

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

С 345
K-592

9-5060

С.И. Козлов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ИОНОВ
В ДВУХМЕТРОВом ИЗОХРОННОМ ЦИКЛОТРОНЕ ОИЯИ**

Специальность 055 - физика атомного ядра и космических лучей

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук

Дубна 1970

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

Ю.П. Оганесян

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

В.И. Данилов,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Ю.Г. Басаргин

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова.

Автореферат разослан " " 1970 г.

Защита диссертации состоится " " 1970 г.

на заседании Объединенного Ученого 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

9-5060

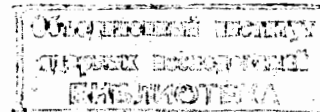
С.И. Козлов

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ИОНОВ
В ДВУХМЕТРОВОМ ИЗОХРОННОМ ЦИКЛОТРОНЕ ОИЯИ

Специальность 055 - физика атомного ядра и космических лучей

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

6924 вр



История развития экспериментальной ядерной физики тесно связана с разработкой ускорителей заряженных частиц. Многообразие типов ускорителей, используемых в настоящее время, объясняется разносторонними требованиями, предъявляемыми к характеристикам ускоряемых частиц: предельной энергии, интенсивности, энергетическому разрешению, массе частиц. Для широкого круга экспериментов с применением тяжелых ионов /1/ необходимо, чтобы конечная энергия ускоряемых ионов, определяемая уровнем среднего магнитного поля, конечным радиусом ускорения и отношением Λ/Z , превосходила кулоновский барьер ядра. Требуемая величина интенсивности ионных пучков должна составлять десятки микроампер. Однако интенсивность пучка является сложной функцией, зависящей от ряда параметров начальной оптики, магнитной структуры и системы вывода. В настоящей работе приведены теоретические и экспериментальные результаты исследований движения ионов в области ускорения и вывода для двухметрового изохронного циклотрона ОИЯИ /2/.

В первой главе диссертации рассматривается влияние геометрии электродов центральной области на качество пучка в аксиальном и радиальном направлениях /3/. Поскольку электрическое поле оказывает доминирующую роль на характер движения ионов в центральной области, то вычисления орбит должны включать в себя детальное описание этого поля. Распределение электрического потенциала находилось на моделях централь-

ной части ускорителя с помощью электролитической ванны. Значение потенциала в каждой точке измерялось цифровым вольтметром и регистрировалось на перфоленте телеграфным аппаратом "СТА-2М". Ошибка измерений была не более 1%. Район, вытягивающий электрод-источник, моделировался в масштабе 5:1. Измерения проводились в декартовой системе координат с шагом по x , y - 0,05 см и на трех уровнях по $z = 0$; 0,3; 6 см.

Область центра до радиуса 10 см моделировалась в масштабе 2:1. Распределение потенциала измерялось в цилиндрической системе координат (r, θ, z) с шагом по углу 2° , по радиусу 1 см, при тех же значениях z . Топография магнитного поля была получена из результатов магнитных измерений^{/4/}. Распределения электрического потенциала $V(x, y, z), V(r, \theta, z)$ и магнитного поля в дальнейшем использовались для вычисления движения ионов в центре ускорителя.

Расчет траекторий ионов проводился на вычислительной машине БЭСМ-4 по программе, составленной на языке "АЛ-ГОЛ-60". Уравнение движения частиц в электромагнитном поле

$$(\mathbf{A} \nabla \dot{\mathbf{v}})' = \frac{Ze}{c} [\dot{\mathbf{v}} \times \mathbf{H}] + Ze \dot{\mathbf{E}}$$

представлялось системой соответствующих уравнений как в декартовой, так и в цилиндрической системах координат. Интегрирование выполнялось методом Рунге-Кутты с постоянным шагом по ct (c - скорость света). Электрическое поле имело вид:

$$\dot{\mathbf{E}} = -\text{grad } V \times \mathbf{V}_g \times \cos\left(\frac{2\pi n}{\lambda_g} ct + \phi_0\right),$$

где λ_g - длина волны генератора, V_g - амплитуда напряжения на дуанте, n - номер гармоники ускоряющего напряжения; ϕ_0 - начальная фаза иона. Для оценки диапазона фаз ионов, захваченных в ускорение, рассчитывалось движение между ионным источником и вытягивающим электродом. Расстояние

источник - вытягивающий электрод равно 5 мм, размеры вытягивающей щели (4x12) мм. Из этих расчетов следует, что основной диапазон фаз ($\Delta\phi$) ионов, отличающихся по энергии не более, чем на 10%, лежит в отрицательной области фаз. Величина $\Delta\phi$ с изменением напряжения на дуанте в пределах (45+75) кв. меняется относительно мало - на 10-15%. Результаты расчетов движения иона при варьировании номера гармоники ускоряющего напряжения приведены в таблице 1.

Таблица 1

| | Диапазон фаз (град) | $\phi_{\text{ц}}^0$ | $r_{\text{пр}}[\text{рад}]$ | Δ_x^0 |
|---|---------------------|---------------------|-----------------------------|--------------|
| 1 | +5 - - 42 | - 18 | 0,47 | 78,5 |
| 2 | -7 - - 62 | - 34,5 | 0,91 | 23 |
| 3 | -25 - - 70 | - 47 | 1,78 | -5 |
| 4 | -53 - - 87 | - 70 | 2,98 | 25 |

где $\phi_{\text{ц}}$ - фаза иона, для которой прирост энергии максимален; $r_{\text{пр}}$ - угол пролета частицей первого ускоряющего промежутка; Δ_x - угловое смещение вытягивающего электрода относительно кромки дуанта, при котором весь диапазон начальных фаз проходит следующий ускоряющий промежуток в оптимальной фазе высокочастотного напряжения. Основной режим ускорения ионов на У-200 соответствует второй гармонике высокочастотного напряжения с максимальным приростом энергии за оборот, равным $2,83 Ze V_g$, хотя размещение двух 45° дуантов в противоположные долины (рис. 1) позволяет использовать гармоники другой кратности^{/5/}.

Положение ионного источника и вытягивающего электрода относительно магнитного центра ускорителя предварительно выбиралось графоаналитическим методом^{/6/} с последующим этапом измерений распределения электрического поля. Геометрическое положение элементов начальной оптики по отношению

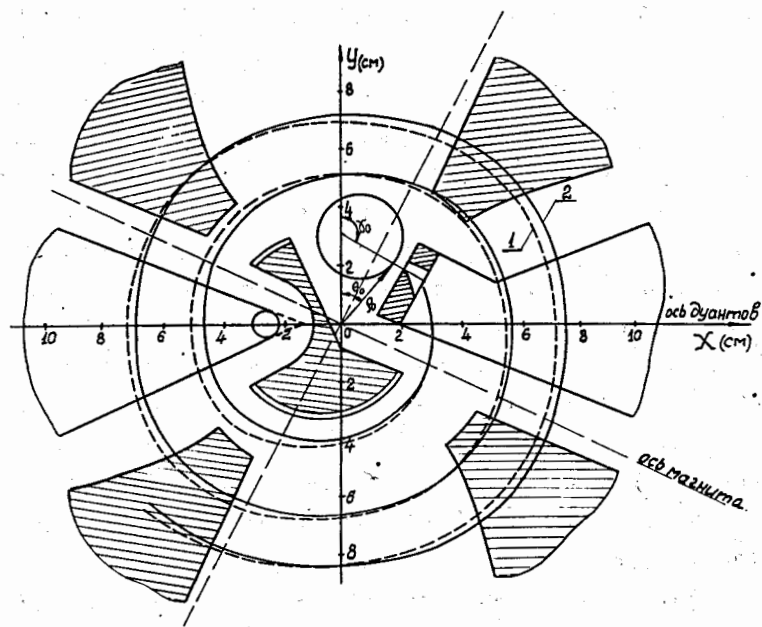


Рис. 1. Центральная область двухметрового изохронного циклотрона. Траектории ионов: 1 - $\phi_0 = -20^\circ$, 2 - $\phi_0 = -50^\circ$, $\gamma_0 = 122^\circ$, $\theta_0 = 34^\circ$, $\rho_0 = 3$ см, $V_g = 75$ кв.

к магнитному центру ускорителя задается координатами: ρ_0 , γ_0 , θ_0 (см. рис. 1), которые определялись затем по результатам расчетов начальных траекторий ионов. Для нахождения положения электродов центральной области исследовался разброс по энергии, центрам орбит и фазам частиц в пучке ионов на последовательных оборотах. Найдено, что после трех оборотов разброс ионов по энергии не более 4%, а область начальных фаз сужается примерно на 30%. Следует отметить острую зависимость амплитуды радиальных колебаний A_r от значения параметра γ_0 . Величина A_r не превышает 0,1 см при $\gamma_0 = 122^\circ$. Анализ расчетов вертикального движения ионов показал, что введение вариации магнитного поля на начальные радиусы (секторы в У-200 начинаются с радиуса 5,5 см) увеличивает значение v_z^2 почти в полтора раза по сравнению со случаем для гладкого поля. Все ионы рассматриваемого диапазона начальных фаз сфокусированы в вертикальном направлении.

Вторая глава посвящена исследованию движения ионов в области ускорения $r \geq 10$ см. Устойчивость движения частиц в аксиальном и радиальном направлениях, изохронность ускорения ионов в этом районе определяются, в основном, величиной азимутальной вариации и распределением среднего магнитного поля по радиусу. Формирование магнитного поля /7/ двухметрового изохронного циклотрона состояло в последовательной его коррекции с помощью железных масс для получения желаемой формы поля. Полный объем магнитных измерений составил около 400 тыс. точек. Датчик Холла, используемый для снятия топографии магнитного поля, калибровался на стенде с помощью датчика ядерного магнитного резонанса. Затем зависимость магнитного поля H от э.д.с. Холла $E_x - H = f(E_x)$ представлялась полиномом $H = \sum_{i=0}^m a_i E_x^i$, коэффициенты которого определялись методом наименьших квадратов (МНК). Оптимальная степень полинома, при которой средняя квадратичная ошибка минимальна, равнялась 6. Применяемая методика измере-

ний /8/ обеспечивала высокую скорость измерения (≈ 2 сек/точка) и представление результатов измерения в виде (перфоленга), удобном для ввода их в ЭВМ типа "Минск-22", где производилась предварительная обработка результатов измерений, запись на магнитную ленту с последующей передачей информации на ЭВМ БЭСМ-4. Вычислительная программа (рис. 2) переводит значения э.д.с. Холла в магнитное поле, определяет величины среднего поля, флаттера, амплитуд и фаз гармоник Фурье разложения магнитного поля по азимуту. Затем для иона с заданным отношением Λ/Z вычислялось изохронное поле и фазовое движение иона, определяемое отклонением реального распределения магнитного поля от изохронного. Проведенные исследования действия кольцевых корректирующих катушек на среднее магнитное поле /9/ позволили определить параметры токовой системы создаваемого в ЛЯР четырехметрового изохронного циклотрона на базе 310-см классического циклотрона /10/. Анализ расчетов /11/ частот вертикальных ν_z и радиальных ν_r бетатронных колебаний, проведенных по приближенным аналитическим выражениям, показал, что точность определения значений ν_r, ν_z при этом существенным образом зависит от числа используемых гармоник фурье-разложения и производных среднего магнитного поля по радиусу. Для проверки полученных значений ν_r, ν_z с помощью ЭВМ было проведено численное интегрирование уравнений движения иона в измеренном магнитном поле. Равновесная орбита определялась методом последовательных приближений /12,13/. Интегрирование производилось методом Рунге-Кутты на элементе периодичности магнитной структуры циклотрона с постоянным шагом 1.875° . Результаты расчетов частот бетатронных колебаний ν_r, ν_z определенных 1) по приближенным аналитическим выражениям, включающим три основные гармоники фурье-разложения магнитного поля $H(r, \theta)$ и производные среднего поля по радиусу до третьей включительно, и 2) по методу численного интегрирования, сведены в таблицу 2.

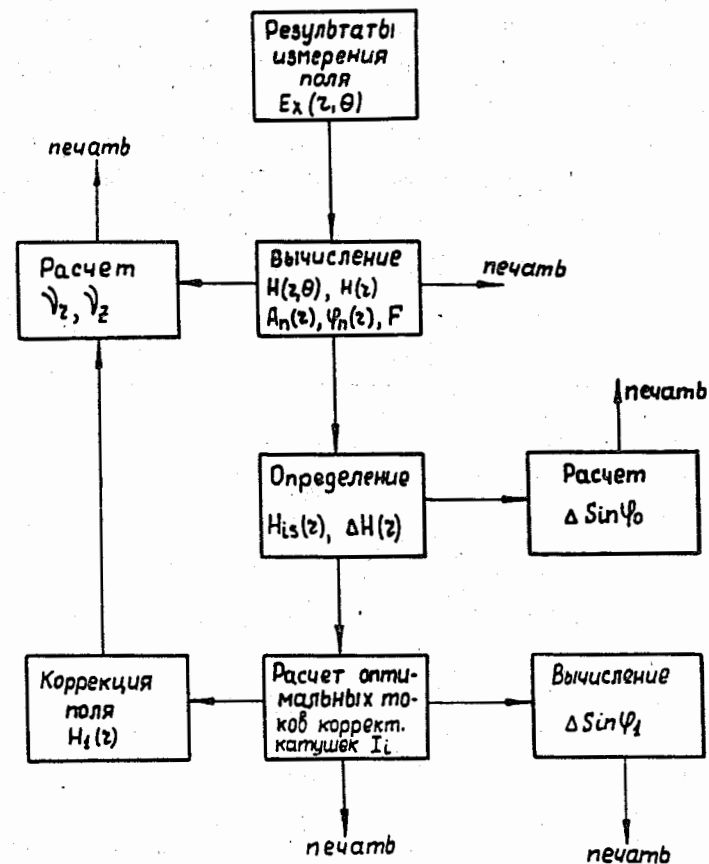


Рис. 2. Блок-схема программы обработки данных магнитных измерений.

Таблица 2

| R (см) | 20 | 40 | 60 | 80 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 1 ν_r | 1,0083 | 1,0101 | 1,0108 | 1,0162 |
| ν_z | 0,2520 | 0,2499 | 0,2248 | 0,1823 |
| 2 ν_r | 1,0102 | 1,0096 | 1,0096 | 1,0186 |
| ν_z | 0,2523 | 0,2507 | 0,2392 | 0,2150 |

Для нахождения величин предельных стабильных амплитуд радиальных колебаний Λ_r^p использовался метод фазовых графиков $(\Delta r, \Delta a) /^{14/}$, где Δr , Δa - отклонения от параметров соответствующей равновесной орбиты при пересечении частицей радиальной линии отсчета. Значения Λ_r^p для ряда энергий ионов O_{16}^{+5} приведены в таблице 3.

Таблица 3

| E(Мэв) | 1,06 | 1,89 | 2,94 | 86,5 | 138 | 292 |
|--------------------|------|------|------|------|-----|-----|
| Λ_r^p (см) | 0,8 | 3 | 5,5 | 5 | 4 | 3,3 |

Экспериментальные исследования параметров пучков ускоренных ионов показали, что магнитная структура циклотрона обеспечивает устойчивое и изохронное ускорение частиц с высокой интенсивностью в диапазоне отношений $A/Z = 2,8+4,2 /^{15,16/}$.

Третья глава содержит теоретические и экспериментальные результаты по выводу ускоренных пучков ионов из двухметрового изохронного циклотрона двумя способами: методом перезарядки ионов на тонкой фольге $/^{17,18/}$ и электростатическим deflectором в сочетании с магнитным каналом $/^{19/}$. Необходимое место установки обдирочного устройства для нацеливания пучка ионов в заданном направлении определялось графическим

построением траекторий иона после обдирки в реальном магнитном поле ускорителя. Распределение поля при этом представлялось в виде эквипотенциалей. Расчетное положение перезарядного устройства потребовалось экспериментально скорректировать по азимуту на $1,5^\circ$. В качестве мишени использовалась неохлаждаемая алюминиевая фольга толщиной 0,5 мк. Для улучшения теплоизоляции на фольгу нанесен тонкий слой графита. Этим методом были выведены пучки дейтонов с интенсивностью 30-40 мка и ионов углерода - 3-4 мка с эффективностью 90-100%. Размеры отклоненного пучка, определенные измерением β - активности фольг, облученных на входе в ионопровод, не превышают 3 см по горизонтали и 1 см по вертикали. Вывод ионов перезарядкой обладает рядом несомненных преимуществ по сравнению с электростатическим методом: простота конструкции выводного устройства; высокий коэффициент вывода; имеется возможность выпускать пучок с разных радиусов, варьируя таким образом энергию выведенного пучка. Однако этим методом можно вывести ионы в ограниченном диапазоне отношений A/Z . В нашем случае это $A/Z > 3,8$. Использование же электростатического deflectора позволяет выводить все ионы без исключения. Для конструирования deflectора необходима тщательная подгонка его электродов к геометрической форме пучка.

Траектория выведенного пучка определялась интегрированием уравнений движения иона в реальном магнитном поле ускорителя при действии электрического поля deflectора.

Для фокусирования пучка в рассеянном магнитном поле циклотрона применялся магнитный канал $/^{20/}$, параметры которого выбирались как расчетным путем, так и моделированием на стенде магнитных измерений. Поле канала формируют железные прутки кругового сечения. Магнитный канал обеспечивает градиент около 2,2 кэ/см, который слабо меняется при варьировании величины внешнего магнитного поля в пределах 15+21 кэ. Окончательное расположение элементов системы вывода У-200 приведено на рис. 3.

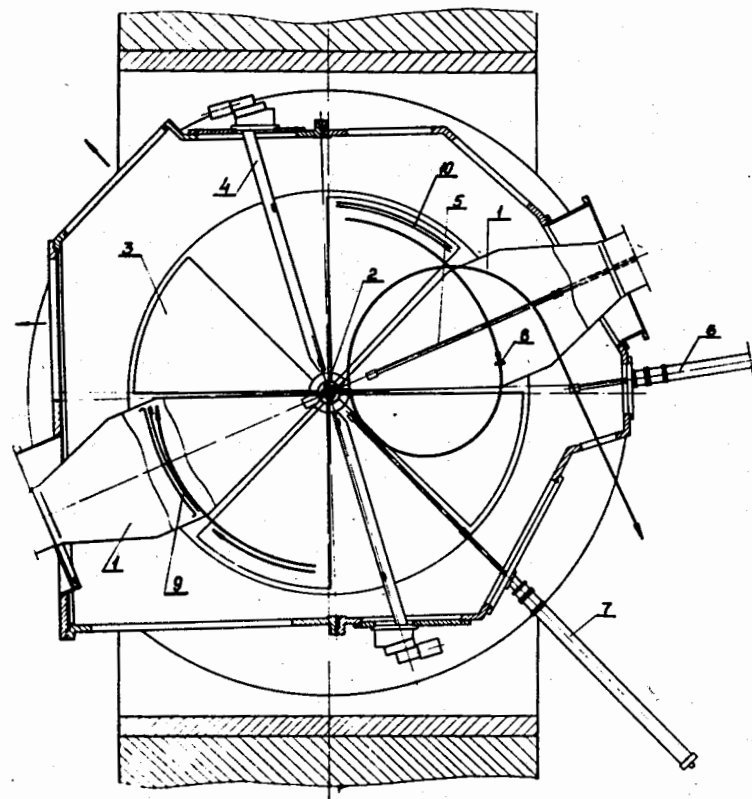


Рис. 3. Вид циклотрона в плане: 1 - дуанты, 2 - ионный источник, 3 - секторы, 4, 5, 6, 7 - токовые пробники, 8 - обдирочное устройство, 9 - электростатический дефлектор, 10 - магнитный канал.

Конструктивно дефлектор и канал выполнены в каркасах из нержавеющей стали и их положения внутри камеры регулируются без нарушения вакуума. Пластины дефлектора и шиммы магнитного канала, ввиду их малой угловой протяженности (38° и 48° , соответственно), согласно расчетам осевых траекторий, выполнены в виде дуг окружностей, что упрощает технологию и повышает точность изготовления. Радиальная апертура дефлектора составляет 4 мм при максимальном требуемом потенциале на высоковольтной пластине 40 кв. Апертура канала 14 мм. Эффективность прохождения пучком магнитного канала составляет 70%. Коэффициент вывода - 14%.

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Выполнены расчеты начального движения ионов на ЭВМ с использованием экспериментально найденных распределений электрического и магнитного полей. Определены оптимальные параметры начальной ионной оптики, обеспечивающей высокое качество пучка в аксиальном и радиальном направлениях.

2. Составлен комплекс вычислительных программ, позволивших обеспечить математическую обработку данных магнитных измерений (около 400,000 точек) на ЭВМ. Исследована пространственная устойчивость движения ионов. Проведен анализ фазового движения для ионов с различными отношениями Λ/Z . Осуществлен выбор параметров токовой корректирующей системы циклотрона У-400.

3. Реализован вывод пучков ионов методом перезарядки на тонкой фольге с эффективностью, близкой к 100%.

4. Исследован и осуществлен вывод ионов электростатическим дефлектором в сочетании с фокусирующим магнитным каналом. Эффективность вывода около 14%.

Результаты, лежащие в основе диссертации, докладывались на Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц (Москва, 1968 г.), на Национальной конференции по ускорителям (Вашингтон, 1969 г.) и представлены на Международную конференцию по циклотронам (Оксфорд, 1969 г.).

Диссертация написана по материалам работ /2-11,15,16,18,19/

Л и т е р а т у р а

1. Г.Н. Флеров. Препринт ОИЯИ Р7-4199, Дубна, 1968.
2. И.А. Шелаев, С.И. Козлов, Р.Ц. Оганесян, Ю.Ц. Оганесян, В.А. Чугреев. Препринт ОИЯИ, 9-3988, Дубна, 1968.
3. И.А. Шелаев, С.И. Козлов, В.М. Николаев. Сообщение ОИЯИ, Р9-5032, Дубна, 1970.
4. И.А. Шелаев, С.И. Козлов, Р.Ц. Оганесян, С.Г. Фефилова. Препринт ОИЯИ, Р9-4233, Дубна, 1968.
5. И.А. Шелаев, С.И. Козлов, Р.Ц. Оганесян. Доклад на Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц. Труды конференции, Москва, 1968.
6. С.И. Козлов, Р.Ц. Оганесян, Пек Ден Ги, И.А. Шелаев. Препринт ОИЯИ, Р-2854, Дубна, 1966.
7. И.А. Шелаев, С.И. Козлов, Р.Ц. Оганесян. Доклад на Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц. Труды конференции, Москва, 1968.
8. Э.Г. Имаев, С.И. Козлов, Р.Ц. Оганесян, С.Г. Фефилова, И.А. Шелаев, Л.П. Челноков. Препринт ОИЯИ, 9-3713, Дубна, 1968.
9. И.А. Шелаев, А.И. Иваненко, С.И. Козлов, Р.Ц. Оганесян, В.А. Чугреев. Сообщение ОИЯИ, Р9-5047, Дубна, 1970.
10. И.А. Шелаев, Е.Д. Воробьев, Б.А. Загер, С.И. Козлов, В.И. Кузнецов, Р.Ц. Оганесян, Ю.Ц. Оганесян, К.И. Семин, А.Н. Филипсон, В.А. Чугреев. Препринт ОИЯИ Р9-5086.
11. И.А. Шелаев, С.И. Козлов, Б.А. Кленин. Сообщение ОИЯИ, Р9-5033, Дубна, 1970.
12. Ю.Г. Басаргин, Р.Н. Литуновский. Сб. "Электрофизическая аппаратура", вып. 5, М., Атомиздат, 1966, стр. 135.
13. T.A. Welton. Sector-Focused Cyclotron, Proceeding of Conference at Sea Island, 1959, p.48.
14. M.M. Gordon and T.A. Welton. Nucl.Instr. and Meth., v. 6, N3 (1960) p.221.

15. И.А. Шелаев, В.С. Алфеев, С.И. Козлов, В.М. Николаев, Р.Ц. Оганесян. Сообщение ОИЯИ, Р9-5048, Дубна, 1970.
16. I.A. Shelaev, S.I. Kozlov, R.Tz. Oganessian and Yu.Tz. Oganessian, IEEE Transaction on Nuclear Science v. NS-16, N3, 802, Washington, 1969.
17. Г.Н. Вялов, Ю.Ц. Оганесян, Г.Н. Флеров. Препринт ОИЯИ, 1884, Дубна, 1964.
18. И.А. Шелаев, В.С. Алфеев, С.И. Козлов, Р.Ц. Оганесян. Препринт ОИЯИ, Р9-4831, Дубна, 1969. (ПТЭ, №3, стр. 53, 1970г.).
19. И.А. Шелаев, В.С. Алфеев, С.И. Козлов, В.М. Николаев, Р.Ц. Оганесян. Сообщение ОИЯИ, Р9-5037, Дубна, 1970г.
20. В.И. Данилов и др. Препринт ОИЯИ, Р9-2588, Дубна, 1966.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 апреля 1970 года.