

034511

3-59

1037/2-77

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



21/3-77

P9 - 10197

Х.-У.Зиберт, Д.Леманн, Г.Музиоль, Г.Щорнак

К РАСЧЕТУ СЕЧЕНИЙ ИОНИЗАЦИИ  
ПРИ ЭЛЕКТРОННО-АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ  
В ОБЛАСТИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ  
ЭНЕРГИЙ ЭЛЕКТРОНОВ

**1976**

Р9 - 10197

Х.-У.Зиберт, Д.Леманн, Г.Музиоль, Г.Щорнак

К РАСЧЕТУ СЕЧЕНИЙ ИОНИЗАЦИИ  
ПРИ ЭЛЕКТРОННО-АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ  
В ОБЛАСТИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ  
ЭНЕРГИЙ ЭЛЕКТРОНОВ

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Зиберт Х.-У., Леманн Д., Музиоль Г., Шорнак Г.

P9 - 10197

К расчету сечений ионизации при электронно-атомных столкновениях в области релятивистских энергий электронов

Изложен метод, основанный на расширении модели Колбенстведта, позволяющий рассчитывать с хорошей точностью (по экспериментальным данным, не хуже 15%) полные сечения ионизаций, сечения подболочек и сечения многократной ионизации при столкновениях электронов релятивистской энергии с атомами или ионами. Приведены результаты расчетов сечений одно- и двукратной ионизаций элементов азота, криптона, ксенона и урана при энергиях электронов 1 и 20 МэВ.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований  
Дубна 1976

Siebert H.-U., Lehmann D., Musiol G.,  
Zschornack G.

P9 - 10197

Calculations of Ionization Cross Sections  
for Electron-Atom Collisions by Relativistic  
Electron Impact

Based on the expansion of Kolbenstvedt's model to all atomic subshells, a method was obtained to calculate total ionization cross sections, subshell cross sections and multiionization cross sections for atoms and ions by relativistic electron impact.

The composed results agree with experimental data better than 15%.

The results of calculations of cross sections for single and double ionization of nitrogen, krypton, xenon, and uranium at 1 and 20 MeV electron energies are presented.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research

Dubna 1976

© 1976 Объединенный институт ядерных исследований Дубна

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Знание величин полных сечений ионизации, сечений ионизации подболочек и сечений многократной ионизации атома при электронно-атомных столкновениях в области релятивистских энергий электронов является чрезвычайно полезным при проектировании ионных источников и ускорителей ионно-электронных колец. Так, знание сечений ионизации, расчет которых является целью настоящей работы, необходимо как для экспериментального определения /путем измерения рентгеновских спектров<sup>/1/</sup> / числа ионов в ионно-электронных кольцах, так и для теоретического расчета накопления многозарядных ионов в ионно-электронных кольцах<sup>/2-4/</sup>.

Соударение между электронами большой энергии и первоначально нейтральными атомами приводит, вследствие прямой ионизации и последующих переходов Оже или Костера-Кронига, а также вследствие конфигурационного взаимодействия между однодырочными и двухдырочными состояниями<sup>/5/</sup> и ионизационных эффектов второго порядка /двойной эффект Оже и эффект "встряски"/, к испусканию одного или нескольких электронов. Три последних эффекта наблюдаются особенно при низких степенях ионизации.

Настоящая работа содержит теоретические основы используемого метода расчета сечений ионизации, а также рассчитанные с помощью этого метода значения сечений одно- и двукратной ионизации атомов азота, криптона, ксенона и урана при различных релятивистских энергиях электронов.

## 2. РАСЧЕТ СЕЧЕНИЙ ИОНИЗАЦИИ

### 2.1. Прямая ионизация

Метод расчета сечения ионизации К-оболочки атома при электронно-атомных столкновениях в области релятивистских энергий предложен Колбенстведтом<sup>/6/</sup>. Согласно этому методу, сечения ионизации рассчитываются как сумма сечений ионизации при больших и малых параметрах удара. При этом, если параметр удара меньше радиуса К-оболочки атома, используется сечение столкновения между двумя свободными электронами, передаваемая энергия которых больше энергии ионизации. В случае столкновения с параметром удара, большим радиуса К-оболочки атома, вычисляют мнимый спектр фотонов, имеющих поле, эквивалентное полю налетающего электрона, и с помощью известного сечения фотоионизации получают значение вероятности ионизации атома мнимыми фотонами. В работе<sup>/6/</sup> разделение между большими и малыми параметрами удара было установлено относительно радиуса К-оболочки.

Для получения сечений ионизации отдельных подоболочек  $(n, \ell, j)$ , а также полного сечения ионизации атома или иона нами проведены следующие изменения модели Колбенстведта:

1. Радиус, соответствующий каждой подоболочке атома, рассматривается как граница между большим и малым параметрами удара.

2. Вместо потенциала ионизации К-оболочки используется потенциал ионизации  $I_{n\ell j}(Z_I)$  рассматриваемой подоболочки атома или иона зарядности  $Z_I$ .

3. Для каждой подоболочки вводится нормированный на число К-электронов вес конфигурации, который пропорционален числу электронов  $q_{n\ell j}(Z_I)$  в рассматриваемой подоболочке:

$$g_{n\ell j}(Z_I) = \frac{q_{n\ell j}(Z_I)}{2} \quad /1/$$

Используя вышеприведенные предположения, получаем следующее выражение для сечения прямой ионизации  $\sigma_{n\ell j}^C(Z_I)$  подоболочки  $(n, \ell, j)$ :

$$\sigma_{n\ell j}^C(Z_I) = g_{n\ell j}(Z_I) \left\{ \frac{0.275}{I_{n\ell j}(Z_I)} \frac{(E+1)^2}{E(E+2)} \left[ \ln \frac{1.19E(E+2)}{I_{n\ell j}(Z_I)} - \frac{E(E+2)}{(E+1)^2} \right] + \frac{0.99}{I_{n\ell j}(Z_I)} \frac{(E+1)^2}{E(E+2)} \left[ 1 - \frac{I_{n\ell j}(Z_I)}{E} \right] \times \right. \\ \left. \times \left( 1 - \frac{E^2}{2(E+1)^2} + \frac{2E+1}{(E+1)^2} \cdot \ln \frac{E}{I_{n\ell j}(Z_I)} \right) \right\}, \quad /2/$$

где  $E$  - кинетическая энергия ударяющегося электрона, причем  $E$  и  $I_{n\ell j}(Z_I)$  даны в единицах массы покоя электрона. Тогда полное сечение прямой ионизации можно представить как сумму сечений подоболочек

$$\sigma_{\text{tot}}^C(Z_I) = \sum_{n\ell j} \sigma_{n\ell j}^C(Z_I), \quad /3/$$

где  $\sigma_{\text{tot}}^C(Z_I)$  является сечением для образования одной вакансии в атоме или ионе зарядности  $Z_I$  вследствие прямого перехода электрона в несвязанное состояние.

Так как сечения фотоионизации рассчитываются аналитическим образом с помощью метода, предложенного Гейтлером<sup>/8/</sup> и Стоббом<sup>/9/</sup>, только для атома водорода и водородоподобных ионов /с зарядом ядра  $\ll 137$ /<sup>/7/</sup>, то применение результатов<sup>/6/</sup> в настоящей работе является приближением.

### 2.2. Многократная ионизация

Образование вакансий во внутренних подоболочках атома при столкновениях между электронами и атомами или ионами может, в течение последующих перестроек электронной конфигурации, приводить к испусканию одного или нескольких электронов вследствие переходов Оже и Костера-Кронига или ионизационных эффек-

тов второго порядка. Исходя из начального процесса ионизации в подоболочке  $(n, \ell, j)$ , можно определить вероятность потери электронов  $W_{n\ell j}^{Z_1}(k)^{12/}$ , которая составляет вероятность последующего испускания  $k-1$  электронов.

Сечение многократной ионизации для образования иона ионизированного состояния  $Z_M = Z_1 + k$  из иона со степенью ионизации  $Z_1$  вычисляется следующим образом:

$$\sigma_{\text{tot}}^M(Z_1, Z_M) = \sum_{n\ell j} \sigma_{n\ell j}^C(Z_1) W_{n\ell j}^{Z_1}(k). \quad /4/$$

Экспериментальные значения вероятности потери электронов имеются лишь для атомов благородных газов и ртути в нейтральном состоянии <sup>10/</sup>. Вычисление этих вероятностей возможно путем следующего упрощения:

$$W_{n\ell j}^{Z_1}(k) = W_{n\ell j, A}^{Z_1}(k) \cdot W_{n\ell j, CK}^{Z_1}(k), \quad /5/$$

где  $W_{n\ell j, A}^{Z_1}(k)$  является выходом Оже и  $W_{n\ell j, CK}^{Z_1}(k)$  - выходом Костера-Кронига.

Получение разумных оценок для величин  $W_{n\ell j}^{Z_1}(k)$  атомов и ионов всех элементов возможно на основе следующих предположений:

1. С увеличением степени ионизации запрещаются всевозможные переходы Костера-Кронига из-за энергетических соображений <sup>11/</sup>.

2. Вклад ионизационных эффектов второго порядка в многократную ионизацию составляет при низких степенях ионизации 10-20% полного сечения для нейтрального атома <sup>12/</sup> и сильно уменьшается с увеличением степени ионизации. Таким образом, вкладом ионизационных эффектов второго порядка в многократную ионизацию можно, за исключением низких степеней ионизации, пренебречь.

3. В случае отсутствия ионизационных процессов второго порядка заполнение вакансий во внутренних оболочках атома происходит через каскады Оже путем последовательного движения вакансий с внутренних оболочек на более внешние. Принимается испускание элект-

рона Оже из той же самой оболочки, из которой другой электрон переходит на внутреннюю оболочку.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ И РАСЧЕТАМИ ДРУГИХ АВТОРОВ

С помощью описанной выше методики рассчитаны сечения прямой и многократной ионизаций для элементов криптона и ксенона. При расчете использованы ионизационные потенциалы, полученные с помощью релятивистской программы типа Дирака-Фока-Слетера <sup>15/</sup> /ионизационные потенциалы для ксенона были опубликованы в работе <sup>11/</sup> /.

Для указанных элементов уже имеются значения сечений ионизаций и вероятностей потерь электронов для нейтральных атомов, полученные как экспериментальным <sup>10,13,14/</sup>, так и расчетным <sup>2,16/</sup> способами.

На рис. 1,2 представлены результаты расчета полных сечений ионизации для криптона и ксенона как функции кинетической энергии ударяющих электронов, полученные в настоящей работе и работах <sup>2,16/</sup>, а также экспериментальные данные работ <sup>13,14/</sup>.

Видно, что при релятивистских энергиях полные сечения, полученные в настоящей работе, хорошо совпадают с экспериментальными значениями /см. табл. 1/. Отклонения между ними составляют 15% для криптона и 8% для ксенона в диапазоне энергий электронов 1-3 МэВ.

На основании одинаковости поведения кривых значений, рассчитанных нами, и экспериментальных сечений ионизации в исследуемой области энергии электронов можно ожидать, что данное описание полного сечения ионизации является верным и для энергий электронов до 20 МэВ, важных для ускорителей ионно-электронных колец. Естественно, рассчитанные сечения ионизации отклоняются от экспериментальных значений в области нерелятивистских энергий, так как формула <sup>2/</sup> справедлива только для релятивистских энергий электронов.



Рис. 1. Полные сечения ионизации нейтрального криптона как функции кинетической энергии электронов.



Рис. 2. Полные сечения ионизации нейтрального ксенона как функции кинетической энергии электронов.

Таблица 1

Полные сечения ионизации атомов криптона и ксенона, полученные в настоящей работе ( $\sigma$ ) и в эксперименте ( $\sigma_{\text{ЭКС}}$ ). Все сечения даны в  $\text{см}^2$ .

E, МэВ	Криптон		Ксенон	
	$\sigma_{\text{ЭКС}}$	$\sigma$	$\sigma_{\text{ЭКС}}$	$\sigma$
1,0	1,28(-18)	1,10(-18)	1,78(-18)	1,67(-18)
2,0	1,30(-18)	1,09(-18)	1,81(-18)	1,65(-18)
3,0	1,31(-18)	1,11(-18)	1,83(-18)	1,68(-18)

На рис. 3,4 показаны сечения прямой ионизации атомов криптона и ксенона как функции ионизационного со-

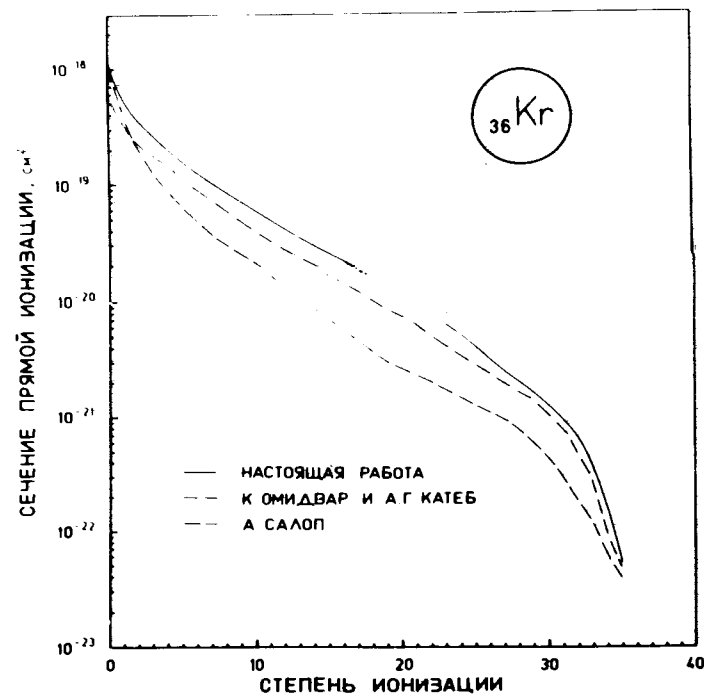


Рис. 3. Сечения прямой ионизации криптона как функции степени ионизации.

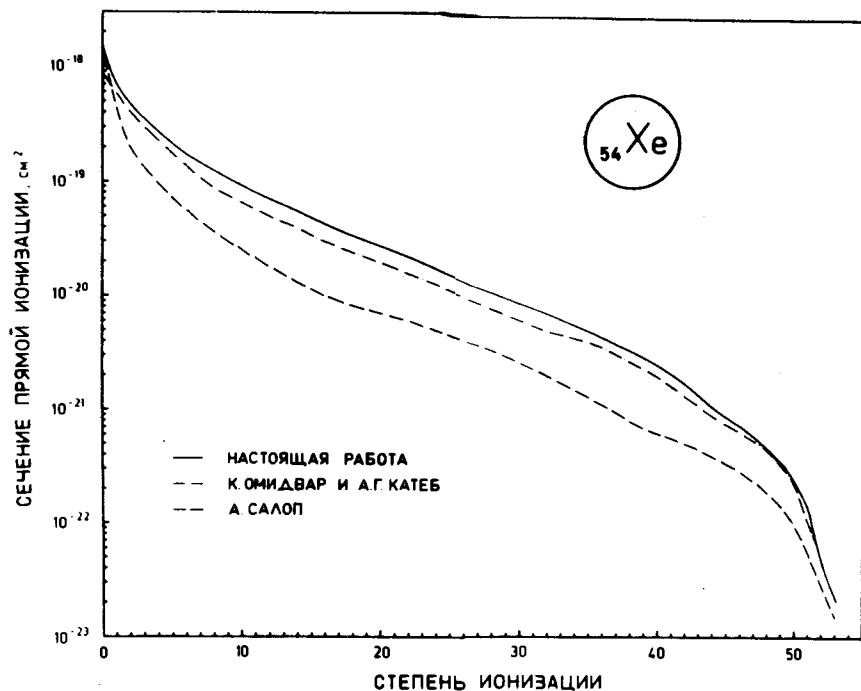


Рис. 4. Сечения прямой ионизации ксенона как функции степени ионизации.

стояния при энергии электронов 20 МэВ, полученные в настоящей работе, а также в работах Салопа<sup>/2,16/</sup> и Омидвара и Катеба<sup>/17/</sup>. Наблюдается удовлетворительное согласие полученных нами кривых с результатами работы<sup>/17/</sup> и одновременно существенное расхождение их с результатами работ<sup>/2,16/</sup>.

В табл. 2-9 представлены результаты расчета сечений одно- и двукратной ионизаций атомов азота, криптона, ксенона и урана при энергиях электронов 1 и 20 МэВ. В таблицах приняты следующие обозначения: I - степень ионизации, K - кратность. Все сечения даны в см<sup>2</sup>.

Как следует из табл. 10 /для ксенона/, значения сечений ионизаций с кратностью больше двух составляют меньше 10% от значений сечений однократной ионизации при низких степенях и 1% - при высоких степенях ионизации.

Таблица 2

Сечения одно- и двукратной ионизаций атома азота при энергии электронов 1 МэВ.

I \ K	K	
	1	2
0	4,31(-19)	4,70(-21)
1	1,55(-19)	4,47(-21)
2	7,08(-20)	4,19(-21)
3	3,30(-20)	
4	1,46(-20)	
5	3,42(-21)	
6	1,38(-21)	

Таблица 3

Сечения одно- и двукратной ионизаций атома азота при энергии электронов 20 МэВ

I \ K	K	
	1	2
0	5,12(-19)	5,97(-21)
1	1,86(-19)	5,69(-21)
2	8,51(-20)	5,36(-21)
3	4,06(-20)	
4	1,81(-20)	
5	4,38(-21)	
6	1,77(-21)	

Таблица 4

Сечения одно- и двукратной ионизаций атома криптона при энергии электронов 1 МэВ

I \ k	k		I \ k	k	
	1	2		1	2
0	8,46(-19)	1,76(-19)	18	1,27(-20)	2,65(-21)
1	4,52(-19)	4,01(-20)	19	9,99(-21)	2,57(-21)
2	2,98(-19)	7,78(-20)	20	8,48(-21)	2,50(-21)
3	2,15(-19)	6,22(-20)	21	7,12(-21)	2,43(-21)
4	1,63(-19)	5,83(-20)	22	5,91(-21)	2,37(-21)
5	1,27(-19)	2,97(-20)	23	4,82(-21)	2,30(-21)
6	1,01(-19)	2,80(-20)	24	3,84(-21)	2,24(-21)
7	8,26(-20)	3,56(-21)	25	3,00(-21)	2,78(-23)
8	6,79(-20)	3,52(-21)	26	2,21(-21)	2,76(-23)
9	5,54(-20)	3,43(-21)	27	1,85(-21)	2,72(-23)
10	4,58(-20)	3,34(-21)	28	1,52(-21)	2,68(-23)
11	3,82(-20)	3,25(-21)	29	1,21(-21)	2,64(-23)
12	3,20(-20)	3,16(-21)	30	9,39(-22)	2,61(-23)
13	2,70(-20)	3,08(-21)	31	6,92(-22)	2,57(-23)
14	2,28(-20)	2,99(-21)	32	4,67(-22)	2,53(-23)
15	1,93(-20)	2,89(-21)	33	2,64(-22)	
16	1,64(-20)	2,81(-21)	34	7,46(-23)	
17	1,39(-20)	2,73(-21)	35	3,60(-23)	

Таблица 5

Сечения одно- и двукратной ионизаций атома криптона при энергии электронов 20 МэВ

I \ k	k		I \ k	k	
	1	2		1	2
0	1,01(-18)	2,12(-19)	18	1,67(-20)	3,51(-21)
1	5,47(-19)	9,80(-20)	19	1,31(-20)	3,46(-21)
2	3,64(-19)	9,62(-20)	20	1,11(-20)	3,37(-21)
3	2,64(-19)	7,68(-20)	21	9,39(-21)	3,28(-21)
4	2,02(-19)	5,24(-20)	22	7,82(-21)	3,19(-21)
5	1,58(-19)	3,77(-20)	23	6,41(-21)	3,11(-21)
6	1,27(-19)	3,56(-20)	24	5,14(-21)	3,02(-21)
7	1,04(-19)	4,74(-21)	25	4,03(-21)	4,08(-23)
8	8,56(-20)	4,68(-21)	26	3,00(-21)	4,06(-23)
9	7,02(-20)	4,56(-21)	27	2,51(-21)	4,01(-23)
10	5,83(-20)	4,45(-21)	28	2,07(-21)	3,96(-23)
11	4,87(-20)	4,33(-21)	29	1,66(-21)	3,90(-23)
12	4,10(-20)	4,22(-21)	30	1,29(-21)	3,85(-23)
13	3,47(-20)	4,10(-21)	31	9,53(-22)	3,79(-23)
14	2,94(-20)	4,01(-21)	32	6,47(-22)	3,74(-23)
15	2,50(-20)	3,88(-21)	33	3,70(-22)	
16	2,13(-20)	3,77(-21)	34	1,11(-22)	
17	1,81(-20)	3,66(-21)	35	5,35(-23)	



Таблица 6  
Сечения одно- и двукратной ионизаций атома ксенона  
при энергии электронов 1 МэВ

I	k		I	k	
	1	2		1	2
0	1,27(-18)	3,94(-19)	27	8,85(-21)	9,05(-22)
1	5,64(-19)	2,38(-19)	28	8,43(-21)	8,88(-22)
2	3,85(-19)	1,93(-19)	29	7,57(-21)	8,71(-22)
3	2,86(-19)	1,62(-19)	30	6,79(-21)	8,55(-22)
4	2,23(-19)	9,61(-20)	31	6,08(-21)	8,39(-22)
5	1,79(-19)	2,65(-20)	32	5,42(-21)	8,23(-22)
6	1,40(-19)	1,87(-20)	33	4,83(-21)	8,08(-22)
7	1,23(-19)	1,80(-20)	34	4,28(-21)	7,92(-22)
8	1,04(-19)	1,76(-20)	35	3,78(-21)	7,77(-22)
9	8,80(-20)	1,75(-20)	36	3,31(-21)	7,62(-22)
10	6,69(-20)	1,74(-20)	37	2,91(-21)	7,49(-22)
11	6,41(-20)	1,68(-20)	38	2,54(-21)	7,36(-22)
12	5,68(-20)	1,63(-20)	39	2,18(-21)	7,33(-22)
13	4,96(-20)	1,57(-20)	40	1,85(-21)	7,11(-22)
14	4,35(-20)	1,52(-20)	41	1,55(-21)	6,98(-22)
15	3,83(-20)	1,47(-20)	42	1,26(-21)	6,86(-22)
16	3,38(-20)	1,42(-20)	43	1,00(-21)	3,33(-24)
17	2,99(-20)	1,37(-20)	44	7,53(-22)	3,31(-24)
18	2,64(-20)	1,33(-20)	45	6,39(-22)	3,28(-24)
19	2,36(-20)	1,28(-20)	46	5,33(-22)	3,25(-24)
20	2,11(-20)	8,19(-21)	47	4,33(-22)	3,21(-24)
21	1,88(-20)	5,19(-21)	48	3,39(-22)	3,18(-24)
22	1,68(-20)	5,13(-21)	49	2,54(-22)	3,15(-24)
23	1,28(-20)	2,90(-21)	50	1,73(-22)	3,11(-24)
24	1,22(-20)	2,83(-21)	51	9,86(-23)	
25	1,18(-20)	9,31(-22)	52	2,77(-23)	
26	1,04(-20)	9,22(-22)	53	1,35(-23)	

Таблица 7  
Сечения одно- и двукратной ионизаций атома ксенона  
при энергии электронов 20 МэВ

I	k		I	k	
	1	2		1	2
0	1,51(-18)	5,03(-19)	27	1,18(-20)	1,26(-21)
1	6,82(-19)	2,91(-19)	28	1,13(-20)	1,24(-21)
2	4,71(-19)	2,37(-19)	29	1,01(-20)	1,22(-21)
3	3,52(-19)	2,04(-19)	30	9,11(-21)	1,20(-21)
4	2,76(-19)	1,85(-19)	31	8,17(-21)	1,17(-21)
5	2,23(-19)	1,39(-19)	32	7,31(-21)	1,15(-21)
6	1,75(-19)	4,82(-20)	33	6,53(-21)	1,13(-21)
7	1,54(-19)	3,33(-20)	34	5,80(-21)	1,11(-21)
8	1,31(-19)	2,43(-20)	35	5,13(-21)	1,09(-21)
9	1,11(-19)	2,35(-20)	36	4,51(-21)	1,07(-21)
10	8,51(-20)	2,28(-20)	37	3,98(-21)	1,05(-21)
11	8,16(-20)	2,20(-20)	38	3,47(-21)	1,04(-21)
12	6,36(-20)	2,06(-20)	39	3,00(-21)	1,02(-21)
13	6,02(-20)	2,03(-20)	40	2,55(-21)	1,00(-21)
14	5,60(-20)	1,99(-20)	41	2,15(-21)	9,85(-22)
15	4,94(-20)	1,93(-20)	42	1,76(-21)	9,68(-22)
16	4,37(-20)	1,86(-20)	43	1,40(-21)	5,27(-24)
17	3,87(-20)	1,80(-20)	44	1,07(-21)	5,25(-24)
18	3,43(-20)	1,75(-20)	45	9,10(-22)	5,20(-24)
19	3,08(-20)	1,69(-20)	46	7,60(-22)	5,15(-24)
20	2,76(-20)	1,09(-20)	47	6,19(-22)	5,11(-24)
21	2,47(-20)	6,92(-21)	48	4,87(-22)	5,06(-24)
22	2,20(-20)	6,85(-21)	49	3,66(-22)	5,01(-24)
23	1,69(-20)	3,91(-21)	50	2,52(-22)	4,96(-24)
24	1,65(-20)	3,81(-21)	51	1,46(-22)	
25	1,56(-20)	1,30(-21)	52	4,43(-23)	
26	1,38(-20)	1,28(-21)	53	2,15(-23)	

Таблица 8  
Сечения одно- и двукратной ионизаций атома урана  
при энергии электронов 1 МэВ

I	k		I	k	
	1	2		1	2
0	1,68(-18)	9,41(-19)	27	2,88(-20)	4,53(-21)
1	8,95(-19)	1,81(-19)	28	2,68(-20)	4,46(-21)
2	6,00(-19)	1,73(-19)	29	2,51(-20)	4,40(-21)
3	4,31(-19)	1,63(-19)	30	2,34(-20)	3,54(-21)
4	3,24(-19)	1,49(-19)	31	2,19(-20)	2,79(-21)
5	2,58(-19)	1,38(-19)	32	2,04(-20)	2,76(-21)
6	2,14(-19)	1,27(-19)	33	1,90(-20)	2,72(-21)
7	1,85(-19)	8,89(-20)	34	1,77(-20)	2,67(-21)
8	1,61(-19)	6,68(-20)	35	1,64(-20)	2,58(-21)
9	1,42(-19)	6,44(-20)	36	1,53(-20)	2,56(-21)
10	1,26(-19)	6,22(-20)	37	1,42(-20)	2,55(-21)
11	1,13(-19)	4,94(-20)	38	1,33(-20)	2,51(-21)
12	1,01(-19)	4,79(-20)	39	1,24(-20)	2,47(-21)
13	9,17(-20)	3,87(-20)	40	1,15(-20)	2,43(-21)
14	8,33(-20)	1,71(-20)	41	1,07(-20)	2,39(-21)
15	7,58(-20)	1,67(-20)	42	1,00(-20)	2,35(-21)
16	6,91(-20)	1,62(-20)	43	9,33(-21)	2,31(-21)
17	6,32(-20)	1,58(-20)	44	8,69(-21)	2,27(-21)
18	5,80(-20)	1,54(-20)	45	8,09(-21)	2,24(-21)
19	5,33(-20)	1,51(-20)	46	7,53(-21)	2,20(-21)
20	4,90(-20)	1,47(-20)	47	7,05(-21)	2,17(-21)
21	4,53(-20)	1,43(-20)	48	6,59(-21)	2,14(-21)
22	4,18(-20)	1,40(-20)	49	6,15(-21)	2,10(-21)
23	3,86(-20)	9,56(-21)	50	5,75(-21)	2,07(-21)
24	3,57(-20)	6,83(-21)	51	5,36(-21)	2,04(-21)
25	3,32(-20)	6,71(-21)	52	4,99(-21)	2,01(-21)
26	3,09(-20)	6,59(-21)	53	4,64(-21)	1,32(-21)

Таблица 8. Продолжение

I	k		I	k	
	1	2		1	2
54	4,30(-21)	1,30(-21)	73	8,22(-22)	1,15(-22)
55	3,98(-21)	1,28(-21)	74	7,33(-22)	1,13(-22)
56	3,68(-21)	8,56(-22)	75	6,52(-22)	1,12(-22)
57	3,45(-21)	8,43(-22)	76	5,74(-22)	1,11(-22)
58	3,14(-21)	4,56(-22)	77	4,98(-22)	1,10(-22)
59	2,89(-21)	4,51(-22)	78	4,25(-22)	1,09(-22)
60	2,65(-21)	4,46(-22)	79	3,60(-22)	1,08(-22)
61	2,61(-21)	4,42(-22)	80	2,98(-22)	1,07(-22)
62	2,07(-21)	2,78(-22)	81	2,39(-22)	2,05(-25)
63	2,02(-21)	1,27(-22)	82	1,83(-22)	2,04(-25)
64	1,83(-21)	1,26(-22)	83	1,56(-22)	2,03(-25)
65	1,70(-21)	1,25(-22)	84	1,30(-22)	2,02(-25)
66	1,57(-21)	1,23(-22)	85	1,05(-22)	2,01(-25)
67	1,45(-21)	1,22(-22)	86	8,12(-23)	1,99(-25)
68	1,33(-21)	1,21(-22)	87	6,14(-23)	1,98(-25)
69	1,22(-21)	1,20(-22)	88	4,23(-23)	1,96(-25)
70	1,11(-21)	1,18(-22)	89	2,41(-23)	
71	1,01(-21)	1,17(-22)	90	6,45(-24)	
72	9,14(-22)	1,16(-22)	91	3,16(-24)	

Таблица 9  
Сечения одно- и двукратной ионизаций атома урана  
при энергии электронов 20 МэВ

I	k		I	k	
	1	2		1	2
0	1,99(-18)	1,13(-18)	27	3,80(-20)	6,19(-21)
1	1,08(-18)	2,27(-19)	28	3,55(-20)	6,10(-21)
2	7,30(-19)	2,17(-19)	29	3,32(-20)	6,01(-21)
3	5,29(-19)	2,05(-19)	30	3,10(-20)	4,88(-21)
4	4,01(-19)	1,88(-19)	31	2,90(-20)	3,87(-21)
5	3,22(-19)	1,74(-19)	32	2,72(-20)	3,83(-21)
6	2,68(-19)	1,61(-19)	33	2,53(-20)	3,77(-21)
7	2,32(-19)	1,13(-19)	34	2,36(-20)	3,65(-21)
8	2,03(-19)	8,58(-20)	35	2,20(-20)	3,62(-21)
9	1,8(-19)	8,20(-20)	36	2,05(-20)	3,57(-21)
10	1,60(-19)	8,01(-20)	37	1,91(-20)	3,55(-21)
11	1,44(-19)	6,40(-20)	38	1,79(-20)	3,49(-21)
12	1,29(-19)	6,20(-20)	39	1,67(-20)	3,44(-21)
13	1,18(-19)	5,03(-20)	40	1,55(-20)	3,39(-21)
14	1,07(-19)	2,26(-20)	41	1,45(-20)	3,34(-21)
15	9,75(-20)	2,20(-20)	42	1,36(-20)	3,28(-21)
16	8,91(-20)	2,15(-20)	43	1,27(-20)	3,23(-21)
17	8,17(-20)	2,1(-20)	44	1,18(-20)	3,18(-21)
18	7,51(-20)	2,05(-20)	45	1,10(-20)	3,14(-21)
19	6,92(-20)	2,00(-20)	46	1,03(-20)	3,09(-21)
20	6,38(-20)	1,95(-20)	47	9,65(-21)	3,04(-21)
21	5,91(-20)	1,91(-20)	48	9,05(-21)	3,00(-21)
22	5,46(-20)	1,86(-20)	49	8,47(-21)	2,96(-21)
23	5,05(-20)	1,28(-20)	50	7,92(-21)	2,91(-21)
24	4,68(-20)	9,22(-21)	51	7,39(-21)	2,87(-21)
25	4,37(-20)	9,07(-21)	52	6,89(-21)	2,83(-21)
26	4,07(-20)	8,91(-21)	53	6,42(-21)	1,87(-21)

Таблица 9. Продолжение

I	k		I	k	
	1	2		1	2
54	5,97(-21)	1,84(-21)	73	1,20(-21)	1,75(-22)
55	5,54(-21)	1,82(-21)	74	1,07(-21)	1,73(-22)
56	5,13(-21)	1,22(-21)	75	9,56(-22)	1,72(-22)
57	4,76(-21)	1,21(-21)	76	8,45(-22)	1,70(-22)
58	4,40(-21)	6,59(-22)	77	7,37(-22)	1,69(-22)
59	4,06(-21)	6,52(-22)	78	6,32(-22)	1,67(-22)
60	3,73(-21)	6,46(-22)	79	5,40(-22)	1,65(-22)
61	3,67(-21)	6,39(-22)	80	4,50(-22)	1,64(-22)
62	2,95(-21)	4,10(-22)	81	3,65(-22)	3,91(-25)
63	2,87(-21)	1,92(-22)	82	2,83(-22)	3,90(-25)
64	2,61(-21)	1,91(-22)	83	2,42(-22)	3,88(-25)
65	2,43(-21)	1,89(-22)	84	2,03(-22)	3,86(-25)
66	2,25(-21)	1,87(-22)	85	1,65(-22)	3,84(-25)
67	2,08(-21)	1,86(-22)	86	1,29(-22)	3,82(-25)
68	1,91(-21)	1,84(-22)	87	9,81(-23)	3,80(-25)
69	1,76(-21)	1,82(-22)	88	6,84(-23)	3,77(-25)
70	1,61(-21)	1,80(-22)	89	4,00(-23)	
71	1,46(-21)	1,79(-22)	90	1,24(-23)	
72	1,33(-21)	1,77(-22)	91	6,11(-24)	

Таблица 10

Сечения многократной ионизации атома ксенона при энергии электронов 20 МэВ

I	K	1	2	3	4	5	6	7	8
0		1,51(-18)	5,03(-19)	1,01(-19)	8,62(-20)	2,71(-20)	1,13(-20)	3,04(-21)	1,70(-21)
1		6,82(-19)	2,91(-19)	6,70(-20)	5,86(-20)	1,95(-20)	8,59(-21)	2,53(-21)	1,41(-21)

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод позволяет несложным путем, с хорошей точностью /по экспериментальным данным, не хуже 15%/ и без больших затрат времени на ЭВМ вычислить полное сечение ионизации и сечения ионизации подболочек атомов или ионов любой степени ионизации при столкновениях с релятивистскими электронами.

Авторы весьма признательны Р.Рейфу и Р.Шмидту за полезные дискуссии во время подготовки настоящей работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Х.-У.Зиберт, Д.Леманн, Г.Музиоль, Г.Щорнак. Сообщение ОИЯИ, Р9-9366, Дубна, 1975.
2. A.Salop. *Phys.Rev.*, A8, 3022 /1973/.
3. М.Л.Иовнович, А.Б.Кузнецов, В.П.Прейзендорф. Сообщение ОИЯИ, Р9-8119, Дубна, 1974.
4. В.Георге, М.Л.Иовнович, В.Г.Новиков, В.П.Прейзендорф, М.Б.Рубин, В.П.Саранцев. Сообщение ОИЯИ, Р9-6555, Дубна, 1972.
5. T.Aberg. *Phys.Rev.*, A4, 1735 /1971/.
6. H.Kolbenstvedt. *Journ. Appl.Phys.*, 38, 4785 /1967/.
7. L.D.Landau, E.M.Lifschitz. *Lehrbuch der theoretischen Physik. Bd. IVa, 3. Auflage, Akademie-Verlag, Berlin, 1975, S. 215.*
8. W.Heitler. *The Quantum Theorie of Radiation. Oxford University Press, 1954, 3rd ed., p. 207.*
9. M.Stobbe. *Ann. d. Phys.*, 7, 661 /1930/.
10. T.A.Carlson, W.E.Hunt, M.O.Krause. *Phys.Rev.*, 151, 41 /1966/.
11. Х.-У.Зиберт, Д.Леманн, Г.Музиоль, Г.Щорнак. Препринт ОИЯИ, Р9-9657, Дубна, 1976.
12. M.O.Krause. *Proc. Int. Conf. Inn. Shell Ioniz. Phenomena Future Appl., Atlanta, 1973, p. 1586.*
13. T.M.El-Sherbini, M.J. van der Wiel, F.J. de Heer. *Physica*, 48, 157 /1970/.
14. F.F.Rieke, W.Prepejchal. *Phys.Rev.*, A6, 1507 /1972/.
15. D.A.Liberman, D.T.Cromer, J.T.Waber. *Comp.Phys. Comm.*, 2, 107 /1971/.
16. A.Salop. *Phys. Rev.*, A9, 2496 /1974/.
17. K.Omidvar, A.H.Khateeb. *J.Phys.*, B6, 1507 /1972/.

Рукопись поступила в издательский отдел  
7 декабря 1976 года.