

## ОБОЗРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

# Столкновительные процессы с участием тяжёлых многоэлектронных ионов при взаимодействии с нейтральными атомами

И.Ю. Толстихина, В.П. Шевелько

*Представлен обзор экспериментальных данных и теоретических методов расчёта эффективных сечений перезарядки (захвата электронов) и обдирки (ионизации налетающего иона) с участием тяжёлых многоэлектронных ионов (типа  $\text{Xe}^{q+}$ ,  $\text{Pb}^{q+}$ ,  $\text{W}^{q+}$ ,  $\text{U}^{q+}$ ), сталкивающихся с нейтральными атомами (H, He, N, Ne, Ar, Kr, Xe) при энергиях  $E \approx 10$  кэВ/н – 10 ГэВ/н, т.е. от низких до релятивистских энергий. Такие процессы с изменением зарядового состояния происходят с большой вероятностью (полные сечения достигают в максимуме величин  $10^{-14}$ – $10^{-16}$  см<sup>2</sup>), поэтому они существенно влияют на кинетику лабораторной и астрофизической плазмы и определяют времена жизни ионных пучков в ускорительных установках. Рассмотрены также многоэлектронные процессы перезарядки и обдирки, роль которых в случае столкновений сложных атомных систем возрастает, а вклад в полное сечение достигает 50 % и более. Изучены влияние электронов внутренних оболочек сталкивающихся атомных систем и роль изотопического эффекта при перезарядке медленных ионов с энергией  $E \approx 10$ –100 эВ/н на изотопах водорода H, D и T. Дано краткое описание соответствующих компьютерных программ для расчёта сечений перезарядки и обдирки сложных атомов и ионов в широком диапазоне энергий сталкивающихся частиц.*

PACS numbers: 34.10.+x, 34.50.Fa, 34.70.+e

DOI: 10.3367/UFNr.0183.201303a.0225

## Содержание

1. Введение (225).
2. Процессы одноэлектронной перезарядки (226).
  - 2.1. Свойства процессов одноэлектронной перезарядки. Роль захвата электронов внутренних оболочек мишени.
  - 2.2. Методы и программы для расчёта сечений перезарядки.
3. Процессы обдирки (ионизации налетающего иона) (231).
  - 3.1. Борновское приближение.
  - 3.2. Классическое приближение.
4. Многоэлектронные процессы в ион-атомных столкновениях (237).
  - 4.1. Многоэлектронная перезарядка.
  - 4.2. Многоэлектронная обдирка.
  - 4.3. Рекомендуемые данные по сечениям перезарядки и обдирки.
5. Эффекты плотности мишени (240).
  - 5.1. Влияние эффектов плотности на сечения перезарядки.
  - 5.2. Влияние эффектов плотности на сечения обдирки.
6. Времена жизни ионных пучков в ускорителях (242).
7. Перезарядка при медленных столкновениях (244).
  - 7.1. Резонансная перезарядка протона на атоме водорода.

7.2. Изотопические эффекты перезарядки с участием изотопов водорода.

8. Заключение (253).
- Список литературы (253).

## 1. Введение

Радиационные и столкновительные процессы, протекающие в лабораторной и астрофизической плазме, определяются взаимодействием составляющих плазму атомных частиц (электронов, атомов, молекул и ионов) между собой и с фотонами. К таким элементарным процессам относятся процессы возбуждения, ионизации, рекомбинации, возникающие в электрон-атомных и ион-атомных столкновениях, а также фотопроцессы. Элементарные процессы представляют интерес для многих областей атомной физики и атомной спектроскопии, физики плазмы, квантовой электроники, физики ускорителей и термоядерного синтеза, а установление связей между характеристиками элементарных процессов и интенсивностью излучения позволяет развивать надёжные методы спектроскопической и корпускулярной диагностики плазмы. Свойства элементарных процессов и их роль в лабораторной и астрофизической плазме рассмотрены во многих обзорах и монографиях [1–24].

В последние годы существенно возрос интерес к изучению атомных процессов с участием тяжёлых многоэлектронных ионов. Это вызвано стремительным развитием ускорительной техники, а также использованием тяжёлых ионов в различных приложениях в физике УТС (управляемого термоядерного синтеза) [25, 26], в про-

**И.Ю. Толстихина.** Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация  
Тел. (499) 132-67-15. E-mail: inga@sci.lcbdev.ru

Московский физико-технический институт (государственный университет), Институтский пер. 9, 141700 Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация

**В.П. Шевелько.** Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация  
Тел. (499) 783-36-84. E-mail: shev@sci.lebedev.ru

Статья поступила 26 марта 2012 г.,  
после доработки 19 апреля 2012 г.