

Объединенный  
институт  
ядерных  
исследований  
Дубна

6282/83

P7-83-627

Е.Д.Донец, В.А.Трифонов\*, Г.А.Тутин\*,  
Г.Щорнак, В.П.Эйсмонт\*

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ  
ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ,  
ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ ПАДЕНИИ  
МЕДЛЕННЫХ ВОДОРОДОПОДОБНЫХ ИОНОВ  
АРГОНА НА ТВЕРДЫЕ МИШЕНИ

Направлено в "Журнал экспериментальной  
и теоретической физики"

\*Радиевый институт им. В.Г.Хлопина, Ленинград.

1983

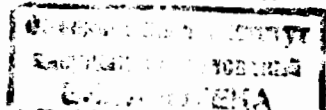
Успехи и дальнейший прогресс в ускорении тяжелых заряженных частиц в значительной мере связаны с развитием источников ионов, в частности, с повышением эффективного заряда поставляемых ими ионов. В настоящее время наиболее глубокой степени ионизации атомов удается добиться в источниках электронно-лучевого типа<sup>1,2/</sup>. С помощью таких источников получены голые ядра С, N, O, Ne, Ar, а также ионы Kr<sup>34+</sup> и Xe<sup>50+ /3-7/</sup>.

Достижение более высокой степени ионизации тяжелых атомов требует, наряду с решением других задач, совершенствования методов диагностики зарядового состояния ионов, производимых источником. Одним из таких методов может быть регистрация характеристического излучения ионного пучка. С этой целью были начаты измерения спектров рентгеновских лучей высокозарядных ионов аргона<sup>8/</sup>, выходящих из источника "Крион-2" ОИЯИ<sup>1/</sup>. Имелось в виду также, что спектральный состав излучения, испускаемого при столкновении с мишенью высокоионизованных атомов с кинетической энергией 10 кэВ, представляет большой интерес и с точки зрения физики взаимодействия многозарядных ионов с веществом, и для выяснения механизма разрядки возбужденных состояний, образовавшихся в результате взаимодействия ионов. Такие спектроскопические данные необходимы также для оценки роли радиационных потерь в энергетическом балансе термоядерной плазмы.

Целью настоящей работы являлось измерение спектра характеристического излучения медленных ионов Ar<sup>17+</sup>, падающих на твердые мишени.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Импульсный пучок высокозарядных ионов Ar вытягивался из ионного источника "Крион-2" и направлялся на твердую мишень, расположенную в вакуумной камере под углом 84° к падающему пучку. Под углом 90° к пучку ионов в стенке вакуумной камеры было вмонтировано бериллиевое окно толщиной 100 мкм, через которое можно без значительного ослабления пропускать рентгеновское излучение, возникающее в области мишени из ионов Ar. За бериллиевым окном на расстоянии ~2 см устанавливался детектор рентгеновского излучения на основе сверхчистого германия фирмы Princeton Gamma-Tech. с площадью чувствительной поверхности 100 мм<sup>2</sup> и толщиной чувствительного слоя 7 мм. При постоянной времени формирования спектрометрического тракта 4 мкс достигалось энергетиче-



ческое разрешение /полная ширина распределения на половине высоты/ 215 эВ при энергии фотона  $E_x = 3$  кэВ. Спектрометрический тракт включал в себя неперегружающийся усилитель типа PGT340, режектор наложенных импульсов, стретчер, многоканальный амплитудный анализатор NTA1024 /тип 31024/.

Калибровка энергетической шкалы спектрометра производилась по пикам флуоресценции Cl, Ar, Ca, возбуждаемой с помощью источника мягкого рентгеновского излучения на основе  $^{55}\text{Fe}$ . Для контроля стабильности спектрометрического тракта на край детектора помещался слабый источник  $^{55}\text{Fe}$ . Пик флуоресценции Mn, образующегося в результате К-захвата из  $^{55}\text{Fe}$ , использовался также для калибровки.

Чтобы уменьшить число наложенных друг на друга импульсов в спектрометре и увеличить скорость набора информации, длительность ионного импульса источника была повышена до  $\sim 3$  мс /от 50 мкс в обычном режиме работы/. При непрерывной во времени регистрации в интересующей нас области энергий наблюдался интенсивный фон, представляющий собой сплошной спектр тормозного излучения электронов, попадающих на мишень. Этот фон связан с особенностями работы самого ионного источника. Для улучшения отношения сигнал/фон было введено временное управление амплитудным анализатором с помощью внешних импульсов, поступающих со схемы управления источником ионов. Таким путем регистрировалось только излучение, возникающее в момент прихода импульсов ионов на мишень. Отношение сигнал-фон во временном окне составляло  $\sim 40$ . Форма спектра фоновое тормозное излучение измерялась в отдельных сериях. Соответствующим образом пронормированный фон вычитался из рабочего спектра.

Зарядовое распределение ионов Ar в падающем пучке определялось временем их удержания в ловушке ионного источника<sup>3/</sup>. При времени удержания, меньшем, чем требуется для получения ионов  $\text{Ar}^{17+}$ , рентгеновского излучения в области К-серии Ar не возникало. Режим работы источника "Крион-2" был установлен таким образом, чтобы ионы  $\text{Ar}^{17+}$  составляли  $\sim 15\%$  от общего числа выпускаемых ионов Ar /время удержания 300 мс/.

Для проверки предположения о том, что вклад в рентгеновское излучение в области К-серии Ar может возникать при бомбардировке электронами атомов Ar, имплантированных в мишени, был проведен эксперимент, когда временное окно устанавливалось после прихода ионного импульса, но при наличии электронного тока в источнике. Излучения, отличного от тормозного, в этом эксперименте обнаружено не было.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Основные измерения проводились с мишенью из металлического бериллия толщиной 100 мкм при энергии падающих ионов  $\text{Ar}^{17+}$  420 эВ/нукл. / $v = 2,8 \cdot 10^7$  см/с/.

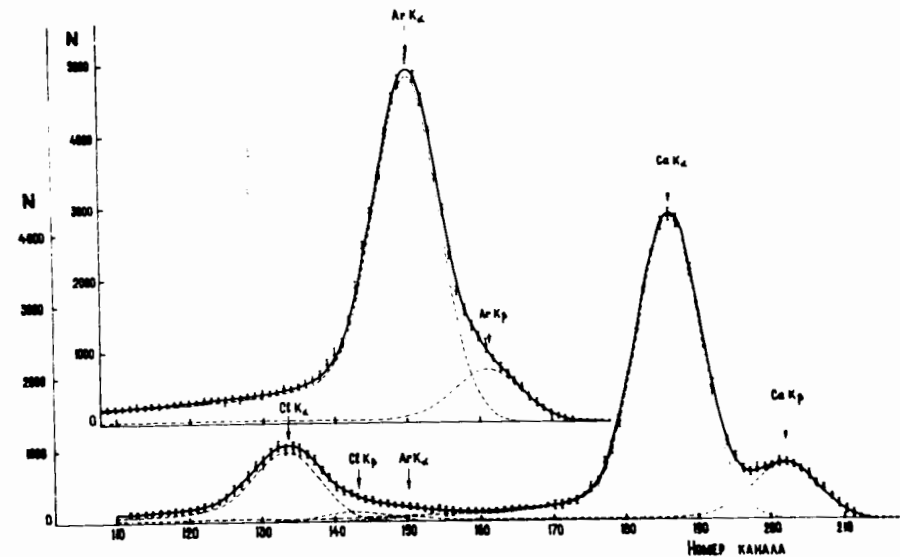


Рис.1. Калибровочные спектры характеристического рентгеновского излучения. Пунктиром показаны результаты разложения спектров на отдельные линии.

Обработка калибровочных и рабочих спектров велась на ЭВМ с использованием программы обработки спектров "ПРОСПЕКТ", разработанной в ЛИЯФ АН СССР им. Б.П.Константинова<sup>9/</sup>. Форма аппаратной линии спектрометра аппроксимировалась суммой гауссиана, фоновой ступеньки и экспоненциального хвоста в сторону меньших энергий. Параметры формы линии подбирались для калибровочных линий с энергиями 2622, 2957, 3691 и 5895 эВ и интерполировались в промежуточную область энергий. Пример калибровочных спектров показан на рис.1.

Полученный экспериментальный спектр К-серии характеристического излучения Ar, возникающего при падении ионов  $\text{Ar}^{17+}$  на бериллиевую мишень, показан на рис.2. Измеренный спектр был разложен на три компонента, при этом независимо варьировались веса, положения и полуширины компонентов. Результаты разложения представлены в таблице. В первой колонке указан номер компонента, во второй - его средняя энергия, в третьей - полуширина, в четвертой - площадь пика.

Первый компонент ответствен за переходы между состояниями с главными квантовыми числами  $2 \rightarrow 1$  / $K_{\alpha}$ -излучение/. Его средняя энергия на  $69 \pm 11$  эВ больше энергии  $K_{\alpha}$  излучения нейтрального Ar /2957 эВ/. Второй компонент, вероятнее всего, соответствует переходам  $3 \rightarrow 1$  / $K_{\beta}$ -излучение/. Средняя энергия его на  $215 \pm 40$  эВ

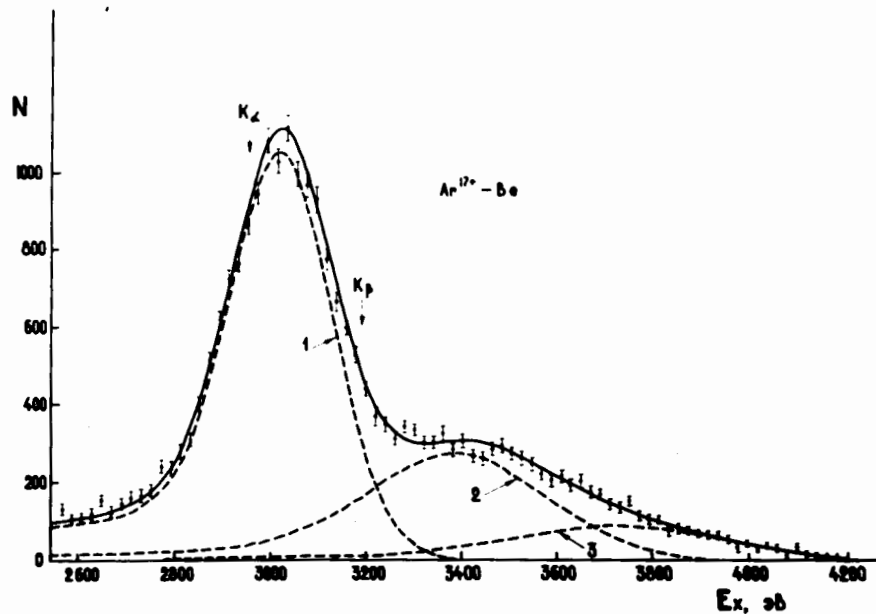


Рис.2. Спектр характеристического излучения, возникающего при падении ионов  $Ar^{17+}$  со скоростью  $v = 2,8 \cdot 10^7$  см/с на бериллиевую мишень. Пунктиром с соответствующими цифрами представлены компоненты разложения: 1 -  $2 \rightarrow 1$ , 2 -  $3 \rightarrow 1$ , 3 -  $4,5 \dots \rightarrow 1$ . Положения нормальных  $K_{\alpha}$  и  $K_{\beta}$  - линий указаны стрелками.

Таблица

| 1   | 2              | 3             | 4               | 5             |
|-----|----------------|---------------|-----------------|---------------|
| $i$ | $\bar{E}_i$    | $w_i$         | $S$             | $w_i$ соб.    |
|     | эВ             | эВ            |                 | эВ            |
| 1   | 3026 $\pm$ 11  | 255 $\pm$ 7   | 16800 $\pm$ 440 | 136 $\pm$ 8   |
| 2   | 3410 $\pm$ 40  | 400 $\pm$ 90  | 6600 $\pm$ 1400 | 340 $\pm$ 90  |
| 3   | 3750 $\pm$ 170 | 480 $\pm$ 140 | 2400 $\pm$ 1500 | 420 $\pm$ 140 |

больше энергии  $K_{\beta}$  излучения нейтрального  $Ag$  /3191 эВ/. Третий компонент, по-видимому, обязан своим происхождением переходам из состояний с главным квантовым числом  $d \geq 4$  в состояние с  $d = 1$ . С учетом поглощения рентгеновского излучения в бериллиевых окнах,

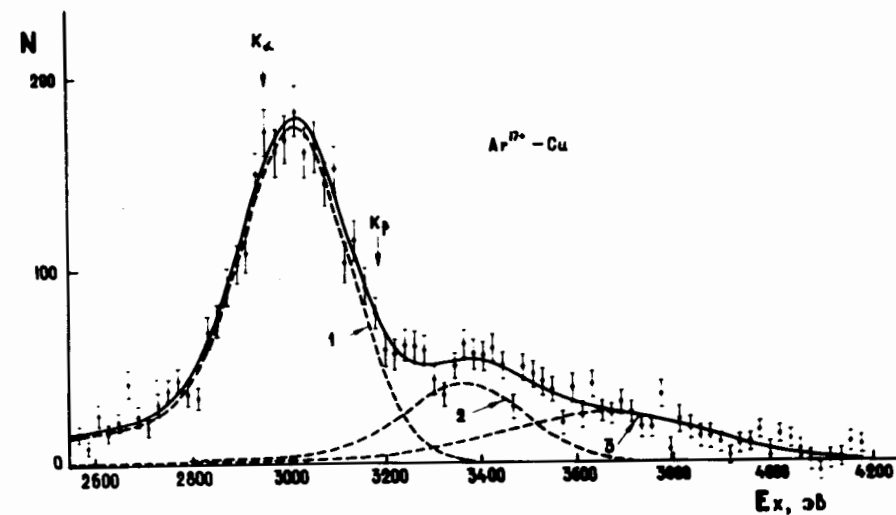


Рис.3. То же, что на рис.2, но с медной мишенью.

слое воздуха и в мертвом слое детектора, отношение интенсивностей  $K_{\beta}$  и  $K_{\alpha}$  излучения в нашем случае составляет  $I(K_{\beta})/I(K_{\alpha}) = 0,30 \pm 0,08$ . В пятой колонке таблицы представлена полуширина линий характеристического излучения, полученная при вычитании аппаратной дисперсии из полной дисперсии компонента.

Были также проведены эксперименты на мишенях из кремния и меди. В пределах ошибок эксперимента спектры характеристического излучения ионов  $Ag$ , падающих на эти мишени, не отличаются от спектра, полученного с бериллиевой мишенью. Спектр, полученный с медной мишенью, показан на рис.3. Уменьшение энергии падающих ионов до  $\sim 50$  эВ/нуклон также не привело к заметному изменению формы спектра.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Теоретические расчеты сдвига энергий  $K_{\alpha}$  и  $K_{\beta}$  излучения и отношения  $I(K_{\beta})/I(K_{\alpha})$  для ионов  $Ag$  различной степени ионизации проведены в работе Бхаллы<sup>10</sup>. Результаты нашего эксперимента свидетельствуют, что средние энергии компонентов  $K_{\alpha}$  и  $K_{\beta}$  и отношение их интенсивностей ( $I(K_{\beta})/I(K_{\alpha})$ ) соответствуют радиационным переходам в ионе  $Ag$  с одной  $K$ -вакансией, четырьмя  $L$ -вакансиями и несколькими  $2-3$  вакансиями в  $M$ -оболочке. Полуширины линий характеристического излучения  $K_{\alpha}$  и  $K_{\beta}$  соответствуют полному набору возможных электронных конфигураций иона  $Ag$  с разной степенью заполненности  $L$ -оболочки /от 0 до 8  $L$ -вакансий/.

Понять наблюдаемую картину спектра можно в рамках следующих представлений. При падении ионов  $Ar^{17+}$  на твердую мишень происходит быстрая  $\sim 10^{-17}$  с/нейтрализация ионного заряда электронами проводимости мишени. При этом электроны заселяют оболочки с большим главным квантовым числом,  $n \sim q$  /  $q$  - заряд иона/, по энергии связи приблизительно соответствующие энергии связи электронов проводимости в материале мишени. Далее идет разрядка образующихся многократно возбужденных состояний двумя конкурирующими процессами: оже- и радиационными переходами. При  $Z = 18$  /  $Z$  - заряд ядра иона/ конкуренция на начальных ступенях каскада идет в пользу оже-процесса и лишь на последней ступени становятся существенными вероятности радиационных переходов /вероятности оже-переходов слабо зависят от  $n$ , а вероятности радиационных переходов в водородоподобном ионе при усреднении по  $l$ ,  $\approx n^{-4,5}$ /. Радиационный переход в состояние с  $n = 1$  происходит с наибольшей вероятностью в конфигурации, когда оже-процессом заполнена значительная доля вакансий в L-оболочке, причем дисперсия числа вакансий велика. Так как наблюдаемое в нашей работе излучение, по-видимому, возникает на последней стадии разрядки возбужденных состояний ионов  $Ar$ , то понятен факт независимости формы спектра /в пределах ошибок эксперимента/ от материала мишени и энергии падающих ионов.

Для проверки правильности изложенных представлений интересно провести измерения с ионами с другим  $Z$ . С увеличением  $Z$  падающего иона излучение будет эффективнее конкурировать с оже-переходами /из-за  $\sim Z^4$  вероятности радиационных переходов/. и переходы  $2 \rightarrow 1$  будут происходить при меньшей /в среднем/ степени заселенности L-оболочки, то есть будут относительно сильнее смещены от положения нормальных  $K_{\alpha}$ -линий. В описанной экспериментальной ситуации интерес представляет также определение выходов флуоресценции, которые могут сильно зависеть от степени заселенности внутренних оболочек.

Авторы благодарны Ю.В.Мартыненко и Ю.Н.Явлинскому за плодотворные обсуждения, Г.Е.Щукину за помощь в освоении программы "ПРОСПЕКТ", А.П.Батожку за помощь в проведении расчетов, В.В.Сальникову, Е.Г.Лебедевой и С.А.Энесблату за помощь в измерениях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Донец Е.Д., Овсянников В.П. ОИЯИ, Р7-80-515, Дубна, 1980.
2. Arianer J. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1981, Ns-28, p.1018.
3. Донец Е.Д., Овсянников В.П. ОИЯИ, Р7-10438, Дубна, 1977.
4. Донец Е.Д., Овсянников В.П. ОИЯИ, Р7-10780, Дубна, 1977.
5. Блинные Н.Н. и др. ОИЯИ, Р7-12409, Дубна, 1979.
6. Донец Е.Д., Овсянников В.П., Дудников В.Г. ОИЯИ, Р7-12905, Дубна, 1979.

7. Arianer J. et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1979, NS-26, p.3713.
8. Трифонов В.А. и др. Препринт Радиевого института им. В.Г.Хлопина. РИ-159, Л., 1982.
9. Кабина Л.П., Кондуков И.А., Федорова Э.И. Препринт ЛИЯФ, № 123, Л., 1974.
10. Bhalia C.P. Phys.Rev., 1973, A8, p.2877.

Рукопись поступила в издательский отдел  
2 сентября 1983 года.

## НЕТ ЛИ ПРОВЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

|               |   |            |
|---------------|---|------------|
| D3-11787      | Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.   | 3 р. 00 к. |
| D13-11807     | Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.  | 6 р. 00 к. |
|               | Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/   | 7 р. 40 к. |
| D1,2-12036    | Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978  | 5 р. 00 к. |
| D1,2-12450    | Труды XIII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.  | 3 р. 00 к. |
|               | Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/  | 8 р. 00 к. |
| D11-80-13     | Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979            | 3 р. 50 к. |
| D4-80-271     | Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.  | 3 р. 00 к. |
| D4-80-385     | Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.  | 5 р. 00 к. |
| D2-81-543     | Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981  | 2 р. 50 к. |
| D10,11-81-622 | Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980                      | 2 р. 50 к. |
| D1,2-81-728   | Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.  | 3 р. 60 к. |
| D17-81-758    | Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.   | 5 р. 40 к. |
| D1,2-82-27    | Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.  | 3 р. 20 к. |
| P18-82-117    | Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981. | 3 р. 80 к. |
| D2-82-568     | Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.  | 1 р. 75 к. |
| D9-82-664     | Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.   | 3 р. 30 к. |
| D3,4-82-704   | Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.   | 5 р. 00 к. |

Заказ на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:  
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79  
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Донец Е.Д. и др. P7-83-627  
Измерение спектров характеристического излучения, возникающего при падении медленных водородоподобных ионов аргона на твердые мишени

Выполнены измерения жесткой части спектра характеристического излучения, возникающего при падении ионов  $Ar^{17+}$  на мишени из  $Be(BeO)$  и  $Cu(CuO)$  при значениях энергии  $\sim 500$  эВ/нукл. и  $\sim 50$  эВ/нукл. Для получения пучка ионов  $Ar^{17+}$  использован криогенный электронно-лучевой ионизатор, регистрация спектров излучения производилась с помощью детектора на основе сверхчистого германия. Обнаружено, что переходы в состояние 1S происходят при значительном заполнении вакансий в L-оболочке /в среднем 4 вакансии/. Вид спектра в пределах ошибок не зависит ни от скорости ионов /в указанных пределах/, ни от материала применявшихся мишеней. Обсуждается возможный механизм заполнения оболочек в высокозарядных ионах.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Donets E.D. et al. P7-83-627  
The Measurement of Characteristic X-Ray Spectra of Slow Hydrogen Argon Ions on Solid Targets

The measurements of K-(shell) X-rays arising when  $Ar^{17+}$  ions are incident on  $Be(BeO)$  and  $Cu(CuO)$  targets under energy of about 500 eV/nuclei and 50 eV/nuclei are performed. The cryogenic electron beam ionizer was used for production of  $Ar^{17+}$  beam and x-rays were detected by means of a super-pure Ge spectrometer. It has been found that transitions to the 1s-states occur under considerable population of L-shell (4 vacancies on the average). K-(shell) x-ray spectra do not depend in the error limits neither on ion velocity nor on material of the targets used. Possible processes of shell populations in highly charged ions are discussed.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой