

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



П-27

2884/2-78

P9 - 11412

Э.А.Перельштейн, Г.Д.Ширков

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ ИОНОВ

В ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКАХ

С УЧЕТОМ ИОН-ИОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

**1978**

**P9 - 11412**

**Э.А.Перельштейн, Г.Д.Ширков**

**РАСЧЕТ ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ ИОНОВ  
В ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКАХ  
С УЧЕТОМ ИОН-ИОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ**

***Направлено в ЖТФ***

Перельштейн Э.А., Ширков Г.Д.

P9 - 11412

**Расчет процесса накопления ионов в электронных лучах с учетом ион-ионных взаимодействий**

В работе рассчитывается процесс накопления ионов в релятивистских лучах электронов с учетом ион-ионной перезарядки и ионизации. Проведен расчет накопления ионов азота из остаточного газа в течение времени сжатия электронных колец в ускорителе тяжелых ионов ОИЯИ. Расчет проведен для колец с разными параметрами и для различных давлений остаточного газа. Результаты сравниваются с аналогичными расчетами, выполненными без учета ион-ионных процессов. Показано, что при сильной загрузке кольца ионами ион-ионные столкновения играют существенную роль в их накоплении и необходимо учитывать при расчетах процесса накопления ионов. В частности, ион-ионные взаимодействия могут увеличивать средний заряд ионов и уменьшать дисперсию по зарядам.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Perelstein E.A., Shirkov G.D.

P9 - 11412

**Calculation of Ion Accumulation in Electron Beams with the Account of Ion-Ion Interactions**

The process of accumulating ions in the relativistic electron beams with the account of ion-ion recharge and ionization is calculated. The accumulation of nitrogen ions from the residual gas during the compression of electron rings in heavy ion accelerator has been calculated for rings of various parameters and for various pressures of the residual gas. The results are compared to analogous calculations performed without considering ion-ion processes. It is shown that at a large quantity of ions in the ring the part of ion-ion collisions is essential and should be taken into account when calculating the ions accumulation process. In particular, the ion-ion interactions could increase the average ion charge and diminish the dispersion over charges.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research.

Dubna 1978

Исследование накопления ионов в электронных кольцах необходимо для понимания многих процессов, происходящих в коллективных ускорителях ионов. Кроме того, изучая накопление ионов, можно получать информацию о сечениях столкновений релятивистских электронов с ионами и о кон-ионных столкновениях.

Вопросу загрузки электронных колец ионами посвящены работы [1-4]. Во всех этих работах при рассмотрении процессов атомной ионизации учитывались только электронно-ионные столкновения. Как указывалось в работе [1], кон-ионные соударения можно не учитывать, когда относительная плотность ионов в электронных пучках мала и выполняется условие

$$N_i / N_e \ll A^{1/2} / 10Z^{5/2} \quad /1/$$

В формуле /1/  $N_i$  и  $N_e$  - числа ионов и электронов в кольце,  $Z$  и  $A$  - заряд и массовое число ионов.

С другой стороны, условие, при котором возможно коллективное ускорение электронно-ионного кольца в режиме самофокусировки, имеет вид [5]:

$$\left(1 + \frac{AMN_i}{m\gamma N_e}\right) \frac{N_e \cdot 10^{-14} Z}{2Ra} \frac{Z}{A} \gg 1, \quad /2/$$

где  $m$  и  $M$  - массы электрона и протона,  $\gamma$  - релятивистский фактор вращения электрона в кольце,  $R$  и  $a$  - большой радиус и характерный размер поперечника кольца. Для типичных параметров электронных колец в коллективном ускорителе тяжелых ионов ОИЯИ /УТИ/ из /2/ получается неравенство

$$N_1 / N_e \geq 0,25 / Z$$

/2/

Условия /1/ и /2/ выполняются одновременно только для самых тяжелых ионов с  $Z=1$

В коллективных ускорителях эффективно ускоряются ионы, для которых отношение  $Z/\Lambda$  равно 0,1-0,4. Поэтому при расчетах накопления ионов в электронно-ионных кольцах необходимо учитывать ион-ионные соударения. В данной работе приводится схема расчета загрузки электронных пучков ионами с учетом ион-ионных столкновений и результаты расчетов накопления в кольцах ионов азота из остаточного газа в камере адгезатора.

### 1. Система уравнений для расчетов накопления ионов в электронно-ионных кольцах

Попадая в релятивистский электронный пучок, нейтральные атомы или молекулы ионизируются. Кинетическая энергия образующихся ионов относительно невелика, и они удерживаются в потенциальной яме собственного заряда пучка. Последовательно ионизуясь, ионы увеличивают свой заряд вплоть до полной ионизации. При увеличении числа ионов условие /1/ нарушается и существенными становятся неупругие ион-ионные столкновения. В данном расчете учитываются процессы перезарядки и ионизации атомов и ионов. В общем случае процесс накопления ионов из однокомпонентного газа в релятивистском электронном пучке переменного объема с учетом всех видов межатомных электронных переходов описывается следующей системой уравнений:

$$dN_0/dt = (dV/dt) \cdot N_0 - \sum_{i=1}^Z \sigma_{oi}^e N_0 N_e c - \sum_{m=0}^Z \sum_{j=0}^Z \sum_{i=0}^Z N_0 N_m \times$$

$$\times \sigma_{oimj} v_{om} + s \bar{u} (nV - N_0) / V,$$

$$dN_n/dt = [N_e c \left( \sum_{i=1}^n \sigma_{n-i}^e N_{n-i} - \sum_{i=1}^{z-n} \sigma_{n+i}^e N_i \right) +$$

$$1 \leq n \leq z$$

$$+ \sum_{m=0}^Z \sum_{l=0}^Z \sum_{j=0}^Z N_m (\sigma_{lnm} N_l v_{lm} - \sigma_{nlm} N_n v_{nm}) / V. \quad /3/$$

Здесь  $N_0$  и  $N_n$  - числа нейтралов и ионов с зарядом  $n$  в пучке,  $n$  - плотность нейтралов вне пучка,  $c$  - скорость света,  $\bar{v}$  - среднее значение компоненты скорости нейтралов, нормальной к поверхности пучка,  $Z$  - заряд ядра атома,  $S$  - площадь поверхности пучка,  $v_{ij}$  - средняя относительная скорость ионов с зарядами  $i$  и  $j$ ,  $\sigma_{n, n+1}^e$  - сечение электронной ионизации:

$$A^{n+} + e^- \rightarrow A^{(n+)+} + (i+1)e^-, \quad /4/$$

$\sigma_{ijkn}$  - сечение ион-ионного процесса:

$$A^{i+} + A^{k+} \rightarrow A^{j+} + A^{n+} + (j+n-i-k)e^-. \quad /5/$$

Остановимся подробнее на каждом из этих процессов. Сечение электронной ионизации быстро падает с увеличением кратности ионизации <sup>/3,6/</sup>.

Для легких элементов  $\sigma_{n, n+2} / \sigma_{n, n+1} < 0,05$ , поэтому при расчетах ионизации элементов первого и второго периодов таблицы Менделеева можно ограничиться учетом только однократной электронной ионизации. С ростом номера атома и количества электронов в оболочке сечения  $\sigma_{n, n+2}$ ,  $\sigma_{n, n+3}$  и т.д. становятся по порядку величины сравнимы с  $\sigma_{n, n+1}$  и необходимо учитывать хотя бы  $\sigma_{n, n+2}$ , как это было сделано в <sup>/4/</sup>. В пучке с линейной плотностью электронов  $n_e \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$  средняя скорость колебания ионов  $v_l \sim 10^8 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ . При таких скоростях столкновения ионов сечения перезарядки на один-два порядка больше сечений ионизации <sup>/7/</sup>. При перезарядке электрон, как правило, попадает в возбужденное состояние <sup>/7-9/</sup>. После перехода нескольких электронов на возбужденные уровни возможно возвращение иона в основное состояние путем автоионизации части электронов <sup>/7/</sup>.

Сечение перезарядки уменьшается с ростом числа переходящих электронов. Мы будем рассматривать только наиболее вероятные процессы:

$$A^{i+} + B^{k+} \rightarrow A^{(i+1)+} + B^{(k-1)+} \quad /6/$$

$$A^{i+} + B^{k+} \rightarrow A^{(i+2)+} + B^{(k-2)+} + A^{(i+2)+} + B^{(k-1)+} + e^{-} \quad /7/$$

Первый из них не изменяет суммарный заряд ионов, а меняет его распределение. Второй увеличивает суммарный заряд и является аналогом ионизации.

## 2. Сечение взаимодействия

Сечения электронной ионизации при больших энергиях рассчитывались многими авторами<sup>6,10,11</sup>. Лучшее совпадение с экспериментальными данными в релятивистской области энергий дают расчеты, выполненные в<sup>6</sup>.

Для определенных сечений перезарядки при скоростях столкновения  $v_{ik} \sim 10^8$  можно пользоваться работами<sup>7,9</sup>. Здесь используется формула, полученная в<sup>7</sup>:

$$\sigma_{i i+1 k k-1} = \frac{3\pi a_0^2 k}{2 y_i^3} \ln \left\{ \frac{d \sqrt{k} v_0}{v_{ik}} \left( \ln \frac{d \sqrt{k} v_0}{v_{ik}} \right)^{\frac{2(i+1)}{y_i} - 1} \right\} \quad /8/$$

где  $a_0 = 0,529 \cdot 10^{-8}$  см,  $v_0 = 2,18 \cdot 10^8$  см/с,  $y_i = \sqrt{2I_i}$ ,  $I_i$  - энергия ионизации иона с зарядом  $i$  в ридбергах,

$$d = \frac{b^2 e^{0,577}}{6} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left( \frac{3}{y_i} \right)^{\frac{2(i+1)}{y_i} + \frac{1}{2}} \frac{m!}{3^m} \frac{(2l+1)(l+m)!}{(l-m)!}$$

где  $l$  и  $m$  - момент электрона и его проекция в ионе,  $b$  - амплитуда асимптотики радиальной части атомной волновой функции.

Параметр  $b$  определялся по приближенной формуле с учетом заряда иона из работы<sup>12</sup>.

$$b = \frac{(2 \sqrt{y_k})^{\frac{1+1}{y_1} + \frac{1}{2}}}{\sqrt{\Gamma\left(\frac{2(1+1)}{y_1} + 1\right)}}$$

При вычислении сечения процесса /7/ в формуле /8/ положено

$$y_k = \sqrt{2(I_k + I_{k+1})}.$$

В систему уравнений /3/, а также в сечения перезарядки /8/ входит средняя относительная скорость ионов. Функция распределения для ионов есть

$$f = \frac{N_i}{\pi \nu} \frac{AM}{\Omega} \sigma(E_{гр} - E) \delta(M \phi). \quad /9/$$

где  $\Omega = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{2E_{гр}}{AM}}$  - частота колебаний ионов в поле электронов,  $M \phi$  - момент количества движения ионов,  $E_{гр} = = n_e Z r_{кл} m c^2$ ,  $r_{кл} = 2,82 \cdot 10^{-13}$  см. Оценка средней скорости ионов с помощью /9/ дает

$$\bar{v}_i = \int f v_i dx dv = \frac{4}{3\pi} \Omega.$$

Среднее значение нормальной к поверхности пучка компонентой скорости нейтралов при накоплении ионов из остаточного газа можно найти, используя распределение Максвелла:  $\bar{v} = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} v_T$ , где  $v_T$  - тепловая скорость нейтральных атомов или молекул газа.

### 3. Расчет процесса накопления ионов азота

В качестве примера приведен расчет накопления ионов азота из остаточного газа при сжатии кольца электронов в УТИ /5/. В течение времени сжатия  $T = 1,8$  мс большой и малый размеры кольца меняются приближенно

тельно в 10 раз. Закон изменения среднего радиуса  $R$  приведен на рис. 1. Объем кольца  $V$  в двух областях аппроксимировался функциями вида  $V(t) = A + B \exp(-Ct)$  с точностью до 10%. Результаты расчетов накопления ионов приведены на рис. 1-4. Кривые с номерами 1, 2 и 3 соответствуют давлениям остаточного газа в камере  $10^{-8}$  и  $10^{-7}$  Тор. Индексами  $a$  и  $b$  обозначены режимы сжатия кольца до конечного радиуса  $R_k = 3,2$  см и  $R_k = 3,7$  см. Крестами помечены кривые для  $N_e = 4 \cdot 10^{12}$ , гладкие кривые -  $N_e = 10^{13}$ . Пунктирные кривые соответствуют аналогичным расчетам, но выполненным без учета ион-ионных взаимодействий. На рис. 1 изображено изменение количества ионов в кольце в течение сжатия до 1,8 мс и последующее накопление ионов в сжатом кольце до 2,5 мс. При  $P = 10^{-7}$  Тор суммарный заряд

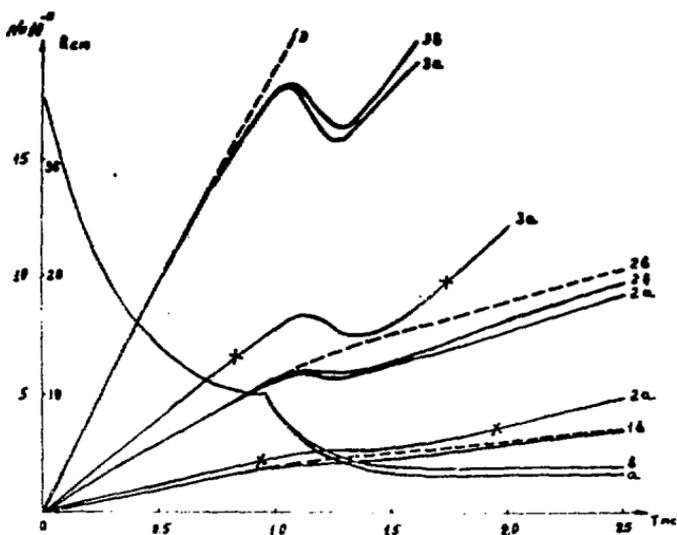


Рис. 1. Изменение размеров электронного кольца и накопление ионов в нем.

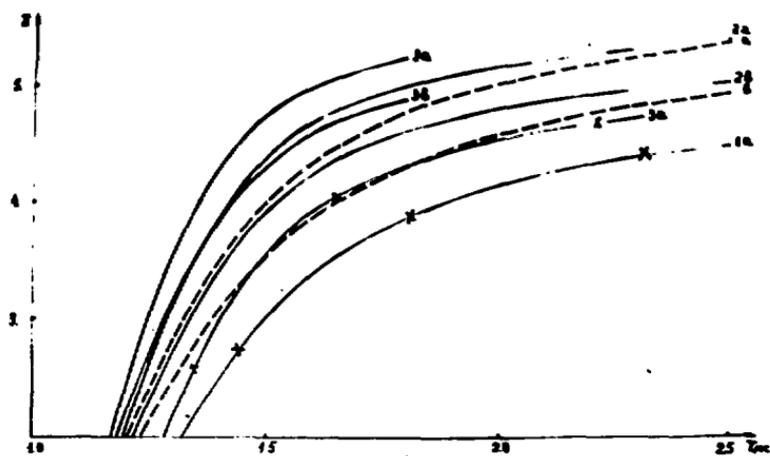


Рис. 2. Изменение среднего заряда ионов.

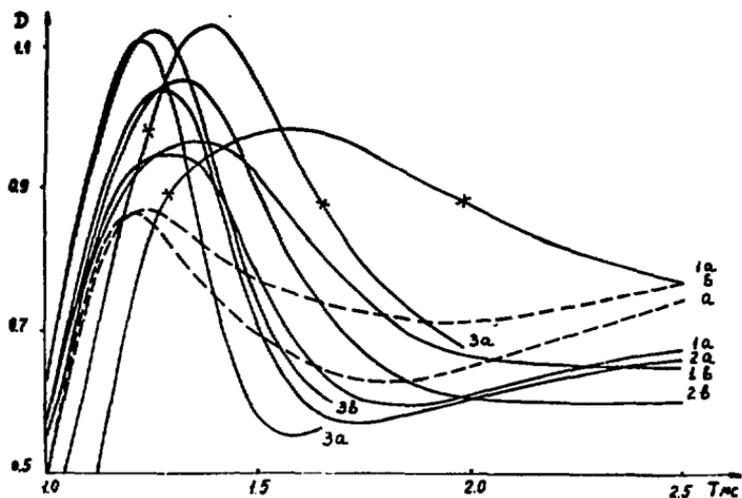


Рис. 3. Изменение дисперсии ионов по зарядам.

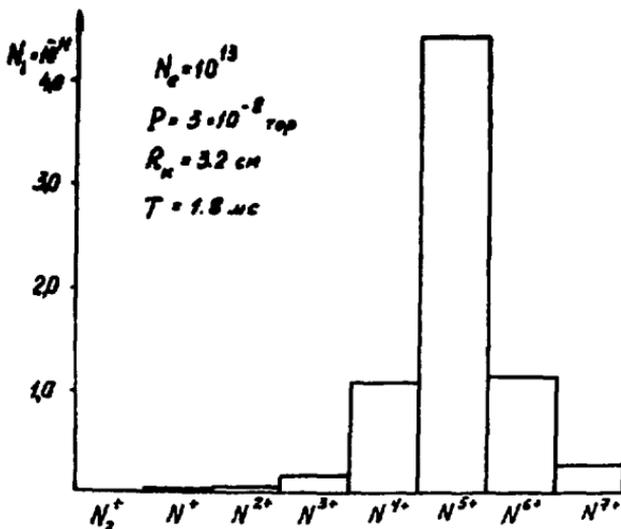


Рис. 4. Распределение ионов по зарядам в конце накопления.

ионов в кольце к концу сжатия превышает заряд электронов и ионы перестают удерживаться электронами. На рис. 2 и 3 представлены средний заряд ионов в кольце и дисперсия ионов по зарядам. Очевидно, что учет ион-ионных взаимодействий существенно влияет на результаты расчетов. В результате перезарядки мало-зарядных ионов могут образоваться быстрые нейтралы, которые уходят из объема кольца. Это приводит к замедлению роста числа ионов в кольце, а при  $\bar{Z} = 1.2$  /  $T = 1.2 - 1.3 \text{ мс}$  даже к уменьшению общего числа ионов. Процессы типа /7/ увеличивают средний заряд ионов. Сечение перезарядки максимально для перехода электрона от мало-зарядного иона или нейтрала к много-зарядному, это уменьшает дисперсию ионов по заряду.

Результаты расчетов /кривые 2а и рис.4/ хорошо согласуются с экспериментами по ускорению ионов азота на УТИ ОИЯИ<sup>13/</sup> и удовлетворяют условию /2' /.

В заключение авторы благодарят Л.П.Преснякова, В.А.Прейзендорфа и Б.Г.Щинова за ценные обсуждения и помощь в работе, а также В.С.Александрова за любезное предоставление результатов по сжатию кольца в адгезаторе УТИ.

#### *Литература*

1. Новович М.Л., Фикс М.М. АЭ, 1970, 6, с. 429; ОИЯИ, Р9-4849, Дубна, 1969.
2. Георге В. и др. ОИЯИ, Р9-5555, Дубна, 1972.
3. Дроздовский А.А. ИТЭФ - 100, М., 1973.
4. Леманн Д. и др. ОИЯИ, 9-10744, Дубна, 1977.
5. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Физика плазмы, 1977, 3, с. 449.
6. Зиберт Х.-У. и др. ОИЯИ, Р9-10197, Дубна, 1976.
7. Чибисов М.И. Письма в ЖЭТФ, 1976, 24, с. 56.
8. Пресняков Л.П., Уланцев А.Д. Квантовая электроника, 1974, 11, с. 2377.
9. Пресняков Л.П., Шевелько В.П. ФИАН, 71, 1977.
10. Czyzinski M. Phys.Rev., 1965, 138A, p.336.
11. Salop A. Phys.Rev., 1974, A9, p.2496.
12. Смирнов Б.М., Чибисов М.И. ЖТФ, 1965, 35, с. 117.
13. Долбилов Г.В. и др. ОИЯИ, Р9-11191, Дубна, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел  
24 марта 1978 года.