

ПОЛУЧЕНИЕ, ИДЕНТИФИКАЦИЯ И СПЕКТРОСКОПИЯ
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИОНОВ Kr^{35+} И Kr^{36+}
НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Е.Д.Донец, С.В.Карташов, В.П.Овсянников

При помощи электронно-лучевого метода ионизации впервые в условиях физической лаборатории получены медленные водородоподобные ионы криптона (Kr^{35+}) и ядра криптона, полностью лишённые электронной оболочки (Kr^{36+}). Идентификация зарядности ионов произведена по характеристическому рентгеновскому излучению, возникающему при их рекомбинации на поверхности твёрдого тела. Получены предварительные экспериментальные данные об энергиях и вероятностях переходов в К-серии рентгеновского излучения для указанных случаев.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Production, Identification and Ion-at-Surface
x-Ray Spectroscopy of Kr^{35+} and Kr^{36+}

E.D. Donets, S.V. Kartashov, V.P. Ovsyannikov

Slow hydrogenlike krypton ions and bare krypton nuclei have been produced for the first time under physical laboratory conditions by the electron-beam ionization method. The ion charge states have been identified using characteristic x-ray emission arising from their recombination on a solid state surface. Preliminary data on the transition energy and transition probability in the K-band x-ray emission have been obtained for these cases.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Введение

Разработка методов получения и исследование физики высокозарядных ионов в последние годы стали весьма актуальными задачами экспериментальной физики. Это связано в первую очередь с развитием техники ускорения многозарядных ионов, получением и исследованием высокотемпературной плазмы, а также с тем, что развитие методов получения высоко-

козарядных ионов достигло такого уровня, когда стала возможной постановка экспериментальных исследований в области квантовой электродинамики сильных полей.

Из существующих источников ионов высокой зарядности наивысшую степень ионизации в настоящее время обеспечивают криогенные электронно-лучевые ионизаторы, в частности, "КРИОН-2"/1/, с помощью которого ранее были получены пучки ядер аргона / Ar^{18+} / и гелиеподобных ионов криптона и ксенона/2/.

Ниже приведены описание и результаты экспериментов по получению водородоподобных ионов и ядер криптона на ионизаторе "КРИОН-2" и предварительному исследованию спектров жесткого рентгеновского излучения, возникающего при попадании медленных ионов Kr^{35+} и Kr^{36+} на поверхность твердого тела.

1. Постановка эксперимента

Схема эксперимента изображена на рис.1. Высокозарядные ионы криптона, в частности Kr^{35+} и Kr^{36+} , генерировались в электронном пучке ионизатора "КРИОН-2". Поскольку энергия связи электронов в К-оболочке водородоподобного криптона около 17 кэВ, в ионизаторе использовался электронный пучок с энергией ~ 35 кэВ. Ток электронного пучка достигал 0,15 А, а плотность тока в нем 600 А/см^2 . Ионизатор работал в импульсном режиме со следующими параметрами:

- 1/ ток электронного пучка - непрерывный;
- 2/ инжекция низкозарядных ионов криптона в электронный пучок в течение ~ 3 мс;
- 3/ удержание ионов в пучке в течение 1 с и более для достижения ими зарядности +35 и +36 за счет электронного удара пучковых электронов;
- 4/ вывод ионов из электронного пучка в продольном направлении и высадка их на мишень в течение $0,1 \div 3$ мс.

Ионы высаживались на мишень из меди или тонкой алюминиевой фольги. При этом энергия ионов могла изменяться в пределах $0,1 \div \approx 20 \cdot q$ кэВ, где q - зарядность иона. В результате деионизации высо-

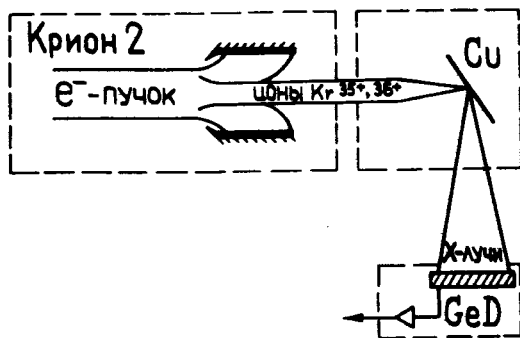


Рис.1. Схема эксперимента.

козарядных ионов криптона возникало рентгеновское излучение, которое лишь в случае попадания на мишень ионов с зарядностью +35 или +36 могло содержать компоненты высокой энергии $/E_x \geq 12,6 \text{ кэВ}/$, являющиеся результатом заполнения К-вакансии в электронной оболочке ионов криптона. К-серия этого излучения измерялась с помощью полупроводникового спектрометра с детектором на основе сверхчистого германия $/GeD/$, расположенного под углом $\sim 90^\circ$ к направлению ионного пучка. При регистрации спектра излучения разрешалась запись только тех событий, которые происходили в течение времени вывода ионов из электронного пучка, что существенно улучшало отношение сигнал/фон.

Аналогичная методика применялась ранее при изучении процесса деионизации ионов $Ar^{17+}/3/$, получаемых на ионизаторе "КРИОН-2".

Калибровка энергетической шкалы спектрометра выполнялась по линиям К-серий характеристического рентгеновского излучения Cu , Rb и Sr , возбуждаемого электронами.

2. Экспериментальные результаты

Жесткое рентгеновское излучение с энергией $E_x \geq 12,6 \text{ кэВ}$ начинало регистрироваться детектором лишь при времени удержания ионов криптона в электронном пучке $/\tau_i/$ более 1 с, что удовлетворительно соответствует величине эффективного поперечного сечения образования ионов Kr^{35+} из ионов Kr^{34+} под действием электронного удара, около

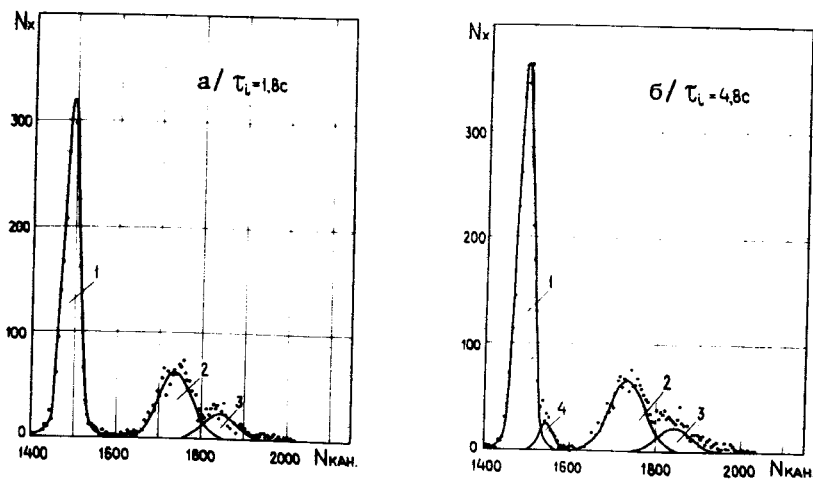


Рис. 2. Спектры К-серий рентгеновского излучения, полученные при высадке на мишень а/ ионов Kr^{35+} и б/ смеси ионов Kr^{35+} и Kr^{36+} .

10^{-22} см² при энергии электронов ~ 35 кэВ. При увеличении времени удержания интенсивность указанного излучения нарастала и при $\tau_i \approx 2$ с достигала 10^6 1/цикл в полный телесный угол. На рис.2а представлен спектр этого излучения, полученный при $\tau_i = 1,8$ с. При дальнейшем увеличении времени удержания начиналось изменение формы спектра. В частности, начинало появляться излучение с энергией, примерно на 0,5 кэВ выше энергии основного компонента. На рис.2б представлен спектр рентгеновского излучения, полученный при удержании ионов в пучке в течение 4,8 с.

Полученные спектры излучения разложены в первом случае на 3, а во втором - на 4 компонента, для которых определены следующие наиболее вероятные значения энергии:

1 - $(12934,7 \pm 3,1)$ эВ,

2 - 15090 эВ,

3 - 15980 эВ,

4 - $(13438,2 \pm 34,8)$ эВ.

Определены также дисперсии и относительные интенсивности компонентов.

3. Качественная интерпретация результатов

Наблюдаемую картину жестких спектров излучения ионов Kr^{35+} , Kr^{36+} , как и в случае $Ar^{17+/3,4,5/}$, можно объяснить, предположив, что переходы электронов, вызывающие излучение, происходят при различных заселенностях оболочек электронами, захваченными ионом с поверхности твердого тела. Иными словами, эти переходы совершаются на различных этапах превращения соответствующего высокозарядного иона в атом криптона.

Действительно, в таком случае первый компонент с энергией 12934 эВ представляет собой K_{α} -излучение, возникающее при заселении единственной имеющейся К-вакансии электроном из заполняющейся L-оболочки, т.е. для случая Kr^{35+} . Сравнение с энергиями диаграммных линий криптона $K_{\alpha 1}$ и $K_{\alpha 2}$, равными соответственно 12650,7 эВ и 12599,0 эВ/5/, показывает, что в среднем энергия K_{α} -излучения в нашем случае смещена в сторону больших значений на 300 эВ. С другой стороны, сравнение с энергиями переходов между состояниями 2P и 1S в гелиеподобном криптоне^{6/} показывает, что она смещена в сторону меньших значений в среднем на величину ~ 150 эВ.

Разница энергий между излучением гелиеподобного криптона и диаграммными линиями, которая составляет ~ 450 эВ, обусловлена эффектом экранирования кулоновского поля ядра, в основном 7 электронами L-оболочки и заполненной M-оболочкой. При этом можно предположить, что эффект экранирова-

ния за счет всей М-оболочки примерно равен эффекту от одного L-электрона. В таком случае указанное смещение в 150 эВ можно рассматривать как свидетельство того, что в случае деионизации Kr^{35+} в момент испускания K_{α} -излучения среднее число L-электронов равно $\sim 2,7$, включая электрон, совершающий переход в К-оболочку, и при этом М-оболочка в основном заполнена. В настоящее время у нас нет оснований для постулирования какой-либо определенной формы функции распределения числа L-электронов при среднем 2,7, ясно лишь, что это распределение не может быть δ -функцией. В таком случае дисперсия первого компонента К-излучения должна быть выше, чем аппаратурная дисперсия ближайшей по энергии калибровочной линии K_{α} -излучения Rb, что и наблюдалось в эксперименте.

Естественно считать, что 2-й и 3-й компоненты представляют собой K_{β} -излучение, причем за 2-й компонент /рис.2а/, выделенный достаточно определенно, ответственно заселение К-вакансии электронами из М-оболочки, а за 3-й - из более высоколежащих оболочек. Значительное смещение линий K_{β} -излучения в сторону высоких энергий относительно диаграммных свидетельствует о малой заселенности оболочек в момент испускания K_{β} -излучения, а их большая дисперсия - о широком наборе различных заселенностей.

4-й компонент с энергией 13438 эВ представляет собой K_{α} -излучение, возникающее при заселении одной из двух имеющихся К-вакансий электроном из заполняющейся L-оболочки, т.е. для случая Kr^{36+} . Сравнение с энергией линии K_{α_1} водородоподобного криптона, равной 13509 эВ/8/, показывает, что энергия этого компонента смещена в область меньших значений на величину (71 ± 35) эВ, т.е., значительно меньше, чем в случае Kr^{35+} по сравнению с энергией излучения гелиеподобного криптона, где это смещение составляло 150 эВ. Это означает, что переход, сопровождающий K_{α} -излучение в случае Kr^{36+} , совершается при меньшей в среднем заселенности L- и М-оболочек, что легко объясняется наличием двух К-вакансий и, следовательно, примерно в 2 раза большей вероятностью указанного перехода.

Особенностью наблюдаемых спектров К-излучения в сравнении с диаграммными является также существенно большее отношение интенсивности K_{β} -излучения к интенсивности K_{α} -излучения, что подтверждает сделанное ранее предположение/3/ о том, что при деионизации медленных высокозарядных ионов на поверхности твердого тела заполнение электронных оболочек идет в основном сверху через захват электронов на высоколежащие электронные орбиты ионов.

Заключение

Исследования превращения в атомы медленных высокозарядных ионов при их соприкосновении с поверхностью твердого тела, начатые ранее^{2,3} и продолженные в данной работе, представляются весьма перспективным направлением в атомной физике. В таких процессах образуются и распадаются неисследованные ранее состояния атомов, в первую очередь многократно возбужденные, которые на ранних стадиях можно, по удачному определению академика А.М.Балдина, охарактеризовать как сверхвозбужденные.

Таким образом, в сочетании с классической спектроскопией атомов при их возбуждении заряженными частицами и фотонами и beam-foil-спектроскопией спектроскопия ионов на поверхности твердого тела /ion-at-surface spectroscopy/ может обеспечить существенно более полное описание возможных энергетических состояний атомов и ионов, а также способов и вероятностей их распада.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность академику А.М.Балдину за всестороннюю поддержку данного направления исследований. Авторы также признательны В.В.Сальникову за участие в подготовке экспериментов.

Литература

1. Донец Е.Д., Овсянников В.П. ОИЯИ, Р7-9799, Дубна, 1976.
2. Donets E.D. Physica Scripta, 1983, v.T3, p.11.
3. Донец Е.Д. и др. ОИЯИ, Р7-83-627, Дубна, 1983.
4. Donets E.D. Nucl.Instr. and Meth. in Phys.Res., 1985, B9, p.522.
5. Datz S. Physica Scripta, 1983, v.T3, p.79.
6. Bearden J.A. Rev. of Mod.Phys., 1967, 39,78, p.87.
7. Briand J.P. et al. Z.Phys.A., 1984, 318, p.1.
8. Mohr P. Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1983, 29, p.453.

Рукопись поступила 11 сентября 1986 года.