

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



С 345<sub>11</sub>

Л-44

3880/2-77

26/12-77

9 - 10744

Д.Леманн, Г.Мюллер, Г.Музиоль, Г.Щорнак

ДИНАМИКА ПРОЦЕССА ИОНИЗАЦИИ  
В ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫХ КОЛЬЦАХ

**1977**

9 - 10744

Д.Леманн, Г.Мюллер, Г.Музиоль, Г.Щорнак

ДИНАМИКА ПРОЦЕССА ИОНИЗАЦИИ  
В ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫХ КОЛЬЦАХ

Лемани Д. и др.

9 - 10744

**Динамика процесса ионизации в электронно-ионных кольцах**

Приводятся результаты расчёта временного развития процесса ионизации ионов в электронных кольцах. Для расчёта используются значения сечений однократной и двукратной ионизации, расхождение которых с экспериментальными значениями не превышает 15%. Приведены характерные времена ионизации для первых и последних степеней ионизации элементов азота, криптона, ксенона и урана при энергии электронов 20 МэВ, объеме электронного кольца  $3,15 \text{ см}^3$  и числе электронов в кольце  $10^{13}$ .

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Для правильного выбора параметров дубненского коллективного ускорителя и корректировки их в процессе работы необходимо иметь информацию о процентном составе ионов различной степени ионизации в электронно-ионном кольце ускорителя в любой момент времени. С помощью результатов данной работы можно осуществлять выбор временных окон и определять полное время, необходимое для проведения эксперимента, предложенного в работе<sup>1/</sup>, по изучению динамики процесса ионизации в электронно-ионных кольцах. С другой стороны, эти результаты можно использовать при создании ионных источников на основе электронно-ионных колец, в частности источников полностью ионизированных ионов. Для расчетов используются значения сечений ионизации<sup>2/</sup>, расхождение которых с экспериментальными значениями не превышает 15%. Ожидается, что точность расчетов будет выше, чем в предыдущих работах<sup>3-6/</sup>, поскольку в данной работе учитывается вклад мультиионизационных процессов в развитие ионизации.

Расчеты проводились для широкого  $Z$ -диапазона элементов, а именно для азота, криптона, ксенона и урана, при условиях, очень близких к условиям коллективного ускорителя.

## 2. РАСЧЕТ ЗАРЯДНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Расчет временного развития ионизационного процесса в электронно-ионных кольцах является очень сложной

задачей, которую можно решить только при ряде предположений, изложенных, в частности, в работе 7.;

а/ кинетическая энергия электронов и геометрия электронно-ионного кольца остаются во время пребывания ионов в кольце постоянными;

б/ кинетическая энергия нейтральных атомов или ионов очень мала /скорости близки к тепловым/;

в/ ионы, находящиеся в электронном кольце, распределены в объеме кольца равномерно;

г/ время между двумя последовательными соударениями так велико, что большинство ионов находится в своем основном состоянии;

д/ электронно-ионными рекомбинациями и передачами заряда типа ион-ион или ион-атом пренебрегаем.

С учетом этих условий временное изменение распределения зарядностей ионов в электронном кольце описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dN_l}{dt} = \sum_{J=0}^{l-1} K_{l,J} N_J - K_{l,l} N_l \quad \text{для } l=1,2,\dots,Z-1, \quad /1/$$

$$\frac{dN_Z}{dt} = \sum_{J=0}^Z K_{Z,J} N_J .$$

Здесь  $Z$  - атомный номер,  $N_0$  - число нейтральных атомов, а  $N_l$  - число ионов с зарядом  $Z_l$  в объеме  $V$  электронного кольца. Для всех  $N_k$  ( $k=1,2,\dots,Z-1$ ) считается  $N_k|_{t=0} = 0$ . Коэффициенты  $K_{l,J}$  представляют собой вероятности перехода из зарядного состояния  $Z_J$  в состояние  $Z_l$  в единичном интервале времени. Коэффициенты  $K_{l,l}$  описывают переход из состояния  $Z_l$  в высшие зарядовые состояния. Эти коэффициенты имеют следующий аналитический вид:

$$K_{l,J} = \frac{1}{V} N_0 v_e \sigma_{tot}(Z_l, Z_J) , \quad /2/$$

$$K_{l,l} = \frac{1}{V} N_0 v_e \sigma_{tot}(Z_l) , \quad /3/$$

где  $N_e$  - число электронов в кольце,  $v_e$  - скорость электронов,  $\sigma_{tot}(Z_1)$  - полное сечение ионизации ионов с зарядностью  $Z_1$ ,  $\sigma_{tot}(Z_1, Z_J)$  - сечение перехода из зарядового состояния  $Z_J$  в состояние  $Z_1$ . Вероятности переходов  $K_{1,J}$  связаны с характерными временами ионизации  $\tau_{1,J}$  следующим образом:

$$\tau_{1,J} = \frac{1}{K_{1,J}} \quad /4/$$

Время ионизации  $\tau_{1,J}$  есть среднее время, через которое ион переходит из зарядности  $Z_J$  в зарядность  $Z_1$ .

### 3. ВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ ИОНИЗАЦИИ

На рис. 1-4 изображены результаты расчетов временного развития процесса ионизации ионов в электронном кольце для азота, криптона, ксенона и урана. Расчеты проводились с учетом значений сечений прямой и двукратной ионизации из работы [2]. Использовались следующие параметры кольца: большой радиус - 4 см, маленький

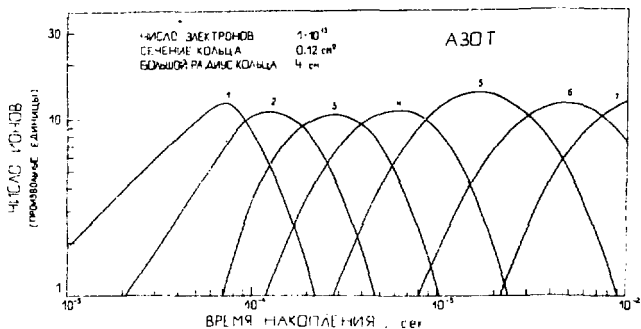


Рис. 1. Временное развитие процесса ионизации азота в электронном кольце при энергии электронов 20 МэВ.

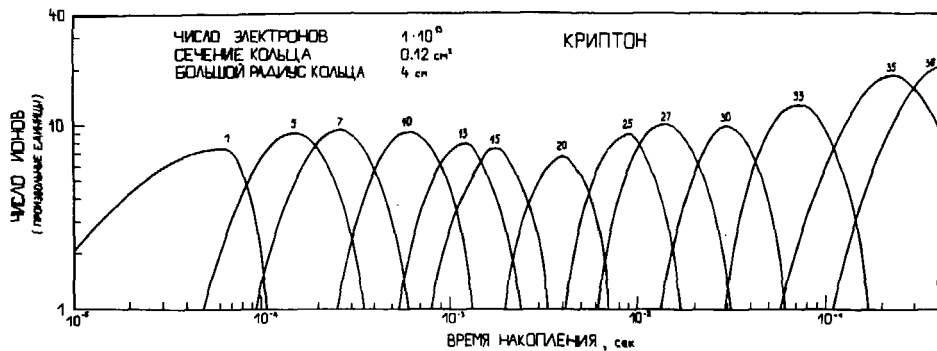
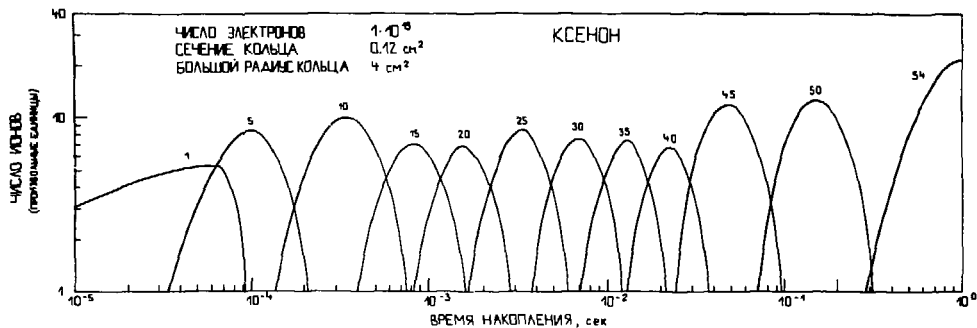
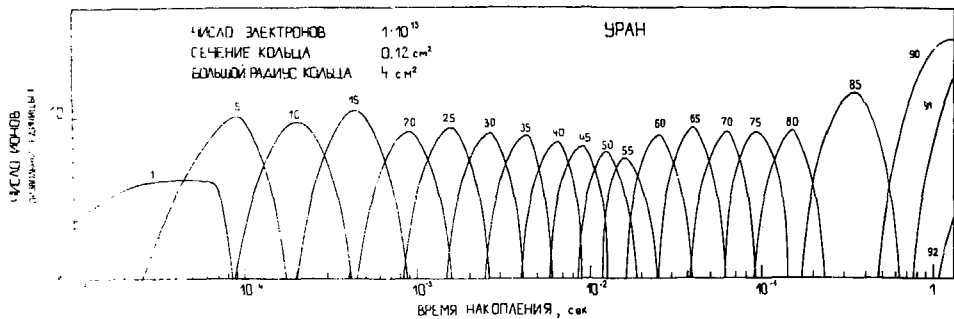


Рис. 2. Временное развитие процесса ионизации криптона в электронном кольце при энергии электронов 20 МэВ.



**Рис. 3. Временное развитие процесса ионизации ксенона в электронном кольце при энергии электронов 20 МэВ.**





**Рис. 4. Временное развитие процесса ионизации урана в электронном кольце при энергии электронов 20 МэВ.**

радиус - 0,2 см, а длительность импульса газовой струи - 70 мкс. Поэтому распределение зарядностей, которые появляются при  $t \leq 70$  мкс, отличается от распределения остальных зарядностей. Из кривых видно, что с увеличением времени снижается сложность зарядового спектра и каждая рассматриваемая зарядность живет дольше. Таким образом, в случае ксенона в промежутке времени от 500 мкс до 1 мс существует десять различных зарядностей одновременно, время их жизни составляет приблизительно 60 мкс. Позже, в промежутке от 10 мс до 10,5 мс наблюдается только шесть зарядностей, однако среднее время их жизни возрастает до 10 мс. Причина такого поведения состоит в том, что характерное время ионизации  $\tau_{i,j}$  увеличивается при нарастании степени ионизации. Для первых степеней ионизации эта тенденция показана в табл. 1. Хорошее представление о числе степеней ионизации и их времени жизни на различных стадиях процесса накопления ионов в электронном кольце дает зависимость степени ионизации от времени накопления, как показано на примере ксенона на рис. 5. Кроме сплошной линии, показывающей тот момент времени, в который рассматриваемая зарядность имеет максимум по интенсивности, указывается временной диапазон, в течение которого рассматриваемая зарядность имеет не менее чем половину своего максимума по интенсивности. Знание времени ионизации для очень высоких ионизационных состояний имеет большое значение при создании источников полностью ионизированных ионов. Эти времена ионизации определяются в основном характерными временами ионизации К-оболочки, потому что, как видно из табл. 2, электроны этой оболочки дают самый большой вклад в суммарное время ионизации. Поэтому в случае урана с зарядностями 91 и 92 можно отказаться от решения системы дифференциальных уравнений /1/, которое требует больших затрат машинного времени.

Авторы выражают признательность В.А.Прейзендорфу за предоставление программы "NEWION".

Таблица 1

Характерные времена ионизации (в секундах) для первых степеней ионизации I при энергии электронов 20 МэВ, объеме кольца  $3,15 \text{ см}^3$  и  $N_e = 10^{13}$ . Используются значения сечений ионизации из работы [2].

I	Азот	Криптон	Ксенон	Уран
0	2.03 (-5)	8.63 (-6)	5.24 (-6)	3.37 (-6)
I	5.48 (-5)	1.77 (-5)	1.08 (-5)	8.03 (-6)
2	1.66 (-4)	2.29 (-5)	1.49 (-5)	1.11 (-5)
3	2.59 (-4)	3.09 (-5)	1.89 (-5)	1.43 (-5)
4	5.81 (-4)	4.14 (-5)	2.28 (-5)	1.79 (-5)
5	2.40 (-3)	5.40 (-5)	2.93 (-5)	2.12 (-5)
6	5.96 (-3)	6.42 (-5)	4.72 (-5)	2.45 (-5)
7		9.66 (-5)	5.63 (-5)	3.05 (-5)
8		1.52 (-4)	6.83 (-5)	3.29 (-5)
9		1.62 (-4)	7.80 (-5)	4.00 (-5)
10		1.68 (-4)	9.86 (-5)	4.37 (-5)
11		1.99 (-4)	1.01 (-4)	5.06 (-5)
12		2.32 (-4)	1.25 (-4)	5.51 (-5)
13		2.71 (-4)	1.31 (-4)	6.58 (-5)
14		3.15 (-4)	1.39 (-4)	8.10 (-5)
15		3.64 (-4)	1.53 (-4)	1.04 (-4)

Таблица 2

Характерные времена ионизации высокоионизированных ионов при энергии электронов 1 и 20 МэВ, объеме кольца  $3,15 \text{ см}^3$  и  $N_e = 10^{13}$ .  $I$  - степень ионизации. Используются значения сечений ионизации из работы<sup>1/2/</sup>.

	I	Криптон $Z = 36$		Ксенон $Z = 54$		Уран $Z = 92$	
		$\sigma, \text{см}^2$	$\tau, \text{сек}$	$\sigma, \text{см}^2$	$\tau, \text{сек}$	$\sigma, \text{см}^2$	$\tau, \text{сек}$
1 МэВ	$Z - 4$	4,90 (-22)	2,15 (-2)	1,76 (-22)	5,98 (-2)	4,25 (-23)	2,48 (-1)
	$Z - 3$	2,64 (-22)	3,99 (-2)	9,86 (-23)	1,07 (-1)	2,41 (-23)	4,37 (-1)
	$Z - 2$	4,76 (-23)	1,41 (-1)	2,77 (-23)	3,80 (-1)	6,45 (-24)	1,63
	$Z - 1$	3,60 (-23)	2,92 (-1)	1,35 (-23)	7,80 (-1)	3,16 (-24)	3,33
20 МэВ	$Z - 4$	6,81 (-22)	1,55 (-2)	2,57 (-22)	4,09 (-2)	6,88 (-23)	1,53 (-1)
	$Z - 3$	3,70 (-22)	2,84 (-2)	1,46 (-22)	7,21 (-2)	4,00 (-23)	2,63 (-1)
	$Z - 2$	1,11 (-22)	9,48 (-2)	4,43 (-23)	2,38 (-1)	1,24 (-23)	8,49 (-1)
	$Z - 1$	5,35 (-23)	1,97 (-1)	2,15 (-23)	4,89 (-1)	6,11 (-24)	1,72

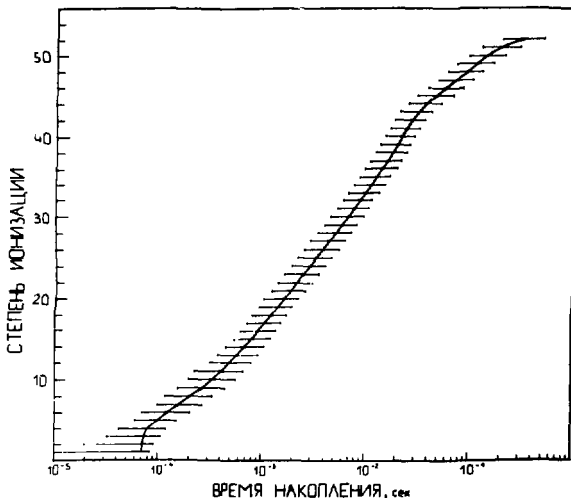


Рис. 5. Распределение степени ионизации как функции времени накопления ионов в электронном кольце.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Зиберт Х.-У. и др. ОИЯИ, Р9-9366, Дубна, 1975.
2. Зиберт Х.-У. и др. ОИЯИ, Р9-10197, Дубна, 1976.
3. Ионович М.Л., Рубин Н.Б., Саранцев В.П. ОИЯИ, Р9-4257, Дубна, 1969.
4. Ионович М.Л., Фикс М.М. ОИЯИ, Р9-4849, Дубна, 1969.
5. Георге В. и др. ОИЯИ, Р9-6555, Дубна, 1972.
6. Peterson J.M. LBL-373, Berkeley, 1971.
7. Salop A. Phys.Rev., 1973, A8, p.3022.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 июня 1977 года.