

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Morgan, S. H. Corrections to the Bethe-Bloch Formula for Average Ionization Energy Loss of Relativistic Heavy Nucley / S. H. Morgan, Jr. and P. B. Eby // Nucl. Instrum. Methods. – 1973. – Vol. 106. – P. 429–435.
2. Lijian, T. Analitic Fitting to the Mott Cross Section of Electrons / T. Lijian, H. Qing, L. Zhengming // Radiat. Phys. Chem. – 1995. – Vol. 45, № 2. – P. 235–245.
3. Kats, P. B. Normalized Mott Cross Section in Different Approaches / P. B. Kats, K. V. Halenka, O. O. Voskresenskaya // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2021. – Vol. 18, № 3. – P. 277–283.

Е. В. ГОЛЕНКО, И. Д. ГОЛЕНКО, П. Б. КАЦ
Беларусь, Брест, УО «БрГУ имени А. С. Пушкина»

**РАСЧЕТ СЕЧЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ АТОМА ФОТОНОМ ЗА СЧЕТ
ФОТОЭФФЕКТА ДЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ
МЕТОДА LQZ И ЕГО МОДИФИЦИРОВАННЫХ ВАРИАНТОВ**

Для элементов с большими зарядовыми числами для расчета сечения смещения атома фотоном может использоваться интерполяция данных численного интегрирования моттовского сечения рассеяния, приведенных в [1]. В [2] табулированы значения сечения смещения атома фотоном, рассчитанные таким способом, для ряда элементов. Ранее мы представили результат расчета с использованием метода LQZ [3]. На рисунке 1 приведено сравнение наших результатов с результатами [2].

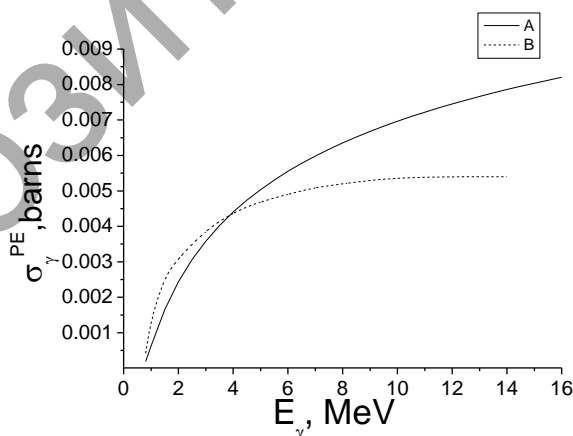


Рисунок 1 – Сечение смещения атома фотоном за счет фотоэффекта.
Для железа: А – расчет с помощью метода LQZ; В – по данным [2]

Результаты [2] значительно отличаются от полученных нами, хотя наши результаты совпали с результатами [4] для железа, полученными с помощью приближения Маккинли – Фешбаха.

Для больших Z неприменимо приближение Маккинли – Фешбаха, поэтому основные способы расчета сечения смещения атома фотоном включают либо

интерполяцию данных [2], либо использование метода LQZ. В данной работе приведем результаты расчетов для платины и золота с использованием метода LQZ. В предыдущем докладе мы разработали модифицированный и дважды модифицированный методы LQZ, обеспечивающие правильную асимптотику нормированного моттовского сечения при θ . В модифицированном методе LQZ выражение для нормированного моттовского сечения

$$R_{LQZ\text{mod}}(\theta, Z, E) = 1 + \sum_{j=1}^4 a_j(Z, E)(1 - \cos \theta)^{j/2},$$

$$a_j(Z, E) = \sum_{k=1}^6 d_z(j, k)(\beta - 0,668269)^{k-1}.$$

В дважды модифицированном методе LQZ

$$R_{LQZ\text{mod}2}(\theta, Z, E) = 1 + \sum_{j=1}^5 a_j(Z, E)(1 - \cos \theta)^{j/2}.$$

Сечение смещения атома фотоном за счет фотоэффекта было вычислено и с использованием модифицированного и дважды модифицированного методов LQZ. Результаты представлены в таблицах 1, 2. Для золота также приведены данные из [2].

Таблица 1 – Платина, сечение в барнах

Энергия, МэВ	$\sigma_{\gamma}^{\text{PE}}$	$\sigma_{\text{mod}}^{\text{PE}}$	$\sigma_{\text{mod}2}^{\text{PE}}$
1,5	0,00008	0,00008	0,00009
2	0,04318	0,04316	0,04293
2,5	0,16282	0,16275	0,16235
3	0,29417	0,29399	0,29381
3,5	0,41551	0,41520	0,41524
4	0,52316	0,52276	0,52294
4,5	0,61788	0,61741	0,61765
5	0,70138	0,70087	0,70112
5,5	0,77540	0,77487	0,77509
6	0,84143	0,84090	0,84108
6,5	0,90072	0,90022	0,90035
7	0,95431	0,95384	0,95391
7,5	1,00302	1,00259	1,00261
8	1,04754	1,04716	1,04713
8,5	1,08843	1,08810	1,08803
9	1,12616	1,12589	1,12577
9,5	1,16111	1,16091	1,16074
10	1,19362	1,19348	1,19328
10,5	1,22396	1,22389	1,22365

Продолжение таблицы 1

11	1,25237	1,25236	1,25208
11,5	1,27904	1,27909	1,27879
12	1,30414	1,30427	1,30393
12,5	1,32784	1,32803	1,32767
13	1,35026	1,35051	1,35013
13,5	1,37152	1,37183	1,37143
14	1,39171	1,39208	1,39166
14,5	1,41092	1,41136	1,41092
15	1,42924	1,42974	1,42928
16	1,46347	1,46408	1,46359

Таблица 2 – Золото, сечение в барнах

Энергия, МэВ	σ_{γ}^{PE}	$\sigma_{\gamma mod}^{PE}$	$\sigma_{\gamma mod 2}^{PE}$	$\sigma_{\gamma}^{PE}[2]$
1,5	0,00010	0,00010	0,00012	9,7E-04
2	0,04409	0,04401	0,04383	5,5E-02
2,5	0,17205	0,17175	0,17153	–
3	0,31372	0,31332	0,31332	2,6E-01
3,5	0,44447	0,44431	0,44447	–
4	0,56093	0,56052	0,56072	4,8E-01
4,5	0,66310	0,66272	0,66288	–
5	0,75309	0,75274	0,752832	6,5E-01
5,5	0,83279	0,83248	0,83248	–
6	0,90384	0,90356	0,90347	7,7E-01
6,5	0,96759	0,96735	0,96718	–
7	1,02516	1,02496	1,02472	8,6E-01
7,5	1,07746	1,07730	1,07699	–
8	1,12523	1,12511	1,12476	9,5E-01
8,5	1,16908	1,16901	1,16861	–
9	1,20952	1,20949	1,20906	–
9,5	1,24698	1,24698	1,24653	–
10	1,28179	1,28183	1,28137	1,0E+00
10,5	1,31426	1,31435	1,31387	–
11	1,34466	1,34478	1,34430	–
11,5	1,37318	1,37334	1,37286	–
12	1,40003	1,40022	1,39975	–
12,5	1,42536	1,42559	1,42513	–
13	1,44932	1,44957	1,44913	–
13,5	1,47202	1,47231	1,47188	–
14	1,49359	1,49390	1,49349	1,1E+00
15	1,53366	1,53403	1,53366	–
16	1,57017	1,57060	1,57028	–

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oen, O. S. Cross sections for atomic displacements in solids by fast electrons / O. S. Oen // Oak Ridge National Laboratory Report ORNL-4897. – 1973.
2. Kwon, J. Gamma displacement cross-sections in various materials / J. Kwon, A. T. Motta // Annals of Nuclear Energy. – 2000. – Vol. 27. – P. 1627–1642.
3. Lijian, T. Analitic Fitting to the Mott Cross Section of Electrons / T. Lijian, H. Qing, L. Zhengming // Radiat. Phys. Chem. – 1995. – Vol. 45, № 2. – P. 235–245.
4. Alexander, D. E. Defect production considerations for gamma ray irradiation of reactor pressure vessel steels / D. E. Alexander // Journal of Nuclear Materials. – 1997. – Vol. 240. – P. 196–204.

И. Д. ГОЛЕНКО, П. Б. КАЦ

Беларусь, Брест, УО «БрГУ имени А. С. Пушкина»

**РАСЧЕТ СЕЧЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ АТОМА ФОТОНОМ
ЗА СЧЕТ ФОТОЭФФЕКТА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА LQZ**

Гамма-кванты в основном вызывают смещения атомов за счет образования в веществе электронов высокой энергии, которые и вызывают смещение атомов. Один из методов расчета сечения смещения атома фотоном был предложен в работе [1]. При этом необходим расчет сечения смещения атома электроном. В [2] для расчета сечения смещения атома электроном используется приближение Маккинли – Фешбаха, в других используют кусочную интерполяцию данных по сечениям смещения атомов из [3]. Сечение Маккинли – Фешбаха неприменимо для тяжелых элементов, таких как золото. Как мы показали ранее, метод LQZ [4] и его модификации при расчетах сечения смещения атома электроном приводят к результатам, очень близким к получаемым при интегрировании моттовского дифференциального сечения рассеяния [3]. В данной работе мы используем метод LQZ и его модификации для расчета сечения смещения атома фотонами за счет фотоэффекта.

Сечение смещения атома фотоном с энергией E_γ за счет фотоэффекта [1]:

$$\sigma_{PE}(E_\gamma) = \sigma^{PE}(E_\gamma) \bar{n}(E), \quad (1)$$

где $\sigma^{PE}(E_\gamma)$ – сечение фотоэффекта на атоме. Для энергии фотонов более 2 МэВ [6]

$$\begin{aligned} \sigma^{PE}(E_\gamma) = & 5\pi a_0^2 Z^5 \alpha^8 \exp(-\pi Z\alpha + 2(Z\alpha)^2(1 - \ln[Z\alpha])) \times \\ & \times (\gamma^2 - 1)^{3/2} \left(\frac{mc^2}{E_\gamma} \right)^5 \left(\frac{4}{3} + \frac{\gamma(\gamma - 2)}{\gamma + 1} \left[1 - \frac{1}{2\gamma\sqrt{\gamma^2 - 1}} \ln\left(\frac{\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}}{\gamma - \sqrt{\gamma^2 - 1}} \right) \right] \right), \end{aligned} \quad (2)$$

a_0 – боровский радиус, $\alpha = 1/137,036$ – постоянная тонкой структуры, γ – лоренцевский фактор для образовавшегося при фотоэффекте электрона с энергией E : $E = E_\gamma - B$, B – энергия связи электрона в атоме. Будем в качестве B брать