

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Северный (Арктический) федеральный университет
имени М.В. Ломоносова»

В.И. Матвеев, Д.Н. Макаров

**НЕПЕРТУРБАТИВНЫЕ МЕТОДЫ
В ТЕОРИИ СТОЛКНОВЕНИЙ
БЫСТРЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
С АТОМАМИ И МОЛЕКУЛАМИ**

Монография

Архангельск
ИПЦ САФУ
2012

УДК 539.1
ББК 22.386
М33

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований **А.С. Артемов**;
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и электроники Сыктывкарского государственного университета **Л.Н. Котов**;
доктор физико-математических наук, профессор, профессор Туринского политехнического университета в г. Ташкенте **Д.У. Матрасулов**

Матвеев, В.И.

М33 Непertурбативные методы в теории столкновений быстрых тяжелых ионов с атомами и молекулами: монография / В.И. Матвеев, Д.Н. Макаров; Сев. (Арктич.) федер. ун-т. – Архангельск: ИПЦ САФУ, 2012. – 153 с.
ISBN 978-5-261-00742-5

В монографии излагаются физические принципы и непertурбативные методы теории столкновений быстрых и релятивистских тяжелых многозарядных ионов в области неприменимости теории возмущений. Рассматриваются процессы потерь энергии, возбуждения и ионизации как снарядов, так и мишеней. Особое внимание уделяется так называемым качественным методам получения оценок, характерных для рассматриваемых эффектов величин. Тем самым восполняется значительный пробел в научной и учебной литературе, посвященной этой интенсивно развивающейся области. Книга написана в физически прозрачной манере и рассчитана на широкий круг читателей, прежде всего экспериментаторов и молодых ученых, работающих в этой области. Часть более сложного материала по процессам потерь энергии может быть интересна физикам-теоретикам.

УДК 539.1
ББК 22.386

ISBN 978-5-261-00742-5

© Матвеев В.И., Макаров Д.Н., 2012
© Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, 2012

ВВЕДЕНИЕ

Изучение поведения вещества в сверхсильных электромагнитных полях является одной из актуальных задач современной физики. Поэтому значительный интерес, проявляемый к исследованиям неупругих процессов, сопровождающих столкновения тяжелых ионов с различного рода мишенями, объясняется прежде всего тем, что эффективные напряженности полей, создаваемых ионами больших зарядов, могут достигать значений $\geq 10^{11}$ В/см (для сравнения – характерная атомная напряженность электрического поля $\approx 5 \cdot 10^9$ В/см). Дополнительное к этому и значительное усиление поля может быть достигнуто из-за релятивистского сжатия. Получение таких значений поля другими методами в настоящее время крайне затруднительно. Таким образом, столкновительные эксперименты с участием релятивистских и ультрарелятивистских многозарядных ионов представляют собой, по сути дела, пока единственную возможность исследования поведения вещества в сверхсильных электромагнитных полях. Сечения неупругих процессов в столкновениях такого типа довольно велики и поэтому такие исследования интересны и в прикладном плане. Значительный прогресс в технике эксперимента, достигнутый в последнее время в области исследований столкновений релятивистских и ультрарелятивистских тяжелых ионов с атомами, молекулами и ядрами, связан с использованием ускорителей тяжелых ионов в ряде научных центров Германии, Швейцарии, Японии и США. Реакции, вызываемые пучком ускоренных ионов, в зависимости от их энергии, приводят к большому разнообразию явлений: если при малых энергиях ниже кулоновского барьера наблюдаются атомные и молекулярные явления, то в области энергий выше кулоновского барьера получаются новые ядра, необычные по нуклонному составу и свойствам, изучаются механизмы ядерных процессов. Релятивистская область энергий (≥ 1 ГэВ/нукл.) дает сведения о фундаментальных явлениях на уровне элементарных частиц. Именно в

процессах столкновений пучков высокоэнергетических многозарядных ионов на Большом адронном коллайдере выполняются сложнейшие эксперименты по изучению фундаментальных основ современной физики и происхождения Вселенной.

Значительны и прикладные возможности. Имплантация ионов используется в электронной промышленности для легирования поверхностных и близких слоев полупроводниковых материалов. Элементный анализ поверхностных слоев материала с помощью ионов получает все большее распространение. Моделирование радиационных повреждений конструкционных материалов, вызываемых большим потоком излучений, особенно эффективно, если его проводить с помощью пучка тяжелых ионов. Значительно и медико-биологическое применение тяжелых ионов. Ядерные фильтры или ультрамелкие сита, полученные облучением полимерных пленок потоком тяжелых ионов и последующим их протравливанием, уже используются для тонкой очистки и фильтрации жидкостей и газов в электронной технологии, для стерилизации биологических сред и разделения типов вирусов и белковых молекул в микробиологии, для очистки и пастеризации в пищевой промышленности. Ионная радиография (ионография) позволяет получить более контрастные и содержательные снимки внутреннего строения различных объектов по сравнению с рентгеновскими снимками. Особенно эффективно использование тяжелых ионов в радиотерапии для лечения злокачественных новообразований, так как из-за высоких удельных потерь энергии пучка воздействие тяжелых ионов сильнее, чем других частиц.

Интенсивные экспериментальные исследования стимулировали соответствующие теоретические работы, поскольку многие интересные в прикладном плане процессы, несмотря на высокие скорости ионов, не описываются в рамках теории возмущений. Появилась необходимость в построении непертурбативной теории неупругих процессов при столкновениях тяжелых ионов с различного рода мишенями.

В монографии рассмотрены, на основе непертурбативных подходов, неупругие процессы в диапазоне относительных скоростей столкновения $v \gg v_a = v \leq c$, где v_a – характерная атомная скорость, c – скорость света. При этом на заряды ионов не налагаются ограничения, связанные с применимостью теории возмущений.

Таким образом, обсуждается преимущественно область параметров столкновения, активно исследуемая в настоящее время на ускорителях тяжелых ионов. Значительное внимание уделяется методам получения оценок, характерных для рассматриваемых эффектов величин, что, несомненно, полезно при постановке и проведении экспериментов. Тем самым восполняется значительный пробел в известных монографиях и обзорах [1–13], посвященных бурно развивающейся физике столкновений тяжелых ионов.

Экспериментальные результаты привлекаются лишь для иллюстрации и сравнения с теорией. При изложении используется система атомных единиц (см. приложение): $\hbar = e = m_e = 1$, \hbar – постоянная Планка, e и $m_e = 1$ – заряд и масса электрона.

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Высокоэнергетические приближения	6
1.1. Приближения эйконала и его модификации	6
1.1.1. Нерелятивистское потенциальное рассеяние	6
1.1.2. Предельные случаи	8
1.1.3. Релятивистское потенциальное рассеяние	9
1.1.4. Столкновения с нерелятивистской системой частиц ..	10
1.1.5. Столкновение с релятивистской системой	13
1.2. Приближение внезапных возмущений	16
1.2.1. Общее рассмотрение	16
1.2.2. Применение к кулоновскому полю	19
1.3. Борновское приближение и асимптотика Бете в методе параметра удара	21
1.3.1. Метод параметра удара	22
1.3.2. Импульсное представление	23
1.3.3. Дипольное приближение	25
Глава 2. Сечения неупругих процессов	30
2.1. Наглядное представление столкновения иона большого заряда с атомом	31
2.2. Метод шивки	37
2.3. Столкновения с водородоподобными атомами	41
2.4. Возбуждение и ионизация гелиеподобного атома	46
2.4.1. Однократная ионизация	49
2.4.2. Двойная ионизация	50
2.4.3. Возбуждение автоионизационных состояний	52
2.4.4. Полные неупругие сечения	55
2.5. Сечения неупругих процессов при столкновениях реляти- вистских структурных тяжёлых ионов с атомами.....	58
Глава 3. Потеря электронов тяжёлыми структурными ионами	66
3.1. Одноэлектронная обдирка снаряда при произвольной судьбе мишени	67
3.2. Столкновение многоэлектронных систем.....	71
3.3. Обдирка водородоподобного снаряда на многоэлектрон- ном атоме	76
3.4. Многократная потеря электронов	78

Глава 4. К теории потерь энергии быстрыми заряженными частицами	85
4.1. Поправка Блоха	88
4.2. Погрешности при вычислении поправки Блоха на свободных электронах	94
4.3. Потери энергии при столкновениях с атомами в приближении эйконала	97
4.4. Обобщение на сложные атомы.....	103
4.5. Результаты расчетов.....	108
4.6. Непертурбативная оболочечная поправка	112
4.7. Непертурбативная оболочечная поправка для водородоподобных атомов	113
4.8. Непертурбативная оболочечная поправка для сложных атомов	116
4.9. Поправка Баркаса	120
Выводы	125
Глава 5. Флуктуации потерь энергии быстрыми заряженными частицами	126
5.1. Непертурбативное описание страгглинга и поправка к формуле Фано	129
5.2. Расчеты и оценки для простейшей мишени	135
5.3. Непертурбативная формула для расчёта энергетического страгглинга на сложных атомах	141
Приложение. Система атомных единиц	145
Список литературы	146