

**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

1123/2-80

18/3-80

P9 - 12963

Г.В.Долбилов, В.Д.Инкин, А.К.Красных,  
А.А.Мозелев, В.П.Саранцев, А.П.Сумбаев,  
С.И.Тютюнников, А.А.Фатеев,  
Б.А.Шестаков, А.С.Щеулин

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ НАКОПЛЕНИЯ ИОНОВ  
ПО ТОРМОЗНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ ЭЛЕКТРОНОВ**

**1980**

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных процессов, от которого в дальнейшем зависят параметры ионов, ускоряемых в электронных кольцах, является процесс их накопления в электронных кольцах. Действительно, от него зависит как общее количество ионов  $n_i$ , так и их максимальная энергия, полученная при ускорении электронного кольца, нагруженного ионами. В работах <sup>/1,2,3/</sup> было показано, что в двухкомпонентных кольцах возможны неустойчивости, которые могут быть основной причиной ограничения количества ионов в электронном кольце.

Эксперименты с электронными кольцами в Гаршинге <sup>/4/</sup> показали наличие некоторых когерентных процессов: радиальную прецессию электронного кольца, зависимость частоты прецессии от давления остаточного газа. Однако они не дают прямого ответа на вопрос о том, какое максимальное количество ионов может быть накоплено, и о том, какой процесс все же определяет их предельное количество в электронных кольцах: электронно-ионная неустойчивость или близкая к 100% нейтрализация потенциальной ямы, которая ведет к медленному увеличению объема, занимаемого ионной компонентой. Измерение накопления ионов в электронном кольце при разных условиях может дать ответ об их предельных количествах и соответственно о том, достигается ли стопроцентная компенсация ямы или нет. Целью настоящей работы является экспериментальная проверка методики измерения накопления ионов по тормозному излучению электронов.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе <sup>/5/</sup> была показана возможность измерения тормозного излучения электронов на ионах, находящихся в электронном кольце. Для этого использовался спектрометр на основе фотоэлектронного умножителя /ФЭУ/ с кристаллом NaJ(Tl). Блок-схема аппаратуры для исследования процесса накопления ионов в электронных кольцах показана на рис. 1. Сигналы с ФЭУ через усилитель-формирователь подавались на вход дискриминатора, который определял энергетический порог регистрации  $\gamma$ -квантов. С выходов дискриминатора сигналы поступали на счетчики, работающие в определенных временных интервалах, которые задаются таймерным устройством. Временная диаграмма показана на рис. 2. Процесс накопления ионов во времени исследовался путем изменения задержек стробов. Аппаратура выполнена в стандарте КАМАК и работала на линии с ЭВМ ТРА-1, которой задавалась величина задержки стробов, затем произво-

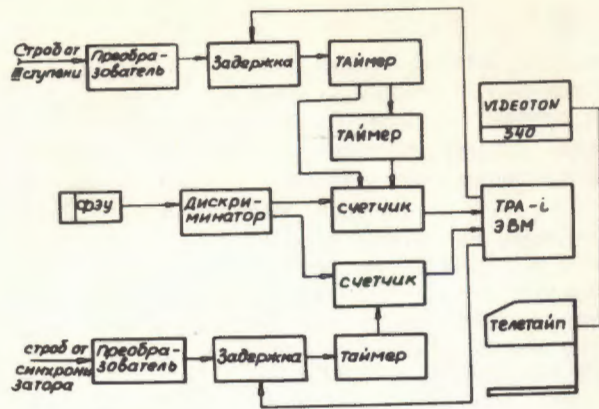


Рис. 1. Блок-схема аппаратуры.

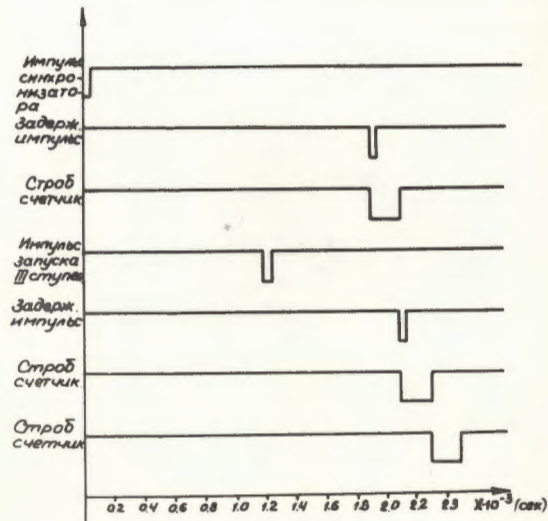


Рис. 2. Временная диаграмма.

дилось считывание информации из счетчиков, обработка ее и вывод значения произведения количества электронов на число ионов в объеме кольца -  $N_e n_i$  на телетайп или дисплей VT-340.

Исследование процесса накопления ионов в электронных кольцах проводилось на прототипе коллективного ускорителя тяжелых ионов Отдела новых методов ускорения ОИЯИ в режиме сжатия колец с параметрами:  $R_{\text{кон}} = 3,6$  см,  $N_e = 5 \cdot 10^{12}$ .

Загрузка электронного кольца ионами осуществлялась вследствие ионизации остаточного газа, а также из импульсного потока атомов, который обеспечивался газодинамическим источником <sup>18</sup>. Поток атомов газа пересекал кольцо электронов на  $R = 5,6$  см, что обеспечивалось определенной задержкой момента открытия клапана по отношению к началу сжатия кольца. Плотность газа в струе могла регулироваться изменением давления в форкамере. В широких пределах давление линейно связано с плотностью потока нейтральных атомов.

### ПРОГРАММА ОБРАБОТКИ

Алгоритм программы исследования процесса накопления ионов в электронных кольцах показан на рис. 3. После начальных операций задаются параметры, используемые для пересчета числа зарегистрированных  $\gamma$ -квантов  $N_\gamma$  в величины произведения чисел электронов и ионов  $N_e n_i$  в электронно-ионном кольце. Объем электронного кольца и геометрический фактор

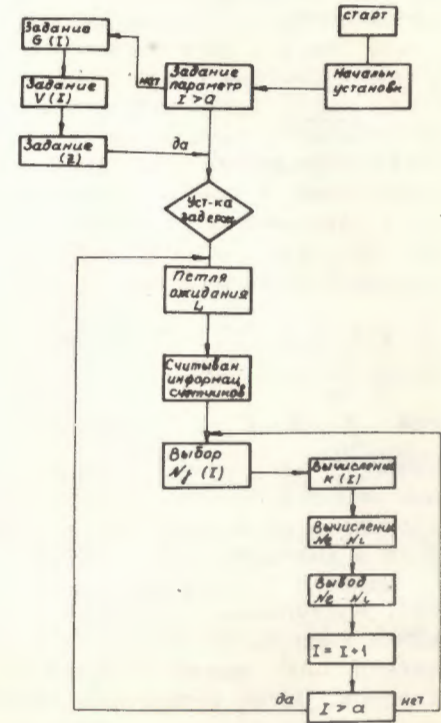


Рис. 3. Алгоритм программы обработки.

задаются с телетайпа для каждой точки, в которой производится измерение  $N_\gamma$ . Задается также число исследуемых точек ( $a=3$ ), соответствующее количеству счетчиков. Для каждой точки объем кольца  $V(I)$  и геометрический фактор  $G(I)$  рассчитываются предварительно. Последний рассчитывается по формуле /1/, которая учитывает как угловой разброс электронов за счет бетатронных колебаний, так и направленность тормозного излучения:

$$G = \frac{a^3}{4(\nu_r \cdot \nu_z \frac{a_r a_z}{R^2} + \frac{1}{\gamma} (\frac{\nu_r a_r}{R} + \frac{\nu_z a_z}{R}) + \frac{1}{\gamma^2})}, \quad /1/$$

где  $a = \frac{r}{L}$ ,  $r$  - радиус отверстия коллиматора,  $L$  - расстояние от источника излучения до детектора,  $\nu_r = \sqrt{1-n}$ ,  $\nu_z = \sqrt{n}$ ,  $n$  - показатель спада магнитного поля,  $a_r$  и  $a_z$  - соответственно радиальный или аксиальный размеры кольца,  $R$  - радиус кольца,  $\gamma$  - энергия электронов в  $mc^2$ .

На рис. 4 представлены графики зависимости геометрического фактора от времени сжатия электронно-ионного кольца для коллиматора, с помощью которого исследовалось накопление ионов азота в электронном кольце. Напряжение на третьей ступени системы сжатия колец составляло 20 и 24,5 кВ.

На рис. 5 представлены графики временной зависимости геометрического фактора для коллиматора, используемого при исследовании накопления ионов ксенона в электронных кольцах, напряжение на третьей ступени сжатия составляло 20 и 24,5 кВ.

В зависимости от вида исследуемого газа вводилась функция  $\Phi(z_0, E_H)$ , которая представляет собой функцию отклика на падающий тормозной спектр  $\sigma(E_\gamma, E_0, z_0)$ :

$$\Phi(z_0, E_H) = \sum_{E_H}^{E_0} \sigma(E_0, E_{\gamma i}, z_0) \Delta E_{\gamma i} \sum_{E_H}^{E_0} \epsilon(E_{\gamma i}, E_{\gamma j}), \quad /2/$$

где  $\sum_{E_H}^{E_0} \epsilon(E_{\gamma i}, E_{\gamma j})$  представляет собой эффективность регистрации  $\gamma$ -излучения с энергией  $E_{\gamma i}$  в зависимости от значения нижнего порога дискриминации  $E_H$ . Указанная величина строилась по измеренным аппаратурным спектрам от источников ОСГИ в диапазоне 150 ÷ 1400 кэВ.

Далее с устройства ввода устанавливались задержки стробов, поступающих на входы счетчиков. Используемый модуль КАМАК типа КС-012 позволял организовать петлю ожидания LAM. Сигнал LAM вырабатывается этим модулем после прихода всех стробов. Затем информация счетчиков считывается в ЭВМ ТРА-1.

Рис. 4. Графики временной зависимости геометрического фактора при исследовании ионов азота: 1 -  $U_{IIICT} = 20$  кВ; 2 -  $U_{IIICT} = 24,5$  кВ.

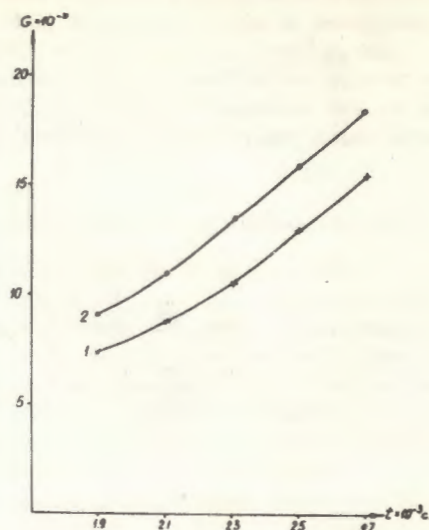
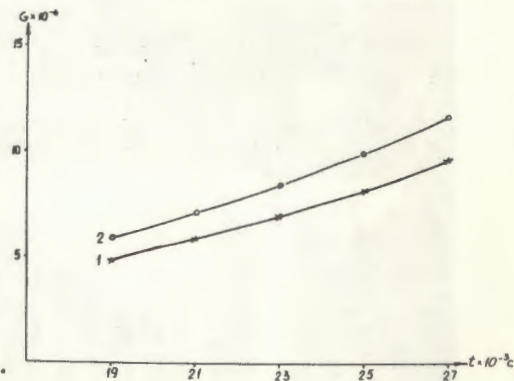


Рис. 5. Графики временной зависимости геометрического фактора для коллиматора при исследовании ионов ксенона: 1 -  $U_{IIICT} = 20$  кВ; 2 -  $U_{IIICT} = 24,5$  кВ.



В целях экономии машинной памяти организован цикл обработки. Для каждого  $N_\gamma(I)$  производилось вычисление  $K(I)$ :

$$K(I) = \frac{1}{V(I)} \cdot c \cdot r \cdot G(I) \cdot \Phi(z_0, E_H). \quad /3/$$

Расчет  $N_e n_i$  осуществлялся далее по формуле

$$N_e n_i = \frac{N_\gamma(I)}{K(I)}. \quad /4/$$

Числовое значение произведения  $N_e n_i$  передавалось на телетайп или дисплей VT-340. Далее производилась проверка I;

если вся информация обработана, происходит возвращение программы в место ожидания LAM.

Для работы с аппаратурой КАМАК и обработки информации использовался один из вариантов языка ФОКАЛ, что позволяло в случае изменения режима работы ускорителя производить коррекцию программы с телетайпа.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве иллюстрации процесса накопления ионов в электронном кольце на рис. 6 приведена осциллограмма тормозного излучения электронов для случая накопления ионов  $X_e$  из импульсной газовой струи. Длительность струи газа  $\tau \approx 300$  мкс; видно, что после прохождения струи сохраняется интенсивность  $\gamma$ -излучения из кольца. Уменьшение амплитуды происходит из-за спада амплитуды тока в третьей ступени сжатия, т.е. в этом случае радиус электронно-ионного кольца увеличивается и уходит из поля зрения детектора.

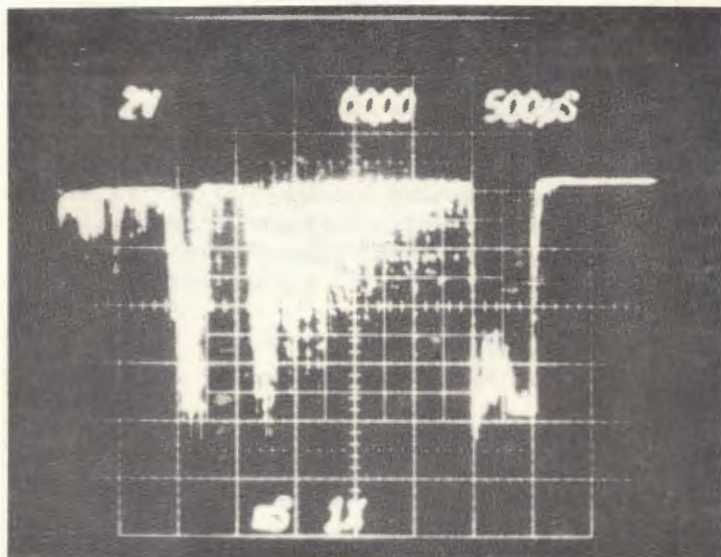
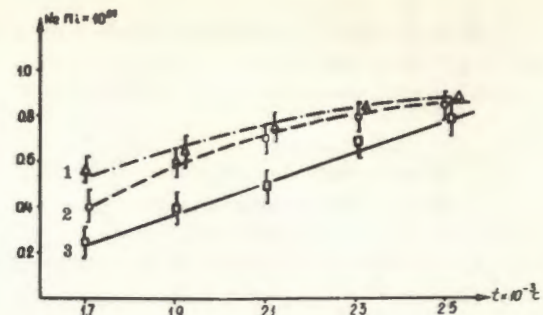


Рис. 6. Осциллограмма тормозного излучения электронов на ионах, захваченных в кольцо из газовой струи.

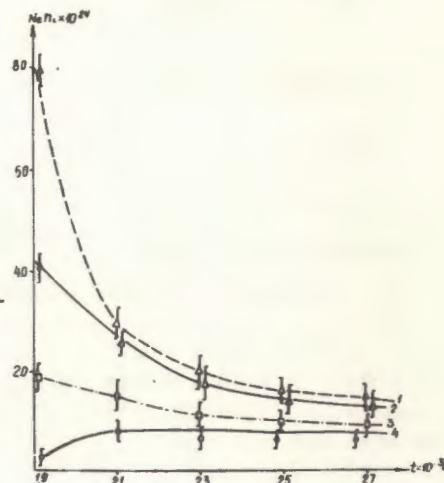
На рис. 7 приведены графики временной зависимости накопления ионов в электронных кольцах из остаточного газа. По

Рис. 7. Графики временной зависимости накопления ионов азота из остаточного газа.



оси ординат отложены значения экспериментально измеренной величины  $N_e n_i$ , по оси абсцисс - время в мс с момента инъекции. Измерения проводились для трех значений давления остаточного газа: 1 -  $P = 2 \cdot 10^{-7}$  Тор, 2 -  $P = 10^{-7}$  Тор, 3 -  $P = 5 \cdot 10^{-8}$  Тор. Как видно, величина произведения  $N_e n_i$  стремится к своему предельному значению:  $N_e n_i \approx (8 \pm 3) \cdot 10^{23}$ . Были также измерены величины временной зависимости накопления ионов азота при импульсной загрузке газа из газодинамического источника, которые приведены на рис. 8. Струя нейтральных атомов пересекает кольцо на  $R = 5,6$  см, что

Рис. 8. Графики временной зависимости накопления ионов азота из газовой струи.



соответствует времени  $t = 1,9$  мс, в этот момент интенсивность тормозного излучения определяет  $N_e n_0$ , где  $n_0$  - плотность нейтральных атомов в струе. Кривые накопления ио-

нов были сняты при разных давлениях в форкамере газодинамического источника:

- 1 -  $P = 0,3$  атм;
- 2 -  $P = 0,2$  атм;
- 3 -  $P = 0,1$  атм;
- 4 - снята при накоплении из остаточного газа,  $P = 7 \cdot 10^{-8}$  Тор.

На рис. 9 приведены графики временной зависимости  $N_e n_i$  в случае импульсного напуска  $X_e$  для трех значений давления в форкамере газодинамического источника:

- 1 -  $P = 0,2$  атм;
- 2 -  $P = 0,1$  атм;
- 3 -  $P = 0,05$  атм.

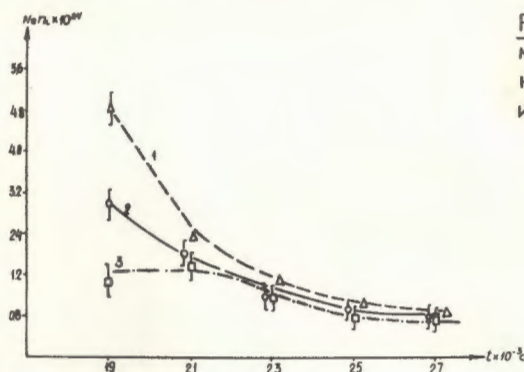


Рис. 9. Графики временной зависимости накопления ионов ксенона из газовой струи.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о возможности измерения накопления ионов по тормозному излучению электронов. При накоплении в кольце ионов азота из остаточного газа экспериментальная величина временной зависимости  $n_i$  близка к той, которую предсказывают расчеты, приведенные в работе /7/. Из полученных данных видно, что при давлении в камере адгезатора  $P \geq 5 \cdot 10^{-7}$  происходят процессы насыщения /рис. 7/. Предельное значение произведения  $N_e n_i = /8+3/ \cdot 10^{23}$ . Для  $N_e = 5 \cdot 10^{12}$  и  $z_i = 4,5$  значение фактора нейтрализации составляет примерно /25÷30/%.

Анализ данных, полученных при загрузке электронного кольца ионами из газовой струи /рис. 8,9/, показывает, что в момент времени, соответствующий прохождению кольца через

область струи, значение  $N_e n_0$  линейно зависит от плотности газа в струе. Знание  $n_0$  позволит производить вычисление числа электронов в кольце в данный момент времени. Дальнейшее поведение  $N_e n_0$  в зависимости от времени определяется уже двумя факторами:

1. Спадом плотности нейтральных атомов во время импульса.
2. Накоплением ионов в электронном кольце.

Отсюда видно, что для исследования динамики накопления ионов из газовой струи необходимо иметь спад импульса газа  $t \leq 200$  мкс. В этом случае можно однозначно трактовать временную зависимость полученных результатов. Тем не менее грубое рассмотрение поведения  $N_e n_i$  в зависимости от времени позволяет сделать вывод о том, что происходит накопление ионов и что существует его предельное значение, которое зависит от плотности нейтральных атомов в струе.

Получены предварительные значения  $N_e n_i$  в случае накопления ионов азота и ксенона из струи:  $N_e n_i$  для азота равно /3+1,20/  $\cdot 10^{24}$ ,  $N_e n_i$  для ксенона - /1+0,25/  $\cdot 10^{24}$ .

В заключение авторы выражают благодарность А.Х.Ангелову за помощь в работе с ЭВМ, Э.А.Перельштейну, Г.Д.Ширкову и А.Б.Кузнецову за обсуждение результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Kochkarev D.C., Zenkevich R.P. Particle Accelerators, 1972, 3, p.1.
2. Kazarinov N.Yu. et al. Particle Accelerators, 1975, 4, p.49.
3. Dommaschec W., Hoffmann I. Particle Accelerators, 1979, 9, p.159.
4. Andelfinger C. et al. Proc. 9th Intern. Conf. on High Energy Accelerators. Stanford, California, 1974, p.218.
5. Иовнович М.Л. и др. ОИЯИ, Р9-4850, Дубна, 1970.
6. Александров В.С. и др. ОИЯИ, Р9-10278, Дубна, 1976.
7. Ширков Г.Д., Перельштейн Э.А. ОИЯИ, Р9-11412, Дубна, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел  
28 ноября 1979 года.