

АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 539.186

**НАЧАЛО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ИОННО-АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ В НИИЯФ МГУ****Я.А. Теплова**

(НИИЯФ)

E-mail: teplova@anna19.npi.msu.su

Приводятся сведения об организации в НИИЯФ МГУ оригинального направления исследований в физике ионно-атомных столкновений, а также результаты многолетних работ в этом направлении, выполненных под руководством профессора В.С. Николаева.

В последние десятилетия XX века из атомной физики выделилась в самостоятельное направление физика ионно-атомных столкновений. В отличие от традиционной спектроскопии структура атомов и ионов в этом разделе физики изучается в динамике на движущихся объектах. Это позволяет анализировать структуру частиц при их столкновениях в широком диапазоне энергий и для различных вариантов сталкивающихся систем, а эксперименты проводить с использованием ускорителей. В НИИЯФ МГУ история организации этого направления экспериментальных исследований тесно связана с именем доктора физ.-мат. наук, профессора Валентина Сергеевича Николаева (1926–1993). Во многом благодаря пионерским работам В.С. Николаева с сотрудниками в физике ионно-атомных столкновений стало развиваться оригинальное направление научных исследований процессов с участием многозарядных ионов (ядерный заряд $Z = 1 \div 36$), имеющих энергию от 0.1 до 1 МэВ/нукл.

В начале 1950-х гг. руководитель лаборатории ядерных реакций НИИЯФ С.С. Васильев определил новую тему научных исследований — ускорение «тяжелых» ионов ($Z > 2$) и изучение ядерных реакций под их воздействием. Он объединил группу молодых сотрудников для разработки этих вопросов и распределил конкретную работу между ними. С целью осуществления всех предполагаемых измерений нужно было «приготовить» пучок с определенным зарядом при небольшом энергетическом разбросе. Для выделения ионов с разными зарядами и последующего анализа параметров пучка (заряд и энергия) применялись четыре магнитных анализатора на всем пути ионов от источника до детектора.

Результаты измерений показали, что в относительно небольшом циклотроне, с диаметром полюсов магнита ~ 72 см, при использовании стандартного дугового ионного источника невозможно ускорить и вывести пучок полностью «ободранных» ионов (ядер) с энергией и интенсивностью, достаточными для исследования ядерных реакций.

В.С. Николаев рассчитал размеры магнита, необ-

ходимые для создания циклотрона, в котором можно было бы получать частично «ободранные» ионы с энергией, достаточной для возникновения ядерных реакций. Однако осуществление этой программы требовало больших финансовых средств, отсутствовавших в лаборатории. С другой стороны, параметры взаимодействия многозарядных ионов со средой в то время были недостаточно изучены, хотя считались очень важными для приложений как в ядерной, так и в атомной физике. Особенно это касалось вопросов торможения и перезарядки сложных частиц. В.С. Николаев взял инициативу в свои руки, объединил группу сотрудников (И.С. Дмитриев, Я.А. Теплова, Л.Н. Фатеева, Ю.А. Воробьев) и продолжил исследования.

Усилиями нового коллектива была создана многопрофильная, вполне совершенная по тем временам экспериментальная масс-спектрометрическая установка, позволявшая измерять пробеги и потери энергии ускоренных частиц, их перезарядку при прохождении твердых и газовых мишеней и как следствие определять сечения потери и захвата электронов ионами. Удачной оказалась ускорительная установка — 72-см циклотрон [1]. Величина энергии ионов в пучках, выведенных из ускорителя, находилась вблизи максимума удельных потерь энергии легких ионов. Кроме того, на 72-см циклотроне можно было ускорить и использовать для измерений ионы до $Z \leq 36$ разной зарядности. После публикации основных результатов многочисленных экспериментов стало ясно, что в НИИЯФ МГУ создано новое направление исследований — физика ионно-атомных столкновений промежуточных энергий [2, 3]. Постепенно, благодаря введению в конструкции ускорителя и измерительной аппаратуры ряда усовершенствований, весь комплекс превратился в уникальное устройство для проведения экспериментов в области ионно-атомных столкновений. Измерения на 72-см циклотроне, который в 1964 г. был передан МИФИ, продолжались до 1997 г., когда ускоритель, находившийся в рабочем состоянии, был ликвидирован.

Группой В.С. Николаева было исследовано вли-

яние структурных особенностей волновых функций связанных электронов на величину сечений потери электрона при различных скоростях налетающих частиц. Выполнены расчеты сечений ионизации водородоподобных систем при соударении с атомными ядрами, а также атомами водорода и гелия (в первом борновском приближении). Установлена зависимость этих сечений от конкретного вида радиальных волновых функций. Результаты теоретических расчетов были подтверждены экспериментальными данными по ионизации внутренних оболочек, полученными в лаборатории атомных столкновений и в зарубежных научных центрах. Экспериментально исследовано образование метастабильных частиц в атомных столкновениях и их влияние на сечения перезарядки различных многозарядных ионов (лития, бора, азота). Было показано, что присутствие метастабильных частиц в пучке ионов повышает сечение захвата электронов для ионов с небольшим зарядом и резко снижает его для высокозарядных ионов. При исследовании двукратной перезарядки установлено

и оценено влияние послестолкновительной автоионизации на сечения захвата двух электронов многозарядными частицами. На основе выполненных экспериментальных и теоретических исследований разработаны полуэмпирические методы расчета сечений потери и захвата одного и нескольких электронов ионами. Результаты расчетов были использованы при проектировании ускорителей тяжелых ионов.

Работы группы В.С. Николаева стали отправным пунктом для широких исследований в области физики ионно-атомных столкновений, проводимых в Московском университете и за его пределами.

Литература

1. Николаев В.С., Дмитриев И.С., Теплова Я.А., Фатеева Л.Н. // Ускорители. М.: Атомиздат, 1960. С. 90.
2. Николаев В.С. // УФН. 1965. **85**. С. 679.
3. Николаев В.С. // Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 1967.

Поступила в редакцию
19.12.01

УДК 539.12.04

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕЗАРЯДКИ ИОНОВ ^{14}N И ^{16}O С ЭНЕРГИЕЙ $30 \div 330$ кэВ/нукл. НА ИХ МНОГОКРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ

А.А. Бедняков, В.С. Николаев
(НИИЯФ)

Измерены дифференциальные и интегральные угловые распределения ионов ^{14}N и ^{16}O с начальными энергиями $\varepsilon_0 \approx 330, 110, 78$ и 32 кэВ/нукл., рассеянных в пленках Al, Cu, Ag и Au толщиной от ~ 0.3 до 2.3 мкм. Получены универсальные зависимости полуширины этих распределений от толщины мишеней. Из анализа угловых распределений рассеяния для наиболее тонких пленок найдены величина и зависимость от энергии «эффективного заряда» i_{sc} , введение которого в теорию Мольера–Бете позволяет учесть влияние перезарядки ионов в процессе рассеяния.

Введение

При исследовании в области физики твердого тела, а также при получении и легировании различных материалов все большее применение находят пучки быстрых ионов с атомным номером $Z_1 > 2$ и энергией порядка десятков–сотен кэВ/нукл. Прохождение таких ионов через твердое вещество сопровождается интенсивными процессами захвата и потери электронов (перезарядки) [1], что не может не влиять на различные, в том числе угловые, характеристики ионного пучка. Однако существующие теории многократного рассеяния заряженных частиц [2–6] влияние процессов захвата и потери электронов не учитывают, а имеющиеся для указанной области Z_1 и энергий экспериментальные данные весьма скудны и получены они лишь для сравнительно тонких мишеней [7, 8].

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению рассеяния ионов ^{14}N и ^{16}O в различных металлических мишенях при энергиях $E/A_1 \approx 0.03 \div 0.33$ МэВ/нукл. (A_1 — атомный вес иона), когда средний заряд ионов в веществе \bar{i}_{in} существенно меньше их ядерного заряда Z_1 . Определены зависимости параметров угловых распределений рассеянных частиц от их энергии, толщины мишени t и заряда ядер рассеивающих атомов Z_2 . Из сопоставления результатов эксперимента с теорией многократного рассеяния Мольера–Бете [2–4] найдена величина эффективного заряда ионов i_{sc} , характеризующего их рассеяние в Al при указанных условиях.

1. Экспериментальная методика

Выведенный из 72-см циклотрона ионный пучок после прохождения через электромагнитный анали-