

7-99-285

На правах рукописи  
УДК 539.17+539.14

Т-191

ТАРАСОВ  
Олег Борисович

ПОЛУЧЕНИЕ НЕЙТРОНОИЗБЫТОЧНЫХ ИЗОТОПОВ  
ЛЕГКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПУЧКЕ  $^{36}\text{S}$  И ИЗУЧЕНИЕ  
ИХ СВОЙСТВ

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1999

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флёрва  
Объединённого института ядерных исследований, Дубна

Научные руководители:

доктор физико-математических наук  
профессор Пенионжкевич Ю.Э.

кандидат физико-математических наук  
ведущий научный сотрудник Левитович М.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук  
профессор Оглоблин А.А.

доктор физико-математических наук  
профессор Калининков В.Г.

Ведущая организация: Радиевый институт им.В.Г.Хлопина,  
Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится *18 декабря 1999* в 12 часов  
на заседании диссертационного совета Д 047.01.05 при лабора-  
тории нейтронной физики им. И.М.Франка и Лаборатории ядер-  
ных реакций им. Г.Н.Флёрва Объединённого института ядер-  
ных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "4" ноября 1999 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

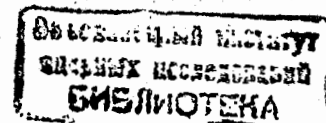


Попеко А.Г.

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Изучение свойств супернейтроноизбы-  
точных изотопов легких элементов является важной и интересной об-  
ластью современных исследований в ядерной физике. Интерес к этой  
области вызван интригующими явлениями, обнаруженными у ядер  
вблизи нейтронной линии стабильности, например "скин" или "гало".  
Сильнейшие тесты ядерных моделей могут быть сделаны с дважды  
магическими ядрами и с ядрами вблизи границ ядерной стабильности.  
Таким образом, синтез и исследование свойств супернейтроноизбы-  
точных изотопов легких элементов, в частности дважды магического  
ядра  $^{28}\text{O}$ , вызывает интерес для определения положения нейтронной  
линии стабильности, так и проверки различных моделей, описываю-  
щих свойства экзотических ядер.

Одним из интересных аспектов области нейтроноизбыточных ядер  
вблизи оболочки  $N=20$  представляется явление деформации, наблю-  
даемое в районе  $\text{Ne-Al}$ . Компактные сферические формы, предсказан-  
ные для ядер вблизи магических чисел, могут быть представлены не-  
которыми другими деформированными равновесными состояниями.  
Было показано, что для  $^{30}\text{Na}$ , имеющего одну вакансию в нейтронной  
оболочке  $N=20$ , ядерный потенциал имеет два минимума: один в  $\beta=0$  и  
другой в  $\beta=0.35$ . С увеличением числа нейтронов деформация основ-  
ной равновесной конфигурации для изотопов  $\text{Na}$  становится равной  
 $\beta=0.35$ . Сильная деформация ядер с данным числом нейтронов может  
приводить к появлению изомерных состояний в супернейтроно-  
избыточных изотопах кислорода, неона и натрия. Данное явление мо-  
жет влиять на свойства распада этих ядер, таких как время жизни, ве-  
роятность нейтронной эмиссии, и как уже наблюдалось в некоторых  
случаях, на массы и среднеквадратичный радиус.



С развитием ускорительной техники и получением экзотических пучков разделенных изотопов (например,  $^{36}\text{S}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ) экспериментаторам удалось значительно продвинуться к нейтронным линиям ядерной стабильности. Были открыты новые изотопы ( $^{29}\text{F}$ ,  $^{31}\text{Ne}$  и т.д.), измерены массы таких ядер как  $^{26,27}\text{F}$  и  $^{29,30}\text{Ne}$ , но вопрос относительно их свойств  $\beta$ -распада ( $T_{1/2}$ ,  $P_n$ ,  $Q_\beta$ ) оставался открытым. Изучение свойств  $\beta$ -распада  $^{29}\text{F}$  (самое лёгкое ядро с  $N=20$ ) вызывает повышенный интерес с точки зрения исследования стабильности дважды магического ядра  $^{28}\text{O}$ , как его ближайшего стабильного "соседа" по таблице изотопов.

Важное значение при получении максимального выхода экзотических ядер (или максимальной интенсивности пучка РЯ) имеет выбор реакции, дающей наибольший выход интересующих продуктов. Первые эксперименты, проведенные в Дубне с использованием пучков  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{40}\text{Ar}$  с энергией 7 МэВ/А позволили получить около 20 новых изотопов, значительно удаленных от линии стабильности. В этих экспериментах был обнаружен новый механизм ядерных реакций с тяжелыми ионами, получивший в последствие название глубоконеупругих реакций передач. Этот тип реакций, являющийся переходным между реакциями полного слияния и прямыми реакциями, был хорошо изучен при энергиях до 10 МэВ/А. Дальнейшее продвижение к границам ядерной стабильности было связано с использованием реакций с тяжелыми ионами высоких энергий, где в результате фрагментации ядер на толстой мишени было получено много новых нейтроноизбыточных изотопов легких элементов с относительно высокими выходами. Продвижение в область более тяжелых элементов ( $Z > 10$ ) потребовало получения пучков более тяжелых ядер с высокой интенсивностью, что в то время было проблематичным. Появление в конце 70-ых годов сильноточных ускорителей тяжелых ионов промежуточных энергий (50÷100 МэВ/А) и использование реакций фрагментации явилось но-

вым этапом в получении ядер у границ нейтронной стабильности. Особенно эффективным оказалось использование пучка ядер разделенного изотопа  $^{48}\text{Ca}$ , при фрагментации которого образовывались сильно нейтроноизбыточные ядра. Цикл экспериментов, проведенных в коллаборации ГАНИЛ-ОИЯИ Дубна с использованием пучка  $^{48}\text{Ca}$ , позволил открыть и изучить свойства около 20 новых изотопов у границ ядерной стабильности.

Между тем, дальнейшее продвижение в область нейтроноизбыточных ядер вблизи  $N=20$  потребовало поиска новых реакций, в которых можно было бы получить максимальную интенсивность радиоактивных ядер. Поэтому детальное изучение механизмов реакций под действием тяжелых ионов непосредственно связано с поиском оптимальных реакций для получения новых экзотических ядер, а также высокоинтенсивных вторичных пучков.

Основная цель работы может быть сформулирована следующим образом: получение нейтроноизбыточных ядер вблизи оболочки  $N=20$  и исследование их свойств, что включает в себя:

- Исследование механизмов реакций, приводящих к образованию сильнейтроноизбыточных ядер в диапазоне энергий 6÷75 МэВ/А. Выбор наиболее оптимальной реакции для синтеза супернейтроноизбыточных ядер вблизи оболочки  $N=20$ .
- Синтез и исследование стабильности супернейтроноизбыточных ядер вблизи оболочки  $N=20$ .
- Изучение характеристик распада нейтроноизбыточных ядер в области  $N=20$ .

Научная новизна и практическая ценность. В данной работе впервые получена экспериментальная информация о закономерностях выходов продуктов реакций на различных пучках в диапазоне энергий

6-75 МэВ на нуклон. Данная информация в совокупности с анализом выходов вторичных продуктов в зависимости от энергии позволяет сделать вывод, что для синтеза нейтроноизбыточных изотопов в области оболочки  $N=20$  предпочтителен пучок нейтроноизбыточных изотопов серы, а именно изотопов  $^{36}\text{S}$ , с энергией в диапазоне 30-70 МэВ на нуклон

Впервые в данной работе получено доказательство ядерной нестабильности дважды магического ядра  $^{28}\text{O}$ . Не было зарегистрировано ни одного события соответствующего изотопам кислорода  $^{26}\text{O}$  и  $^{28}\text{O}$ . Верхние пределы сечения образования изотопов кислорода, извлеченных из данных, равны 0.7 пбн для  $^{26}\text{O}$  и 0.2 пбн для  $^{28}\text{O}$  соответственно.

Впервые были определены характеристики  $\beta$ -распадов ( $T_{1/2}$ ,  $P_n$ ) нейтроноизбыточных ядер  $^{26,27,29}\text{F}$  и  $^{29,30}\text{Ne}$  вблизи оболочки  $N=20$  в реакциях квазифрагментации пучка  $^{36}\text{S}$ . Уточнены характеристики распадов для остальных ядер в области  $N=20$ . Впервые были получены данные по  $\gamma$ -излучению, сопровождающего  $\beta$ -распад нейтроноизбыточных ядер  $^{24}\text{O}$ ,  $^{25-27}\text{F}$  и  $^{28-30}\text{Ne}$ .

Разработанное в рамках диссертационной работы программное обеспечение для моделирования экспериментов и анализа экспериментальной информации широко используется в ряде ведущих ядерных центров (ОИЯИ, ГАНИЛ, РИКЕН, МСУ, ГСИ).

**На защиту выносятся** следующие положения и результаты:

1. Результаты исследований закономерностей образования ядер на пучках ионов серы в зависимости от нейтронного избытка пучка, отношения  $N/Z$  ядер мишени, от энергии ускоряемой частицы. Разработка аналитической формулы для оценки интенсивности вторичных пучков.

2. Результаты исследования стабильности дважды магического

ядра  $^{28}\text{O}$ .

3. Разработка экспериментальных методик регистрации и исследования свойств миллисекундных  $\beta$ -распадов.

4. Результаты исследований характеристик  $\beta$ -распада ( $T_{1/2}$ ,  $P_n$ ) нейтроноизбыточных ядер вблизи оболочки  $N=20$  в реакции квазифрагментации пучка  $^{36}\text{S}$ .

5. Разработка программного обеспечения для моделирования экспериментов и анализа экспериментальной информации.

### **Апробация работы и публикации.**

Материалы, вошедшие в диссертацию, докладывались на семинарах ЛЯР ОИЯИ, ГАНИЛ (Кан, Франция), а также на следующих конференциях и совещаниях: Международное совещание, посвященное 10-летию сотрудничеству коллаборации Дубна-ГАНИЛ (Кан, Франция, 3-8 ноября 1998 г.), Международная конференция по экзотическим ядрам и атомным массам ENAM-98 (Мичиган, США, июнь 1998 г.), Международной конференции по структуре ядра ANIS-97 (Кан, Франция, 4-8 ноября 1997 г.), VI Международная школа-семинар по физике тяжелых ионов (Дубна, 22-27 сентября, 1997 г.), Международное совещание по экзотическим ядрам (Ржеж, Чехия, 12-16 мая 1997 г.), Совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Обнинск, июнь 1997 г.). Материалы, вошедшие в диссертацию, достаточно полно опубликованы в 10-ти печатных работах, приведенных в конце реферата.

### **Объём и структура диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и приложения. Диссертация содержит 117 страниц машинописного текста, включающих в себя 15 таблиц, 75 рисунков и список литературы из 108 наименований.

## 2. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** определена актуальность и значимость изучаемых в работе проблем. Описана структура диссертации, представлена информация об апробации работы, основные публикации, составившие содержание диссертации и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены различные реакции, используемые для получения ядер удаленных от линии стабильности. Обсуждаются основные способы получения пучков радиоактивных ядер, а именно, использование метода масс-сепаратора и ISOL метода. Приведена информация о крупных ускорительных комплексах, где уже реализованы данные методы или находятся в стадии проекта.

Было показано, что нейтроноизбыточные ядра в области  $N=20$  возможно получить только методом "фрагмент-сепаратора" в реакциях передачи или во фрагментации.

Разработана аналитическая формула для оценки интенсивности вторичных пучков, получаемых методом фрагмент-сепаратора, окончательный вид которой выглядит следующим образом:

$$I_{\text{втор}} \propto I_{\text{перв}} \frac{E^{2.5}}{Z_B^{0.1763Z_B}}, \quad /1/$$

где  $E$  - энергия налетающей частицы [МэВ/А],  $I_{\text{перв}}$  - интенсивность первичного пучка [1/сек],  $Z_B$  - атомный номер бомбардирующей частицы. При  $Z_B$ , близкому к заряду фрагмента из разложения выражения, /1/ в ряд Тейлора следует, что экспонента пропорциональна атомному номеру налетающей частицы. Таким образом, выход продуктов обратно пропорционален в этом случае квадрату атомного номера первичного пучка. На Рис.1 представлены вычисления по программе

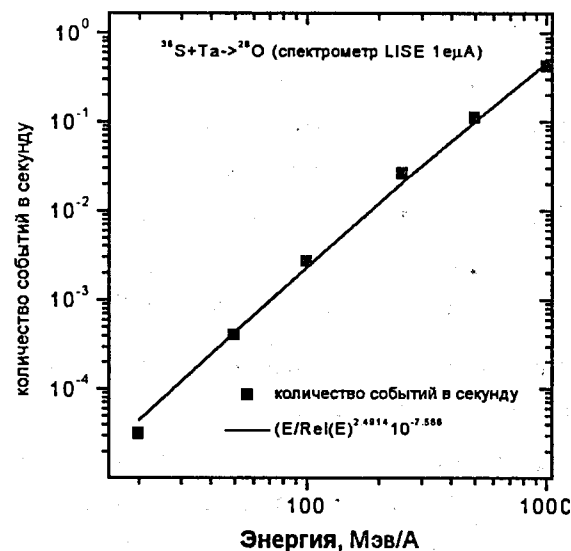


Рис.1. Максимальный выход изотопов  $^{28}\text{O}$  от энергии на основе вычислений программы "LISE" во фрагментации  $^{36}\text{S}$  на танталовой мишени для спектрометра "LISE". Сплошная линия есть результат фитирования функцией  $a \cdot E^b$ .

ЛИСЕ\* максимального выхода изотопа  $^{28}\text{O}$  от энергии, а также результаты фитирования функцией  $a \cdot E^b$ . Наилучшее согласие достигается при показателе степени равным 2.491, что подтверждает предположение о пропорциональности интенсивности вторичного пучка от энергии в степени 2.5 (см. уравнение /1/). Также необходимо отметить, что ввод релятивистской поправки позволил хорошо аппроксимировать данные при релятивистских энергиях.

На основе сравнения от энергии интенсивностей первичных пучков на различных ускорителях было продемонстрировано, что энергия первичного пучка не является основополагающим фактором для синтеза нейтроноизбыточных изотопов лёгких ядер<sup>†</sup>. Преимуществами одного эксперимента над другим будут являться большие акцептансы спектрометра, высокие технологии ускорения первичного пучка, а

\* Описание программы подробно приводится в приложении к диссертации.

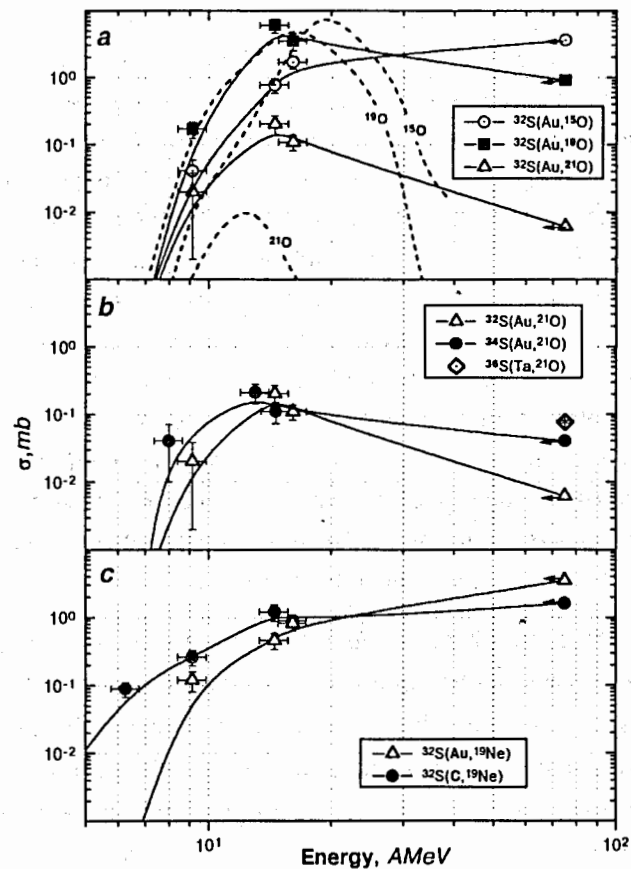
† Так например, дважды магический протоноизбыточный изотоп  $^{100}\text{Sn}$  был одновременно синтезирован в ГАНИИ при промежуточных энергиях и в ГСИ при энергии уже больше ГэВ на нуклон.

также, безусловно выбор реакции.

Было показано, что для получения нейтроноизбыточных изотопов наиболее выгодно использовать пучок стабильного нейтроноизбыточного изотопа с атомным номером наиболее близким к синтезируемому продукту. Так для случая вторичного продукта  $^{28}\text{O}$  наиболее близким нейтроноизбыточным пучком по атомному числу, у которого число нейтронов столько же или больше, является пучок изотопов  $^{36}\text{S}$ .

**Вторая глава** посвящена исследованиям закономерностей образования различных изотопов элементов с  $6 \leq Z \leq 14$  в реакциях на пучках  $^{32,34,36}\text{S}$  в диапазоне энергий  $6 \leq E \leq 75$  МэВ/А. Эксперименты на пучках  $^{32,34}\text{S}$  при энергии  $6 < E < 17$  МэВ/А были выполнены на циклотроне У400 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Для измерения выходов различных изотопов использовался магнитный спектрометр МСП-144, описание которого кратко даётся в данной главе. На основе экспериментальной информации даны оценки образования различных изотопов для промежуточных энергий на пучках  $^{32,34,36}\text{S}$ . Приведены сравнения экспериментальных результатов в области низких энергий с расчетами по динамической модели глубококонепругих столкновений (см.Рис.2), откуда следует, что вклад глубококонепругих реакций передач в сечения образования нейтроноизбыточных ядер является определяющим в области низких энергий. Тогда как для промежуточных энергий основной вклад в сечения образования ядер вносят реакции фрагментации, хотя как видно из рисунка при этих энергиях еще заметен вклад реакции многонуклонных передач. Полученные данные обсуждаются с точки зрения возможностей реакций с тяжелыми ионами в широком диапазоне энергий для получения ядер, удаленных от линии стабильности.

На основе аналитических выкладок в первой главе и анализа закономерностей выходов продуктов реакций на пучках изотопов серы в



**Рис.2.** Полные сечения образования различных изотопов, как функция энергии бомбардирующей частицы. Представлены зависимости сечений от: {a} - нейтронного избытка образующихся изотопов кислорода для пучка  $^{32}\text{S}$  на золотой мишени, {b} - нейтронного избытка пучка изотопа серы для образования изотопа  $^{21}\text{O}$  на золотой мишени, включая экспериментальную точку 75 МэВ/А для пучка  $^{36}\text{S}$ , {c} - различных мишеней для пучка  $^{32}\text{S}$  для изотопа  $^{19}\text{Ne}$ .

данной главе были сделаны следующие выводы:

- для синтеза нейтроноизбыточных изотопов в области оболочки  $N=20$  предпочтителен пучок нейтроноизбыточных изотопов серы, а именно изотопов  $^{36}\text{S}$ , с энергией в диапазоне 30-70 МэВ на нуклон;
- в случае использования первичного пучка с энергией близкой к энергии Ферми (20-40 МэВ на нуклон) для получения нейтроноизбыточных ядер предпочтительно использовать более тяжелые мишени.

**В третьей главе** представлены результаты исследований стабильности дважды магического ядра  $^{28}\text{O}$  и нейтроноизбыточных ядер в области оболочки  $N=20$ . Эксперимент, целью которого являлись иссле-

дования стабильности нейтроноизбыточных ядер в области оболочки  $N=20$  и свойств  $\beta$ -распада ядер в этом регионе, был проведен в Национальной лаборатории ГАНИЛ (Кан, Франция) по предложению ЛЯР с использованием спектрометра LISE<sup>\*</sup>, который был специально адаптирован к подобному типу экспериментов. Попытка синтезировать  $^{28}\text{O}$  была предпринята в реакции фрагментации пучка ионов  $^{36}\text{S}$  (78 МэВ/А) со средней интенсивностью 800 энА. Предварительно был проведен ряд экспериментов на пучке  $^{36}\text{S}$  с целью получения следующей информации: сечения образования ядер вблизи  $^{28}\text{O}$  на различных мишенях, выбор оптимальной мишени и определение оптимальной её толщины, выбор поглотителя в промежуточной дисперсивной плоскости спектрометра и определение его оптимальной толщины, наиболее вероятная скорость фрагментов, ширина импульсных распределений, определение наиболее оптимальной настройки спектрометра (магнитная жесткость, размеры щелей и т.д.).

Для определения наилучшей настройки спектрометра LISE при получении  $^{28}\text{O}$  были проведены измерения импульсного распределения всех фрагментов в области  $N=20$  и оптимизация мишеней (Be, C, Ni, Ta). Было показано, что танталовая мишень дает наибольший выход нейтроноизбыточных ядер, что находится в согласии с результатами предыдущих экспериментов и с выводами второй главы.

На Рис.3 представлена матрица  $(A/Q, Z)$  полученная в результате 53-часового измерения при настройке спектрометра на поиск  $^{28}\text{O}$ . Отчетливо виден самый тяжелый изотоп фтора  $^{29}\text{F}$ ; всего было зарегистрировано 519 событий данного нуклида. Не было зарегистрировано ни одного события соответствующего изотопам кислорода  $^{26}\text{O}$  и  $^{28}\text{O}$ . Ожидалось около  $11 \pm 2$  событий, соответствующих  $^{28}\text{O}$  в соответствии с оценками параметризации ЕРАХ<sup>†</sup>, модифицированной автором на основе систематики сечений образования изотопов легких ядер в реакции фрагментации изотопа  $^{36}\text{S}$  на различных мишенях. Результаты исследований данным методом указывают на нестабильность изотопа

\* Описание спектрометра "LISE" приводится в приложении к диссертации.

† Описание эмпирической параметризации приводится в приложении к диссертации.

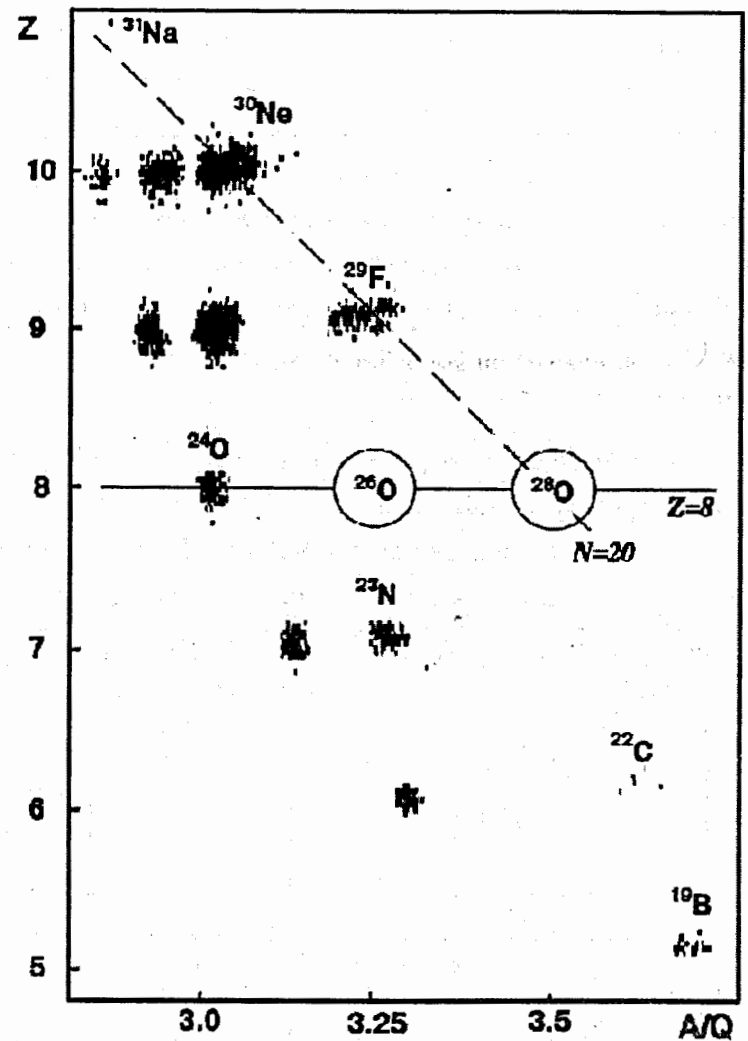
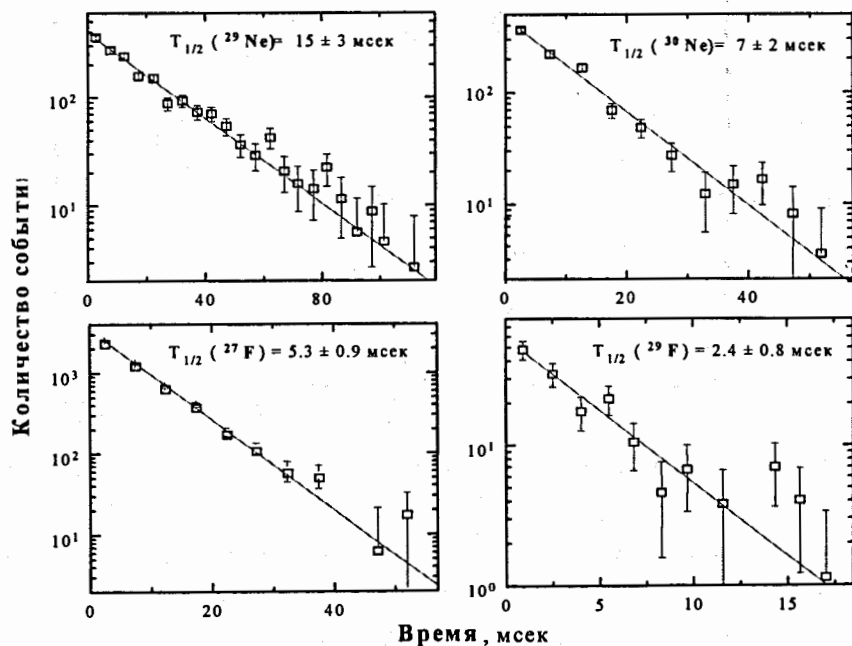


Рис.3. Идентификационная матрица  $(A/Q, Z)$ . Штриховая линия показывает ядра с  $N=20$ , сплошная линия изотопы кислорода ( $Z=8$ ).

$^{28}\text{O}$ , также как и для  $^{26}\text{O}$ . Верхние пределы сечения образования изотопов кислорода, извлеченных из данных, равны 0.7 пбн для  $^{26}\text{O}$  и 0.2 пбн для  $^{28}\text{O}$  соответственно. Вывод о несвязанности ядра  $^{28}\text{O}$  также следует из заложенной модели в расчетах по оболочечной модели, выполненных для описания характеристик распада ядер вблизи оболочки  $N=20$  в данном эксперименте.

**Четвертая глава** посвящена исследованиям свойств  $\beta$ -распада и изомерных состояний нейтроноизбыточных ядер в области  $N=20$ . Описаны методы исследований свойств миллисекундных  $\beta$ -распада и микросекундных изомерных состояний, которые были использованы в настоящей работе. Для регистрации  $\beta$ -распадов применялся телескоп из пяти полупроводниковых детекторов, которые были окружены  $^3\text{He}$  нейтронными счетчиками и Ge детекторами для измерения  $\beta$ -п и  $\beta$ - $\gamma$  совпадений при  $\beta$ -распаде и поиска микросекундных изомерных состояний.

В данном эксперименте впервые были получены характеристики  $\beta$ -распадов супернейтроноизбыточных ядер  $^{26,27,29}\text{F}$  и  $^{29,30}\text{Ne}$ . Измерение периодов их полураспада представлено на Рис.4. В Таблице приводятся результаты исследования свойств  $\beta$ -распада нейтроноизбыточных



**Рис.4.** Определение периодов полураспада супернейтроноизбыточных ядер  $^{27,29}\text{F}$ ,  $^{29,30}\text{Ne}$ . Временные спектры приведены после вычитания постоянного фона и учёта вклада дочерних распадов.

ядер вблизи оболочки  $N=20$ . В эксперименте были уточнены результаты измерений периодов полураспада и вероятностей нейтронной эмиссии для ядер  $^{22}\text{N}$ ,  $^{24}\text{O}$ ,  $^{25}\text{F}$ , проведённых в других экспериментах. Для восстановления реальных характеристик распада была создана и использована программа моделирования регистрации цепочки распадов. Алгоритм программы изложен в приложении к диссертации.

В данной главе также представлены новые систематики периодов полураспада нейтроноизбыточных изотопов элементов с  $Z = 7 \div 16$  и вероятностей испускания запаздывающих нейтронов с учётом полученных нами данных.

Был проведён детальный анализ  $\gamma$ -излучения, испущенного после  $\beta$ -распада нейтроноизбыточных ядер  $^{24}\text{O}$ ,  $^{25-27}\text{F}$  и  $^{28-30}\text{Ne}$  (полученных в реакциях фрагментации на пучках  $^{36}\text{S}$ ) был проделан в данной работе. Измеренные энергетические спектры  $\gamma$ -излучения сравнивались с вычислениями по оболочечной модели.

Приведены результаты исследований характеристик распада короткоживущего ( $T_{1/2}=200$  нс) изомера  $^{32\text{m}}\text{Al}$ . Показано, что использованный в данной работе метод обнаружения и идентификации изомер-

*Таблица. Основные характеристики  $\beta$ -распада нейтроноизбыточных ядер вблизи оболочки  $N=20$ , полученных в реакциях квазифрагментации  $^{36}\text{S}$ . Звёздочкой отмечены измеренные впервые характеристики распадов.*

A,Z	$T_{1/2}$ [мс]	$P_n$ [%]
$^{22}\text{N}$	31(5)	37(14)
$^{24}\text{O}$	67(10)	12(8)
$^{25}\text{F}$	70(10)	14(5)*
$^{26}\text{F}$	9.6(0.8)*	11(4)*
$^{27}\text{F}$	5.2(0.3)*	90(30)*
$^{29}\text{F}$	2.4(0.4)*	100(80)*
$^{27}\text{Ne}$	22(6)	0(3)
$^{28}\text{Ne}$	20(3)	11(3)
$^{29}\text{Ne}$	15(4)*	27(9)*
$^{30}\text{Ne}$	7.5(1.5)*	9(17)*
$^{30}\text{Na}$	50(4)	
$^{31}\text{Na}$	16.9(1.5)	

\* Метод обнаружения и идентификации микросекундных изомеров подробно изложен в приложении к диссертации.



ров является эффективным для получения и изучения свойств изомеров с временем жизни в диапазоне  $0.01 \div 100$  мкс.

**В заключении** изложены основные результаты, полученные в данной диссертационной работе:

— Исследованы закономерности образования различных изотопов элементов с  $6 \leq Z \leq 14$  в реакциях на пучках  $^{32,34,36}\text{S}$  в диапазоне энергий  $6 \leq E \leq 75$  МэВ/А. Получены выходы ядер в зависимости от мишени, бомбардирующей энергии пучка и от нейтронного избытка ядер пучка. На основе экспериментальной информации даны оценки образования различных изотопов для промежуточных энергий на пучках  $^{32,34,36}\text{S}$ . Приведены сравнения экспериментальных результатов измерения сечений в области низких энергий с расчетами по динамической модели глубоконеупругих столкновений. Проведен анализ возможностей реакций с тяжелыми ионами в широком диапазоне энергий для получения ядер, удаленных от линии стабильности. Разработана аналитическая формула для оценки интенсивности вторичных пучков. Было показано, что наиболее выгодной для синтеза нейтроноизбыточных ядер вблизи оболочки  $N=20$  является фрагментация нейтроноизбыточного изотопа серы  $^{36}\text{S}$ .

— В реакции фрагментации нейтроноизбыточного изотопа серы  $^{36}\text{S}$  получено свидетельство о ядерной нестабильности дважды магического ядра  $^{28}\text{O}$ . Верхние пределы сечения образования изотопов кислорода, извлеченные из данных, равны 0.7 пбн для  $^{26}\text{O}$  и 0.2 пбн для  $^{28}\text{O}$  соответственно.

— Получены характеристики  $\beta$ -распадов ( $T_{1/2}, P_n$ ) нейтроноизбыточных ядер  $^{26,27,29}\text{F}$  и  $^{29,30}\text{Ne}$  вблизи оболочки  $N=20$  в реакциях квазифрагментации пучка  $^{36}\text{S}$ . В эксперименте были уточнены результаты измерений периодов полураспада и вероятностей нейтронной эмиссии для ядер  $^{22}\text{N}$ ,  $^{24}\text{O}$ ,  $^{25}\text{F}$ . Приведены результаты исследований характери-

стик распада изомера  $^{32m}\text{Al}$ .

— На основе полученных сечений продуктов реакции на пучках ионов серы модифицирована эмпирическая параметризация для оценок сечений образования нейтроноизбыточных изотопов.

— Разработано программное обеспечение для моделирования экспериментов и анализа экспериментальной информации:

— Модифицирована программа "LISE" (расчет трансмиссии и выходов фрагментов для ахроматического спектрометра), разработана ее версия под Windows;

— Разработана программа автоматического поиска двумерных пиков и определения их статистических характеристик;

— Разработана программа моделирования регистрации продуктов цепочки  $\beta$ -распадов.

#### **В приложении к диссертации**

— Приводится описание фрагмент-сепаратора LISE;

— Представлена эмпирическая параметризация выходов продуктов в реакции фрагментации и ее модификации на основе последних экспериментальных данных;

— Приводится описание новой версии программы "LISE" под Windows для оценки выходов вторичных продуктов и их трансмиссии с использованием фрагмент-сепараторов. Детальное описание программы можно найти, используя ВЕБ-ссылку <http://dnr080.jinr.ru/LISE.html>. Данную программу можно получить, используя ФТП по адресу: 159.93.20.89 (Дубна) или 192.93.218.174 (Кан) user: anonymous;

— Описана программа, разработанная для автоматического поиска двумерных пиков и определения их статистических характери-

стик;

— Приводится алгоритм программы, разработанной для моделирования регистрации продуктов цепочки  $\beta$ -распадов;

— Представлен метод обнаружения и идентификации микросекундных изомеров.

**Список публикаций с основными результатами диссертации.**

1. Tarasov O., Allatt R., Angelique J.C., Anne R., Borcea C., Dlouhy Z., Donzaud C., Grévy S., Guillemaud-Mueller D., Lewitowicz M., Lukyanov S., Mueller A.C., Nowacki F., Oganessian Yu., Orr N.A., Ostrowski A.N., Page R.D., Penionzhkevich Yu., Pougheon F., Reed A., Saint-Laurent M.G., Schwab W., Sokol E., Sorlin O., Trinder W., Winfield J.S. "Search for  $^{28}\text{O}$  and study of the neutron rich nuclei near the neutron closure  $N=20$ " // Physics Letters B, 1997, V.409, p.64-70; <http://dnr080.jinr.ru/paper/28O/28O.htm>
2. Tarasov O.B., Penionzhkevich Yu.E., Anne R., Baiborodin D.A., Guillemaud-Mueller D., Fomichev A.S., Kalpakchieva R., Lewitowicz M., Lukyanov S.M., Maidikov V.Z., Mueller A.C., Oganessian Yu.Ts., Saint-Laurent M.G., Skobelev N.K., Sorlin O., Toneev V.D., Trinder W. "Production of nuclei in  $^{32,34,36}\text{S}$ -induced reactions in the energy range  $6\div 75$  MeV/A" // Nuclear Physics A, 1998, V.629, pp.605-620; <http://dnr080.jinr.ru/paper/32s/32s.htm>
3. Tarasov O., Allatt R., Angelique J.C., Anne R., Borcea C., Dlouhy Z., Donzaud C., Grévy S., Guillemaud-Mueller D., Izosimov I.N., Lewitowicz M., Lukyanov S., Mueller A.C., Nowacki F., Oganessian Yu., Orr N.A., Ostrowski A.N., Page R.D., Penionzhkevich Yu., Pougheon F., Reed A., Saint-Laurent M.G., Schwab W., Siiskonen T., Sokol E., Sorlin O., Suhonen J., Trinder W., Winfield J.S. " $\beta$ -decay of neutron rich isotopes of fluorine and neon" // Proceedings of the VI-International School-Seminar, Dubna, 1997, Word Scientific, Singapore 1998, Ed. Yu.Ts.Oganessian and R.Kalpakchieva, pp.364-366.

4. Reed A., Tarasov O., Page R.D., Guillemaud-Mueller D., Penionzhkevich Yu., Allatt R., Angelique J.C., Anne R., Borcea C., Burjan V., Catford W.N., Dlouhy Z., Donzaud C., Grevy S., Lewitowicz M., Lukyanov S., Marques F.M., Martinez G., Mueller A.C., Nolan p.J., Novak J., Orr N.A., Pougheon F., Regan p.H., Saint-Laurent M.G., Siiskonen T., Sokol E., Sorlin O., Suhonen J., Trinder W., Vincent S.M., "Radioactivity of Neutron Rich Oxygen, Fluorine and Neon Isotopes" // Physical Review C, 1999, V.60, pp.; <http://dnr080.jinr.ru/paper/RDP/rdp.pdf>
5. Robinson M., Halse P., Trinder W., Anne R., Borcea C., Lewitowicz M., Lukyanov S., Mirea M., Oganessian Yu., Orr N.A., Penionzhkevich Yu., Saint-Laurent M.G., Tarasov O. "New isomer  $^{32m}\text{Al}$ " // Physical Review C, 1996, V.53, pp.1465-1468; <http://dnr080.jinr.ru/paper/32Al.pdf>
6. Lewitowicz M., Anne R., Bazin D., Auger G., Corre J.M., Hue R., Saint-Laurent M.G., Grzywacz R., Pfutzner M., Rykaczewski K., Zylizc J., Fomichev A., Lukyanov S., Penionzhkevich Yu., Tarasov O., Borrel V., Guilemaund-Mueller D., Mueller A.C., Pougheon F., Sorlin O., Borcea C., Janas Z., Keller H., Schmidt K., Dorfler T., Schmidt-Ott W.D., Huyse M., Szerypo J., Wauters J. "Identification of the doubly-magic nucleus  $^{100}\text{Sn}$  in the reaction  $^{112}\text{Sn}+^{nat}\text{Ni}$  at 63 MeV/nucleon" // Phys. Lett. B, 1994, Vol.332, pp.20-24.
7. Rykaczewski K., Anne R., Auger G., Bazin D., Borcea C., Borrel V., Corre J.M., Dorfler T., Fomichev A., Grzywacz R., Guillemaud-Mueller D., Hue R., Huyse M., Janas Z., Keller H., Lewitowicz M., Lukyanov S., Mueller A.C., Penionzhkevich Yu., Pfutzner M., Pougheon F., Saint-Laurent M.G., Schmidt K., Schmidt-Ott W.D., Sorlin O., Szerypo J., Tarasov O., Wauters J., Zylizc J. "Identification of New Nuclei at and beyond the Proton Drip-Line near the Doubly-Magic Nucleus  $^{100}\text{Sn}$  Region" // Physical Review C, 1995, V.52, p.2310.
8. Fomichev A.S., David I., Dlouhy Z., Lukyanov S.M., Oganessian Yu.Ts., Penionzhkevich Yu.E., Perelygin V.P., Skobelev N.K., Tarasov O.B., Wolski R., "Fission of  $^{209}\text{Bi}$  Induced by  $^6\text{He}$  Ions". //

Z.Physik. A, 1995, V.351, p.129.

9. Grzywacz R., Anne R., Auger G., Bazin D., Borcea C., Borrel V., Corre J.M., Dorfler T., Fomichev A., Guilemaund-Mueller D., Hue R., Huyse M., Janas Z., Keller H., Lewitowicz M., Lukyanov S., Mueller A.C., Penionzhkevich Yu., Pfutzner M., Pougheon F., Rykaczewski K., Saint-Laurent M.G., Schmidt K., Schmidt-Ott W.D., Sorlin O., Szerypo J., Tarasov O., Wauters J. "Identification of  $\mu$ s-isomers produced in the quasifragmentation of a  $^{112}\text{Sn}$  beam" // Phys. Lett. B, 1995. V.355, p.439.
10. Grzywacz R., Anne R., Auger G., Bazin D., Borcea C., Corre J.M., Dorfler T., Fomichev A., Grevy S., Grawe H., Guillemaud-Mueller D., Huyse M., Janas Z., Keller H., Lewitowicz M., Lukyanov S., Mueller A.C., Orr N., Ostrowski A., Penionzhkevich Yu., Piechaczek A., Pougheon F., Rykaczewski K., Saint-Laurent M.G., Schmidt-Ott W.D., Sorlin O., Szerypo J., Tarasov O., Wauters J., Zylicz J. "New  $\mu$ s-isomers in  $T_2=1$  nuclei produced in the  $^{112}\text{Sn}(63\text{AMeV}) + ^{\text{nat}}\text{Ni}$  reaction" // Physical Review C, 1997, V.55, pp.1126-1129; <http://dnr080.jinr.ru/paper/isomers.pdf>

Рукопись поступила в издательский отдел  
27 октября 1999 года.