

ОРДЕНА ЛЕНИНА АКАДЕМИЯ НАУК УССР  
ОРДЕНА ЛЕНИНА ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ХФТИ 74-22

Ю.З. ЛЕВЧЕНКО, Л.И. ПИВОВАР, Г.Д. ТОЛСТОЛУЦКАЯ

ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА МЕДЛЕННЫХ ИОНОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ  
ПРИ ИОНИЗАЦИИ *He*, *Ne*, *Ar*, *Kr*,  $H_2$  и  $N_2$  ИОНАМИ  
ГЕЛИЯ, ЛИТИЯ, АЗОТА, НЕОНА, АРГСНА И КРИПТОНА  
С ЭНЕРГИЕЙ 200 + 2000 КЭВ

Харьков 1974

ОРДЕНА ЛЕНИНА АКАДЕМИЯ НАУК УССР  
ОРДЕНА ЛЕНИНА ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ХФТИ 74-22

Ю.З. ЛЕВЧЕНКО, Л.И. ПИВОВАР, Г.Д. ТОЛСТОЛУЦКАЯ

ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА МЕДЛЕННЫХ ИОНОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ  
ПРИ ИОНИЗАЦИИ *He*, *Ne*, *Ar*, *Kr*,  $H_2$  и  $N_2$  ИОНАМИ  
ГЕЛИЯ, ЛИТИЯ, АЗОТА, НЕОНА, АРГОНА И КРИПТОНА  
С ЭНЕРГИЕЙ 200 + 2000 КЭВ

Харьков 1974

В работе исследовались процессы ионизации атомов и молекул газов быстрыми ионами с зарядом от одного до трех. Для образующихся медленных частиц получены зарядовые распределения при однократных столкновениях в широком диапазоне энергий налетающих ионов. На основании этих данных и имеющихся в литературе данных по полным сечениям можно получить парциальные сечения образования медленных ионов.

Проводится сопоставление полученных данных с имеющимися теоретическими расчетами и показаны различные случаи применимости первого и второго борновского приближения.

## В В Е Д Е Н И Е

Ионизация атомов и молекул среди является одним из основных процессов, сопровождающих прохождение быстрых атомных частиц через вещество.

Наиболее подробно изучена ионизация атомов и молекул газов в области скоростей относительного движения  $v < v_0 = e^2/\hbar = 2,2 \cdot 10^8$  см/сек.

В области скоростей относительного движения  $v > v_0$  в широком энергетическом интервале и для большого набора сталкивающихся партнеров измерены лишь полные поперечные сечения образования медленных положительных ионов (каждущиеся сечения)  $\sigma_+ = \sum_{n=1}^{n_{max}} n \cdot \sigma_n$  и поперечные сечения образования свободных электронов (полные сечения ионизации)  $\sigma_-$  [1-5].

Такие данные важно дополнить исследованием зарядового распределения медленных ионов. Эта дополнительная информация весьма полезна как с точки зрения выяснения роли многоэлектронных процессов в однократных столкновениях, формирования представлений о механизме ионизационных столкновений и дальнейшего развития теории, так и с прикладной точки зрения в связи с необходимыми расчетами лабораторных и промышленных устройств с пучками высокоэнергетических ионов, получающих в настоящее время все более широкое использование.

Вместе с тем систематические исследования состава медленных ионов при ионизации газов тяжелыми налетающими частицами с массой  $M \gg 4 M_p$  ( $M_p$  - масса протона) и энергией относительного движения  $E > 180$  кэВ практически не проводились. В литера-

туре, несколько нам известно, можно найти лишь данные по составу медленных ионов, образовавшихся при ионизации некоторых газов  $\alpha$  - частицами с фиксированной энергией 2200 кэв [6] и данные по составу медленных ионов, образовавшихся при развале сложных молекул, бомбардируемых различными тяжелыми ионами (например, [7]).

В настоящей работе проведены систематические измерения относительного содержания различных медленных ионов, образовавшихся в газах  $He$ ,  $Ne$ ,  $Ar$ ,  $Kr$ ,  $H_2$  и  $N_2$  при ионизации высокоэнергетичными тяжелыми частицами. В качестве бомбардирующих частиц использовались ионы  $He^+$ ,  $N^+$ ,  $Ne^+$ ,  $Ar^+$ ,  $Kr^+$  (200 + 1800 кэв);  $Li^+$  (200 + 2000 кэв);  $He^{2+}$ ,  $N^{2+}$  (600 + 1800 кэв);  $Li^{2+}$  (600 + 2000) и  $Li^{3+}$  (1200 + 2000 кэв).

### АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Источником высокоэнергетичных однозарядных ионов служил компактный электростатический ускоритель на 2 Мэв [8]. Двух- и трехзарядные ионы получались с помощью укороченной газовой мишени [9], установленной на выходе ускорителя.

Анализ медленных ионов проводился на установке, описанной в работе [10]. Здесь медленные ионы вытягивались из зоны столкновений, затем ускорялись и формировались в пучок, который анализировался с помощью магнитного масс-монохроматора, и отдельные его компоненты регистрировались счетчиком ионов [11].

Из полученных масс-спектрограмм определялось относительное содержание  $n$  - зарядных медленных ионов

$$\alpha_n = \frac{N_n / \gamma_n}{\sum_{n=1}^{n_{max}} N_n / \gamma_n},$$

где  $N_n$  - интенсивность соответствующей линии спектра,  $\gamma_n$  - эффективность счета регистрируемых ионов.

В результате серии методических измерений определены условия вытягивания, ускорения, формирования и анализа медленных

ионов, при которых измеряемые величины  $\alpha_n$  сохраняют постоянство. При таких оптимальных условиях опытов в счетчик поступают  $n$  - зарядные ионы с энергией  $(4,4 \times n)$  кэв.

В опытах было установлено (в отличие от указаний работы [II]), что эффективность счетчика при регистрации тяжелых ионов с энергией в несколько килоэлектронвольт существенно отличается от единицы. Было также установлено, что основной причиной понижения эффективности счета являются просчеты из-за малости среднего коэффициента ионно-электронной эмиссии при бомбардировке первого ( $SiVe$ ) - диода вторично-электронного умножителя медленными ионами.

Эффективность счета определялась для всех регистрируемых ионов.

В табл. I приводятся установленные нами величины  $\gamma_n$ .

Т а б л и ц а I

Эффективность счета ионов с энергией  $(4,4 \times n)$  кэв счетчиком типа [II, 10]

И о н	$\gamma_n$	И о н	$\gamma_n$
$Ar^+$	0,75	$Kr^+$	0,6
$Ar^{2+}$	0,84	$Kr^{2+}$	0,74
$Ar^{3+}$	0,93	$Kr^{3+}$	0,85
$Ar^{4+}$	0,98	$Kr^{4+}$	0,96
$He^+$	0,82	$Ne^+$	0,78
$He^{2+}$	0,91	$Ne^{2+}$	0,84
$N_2^+$	0,87	$Ne^{3+}$	0,93
$N_1^+$	0,82	$H_2^+$	0,95
$N_1^{2+}$	0,9	$H_1^+$	0,9

Масс-спектрограммы снимались при сравнительно низких давлениях исследуемого газа в камере столкновений ( $1+3 \cdot 10^{-5}$  мм рт.ст.), при этом концентрация газа в зоне анализа и детектирования медленных ионов была такой ( $1+2 \cdot 10^{-6}$  мм рт.ст.), что измеряемые величины  $d_n$  не искажались за счет процессов перезарядки.

Для ионов азота ( $n > 2$ ), неона ( $n > 3$ ), аргона и криптона ( $n > 4$ )  $\delta_n \approx 1$ .

Случайные ошибки измерений  $d_n$  оценивались по воспроизводимости результатов и в большинстве случаев составляли для медленных ионов с кратностью заряда  $n \leq 3$  приблизительно  $\pm 10$  %, для ионов с  $4 \leq n \leq 6$  -  $\pm(15+20)$  %, для ионов с  $n > 6$  -  $\pm(20+25)$  %.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для каждой исследованной пары сталкивающихся частиц с определенной энергией относительного движения мы снимали несколько спектров медленных положительных ионов. Результатом их обработки явились усредненные величины относительного содержания  $n$ -зарядных ионов  $d_n$ , при этом выполнялось условие нормировки

$$\sum_{n=1}^{n_{max}} d_n = 1.$$

Сводка данных по  $d_n$  приведена в таблицах.

В табл. 2 показаны результаты для случаев ионизации He, Ne, Ar, Kr, H<sub>2</sub> и N<sub>2</sub> ионами He<sup>+</sup> и He<sup>2+</sup>. В табл. 3 соответствующие данные для случаев ионизации ионами Li<sup>+</sup>, Li<sup>2+</sup>, Li<sup>3+</sup>, в табл. IV - для ионизации ионами N<sup>+</sup> и N<sup>2+</sup> и в табл. V - ионами Ne<sup>+</sup>, Ar<sup>+</sup> и Kr<sup>+</sup>.

Воспользовавшись приведенными по  $d_n$  и имеющимися в литературе данными по полным сечениям образования медленных положительных ионов  $\sigma_+$ , можно получить парциальные сечения образования  $n$ -зарядных медленных ионов

$$\sigma_n = \frac{d_n}{\sum_{n=1}^{n_{max}} n d_n} \cdot \sigma_+$$

Т а б л и ц а 2

Относительное содержание медленных положительных ионов при ионизации газов ионами  $He^+$  и  $He^{2+}$ . Величины  $\alpha_n$  без скобок относятся к ионам  $He^+$ ;  $\alpha_n$  в круглых скобках - к ионам  $He^{2+}$ . а) Мишени -  $He$  и  $Kr^*$ .

E, кэВ	Мишень								
	He		Kr						
	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$
200	9,48-I	5,2-2	6,25-I	2,6-I	9,0-2	2,1-2	4,8-3	1,3-3	6,4-4
300			6,47-I	2,46-I	7,8-2	2,1-2	5,9-3	1,6-3	
400	9,33-I	6,7-2	7,0-I	2,0-I	7,0-2	1,8-2	5,9-3	2,8-3	1,2-3
600	9,36-I (9,21-I)	6,4-2 (7,9-2)	7,2-I (7,4-I)	2,0-I (1,8-I)	5,2-2 (5,8-2)	1,9-2 (1,5-2)	6,8-3 (6,1-3)	3,9-3 (2,2-3)	1,4-3
800	9,46-I (9,41-I)	5,4-2 (5,9-2)	7,56-I (7,68-I)	1,5-I (1,62-I)	6,1-2 (4,7-2)	1,75-2 (1,34-2)	8,8-3 (6,5-3)	5,3-3 (2,9-3)	
1000	9,52-I (9,55-I)	4,8-2 (4,5-2)	7,53-I (8,0-I)	1,65-I (1,34-I)	5,2-2 (4,2-2)	1,9-2 (1,4-2)	8,8-3 (6,2-3)	3,3-3 (2,0-3)	
1200	9,66-I (9,57-I)	3,4-2 (4,3-2)	7,6-I (8,05-I)	1,4-I (1,4-I)	6,1-2 (3,4-2)	2,0-2 (1,25-2)	1,06-2 (5,6-3)	7,5-3 (3,5-3)	
1400	9,66-I (9,63-I)	3,4-2 (3,6-2)	7,8-I (8,3-I)	1,25-I (1,18-I)	5,8-2 (3,0-2)	2,0-2 (1,2-2)	1,03-2 (5,6-3)	6,6-3 (2,2-3)	
1600	(9,63-I)	(3,6-2)							
1800	9,72-I (9,71-I)	2,8-2 (2,9-2)	7,9-I (8,4-I)	1,12-I (1,05-I)	5,8-2 (3,0-2)	2,2-2 (1,25-2)	1,4-2 (6,0-3)	6,8-3	



б) Мишени - Ne и Ar

E, кэВ	Мишень									
	Ne					Ar				
	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$
200	7,48-I	2,16-I	3,4-2	1,5-3	6,45-I	2,45-I	9,7-2	1,2-2	5,4-4	
300	7,55-I	2,0-I	4,4-2	3,3-3	6,25-I	2,78-I	8,4-2	1,2-2	9,0-4	
400	7,35-I	2,1-I	5,2-2	4,4-3	6,9-I	2,36-I	7,0-2	7,5-3	7,4-4	
600	7,31-I (7,16-I)	2,2-I (2,2-I)	4,7-2 (6,2-2)	4,7-3 (7,0-3)	7,27-I (7,26-I)	2,12-I (2,04-I)	5,4-2 (6,0-2)	6,5-3 (8,4-3)	1,1-3 (1,5-3)	
800	7,4-I (7,44-I)	2,1-I (2,04-I)	4,5-2 (4,7-2)	4,1-3 (5,0-3)	7,7-I (7,77-I)	1,84-I (1,75-I)	3,9-2 (4,0-2)	6,5-3 (6,5-3)	1,6-3 (1,75-3)	
1000	7,66-I (7,53-I)	1,94-I (2,0-I)	3,8-2 (4,4-2)	3,4-3 (4,3-3)	8,16-I (8,04-I)	1,44-I (1,59-I)	2,8-2 (3,0-2)	8,5-3 (6,0-3)	2,5-3 (1,6-3)	
1200	7,87-I (7,9-I)	1,77-I (1,67-I)	3,3-2 (3,4-2)	3,1-3 (3,0-3)	8,04-I (8,3-I)	1,56-I (1,38-I)	3,2-2 (2,6-2)	7,3-3 (5,7-3)	2,3-3 (1,8-3)	
1400	8,08-I (7,8-I)	1,63-I (1,83-I)	2,6-2 (3,35-2)	2,4-3 (3,5-3)	8,17-I (8,2-I)	1,44-I (1,45-I)	2,8-2 (2,67-2)	8,6-3 (6,2-3)	2,5-3 (2,1-3)	
1600	8,13-I	1,59-I	2,6-2	2,2-3						
1800	8,32-I (8,12-I)	1,43-I (1,6-I)	2,3-2 (2,5-2)	1,7-3 (2,7-3)	8,3-I (8,5-I)	1,29-I (1,15-I)	3,2-2 (2,75-2)	9,0-3 (7,5-3)	(2,8-3)	

в) Мишени -  $H_2$  и  $N_2$

E, кэВ	Мишень					
	$H_2$		$N_2$			
	$\alpha_1(H_2^+)$	$\alpha_1(H^+)$	$\alpha_1(N_2^+)$	$\alpha_1(N_1^+)$	$\alpha_2(N_2^{2+})$	$\alpha_3(N_2^{3+})$
200	9,4-1	6,2-2	6,9-1	2,77-1	3,3-2	6,6-4
400	9,5-1	5,3-2	7,3-1	2,42-1	2,6-2	4,3-4
600	9,55-1 (9,58-1)	4,5-2 (4,2-2)	7,45-1 (7,11-1)	2,36-1 (2,61-1)	2,1-2 (2,8-2)	3,2-4 (6,8-4)
800	9,61-1 (9,6-1)	3,9-2 (4,0-2)	7,8-1 (7,15-1)	2,06-1 (2,6-1)	1,6-2 (2,5-2)	4,6-4 (4,7-4)
1000	9,64-1 (9,61-1)	3,5-2 (3,9-2)	7,75-1 (7,23-1)	2,12-1 (2,57-1)	1,6-2 (2,0-2)	3,6-4 (3,0-4)
1200	9,68-1 (9,63-1)	3,2-2 (3,7-2)	7,8-1 (7,46-1)	2,08-1 (2,3-1)	1,3-2 (2,2-2)	4,5-4 (5,5-4)
1400	9,68-1 (9,61-1)	3,2-2 (3,9-2)	8,0-1 (7,7-1)	1,86-1 (2,1-1)	1,07-2 (1,7-2)	2,5-4 (4,5-4)
1800	9,7-1 (9,63-1)	3,0-2 (3,7-2)	8,13-1 (7,8-1)	1,77-1 (2,05-1)	8,6-3 (1,5-2)	

\* Здесь и далее численные значения  $\alpha_n$  следует читать: например,  
 $(9,48-1) = 9,48 \cdot 10^{-1}$

Таблица 3

Ионизация ионами  $Li^+$ ,  $Li^{2+}$  и  $Li^{3+}$ .Величины  $\alpha_n$  без скобок для ионов  $Li^+$ ,  $\alpha_n$ в круглых скобках -  $Li^{2+}$ , в квадратных  
скобках -  $Li^{3+}$ .

а) Мишени - He и Kr

E, кэВ	Мишень								
	He		Kr						
	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$
200	8,9-I	I,I-I	6,54-I	2,24-I	8,9-2	2,2-2	7,0-3	3,I-3	8,0-4
400	9,2-I	8,0-2	6,57-I	2,2I-I	8,4-2	2,55-2	9,8-3	3,2-3	I,2-3
600	9,2-I (8,92-I)	8,0-2 (I,02-I)	7,06-I (6,72-I)	1,94-I (2,06-I)	6,26-2 (7,8-2)	2,18-2 (2,5-2)	9,3-3 (I,3-2)	4,9-3 (8,8-3)	I,7-3
800	9,13-I (9,I6-I)	8,7-2 (8,35-2)	7,0-I (6,67-I)	1,83-I (2,04-I)	7,0-2 (7,6-2)	2,48-2 (3,3-2)	1,25-2 (I,33-2)	(7,I-3)	(4,8-3)
1000	9,3-I (9,06-I)	7,0-2 (9,34-2)	7,22-I (6,64-I)	1,81-I (2,I-I)	5,82-2 (7,7-2)	1,97-2 (2,4-2)	1,05-2 (I,28-2)	5,6-3 (8,8-3)	2,9-3 (6,4-3)
1200	9,3-I (9,3I-I) [8,8-I]	7,0-2 (6,85-2) [I,2-I]	7,52-I (7,0I-I) [7,08-I]	1,66-I (1,87-I) [I,95-I]	4,06-2 (6,6-2) [7,2-2]	2,7-2 (2,2-2) [2,3-2]	1,0-2 (I,I7-2)	7,2-3 (8,3-3)	(2,9-3)
1400	9,2-I (9,23-I) [8,85-I]	8,0-2 (7,7-2) [I,I5-I]	7,36-I (7,0-I) [7,28-I]	1,61-I (2,07-I) [I,7-I]	5,3-2 (5,7-2) [7,8-2]	2,14-2 (2,04-2) [2,4-2]	1,33-2 (I,I2-2)	7,7-3 (7,8-3)	5,7-3 (3,0-3)
1600	[8,95-I]	[I,05-I]							
1800	9,29-I (9,32-I) [9,0-I]	7,1-2 (6,8-2) [I,0-I]	7,6-I	1,55-I	4,8-2	2,36-2	1,4-2		
2000	9,35-I (9,4-I) [9,I-I]	6,5-2 (6,0-2) [9,0-2]	7,64-I (7,25-I) [7,38-I]	1,5-I (1,8-I) [I,7-I]	4,8-2 (5,5-2) [6,7-2]	2,4-2 (2,I-2) [2,5-2]	1,4-2 (I,I-2)	(8,0-3)	

б) Мишени - Ne и Ar

E, кэВ	МИШЕНЬ											
	Ne					Ar						
	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	d <sub>5</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	d <sub>5</sub>	d <sub>6</sub>	d <sub>7</sub>
200	6,38-I	3,0-I	5,8-2	2,35-3	2,3-4	6,53-I	2,32-I	1,02-I	1,42-2	9,4-4		
400	6,58-I	2,49-I	8,5-2	9,1-3	3,0-4	6,2-I	2,33-I	1,23-I	1,89-2	1,84-3		
500	6,46-I (6,75-I)	2,46-I (2,25-I)	9,35-2 (8,4-2)	1,4-2 (1,49-2)	4,9-4 (1,6-3)	6,34-I (6,9-I)	2,49-I (1,91-I)	9,7-2 (9,1-2)	1,8-2 (2,56-2)	2,0-3 (4,2-3)	3,0-4	2,0-5
800	6,5-I (7,04-I)	2,4-I (2,09-I)	9,0-2 (7,1-2)	1,6-2 (1,52-2)	9,5-4	6,78-I (6,75-I)	2,19-I (2,11-I)	8,5-2 (8,8-2)	1,53-2 (2,0-2)	3,2-3 (3,9-3)	8,4-4 (6,9-4)	1,2-4
1000	6,97-I (6,94-2)	2,12-I (2,07-I)	7,6-2 (7,92-2)	1,4-2 (1,75-2)	7,4-4 (1,5-3)	6,76-I (6,88-I)	2,24-I (2,18-I)	8,09-2 (7,5-2)	1,45-2 (1,5-2)	3,6-3 (4,1-3)	7,0-4 (9,6-4)	3,3-4
1200	6,9-I (7,03-I) [6,92-I]	2,19-I (2,03-I) [2,0-I]	7,7-2 (7,5-2) [8,7-2]	1,33-2 (1,6-2) [2,4-2]	7,3-4 (1,5-3)	7,29-I (7,01-I) [6,69-I]	1,99-I (2,06-I) [2,14-I]	5,6-2 (7,3-2) [9,0-2]	1,17-2 (1,5-2) [2,7-2]	3,7-3 (4,1-3)	1,0-3	2,0-4
1400	6,88-I (7,18-I) [7,13-I]	2,21-I (1,95-I) [1,93-I]	7,6-2 (7,1-2) [8,1-2]	1,3-2 (1,47-2) [2,5-2]	1,0-3 (1,5-3)	7,22-I (7,2-1) [6,9-I]	1,97-I (2,0-I) [2,08-I]	5,9-2 (6,4-2) [8,1-2]	1,43-2 (1,3-2) [2,0-2]	5,6-3 (4,8-3)	1,6-3 (1,4-3)	
1600	(7,25-I)	(1,9-I)	(6,8-2)	(1,45-2)	(1,5-3)							
1800	7,38-I (7,39-I) [7,13-I]	1,91-I (1,8-I) [1,9-I]	6,03-2 (6,5-2) [7,4-2]	1,03-3 (1,45-2) [2,23-2]	1,03-3 (1,5-3)	8,03-I	1,45-I	3,7-2	1,15-2	4,3-3		
2000	7,37-I (7,41-I) [7,28-I]	1,85-I (1,8-I) [1,8-I]	6,5-2 (6,4-2) [7,0-2]	1,2-2 (1,4-2) [2,4-2]	1,15-3 (1,5-3)	7,94-I (7,7-I) [7,52-I]	1,4-I (1,6-I) [1,68-I]	5,0-2 (5,4-2) [6,4-2]	1,2-2 (1,25-2) [1,6-2]	5,7-3 (5,4-3)	(2,0-3)	

в) мишени -  $H_2$  и  $N_2$

E, кэВ	Мишень					
	$H_2$		$N_2$			
	$d_1(H_2^+)$	$d_1(H_1^+)$	$d_1(N_2^+)$	$d_1(N_1^+)$	$d_2(N_2^{2+})$	$d_3(N_2^{3+})$
200	9,47-1	5,3-2	7,43-1	2,27-1	2,8-2	1,2-3
400	9,59-1	4,1-2	7,58-1	2,13-1	2,7-2	6,0-4
600	9,61-1 (9,34-1)	3,9-2 (6,6-2)	7,59-1 (7,82-1)	2,15-1 (1,92-1)	2,5-2 (2,56-2)	7,0-4 (1,8-3)
800	9,64-1 (9,51-1)	3,6-2 (4,9-2)	7,92-1 (7,57-1)	1,87-1 (2,15-1)	1,89-2 (2,63-2)	4,0-4 (9,5-4)
1000	9,63-1 (9,53-1)	3,7-2 (4,7-2)	7,86-1 (7,34-1)	1,94-1 (2,34-1)	1,9-2 (2,34-2)	(8,5-4)
1200	9,58-1 (9,54-1) [9,39-1]	4,1-2 (4,6-2) [6,0-2]	7,66-1 (8,12-1) [6,8-1]	2,1-1 (1,81-1) [2,84-1]	2,0-2 (1,44-2) [3,7-2]	5,0-4 (1,3-3)
1400	9,65-1 (9,62-1) [9,46-1]	3,5-2 (3,8-2) [5,4-2]	7,19-1 (7,31-1) [7,03-1]	2,56-1 (2,43-1) [2,62-1]	2,1-2 (2,6-2) [3,56-2]	4,0-4 (1,35-3)
1600	[9,5-1]	[5,0-2]				
1800	(9,63-1) [9,51-1]	(3,7-2) [4,9-2]				
2000	9,66-1 (9,63-1) [9,52-1]	3,4-2 (3,7-2) [4,8-2]	7,6-1 (7,25-1) [7,1-1]	2,2-1 (2,4-1) [2,6-1]	1,85-2 (3,0-2) [3,0-2]	

Т а б л и ц а 4

НОМИНАЦИЯ ИОНАМИ  $N^+$  И  $N^{2+}$  ВЕЛИЧИНЫ  $d_n$  БЕЗ СКОБОК ДЛЯ  
 ИОНОВ  $N^+$ ,  $d_n$  В КРУГЛЫХ СКОБКАХ - ДЛЯ  $N^{2+}$

а) ИИОНИИ - He И Kr

E, кэВ	И И О Н И И										
	He		Kr								
	$d_1$	$d_2$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_6$	$d_7$	$d_8$	$d_9$
200	9,92-I	8,2-3	5,96-I	2,74-I	9,8-2	2,44-2	5,0-3	2,2-3	1,12-3	3,2-4	
300	9,8-I	2,0-2									
400	9,69-I	3,1-2	5,51-I	2,58-I	1,26-I	4,1-2	1,65-2	4,6-3	2,6-3	1,2-3	
600	9,44-I (8,94-I)	5,6-2 (1,06-I)	5,21-I (5,51-I)	2,44-I (2,24-I)	1,35-I (1,35-I)	5,0-2 (5,2-2)	2,5-2 (1,8-2)	1,4-2 (1,08-2)	6,1-3 (4,9-3)	3,2-3 (2,2-3)	1,0-3 (7,5-4)
800	9,13-I (8,61-I)	8,7-2 (1,39-I)	5,32-I (5,48-I)	2,32-I (1,9-I)	1,28-I (1,5-I)	5,2-2 (5,7-2)	2,6-2 (2,4-2)	1,53-2 (1,82-2)	7,8-3 (2,8-3)	4,4-3 (6,7-3)	1,7-3 (1,25-3)
1000	8,85-I (8,5-I)	1,15-I (1,5-I)	5,29-I (6,12-I)	2,29-I (1,89-I)	1,35-I (1,06-I)	5,0-2 (4,7-2)	2,7-2 (2,1-2)	1,5-2 (1,5-2)	9,7-3 (7,2-3)	6,0-3 (4,7-3)	2,8-3 (2,0-3)
1200	8,63-I (8,61-I)	1,37-I (1,39-I)	4,99-I (6,1-I)	2,45-I (1,88-I)	1,37-I (9,9-2)	5,3-2 (4,9-2)	2,5-2 (2,3-2)	1,6-2 (1,5-2)	1,14-2 (8,7-3)	7,6-3 (5,1-3)	3,9-3 (2,3-3)
1400	8,61-I (8,32-I)	1,39-I (1,68-I)	5,3-I (5,84-I)	2,28-I (2,07-I)	1,3-I (1,06-I)	4,6-2 (4,8-2)	2,6-2 (2,4-2)	1,65-2 (1,25-2)	1,1-2 (9,4-3)	7,7-3 (5,6-3)	4,0-3 (3,0-3)
1800	8,4-I (8,5-I)	1,6-I (1,5-I)	5,54-I (5,96-I)	2,2-I (2,0-I)	1,25-I (1,05-I)	4,6-2 (4,8-2)	2,6-2 (2,6-2)	1,7-2 (1,5-2)	1,2-2 (1,0-2)	8,5-3 (6,5-3)	4,4-3 (3,5-3)

б) Мишени - Ne и Ar

71

E, кэВ	Мишень												
	Ne					Ar							
	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$	$\alpha_8$
200	8,54-I	1,32-I	1,24-2	1,1-3		6,04-I	2,58-I	1,02-I	3,3-2	2,9-3	3,0-4		
300	8,0-I	1,8-I	2,0-2	2,0-3									
400	7,53-I	2,11-I	3,2-2	2,9-3		5,53-I	2,7-I	1,26-I	4,1-2	6,8-3	8,8-4		
600	6,9-I (6,74-I)	2,38-I (2,49-I)	5,8-2 (6,1-2)	8,8-3 (1,3-2)	6,0-4 (7,4-4)	5,33-I (5,12-I)	2,56-I (2,74-I)	1,43-I (1,37-I)	5,3-2 (5,7-2)	1,0-2 (1,4-2)	2,1-3 (3,2-3)	1,0-3 (9,2-4)	2,7-4 (2,3-4)
800	6,4-I (6,36-I)	2,62-I (2,65-I)	8,4-2 (8,0-2)	1,58-2 (1,65-2)	1,5-3 (1,6-3)	4,67-I (4,91-I)	2,75-I (2,45-I)	1,7-I (1,66-I)	6,7-2 (7,2-2)	1,5-2 (2,0-2)	3,5-3 (3,8-3)	1,5-3 (1,0-3)	4,0-4 (3,4-4)
1000	6,25-I (6,15-I)	2,52-I (2,6-I)	1,0-I (9,7-2)	2,1-2 (2,5-2)	2,4-3 (3,2-3)	5,18-I (5,23-I)	2,58-I (2,44-I)	1,47-I (1,45-I)	5,95-2 (6,3-2)	1,4-2 (1,7-2)	4,1-3 (4,5-3)	1,6-3 (1,6-3)	4,2-4 (4,9-4)
1200	5,97-I (6,18-I)	2,65-I (2,48-I)	1,0-I (9,9-2)	3,3-2 (3,0-2)	4,1-3 (5,1-3)	4,95-I (5,44-I)	2,54-I (2,28-I)	1,61-I (1,45-I)	6,6-2 (6,1-2)	1,8-2 (1,7-2)	5,0-3 (4,2-3)	2,3-3 (1,9-3)	8,2-4 (6,3-4)
1400	6,03-I (6,03-I)	2,52-I (2,52-I)	1,06-I (1,03-I)	3,3-2 (3,5-2)	4,7-3 (7,1-3)	5,02-I (5,65-I)	2,5-I (2,0-I)	1,61-I (1,52-I)	6,7-2 (6,1-2)	1,7-2 (1,6-2)	5,0-3 (4,0-3)	2,4-3 (1,9-3)	8,0-4 (6,0-4)
1600	6,1-I	2,45-I	1,05-I	3,4-2	5,0-3								
1800	6,13-I (5,95-I)	2,4-I (2,5-I)	1,05-I (1,1-I)	3,6-2 (3,8-2)	5,5-3 (7,4-3)	5,21-I (5,7-I)	2,3-I (2,16-I)	1,6-I (1,59-I)	6,5-2 (6,0-2)	1,8-2 (2,0-2)	5,6-3 (4,9-3)	2,8-3 (2,4-3)	9,0-4 (7,4-4)

в) мишени -  $H_2$  и  $N_2$

E, кэВ	Мишень							
	$H_2$				$N_2$			
	$\alpha_1 (H_2^+)$	$\alpha_1 (H_1^+)$	$\alpha_1 (N_2^+)$	$\alpha_1 (N_1^+)$	$\alpha_2 (N_1^{2+})$	$\alpha_3 (N_1^{3+})$	$\alpha_4 (N_1^{4+})$	
200	9,28-I	7,2-2	6,04-I	3,52-I	4,15-2	2,6-3		
400	9,05-I	9,47-2	6,29-I	3,16-I	5,3-2	3,0-3		
600	9,05-I (9,1-I)	9,5-2 (9,0-2)	5,97-I (6,15-I)	3,43-I (3,1-I)	5,42-2 (6,9-2)	4,5-3 (6,6-3)	1,7-4 (2,0-4)	
800	9,04-I (9,06-I)	9,6-2 (9,4-2)	5,91-I (6,23-I)	3,34-I (3,02-I)	6,78-2 (6,7-2)	6,4-3 (7,1-3)	2,1-4 (2,0-4)	
1000	9,05-I (9,17-I)	9,5-2 (8,3-2)	6,02-I (6,17-I)	3,18-I (3,09-I)	7,3-2 (6,7-2)	7,1-3 (7,8-3)	2,2-4 (3,6-4)	
1200	9,06-I (9,12-I)	9,4-2 (8,8-2)	6,43-I (6,23-I)	2,88-I (3,03-I)	6,2-2 (6,45-2)	6,45-3 (8,4-3)	2,9-4 (3,8-4)	
1400	9,13-I (9,15-I)	8,7-2 (8,5-2)	6,31-I (6,42-2)	2,99-I (2,88-I)	6,32-2 (6,2-2)	6,7-3 (7,6-3)	2,0-4 (4,0-4)	
1600	9,14-I	8,6-2						
1800	9,15-I (9,17-I)	8,5-2 (8,0-2)	6,3-I (6,3-I)	2,9-I (2,9-I)	7,0-2 (6,5-2)	6,5-3 (7,3-3)		



Таблица 5

Ионизация ионами  $Ne^+$ ,  $Ar^+$  и  $Kr^+$ . Величины  $\alpha_n$  без скобок для ионов  $Ne^+$ ,  $\alpha_n$  в круглых скобках для  $Ar^+$ ,  $\alpha_n$  в квадратных скобках - для  $Kr^+$

А) Мишени - He и Kr

91

E, кэВ	Мишень											
	He		Kr									
	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$	$\alpha_8$	$\alpha_9$	
200	9,83-1 (9,99-1)	1,72-2 (1,1-3)	5,71-1 (7,99-1) [9,56-1]	3,23-1 (1,75-1) [2,98-2]	8,8-2 (2,4-2) [1,41-2]	1,46-2 (1,4-3) [1,24-3]	3,2-3					
400	9,57-1 (9,98-1)	4,2-2 (2,0-3)	5,11-1 (7,19-1) [8,87-1]	3,0-1 (2,28-1) [9,72-2]	1,29-1 (4,65-2) [9,7-3]	3,9-2 (5,2-3) [2,24-3]	1,7-2 (1,5-3) [9,0-4]	4,5-3				
800	(9,9-1)	(1,0-2)	5,94-1 (6,24-1) [7,78-1]	2,28-1 (2,5-1) [1,95-1]	1,02-1 (1,1-1) [2,44-2]	3,8-2 (1,6-2) [2,9-3]	2,04-2 (4,0-3) [8,3-4]	1,15-2 (3,0-3)	4,3-3 (1,6-3)	2,2-3 (6,7-4)	8,4-4	
1000	9,26-1 (9,88-1)	7,4-2 (1,2-2)										
1400	8,92-1 (9,82-1)	1,08-1 (1,8-2)	5,53-1 (5,75-1) [7,0-1]	2,16-1 (2,52-1) [2,26-1]	1,18-1 (1,19-1) [3,6-2]	4,37-2 (3,2-2) [4,5-3]	2,82-2 (1,1-2) [2,0-3]	1,94-2 (4,8-3)	1,22-2 (3,4-3)	6,4-3 (2,3-3)	2,7-3 (9,1-4)	
1800			5,53-1 (5,55-1) [7,23-1]	2,1-1 (2,3-1) [2,32-1]	1,15-1 (1,2-1) [4,0-2]	4,4-2 (3,8-2) [5,0-3]	2,8-2 (1,7-2)	1,9-2 (9,0-3)	8,2-3 (4,5-3)	6,8-3 (3,8-3)	(1,4-3)	

б) Мишени- Ne и Ar

E, кэВ	Мишень									
	Ne					Ar				
	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$
200	7,9I-I (9,82-I)	1,9-I (1,7-2)	1,76-2 (1,1-3)	7,2-4	.	5,76-I (8,62-I)	3,24-I (1,18-I)	8,7-2 (1,72-2)	1,2-2 (1,5-3)	1,8-3 (6,1-4)
400	6,79-I (9,53-I)	2,68-I (3,9-2)	4,87-2 (7,2-3)	4,1-3 (5,8-4)	2,8-4	5,49-I (7,6-I)	2,86-I (1,92-I)	1,31-I (4,1-2)	2,94-2 (5,5-3)	4,09-3 (8,4-4)
800	6,2-I (8,92-I)	2,7-I (8,88-2)	9,2-2 (1,67-2)	1,8-2 (2,4-3)	1,17-3	5,34-I (6,57-I)	2,6-I (2,36-I)	1,45-I (8,56-2)	4,87-2 (1,93-2)	1,09-2 (2,8-3)
1000	6,1-I	2,6-I	1,0-I	2,8-2	3,0-3					
1400	5,87-I (8,09-I)	2,55-I (1,62-I)	1,19-I (2,46-2)	3,36-2 (4,1-3)	4,4-3	5,34-I (5,71-I)	2,45-I (2,61-I)	1,48-I (1,21-I)	5,75-2 (3,9-2)	1,44-2 (7,6-3)
1800	5,79-I	2,5-I	1,25-I	4,0-2	5,5-3	5,6-I (5,26-I)	2,3-I (2,65-I)	1,5-I (1,5-I)	6,0-2 (4,8-2)	2,0-2 (1,15-2)

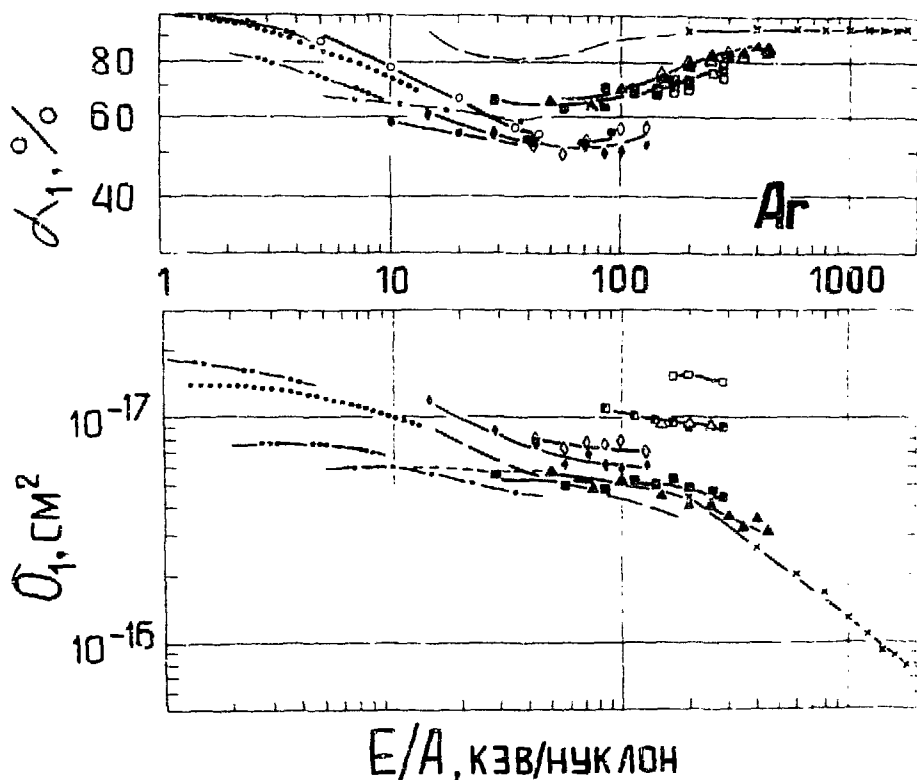


Рис. 1. Зависимости относительного содержания медленных однозарядных ионов аргона  $\alpha_1$  и парциальных сечений  $\sigma_1$  от приведенной энергии относительного движения  $E/A$  для налетающих частиц:  $\blacktriangle$  -  $He^+$ ,  $\triangle$  -  $He^{2+}$ ,  $\blacksquare$  -  $Li^+$ ,  $\square$  -  $Li^{2+}$ ,  $\square$  -  $Li^{3+}$ ,  $\blacklozenge$  -  $N^+$ ,  $\diamond$  -  $N^{2+}$ ,  $\bullet$  -  $Ne^+$ ,  $\circ$  -  $Ar^+$ ,  $\times$  -  $H^+$ .

Для вычисления парциальных сечений  $\sigma_n$  следует использовать полученные нами ранее для тех же мишеней и в том же энергетическом интервале (что и для  $\alpha_n$ ) полные сечения  $\sigma_+$ . Сечения  $\sigma_+$  измерены для налетающих частиц  $He^+$  [3],  $Li^{k+}$  ( $k=1,2,3$ ) [4] и  $N^{k+}$  ( $k=1,2$ ) [5]. Сечения  $\sigma_n$  в случае ионизации гелия, аргона, водорода и азота  $\alpha$  - частицами с энергией 600-1000 кэв можно рассчитать, воспользовавшись данными  $\sigma_+$  из работы [2].

Теперь остановимся на характерных особенностях полученных результатов. В качестве примера рассмотрим случай ионизации аргона различными налетающими частицами. На рис. 1-7 представлены графики зависимостей относительного содержания медленных  $n$ -за-

рядных ионов аргона и парциальных сечений  $\sigma_n$  от приведенной энергии  $E/A$ , пропорциональной квадрату скорости относительного движения -  $v^2$  ( $E$  и  $A$  - энергия и массовое число налетающего иона). На рис. I-4 приведены соответствующие данные, полученные другими авторами при энергиях относительного движения  $E \leq 180$  кэВ [12+14], а на рис. I-5 приведены зависимости  $\alpha_n(E/A)$  и  $\sigma_n(E/A)$  для протонного удара [10, 15, 16].

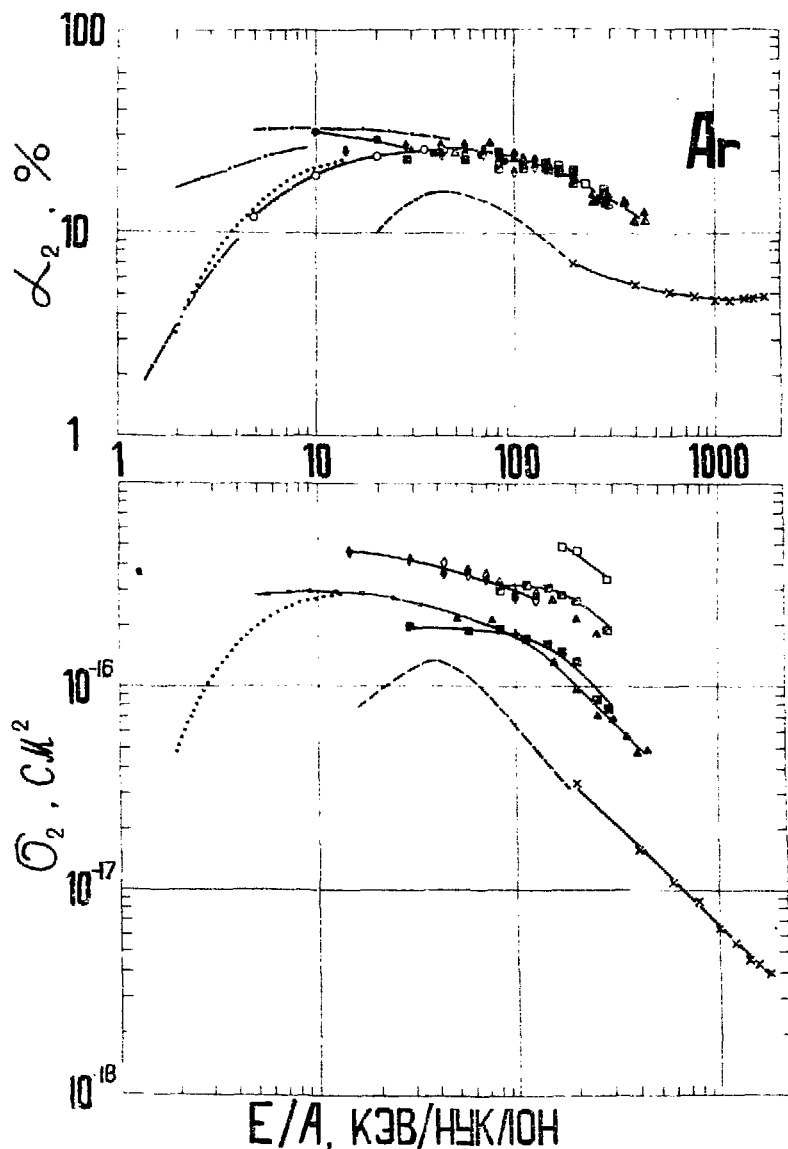


Рис. 2. Зависимости  $\alpha_2(E/A)$  и  $\sigma_2(E/A)$  Обозначения такие же, как и на рис. I

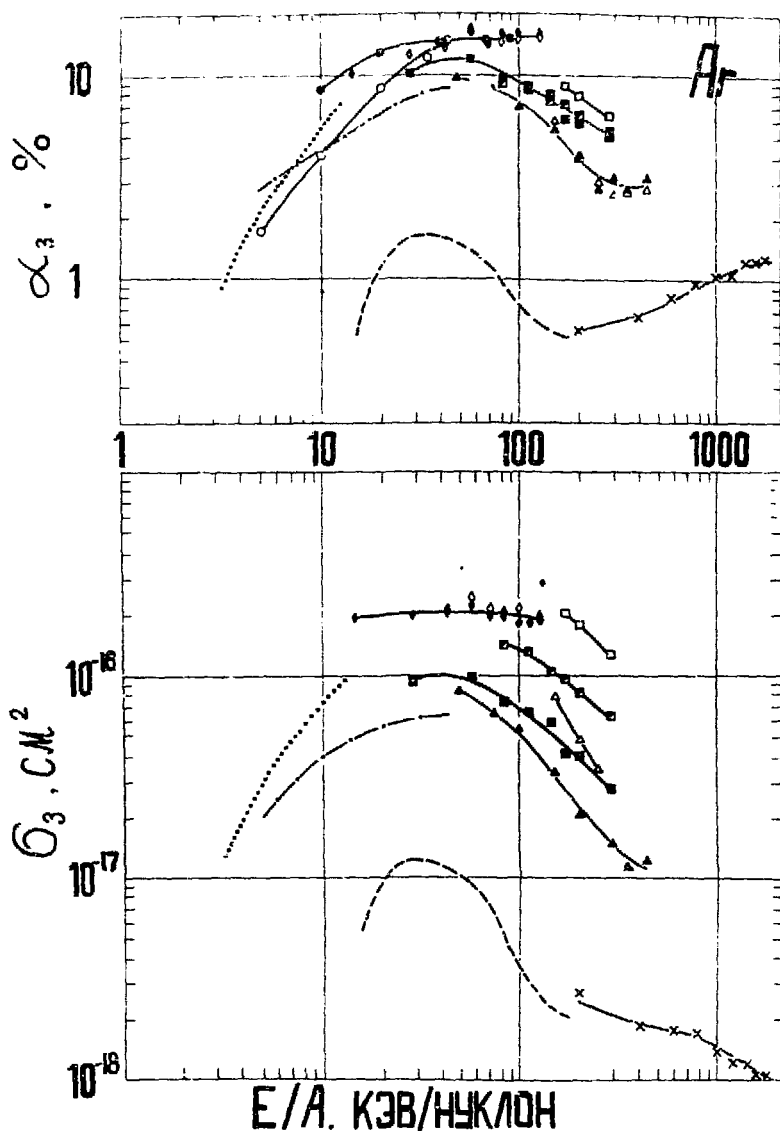


Рис. 3. Зависимости  $\alpha_3 (E/A)$  и  $\sigma_3 (E/A)$ .  
 Обозначения см. на рис. 1

Несмотря на неоднократные предостережения ряда авторов о возможных больших ошибках при сборе высокозарядных медленных ионов (например, [17]), с одной стороны, и несмотря на довольно существенные различия условий сбора и анализа, с другой стороны, данные настоящей работы и данные других работ [12-14]

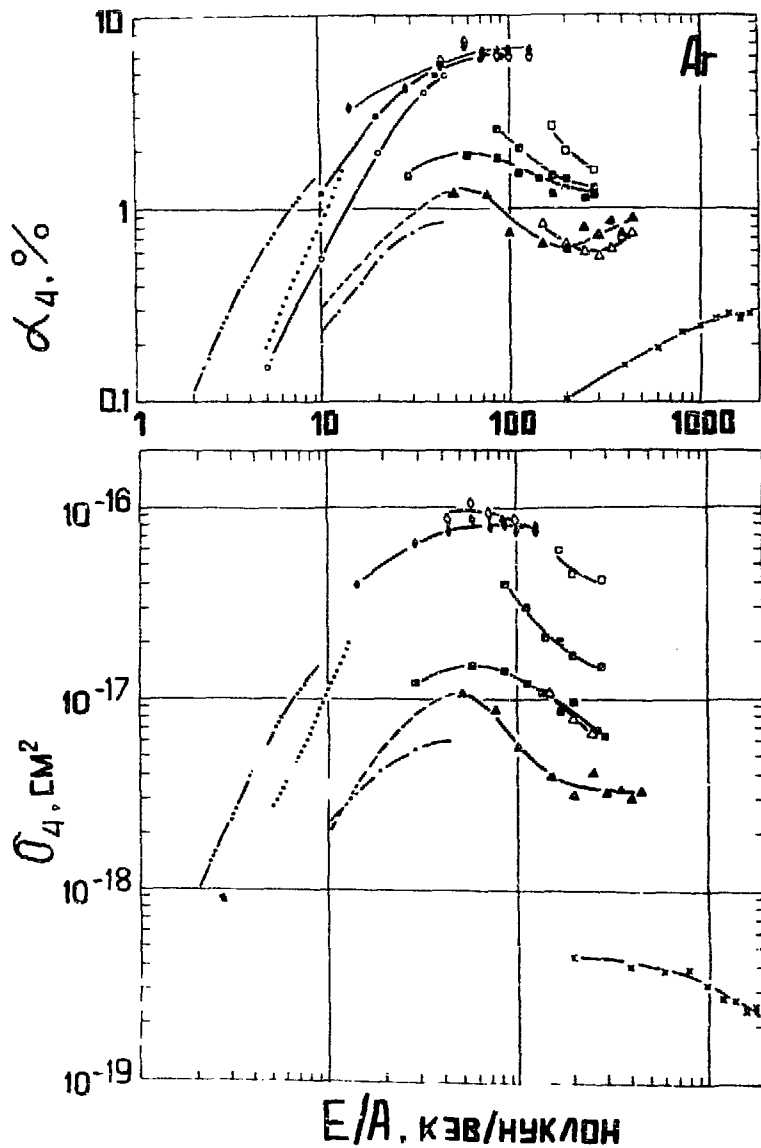


Рис. 4. Зависимости  $\alpha_4 (E/A)$  и  $\sigma_4 (E/A)$   
 Обозначения см. на рис. 1

хорошо согласуются в смежной области скоростей. Следует отметить, что и для случаев ионизации других мишенных газов наблюдается столь же хорошая стковка с данными ленинградских физиков. Сравнения же  $\alpha_n$  (мишени - He, Ne, Ar и Kr), полученных нами при бомбардировке  $\alpha$ -частицами с энергией 1800 кэВ, с соответствующими  $\alpha_n$ , приведенными в работе [6] для  $\alpha$ -частиц с энергией 2200 кэВ, показывают очень большие расхождения.

Данные работы [6], как правило, дают значительно более низкие величины  $\alpha_n$  для медленных ионов с  $n \geq 2$ ; например,  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  для Ar из нашей работы 11,5 и 2,75 %, а  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  из [6] - 3,36 и 0,59 % соответственно.

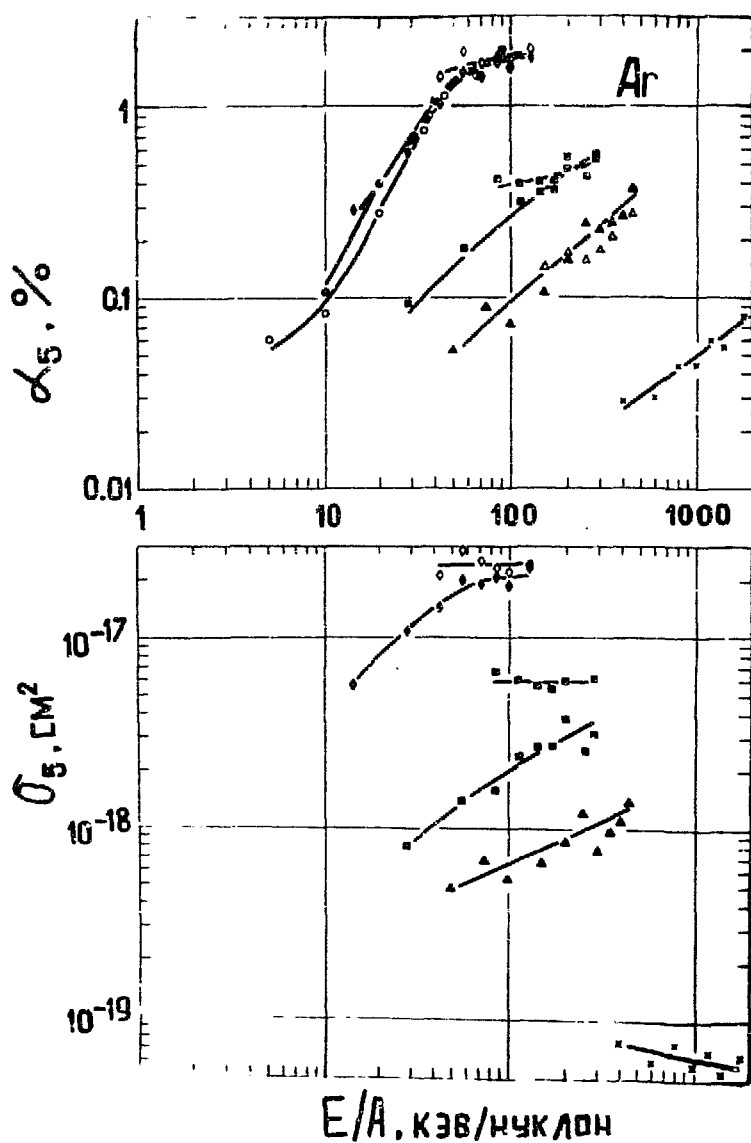


Рис. 5. Зависимости  $\alpha_5(E/A)$  и  $\sigma_5(E/A)$   
Обозначения см. на рис. I

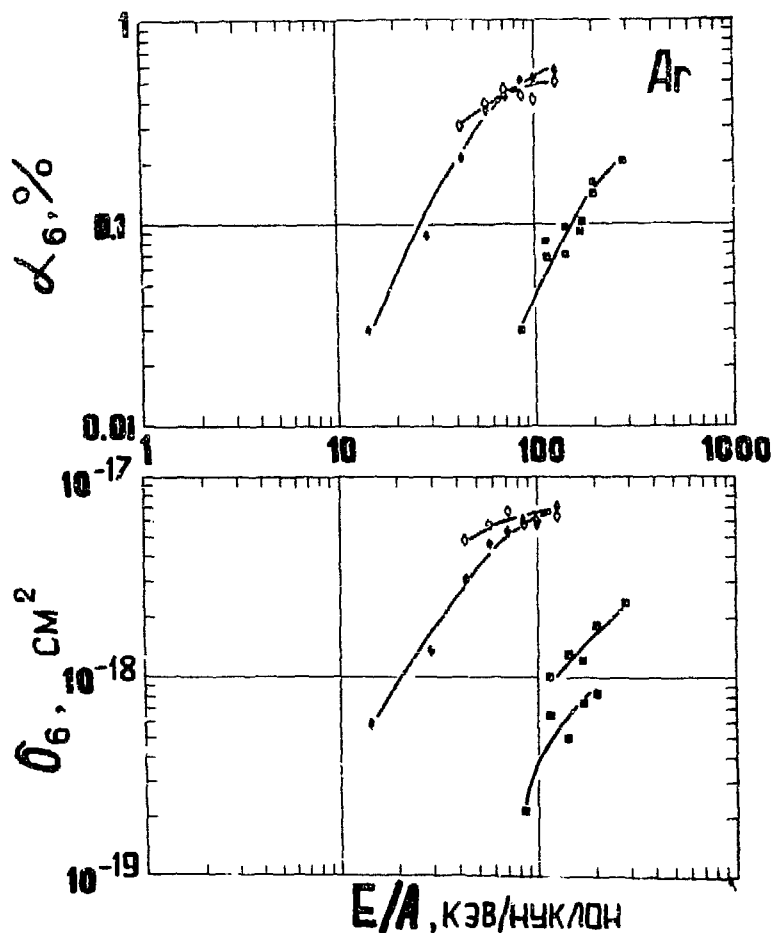


Рис. 6. Зависимости  $\alpha_6(E/A)$  и  $\sigma_6(E/A)$   
 Обозначения см. на рис. 1

Образование многозарядных ионов при однократных ионно-атомных столкновениях происходит как в результате удаления внешних электронов, так и в результате образования вакансий во внутренних оболочках с последующими  $O_{K\alpha}$ -переходами. Удаление внешних электронов может быть следствием  $qe$ -возбуждения некоего автоионизационного состояния, возникающего в результате пересечения внешних электронных оболочек сталкивающихся систем (квазимолекулярный механизм) и результатом прямого кулоновского взаимодействия (ударный механизм). В рассматриваемых случаях столкновений различных ионов с атомами  $Ar$  реализуются оба механизма взаимодействия.



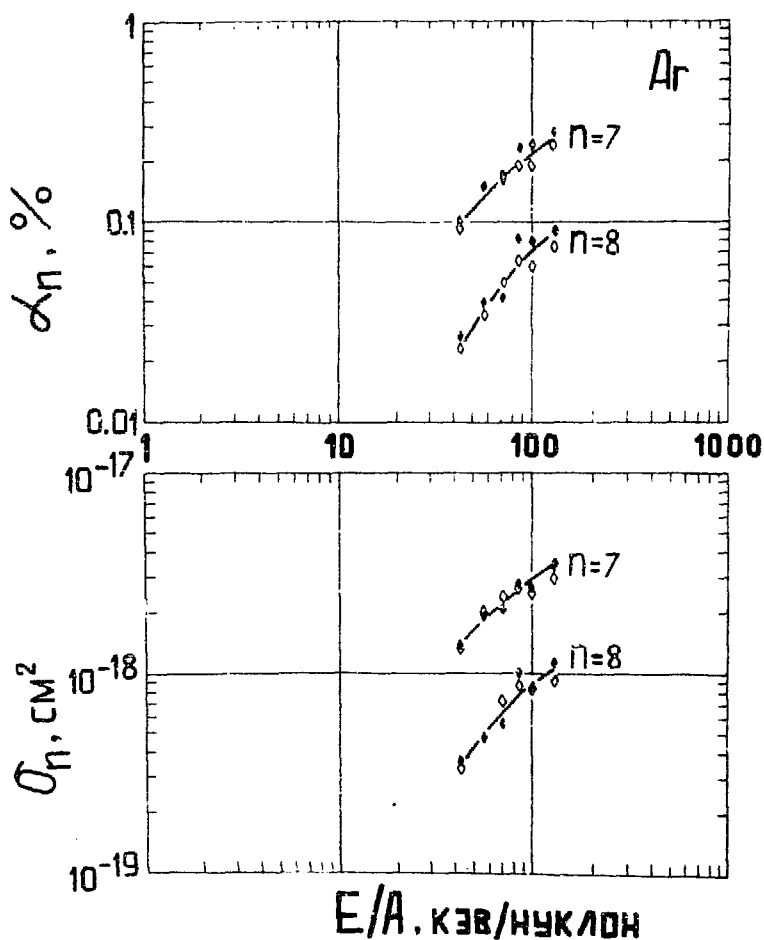


Рис. 7. Зависимости  $\alpha_7(E/A)$ ,  $\alpha_8(E/A)$ ,  $\sigma_7(E/A)$  и  $\sigma_8(E/A)$ . Обозначения см. на рис. I

Образование вакансий во внутренних оболочках также возможно в результате как одного, так и другого механизма взаимодействия.

Но как следует из анализа корреляционных диаграмм, связывающих уровни изолированных и объединенного атомов, квазимолекулярный механизм образования  $L$  - вакансий в аргоне может проявляться в столкновениях, когда налетающая частица имеет заряд ядра  $Z_1 \geq 6$  (углерод), для более легких налетающих частиц вакансии в  $L$  - оболочке аргона образуются только в результате прямого кулоновского взаимодействия [18, 19].

Следовательно, можно ожидать некоторое различие в ходе кривых зависимостей  $\alpha_n$  и  $\sigma_n$  для налетающих частиц с  $Z_1 < 6$

( $H_1^+$ ,  $He^{1,2+}$ ,  $Li^{1,2,3+}$ ) и с  $Z_1 > 6$  ( $N^{1,2+}$ ,  $Ne^+$  и  $Ar^+$ ); в особенности при сравнительно небольших  $E/A$ , где мала вероятность образования вакансий из-за прямого кулоновского возбуждения. Такое различие хода кривых  $\alpha_n(E/A)$  и  $\sigma_n(E/A)$  для тяжелых и легких налетающих частиц прослеживается при рассмотрении рис. 1-7. и будет видно при дальнейшем обсуждении результатов.

В нашей работе [10] было отмечено наличие двух максимумов на некоторых кривых зависимостей  $\alpha_n(E)$  для случая ионизации  $Ar$  протонным ударом. Первый максимум находится при  $E/A \approx 40+60$  кэв/нуклон, а второй - при  $E/A \approx 1300+1500$  кэв/нуклон. Большинство данных настоящей работы получено при  $E/A$ , характерных для первого максимума. Действительно, приблизительно при таких же значениях  $E/A$  для всех налетающих частиц наблюдаются максимумы кривых зависимостей  $\alpha_n(E/A)$  и  $\sigma_n(E/A)$  ( $n = 2+4$ ). При наибольших изученных скоростях относительного движения (для  $He^+$  и  $He^{2+}$   $E/A$  достигает величины 450 кэв/нуклон) довольно отчетливо проявляется переход зависимостей  $\alpha_3(E/A)$  и  $\alpha_4(E/A)$  на второй максимум.

Обращают на себя внимание также следующие факты. Относительное содержание медленных двухзарядных ионов аргона  $\alpha_2$  совершенно не зависит от рода налетающей частицы (ее массы и заряда) при  $E/A \geq (60+80)$  кэв/нуклон (несколько ниже лежит приводимая для сравнения кривая  $\alpha_2(E/A)$  для случая протонного удара [10, 15, 16]).

С увеличением кратности заряда медленных ионов аргона увеличивается различие величин  $\alpha_n$  для легких налетающих ионов с  $Z_1 < 6$ , для тяжелых снарядов ( $N_1^+$ ,  $N_1^{2+}$ ,  $Ne^+$ ,  $Ar^+$ ) величины  $\alpha_n$  образуют одну кривую зависимости от  $E/A$ .

Ионизация же легкими частицами характеризуется независимостью величин  $\alpha_n$  ( $n = 1+6$ ) от заряда ионов гелия и лития.\*)

\*) Лишь кривые  $\alpha_4(E/A)$  для ионов  $Li^+$ ,  $Li^{2+}$  и  $Li^{3+}$  имеют довольно большое различие при малых  $E/A$  (см. рис. 4)

Кривые зависимостей  $\sigma_1(E/A)$  для легких налетающих однозарядных ионов ( $H^+$ ,  $He^+$ ,  $Li^+$ ) почти совпадают, несколько выше группируются кривые  $\sigma_1(E/A)$  для двухзарядных налетающих ионов ( $He^{2+}$  и  $Li^{2+}$ ), еще выше лежит кривая  $\sigma_1(E/A)$  для  $Li^{3+}$ -ионов.

Из такого рода особенностей хода кривых  $\sigma_1(E/A)$  можно предположить, что однократная ионизация атомов - мишеней легкими налетающими частицами в основном осуществляется при столь далеких соударениях, когда происходит практически полная экранировка заряда ядра снаряда имеющимися в его структуре электронами.

С увеличением  $Z_1$  различие в величинах сечений  $\sigma_n$  для различных однозарядных и двухзарядных ионов увеличивается,  $\sigma_n$  имеет большую величину для налетающих частиц с большим зарядом ядра  $Z_1$ .

Следует подчеркнуть, что с увеличением заряда медленных ионов аргона до  $n \geq 5$  (то есть в случаях удаления более половины электронов внешней  $M$  - оболочки) при  $E/A \approx (50+100)$  кэв/нукл для легких налетающих частиц уже не наблюдаются максимумы на кривых зависимостей  $\alpha_n(E/A)$  и  $\sigma_n(E/A)$ , эти зависимости показывают постоянный рост величин  $\alpha_n$  и  $\sigma_n$  в изученном интервале  $E/A$ .

Отмеченные нами характерные особенности кривых зависимостей  $\alpha_n(E/A)$  и  $\sigma_n(E/A)$  при ионизации аргона в большинстве своем можно отнести и к случаям ионизации других многоэлектронных атомных систем ( $Ne$  и  $Kr$ ).

С точки зрения сравнения с теорией представляется интересным рассмотрение ионизации легких мишеней безструктурными налетающими частицами - голыми ядрами  $H^+$ ,  $He^{2+}$  и  $Li^{3+}$ .

В соответствии с первым борновским приближением сечения ионизации  $\sigma_n$  при одинаковых скоростях относительного движения должны быть пропорциональны квадрату заряда налетающей частицы  $Z_1^2$ .

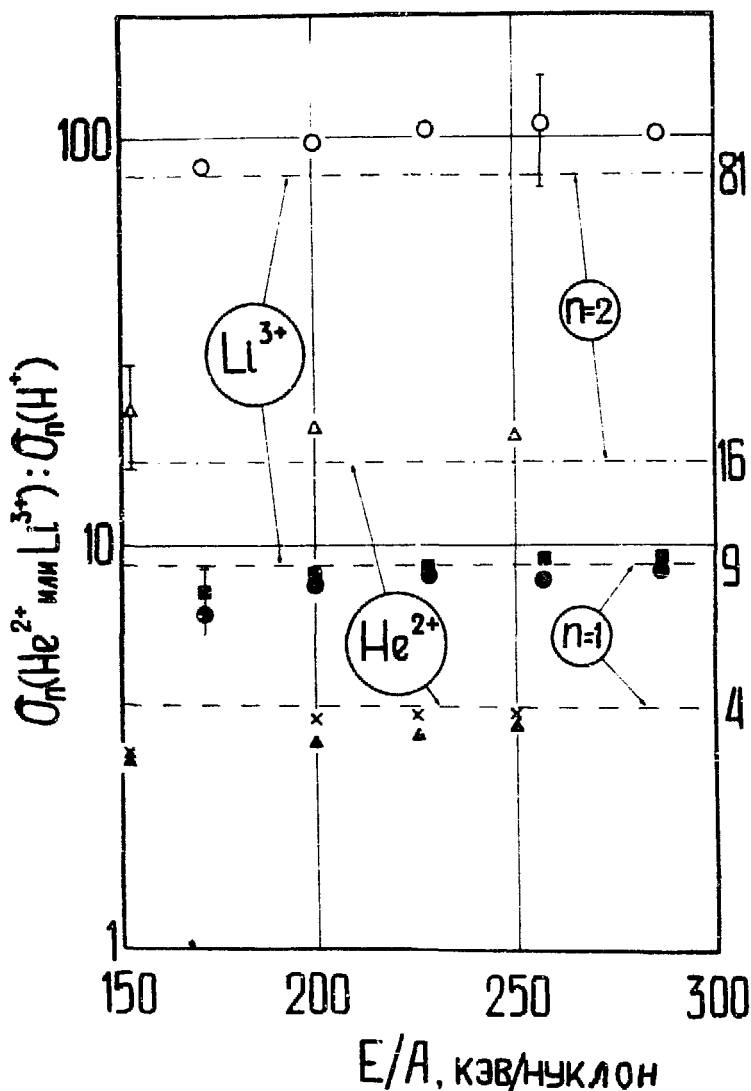


Рис. 8. Зависимости отношений  $\sigma_1(\text{He}^{2+})/\sigma_1(\text{H}^+)$  (мишени:  $\text{H}_2 - x$ ,  $\text{He} - \blacktriangle$ ),  $\sigma_1(\text{Li}^{3+})/\sigma_1(\text{H}^+)$  (мишени:  $\text{H}_2 - x$ ,  $\text{He} - x$ ),  $\sigma_2(\text{He}^{2+})/\sigma_2(\text{H}^+)$  (мишень  $\text{He} - \triangle$ ),  $\sigma_2(\text{Li}^{3+})/\sigma_2(\text{H}^+)$  (мишень  $\text{He} - o$ ) от приведенной энергии относительного движения  $E/A$

На рис. 8 приведены отношения сечений отрыва отдельного электрона  $\sigma = \sum_{n=1}^{n_{\text{max}}} n \sigma_n$  \*) при ионизации гелия и водорода ядрами

\*) Сечение отрыва одного электрона имеет такой же смысл, как и сечение потери отдельного электрона, введенное в работе [20].

гелия и лития к подобным сечениям для протонного удара при равных  $E/\lambda$ . Видно прекрасное совпадение таких соотношений с теоретически предсказываемыми величинами

$$Z_1^2(\text{He}^{2+})/Z_1^2(\text{H}^+) = 4 \text{ и } Z_1^2(\text{Li}^{3+})/Z_1^2(\text{H}^+) = 9 \text{ соответственно.}$$

На этом же рисунке показано, что отношение сечений образования двухзарядных ионов гелия  $\sigma_2$ , образующихся при ионизации снарядами  $\text{He}^{2+}$  и  $\text{Li}^{3+}$ , к сечениям  $\sigma_2$  при протонном ударе при равных сравнительно больших скоростях относительного движения близки к величинам 16 и 81. Это соответствует пропорциональности сечений  $\sigma_2$  четвертой степени заряда бомбардирующих частиц -  $Z_1^4$ .

Такие соотношения сечений ионизации гелия говорят о том, что механизм осуществления двухкратной ионизации гелия в рассматриваемом интервале скоростей соответствует предположениям второго борновского приближения. И тогда становится понятной тщетность многочисленных попыток получить удовлетворительное теоретическое описание двухкратной ионизации гелия в рамках первого борновского приближения [21].

В заключение авторы выражают искреннюю признательность В.С. Николаеву за обсуждение результатов этой работы и полезные советы.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Langley R.A., Martin D.W., Harmer D.S., Hooper J.W.,  
McDaniel E.W. "Cross Section for Ion and Electron produc-  
tion in Gases by Fast Helium Ions (0,133 -  
1,0 Mev).I.Experimental".  
Phys.Rev.v.136,N2A, 1964, 379.
2. Puckett L.J., Taylor G.O., Martin D.W.  
"Cross Sections for Ion and Electron Produc-  
tion in Gases by 0,15-1,00 Mev Hydrogen and  
Helium Ions and Atoms".  
Phys.Rev.,v.178, N1, 1969, 271.
3. Пивовар Л.И., Левченко Д.З., Григорьев А.Н. Ионизация газов  
ионами  $He^+$  с энергией 0,2 - 1,8 Мэв .  
-"ЖЭТФ", 54, 1968, 1310.
4. Пивовар Л.И., Левченко Д.З., Кривоносов Г.А. Ионизационные  
столкновения и перезарядка ионов  $Li^+$ ,  $Li^{2+}$  и  
 $Li^{3+}$  в газах (0,2 - 2,0 Мэв) -"ЖЭТФ",59,1970,19.
5. Пивовар Л.И., Левченко Д.З., Григорьев А.Н., Хазан С.М.  
Ионизация газов быстрыми ионами  $N^+$  и  $N^{2+}$ .  
-"ЖЭТФ", 56, 1969, 736.
6. Rudolph P.S., Charles E. Melton  
"Experimental and Teoretical Considerations  
for Ionization of Simple Hydrocarbons,  $H_2$ ,  $D_2$ ,  
 $O_2$ ,  $H_2O$  and Rare Gases by 2,2-Mev  $\alpha$ -particles  
and by Electrons in a Mass Spectrometer".  
J.Chem.Phys.v.45, N6, 1966, 2227.
7. Abbe J.-C., Adloff J.-P.  
"Ionization de Gas Sous l'Effet d'Ions de  
200A.1200keV".  
Phys.Lett.v.11, 1964, 28.
8. Пивовар Л.И., Тубаев В.М. Компактный ЭСУ на 2,5 Мэв .  
-"ЖЭТФ", 32, 1962, 713.

9. Пивовар Л.И., Левченко Ю.З. Укороченная перезарядная газовая мишень. - "ПТЭ", 4, 1970, 28.
10. Левченко Ю.З., Пивовар Л.И., Толстолуцкая Г.Д. Состав медленных ионов, образующихся при ионизации газов высокоэнергетическими протонами. - "ЖЭТФ", 64, 1973, 1991.
11. Козлов В.Ф., Колот В.Я., Довбня А.Н. Счетчик медленных ионов. - "ПТЭ", 6, 1965, 81.
12. Соловьев Е.С., Ильин Р.Н., Опарин В.А., Федоренко Н.В. Ионизация газов быстрыми атомами и однозарядными ионами гелия. - "ЖЭТФ", 45, 1963, 496.
13. Ильин Р.Н., Соловьев Е.С. Ионизация аргона ионами кислорода и азота. - "ЖТФ", 31, 1961, 680.
14. Афросимов В.В., Ильин Р.Н., Опарин В.А., Соловьев Е.С., Федоренко Н.В. Ионизация аргона атомами, однозарядными и двухзарядными ионами неона и аргона. - "ЖЭТФ", 41, 1961, 1048.
15. Соловьев Е.С., Ильин Р.Н., Опарин В.А., Федоренко Н.В. Ионизация газов быстрыми атомами водорода и протонами. - "ЖЭТФ", 42, 1962, 659.
16. Афросимов В.В., Ильин Р.Н., Федоренко Н.В. Ионизация аргона ионами водорода. - "ЖТФ", 28, 1958, 2266.
17. Puckett L.J., Martin D.W. Analysis of Recoil  $\text{He}^+$  and  $\text{He}^{++}$  Ions Produced by Fast Protons in Helium Gas. Phys.Rev. A, v.1, N5, 1970, 1432.
18. Шергин А.П. Кандидатская диссертация. Потери энергии и ионизация при возбуждении электронных оболочек в атомных столкновениях. ФТИ АН СССР, Л., 1973.
19. F.W.Saris. Cross Sections for Ar L-shell x-rays Emission in Collisions of  $\text{He}^+$ ,  $\text{C}^+$ ,  $\text{N}^+$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{Al}^+$ ,  $\text{Cl}^+$ ,  $\text{Tl}^+$ ,  $\text{Fe}^+$ ,  $\text{Cu}^+$  on Ar. Physica, 52, 1971, 290.
20. Дмитриев И.С., Николаев В.С., Фатеева Л.Н., Теплова Я.А. Исследование потери нескольких электронов быстрыми многозарядными ионами. - "ЖЭТФ", 43, 1962, 361.

21. Byron F.W., Charles J. Joachain. Multiple Ionization Process, in Helium .  
Phys.Rev. v.164, N1, 1967, 1.

---

Ответственный за выпуск Ю.В.ЛЕВЧЕНКО

Подписано к печати 18 марта 1974 г. Т-06401, 2 п.л., зак.228, тир.280.  
Цена 20 коп. Харьков-108, ротاپронт ФТИ АН УССР.