



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова  
Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт»

Препринт 2025-1  
ОЭФ

А.М. Горин<sup>1</sup>, С.В. Евдокимов<sup>1</sup>, А.А. Зайцев<sup>2</sup>, В.И. Изучеев<sup>1</sup>,  
Д.С. Криницын<sup>1</sup>, Б.В. Полищук<sup>1</sup>, В.И. Рыкалин<sup>1</sup>,  
С.А. Садовский<sup>1</sup>, Ю.В. Харлов<sup>1</sup>, А.А. Шангараев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, г. Протвино, МО, РФ

<sup>2</sup> Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, МО, РФ

**Наблюдение гамма-ядерных переходов  
возбуждённых ядер, образующихся в адрон-ядерных  
взаимодействиях, в эксперименте Гиперон+**

Протвино 2025

### Аннотация

А.М. Горин и др. Наблюдение гамма-ядерных переходов возбуждённых ядер, образующихся в адрон-ядерных взаимодействиях, в эксперименте Гиперон+: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2025-1. – Протвино, 2025. – 9 с., 5 рис.

Возможными продуктами адрон-ядерных взаимодействий в пучке адронов промежуточных энергий 5 - 10 ГэВ являются вторичные возбуждённые ядра. При переходах из возбуждённого состояния в основное или другое возбуждённое состояние такие ядра испускают фотоны МэВ-ных энергий, соответствующих разности уровней перехода возбуждения ядер. Энергетические спектры фотонов девозбуждения ядер являются их характерными особенностями. Поэтому детектирование указанных фотонов гамма-ядерных переходов позволяет провести идентификацию ядер, образующихся в конечном состоянии такой реакции. В свою очередь изучение корреляции спектров возбуждения вторичных ядер с типом и параметрами адронных систем, вылетающих при этом в переднюю полусферу реакции, открывает возможности для исследования динамики адрон-ядерных взаимодействий. В настоящей работе представлены первые результаты измерения спектров гамма-ядерных переходов в эксперименте Гиперон+ в тестовом сеансе по набору статистики адрон-ядерных взаимодействий с импульсом 7 ГэВ/с на углеродной мишенью ( $^{12}\text{C}$ ) при помощи спектрометра Гамма-Ядерных Переходов (GNT). Полученные данные можно интерпретировать как наблюдение ряда гамма-переходов ядер  $^{11}\text{C}$ , образующихся в конечном состоянии событий, отобранных триггером на взаимодействие частиц пучка с мишенью.

### Abstract

A.M. Gorin et al. Gamma-nucleus transition observation of excited nuclei produced in hadron-nuclear interactions in Hyperon+ experiment: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2025-1. – Protvino, 2025. – p. 9, figs. 5.

Possible products of hadron-nuclear interactions in a beam of hadrons at intermediate energies 5-10 GeV are secondary excited nuclei. During transitions from the excited state to the ground or other excited state, such nuclei emit photons in a MeV energy region correspond to the difference in the levels of the excitation transition of the nuclei. The energy spectra of photons of the nucleus deexcitation are their characteristic features. Therefore, the detection of these photons of gamma-ray nuclear transitions makes it possible to identify the nuclei formed in the final state of such a reaction. In turn, studying the correlation of the excitation spectra of secondary nuclei with the type and parameters of hadron systems that fly out into the reaction forward hemisphere opens up opportunities for studying the dynamics of hadron-nuclear interactions. This paper presents the first results of measuring the spectra of gamma-ray nuclear transitions in the Hyperon+ experiment in a test session using a set of statistics on hadron-nuclear interactions with a momentum of 7 GeV/c on a carbon target ( $^{12}\text{C}$ ) using the Gamma-Nuclear Transition (GNT) spectrometer. The data obtained can be interpreted as an observation of a series of gamma transitions of  $^{11}\text{C}$  nuclei produced in the final state of events selected with the trigger for the interaction of the beam particles with the target.

## Введение

Динамика сильных взаимодействий является объектом многочисленных исследований как в области больших переданных импульсов, так и в непертурбативной области КХД. Взаимодействие налетающих адронов с ядрами при промежуточных энергиях характеризуется малыми величинами переданных импульсов, что соответствует непертурбативному режиму КХД. Изучение этих процессов углубляет наше понимание сильных взаимодействий и приближает создание теории и методов вычислений, обладающих достаточной описательной и предсказательной силой. Для детального изучения таких процессов необходимо регистрировать как можно более детально продукты взаимодействия. Так, заряженные и нейтральные частицы, вылетающие в переднюю полусферу в СЦМ реакции, могут быть зарегистрированы с помощью трековых детекторов и различных калориметров. Однако вторичное ядро, образующееся в конечном состоянии реакции, имеет малый импульс в экспериментах с фиксированной ядерной мишенью. Образовавшееся ядро быстро останавливается в толще мишени за счет тормозных потерь. Тем не менее, его идентификация возможна, если ядро в результате взаимодействия оказалось в возбужденном состоянии, поскольку фотоны, испускаемые при гамма-переходах ядра имеют энергию, равную разности энергий начального и конечного состояний. Для различных ядер энергии уровней возбуждений индивидуальны, что и позволяет провести идентификацию конкретных ядер по детектируемым уровням их возбужденных состояний.

Эксперимент Гиперон+, см. [1], направлен на детальное изучение механизмов адрон-ядерных взаимодействий при энергиях адронного пучка порядка 5 - 10 ГэВ. Он является дальнейшим развитием эксперимента Гиперон-М [3], в рамках которого были проведены прецизионные исследования нейтральных мезонных состояний, образующихся в адрон-ядерных взаимодействиях при импульсе адронного пучка 7 ГэВ/с. В частности, были проведены поиски модификации масс и ширин  $f_2(1270)$  [4] и  $\omega(782)$  [5] мезонов, образующихся в холодной материи атомных ядер, а также осуществлен поиск ранее неизвестных состояний, которые могут образовываться в

адрон-ядерных взаимодействиях [6]. С целью существенного расширения возможностей эксперимента был разработан и реализован проект модернизации установки Гиперон-М до уровня Гиперон+ за счет создания нового мишенного узла установки, включающего GNT-спектрометр фотонов гамма-ядерных переходов МэВ-ного диапазона энергий на основе сцинтиллирующих кристаллов NaI(Tl) и BGO, veto-детектор CPV для подавления регистрации заряженных частиц, вылетающих в апертуру GNT-спектрометра, мишеный счетчик  $S_5$  и сегментированный детектор  $S_O$ , см. Рис.1.

В ноябре 2024 г. установка Гиперон+ [1] в полном составе была экспонирована в тестовом сеансе на положительном адронном пучке с импульсом 7 ГэВ/с 18 канала ускорительного комплекса У-70. В настоящей работе рассмотрена процедура проведения измерений, приведены первые полученные результаты на мишени  $^{12}\text{C}$  и проведено их сравнение с результатами Монте-Карло моделирования.

## 1. Установка Гиперон+

Установка Гиперон+ расположена на 18 канале ускорительного комплекса У-70 [2]. Схема экспериментальной установки Гиперон+ приведена на Рис. 1. Базовыми

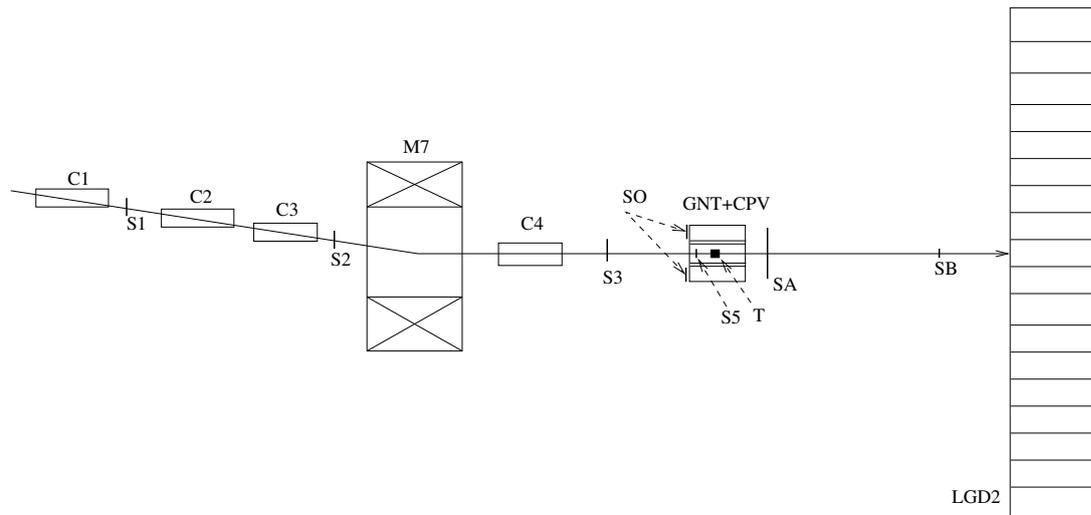


Рис. 1. Схема экспериментальной установки Гиперон+:  $S_{1-3}$  - пучковые сцинтилляционные счетчики,  $C_{1-3}$  - черенковские счетчики,  $M7$  - магнит наведения пучка на мишень,  $S_5$  - мишеный триггерный счетчик,  $T$  - мишень,  $S_O$  - сцинтилляционный сегментированный счетчик задней полусферы,  $GNT$  - спектрометр гамма-ядерных переходов,  $S_A$  - сцинтилляционный veto-счетчик, закрывающий апертуру калориметра  $LGD2$ ,  $S_B$  - триггерный сцинтилляционный антисчетчик пучка,  $LGD2$  - черенковский электромагнитный спектрометр полного поглощения.

детекторами установки Гиперон+ являются пороговые черенковские счетчики  $C_{1-3}$  для определения типа пучковой частицы, пучковые сцинтилляционные счетчики

$S_{1-3}$  для выделения пучковой частицы, черенковский электромагнитный спектрометр полного поглощения  $LGD2$ , широкоапертурный сцинтилляционный вето-счетчик  $S_A$ , закрывающий от заряженных частиц апертуру спектрометра  $LGD2$ , детектор гамма-ядерных переходов GNT на основе сцинтиллирующих кристаллов NaI(Tl) и BGO, а также тонкий сцинтилляционный счетчик  $S_B$  с размерами  $7 \times 7 \times 0.3$  см<sup>3</sup>, установленный по пучку непосредственно перед спектрометром  $LGD2$ . Включение  $S_B$  в триггер в режиме антисовпадений позволяет выделять события взаимодействия пучка с мишенью.

Спектрометр GNT представляет собой систему из трех колец сцинтилляционных счетчиков каждое с 3-мя кристаллами NaI(Tl) и 3-мя кристаллами BGO с размерами обоих кристаллов  $D/L=63/63$  мм. Вместе с шестью счетчиками вето-детектора заряженных частиц CPV и шестью счетчиками сегментированного детектора  $S_O$ , предназначенными для подавления фоновых событий в счетчиках GNT от заряженных частиц, он образует мишенный узел установки Гиперон+. Спектрометр GNT показан на Рис.2. Он позволяет эффективно регистрировать фотоны в МэВ-ом диапазоне энергий и измерять их энергии с высокой точностью, подробнее см. в [8].

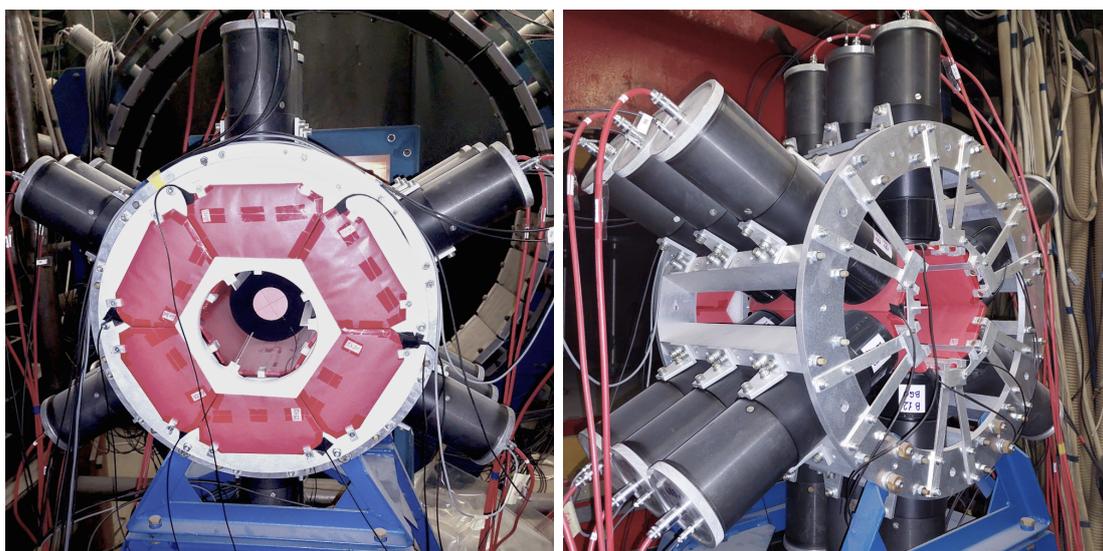


Рис. 2. Фотографии мишенного узла установки Гиперон+. Слева показан вид со стороны пучка, на переднем плане видны все шесть трапецидальных счетчиков сегментированного детектора  $S_O$ . Справа – вид мишенного узла со стороны спектрометра  $LGD2$ , видны практически все тубусы счетчиков GNT, а в центре также хорошо видны (красные) сцинтилляционные пластины детектора CPV.

## 2. Калибровка GNT-спектрометра

Перед экспозицией установки Гиперон+ на пучке была проведена калибровка энергетической шкалы всех счетчиков GNT-спектрометра с помощью  $\beta^+$  радиоактивного источника на основе  $^{22}\text{Na}$ , распадающегося по каналу  $^{22}\text{Na} \rightarrow ^{22}\text{Ne}^* + e^+ + \nu_e$ .

При этом вторичное возбуждённое ядро  $^{22}\text{Ne}^*$  имеет время жизни  $T_{1/2} = 3.6$  пс, оно переходит в своё основное состояние посредством излучения  $\gamma$ -кванта с энергией  $E = 1.2745$  МэВ [7]. В результате каждый акт  $\beta^+$ -распада  $^{22}\text{Na}$  сопровождается излучением 3 фотонов – двух с энергией 0.511 МэВ от  $e^+e^-$  аннигиляции и еще одного от  $\gamma$ -распада ядра  $^{22}\text{Ne}^*$ . С целью калибровки запуск GNT-спектрометра, полностью интегрированного в инфраструктуру эксперимента Гиперон+, проводился импульсом со счетчика  $S_5$ , расположенного рядом с источником  $^{22}\text{Na}$ , при прохождении через счетчик распадного позитрона как заряженной частицы до момента его аннигиляции. Более подробное описание процедуры калибровки GNT-спектрометра см. в работе [8].

На Рис.3 приведены полученные в результате калибровки энергетические спектры, просуммированные по всем 9 GNT-счетчикам с кристаллами NaI(Tl) слева, и по всем счетчикам с кристаллами BGO справа. Как видно из рисунка реализованная, процедура обеспечивает относительную калибровку счетчиков с точностью порядка нескольких единиц на  $10^{-3}$ .

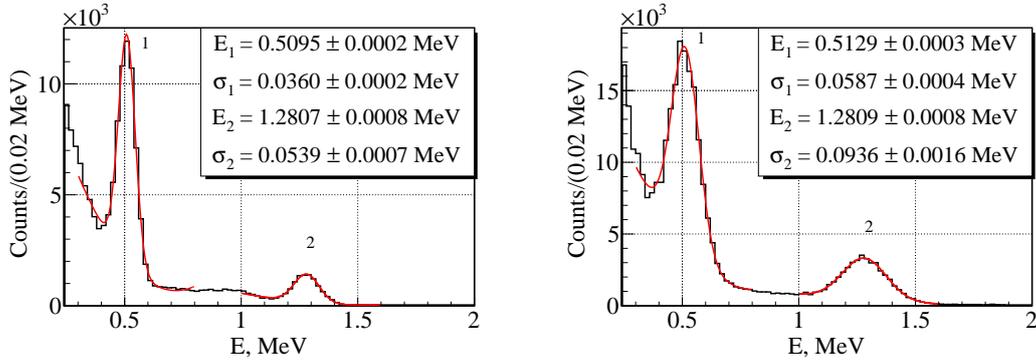


Рис. 3. Энергетические спектры, полученные в ходе калибровки детектора *GNT* с помощью радиоактивного источника  $^{22}\text{Na}$ . Слева изображен спектр, полученный на кристаллах NaI(Tl), справа – на кристаллах BGO. Красными линиями показаны результаты фитирования наблюдаемых в спектрах пиков функциями Гаусса с полиномиальным фоном.

### 3. Набор данных на углеродной мишени

В ноябре 2024 г. была проведена первая экспозиция установки Гиперон+ в полном составе на положительном адронном пучке с импульсом 7 ГэВ/с 18 канала ускорительного комплекса У-70 на углеродной мишени из аморфного графита высокой чистоты. Размер мишени D/L=4/6 см. Для отбора событий использовался триггер на взаимодействие частиц пучка с мишенью:

$$trig = S_1 * S_2 * S_3 * S_5 * \bar{S}_O * \bar{S}_B, \quad (1)$$

см. Рис.1. При этом импульсы со счетчика  $S_A$  подавались для оцифровки на АЦП. Полученные в результате спектры по энергиям зарегистрированных фотонов в счетчиках GNT-спектрометра, просуммированные по счетчикам на основе кристаллов NaI(Tl) и отдельно – кристаллов BGO, показаны на Рис.4. В обоих спектрах наблюдается несколько разных пиков. Для количественного анализа спектры в области пиков были профитированы распределениями Гаусса с полиномиальным фоном. Первый пик на обоих спектрах можно отождествить с пиком от двухфотонной  $e^+e^-$ -аннигиляции.

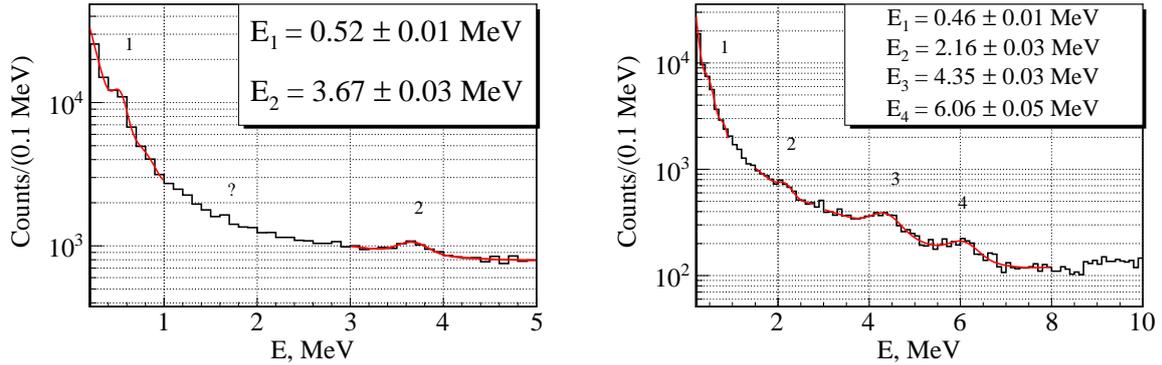


Рис. 4. Энергетические спектры, полученные с GNT-счетчиков на основе кристаллов NaI(Tl) и BGO, при отборе событий адрон-ядерных взаимодействий при импульсе 7 ГэВ/с на углеродной мишени при помощи триггера (1) в эксперименте Гиперон+ в осеннем сеансе 2024 г. Слева изображен спектр, полученный со счетчиков на основе кристаллов NaI(Tl), справа – на основе кристаллов BGO.

Чтобы понять природу других наблюдаемых пиков, надо рассмотреть возможные механизмы взаимодействия частиц пучка с ядрами мишени. Одним из возможных сценариев взаимодействия частиц пучка с ядром мишени является квазиупругое рассеяние, когда налетающий адрон рассеивается на ядре и улетает в переднюю полушферу в системе центра масс реакции, а само ядро переходит в возбуждённое состояние. В этом случае возможным вторичным ядром является первое возбуждённое состояние  $^{12}C(J^P = 2^+, E = 4.4398 \text{ МэВ})$ , см. например, [9], и переход в основное состояние осуществляется за счет излучения фотона с энергией 4.4398 МэВ, который может быть зарегистрирован в кристаллах GNT-счетчиков. Второе возбуждённое состояние имеет уже энергию 7.654 МэВ.

Другим возможным сценарием адрон-ядерных столкновений является неупругое взаимодействие частицы пучка с одним из нуклонов ядра, в результате которого нуклон после взаимодействия покидает ядро. При этом вторичными могут быть состояния  $^{11}C$  и  $^{11}B$ , являющиеся зеркальными ядрами со схожими конфигурациями энергетических уровней. Так, у ядра  $^{11}C$  в интересующей нас области энергий имеются следующие возбуждённые уровни [16]: ( $J^P = 1/2^-, E = 2.0000 \text{ МэВ}$ ), ( $J^P = 5/2^-, E = 4.3188 \text{ МэВ}$ ), ( $J^P = 1/2^+, E = 6.3392 \text{ МэВ}$ ), ( $J^P = 7/2^-, E = 6.4782 \text{ МэВ}$ ) и

другие. Аналогичные уровни есть и у ядра  $^{11}\text{B}$ . Регистрация фотонов соответствующих энергий позволяет идентифицировать образующиеся конкретные возбуждённые состояния ядер, если при этом энергии фотонов измеряются достаточно точно.

Касательно эксперимента Гиперон+ в этой связи следует отметить, что конечный и сравнительно небольшой размер кристаллов GNT-счетчиков с неизбежностью должен приводить к нелинейности энергетической шкалы счетчиков из-за частичного вытекания электромагнитных ливней из кристаллов. Для оценки этих эффектов было проведено детальное Монте-Карло моделирование процессов развития и регистрации фотоных ливней в счетчиках GNT-спектрометра.

#### 4. Монте-Карло моделирование GNT-спектрометра

Монте-Карло моделирование процессов, детектируемых в установке Гиперон+, проводилось с помощью пакетов программ GEANT4 и VMC [10, 11, 12, 13]. Модель установки включала ядерную мишень Т, сцинтилляционные пластины вето-детектора CPV и кристаллы NaI(Tl) и BGO, являющиеся радиаторами счетчиков спектрометра GNT. Моделирование собственно физических событий проводилось при помощи генератора PYTHIA8.3 [14, 15] с добавлением монохроматических фотонов с энергиями 2.0, 4.3 и 6.3 МэВ, соответствующих энергиям гамма-ядерных переходов возбуждённых состояний ядра  $^{11}\text{C}$  [16]:  $1/2^- \rightarrow 3/2^-$  ( $\Delta E = 2.0000$  МэВ),  $1/2^+ \rightarrow 1/2^-$  ( $\Delta E = 4.3392$  МэВ) и  $1/2^+ \rightarrow 3/2^-$  ( $\Delta E = 6.3392$  МэВ). Полученные в результате события типа "коктейль" передавались пакету программ GEANT4 для транспортировки всех вторичных частиц через детекторы установки. Далее для анализа событий использовалась стандартная программа обработки данных эксперимента Гиперон+. Однако здесь надо отметить, что пакет GEANT4 позволяет моделировать только энергию ионизационных потерь в кристаллах спектрометра GNT. Чтобы пересчитать эту энергию в поток сцинтилляционных фотонов, измеряемый в конечном счете в эксперименте, энергия ионизационных потерь корректировалась в соответствии с измеренным разрешением детекторов, полученном ранее при калибровке счетчиков на радиоактивном источнике  $^{22}\text{Na}$ . На Рис. 5 приведены полученные результаты моделирования событий для счетчиков с кристаллами NaI (слева) и BGO (справа) для трех энергий фотонов гамма-ядерных переходов: 2, 4.3 и 6.3 МэВ.

Как видно из Рис.5 МК-спектры с обоих кристаллов становятся заметно более пологими слева от максимума и при этом дополнительно еще сами существенно сдвигаются влево, причем оба эффекта в заметно большей степени проявляются в счетчиках с кристаллами NaI(Tl), сдвигка положения максимума распределения энергии в которых достигает 13%. К тому же, и эффективность детектирования фотонов в счетчиках с NaI(Tl) где-то раза в два меньше, чем у счетчиков с кристаллами BGO. В совокупности все это приводит к тому, что экспериментальные спектры энергий фотонов с кристаллов NaI(Tl) и BGO должны значительно отличаться, что и наблюдается на Рис.4. При этом предпочтение, начиная с энергий фотонов от 1.5 МэВ и выше, следует отдавать данным с кристаллов BGO. Счетчики с кристаллами NaI(Tl) эффективны при энергиях фотонов до 1.5 МэВ за счет более высокого их световых выхода

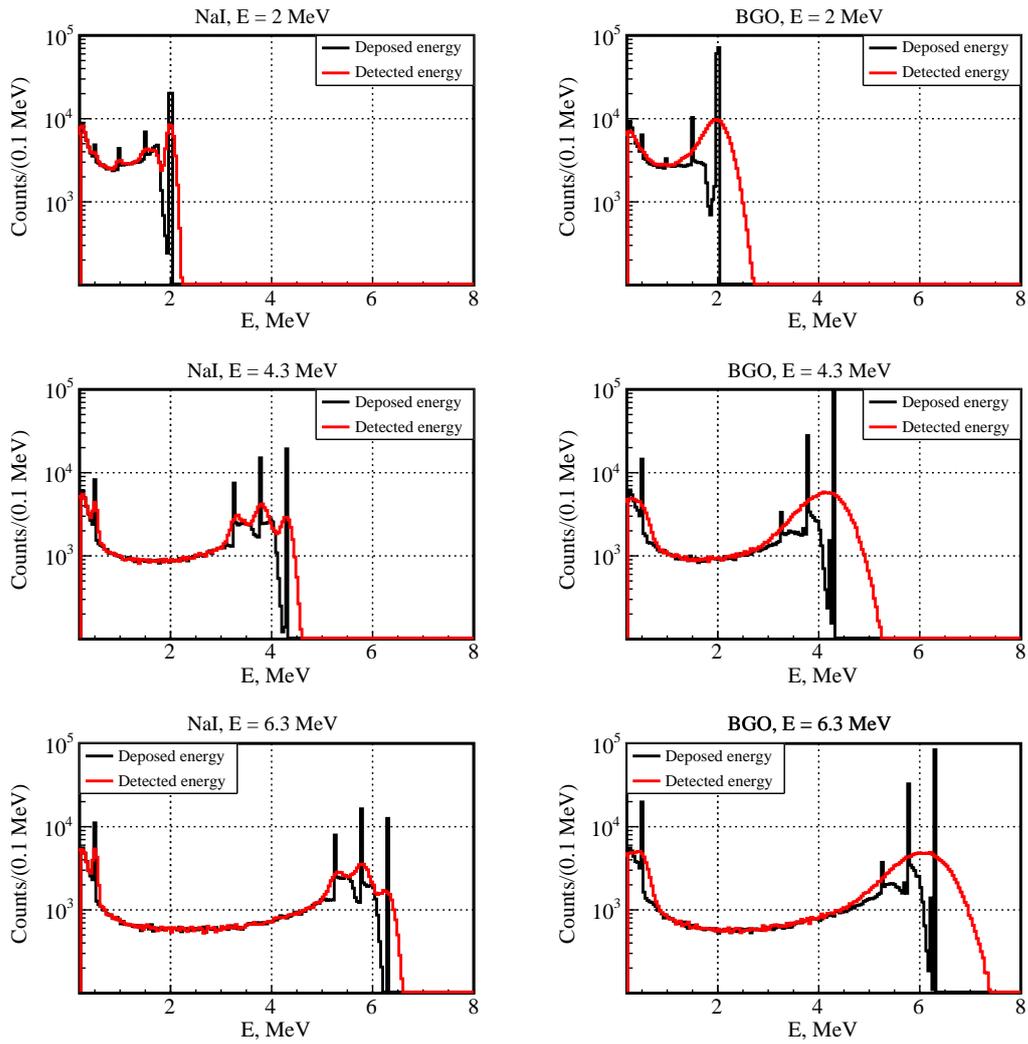


Рис. 5. Монте-Карло моделирование энергетических спектров для GNT-счетчиков с кристаллами NaI(Tl) (слева) и BGO (справа) в событиях с монохроматическими фотонами трех энергий: 2.0 (вверху), 4.3 (по середине) и 6.3 (внизу) МэВ. Черными линиями показаны энергии ионизационных потерь в кристаллах, а красными линиями – измеряемые энергии сцинтилляционных импульсов со счетчиков GNT.

по сравнению с BGO.

Возвращаясь теперь к измеренному спектру энергий фотонов в GNT-счетчиках на основе кристаллов BGO, показанному на Рис.4 справа, можно утверждать, что в спектре наблюдаются четыре пика в области энергий до 10 МэВ. При этом первый пик с энергией  $\approx 0.50$  МэВ следует рассматривать как аппаратный фон, связанный с  $e^+e^-$ -аннигиляцией позитронов, в избытке образующихся адрон-ядерных взаимодействиях при импульсе 7 ГэВ/с. А три других пика, соответствующие энергиям, приблизительно равным 2.16, 4.35 и 6.06 МэВ, можно отождествить с  $\gamma$ -переходами первых трёх возбуждённых состояний ядра  $^{11}\text{C}$  в основное состояние, или с анало-

гичными переходами зеркального ядра  $^{11}\text{B}$ . Для дифференциации  $\gamma$ -переходов ядер  $^{11}\text{C}$  и  $^{11}\text{B}$  требуется существенное повышение статистики эксперимента и тщательное МК-моделирование процессов в счетчиках GNT спектрометра.

## Заключение

В работе представлены результаты первой тестовой экспозиции установки Гиперон+ в полном составе с мишенью  $^{12}\text{C}$  на положительном адронном пучке с импульсом 7 ГэВ/с ускорительного комплекса У-70. Спектрометр гамма-ядерных переходов GNT, предназначенный для регистрации и измерения энергий фотонов МэВ-ного диапазона, был откалиброван в составе установки с помощью  $\beta^+$ -источника  $^{22}\text{Na}$  с триггером от распадного позитрона как заряженной частицы, детектируемой пучковым синтилляционным счетчиком  $S_5$ . В данных экспозиции установки на адронном пучке в энергетическом спектре фотонов со счетчиков спектрометра GNT на основе кристаллов ВГО выделяются три линии  $E \approx 2.0$  МэВ,  $E \approx 4.3$  МэВ и  $E \approx 6.3$  МэВ, которые можно интерпретировать как результат  $\gamma$ -переходов ядра  $^{11}\text{C}$  из первых трех его возбужденных состояний ( $E = 2.0000$  МэВ,  $J^P = 1/2^-$ ), ( $E = 4.3188$  МэВ,  $J^P = 5/2^-$ ) и ( $E = 6.3392$  МэВ,  $J^P = 1/2^+$ ) в основное состояние ядра ( $J^P = 3/2^-$ ) и/или аналогичных  $\gamma$ -переходов возбужденного зеркального ядра  $^{11}\text{B}$ . Этот результат является подтверждением эффективности методики идентификации возбужденных состояний вторичных ядер в эксперименте Гиперон+ методами прецизионной ядерной гамма-спектроскопии. Он открывает широкие перспективы изучения механизмов адрон-ядерных взаимодействий для различных лёгких ядер при промежуточных энергиях.

Данная работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда No 22-12-00095, <https://rscf.ru/project/22-12-00095/>

## Список литературы

- [1] А.М. Горин, С.В. Евдокимов, А.А. Зайцев и др. Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87 (8). С. 1109
- [2] Черный С.А. Физика элементарных частиц и атомного ядра, 1991, Т. 22 №5, С. 1067-1128
- [3] А.А. Асеев, М.Ю. Боголюбский, В.А. Викторов и др. (Коллаборация Гиперон-М), Препринт ИФВЭ 2002-3, Протвино (2002).
- [4] М.Ю. Боголюбский, С.В. Евдокимов, В.И. Изучеев и др. ЯФ, 2013, том 76, No 11, с. 1–15.
- [5] С.В. Евдокимов, В.И. Изучеев, Е.С. Кондратюк и др. Письма ЖЭТФ, 10 марта 2021, том 113, вып. 5, с. 291–298.

- [6] А.М. Горин, С.В. Евдокимов, А.А. Зайцев, и др. Письма ЖЭТФ, Том 118, № 9-10 (11) (2023) с. 629-636
- [7] M. Shamsuzzoha Basunia, Nuclear Data Sheets, Volume 127 (2015) P.69-190
- [8] А.М. Горин, С.В. Евдокимов, А.А. Зайцев и др. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА И ИНЖИНИРИНГ, 2024, том 15, № 6, с. 590–598
- [9] J.L. Groves et al., Phys.Rev.D vol. 15 num. 1 (1977) p. 47-58
- [10] S. Agostinelli et al., Nucl. Instrum. Meth. A 506 (2003) 250-303
- [11] J. Allison et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 53 (2006) 270-278
- [12] J. Allison et al., Nucl. Instrum. Meth. A 835 (2016) 186-22
- [13] I. Hřivnáčová et al., The Virtual MonteCarlo, ECONF C0303241:THJT006,2003; e-Print: cs.SE/0306005
- [14] C. Bierlich, S. Chakraborty, N. Desai, L. Gellersen, I. Helenius, P. Ilten, L.L önnblad, S. Mrenna, S. Prestel and C.T. Preuss, *et al.* “A comprehensive guide to the physics and usage of PYTHIA 8.3,” LU-TP 22-16, MCNET-22-04, FERMILAB-PUB-22-227-SCD, doi:10.21468/SciPostPhysCodeb.8 [arXiv:2203.11601 [hep-ph]].
- [15] T. Sjöstrand et al., Comput. Phys.Commun. 191 (2015) 159 [arXiv:1410.3012 [hep-ph]]
- [16] J.H. Kelley, E. Kwan, J.E. Purcell, C.G. Sheu, H.R. Weller, Nuclear Physics A 880 (2012) P. 88-195

*Рукопись поступила 30 января 2025 г.*

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

А.М. Горин, С.В. Евдокимов, А.А. Зайцев и др.

Наблюдение гамма-ядерных переходов возбуждённых ядер, образующихся в адрон-ядерных взаимодействиях, в эксперименте Гиперон+.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **Л<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X**.

---

Подписано к печати 04.02.2025 Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.  
Печ.л. 1. Уч.-изд.л. 0,9. Тираж 60. Заказ 1. Индекс 3649.

---

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ  
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

[www.ihep.ru](http://www.ihep.ru); библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

---

П Р Е П Р И Н Т 2025–1,  
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2025

---