

ОБ ИССЛЕДОВАНИЯХ СПЕКТРОВ ЭЛЕКТРОНОВ, ВЫЛЕТАЮЩИХ ИЗ МИШЕНЕЙ НА УСКОРИТЕЛЯХ

Д. Берени

Институт ядерных исследований, Дебрецен, Венгрия

В обзоре дана краткая характеристика экспериментальной техники, рассмотрены основные результаты изучения электронов (энергетическое, угловое распределение, дифференциальные сечения), выбитых в процессе облучения газовых и твердых мишеней (фольг) на ускорителях. Энергетическое распределение электронов является непрерывным, а их угловое распределение — явно анизотропным. Далее изучены результаты, полученные по оже-процессам в атомах мишеней, облученных на ускорителях заряженных частиц. В обзоре суммированы данные для различных мишеней: газовая, твердая, атомный и молекулярный пучок. Рассмотрен также случай, когда источником электронов являются ионы, возбужденные при прохождении через фольгу или газ.

Firstly short survey of the instrumental techniques and then that of the data (energy and angular distribution, cross section) on ejected electrons from the collision process itself are summarized separately for gaseous and solid targets (foils) of nuclear accelerators. The energy distribution of these electrons is continuous in general and their angular distributions is strongly anisotropic. Afterwards the Auger-processes of the atoms participating in the collision in targets of accelerators bombarded by charged particles are treated. The results are given separately for gaseous and solid targets (foils) including atomic-molecular beams and beam-foil as well as beam-gas excitation.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования процессов в атомных столкновениях имеют важное значение не только для получения более точной информации об атомной структуре и о механизме столкновений, но и для практических приложений. Поэтому в последние годы интенсивность исследований в этой области атомной физики быстро возрастает. Имеются два основных подхода к этим явлениям.

С одной стороны, изучаются частицы, связанные с самим процессом столкновения: первичные, рассеянные частицы (электроны, протоны, или тяжелые ионы), электроны, выбитые из атомных оболочек, тормозное излучение и т. д. Исследование этих частиц дает информацию прежде всего о ходе процесса столкновения.

С другой стороны, если исследуются излучения, возникающие уже после столкновения: оже-электроны, рентгеновское излучение, то получаем информацию о структуре атома. Переходя к большим энергиям бомбардирующих частиц и к высокой степени ионизации, в принципе можно получить ранее не доступные сведения о новых состояниях атома. Разумеется, эти два подхода нельзя противопоставлять или резко разграничивать.

В последнее время опубликовано довольно много работ, в которых исследуются рентгеновское излучение, сопровождающее такие процессы (см., например, обзоры [1, 2, 91] и работы [3—5], выполненные в нашем институте). Немало работ посвящено исследованию электронов, возникающих в момент столкновения или после него в процессах, в которых бомбардирующие частицы имеют относительно низкие энергии (см., например, обзоры [6, 7] и другие работы [8—11]).

Значительно меньше работ, в которых исследованы не только электромагнитное или электронное излучение, но и корреляции между ними и первичными, рассеянными частицами (электронами, протонами, α -частицами или тяжелыми ионами) (см., например, [12—15]). Число работ, в которых изучаются электронные спектры мишеней, облученных на ускорителях, при относительно высоких энергиях пока тоже невелико.

В настоящем обзоре обсуждаются работы, в которых исследованы электроны, выбитые из мишеней, экспонированных в пучках ускорителей (энергетическое, угловое распределение; отдельно или в корреляции с другими излучениями). Более определенно рассмотрим исследования, которые проведены при энергиях бомбардирующих частиц, превышающих 100—150 *кэв*.

В этом обзоре будем обсуждать, главным образом, экспериментальные аспекты проблемы. Работы, которые посвящены электронам, выбитым в процессе самого столкновения, и электронам, испущенным после столкновения, рассмотрены отдельно. При этом обсуждаются результаты, полученные с помощью разных мишеней и различных бомбардирующих частиц. Заканчивается обзор коротким разделом о возможном применении результатов, полученных в этой области.

1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Несомненно, что в этих исследованиях самыми важными приборами являются *ускорители*. Здесь не будем останавливаться на этом вопросе подробно. Упомянем лишь, что используются различные ускорители: для электронов, протонов и тяжелых ионов.

Другой важный прибор — *анализатор электронов* по энергии. В большинстве случаев для этого используются электростатические анализаторы и значительно реже — магнитные спектрометры.

Электростатические спектрометры имеют малые размеры и их легче защищать от рассеянных магнитных полей.

Известно несколько типов электростатических анализаторов. Чаще всего используются анализатор с параллельными пластинами и цилиндрическое электростатическое зеркало, т. е. прибор из двух коаксиальных цилиндров. Электростатические анализаторы и их типы обсуждаются более подробно, например, в обзорных статьях [16—18]. Там же можно познакомиться и с дальнейшими деталями экспериментальной методики электронных спектрометров (например, с детектирующей и вакуумной системами, с управлением измерениями, обработкой спектров и т. п.).

Важный вопрос для этих исследований — вид мишени. Основные виды мишеней — источников излучаемых электронов — следующие: газ (статический газовый объем); ионный, атомный или молекулярный пучок; фольга (твердая мишень).

Если мишенью является фольга, возможны разные способы измерения спектра электронов от передней поверхности фольги (или от толстой твердой мишени) и от задней поверхности фольги. Еще одна возможность — изучение спектра электронов из ионов, возбужденных при прохождении через фольгу. Эти вопросы будут обсуждены более подробно ниже.

2. ЭЛЕКТРОНЫ, ВЫБИТЫЕ В ПРОЦЕССЕ СТОЛКНОВЕНИЯ

Число исследований электронов, выбитых в самом процессе столкновения, гораздо меньше, чем исследований оже-электронов. Особенно мало таких измерений проведено в области ускорительных энергий.

1. Газовые мишени. Результаты для газовых мишеней приведены в обзоре [19] (до 1971 г.) для различных бомбардирующих частиц и в таблице [20] для протонов с энергией 5 кэв — 5 Мэв с гелиевой мишенью (см. также [7]).

Тобурен с сотр. провели свои первые исследования (до 1971 г.) на электростатическом ускорителе с напряжением 2 Мв. Сначала они использовали азотную мишень [21], затем применили водород [22], ксенон [23] и углеводородные газы [24, 25]. Во всех этих работах определялись двойные дифференциальные сечения при бомбардировке протонами между 0,3 — 2,0 Мэв и измерены спектры электронов в диапазоне от 2 до 2000—4000 эв при углах от 20 до 130°.

Спектры электронов под разными углами, полученные при бомбардировке водородной мишени протонами с энергией 1 Мэв, приведены на рис. 1. Сопоставление с теорией возможно для угловых и энергетических распределений порознь (рис. 2 и 3). Как видно из рис. 2, при угловых распределениях согласие с расчетом, основанным на использовании уравнений Фадеева [26], лучше, чем

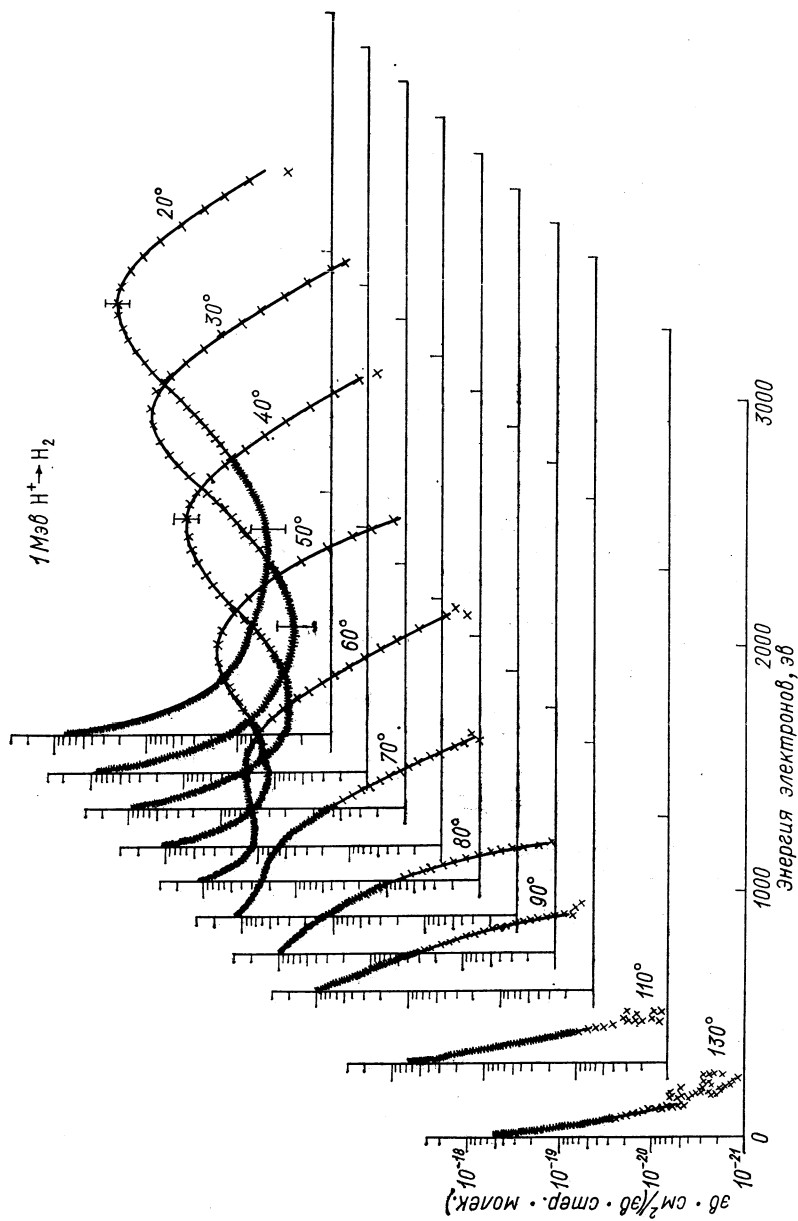


Рис. 1. Дифференциальные сечения выбивания электронов при бомбардировке молекулярного водорода протонами с энергией 1 Мэв [22]

в борновском приближении [27]. Энергетические распределения находятся в довольно хорошем соответствии с расчетами Рудда и др. (так называемая *ВЕА-теория*) [28]. Интересно отметить, что для углеводородных газов выход и энергетическое угловое распределение не зависит от их молекулярной структуры.

В другой группе (университет в Небраске, США) использован каскадный ускоритель и следующие газовые мишени: H_2 , He , N_2 , O_2 , Ne , Ar . В качестве налетающих частиц были использованы протоны с энергией от 50 до 300 *кэв* [27, 29—32]. С помощью электростатического анализатора, фокусирующего электроны под углом 127° , а также анализатора с параллельными пластинами измерено энергетическое распределение электронов в пределах от нескольких до тысячи *эв* и угловое распределение в диапазоне углов $10\text{--}160^\circ$. Сопоставление с теоретическими расчетами проведено в [28, 33, 34]. Некоторые из этих результатов приведены на рис. 4. Как видно (см. также рис. 2), расхождение становится больше, если энергия бомбардирующих частиц уменьшается или атомное число мишени увеличивается.

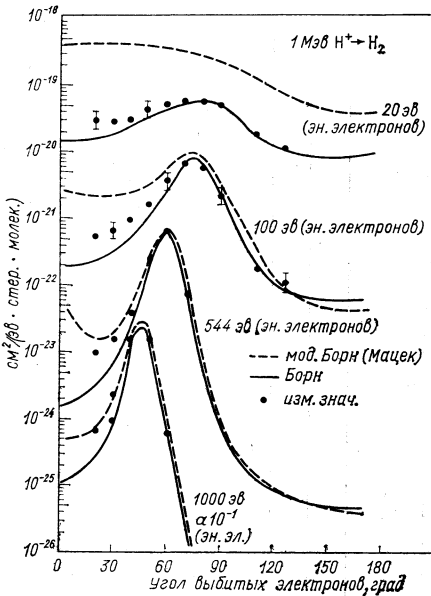


Рис. 2. Угловое распределение электронов разных энергий при бомбардировке молекулярного водорода протонами с энергией 1 *Мэв* [22]

ском ускорителе (Ван-де-Графф) 500 *кэв* [36, 37]. Он использовал электростатический анализатор с параллельными пластинами. Электронные спектры были измерены для углов от 20 до 150° . Подробно эти результаты с теорией не сопоставлялись. В других, более поздних работах Штолтерфот и его сотрудники бомбардировали кислородную мишень тяжелыми ионами O^{n+} [38]; Брух и др. [39] — аргонную мишень ионами O^{4+} [39]. Они обнаружили четкий пик при малых углах.

В 1975 г. группа Тобурена и Штолтерфота в сотрудничестве с теоретиками исследовала энергетическое и угловое распределение электронов при бомбардировке He протонами (и электронами той же скорости, что и протоны) [40]. В Ричланде энергия прото-

нов с энергией от 50 до 300 *кэв* [27, 29—32]. С помощью электростатического анализатора, фокусирующего электроны под углом 127° , а также анализатора с параллельными пластинами измерено энергетическое распределение электронов в пределах от нескольких до тысячи *эв* и угловое распределение в диапазоне углов $10\text{--}160^\circ$. Сопоставление с теоретическими расчетами проведено в [28, 33, 34]. Некоторые из этих результатов приведены на рис. 4. Как видно (см. также рис. 2), расхождение становится больше, если энергия бомбардирующих частиц уменьшается или атомное число мишени увеличивается.

Штолтерфот бомбардировал атомный и молекулярный пучок He и N_2 протонами с энергией от 200 до 500 *кэв* на электростатическом ускорителе (Ван-де-Графф) 500 *кэв* [36, 37]. Он использовал электростатический анализатор с параллельными пластинами. Электронные спектры были измерены для углов от 20 до 150° . Подробно эти результаты с теорией не сопоставлялись. В других, более поздних работах Штолтерфот и его сотрудники бомбардировали кислородную мишень тяжелыми ионами O^{n+} [38]; Брух и др. [39] — аргонную мишень ионами O^{4+} [39]. Они обнаружили четкий пик при малых углах.

Штолтерфот и его сотрудники бомбардировали кислородную мишень тяжелыми ионами O^{n+} [38]; Брух и др. [39] — аргонную мишень ионами O^{4+} [39]. Они обнаружили четкий пик при малых углах.

В 1975 г. группа Тобурена и Штолтерфота в сотрудничестве с теоретиками исследовала энергетическое и угловое распределение электронов при бомбардировке He протонами (и электронами той же скорости, что и протоны) [40]. В Ричланде энергия прото-

нов была 300 кэв, 1 и 5 Мэв, в Берлине — 100 и 300 кэв, а также 1 и 5 Мэв. Данные из разных лабораторий хорошо согласуются. Расчеты в борновском приближении (волновые функции Хартри — Фока) расходятся с экспериментальными данными, особенно в области малых углов и относительно малых энергий бомбардирующих протонов (рис. 5).

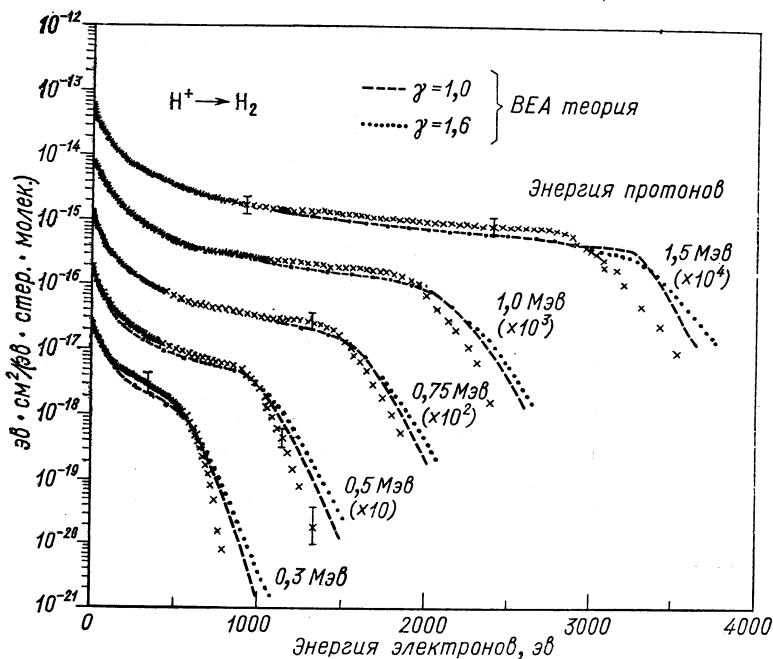


Рис. 3. Дифференциальные сечения выбивания электронов из молекулярного водорода при разных энергиях протонов, бомбардирующих мишень [22]

2. **Твердые мишени (фольги).** Во многих работах изучаются электроны, выбитые с поверхности твердых тел при бомбардировке заряженными частицами относительно низких энергий (см., например, [42—44]). Но известно мало результатов по электронам (энергетические и угловое распределения), выбитым из твердых мишеней ядерными частицами при ускорительных энергиях. Так, фольги 50 мкг/см² Си и Ag были бомбардированы электронами с энергией 140 кэв [45]. Электронные спектры детектировались под углами 15 и 45° относительно бомбардирующего пучка электронов в совпадении с К рентгеновским излучением. Полученные результаты для 15° согласуются с теоретическими расчетами Даса [46], в то время, как для 45° такого совпадения не наблюдается.

Исследование спектров электронов,

Бомбардирующая частица		Мишень	
Тип	Энергия, Мэв	Материал	Вид
<i>p</i>	50—100 <i>кэв</i>	H ₂	газ
<i>p</i>	50—150 <i>кэв</i>	H ₂ , He	газ
<i>p</i>	100—300 <i>кэв</i>	H ₂ , He	газ
Ne ⁺ , Ar ⁺	50—300 <i>кэв</i>	Ne, Ar	газ
<i>p</i> , H ₂ ⁺	110—320 <i>кэв</i>	C, Au	фольга
<i>p</i>	0,3—1,7	N ₂	газ
<i>p</i>	50—300 <i>кэв</i>	N ₂ , O ₂ , Ne, Ar	газ
<i>p</i>	200—500 <i>кэв</i>	CH ₄ , He	газ, мол. пучок
<i>p</i>	200—500 <i>кэв</i>	N ₂	мол. пучок
<i>p</i>	0,3—1,5	H ₂	газ
<i>p</i> , H ₂ ⁺ , He ⁺ , He	20—150 <i>кэв</i>	He	газ
O ³⁺ —O ⁸⁺	17—41	O ₂ , N ₂ , Ne, Ar	газ
H ₂ ⁺	0,6—1,5	H ₂	газ
<i>e</i>	140 <i>кэв</i>	Cu, Ag	фольга
<i>p</i>	0,3—2	Xe	газ
O ⁴⁺ —O ⁸⁺	30	O ₂	газ
He ⁺⁺ , о.р. *1	0,45—1,5	C	фольга
<i>p</i>	0,3—2,0	CH ₄ , C ₂ H ₆ ^{2*}	газ
<i>p</i>	0,3—5,0	He	газ
<i>p</i>	0,25—2,0	CH ₄ , NH ₃ ^{3*}	газ
He ⁺⁺ , о.р. *1	0,45—1,5	C, Au	фольга
O ⁸⁺	83	Au	фольга

*1 α -Частицы и осколки расщепления из ²⁴¹Am и ²⁵²Cf.

*2 и C₂H₄, C₂H₂, C₆H₆.

*3 и CH₃NH₂, (CH₃)₂NH.

*4 ЦЭА — цилиндрический электростатический анализатор.

Гаррисон и Лукас исследовали спектр электронов, вылетающих с задней стороны углеродной и золотой фольги при бомбардировке протонами с энергией от 110 до 320 *кэв* [47]. В непрерывном спектре они обнаружили пик, который соответствует скорости вылетающих электронов, равный скорости налетающих протонов.

Кожухаров и др. [48] бомбардировали золотую фольгу тяжелыми ионами ¹⁶O (83 Мэв). Спектр δ -электронов сравнивался с борновским приближением и так называемой *монопольной моделью*.

В Дармштадте детектировали электронные спектры из углеродных и золотых фольг, полученные при облучении α -частицами

Таблица 1

выбитых в процессе столкновения

Исследованный диапазон энергий электронов, эв	Тип анализатора электронов	Угол наблюдения эмиссии электронов, град	Литература
4—300	ЦЭА *4 фок. на 127°	23—152	[27]
1—500	ЦЭА фок. на 127°	10—160	[29]
2—850	ЭАПП *5	10—160	[30]
1,5—1000	ЭАПП	10—160	[31]
8—440	МС *6 фок. на 180°	0	[47]
2—4000	ЦЭЗ *7	20—130	[21]
1,5—1057	ЦЭА фок. на 127°	10—160	[32]
1—1000	ЭАПП	18—155	[36]
1—1300	ЭАПП	20—150	[37]
2—1000	ЦЭЗ	20—130	[22]
18—120	ЭАПП	10—160	[51]
310—2100	ЦЭЗ	90	[39]
2—1700	ЦЭЗ	20—125	[52]
(70—110) · 10 ³	МС	15; 45	[45]
1—1500	ЦЭЗ	20—130	[23]
25—4000	ЭАПП	25—90	[38]
250—3500	ЦЭЗ	42; 138	[49]
10—4000	ЦЭЗ	20—130	[24]
20—1200	ЭАПП, ЦЭЗ	30—150	[40]
20—2500; 1—200	ЦЭЗ, ТВП *8	15—125; 50—125	[25]
250—3400	ЦЭЗ	42; 138	[50]
(26—68) · 10 ³	МС, апельсиновый	90	[48]

*5 ЭАПП — электростатический анализатор с параллельными пластинами.

*6 МС — магнитный спектрометр.

*7 ЦЭЗ — цилиндрическое электростатическое зеркало.

*8 ТВП — техника времени полета.

и осколками расщепления. Источниками налетающих частиц были радиоактивные препараты ^{241}Am , ^{252}Cf . Электронные спектры измеряли для углов 42 и 138° в совпадении с ионами [49, 50]. Результаты сравнивали с ВЕА-теорией с учетом эффектов рассеяния и замедления электронов и результатами для газовых мишеней. Для протонов и α -частиц ВЕА-теория хорошо передает форму спектров. Некоторые более поздние работы в этой области даны в [92].

3. Вывод. Сводка проведенных экспериментов приведена в табл. 1. Видно, что измерений с газовыми мишенями гораздо больше, чем с твердыми. Использовали статическую газовую мишень из атомов, из простых и более сложных молекул и только несколько раз

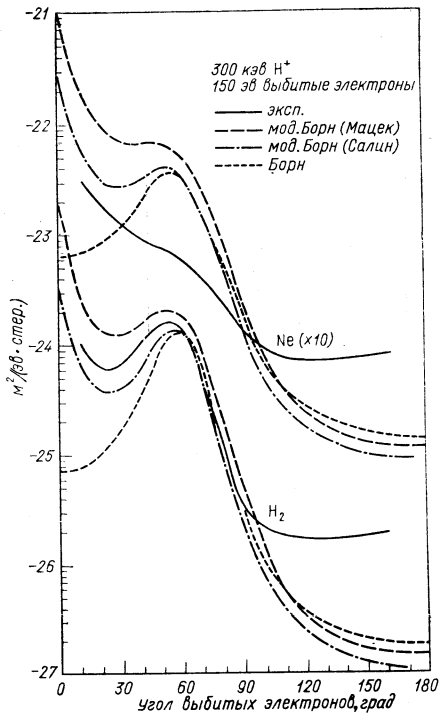


Рис. 4. Угловое распределение (150 эв) электронов из мишеней H_2 и Ne при бомбардировке протонами с энергией 300 кэв [7]

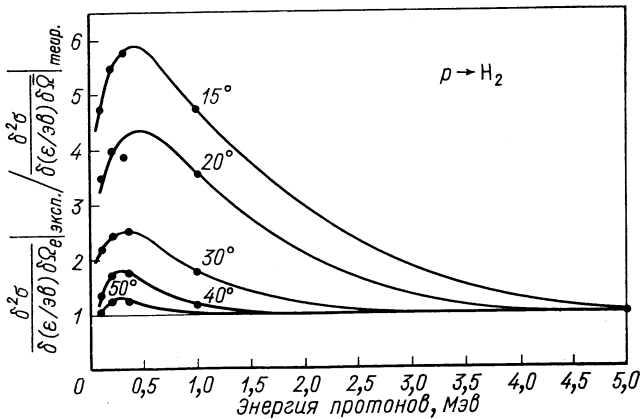


Рис. 5. Зависимость отношения экспериментальных и теоретических значений двойного дифференциального сечения при бомбардировке мишени Ne протонами для одинаковой скорости бомбардирующих протонов и выбитых электронов [40]

атомный и молекулярный пучок. В большинстве случаев газové и твердые мишени облучались протонами и значительно реже электронами, α -частицами и тяжелыми ионами.

Основные теоретические подходы — ВЕА-(полуклассическая теория) и борновское приближение. Другие теоретические подходы обсуждаются в работе [6]. Ни один из них не может объяснить экспериментальные данные полностью, полученные при бомбардировке только протонами. Существенные расхождения имеют место для углового распределения и дифференциальных сечений.

3. ОЖЕ-И АВТОИОНИЗАЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ

Вакансии, возникающие при столкновении, через 10^{-13} — 10^{-16} сек заполняются с испусканием рентгеновского излучения оже- и автоионизационных электронов. При изучении электронных спектров можно получить данные об атоме и ионе, о состояниях атомов и ионов после столкновения. Например, можно изучать переходы (автоионизационные), которые нельзя исследовать методами оптической спектроскопии из-за правил отбора (см. работу [53]). Число и интенсивность спутников, угловое распределение оже-электронов может дать информацию о числе вакансий в атоме, возникающих при столкновениях. Число вакансий характеризует механизм столкновения.

Кроме того, отметим, что и полные сечения ионизации элементов с малым атомным номером практически можно определить только используя оже-электроны, так как вероятность у рентгеновского излучения этих элементов мала.

Этим объясняется значительное число таких экспериментов, проведенных с помощью ускорителей. Подробно с ними можно познакомиться в работах [1, 6, 7, 12, 19, 54]. Выделим здесь лишь главные экспериментальные направления исследований и укажем на несколько самых новых результатов.

1. Статические газové мишени и атомные-молекулярные пучки в качестве мишеней. Большинство измерений проведено здесь с использованием газовой мишени (так называемые *статические газové мишени*). Несколько раз использовался атомный или молекулярный пучок.

Обратимся прежде всего к исследованиям, в которых мишени облучались протонами. При столкновениях протонов, электронов, фотонов и ядер атомов без электронной оболочки с атомами оже-спектры весьма сходны (почти те же самые), если скорость налетающих частиц больше скорости электронов атомной оболочки. Например (рис. 6), показано, что оже-спектры аргона приблизительно одинаковы при бомбардировке электронами (2 кэв) и протонами (1,8 Мэв), однако заметно изменяется при бомбардировке α -частицами с энергией 1,8 Мэв.

Тобурен [55], исследуя K оже-спектры, возникающие при бомбардировке разных газовых мишеней (CH_2 , C_2H_4 и т. д.) протонами с энергией $0,3 - 2,0 \text{ Мэв}$ изучал ионизацию K -оболочки

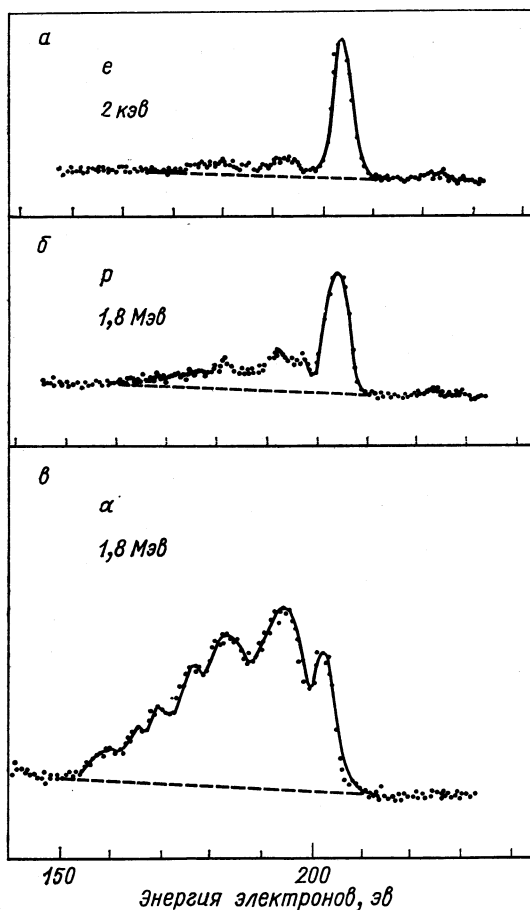


Рис. 6. L -оже-линии при бомбардировке аргона электронами (а), протонами (б) и α -частицами (в) [58]

углерода. ВЕА-расчеты дают более хорошее согласие с экспериментальными данными, чем борновское приближение.

Шнайдер и его сотрудники подвергали бомбардировке атомный пучок аргона протонами. Диапазон энергий налетающих протонов составлял $0,4 - 4 \text{ Мэв}$. Они измеряли интенсивность сателли-

тов в *K* оже-спектрах [56]. На рис. 7 изображены результаты для аргона, наряду с результатами других авторов, полученными для неона. Видно, что относительная интенсивность спутников уменьшается с ростом энергии бомбардирующих протонов и стремится к значению, полученному при бомбардировке электронами с той же самой скоростью.

В работах [57, 58] разные статические газовые мишени (CO_2 , N_2 , NO , O_2 , CCl_2F_2 , Ar) облучались протонами и α -частицами. Сечения ионизации *K*- и частично *L*-оболочки определялись из оже-спектров.

Другие авторы [59, 60] определили сечения выбивания электронов и ионизации *K*-оболочки в газах N_2 , Ne и SF_6 при бомбардировке ионами H^+ , H_2^+ , He^+ и He^{++} . Получить полное объяснение результатов, используя механизм кулоновской ионизации или z^2 -скейлинга, не удается.

При бомбардировке тяжелыми ионами сечение возникновения излучения электронов растет особенно сильно в том случае, когда налетающие ионы те же самые, что и атомы мишени или близкие к ним по атомному номеру. Здесь возникает новый механизм ионизации и излучение электронов (квази-молекулярная модель, см. например, [61]). При этом не только сечение больше, но и электронный спектр оказывается более сложным. Например, разница между оже-спектрами неона, возбуждаемыми ионами F^+ и протонами, видна на рис. 8. Другие работы, посвященные этому вопросу, подробно рассмотрены, например, в [7, 12, 19].

Атомы Ne бомбардировались ионами N , O и F с энергией 1 — 2 *Мэв*. Поведение сечения возникновения оже-электронов на *K*-оболочке в зависимости от заряда, энергии и атомного номера ионов показывает, что здесь возможно справедлив механизм электронного обмена. Разница между оже-спектрами, возбужденными ионами без электронов и ионами с одним или двумя электронами, очень резкая [62].

$\text{Ne} - \text{Ne}$ -соударения были исследованы в институтах в Берлине и Орхусе [63]. Интервал энергий налетающих ионов был 45 *кэв* — 2,2 *Мэв*. Измерялось не только энергетическое распределение *K* оже-электронов, но и их угловое распределение. Было также изучено влияние возбуждения внешних оболочек на *K*-ионизацию. Интерпретация результатов была проведена на основе квазимолекулярной модели.

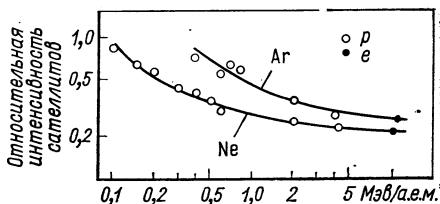


Рис. 7. Интенсивность спутников, отнесенная к интенсивности так называемых «диаграмм» — линий в *K* оже-спектре, при бомбардировке Ar и Ne мишеней протонами и электронами [56]

Некоторые из самых последних измерений, в которых

Налетающая частица		Мишень	
Тип	Энергия, Мэв	Газ	Давление, торр
<i>p</i>	0,3—2,0	CH ₄ , C ₂ H ₆ *6	—
<i>p</i>	0,4—4,0	Ag-пучок	10 ⁻³
<i>p</i> , He ⁺	1—5	Ne, N ₂ , SF ₆	1—5·10 ⁻³
<i>p</i> , α	0,5—2,6	CO ₂ , N ₂ *7	2·10 ⁻³
<i>p</i> , α	0,3—2,6	CCl ₂ F ₂ Ag	2·10 ⁻³
<i>p</i> , H ₂ ⁺ , He ⁺ , He ⁺⁺	0,75 Мэв/а.е.м.	N ₂	—
N, O, F	1—2 Мэв/а.е.м.	Ne	5—30·10 ⁻³
Ne	0,05—2,0	Ne	5·10 ⁻⁴
<i>p</i> , N, O, F, Cl	0,5—50	Ne	1—2·10 ⁻²
Ar ¹²⁺	56	CH ₄ *8-пучок	10 ⁻²
Xe ³¹⁺	200	Ne-пучок	10 ⁻²

*1 ЦЭЗ — цилиндрическое электростатическое зеркало.

*2 ЭАДФ — электростатический анализатор с двойной фокусировкой.

*3 ЭАПП — электростатический анализатор с параллельными пластинами.

*4 АДТП — анализатор с двухступенчатым тормозным полем.

Вудс и др. [64] также исследовали *K* оже-электроны неона при его бомбардировке разными ионами с большой энергией (0,5—10 Мэв H⁺, 14—21 Мэв N, 24—35 Мэв O, 3—35 Мэв F, 40—50 Мэв Cl). Зарядовые состояния ионов разные. Было найдено, что сечение почти не зависит от энергии налетающих ионов, если на *K*-оболочке налетающего иона имеется вакансия.

Ман и его сотрудники обнаружили, что интенсивность и ширина *K* оже-линий изменяются, если в мишенях атомы C и N входят в состав разных соединений. Используемыми в этой работе мишенями были: CH₄, C₂H₂, CO₂ и NH₃, N₂ и Ne (бомбардировка ионами Ag¹²⁺—56 Мэв). Ширина линий объясняется эффектом Доплера, возникающим при кулоновском разрушении молекул соединения в мишени [65].

Наконец в Дармштадте измерили *K* оже-спектры неона на ускорителе UNILAS. Налетающие частицы — ионы Xe³¹⁺ с энергией 200 Мэв. Мишенью являлся атомный пучок неона. Оже-спектры измерены для углов 90, 128, 155°. Самый интересный результат этого исследования состоит в том, что вопреки ожиданиям оже-спектры весьма просты. Линии спектра определяются высоко возбужденными состояниями атомов Ne [66].

Наиболее важные сведения о новых измерениях оже-спектров газовых мишеней на ускорителях приведены в табл. 2.

2. Электроны из ионов, возбужденных при прохождении через твердые мишени («beam-foil»). В этих экспериментах

Таблица 2

исследованы оже-спектры газовых мишеней на ускорителях

Оже-линии	Тип анализатора энергий электронов	Углы наблюдения эмиссии электронов, град	Литература
K	ЦЕЗ *1	20—130	[55]
K	ЭАДФ *2	90	[56]
K	ЭАПП *3	90	[59]
K	АДТП *4	90	[57]
L	АДТП *4	90	[58]
K	—	90	[60]
K	ЦЕЗ *1	132 (90—174)	[62]
K	СЭА *5, ЭАПП *3	96,6; 30, 90, 150	[63]
K	ЦЕЗ *1	0 (42), 132 (90—174)	[64]
K	АДТП *4 и СЭА *5	155	[65]
K	ЭАПП *3	90, 128, 155	[66]

*5 СЭА — сферический электростатический анализатор

*6 и C₂H₄, C₂H₂

*7 и NO, O₂, CO₂, NO, CCl₂F₂, Ne

*8 и C₂H₂, CO₂, NH₃, N₂, Ne.

мишени в большинстве случаев являются фольгами, а исследуемые электроны испускаются ионами после прохождения через фольгу.

В последнее время эту технику применяли Гренефелд и его сотрудники. Например, измерялись K оже-спектры из ионов Ne после их прохождения через C фольгу (~10 мкг/см²). Энергия ионов была 1,4 и 20 Мэв [67]. Позже [68, 69] оже-спектры регистрировались в совпадении с ионами, находящимися в разных зарядовых состояниях. Оже-спектры стали более обозримыми, анализировать их стало легче. Они сопоставили энергии и интенсивности наблюдаемых линий с расчетными значениями [70, 71] KLL-линий Li-подобных ионов Ne и получили хорошее согласие. В другом исследовании та же самая группа измерила время жизни 1s2s2p⁴P_{5/2} состояния азота, кислорода и неона из анализа автоионизационного электронного спектра. В этом эксперименте углеродные фольги бомбардировались ионами N (4 Мэв), O (5 Мэв) и Ne (10 Мэв) и измерялись интенсивности автоионизационной линии в зависимости от расстояния между фольгой и фокусом спектрометра [72].

Другая группа (Остин, шт. Техас, США) использовала не только углеродную фольгу, но и разные газы («beam-gas»; He, Ne, Ar) (табл. 3) [73—75]. Газы применялись здесь в виде атомного пучка. Были измерены оже-спектры O⁺, O²⁺, O³⁺ (3, 8, 18 Мэв, соответственно) после прохождения через разные газы. Сопоставля-

**Некоторые из самых последних измерений, в которых исследованы
испускаются из палетающих ионов**

Налетающая частица		Мишень	Вакуум в камере мишени, торр
Тип	Энергия, Мэв		
Ne O ⁺ , O ²⁺ , O ³⁺	1,4—20	C (10 мкг/см ²) He, Ne, Ar; атомный пучок *6	—
	3,8—18		1·10 ⁻⁴
C ⁺	2	C (5 мкг/см ²); атомный пучок *6	5·10 ⁻⁶
N, O, Ne	4—10	C (5—10 мкг/см ²)	—
Ne	10	C	—
Be	25—500 кэв	H ₂ , He, CH ₄ , Ne*6	10 ⁻³
B	200 кэв	CH ₄ *6	—
C	2	C (5 мкг/см ³)	—
Ne	10	C (8 мкг/см ²)	—
p	350 кэв	Mo	10 ⁻⁷
p	350—400 кэв	Nb	3·10 ⁻¹⁰
Ar	130—300 кэв	Cu, Ag	1·10 ⁻⁹

*1 ЦЭЗ — цилиндрическое электростатическое зеркало.

*2 ЭАДФ — электростатический анализатор с двойной фокусировкой.

*3 ЭАПП — электростатический анализатор с параллельными пластинами.

*4 АТП — анализатор с тормозным полем.

лись оже-спектры, полученные для ионов C⁺ с энергией 2 Мэв после прохождения через Ne (газ) и через C (фольга). Спектры приведены на рис. 9. В этих работах энергии переходов были рассчитаны в разных приближениях (см., например, [75]).

Родбро и его сотрудники [89] исследовали оже-спектры из процесса столкновения ионов Be⁺ с атомами разных газов (H₂, He, CH₄, Ne), изучая возбужденные состояния Be. Бериллий интересен тем, что представляет самую простую атомную систему, в которой возможны высоко возбужденные четырехэлектронные состояния [90].

3. Твердые мишени. Экспериментов, в которых измерялись спектры оже-электронов, возникающие при бомбардировке твердых мишеней ускоренными ионами, немного. Особенно мало информации имеется для энергии бомбардирующих ионов в несколько сот кэв (не только для оже-электронов, но и электронов, выбитых в процессе столкновения). Между тем эта область энергий очень интересна и важна. Можно надеяться, что в будущем будет проведено больше таких измерений (см., например, [44]).

Таблица 3*5

оже-спектры твердых мишеней (включая случаи, где оже-электроны после прохождения через фольгу)

Оже-линии	Тип анализатора энергий электронов	Углы наблюдения эмиссии электронов, град	Литература
K	ЦЭЗ *1	42,3	[67]
K	ЭАДФ *2	23,7	[74]
K	ЭАДФ *2	23,7	[73]
Автоиониз. эл.	ЦЭЗ *1	42,3	[72]
K	ЦЭЗ *1	42,3	[68]
K	ЭАПП *3	15, 150	[89]
K	ЭАПП *3	15	[90]
K	ЭАДФ *2	23,7	[75]
K	ЦЭЗ *1	42,3	[69]
—	ЦЭЗ *1, АТП *4	90	[76]
—	АТП *4	90	[77]
—	—	—	[79]

*5 В первой части таблицы приведены эксперименты, в которых электроны излучаются налетающими ионами после прохождения через мишень («beam-foil»).

*6 Излучаются электроны ионами после прохождения через газовую мишень («beam-gas»).

Мускет и Бауер [76, 77] исследовали выход электронов и оже-спектры от поверхности мишеней из Mo и Nb при бомбардировке ее протонами с энергией 350 и 30—400 кэв. Вурц и Тапп бомбардировали дейтонами нержавеющей сталь [78], а Крюгер и др. [79] облучали ионами Ag мишеней из Ag и Cu в ускорителе.

Самым важным фактором в этих экспериментах было достижение высокого вакуума. Вблизи мишени он был выше, чем 10^{-7} торр [76], и $3 \cdot 10^{-10}$ торр [77].

4. Обсуждение. В табл. 2 и 3 указаны параметры самых последних измерений, относящихся к оже-электронам, вылетающим из мишени ускорителей. В табл. 3 приведены данные, относящиеся к твердым мишеням. В первой части таблицы приведены эксперименты, в которых оже-электроны были исследованы из ионов, прошедших через твердую фольгу, а в некоторых случаях через газовый пучок.

В последнее время тяжелые ионы все чаще применяются в качестве налетающих частиц и все чаще используются твердые мишени, особенно в методе «beam-foil». Следует отметить, что описа-

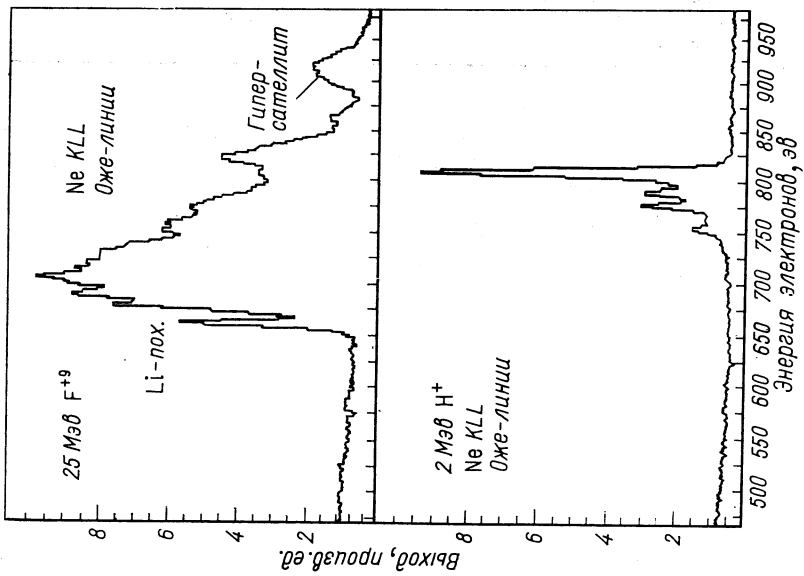


Рис. 8. Спектры оже-электронов при бомбардировке протонами и ионами F^{9+} [62]

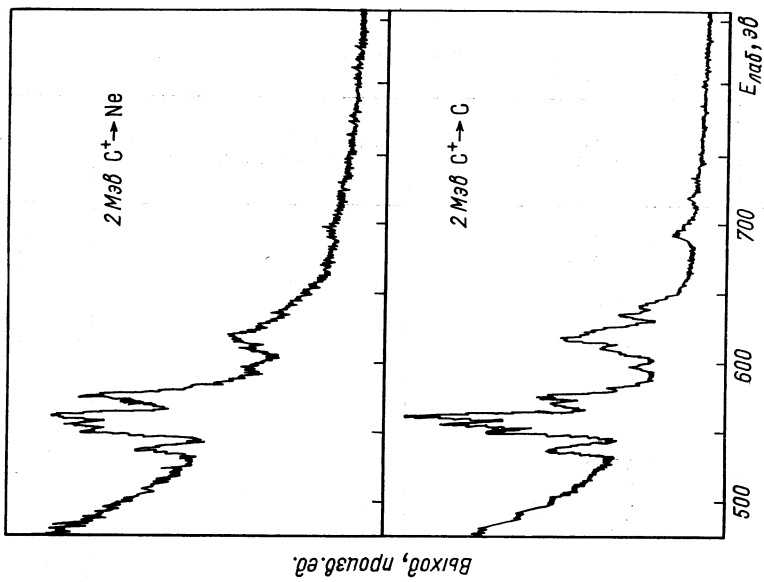


Рис. 9. Оже-спектры из C^{+} ионов с энергией 2 Мэв, прошедших через Ne (газ) и C (фольга; 5 $\mu\text{мг}/\text{см}^2$) [73]

ние столкновений тяжелых ионов в рамках борновского приближения или ВЕА-теории приводят к неудовлетворительным результатам. По-видимому, необходим подход типа квазимолекулярной модели.

4. ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Имеется немало областей, где данные, полученные в рассмотренных исследованиях, не только полезны, но и необходимы. Здесь можно назвать такие области как дозиметрия, явления в верхних слоях атмосферы и в плазме, которые важны с точки зрения получения энергии в термоядерных реакциях.

Одно из самых интересных применений — анализ поверхностей. Хорошо известно (см., например [80, 81]), что рентгеновское излучение из мишеней, облученных тяжелыми ионами (чаще всего протонами) в ускорителях, широко применяется при анализе образцов на наличие примесей, особенно в поверхностном слое ($\sim 0,1 - 100$ мкм). В последнее время этим методом проведены даже анализы по глубине, т. е. измерены концентрации некоторых элементов в слоях образца на разных расстояниях от поверхности (см., например, [82—84]).

С другой стороны, в настоящее время оже-спектроскопия с освобождением оже-электронов при бомбардировке электронами с энергией в несколько кэв, является очень распространенным методом анализа поверхности (от монослоя до максимум 100 \AA) (см., например, [85, 86]).

Таблица 4

Сопоставление трех методов анализа поверхности, основанные на бомбардировке протонами

Метод	Изучение рентгеновского излучения (PIXE)	Резерфордское рассеяние (RBS)	Изучение оже-электронов (PIAES)
Анализируемые элементы	$Z \geq 4$	$Z \geq 3$	$Z \geq 6$
Идентификация элементов	очень хорошо	хорошо	очень хорошо
Чувствительность (в монослое)	$\sim 0,1$	$0,001-100$	$\sim 0,02$
Глубина, (\AA)	$\sim 10^4$	$\sim 10^4$	~ 30
Информация о химической структуре	нет	нет	да
Результаты	абсолютные	абсолютные	относительные
Анализ концентрации в зависимости от глубины	да	да	да
Мультиэлементный характер	да	нет	да

Оже-анализ, основанный на применении протонов или тяжелых ионов в ускорителях, в некоторых отношениях может оказаться более удобным и совершенным. Так, глубину проникновения протонов в материал можно определить более точно, чем при использовании электронов. Поэтому возможность для количественного анализа здесь более благоприятная [76].

Мускет и Бауер не только провели такой анализ с помощью протонов (100—400 кэВ), но и сопоставили важные характеристики этого метода с другими методами по анализу поверхностей (табл. 4 [87]). Гренефельд и Шпор [88] исследовали тяжелые ионы (например, Ne) в качестве налетающих частиц в таких анализах. Во всех этих исследованиях необходим высокий вакуум (выше чем 10^{-7} тор).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Garcia J. D., Fortner R. J., Kavanagh T. M.—«Revs. Mod. Phys.», 1973, v. 45, p. 111.
2. Hink W.—«Rev. Phys. Appl.», 1976, v. 11, p. 31.
3. Koltay E. e.a.—«Z. Phys. A.», 1976, Bd. 278, S. 299.
4. Schlenk B. e.a.—«Acta Phys. Hung.», 1976, v. 41, p. 159.
5. Schlenk B. e.a.—«J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.», 1977, v. 10, p. 1303.
6. Ogurtsov G. N.—«Revs. Mod. Phys.», 1972, v. 44, p. 1.
7. Rudd M. E.—«Radiation Res.», 1975, v. 64, p. 153.
8. Афросимов В. В. и др.—«ЖЭТФ», 1969, т. 39, с. 159.
9. Тордеев Ю. С., Огурцов Т. Н.—«ЖТФ», 1974, т. 60, с. 2051.
9. Огурцов Т. Н.—«ЖТФ», 1973, т. 64, с. 1149.
11. Афросимов В. В. и др.—«ЖЭТФ», 1976, т. 24, с. 273.
12. Kessel O. C., Fastrup B.—«Case studies in Atomic Phys.», 1974, v. 3, p. 137.
13. Madison D. H.— In: Proc. 2nd Int. Conf. Inner Shell Ionization Phenomena. Ed Mehlborn W., Brenn R. Freiburg, 1976, p. 321.
14. Laegsgaard E., Anderson J. U., Lund M.— Coulomb Ionization of Inner Shells. Aarhus Universitet. Det Fysiske Institut, 1977.
15. Andersen J. U. e.a.—«J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.», 1976, v. 9, p. 3247.
16. Афанасьев В. П., Явор С. Я.—«ЖТФ», 1975, т. 45, с. 1137.
17. Krause M. O.— In: Atomic Inner Shell Processes. Ed. Crasemann B. Ch. 2. N.Y., Academic Press. 1975, p. 33.
18. Berényi D.—«Adv. Electr. Electron Phys.», 1976, v. 42, p. 55.
19. Rudd M. E., Macek J. H.—«Case Studies in Atomic Phys.», 1974, v. 3, p. 46.
20. Rudd M. E., Toburen L. H., Stolterfoht N.—«Atomic Data and Nucl. Data Table.», 1976, v. 18, p. 413.
21. Toburen L. H.—«Phys. Rev. A», 1971, v. 3, p. 216.
22. Toburen L. H., Wilson W. E.—«Phys. Rev. A», 1972, v. 5, p. 247.
23. Toburen L. H.—«Phys. Rev. A», 1974, v. 9, p. 2505.
24. Wilson W. E., Toburen L. H.—«Phys. Rev. A», 1975, v. 11, p. 1303.
25. Lynch D. J., Toburen L. H., Wilson W. E.—«J. Chem. Phys.», 1976, v. 64, p. 2616.
26. Macek J.—«Phys. Rev. A», 1970, v. 1, p. 235.
27. Kuyatt C. E., Jorgensen T. Jr.—«Phys. Rev.», 1963, v. 130, p. 1444.
28. Rudd M. E., Gregoire D., Crooks J. B.—«Phys. Rev. A», 1971, v. 3, p. 1635.
29. Rudd M. E., Jorgensen T. Jr.—«Phys. Rev.», 1963, v. 131, p. 666.
30. Rudd M. E., Sauter C. A., Bailey C. L.—«Phys. Rev.», 1966, v. 151, p. 20.
31. Cacak R. K., Jorgensen T. Jr.—«Phys. Rev. A», 1970, v. 2, p. 1322.
32. Crooks J. B., Rudd M. E.—«Phys. Rev. A», 1971, v. 3, p. 1628.

33. Bensen T. F. M., Vriens L.—«Physica», 1970, v. 47, p. 307.
34. Bensen T. F. M., Banks D.—«J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.», 1971, v. 4, p. 706.
35. Sabin A.—«J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.», 1969, v. 2, p. 631.
36. Stolterfoht N.—«Z. Phys.», 1971, Bd. 248, S 81.
37. Stolterfoht N.—«Z. Phys.», 1971, Bd. 248, S 92.
38. Stolterfoht N. e.a.—«Phys. Rev. Lett.», 1974, v. 33, p. 59.
39. Bruch D., Wieman H., Ingalls W. B.—«Phys. Rev.», 1973, v. 30, p. 823.
40. Manson S. T. e.a.—«Phys. Rev.», 1975, v. 12, p. 60.
41. Medved D. B., Strausser Y. E.—«Adv. Electr. Electron Phys.», 1965, v. 21, p. 101.
42. Kaminsky M. Atomic and Ionic Phenomena an Metal Surfaces. Berlin, Springer Verlag, 1965.
43. Krebs K. H.—«Forts. d. Phys.», 1968. Bd. 16, S. 419.
44. McCracken G. M.—«Reports on Prog. in Phys.», 1974, v. 38, p. 241.
45. Quarles C. A., Faulk J. D.—«Phys. Rev. Lett.», 1973, v. 31, p. 859.
46. Das J. N.—«Nuovo cimento», 1972, v. 128, p. 197.
47. Harrison K. G., Lukas M. W.—«Phys. Lett. A», 1970, v. 33, p. 142.
48. Kozuharov C. e.a.—«Phys. Rev. Lett.», 1977, v. 39, p. 540.
49. Pferdekämper K. E., Clerc H.-G.—«Z. Phys. A», 1975, Bd. 275, S. 223.
50. Pferdekämper K. E., Clerc H.-G.—«Z. Phys. A», 1977, Bd. 280, S 155.
51. Schowengerdt F. D., Smardt S. R., Rudd M. E.—«Phys. Rev. A», 1973, v. 7, p. 560.
52. Wilson W. E., Toburen L. H.—«Phys. Rev. A», 1973, v. 7, p. 1535.
53. Berry H. G.—«Phys. Scripta», 1975, v. 12, p. 5.
54. Powell C. J.—«Revs. Mod. Phys.», 1976, v. 48, p. 33.
55. Toburen L. H.—«Phys. Rev. A», 1972, v. 5, p. 2482.
56. Schneider D. e.a.—«Phys. Lett. A», 1976, v. 56, p. 189.
57. Kobayashi N. e.a.—«J. Phys. Soc. Japan», 1976, v. 40, p. 1421.
58. Maeds N. e.a.—«J. Phys. Soc. Japan», 1976, v. 40, p. 1430.
59. McKnight R. H., Rains R. G.—«Phys. Lett. A», 1976, v. 57, p. 129.
60. McKnight R. H., Rains R. G.—«Phys. Rev. A», 1976, v. 14, p. 1388.
61. Fano V., Lichten W.—«Phys. Rev. Lett.», 1965, v. 14, p. 627.
62. Woods C. W. e.a.—«Phys. Rev. A», 1975, v. 12, p. 1393.
63. Stolterfoht N. e.a.—«Phys. Rev. A», 1975, v. 12, p. 1313.
64. Woods C. W. e.a.—«Phys. Rev. A», 1976, v. 13, p. 1358.
65. Mann R., Folkmann F., Groeneveld K.-O.—«Phys. Rev. Lett.», 1976, v. 37, p. 1674.
66. Stolterfoht N. e.a.—«J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.», 1977, v. 10, p. 1281.
67. Groeneveld K. O. e.a.—«Z. Phys. A», 1975, Bd. 274, S 191.
68. Groeneveld K. O. e.a.—«Phys. Lett. A», 1976, v. 56, p. 29.
69. Schumann S. e.a.—«Phys. Lett. A», 1977, v. 60, p. 289.
70. Chen H. M., Crasemann B.—«Phys. Rev. A», 1975, v. 12, p. 959.
71. Matthews D. L., Johnson B. M., Moore C. F.—«Atomic Data and Nucl. Data Tables», 1975, v. 15, p. 41.
72. Groeneveld K. O. e.a.—«Phys. Lett. A», 1975, v. 54, p. 335.
73. Schneider D. e.a.—«Phys. Lett. A», 1975, v. 54, p. 174.
74. Johnson B. M. e.a.—«Phys. Lett. A», 1975, v. 53, p. 254.
75. Schneider D. e.a.—«Phys. Rev. A», 1977, v. 15, p. 926.
76. Musket R. G., Bauer W.—«Appl. Phys. Lett.», 1972, v. 20, p. 455.
77. Musket R. G.—«J. Vac. Sci. Technol.», 1975, v. 12, p. 444.
78. Wurtz J. L., Tapp C. M.—«J. Appl. Phys.», 1972, v. 43, p. 3318.
79. Krüger W., Scharmann A., Stiller N.—«Nucl. Instr. Meth.», 1976, v. 132, p. 483.
80. Deconninck G., Demortier G., Bodart F.—«Atomic En. Rev. », 1975, v. 13, p. 367.

81. Johansson S. A. E., Johansson T. B.—«Nucl. Instr. Meth.», 1976, v. 137, p. 473.
82. Pabst W.—«Nucl. Instr. Meth.», 1974, v. 120, p. 543.
83. Benka O., Geretschläger M., Paul H.—«J. Appl. Phys.», 1976, v. 47, p. 5090.
84. Végh J. e.a.—«Nucl. Instr. Meth.», в печати.
85. Burhop E. H. S., Asaad W. N.—«Adv. At. Mol. Phys.», 1972, v. 8, p. 163.
86. Chang C. C.—«Surface Sci.», 1975, v. 48, p. 9.
87. Musket R. G., Bauer W.—«Thin Solid Films», 1973, v. 19, p. 69.
88. Groeneveld K. O., Spohr R.—«Vakuum-Technik», 1974, jhg. 23, s. 225.
89. Rodbro M., Bruch R., Bisgaard P.—«J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.», 1977, v. 10, p. 1275.
90. Rodbro M. e.a.—«J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.», 1977, v. 10, p. 1483.
91. Каун К., Манфрасс П., Франк В.—«ЭЧАЯ», 1977, т. 8, с. 1246.
92. Groeneveld K.-O.—In: Beam-foil Spectroscopy. Ed. I. A. Sellin and D. J. Pegg. Vol. 2. New York, Plenum Press, 1976, p. 593.