

Координатный детектор для регистрации заряженных частиц на основе матрицы кремниевых фотоумножителей и сцинтилляционных кристаллов LYSO

В. В. Мицук

Институт ядерных исследований РАН, Московский физико-технический институт
(государственный университет)

1 Исследуемая ядерная реакция. Расчет кинематических параметров системы

Одной из интересных задач современной физики является изучение нарушения зарядовой симметрии (НЗС) ядерных сил, которое обычно связывают с различием масс u - и d -кварков, их зарядов и магнитных моментов. Для получения количественной оценки эффекта НЗС необходимы данные об энергиях синглетных двухнуклонных состояний. Такая информация может быть получена при исследовании реакций с двумя нуклонами в конечном состоянии. Примером исследования по данной проблеме может служить задача, состоящая в определении энергий синглетных квазисвязанных nn -, pp - и np -состояний двухнуклонной системы (E_{nn}^s , E_{pp}^s , E_{np}^s) в рамках единой экспериментальной схемы [1, 2].

В Лаборатории атомного ядра ИЯИ РАН проводятся работы по исследованию реакции $d + d \rightarrow p + p + n + n$. Эта реакция может идти с образованием на первом этапе (до развала) различных синглетных двухнуклонных систем: $d + d \rightarrow (nn)^s + (pp)^s$ или $d + d \rightarrow (np)^s + (np)^s$.

Разрабатываемый детектор предполагается использовать при исследовании первого варианта $d + d \rightarrow (nn)^s + (pp)^s$ (рис. 1) для регистрации конечных протонов (т. н. E -детектор полного поглощения). Изучение последующего распада этих состояний в кинематически полном эксперименте позволит определить энергии синглетных состояний, а анализ полученных данных позволит судить о мере нарушения зарядовой симметрии ядерных сил.

Было проведено моделирование планируемого эксперимента. Созданная программа моделирования [3] позволяет проводить выбор геометрии эксперимента, рассчитывать времена полета и

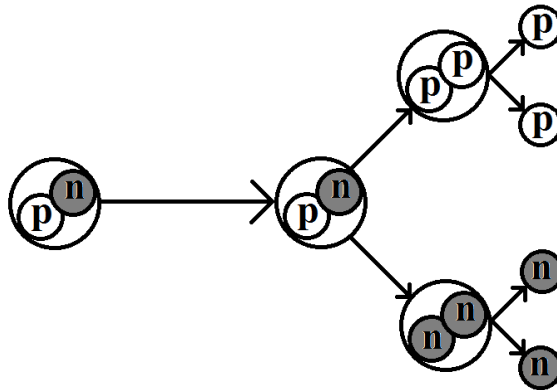


Рис. 1: Схема исследуемой реакции $d + d \rightarrow (pp) + (nn)$.

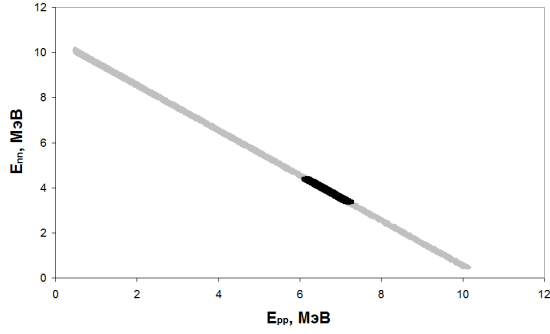


Рис. 2: Двумерная диаграмма $E_{pp}-E_{nn}$ реакции $d + {}^2H \rightarrow (nn)^s + (pp)^s$.

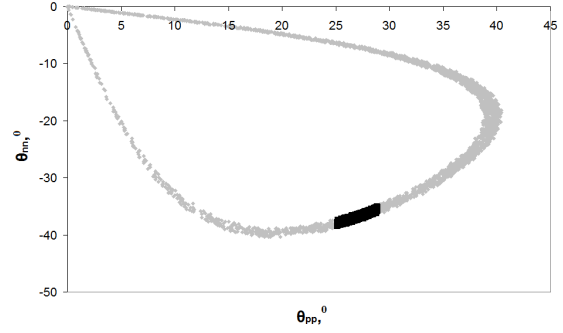


Рис. 3: Двумерная диаграмма $\Theta_{pp}-\Theta_{nn}$ реакции $d + {}^2H \rightarrow (nn)^s + (pp)^s$.

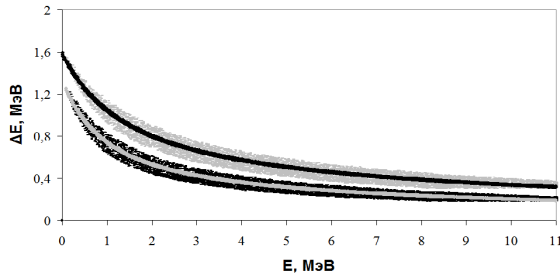


Рис. 4: $\Delta E - E$ -диаграмма: тонкие серая и черная линии соответствуют регистрации протонов и дейтронов соответственно в случае идеального разрешения детектора; широкие черная и серая полосы – регистрация протонов и дейтронов соответственно в случае разрешения 30%.

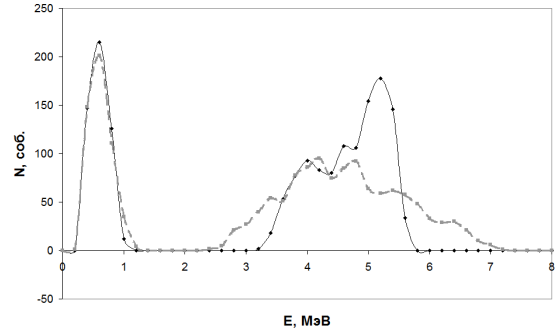


Рис. 5: Спектры энергии протонов при идеальном разрешении (сплошная кривая) и разрешении 30% (штрихпунктир).

энергии всех вторичных частиц и, соответственно, задавать ограничения на допустимые параметры детекторов. Для примера на рис. 2 и 3 приведены двумерные диаграммы $E_{pp}-E_{nn}$ и $\Theta_{pp}-\Theta_{nn}$. Исходя из этих диаграмм, выбираются сопряженные углы вылета двухнуклонных систем, которым будут соответствовать и определенные интервалы энергий развалных частиц (темным тоном выделены выбираемые интервалы). По таким диаграммам определены минимально необходимые параметры E -детектора: диапазон регистрируемой энергии протонов от 0 до 7,5 МэВ, энергетическое разрешение не хуже 30% при 1 МэВ, временное – не хуже 1 нс и возможность одновременной регистрации двух протонов на расстоянии не более 5 мм.

Тип частицы в данном эксперименте определяется по стандартной схеме $\Delta E - E$ разделения. На рис. 4 приведены результаты моделирования для этой диаграммы. Видно, что разрешения E -детектора в 30% достаточно для уверенного разделения протонов и дейтронов.

При моделировании спектра энергии протонов (рис. 5) наблюдаются два пика, расстояние между которыми в соответствии с формулой $E^* = [E_1 + E_2 - 2(E_1 \cdot E_2)^{\frac{1}{2}} \cdot \cos(\Theta_1 \Theta_2)]/2$ (здесь E_1 , Θ_1 и E_2 , Θ_2 – энергии и углы вылета «развалных» протонов) позволяет определить энергию связанного состояния (pp). На рисунке видно, что изменение разрешения от идеального до 30% оставляет возможность определения энергии связанного состояния.

Схема эксперимента представлена на рис. 6: нейтрон будет детектироваться жидким водородосодержащим сцинтиллятором, расположенным под углом $\sim 36^\circ$, близким к углу вылета nn -системы (справа от направления первичного пучка), два протона будут регистрироваться $\Delta E - E$ телескопом, установленным под расчетным углом 27° . Все детекторы располагаются в единой горизонтальной плоскости реакции. Энергия нейтронов определяется по времени пролета нейтронов

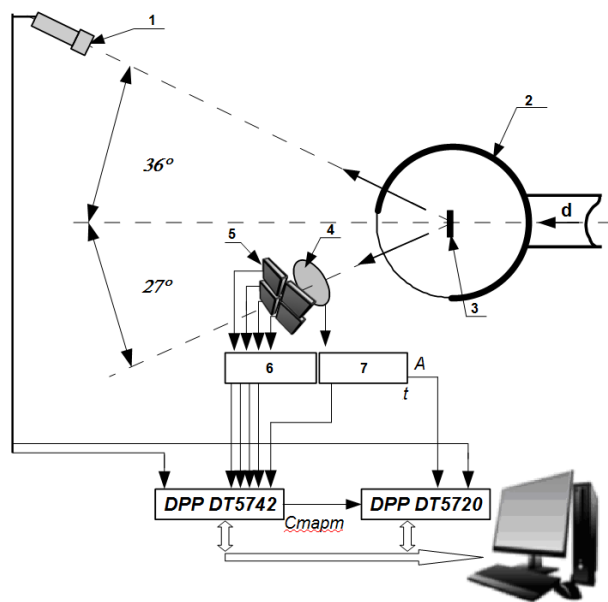


Рис. 6: Схема эксперимента: 1 – нейтронный детектор N1, 2 – камера рассеяния, 3 – CD_2 -мишень, 4 – ΔE -детектор, 5 – E -детектор, 6 – предусилитель матрицы SiФЭУ, 7 – предусилитель ΔE -детектора; DPP DT5742 и DPP DT5720 – цифровые сигнальные процессоры.

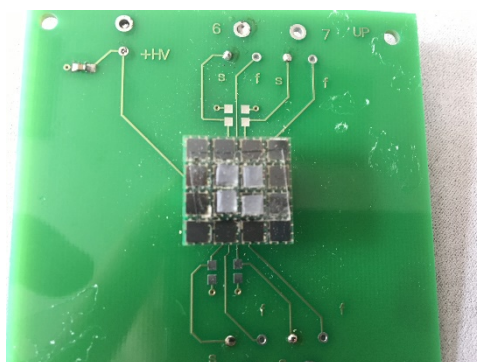


Рис. 7: Внешний вид координатного детектора для регистрации заряженных частиц.

до детектора, при этом в качестве стартового сигнала времяпролетной системы будет использован сигнал от E - либо ΔE -детектора, регистрирующего протоны. В качестве ΔE -детектора используется полностью обедненный поверхностно-барьерный кремниевый детектор с толщиной ~ 25 мкм. E -детектором должна служить матрица из детекторов, минимально 2×2 , с максимальными размерами чувствительной области каждого $3 \text{ мм} \times 3 \text{ мм}$. При этом будет шесть возможных комбинаций детектирования пары протонов в совпадении.

В соответствии с результатами моделирования был спроектирован координатный E -детектор.

2 E -детектор

Внешний вид первого варианта детектора представлен на рис. 7. Детектор создан на основе кристаллов LYSO и матрицы кремниевых фотоумножителей SiФЭУ ARRAYC-30035-16P-PCB фирмы SENSLE.

Матрица состоит из 16 SiФЭУ, в данном варианте детектора пока используются только четыре центральных. Матрицы SENSLE имеют ряд преимуществ: высокая степень надежности, гарантированно одинаковые параметры составляющих, малый темновой ток, высокий коэффициент усиления, дополнительный быстрый выход для временных измерений [4].

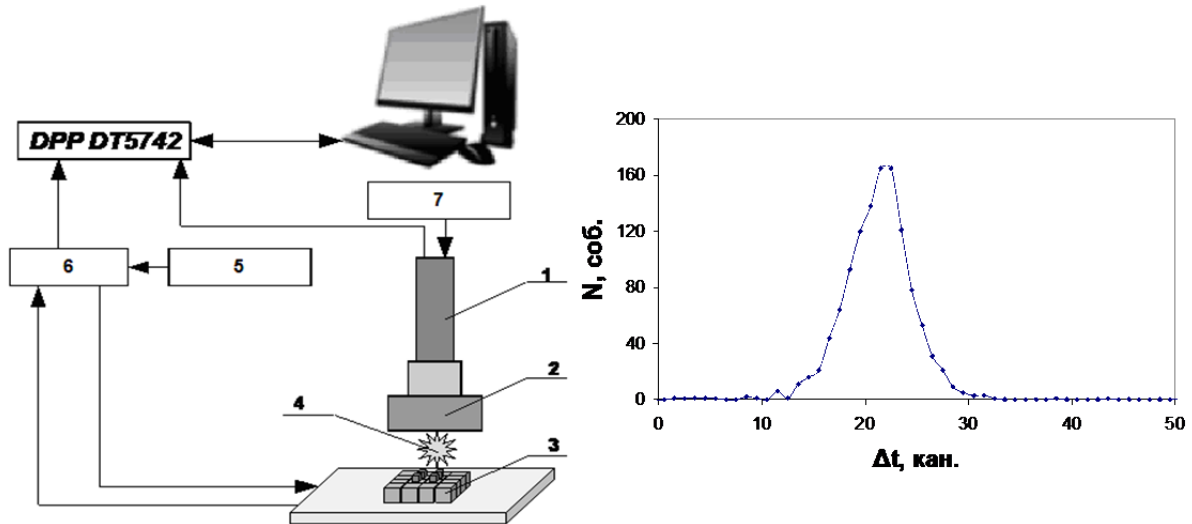


Рис. 8: Схема эксперимента по определению временного разрешения детектора: 1 – ФЭУ, 2 – сцинтиллятор EJ-301, 3 – исследуемый детектор, 4 – источник ОСГИ ^{22}Na , 5 – регулируемый источник напряжения для SiФЭУ, 6 – многоканальный усилитель, 7 – источник высокого напряжения, DT5742 – цифровой сигнальный процессор. Справа пример спектра разницы времен регистрации сигнала исследуемым детектором и детектором N1 (при обработке сигналов использовался метод FSP).

Были использованы сцинтилляционные кристаллы LYSO размерами $3 \times 3 \times 2 \text{ мм}^3$, самостоятельно изготовленные из кристаллов стандартных размеров $3 \times 3 \times 12 \text{ мм}^3$.

Выбор кристаллов LYSO и их размеров основан на следующих требованиях: отсутствие входного окна у кристалла (регистрируются заряженные частицы, поэтому исключаются все гигроскопичные кристаллы), хорошее энергетическое разрешение, полное поглощение частиц с энергией до 10 МэВ. Использование матричного полупроводникового детектора в данном случае предпочтительнее, но не проходит по экономическим соображениям.

2.1 Изучение характеристик детектора

Была проведена калибровка детектора и определены амплитудное и временное разрешения. В целях определения рабочей области напряжений детектора была снята зависимость разрешения от напряжения, приложенного к детектору. В измерениях использовались источники α - и γ -излучения ОСГИ.

При определении временного разрешения использовалась стандартная методика одновременной регистрации двух γ -квантов от бета-распада ^{22}Na (рис. 8). Вторым детектором служил детектор N1 основной установки (см. рис. 6), сделанный на основе сцинтиллятора EJ-301 и ФЭУ Hamamatsu R636-10, с временным разрешением $\sim 0,2$ нсек.

Цифровой сигнальный процессор CAEN DT5742 имеет шаг оцифровки по времени 0,2 нс, достаточный для определения временного разрешения исследуемого детектора.

Была получена зависимость временного разрешения детектора от прикладываемого к нему напряжения (рис. 9). В диапазоне 31–32 В временное разрешение (0,6 - 1 нс) достаточно для вычисления энергии нейтрона.

Были получены аналогичные зависимости амплитудного разрешения от напряжения смещения для γ -линий источников ОСГИ различных энергий. На рис. 10 приведена такая зависимость для энергии 511 кэВ источника ^{22}Na , а на рис. 11 – амплитудный спектр этого источника, снятый при напряжении смещения $U_{\text{см}} = 31 \text{ В}$.

Полученное значение амплитудного разрешения в диапазоне напряжений смещения 31-32 В ($\leq 30\%$ для 0,5 МэВ) удовлетворяет минимальным требованиям к детектору по условиям планируемого эксперимента.

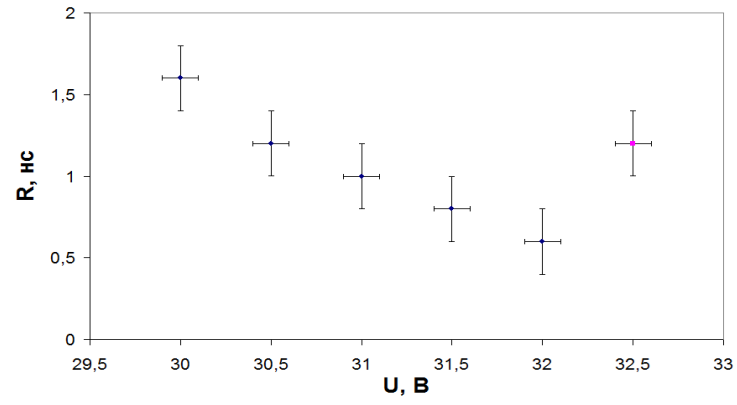


Рис. 9: Зависимость временного разрешения от напряжения.

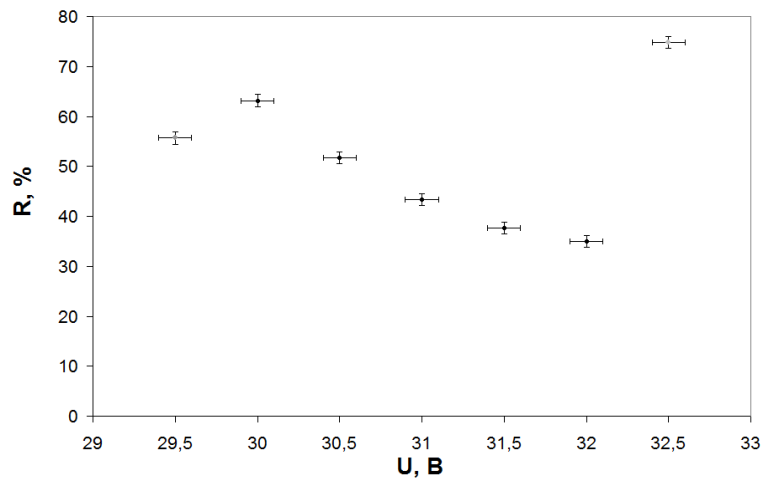


Рис. 10: Зависимость разрешения детектора по линии 511 кэВ от прикладываемого напряжения.

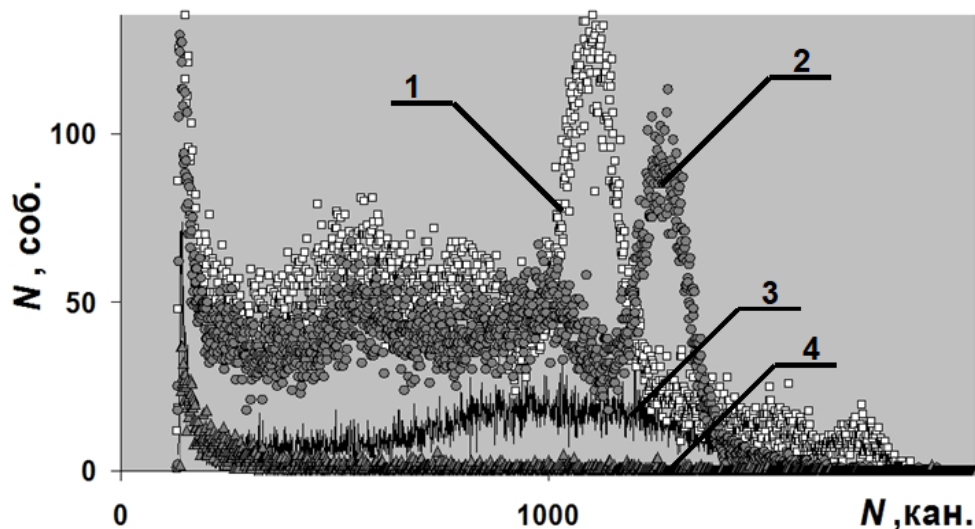


Рис. 11: Формы амплитудных спектров детектора. Время измерения – 15 минут. 1 и 2 – спектры излучения от источников ^{22}Na ($10^3/\text{сек}$) и ^{137}Cs ($10^3/\text{сек}$), деленные на 10^2 ; 3 – фоновый спектр, 4 – спектр сигналов кремниевой матрицы в отсутствии кристалла LYSO, умноженный на 10^2 .

2.2 Особенности проектирования детектора: исследование собственного фона детектора и создание оптического контакта матрицы фотодиодов и кристалла LYSO

Кристалл LYSO ($\text{Ce}_z\text{Lu}_{2-x-z}\text{Y}_x\text{SiO}_5$, где $0,05 < x < 1,95$ и $0,001 < z < 0,02$) имеет собственный радиоактивный фон, обусловленный наличием изотопа лютеция ^{176}Lu . На рис. 11 приведен амплитудный спектр собственного фона детектора. Для сравнения здесь же приведены спектры источников ^{22}Na и ^{137}Cs , измеренные детектором в тех же условиях.

Собственный фон детектора не должен оказать заметного влияния на результаты планируемого эксперимента, поскольку условие совпадения сигналов с сигналами ΔE -детектора и нейтронного детектора в узком временном диапазоне значительно ослабит его.

При проектировании детектора был проведен подбор материалов для создания оптического контакта между кристаллом LYSO и матрицей фотодиодов. Известно, что оптический контакт значительно влияет на процесс светосбора и, соответственно, на результирующие разрешения.

Были проведены испытания нескольких вариантов материалов с измерениями амплитудных спектров источников γ - и α -излучения. Определялись максимальные амплитуда сигналов и разрешение. Далее приведен список использованных материалов и «эффективность» (в скобках приведено отношение максимума сигнала к максимуму сигнала на диффузионном масле):

- масло диффузионное (1),
- глицерин (0,93),
- оптический вазелин (0,87),
- двусторонний скотч 3М 9473 VHB, диспенсер – пленка (0,87),
- силиконовый компаунд Silgel 612 (A, B) производства Wacker (0,83),
- двусторонний скотч 3М 9473 VHB, диспенсер – бумага (0,73),
- канадский бальзам (0,68).

Исходя из конструктивных соображений был сделан выбор в пользу двустороннего скотча 3М 9473 VHB, с пленкой в качестве диспенсера.

3 Проверка системы из нескольких детекторов

Аналогичные измерения проведены для всех четырех детекторов, входящих в матричную сборку. Получены практически одинаковые результаты (рабочая точка, разрешения и т. д.) для всех вариантов. При облучении матрицы коллимированным источником излучений исследовалось влияние каждого из четырех детекторов друг на друга. Каких-либо перекрестных зависимостей не обнаружено.

Была также проверена зависимость разрешений (амплитудного и временного) детектора от температуры. Исследование проводилось при помещении детектора в стационарный хладотермостат ХТ-3/70-2. Значительного изменения разрешений не обнаружено (в пределах 1–2% при охлаждении на 20 градусов), что близко к температурной зависимости коэффициента усиления SiФЭУ, но меньше ожидаемого для всего детектора. Это объясняется тем, что на данном этапе разработки сами значения разрешений далеки от оптимальных и определяются, в основном, качеством кристаллов. При планируемой в ближайшее время доработке детектора ожидается улучшение параметров разрешения. Температурные измерения будут проведены повторно.

4 Заключение

Спроектирован и собран координатный детектор для регистрации заряженных частиц на основе матрицы кремниевых фотоумножителей и сцинтилляционных кристаллов LYSO. Цель создания детектора – его применение для исследований в области физики легких ядер, в частности для определения энергии связанного состояния (pp), которое образуется в результате реакции $d + d \rightarrow (pp) + (nn)$. Были измерены временное, амплитудное, пространственное разрешение. Определен рабочий диапазон напряжений смещения. Выбрана рабочая точка. Определен собственный фон детектора и его влияние на применение детектора для измерений. Были проведены измерения по определению зависимости разрешения детектора от температуры. Путем исследования спектров определен наилучший материал для создания оптического контакта между кристаллами и матрицей SiФЭУ. Данная конструкция и измеренные параметры детектора уже удовлетворяют условиям эксперимента. В ближайшее время планируется модернизация детектора (замена кристаллов) для достижения лучших значений энергетического разрешения ($\sim 15\%$).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-32-00743.

Список литературы

- [1] Зуев С. В., Каспаров А. А., Конобеевский Е. С., Мордовской М. В., Железных И. М., Гасанов А. Г., Лебедев В. М., Спасский А. В. Установка для изучения NN-корреляций в реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow n + n + p + p$ // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2016. – Т. 80. – № 3. – С. 254.
- [2] Конобеевский Е. С., Зуев С. В., Каспаров А. А., Лебедев В. М., Мордовской М. В., Спасский А. В. Исследование реакции $d + d \rightarrow {}^2\text{He} + {}^2n$ при энергии дейтронов 15 МэВ // ЯФ. – 2015. – Т. 78. – № 7–8. – С. 1–9.
- [3] Зуев С. В., Каспаров А. А., Конобеевский Е. С. Программа моделирования экспериментов по исследованию реакций с тремя частицами в конечном состоянии // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2014. – Т. 78. – № 5. – С. 527–531.
- [4] Информация сайта компании SENSL [Электронный ресурс] URL: <http://www.sensl.com/downloads/ds/DS-ArraySB-4.pdf> (дата обращения: 02.04.2017).