

Д. С. ВАЛИОЛДА¹, Д. М. ДЖАНСЕЙТОВ², А. Н. ИСАДЫКОВ²¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,
²Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан)**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГАММА СПЕКТРОМЕТРОВ
НА ПУЧКАХ РАДИОАКТИВНЫХ ЯДЕР**

Аннотация. В работе исследуются характеристики неорганических сцинтилляционных детекторов LaBr₃(Ce) (BriLanCe 380), нацеленных на регистрацию гамма квантов в эксперименте по изучению двух протонного распада ¹⁷Ne на установке АКУЛИНА (ЛЯР им. Г. Н. Флерова, ОИЯИ). Приводятся результаты калибровки детекторов LaBr₃(Ce) источниками гамма излучения ⁶⁰Co и ¹³⁷Cs. Определены эффективность регистраций детекторов и определена методика работы с данным детектором.

Ключевые слова: протонная радиоактивность, фрагмент сепаратор, вторичные радиоактивные пучки, фотоэлектронный умножитель, система TOF (Time-of-flight), сцинтилляционный детектор, неорганический сцинтиллятор BriLanCe 380.

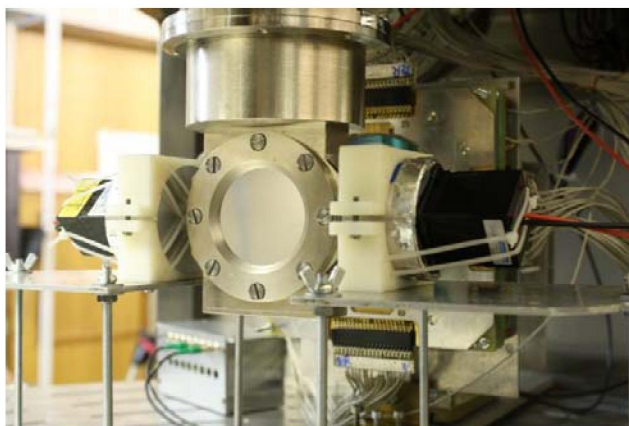
Тірек сөздер: протондық радиоактивтілік, фрагмент сепаратор, екінші ретті радиоактивті шоғырлар, фотоэлектронды көбейткіш, TOF (Time-of-flight) жүйесі, сцинтилляциялық детектор, BriLanCe 380 бейорганикалық сцинтилляторы.

Keywords: spectroscopy of charged particles, proton radioactivity, fragment separator, secondary radioactive beam, PMT, TOF (Time-of-flight) system, scintillation detector, inorganic scintillators of CsI(Tl), BriLanCe 380, Doppler effect.

Проводимая работа является частью научно-исследовательской деятельности по исследованию характеристик гамма – спектрометров для установки АКУЛИНА [1]. В ЛЯР имени Г. Н. Флерова (ОИЯИ) на сепараторе АКУЛИНА проводятся исследования в области экзотических ядер. Особенно наибольший интерес связан с изучением двух протонного распада ядер. В начале 2013 г. был проведен эксперимент по изучению двух протонного распада ¹⁷Ne [2].

Данный эксперимент предусматривает экспериментальный поиск ветви двухпротонного распада первого возбужденного состояния ядра ¹⁷Ne, находящегося при энергии возбуждения $E^* = 1,288$ МэВ и имеющего спин/четность $J^\pi=3/2^-$. Энергия двухпротонного распада этого состояния ¹⁷Ne равняется 344 КэВ. Главной известной ветвью этого распада является гамма распад. Последовательное испускание двух протонов, при котором сначала должна получиться система ¹⁶F+p, а вслед за этим ¹⁶F распался бы на ¹⁵O+p, запрещено законом сохранения энергии. Таким образом, это состояние в сильном канале является *истинно двухпротонным распадчиком*. В данном эксперименте предлагается искать слабую ветвь истинно двухпротонного распада этого состояния в реакций ¹H(¹⁸Ne, d)¹⁷Ne [2].

В данном эксперименте использовались несколько типов детектирующих устройств для регистрации продуктов распада и идентификаций ионов. Для регистрации гамма квантов используются 2 детектора состоящие из сцинтиллятора LaBr₃(Ce) [3] и ФЭУ компании HamamatsuR7600-U200, расположенные на расстоянии 50мм от мишени (рисунок 1).

Рисунок 1 – Детекторы из сцинтиллятора LaBr₃(Ce) в эксперименте

Детекторы $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ нацелены на регистрацию гамма квантов, испускаемых из первого возбужденного состояния ^{17}Ne с известной энергией 1.288 МэВ [2]. Эффективность регистрации крайне сложно оценить, пользуясь известными литературными формулами [4], для данного эксперимента легче эффективность регистрации извлечь из померенных данных, так как в случае метода вторичных пучков есть множество факторов (например, прохождение гамма квантов через вещество (медь) мишени), которые могут ослабить гамма излучение, есть трудности с их определением (например, трудно оценить толщину этого вещества). Эти факторы могут повлиять на оценку эффективности регистрации детекторов. Определение эффективности регистрации важно для определения сечения заселения первого возбужденного состояния ^{17}Ne в данном эксперименте. Обработанные данные являются частью обработки экспериментальных данных.

1. Калибровка и фитирование детекторов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$. Для калибровки данного детектора использовались источники гамма-излучения ^{60}Co и ^{137}Cs . На рисунке 2 представлены калибровочные спектры ^{60}Co и ^{137}Cs , измеренные для детекторов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, приводятся результаты фитирования программой ROOT [6] для каждого пика гамма-излучения. Для калибровки экспериментальных данных, также нужно учитывать аннигиляцию позитрона с $E = 511 \text{ KeV}$ в спектре гамма излучения.

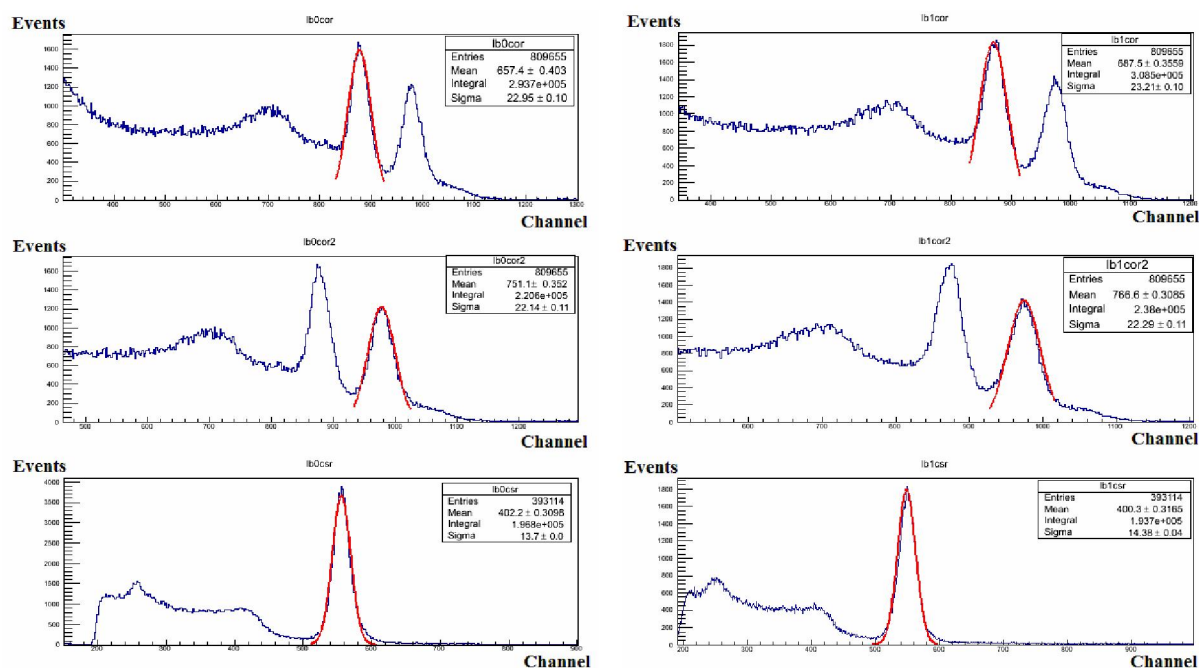


Рисунок 2 – Калибровка первого(слева) и второго(справа) детекторов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ источниками γ -квантов: ^{60}Co и ^{137}Cs . Фитирование пиков 1) $E_\gamma = 1170 \text{ KeV}$, 2) $E_\gamma = 1330 \text{ KeV}$, 3) $E_\gamma = 660 \text{ KeV}$

Линейная зависимость между номером канала и энергией $E = BX + A$ (1) строится для каждого детектора для определения калибровочных коэффициентов. В результате сопоставления каналов и энергий были найдены калибровочные коэффициенты: для первого $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ пьедестал $A = -242.82 \text{ кэВ}$; наклон $B = 1.61 \text{ кэВ/канал}$, для второго: пьедестал $A = -265.09 \text{ кэВ}$; наклон $B = 1.65 \text{ кэВ/канал}$. Далее используя эти полученные калибровочные коэффициенты (таблица 1) и линейное уравнение (1), в программе ROOT переводим калибровочные спектры в энергетическую шкалу.

Таблица 1 – Калибровочные коэффициенты для двух детекторов

$E_\gamma[\text{KeV}]$	$X[\text{Ch}]$	σ	ПППМ	$E_\gamma[\text{KeV}]$	$X[\text{Ch}]$	σ	ПППМ
660 (^{137}Cs)	556.2	13.7	32.3	660 (^{137}Cs)	548,96	14,37	33.84
1170 (^{60}Co)	877.1	22.7	53.5	1170 (^{60}Co)	870,90	23,25	54.75
1330 (^{60}Co)	977.7	22.1	52.0	1330 (^{60}Co)	974,50	22,80	53.69

Для проверки калибровки спектров источника гамма квантов построим суперпозицию спектров ^{60}Co и ^{137}Cs . Для того, чтобы получить спектры в одной шкале находим нормировочные коэффициенты из сравнения числа событий для каждого источника. Тогда получаем, что нормировочные коэффициенты $C(^{60}\text{Co})=1$; $C(^{137}\text{Cs})=0.5$. Затем используя команду сложения гистограмм в программе ROOT - `Add(const TH1 * h, const TH1 * h2, Double_t c1 = 1, Double_t c2 = 0.5)`[6], получаем следующие графики (рис.3) суперпозиций спектров от γ источников ^{60}Co и ^{137}Cs для каждого детектора. В графике приведены значения пиков, полученные после проведения калибровки и фитирования.

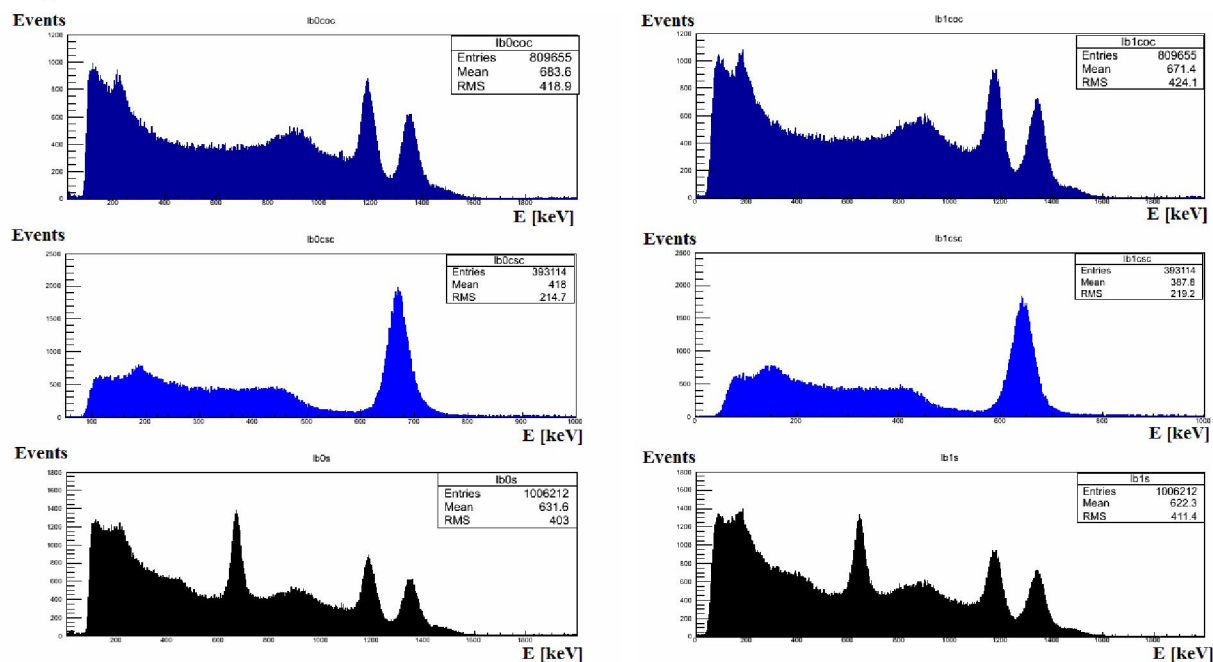


Рисунок 3 – Калибровка детекторов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ источниками γ – квантов: а) ^{60}Co ; б) ^{137}Cs ; в) суперпозиция спектров от γ источников ^{60}Co и ^{137}Cs ; Нормировочные коэффициенты $C(^{60}\text{Co})=1$; $C(^{137}\text{Cs})=0.5$

Как уже отмечалось выше, первое возбужденное состояние ^{17}Ne распадается с испусканием гамма кванта с энергией 1,288 MeV. Т.е. регистрация гамма квантов с этой энергией дает возможность оценки сечения заселения первого возбужденного состояния ^{17}Ne . Для оценки сечения нужно определить эффективность регистрации детекторов.

Определение эффективности регистрации для данного эксперимента учитывается в предположении, что произойдет процесс аннигиляции позитрона. В данном эксперименте позитрон может образоваться за счет образования электрон-позитронной пары. Появившиеся позитроны могут остановиться на мишени (много факторов этому способствует, например, материал мишени - медь, жидкая мишень и т.д.) и далее в результате аннигиляции остановившегося позитрона испускаются 2 гамма кванта с энергией 511кэВ в противоположные стороны. Можно зарегистрировать эти гамма кванты детекторами $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$.

Если в один детектор попадает один гамма квант, то во второй детектор также попадает второй гамма квант. Значит, отношение событий зарегистрированных гамма квантов в двух детекторах дает информацию об эффективности регистрации.

Для оценки эффективности регистрации детекторов зададим временные условия. Для этого строим двумерные графики зависимости времени от амплитуды (рисунок 4). В (1) графике построены свои амплитуды для каждого детектора в зависимости от своих времен. Времена переведены в шкалу нс. Здесь (выделенная красным область) соответствует мгновенным гамма квантам, испускаемым из возбужденного состояния

^{17}Ne . Широкая полоса (выделена стрелкой) показывает, что есть случайные совпадения с пиком аннигиляции позитрона (511 кэВ). Увеличивая эту область, во втором графике (2) видим, что выделенное пятно соответствует гамма квантам, испущенным в результате аннигиляции позитрона. В графике (3) учитывали условие совпадения гамма квантов в обоих детекторах, построены

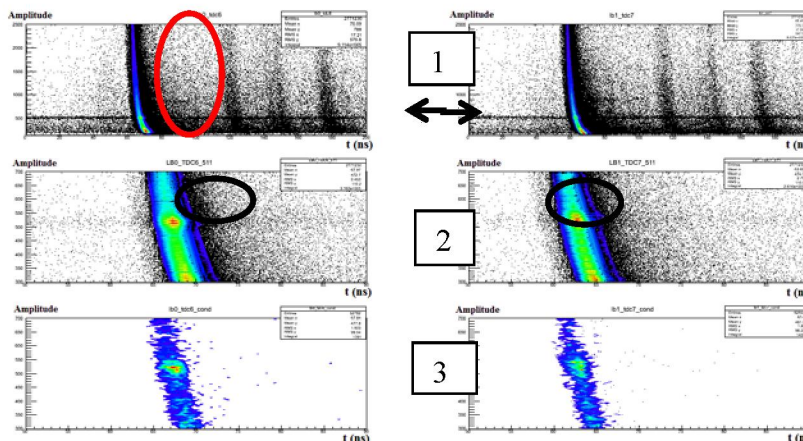


Рисунок 4 – Амплитудно-временной спектр

графики при правильной амплитуде и времени в другом детекторе. Видно, что примесь случайных событий почти исчезла, но есть вклад фона самого детектора.

Для определения числа событий в пике 511 кэВ без фона использовался пакет программ Origin. С помощью команды baseline отрезаем фон, и фитируем в форме Гаусса пик аннигиляций позитрона. Используя данные и параметры фитирования, считаем площадь пика, т.е. интегрируем данную область. В результате получается число событий в пике аннигиляций e^+ . Данная процедура выполняется для всех 4-х условий. Далее как уже упоминали, поделив число событий, когда гамма квант попал в оба детектора на число гамма квантов в первом/втором детекторе получаем значения эффективности регистрации (ϵ):

$$\epsilon = \frac{3229}{170093} = 1,9\% \text{ для первого детектора, } \epsilon = \frac{2883}{162906} = 1,8\% \text{ для второго детектора.}$$

Для определения эффективности регистрации из экспериментальных данных с заданной энергией, т.е. $E_\gamma = 1,3 \text{ МэВ}$, нужно ввести поправку, учитывающую эффективность поглощения детектора Brilliance 380 и проходимость гамма квантов через слой вещества.

Для определения первой поправки пользуемся графиком (рисунок 5) зависимости эффективности поглощения от энергии [5]. В данном случае размер кристалла составляет 2 дюйма. Для этого размера смотрим эффективность поглощения для энергии 1,3 МэВ (энергия гамма кванта,

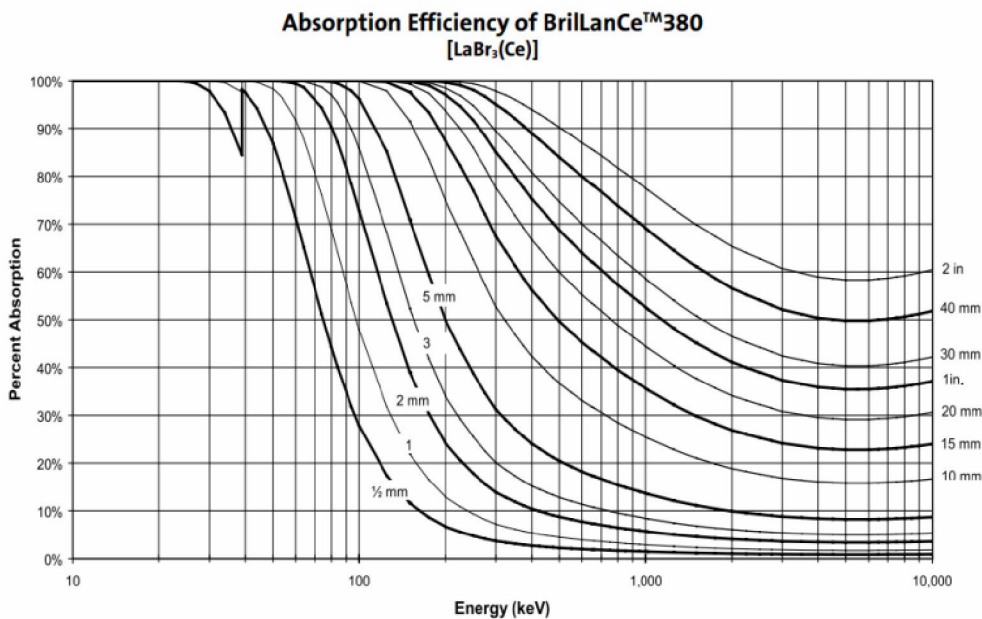


Рисунок 5 – Эффективность поглощения детекторов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ [6]

испущенного из первого возбужденного состояния ^{17}Ne) и для 511 кэВ (процесс аннигиляции позитрона). Для первого находим, что порядка 57% , т.е. 0,57; для энергии 511 кэВ порядка 90%, т.е. 0,9. далее находим отношение коэффициентов поглощения, и это будет первой поправкой для определения эффективности регистрации гамма квантов с энергией 1,3 МэВ.

$$\text{Поправка 1} = ,0,57/-0,90.=0,63$$

Для определения второй поправки рассматриваем процесс прохождения гамма квантов через слой вещества. В данном случае в качестве вещества будет материал мишени – медь. Далее, используя литературную формулу [4] для данного процесса: $I(x)=I(0) \cdot e^{-\mu x}$, ослабление интенсивности (I) падающего пучка фотонов в зависимости от толщины слоя вещества. Линейный коэффициент ослабления μ находится из табличных значений [5], соответственно для каждой энергии гамма квантов:

$$\mu (E_{\gamma} = 1.3 \text{ МэВ}) = 0,522; \mu (E_{\gamma} = 0.5 \text{ МэВ}) = 0,732;$$

толщина вещества для данного случая $x=1$ см. Тогда отношение интенсивностей пучка даёт нам значение второй поправки.

$$\text{Поправка 2} = I_1/I_2 = e^{(\mu_2 - \mu_1)x} = 1,21$$

- 1) Тогда общая поправка будет на коэффициент 0,76. Т.е. ослабление эффективности на 25%.
- 2) Далее с учетом этой поправки находим эффективность регистрации гамма квантов с энергией 1.3 МэВ:

$$\varepsilon_1 = 1,9 * 0,76 = 1,44 \sim 1,4\%$$

$$\varepsilon_2 = 1,8 * 0,76 = 1,36 \sim 1,4\%$$

Заключение. В результате проделанной работы выполнена калибровка сцинтилляционного детектора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ источниками гамма-лучей ^{60}Co и ^{137}Cs и по пику аннигиляции позитрона.

Определен верхний предел временного разрешения детекторов, при условии совпадения гамма квантов аннигиляции позитрона: 1,7 нс для обоих детекторов. Для одного детектора временное разрешение составит 1,4 нс.

Определение эффективности регистрации детекторов $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ была выполнена, в предположении об источнике гамма квантов вблизи мишени. Реальное вычисление эффективности затруднено наличием неравномерного количества материала мишени (медь) из экспериментальных данных. Для определения эффективности предполагалась аннигиляция позитрона с испусканием 2γ квантов в противоположные стороны. Расположение детекторов позволяет учитывать данный процесс. Учитывая условие совпадения числа γ квантов в обоих детекторах $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, определены значения эффективности регистрации для энергии аннигиляции позитрона: 1.9 и 1.8% соответственно для каждого детектора.

В результате с учетом поправки определено значение эффективности регистрации гамма квантов с энергией 1,3 МэВ, равное 1,4% для детекторов Brilliance 380.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 A.M. Rodin et al. Status of ACCULINNA beam line. Nucl.Inst. and Meth.in Physics ReaserchB204 (2003) 114-118.
- 2 L. V. Grigorenko et. al – Possibility to study a two-proton halo in ^{17}Ne - PHYSICAL REVIEW C 71, 051604(R) (2005).
- 3 <http://www.detectors.saint-gobain.com>.
- 4 К.Н. Мухин Экспериментальная ядерная физика Т.1. Физика атомного ядра. – Москва, Лань, 2008. - 384 с.
- 5 Efficiency calculations for selected scintillators, <http://www.detectors.saint-gobain.com>.
- 6 <http://root.cern.ch/>

REFERENCES

- 1 A.M. Rodin et al. Status of ACCULINNA beam line. Nucl.Inst. and Meth.in Physics Reaserch B204 (2003) 114-118.
- 2 L. V. Grigorenko et. al – Possibility to study a two-proton halo in ^{17}Ne - PHYSICAL REVIEW C 71, 051604(R) (2005).
- 3 <http://www.detectors.saint-gobain.com>.
- 4 K.N. Mulin Jeksperimental'naja jadernaja fizika T.1. Fizika atomnogo jadra. – Moskva, Lan', 2008. - 384 s. (In Russ)
- 5 Efficiency calculations for selected scintillators, <http://www.detectors.saint-gobain.com>.
- 6 <http://root.cern.ch/>

Резюме

Д. С. Валиолда¹, Д. М. Жансейітов², А. Н. Исадықов²

⁽¹⁾Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,
⁽²⁾Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан)

РАДИОАКТИВТІ ЯДРОЛАР ШОҒЫРЫНДА ГАММА-СПЕКТРОМЕТРЛАР СИПАТТАМАСЫН ЗЕРТТЕУ

Жұмыста АКУЛИНА құрылғысында (Г.Н. Флеров атындағы ЯРЛ, БЯЗИ) өткізілген, ¹⁷Ne ядросының қос протонды ыдырауын зерттеуге бағытталған тәжірибеде гамма кванттарын тіркеуге арналған LaBr₃(Ce) (Brilliance 380) бейорганикалық сцинтилляциялық детекторларының сипаттамалары зерттеледі. LaBr₃(Ce) детекторларының ⁶⁰Co пен ¹³⁷Cs гамма сәулелерінің көзімен калибрлеу нәтижелері келтірілген. Бұл детекторлармен жұмыс істеу әдістемелері мен олардың тіркеу нәтижелілігі анықталған.

Тірек сөздер: протондық радиоактивтілік, фрагмент сепаратор, екінші ретті радиоактивті шоғырлар, фотоэлектронды көбейткіш, TOF (Time-of-flight) жүйесі, сцинтилляциялық детектор, BriLanCe 380 бейорганикалық сцинтилляторы.

Summary

D. S. Valiolda¹, D. M. Janseitov², A. N. Issadykov²

⁽¹⁾Al Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,
⁽²⁾Eurasian National University, Astana, Kazakhstan)

THE STUDY OF CHARACTERISTICS OF GAMMA SPECTROSCOPY IN RADIOACTIVE BEAM

This paper examines the characteristics of inorganic scintillation detectors LaBr₃(Ce)(BriLanCe 380), aimed at the registration of gamma rays in the experimental study of the two proton decay of ¹⁷Ne in ACCULINNA (G.N. Flerov LNR, JINR). The results of LaBr₃(Ce) detector's calibration with gamma-ray sources of ⁶⁰Co and ¹³⁷Cs is presented. The efficiency of the detector was determined and methods of working with the detector are defined.

Keywords: spectroscopy of charged particles, proton radioactivity, fragment separator, secondary radioactive beam, PMT, TOF (Time-of-flight) system, scintillation detector, inorganic scintillators of CsI(Tl), BriLanCe 380, Doppler effect.