

^{1,2}Д.Б. Бериков, ^{2,3}Г.С. Ахмадов, ²Ю.Н. Копач,
¹К.Ш. Жумадилов, ²В.Л. Кузнецов

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Казахстан, г. Нур-Султан

²Объединенный институт ядерных исследований, Россия, г. Дубна

³Национальный центр ядерных исследований, Азербайджан, г. Баку

e-mail: daniyar.berikov@gmail.com

ЦИФРОВОЕ НЕЙТРОН/ГАММА РАЗДЕЛЕНИЕ С ОРГАНИЧЕСКИМ СЦИНТИЛЛЯТОРОМ

Аннотация. В работе представлены результаты по нейтрон-гамма разделению с помощью органического сцинтиллятора стильбена. Для сцинтилляций стильбена характерно быстрое время нарастания (~ 1 нс), а их спад характеризуется наличием быстрой (для комптоновских электронов от γ -квантов) и медленной (для протонов отдачи от быстрых нейтронов) компонент. Известный PSD (pulseshapediscrimination, разделение по форме сигнала) метод одновременного измерения общего заряда и части этого заряда в хвосте импульса предлагается для идентификации частиц. Аналого-цифровой преобразователь типа ЦРС-32 использовался для преобразования импульсов нейтронов и гамма-квантов, а также для хранения их в цифровом формате. Разработан алгоритм на языке программирования C++ и ROOT для обработки цифровых данных.

Детекторы на основе стильбена планируется использовать в эксперименте по исследованию T-нечетных эффектов для данных частиц в делении тяжелых ядер под действием поляризованных нейтронов. Экспериментальные работы были проведены в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований.

Ключевые слова: нейтрон-гамма разделение по форме сигнала, T-нечетные эффекты в делении ядер.

^{1,2}D.B. Berikov, ^{2,3}G.S. Ahmadov, ²Yu.N. Kopatch,
¹K.Sh. Zhumadilov, ²V.L. Kuznetsov

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan, Nur-Sultan

²Joint Institute for Nuclear Research, Russia, Dubna

³National Nuclear Research Center, Azerbaijan, Baku

e-mail: daniyar.berikov@gmail.com

Digital neutron/gamma discrimination with an organic scintillator

Abstract. The paper presents the results of neutron-gamma discrimination using organic stilbene scintillator. Stilbene scintillations are characterized by a fast rise time (~ 1 ns), and their decline is characterized by the existence of a fast (for compton electrons from gamma-quanta) and a slow (for recoil protons from fast neutrons) component. A well-known PSD (pulse shape discrimination) method of simultaneous measurement of the total charge and the part of this charge in the tail of the pulse is proposed for identifying particles. An analog-to-digital converter of the TsRS-32 type was used to convert neutron and gamma-ray pulses and to store them in a digital format. An algorithm has been developed in the C++ and ROOT programming languages for digital data processing.

Stilbene-based detectors are planned to be used in an experiment to study T-odd effects for given particles in the fission of heavy nuclei induced by polarized neutrons. Experimental work was carried out in the I.M. Frank Laboratory of Neutron Physics Joint Institute for Nuclear Research.

Key words: Neutron-gamma pulse shape discrimination, T-odd effects in the fission of heavy nuclei.

^{1,2}Д.Б. Беріков, ^{2,3}Г.С. Ахмадов, ²Ю.Н. Копач,
¹К.Ш. Жумадилов, ²В.Л. Кузнецов

¹А.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан, Нұр-Сұлтан қ.

²Біріккен ядролық зерттеу институты, Ресей, Дубна қ.

³Ұлттық ядролық зерттеу орталығы, Әзірбайжан, Баку қ.
e-mail: daniyar.berikov@gmail.com

Органикалық сцинтиллятор көмегімен цифрлі нейтрон/гамма ажырату

Аңдатпа. Жұмыста органикалық сцинтиллятор стильбен көмегімен нейтрон-гамма ажырату нәтижелері көрсетілген. Стильбен сцинтилляциясы жылдам өсу уақытымен сипатталады, ал оның құлдырауы жылдам (гамма-кванттан туатын комптондық электрондар үшін) және баяу (жылдам нейтрондардан туатын протондар үшін) компоненттердің бар болуымен сипатталады. Бөлшектерді ажырату үшін танымал PSD (pulse shape discrimination, сигнал формасы арқылы ажырату) әдісін, толық заряд пен импульс соңындағы сол зарядтың бір бөлігін бір уақытты өлшеу, қолдану ұсынылған. Нейтрондар мен гамма-кванттар импульсін түрлендіру үшін және оларды цифрлық форматта сақтау үшін ЦРС-32 аналог-цифрлі түрлендіргіш қолданылды. Цифрлі деректерді өңдеу үшін C++ және ROOT программалық тілде алгоритмдер әзірленді.

Стильбен негізіндегі детекторларды поляриланған нейтрондардың әсерінен ауыр ядролардың бөлінуі кезіндегі нейтрон/гамма бөлшектері үшін Т-тақ эффектілерді зерттеуге бағытталған экспериментте қолдану жоспарланған. Эксперименталды жұмыстар Біріккен ядролық зерттеу институтының И.М. Франк атындағы Нейтрондық физика лабораториясында жасалды.

Түйін сөздер: сигнал формасы арқылы нейтрон-гамма ажырату, ядролардың бөлінуі кезіндегі Т-тақ эффектілер.

Введение

Несмотря на то, что со времени открытия деления атомных ядер прошло уже 80 лет, этот процесс даже сегодня остается предметом экспериментальных и теоретических исследований и занимает особое место в ядерной физике. В настоящее время интенсивные экспериментальные исследования данного явления ведутся в ядерно-физических центрах Европы, США и России. Продолжаются исследования Р-четных, Р-нечетных и Т-нечетных асимметрий для угловых распределений продуктов двойного и тройного деления ядер, детально изучаются редкие моды деления тяжелых ядер такие, как недавно открытые четверные деления [1-3]. Угловые распределения продуктов деления эффективно используются для исследования так называемых переходных состояний делящегося ядра, вызванного энергетическими легкими или тяжелыми ионами и гамма квантами.

Поиски Т-нечетных асимметрий в угловых распределениях продуктов тройного деления ядер холодными поляризованными нейтронами были начаты в конце 90-х годов с надеждой обнаружение при анализе этих асимметрий эффектов нарушения Т-инвариантности [4-5]. Результатами этих поисков к настоящему времени являются обнаружение Т-нечетных асимметрий TRI- и ROT- типов в тройном и бинарном

делении ряда ядер-актинидов [6-7]. В Лаборатории Нейтронной Физики им. И.М. Франка Объединенного Института Ядерных Исследований (ЛНФ, ОИЯИ, г. Дубна, Россия) планируется провести эксперимент по исследованию ROT-эффекта для гамма-квантов и нейтронов в бинарном делении актинидов под действием поляризованных нейтронов. При изучении данного процесса [8-10] возникает необходимость одновременно регистрировать потоки быстрых нейтронов и гамма-квантов и разделять их импульсы друг от друга. Чтобы обеспечить такие условия, детектирующая аппаратура должна иметь высокую эффективность регистрации быстрых нейтронов и хорошее временное разрешение, возможность регистрировать гамма-квантов в широком энергетическом диапазоне, возможность разделения импульсов от нейтронов и от гамма-квантов.

Органические сцинтилляторы хорошо подходят для этих целей, которые обладают быстрым временным откликом и позволяют разделять нейтроны и гамма-кванты по форме импульса (PSD, pulsediscrimination). Разница в интенсивности медленных нейтронных и быстрых гамма компонентом света служит основой для методов PSD.

В данной работе представлены результаты по n/γ разделению с помощью стильбена (органический сцинтиллятор).

Теоретическая часть

Идентификация частиц по форме импульса [11-13] основана на том, что для органических сцинтилляторов стиблена форма сцинтилляционного импульса зависит от удельных ионизационных потерь и различна для протонов отдачи и комптоновских электронов (рис. 1).

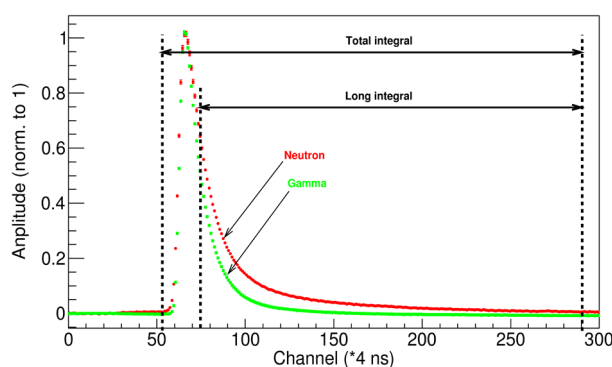


Рисунок 1 – Форма сцинтилляционного импульса и описание PSD метода для нейтрона и гамма-кванта на кристалле стиблена

Световой импульс, возникающий в сцинтилляторе при прохождении через него ионизирующего излучения можно представить, как сумму двух компонент: быстрой и медленной [14-16]. Импульсы протонов отдачи, образованные при упругом столкновении быстрых нейтронов с кристаллом стиблена, обладает заметной медленной компонентой в отличие от импульсов слабоионизирующих гамма квантов. Характерное время медленной и быстрой компоненты – несколько сотен и порядка нескольких наносекунд соответственно.

Основное преимущество цифрового разделения сигналов детектора, образующихся в результате регистрации быстрых нейтронов и гамма-квантов в том, что для обработки импульсов не нужны дополнительные электронные модули и блоки. Необходим лишь аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Еще одним достоинством является отсутствие необходимости анализа поступающей информации в режиме «on-line». Для реализации данного метода аналоговый сигнал детектора преобразуется при помощи АЦП в цифровой массив данных без потери, содержащейся в нем информации. Дальнейший анализ экспериментальных данных может быть произведена неограниченное число раз. Полученное цифровое значение импульса тока подвергает-

ся определенной процедуре идентификации с помощью разработанного алгоритма на языке программирования, например, C++ или ROOT. Сюда можно отнести определение максимума сигналов, временного интервала для интегрирования, интегрирование (собираение заряда) полного импульса и медленной компоненты импульса и их сравнение. В отличие от аналогового метода идентификации частиц, данный метод позволяет применять оптимальные фильтры, производить сложную математическую обработку полученных данных, что обеспечивает более эффективное разделения импульсов [17-18]. Для аналоговых методов идентификации характерно ухудшение параметров разделения при увеличении входной загрузки, т.е. частоты поступления импульсов с детектора. Это связано, с наложением входных импульсов. Использование цифрового метода идентификации полностью устраняет данный эффект и может работать при загрузке детектора 10^6 импульсов в секунду [19].

Экспериментальная часть

В ЛНФ ОИЯИ поставлен эксперимент по n/γ разделению в спонтанном делении калифорния ^{252}Cf . Схема эксперимента показана на рис. 2.

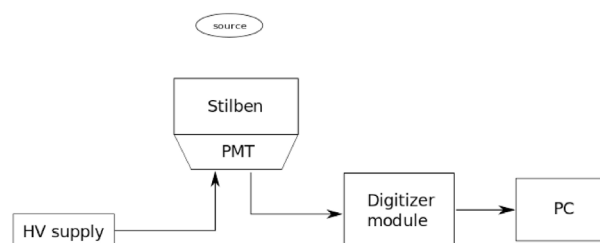


Рисунок 2 – Схема эксперимента

Мгновенные нейтроны (средней энергией 2.14 МэВ) и гамма-кванты (с энергией от 7 до 9 МэВ) деления регистрировались кристаллом стиблена размером $50 \times 50 \text{ мм}^2$ в сочетании с ФЭУ (фотоэлектронный умножитель) PMT R1307 (фирма Amcys-H) который располагался на расстоянии 30 см от источника ^{252}Cf . Порог регистрации нейтронов составлял около 200 кэВ. Многоканальный АЦП ЦРС-32 (32-канальный Цифровой Регистратор Сигналов) использовался для оцифровки сигналов и определения их амплитуды и временные характеристики одновременно. Частота оцифровки составляла 200 МГц с разрешением 11 бит. Оцифрованные

экспериментальные данные передавались через USB-3 в персональный компьютер. Алгоритм для идентификации событий от нейтронов и от гамма-квантов был разработан на языке C++, основываясь на пакете ROOT.

Сравнение зарядов было реализовано простым путем интегрирования различных частей входного импульса [20]. Первое интегрирование выполняется от начала времени нарастания

импульса до конца, полный интеграл, а другое интегрирование выполняется над хвостовой частью (длинный интеграл, смотреть рис. 1). Соотношение между ними использовалось для разделения нейтронов от гамма-квантов. Область, где начинается хвостовая часть, может быть оптимизирована для лучшего n/γ разделения. В нашем случае хвостовая часть интегрирования начинается через 80 нс после времени нарастания.

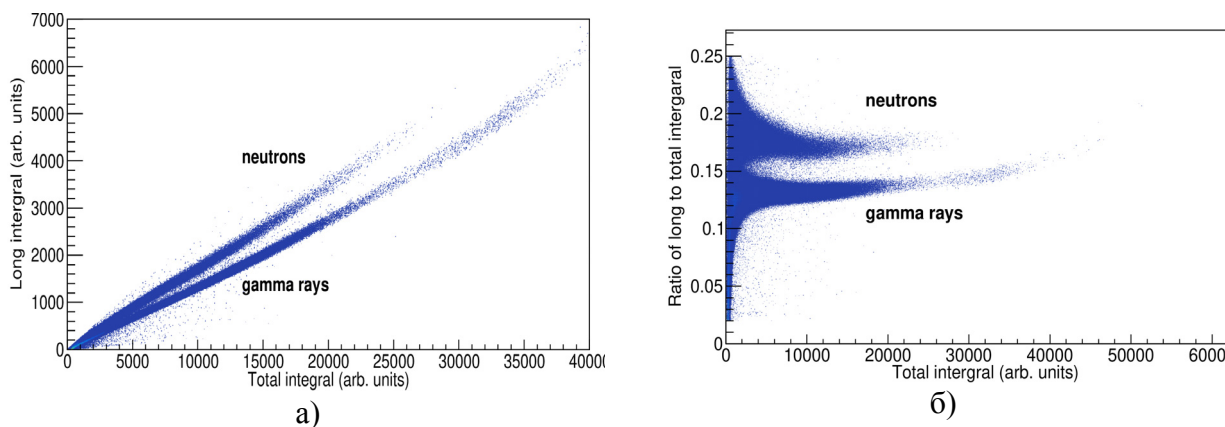


Рисунок 3 – Нейтрон гамма разделения методом PSD

Основные экспериментальные результаты представлены на рисунках 3а и 3б, в виде двумерных гистограмм. На рисунке 3а, по горизонтали отложен полный интеграл импульса, а по вертикали интеграл медленной компоненты импульса в произвольных единицах. На рисунке 3б, по горизонтали отложен полный интеграл импульса, а по вертикали отношение длинного интеграла к общему. Из полученных результатов наблюдаем два следа, каждый из которых соответствует своему типу частиц, и видим что следы нейтронов и γ-квантов хорошо разделяются.

Наиболее распространенным способом определения качества n/γ разделения является вычисление параметра разделения FOM (a figure of merit) или же коэффициента добротности, определенного следующим образом:

$$FOM = \frac{N_2 - N_1}{FWHM_1 + FWHM_2} \quad (1)$$

где $N_2 - N_1$ – расстояния между пиками, соответствующими нейтронам и гамма-квантам, $FWHM_1 + FWHM_2$ – сумма ширин этих пиков

на половине высоты. На рисунке 4 показана демонстрация качества нейтрон-гамма разделения. Численная оценка качества n/γ дискриминации, т.е. вычисленное по формуле (1) значение коэффициента добротности составляло 1.15.

Данная превосходная способность метода PSD дает возможность широко использовать органические сцинтилляторы в экспериментах, с точки зрения обнаружения и идентификации нейтронов в присутствии гамма-фона.

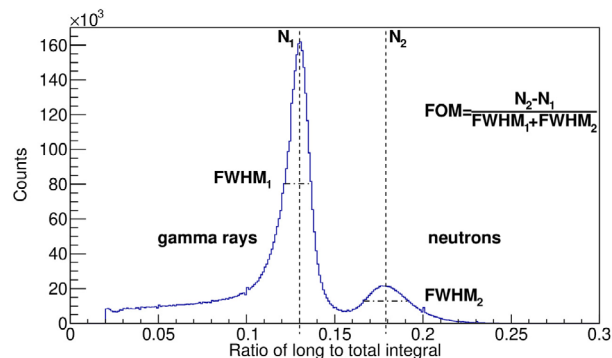


Рисунок 4 – Демонстрация качества нейтрон-гамма разделения

Заключение

В работе показаны результаты нейтрон-гамма разделения с помощью органического сцинтиллятора стиблена. Цифровой метод разделение по форме сигнала был успешно применен к импульсам из источника Cf-252 для надежной идентификации нейтронов от гамма-квантов. Под методом цифровой идентификацией типа частиц по форме импульса понимается процесс преобразования в цифровую форму при помощи АЦП аналогового сигнала из детектора, вызванного регистрацией частицы, и с последующей обработкой цифрового массива по определенному алгоритму для определения типа зарегистрированной частицы. Результаты, основанные на значениях FOM, показывают, что с помощью

этого метода можно добиться хорошей n/γ дискриминации. Данный метод цифровой идентификации можно применять для определения спектрального состава и плотности потока нейтронов и гамма-квантов в смешанных импульсных полях.

Разработан алгоритм и программное обеспечение цифровой идентификации. Примененный алгоритм идентификации позволяет производить сложные математические обработки полученных данных, что обеспечивает более эффективное разделение импульсов. Полученные результаты позволяют использовать исследуемый детектор в корреляционных экспериментах, в частности в планируемом эксперименте по исследованию T-нечетных эффектов в делении тяжелых ядер.

Литература

- 1 Гундорин Н.А., Зейналов Ш.С., Копач Ю.Н., Попов А.Б. и Фурман В.И. Исследования характеристик и корреляционных эффектов в делении // ЭЧАЯ. – 2016. – Т. 47, вып. 4. – С. 1248-1287.
- 2 Ahmadov G.S., Kopatch Yu.N., Telezhnikov S.A., Ahmadov F.I., Granja C. and et al. Detection of ternary and quaternary fission fragments from 252Cf with a position-sensitive ΔE -E telescope based on silicon detectors // Phys. Part. Nucl. Lett. – 2015. – Vol. 12:4. – P. 542-549.
- 3 Gagarski A., Goennenwein F., Guseva I., Jesinger P., Kopatch Yu. and et al. Particular features of ternary fission induced by polarized neutrons in the major actinides 233, 235U and 239, 241Pu // Phys. Rev. C. – Vol. 93. – P. 054619.
- 4 Jesinger P., Danilyan G.V., Gagarski A.M., Geltenbort P., Goennenwein F. and et al. Interference effect in the angular distribution of outgoing particles in ternary fission induced by cold polarized neutrons // Phys. At. Nucl. – 1999. – Vol. 62:9. – P. 1608-1610.
- 5 Jesinger P., Koetzle A., Gagarski A., Gönnenwein F., Danilyan G. and et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. – 2000. – Vol. 440. – P. 618-625.
- 6 Danilyan G.V. On the Relative Signs of “ROT-Effects” in Ternary and Binary Fission of 233U and 235U Nuclei Induced by Polarized Cold Neutrons // JETP Letters. – 2018. – Vol. 107:4. – P. 216-218.
- 7 Danilyan G.V., Klenke J., Kopach Yu.K., Krakhotin V.A., Novitsky V.V. and et al. Effects of rotation of fissioning nuclei in the angular distributions of prompt neutrons and gamma rays originating from the polarized-neutron-induced fission of 233U and 235U nuclei // Phys. At. Nucl. – 2014. – Vol. 77:6. – P. 677-681.
- 8 Kopatch Yu.N., Novitsky V.V., Ahmadov G.S., Gagarski A.M., Berikov D. and et al. Measurement of the ROT effect in the neutron induced fission of 235U in the 0.3 eV resonance at a hot source of polarized neutrons // EPJ Web of Conferences. – 2018. – Vol. 169. – P. 00010.
- 9 Danilyan G.V., Klenke J., Krakhotin V.A., Kuznetsov V.L., Novitsky V.V. and et al. Scission gamma rays // Phys. At. Nucl. – 2009. – Vol. 72. – P. 1812.
- 10 Danilyan G.V., Klenke J., Krakhotin V.A., Kopatch Yu.N., Novitsky V.V. and et al. T-odd angular correlations in the emission of prompt gamma rays and neutrons in nuclear fission induced by polarized neutrons // Phys. At. Nucl. – 2011. – Vol. 74. – P. 671.
- 11 Taggart M.P., Payne C. and Sellin P.J. Neutron-gamma discrimination via PSD plastic scintillator and SiPMs // J. Phys. Conference Series. – 2016. – Vol. 763. – P. 012007.
- 12 Comrie A.C., Buffler A., Smit F.D. and Wörtche H.J. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. – 2015. – Vol. 772. – P. 43-49.
- 13 Preston R.M., Eberhardt J.E. and Tickner J.R. Neutron-gamma pulse shape discrimination using organic scintillators with silicon photomultiplier readout // IEEE Transact. Nucl. Sci. – 2014. – Vol. 61:4. – P. 2410-2418.
- 14 Uchida Y., Takada E., Fujisaki A., Isobe M., Ogawa K. and et al. A study on fast digital discrimination of neutron and gamma-ray for improvement neutron emission profile measurement // Review of Science Instruments. – 2014. – Vol. 85. – P. 11E118.
- 15 Nyibule S., Henry E., Toke J., Skulski W. and Schrode W-U. Digital Gamma-Neutron Discrimination with Organic Plastic Scintillator EJ 299-33 // Progress in Physics. – 2014. – Vol. 10:3. – P. 163-165.

16 Szczęśmak T., Grodzicka M., Moszyński M., Wolski D., Swiderski L. and et al. Digital neutron-gamma discrimination methods: Charge comparison versus zero-crossing// IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference. – 2014. – P.1-4.

17 Aryaeinejad R., Hartwell J., Spencer D. Comparison between digital and analog pulse shape discrimination techniques for neutron and gamma ray separation // IEEE Nuclear Science Symposium conference record. Nuclear Science Symposium. – 2005. – Vol.1:500. – P. 504

18 Chuan P.V., Hoa N.D., Chau N.D. and Khue V.N. Study On Neutron – Gamma Pulse Shape Discrimination Algorithms For Scintillation Detector // Dalat University Journal of Science. – 2016. – Vol. 6:3. – P. 281-292.

19 Takaku D., Oishi T. and Baba M. Development of Neutron-Gamma Discrimination Technique using Pattern-Recognition Method with Digital Signal Processing // Prog. Nucl. ScienTechn. – 2011. – Vol.1. – P.210-213.

20 Akbarov R.A., Ahmadov G.S., Ahmadov F.I., Berikov D., Holik M. and et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment //Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. – 2018. – Vol. 936. – P. 549-551.

References

- 1 N.A. Gundorin, Sh.S. Zeinalov, Yu.N. Kopatch, A.B. Popov and V.I. Furman, Phys. Part. Nucl. 47:4, 1248-1287 (2016).
- 2 G.S. Ahmadov, Yu.N. Kopatch, S.A. Telezhnikov, F.I. Ahmadov, C. Granja and et al., Phys. Part. Nucl. Lett. 12:4, 542-549(2015).
- 3 Gagarski, F. Goennenwein, I. Guseva, P. Jesinger, Yu. Kopatch and et al., Phys. Rew. C 93, 054619 (2016).
- 4 P. Jesinger, G. V. Danilyan, A. M. Gagarski, P. Geltenbort, F. Goennenwein and et al., Phys. At. Nucl. 62:9, 1608-1610 (1999).
- 5 P. Jesinger, A. Koetzle, A. Gagarski, F. Gönnenwein, G. Danilyan and et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 440, 618-625 (2000).
- 6 G. V. Danilyan, JETP Letters 107:4, 216-218 (2018).
- 7 G.V. Danilyan, J. Klenke, Yu.K. Kopach, V.A. Krakhotin, V.V. Novitsky and et al., Phys. At. Nucl. 77, 715-720 (2014).
- 8 Yu.N. Kopatch, V.V. Novitsky, G.S. Ahmadov, A.M. Gagarsky, D. Berikov and et al., EPJ Web of Conferences 169, № 00010 (2018).
- 9 G.V. Danilyan, J. Klenke, V.A. Krakhotin, V.L. Kuznetsov, V.V. Novitsky and et al., Phys. At. Nucl. 72, 1872-1877 (2000).
- 10 G.V. Danilyan, J. Klenke, V.A. Krakhotin, Yu.N. Kopatch, V.V. Novitsky and et al., Phys. At. Nucl. 74, 697-701 (2011).
- 11 M.P. Taggart, C. Payne and P.J. Sellin, Jour. Phys. Conference Series 763, 012007 (2016)
- 12 A.C. Comriea, A. Bufflera, F.D. Smit and H.J. Wörtche, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 772, 43-49 (2015).
- 13 R.M. Preston, J.E. Eberhardt and J.R. Tickner, IEEE Transact. Nucl.Sci. 61:4, 2410-2418 (2014).
- 14 Y. Uchida, E. Takada, A. Fujisaki, M. Isobe, K. Ogawa and et al., Review of Science instruments 85, 11E118 (2014).
- 15 S. Nyibule, E. Henry, J. Toke, W. Skulski and W-U. Schroder, Progress in Physics 10, 163-165 (2014).
- 16 T. Szczęśmak, M. Grodzicka, M. Moszyński, D. Wolski, L. Swiderski and et al., IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 1-4 (2014).
- 17 R. Aryaeinejad, J. Hartwell, D. Spencer, IEEE Nuclear Science Symposium conference record. Nuclear Science Symposium, 1:500, 504 (2005).
- 18 P.V.Chuan, N.D.Hoa, N.D.Chau and V.N. Khue, Dalat University Journal of Science 6:3, 281-292 (2016)
- 19 D. Takaku, T. Oishi and M. Baba, Prog. Nucl. ScienTechn.1, 210-213 (2011).
- 20 R.A. Akbarov, G.S. Ahmadov, F.I. Ahmadov, D. Berikov, M. Holik and et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 936, 549-551 (2018).