

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



Б-287

20/1-75  
P1 - 8205

197/2-75

Ю.А.Батусов, С.А.Бунятов, Л.Визирева,  
Г.Р.Гулканян, Ф.Мирсалихова, В.М.Сидоров,  
Х.Чернев

ИСПУСКАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ОЖЕ  
В  $\mu$  -МЕЗОАТОМАХ  
И ВЫЛЕТ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
ПРИ ЗАХВАТЕ  $\mu$  -МЕЗОНОВ ЛЕГКИМИ (C,N,O)  
И ТЯЖЕЛЫМИ (Ag, Br) ЯДРАМИ

**1974**

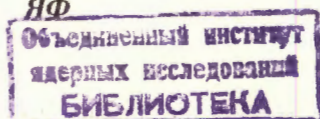
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

P1 - 8205

Ю.А.Батусов, С.А.Бунятов, Л.Визирева,<sup>1</sup>  
Г.Р.Гулканян, Ф.Мирсалихова,<sup>2</sup> В.М.Сидоров,  
Х.Чернев<sup>3</sup>

ИСПУСКАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ОЖЕ  
В  $\mu$ -МЕЗОАТОМАХ  
И ВЫЛЕТ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
ПРИ ЗАХВАТЕ  $\mu$ -МЕЗОНОВ ЛЕГКИМИ (C,N,O)  
И ТЯЖЕЛЫМИ (Ag, Br) ЯДРАМИ

Направлено в ЯФ



- 
- <sup>1</sup> Высший химико-технологический институт, София.  
<sup>2</sup> Ташкентский политехнический институт.  
<sup>3</sup> Физический институт БАН, София.

Батусов Ю.А., Бунятов С.А., Визирева Л., Гулкьян Г.Р., Р1 - 8205  
Мирсалихова Ф., Сидоров В.М., Чернев Х.

Испускание электронов Оже в  $\mu^-$ -мезоатомах и вылет  
заряженных частиц при захвате  $\mu^-$ -мезонов легкими (C,N,O)  
и тяжелыми (Ag,Br) ядрами

Определены вероятности испускания электронов Оже с энергией  
(20±100) кэВ в  $\mu^-$ -мезоатомах легких (C,N,O) и тяжелых (Ag,Br)  
элементов.

Получены относительные вероятности испускания одного, двух, трех  
и четырех заряженных частиц при захвате  $\mu^-$ -мезонов ядрами (C,N,O)  
и (Ag,Br). Полный выход заряженных частиц на один акт захвата состав-  
ляет (7,4±1,4)% для ядер (C,N,O) и (2,9±0,2)% для ядер (Ag,Br).

Препринт Объединенного института ядерных исследований.  
Дубна, 1974

Batusov Yu.A., Bunyatov S.A., Vizireva L., Р1 - 8205  
Gulkanyan G.R., Mirsalikhova F., Sidorov V.M.,  
Chernev Kh.

Emission of the Auger Electrons in  $\mu^-$ -Mesic Atoms  
and Escape of Charged Particles in  $\mu^-$ -Meson  
Capture by Light (C,N,O) and Heavy (Ag,Br) Nuclei

The probabilities of emission of the Auger electrons  
of (20±100) keV in  $\mu^-$ -mesic atoms of light (C,N,O) and heavy  
(Ag,Br) elements were determined to be  $\alpha^l = (1.1 \pm 0.3) \cdot 10^{-2}$  and  
 $\alpha^h = (31 \pm 1) \cdot 10^{-2}$  respectively. The multiplicity was also de-  
termined and the spectrum of the Auger electrons from  
heavy element mesic atoms was measured.

There were obtained the relative probabilities of emis-  
sion of one, two, three and four charged particles in  $\mu^-$ -me-  
son capture by (C,N,O) and (Ag,Br) nuclei. The total yield of char-  
ged particles per one capture act is (7.4±1.4)% for (C,N,O)  
and (2.9±0.2)% for (Ag,Br) nuclei.

Preprint. Joint Institute for Nuclear Research.

Dubna, 1974

В предыдущей работе<sup>/1/</sup> были исследованы некоторые  
общие характеристики вылета заряженных частиц при  
захвате  $\mu^-$ -мезонов легкими (C, N, O) и тяжелыми  
(Ag, Br) ядрами фотозумьсии. В частности, были опре-  
делены относительные вероятности  $W_2^l$ ,  $W_3^l$ ,  $W_4^l$  вы-  
лета, соответственно, двух, трех и четырех заряженных  
частиц из легких ядер и одной и двух заряженных частиц -  
из тяжелых ( $W_1^T$ ,  $W_2^T$ ). В работе<sup>/1/</sup> для разделения  
числа событий захвата с вылетом заряженных частиц  
из легких и тяжелых ядер нами использовались вероят-  
ности испускания электронов Оже с энергией /20 ÷  
±100/ кэВ из мезоатомов легких ( $\alpha^l$ ) и тяжелых ( $\alpha^T$ )  
элементов. Для вероятности  $\alpha^l$  определено<sup>/1/</sup> значе-  
ние  $\alpha^l = 1,5 \pm 0,5\%$ , а для  $\alpha^T$  было взято значение  
 $\alpha^T = 32 \pm 6\%$  из работы<sup>/2/</sup>. Из-за больших ошибок в зна-  
чениях  $\alpha^l$  и, особенно,  $\alpha^T$  в работе<sup>/1/</sup>, получены только  
грубые оценки для вероятностей  $W_1^l$  и  $W_3^T$ .

В настоящей работе величина  $\alpha^T$  определяется зна-  
чительно точнее, несколько улучшена также точность  
величины  $\alpha^l$ . Это позволяет дать более полную и точную  
количественную картину испускания заряженных частиц  
при захвате  $\mu^-$ -мезонов ядрами (C, N, O) и (Ag, Br).

Методические вопросы, связанные с пучком  $\mu^-$ -мезо-  
нов, с выбором зоны просмотра остановок  $\mu^-$ -мезонов  
в фотозумьсионных камерах, определением примеси  
 $\pi^-$ -мезонов, идентификацией  $\sigma$ -звезд и электронов Оже,  
подробно рассмотрены в работе<sup>/1/</sup>.

**Остановки  $\mu^-$ -мезонов и образование  $\mu^-$ -мезоатомов на легких и тяжелых элементах**

В настоящей работе остановки  $\mu^-$ -мезонов регистрировались при помощи прослеживания треков мезонов до точки остановки. При этом, в отличие от метода просмотра "по площади" /1/, не возникает необходимости введения поправок на эффективность поиска остановок  $\mu^-$ -мезонов и поиска  $\sigma^-$ -звезд.

После прослеживания 10000 треков  $\mu^-$ -мезонов было зарегистрировано 193  $\sigma^-$ -звезды. С учетом примеси  $\sigma^-$ -звезд от остановок  $\pi^-$ -мезонов /составляющей 1% от общего числа  $\sigma^-$ -звезд /1//, находим, что вероятность образования  $\sigma^-$ -звезды на одну остановку  $\mu^-$ -мезона в фотоэмульсии составляет  $w_\sigma = 1,91 \pm 0,14 \cdot 10^{-2}$ . Это значение согласуется с определенным нами в работе /1/:  $w_\sigma = 2,00 \pm 0,17 \cdot 10^{-2}$ . Усредняя оба значения, получаем:

$$w_\sigma = 1,94 \pm 0,11 \cdot 10^{-2},$$

что находится в хорошем согласии со значением, полученным в работе /3/  $w_\sigma = 1,95 \pm 0,07 \cdot 10^{-2}$ .

Остальная часть остановок  $\mu^-$ -мезонов распределяется между  $\rho^-$ -остановками /захват  $\mu^-$ -мезона ядром без испускания заряженных частиц/ и  $\mu^-e^-$ -остановками /распад  $\mu^-$ -мезона/ следующим образом:

$$w_\rho = 56,2 \pm 0,9 \cdot 10^{-2}, \quad w_{\mu-e} = 41,8 \pm 0,8 \cdot 10^{-2}.$$

Для того чтобы определить, какая часть всех остановок приводит к образованию мезоатомов на легких элементах ( $\beta$ ) и какая - на тяжелых ( $1 - \beta$ ), мы воспользовались уравнениями

$$w_\rho + w_\sigma = \beta W_{\text{захв}}^{\text{Л}} + (1 - \beta) W_{\text{захв}}^{\text{Т}} \quad /1/$$

$$w_{\mu-e} = \beta (1 - W_{\text{захв}}^{\text{Л}}) + (1 - \beta) (1 - W_{\text{захв}}^{\text{Т}}), \quad /2/$$

где  $W_{\text{захв}}^{\text{Л}}$  означает часть  $\mu^-$ -мезонов в мезоатомах легких элементов, захватываемую ядром. Аналогичный смысл для тяжелых ядер имеет величина  $W_{\text{захв}}^{\text{Т}}$ . Величины  $W_{\text{захв}}^{\text{Л}}$  отдельно для каждого из ядер C, N, O, Ag, Br известны из измерений времени жизни  $\mu^-$ -мезонов в мезоатомах этих элементов /4/. Усредненные величины  $W_{\text{захв}}^{\text{Л}}$  для группы легких (C, N, O) и  $W_{\text{захв}}^{\text{Т}}$  для тяжелых (Ag, Br) ядер равны:

$$W_{\text{захв}}^{\text{Л}} = 0,12, \quad W_{\text{захв}}^{\text{Т}} = 0,95.$$

При усреднении этих величин принималось, что относительная частота остановок в каждом из элементов C, N, O или Ag, Br равна среднему арифметическому от частот, полученных в предположениях о концентрационном законе и Z-законе остановки данного элемента. Отметим, однако, что значения  $\beta$ , получаемые из уравнений /1/ и /2/, весьма слабо зависят от предположения о законе остановок / Z-закон, концентрационный закон или среднее между ними/. Значения  $\beta$ , полученные отдельно из уравнения /1/ и из уравнения /2/, в пределах ошибок совпадают друг с другом и равны:

$$\beta = 0,44 \pm 0,02.$$

Таким образом, /44 ± 2% всех остановившихся  $\mu^-$ -мезонов захватываются на атомные орбиты легких и /56 ± 2% - тяжелых элементов.

*Вероятность испускания электронов Оже с энергией /20 ÷ 100/ кэВ из мезоатомов легких и тяжелых элементов*

Для регистрации электронов Оже часть остановок просматривалась с большим увеличением 1350х. Критерии идентификации электронов Оже были такими же, как и в работе /1/. Из  $N_{\rho+\sigma} = 2627$   $\rho^-$  и  $\sigma^-$ -остановок  $N_{\rho+\sigma}^0 = 736$  сопровождалось испусканием одного и более электронов Оже с энергией /20 ÷ 100/ кэВ, а из

$N_{\mu} = 1236 \mu - e$  остановок - всего  $N_{\mu}^0 = 33$ . Для определения вероятностей  $\alpha^L$  и  $\alpha^T$  испускания одного и более электронов Оже в указанном энергетическом интервале из мезоатомов легких и тяжелых элементов мы воспользовались системой уравнений, означающих, что полное число событий данного типа /с электроном Оже или без него/ представляет собой сумму чисел событий на легких и тяжелых элементах:

$$\frac{N_{\rho+\sigma}^0}{N_{\rho+\sigma}} = \frac{\beta W_{\text{захв}}^L}{\beta W_{\text{захв}}^L + (1-\beta) W_{\text{захв}}^T} \alpha^L + \frac{(1-\beta) W_{\text{захв}}^T}{\beta W_{\text{захв}}^L + (1-\beta) W_{\text{захв}}^T} \alpha^T \quad /3/$$

$$\frac{N_{\mu}^0}{N_{\mu}} = \frac{\beta(1 - W_{\text{захв}}^L)}{\beta(1 - W_{\text{захв}}^L) + (1-\beta)(1 - W_{\text{захв}}^T)} \alpha^L + \frac{(1-\beta)(1 - W_{\text{захв}}^T)}{\beta(1 - W_{\text{захв}}^L) + (1-\beta)(1 - W_{\text{захв}}^T)} \alpha^T \quad /4/$$

Решая систему уравнений /3/, /4/, находим

$$\alpha^L = /0,8 \pm 0,4/\%, \quad \alpha^T = /31 \pm 1/\%$$

где в указанных ошибках учтена, кроме статистических, ошибка в коэффициенте  $\beta = /0,44 \pm 0,02/$ .

Полученное значение  $\alpha^L$  в пределах ошибок согласуется со значением  $\alpha^L = /1,5 \pm 0,5/\%$ , определенным нами ранее /1/ по зарегистрированным  $\sigma$ -звездам, принадлежащим легким ядрам и сопровождаемым вылетом электронов Оже.

Усредняя значение  $\alpha^L$ , полученное двумя независимыми способами, находим

$$\alpha^L = /1,1 \pm 0,3/\%$$

Таблица 1

Полное число р-остановок с электронами Оже	с одним электроном	с двумя электронами	с тремя электронами	полное число электронов Оже	
736	653	73	10	823	
на один атомный захват ядрами (Ag, Br)	0,31±0,01	0,27±0,01	0,03±0,004	0,004±0,001	0,35±0,01

Таблица 2

Энергия электронов (кэВ)	20-40	40-60	60-80	80-100	20-100
Число электронов на один атомный захват ядрами (Ag, Br)	0,24±0,03	0,06±0,01	0,03±0,01	0,02±0,01	0,35±0,01

Это значение согласуется с теоретически вычисленным значением  $\alpha^L = 1,6\%$  из работы /5/ /при энергии электронов  $\geq 15$  кэВ/.

Используя значения  $\alpha^L = 0,011$  и  $\alpha^T = 0,31$  из уравнений /3/, /4/, находим, что практически все  $\rho$ -остановки с электроном Оже относятся к тяжелым ядрам /примесь легких ядер меньше 0,5%/ , а из  $\mu$ -е остановок с электроном Оже 65% относится к тяжелым ядрам и 35% - к легким.

В табл. 1 приведено распределение по множественности для электронов Оже, сопровождающих  $\rho$ -остановки.

В табл. 2 приведен спектр электронов Оже, сопровождающих  $\rho$ -остановки, для 118 измеренных случаев. Соотношение пробег - энергия для медленных электронов взято из работы /6/ .

*Относительные вероятности испускания заряженных частиц при захвате  $\mu^-$ -мезонов легкими и тяжелыми ядрами*

Для каждого типа  $\sigma$ -звезд /с данным числом лучей/ число событий на легких  $N^L$  и тяжелых  $N^T$  ядрах находится следующим образом /1/ . Если число зарегистрированных  $\sigma$ -звезд данного типа равно  $N$ , среди которых -  $N^0$  с электронами Оже, то имеют место следующие соотношения:

$$1 = \frac{N^L}{N} + \frac{N^T}{N}$$

/5/

$$\frac{N^0}{N} = \alpha^L \frac{N^L}{N} + \alpha^T \frac{N^T}{N} .$$

Отношения  $N^0/N$  для каждого типа  $\sigma$ -звезд найдены в работе /1/ . Используя значения  $\alpha^L = 1,1 \pm 0,3 \cdot 10^{-2}$  и  $\alpha^T = 31 \pm 1 \cdot 10^{-2}$ , находим отношения  $N^L/N$  и  $N^T/N$  /в процентах/ для каждого типа  $\sigma$ -звезд /табл. 3/.

Таблица 3

Относительные числа событий на легких и тяжелых ядрах в процентах

Ядра	1-лу-		2-лу-		3-лу-		4-лу-		Все звезды
	звезд	чевые	звезд	чевые	звезд	чевые	звезд	чевые	
C, N, O	5,7 $\pm$ 4,0	68,2 $\pm$ 2,1	88,6 $\pm$ 2,5	97,7 $\pm$ 2,3	20,4 $\pm$ 3,6				
Ag, Br	94,3 $\pm$ 4,0	31,8 $\pm$ 2,7	11,4 $\pm$ 2,5	2,3 $\pm$ 2,3	79,6 $\pm$ 3,6				

Таблица 4

Вероятности вылета заряженных частиц на один акт захвата, %

Число частиц	ядра	C, N, O		Ag, Br	
		$W^L$	$W^T$	$W^L$	$W^T$
1		1,5 $\pm$ 1,1	2,7 $\pm$ 0,2	2,7 $\pm$ 0,2	
2		3,7 $\pm$ 0,3	0,17 $\pm$ 0,02	0,17 $\pm$ 0,02	
3		1,7 $\pm$ 0,1	0,02 $\pm$ 0,005	0,02 $\pm$ 0,005	
4		0,5 $\pm$ 0,08	0,001	0,001	
Всего		7,4 $\pm$ 1,4	2,9 $\pm$ 0,2	2,9 $\pm$ 0,2	

Приведенные в табл. 3 отношения позволяют определить, какая часть  $\sigma$ -звезд каждого типа, зарегистрированных в работе /1/, относится к легким, какая - к тяжелым ядрам, и найти вероятность испускания данного числа заряженных частиц на один акт захвата  $\mu^-$ -мезонов ядрами (C, N, O) и (Ag, Br).

Результаты вычисления относительных вероятностей испускания заряженных частиц приведены в табл. 4.

Полный выход заряженных частиц при захвате  $\mu^-$ -мезонов легкими ядрами составляет  $W^L = 7,4\%$ , тяжелыми -  $W^T = 2,9\%$ . Приведенные в табл. 4 результаты согласуются с результатами работы /1/, однако они более полны и обладают значительно лучшей точностью. Отметим, что полученное значение  $W^T = 2,9\%$  согласуется со значением в работе /7/, в то время как значение  $W^L = 7,4\%$  примерно в два раза ниже приведенного в /7/.

Необходимо подчеркнуть, что имеющиеся теоретические оценки /8/ для верхних пределов вероятностей испускания заряженных частиц при захвате  $\mu^-$ -мезонов ядрами C, N, O составляют соответственно 5%, 2%, 1%, т.е. для легких ядер, входящих в состав фотоэмульсии,  $W^L < 2\%$ , что находится в противоречии с экспериментальным значением, полученным в настоящей работе. Таким образом, теория захвата  $\mu^-$ -мезонов сложными ядрами пока не может дать количественного объяснения одному из самых общих характеристик этого процесса - выходу заряженных частиц.

#### Литература

1. Ю.А. Батусов и др. ЯФ, 18, 962, 1973.
2. H. Morinaga, W. Fry. Nuovo Cim., 10, 309, 1953.
3. D. Kotelchuk. Nuovo Cim., 34, 27, 1964.
4. M. Eckhause, R. T. Siegel. Nucl. Phys., 81, 575, 1966.
5. A. R. Burbidge, A. H. de Borde. Phys. Rev., 89, 189, 1953.
6. P. Q. Bizzeti, M. Della Corte. Nuovo Cim., 11, 317, 1959.
7. А. О. Вайсенберг, Э. Д. Колганова, Н. В. Рабин. ЯФ, 1, 652, 1965.

8. В. А. Вартамян, Р. А. Эрамжян. Вопросы атомной науки и техники. ХФТИ 73-9, стр. 25 /1973/.  
V. V. Balashov, R. A. Eramzhyan, N. M. Kabachnik et al. JINR, E4-4601, Dubna, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел  
15 августа 1974 года.