

Ш-643



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

9-93-143

ШИРКОВ
Григорий Дмитриевич

УДК 621.384.6.01:539.1+
621.3.038.612

**ТЕОРИЯ НАКОПЛЕНИЯ ИОНОВ
В ИСТОЧНИКАХ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ**

Специальность: 01.04.20 — физика пучков
заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Дубна 1993

Работа выполнена в Лаборатории сверхвысоких энергий
Объединенного института ядерных исследований, Дубна.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

БЫКОВСКИЙ
Юрий Алексеевич

доктор физико-математических наук,
профессор

ДМИТРИЕВСКИЙ
Виталий Петрович

доктор физико-математических наук,
профессор

ПРЕСНЯКОВ
Леонид Петрович

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, Новосибирск

Защита диссертации состоится _____ 1993 года
в _____ часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.03
при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных
исследований, г.Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.
Автореферат разослан _____ 1993 года.

Ученый секретарь Специализированного совета
д.ф.-м.н.

Батусов Ю.А.

Общая характеристика работы.

Темой данной диссертации являются теоретические исследования и математическое моделирование физических процессов связанных с образованием и накоплением ионов в источниках многозарядных ионов.

Актуальность работы.

Главной причиной создания и интенсивного развития в течении последних 10 - 20 лет источников многозарядных ионов явилось появление во многих странах мира исследовательских центров по ядерной физике с ускорителями и накопителями ионов. Эффективность работы любого ускорительного комплекса ионов в значительной степени определяется его первым звеном - ионным источником. В последние годы источники многозарядных ионов успешно используются также для различных исследований по атомной физике. Главными показателями работы ионных источников служат зарядовое распределение и интенсивность ионов или ионный ток на выходе из источника.

В настоящее время в мире существует несколько основных типов источников, в которых с успехом получают многозарядные и высокозарядные ионы. К этим источникам относятся источники на электронно-циклотронном резонансе (ECR), электронно-лучевые источники (EBIS) и разновидность EBIS электронно-пучковая ионная ловушка (EBIT). В ОИЯИ в настоящее время создается новый тип ионного источника ERIS, основанный на получении ионов в релятивистских электронных кольцах.

Первые ECR источники были сооружены на основе открытых магнитных ловушек для термоядерного синтеза во Франции группой Jeller и в Германии под руководством Wiewemann в начале семидесятых годов. Сейчас этот тип источника многозарядных ионов стал самым распространенным в мире и наиболее используемым в качестве инжектора в ускорители ионов, в том числе в CERN (Швейцария), GANIL (Франция), GSI (Германия) и др. К настоящему времени уже около пятидесяти ECR источников работают в десятках научных центров разных стран. В 1992 году в лаборатории ядерных реакций ОИЯИ был успешно осуществлен запуск источника DECRIS-14 (Dubna ECR Ion Source with 14.5GHz).

Электронно - лучевой метод получения ионов был предложен Е.А.Донцом в 1967г. в Дубне. После сооружения в ОИЯИ первых

ОИЯИ
Библиотека

рабочего вещества, снижению их потерь и увеличению времени жизни в источнике и, следовательно, является причиной повышения зарядности и значительного увеличения выхода многозарядных ионов.

3. Аналитическими методами и численным моделированием на основе метода крупных частиц проведены исследования функции распределения многозарядных ионов в электронных пучках и тонких кольцах, в результате которых:

- впервые найдены стационарные функции распределения многозарядных ионов, образующихся при последовательной ионизации ионов в электронных пучках с гауссовской плотностью в сечении;

- определены зависимости среднеквадратичных поперечных размеров и фазовых объемов ионных компонент от заряда ионов и впервые показано, что в электронных пучках с гауссовой плотностью в сечении эти величины убывают с ростом заряда значительно быстрее чем в пучках с постоянной плотностью.

- изучено изменение пространственного распределения потенциала электрического поля в электронном пучке при накоплении ионов.

4. На основе метода полных моментов функции распределения проведены теоретические исследования процесса накопления и ускорения ионов в релятивистских электронных кольцах, в результате которых:

- впервые получены системы уравнений для моментов второго порядка релятивистских электронных колец с учетом синхротронного излучения электронов, их рассеяния на накопленных ионах и начального продольного азимутального энергетического разброса электронов;

- получены уравнения, описывающие динамику накопления и коллективного ускорения ионов в многокомпонентных электронно-ионных кольцах;

- проведено численное моделирование процессов накопления и ускорения ионов в коллективном ускорителе тяжелых ионов, результаты которого находятся в согласии с проведенными экспериментами на прототипе коллективного ускорителя тяжелых ионов (КУТИ) и использовались при проектировании и создании КУТИ-20 в ОИЯИ.

5. Предложен способ, защищенный авторским свидетельством, дополнительного уменьшения радиуса релятивистских электронных

колец за счет синхротронного излучения, путем создания на конечных радиусах сжатия распределения магнитного поля с показателем спада близким к единице.

6. Предложен метод, защищенный авторским свидетельством, ускорения ионов в электронных кольцах, отличающийся тем что ионы ускоряются по окружности электронного кольца за счет действия силы Кориолиса в течении времени сжатия кольца в коллективном ускорителе ионов.

7. Проведен анализ процессов при длительном удержании релятивистских электронных колец с ионами, в результате которого впервые показано, что релятивистское электронное кольцо с ионами может существовать не более 100 нс в магнитной системе коллективного ускорителя, а основными факторами, ограничивающими время жизни электронных колец в КУТИ являются потери энергии релятивистских электронов кольца на синхротронное излучение и рассеяние электронов на накопленных ионах, приводящие к увеличению поперечных размеров электронного кольца.

8. Выполнено физическое обоснование проекта ОИЯИ ERIS (Электронно-кольцевого ионизатора) на основе модернизированной магнитной системы КУТИ, целью которого является получение высокозарядных ионов для проведения исследований по физике электронной оболочки ионов. В результате реализации первого этапа проекта ERIS, руководителем которого является диссертант, проведена реконструкция магнитной системы КУТИ и получены спектры линий K_{α} и K_{β} рентгеновского излучения криптона и ксенона при удержании электронного кольца в течении 30 нс.

9. Проведены теоретические исследования процесса длительного удержания высокозарядных ионов в электронном пучке EBIS, в результате которых:

- впервые показано, что упругие кулоновские столкновения ионов, приводящие к установлению больцмановской функции распределения ионов, могут являться основной причиной их значительных потерь при длительном удержании ионов в EBIS и EBIT;

- определены особенности применения метода ионного охлаждения в EBIS и EBIT для предотвращения потерь высокозарядных ионов;

- предложен метод ионного охлаждения тяжелых ионов в EBIS

непрерывным потоком легких ионов и определены необходимые параметры струи легких ионов для охлаждения высокозарядных ионов в источнике КРИОН-2.

10. На основе рассмотрения упругих и неупругих взаимодействий и столкновений заряженных частиц в плазме, а также классических потерь из открытой магнитной ловушки, разработаны основные положения принципиально новой модели накопления и удержания ионов в ECR источниках, создание которой позволило:

- впервые найти физическое объяснение явлений "gaz mixing" и "pulse regime", используемых для увеличения во много раз выхода многозарядных ионов в большинстве существующих ECR источников;

- предложить новый перспективный метод увеличения выхода многозарядных ионов, основанный на использовании ионного охлаждения в импульсном режиме работы с уменьшенной длительностью импульса ионного тока на выходе из ECR источника, позволяющий рассчитывать на получение ионов Kr^{30+} или ионов Pb^{40+} с током до $0.1 \div 0.3$ мА при длительности импульса около 0.3 нс;

- разработать методы и алгоритмы численного моделирования основных процессов, связанных с образованием и накоплением ионов, в различных режимах работы ECR источников, в том числе впервые для смесей газов и в динамическом режиме;

- выполнить численное моделирование процессов накопления ионов в ECR источниках, результаты которого имеют хорошее качественное и количественное согласие по зарядовому распределению и величине ионного тока на выходе из ECR источников в обычном режиме и при использовании "gaz mixing", а так же по временному развитию процессов для импульсного режима работы, с имеющимися экспериментальными данными, полученными в ведущих научных центрах;

- выполнить расчеты зарядовых распределений ионов для ECRIS в Техническом университете г. ДРЕЗДЕН (ФРГ) и DECRI-14 (ЛЯР ОИЯИ).

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались на Международных и Всесоюзных конференциях, в том числе: IVth International Conference on Ion Sources (Germany, 1991), Vth International Conference on the Physics of Highly Charged Ions

(Germany, 1990), 11 and 12 Arbeitsbericht Arbeitsgruppe Energiereiche Atomare Stosse (Germany, 1990, 1991), 14th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases (Yugoslavia, 1988), 8th European Section Conference on Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases (Germany 1986), International Conference on Numerical Methods and Applications (Bulgaria, 1985), International Seminar on High Energy Ion-Atom Collision Processes (Hungary, 1981), 5th International Conference on the Problems of Mathematical Simulation, Programming and Mathematical Methods of Solving Physical Problems (Dubna, 1983), неоднократно на Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц и Совещании по коллективным методам ускорения (Дубна, 1982).

Кроме того, результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах в CERN (Switzerland), Technische Universitat Dresden (Germany), Институт Физики ЧАН (Прага), ИАЭ им. И.В. Курчатова, ИТЭФ, МИФИ и ИВТАН (Москва), ИТФ (Киев), ОИЯИ, ЛСВЭ, ЛЯР и ЛЯП (ОИЯИ, Дубна) и в других научных учреждениях.

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 32 печатных работах и защищены 3 авторскими свидетельствами, список которых приведен в конце автореферата.

Предлагаемая диссертация, состоит из Введения, пяти глав, Заключение и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 363 страницы текста, включая 81 иллюстрацию, 5 таблиц и списка литературы из 225 наименований.

Содержание диссертации.

Введение.

Во введении раскрыта основная тема работы, сформулированы цели и задачи диссертации. Кратко изложено содержание работы по главам.

Первая глава.

Первая глава является вводной главой. В ней проведено изучение основных столкновительных процессов между заряженными частицами и нейтралами.

На основе анализа существующей обширной литературы по неупругим столкновительным процессам (ионизация электронным

через так называемый ионизационный фактор:

$$j_{\tau_1} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\sigma_k} \quad (4)$$

где $j = n_e v_e$ — плотность тока электронов.

Однако, несмотря на то что значения (3) или (4) меньше чем (2), их использование при оценке времени ионизации многозарядных ионов более оправдано, т. к. реально существует целый ряд процессов замедляющих или ограничивающих рост ионного заряда в источнике, не учтенных при выводе (2). К этим процессам в первую очередь относятся ионные потери, которые могут быть вызваны различными причинами, а также перезарядка нейтральных атомов или молекул остаточного газа, которые неизбежно присутствуют в источнике, на накопленных многозарядных ионах /8,19/.

На основе сечений ионизации электронным ударом и перезарядки нейтралов на многозарядных ионах найдено требование на плотность нейтралов, при которой перезарядкой в источнике можно пренебречь:

$$\frac{n_n}{n_e} \ll 5 n \sqrt{\frac{A}{E_1 E_0}} \frac{I_0}{i^3} \quad (5)$$

Здесь n — число электронов на внешней оболочке иона, i — его заряд, A — атомная масса; E_1 — энергия ионов; E_0 — энергия электронов; I_0 — потенциал ионизации нейтралов.

Анализ основных процессов в ионных источниках /2,3,19,23,31/ позволил сформулировать в диссертации условия необходимые для образования многозарядных ионов в ионных источниках:

1. Энергия электронов должна быть больше потенциала ионизации ионов требуемой зарядности;
2. Должен быть обеспечен фактор ионизации определяемый формулой (4);
3. Плотность нейтралов должна быть по возможности меньше. Для оценки допустимой плотности нейтралов может быть использовано условие (5).

Вторая глава

Вторая глава носит методический характер. Первый параграф этой главы посвящен функции распределения ионов образующихся в пучках с равномерным и гауссовским распределением плотности электронов в сечении /10,11,12,19/.

Стационарная функция распределения может быть функцией только от интегралов движения. Каждый ион между актами ионизации может иметь два интеграла движения — момент количества движения относительно оси пучка M_p и, если мы пренебрежем упругими столкновениями между актами ионизации, полную энергию E_1 колебательного движения в потенциальной яме заряда пучка.

В этих условиях получены /10/ стационарные функции распределения ионов в фазовом пространстве координат r и скоростей v в электронном пучке с гауссовской плотностью в сечении при последовательном переходе ионов из зарядности i в зарядность:

$$f_1 = \frac{AM}{\pi a_{11}^2 \omega_1} \exp\left(-\frac{r^2 + v^2/\omega_1^2}{2a_{11}^2}\right) \delta(M_p) \quad (6)$$

где a_{11} — среднеквадратичные поперечные полуразмеры ионных компонент, ω_1 — частота колебаний i — зарядных ионов в поле электронов.

Среднеквадратичные поперечные размеры и скорости ионных компонент находятся интегрированием с функцией распределения (6) по всему пространству координат и скоростей:

$$a_1^2 = a_{11}^2/i, \quad (7)$$

$$v_1^2 = a_{11}^2 \omega_1^2 = a_1^2 \omega_1^2 = \text{const} \quad (8)$$

Эти выражения позволяют определить эффективный фазовый объем для ионов

$$F_1 = a_1^2 \omega_1 = a_{11}^2 \omega_1 / \sqrt{I} \quad (9)$$

Стационарная функция распределения ионов (6), и зависимости (7) — (9) справедливы, когда при образовании каждой новой зарядности функция распределения предыдущей зарядности меняется мало. Такие условия могут выполняться, например, в случае существования значительного постоянного притока новых ионов из нейтрального газа. Тем не менее, учет неравномерной плотности в сечении пучка при последовательном накоплении ионных зарядностей приводит к тому, что среднеквадратичные размеры ионных компонент уменьшаются заметно быстрее, чем в пучках с постоянной плотностью электронов. Одновременно падают и эффективные фазовые объемы. Эти результаты нашли подтверждение в третьем параграфе в результате моделирования методом крупных частиц.

Во втором параграфе изложены основные положения метода

полных моментов функции распределения в задачах о динамике пучков заряженных частиц /1,4/. Этот метод был разработан в ОИЯИ под руководством Э.А. Перельштейна. При исследовании пучков заряженных частиц, особенно в случае источников многозарядных ионов, основной интерес представляют усредненные характеристики пучка, такие как средняя скорость, среднеквадратичные размеры, температура и т.д. Главная задача метода моментов — дать сокращенное (по сравнению с уравнениями Власова) описание динамики пучков, позволяющее в то же время проследить основные физические закономерности.

В /4/ получены линеаризованные уравнения движения в цилиндрической системе координат с учетом синхротронного излучения релятивистских электронов, их рассеяния на накопленных ионах и начального продольного азимутального энергетического разброса электронов. Уравнения движения используются при выводе системы уравнений для моментов второго порядка с учетом указанных выше эффектов. При изменениях энергии электронов, только вследствие синхротронного излучения, получена система уравнений, описывающая рост поперечного фазового объема электронного кольца за счет рассеяния электронов, которая при отсутствии рассеяния переходит в систему адиабатических инвариантов. Определено изменение продольного энергетического разброса электронов в электронно-ионном кольце, вызванного синхротронным излучением.

Получена система уравнений, описывающая изменение среднеквадратичных размеров электронной и ионной компонент при накоплении ионов в электронных пучках и кольцах переменного объема. Выполнен расчет адиабатического сжатия электронно-ионного кольца в адгезаторе прототипа КУТИ в атмосфере остаточного газа (азота).

На основе метода моментов функции распределения получены уравнения для относительных поляризаций и среднеквадратичных размеров многокомпонентных электронно-ионных колец, при их коллективном ускорении в электрических и магнитных полях /9/. Установлено, что при расчетах необходимо учитывать реальное распределение ионов по зарядностям, в частности наличие ионов из остаточного газа. Выполнен расчет ускорения ионов ксенона в присутствии ионов азота в спадающем магнитном поле прототипа КУТИ, результаты которого приведены на рис.1 /9/. Рассмотрено два случая:

Кривые 1 соответствуют электронным кольцам с числом

электронов 5×10^{12} , числом ионов ксенона 6×10^{10} и ионов азота 4×10^{11} .

Кривые 2 — число электронов 10^{13} , ионов ксенона — 5×10^{10} , ионов азота — 2.5×10^{11} .

На рис. 1 представлены набор энергии E ионами на нуклон и отношение суммарных масс электронного и ионного колец ξ . В случае 1 электрическое поле, создаваемое электронами, недостаточно для ускорения всех ионных зарядностей и малозарядные ионы Xe теряются в процессе ускорения. Средний заряд ионов ксенона в кольце равен 13 и потеря первых девяти, относительно малочисленных зарядностей, не приводит к заметным изменениям параметров кольца.

На рис.1 первых два скачкообразных изменения загрузки кольца ξ отражают потери 10 и 11 зарядностей. В результате этого, а также постепенного уменьшения ведущего магнитного поля, электронное кольцо увеличивается в размерах, и теряется большое число ионов с зарядностью 12. Это приводит к резкому росту аксиальных размеров электронной компоненты и разрушению всего кольца. На основе численного эксперимента показано /9/, что для компактного ускорения электронных колец с тяжелыми ионами, необходимое расчетное число электронов должно быть более 5×10^{12} при существовавших в КУТИ ускоряющих полях и давлений остаточного газа.

В третьем параграфе второй главы изложены основы метода крупных частиц и результаты математического моделирования этим методом процесса накопления многозарядных ионов в электронных пучках /11,12,13,14,19/.

Метод крупных частиц делает возможным рассмотреть детальные характеристики пучков, изучить функции распределения частиц и их изменения при переходе ионов из зарядности в зарядность, учесть нелинейность собственных полей электронов. Этот метод находит применение в задачах связанных с движением сплошной среды, в том числе в электродинамике сплошных сред и в моделировании пучков заряженных частиц.

В методе крупных частиц в начальный момент фазовый объем каждого компонента ансамбля разбивается на некоторое количество непересекающихся элементарных объемов (ячеек), и движение каждого такого объема отождествляется с движением какой-либо одной его частицы с суммарными зарядом и массой. Получаемые таким образом модельные частицы называют крупными частицами.

Методом крупных частиц проведено математическое

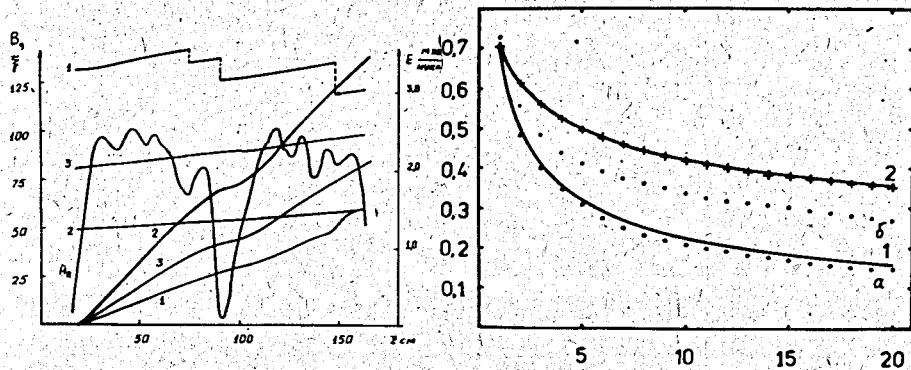


Рис. 1. Изменения ускоряющего магнитного поля B_0 , энергии ионов в процессе ускорения E и полной загрузки кольца Q .

Рис. 2. Изменение среднеквадратичных размеров ионных компонент в зависимости от заряда ионов. (Обозн. см. в тексте).

моделирование процесса накопления и перехода из зарядности в зарядность ионов в электронных пучках [11,12,14]. Исследованы динамика функций распределения электронов и ионов, а так же суммарного потенциала электрического поля в зависимости от зарядовой нейтрализации электронов накопленными ионами. Собственные поля, создаваемые распределениями заряженных частиц, находятся решением на сетке уравнения Пуассона.

С использованием метода крупных частиц была изучена динамика моментов второго порядка ионов в зависимости от их зарядности и промоделированы функции распределения (6) и зависимости (7) – (9), полученные в первом параграфе этой главы [10,12]. Для представления каждой ионной зарядности использовалось по 1000 частиц. Предполагалось, что электроны в сечении пучка распределены по гауссовскому закону. В этих расчетах создаваемые ионами поля не учитывались.

Расчеты были выполнены для двух случаев. В первом (случай "а"), соответствующем условиям при которых была найдена функция распределения (6), предполагалось, что при образовании новых ионов функция распределения предыдущей зарядности остается неизменной. В случае "б" учитывалось изменение функции распределения.

На рис. 2 изображено изменение отношения среднеквадратичных размеров ионов i -той зарядности к среднеквадратичным размерам электронного пучка a_1/a_0 . На этом рисунке кривая проведена через точки, найденные по формулам (7) для гауссовой плотности

электронного пучка. Рядом точками нанесены результаты численного расчета для случаев "а" и "б".

О точности численных вычислений можно судить по расчетам процесса накопления ионов в электронном пучке с постоянной плотностью. Результаты этих расчетов (обозначены крестами на рис. 2) отличаются не более чем на 1-2% от известных точных значений, представленных сплошными кривыми 2.

Этот численный расчет имеет весьма хорошее согласие с полученной модельной функцией распределения (6) и, с одной стороны подтверждает ее реальность, а с другой – демонстрирует возможности метода крупных частиц.

Третья глава.

Третья глава посвящена накоплению ионов в релятивистских электронных кольцах. В первом параграфе изложены основные принципы ускорения ионов электронными кольцами в коллективном ускорителе и кратко описано его устройство.

В этом параграфе предложен также метод ускорения встречных ионных пучков за счет силы Кариолиса при формировании электронного кольца в коллективном ускорителе [16,34]. Для этого в электронное кольцо инжектируются навстречу друг другу по касательной два пучка нейтральных атомов. В результате ионизации образуются ионы, которые захватываются электрическим полем электронов на круговую орбиту. При сжатии электронного кольца в нарастающем во времени магнитном поле для вращающихся ионов выполняется закон сохранения обобщенного момента количества движения. В электронных кольцах коллективного ускорителя механический момент намного превышает вклад от магнитного поля. Поэтому, при сжатии электронного кольца скорость вращающихся ионов возрастает обратно пропорционально радиусу кольца. Расчетным путем показано, что на конечном радиусе электронного кольца энергия ионов азота может достичь 218keV, аргона – 109keV, ксенона – 85keV и свинца – 73keV. При ускорении двух встречных пучков относительная энергия ионов будет соответствовать в четыре раза больше и получаемая светимость до $4 \cdot 10^{30}(\text{cm}^2\text{s})^{-1}$ [34].

Во втором параграфе изучены особенности накопления ионов в релятивистских электронных кольцах с изменяющимися во времени размерами. Проведен численный расчет накопления ионов азота, аргона, криптона, ксенона и урана в электронных кольцах

коллективного ускорителя ионов /2,3,5,8/. Определен вклад ион-ионных и ион-атомных процессов при накоплении ионов /2,3,8/. Получены простые формулы, позволяющие с достаточной точностью без использования ЭВМ определять общее число и средний заряд ионов при формировании электронно-ионных колец в коллективном ускорителе /3/.

В качестве примера можно привести результаты численного расчета по накопления ионов Xe и U из импульсной струи нейтрального газа длительностью 0.25мс при сжатии электронного кольца в атмосфере остаточного газа (азота) в камере КУТИ-20 /5/. Общее время сжатия кольца составляло 2.5мс, после чего размеры кольца считались постоянными. Предполагалось, что источник начинает работать при $t \approx 1.75$ мс и при радиусе кольца $R = 5$ см.

Основные результаты этих расчетов приведены на рис. 3. Сплошные кривые соответствуют $N_e = 10^{13}$, пунктирные - $N_e = 5 \times 10^{12}$. На этом рисунке изображено изменение среднего заряда ионов \bar{Z} азота, ксенона и урана в электронном кольце. Видно, что средний заряд \bar{Z} сильно зависит от числа электронов в кольце.

В третьей части третьей главы, проанализированы основные процессы ограничивающие время жизни релятивистских электронных колец с ионами. Показано, что к ним относятся /7,15,17,19/:

а/. Потери энергии релятивистских электронов кольца на синхротронное излучение.

б/. Рассеяние электронов на накопленных ионах и связанный с этим рост малых размеров электронного кольца.

с/. Нейтрализация собственного заряда электронного кольца образующимися ионами из остаточного газа.

д/. Ограничения на максимальный заряд ионов, вызванное их перезарядкой с нейтралами остаточного газа.

Установлено, что перечисленные причины ограничивают время жизни электронно-ионных колец КУТИ интервалом 50-100мс, а также накладывают жесткие требования на вакуумные условия в камере адгасатора (компрессора) /15/. В этих условиях максимальный заряд ионов при постоянных размерах кольца оценивается для ксенона как $i = 44 \div 46$ и для урана $i = 70 \div 76$.

Получение ионов более высоких зарядностей требует значительного увеличения плотности электронных колец. Однако, дальнейшее уменьшение радиуса кольца за счет увеличения индукции магнитного поля ограничено возможностями магнитной системы.

В /6,33/ было предложено использовать СИ электронов на

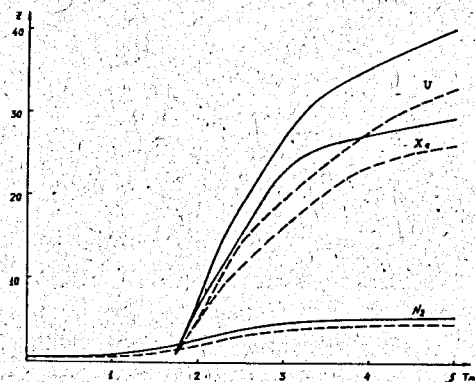


Рис. 3. Изменение среднего заряда ионов азота, ксенона и урана в зависимости от времени в электронном кольце коллективного ускорителя. (Обозначения см. в тексте).

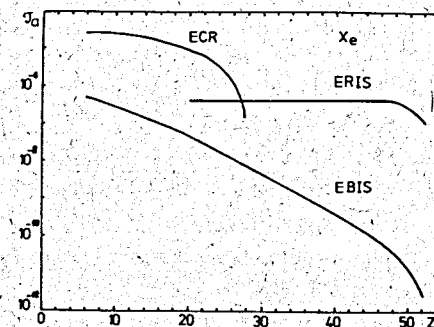


Рис. 4. Сравнительные зависимости выхода ионов Xe от зарядности для электронно-кольцевого источника ERIS, источника ионов на электронно-циклотронном резонансе ECR и электронно-лучевого источника EBIS.

конечных радиусах сжатия кольца, для уменьшения начального момента электронов и дополнительного сжатия электронного кольца. За счет СИ-радиус электронного кольца R меняется как:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{1}{1-n} \frac{R}{E} \frac{dE}{dt} \quad (10)$$

Создавая в конце сжатия неоднородное по радиусу магнитное поле с показателем спада n близким к единице, можно при относительно небольших потерях энергии электронов кольца на СИ получить значительное уменьшение обобщенного момента M_0 и конечного радиуса R . Дополнительное сжатие кольца происходит с уменьшением энергии электронов. Это снижает требуемое максимальное значение индукции магнитного поля на малом радиусе кольца.

Было проведено соответствующее математическое моделирование и разработана система дополнительного сжатия и длительного удержания электронного кольца /6,17/. После уменьшения радиуса электронного кольца вдвое (до $R \approx 2$ см) в магнитном поле с показателем спада $n < 1$, электронное кольцо попадало в магнитное поле медленно спадающее во времени с постоянной затухания $\tau \approx 50$ нс. В результате уменьшение индукции магнитного поля компенсировало уменьшение радиуса электронного кольца за

счет СИ и размеры кольца оставались приблизительно постоянными в течение 40 – 50мс.

Эти предложения легли в основу проекта электронно-кольцевого источника ионов ERIS, реализация которого была начата в 1991 году в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне.

В четвертом параграфе содержится физическое обоснование проекта ERIS (электронно-кольцевого ионизатора), целью которого является получение многозарядных ионов для исследований по физике электронной оболочки ионов методами рентгеновской спектроскопии /7,15,17,18,19,20,32/.

В качестве источника высокозарядных ионов на установке ERIS предполагается использование электронных колец с параметрами: число электронов – $N_e \sim 5 \times 10^{12}$, большой радиус – $R \sim 1.8 \div 2.2$ см, малые радиусы (среднеквадратичные) – $a_{r,z} \sim 1.0$ мм, релятивистский фактор азимутального вращения электронов – $\gamma \geq 10$, длительность существования кольца от начала формирования – $\sim 60 \div 100$ мс, в том числе на малых радиусах – $40 \div 80$ мс.

Загрузка объема кольца дозированными порциями нейтралов исследуемого элемента позволит путем последовательной ионизации электронным ударом получать и накапливать в кольце ионы высоких зарядностей от Xe^{30+} до Xe^{50+} и от U^{44+} до U^{82+} количеством до 10^{10} ионов в цикле.

Решающим преимуществом создаваемой установки, как источника многозарядных ионов качественно нового типа, в сравнении с существующими источниками, являются относительно высокая интенсивность многозарядных ионов (до 10^{10} в цикле) практически любого элемента периодической таблицы, а также возможность исследования временного развития ионизации атомов. После оснащения ERIS кристалл-дифракционным спектрометром высокого разрешения может быть создан исследовательский комплекс для изучения глубокоионизированных состояний ионов.

На рис.4 изображен расчетный выход ионов Xe из ERIS в сравнении с источниками многозарядных ионов ECR и EBIS /20/.

В 1991-1992 был в основном завершен первый этап реконструкции КУТИ в установку ERIS. Был сконструирован и изготовлен новый вариант магнитной системы сжатия. В ходе первых экспериментов были зарегистрированы спектры излучения линий K_{α} и K_{β} ионов Kr и Xe из электронного кольца с радиусом около 4.5см в течение времени удержания $30 \div 40$ мс /32/.

Четвертая глава

Четвертая глава целиком отдана изучению процессов в электронно-лучевых источниках EBIS и электронно-пучковых ионных ловушках EBIT. В первом параграфе кратко описаны принцип действия и конструкция EBIS.

Во втором параграфе на основе экспериментального материала рассмотрены образование и накопление высокозарядных ионов в электронном пучке EBIS.

В третьем параграфе рассмотрены теоретические вопросы образования и накопления высокозарядных ионов в электронном пучке EBIS.

Интенсивные ионные потери являются одной из основных проблем возникающих при работе EBIS. Полученные оценки времени прямого нагрева ионов в результате упругого рассеяния электронов объясняют существующие ионные потери только отчасти /21,25/. Реальное уменьшение числа высокозарядных ионов происходит гораздо быстрее.

В электронно-ионных пучках происходят не только электронно-ионные упругие столкновения, но и столкновения ионов между собой. Причем, частота столкновений ионов друг с другом гораздо выше чем между электронами и ионами. Характерное время столкновений между ионами и установления равновесной функции распределения Больцмана по энергиям частиц оказывается относительно очень малым, особенно для высокозарядных ионов, в силу низкой энергии ионов в электронных пучках EBIS. Например, для ионов Xe^{50+} в электронном пучке с параметрами соответствующему источнику КРИОН-2 получено $\tau_{11} \approx 10^{-8}$ с /21,25/.

Распределение Больцмана имеет ту характерную особенность, что даже при средней энергии или температуре ионов T_1 гораздо меньшей, чем граничная энергия ионов в пучке E_m , всегда существует хотя бы небольшое число ионов ΔN_1 с энергией выше чем E_m . Такие ионы теряются из пучка. Функция распределения получает отличие от распределения Больцмана и перестает быть стационарной. Однако, за время $\Delta t \approx \tau_{11}$, столкновения частиц приводят к перераспределению энергии между частицами и восстановлению вида функции распределения ионов в пучке. Опять появляются ионы с энергией выше E_m , которые снова уходят из пучка и т. д.

В /30/ была найдена скорость ионных потерь вызванных этими процессами.

T/E_m	A	Kr	Xe	U
0.5	$4.7 \cdot 10^{-5}$	$2.4 \cdot 10^{-5}$	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^{-5}$
0.2	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$7.7 \cdot 10^{-5}$	$5.3 \cdot 10^{-5}$	$3.2 \cdot 10^{-5}$
0.1	$5.6 \cdot 10^{-3}$	$2.9 \cdot 10^{-3}$	$1.9 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$
0.067	0.37	0.19	0.13	0.078
0.05	31	16	11	6.5
0.04	2900	1500	1000	620

В таблице приведены значения характерного времени (в сек.) возникновения ионных потерь τ_i в зависимости от отношения T_i/E_m для ионов аргона, криптона, ксенона и урана /30/.

Результаты приведенные в таблице показывают, что даже при температуре ионов в 5 - 10 раз меньше чем граничная энергия ионов в пучке, при времени удержания в течении нескольких секунд большая часть ионов оказывается потерянной из пучка. Дополнительный нагрев ионов электронами только усиливает этот эффект. Тем самым, учет реального экспоненциального распределения ионов по энергиям, возникающего в результате упругих ионных столкновений в пучке, объясняет наблюдаемые потери ионов в электронно-лучевых источниках. Для предотвращения ионных потерь в течении времени удержания ионов в EBIS и EBIT, составляющие, как правило, секунды, минуты и даже часы, необходимо поддерживать температуру ионов в источнике на уровне менее чем $E_m/20 - E_m/25$. С этой целью может быть использовано ионное охлаждение /30/.

В /35/ впервые было предложено использовать ионы низкой зарядности для охлаждения тяжелых многозарядных ионов с целью предотвращения их потерь из электронного пучка в EBIS. Этот метод в настоящее время с успехом используется в различных установках этого типа. Позднее, аналогичное предложение было использовано для уменьшения потерь высокозарядных ионов в EBIT, принцип действия которого близок к EBIS.

Суть метода ионного охлаждения /21,25,35/ заключается в том, что в электронный пучок, в котором удерживаются тяжелые высокозарядные ионы, вводят легкие ионы с низкими зарядностями. Упругие столкновения ионов с разными зарядами и массами друг с другом приводят к установлению равновесных распределений для каждого типа ионов в отдельности и, что самое важное, к равновесию между всеми ионными компонентами с одинаковой, общей

для всех, средней энергией или температурой. Как было получено, характерное время установления равновесного распределения ионов имеет микросекундный масштаб времени для электронных пучков EBIS.

Малозарядные и многозарядные ионы, имея одинаковую температуру, в то же время имеют разные граничные энергии. Граничные энергии ионов в потенциальной яме электронного пучка пропорциональны их заряду. Следовательно, и условия потерь, и времена жизни для разных ионов различны. Легкие малозарядные ионы живут в пучке мало и быстро теряются. И если начальная энергия малозарядных ионов была меньше энергии многозарядных ионов, то в результате столкновений и перераспределения энергий малозарядные ионы нагреваются и уходят из пучка или испаряются. Теряясь из ловушки малозарядные ионы уносят с собой энергию, а многозарядные ионы охлаждаются и их время жизни в пучке возрастает.

Для того, чтобы поддерживать среднюю энергию тяжелых ионов на низком уровне и постоянно отводить из источника энергию, приобретаемую ионами в результате нагрева электронами, необходим постоянный приток легких ионов для охлаждения. В этом случае в источнике установится равновесие, условия которого будут зависеть от зарядности и скорости притока легких ионов. Установившиеся параметры должны определяться условиями баланса для числа и полной энергии всех типов ионов в пучке.

На основе таблицы 1 в /30/ показано, что для поддержания температуры тяжелых высокозарядных ионов на необходимо низком уровне с целью предотвращения их потерь из электронного пучка EBIS при длительном удержании необходимо использовать ионы легких элементов с атомной массой в 20 - 25 раз меньше массы ионов рабочего вещества.

Четвертый параграф посвящен EBIT. Описаны принцип действия, результаты расчетов и исследований по накоплению высокозарядных ионов в EBIT.

Пятая глава

В пятой главе изучаются источники ионов на электронно-циклотронном резонансе. В первом параграфе изложен принцип действия, кратко описаны устройство и основные параметры этого самого распространенного типа источника многозарядных ионов.

Во втором параграфе рассмотрена модель накопления и

удержания ионов в ECR источниках /29,31/.

В изученных выше источниках ERIS, EBIS и EBIT могут существовать потери ионов, которые являются нежелательным фактором и с ними необходимо бороться. Особенностью ECR источников является непрерывные, установившиеся потери ионов. Время удержания ионов τ_1 , а также их поток на выходе из источника, определяются только скоростью ионных потерь. От времени жизни τ_1 зависит зарядовое распределение ионов в источнике. Поэтому проблема удержания и потерь ионов является одной из самых главных для ECR источников.

Модель накопления и удержания ионов в ECR источниках /29,31/ основана на рассмотрении упругих и неупругих взаимодействий и столкновений заряженных частиц в плазме, а так же классических потерь из открытой магнитной ловушки.

Электроны в ECR источниках, имеющие в результате нагрева ВЧ полем относительно высокую энергию, удерживаются сильным внешним магнитным полем с магнитными пробками на концах ловушки. Ионы, у которых энергия значительно меньше, испытывают интенсивные упругие столкновения и в магнитном поле сохраняются хуже. В результате возникающих в начальный момент ионных потерь, в плазме появляется небольшой отрицательный потенциал, который регулирует скорость ухода ионов и тем самым сохраняет в целом нейтральность плазмы. Интенсивные упругие взаимодействия между ионами приводят к тому, что у всех ионов, независимо от заряда и массы, устанавливается единая температура и распределение по энергиям, близкое к равновесному распределению Больцмана. Поэтому ионы, имеющие разную зарядность, но одинаковую среднюю энергию, имеют разную высоту потенциального барьера, разное время жизни и разную вероятность быть потерянными из потенциальной ямы и уйти из источника.

На основе этой модели были сформулированы три главных принципа удержания ионов в потенциальной ловушке ECR источника /31/:

- 1). Ионы с высокими зарядами имеют большее время жизни и им труднее покинуть источник.
- 2). Зарядовое распределение ионов на выходе из источника имеет средний заряд ниже чем внутри ионной ловушки.
- 3). Уменьшение температуры или средней энергии ионов в источнике увеличивает их время жизни в ловушке, а следовательно приводит к увеличению среднего заряда.

Созданная модель позволила не только провести теоретическое

изучение процессов связанных с получением ионов в обычных режимах работы ECR источников, но и впервые найти физическое объяснение и провести математическое моделирование значительного увеличения выхода многозарядных ионов при использовании смесей легких и тяжелых элементов (ионное охлаждение) и в импульсном режиме работы ECR источника ионов /21,25,29,31/.

Во втором параграфе получены уравнения баланса ионных зарядностей в алгебраической форме для стационарного режима работы ECR источника и в дифференциальной форме для математического описания переходных процессов. Разработаны методы численного решения нелинейных алгебраических уравнений для математического моделирования процессов накопления и получения ионов в ECR источниках в статических режимах, в том числе и для смесей различных газов /22,23,24,26/. Численное решение дифференциальных уравнений баланса было использовано для моделирования динамических процессов, в частности импульсного режима работы ECR источников /27,28,29,31/. Проведен расчет зарядовых распределений ионов для ECRIS в Техническом университете г. ДРЕЗДЕН (ФРГ) /22,26/ и DECRIS-14 (ЛЯР ОИЯИ) /23,24/.

Третий параграф посвящен проблеме получения многозарядных ионов в ECR источниках. Изложены физические принципы процессов gas mixing (ионного охлаждения) и импульсного режима работы ECR источников, широко используемых для значительного увеличения выхода многозарядных ионов.

В качестве примера на рис. 5 и рис. 6 приведены расчетные зарядовые распределения ионов криптона внутри источника и на выходе из него при разных отношениях числа ионов криптона и азота, который использовался для охлаждения /31/. Расчеты были выполнены для ECR источника типа MINIMAFIOS. Предполагалось, что электроны имеют температуру $T_e = 5000$ eV и плотность $n_e = 2 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$. На этих рисунках использованы обозначения: 1 - чистый криптон; 2 - 75% ионного заряда криптона и 25% азота; 3 - 50% криптона и 50% азота; 4 - 33% криптона и 67% азота.

Расчеты показали, что добавление в плазму источника ионов азота уменьшает температуру ионов с 16 eV до 3 eV и увеличивает средний заряд ионов криптона с 7 до 28. В то же время, выход многозарядных ионов из источника увеличивается, но не в такой степени как в самой ловушке. На рис. 5 и рис. 6, в соответствии с теорией, хорошо видно различие в зарядовых распределениях

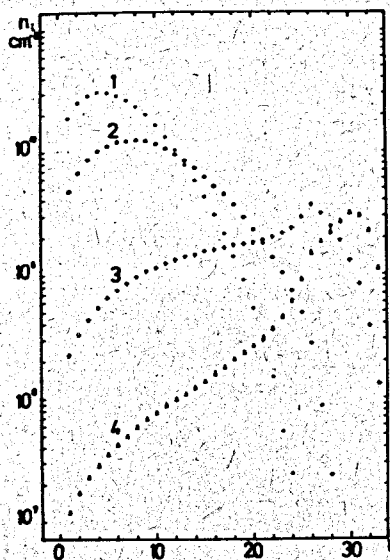


Рис. 5. Расчетное зарядовое распределение плотности ионов криптона n в логарифмическом масштабе в ECR источнике при различных относительных концентрациях ионов криптона и азота. (Обозн. см. в тексте).

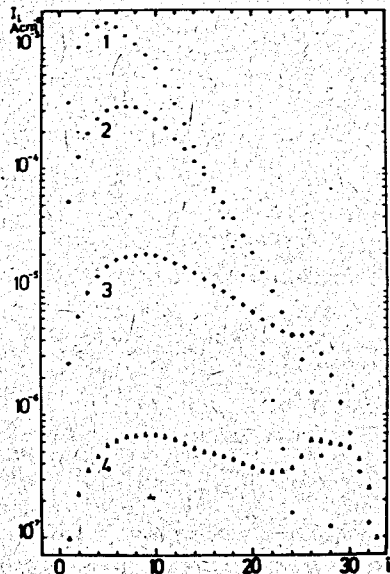


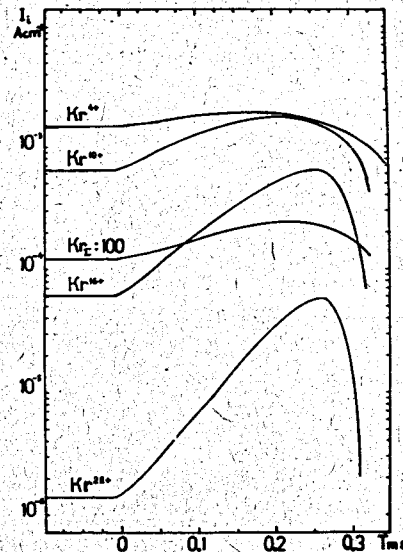
Рис. 6. Расчетное зарядовое распределение плотности тока j ионов криптона в логарифмическом масштабе на выходе из ECR источника при различных относительных концентрациях ионов криптона и азота. (Обозн. см. в тексте).

ионов внутри ловушки и на выходе из источника. Это различие особенно сильно для охлажденных ионов. Этот важный результат объясняется тем, что многозарядные ионы находятся на дне потенциальной ямы, имеют большее время жизни и поэтому струдом покидают источник.

На основе этого можно рассчитывать значительно увеличить выход многозарядных ионов из ECR источника, если извлечь из потенциальной ловушки в плазме накопленные многозарядные ионы. Одним из таких методов является импульсный режим работы ECR источника.

Кратковременное увеличение выхода многозарядных ионов может быть получено, если будет снят удерживающий ионы потенциал плазмы. Тогда накопленные ионы выплеснутся из источника и зарядовое распределение импульса ионного тока будет соответствовать тому распределению, которое имели ионы внутри ловушки. Это и имеет место при выключении ВЧ нагрева

Рис. 7. Расчетная временная зависимость в логарифмическом масштабе для плотности тока ионов Kr^{4+} , Kr^{10+} , Kr^{18+} , Kr^{22+} и суммарной плотности тока всех зарядностей криптона в импульсном режиме для ECR источника.



электронной компоненты в импульсном режиме работы источника. При остывании электронов, интенсивность их столкновений с ионами и между собой возрастает, они чаще попадают в конус потерь и теряются из источника. Уменьшение числа электронов вызывает нарушение зарядового баланса в плазме и исчезновение отрицательного потенциала. Накопленные ионы перестают удерживаться и уходят из источника. Характерное время развития этого процесса определяется скоростью потерь электронов, имеет величину близкую ко времени жизни электронов в источнике τ_e и, в зависимости от параметров плазмы, обычно находится в пределах от 300 нс до 1 мс.

На рис. 7 [31] в реальном масштабе времени приведены расчетные изменения тока ионов Kr^{4+} , Kr^{10+} , Kr^{18+} , Kr^{22+} и суммарный ток всех зарядностей криптона после выключения нагрева электронов. Эти расчеты были проведены для источника типа MINIMAFIOS.

Полученные в диссертации результаты численного моделирования на основе созданной модели процессов ионного охлаждения и импульсного режима в ECR источниках имеют не только качественное, но и количественное согласие с многочисленными экспериментальными результатами полученными в реальных ECR

источниках, в большинстве из которых регулярно используются эти эффекты для увеличения выхода многозарядных ионов.

Кроме выключения ВЧ нагрева электронов, могут существовать другие способы получения импульсов многозарядных ионов /31/. Для этого достаточно разрушить отрицательную потенциальную яму, удерживающую ионы. Это может быть сделано, например, кратковременным снятием одной из магнитных пробок, удерживающие электроны или путем инъекции в рабочую зону источника небольшого пучка положительных ионов, который снимет отрицательную потенциальную яму удерживающую накопленные ионы. Причем, во втором случае, длительность импульса ионов из ловушки будет определяться не временем потери электронов из источника, а временем свободного разлета ионной компоненты, которая может составлять всего десятки микросекунд и это может привести к уменьшению длительности импульса ионного тока и соответствующему увеличению его амплитуды.

В /31/ показано, что если использовать ионное охлаждение для сдвига зарядового распределения внутри источника в высокозарядную область и в несколько раз уменьшить время разрушения потенциальной ямы внутри источника, то можно надеяться получить, при длительности импульса около 0,3 нс, ионы Kr^{30+} или, возможно, ионы Pb^{40+} с током до $0,1 \div 0,3$ нА на выходе из источника. Такой режим работы ECR источника в качестве инжектора в ускорителе и накопителе тяжелых ионов, в том числе в ускорительном комплексе CERN.

В заключение сформулированы основные результаты диссертации:

1. Разработаны основные положения кинетической теории накопления и получения многозарядных и высокозарядных ионов в ионных источниках, основанных на последовательной ионизации ионов электронным ударом в течении времени удержания ионов в источнике. Полученные результаты позволили впервые в едином подходе провести теоретические исследования и математическое моделирование физических процессов, связанных с образованием и накоплением ионов в многокомпонентных электронно-ионных пучках электронно-лучевых источников, кольцах электронно-кольцевого ионизатора и горячей плазме источников ионов на электронно-циклотронном резонансе. Предложены и обоснованы общие методы увеличения выхода многозарядных ионов из ИМИ.

2. На основе анализа сечений неупругих столкновений определены вероятности основных процессов между различными компонентами в электронно-ионных пучках и плазме ИМИ. Показано, что доминирующим процессом является последовательная ионизация электронным ударом ионов, образующихся из нейтральных атомов. Найдены условия, при которых перезарядка нейтральных атомов и молекул на ионах оказывает значительное влияние на процесс накопления ионов и может ограничивать предельнодостижимые значения ионных зарядностей в ИМИ.

3. Определена роль упругих кулоновских столкновений между заряженными частицами в ИМИ. Найдены скорости нагрева ионов электронами и перераспределения энергии между различными ионными компонентами. Впервые показано, что упругие столкновения в ионных источниках являются причиной установления равновесного распределения Больцмана по энергиям ионов с общей температурой для всех ионных компонент.

4. Совместно с Е.Д.Донцом, впервые предложено и физически обосновано охлаждение многозарядных ионов в EBIS малозарядными ионами легких элементов, с целью значительного снижения потерь и увеличения выхода из источника многозарядных ионов. Ионное охлаждение нашло успешное применение в других типах ионных источников и в настоящее время стало самым эффективным и широко применяемым в мире способом значительного увеличения выхода многозарядных ионов для EBIS, EBIT и ECR источников ионов.

5. Впервые найдены стационарные функции распределения многозарядных ионов при последовательной ионизации ионов в электронных пучках с гауссовской плотностью в сечении. Аналитическими методами и в результате численного моделирования показано, что в таких пучках среднеквадратичные поперечные размеры ионных компонент убывают быстрее с ростом заряда ионов, чем в электронных пучках с постоянной плотностью в сечении.

6. На основе метода полных моментов функции распределения получены системы уравнений, описывающие динамику накопления ионов в многокомпонентных электронно-ионных пучках и тонких кольцах, а так же коллективного ускорения многокомпонентного электронно-ионного кольца. Предложены способ дополнительного уменьшения размеров электронных колец за счет синхротронного излучения и метод ускорения ионов в течении времени сжатия электронного кольца в коллективном ускорителе ионов за счет

действия силы Кориолиса. Проведено численное моделирование процессов накопления и ускорения ионов в коллективном ускорителе тяжелых ионов. Результаты расчетов находятся в согласии с проведенными экспериментами на прототипе КУТИ и использовались при проектировании и создании КУТИ-20 в ОИЯИ.

7. На основе теоретического анализа процессов при длительном удержании релятивистских электронных колец с ионами определены основные факторы, ограничивающие время жизни электронных колец КУТИ и показано, что релятивистское электронное кольцо может существовать до 100ms и быть использовано для получения многозарядных ионов в модернизированной магнитной системе коллективного ускорителя. Выполнено физическое обоснование проекта ОИЯИ ERIS (электронно-кольцевой ионизатор), целью которого является получение высокозарядных ионов для проведения исследований по физике электронной оболочки ионов. Начата реализация проекта ERIS и получены первые спектры линий K_{α} и K_{β} при рентгеновском излучении криптона и ксенона из электронного кольца.

8. Изучен процесс длительного удержания многозарядных ионов в EBIS. Впервые показано, что упругие кулоновские столкновения ионов могут являться основной причиной значительных ионных потерь в EBIS и определены особенности применения ионного охлаждения для их предотвращения. Предложен новый метод ионного охлаждения тяжелых ионов в EBIS непрерывным потоком легких ионов и определены необходимые параметры струи легких ионов для охлаждения высокозарядных ионов в источнике КРИОН-2.

9. На основе рассмотрения упругих и неупругих взаимодействий и столкновений заряженных частиц в плазме, а так же классических потерь из открытой магнитной ловушки, разработана модель накопления и удержания ионов в ECR источниках. Созданная модель позволила не только провести теоретическое изучение процессов связанных с получением ионов в обычных режимах работы ECR источников, но и впервые найти физическое объяснение и провести математическое моделирование значительного увеличения выхода многозарядных ионов при использовании смесей легких и тяжелых элементов (ионное охлаждение) и в импульсном режиме работы ECR источника ионов. Предложен новый перспективный способ увеличения выхода многозарядных ионов при использовании ECR источника в качестве инжектора в ускорителе и накопителе

тяжелых ионов, в том числе в ускорительном комплексе CERN.

10. Предложены новые методы и алгоритмы расчета зарядовых распределений, позволяющие моделировать основные процессы в ECR источнике в статическом и динамическом режимах. Результаты численного моделирования имеют хорошее качественное и количественное согласие по зарядовому распределению и величине ионного тока на выходе из ECR источников, а также временному развитию процессов для импульсного режима работы, с имеющимися экспериментальными данными, полученными в ведущих научных центрах. Проведен расчет зарядовых распределений ионов для ECRIS в Техническом университете г.ДРЕЗДЕН (ФРГ) и DECRIIS-14 (ЛЯР ОИЯИ).

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

1. Самосогласованная задача о движении заряженных эллипсоидальных сгустков частиц. Э.А.Перельштейн, Г.А.Ширков. Препринт ОИЯИ Р9-10468, Дубна, 1977, 12с.; ЖТФ, т.48, 1978, сс. 249-253.

2. Расчет процесса накопления ионов в электронных пучках с учетом ион-ионных взаимодействий. Э.А.Перельштейн, Г.А.Ширков. Препринт ОИЯИ Р9-11412, Дубна, 1978, 11с.; ЖТФ, т.49, 1979, сс. 19-23.

3. О накоплении ионов в электронных кольцах. Г.А.Ширков. Препринт ОИЯИ Р9-12055, Дубна, 1979, 11с.; ЖТФ, т.49, 1979, сс. 1471-1475.

4. Метод моментов в динамике кольцевых пучков заряженных частиц. Н.Ю.Казаринов, Э.А.Перельштейн, Г.А.Ширков. ЖТФ, 50, 1980, сс. 549-546.

5. О накоплении тяжелых ионов в электронных кольцах коллективного ускорителя. Э.А.Перельштейн, Г.А.Ширков. Сообщение ОИЯИ 9-80-124, Дубна, 1980, 6с.

6. О возможности увеличения эффективной ускоряющей силы в ускорителях с электронными кольцами. В.С.Александров, Э.А.Перельштейн, В.П.Саранцев, Г.А.Ширков. Сообщение ОИЯИ Р9-81-20, Дубна, 1981, 6с.

7. Ion-Ion Collisions in Electron Ion Rings. E.Perelstein, G. Shirkov. Proceedings of Intern. Seminar on High Ion-Atom Collision Processes, Hungary, 1981, p.207-210. [in English].

8. О накоплении многозарядных ионов в электронных кольцах коллективного ускорителя. Э.А.Перельштейн, Г.А.Ширков. В

кн.: Труды совещания по проблемам коллективного метода ускорения. Дубна, ОИЯИ, Д9-82-664, 1982, сс. 31-33.

9. Расчет ускорения многокомпонентных электронно-ионных колец. Н.Ю.Казаринов, Э.А.Перельштейн, Г.А.Ширков. В кн.: Труды совещания по проблемам коллективного метода ускорения. Дубна, ОИЯИ, Д9-82-664, 1982, сс. 62-65.

10. О функции распределения ионов. Э.А.Перельштейн, Г.А.Ширков. Препринт ОИЯИ Р9-82-526, Дубна, 1982, 11с.

11. Моделирование процесса накопления ионов в электронных пучках. Э.А.Перельштейн, В.Ф.Шевцов, Г.А.Ширков и Б.Г.Шинов. Препринт ОИЯИ Р9-82-532, Дубна, 1982, 11с.; ЖТФ т.54, 1984, сс. 270-278.

12. Моделирование накопления ионов в электронных пучках. Э.А.Перельштейн, В.Ф.Шевцов, Г.А.Ширков и Б.Г.Шинов. В кн.: Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1983, т. II, сс. 375-379.

13. Программа для моделирования накопления ионов в электронных пучках. Э.А.Перельштейн, В.Ф.Шевцов, Г.А.Ширков и Б.Г.Шинов. В кн.: V Международное совещание по проблемам математического моделирования, программирования и математическим методам решения фундаментальных задач. ОИЯИ, Д10, 11-84-818, Дубна 1985, сс. 204-206.

14. Численное моделирование динамики электронно-ионных пучков. Э.А.Перельштейн, Г.А.Ширков и Б.Г.Шинов. Препринт ОИЯИ 11-84-818, Дубна, 1984, 4с.;

В кн.: Численные методы и приложения. София, 1985, сс. 471-475.

15. Electron Ring Phenomena and the Problem of Highly Charged Ion Production. E. Perelstein, G. Shirkov. Preprint JINR, E9-85-4, Dubna, 1985, 4p. [in English].

16. Коллективное ускорение встречных ионных пучков. И.В.Кузнецов, Э.А.Перельштейн, В.П.Саранцев и Г.А.Ширков. Краткие сообщения ОИЯИ №10-85, Дубна, 1985, сс. 62-68.

17. О возможности получения многозарядных ионов в электронных кольцах коллективного ускорителя. Г.А.Ширков. В кн.: Труды II семинара молодых ученых в области экспериментальной физики. ОИЯИ, Р9-85-862, Дубна, 1985, сс. 22-26.

18. The Possibility of Intense Electron Ring Use in Atomic Physics Experiments. I. Kuznetsov, E. Perelstein, G. Shirkov. Proceedings of 8th European Section Conference on Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases, Greifswald, DDR, 1986, pp. 114-115 [in English].

19. Динамика процессов накопления ионов в электронных пучках и кольцах (обзор). Э.А.Перельштейн, Г.А.Ширков. ЭЧАЯ, 1987, т. 18, сс. 154-194.

20. Spectroscopic Source of Multicharged Ions. E. Perelstein, G. Shirkov. Preprint JINR E9-88-238, Dubna, 1988, 4p.; Proceedings 14th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases, 88, Sarajevo, Yugoslavia, 1988, p. 148-151 [in English].

21. Упругие столкновения ионов в источниках многозарядных ионов. Г.А.Ширков. Препринт ОИЯИ Р9-89-600, Дубна, 1989, 8с.; Elastiche Ionenstosse in Quellen Mehrfach Geladener Ionen. G. Shirkov. Preprint GSI, GSI-tr-89-09, Darmstadt, 1989, 12p. [in German].

22. Ladungszustandsverteilung und Ioneneinschluss in ECR-Ionenquellen. G. Shirkov, C. Muhle, G. Musiol, G. Zschornack. Proceedings of 11 Arbeitsbericht Arbeitsgruppe Energiereiche Atomare Stosse, Rottenburg, 1990, p. 20-22 [in German].

23. Расчет зарядового распределения ионов в ECR источниках ионов. Г.А.Ширков. Препринт ОИЯИ Р9-90-581, Дубна, 1990, 18с.; ЖТФ, т. 62, 1992, сс. 94-107.

24. Calculation of Ion Charge State Distribution in Dubna ECRIS-14. V. Kutner, G. Shirkov. Proceeding of 5th Internat. Conference on the Physics of Highly Charged Ions, Giessen, Germany, 1990 in: Atomic Physics of Highly Charged Ions. Springer-Verlag, Berlin, 1991, (Supplement to Z. Phys. D.) p. S 323-325. [in English].

25. Elastic Ion Collisions in Multiply Charged Ion Sources. G. Shirkov. Proceeding of 5th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions, Giessen, Germany, 1990. in: Atomic Physics of Highly Charged Ions, Springer-Verlag, Berlin, 1991, (Supplement to Z. Phys. D.) p. S 319-321. [in English].

26. Ionization and Charge Dispersion in Electron Cyclotron Resonance Ion Source. G. Shirkov, C. Muhle, G. Musiol, G. Zschornack. Nuclear Instruments and Methods A302 (1991). pp. 1-5 [in English].

27. Eine Neue Methode zur Berechnung von Ladungszustandsverteilungen in ECR-Ionenquellen. G. Shirkov, I. Steinert, G. Zschornack. Proceedings 12 Arbeitsbericht Arbeitsgruppe Energiereiche Atomare Stosse, Riezlern, Germany, 1991, p. 125-127. [in German].

28. A New Approach to Calculate Ionization and Charge

Dispersion in Electron Cyclotron Resonance Ion Source. I. Steinert, G.D. Shirkov, G. Zschornack. Preprint TU Dresden NM- IKAP-03-1991, 10p.;

Nuclear Instruments and Methods A314 (1992), pp.602-604 [in English].

29. The Multiply Charged Ion Production in ECR Ion Sources. G. Shirkov. Preprint JINR E9-91-383, Dubna, 1991, 8p.;

Proc. of 4th International Conference on Ion Sources, Bensheim, Germany, 1991, Edited by B.H. Wolf, Rev. Sci Instrum., Vol. 63, No. 4, pp.2894-2896, 1992 [in English].

30. The Ion Cooling in EBIS. G. Shirkov, E. Donets, R. Becker, M. Kleinod, preprint JINR E9-91-382, Dubna, 1991, 8p.;

Proc. of 4th International Conference on Ion Sources, Bensheim, Germany, 1991, Edited by B.H. Wolf, Rev. Sci Instrum., Vol. 63, No. 4, pp.2819-2821, 1992 [in English].

31. Fundamental Processes Determinating the Highly Charged Ion Production in ECR Ion Sources. G. Shirkov, preprint JINR E9-92-33, Dubna, 1992, 11p.;

Nucl. Instr. & Methods A322, pp.161-165, 1992 [in English].

32. Электронно-кольцевой ионизатор ERIS. С.М. Бийский, ..., Г.Д. Ширков. Сообщение ОИЯИ Р9-92-431, Дубна, 1992, 10с.

33. Способ формирования электронных колец высокой плотности и устройство для его осуществления. В.С. Александров, В.П. Саранцев, Г.Д. Ширков. Авторское свидетельство СССР № 797537 от 25.07.1979;

Бюллетень ОИ, 1981, №2, с.255.

34. Способ ускорения заряженных частиц в электронных кольцах. И.В. Кузнецов, Э.А. Перельштейн, В.П. Саранцев, Г.Д. Ширков. Авторское свидетельство СССР № 1102061 от 27.09.1982;

Бюллетень ОИ, 1984, №25, с.196.

35. Способ получения высокозарядных ионов. Е.А. Донец, Г.Д. Ширков. Авторское свидетельство СССР № 1225420 от 02.07.1984;

Бюллетень ОИ, 1989, №44, с.69.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 апреля 1993 года.