

Г-836

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

7 - 7336

ГРИДНЕВ

Герман Федорович

ПОЛУЧЕНИЕ НЕЙТРОНОИЗБЫТОЧНЫХ ИЗОТОПОВ
ЛЕГКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В РЕАКЦИЯХ ПЕРЕДАЧИ
С ИОНАМИ ^{22}Ne И ^{40}Ar

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра
и космических лучей

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1973

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук В.В. Волков

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук О.Ф. Немец,
кандидат физико-математических наук В.К. Лукьянов.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова,
г. Москва.

Автореферат разослан " " 1973 г.

Защита диссертации состоится " " "

1973 года в " " часов на заседании Объединенного Ученого совета ЛНФ и ЛЯР ОИЯИ (Дубна, Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Отзывы и замечания просим направлять по адресу:
г. Дубна, Московской области, Объединенный институт ядерных исследований, ученому секретарю Объединенного Ученого совета ЛЯР и ЛНФ.

Ученый секретарь Совета

Э.Н. Каржавина

7 - 7336

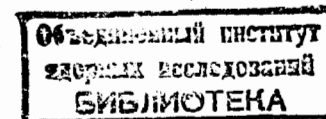
ГРИДНЕВ
Герман Федорович

ПОЛУЧЕНИЕ НЕЙТРОНОИЗЫТОЧНЫХ ИЗОТОПОВ
ЛЕГКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В РЕАКЦИЯХ ПЕРЕДАЧИ
С ИОНАМИ ^{22}Ne И ^{40}Ar .

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра
и космических лучей

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)



В экспериментах, начатых в 1969 году в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ, для получения нейтроноизбыточных легких ядер впервые были использованы реакции передачи на тяжелых ионах. Результатом этих работ явилось получение всех известных к тому времени нейтроноизбыточных изотопов элементов от He до Ne и одиннадцати новых изотопов C, N, O, F, Ne. Были получены также данные, свидетельствующие о вероятной ядерной неустойчивости ^{10}He и $^{13,14}\text{Be}$. Эти работы, в которых принимал участие автор диссертации, продемонстрировали высокую эффективность применения тяжелых ионов для получения и изучения свойств нейтроноизбыточных изотопов легких элементов.

Настоящая диссертация написана по материалам работ, являющихся продолжением этих исследований. Она посвящена изучению реакций многонуклонных передач на ^{22}Ne и ^{40}Ar , приводящих к образованию нейтроноизбыточных легких ядер и использованию ^{40}Ar для получения новых нейтронообогащенных ядер.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

В первой главе представлен обзор литературных данных. В ней рассмотрены наиболее интересные физические свойства легких ядер с большим избытком нейтронов. Проводится сравнение различных способов получения таких ядер, а также методов их идентификации и изучения.

Среди вопросов, связанных с изучением нейтронообогащенных легких ядер, можно указать на проблемы существования легких ядер с очень большим избытком нейтронов, таких, как, например, ^{22}He /1/, вопрос о границе ядерной устойчивости легких нуклидов, возможность различия в пространственном распределении нейтронов и протонов, существования новых видов радиоактивного распада - двухнейтронного распада ядер /2/, вопросы нуклеосинтеза в космофизике.

Нейтронноизбыточные изотопы легких элементов получались в ядерных реакциях различного типа: реакциях на легких частицах малых и средних энергий, фотоядерных реакциях, при спонтанном и вынужденном делении тяжелых ядер, в реакциях на π^- -мезонах. Но наибольший успех в получении таких ядер связан с использованием реакций на протонах высоких энергий и тяжелых ионах. В реакциях с протонами высоких энергий впервые были получены ^{11}Li , $^{14,15}\text{B}$, $^{17,19}\text{C}$, ^{19}N , ^{21}O ; измерены времена жизни ^{11}Li , $^{27-33}\text{Na}$; показана ядерная нестабильность ^{10}Li и ^{13}Be . В реакциях на тяжелых ионах были получены новые изотопы ^{18}C , $^{20,21}\text{N}$, $^{22-24}\text{O}$, $^{23-25}\text{F}$, $^{25,26}\text{Ne}$; измерены массы $^{21,22}\text{O}$; показана ядерная нестабильность ^{10}He , $^{13,14}\text{Be}$; изучены свойства ^{25}Ne (ссылки на оригинальные работы можно найти в обзорах /3,4/).

Для регистрации и идентификации ядер в реакциях с протонами использовались телескоп детекторов (с измерением энергии иона, его удельной ионизации и времени пролета) или масс-сепаратор. С помощью первого метода удалось разделить изотопы элементов вплоть до Ne . Однако продвижение к границе ядерной устойчивости встретило трудности, обусловленные малостью сечений образования новых ядер и значительной перегрузкой регистрирующей аппаратуры от частиц с малыми Z . Применение масс-сепаратора позволило использовать очень толстые мишени, что значительно повысило выходы ядер, но пока получены результаты лишь для щелочных элементов.

Использование в реакциях с тяжелыми ионами для идентификации тяжелых заряженных частиц магнитного спектрометра с телескопом детекторов $\Delta E, E$ в выходном фокусе позволило разгрузить детектирующую аппаратуру от упруго рассеянных ионов и получить, на первых этапах работы, разрешение, достаточное для разделения изотопов с атомным номером $Z \leq 10$.

Во второй главе диссертации описаны методики, использованные при измерениях. Это методика $\Delta E, E$ и комбинация магнитного спектрометра с техникой $\Delta E, E$. На основе проведенных исследований показана возможность разделения, с помощью последней методики, изотопов с массовым числом A вплоть до 40-50. Приводится описание электронного измерительного комплекса и процедуры обработки экспериментальных данных.

В методике $\Delta E, E$ продукты реакций регистрировались телескопом из тонкого и толстого детекторов. Достоинством метода является его большая информативность, т.к. регистрируются все частицы, вылетевшие под данным углом ϑ из мишени во всем диапазоне энергий. К недостаткам относится невозможность разделения изотопов элементов с $Z > 8$. Комбинированная методика свободна от этого недостатка, но измерение дифференциальных сечений образования большого числа продуктов в широком диапазоне углов и энергий требует здесь затраты большого времени работы ускорителя. Поэтому эксперименты проводились с помощью двух методик. Там, где было достаточно разделения элементов, использовалась методика $\Delta E, E$, а изотопные распределения измерялись в комбинированной методике.

Импульсы с детекторов ΔE и E , в обеих методиках, усиливались и поступали на двоянный амплитудный кодировщик. Регистрация событий осуществлялась в памяти амплитудного анализатора АИ-4096, работающего в двухмерном режиме.

Двоянный кодировщик содержал два спектрометрических тракта, блоки логики и управления, тракт монитора. Особое внимание при проектировании и наладке кодировщика было уделено его стабильной и безошибочной работе в течение длительных экспериментов. Для выполнения первого условия характеристики каждого тракта стабилизировались по двум точкам - порогу и усилению. Безошибоч-

ность работы кодировщика обеспечивалась некоторыми схемными решениями, тщательной синхронизацией работы спектрометрических трактов и регулярно проверялась по специальной программе, предложенной автором /5/.

Характерное разрешение тонких ΔE кремниевых детекторов при регистрации тяжелых ионов составляет $\sim 4\%$. Этого разрешения как в методе $\Delta E, E$, так и в комбинированной методике недостаточно для разделения соседних изотопов с атомными номерами $Z > 8$ по оси ΔE двухмерного $\Delta E, (E - \Delta E)$ спектра. Однако в комбинированной методике области регистрации соседних изотопов значительно разнесены по оси $(E - \Delta E)$ двухмерного спектра. Различие в энергии соседних изотопов после прохождения ими магнитного спектрометра, определяемое соотношением $E = \text{const} \cdot H^2 \cdot Z^2 / A$, еще больше увеличивается после прохождения частицами детектора ΔE , т.к. более тяжелый изотоп потеряет в нем большую энергию. Показано, что в комбинированной методике достижимо разделение изотопов с массовыми числами 40-50.

Третья глава посвящена изучению характеристик реакций передачи при взаимодействии ионов ^{22}Ne и ^{40}Ar с мишенью из ^{232}Th . Ранее нами было показано, что именно тяжелые ядра-мишени позволяют получить наибольший выход нейтроноизбыточных изотопов /4/. Для продвижения к границе ядерной стабильности для нуклидов с $Z \geq 5$ ион ^{22}Ne особенно удобен. Представляло интерес также выяснить перспективы использования более тяжелых, уже обогащенных нейтронами, ионов, таких как ^{40}Ar . Были измерены энергетические спектры, угловые распределения и сечения образования легких элементов при облучении ^{232}Th ионами ^{22}Ne с энергией 174 Мэв и ионами ^{40}Ar с энергиями 297 и 388 Мэв /6,7/.

Характерные особенности энергетических спектров продуктов можно видеть на примере спектров P, Ce, K из реакции $\text{Th} + \text{Ar}$,

представленных на рис.1. Спектры захватывают весьма широкие интервалы энергии, достигающие 200-240 Мэв. Сравнение энергетических спектров элементов и их изотопов для угла 40° показало, что их ширины близки. Это означает, что большая ширина спектров определяется не результатом наложения энергетических спектров отдельных изотопов, а особенностями взаимодействия двух ядер. Влияние энергии налетающей частицы на протяженность и форму энергетических спектров хорошо видно из рисунка. Следует отметить, что низкоэнергетические части спектров практически не зависят от энергии налетающей частицы. На углах регистрации $35^\circ - 45^\circ$ энергетические спектры продуктов малонуклонных передач при энергии ^{40}Ar 388 Мэв распадаются на два хорошо разделяющихся максимума. Объяснить такой вид спектров в рамках обычных представлений о реакциях передачи как прямом процессе, разыгрываемся при касательном соударении двух ядер, затруднительно.

Для выяснения особенностей прямых реакций оказалось полезным сопоставить кинетические энергии продуктов реакции для максимумов в энергетических спектрах легкого продукта с величиной выходного кулоновского барьера V_{cm} . На рис.2 приведено сравнение этих величин для продуктов реакции $\text{Th} + \text{Ar}$. Величины V_{cm} и Q_m рассчитывались в предположении двух частиц в выходном канале ($Z_0 = 1,46$). Для малонуклонных передач на углах, близких к углу резерфордского рассеяния при касательном столкновении, кинетическая энергия конечных продуктов близка к энергии во входном канале E_{cm} , т.е. процесс носит квазиупругий характер. С уменьшением угла ϑ происходит резкое уменьшение кинетической энергии конечных продуктов. Она падает до величины, близкой к выходному кулоновскому барьеру. Что же касается кинетической энергии продуктов для низкоэнергетических максимумов в спектрах, то она оказывается несколько меньшей выходного кулоновского барьера и плавно спадает, но с увеличением угла ϑ .

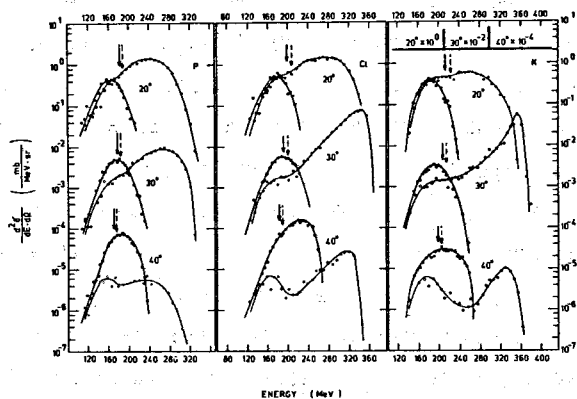


Рис. 1. Энергетические спектры легких продуктов из реакции $\text{Th} + \text{Ar}$. Открытые точки относятся к энергии ^{40}Ar 388 Мэв, черные - к энергии 297 Мэв. Кривые и точки для каждого угла регистрации умножены на коэффициенты, указанные на рисунке. Стрелками показаны энергии продуктов в л.с.к. при распаде системы на 2 сферических ядра с высоты кулоновского барьера. Пунктирная стрелка для $E = 388$ Мэв, сплошная - для $E = 279$ Мэв.

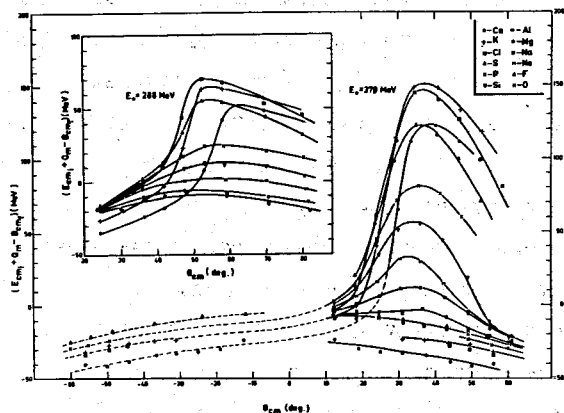


Рис. 2. Разность кинетических энергий конечных продуктов в максимумах энергетических распределений и их кулоновских барьеров для разных углов вылета легкого продукта. Энергии ионов ^{40}Ar в середине мишени $E_0 = 288$ Мэв и $E_0 = 379$ Мэв.

Расчет, в классическом приближении, движения тяжелого иона в оптическом потенциале показывает возможность таких траекторий, когда под действием ядерного притяжения углы отклонения оказываются отрицательными /8/ (за положительное принимается угловое отклонение под действием кулоновского поля). Если предположить, что низкоэнергетические максимумы в спектрах для углов регистрации от 10° до 60° в действительности принадлежат продуктам, вылетевшим под углами от -10° до -60° , то удастся связать в одну систему высокоэнергетические и низкоэнергетические максимумы в энергетических спектрах. Таким образом, высокоэнергетические максимумы в спектрах продуктов малонуклонных передач отвечают касательным столкновениям с отклонением в сторону положительных углов. Низкоэнергетические максимумы можно интерпретировать как отвечающие столкновениям с сильным перекрытием ядерных поверхностей и отклонением в сторону отрицательных углов.

Кинетическая энергия продуктов многонуклонных передач в максимумах выхода ведет себя так же, как энергия в низкоэнергетических максимумах спектров малонуклонных передач. Видимо, и в этом случае имеет место сильное перекрытие поверхностей взаимодействующих ядер и, соответственно, отклонение в сторону отрицательных углов.

В ряде случаев максимум энергетического спектра легкого продукта лежит ниже выходного кулоновского барьера. По нашему мнению, наиболее вероятной причиной этого можно считать некоторую деформацию ядер в момент разрыва системы, причем деформация увеличивается с увеличением угла поворота траектории легкого продукта после 0° .

Полученные нами данные по угловым распределениям продуктов реакций передачи являются наиболее полными, среди опубликованных, для случаев Ne и Ar и тяжелых ядер-мишеней. Охватывая значительное число выходных каналов, они позволяют проследить эволюцию

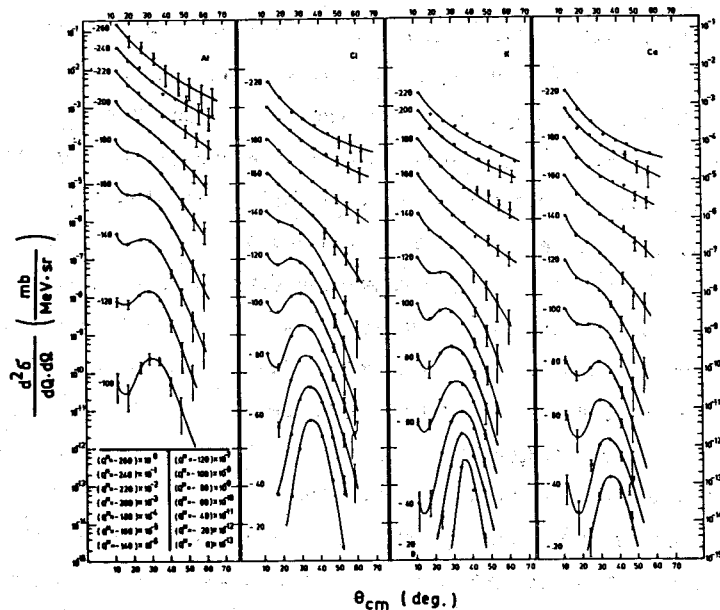


Рис. 3. Парциальные угловые распределения легких продуктов при фиксированном значении Q -реакции, Q^* . Энергия ионов ^{40}Ar в середине мишени $E_0 = 379$ Мэв.

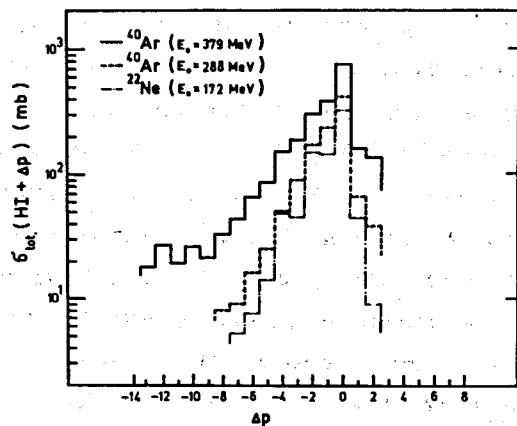


Рис. 4. Выход легких продуктов реакций в зависимости от числа протонов, переданных тяжелым ионом.

формы угловых распределений с увеличением числа переданных нуклонов. Угловые распределения продуктов малонуклонных передач имеют четко выраженный максимум на углах, несколько меньших, чем угол Резерфордского рассеяния при касательном соударении двух ядер. С увеличением числа переданных нуклонов ширина пика в угловом распределении возрастает, а его максимум смещается в сторону меньших углов. Дифференциальные сечения многонуклонных передач монотонно растут с уменьшением угла вылета. Так как полученные нами энергетические спектры имеют большую протяженность, было целесообразным рассмотреть форму угловых распределений легких продуктов реакций при различных энергиях возбуждения конечных ядер. На рисунке 3 приведены угловые распределения для Ar , Cl , K , Ca при различных значениях Q реакции. Расчет проводился в предположении двух частиц в выходном канале. Полученные угловые распределения были проанализированы на основе модели В.Струтинского [9].

На рисунке 4 показаны сечения образования легких продуктов в изученных реакциях, которые позволили рассчитать полные сечения прямых реакций в системах $^{232}\text{Th} + ^{22}\text{Ne}$ и $^{232}\text{Th} + ^{40}\text{Ar}$. Они составляют 0,8 барна для ^{22}Ne с энергией 174 Мэв, 1,1 и 2,4 барна для ^{40}Ar с энергиями 297 и 388 Мэв, что дает следующие величины критических угловых моментов для этих систем $74\hbar$, $102\hbar$ и $94\hbar$. Стоит подчеркнуть значительные сечения реакций многонуклонных передач. Это обстоятельство важно учитывать при переходе к более тяжелым ионам, где вклад от прямых реакций должен еще более увеличиться.

В четвертой главе диссертации изложены результаты более подробного (с разделением изотопов) исследования реакций на ^{22}Ne и ^{40}Ar на угле 40° . В реакции $^{232}\text{Th} + ^{22}\text{Ne}$ были измерены энергетические спектры и сечения образования около 60 изотопов

легких элементов /10/. Знание этих факторов необходимо для выбора оптимальных условий эксперимента при получении новых нейтроноизбыточных изотопов. Величины Q_m -реакций, соответствующие максимумам в энергетических спектрах легких продуктов, были проанализированы в рамках модели Сименса с соавторами /11/.

Несмотря на то, что экспериментальные данные обнаруживают заметные отклонения от предсказаний этой простой модели, особенно для малонуклонных передач, модель удовлетворительно передает общие особенности кинематики реакций многонуклонных передач. Она может быть использована для предсказания энергий продуктов реакций передач, по крайней мере, при $E_{cm_i} \gg V_{cm_i}$ и регистрации на углах, близких к резерфордскому.

В наших первых работах при облучении ^{232}Th ионами ^{15}N и ^{16}O была получена экспоненциальная зависимость дифференциальных сечений образования изотопов данного элемента от величины Q_{gg} - энергетического баланса реакции для образования обоих продуктов в основных состояниях. Однако уже тогда было замечено, что согласие с этой зависимостью ухудшается с увеличением атомного номера элемента Z . Экспериментальные данные, полученные в реакции с ^{22}Ne , показывают еще более заметное отклонение от этой зависимости для элементов с $Z > 6$. На рис.5 представлена систематика для выходов различных изотопов в зависимости от атомного номера образующегося изотопа. Прямые горизонтальные линии для изотопов Li , Be , B соответствуют зависимости $d\sigma/d\Omega \sim e^{k \cdot Q_{gg}}$. Для изотопов элементов с большими Z экспериментальные точки укладываются на плавные кривые с максимумом. Полученную систематику можно использовать для оценок сечений образования новых изотопов.

При регистрации продуктов реакций, обладающих кинетической энергией, впервые удалось получить разделение изотопов с массовыми

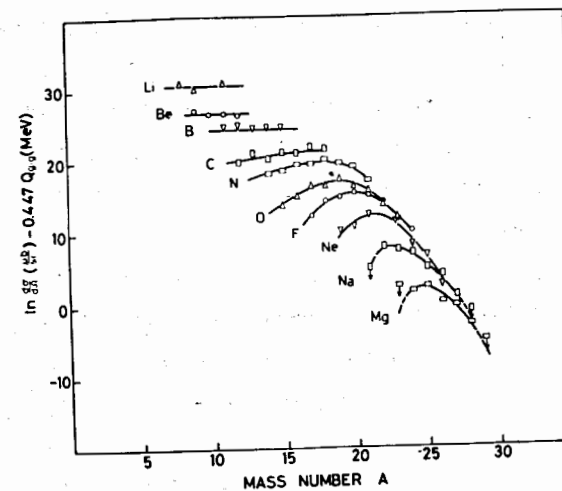


Рис. 5. Отклонение от зависимости $d\sigma/d\Omega = \text{const} \cdot \exp(k \cdot Q_{gg})$ как функция массового числа наблюдаемого продукта реакции $^{232}\text{Th} + ^{22}\text{Ne}$.

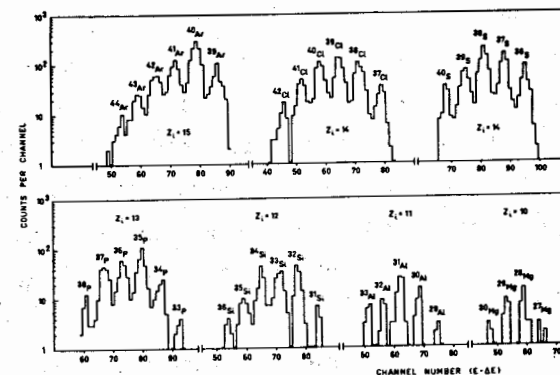


Рис.6. Выход различных изотопов Mg , Al , Si , P , S , Cl , Ar в реакции $^{232}\text{Th} + ^{40}\text{Ar}$. Выход измерен для энергий продуктов $E = 41,75 \cdot Z^2/A$ (МэВ).

числами 40-50. В экспериментах по облучению ^{232}Th ионами ^{40}Ar были получены и идентифицированы 17 новых нейтроноизбыточных изотопов Mg , Al , Si , P , S , Cl . Рисунок 6 иллюстрирует эти результаты. Сечения образования новых изотопов оказались достаточно большими, что открыло возможность более детального изучения их ядерных свойств^{/I2-I4/}.

Основные результаты диссертации состоят в следующем:

1. Показана возможность и впервые получено надежное разделение изотопов - продуктов реакций вплоть до изотопов K , Ca в методике, включающей магнитный спектрометр в комбинации с техникой $\Delta E, E$.

2. Измерены энергетические спектры, угловые распределения и сечения образования легких элементов - продуктов реакций $\text{Th} + \text{Ne}$ и $\text{Th} + \text{Ar}$. Показано, что реакции передачи могут протекать как в форме квазиупругого, так и глубоко неупругого процессов. Изучены характеристики этих процессов.

3. Измерены энергетические спектры и сечения образования изотопов легких элементов в реакциях $\text{Th} + \text{Ne}$ и $\text{Th} + \text{Ar}$ на угле ^{40}O . Построена систематика сечений образования изотопов и проведен анализ величин энергий в максимумах энергетических спектров. Полученные данные позволяют предсказывать сечения образования и вид энергетических спектров новых нейтроноизбыточных изотопов.

4. При облучении ^{232}Th ионами ^{40}Ar впервые получены и идентифицированы 17 новых нейтроноизбыточных изотопов $^{29,30}\text{Mg}$, $^{31-33}\text{Al}$, $^{33-36}\text{Si}$, $^{35-38}\text{P}$, $^{39,40}\text{S}$, $^{41,42}\text{Cl}$.

Основные материалы диссертации опубликованы в работах /5-7, 10, 12/ и доложены на Симпозиуме по реакциям на тяжелых ионах и многочастичным возбуждениям (Сакле, Франция, 1971)^{/13/} и XII совещании по ядерной спектроскопии и теории ядра (Дубна, 1971)^{/14/}.

ЛИТЕРАТУРА:

- I. А.И.Базь, В.И.Гольдманский, Я.Б.Зельдович. УФН, 72, 211 (1960)
2. Э.Е.Берлович, О.М.Голубев, Д.Н.Новиков. Письма в ЖЭТФ, т.12, вып.6, 289 (1970)
3. R.Klapisch. Proc. Int.Conf. on the Properties of Nuclei Far From the Region of Beta-Stability, Leysin, Switzerland, 1970 (CERN, Geneva, 1970) p. 31
4. А.Г.Артух, В.В.Авдейчиков, Я.Вильчински, В.В.Волков, Г.Ф.Гриднев, В.Л.Михеев, Я.Эрё. Материалы межд.конф. по физике тяжелых ионов, Дубна, 1971 (Дубна, Д7-5769, 1971) стр.193.
5. Г.Ф.Гриднев, А.М.Сухов. ОИЯИ, I3-5153, Дубна, 1970.
6. А.Г.Артух, Я.Вильчински, В.В.Волков, Г.Ф.Гриднев, В.Л.Михеев. ОИЯИ, P7-6815, Дубна, 1973.
7. A.G.Artukh, G.F.Gridnev, V.L.Mikheev, V.V.Volkov, J.Wilczynski. JINR, E7-6970, Dubna, 1973
8. T.Kammuri. Prog. Theor. Phys., 28 (1962)934
9. В.М.Струтинский. ЖЭТФ, 46, 2078 (1964)
10. A.G.Artukh, G.F.Gridnev, V.L.Mikheev, V.V.Volkov, J.Wilczynski. JINR, E7-6764, Dubna, 1972
- II. P.J.Siemens, J.P.Bondorf, D.H.E.Gross, F.Dickman. Phys.Lett., 36B(1971) 24
12. A.G.Artukh, V.V.Avdeichikov, G.F.Gridnev, V.L.Mikheev, V.V.Volkov, J.Wilczynski. Nucl.Phys., A176 (1971)284
13. A.G.Artukh, V.V.Avdeichikov, G.F.Gridnev, V.L.Mikheev, V.V.Volkov, J.Wilczynski. Journal de Phys., 32(1971)06-129

14. А.Г.Артюх, В.В.Авдейчиков, Я.Вильчински, В.В.Волков, Г.Ф.Гриднев,
В.Л.Михеев.

Ядерная спектроскопия и теория ядра (ОИЯИ, Д6-5783, Дубна, 1971)
стр.47.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 июля 1973 года.