ТРЕХПЛЕЧЕВОЙ СПЕКТРОМЕТЕР SCAN-3 НА ВНУТРЕННИХ МИШЕНЯХ НУКЛОТРОНА

С.В. Афанасьев[a,e], *Ю.С. Анисимов*[a], *В.А. Басков*[b], *Д.К. Дряблов*[a,e,1], *Б.В. Дубинчик*[a], *Ш. Гмуца*[c], *Я. Климан*[c], *Р.Ю. Колесников*[a], *Ю.Ф. Кречетов*[a], *О.В. Кутинова*[a,e], *А.С. Кузнецов*[a], *А.И. Львов*[b], *А.И. Малахов*[a,e], *В. Матеушек*[c], *В.В. Полянский*[b], *Д.Г. Сакулин*[a,e], *С.С. Сидорин*[b], *В.А. Смирнов*[a], *Е.В. Сухов*[a,e], *В.В. Устинов*[a,e], *В. Вартик*[a], *С. Вокал*[d]

[a] Объединенный институт ядерных исследования, Дубна

[b] Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

[c] Институт физики Словацкой академии наук, Братислава, Словакия

[d] Университет Павла Йозефа Шафарика, Факультет естественных наук, Кошице, Словакия

[e] Государственный университет «Дубна», Дубна

Создается новый прецизионный трехплечевой спектрометер SCAN-3 для детектирования заряженных (π, K, p) и нейтральных (n) частиц, образующихся при взаимодействии дейтронного пучка Нуклотрона ЛФВЭ с внутренними мишенями ускорителя. Проект SCAN-3 направлен на изучение сильно возбужденной ядерной материи. Материя будет изучаться путем наблюдения за конкретными продуктами ее распада, то есть парами энергичных частиц с широким углом раскрытия, близким к 180°. В статье обсуждается ход работ по созданию спектрометра.

A new precision three-arm magnetic spectrometer SCAN-3 is being built for detecting charged (π, K, p) and neutral (n) particles produced at the LHEP Nuclotron internal target in dA collisions. This project is aimed at studies of highly excited nuclear matter. The matter will be studied through observation of its particular decay products, that is, pairs of energetic particles with a wide opening angle, close to 180°. The progress of work on the creation of the spectrometer will be discussed.

PACS: 29.30.−h; 21.85.+d

Введение

В ЛФВЭ ОИЯИ создается спектрометер SCAN-3 для поиска и исследования η-мезонных ядер, Δ-изобары, рождающейся в ядрах мишени, исследования парных np и pp корреляций, исследодвания кумулятивных процессов и развала тяжелых ядер на фрагменты низких энергий. Одна из основных целей эксперимента СКАН-3 на внутреннем пучке Нуклотрона направлена на изучение квазисвязанных состояний η-мезона в

[1] E-mail: dryablov@jinr.ru

ядрах. Открытие и исследование η - мезонных связанных систем может дать уникальную возможность для лучшего исследования элементарного мезон - нуклонного взаимодействия в ядерной среде в области низких энергий, улучшило бы наши знания о свойствах нуклонного резонанса N*(1535) и η в ядерной материи. Связанные η - состояния в ядрах чувствительны к ароматическому синглетному компоненту SU(3) и могут быть использованы в качестве теста синглетной по аромату динамики. В общем случае, исследование η – мезонных ядер будет полезно для изучения нарушений киральной и аксиальной U(1) симметрий в низкоэнергетической области КХД [1].

Спектрометер SCAN-3 будет использовать станцию внутренних мишеней ускорителя Нуклотрон с возможностью контролированного ввода различных тонких мишеней в пучок частиц внутри вакуумной камеры. Внутренние мишени начали использоваться еще в 1960-х-1970-х годах на ускорителях высоких энергий в ОИЯИ (г. Дубна) и по всему миру и хорошо себя зарекомендовали, так как имеют ряд преимуществ перед мишенями на выведенных пучках, среди которых можно выделить следующие: 1) возможность в одном цикле ускорения на росте магнитного дипольного поля синхротрона провести исследования с разными энергиями пучка в широком диапазоне; 2) высокая светимость и уровень выхода частиц реакции, который может быть намного больше, чем для случая выведенного пучка и фиксированной мишени; 3) минимизация изменения характеристик продуктов реакции при взаимодействии в тонкой мишени; 4) высокое энергетическое и угловое разрешение из-за минимизации многократного рассеяния в тонкой внутренней мишени и из-за хорошо определенной точки пересечения пучка частиц и мишени; 5) отсутствие фона от контейнера, в котором находится мишень; 6) многократное прохождение пучка через тонкую внутреннюю мишень позволяет уменьшить импульсные нагрузки на детекторы без потери в величине светимости реакции.

Требования для установки

На Нуклоктроне η-ядра планируется продолжить [2] изучать в dA-столкновениях и наблюдать продукты быстрого распада (πN и NN) η-ядер, вызванных внутренними реакциями аннигиляции в покое $\eta N \to \pi N$ и $\eta NN \to NN$. Информацию о связывании η и, в конечном итоге, о низкоэнергетическом взаимодействии ηA можно получить на основе точных измерений энергетических спектров пар ηN и NN, вылетающих под близким к 180° углам в лабораторной системе отчета [3].

Мы исходим из того факта, что точность определени энергии пары частиц от распада η-ядра должна быть не хуже 10 МэВ [4]. Кинетическая энергия и импульс вторичных π и N должны быть равны (если не учитывать влияние связи и ферми-движения): E_π = 313 МэВ, E_N = 94 МэВ, p_π=p_N=431 МэВ/с. Соответственно, проведение эксперимента

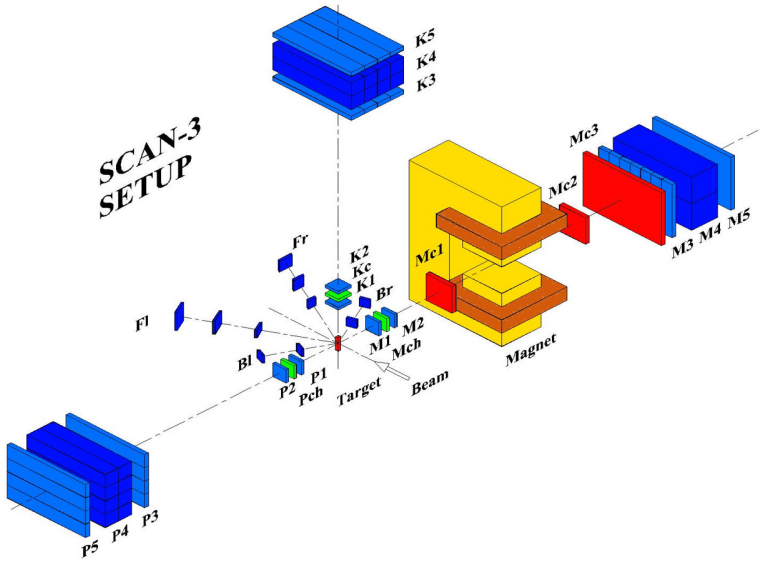


Рис. 1. Схематический вид установки SCAN-3. M1, K1, P1 - стартовые счетчики TOF системы; Mch, Kc, Pch - черенковские детекторы; M2, K2, P2 - вершинные детекторы; Mc1, Mc2 - координатные straw-детекторы; Mc3 - координатная дрейфовая камера; K4, P4 - нейтронные детекторы; M3, P3 - сцинтилляционные детекторы для измерения TOF и ΔE; M5, P5, K5 - сцинтилляционные детекторы быстрых частиц; Magnet - магнит SP-46 с поперечным зазором 100 (вертикаль) x 300 (горизонталь) мм^2 и магнитным полем до 7 кГс.

требует точности измерения кинетических энергий на уровне 1% для пионов и 3% для нуклонов. Для NN пары кинетическая энергия и импульс составляют примерно $E_{N1} = E_{N2} = 273$ МэВ, $p_{N1} = p_{N2} = 767$ МэВ/с. Соответственно, проведение эксперимента на заявленном уровне требует точности измерения кинетических энергий таких нуклонов на уровне 1%.

Схема установки

Для эффективной регистрации продуктов распада η-мезонных ядер и одновременной регистрации фоновых событий установка SCAN-3 (рис. 1) имеет три независимых плеча, расположенных в одной плоскости с мишенью и взаимно перпендикулярных друг другу. Одно плечо выполнено в виде магнитного спектрометра, оптимизированного для регистрации и измерения заряженных частиц - протонов и мезонов. Два других плеча представляют собой безмагнитные сцинтилляционные спектрометры, предназначенные для регистрации протонов и нейтронов. Идентификация и спектрометрия частиц осуществляется путем регистрации времени полета и выделенной энергии в веществе детекторов.

В дополнение к существующим элементам экспериментальной установки [2, 4] были созданы следующие подсистемы: 1) многослойные детекторы нейтронов; 2) передний стартовый счетчик; 3) кремниевый вер-

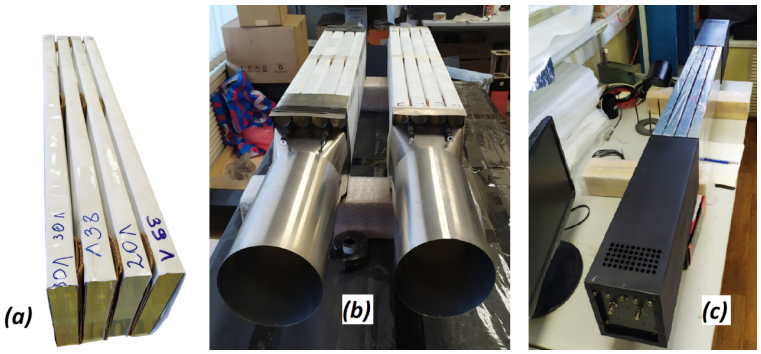


Рис. 2. Стадии изготовления модуля нейтронного детектора: конфигурация сцинтилляторов (a), сборка модуля (b) и компоновка конечного модуля (c)

шинный детектор; 4) дрейфовые камеры трековой системы; 5) система сбора данных на основе VME.

Нейтронный детектор

Нейтронная спектрометрия является главным приоритетом в исследовательской программе проекта SCAN-3. Для достижения требуемой точности измерений энергии нейтронов (в районе 4-5 МэВ) в области энергий 100÷300 МэВ необходимо измерять TOF (δt) нейтронов с точностью не хуже $\delta t = 400$ пс и $\delta L = 8$ см одновременно.

Для решения этой сложной задачи был разработан детектор нейтронов [5], разделенный на 6 независимых модулей. Каждый модуль состоит из четырех сцинтилляционных пластин, собранных в единый блок (рис. 2). Размеры каждой пластины составляют $80 \times 18 \times 3$ см^3. В результате получается нейтронное плечо общей площадью $80{\times}54$ см^2 на базе ToF системы длиной 3,5 м. Сцинтилляционные пластины были выбраны по длине ослабления света и сгруппированы по сходным характеристикам. Регистрация сигналов от сцинтилляторов модуля осуществляется двумя независимыми наборами ФЭУ: 1) два PMT Philips XP2041 или Hamamatsu R1250, расположенных на противоположных концах блоков, обеспечивают одновременное считывание сигналов со всех сцинтилляторо; 2) восемь PMT-87, расположенных на противоположных сторонах каждого сцинтиллятора, обеспечивают считывание оптических сигналов с каждого сцинтиллятора. Это позволяет получать дополнительные и независимые данные от каждого отдельного блока.

Детектор нейтронов был протестирован на космических лучах. Временные спектры разницы поступления сигналов для всех модулей были получены с помощью DRS4 Evaluation board V3. Время прихода сигналов определялось на фиксированном уровне 0,3 высоты импульса. В качестве счетчиков быстрого триггера использовался сцинтиллятор BC-408 размерами $80{\times}25{\times}35$ мм^3 со считыванием ФЭУ Philips XP2972.

Поскольку в модуле производится до 10 независимых измерений времени, то временное разрешение модулей будет определяться количеством

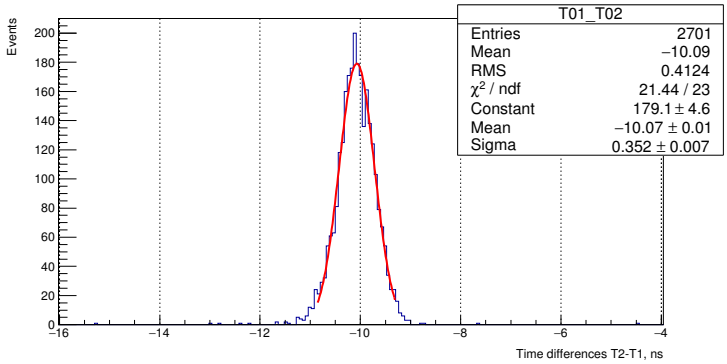


Рис. 3. Пример распределения разницы времени прихода сигналов с нейтронного детектора для случая ФЭУ Hamamatsu

выполненных измерений, т.е. количеством сработавших пластин в модуле. Итоговое временное разрешение модуля определяется как $\sigma_t/\sqrt{n+1}$, где n = 1÷4 – количество сработавших пластин, т.е. тех, информация от которых учитывалась для расчета временного джиттера. В самом худшем случае мы будем иметь $\sigma_t/\sqrt{2}$ и, следовательно, временное разрешение модулей составит около 250÷270 пс для модулей со считыванием Hamamatsu R1250 (рис. 3) и в районе 770÷830 пс для модулей со считыванием Philips XP2041. Временное разрешение, удовлетворяющее поставленной задаче, было получено на примере ФЭУ Hamamatsu и сейчас ведутся работы по улучшению полученных характеристик в случае ФЭУ Philips.

Стартовый детектор

Стартовый детектор - это первый детектор после внутренней мишени. Он должен иметь минимальную толщину и хорошие временные характеристики, так как включен в систему TOF. Детектор (рис. 4) собран на матрице из 8 SiPM и быстродействующем пластическом сцинтилляторе. Для производства тонких сцинтилляционных пластин была применена технология термоформирования для получения сцинтиллятора нужной толщины. Эта технология позволяет получить однородность по толщине на уровне 1% для сцинтилляторов толщиной от 0,5 мм до 1,5 мм. Был разработан и изготовлен быстродействующий предусилитель для матрицы SiPM. Тест этого счетчика показал разрешение по времени не хуже 200пс.

Вершинный детектор

Вершинный кремниевый детектор был разработан и собран для измерения положения точки взаимодействия внутреннего пучка с мишенью. Этот детектор является частью трековой системы установки SCAN и

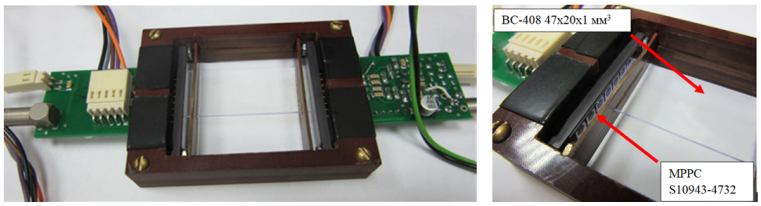


Рис. 4. Внешний вид стартового детектора (слева) и его компонентов (справра)

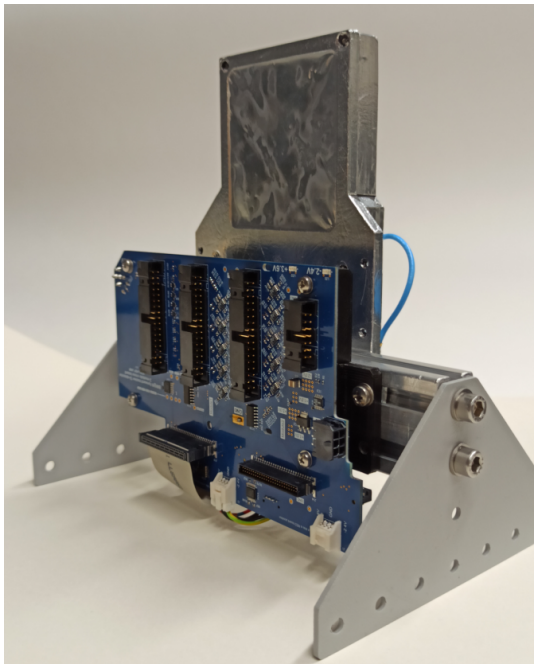


Рис. 5. Первая координатная плоскость, собранная на механической раме.

позволит увеличить пространственное разрешение в два раза. Детектор имеет однокоординатный кремниевый модуль с 640 стрипами. Он собран на механической раме (рис. 5) и помещен в коробку, защищенную от света и электромагнитных помех. Все электрические сигналы – управляющие, информационные, низкого напряжения (LV), смещения детектора (HV) передаются на модули по коротким микрокабелям от кросс-платы. Аналоговые сигналы с выходного чипа передаются по кабелю длиной около 20 м на входы аналого-цифровых преобразователей. Модуль состоит из кремниевого микрополоскового детектора квадратной формы, электронных карт считывания и механической рамы для точного позиционирования модуля, сборки детекторов и карт считывания. Размеры кремниевых детекторов составляют 63 $\times$ 63 мм^2, чувствительная площадь детекторов составляет 61 $\times$ 61 мм^2, а толщина детекторов составляет 300 мкм. Общий темновой ток детекторов составляет $<$ 1 мкА/120 В, полное напряжение разряда составляет 40 В. Каждый детектор имеет 640 стрипов расположенных вертикально с шагом стрипов 95 мкм. Емкость каждой полоски составляет 8 пФ.



Рис. 6. Straw детектор

Straw детекторы

Магнитный спектрометр должен обеспечить точность определения энергии, в первую очередь, π из распада η - ядра не хуже 4-5 МэВ. Трековая система магнитного плеча SCAN-3 кроме вершинного детектора и двухкоординатной пропорциональная камеры (размером 600x200 мм^2) содержит два однокоординатных straw детектора. Каждый детектор состоит из двух наборов 32 дрейфовых трубок диаметром 6 мм, смещенных на радиус и склеенных в единый блок (рис. 6). Эти камеры были протестированы на стенде и сейчас проводится их тестирование в рабочем положении в составе спектрометра.

Для автоматизированной регулируемой подачи смеси газов в straw детекторы была создана панель управления газом, в состав которой входят два баллона с газами Ar и CO_2 высокой чистоты, ротаметры, редукторы с манометрами, два цифровых регулятора расхода газа РРГ-20 с магнитными клапанами фирмы "Элточприбор"(https://eltochpribor.ru) для автоматического регулирования и контроля расхода газа, система автоматического управления по заданной программе смешиванием газов и подачей газовой смеси в рабочую камеру - контроллер КГС-3, два изготовленных в ОИЯИ гидравлических завтора.

Система сбора данных

Система сбора данны была разработана Научно–экспериментальным отделом автоматизации физических исследований ЛФВЭ и построена на платформе VME (https://afi.jinr.ru). Она включает в себя набор модулей, основными из которых являются: контроллер VME - FVME2, триггерный модуль FVME2TM, 16-канальные преобразователи времени (с разрешением 25 пс) и заряда TQDC-16, 64 канальные ВЦП с разрешением 100 пс - TDC64V. Сейчас разрабатываются декодирующие программы для получаемых экспериментальных данных.

Заключение

Вводимый в экслуатацию в районе внутренних мишеней Нуклотрона ЛФВЭ трехплечевой спектрометер SCAN-3 имеет ряд задач по изучению сильно возбужденной ядерной материи. Одной из главных и технически сложных задач является поиск и исследование связанных состояний η-мезона и ядра. Для возможности исследования подобных ядер установка SCAN-3 может регистрировать пары частиц из распада η-ядер по нескольким каналам с разрешением по энергии пары не хуже 10 МэВ.

Первыми основными экспериментальными задачами SCAN-3 являются:
- исследования резонансов $S_{11}(1535)$ и $\Delta(1232)$ в ядерной материи;
- поиск η-ядер и Δ-ядер в dA-столкновениях через узкие резонансные пики в суммарном энергетическом спектре коррелированных пар;
- определение энергий связи и ширин η в ядрах;
- измерения сечения $\sigma_{\eta A}$ образования η-ядер при dA-столкновениях;
- измерения относительных выходов событий π^+p, π^-p, pN.

Список литературы

1. *Bass S.D. and Thomas A.W.* QCD Symmetries in η- and η'-Mesic Nuclein / Acta Physica Polonica. — 2014 — B 45 — P. 627 - 638

2. *Afanasiev S.V. et al.* Search results of η-mesic nuclei in the d + C reaction in JINR / Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)— 2011 — 219-220 — P. 255 - 258

3. *Baskov V.A. et al.* Studies of eta-mesic nuclei at the LPI electron synchrotron — 2012. — arXiv:1212.6313 [nucl-ex]

4. *Afanasiev S.V. et al.* Creation of the precision magnetic spectrometer SCAN-3 // EPJ Web Conf. — 2017. — V. 138 — P. 09002.

5. *Afanasiev S.V. et al.* Upgrade of the SCAN-3 spectriometer at Nuclotron // Phys. Part. Nucl. Lett. — 2023. — V. 20, no. 5. — P. 1232–12351.