

## ТРИГГЕРНАЯ СИСТЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА «ГИПЕРНИС»

*А. В. Аверьянов, С. А. Авраменко*, *В. Д. Аксиненко,*  
*А. Н. Баева, С. В. Герценбергер, А. И. Голохвастов*,  
*А. М. Короткова, Д. О. Кривенков*<sup>1</sup>, *Ю. Лукстиньш,*  
*А. И. Максимчук, Е. А. Матюшина, О. В. Охрименко,*  
*Н. Г. Парфенова, С. Н. Пляшкевич, Р. А. Салмин,*  
*Е. А. Строковский, А. А. Фещенко*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Описывается триггерная система спектрометра гиперНИС, предложенная для выделения событий с образованием и последующим распадом релятивистских гиперфрагментов. Работа системы основана на регистрации зарядов гиперфрагмента и дочернего ядра в двухчастичном  $\pi^-$ -мезонном распаде. Отбор событий осуществляется с использованием сцинтилляционных и черенковских счетчиков. Приводятся результаты методических работ по обновлению оборудования и программного обеспечения эксперимента, описываются характеристики триггерных детекторов, и рассматриваются особенности применения триггерной системы в планируемом эксперименте по поиску гиперъядра  ${}^6_{\Lambda}H$ . Проводится оценка ожидаемой эффективности и помехоустойчивости системы отбора событий.

The trigger system of the HyperNIS spectrometer is designed to select events with production and subsequent decay of relativistic hyperfragments. The trigger is based on the feature that in two-body  $\pi^-$ -decays of hypernuclei the charge of the residual nucleus exceeds that of the hypernucleus. The charge of the fragments before and after decay volume is measured by sets of scintillation and Cherenkov counters. A description of the experiment is given with emphasis on the event selection criteria and the parameters of the trigger detectors. Expected performance of the trigger system is discussed in particular with respect to the planned experiment which will search for the hypernucleus  ${}^6_{\Lambda}H$ .

PACS: 21.80.+a; 14.20.Jn; 13.85.-t

### ВВЕДЕНИЕ

Пучки релятивистских ядер, получаемые на нуклотроне ОИЯИ, позволяют изучать образованные в ядро-ядерных взаимодействиях гиперъядра. В других реакциях, в которых исследуются гиперъядра, например во взаимодействиях каонов, пионов или электронов с ядрами мишени, получившиеся в мишени гиперъядра распадаются, что затрудняет измерение времени их жизни. При постановке эксперимента с пучками релятивистских

---

<sup>1</sup>E-mail: krivenkov@ihe.jinr.ru

ионов гиперядра могут образовываться в периферических взаимодействиях в результате коалесценции  $\Lambda$ -гиперона с фрагментом налетающего ядра. При этом импульс получающегося гиперфрагмента в расчете на один нуклон оказывается близким по величине к импульсу ядра-снаряда. При энергиях несколько ГэВ/нуклон время жизни таких релятивистских гиперядер в лабораторной системе отсчета увеличивается в несколько раз, пробеги достигают нескольких десятков сантиметров и значительная доля их распадается за пределами мишени. Это позволяет измерять время жизни гиперядер по пробегу, а также идентифицировать образовавшиеся изотопы гиперядер по импульсу и инвариантной массе продуктов их распада [1].

Однако следует отметить, что организация триггера для регистрации событий с образованием релятивистских гиперфрагментов представляет собой сложную методическую проблему, потому что такие события происходят на фоне значительно более вероятных процессов обычной фрагментации. В Дубне была применена триггерная система, основанная на регистрации двухчастичных  $\pi^-$ -мезонных распадов гиперядер [2]. При таких распадах заряд дочернего ядра превосходит заряд гиперфрагмента, что предопределяет высокую селективность триггера и облегчает идентификацию событий. Важно указать основное ограничение применяемого триггера: поскольку вероятность двухчастичных

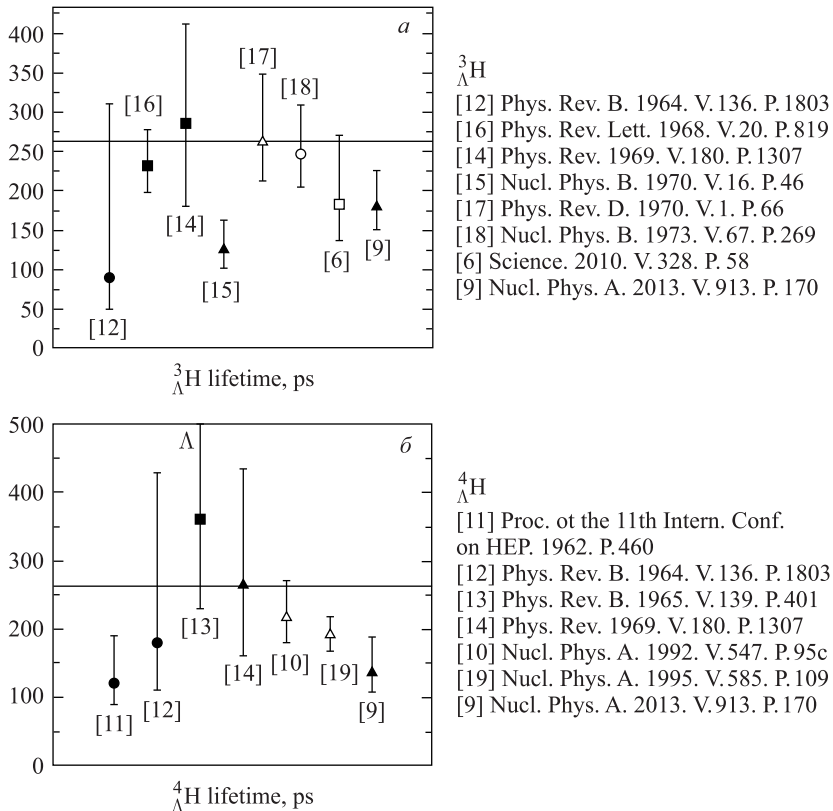
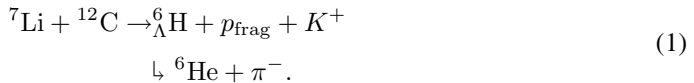


Рис. 1. Мировые данные о времени жизни гиперядер  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  и  ${}^4_{\Lambda}\text{H}$  [3]. Время жизни свободного  $\Lambda$ -гиперона показано сплошной линией

$\pi^-$ -мезонных распадов велика только для самых легких гиперядер, метод становится неэффективным при регистрации более тяжелых гиперфрагментов. Отметим, что изучение процессов образования легких релятивистских гиперядер путем регистрации их двухчастичных распадов было осуществлено и в Дармштадте, однако с другим принципом триггерной системы [3].

Главной задачей проекта «ГиперНИС» в настоящее время является поиск гиперядра  ${}^6_{\Lambda}\text{H}$ , существование которого остается открытым вопросом. В эксперименте FINUDA (Фраскати, Италия) были обнаружены сигналы гиперядер  ${}^6_{\Lambda}\text{H}$  в количестве трех событий [4]. Однако в эксперименте E10 в J-PARC (Япония) по предварительным подсчетам ожидалось обнаружение сигналов об образовании такого гиперядра в количестве не менее 50 событий, но не было обнаружено ни одного [5]. Оба эксперимента имели принципиальные ограничения: не было прямой идентификации (Фраскати) или слишком большой переданный импульс мешал кинематическому анализу (J-PARC). Поиск образования  ${}^6_{\Lambda}\text{H}$  в столкновениях релятивистских ионов поможет прояснить сложившуюся неопределенность.

В эксперименте «ГиперНИС» для такого поиска используется реакция образования  ${}^6_{\Lambda}\text{H}$  с последующим двухчастичным распадом:



Ядро  ${}^7\text{Li}$  с энергией 3,5 ГэВ/нуклон налетает на углеродную мишень. Один протон из ядра лития отрывается, а другой переходит в  $\Lambda$ -гиперон и  $K^+$ , образуя гиперядро  ${}^6_{\Lambda}\text{H}$ . За мишенью установлен вакуумный объем. Чтобы отсечь фон, отбираются только те события, в которых предполагаемая вершина распада на  $\pi^-$ -мезон и  ${}^6\text{He}$  находится в вакуумном объеме.

В этом же эксперименте будет регистрироваться образование  ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ , что позволит уточнить время жизни и сечение рождения этого гиперядра. В настоящее время вырос интерес к проблеме несоответствия времени жизни легких гиперядер и свободных гиперонов. Результатов измерений времени жизни легчайших гиперядер очень мало, и их точность не позволяет сделать надежные выводы (рис. 1).

## 1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема расположения детекторов установки приведена на рис. 2. Сцинтилляционные счетчики так называемой группы М (I) предназначены для мониторинга пучка. Размер области их пересечения ( $10 \times 10$  см) выбран достаточно большим, чтобы гарантированно детектировать все пучковые частицы. Также на одном из мониторинговых счетчиков организована блокировка попадания в установку двух и более частиц, пришедших с разницей во времени меньше 60 нс.

Принцип блокировки показан на рис. 3. Импульсы, приходящие от счетчика блокировки, разделяются на три части, две из которых задерживаются на 20 и 40 нс, после чего все три части складываются и суммарный сигнал подается на вход дифференциального дискриминатора. В случае прохождения в указанном интервале времени двух или большего числа частиц суммарный импульс превышает верхний порог дискриминатора и триггерный сигнал при этом не вырабатывается.

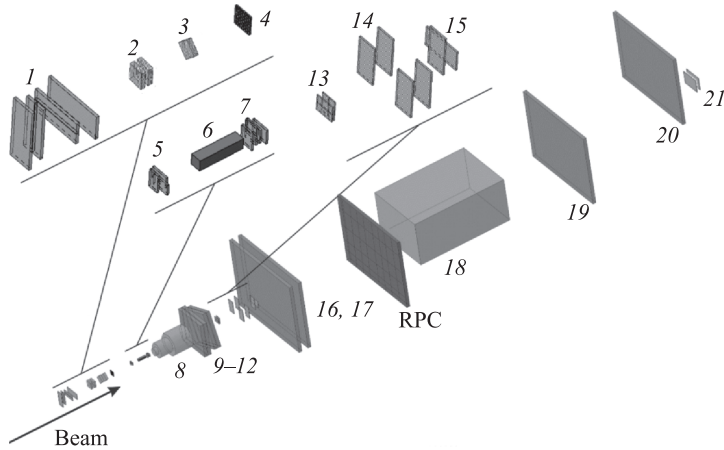


Рис. 2. Схема установки гиперНИС: 1–4 — мониторные и стартовые счетчики; 5, 7, 13, 15, 21 — триггерные счетчики; 6 — углеродная мишень; 8 — вакуумный объем длиной 57 см; 9–12 — пропорциональные камеры (ПК) размером  $40 \times 40$  см на расстоянии 85 см от центра мишени; 14 — калибровочные счетчики; 16, 17 — ПК размером  $90 \times 120$  см на расстоянии 2 м от мишени; 18 — магнит; 19 — ПК размером  $90 \times 120$  см на расстоянии 7 м от мишени; 20 — ПК размером  $90 \times 120$  см на расстоянии 9 м от мишени

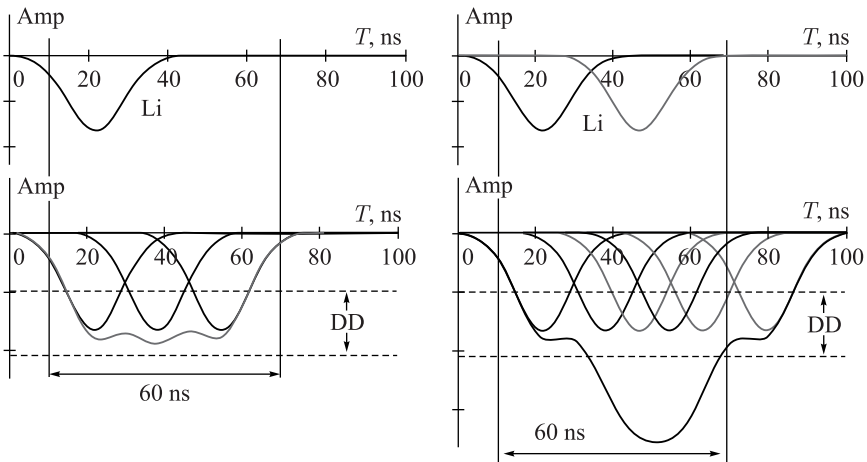


Рис. 3. Временная блокировка двух одновременных частиц. Графики сигналов с мониторных счетчиков соответствуют приходу одной частицы (слева) и двух частиц (справа), а также результату работы системы временной блокировки в каждом из случаев соответственно

Счетчики 2 (см. рис. 2) используются для измерения интенсивности и временной структуры пучка. Эти данные передаются на пульт управления ускорителя. Счетчик 3 вырабатывает стартовый сигнал для времяпролетной системы RPC, расположенной на расстоянии 3,5 м от мишени. В стартовом счетчике используется тонкий сцинтиллятор и четыре быстрых ФЭУ-143, чтобы компенсировать разницу во времени выработки стартового сигнала, зависящую от места попадания частицы в сцинтиллятор. Времяпролетная

система используется для измерения импульсов пионов из распадов гиперядер, что позволяет реконструировать эффективную массу гиперядер. Счетчики 2 и 3 не участвуют в формировании триггерного сигнала. Детектор 4 представляет собой годоскоп, состоящий из восьми горизонтальных и восьми вертикальных узких (шириной 8 мм) сцинтилляторов. Этот годоскоп используется для контроля положения и профиля пучка и при необходимости убирается из пучка для уменьшения фона.

Под номерами 5, 7, 13, 15 и 21 на рис. 2 представлены счетчики так называемых групп А, В, С и D соответственно. Эти группы триггерных счетчиков далее будут описаны более детально. Под номером 6 указана углеродная мишень размером  $3 \times 3 \times 12$  см ( $20 \text{ г/см}^2$ , плотность  $1,7 \text{ г/см}^3$ ). Вакуумный распадный объем 8 начинается на расстоянии 14 см и заканчивается на расстоянии 71 см от мишени. Четыре пропорциональные камеры 9–12 имеют по одной плоскости. Анодные проволочки одной из них ориентированы горизонтально, второй — вертикально, а две другие камеры повернуты в плоскости, перпендикулярной оси пучка, на  $20^\circ$  относительно первых двух камер. Счетчики 14 используются для выделения треков, которые применяются в программе юстировки установки. Эти счетчики снимаются после настройки. Под номерами 16, 17, 19, 20 — пропорциональные камеры, 18 — магнит.

Для рассмотрения счетчиков групп А, В, С и D воспользуемся блок-схемой, представленной на рис. 4. Сигнал от каждого из используемых счетчиков записывается с помощью системы сбора данных и одновременно проходит через дифференциальные дискриминаторы (DD), которые, в свою очередь, пропускают сигналы лишь определенных по величине амплитуд. Так, для счетчиков группы А размером  $45 \times 30$  мм, установленных с таким сдвигом относительно друг друга, чтобы в совпадении выделять область пучка размером  $28 \times 28$  мм. Верхний и нижний пороги дискриминаторов настроены на пропускание сигналов, амплитуда которых соответствует ядру  $Li$ . Пороги дискриминаторов счетчиков групп В выставляются так, чтобы выделять прохождение через эти счетчики только одной или двух однозарядных частиц. Дискриминаторы счетчиков группы С настроены на регистрацию прохождения через эти счетчики ядра  $He$ , а также комби-

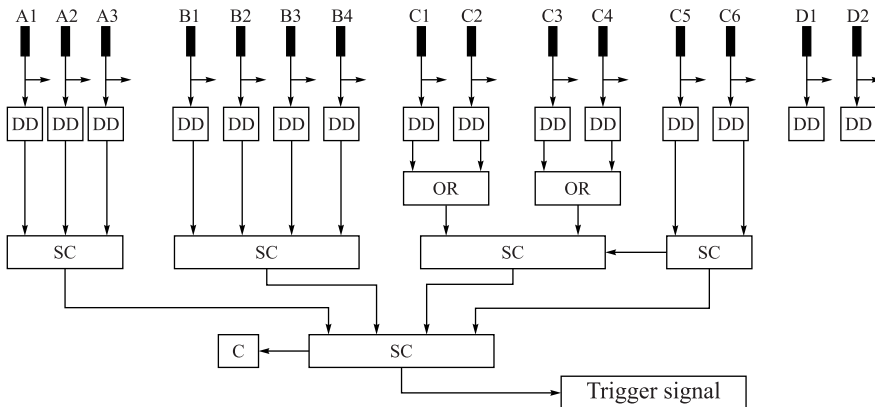


Рис. 4. Схема получения триггерного сигнала: черные прямоугольники — ФЭУ; DD — дифференциальные дискриминаторы; OR — логические сумматоры; SC — схемы совпадений; С — пересчетная схема

нации  $\text{He} + p$  и  $\text{He} + p + \pi$ . Разрешающее время схем совпадений выбирается равным 20 нс. Только в случае совпадения сигналов от всех групп счетчиков с требуемыми условиями вырабатывается триггер и запускается процесс записи данных с электроники пропорциональных камер, RPC и триггерных счетчиков. Количество полезных событий, а также основные отсчеты триггерных детекторов контролируются пересчетными схемами. В частности, записываются счет мониторных счетчиков (числа всех частиц и частиц после фильтра временной блокировкой), число частиц, попадающих в мишень, число отсчетов счетчиков групп В и С.

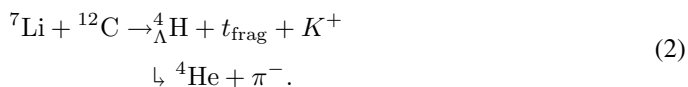
Счетчики С1–С4, обозначенные номером 13, располагаются парами (С1 и С2 расположены горизонтально, С3 и С4 — вертикально), и сигналы каждой из пар счетчиков подаются на логические сумматоры. Это сделано для того, чтобы избежать имитации прохождения через эти счетчики двухзарядной частицы группой однозарядных. В такой постановке всем фоновым частицам надо пройти через ограниченную область в четверть площади, перекрываемой этими сцинтилляторами, чтобы сигнал от них был воспринят как сигнал от одной частицы. Счетчики группы D в триггерную систему не входят и служат для разделения фрагментов  ${}^3\text{H}$  и  ${}^6\text{He}$ .

## 2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ

При анализе данных сначала предполагается отобрать события с топологией, удовлетворяющей распаду гиперядра: трек от фрагмента He должен регистрироваться пропорциональными камерами 9–12, 16–17 и 20, 21, а трек от пиона — камерами 9–12 и 16–17 (см. рис. 2) и при этом проходить в определенном диапазоне углов, разрешенном кинематикой распада. Основную роль в идентификации играет отбор событий с восстановлением вторичной вершины от предполагаемого распада гиперядра (1) в вакуумном объеме, что гарантирует, что вторичная вершина не является результатом взаимодействия вторичных частиц в воздухе. Импульс фрагмента He измеряется по отклонению его трека в магнитном поле, а импульс пиона определяется по времени пролета. Это дает возможность восстановить инвариантную массу пары  ${}^6\text{He} + \pi^-$ .

Описанный триггер позволяет регистрировать события с рождением и распадом любого из изотопов гиперядер водорода —  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ ,  ${}^4_{\Lambda}\text{H}$  и  ${}^6_{\Lambda}\text{H}$ . В силу того, что гиперядра, образующиеся в результате реакции (1), должны иметь почти такую же скорость (в лабораторной системе отсчета), что и ядра  ${}^7\text{Li}$ , падающие на мишень, их импульс в расчете на один нуклон должен быть близок к соответствующему импульсу пучковых ядер 3,5 ГэВ/с на нуклон. Это позволяет достаточно точно разделить изотопы гиперводорода по импульсу дочерних ядер и, следовательно, надежно идентифицировать гиперядро  ${}^6_{\Lambda}\text{H}$ , если оно существует.

Некоторые сложности для однозначной интерпретации события может вызывать процесс распада  ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ , если при его рождении образовался тритий — фрагмент лития:



Отношение заряда к массе у трития, образовавшегося при фрагментации ядра Li в реакции (2), такое же, как у ядра  ${}^6\text{He}$ , которое, в свою очередь, является результатом распада

гиперъядра  ${}^6_{\Lambda}\text{H}$  из реакции (1). Поэтому и ядро  $t$ , и  ${}^6\text{He}$  одинаково отклоняются в магнитном поле. Это может привести к трудностям в идентификации полученного гиперъядра. Как уже отмечалось, для решения этого вопроса используются счетчики группы D, находящиеся за всеми координатными детекторами и регистрирующие амплитуду сигнала прошедшей через них частицы в том месте, где ожидается прохождение ядер  ${}^6\text{He}$  после распада гиперъядра  ${}^6_{\Lambda}\text{H}$ .

Также важно отметить, что процесс образования и распада  ${}^4_{\Lambda}\text{H}$  был изучен [2], поэтому регистрация  ${}^4_{\Lambda}\text{H}$  является надежной проверкой работоспособности спектрометра, а также позволит с большей статистической точностью измерить время жизни этого гиперъядра, что представляет самостоятельный интерес.

### 3. ФОНОВЫЕ СОБЫТИЯ

Мертвое время установки составляет порядка 100 мкс, а ожидаемая интенсивность первичного пучка частиц во время набора статистики достигает величины порядка  $10^5 \text{ c}^{-1}$ . Триггер настраивается на регистрацию рождения и распада гиперъядер водорода так, чтобы сигнал вырабатывался около 100–300 раз в секунду. Тогда мертвое время установки составит примерно 1–3 %, что позволит не пропустить редкий распад и в то же время расширить пороги дифференциальных дискриминаторов на триггерных счетчиках, чтобы повысить эффективность триггера. В предположении, что сечение рождения  ${}^6_{\Lambda}\text{H}$  сопоставимо с сечением рождения  ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ , можно ожидать порядка 100 полезных событий в сутки.

Единственная физическая реакция, которая также удовлетворяет условиям триггера, а именно перезарядка ядра трития в  ${}^3\text{He}$  на выходе из счетчика В4 или на входе в счетчик С1, имеет малое сечение 1,9 мб, поэтому частота таких фоновых событий в среднем не будет превышать одного отсчета за цикл ускорителя. К тому же вторичная вершина в этих событиях находится не в вакуумном объеме, что позволяет исключить их на этапе обработки набранных данных.

Главными источниками фоновых срабатываний триггерной системы являются случаи, когда двухзарядный фрагмент регистрируется счетчиками группы В как однозарядный или, наоборот, несколько однозарядных фрагментов регистрируются счетчиками С1–С6 как ядро гелия. Точность измерения заряда пролетающего иона счетчиками групп В и С определяется флуктуациями ионизационных потерь, однородностью и качеством светосбора, а также нестабильностью ФЭУ. Из-за конечной разрешающей способности детекторов высокая помехоустойчивость триггера достигается за счет частичного уменьшения аппаратной эффективности регистрации исследуемого процесса [6]. Главная задача при настройке — оптимальный выбор порогов дифференциальных дискриминаторов, чтобы получить триггер, который обладает максимальной эффективностью, но в достаточной степени снижает частоту фоновых запусков.

По ранее проведенным сеансам облучения сделаны выводы, что недостаточным амплитудным разрешением счетчиков объясняется только часть фоновых запусков триггера. Другие запуски, возможно, являются результатом случаев, когда однозарядный фрагмент, прошедший счетчики В1–В4, может провзаимодействовать в счетчике С1 с образованием вторичных частиц, которые вызывают во всех счетчиках группы С энерговыделение, соответствующее двухзарядным фрагментам [6]. Использование сегментированных счетчиков, состоящих из пар С1, С2 и С3, С4, помогает решать эту проблему.

Такое попарное включение счетчиков С1, С2 и С3, С4 в триггер позволяет также сократить число фоновых срабатываний триггерной системы от событий с образованием свободных  $\Lambda$ -гиперонов и  $K^0$ -мезонов, когда эти частицы распадаются в вакуумном объеме, а заряженные продукты их распада попадают в счетчики группы С, вызывая в них дополнительную ионизацию по сравнению со счетчиками группы В.

#### 4. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ И ЧЕРЕНКОВСКИЕ СЧЕТЧИКИ

Некоторые характеристики используемых в триггерной системе сцинтилляционных счетчиков приведены в таблице. Во всех счетчиках, кроме счетчиков групп А, В и С, использовались пластиковые сцинтилляторы на основе полистирола. Все счетчики групп А и С сделаны из пластика на основе оргстекла, который обладает меньшим по сравнению с полистиролом световыходом. В настоящее время организуется замена этих счетчиков на их полистирольные аналоги. Счетчики группы В представляют собой черенковские детекторы, использующие радиаторы из кварцевого стекла и фотоумножители фирмы ET Enterprises.

Высоковольтное питание для всех ФЭУ обеспечивается источниками питания WIENER MPOD. Для удобного управления всеми используемыми каналами блоков с высоковольтными источниками (в нашем случае применяются блоки по 16 каналов) было разработано программное обеспечение с графическим интерфейсом.

Для формирования триггерного сигнала используются логические блоки производства ЛВЭ ОИЯИ такие, как формирователи 4Ф-115, дифференциальные дискриминаторы ДД 274, схемы совпадений 2СС-1511, контроллер крейта СРС7 и др. Поскольку официальная поддержка работоспособности этих электронных модулей больше не осу-

Характеристики счетчиков на установке гиперНИС

Счетчик	Размеры, мм	Тип ФЭУ
M1, M2	200 × 90 × 8	ФЭУ-118
A1, A2, A3	30 × 45 × 3	ФЭУ-118
B1, B2, B3, B4	40 × 60 × 3	ET-9107QSB
C1, C2, C3, C4	50 × 75 × 3	ФЭУ-118
C5, C6	100 × 100 × 5	ФЭУ-118
D1, D2	400 × 400 × 20	ET-9813QKSB

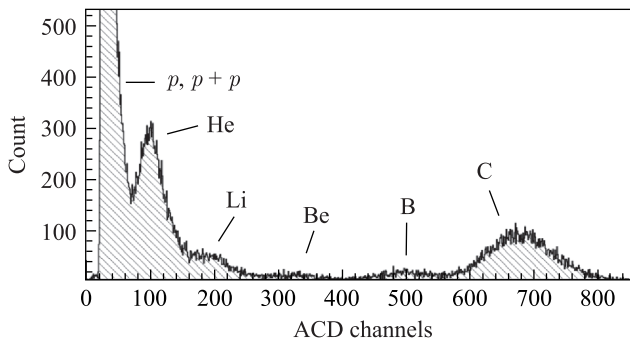


Рис. 5. Пример амплитудного спектра



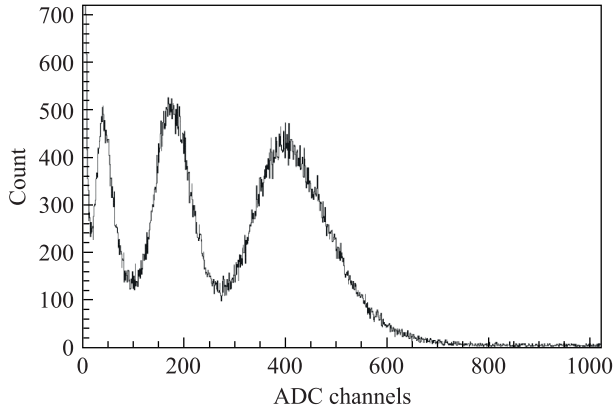


Рис. 6. Амплитудный спектр со счетчика C1, набранный в сеансе с пучком  ${}^7\text{Li}$

ществляется, в эксперименте «ГиперНИС» постепенно производится их замена на блоки фирмы CAEN, обладающие схожим функционалом, такие, как усилители N979, пересчетные схемы N1145, дискриминаторы N845, схемы совпадений N405 и др.

Амплитудное разрешение всех счетчиков триггерной системы измерялось в тестовых сеансах в пучках разных ядер. На рис. 5 приведен пример амплитудного спектра со счетчика D1 (без магнитного поля). Данные набирались на пучке углерода. Перед счетчиком была установлена алюминиевая мишень толщиной 25 мм. На рис. 6 показан амплитудный спектр со счетчика C1, набранный в сеансе с пучком лития.

## 5. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРИГГЕРА

Для оценки аппаратной эффективности триггера применялась простая модель, учитывающая амплитудное разрешение счетчиков групп А, В и С, которые формируют триггерный сигнал. Для этого использовались амплитудные спектры, полученные в тестовом сеансе на пучке углерода на каждом из счетчиков. На рис. 7 для примера приведен амплитудный спектр со счетчика А3, а также модельные функции отклика этого счетчика на прохождение частиц разных зарядов.

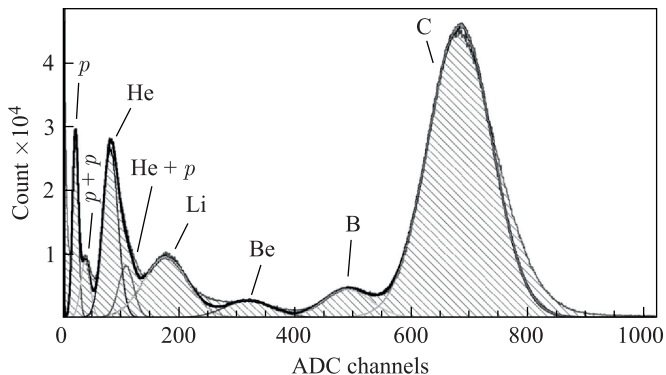


Рис. 7. Амплитудный спектр со счетчика А3 (закрашенное распределение), модельные функции отклика для каждого из зарядов (другие распределения)

В процедуре моделирования отклика сцинтиляционных счетчиков групп А, С и D на прохождение одиночной частицы применялась такая комбинация распределений, когда вклад в разрешение, обусловленный флуктуацией ионизации в сцинтилляторах, описывался распределением Ландау, а дополнительный разброс в амплитуде сигналов, привносимый шумами ФЭУ и электроники, описывался распределением Гаусса. Пики в амплитудном распределении черенковских детекторов группы В описывались распределением Гаусса. Коэффициенты, определяющие относительный вклад каждого из пиков в амплитудном спектре, подбирались такими, чтобы сумма всех модельных данных максимально близко описывала реальный суммарный амплитудный спектр. Такой подход позволял получать отклик каждого из счетчиков на прохождение одиночных частиц с зарядами 1, 2 и 3, а также на комбинации двух частиц  $p + p$  и  $He + p$ . Отклик детекторов на прохождение трех однозарядных частиц определялся из полученного модельного отклика на одну однозарядную частицу: строилось распределение суммы трех амплитуд, случайно разыгранных по однозарядному пику.

Полученные модельные функции отклика для всех счетчиков триггера на прохождение через них разных комбинаций частиц использовались для оценки суммарной эффективности триггера с учетом всех используемых схем совпадения и дифференциальных дискриминаторов (см. рис. 4), настроенных на пропускание определенных значений амплитуд. Условие истинности для триггера будет соответствовать логическому выражению:

$$(A1 \cap A2 \cap A3) \cap (B1 \cap B2 \cap B3 \cap B4) \cap ((C1 \cup C2) \cap (C3 \cup C4)) \cap (C5 \cap C6), \quad (3)$$

где А1–А3, В1–В4, С1–С6 принимают значение логической единицы только тогда, когда сигнал от соответствующих счетчиков прошел через дифференциальный дискриминатор. В случае С1–С4 достаточно, чтобы правильно работал хотя бы один счетчик из каждой пары: С1, С2 и С3, С4.

Существенными для эффективности и помехоустойчивости триггера являются верхние пороги дискриминаторов в счетчиках группы В и нижние пороги в счетчиках группы С. Для оценки эффективности верхний порог каждого из счетчиков группы В выставлялся таким образом, чтобы вероятность их индивидуальных срабатываний на прохождение двухзарядной частицы не превышала 10%. Аналогично нижние пороги счетчиков группы С выбирались такими, чтобы индивидуальное срабатывание групп С1, С2, С3, С4 и С5, С6 при прохождении двух однозарядных частиц не превышало 10%. При таком выборе порогов ожидаемая частота ложных триггеров составит величины порядка 100 Гц.

Моделирование показало, что из  $10^5$  разыгранных событий с рождением и распадом гиперядра  ${}^6_{\Lambda}H$  16,6% будут отброшены, так как моделируемый сигнал в каком-то из счетчиков даст слишком большое или слишком малое значение амплитуды, выходящее за выбранные пороги дифференциальных дискриминаторов. Таким образом, суммарная модельная эффективность триггера составляет 83% при достаточно высоком подавлении фоновых отсчетов. Отметим, что полученная оценка эффективности относится к случаю прохождения через счетчики группы В только двух однозарядных частиц ( ${}^6_{\Lambda}H$  и  $p$ ). В некоторой доле событий в эти счетчики могут также попадать другие частицы, в частности фрагменты мишени или  $K^+$ -мезон, сопровождающий рождение гиперядра. Однако в общем случае следует ожидать вылета  $K^+$ -мезона в широком диапазоне углов, поскольку для образования гиперядра  $\Lambda$ -гиперон должен иметь импульс, близкий к импульсу ну-

клонов снаряда. К тому же образование  ${}^6\text{Li}$  в основном должно происходить в периферических столкновениях, в которых эффективно участвует небольшое число нуклонов снаряда и мишени. Тем не менее в реальном эксперименте планируется выставление порогов счетчиков группы В таким образом, чтобы при достаточном подавлении фона от двухзарядных фрагментов эти счетчики с максимальной эффективностью регистрировали события не только с двумя, но и с тремя однозарядными частицами.

Отдельного рассмотрения заслуживает случай распада ядра  ${}^7\text{Li}$  на три однозарядных фрагмента как наиболее вероятный для появления фонового триггерного сигнала в счетчиках группы С. Допустим, что на мишень падает  $10^5$  ядер  ${}^7\text{Li}$ . Примерно 2/3 из них провазаимодействуют с ядрами мишени. Как показано в работе [7], примерно 10% от всех взаимодействий дадут три однозарядных фрагмента. Достаточное подавление ложных триггеров можно получить, если в каждом из счетчиков группы С нижний порог дискриминатора выставлять так, чтобы считать не более 30% от случаев прохождения через них трех однозарядных частиц. В этом случае можно ожидать, что частота ложных триггеров составит около 200 Гц, что не представляет существенной сложности для системы сбора данных. Детальная оценка эффективности триггера для этого случая не проводилась, поскольку, как уже указывалось, дополнительное подавление фоновых запусков будет происходить в тех случаях, когда три частицы будут разделяться между счетчиками в парах С1, С2 и С3, С4 (такое разделение не включалось в моделирование).

Следует отметить, что в реальном эксперименте фактическая суммарная аппаратурная эффективность счетчиков групп В и С будет оценена с помощью дополнительных измерений, аналогичных описанным в работе [6]. В частности, эффективность регистрации фрагментов He счетчиками группы С может быть измерена с помощью счетчиков В и D, настроенных на выделение двухзарядных фрагментов. Аналогично аппаратурная эффективность счетчиков группы В может быть оценена, если настроить счетчики группы С на выделение однозарядных фрагментов, а между мишенью и счетчиком В1 ввести дополнительный счетчик, также выделяющий случаи прохождения через него группы однозарядных фрагментов. В случае достаточного подавления фоновых отсчетов с помощью счетчиков В2–В4 возможно также исключение из триггера счетчика В1 и использование его в качестве вспомогательного для измерения эффективности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Avramenko S., Aksinenko V., Anikina M., Bannik B., Belikov Yu., Butenko V., Drozdov V., Gajevski K., Galperin A., Glagoleva N., Golokhvastov A., Lovchev K., Kaminsky N., Khorozov S., Khusainov E., Kondratiev V., Kozubsky E., Krasnov L., Kulakov B., Lukstins J., Mandrik O., Matyushin A., Matyushin V., Mirkovski J., Mukhin S., Nikityuk N., Nurgozhin N., Okhrimenko L., Okonov E., Ostanevich T., Pavlovski Z., Piatkovski A., Pol Yu., Radomanov V., Saitov I., Sedikh S., Shevchenko I., Stepanov L., Taran G., Vardenga G., Zavyalov V. A Study of the Production and Lifetime of the Lightest Relativistic Hypernuclei // Nucl. Phys. A. 1992. V. 547. P. 95.
2. Abdurakhimov A. U., Aksinenko V. D., Anikina M. H., Avramenko S. A., Bannik B. P., Butenko V. A., Glagoleva N. S., Golokhvastov A. I., Grachev A. G., Dementiev E. A., Drozdov V. A., Kaminsky N. I., Khorozov S. A., Kirillov A. D., Kozubsky E. V., Kulakov B. A., Kuznetsov A. A., Kuznetsova E. S., Lyuboshitz V. L., Lukstins J. R., Mandrik O. Yu., Maniakov P. K., Matushin A. T., Matushin V. T., Mukhin S. V., Nikityuk N. M., Okhrimenko L. S., Okonov E. O., Ostanevich T. G., Radomanov V. B., Rozhnyatovskaya S. A., Rukoyatkin P. A., Ryakhovsky V. N., Saitov I. S., Sedykh S. A., Svetov A. L.,

- Vardenga G. L., Zavialov V. F., Belikov Yu. A., Kondratiev V. P., Krasnov L. V., Shevchenko I. E., Stepanov I. V., Gaevsky K., Mirkovsky Ya., Pavlovsky Z., Piatkovsky A., Khusainov E. K., Nurgozhin N. N., Pol Yu. S., Taran G. G., Lovchev K. Experimental Study of Relativistic Hypernuclei Using the HYBS-Spectrometer // *Nuovo Cim. A.* 1989. V. 102. P. 645.
3. Rappold C., Kim E., Nakajima D., Saito T. R., Bertini O., Bianchin S., Bozkurt V., Kavatsyuk M., Ma Y., Maas F., Minami S., Özel-Tashenov B., Yoshida K., Achenbach P., Ajimura S., Aumann T., Ayerbe Gayoso C., Bhang H. C., Caesar C., Erturk S., Fukuda T., Göküzüm B., Guliev E., Hiraiwa T., Hoffmann J., Ickert G., Ketenci Z. S., Khanefit D., Kim M., Kim S., Koch K., Kurz N., Le Fuvre A., Mizoi Y., Moritsu M., Nagae T., Nungesser L., Okamura A., Ott W., Pochodzalla J., Sakaguchi A., Sako M., Schmidt C. J., Sekimoto M., Simon H., Sugimura H., Takahashi T., Tambave G. J., Tamura H., Trautmann W., Voltz S., Yokota N., Yoon C. J. Hypernuclear Spectroscopy of Products from  ${}^6\text{Li}$  Projectiles on a Carbon Target at 2A GeV // *Nucl. Phys. A.* 2013. V. 913. P. 170.
  4. Agnello M., Benussi L., Bertani M., Bhang H. C., Bonomi G., Botta E., Bregant M., Bressani T., Bufalino S., Busso L., Calvo D., Camerini P., Dalena B., De Mori F., D'Erasmus G., Fabbri F. L., Feliciello A., Filippi A., Fiore E. M., Fontana A., Fujioka H., Genova P., Gianotti P., Grion N., Lucherini V., Marcello S., Mirfakhrai N., Moia F., Morra O., Nagae T., Ota H., Pantaleo A., Paticchio V., Piano S., Rui R., Simonetti G., Wheadon R., Zenoni A., Gal A. Evidence for Heavy Hyperhydrogen  ${}^6_\Lambda\text{H}$  // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 108. P. 042501.
  5. Sugimura H., Agnello M., Ahn J. K., Ajimura S., Akazawa Y., Amano N., Aoki K., Bhang H. C., Chiga N., Endo M., Evtoukhovitch P., Feliciello A., Fujioka H., Fukuda T., Hasegawa S., Hayakawa S., Honda R., Hosomi K., Hwang S. H., Ichikawa Y., Igarashi Y., Imai K., Ishibashi N., Iwasaki R., Joo C. W., Kiuchi R., Lee J. K., Lee J. Y., Matsuda K., Matsumoto Y., Matsuoka K., Miwa K., Mizoi Y., Moritsu M., Nagae T., Nagamiya S., Nakagawa M., Naruki M., Noumi H., Ota R., Roy B. J., Saha P. K., Sakaguchi A., Sako H., Samanta C., Samoilo V., Sasaki Y., Sato S., Sekimoto M., Shimizu Y., Shiozaki T., Shirotori K., Soyama T., Takahashi T., Takahashi T. N., Tamura H., Tanabe K., Tanaka T., Tanida K., Tokiyasu A. O., Tsamalaidze Z., Ukai M., Yamamoto T. O., Yamamoto Y., Yang S. B., Yoshida K. Search for  ${}^6_\Lambda\text{H}$  Hypernucleus by the  ${}^6\text{Li}(\pi^-, K^+)$  Reaction at  $p_{\pi^-} = 1.2$  GeV/c. arXiv:1310.6104v2[nucl-ex]. 2014.
  6. Беликов Ю. А., Голохвастов А. И., Кондратьев В. П., Краснов Л. В., Лукстиньш Ю., Маньяков П. К., Седых С. А., Степанов И. В., Хорозов С. А., Шевченко И. Е. Триггерная система для регистрации релятивистских гиперядер. Сообщ. ОИЯИ Р1-91-209. Дубна, 1991.
  7. Adamovich M. I., Alexandrov Yu. A., Gerassimov S. G., Dronov V. A., Larionova V. G., Peresadko N. G., Kharlamov S. P. Dissociation of Relativistic  ${}^7\text{Li}$  in Photoemulsion and Structure of  ${}^7\text{Li}$  Nucleus // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2004. V. 30. P. 1479–1485.

Получено 27 февраля 2019 г.