

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Представляется работа:

**“Создание спектрометра  $BM@N$  на ускорительном комплексе NICA”**

Раздел: Научно-методические и научно-технические работы

**Коллектив соавторов (все ЛФВЭ):**

1. Базылев С.Н.
2. Замятин Н.И.
3. Капишин М.Н.
4. Кулиш Е.М.
5. Маканькин А.М.
6. Пиядин С.М.
7. Румянцев М.М.
8. Седых С.А.
9. Хабаров С.В.
10. Юревич В.И.

**В представленный цикл работ входят 10 публикаций и докладов на международных конференциях, принятых к публикации:**

1.  $BM@N$  Collaboration. “*The  $BM@N$  spectrometer at the NICA accelerator complex*”, Nucl. Instr. Meth. A 1065 (2024) 169532, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169532>.

2. A. Galavanov, M. Kapishin, V. Karjavine, S. Khabarov, Y. Kirushin, E. Kulish, N. Kuzmin, V. Lenivenko, A. Makankin, A. Maksymchuk, S. Piyadin, V. Plotnikov, M. Rumyantsev, I. Rufanov, V. Sidorenko, S. Vasiliev, A. Vishnevskiy and A. Zinchenko, “*Status of the GEM/CSC tracking system of the  $BM@N$  experiment*”, 2020 *JINST* **15** C09038, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/09/C09038>.

3. S. Vasiliev, A. Galavanov, M. Kapishin, V. Karjavine, E. Kulish, “*Characterization of GEM Detectors in the  $BM@N$  Experiment*”, Phys.Part.Nucl.Lett. 16 (2019) 6, 859-865.

4. A. Galavanov, M. Kapishin, V. Kapisnjak (CERN), V. Karjavine, “*Performance of the  $BM@N$  GEM/CSC tracking system at the Nuclotron beam*”, Contribution to: ISHEPP 2018, EPJ Web Conf. 204 (2019) 07009.

5. A. Galavanov, M. Kapishin, V. Karjavine, S. Khabarov, E. Kulish, V. Lenivenko, A. Makankin, A. Maksymchuk, R. De Oliveira (CERN), S. Piyadin, G. Pokatashkin,

I. Rufanov, and S. Vasiliev, “*Large area BM@N GEM detectors*”, Journal of Physics: Conference Series 1498 (2020) 012043 IOP Publishing, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1498/1/012043>.

6. V. Babkin, S. Basilev, M. Buryakov, V. Golovatyuk, S. Lobastov, V. Petrov, M. Romyantsev, A. Schipunov, A. Shutov, I. Slepnev, V. Slepnev, “*Triple-stack multigap resistive plate chamber with strip readout*”, Nucl. Instr. Meth. A 824 (2016), 490-492, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.11.060>.

7. K. Alishina, V. Plotnikov, L. Kovachev, Yu. Petukhov, M. Romyantsev, “*Charged Particle Identification by the Time-of-Flight Method in the BM@N Experiment*”, contribution to LXX International conference Nucleus-2020, Phys. Part. Nucl. 53 (2022) 2, 470-475, <https://doi.org/10.1134/S106377962202006X>.

8. Yu. A. Topko, S. V. Khabarov, N. I. Zamyatin, B. L. Topko, O. G. Tarasov, E. V. Zubarev, Yu. A. Kopylov and E. A. Streletskaya, “*The Development of Silicon Beam Tracker and Beam Profilometer at the BM@N Experiment*”, Phys. Part. Nuclei 53, 398–402 (2022), <https://doi.org/10.1134/S1063779622020812>.

9. D. Chemezov, M. Kapishin, S. Khabarov, Yu. Kopylov, E. Martovitsky, S. Novozhilov, S. Piyadin, S. Sedykh, E. Streletskaya, O. Tarasov and N. Zamyatin, “*Beam tracker system for the BM@N/NICA experiment*”, contribution to 6th International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP2023).

10. S. Bazylev, P. Grigoriev, M. Kapishin, S. Khabarov, N. Lashmanov, S. Piyadin, V. Rogov, S. Sedykh, S. Sergeev, A. Shchipunov, A. Shutov, O. Tarasov, V. Tikhomirov, A. Timoshenko, V. Velichkov, V. Yurevich and N. Zamyatin, “*Development of the interaction trigger system for study of nucleus–nucleus collisions at BM@N/NICA experiment*”, contribution to 6th International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP2023).

Выдвинутая на конкурс работа отражена в статьях, опубликованных с 2016 г. по 2024 г. в научных журналах и материалах конференций в рамках проекта BM@N по теме 02-1-1065-2007/2026: «Комплекс NICA: создание комплекса ускорителей, коллайдера и экспериментальных установок на встречных и выведенных пучках ионов для изучения плотной барионной материи, спиновой структуры нуклонов и легких ядер, проведения прикладных и инновационных работ».

Одной из важнейших областей исследований, планируемых на строящемся комплексе NICA, является изучение столкновений ядер при энергиях до  $\sqrt{s_{NN}} = 11$  ГэВ с целью определения свойств получающейся сверхплотной ядерной среды, уточнения параметров уравнения состояния ядерной материи и поиска таких критических эффектов, как фазовый переход или образование смешанной фазы.

По времени построения и ввода в эксплуатацию детектор BM@N является первым из трёх крупных детекторов комплекса NICA (BM@N, MPD, SPD). Детектор предназначен для проведения экспериментов с фиксированной мишенью на выведенных пучках Нуклотрона. Программа исследований на BM@N включает в себя проведение серии сеансов с пучками как относительно лёгких (C, Ar, Kr), так и тяжёлых (Xe, Bi) релятивистских ионов с кинетической энергией 1.5-5 ГэВ/нуклон. Детектор представляет собой широко-апертурный магнитный спектрометр, адресующий характерный для данной области физики

круг задач: измерение множественности и спектров частиц, рождающихся в ядро-ядерных взаимодействиях; изучение корреляций частиц и их азимутальных потоков в зависимости от центральности столкновения. Дополнительный интерес представляет измерение сечения образования странных и мульти-странных частиц, выход которых в около-пороговом и подпороговом диапазоне энергий чувствителен к барионной плотности, достигаемой во взаимодействиях.

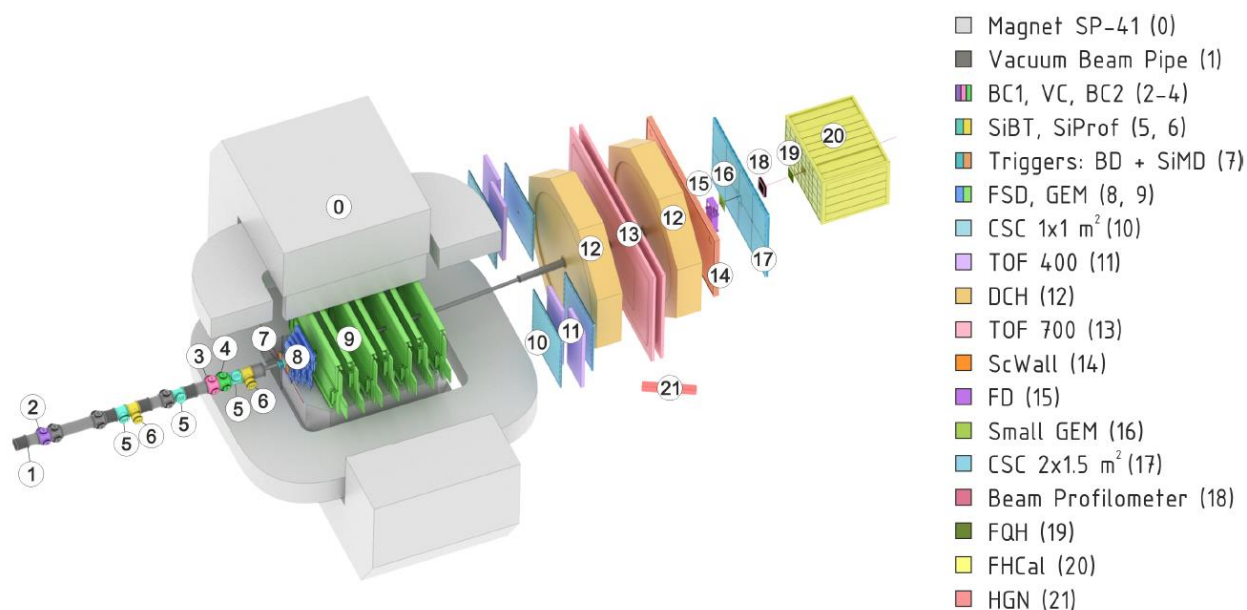
Особенностью проведения экспериментов, исследующих ядро-ядерные столкновения при высоких энергиях, является большая множественность рождающихся частиц и их образование в широком диапазоне по скорости и поперечному импульсу. Это накладывает высокие требования при построении современного многозадачного спектрометра в релятивистской ядерной физике: помимо уже указанной необходимости регистрировать частицы в широком диапазоне импульсов и углов вылета, его трековые подсистемы должны обладать большой гранулярностью, надёжно идентифицировать частицы и с высокой точностью измерять их импульсы в условиях интенсивной загрузки как по частоте взаимодействий, так и по множественности регистрируемых частиц. Детектор также должен иметь возможность охарактеризовать центральность столкновения и плоскость реакции.

Оснащение спектрометра VM@N необходимым набором детекторных подсистем проводилось поэтапно в течение нескольких лет. При этом вводимые в строй детекторы проходили тестовые испытания в ходе методических сеансов на пучках Нуклотрона: в пучках дейтронов в 2016-м году, ионов углерода в 2017-м году, ионов аргона и криптона в 2018-м году. При этом, хотя и в неполной конфигурации детектора, а также с ограниченной статистикой, в сеансах на углероде и аргоне коллаборацией VM@N были получены первые опубликованные физические результаты. Представленные на конкурс публикации описывают работы по созданию и тестированию детекторов, проведённые как в этом подготовительном цикле исследований, так и в период 2018-2023 годов.

К сеансу Нуклотрона 2022-2023 гг., с пучком ядер ксенона, спектрометр VM@N был оснащён практически полным набором всех основных детекторных подсистем и подготовлен к экспериментам с тяжёлыми ионами. В декабре 2022 - январе 2023 г. на установке был проведён физический сеанс, в ходе которого было набрано более 500 млн событий с центральными и полу-центральными взаимодействиями Xe+CsI при кинетической энергии пучка 3.8 ГэВ на нуклон и около 50 млн событий при энергии пучка 3.0 ГэВ на нуклон. Все подсистемы детектора отработали на требуемом уровне, что фактически обозначило завершение создания спектрометра и полноценное введение установки в эксплуатационный режим. В настоящий момент проводится анализ набранных данных, предварительные результаты представлены на международных конференциях и готовятся к публикации.

С учетом успешной подготовки детектора к экспериментам с тяжёлыми ядрами и ожидаемого большого числа значимых физических результатов по результатам проведённого сеанса, коллаборацией VM@N было принято решение представить в единой статье развёрнутое техническое описание спектрометра, его основных подсистем и ключевых элементов. Эта статья опубликована в журнале Nuclear Instruments and Methods в августе 2024 г. С учетом большого размера этой статьи ниже указываются ссылки на её разделы.

## Научно-методические работы, проведённые в рамках представленного цикла:



### 1. Разработка элементов и создание вакуумного канала транспортировки пучка в зоне VM@N ([1] глава 2.2).

Опыт работы в тестовом сеансе 2018 г. с ускоренными ядрами Ar, Kr показал необходимость создания вакуумного канала не только на участке транспортировки пучка между Нуклотроном и VM@N, но и непосредственно в зоне самого эксперимента, включая участок прохождения пучка через мишень, анализирующий магнит и трековые системы спектрометра. В зоне трековых систем выбор материала и конструкции элементов ионопровода осуществлялся с учетом требования минимизировать дополнительное вещество, вносимое вакуумным каналом. Уровень вакуума, поддерживаемого в ходе эксперимента, составляет  $10^{-4}$  Торр.

#### 1.1 Вакуумный ионопровод до мишени.

На участке до мишени внутри вакуумного канала размещаются только принципиально важные элементы: сцинтилляторы триггерных счетчиков пучка BC1, BC2, VC, а также три плоскости кремниевых детекторов трековой системы пучка (SiBT). Для этих детекторов разработаны и изготовлены вакуумные секции. Фотоумножители счетчиков пучка, а также электроника детекторов SiBT размещены вне вакуума на фланцах вакуумных секций, что обеспечивает доступ для проведения работ с ними без нарушения вакуума. Помимо детекторов SiBT для настройки фокусировки пучка могут использоваться два профилометра пучка. Профилометры имеют автономную систему считывания, независимую от основной системы сбора данных эксперимента, и используются на этапе настройки пучка. В периоды набора физических данных детекторы профилометров выводятся из пучка, для чего разработана и создана система дистанционного управления перемещением детекторов профилометров. Большинство элементов вакуумного канала до мишени выполнены из нержавеющей стали, а те из них, что расположены в магнитном поле – из алюминия.

## **1.2 Вакуумный ионопровод на участках центральной и внешней трековых систем.**

Поскольку внутри анализирующего магнита важно минимизировать количество вещества на пути частиц, образованных во взаимодействии пучкового иона в мишени, элементы вакуумной трубы на этом участке изготовлены из тонкого углепластика с толщиной стенок около 1 мм. Чтобы учесть изгиб траектории пучковых частиц в магнитном поле, труба из углепластика выполнена из четырех сегментов, скреплённых специально разработанными тонкими углепластиковыми соединителями. Общая длина этого участка ионопровода составляет около 4.7 м. Последняя часть вакуумного канала проходит после анализирующего магнита через детекторы внешней трековой системы. Этот участок выполнен из трех алюминиевых цилиндрических сегментов с общей длиной 3.2 м, диаметром 125 мм и с толщиной стенок 1.5 мм. Замыкает вакуумный канал титановая мембрана толщиной в 100 мкм.

## **1.3 Узел со сменными мишенями в вакуумном канале ([1] глава 2.3).**

Мишенная зона была спроектирована с учетом необходимости размещения мишеней в вакуумном объеме. При этом конструкция поддержки мишеней выполнена из легких материалов. Специально разработанный мишенный узел позволяет дистанционно осуществлять выбор одной из набора четырёх мишеней и управлять вводом мишени в пучок и выводом из него. Расположение мишенного узла в магнитном поле потребовало разработку и изготовление его элементов из немагнитных материалов.

## **2. Разработка и создание трековой системы пучка ([1] глава 4, [8],[9]).**

Пучковая трековая система, созданная на основе кремниевых детекторов (Silicon Beam Tracker, SiBT) позволяет как мониторировать профиль пучка в ходе набора статистики, так и определять в каждом событии координаты и углы влёта пучкового иона в мишень. Каждая из трёх плоскостей SiBT представляет собой двусторонний кремниевый стриповый детектор с размерами  $63 \times 63 \times 0.175 \text{ mm}^3$ . Стрипы на p+ и n+ сторонах ориентированы перпендикулярно друг другу. Число стрипов на каждой стороне составляет 128, при этом шаг между стрипами равен 470 мкм. Разработанная система крепления и позиционирования детекторов на канале пучка позволяет контролировать их положение по отношению к оси пучка с точностью 5 мкм.

Разработана в VM@N и испытана в сеансе 2023 года электроника считывания, созданная на базе микросхемы VATA64HDR16.2 (IDEAS, Норвегия) с мультиплексированием на 64 канала. Выбор этой микросхемы сделан с учетом большого динамического диапазона для входных импульсов (от -20 до +50 пкКл), что соответствует уровню сигналов при работе с пучками тяжелых ионов.

Измерена и проанализирована степень радиационных повреждений детекторов, накопленных за время использования SiBT в ходе методического и физического сеансов в декабре 2022 и январе 2023 гг. Продемонстрирована возможность дальнейшего использования кремниевых детекторов в будущих сеансах без замены.

### 3. Создание системы быстрого триггера на взаимодействие ядер.

Триггерная система включает триггерные детекторы и модули быстрой электроники, в которых реализована логика выработки сигнала на запись события.

#### 3.1 Триггерные детекторы ([1] глава 3, [10]).

Разработанная для программы исследований с тяжелыми ионами детекторная триггерная система VM@N включает в себя пучковые счетчики (BC1, BC2, VC), детекторы множественности вторичных частиц в мишенной зоне (BD и SiMD), детектор фрагментов налетающего ядра (FD).

Конструкции пучковых сцинтилляционных счетчиков были разработаны с учетом требований использовать максимально тонкие сцинтилляторы (250 и 150 мкм для BC1 и BC2 соответственно) и располагать их в вакуумном ионопроводе. В качестве ФЭУ были выбраны Hamamatsu R2490-07 (ФЭУ с сеточными динодами) и Photonis XPM85112/A1 Q400 (ФЭУ на микроканальных пластинах), обладающие хорошими временными характеристиками и способными работать в магнитном поле. Амплитудное разрешение счетчиков BC1 и BC2, полученное для сигналов от прохождения ионов Xe составило  $\sigma = 4.8\%$  и  $\sigma = 7.1\%$  соответственно. Оба счетчика продемонстрировали высокое временное разрешение на уровне  $\sigma = 40$  пс, что позволяет получить от системы двух счетчиков стартовое время для времяпролетной системы с  $\sigma = 30$  пс.

Триггерный детектор фрагментов FD расположен ниже по пучку после мишени, сразу за вакуумным ионопроводом. Амплитуда сигнала FD используется в логике триггера на взаимодействие: эта амплитуда должна быть ниже уровня, характерного для прохождения через детектор иона пучка. В сеансе 2023 года с пучком Xe в качестве радиатора в FD использовался сцинтиллятор толщиной 0.5 мм, при этом амплитудное разрешение для пика Xe составило  $\sigma = 5.2\%$ .

Сцинтилляционный детектор множественности (Barrel Detector, BD) окружает мишень и регистрирует вторичные частицы, образующиеся в ядро-ядерных взаимодействиях в мишени. BD состоит из 40 стрипов длиной 15 см, просматриваемых с одного торца кремниевыми фотоумножителями. Помимо частиц от ядерного взаимодействия в стрипы BD могут попадать  $\delta$ -электроны, образующиеся при прохождении пучкового ядра через мишень. Для подавления фона  $\delta$ -электронов были рассчитаны и изготовлены свинцовые экраны, толщина и расположение которых определялись по результатам моделирования.

Кремниевый детектор множественности (SiMD), перекрывающий область малых углов, имеет гранулярность 64 канала и толщину 300 мкм. Детектор был спроектирован, изготовлен и протестирован в сеансе 2023 года. При наборе физических данных использовался только детектор BD, которого оказалось достаточно для выработки эффективного триггера на взаимодействия Xe+CsI. Однако добавление в систему информации с SiMD для увеличения эффективности триггера может оказаться предпочтительным в экспериментах с более лёгкими ядрами.

#### 3.2 Электроника триггерной системы ([1] главы 9.1-9.3. [10]).

Были разработаны и реализованы концепция, электроника и интерфейс триггера. Логика отбора событий для записи предусматривает использование нескольких физических

триггеров, в том числе с выбором разного уровня центральности ядро-ядерных столкновений, а именно,

$$\text{Beam Trigger: } BT = BC1 \times BC2 \times VC (\text{veto})$$

$$\text{Minimum Bias Trigger: } MBT = BT \times FD (\text{veto})$$

$$\text{Central Collisions Trigger: } CCT = MBT \times BD (>N)$$

Выработка физических триггеров осуществляется в специально разработанном электронном модуле, в котором используются электронные схемы программируемой логики FPGA и созданный программный интерфейс.

Помимо модуля выработки физических триггеров общая архитектура триггерной электроники включает в себя модули, в которых реализованы триггерные задачи последующих уровней: осуществляется смешивание нескольких типов триггеров с выставлением для каждого из них желаемого коэффициента кратности (подавления); вырабатывается запрет на запись события в случае прохождения двух близких по времени пучковых ионов; формируются триггерные сигналы более высокого уровня (L1, L2) и осуществляется обмен триггерными сигналами с front-end электроникой детекторных систем.

#### **4. Измерение карты поля анализирующего магнита ([1] глава 2.4).**

В качестве анализирующего магнита в эксперименте используется широко-апертурный дипольный магнит СП-41 с максимальным значением магнитного поля в центре магнита 1 Тл при токе в магните 1900А и апертурой  $200 \times 100 \text{ см}^2$ . В 2022 г. было проведено повторное измерение карты магнитного поля с бóльшим охватом краев поля за пределами полюсов магнита и с более мелким шагом ( $2.4 \times 2.0 \times 2.5 \text{ см}^3$ ) по координатам X,Y,Z. Измерения были проведены для четырёх значений тока в магните: 900, 1300, 1600 и 1900 А.

#### **5. Расширение комплектации центральной трековой системы.**

Трековые детекторы спектрометра разделяются на две группы: центральную трековую систему, детекторы которой расположены внутри анализирующего магнита, и внешнюю трековую систему, состоящую из детекторов, размещённых вне анализирующего магнита, ниже по пучку. В конфигурации 2022-2023 гг. центральная трековая система была сформирована из четырёх плоскостей переднего кремниевого детектора (Forward Silicon Detector, FSD), размещённых непосредственно за мишенью, и последующих семи плоскостей детекторов на основе газовых электронных умножителей (Gas Electron Multipliers, GEM). Каждая из трековых плоскостей FSD и детекторов GEM разделена на верхнюю и нижнюю части для облегчения монтажа с учётом вакуумной трубы, проходящей внутри анализирующего магнита вдоль оси пучка.

##### **5.1 Подготовка и включение в установку четырёх плоскостей FSD ([1] глава 5.1).**

Конструктивно FSD состоит из 48 модулей на основе двусторонних кремниевых стриповых детекторов с размерами  $63 \times 63 \times 0.32 \text{ мм}^3$  и  $93 \times 63 \times 0.32 \text{ мм}^3$ , и шагом стрипов 95 мкм и 103 мкм на p+ и n+ сторонах модулей соответственно. Стрипы p+ стороны расположены вертикально, угол наклона стрипов n+ стороны по отношению к вертикали составляет 2.5 градуса. Общее число считываемых каналов FSD составляет 61440. Разработанная в

BM@N front-end электроника для считывания сигналов FSD детекторов использует микросхему VATAGP 7.1 (IDEAS, Норвегия) с мультиплексированием на 128 каналов.

## **5.2 Завершение комплектации центральной трековой системы детекторами GEM ([1] глава 5.2, [2]-[5]).**

После сеанса 2018 г. на пучке аргона и криптона, в котором была испытана первая очередь центрального трекера из семи GEM-детекторов, создание GEM-трекера было продолжено. К сеансу 2022-2023 гг. с пучком ксенона детекторы GEM были подготовлены в полной комплектации. Детекторы изготавливались в ЦЕРН с непосредственным участием сотрудников ОИЯИ. Плоскости системы GEM составлены из 7 верхних и 7 нижних детекторов, с поперечными размерами  $163 \times 45 \text{ см}^2$  и  $163 \times 39 \text{ см}^2$ , выбранными для оптимального заполнения внутреннего пространства анализирующего магнита с условием максимального увеличения акцептанса для вторичных частиц. На момент изготовления GEM-детекторы BM@N были самыми большими детекторами этого типа в мире. Детекторы имеют три усилительных каскада, каждый из которых представляет собой каптоновую плёнку толщиной 50 мкм, покрытую с обеих сторон медью толщиной 5 мкм, с регулярной структурой отверстий с диаметром 70 мкм и шагом 140 мкм. Считывание сигналов осуществляется с анодной плоскости, представляющей собой многослойную печатную плату с двумя слоями параллельных стрипов с углами наклона по отношению к вертикали 0 и 15 градусов и шагом между стрипами 800 мкм. Общее число считываемых каналов детекторов GEM составляет 87157. Разработанная в BM@N front-end электроника для считывания сигналов GEM детекторов использует микросхему VA163 (IDEAS, Норвегия) с мультиплексированием на 32 канала.

## **6. Создание, интеграция в спектрометр и проверка работы в физическом сеансе время-пролётных систем TOF400 и TOF700 ([1] глава 6, [6]-[7]).**

Для идентификации заряженных частиц по времени пролёта в спектрометре BM@N используются две системы, TOF400 и TOF700, расположенные на расстоянии примерно в 4 и 7 м от мишени соответственно. Обе системы собраны из детекторов, представляющих собой многозачорные резистивные плоские камеры с падовым считыванием (Multigar Resistive Plate Chambers, MRPC). Этот тип детекторов широко используется в современных системах, измеряющих время пролёта, поскольку характеризуется высоким временным разрешением и хорошей эффективностью, а также позволяет получить желаемую сегментацию и работать в потоках частиц с интенсивностью на уровне  $\sim 10^4 \text{ Гц/см}^2$ , что более чем на порядок величины превышает ожидаемый поток частиц в BM@N.

Электроды для считывания представляют собой печатные платы со стрипами, размеры которых выбирались, исходя из ожидаемой множественности частиц в столкновениях тяжелых ядер в зоне расположения детекторов. Сигналы считываются с обоих концов стрипа. Front-end электроника для обеих времяпролетных систем основана на микросхеме NINO (разработка и изготовление ЦЕРН), реализующей точную привязку фронта выходного LVDS сигнала ко времени входного и “time-over-threshold” метод, в котором длительность выходного сигнала пропорциональна амплитуде входного. Считывание выходных сигналов осуществляется с использованием модулей электроники TDC64VHLE (TOF700) и TDC72VHL (TOF400), созданных в ЛФВЭ ОИЯИ на базе микросхемы HPTDC, разработанной в ЦЕРН. Детекторы системы TOF400 изготовлены в ЛФВЭ ОИЯИ, а



TOF700 – в СНЭО ОИЯИ с участием сотрудников ИФВЭ (г. Протвино). В проведенном физическом сеансе в обеих системах использовалась одинаковая газовая смесь, которая подавалась с помощью специально разработанной газовой системы, параметры которой контролировались в ходе сеанса.

В системе TOF400 используются два плеча, правое и левое по отношению к пучку, в каждом из которых сборки детекторов перекрывают активную зону с поперечными размерами  $1.1 \times 1.3 \text{ м}^2$ . Общее число каналов считывания составляет 1920. Проведённые испытания прототипов TOF400 продемонстрировали возможность получить временное разрешение на уровне 50 пс при эффективности регистрации превышающей 95%.

В системе TOF700 детекторы MRPC собраны в единую стенку, перекрывающую в плоскости XY площадь с размерами  $3.1 \times 2.0 \text{ м}^2$ , и имеющую в центре отверстие для вакуумного ионопровода пучка. Общее число каналов считывания составляет 3520, типичное разрешение составляет 60 пс.

## **7. Расширение конфигурации внешней трековой системы катодно-стриповыми камерами ([1] глава 7, [2],[4]).**

Во внешней трековой системе в сеансе 2023 Хе использовались газовые координатные системы двух типов: две широко-апертурные дрейфовые камеры (DCH) и пять катодно-стриповых камер (CSC), четыре малых и одна большая. DCH уже проходили тестирование и активно использовались в предыдущих методических сеансах с ядрами C, Ar, Kr. Однако в экспериментах с наиболее тяжелыми ионами (Au, Bi) ожидаемая пространственная плотность частиц во внешней трековой системе слишком высока для эффективного восстановления треков с помощью DCH, поэтому осуществляется их замена на две большие CSC, первая из которых была изготовлена к сеансу 2023 года и протестирована в нем. Чувствительная область малых CSC имеет поперечные размеры  $113 \times 107 \text{ см}^2$ . Расположение этих камер выбрано для облегчения привязки треков заряженных частиц, восстановленных в центральной трековой системе, с отсчетами во времяпролетной системе TOF400. Чувствительная зона больших CSC имеет поперечные размеры  $219 \times 145 \text{ см}^2$ , в центре камер сделано отверстие для прохождения вакуумного ионопровода. Разработанная для считывания сигналов CSC front-end электроника использует ту же микросхему VA163, что и электроника детекторов GEM. В полной конфигурации шесть детекторов CSC будут иметь приблизительно 30100 каналов считывания.

## **8. Оснащение спектрометра детекторами FHCaI, ScWall, FQH ([1] глава 8).**

Конфигурацию детекторных подсистем BM@N замыкают передние детекторы, расположенные после внешней трековой системы под малыми углами к пучку в 9 метрах от мишени: передний адронный калориметр FHCaI, сцинтилляционная стенка ScWall и пучковый кварцевый годоскоп FQH. Эти детекторы предназначены для регистрации фрагментов ядра снаряда, а также используются для определения центральности столкновения и ориентации плоскости реакции. Эти три подсистемы созданы группой ИЯИ (г.Троицк). Сотрудниками ОИЯИ осуществлены работы по полной интеграции этих детекторов в спектрометр BM@N. В частности, разработаны и созданы конструкции подвески и размещения детекторов в экспериментальной зоне BM@N; проведено подключение front-end электроники к общей системе сбора данных; реализовано оснащение детекторов модулями оцифровки сигналов ADC64s2, разработанных и изготовленных в

ЛФВЭ ОИЯИ; организовано считывание данных с этих детекторов и включение этих детекторных систем в общую систему мониторинга и контроля.

#### **9. Создание системы сбора данных и системы медленного контроля ([1] главы 9.4-9.5, 10).**

Были изготовлены и подключены к front-end электронике всех детекторных подсистем ВМ@N необходимые для их считывания модули ADC и TDC. Для синхронизации считывания временной информации используется система White Rabbit. Разработанная и реализованная архитектура системы сбора данных, включающая серверы, осуществляющие передачу данных по сети, и дисковую систему для сохранения данных в ходе набора статистики, продемонстрировала бесперебойную работу в течение нескольких методических и первого физического сеансов. Разработана и реализована система медленного контроля параметров установки, к которой подключены все детекторные подсистемы эксперимента.

**Таким образом, был создан спектрометр ВМ@N в конфигурации, позволившей провести первый физический сеанс на пучке ядер Хе с энергиями 3.8 ГэВ/нуклон и 3.0 ГэВ/нуклон на фиксированной мишени CsI, в ходе которого набраны экспериментальные данные с высокой статистикой. Все детекторные подсистемы продемонстрировали соответствие проектным параметрам. Развернутое описание спектрометра с техническими деталями о всех основных подсистемах ВМ@N представлено в большой статье, опубликованной в журнале Nuclear Instruments and Methods.**

Председатель НТС ЛФВЭ

Е.А.Строковский

Ученый секретарь НТС ЛФВЭ

С.П.Мерц