,3-2,0 МэВ. Четыре уровни с энергиями $E_{ур} = 9793,8 \pm 2,0$, $10513,5 \pm 1,0$, $10884,1 \pm 2,0$ и $11778,8 \pm 1,5$ кэВ установлены впервые. Установлено, что уровень при $E_{ур} = 11,43$ МэВ является дублетом

По результатам измерения углового распределения гамма-лучей определены или уточнены спины для 15 (таблица 6) из наблюдаемых 68 уровней, определены коэффициенты смешивания мультипольностей для 7 прямых переходов разряжающих резонансные уровни.

Экспериментальные значения энергий четырех уровней и вероятности E2 переходов разряжающие эти уровни сравниваются с расчетами по модели Давыдова для неаксиального четно-четного ядра ^{28}Si .

3.2.6. Экспериментальные результаты

Спектры гамма-лучей реакции $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ в энергетическом интервале налетающих протонов $E_p = 0,3\text{-}2,0$ МэВ была измерена в двух режимах (рис.10 и 11) $E_\gamma \leq 3,0$ МэВ и $0,3 \text{ МэВ} \leq E_\gamma \leq 16,0$ МэВ.

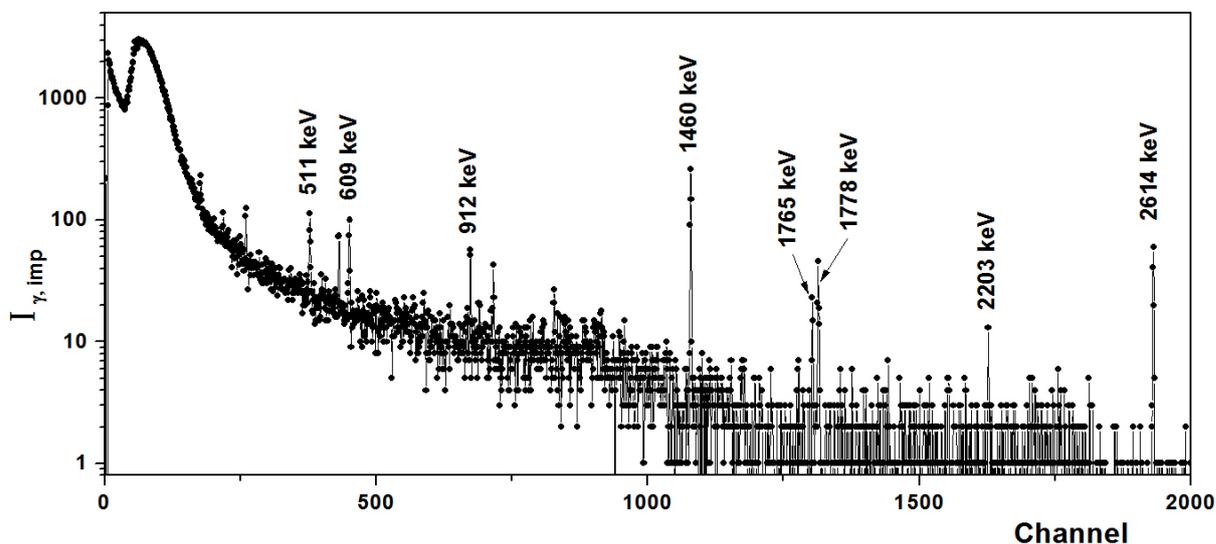


Рис.10. Спектр гамма-лучей из реакции $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ при $E_p = 700$ кэВ.

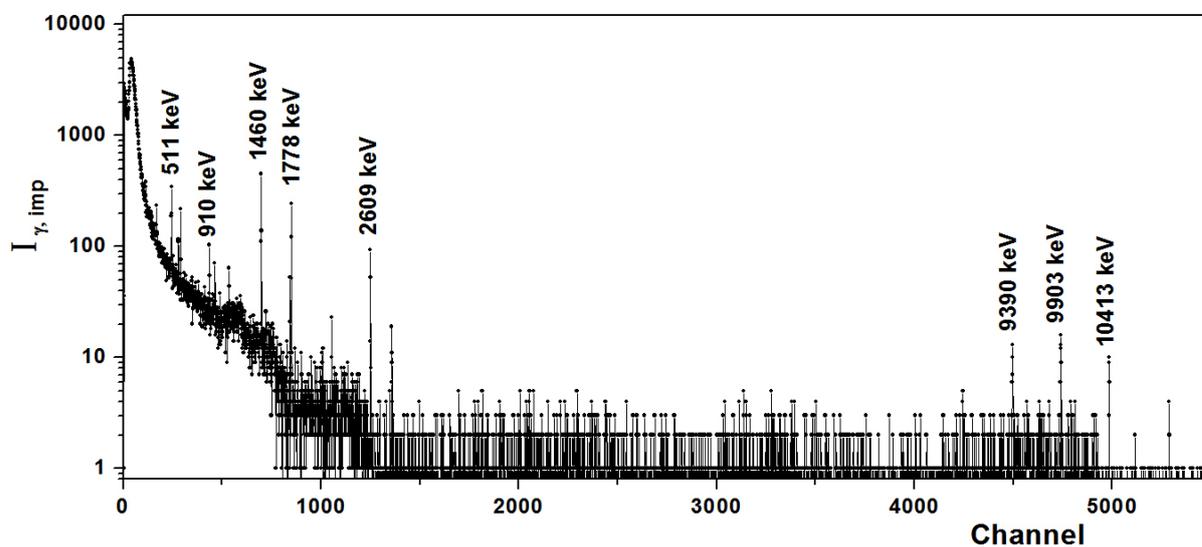


Рис.11. Спектр гамма-лучей из реакции $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ при $E_p = 630$ кэВ.

Обработка и анализ измеренных гамма-спектров позволили идентифицировать 53 резонансных уровня в ядре ^{28}Si (таблица 1), 15 состояний этого ядра не связанных с резонансным его возбуждением (таблица 2).

Гамма распад 53 резонансов реакции $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ в диапазоне энергий $E_p = 0,3-2,0$ МэВ показан в таблице 1. Дублеты при $E_p = 1364, 1577, 1662$ и 1723 кэВ не разрешились. Приведенные результаты находятся в хорошем согласии с предыдущими экспериментами, за исключением того, что почти во всех случаях наблюдались дополнительные слабые первичные переходы. В типичных спектрах энергетическое разрешение HPGe детектора составляло $1,8$ кэВ при $E_\gamma = 1,3$ МэВ и около 9 кэВ при $E_\gamma = 10$ МэВ.

Переходы в основное состояние наблюдались при резонансах $E_p = 736, 923, 1002$ и 1278 кэВ с интенсивностью $0,2, 0,2, 0,3$ и $0,5\%$ соответственно. Эти переходы M3 или E4 слишком сильны, чтобы объясняться этими резонансами. Чтобы определить происхождение этих переходов, фоновые спектры регистрировались при $E_p = 700, 910, 970$ и 1290 кэВ. Хотя наблюдались слабые $\gamma \rightarrow 1,78$ МэВ и $\gamma \rightarrow 4,62$ МэВ переходы не наблюдались при первых трех энергиях, тогда как слабый переход $\gamma \rightarrow 0$ МэВ наблюдался при $E_p = 1290$ кэВ. Кроме того, наблюдался переход M3 $\gamma \rightarrow 4,62$ МэВ (интенсивность $1,1\%$) при резонансе $E_p = 774$ кэВ, который был слишком сильным. Этот переход предположительно возникает из соседнего резонанса $E_p = 767$ кэВ, сильно распадающегося на уровне $E_{ур} = 4,62$ МэВ. При резонансе $E_p = 1911$ кэВ $I^\pi = 5^+ 3,7\%$ $\gamma \rightarrow 0$ и $2,3\%$ $\gamma \rightarrow 1,78$ МэВ которые не могут быть отнесены к этому резонансу, поскольку это приведет к слишком сильным переходам M5 и M3, соответственно. Эти переходы могут возникать из соседнего резонанса $E_p = 1900$ кэВ, сильно распадающегося на основное состояние и первое возбужденное состояние.

Уровни при $E_{ур} = 9,48, 9,79, 9,93, 10,51, 10,54, 10,67, 10,88, 10,90, 10,92, 10,95, 11,08$ и $11,78$ МэВ не наблюдались в предыдущих экспериментах [23,24].

Резонансы, при которых возбуждались новые уровни при $E_x = 9,79, 10,51, 10,88$ и $11,78$ МэВ, приведены в таблице 3. Критерии, принятые для предложения нового уровня, были:

- а) «уровень» должен был возбуждаться по крайней мере дважды,
- б) более сильные его распады должны наблюдаться в каждом случае,
- в) энергии должны согласовываться в разумных пределах.

Было обнаружено, что уровень при $E_{ур} = 11,43$ МэВ является дублетом. Резонансы, в которых возбуждались различные члены этого дублета, приведены в таблице 5. Новый уровень при $E_{ур} = 11,78$ МэВ не является резонансом $E_{ур} = 11,78$ МэВ, $I^R\pi = 2+$, который распадается на $E_{ур} = 1,78$ МэВ уровень.

Гамма-распад 46 уровней в ^{28}Si нерезонансного характера приведен в таблице 3. Эти результаты, хорошо согласуются с предыдущими [24] результатами, полученными с помощью Ge(Li) детектора с чувствительным объёмом 10 см^3 . Ранее не сообщалось о γ -распаде уровней при $E_x = 9,79, 9,93, 10,51, 10,88, 10,92, 11,08$ и $11,78$ МэВ. Ниже обсуждается различия с предыдущими результатами.

Уровни $E_{ур} = 7,42, 7,80$ и $7,93$ МэВ. В предыдущем эксперименте [24] не объяснено распад уровня $E_{ур} = 7,42$ МэВ. А переход $(6 \pm 2)\%$, $7,42 \rightarrow 1,78$ МэВ наблюдался [22,24] при резонансах $E_p = 679, 1002, 1025, 1262$ и 1381 кэВ. Верхние пределы для перехода $7,42 \rightarrow 4,98$ МэВ определялись при резонансах $E_p = 1002$ и 1025 кэВ, и во всех случаях было установлено, что этот переход, если он присутствует, должен быть менее 2%. При резонансах $E_p = 1025$ и 1317 кэВ наблюдался новый переход $(1,0 \pm 0,4)\%$, $7,80 \rightarrow 4,62$ МэВ. Переход 100%, $7,93 \rightarrow 0$ МэВ был описан [22,39]. В работах [28,40] наблюдались переходы к уровням $E_{ур} = 1,78, 4,62$ и $4,98$ МэВ при резонансах $E_p = 992$ и 1199 кэВ.

Уровни $E_{ур} = 8,26$ и $8,59$ МэВ. 100% -ный переход от уровня $E_{ур} = 8,26$ МэВ к уровню $E_{ур} = 1,78$ МэВ был найден в работе [21], 8% -ный переход к основному состоянию и 67% -ный переход к уровню $E_{ур}=1,78$

МэВ эксперименте [24,27]. В настоящем эксперименте наблюдались дополнительные переходы с интенсивностями $(4.0 \pm 1.0)\%$ и $(17.0 \pm 1.0)\%$ уровни $E_{ур} = 4,62$ и $4,98$ МэВ, соответственно.

100% -ный переход от уровня $E_{ур} = 8.59$ МэВ к уровню $E_{ур} = 1,78$ МэВ наблюдался в работах [21,77], тогда как ранее [24] наблюдался переход 97% к этому уровню. Приведенные результаты также показывают, что переход $8.59 \rightarrow 1,78$ МэВ не полностью учитывает распад этого уровня и что он также распадается на уровень $E_{ур} = 6.28$ МэВ. Переход $8,59 \rightarrow 6,28$ МэВ наблюдался при семи резонансах.

Уровни $E_{ур} = 8,94$ и $9,38$ МэВ. Ранее [24] 53% распада уровня $E_{ур} = 8,94$ МэВ было неизвестно. В нашей работе было обнаружено, что переход $8,94 \rightarrow 6,89$ МэВ, наблюдаемый при четырех резонансах, полностью учитывает ранее неизвестный распад, согласующийся с работой [40]. А переход с интенсивностью $(4,0 \pm 1,0)\%$ идущий между уровнями $9,38 \rightarrow 6,28$ МэВ, о котором ранее не было известно, наблюдалось при двух резонансах.

Уровень $E_{ур} = 9,48$ МэВ наблюдали [21,41]. Они сообщили о 100% -ом переходе на основное состояние. Полученные нами результаты показывают 85% -ный переход в основное состояние и возможный распад на уровень $E_{ур} = 7,38$ МэВ.

Уровни $E_{ур} = 9,42$ и $9,48$ МэВ. Полученные в нашей работе разветвления уровня $E_{ур} = 9,42$ МэВ не согласуются с результатами, полученными [22,39]. Новый резонансный переход $(5 \pm 2)\%$, $9,42 \rightarrow 6,28$

Таблица 3. Гамма-распад уровней возбуждаемых в резонансах реакции $^{27}\text{Al}(\rho,\gamma)^{28}\text{Si}$ в энергетическом диапазоне $E_p = 0.3 - 2.0$ МэВ

Резонансы			Гамма-распад резонансных уровней в ^{28}Si , %												
E_p , кэВ	$E_{ур}$, кэВ	I	0 0 ⁺	1.78 2 ⁺	4.62 4 ⁺	4.98 0 ⁺	6.28 3 ⁺	6.69 0 ⁺	6.88 3 ⁻	6.89 4 ⁺	7.38 2 ⁺	7.42 2 ⁺	7.80 3 ⁺	7.93 2 ⁺	Другие уровни $E_{ур}$ (%)
295	11870	(4 ⁺)	< 0.5	1.8	69					16			5.1		8.41(4.9), 8.59(3.2)
327	11900	(4 ⁺)	< 0.2	1.1	75		1.9			14					8.59(5.7), 9.42(2.3)
406	11977	2 ⁺ , 3 ⁻ , 4 ⁺	< 0.05	2.6	73		1.0		1.1	13					8.59(5.8), 9.42(2.3), 10.31(1.2)
447	12016	2 - 4	< 0.5	2.8	25		3.0					31	3.6	4.5	8.59(2.2), (9.32(2.7))
505	12072	2 ⁺	55	14	2.8	0.8	2.9			7.0	0.8	1.7	1.9	1.6	8.26(1.5), 8.59(1.7), 9.38(1.4), 9.50(0.7), 10.38(5.7)
507	12074	2 ⁽⁺⁾	16	44	(0.5)		0.7		10		1.5	7.8	3.1	3.8	8.41(0.9), 5.59(0.9), 9.38(8.5), 10.38(2.3)
612	12176	(5 ⁺)	< 0.2	< 0.5	< 0.5		96								8.59(4.0)
633	12195	3 ⁻	0.1	73	15		1.5		3.5	1.4				0.5	8.26(0.7), 8.41(1.2), 8.90(0.6), 9.32(0.3), 9.38(2.2)
655	12217	2 ⁻	2.2	46			4.2		1.4			2.2		6.1	8.26(1.6), 8.33(1.0), 8.41(0.8), 8.59(3.0), 8.90(0.4), 9.32(2.0), 9.38(28), 10.60(1.1)
679	12240	3 ⁺	0.1	43	26					1.4	0.8	21		0.6	8.41(0.9), 8.59(0.3), 9.16(2.6), 9.48(0.3), 9.79(1.7), 10.21(0.6), 10.51(0.7)
731	12291	2 ⁺	0.5	49	0.4	1.3	3.1	2.4						0.9	8.33(0.6), 8.59(0.7), 9.32(9.8), 9.38(31), 9.50(0.3)
736	12295	3 ⁺		73	18					0.6	2.3	2.3	0.7	0.3	8.33(0.3), 9.32(2.0), 9.38(0.5)
742	12301	1 ⁻ , 2 ⁺	0.5	17											8.33(4.0), 8.90(48), 9.50(19), 10.60(3.0), 10.72(8.5)
760	12318	2 ⁽⁺⁾	1.5	89					1.8		1.2		2.7		9.32(3.8)
767	12325	4	< 0.06	1.0	77		3.5		0.9	1.3			1.0		8.41(3.0), 8.59(5.0), 9.32(5.0), 9.77(2.3)
774	12331	1 ⁺	75	6.3				3.2			9.5	1.0		2.8	8.33(1.5), 9.50(0.7)
885	12439	2 ⁺	69	4.6	3.4		1.4			1.4		0.4	5.6	0.6	8.33(0.6), 9.32(11), 9.38(0.9), 9.50(1.1)
923	12475	4 ⁺		91	2.0		1.0				0.3	0.7	1.4	1.0	8.26(1.1), 8.59(0.2), 9.16(0.4), 9.32(0.3), (10.21(0.1)), 10.38(0.3)
937	12489	3 ⁻	0.2	48	19		7.0		16		3.0				8.41(2.4), 9.38(3.5), 10.88(0.5), 11.434(0.4)
992	12542	3 ⁺	< 0.02	75	4.9		2.4		0.6	0.3			9.7	4.2	8.59(0.3), 9.16(0.4), 9.42(0.9), 9.48(1.3)
1002	12522	4 ⁺		64	2.5		4.8			2.5	4.0	10	0.4	5.2	8.26(3.2), 9.32(1.1), 10.38(2.3)
1025	12574	2	2.2	26	0.7	0.6	2.2				0.8	5.4	46		8.26(8.0), 8.33(1.2), 8.59(2.3), 8.90(1.0), 9.50(1.8), 9.77(1.0), 9.93(0.6), 10.21(0.2)
1090	12636	(3 ⁻)		20	20		13		1.0		7.4	0.6	1.2	0.7	8.33(5.2), 8.59(0.7), 9.32(5.6), 9.38(3.7), 9.50(0.5), 10.38(20), 11.434(0.4)
1098	12644	(4 ⁻)		1.0	8.5					34	14				8.41(1.2), 8.94(5.5), 9.42(4.8), 9.70(31)
1118	12644	4 ⁻ ,		0.2	0.8		29		0.7	5.0					8.41(45), 8.59(14), 8.94(0.8), 9.70(1.5), 11.435(3.0)
1172	12715	1 ⁺ , 2	1.0	62		1.0	4.0	7.0	2.0		1.7	7.0		1.0	8.26(1.3), 9.32(1.0), 9.38(6.0), 9.50(1.7), 10.60(2.7), 10.88(0.6)
1183	12726	2 ⁺	63	23		6.0	1.3		2.4		0.4			0.6	8.26(0.2), 8.59(0.5), 9.32(2.3), 9.38(0.3)
1199	12742	3 ⁻ ,	0.2	20			27		23			3.0	3.2	7.0	8.41(1.1), 8.59(2.6), 9.16(0.6), 9.32(3.6), 9.38(3.4), 9.42(1.0), 9.70(1.0), 10.18(0.4), 10.92(1.0), 11.08(1.9)
1213	12755	(1 ⁻ , 2 ⁺)	0.2	69		2.0		13	2.2		4.0	1.5		1.2	8.26(2.0), 8.33(0.6), 9.32(0.3), 9.50(3.0), 10.72(1.0)
1262	12802	3 ⁻	0.2	41	4.9		1.2		35	2.7		7.0			8.41(2.5), 9.16(0.5), 9.32(1.0), 9.38(1.3), 9.42(0.7), 9.79(0.2),

															10.88(0.2), 10.92(0.4), 11.08(1.2)
1278	12817	4 ⁺		2.2	23		2.1			21					8.54(3.0), 8.59(22), 8.94(1.4), 9.16(4.2), 9.42(14), 10.21(2.0), 10.31(3.6), 11.90(1.5)
1317	12855	4 ⁺		12	12		48		1.5	6.0	0.5	0.5	5.4		8.59(1.9), 9.94(1.1), 9.32(6.2), 10.21(0.5), 10.42(0.3), 10.67(4.0)
1328	12866	2 ⁺ , 3 ⁺		82	8.0		2.3				1.7	1.9	0.4		8.33(0.9), 8.59(0.40), 9.32(0.4), 9.38(0.9), 10.38(1.1)
1364	12900	(4 ⁺)	0.5	27	11		36			8.2			4.7		8.59(2.9), 8.94(1.3), 9.32(2.3), 9.38(1.4), 9.70(0.4), 10.67(4.3)
1365	12901	2 ⁺													
1381	12917	2 ⁺		75	6.0	5	5.0			1.0	0.5	3.2	1.3		8.26(0.9), 8.59(2.9), 9.16(0.6), 9.42(1.2), 9.48(1.1), 9.79(0.3), 10.67(1.0)
1388	12924	2 ⁺	0.1	79	2.1		5.0	0.2	0.5	1.0	3.0	0.2	0.8	3.0	8.26(1.5), 8.33(0.3), 8.59(1.1), 9.16(0.8), 10.21(0.5), 10.31(0.5), 10.67(0.4)
1457	12991	3 ⁻	0.5	4.6	10		1.8		9.3				8.1	0.5	8.41(4.4), 8.59(7.8), 9.32(52), 10.54(1.0)
1502	13034	2 ⁺	0.7	38	24		1.3		6.6	4.8	3.4	3.8	1.5	4.0	8.26(2.2), 8.41(1.0), 9.16(0.8), 9.32(0.7), 9.38(2.7), 9.48(1.2), 10.38(2.0), 10.88(0.3), 11.98(1.0)
1520	13051	2 ⁻	0.8	76			0.7		16		1.2		1.7	0.4	8.33(0.8), 9.50(1.0), 9.77(1.0), 10.54(0.4)
1566	13096	2 ⁺ , 3 ⁻	1.9	5.6	8.0		6.2			9.5		1.4	14		8.26(5.7), 8.59(2.6), 9.32(38), 9.48(1.7), 10.38(5.4)
1577	13106														
1578	13107	3 ⁻	39	8.5	1.5	0.6	4.7		2.7	3.1			14		8.41(0.5), 8.54(4.5), 8.59(8.1), 9.32(9.3), 9.42(0.6), 10.18(8.6), 10.54(0.5), 10.92(0.7), 11.08(0.4)
1588	13117	3		38	21		2.9		4.7		9.0	2.0	2.3	0.5	8.26(1.7), 8.41(3.2), 8.59(1.0), 9.16(3.4), 9.42(0.9), 9.48(0.5), 9.77(0.4), 10.18(0.5), 10.21(4.8), 10.67(1.2), 10.95(1.5), 11.78(0.5)
1647	13173	3 ⁻	1.8	21	4.3		13			1.8	2.5	7.1			9.32(23), 9.70(19), 10.38(6.5)
1662	13188	2 ⁺	0.4	81			2.7			3.6		1.9	1.8		8.26(1.3), 9.50(4.3), 10.51(2.3), 10.67(0.7)
1663	13189														
1680	13205	(2,3) ⁺	1.2	90	2.5				1.8	0.5	1.6				9.32(2.4)
1684	13209	2	5.6	55					7.9				3.4	2.2	9.32(8.7), 9.77(2.2), 10.60(15)
1706	13230	2,3 ⁻	4.4	27	5.8		7.9			21		1.9		2.5	8.59(3.8), 9.32(13), 9.38(9.2), 10.38(3.5)
1723	13247	3 ⁻													
1724	13248	5 ^(3⁻)	0.1	1.0	1.6		1.8			8.6					8.41(0.7), 9.32(1.2), 9.70(85)
1749	13272	2 ⁻	1.5	83										5.8	9.32(8.2), 9.38(1.5)

Таблица 4. Нерезонансные уровни в ^{28}Si

Настоящая работа	Работа [14,]	Возбуждается при резонансах, E_p , кэВ	Примечание
7415.2±2.0	7418.6±1.0 ^{a)}		
9478.5±2.5	9480.4 ±1.5		
9765.0±2.2	9761.5±1.4		
9793.8±2.0		679, 1262, 1381	
9929.3±2.0	9930±7		
10514.9±2.0		979, 1662	
10541.0±2.0	10540±3		
10598.2±2.0	10594±2.0 ^{b)}		
10668.8±2.4	10668±5		
10884.1±2.0		937, 1172, 1262, 1502	
10901.5±2.0	10901±3		
10915.9±2.0	10915.7±1.3		
10945.4±2.0	10945±3		
11078.1±2.0	11077.5±1.3		
11434.3±1.0	11432±2	937, 1090, 1900, 2132	
11434.6±1.5		1118, 1800, 1900, 2303	
11778.8±1.5		1588, 1911	

МэВ наблюдался при резонансах $E_p = 1278$ и 2200 кэВ. Переход $(23+5)\%$, $9,42 \rightarrow 6,89$ МэВ наблюдался при резонансах $E_p = 992$, 1098 , 1278 и 2200 кэВ.

Уровень $E_{ур} = 9,48$ МэВ наблюдался в работах [21,41]. Они сообщили о 100% - ом переходе на основное состояние. Полученные нами результаты показывают 85% -ный переход в основное состояние и возможный распад на уровень $E_x = 7,38$ МэВ.

Уровни $E_{ур} = 10,21$, $10,60$ и $10,67$ МэВ. Переход $10,21 \rightarrow 1,78$ МэВ с интенсивностью 100% был обнаружен [21]. Как предыдущие [24], так и настоящие эксперименты показывают, что этот переход не полностью учитывает распад этого уровня.

Ранее сообщалось [24], что уровень $E_{ур} = 10,60$ МэВ почти полностью разряжается на уровень $E_{ур} = 8,41$ МэВ. В настоящем эксперименте уровень $E_{ур} = 10,60$ МэВ возбуждался при резонансах $E_p = 655$, 742 , 1172 и 1684 кэВ, и во всех случаях наблюдался переход $10,60 \rightarrow 0$ МэВ как и в работе [27]. Однако наблюдаемый им $(35 + 15)\%$, $10,60 \rightarrow 1,78$ МэВ

Таблица 5. Гамма-распад нерезонансных уровней в ^{28}Si

Нерезонансные уровни		Гамма-распад нерезонансных уровней в ^{28}Si , %												
$E_{\text{ур}}$, кэВ	I	0 0 ⁺	1.78 2 ⁺	4.62 4 ⁺	4.98 0 ⁺	6.28 3 ⁺	6.69 0 ⁺	6.88 3 ⁻	6.89 4 ⁺	7.38 2 ⁺	7.42 4 ⁻	8.41 4 ⁻	8.59 3 ⁺	неиз- вестный
1.78	2 ⁺	100												
4.62	4 ⁺	< 0.5	100											
4.98	0 ⁺		100											
6.28	3 ⁺	< 0.7	92.5±0.5	7.5±0.5	<0.2									
6.69	0 ⁺		100	< 0.5		< 4								
6.88	3 ⁻	64±2	33±2	3.0±0.7										
6.89	4 ⁺	< 4	100	< 1	< 1	< 1								
7.38	2 ⁺	37.5±1.5	62.5±1.5	< 2		< 1								
7.42	2 ⁺	94±2	6±2		< 2	< 3	< 2							
7.80	3 ⁺	< 0.3	70.0±1.0	1.0±0.4		29.0±1.0	<0.2							
7.93	2 ⁺	82±2	4.5±2.0	7.8±1.3	5.7±1.5		< 3							
8.26	2 ⁺	9.0±1.5	70±2	4.0±1.0	17.0±1.0	< 2	< 1							
8.33	1 ⁺	72±4	28±4	< 5	< 5		< 4							
8.41	4 ⁻	< 0.4	22±2	4.0±1.5	< 0.5	< 0.4	< 0.3	74±2						
8.54	6 ⁺			100		< 1	< 2							
8.59	3 ⁺	< 1	93.7±2.0		< 2	6.3±2.0	< 1	< 1						
8.90	1 ⁻	47±3	53±3	< 1										
8.94				64±2	< 10	< 4	< 7		36±2					
9.16	(3 ⁻ , 4 ⁺)	< 5	55±5	45±5	< 5	< 5	< 5	< 5						
9.32	3 ⁺	< 0.5	72.7±1.0	< 2	< 3	27.3±1.0	< 1	< 0.5						
9.38	2 ⁺	2.0±1.0	94±2	< 1	< 0.5	4.0±1.0								
9.42	(2 ⁺ , 3 ⁻ , 4 ⁺)	< 2	26±5	38±4		5±2	< 5		23±5	< 3	8±2			
9.48	2 ⁻	85±5								(15±5)				
9.50	(1, 2) ⁺	85±4	15±4	< 3		< 4	< 3	< 4						
9.70	5 ⁻	< 0.1	15±4	20±5	< 0.5		< 0.5	21±5	10±2		< 0.5	34±2	< 2	
9.77	(2-4)	< 2	85±5	< 5	< 10									15
9.79	(1-4)		100											
9.93	(1, 2) ⁻	100												
10.18	3 ⁻		25±5	75±5										
10.21	(2 ⁺ , 3, 4 ⁺)	< 4	75±10		< 4	< 4					8±4			17
10.31	(4 ⁺)		45±10	55±10										
10.38	(3) ⁺	< 1	20.2±1.2	23.0±2.0	< 1	29±3	< 2		6.0±1.0				21.8±1.0	
10.42	3 ⁺ b			15±5		85±5								
10.51		40±10	60±10											
10.54			100											

10.60	1 ⁺	83±4	< 10	< 10									17	
10.67	(2, 3) ⁺	< 0.6	6±2	< 1	< 3	23±5		< 2	< 2	< 1			7±2	30
10.72	1 ⁺	100	< 5		< 3									
10.88			100											
1090	1 ⁺	100												
1092			100											
10.95			35±10											65
11.08			70±10											30
11.434			100											
11.435	(4)		< 2		< 10	20±10						50±10		
11.78				100										

переход не наблюдался в настоящем эксперименте. Для этого перехода нами был получен верхний предел 10%. Переход $10.60 \rightarrow 0$ МэВ не учитывает весь распад этого уровня. В отличие от наблюдения [42], уровень $E_{ур} = 10,67$ МэВ распадается только на уровень $E_{ур} = 1,78$ МэВ, а в резонансах $E_p = 1317$ и 1364 кэВ наблюдался ряд дополнительных разветвлений.

Уровень $E_{ур} = 11,43$ МэВ дублет. Этот уровень считался [44] распадается на уровни $E_{ур} = 6.28$ и 8.59 МэВ. В настоящем эксперименте уровень $E_{ур} = 11,43$ МэВ наблюдался при резонансах $E_p = 937, 1090, 1118, 1800$ кэВ. При резонансах $E_p = 937, 1090$ кэВ наблюдался переход на уровень $E_{ур} = 1,78$ МэВ. При резонансах $E_p = 1118, 1800, 1900$ кэВ было обнаружено, что уровень $E_{ур} = 11,43$ МэВ распадается на уровни $E_{ур} = 6,28, 8,59$ и $9,32$ МэВ как и наблюдались [31] на $E_p = 1118$ кэВ-резонанс. В этом резонансе верхний предел 2% определялся для перехода $11.43 \rightarrow 1.78$ МэВ. Эти наблюдения приводят к выводу, что уровень $E_{ур} = 11,43$ МэВ должен быть дублетом. Энергии этих двух уровней приведены в таблице 3.

3.2.7. Измерения угловых распределений гамма-лучей

Угловые распределения гамма-лучей из реакции (p,γ) измерялись для определения значения спина ряда резонансных состояний ядра ^{28}Si . Угловые распределения измерялись HPGe детектором на расстоянии 7 см от мишени и при углах $0^\circ, 45^\circ$ и 90° относительно направления пучка. Спектры, полученные при каждом из этих углов, хранились в персональном компьютере. Последовательность $0^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 0^\circ$ повторялась несколько раз, пока не набралась необходимая статистика обеспечивающая точность не хуже 3% и проверялись центровка детектора и затухание γ -лучей.

Анализ данных методом наименьших квадратов в терминах полиномов Лежандра в выражении $N(\theta) = B(1 + A_2P_2 + A_4P_4)$ дал

Таблица 6. Коэффициенты угловых распределений гамма-лучей из реакции $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ и выводы о спинах уровней ^{28}Si

E_p , кэВ	Переходы	A_2	A_4	Значение спина уровня	
				Настоящая работа	Работа[14]
406	$r \rightarrow 4.62$ $r \rightarrow 8.59$	0.14 ± 0.03 -0.23 ± 0.14	-0.04 ± 0.06 -0.28 ± 0.21	$2^+, 3^-, 4^+$	(4^+)
679	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 4.62$ $r \rightarrow 7.42$	-0.14 ± 0.01 -0.09 ± 0.02 -0.06 ± 0.02	-0.01 ± 0.03 -0.08 ± 0.03 0.03 ± 0.03	3	3^+
742	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 8.90$ $r \rightarrow 9.50$ $r \rightarrow 10.60$ $r \rightarrow 10.72$	-0.03 ± 0.07 -0.08 ± 0.08 -0.17 ± 0.06 -0.41 ± 0.18 -0.03 ± 0.08	-0.00 ± 0.10 -0.10 ± 0.11 -0.01 ± 0.08 0.21 ± 0.27 -0.16 ± 0.11	$1^-, 2^+$	(2^+)
1025	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 7.80$ $r \rightarrow 8.26$	-0.07 ± 0.03 -0.13 ± 0.01 -0.11 ± 0.09	0.04 ± 0.04 0.06 ± 0.01 -0.06 ± 0.14	2	$(1^+, 2)$
1213	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 6.69$	-0.03 ± 0.02 0.19 ± 0.03	-0.03 ± 0.03 0.03 ± 0.05	$1^+, 2^+$	$1^-, 2^+$
1328	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 4.62$	-0.06 ± 0.01 -0.06 ± 0.05	-0.10 ± 0.02 -0.07 ± 0.07	$2^+, 3^+$	$2-4(2,3)^+$
1381	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 4.62$ $r \rightarrow 6.28$	-0.10 ± 0.01 -0.14 ± 0.04 -0.09 ± 0.12	0.01 ± 0.01 -0.05 ± 0.05 -0.00 ± 0.14	$2^+, 3$	$(2,3)^+$
1388	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 6.28$	-0.09 ± 0.01 -0.08 ± 0.06	-0.03 ± 0.01 0.03 ± 0.08	2^+	2^+
1457	$r \rightarrow 4.62$ $r \rightarrow 7.80$	0.32 ± 0.15 -0.33 ± 0.08	0.05 ± 0.19 -0.03 ± 0.10	3^-	3^-
1502	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 4.62$	-0.29 ± 0.04 -0.24 ± 0.12	-0.02 ± 0.05 0.09 ± 0.15	2,3	2^+
1520	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 6.88$	-0.24 ± 0.02 0.07 ± 0.06	0.10 ± 0.03 -0.04 ± 0.07	2	2^-
1566	$r \rightarrow 6.89$ $r \rightarrow 7.80$ $r \rightarrow 9.32$	-0.14 ± 0.11 -0.29 ± 0.08 -0.27 ± 0.05	0.09 ± 0.14 -0.09 ± 0.10 0.09 ± 0.05	$2^+, 3^-$	$(3^-, 4^+)$
1588	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 4.62$ $r \rightarrow 6.28$	-0.09 ± 0.01 -0.08 ± 0.03 0.05 ± 0.08	-0.02 ± 0.01 -0.00 ± 0.04 0.01 ± 0.09	3	$(2-4)$
1911	$r \rightarrow 4.62$ $r \rightarrow 6.89$	-0.92 ± 0.03 -0.25 ± 0.03	0.19 ± 0.04 -0.02 ± 0.04	5^+	
1969	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 6.28$	0.02 ± 0.06 -0.17 ± 0.10	-0.01 ± 0.08 0.07 ± 0.12	2	

значения для коэффициентов корреляции A_2 и A_4 . Результаты показаны в таблице 4. Количество импульсов, наблюдаемых под каждым углом, использовалось в качестве входных данных для компьютерной программы, рассчитавшей значение $Q^2 = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{BN_i(\theta_i) - N(\theta_i)}{\Delta N(\theta_i)} \right)^2$, где B - константа нормировки, а $N_i(\theta_i)$ задается формулой:

$$N_i(\theta_i) = 1 + Q_2 A_2^* P_2(\cos\theta_i) + Q_4 A_4^* P_4(\cos\theta_1).$$

Величины Q_2 и Q_4 являются коэффициентами затухания, учитывающими конечный размер детектора, и A_2^* и A_4^* являются теоретическими коэффициентами, которые представляют собой функции параметров разрядки уровня и коэффициентов смешивания гамма-перехода.

Таблица 7. Коэффициенты смешения прямого перехода с резонансного уровня спин которого был определен однозначно

E_p	I	Переход	Коэффициент смешивания
679	3^5	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 4.62$ $r \rightarrow 7.42$	0.36 ± 0.04 -1.70 ± 0.18 0.00 ± 0.03
1911	5	$r \rightarrow 4.62$ $r \rightarrow 6.89$	1.43 ± 0.11 0.00 ± 0.03
1969	2	$r \rightarrow 1.78$ $r \rightarrow 6.28$	0.27 ± 0.05 -2.75 ± 1.00

Соответствующие параметры в теоретических выражениях для A_2^* и A_4^* были систематизированы, чтобы найти минимумы χ^2 из Q^2 . Найденное значение спина считалось единственным, когда соответствующий χ^2 находился ниже предела 0,1%, тогда как все остальные спины дали значения χ^2 выше этого предела. Результаты и выводы измерений углового распределения показаны в таблице 7. Было обнаружено, что J^π резонанса $E_p = 679$ кэВ 3^+ [44]. Вывод о положительной четности сделана из анализа параметров разрядки уровня. Коэффициенты смешивания прямых

переходов, которые дали единственные значения спины, показаны в таблице 7.

3.2.4. Сравнение некоторых экспериментальных результатов с расчетами

Сравнение некоторых экспериментальных результатов производилось с известными теоретическим расчетами [49,50]. Уровни $E_{ур} = 0, 1.78, 4.62$ и 8.54 МэВ со следующими спинами и четностями $J^\pi = 0^+, 2_1^+, 4_1^+$ и 6_1^+ считаются членами вращательной полосы основного состояния аксиально-симметричного четно - четного ядра ^{28}Si . Как было показано Давыдовым и др. [49,50], что нарушение аксиальной симметрии в четно-четных ядрах лишь незначительно влияет на спектр вращения осесимметричного ядра и в результате появляются новые уровни с $I^\pi = 2_2^+, 3^+, 4_2^+ \dots$. Если отклонение от аксиальной симметрии невелико, то эти уровни лежат очень высоко. С другой стороны, если отклонение от аксиальной симметрии увеличивается, некоторые дополнительные уровни лежат намного ниже. Выражения для энергий и сильных переходов были получены Давыдовым и др. в терминах параметра γ , который определяет отклонение формы ядра от аксиальной симметрии, собственного квадрупольного момента и энергетического параметра A .

Таблица 8. Энергия и интенсивность перехода в неаксиальном ядре ^{28}Si

Начальный уровень, МэВ		Переход	$I_i \rightarrow I_t$	Вероятность E2 перехода (в.е.)	
Эксперимент	Теория[29,30]			Эксперимент	Теория[29,30]
1.78	1.55	1.78 \rightarrow 0	$2_1^+ \rightarrow 0^+$	13 ± 1	14 ± 1
4.62	4.90	4.62 \rightarrow 1.78	$4_1^+ \rightarrow 2_1^+$	22 ± 4	20 ± 1
7.38	7.19	7.38 \rightarrow 0	$2_2^+ \rightarrow 0^+$	0.3 ± 0.1	0.9 ± 0.1
		7.38 \rightarrow 1.78	$2_2^+ \rightarrow 2_1^+$	2.2 ± 0.6	3.6 ± 0.2
8.54	9.76	8.54 \rightarrow 4.62	$6_1^+ \rightarrow 4_1^+$	>34	23 ± 2

Уровни $E_{ур} = 1,78, 4,62, 7,38$ и $8,54$ МэВ считались членами вращательной полосы $2_1^+, 4_1^+, 2_2^+$ и 6_1^+ неаксиально-симметричного ядра ^{28}Si . Квадрупольный момент уровня $E_{ур} = 1,78$ МэВ равен $Q(2_1^+) = + 0,16 \pm 0,03$ $e \cdot b$ [34]. Поэтому внутренний квадрупольный момент $Q_0 = - (0,62 \pm 0,12)$ $e \cdot b$ для $\gamma = 180$. Это значение для γ дает наблюдаемую спиновую последовательность в ^{28}Si . Интенсивность нескольких E2 переходов, рассчитанные с этими значениями γ и Q_0 , показаны в таблице 6. Энергии уровней были рассчитаны с приведенным выше значением γ и $A = 318$ кэВ. Результаты показаны в таблице 6 и находятся в разумном согласии с экспериментальными значениями.

Выводы к 3 части

В результате проведенных исследований подтверждены существование 53 резонансных (таблица 3), 15 нерезонансных уровней (таблица 4) и установлены гамма-распад (коэффициенты ветвления) резонансных и нерезонансных уровней (таблица 3 и 5) ядра ^{28}Si возбуждаемые в реакции $^{27}\text{Al} (p, \gamma)$ в энергетическом интервале налетающих протонов 0,3-2,0 МэВ. Четыре уровни с энергиями $E_{ур} = 9793,8 \pm 2,0, 10513,5 \pm 1,0, 10884,1 \pm 2,0$ и $11778,8 \pm 1,5$ кэВ установлены впервые. Установлено, что уровень при $E_{ур} = 11,43$ МэВ является дублетом.

По результатам измерения углового распределения гамма-лучей определены или уточнены спины для 15 (таблица 6) из наблюдаемых 68 уровней, определены коэффициенты смещения мультипольностей для 7 прямых переходов разряжающих резонансные уровни.

Экспериментальные значения энергий четырех уровней и вероятности E2 переходов разряжающие эти уровни сравниваются с расчетами по модели Давыдова для неаксиального четно-четного ядра ^{28}Si .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Освоена работа установки для исследования энергетических и угловых распределений гамма лучей из реакций радиационного захвата протонов в ядрах на базе ускорителя ЭГ-2 «СОКОЛ» НУУЗ и спектрометрической аппаратуры на основе сверхчистого HPGe детектора.

2. Изучены спектры энергетического и углового распределения гамма лучей из реакции радиационного захвата протонов $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ в энергетическом диапазоне налетающих протонов 0,3-2,0 МэВ.

3. На основе полученных экспериментальных данных сделаны выводы:

- подтверждены существование 53 резонансных (таблица 1), 15 нерезонансных уровней (таблица 2);

- Четыре уровни с энергиями $E_{ур} = 9793,8 \pm 2,0, 10513,5 \pm 1,0, 10884,1 \pm 2,0$ и $11778,8 \pm 1,5$ кэВ установлены впервые;

- Установлено, что уровень при $E_{ур} = 11,43$ МэВ является дублетом;

- установлены гамма-распад (коэффициенты ветвления) резонансных и нерезонансных уровней (таблица 1 и 3) в ядре ^{28}Si ;

- по результатам измерения углового распределения гамма-лучей определены или уточнены спины для 15 (таблица 4) из наблюдаемых 68 уровней;

- определены коэффициенты смещения мультипольностей для 7 прямых переходов разряжающих резонансные уровни;

- экспериментальные значения энергий четырех уровней и вероятности E2 переходов разряжающие эти уровни сравниваются с расчетами по модели Давыдова для неаксиального четно-четного ядра ^{28}Si .

В соавторстве магистранта опубликованы и направлены на опубликования следующие работы (5 – РИАК IX, X, XI, 1 – Вестник НУУз, 2 – направлено в Доклады АН РУз):

1. С.М.Махмудов, А.Тургунов, И.Холбаев, Ш.Х.Эшкobilов. Радионуклидный состав проб минеральных удобрений на основе фосфогипса. Физика фани муаммолари ва унинг ривожиди истеъдодли ёшлар ўрни. РИАК-IX, Тошкент, 2016, 238-241 б.
2. С.М.Махмудов, А.Тургунов, И.Холбаев, Ш.Х.Эшкobilов. Гамма лучи из реакции радиационного захвата. Физика фани муаммолари ва унинг ривожиди истеъдодли ёшлар ўрни. РИАК-X, Тошкент, 2017, 79-82 б.
3. Азимов А.Н., Алибеков А.С., Базарбаев Н.Н., Кубаев С.Ш., Махмудов С.К., Муминов И.Т., Муминов Т.М., Раимулов А.А., Солиев Т., Холбаев И., Худайбердиев А.Т. Радиоактивность остатков древних металлургических производств Сувликуля. Вестник НУУз, №2/2, 2017, с.74-79
4. Азимов А.Н., Атаджанова Г., Базарбаев Н.Н., Мухамедов К., Махмудов С.К., Муминов И.Т., Холбаев И., Худайбердиев А.Т., Эшкobilов Ш.Х. Космогенный радионуклид ${}^7\text{Be}$ в атмосферных выпадениях 2016 г. в Ташкенте и Самарканде. Направлено в ДАН АН РУз, 2017
5. Махмудов С.К., Руми Р.Ф., Халиков Р.И., Холбаев И., Эржигитов Ж., Эшкobilов Ш.Х., Артемов С.В., Караходжаев А.А., Тожибаев О.Р., Эргашев Ф.Х. Буртебаев Н., Буртебаева Ж., Нассурлла М., Сабидолла А., Хожаев Р. Модификация активационного метода для астрофизических измерений s-факторов. Физика фани муаммолари ва унинг ривожиди истеъдодли ёшлар ўрни. РИАК-XI, Тошкент, 2018
6. Мамаюсупова М.И., Махмудов С.К., Руми Р.Ф., Халиков Р.И., Холбаев И., Эржигитов Ж., Эшкobilов Ш.Х., Артемов С.В.,

- Караходжаев А.А., Тожибаев О.Р., Эргашев Ф.Х. Буртебаев Н., Буртебаева Ж., Нассурлла М., Сабидолла А., Хожаев Р. Установка для измерения угловых распределений гамма квантов на ионном пучке электростатического ускорителя. Физика фани муаммолари ва унинг ривожиди истеъдодли ёшлар ўрни. РИАК-ХИ, Тошкент, 2018
7. Махмудов С.К., Муминов Т.М., Руми Р.Ф., Халиков Р.И., Холбаев И., Эржигитов Ж., Эшкobilов Ш.Х., Артемов С.В., Караходжаев А.А., Тожибаев О.Р., Эргашев Ф.Х. Буртебаев Н., Буртебаева Ж., Нассурлла М., Сабидолла ., Хожаев Р. О схеме уровней ядра ^{28}Si . Физика фани муаммолари ва унинг ривожиди истеъдодли ёшлар ўрни. РИАК-ХИ, Тошкент, 2018
8. Г.У.Атаджанова, С.Махмудов, И.Т.Муминов, Т.М.Муминов, А.К.Мухамедов, Б.Ниязов, Л.Т.Нурмурадов, А.А.Сафаров, А.Т.Худойбердиев. Радионуклиды в сухих атмосферных выпадениях 2017 г. в Ташкенте, Самарканде и Карши. Направлено в ДАН АН РУз.

Цитированная литература

1. C.Rolfs and A.E.Litherland. Nuclear spectroscopy and Reactons, v40, part C, pages 143-184, 1974.
2. К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. Т.1. М., 2006. Изд.ЛАН.
3. Гамма-лучи. Отв. редактор Л.А. Слив. Изд-во АН СССР, М.-Л.,1961, 720 с.
4. У.А.Фаулер. Экспериментальная и теоретическая ядерная астрофизика, поиски происхождения элементов. УФН,1983, т.145(3), с.441- 488.

5. Ядерная астрофизика. Под ред. Ч.Барнса, Д.Клейтона, Д.Шрамма. Пер. с английского, М.: Мир, 1986. - 519 с.
6. A. A. Arahamian, K. Langanke, N. Wiecher. Nuclear Structure Aspects in Nuclear Astrophysics. Progress in Part. Nucl. Phys. - 2005. - v. 54. - p. 535-613.
7. S.V. Artemov, S.B. Igamov, A.A. Karakhodjaev et al. A modified activation method for reaction total cross section and yield measurements at low astrophysical relevant energies. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, A25 (2016) 17-23.
8. Электростатические ускорители. Под редак. А.К. Вальтера,
9. Алиев М.К.,..., Холбаев И. Эшкобилов Ш.Х. Аналитический комплекс на базе электростатического ускорителя СОКОЛ НИИПФ НУУз. Узбекский физический журнал, Ташкент, 2008, v.10(6), с.410-417.
10. F. Confortola, D. Bemmerer, H. Constantini et al., Phys. Rev., C75, 065803 (2007)
11. A. DiLeva, L. Gialanella, R. Kunz et al., Phys. Rev. Lett., 102, 232502 (2009)
12. А.Д.Вергунов, Ю.З.Левченко, М.Т.Новиков, В.М.Пистряк, В.Е.Сторишко, С.Я.Чеканов. Малогабаритный ЭСУ на 2 МэВ горизонтального типа (проект). ВАНТ, сер.: ОЯФ, вып. 3 (24), 1983, с.13-15.
13. Л.П.Ботвинов, А.Д.Вергунов, Л.С.Глазунов, А.В.Зац, Ю.З.Левченко, М.Т.Новиков, В.М.Пистряк, В.Е.Сторишко, С.Я.. Малогабаритный электростатический ускоритель на 2 МэВ горизонтального типа (пред. испытания). ВАНТ.- сер.: ТФЕ.- 1985.- в.1(22).- С. 26-28.
14. Ю.З.Левченко, С.Я.Чеканов, А.Д.Вергунов, Л.П.Батвинов, Л.С.Глазунов, А.А.Зосуля. Колонна изолирующая электростатического ускорителя. Отчет по ОКР, ХФТИ.- Харьков, 1985, № Гос. рег. Г 51840, Инв. № 1675.
15. С.Я.Чеканов, Ю.З.Левченко, В. В.Вербовский, Л.П.Батвинов, В.А.Иващенко, В.М.Пистряк, Л.С.Глазунов, В.В.Кузьменко. Натяжное

- устройство транспортера зарядов электростатического ускорителя.
Отчет по ОКР ХФТИ.- Харьков, 1985, Инв. № 1784.
16. В.В.Кузьменко, В.М.Пистряк, А.В.Симоненко, Ю.З.Левченко.
Инжектор многозарядных ионов для электростатических ускорителей // ВАНТ, сер.: ОЯФ.- 1985.- в. 3(24).- С.35-38.
 17. В.В.Кузьменко, В.М.Пистряк, А.В.Симоненко, Ю.З.Левченко, А.В.Зац
Инжектор многозарядных ионов для электростатических ускорителей
(ресурсные испытания) // ВАНТ, сер.: ТФЭ.- 1985.- в. 1(22).- С.45-47.
 - 18.Германиевые детекторы. Руководство пользователя CPR-000060.
CANBERRA IC.
 19. Настольный многоканальный анализатор гамма спектров DSA-1000.
Product catalog CANBERRA IC. Edition twelve.
 20. GENIE-2000. Operations Manual. CANBERRA IC.
 21. E. F. Gibson, K. Battleson and D. K. McDaniels. Lifetimes, Energies, and
Branching Ratios of ^{28}Si Excited States. Phys. Rev. 172 (1968) 1004
 22. E.F.Gibson, A.Goswami, F.Huang and D.K. McDaniels. 7416-keV 2^+ Level
in ^{28}Si and an Excited Prolate Rotational Band Phys. Rev. 188 (1969) 1965
 23. M.A.Meyer and N.S.Wolmarans. Strengths of (p, γ) resonances in ^{33}Cl , ^{35}Cl
and ^{28}Si . Nucl. Phys. A136 (1969) 663
 24. M. A. Meyer, N. S. Wolmarans and D. Reitmann. Nucl. Phys. A144 (1970)
261
 25. M.M.Aleonard, M.M.Aleonard, D.Castera, P.Hubert. L.P.Mennrath,
J.P.Thibaud. Mesures des vies moyennes des premiers états excités Du
Noyau ^{28}Si . Nucl. Phys. A146 (1970) 90
 26. I. Forsblom and M. Viitasalo, Comment. Phys. Math. 38 (1970) 131
 27. I. Forsblom. Investigation of ^{28}Si levels with the (α, γ) and (p, γ) reactions.
Comment. Phys. Math. 40 (1970) 65
 28. I. Forsblom. The $^{27}\text{Al}(d, n\gamma)$ Reaction and Bound Isobaric Analogue States
in ^{28}Si . Comment. Phys. Math. 42 (1971) 261
 29. P. Holmberg and A. Kiuru. Comment. Phys. Math. 40 (1970) 135

30. J. Dalmas and D. Bertault. Etude des Resonances de la Reaction $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ dans le Domaine d'Energie $E = 200\text{--}300$ keV. J. de Phys. 34 (1973) 357
31. J. Dalmas, F. Leccia and M. M. Aleonard. $E = 1.118$ MeV Resonance in the $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$ Reaction. Phys. Rev. C9 (1974) 2200
32. A. Tsveter. Resonance levels in ^{28}Si from $^{27}\text{Al}+p$ reactions Nucl. Phys. A185 (1972) 433
33. G. A. P. Engelbertink and P. M. Endt. Measurements of (p, γ) resonance strengths in the s-d shell Nucl. Phys. 88 (1966) 12
34. P. M. Endt and C. van der Leun, Nucl. Phys. A214 (1973) 1
35. P. B. Lyons, J. W. Toevs and D. G. Sargood, Nucl. Phys. A130 (1969) 1
36. J. P. Thibaud, Bordeaux University, private communication
37. J. Dalmas, Corapt. Rend. 277B (1973) 237
38. M. L. Roush, L. A. West and J. B. Marion. Precision determinations of nuclear reaction calibration energies by velocity measurements. Nucl. Phys. A147 (1970) 235
39. R. E. Azuma *et al.* A Ge(Li) counter investigation of the gamma-ray decay of ^{28}Si produced in the reaction $^{27}\text{Al}(p, \gamma)^{28}\text{Si}$. Can. J. Phys. 44 (1966) 3075
40. J. P. Gonidec, C. Miehé and G. Walter. Compt. Rend. 272B (1971) 1385
41. L. Simons *et al.*, Phys. Lett. 3 (1963) 306
42. C. Diltz. Beta decay of ^{24}Al and ^{28}P . Nucl. Phys. A18S (1972) 513
43. G. F. Neal and S. T. Lam, Bull. Am. Phys. Soc. 19 (1974) 74
44. A. Heytigers, Thesis, Utrecht University (1964)
45. M. Bister, A. Luukko and A. Anttila, Ann. Acad. Sci. Fenn. 6 (1968) 1
46. H. S. Rose and D. M. Brink. Angular Distributions of Gamma Rays in Terms of Phase-Defined Reduced Matrix Elements. Rev. Mod. Phys. 39 (1967) 306
47. P. M. Endt and C. van der Leun. Atomic Data and Nucl. Data Tables 13 (1974) 67 and Nucl. Phys. A235 (1974) 27
48. P. J. M. Smulders and P. M. Endt, Physica 28 (1962) 1093
49. A. S. Davydov and G. F. Filippov. Rotational states in even atomic nuclei. Nucl. Phys. 8 (1958) 2750

50. A. S. Davydov and V. S. Rostovsky. Relative transition probabilities between rotational levels of non-axial nuclei Nucl. Phys. 12 (1959) 58
51. M. A. Meyer, I. P. L. Reinecke and D. Reitmann. . A study of the $^{23}\text{Na}(p, \gamma)^{24}\text{Mg}$ reaction and the excited states of ^{24}Mg . Nucl. Phys. A185 (1972) 625
52. M. Shamsussoha Rasunia. Nuclear Data Sheets for A = 28. Nuclear Data Sheets, 114, 2013, p.1239-1991
53. Table of Isotopes. Seventh Edition. Edited by C. Michael Lederer and Virginia S. Shirley. 1978 by John Wiley & Sons Inc, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, p.54-55.