

$\frac{4}{8-19}$  23  
566



И. М. Василевский, Ю. Д. Прокошкин

Д-566

ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ АТОМОВ

Дубна 1960 год

Д-566

И.М.Василевский, Ю.Д.Прокошкин

ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ АТОМОВ<sup>x/</sup>

877/6 мр.

---

<sup>x/</sup> Подробная статья будет опубликована в ЖЭТФ.

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

## 1. В в е д е н и е

Ионизационные потери энергии быстрых заряженных частиц, проходящих через вещество, описываются известной формулой Бете-Блоха:

$$-\frac{dE}{dS} = \frac{2\pi(Ze^2)^2 n}{\rho mc^2 \beta^2} \left\{ \ln \frac{2mc^2 \beta^2 T}{I^2 (1-\beta^2)} - 2\beta^2 + \frac{2}{Z} \sum_{K,L} C_i - \delta \right\} \quad /1/$$

Из входящих в это соотношение величин ионизационный потенциал  $I$  является единственной величиной, которая не может быть точно рассчитана на основании современной теории атомных оболочек. В связи с этим формула /1/ носит полуэмпирический характер. Существует два способа экспериментального определения ионизационного потенциала: путем измерения тормозной способности тонкого слоя вещества и путем одновременного измерения полного пробега частиц в веществе и их энергии. Первый метод является наиболее прямым, так как он позволяет найти величину  $I$  непосредственно из соотношения /1/. В то же время этот метод и более труден, поскольку он связан с необходимостью точно измерять малые изменения энергии частиц. В области больших энергий до последнего времени было выполнено лишь одно измерение величины ионизационных потерь /при энергии протонов 18 Мэв<sup>1/</sup>/. Второй метод значительно более прост в экспериментальном отношении, но ему свойственны большие трудности при интерпретации результатов измерений, так как в этом случае приходится учитывать ряд эффектов /рассеяние, ядерное взаимодействие и др./, связанных с прохождением частицы через толстый слой вещества. К тому же этот метод позволяет определить лишь усредненную по широкому интервалу энергии величину  $I$ , а не значение ионизационного потенциала при определенной энергии.

Помимо указанных выше трудностей задача точного определения величины ионизационного потенциала осложняется еще и тем, что  $I$  экспоненциально зависит от измеряемых величин, вследствие чего относительная погрешность определения  $I$  оказывается в 6-10 раз превышающей экспериментальную погрешность величины  $dE/dS$ .

Согласно существующей теории /см. например, /2/ / ионизационный потенциал не должен зависеть от энергии бомбардирующих частиц. Однако, Закс и Ричардсон, проанализировав найденные экспериментальные значения  $I$  для алюминия, ука-

зали на возможную зависимость ионизационного потенциала от скорости частиц<sup>/3/</sup>. Позже Колдуэлл показал<sup>/4/</sup>, что если правильно учесть связь электронов в атоме на К- и L-оболочках, то экспериментальные данные приводят к заключению о независимости I от скорости частиц. При этом им были поставлены под сомнение результаты, полученные Мазером и Сегре<sup>/5/</sup> при максимальной в то время энергии протонов /  $E_{эфф} = 200$  Мэв/ в связи с тем, что в указанной работе энергия протонов была определена путем измерения угла испускания излучения Черенкова, а теоретическое соотношение между этим углом и величиной скорости частицы подтверждено пока экспериментально с недостаточной точностью. Представление о постоянстве ионизационного потенциала оставалось до настоящего времени господствующим и использовалось во всех последних работах /см. например, /6/. Опубликованные недавно данные Зрелова и Столетова<sup>/7/</sup> подтвердили правильность экспериментальных результатов Мазера и Сегре, однако не сняли возражения Колдуэлла, поскольку они были получены тем же методом, что и в работе<sup>/5/</sup>.

Указанные выше разногласия побудили нас в 1957 году провести систематические измерения ионизационных потенциалов различных атомов в широком интервале энергий бомбардирующих частиц. Для определения величин I были измерены как ионизационные потери  $dE/dS$ , так и полные пробеги протонов, дейтронов и альфа-частиц, то есть использованы оба обсуждавшихся выше метода. Опыты были выполнены на шестиметровом ускорителе Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

## 2. Измерение ионизационных потерь

Для определения величины ионизационных потерь нами была использована установка, применявшаяся ранее<sup>/8/</sup> при изучении энергетических характеристик выведенного пучка. Выведенный пучок пропусклся через ряд коллиматоров и отклонялся магнитом. Отклоненный пучок регистрировался детектором, состоящим из тонкого /0,1-0,2 см/ пластического сцинтиллятора и расположенного под ним фотоэлектронного умножителя. Электрические импульсы умножителя интегрировались RC-ячейкой, и величина тока измерялась самопишущим потенциометром. При помощи синхронного мотора детектор мог передвигаться перпендикулярно пучку. При этом на ленте потенциометра регистрировалась функция распределения плотности пучка. Эта функция хорошо описывается кривой Гаусса, что позволило с большой

точностью находить положение центра пучка. Энергия частиц пучка определялась с точностью, лучшей 0,1%, методом токонесущей нити /подробно об этом см. в работе<sup>18/</sup>/. При измерении величин ионизационных потерь на пути пучка помещался тонкий образец изучаемого вещества, и находилась разность энергии первоначального и заторможенного пучка. Эта операция повторялась многократно. Полученные таким способом величины  $dE/dS$  для меди приведены в таблице 1. Во всех измерениях, за исключением точки 615 Мэв, использовался один и тот же медный образец.

Т а б л и ц а 1

Род частиц	p	p	p	d	$\alpha$
Энергия падающих частиц, Мэв <sup>x/</sup>	662	662	283	397 /198/	765 /190/
Эффективная энергия частиц, Мэв <sup>x/</sup>	651	615	267	376,8 /188,5/	691 /173,9/
$dE/dS$ , Мэв/г/см <sup>2</sup>	1,74±0,02	1,772±0,008	2,61±0,03	3,15±0,01	3,337±0,015

x/ В скобках указана эквивалентная энергия протонов.

Величины ионизационных потерь для других, отличных от меди веществ были определены относительным методом, путем сравнения потерь энергии в образцах из исследуемого вещества и из меди. Измеренные относительные потери  $q_x = (dE/dS)_x / (dE/dS)_{Cu}$  приведены в таблице 11. Там же помещены величины, полученные в других работах, что позволяет проследить за изменением относительных тормозных способностей с ростом энергии бомбардирующих частиц.

### 3. Пробег и энергии частиц

Для измерения пробега частиц была использована ионизационная камера. Пучок частиц тормозился при помощи медного фильтра клиновидной формы. Ток

Т а б л и ц а П

Относительные ионизационные потери  $q_x$ .

Частицы	p	p	p	$\alpha$	d	p	p	p	p	p
Эффект. энергия частиц, Мэв x/	19,8	20	70	69I (173,9)	376,8 (188,5)	267	300	615	635	65I
Ссылка	/9/	/10/	/11/	Наст. работа	Наст. работа	Наст. работа	/12/	Наст. работа	/7/	Наст. работа
H <sup>xx</sup>	-	-	-	3,1 $\pm$ 0,1	3,10 $\pm$ 0,04	-	3,01 $\pm$ 0,15	3,06 $\pm$ 0,04	3,02 $\pm$ 0,15	-
C	-	-	-	1,31 $\pm$ 0,01	1,316 $\pm$ 0,003	1,29 $\pm$ 0,01	1,285 $\pm$ 0,013	1,258 $\pm$ 0,003	1,268 $\pm$ 0,013	1,271 $\pm$ 0,005
Al	1,218 $\pm$ 0,002	1,196 $\pm$ 0,007	1,221 $\pm$ 0,012	1,17 $\pm$ 0,01	1,167 $\pm$ 0,003	-	1,143 $\pm$ 0,011	1,154 $\pm$ 0,003	-	1,161 $\pm$ 0,005
Sn	0,828 $\pm$ 0,002	0,835 $\pm$ 0,005 <sup>xxx/</sup>	-	-	0,870 $\pm$ 0,005	-	0,858 $\pm$ 0,009	-	0,870 $\pm$ 0,009	0,874 $\pm$ 0,004
Pb	0,677 $\pm$ 0,004	0,679 $\pm$ 0,007 <sup>xxxx/</sup>	0,747 $\pm$ 0,007	0,749 $\pm$ 0,007	0,748 $\pm$ 0,003	0,736 $\pm$ 0,017	0,754 $\pm$ 0,007	0,763 $\pm$ 0,003	-	0,768 $\pm$ 0,004

x/ В скобках указана эквивалентная энергия протонов.

xx/ Найдено по разности "CH<sub>2</sub>-C".

xxx/ Получено из данных о соседнем элементе с<sub>a</sub> в предположении, что I=kZ и коэффициент k одинаков для с<sub>d</sub> и Sn.

xxxx/ То же для Au и Pb.

ионизационной камеры регистрировался самопишущим потенциометром. Толщина фильтра изменялась синхронно с движением ленты самописца, благодаря чему осуществлялась непрерывная запись кривой Брэгга. Для повышения точности измерение многократно повторялось. Одновременно методом токнесущей нити определялась кинетическая энергия частиц Т. Найденные описанным методом пробеги различных частиц в меди R приведены в таблице 111. При вычислении среднего пробега в отличие от работ <sup>15,7/</sup> учитывалось рассеяние частиц в фильтре. Соответствующая поправка внесена и в приведенные для сравнения в таблице 111 данные, взятые из указанных работ.

Т а б л и ц а 111

Частицы	T, Мэв	R, г/см <sup>2</sup> Cu	Частицы	T, Мэв <sup>x/</sup>	R, г/см <sup>2</sup> Cu
p	663,5±0,7	263,0±0,2	p	190,1±0,8	36,4±0,1
p	658 ±2 <sup>7/</sup>	258,3±1,2	p	148,6±0,8	23,8±0,1
p	473,3±0,6	157,9±0,1	d	394,4±0,5	75,7±0,1
p	340 ± 1 <sup>5/</sup>	93,4±0,2		/197,3±0,3/ <sup>x/</sup>	
p	279,9±0,6	68,6±0,1	α	774,2±1,0	37,5±0,1
				/195,0±0,3/ <sup>x/</sup>	

<sup>x/</sup> В скобках указана эквивалентная энергия протонов.

#### 4. Ионизационные потенциалы

##### А. Ионизационный потенциал для меди

Величины ионизационного потенциала для меди  $I_{Cu}$  были найдены по данным таблицы 1 и приведены в таблице 1У.

Т а б л и ц а 1У

Частицы	р	р	р	д	α
Эффект. <sup>х/</sup> энергия, МэВ	651	615	267	376 /188,5/	691 /173,9/
$I_{Cu}$ , эВ.	301+27	302+11	288+22	333+7	318+9

х/ В скобках указана эквивалентная энергия протонов.

Сравнение всех данных, полученных путем непосредственного измерения величин ионизационных потерь /работа<sup>/1/</sup> и настоящая работа/ показывает, что если формула /1/ справедлива и поправки  $C_1$  и  $\delta$  вычислены Вальске<sup>/13/</sup> и Штернхаймером<sup>/14/</sup> правильно, то необходимо допустить существование зависимости ионизационного потенциала от скорости бомбардирующих частиц /см.рис.1/.

Для получения дополнительной информации о величине ионизационного потенциала в области высоких энергий были использованы соотношения между пробегом и энергией, приведенные в таблице 111 настоящей работы. Ионизационные потенциалы, найденные методом "пробег-энергия" /см.таблицу У/ подкрепляют вывод о существовании зависимости величины  $I_{Cu}$  от скорости частиц.

Т а б л и ц а У

Частицы	Эффект. энергия, МэВ	$I_{Cu}$ , эВ	Частицы	Эффект. энергия, МэВ	$I_{Cu}$ , эВ
р	400	322+7	α	117 <sup>х/</sup>	351+10
р	282	312+5	р	115 <sup>х/</sup>	338+12
р	168	320+6	р	90	341+18
д	118 <sup>х/</sup>	323+12			

х/ Указана эквивалентная энергия протонов.



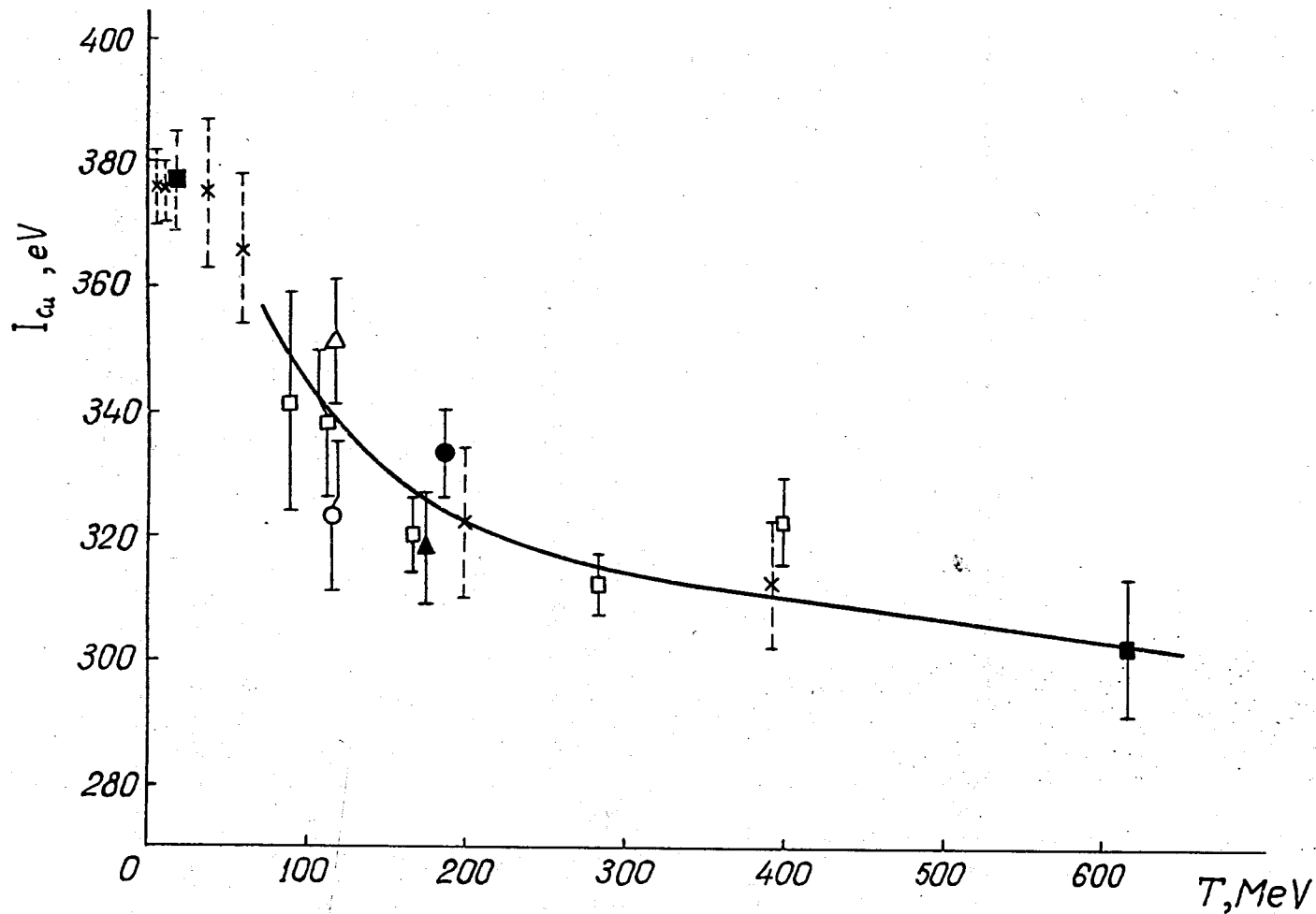


Рис. 1.

Зависимость ионизационного потенциала атома меди  $I_{Cu}$  от энергии бомбардирующих частиц  $T$ . Черные точки-результаты прямых измерений ионизационных потерь, светлые точки показывают величины, найденные методом "пробег-энергия".  $\blacksquare$ ,  $\square$ ,  $\bullet$ ,  $\circ$ ,  $\blacktriangle$  и  $\triangle$  - данные настоящей работы, полученные на пучках протонов, дейтронов и альфа-частиц, соответственно.  $\blacklozenge$  - взято из работы /1/,  $\ast$  - по данным работ /15,9,11/ (в порядке возрастания энергии), полученным на пучках протонов. Аппроксимирующая кривая проведена методом наименьших квадратов.

Б. Ионизационные потенциалы других веществ

Величины ионизационных потенциалов разных веществ  $I_X$ , найденные по данным таблиц 11, 1У, У, приведены в таблице У1 совместно с данными других работ.

Т а б л и ц а У1

Ионизационные потенциалы  $I$  /в электрон-вольтах/

Частицы	Эффект. <sup>x/</sup> энергия, Мэв	Ссыл- ка	H <sup>x</sup>	C	Al	Cu <sup>xx</sup>	Sn	Pb
p	6-18	/15/	-	-	166 <sub>-1</sub>	376 <sub>-20</sub>	622 <sub>-43</sub> <sup>x/</sup>	1076 <sub>-104</sub> <sup>x/</sup>
p	18	/3/	-	-	163 <sub>-3</sub>	377 <sub>-8</sub>	708 <sub>-59</sub>	1179 <sub>-104</sub> <sup>x/</sup>
p	19,8	/9/	-	-	166 <sub>-1</sub>	366 <sub>-5</sub>	621 <sub>-7</sub> <sup>x/</sup>	1070 <sub>-24</sub>
α	691 /173,9/	наст. работа	18 <sub>-6</sub>	86 <sub>-6</sub>	157 <sub>-13</sub>	325 <sub>-8</sub>	-	778 <sub>-43</sub>
α	376,8 /188,5/	наст. работа	17,0 <sub>-2,4</sub>	81,2 <sub>-3,1</sub>	158 <sub>-5</sub>	323 <sub>-8</sub>	473 <sub>-20</sub>	795 <sub>-23</sub>
p	200	/5,4/	-	-	155 <sub>-5</sub>	322 <sub>-8</sub>	-	-
p	267	наст. работа	-	88 <sub>-7</sub>	-	316 <sub>-8</sub>	-	918 <sub>-131</sub>
p	300	/12/	18 <sub>-7</sub>	87 <sub>-8</sub>	170 <sub>-13</sub>	314 <sub>-8</sub>	514 <sub>-38</sub>	789 <sub>-49</sub>
p	615	наст. работа	11,7 <sub>-2,1</sub>	89 <sub>-4</sub>	145 <sub>-7</sub>	302 <sub>-11</sub>	-	786 <sub>-30</sub>
p	635	/7/	14 <sub>-7</sub>	84 <sub>-9</sub>	-	301 <sub>-12</sub>	488 <sub>-38</sub>	-
p	651	наст. работа	-	79 <sub>-5</sub>	136 <sub>-8</sub>	300 <sub>-12</sub>	463 <sub>-23</sub>	753 <sub>-37</sub>

x/ См. примечания к таблице 11.

xx/ Здесь приведены усредненные значения  $I_{Cu}$  /см. кривую на рис. 1/.

Как видно из таблицы У1 ионизационные потенциалы веществ, более тяжелых, чем медь, уменьшаются с ростом энергии еще быстрее, чем  $I_{Cu}$ . Наоборот, для легких веществ /алюминий/ наблюдается сравнительно медленное изменение величины ионизационного потенциала с энергией.

В заключение пользуемся случаем поблагодарить В.П.Зрелова за обсуждение результатов настоящей работы.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 июля 1960 года.

### Л и т е р а т у р а

1. D.C.Sachs, J.R.Richardson, Phys.Rev. , 83, 834, 1951.
2. M.S.Livingston, H.A.Bethe. Revs.Modern Phys., 9, 263, 1937.
3. D.C.Sachs, J.R.Richardson, Phys.Rev., 89, 1163, 1953.
4. D.O.Caldwell. Phys.Rev., 100, 291, 1955; Nuovo Cim., 2, 183, 1955.
5. R.Mather, E.Segre. Phys.Rev., 84, 191, 1951.
6. R.M.Sternheimer. Phys.Rev. , 115, 137, 1959.
7. В.П.Зрелов, Г.Д.Столетов. ЖЭТФ, 36, 658, 1959.
8. И.М.Василевский, Ю.Д.Прокошкин. Атомная энергия, 7, 225, 1959.
9. V.C.Burkig, K.R.MacKenzie. Phys.Rev., 106, 848, 1957.
10. C.P.Sonett, K.R.MacKenzie. Phys.Rev. 100, 734, 1955.
11. N.Bloembergen, P.J. van Heerden. Phys.Rev., 83, 561, 1951.
12. C.J.Bakker, E.Segre. Phys.Rev., 81, 489, 1951.
13. M.C.Walske. Phys.Rev., 88, 1283, 1952; Phys.Rev., 101, 940, 1956.
14. R.M.Sternheimer, Phys.Rev., 88, 851, 1952; Phys.Rev., 91, 256, 1953; Phys.Rev., 103, 511, 1956.
15. H.Bichsel, R.F.Mozley. Phys.Rev., 94, 764, 1954; Phys.Rev. 105, 1788, 1957.