



а следовательно, возможностью управления цветом излучаемого света.

Авторы выражают благодарность профессору И. Ю. Горячевой за предоставленные квантовые точки.

*Работа выполнена при поддержке гранта DAAD (шифр 11.9160.2014 «Изучение формирования монослоев со встроенными квантовыми точками»).*

### Список литературы

1. Chen H. S., Chen C. W., Wang C. H., Chu F. C., Chao C. Y., Kang C. C., Chou P. T., Chen Y. F. Color-Tunable Light-Emitting Device Based on the Mixture of CdSe Nanorods and Dots Embedded in Liquid-Crystal Cells // *J. Phys. Chem. C*. 2010. Vol. 114. P. 7995–7998.
2. Anikeeva P. O., Halpert J. E., Bawendi M. G., Bulovic V. Electroluminescence from a Mixed Red-Green-Blue Colloidal Quantum Dot Monolayer // *Nano Lett.* 2007. Vol. 7, № 8. P. 2196–2200.
3. Kim T. H., Cho K. S., Lee E. K., Chae J., Kim J. W., Kim D. H., Kwon J. Y., Lee S. Y., Choi B. L., Kuk Y., Kim J. M., Kim K. Full-colour quantum dot displays fabricated by transfer printing // *Nature photonics*. 2011. Vol. 5. P. 176–182.
4. Chen H. S., Hsu C. K., Hong H. Y. In GaN–CdSe–ZnSe Quantum Dots White LEDs // *Ieee photonics technology letters*. 2006. Vol. 18, № 1. P. 884–886.
5. Lin Y., Zhang Y., Zhao J., Gub P., Bib K., Zhanga Q., Chuc H., Zhangb T., Cuib T., Wanga Y., Zhaod J., Yu W. W. White-light-emitting diodes using GaN-excited CdSe/CdS/ZnS quantum dots // *China Particuology*. 2014. Vol. 15. P. 90–93.
6. Leck K. S., Divayana Y., Zhao D., Yang X., Abiyasa A. P., Mutlugun E., Gao Y., Liu S., Tan S. T., Sun X. W., Demir H. D. Quantum Dot Light-Emitting Diode with Quantum Dots Inside the Hole Transporting Layers // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2013. Vol. 5. P. 6535–6540.
7. Jaffar S., Nam K. T., Khademhosseini A., Xing J., Langer R. S., Belcher A. M. Layer-by-Layer Surface Modification and Patterned Electrostatic Deposition of Quantum Dots // *Nano Lett.* 2004. Vol. 4, № 8. P. 1421–1425.
8. Lambert K., Wittebrood L., Moreels I., Deresmesb D., Grandidierb B., Hens Z. Langmuir–Blodgett monolayers of InP quantum dots with short chain ligands // *J. Colloid Interface Sci.* 2006. Vol. 300. P. 597–602.
9. Li J. J., Wang Y. A., Guo W., Keay J. C., Mishima T. D., Johnson M. B., Peng X. Large-Scale Synthesis of Nearly Monodisperse CdSe/CdS Core/Shell Nanocrystals Using Air-Stable Reagents via Successive Ion Layer Adsorption and Reaction // *J. Amer. Chem. Soc.* 2003. Vol. 125. P. 12567–12575.
10. Абрамзон А. А., Голоудина С. И. Об агрегатном состоянии конденсированных монослоев на поверхности жидкости // *Успехи коллоидной химии. Л. : Химия. Ленингр. отд-ние*, 1991. С. 239–262.
11. Tomoaia-Cotisel M., Zsako J., Mocanu A., Lupea M., Chifu E. III. The Ionization Characteristics of Some Fatty Acids at the Air/Water Interface // *J. Colloid Interface Sci.* 1987. Vol. 117, № 2. P. 464–476.

УДК 539.14

## СПЕКТР ГАММА-КВАНТОВ В БЕРИЛЛИЕВОЙ МИШЕНИ

М. А. Клочков, Г. Н. Залесный

Саратовский государственный университет  
E-mail: klochkov@sgu.ru



Проанализированы изменения начального тормозного спектра гамма-квантов внутри образца. Показано, что основным механизмом, влияющим на форму спектра  $\gamma$ -квантов в образце бериллия, является эффект Комптона. В работе учитывается эта поправка при анализе выхода фотонейтронов. Однако в отличие от моделей, рассмотренных в других работах, при учете комптоновского рассеяния не используется параметризация.

**Ключевые слова:** фотонейтрон, спектр Шиффа, эффект Комптона, бетатрон.

### Range of Gamma Quanta in the Beryllium Target

М. А. Klochkov, G. N. Zalesny

Changes of an initial brake range of gamma quanta in a sample are analysed. It is shown that the main mechanism influencing  $\gamma$  quanta

range form in a sample of beryllium is Compton's effect. In work this amendment is considered in the analysis of an exit of photoneutrons. However unlike the models considered in other works at the accounting of Compton dispersion parametrization isn't used.

**Key words:** photoneutron, Schiff's range, Compton's effect, betatron.

Проведенные исследования сечения фотонейтронных реакций на  ${}^9\text{Be}$  с использованием пучка тормозного излучения 25 МэВ бетатрона Саратовского государственного университета показали, что в области энергий  $E \sim 4$  МэВ в сечении проявляются структурные особенности, не коррелирующие с хорошо изученным спектром низколежащих уровней этого ядра.



Для объяснения возможных причин их появления выдвигался ряд гипотез. Одна из гипотез – отличие реального тормозного спектра от теоретического спектра Шиффа [1] для тонкой мишени, который использовался в расчетах по восстановлению сечения из измеренного выхода. Возможными причинами, вызывающими такие отличия, могут быть характеристики пучка ускоренных электронов (флуктуации энергии от цикла к циклу, немонохроматичность пучка, изменение энергии электронов в процессе сброса их на тормозную мишень, наличие временных и температурных дрейфов геометрических параметров пучка и т.д.).

Для выявления отклонений экспериментального тормозного спектра от спектра Шиффа экспериментальные данные по выходу фотонейтронов из  ${}^9\text{Be}$  аппроксимировались модельной кривой выхода:

$$\int_{B_n}^{E_{\gamma\max}^i} \Phi(E_{\gamma\max}^i, E_{\gamma\max}, P) \sigma(E_{\gamma}) \varepsilon(E_{\gamma\max}^i - B_n) dE_{\gamma} = Y(E_{\gamma\max}^i),$$

Значения параметров и соответствующие величины  $\chi^2$

Модель спектра	Параметры	Значение $\chi^2$
Спектр Шиффа для тонкой мишени		324
Свертка спектра Шиффа с функцией Гаусса	$\delta=0.04$	66
Ограниченная свертка спектра Шиффа с функцией Гаусса	$\delta=0.069$ $\Delta=0.19$	33
Спектр Шиффа, изменяющийся в образце		74

Примечание.  $\delta$  – стандартное отклонение распределения Гаусса;  $\Delta$  – интервал ограничения свертки.

Другой причиной появления расхождений в определении сечений известных резонансов может быть изменение начального тормозного спектра квантов (спектра Шиффа) внутри образца. Как показал анализ, основным механизмом, влияющим на форму спектра  $\gamma$ -квантов в образце бериллия, может быть эффект Комптона. Сечения процессов – фотоэффекта и рождения электрон-позитронных пар – малы и ими можно пренебречь при анализе данного эксперимента. Расчет сечения эффекта Комптона производился с использованием методов квантовой электродинамики [3].

Результаты расчета выхода нейтронов с учетом изменения формы спектра  $\gamma$ -квантов внутри образца приведены в последней строке таблицы.

где  $\Phi(E_{\gamma\max}, E_{\gamma}, P)$  – модельный спектр тормозного излучения;  $P$  – набор параметров;  $\sigma(E_{\gamma})$  – сечение фотопоглощения, для описания которого использовалась хорошо согласующаяся с теорией параметризации;  $\varepsilon(E_n)$  – рассчитанная методом Монте–Карло зависимость эффективности регистрации нейтронов детектором от их энергии.

В работе [2] рассматривались различные варианты спектров тормозного излучения: «чистый» спектр Шиффа для тонкой мишени; свертка спектра Шиффа с функцией Гаусса и ограниченная свертка спектра Шиффа с функцией Гаусса.

Из результатов, приведенных в таблице, следует, что использование модельных спектров значительно улучшает описание экспериментальных данных. Третий вариант спектра дает лучшее согласие между модельным и экспериментальными выходами фотонейтронов. Однако полученные значения параметров свидетельствуют о большой и асимметричной энергетической ширине пучка, что не соответствует условиям эксперимента.

Как видно из таблицы, учет данной поправки дает результат, сопоставимый с результатом, полученным в модели со сверткой спектра Шиффа с функцией Гаусса.

На рис. 1 приведены кривые выхода нейтронов – экспериментальная и полученная с учетом изменения формы спектра, на рис. 2 – расчетные кривые спектра  $\gamma$ -квантов перед мишенью (спектр Шиффа) и внутри образца (середина мишени).

Как видно из рис. 2, спектр  $\gamma$ -квантов значительно меняет свою форму внутри образца бериллия. Учет этого дает существенную поправку при анализе выхода фотонейтронов в эксперименте. Однако в отличие от моделей, рассмотренных в работе [2], при учете комптоновского рассеяния не использовалось ни одного параметра.

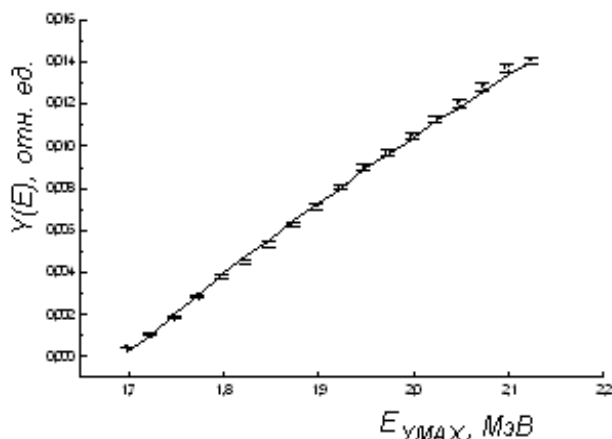


Рис. 1. Кривые выхода нейтронов – экспериментальная и полученная с учетом изменения формы спектра

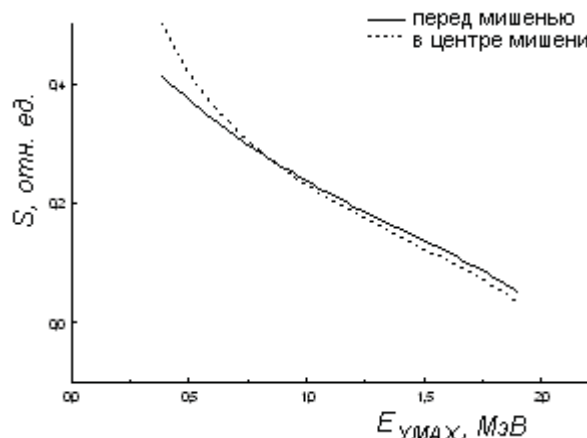


Рис. 2. Расчетные кривые спектра  $\gamma$ -квантов перед мишенью (спектр Шиффа) и внутри образца (середина мишени)

### Список литературы

1. Schiff L. Energy-Angle distribution of thin target bremsstrahlung // Phys. Rev. 1951. Vol. 83. P. 252.
2. Горячев А. М., Залесный Г. Н., Нечкин А. А., Сидоров В. И. Экспериментальная оценка формы тор-

мозного спектра  $\gamma$ -квантов в области максимальной энергии // Proc. of 6-th Intern. Workshop : BDO-99. Saratov, 2000. С. 32.

3. Берестецкий В. Б., Лифшиц Е. М., Путаевский Л. П. Квантовая электродинамика. М. : Наука, 1989. С. 720.

УДК 539.14

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ФОТОНЕЙТРОНОВ ИЗ $^{209}\text{Bi}$ ПРИ $E_{\gamma\text{max}} = 12$ МэВ

С. Н. Беляев, М. А. Клочков, А. А. Нечкин, В. И. Сидоров

Саратовский государственный университет  
E-mail: klochkov@sgu.ru

На пучке тормозного излучения бетатрона измерен энергетический спектр фотонейтронов из  $^{209}\text{Bi}$ . Измерения выполнены с помощью сцинтилляционного спектрометра на основе кристалла стильбена с дискриминацией  $\gamma$ -излучения по форме импульса. Полученные данные сравниваются с известными из литературы и анализируются на основе модели испарения.

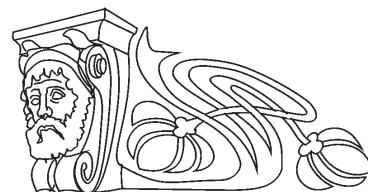
**Ключевые слова:** фотонейтрон, спектр, эмиссия, бетатрон, спектрометр.

**Power Range of Photoneutrons from  $^{209}\text{Bi}$  at  $E_{\gamma\text{max}} = 12$  MeV**

S. N. Belyaev, M. A. Klochkov, A. A. Nechkin, V. I. Sidorov

On a bunch of brake radiation of the betatron the power range of photoneutrons from  $^{209}\text{Bi}$  is measured. Measurements are executed by means of a scintillation spectrometer on the basis of a stilbene crystal with discrimination  $\gamma$ -radiations in an impulse form. The obtained data are compared with known of literature and analyzed on the basis of evaporation model.

**Key words:** photoneutron, range, issue, betatron, spectrometer.



### Введение

Известно, что анализ энергетических распределений продуктов распада атомных ядер среднего и тяжелого веса, в частности фотонейтронов, позволяет достаточно надежно выделить компоненты, обусловленные различными механизмами распада их возбужденных состояний. В большинстве случаев энергетические спектры фотонуклонов удается описать в рамках статистических моделей. Формирование их низкоэнергетической компоненты связывают с распадом ядра из равновесного состояния и описывают в рамках модели испарения, а жесткую часть – с распадом на стадии релаксации и интерпретируют в приближениях модели предравновесного распада [1, 2]. Однако в ряде работ, посвященных экспериментальному исследованию спектров фотонейтронов, наблюдались структуры, которые не удается описать в рамках вышеназванных представлений [3–5]. Такие экспериментальные данные немногочис-