

СЗУЕК

С-20

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



85/2-78

P9 - 10917

2/7-78

В.П.Саранцев, В.С.Александров, Л.С.Барабаш,
Г.В.Долбилов, В.И.Миронов, В.Г.Новиков,
Г.К.Радонов, А.П.Сумбаев, С.И.Тютюнников,
В.П.Фартушный, А.А.Фатеев, А.С.Щеулин

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОННОГО КОЛЬЦА
НА КОНЕЧНЫХ РАДИУСАХ СЖАТИЯ
В ПРОТОТИПЕ КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

1977

P9 - 10917

**В.П.Саранцев, В.С.Александров, Л.С.Барабаш,
Г.В.Долбилов, В.И.Миронов, В.Г.Новиков,
Г.К.Радонов, А.Л.Сумблев, С.И.Тютюнников,
В.П.Фартушный, А.А.Фатеев, А.С.Щеулин**

**ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОННОГО КОЛЬЦА
НА КОНЕЧНЫХ РАДИУСАХ СЖАТИЯ
В ПРОТОТИПЕ КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ**

Саранцев В.П. и др.

Р9 - 10917

Изучение динамики электронного кольца на конечных радиусах сжатия в прототипе коллективного ускорителя тяжелых ионов

Описаны эксперименты по сжатию и изучению поведения электронных колец на конечных радиусах сжатия в адгезаторе прототипа коллективного ускорителя тяжелых ионов.

Произведены измерения параметров колец на начальном участке вывода: равновесного радиуса, размеров сечения, положения геометрического центра. В результате оптимизации системы вывода электронные кольца выведены из камеры адгезатора.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Sarantsev V.P. et al.

Р9 - 10917

Study on the Electron Ring Dynamics on Constriction Final Radii in a Prototype of Heavy Ion Collective Accelerator.

Experiments on the constriction and study of the behaviour of electron rings on constriction final radii are described in an adhezator of a heavy ion collective accelerator prototype.

The ring parameters have been measured: an equilibrium, cross section dimensions, position of geometric centre. As a result of the extraction system optimization, electron rings have been extracted from the adhezator chamber.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1977

В результате экспериментов по формированию и сжатию электронных колец в адгезаторе прототипа коллективного ускорителя тяжелых ионов^{/1-3/} сформированы кольцевые сгустки электронов с числом частиц $N_e = 10^{13}$ со следующими параметрами: большой радиус кольца - 4 см, аксиальный и радиальный полуразмеры $a_r = a_z = 0,2$ см, релятивистский фактор вращения электронов в кольце $\gamma = 40$. Следующий этап наладки ускорителя заключался в оптимизации магнитной системы, позволяющей выводить электронные кольца из адгезатора для дальнейшего ускорения.

В прототипе коллективного ускорителя тяжелых ионов используется магнитный способ ускорения колец в линейно спадающем по оси z и почти однородном в радиальном направлении магнитном поле B_z . Система вывода и ускорения, рассчитанная в работе^{/4/}, должна обеспечивать сжатие электронного кольца до конечного радиуса 2,8 см, вывод кольца и ускорение ионов до энергий $1 \div 5$ МэВ/нуклон. Система включает в себя /рис. 1/ IV ступень сжатия и выводной соленоид, способный создавать магнитные поля с напряженностью до 20 кЭ на длине ускорения - 76 см. Как показали измерения, градиенты магнитного поля соленоида оказались близкими к 50 Э/см с относительным спадом $\Delta B_z / B_z$ на длине ускорения - 30%. Существует возможность двух основных режимов работы магнитной системы: режим сжатия, когда соленоид не включен, а IV ступень работает без шунтировки катушек, и режим вывода, когда шунтированием одной из катушек IV ступени и включением соленоида магнитная яма,

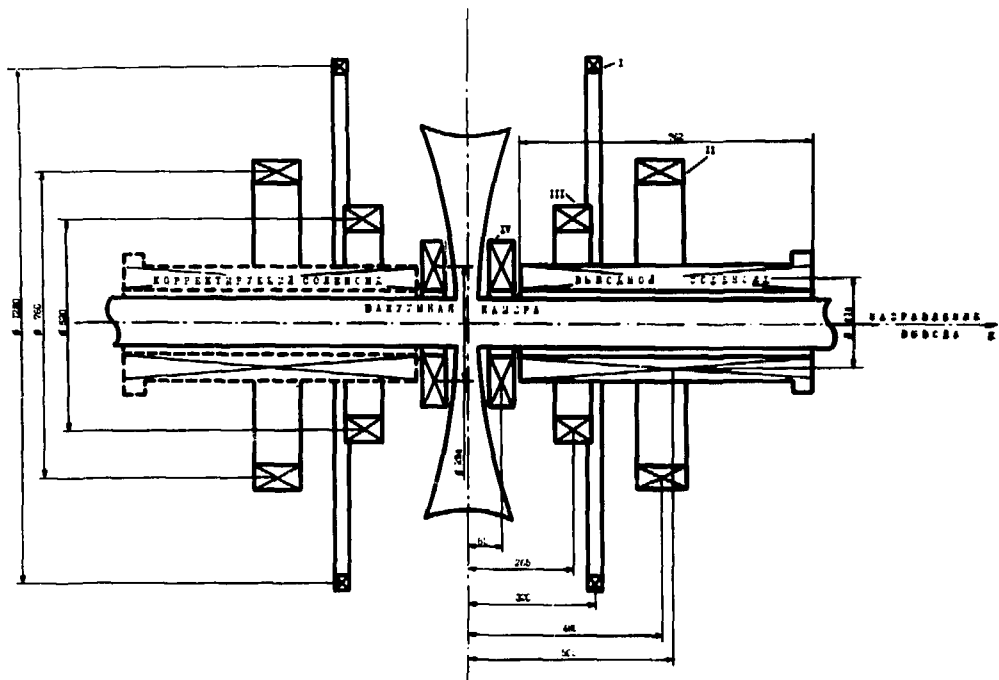


Рис. 1. Магнитная система адгезатора.

удерживающая кольцо, смещается от медной плоскости и постепенно выкладывается в направлении вывода. Электронное кольцо движется вместе с ямой и в момент полного сжатия ее начинает ускоряться в слабом по длине поле соленоида.

На рис. 2 представлены результаты измерений магнитного поля на участке вывода в различные моменты времени: 1,5; 1,6 и 1,7 мс от начала сжатия. Из графиков видно, как постепенно сжимается ведущая магнитная яма. Поля IV ступени и соленоида, время включения шунтировки $t_{ш}$ и соленоида t_c выбирались на основании магнитных измерений таким образом, чтобы радиус кольца в момент вывода был меньше радиуса выводного патрубка, равного 6 см, а ток в IV ступени и в соленоиде был близок к амплитудному значению. В дальнейшем режим вывода оптимизировался путем изменения полей IV ступени и соленоида, а также времени включения шунтировки и соленоида для вывода в патрубок колец с определенным радиусом с наименьшими потерями в процессе вывода.

В экспериментах контролировались радиус кольца в процессе сжатия, поперечные размеры сечения, положение и продольная скорость кольца. Измерения производились при помощи разработанной в ОНМУ ОИЯИ системы инфракрасных детекторов синхротронного излучения, анализировались электрические сигналы с флажков и сигналы с фотоэлектронного умножителя /ФЭУ/ сцинтилляционного детектора тормозного γ -излучения от высадки кольца на флажок, мишень или на стенки камеры.

Система детекторов синхротронного излучения^{15/} представляет собой схему, состоящую из зеркально-оптического тракта^{16/}, детекторов, смонтированных на поворотном столе, и выполненной в стандарте КАМАК электронной аппаратуры амплитудно-временной селекции, работающей на линии с ЭВМ типа М-6000.

Синхротронное излучение от электронного кольца выводится через окно в патрубке камеры адгезатора в зеркально-оптический тракт. Оптические оси тракта отъюстированы таким образом, что изображение малого сечения электронного кольца в синхротронном свете

9

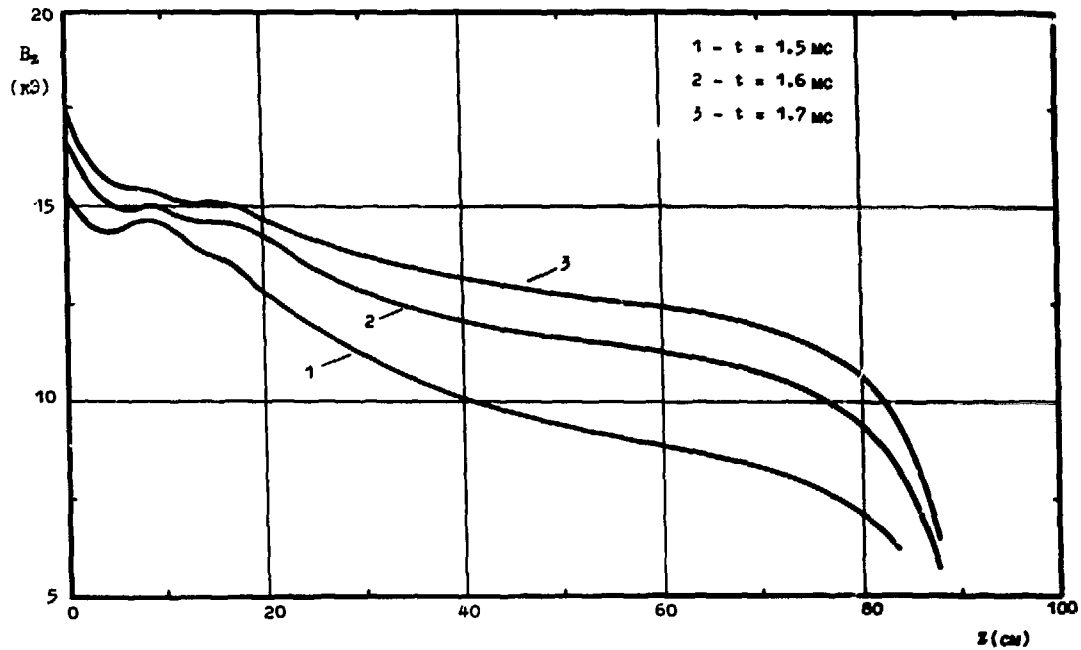


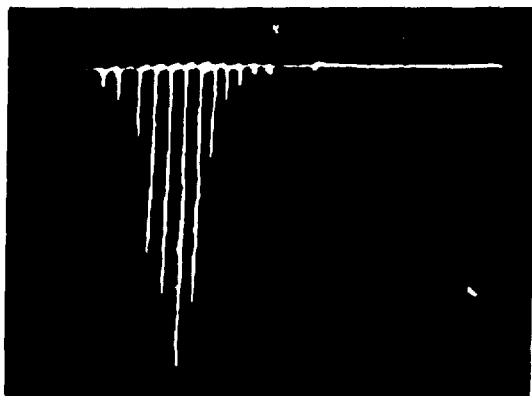
Рис. 2. Распределение магнитного поля в выводном соленоиде в различные моменты времени.

строится в плоскости поворотного стола, где размещены фотодетекторы, составленные из пятидесяти InSb фотосопротивлений n -типа с размерами $0,2 \times 0,4$ мм линейно расположенных вдоль оси стола. Общая длина "линейки" составляет 20 мм. Поворотный стол позволяет изменять ориентацию линейки детекторов относительно осей электронного кольца /либо вдоль оси z , либо вдоль оси r / и положение линейки около оси оптического тракта на величину $\Delta z = \Delta r = \pm 15$ мм.

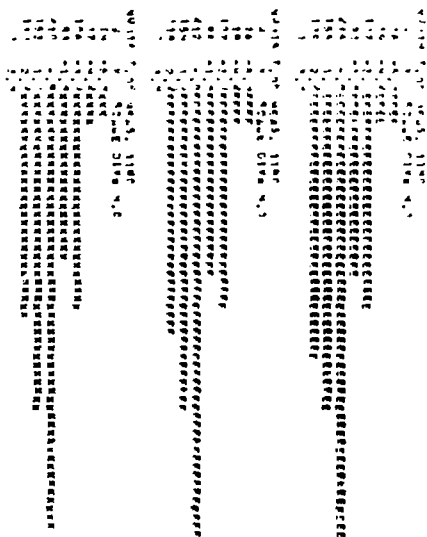
Детекторы преобразуют синхротронное излучение в электрические сигналы, которые после предварительного усиления подаются на входы линейных ворот, способных стробировать поступающие сигналы с длительностью ≥ 1 мкс. Информация с выходов линейных ворот по независимым каналам поступает в блок аналоговой памяти. Электронная аппаратура анализирует амплитудные значения сигналов за время строба линейных ворот, задержка и длительность которого зависят от условий измерений. Схема амплитудно-временного анализа позволяет визуально наблюдать процесс сжатия кольца на экране осциллографа с выхода блока аналоговой памяти. На рис. 35 приведена осциллограмма z -профиля сечения кольца при установке центра линейки на радиус $R = 3,5$ см /ось линейки ориентирована вдоль оси z /. Осциллограмма показывает распределение сигналов с детекторных каналов. Амплитуда сигналов пропорциональна интенсивности синхротронного излучения.

Каналы аналоговой памяти по очереди подключаются на вход аналого-цифрового преобразователя, после чего информация в цифровом коде поступает в буферную память, затем в память ЭВМ, где по специально разработанным программам обрабатывается в соответствии с условиями эксперимента. Результаты измерений после обработки в ЭВМ выводятся на цифropечать и дисплей. На рис. 36 приводится образец выдачи на цифropечать r -профиля малого сечения кольца при подаче на линейные ворота последовательно трех стробирующих импульсов /линейка ориентирована вдоль оси r /.

При изучении динамики электронного кольца на конечных радиусах сжатия и на начальном участке вывода измерялась R -траектория кольца ($R = f(t)$), r - z по-



а



б

Рис. 3. Представление профиля сечения кольца при помощи системы инфракрасных детекторов. а/ - осциллограмма z-профиля, б/ - γ -профиль в различные моменты времени.

ложение и размеры малого сечения кольца в различных режимах работы магнитной системы. На рис. 4 приведена R-траектория кольца в одном из режимов сжатия при напряжении на конденсаторах IV ступени 20 кВ. На рисунке по оси абсцисс отсчитывается время после инжекции, а по оси ординат - радиус кольца. На рис. 5 приводится зависимость конечных радиусов сжатия R_к от величины напряжения на конденсаторах IV ступени. Пунктирные кривые на рис. 4 и 5 построены по точкам, полученным в процессе измерений, сплошные кривые соответствуют адиабатическому инварианту $B_s R^2 = \text{const}$.

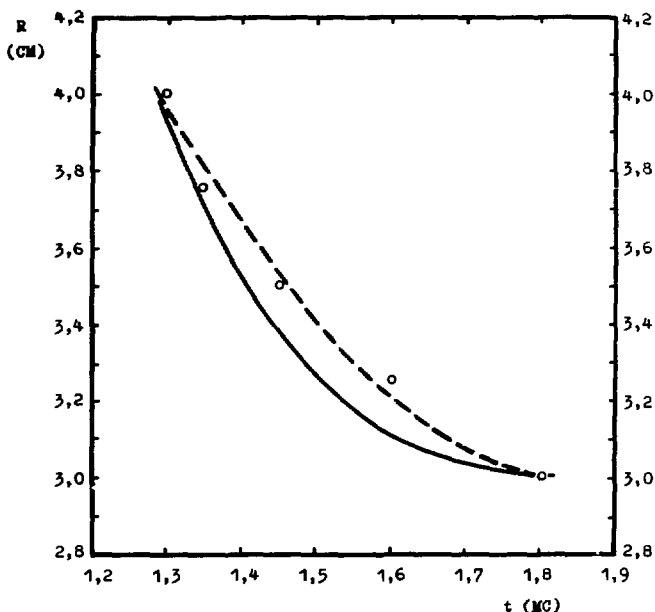


Рис. 4. Радиус кольца как функция времени. Сплошная кривая - зависимость, рассчитанная из адиабатического инварианта.

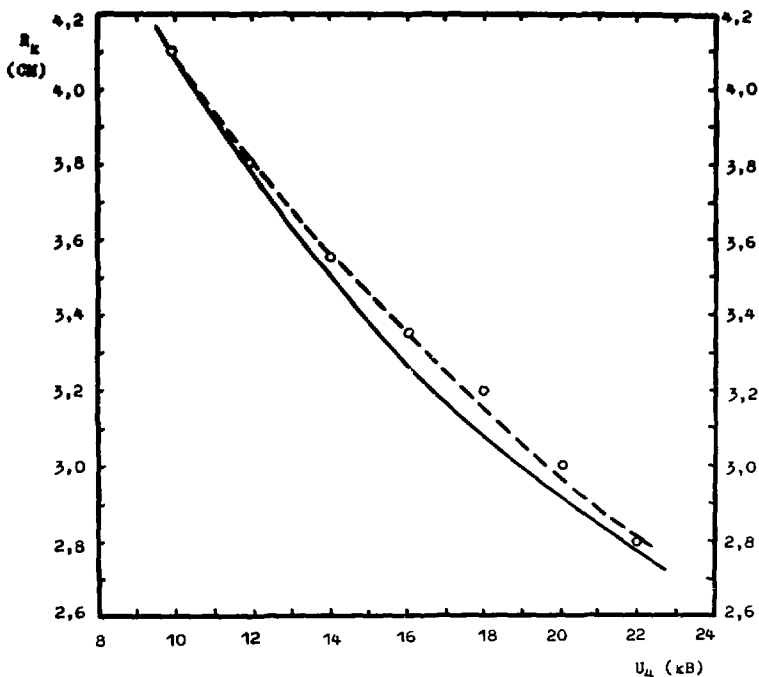


Рис. 5. Зависимость конечных радиусов сжатия от напряжения на конденсаторах IV ступени.

где V_s - пол.э на орбите кольца. Как следует из результатов измерений, наблюдаемые процессы вполне удовлетворительно описываются адиабатическим инвариантом.

Измеренные полуразмеры малого сечения кольца a_r и a_z имеют значения, близкие к величине $1,5 \pm 2$ мм и при сжатии кольца от радиуса 5 см до радиуса 3 см изменяются незначительно. Все эксперименты по измерению R-траектории и поперечных размеров кольца проводились при давлении остаточного газа в камере $3,5 \cdot 10^{-7} \div 3,5 \cdot 10^{-6}$ Тор. Четкой зависимости этих величин от вакуума не обнаружено.

При сжатии электронного кольца с установленным выводным соленоидом обнаружилось существенное искажение магнитных полей, приводящее к разрушению кольца в течение первых двухсот микросекунд с начала сжатия, т.е. на включение полей II ступени. Эти искажения были вызваны "эффектом затемнения" области сжатия вихревыми токами, возникающими в обмотках выводного соленоида при включении полей II ступени. Для компенсации искажений симметрично относительно медианной плоскости, как показано на рис. 1, был установлен корректирующий соленоид. Обмотка корректирующего соленоида с индуктивностью L_k конструктивным исполнением имитировала обмотку выводного соленоида. Режим компенсации при этом выбирался путем изменения положения корректирующего соленоида по оси Z относительно медианной плоскости и изменения величины сопротивления $R_{ш}$ шунтирующего обмотку корректирующего соленоида. Изменением $L_k/R_{ш}$ определялось время компенсации полей соответствующих вихревых токов.

Позднее для устранения искажений "эффектами тени" обмотки выводного соленоида были выполнены многожильным проводом с изолированными жилами. Такое "бестеневое" исполнение обмоток позволило избавиться от паразитных искажений полей на включении ступеней сжатия и обходиться без корректирующего соленоида. R-траектория, положение сжимающегося кольца относительно медианной плоскости и поперечные размеры малого сечения кольца после перехода к "бестеневому" соленоиду существенно не изменились.

При включении катушек IV ступени в режиме сжатия /без шунтировки/ и дополнительном включении соленоида ощущалось изменение магнитного поля в области сжатия, вызывающее смещение кольца относительно медианной плоскости в сторону, противоположную направлению вывода. Рис. 6 иллюстрирует влияние поля соленоида на процесс сжатия /шунтировка не включена/. На рисунке приведены R-Z траектории сжатия при отключенном /а/ и включенном /б/ поле соленоида. Анализ результатов измерений размеров сечения кольца показывает, что яма продолжает удерживать кольцо без разрушения.

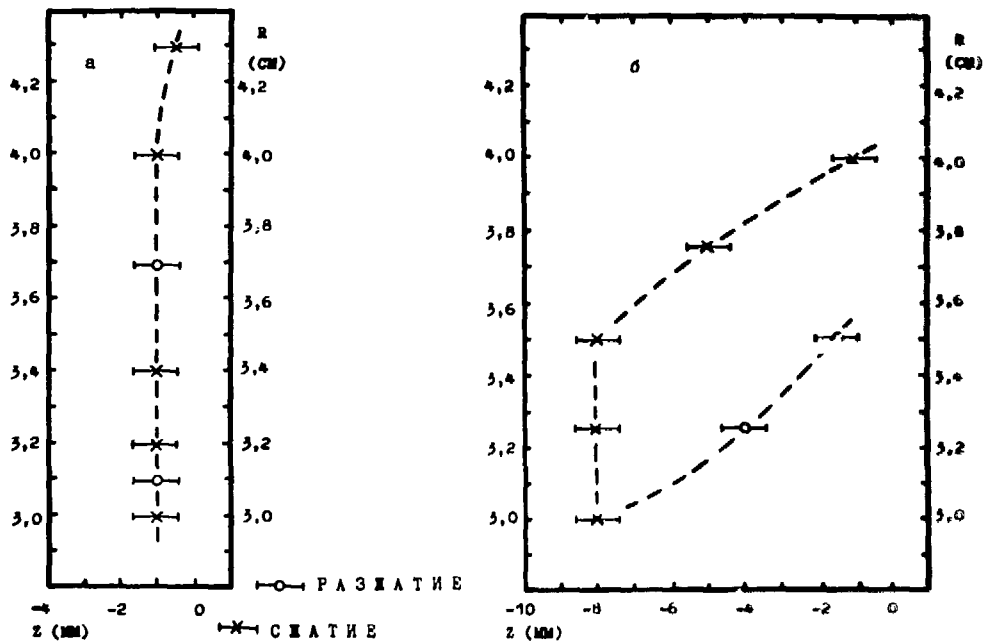


Рис. 6. Траектория кольца на конечных радиусах сжатия при выключенном /а/ и включенном /б/ поле соленоида.

При включении магнитной системы в режиме вывода после оптимизации времени включения шумитровки и соленоида кольцо было выведено в патрубок камеры адгезатора. На рис. 7 приведена ф-ография сечения кольца в синхротронном свете видимого диапазона при сжатии /а/ и при включении шумитровки и соленоида /б/. На снимке видно, что при включении режима вывода кольцо смещается и уменьшается в радиусе. Траектория его

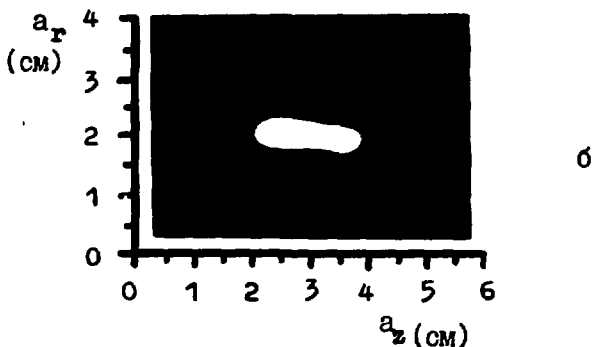
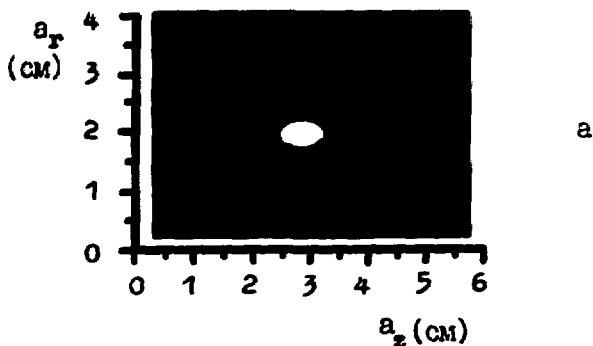


Рис. 7. Сечение кольца в видимом диапазоне синхротронного излучения, а - режим сжатия, б - режим вывода.

в камере на начальном участке вывода была измерена линейкой инфракрасных датчиков синхротронного излучения. Результаты измерений в одном из режимов вывода представлены точками на рис. 8. Расчетная траектория

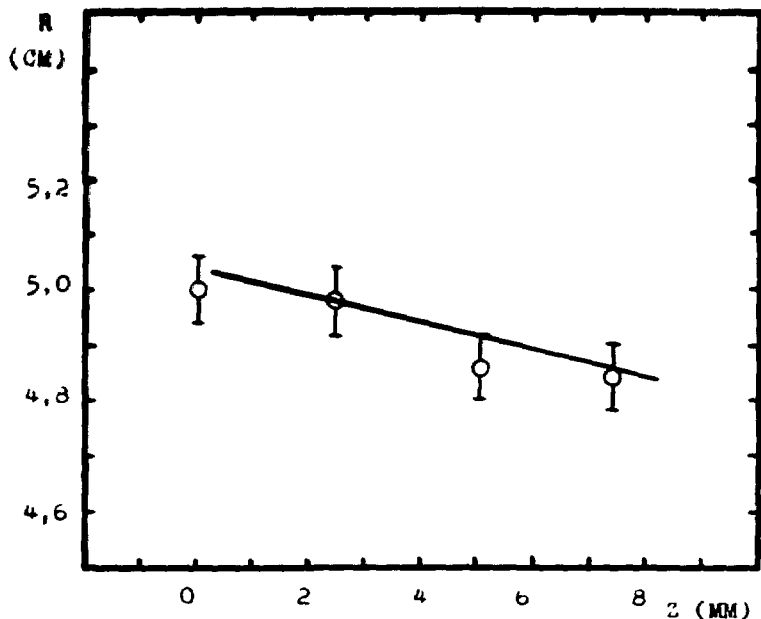


Рис. 8. Траектория кольца на начальном участке вывода. Сплошная кривая - расчетная зависимость.

/сплошная кривая/, приведенная на рисунке, определена по методу, изложенному в работе ¹⁴. Из рисунка следует достаточно хорошее согласие измерений с расчетами. На рис. 9 представлен "автограф" кольца, полученный на фотопленке, установленной на расстоянии $Z = 3$ см от медианной плоскости. Радиус кольца при этом составляет 4 см.

Из анализа электрических сигналов с флажков, установленных в различных положениях по z , и сигналов

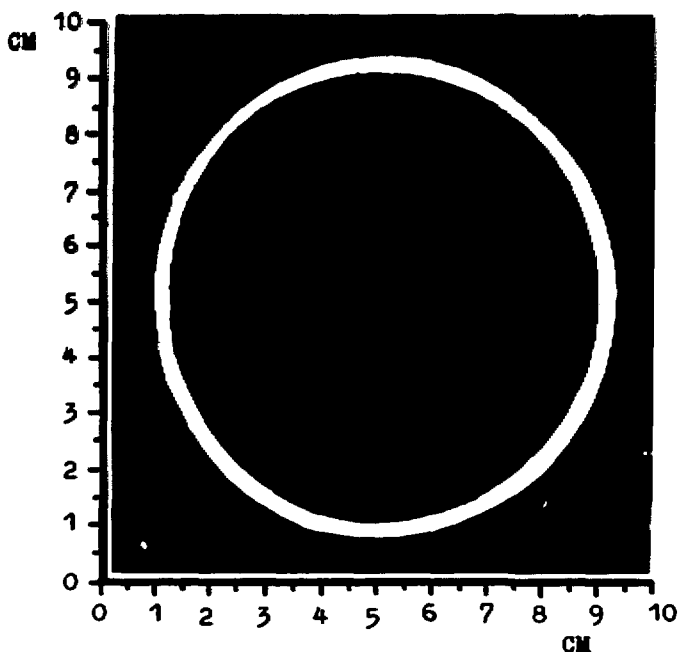


Рис. 9. "Автограф" кольца на $z = 3$ см.

со сцинтилляционного счетчика тормозного излучения при высадке кольца на флажок была построена Z -траектория и определена верхняя граница z -полуразмера сечения кольца на участке вывода. На рис. 10 по оси ординат отложено расстояние от флажка до медианной плоскости, а по оси абсцисс отсчитывается относительное время высадки кольца на флажок. Точками указаны моменты появления сигнала с ФЭУ тормозного излучения от флажков. Как следует из рисунка, скорость перемещения кольца вдоль оси z на участке $2 \text{ см} \leq z \leq 6 \text{ см}$ составляет $2 \cdot 10^{-2} \text{ см/мкс}$. При известной скорости наплывания кольца на флажок можно оценить верхний предел значения z -полуразмера сечения кольца на этом

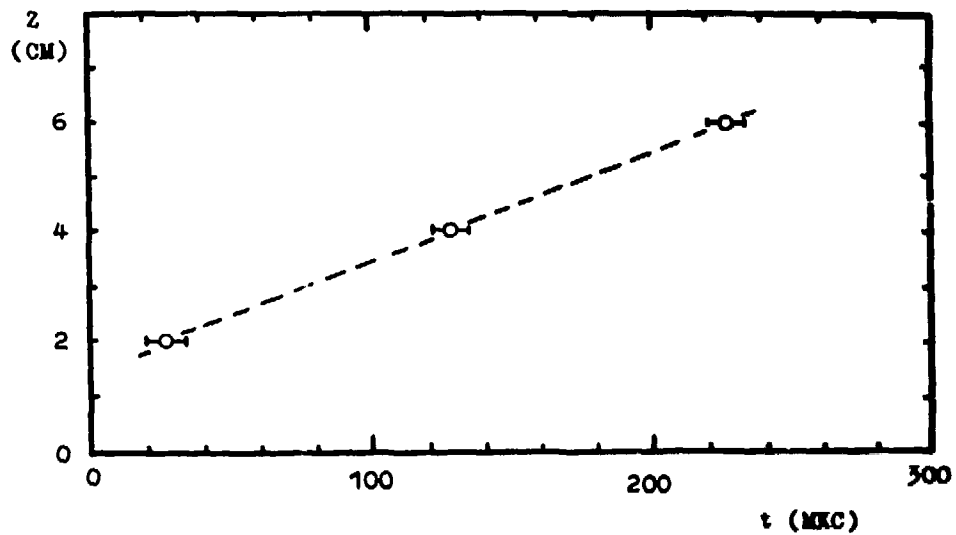


Рис. 10. Относительное время появления сигнала с флажков.

участке по длительности импульса тормозного излучения. При длительности импульса с ФЭУ $\tau_{\gamma} = 20+25$ мкс 2-полуразмер с учетом бетатронных колебаний составляет $\Delta z \leq V_2 \cdot \tau_{\gamma} = 4+5$ мм. Видимо, уширение кольца связано с выталкиванием магнитной ямы при выводе и с влиянием мишени на пучок. Анализ сигналов с детектора тормозного излучения при сбросе кольца на мишень в конце участка вывода указывает на то, что процесс сжатия до конечных радиусов и вход в выводной патрубок камеры адгезатора кольцо проходит без существенных потерь электронов.

При выводе кольца в патрубок было измерено $r-z$ положение кольца с помощью фотопластинок, устанавливаемых на различных расстояниях от медианной плоскости камеры. На рис. 11 точками представлены результаты измерений положения геометрического центра кольца при движении в направлении вывода от положения $Z=0$ до $Z=10$ см. Как оказалось, кольцо в начале участка движется по оси магнитной системы, затем на участке $5 \text{ см} \leq Z \leq 7 \text{ см}$ смещается как целое в радиальном направлении и дальше движется параллельно оси. Радиальное смещение кольца в области $5 \text{ см} \leq Z \leq 7 \text{ см}$, где показатель спада поля магнитной ямы имеет минимальные значения ($n \rightarrow 0$), можно объяснить влиянием первой гармоники поля IV ступени сжатия. Эта гармоника, возникающая из-за набега витков в катушке катушек IV ступени при переходе от слоя к слою, составила примерно 10^{-3} величины основного поля. Действительно, при компенсации первой гармоники поля IV ступени различными способами/изменением взаимного азимутального расположения катушек IV ступени, внесением в область $5 \text{ см} \leq Z \leq 7 \text{ см}$ элементов коррекции поля/удалось избавиться от смещения кольца при прохождении области сжатия ямы и получить его "автограф" на $Z = 60 \pm 80$ см.

Выводы

Из экспериментов по изучению динамики кольца на конечных радиусах сжатия и на начальном участке вывода можно сделать следующее заключение.

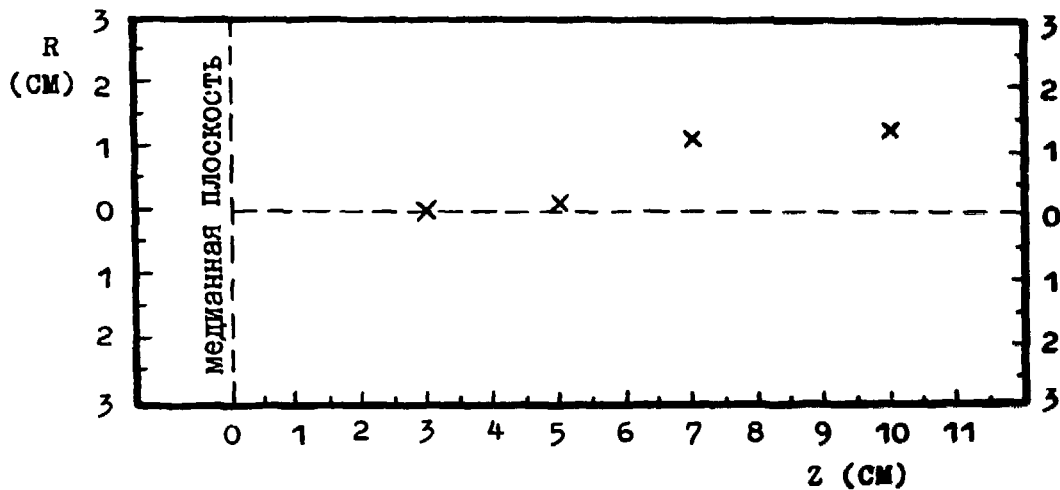


Рис. 11. Положение центра кольца на участке слякки магниевой ямы.

Магнитная система адгезатора УТИ позволяет осуществлять режимы сжатия и вывода, близкие к расчетным.

Электронные кольца, сформированные в камере адгезатора, выводятся в патрубок адгезатора без потерь электронов с сохранением основных параметров, что позволяет приступить к экспериментам по ускорению как электронных колец, так и колец, нагруженных ионами.

Литература

1. Барбачи Л.С. и др. ОИЯИ, Р9-7697, Дубна, 1974.
2. Саранцев В.П. и др. ОИЯИ, 10053, Дубна, 1976.
3. Саранцев В.П. и др. ОИЯИ, Р9-10054, Дубна, 1976.
4. Александров В.С. и др. ОИЯИ, Р9-10118, Дубна, 1976.
5. Беспалова Т.В. и др. I Всесоюзное совещание по автоматизации научных исследований в ядерной физике. Тезисы докладов. Изд. Института ядерных исследований АН УССР, Киев, 1976.
6. Белинская Г.И. и др. ОИЯИ, Р9-9281, Дубна, 1975.

*Рукопись поступила в издательский отдел
9 августа 1977 года.*