

Ш-42



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ**

9 - 6684

**И.А.Шелаев**

**СОЗДАНИЕ ТАНДЕМ-ЦИКЛОТРОНА  
СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ**

**Специальность 260 - приборы  
экспериментальной физики**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

**(Диссертация написана на русском языке)**

**Дубна 1972**

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

В.С.Панасюк

доктор физико-математических наук

С.П.Капица

доктор физико-математических наук

В.П.Саранцев

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Ленинградский физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе.


Автореферат разослан " 7 " IX 1972 года.

Защита диссертации состоится " 17 " X 1972 года на заседании Объединенного совета Лаборатории ядерных реакций и Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований.

Адрес: г. Дубна, Московской области, ОИЯИ, конференц-зал ЛНФ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь совета

/ Э.Н.Каржавина 

9 - 6684

И.А.Шелаев

## СОЗДАНИЕ ТАНДЕМ-ЦИКЛОТРОНА СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Специальность 260 - приборы  
экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Исследование ядерных реакций под действием тяжелых ионов привело к ряду важных научных открытий: синтезу целого семейства изотопов новых трансурановых элементов /1/, обнаружению явления протонной радиоактивности /2/, спонтанного деления ядер из изомерного состояния /3/, получению и изучению свойств большого числа нейтронообогащенных ядер /4/ и др. Эти достижения во многом определились тем, что в распоряжении экспериментаторов имелись интенсивные пучки тяжелых ионов вплоть до ионов аргона.

Вместе с тем для решения ряда новых задач ядерной физики требуются пучки ускоренных ионов еще более тяжелых элементов. Одной из наиболее интересных задач этого направления является синтез далеких трансурановых элементов в районе так называемых новых "островов стабильности" ядер /5/. Синтез подобных элементов позволит проверить основные теоретические представления о природе ядра и даст новую ценную информацию о ядерных силах. Получение ядер с зарядом  $114$  и массой  $298$  возможно, если в ядерных реакциях использовать быстрые ионы ксенона или еще более тяжелого элемента.

Поэтому проблема ускорения тяжелых ионов сейчас интенсивно разрабатывается; во многих лабораториях мира проектируются и создаются установки, предназначенные для получения сверхтяжелых ионов всех элементов, включая уран /6,7,8/.

Реферируемая диссертация содержит результаты экспериментальных и теоретических исследований, выполненных при проектировании, сооружении и эксплуатации тандем-циклотрона ОИЯИ. Этот ускоритель, включающий два одновременно работающих циклотрона, позволили получить пучки ионов ксенона с энергией порядка  $7$  Мэв/нуклон и интенсивностью до  $2,5 \cdot 10^{10}$  сек<sup>-1</sup>.

В первой главе диссертации анализируются общие вопросы ускорения тяжелых ионов с помощью двух циклотронов. В первом циклотроне ионы с зарядом  $Z_1$ , приобретаемом в источнике, ускоряются до относительно небольшой энергии - порядка 1 Мэв/нуклон. Затем эти же ионы инжектируются во второй циклотрон, перезаряжаются в нем на тонкой мишени до заряда  $Z_2 > Z_1$  и ускоряются далее до энергии, определяемой величиной произведения напряженности магнитного поля и конечного радиуса  $(HR)_2$  второго циклотрона. Если величина этого произведения на конечном радиусе циклотрона-инжектора равна  $(HR)_1$ , то, как показано в диссертации, справедливо неравенство

$$Z_1 (HR)_1 / Z_2 \leq (HR)_2 \leq (HR)_1 (2 - Z_1 / Z_2). \quad (I)$$

Это неравенство получено без учета поля рассеяния второго циклотрона и позволяет установить соотношение между размерами обоих ускорителей тандем-циклотрона. В частности, при одинаковой напряженности магнитного поля в каждом циклотроне конечный радиус второго не должен быть вдвое больше конечного радиуса циклотрона-инжектора.

Далее анализируются возможности ускорения тяжелых ионов с помощью имеющихся в Лаборатории ядерных реакций 310-см /9/ и двухметрового /10/ циклотронов.

310-см циклотрон позволяет ускорить тяжелые ионы с зарядом  $Z$  и массой  $A$  до энергии  $E = 250 Z^2 / A$  Мэв. С его помощью можно ускорить ионы с  $A/Z = 5\frac{1}{2} : 7$  в режиме первой гармоники и  $A/Z = 15\frac{1}{2} : 21$  - в режиме третьей, где конечная энергия составляет 1,1 ÷ 0,56 Мэв/нукл. На двухметровом изохронном циклотроне можно ускорить ионы с  $A/Z$  от 2,8 до 14,7, используя режимы от второй до седьмой гармоник включительно, т.к. этот ускоритель имеет два 45° дуанта. Конечная энергия

ионов составляет  $150 Z^2 / A^2$  Мэв/нуклон.

Зная конечную энергию ионов на каждом ускорителе и пользуясь величиной равновесного заряда в зависимости от энергии ионов /11/, можно рассчитать конечную энергию сверхтяжелых ионов для двух возможных вариантов тандем-циклотрона. В качестве рабочего варианта выбран тот, в котором 310-см циклотрон используется как инжектор для двухметрового. Расчеты показывают, что для любого варианта тандем-циклотрона из имеющихся в Лаборатории ускорителей ксенон является предельной частицей, приобретающей энергию, достаточную для преодоления кулоновского барьера на уране /12/.

В первой главе приводится схема синхронизации частоты и фазы ускоряющих напряжений циклотронов, разработанная для предотвращения потерь частиц при переводе пучка из ускоряющей системы одного циклотрона в ускоряющую систему другого. Экспериментально измеренная зависимость интенсивности пучка ионов во втором циклотроне от разности фаз между в.ч. напряжениями циклотронов показывает, что введение синхронизации увеличивает втрое ток ионов во втором ускорителе.

Во второй главе рассмотрены основные особенности ускорения тяжелых ионов на циклотроне - инжекторе в режиме третьей гармоники и намечены мероприятия по повышению интенсивности пучка на выходе этого ускорителя. Сюда относится прежде всего выбор положения ионного источника, при котором достигается минимальная величина амплитуды радиальных колебаний. Показывается, что в выбранном режиме ускорения поворотом источника в азимутальном направлении на 7° удается увеличить длину пути первого полуоборота ионов и тем самым сместить максимум ионного тока источника на 20° в об-

ласть положительных фаз. Это смещение приводит к улучшению вертикальной фокусировки в центре и, следовательно, к росту тока пучка на конечном радиусе ускорителя.

При движении на средних радиусах в классическом циклотроне основные потери сформированного в центре пучка связаны с фазовым движением ионов. Показано, что в режиме третьей гармоники минимальная амплитуда ускоряющего напряжения несколько ниже, чем в режиме первой гармоники. Это связано с тем, что релятивистское возрастание массы иона в этом случае меньше. Однако для тяжелых ионов потери пучка на средних радиусах вызываются еще и перезарядкой ионов на молекулах остаточного газа. Сечение перезарядки ионов тем выше, чем больше масса иона. Так, усредненное по энергии от нуля до 1 Мэв/нуклон экспериментально измеренное сечение перезарядки ионов  $^{132}\text{Xe}^{+8}$  составляет  $2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ , а ускоряемых в том же режиме и до такой же конечной энергии ионов  $^{16}\text{O}^{+1}$  —  $0,5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ . Проведенные измерения показывают, что увеличение разрядки в камере 310-см циклотрона с  $1,5 \cdot 10^6$  до  $2 \cdot 10^7$  мм рт.ст. позволит почти втрое увеличить интенсивность пучка.

В связи с относительно малым числом оборотов, совершаемых тяжелыми ионами при ускорении на циклотроне в режиме третьей гармоники, прирост радиуса за оборот втрое больше, чем в режиме основной частоты, поэтому часть ускоренного пучка теряется при выводе не только на внутренней пластине дефлектора, но и на внешней. Для устранения этих потерь предложено увеличить радиальную апертуру дефлектора с 8 до 15 мм. Намечены также пути устранения нелинейных эффектов фокусирующего и экранирующего каналов системы вывода пучка из 310-см циклотрона, что позволит уменьшить эффективный эммитанс пучка.

Осуществление намеченных во второй главе мероприятий приведет к увеличению в несколько раз интенсивности пучка ускорителя-инжектора.

Третья глава диссертации посвящена различным вопросам расчета, проектирования и наладки 70-метровой системы транспортировки пучка из 310-см циклотрона в двухметровый. Схема трассы приведена на рис.1. Вдоль трассы установлены: четыре поворотных электромагнита, задающие направление движения пучка по горизонтали и обеспечивающие полный угол поворота пучка в этих магнитах  $121^\circ$ ; два магнита, корректирующие разность уровней медианных плоскостей циклотронов (эта разность составляет 50 мм) и семь пар квадрупольных линз для фокусировки пучка. Квадрупольные линзы установлены вдоль ионопровода приблизительно равномерно на расстоянии  $9,10$  м одна от другой. Поворотные магниты и магниты смещения пучка по вертикали расположены в местах нахождения промежуточных фокусов, определенных расчетным путем. На входе в двухметровый циклотрон находится востриговочный электромагнит, позволяющий плавно менять угол ввода пучка в пределах  $\pm 2^\circ$ .

Подбор рабочих значений токов в электромагнитах и линзах проводился экспериментально путем последовательной настройки и фокусировки пучка в каждом из промежуточных фокусов. Одновременно с этим востриговалось горизонтальное и вертикальное положение линз, обеспечивающих данный промежуточный фокус.

Фокусировка считалась удовлетворительной, когда выполнялись следующие требования: изображение пучка в фокусе меньше круга диаметром 4 см; при уменьшении тока в линзах размеры пучка увеличиваются, но положение центра тяжести изображения остается на оси ионопровода; интенсивность пучка в фокусе составляет не менее

90% интенсивности пучка на выходе из 310-см циклотрона. В результате тщательной отстировки всех элементов тракта и подбора оптимальных значений токов электромагнитов и линз коэффициент прохождения пучка ионов по тракту составил около 70%.

Основные потери ионов ксенона в системе транспортировки связаны с перезарядкой на остаточном газе ионопровода. Измерение спектра зарядов, образующихся ионов показало, что перезарядка идет с потерей электронов: при транспортировке восьмизарядных ионов наблюдаются ионы с зарядом до 13 включительно. Рабочее давление  $2 \cdot 10^{-6}$  мм рт.ст. обеспечивается в ионопроводе с помощью 9 насосов типа ВА-0,5.

Инжекция тяжелых ионов в двухметровый циклотрон, их перезарядка, ускорение и первые эксперименты с пучком ионов ксенона, описаны в четвертой главе диссертации. Высокая эффективность инжекции ионов в циклотрон и захват их в режим ускорения обеспечивается решением двух основных задач: выбором размеров и точного положения перезарядной мишени и тщательной фокусировкой пучка на мишени. Радиальное и азимутальное положение мишени, обеспечивающее минимальное отклонение центра орбит ионов после перезарядки от центра ускорителя, рассчитывалось по специальной программе на ЭВМ с использованием ранее измеренной карты магнитного поля двухметрового циклотрона /15/. Такие расчеты были выполнены для ионов с различным зарядом после перезарядки с целью определения области рабочих положений перезарядной мишени.

Для устранения эффекта радиальной дефокусировки краевым магнитным полем двухметрового циклотрона на его входе установлен радиально-фокусирующий железный магнитный канал, аналогичный применяемому при выводе пучка /16/. Благодаря этому, до 30% пучка,

инжектируемого в двухметровый циклотрон, оказывается сфокусированным на перезарядную мишень размером 0,9 см по радиусу и 2,8 см по вертикали.

Перезарядная мишень изготавливалась из графита и имела толщину 40 мкг/см<sup>2</sup>, при этом до 13% ионов  $\text{Xe}^{+8}$  приобретает заряд 27. Эта величина измерялась экспериментально /17/. С целью снижения тепловой нагрузки мишени последняя была сделана в виде кольца диаметром 90 мм. Кольцо вращалось со скоростью 500 об/мин. Время жизни такой мишени составляет 50-70 часов.

Первый пучок ионов  $^{132}\text{Xe}^{+27}$  интенсивностью  $10^6$  сек<sup>-1</sup> был получен в августе 1971 года. Для подтверждения факта ускорения ионов ксенона облучалась толстая мишень из магния естественного изотопного состава, в результате чего наблюдалось образование изотопов  $^{151}\text{-}^{153}\text{Dy}$  /18/. Основным результатом этих опытов заключался в наблюдении первой ядерной реакции с ускоренными ионами ксенона.

В экспериментах по облучению более тяжелых мишеней - тантала, висмута, урана /19/ использовались ионы самого тяжелого изотопа ксенона -  $^{136}\text{Xe}$ . Здесь уже первые опыты показали, что энергия ионов  $^{136}\text{Xe}^{+27}$  недостаточна, поэтому в дальнейшем потребовалось ускорять ионы с зарядом  $+30$ . Для получения ионов с таким зарядом и синхронизации ускоряющих напряжений обеих машин оказалось необходимым перейти на 310-см циклотроне от ускорения восьмизарядных ионов к ускорению девятизарядных.

Эксперименты по ускорению ионов ксенона и продолжительный опыт эксплуатации тандем-циклотрона показали, что при тщательной настройке всех элементов ускорительного тракта и системы транспортировки общая эффективность ускорителя (от выхода из 310-см цикло-

трона до физической мишени) составляет 0,02. В диссертации приводятся причины различных потерь. При этом максимальная интенсивность пучка ионов  $^{136}\text{Xe}^{+30}$  на физической мишени достигает  $2,5 \cdot 10^{10} \text{ сек}^{-1}$ , а усредненная эксплуатационная -  $1 \cdot 10^{10} \text{ сек}^{-1}$ .

Дальнейшее совершенствование тандем-циклотрона, повышение надежности и стабильности работы отдельных систем этого сложного ускорителя позволит поднять максимальную интенсивность пучка до  $10^{11} \text{ сек}^{-1}$ . Тем самым интенсивность пучка тандем-циклотрона ОИЯИ, каждый из ускорителей которого проектировался и строился без учета особенностей тандемного режима, окажется той же величины, что и в лучших зарубежных проектах ускорителей каскадного типа, специально разрабатываемых для ускорения сверхтяжелых ионов.

В заключении диссертации анализируются возможные пути решения проблемы ускорения ионов всех элементов вплоть до урана. Показывается, что в ОИЯИ эта задача может быть решена после реконструкции ЗЮ-см циклотрона в четырехметровый /20/. Тогда с помощью тандем-циклотрона, включающего четырехметровый циклотрон в качестве инжектора и двухметровый - в качестве основного, ионы урана можно ускорить до энергии 7 Мэв/нуклон и выше. Интенсивность пучка в этом случае составит примерно  $10^{11} \text{ сек}^{-1}$ . Рассмотрены также другие варианты ускорителя тяжелых ионов, с помощью которых можно получить пучки более высокой интенсивности. В качестве одного из перспективных вариантов такого ускорителя может быть машина, созданная на основе разрабатываемого в ОИЯИ коллективного метода ускорения заряженных частиц /21/. Как показывают оценки, такой ускоритель позволит получить пучки тяжелых ионов интенсивностью

$10^{12} - 10^{13} \text{ сек}^{-1}$ . Однако метод коллективного ускорения находится еще в стадии эксперимента, поэтому высказывается предположение, что для получения пучков ионов урана и других элементов интенсивностью  $10^{13} \text{ сек}^{-1}$  практически наиболее осуществимым явилось бы создание достаточно большого циклотрона, способного без перезарядки ускорить такие пучки до необходимой энергии.

Основные выводы диссертации сводятся к следующему:

1. Впервые в мировой ускорительной технике осуществлено последовательное ускорение тяжелых ионов с помощью двух циклотронов. Соединение в единую ускорительную систему двух циклотронов привело к созданию качественно нового типа ускорителя - тандем-циклотрона тяжелых ионов. В этой установке относительно малозарядные ионы ускоряются на ускорителе-инжекторе, в качестве которого используется ЗЮ-см классический циклотрон ОИЯИ, до энергии порядка 1 Мэв/нуклон, затем инжектируются во второй - двухметровый изохронный, где после перезарядки приобретают энергию 7 Мэв/нуклон и выше.

2. С помощью тандем-циклотрона впервые получены пучки ионов тяжелых элементов, находящихся во второй половине таблицы Д.И. Менделеева, а именно: получен пучок ионов  $^{136}\text{Xe}^{+30}$  интенсивностью  $2,5 \cdot 10^{10} \text{ сек}^{-1}$  с энергией выше 900 Мэв. Общая эффективность системы транспортировки пучка, его инжекции, перезарядки и последующего ускорения в двухметровом циклотроне достигает 2%.

3. Под действием быстрых ионов ксенона наблюдались первые ядерные реакции и был качественно исследован механизм взаимодействия этих ионов с ядрами различных мишеней - магния, висмута, урана и др. Устойчивая работа тандем-циклотрона позволила приступить

к выполнению широкой программы физических исследований на пучках ионов ксенона.

4. Намечены дальнейшие пути увеличения массы и интенсивности пучков ускоряемых ионов. Сюда относится прежде всего реконструкция ЭО-см циклотрона в четырехметровый. Тогда на тандем-циклотроне ОИИИ с четырехметровым циклотроном в качестве инжектора появится возможность получить пучки ионов всех элементов вплоть до урана с энергией, превышающей кулоновский барьер на тяжелых мишенях, и интенсивность до  $10^{11}$  сек<sup>-1</sup>.

Основные результаты, использованные в диссертации, докладывались на Международной конференции по получению и ускорению тяжелых ионов в США, на Международной конференции по изохронным циклотронам в Канаде, представлены на третьем Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц в Москве и опубликованы в работах /10,12,13,17,18,19,20 /.

Все работы выполнены в Лаборатории ядерных реакций ОИИИ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г.Н.Флеров. Препринт ОИИИ, P15-4315, Дубна, 1969 .
2. В.А.Карнаухов и др. АЭ, 17, 310 (1964) .
3. С.М.Поликанов. УФН, 94, № 1, 43 (1966) .
4. V.V.Volkov. Inter. Nucl. Phys. Conf. Gatlinburg (1966), N-4, p. 81.
5. W.D.Myers, W.I.Swiatecki. Nucl. Phys., 81, 1 (1966).
6. C.Bieth et al. IEEE TRANSACTIONS on Nuclear Science, 1966, v. NS-13, No 4, p. 182.
7. Robert M.Main, IEEE TRANSACTIONS on Nuclear Science, June 1969, v. NS-16, No 3, p.791.
8. Schmelzer oh. Proc. of the Sixth Proton Linear Accelerator Conference, Brookhaven (1968).
9. В.С.Алфеев, Г.Н.Вялов, А.Ф.Линев, В.Н.Покровский, В.А.Савельев, В.Н.Титов, В.А.Чугреев, И.А.Шелаев. Препринт ОИИИ, P-2693, Дубна 1966 .
10. И.А.Шелаев, С.И.Козлов, Р.Ц.Оганесян, Ю.Ц.Оганесян, В.А.Чугреев. Препринт ОИИИ, 9-3688, Дубна, 1968 .
11. В.С.Николаев. УФН, 85, № 4, 679, 1965 .
12. И.А.Шелаев, В.С.Алфеев, Б.А.Загер, С.И.Козлов, И.В.Колесов, А.Ф.Линев, В.Н.Мельников, Р.Ц.Оганесян, Ю.Ц.Оганесян, В.А.Чугреев. Препринт ОИИИ, P9-6062, Дубна, 1971 .
13. И.А.Шелаев, В.С.Алфеев, В.В.Батвия, Б.А.Загер, С.И.Козлов, В.Н.Мельников Р.Ц.Оганесян, А.Н.Филипсон. Препринт ОИИИ, P9-6166, Дубна, 1971 .
14. С.И.Козлов, Р.Ц.Оганесян, Пек Лен Ги, И.А.Шеласев. Препринт ОИИИ, P-2854, Дубна, 1966 .
15. И.А.Шелаев, С.И.Козлов, Р.Ц.Оганесян, С.Г.Федотова, Препринт ОИИИ, P9-4233, Дубна, 1966 .



16. В.И.Данилов, Б.А.Загер, А.Ф.Линев, И.А.Шелаев.  
Препринт ОИЯИ, Р-2588, Дубна, 1966 .
17. I.A.Shelaev et al. Sixth International Cyclotron Conference  
July 1972, Vancouver, Canada.
18. Г.Н.Флеров, С.А.Карамян, Г.С.Попеко, А.Г.Попеко, И.А.Шелаев.  
Препринт ОИЯИ, Р7-6093, Дубна, 1971 .
19. Г.Н.Флеров, С.А.Карамян, В.Э.Пенионжкевич, С.П.Третьякова,  
И.А.Шелаев. Препринт ОИЯИ, Р7-6262, Дубна, 1972 .
20. I.A.Shelaev et al. Nuclear Instruments and Methods  
93, p. 557 (1971).
21. В.Н.Векслер и др. Атомная энергия, 24, вып.4, 317 (1968).

Рукопись поступила в издательский отдел  
21 августа 1972 года.

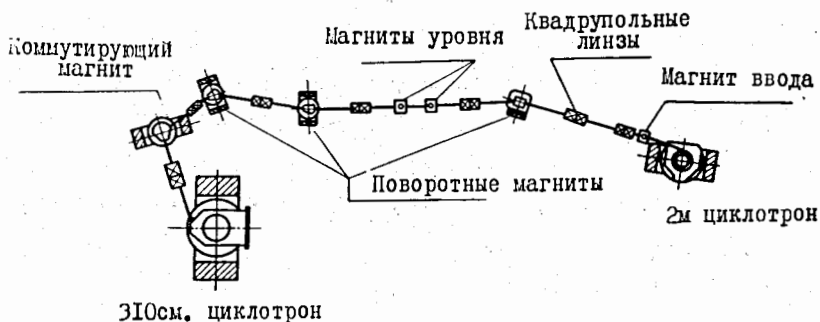


Рис. I Схема трассы пучка, связывающей 310-см и двухметровый циклотроны.