

## Проект NA61-SHINE

### Изучение образования адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях в CERN SPS (SHINE – SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment) (Участие ОИЯИ)

Шифр темы: 02-1-1087-2009/2023

Тема: Исследования по физике релятивистских тяжелых и легких ионов на ускорительных комплексах НУКЛОТРОН/НИКА ОИЯИ и СПС ЦЕРН.

Б.Баатар<sup>a</sup>, В.А.Бабкин<sup>b</sup>, М.Богомилов<sup>c</sup>, М.Г.Буряков<sup>b</sup>, А.В.Дмитриев<sup>b</sup>,  
А.А.Зайцев<sup>b</sup>, С.Илиева<sup>c</sup>, Д.Колев<sup>c</sup>, В.А.Киреев<sup>b</sup>, В.И.Колесников<sup>b</sup>,  
Р.Ю.Колесников<sup>b</sup>, В.В.Ленивенко<sup>b</sup>, Г.И.Лыкасов<sup>d</sup>, В.В.Любушкин<sup>d</sup>,  
А.И.Малахов<sup>b</sup>, В.А.Матвеев<sup>c</sup>, Г.Л.Мелкумов<sup>b</sup>, Б.А.Попов<sup>d</sup>, М.М.Румянцев<sup>b</sup>,  
В.В.Терещенко<sup>d</sup>, Р.Ценов

*a) Институт физики МАН, Улан-Батор (Монголия)*

*b) Лаборатория физики высоких энергий им. В.И.Векслера и А.М.Балдина ОИЯИ (Дубна)*

*c) Университет «Св.Климент Охридски»(Болгария)*

*d) Лаборатория ядерных проблем им. В.П.Джелепова ОИЯИ (Дубна)*

*e) Дирекция ОИЯИ (Дубна)*

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

МАЛАХОВ А.И.

ЗАМЕСТИТЕЛИ РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА

ДМИТРИЕВ А.В.

ЗАЙЦЕВ А.А.

ДАТА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОЕКТА В НОО

ДАТА НТС ЛАБОРАТОРИИ

НОМЕР ДОКУМЕНТА:

ЛФВЭ НТС №

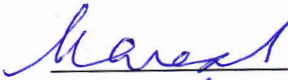
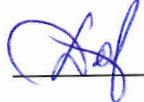
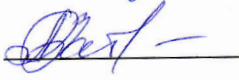
ДАТА ПЕРВОГО УТВЕРЖДЕНИЯ ПРОЕКТА 2012 г.

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

**Изучение образования адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях в CERN SPS (SHINE – SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment)  
NA61-SHINE**

Шифр темы: 02-1-1087-2009/2023

Тема: Исследования по физике релятивистских тяжелых и легких ионов на ускорительных комплексах НУКЛОТРОН/НИКА ОИЯИ и СПС ЦЕРН.

	подпись	дата
УТВЕРЖДЕН ДИРЕКТОРОМ ОИЯИ	_____	_____
СОГЛАСОВАНО:		
ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ОИЯИ	_____	_____
ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ОИЯИ	_____	_____
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ОИЯИ	_____	_____
НАЧАЛЬНИК НОО	_____	_____
ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ	_____	_____
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ	_____	_____
РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА		<u>03.03.2021</u>
ЗАМЕСТИТЕЛИ РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА		<u>03.03.2021</u>
		<u>03.03.2021</u>
ОДОБРЕН ПКК ПО ФИЗИКЕ ЧАСТИЦ	_____	_____

**Предложение по продлению  
участия группы ОИЯИ в эксперименте  
NA61/SHINE на ускорителе SPS в ЦЕРН  
(Тема 02-1-1087-2009/2023)**

**Руководитель от ЦЕРН:**

Марек Гадзитский ([marek.gazdzicki@cern.ch](mailto:marek.gazdzicki@cern.ch))

**Руководитель от ОИЯИ:**

Александр Малахов ([malakhov@lhe.jinr.ru](mailto:malakhov@lhe.jinr.ru))

**Заместители руководителя от ОИЯИ:**

Александр Дмитриев ([admitriev@jinr.ru](mailto:admitriev@jinr.ru))

Андрей Зайцев ([zaicev@jinr.ru](mailto:zaicev@jinr.ru))

**Участники:**

В.А.Матвеев (руководство ОИЯИ)

В.А.Бабкин, А.В.Дмитриев, М.Г. Буряков, А.А.Зайцев, В.А.Киреев,  
В.И.Колесников, Р.Ю.Колесников, В.В.Ленивенко, А.И.Малахов,  
Г.Л.Мелкумов, М.М.Румянцев,  
(Лаборатория физики высоких энергий имени В.И.Векслера и А.М.Балдина,  
ОИЯИ)

Г.И.Лыкасов, В.В.Любушкин, Б.А.Попов, В.В. Терещенко  
(Лаборатория ядерных проблем имени В.П.Джелепова, ОИЯИ)

Б.Баатар (Институ физики и технологии Монгольской академии наук,  
Монголия)

Д.Колев, М.Богомилов, С.Илиева, Р.Ценов (Софийский университет Климента  
Охридского, Болгария)

## Оглавление

	Стр.
Форма №24	1
Форма №25	2
Титул	3
Оглавление	4
Аннотация	5
1 Введение	6
2. Статус исследования	7
2.1 Предмет и методы исследования	7
2.2 Установка и модификация установки	14
2.3 Ожидаемые результаты	17
2.4 План-график	17
2.5 Область ответственности	18
2.6 Научный опыт авторов	18
2.7 Публикации, защита диссертаций, выступления на конференциях	18
3. Оценка кадровых ресурсов	19
4. Оценка бюджета проекта (Форма № 26), расходы на 3 года	21
5. Смета затрат (Форма № 29)	22
6. Сильные и слабые стороны, возможности, угрозы	23
7. Список литературы	23
8. Приложение	25
8.1 Рецензия проф. В. Бутова	25
8.2 Рецензия д.ф.-м.н. А.А. Балдина	27
8.3 Решение НТС Лаборатории	29

## Аннотация

Настоящий документ подготовлен с учетом рекомендаций 49-й сессии Программно-консультативного комитета (ПКК) по физике частиц ОИЯИ и в соответствии с «Правилами подготовки проектов», представленными на сайте ОИЯИ <http://www.jinr.ru/docs/>.

Эксперимент NA61/SHINE включен в «Семилетний план развития ОИЯИ» ([http://www.jinr.ru/wp-content/uploads/JINR\\_Docs/7\\_plan\\_17-23\\_rus.pdf](http://www.jinr.ru/wp-content/uploads/JINR_Docs/7_plan_17-23_rus.pdf)), где на странице 18 написано: «5. Получение новых результатов по программе сканирования энергии в экспериментах NA61 (SPS) и STAR (RHIC) — 2017–2023 гг.»

Предлагается продолжить изучение свойств адронной и ядерной фрагментации в процессах с адронными и ядерными пучками. Более подробно описаны результаты по поиску критической точки на фазовой диаграмме ядерной материи путем сканирования по энергии и атомным номерам взаимодействующих ядер.

Продолжается анализ данных по следующим направлениям:

- ✓ образование легких ядер в ядерных взаимодействиях;
- ✓ генерация гиперонов во взаимодействиях  $Be + Be$ ,  $Ar + Sc$ ,  $Xe + La$ ,  $Pb + Pb$ ;
- ✓ образование антивещества в ядро-ядерных взаимодействиях.
- ✓ рождение очаровательных частиц в столкновениях релятивистских тяжелых ионов.

Ведутся совместные работы по моделированию для проектов NICA и NA61, опираясь на экспериментальные данные, полученные в эксперименте NA61.

Ряд молодых сотрудников занимается созданием новой времяпролётной системы на основе детекторов Multigap Resistive Plate Chambers (MRPC), разработка которых ведётся в том числе для экспериментов на ускорительном комплексе NICA. Поэтому в настоящее время предоставляется прекрасная возможность их тестирования на реальных пучках в условиях эксперимента NA61 до запуска комплекса NICA. Изготовлены детекторы для одной времяпролётной стенки, идет изготовление считывающей электроники и газовой системы. Планируется начать работу с этой системой на пучках ЦЕРН осенью 2021 г.

Была учтена необходимость использования опыта работы в эксперименте NA61 для проекта NICA в ОИЯИ. В представленном проекте продолжена оптимизация количества сотрудников, участвующих в эксперименте с учетом реализации проекта NICA.

Опытные кадры, защитившие докторские и кандидатские диссертации по результатам эксперимента NA61, в настоящее время успешно работают над проектами в рамках общего проекта NICA. Молодые сотрудники ОИЯИ получают бесценный опыт в реализации этих проектов, участвуя в запусках, разработке детекторов и анализе данных на ядерных пучках в ЦЕРН. Достигнута договоренность с руководителем эксперимента NA61 по организации обучения молодых сотрудников на установке NA61, что крайне полезно для будущих экспериментов на комплексе NICA. Планируется защита диссертаций. Таким образом, эксперимент NA61 является хорошей "кузницей" кадров для проекта NICA.

Следует отметить, что участие ОИЯИ в эксперименте не требует больших финансовых и людских ресурсов. При этом сотрудники ОИЯИ участвуют в получении физических результатов высочайшего мирового уровня и получают уникальный опыт работы на самом современном уровне науки.

Сотрудники Лаборатории физики высоких энергий изучают ядро-ядерные взаимодействия и работают над созданием новой времяпролетной системы на основе MRPC. Эта деятельность требует относительно небольших ресурсов. Сотрудники Лаборатории ядерных проблем участвуют в нейтринной программе. Эта работа также не требует больших финансовых затрат.

## 1. Введение

Программа сильных взаимодействий в эксперименте NA61/SHINE основана на сканировании пучками легких и промежуточных ядер (от  $p + p$  до  $\text{Xe} + \text{La}$ ) с импульсами в диапазоне 13A - 158A ГэВ/с. Основные физические цели проекта включают в себя: поиск критической точки второго порядка на фазовой диаграмме КХД (поиск немонотонного поведения сигнатур критических точек, таких как флуктуации поперечного импульса и множественности, сигнал интермиситти и т.д., когда система замерзает вблизи критической точки), изучить свойства начала деконфайнмента (поиск возникновения структур «horn», «kink», «step» и «dale» при столкновениях легких ядер). В последние годы программа была расширена за счет взаимодействий ядер  $\text{Pb} + \text{Pb}$ , в которых изучается образование открытого чарма, а также коллективные эффекты. Основываясь на полученных результатах, несколько лет назад NA61/SHINE представил концепцию двух направлений в ядро-ядерных взаимодействиях при энергиях CERN SPS: начало деконфайнмента (начало образования КГП - порог энергии столкновения для деконфайнмента) и начало «fireball» (начало формирования большого кластера, который статистически распадается – порог размера системы для создания статистической системы).

Основное направление деятельности дубненской группы заключается в следующем:

### 1. Изучение образования легких ядер. Это важно по нескольким причинам:

Прежде всего, механизм образования кластеров в ядро-ядерных столкновениях недостаточно изучен и требует дальнейших исследований. С другой стороны, например, дейтроны и тритоны не являются элементарными адронными частицами и из-за их малой энергии связи по сравнению с окружающей температурой системы, весьма вероятно, что они не выживут при повторных столкновениях. Таким образом, вероятно, что наблюдаемые дейтроны и тритоны, а также значительная часть связанных состояний нескольких нуклонов, зарегистрированных вблизи центральной области быстрот, образуются на поздней стадии реакции. Следовательно, наблюдаемые в эксперименте легкие ядра, образовавшиеся на поздних этапах эволюции реакции, могут предоставить информацию о пространственно-временной структуре поздней стадии столкновения.

### 2. Изучение образования гиперонов и гиперядер во взаимодействиях $\text{Ar} + \text{Sc}$ , $\text{Xe} + \text{La}$ , $\text{Pb} + \text{Pb}$ .

Релятивистские столкновения тяжелых ионов дают уникальную возможность создавать и исследовать горячую и плотную материю в лабораторных условиях. На начальном этапе реакции формируется КГП, а на заключительном этапе – идет процесс адронизации и образования кластеров. Захват рожденных гиперонов кластерами нуклонов приводит к образованию гиперядер, что является очень редким процессом при пороговой энергии для рождения странности. Гиперядра являются уникальными объектами для углубления наших знаний о взаимодействиях странных частиц с ядрами в многочастичной среде и в контролируемых условиях. Это, в свою очередь, необходимо для получения более общего и самосогласованного описания барион-барионных взаимодействий.

3. Изучение образования антивещества в релятивистских ядерных взаимодействиях.

4. Анализ экспериментальных данных с использованием дубненского подхода. Используется развитие подхода к исследованию релятивистских ядерных взаимодействий в пространстве четырехмерных скоростей, предложенного академиком А.М. Балдиным.

5. Измерение среднего числа пар очарованных кварк-антикварков  $\langle c\bar{c} \rangle$ , образующихся в полном фазовом пространстве взаимодействующих тяжелых ионов. Особенность рождения очаровательных частиц при столкновении тяжелых ионов может быть признаком образования КГП, в частности, подавление выхода  $J/\psi$ -мезонов. Таких данных пока нет, и в рамках эксперимента NA61/SHINE планируется осуществить такой анализ.

6. Разработка времяпролетного детектора на основе многоазорных резистивных плоских камер (MRPC) с высоким временным разрешением. Ведется совместная разработка детекторов для NA61 и NICA. Ядерные пучки ЦЕРН используются для тестирования и отладки детекторов.

7. Лаборатория ядерных проблем участвует в нейтринной программе NA61. Коллаборация NA61/SHINE имеет программу измерений образования адронов для экспериментов по осцилляциям нейтрино с длинной базой в FNAL и J-PARC. Эти измерения расширяют знания о потоке нейтрино, создаваемом нейтринными пучками ускорителей.

## 2. Статус исследования

### 2.1. Предмет и методы исследования.

В 2019-2021 годах были обработаны и проанализированы экспериментальные данные NA61/SHINE, а также произведена модернизация установки. Ниже приведены самые последние результаты, опубликованные за этот период.

Опубликованы результаты коллаборации NA61/SHINE [1] по зависимости отношения  $K^+/\pi^+$  от энергии столкновения и параметра обратного наклона  $m_T$ -спектров каонов в неупругих  $p+p$  взаимодействиях. Эти результаты сопоставлены с соответствующими мировыми данными по  $p+p$  взаимодействиям, а также центральным столкновениям  $Pb+Pb$  и  $Au+Au$ . Сравнение выявило сходство между энергетической зависимостью в  $p+p$  взаимодействиях и центральными столкновениями тяжелых ионов в том же диапазоне энергий. Понимание происхождения сходства между результатами столкновений тяжелых ионов и  $p+p$  взаимодействий является сегодня одной из ключевых задач физики тяжелых ионов.

Эксперимент NA61/SHINE в CERN SPS изучает начало деконфайнмента в адронной материи путем сканирования образования частиц при столкновениях ядер с различными атомными номерами в диапазоне энергий SPS. В статье [2] представлены результаты по инклюзивным дважды дифференциальным спектрам, распределениям по поперечному импульсу и быстрой, а также по средней множественности  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ ,  $p$  и анти- $p$ , возникающих в 20% наиболее центральных столкновениях  ${}^7\text{Be} + {}^9\text{Be}$  при импульсах пучка 19A, 30A, 40A, 75A и 150A ГэВ/с. Энергетическая зависимость отношений  $K^\pm/\pi^\pm$ , а также параметров обратного наклона в распределениях поперечных масс  $K^\pm$  близка к аналогичной зависимости в неупругих  $p+p$  взаимодействиях. Новые результаты сравниваются с мировыми данными по взаимодействиям  $p+p$  и  $Pb+Pb$ , а также с предсказаниями моделей EPOS, UrQMD, AMPT, PHSD и SMASH.



Наши сотрудники внесли большой вклад в эту работу. В частности, для моделирования ряда наблюдаемых величин использовалась модель PHSD (Parton-Hadron-String Dynamic). Некоторые результаты моделирования показаны на рис.1.

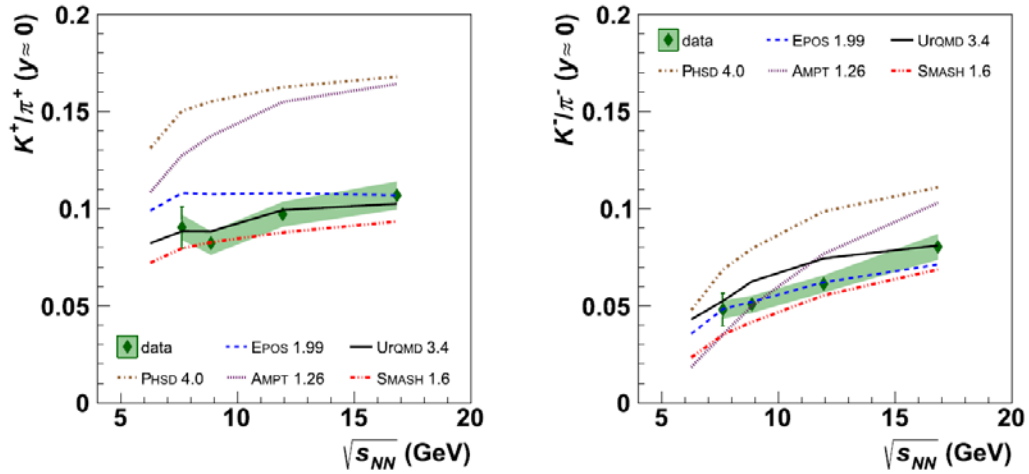


Рис. 1. Сравнение энергетической зависимости для отношений выхода  $K^+/\pi^+$  (слева) и  $K^-/\pi^-$  (справа) в центральной области быстрот для 20% наиболее центральных столкновений Be + Be с моделями: Epos 1.99 (синяя пунктирная линия), Urqmd 3.4 (черная сплошная линия), Ampt 1.26 (фиолетовая пунктирная линия), PHSD (коричневая пунктирная линия) и Smash 1.6 (красная пунктирно-двойная пунктирная линия).

В программе NA61 также были накоплены данные о столкновениях Ar + Sc, Xe + La и Pb + Pb, анализ которых продолжается. Результаты для центральных столкновений  ${}^7\text{Be} + {}^9\text{Be}$  оказались аналогичными результатам для неупругих  $p + p$  взаимодействий по формам спектров поперечного импульса и быстроты, а также по отношениям выходов  $K^+/\pi^+$ . Однако выходы частиц выше примерно в четыре раза, что соответствует ожиданиям по модели «раненого» нуклона. Подводя итог, ни измерения, ни модели не показывают признаки «horn» структуры при низкой энергии SPS для небольших систем столкновений в отличие от результатов для центральных взаимодействий Pb + Pb. Результаты сравнивались с предсказаниями моделей: EPOS 1.99, UrQMD 3.4, AMPT 1.26, PHSD 4.0 и SMASH 1.6. Ни одна из моделей не воспроизводит все особенности представленных результатов.

Для более глубокого понимания существующих данных по легким ядрам в эксперименте NA49 и будущих данных эксперимента NA61 и экспериментов NICA, В. Киреевым была разработана и представлена коллаборации независимая от моделей библиотека поиска кластеров Phase-space Minimum Spanning Tree (psMST) (psMST): это библиотека C++ с открытым исходным кодом под лицензией GNU GPLv3, которая может применяться к любой транспортной модели: PHSD, PHQMD, SMASH, UrQMD и другим. Алгоритм psMST основан на хорошо известных идеях процедуры Minimum Spanning Tree: он может учитывать только пространственную информацию частиц для идентификации кластеров (как, например, оригинальный MST), но также могут использоваться корреляции импульсов частиц. Это может пролить свет на происхождение и динамику образования кластеров, а также на эволюцию столкновения тяжелых ионов. На рис.2 показано быстрое распределение дейтронов в столкновениях Pb + Pb при импульсе пучка  $P_{\text{lab}} = 40\text{A}\cdot\text{ГэВ}/\text{с}$ . Экспериментальные данные NA49 взяты из Phys. Rev. C 94, 044906 (2016). Кластеры, найденные с помощью psMST, хорошо согласуются с экспериментальными данными. На рис.



3 показаны быстроечные распределения кластеров с массовым числом « $A = 2$ » на трёх шагах эволюции реакции: 40, 90, 150 фм/с при импульсе пучка 158А ГэВ/с. Алгоритм psMST был применен к 3 различным моделям: RHQMD, SMASH UrQMD. Все транспортные подходы дают похожие результаты.

Очень важно иметь надежное моделирование образования кластеров, поскольку его включение может также изменить спектры отдельных частиц, что имеет решающее значение для анализа флуктуаций от события к событию, измерению азимутальных потоков частиц и т.д. psMST также может быть использован в экспериментах NICA. В настоящее время готовится статья с подробным описанием алгоритма и его работы в сочетании с различными моделями.

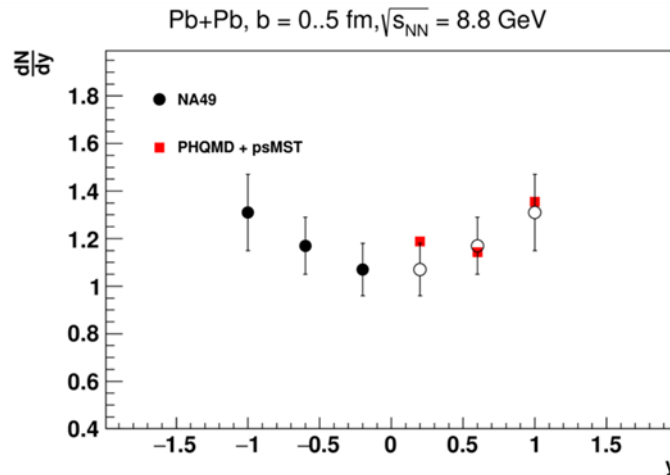


Рис 2. Распределение по быстройте дейтронов, измеренные в центральных взаимодействиях Pb + Pb при 40 ГэВ/с. Экспериментальные данные показаны черными кружками, предсказания RHQMD + psMST - красными квадратами.

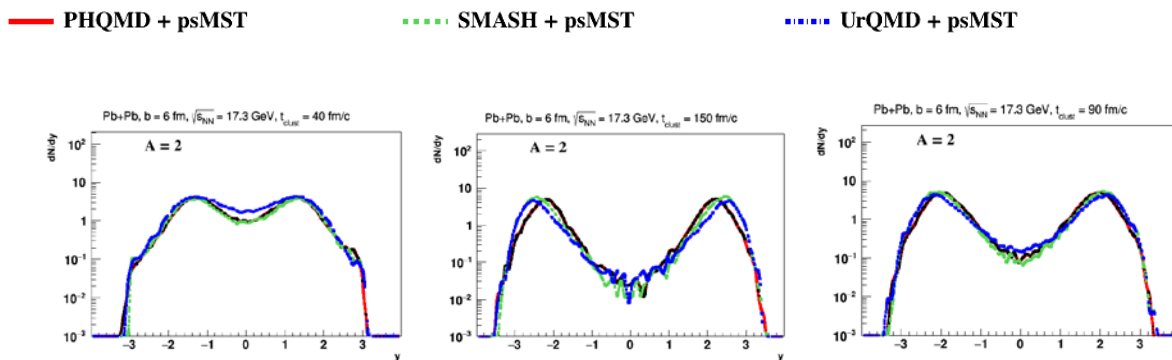


Рис 3. Спектры быстроек легких кластеров с массой  $A = 2$ , измеренные в центральных взаимодействиях Pb + Pb при 158 ГэВ/с. Алгоритм psMST был применен к трем моделям: RHQMD - красные линии, SMASH - зеленые пунктирные линии, UrQMD - синие пунктирные линии.

Рождение  $\Xi(1321)^-$  и анти- $\Xi(1321)^+$  гиперонов в неупругих  $p + p$  взаимодействиях изучается в эксперименте с фиксированной мишенью при импульсе пучка 158 ГэВ/с [3]. Дважды дифференциальные распределения по быстройте  $y$  и поперечному импульсу  $p_T$  получены из 33 миллионов неупругих событий. Они позволяют экстраполировать спектры на полное фазовое пространство и определять среднюю множественность как  $\Xi^-$ , так и анти- $\Xi^+$ .

Спектры быстрой и поперечного импульса сравниваются с предсказаниями транспортной модели. Средняя множественность  $\Xi^-$  в неупругих  $p + p$  взаимодействиях при 158 ГэВ/с используется для количественной оценки увеличения странности в  $A + A$  столкновениях при том же импульсе пучка. Некоторые результаты моделирования физиками дубненской группы показаны на рис.4.

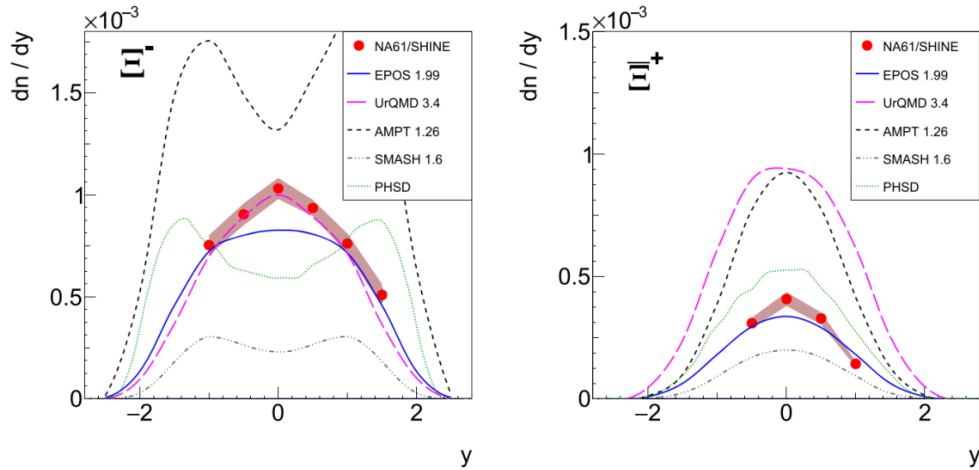


Рис.4. Спектры быстрой  $\Xi^-$  (слева) и анти- $\Xi^+$  (справа), измеренные в неупругих  $p + p$  взаимодействиях при 158 ГэВ/с. Заштрихованные полосы показывают систематические погрешности. Предсказания Urqmd 3.4, Epos 1.99, Ampt 1.26, Smash 1.6 и Phsd показаны пурпурными, синими, черными, серыми и зелеными линиями соответственно.

Одна из заявленных целей NA61/SHINE - поиск критической точки (КТ) сильно взаимодействующей материи. NA61/SHINE - это первый эксперимент, в котором выполняется двумерное сканирование по импульсу пучка (13А - 150А ГэВ/с) и размеру сталкивающихся систем ( $p + p$ ,  $p + Pb$ ,  $Be + Be$ ,  $Ar + Sc$ ,  $Xe + La$ ), тем самым исследуя различные условия замораживания по температуре  $T$  и барионному химическому потенциалу  $\mu_B$  (рис. 5 слева).

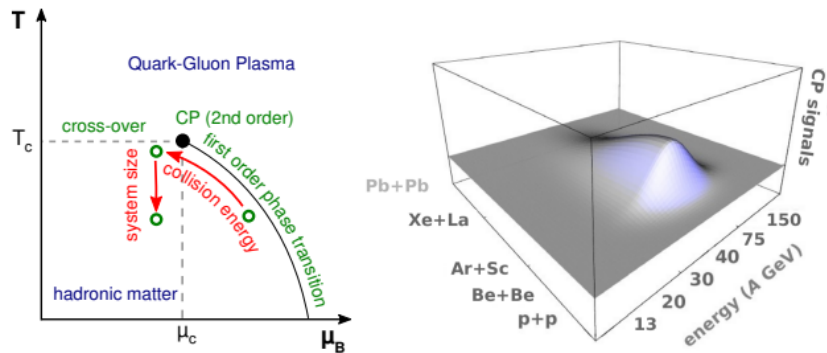


Рис.5. Слева: гипотетический рисунок фазовой диаграммы сильно взаимодействующего вещества с критической точкой, изображенный как функция барионного химического потенциала  $\mu_B$  и температуры  $T$ . Справа: изображение холма флуктуаций, которые могут наблюдаться в сканировании по импульсу пучка и размеру системы при условии, что параметры «замораживания» близки к критической точке

Вблизи КТ происходит фазовый переход второго рода; корреляционная длина системы увеличивается, что приводит к масштабно-инвариантной системе и ожидаемому «холму» повышенных флуктуаций различных наблюдаемых в окрестности КТ (рис. 5 справа). В КТ флуктуации параметра порядка могут быть обнаружены в пространстве поперечных импульсов в рамках анализа интермиттенсы протонов с использованием Second Scaled Factorial Moments (SSFМ). SSFM рассчитываются путем разбиения области пространства поперечных импульсов на решетку из  $M \times M$  бинов одинакового размера и подсчета количества пар протонов на бин.

Согласно программе поиска критической точки в ядерной материи, новые результаты анализа интермиттенсы протонов в неупругих столкновениях  $^{40}\text{Ar} + ^{45}\text{Sc}$  при  $150\text{A}\cdot\text{ГэВ}/\text{с}$  были опубликованы в качестве предварительных и отражены в трудах 45th Congress of Polish Physicists [4]. Выбранная протонная чистота составляла не менее 90%. Были рассчитаны факториальные моменты (SSFМ) для выбранных протонов (исходных и смешанных событий). Результаты для коррелятора  $\Delta F_2(M)$  для интервалов центральности 10% и 20% показаны на рис. 6.

Исходные значения данных и их стандартные «bootstrap» ошибки нанесены на график в зависимости от доверительных интервалов (68–95–99,7%) распределений  $\Delta F_2(M)$ , полученных из 1000 «bootstrap» повторных выборок анализируемых событий. На рисунке 6 (вверху справа) сравниваются экспериментальные значения  $\Delta F_2(M)$  с  $\Delta F_2(M)$ , полученные из некоррелированного протонного фона с теми же инклюзивными характеристиками, что и исходные события  $^{40}\text{Ar} + ^{45}\text{Sc}$ . Основываясь на наблюдаемых доверительных интервалах  $\Delta F_2(M)$  для 10–20% самого центрального набора, можно сделать вывод, что SSFM отличаются от нуля примерно на  $\sim 1\text{--}2\sigma$ , что указывает на пограничное статистически значимое разделение реальных данных от смешанных событий (фон). Такой же вывод можно сделать при сравнении со случайным фоном, рис. 6 (справа внизу).

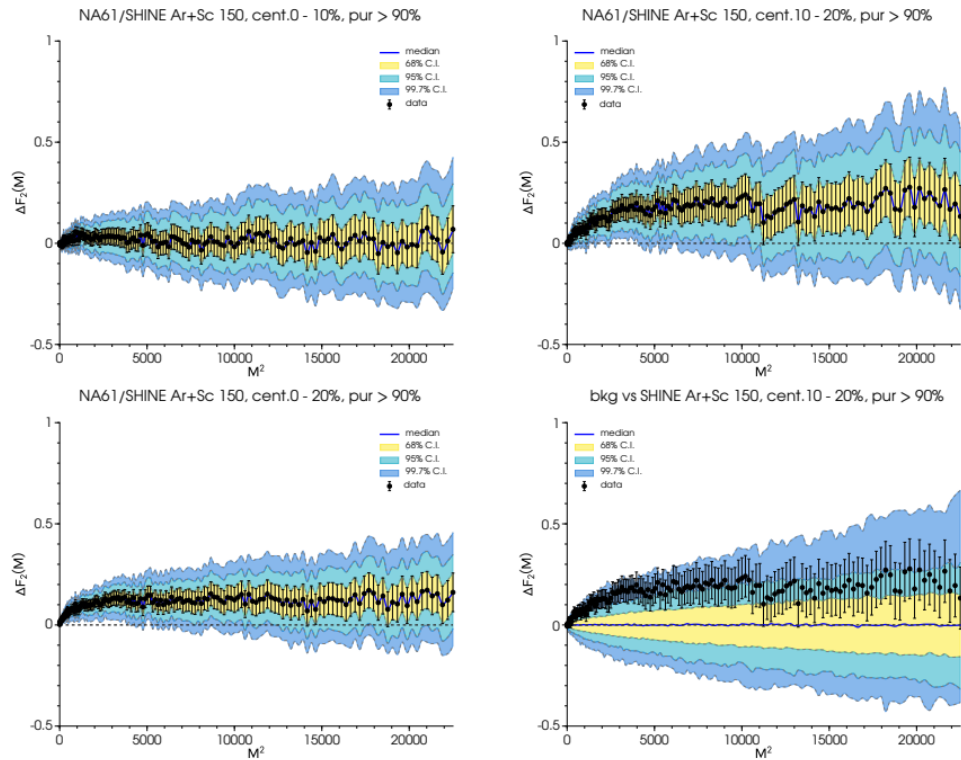


Рис.6. Факториальный момент  $\Delta F_2(M)$  для  $^{40}\text{Ar} + ^{45}\text{Sc}$  0–10% (вверху слева), 10–20% (вверху справа) и 0–20% (внизу слева) наиболее центральных столкновений при 150А·ГэВ/с (черные точки); ошибки соответствуют стандартной «bootstrap» ошибке; цветные диапазоны указывают на «bootstrap» доверительные интервалы; сплошная синяя линия дает среднее значение «bootstrap» выборок. Внизу справа: 10–20% самого центрального  $\Delta F_2(M)$  (черные точки) по сравнению с  $\Delta F_2(M)$  смоделированных случайных фоновых протонов для той же статистики событий.

К сожалению, надежные доверительные интервалы для индекса интермиттенци не могли быть получены с помощью простых степенных аппроксимаций из-за коррелированности значений для различных размеров  $M$  бинов. Таким образом, статус интермиттенци в настоящее время не является окончательным для взаимодействий  $^{40}\text{Ar} + ^{45}\text{Sc}$  при 150А·ГэВ/с. Качество и неопределенность степенного масштабирования  $\Delta F_2(M)$  еще предстоит установить. Анализ продолжается.

Физики ОИЯИ также выполнили оригинальные исследования с использованием подхода к изучению релятивистских ядерных взаимодействий в четырехмерном пространстве скоростей, который ранее был развит академиком А.М. Балдиным. Принципы подобия и автомодельности оказались очень плодотворными при изучении ядерных взаимодействий при высоких энергиях.

В частности, используя принцип подобия, дубненские физики впервые получили аналитическое описание распределений пионов по быстройре при взаимодействии с релятивистскими ядрами, которые превосходно описывают данные NA61/SHINE, зарегистрированные при всех импульсах в диапазоне от 20 ГэВ/с до 158 ГэВ/с [5]. Эти результаты представлены на рис.7 (слева). На рис.7 (справа) показаны результаты наших расчетов спектров пионов по поперечной массе  $m_{\text{пт}}$  в столкновениях PbPb, ArSc, BeBe и pp в

центральной области быстрот при  $\sqrt{s} = 8.77$  ГэВ (или при импульсе на нуклон  $P_{in} = 40$  ГэВ/с) по сравнению с данными эксперимента NA61/SHINE [6].

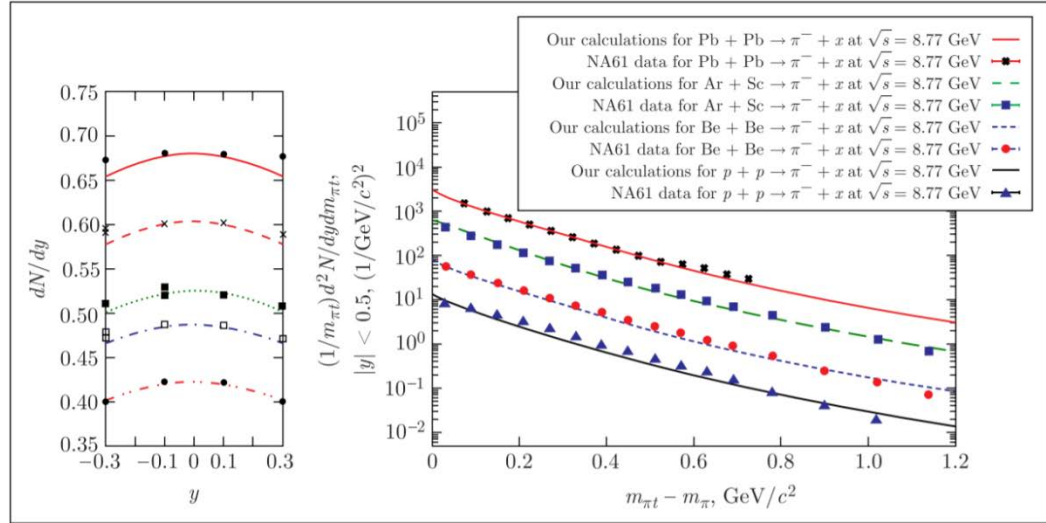


Рис. 7. Слева: распределения пионов по быстроте ( $y$ ) в  $p + p$  столкновениях при импульсах  $P_{in} = 158$  ГэВ/с (сплошная красная кривая), 80 ГэВ/с (пунктирная красная кривая), 40 ГэВ/с (зеленая кривая), 31 ГэВ/с (синяя кривая), 20 ГэВ/с (красная нижняя кривая) по сравнению с экспериментом NA61/SHINE в процессе  $p + p \rightarrow \pi^- + x$  [5]. Справа: результаты наших расчетов спектров  $m_{\pi^+}$  в столкновениях  $Pb + Pb$ ,  $Ar + Sc$ ,  $Be + Be$  и  $p + p$  в центральной области быстрот при импульсе на нуклон  $P_{in} = 40$  ГэВ/с в сравнении с данными NA61 / SHINE [6]

Помимо вышеупомянутых результатов было получено много других, в частности:

- поиск пентакварков в  $p + p$  при 158 ГэВ/с [7];
- рождение  $\phi$ -мезонов в  $p + p$  при 40–158 ГэВ/с [8];
- рождение  $K^*(892)$  в  $p + p$  при 158 ГэВ/с [9];
- двухчастичные корреляции по азимутальному углу и псевдобыстроте в  $Be + Be$  [10].

Недавно был начат анализ данных во взаимодействиях ядер  $Ar+Sc$  с импульсами 13A, 19A, 30A, 40A, 75A и 150A ГэВ/с. В настоящее время А.Зайцевым ведется процедура идентификации рожденных частиц  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$  и (анти)протонов в центральной области быстрот для наиболее центральных столкновений  $Ar+Sc$ .

Коллаборация NA61/SHINE имеет программу измерений образования адронов для экспериментов по осцилляциям нейтрино с длинной базой в FNAL и J-PARC. Эти измерения расширяют знания о потоке нейтрино, создаваемом нейтринными пучками ускорителей. NA61/SHINE измеряет полные сечения и дифференциальные спектры выходов адронов от мишеней из тонких мишеней и копии мишени нейтринного пучка. Кроме того, коллаборация выполняет измерения образования адронов, важные для интерпретации данных об атмосферных ливнях при сверхвысоких энергиях, и измеряет сечения фрагментации для понимания данных о космических лучах в Галактике [11, 12].

## 2.2 Установка и модификация установки

Во время Long Shutdown 2 в ЦЕРНе (2019-2021 гг.) продолжается значительная модификация спектрометра NA61/SHINE. Обновление мотивировано программой чарма и нейтрино, обе из которых требуют десятикратного увеличения скорости сбора данных примерно до 1 кГц. Программа чарма также требует удвоения покрытия фазового пространства вершинного детектора. Это, в частности, требует следующего: (i) создание нового вершинного детектора, (ii) замена считывающей электроники ТРС, (iii) внедрение новых систем запуска и сбора данных, (iv) модернизация детектора налетающих частиц, (v) создание новых детекторов ТоF для идентификации частиц в области средних скоростей.

Модернизация детекторов графически представлена на рис. 8 и подробно обсуждается в [13–15].

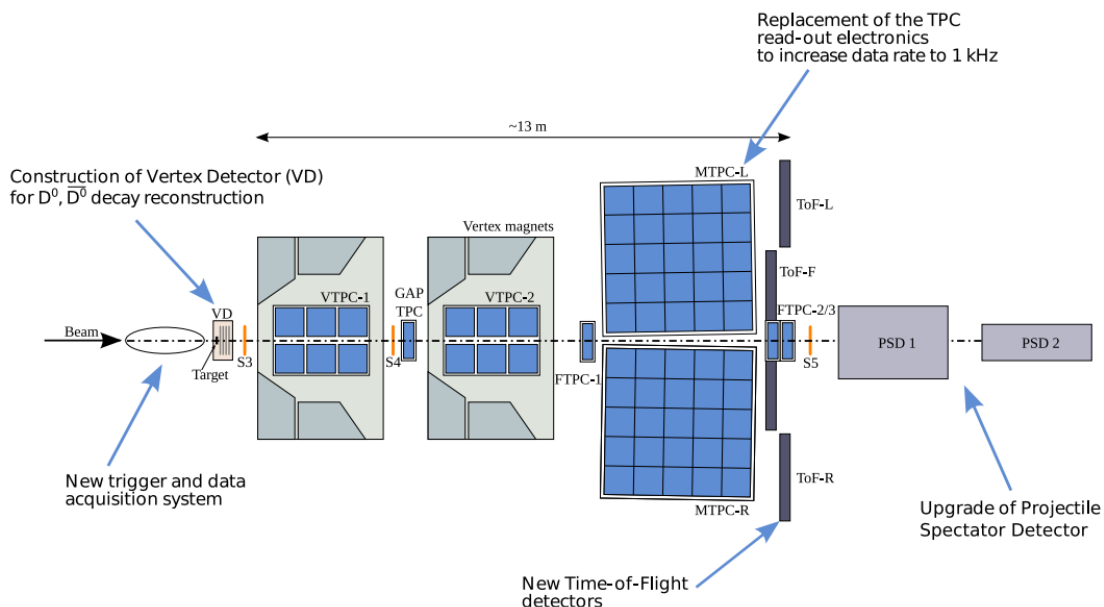


Рис.8. Обновление NA61 / SHINE планируется завершить в течение периода LS2.

Группа участников проекта (А.Дмитриев и др.) из ОИЯИ отвечает за обновление Time of Flight System (ToF). Предыдущая времяпролетная система идентификации частиц состояла из двух стенок, каждая из которых имела 891 сцинтилляционный детектор. Одна из стенок была сделана в ОИЯИ. Временное разрешение в среднем составляло 75 пс, что обеспечивало разделение каонов от пионов до импульса 8 ГэВ/с. После 20 лет работы большинство частей системы потребовало бы значительной реконструкции. В связи с этим было принято решение о замене старой системы на новую систему ТоF на основе многозачерных резистивных пластинчатых камер (МРПК) типа VM@N, что стало возможным благодаря гранту дирекции ОИЯИ [16]. Эти работы успешно выполняются. Завершено изготовление детекторов для одной стенки. Новый подход к усилению и оцифровке сигналов MRPC будет использован в считывающей электронике. Была разработана аналоговая интерфейсная электроника (AFE) с быстродействием менее 10 пс для MRPC. Выходные сигналы AFE оцифровываются 32-канальной высокоскоростной платой оцифровки (DB). Создание DB осуществляется Женевским университетом при сотрудничестве ОИЯИ. Результаты тестирования AFE показывают, что считывающая электроника работает хорошо, а ее временное разрешение лучше, чем входной усилитель/дискриминатор на базе широко распространенной NINO ASIC



[bug] в динамическом диапазоне 50-1200 фКл (см. Рис. 9). Детекторы в полной конфигурации были протестированы и показали отличное временное разрешение на пучках ЦЕРН и ФИАН. В ЦЕРНе продолжается создание газовой системы. Эта работа чрезвычайно полезна для проекта NICA, поскольку времяпролетные детекторы, а также новый front-end электроники, которые планируется использовать в установке MPD в NICA, будут полностью разработаны и испытаны в ядерных пучках ЦЕРНа.

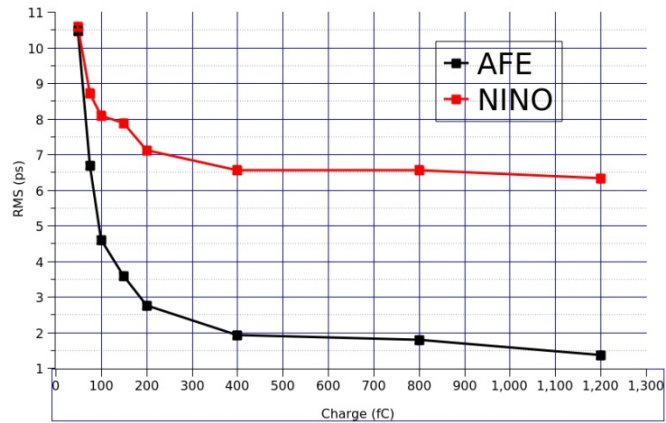


Рис.9. Зависимость временного разрешения от заряда сигнала.

Были рассмотрены два типа MRPC как отдельные детекторы для стены NA61/SHINE ToF, чтобы гарантировать требуемую низкую загрузку детектора. «Узкий» детектор со считывающим стрипом 150 мм и «широкий» со считывающим стрипом 300 мм. «Широкий» MRPC полностью идентичен детекторам, использованным в эксперименте BM@N. Оба варианта имеют схожие характеристики с точки зрения сборки и эксплуатации. Счетчики имеют полностью дифференциальную, симметричную, трехсекционную архитектуру, сигналы считываются с обеих сторон стрипа. Схема детектора MRPC представлена на рис.10.

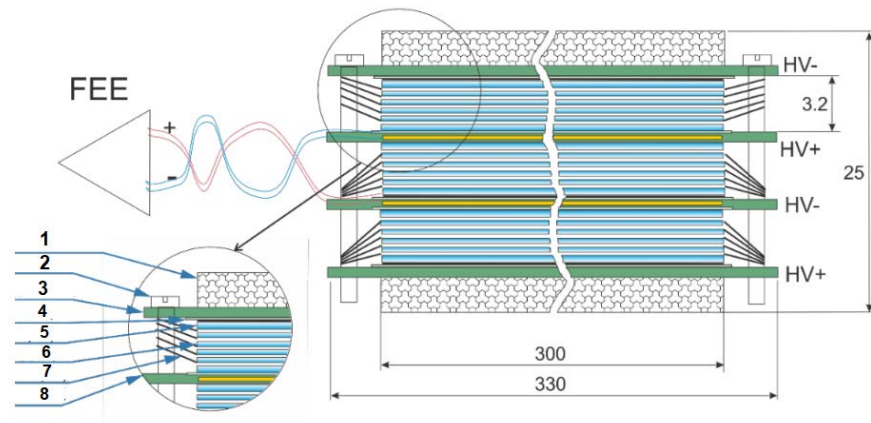


Рис.10. Схема трехсекционного MRPC со считывающими стрипами: 1 - соты (5 мм); 2- винт PET; 3- внешняя плата (1,5 мм); 4-майлар (100 мкм); 5- внешнее высоковольтное стекло (400 мкм); 6- внутреннее стекло (280 мкм); 7- прокладка (леска 200 мкм); 8 - PET со стрипами (1,5 мкм).

Последнее испытание пучка проводилось на ускорителе S-25R "РАКНРА" в ФИАН в Троицке в конце 2020 года. Пучок позитронов с импульсом 300 МэВ/с направлялся в



перпендикулярном к камере направления. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 11а.

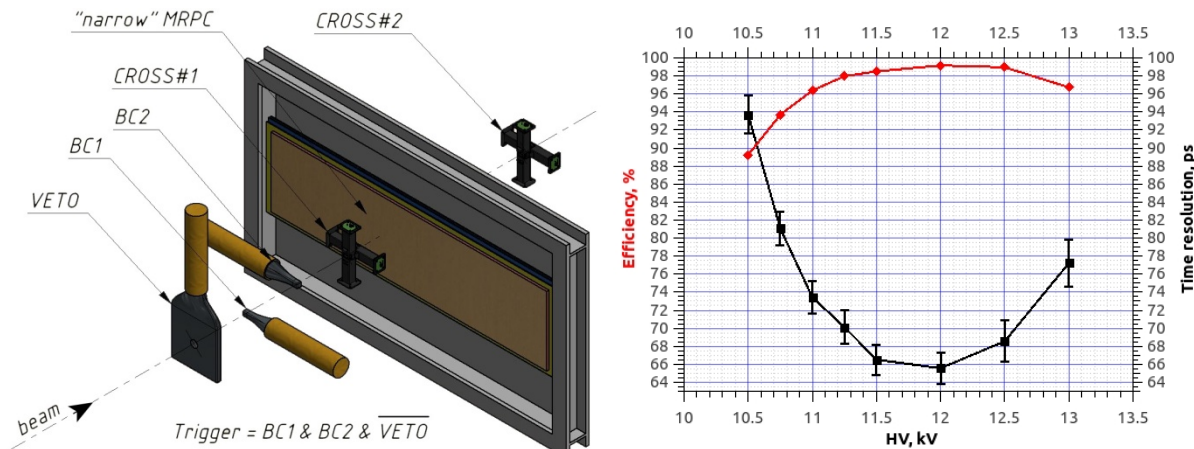


Рис.11. а) Схематическое изображение теста MRPC в пучке S-25R "ПАКХРА" б) Временное разрешение и эффективность MRPC.

Характеристики предлагаемого детектора MRPC представлены на рис. 11б. Наилучший результат был достигнут при напряжении 12 кВ, временном разрешении  $65,7 \pm 1,7$  пс и эффективности 99%. Падение эффективности при высоком напряжении связано с наличием стримеров. Программа анализа сигналов была настроена на режим одиночной лавины. Будущее программное обеспечение для анализа потребует подробных исследований форм сигналов и модификации алгоритмов для обработки всех типов сигналов MRPC.

Конструкция новой времяпролетной системы NA61/SHINE будет состоять из двух симметричных модулей, которые будут расположены на опорах, использованных для предыдущей системы. Типичная газовая смесь для детекторов MRPC будет состоять из 90% фреона R134a, 5% изобутана и 5% SF<sub>6</sub>. Газовая смесь должна транспортироваться в каждый модуль независимо от специализированной системы, рециркулирующей эту смесь.

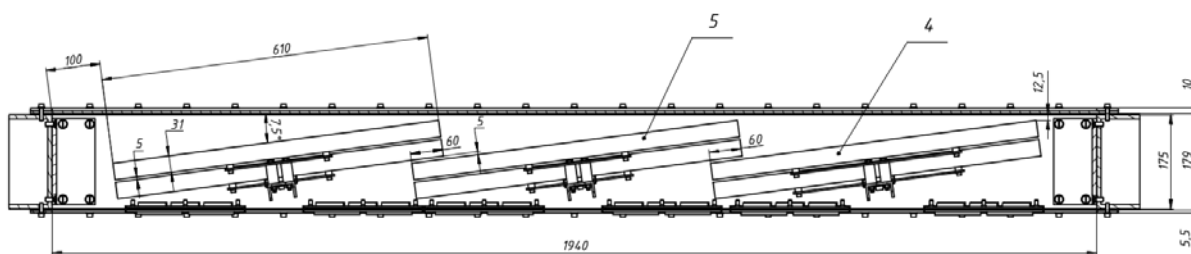


Рис 12. Вид сверху на модуль «Time of Flight» в разрезе.

Детекторы MRPC расположены внутри модулей под углом 7.5° относительно передней плоскости, как показано на рисунке 12. Расположение детекторов внутри модулей разработано с учетом минимизации потерь в чувствительной области.

В 2021-2022 годах планируется завершить изготовление новой системы Time of Flight для эксперимента NA61 / SHINE.

### 2.3. Ожидаемые результаты

Обширная статистика, уже накопленная при различных энергиях, и широкий диапазон сталкивающихся ядер позволяют нам получить большое количество запланированных физических результатов. Дубненская группа традиционно участвует в получении данных по следующим задачам:

- образование легких ядер при ядерных взаимодействиях

(Этой задачей полностью занимается дубненская группа. В. Колесников защитил докторскую диссертацию об образовании дейтронов при ядерных взаимодействиях. Ведутся работы по изучению образования более тяжелых ядер);

- образование гиперонов во взаимодействиях  $Be + Be$ ,  $Ar + Sc$ ,  $Xe + La$ ,  $Pb + Pb$  (Идентификация и реконструкция спектров  $\Lambda$ -гиперонов в столкновениях  $Ar + Sc$  и  $Xe + La$  при 30А и 150А·ГэВ как первый шаг к исследованию образования гиперядер);

- образование антивещества в ядро-ядерных взаимодействиях;

- рождение открытого и скрытого чарма при взаимодействии тяжелых ионов;

- нейтринная программа (Лаборатория ядерных проблем);

- завершится создание новой времяпролетной системы на базе MRPC (вторая стенка).

Отвечающая за сбор данных с помощью времяпролетного детектора и идентификацию вторичных частиц, дубненская группа активно способствует поиску критической точки и возникновению феномена «fireball» в сильно взаимодействующем веществе.

Запланированы доклады на международных встречах, конференциях и публикации научных статей.

По результатам эксперимента NA61 и проекта NICA планируется подготовить две кандидатские и докторскую диссертацию.

Результаты, полученные в эксперименте NA61/SHINE, и общий прогресс в физике сильных взаимодействий, нейтрино и космических лучей указывают на необходимость расширить измерения NA61/SHINE за пределы запланированных на период 2021-2024 годов. Новые измерения должны быть проведены после LS3. Физические аргументы и требуемые пучки кратко изложены в [22].

### 2.4 План-график

Запрос на измерения в 2022-2024 годах подробно изложен в Addendum 2018 г. [17]. SPSC признал широкий интерес к программе физики NA61/SHINE после LS2 [18, 19], как указано в Addendum 2018 г. Измерения, запланированные на 2022-2024 годы, являются продолжением измерений, утвержденных на 2021 год, и перечислены ниже.

Физика на пучках Pb:

(i) 2022 год: четыре недели пучка Pb при 150 А ГэВ/с для измерений очарованных адронов в столкновениях Pb + Pb,

(ii) 2022 год: две недели вторичного пучка легких ионов при 13 А ГэВ/с для измерений сечения ядерной фрагментации для физики космических лучей,

(iii) 2023 год: шесть недель пучка Pb при 150 А ГэВ/с для измерений очарованных адронов в столкновениях Pb + Pb,

(iv) 2024 год: шесть недель пучка свинца при 40 А ГэВ/с для измерений очарованных адронов в столкновениях Pb + Pb.

Физика с вторичными адронными пучками: планируется провести серию измерений для дальнейшего уточнения оценок потока нейтрино LBNF на детекторах DUNE. Для этих измерений потребуются следующие конфигурации пучков:

(i) 2022 год: четыре недели пучка  $K^+$  при 60 ГэВ/с для измерения поперечного сечения на графитовой тонкой мишени,

(ii) 2022 год: четыре недели протонного пучка при 120 ГэВ/с для измерения поперечного сечения на титановой тонкой мишени,

(iii) 2023 год: четыре недели протонного пучка 120 ГэВ / с для измерений на прототипе мишени LBNF/DUNE.

## **2.5. Область ответственности**

Вклад/обязанности ОИЯИ:

- создание системы TOF на основе MRPC;
- разработка программного обеспечения и сопровождение библиотеки программного обеспечения;
- реконструкция исходных данных и производство DST;
- анализ данных.

## **2.6. Научный опыт авторов**

Авторы проекта имеют большой научный опыт. А. Малахов, Г. Мелкумов и Г. Лыкасов имеют докторские степени и участвуют в исследовании проблем релятивистской ядерной физики. Шесть молодых сотрудников также активно участвовали в проекте. Пятеро из них - В. Бабкин, М. Буряков, А. Дмитриев, Р. Колесников и М. Румянцев - разрабатывают времяпролетную систему для проекта NA61/SHINE на основе детекторов MRPC. Члены команды MRPC используют знания, полученные в ходе R&D и эксплуатации систем ТоF для проекта NICA. Остальные трое сотрудников - В. Киреев, А. Зайцев, В. Ленивенко - активно подключились к анализу экспериментальных данных. У всех есть публикации и планы на подготовку кандидатских диссертаций.

## **2.7. Публикации, защита диссертаций, выступления на конференциях**

В целом участники ОИЯИ являются соавторами более 100 публикаций по эксперименту NA61/SHINE. За 2019-2021 годы опубликовано уже 13 статей [1-12, 16]. В трех из них

главными соавторами выступили дубненцы. За период 2019-2021 гг. 1 сотрудник группы ОИЯИ защитил кандидатскую и готовятся одна докторская и одна кандидатская диссертация.

Члены группы ОИЯИ сделали 5 презентаций результатов NA61 на международных встречах и конференциях [5, 20, 21]. Пандемия повлияла на участие в большем количестве конференций.

### 3. Оценка кадровых ресурсов

В таблицах 1 и 2 представлены участники эксперимента NA61/SHINE ОИЯИ с указанием направлений исследований и долей их участия. В таблице 3 указан возраст молодых сотрудников.

Таблица 1. Участники проекта из ЛФВЭ:

№	Имя	Обязанности	FTE
1	Бабкин В.	MRPC	0.2
2	Буряков М.	MRPC	0.2
3	Дмитриев А.	MRPC	0.5
4	Киреев В.	Анализ, набор данных	0.5
5	Колесников Р.	MRPC	0.3
6	Колесников В.	Анализ	0.1
7	Ленивенко В.	Анализ, набор данных	0.1
8	Малахов А.	Анализ, набор данных	0.3
9	Мелкумов Г.	Анализ, набор данных	0.8
10	Румянцев М.	MRPC	0.2
11	Зайцев А.	Анализ, набор данных	0.8
Σ			4.0

Таблица 2. Участники проекта из ЛЯП:

№	Имя	Обязанности	FTE
1	Лыкасов Г.	Теория	0.1
2	Любушкин В.	Анализ, набор данных	0.2
3	Попов Б.	Анализ	1.0
4	Терещенко В.	MRPC, набор данных	0.3
Σ			1.6

Таблица 3. Возраст молодых участников проекта.

№	Имя	Возраст (лет)
1	Бабкин В.	37
2	Буряков М..	29

3	Дмитриев А.	28
4	Киреев В.	30
5	Колесников Р.	35
6	Ленивенко В.	30
7	Румянцев М.	29
8	Зайцев А.	29

#### 4. Оценка бюджета проекта (форма №26), расходы на 3 года

Форма №26

Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для обеспечения проекта НА61 (участие ОИЯИ)

Расходы, ресурсы, источники финансирования		Стоимость (к\$) Потребности в ресурсах		Предложение Лаборатории в распределении финансов и ресурсов					
				2022		2023		2024	
		Тема 1087	Тема 1124	Тема 1087	Тема 1124	Тема 1087	Тема 1124	Тема 1087	Тема 1124
Расходы	Основные узлы оборудования, работа по его обновлению, настройке и т.д.	15	-	5	-	5	-	5	-
	Строительство / ремонт помещений	-	-	-	-	-	-	-	-
	Материалы	270	-	140	-	110	-	20	-
Требуемые ресурсы	Нормо-час	Конструкторское бюро ЛФВЭ	-	-	-	-	-	-	-
		Опытное производство ОИЯИ	-	-	-	-	-	-	-
		Опытное производство ЛФВЭ	-	-	-	-	-	-	-
		Nuclotron	-	-	-	-	-	-	-
Σ		285	-	145	-	115	-	25	-
ИТОГО:		285		145		115		25	
Источник финансирования	Бюджет. Тема 1087	285		145		115		25	

Тема 1087 - ЛФВЭ.

Тема 1124 - ЛЯП

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА



А.И. Малахов

5. Смета затрат по проекту (Форма № 29)

Форма №29

Предполагаемые расходы по проекту: «Исследование рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на ускорителе SPS в ЦЕРН (NA61/SHINE - SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment)»

№	Наименование статей затрат	Полная стоимость (тыс.долл.)		2022		2023		2024	
		Тема 1087	Тема 1124	Тема 1087	Тема 1124	Тема 1087	Тема 1124	Тема 1087	Тема 1124
1.	Ускоритель (Нуклотрон), час	-	-	-	-	-	-	-	-
2.	Компьютерная связь	3	-	1	-	1	-	1	-
3.	Конструкторское бюро ЛФВЭ	-	-	-	-	-	-	-	-
4.	Опытное производство ЛФВЭ	-	-	-	-	-	-	-	-
5.	Материалы	270	-	140	-	110	-	20	-
6.	Оборудование	15	-	5	-	5	-	5	-
7.	Оплата НИР	-	-	-	-	-	-	-	-
8.	Командировочные расходы, в том числе:	178	24	60	8	60	8	58	8
	(а) в страны нерублевой зоны	150	12	50	4	50	4	50	4
	b) в города стран рублевой зоны	4	-	2	-	2	-	-	-
	с) по протоколам	24	12	8	4	8	4	8	4
	Σ	466	24	206	8	176	8	84	8
	Итого по прямым расходам:	490		214		184		92	

Тема 1087 – ЛФВЭ

Тема 1124 - ЛЯП

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

А.И. Малахов

ДИРЕКТОР ЛФВЭ

В.Д. Кекелидзе

ДИРЕКТОР ЛЯП

В.А. Бедняков

ВЕДУЩИЙ ИНЖЕНЕР-ЭКОНОМИСТ ЛФВЭ

Г.Г. Волкова

ВЕДУЩИЙ ИНЖЕНЕР-ЭКОНОМИСТ ЛЯП



## 6. Сильные и слабые стороны, возможности, угрозы

Сильные стороны проекта:

- завершение создания времяпролетной TOF-стены высокого разрешения;
- соответствие программе по физике;
- наличие действующей экспериментальной установки с уникальными параметрами;
- собран большой объем экспериментальных данных по протонно-ядерным и ядерно-ядерным взаимодействиям в широком диапазоне энергий (от 13 до 158А ГэВ)
- большой опыт анализа экспериментальных данных;
- большое количество молодых сотрудников;
- возможность обучения молодежи для проекта NICA.

В проекте вряд ли можно было найти слабые места.

У проекта есть возможность привлечь больше молодых физиков, которые также будут обучаться для проекта NICA.

## 7. Список литературы

1. A. Aduszkiewicz, ..., V.Babkin, M.Buryakov, A.Dmitriev, V.Golovatyuk, V. A. Kireyeu, V.I.Kolesnikov, A.Krasnoperov, V.V.Lyubushkin, A.I.Malakhov, V.Matveev, G.L.Melkumov, B.A.Popov, M.Rumyantsev et al., Phys. Rev. C 102 no. 1, (2020) 011901.
2. A. Acharya, ..., V.Babkin, M.Buryakov, A.Dmitriev, V.Golovatyuk, V. A. Kireyeu, V.I.Kolesnikov, A.Krasnoperov, V.V.Lyubushkin, A.I.Malakhov, V.Matveev, G.L.Melkumov, B.A.Popov, M.Rumyantsev et al. Measurements of  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ , p and anti-p spectra in 7Be+9Be collisions at beam momenta from 19A to 150A GeV/c with the NA61/SHINE spectrometer at the CERN SPS. Eur. Phys. J. C (2021) 81:73.
3. A. Aduszkiewicz, ..., V.Babkin, M.Buryakov, A.Dmitriev, V.Golovatyuk, V. A. Kireyeu, V.I.Kolesnikov, A.Krasnoperov, V.V.Lyubushkin, A.I.Malakhov, V.Matveev, G.L.Melkumov, B.A.Popov, M.Rumyantsev et al. Measurements of  $\Xi^-$  and anti- $\Xi^+$  production in proton-proton interactions at  $\sqrt{s_{NN}} = 17.3$  GeV in the NA61/SHINE experiment. Eur. Phys. J. C (2020) 80:833.
4. N. Davis [NA61/SHINE Collaboration]. Searching for the critical point of strongly interacting matter in nucleus-nucleus collisions at CERN SPS. arXiv:2002.06636v1 [nucl-ex] 16 Feb 2020.
5. A.I.Malakhov, G.I.Lykasov. Mid-rapidity dependence of pion production in p-p and A-A collisions. Eur. Phys. J. A (2020) 56: 114.
6. Gennady Lykasov and Alexander Malakhov. Hadron production in pp and AA collisions at mid-rapidity within self-similarity approach. E Web of Conferences PJ 204, 01022 (2019).
7. A. Aduszkiewicz et al., [NA61/SHINE Collab.] Search for an exotic  $S = -2$ ,  $Q = -2$  baryon resonance in proton-proton interactions at  $\sqrt{s_{NN}} = 17.3$  GeV. Phys. Rev. D 101 no. 5, (2020) 051101, arXiv:1912.12198 [hep-ex].
8. A. Aduszkiewicz et al., [NA61/SHINE Collab.] Measurement of  $\phi$  meson production in p + p interactions at 40, 80 and 158 GeV/c with the NA61/SHINE spectrometer at the CERN SPS. Eur. Phys. J. C 80 no. 3, (2020) 199, arXiv:1908.04601 [nucl-ex].

9. A. Aduszkiewicz et al., [NA61/SHINE Collab.]  $K^*(892)0$  meson production in inelastic p+p interactions at 158 GeV/c beam momentum measured by NA61/SHINE at the CERN SPS. Eur. Phys. J. C 80 no. 5, (2020) 460, arXiv:2001.05370 [nucl-ex].
10. A. Aduszkiewicz et al., Two-particle correlations in azimuthal angle and pseudorapidity in central 7Be+9Be collisions at the CERN Super Proton Synchrotron [NA61/SHINE Collab.] arXiv:2006.02153 [nucl-ex].
11. A. Aduszkiewicz et al., [NA61/SHINE Collab.] Measurements of hadron production in  $\pi^+ + C$  and  $\pi^+ + Be$  interactions at 60 GeV/c. Phys. Rev. D 100 no. 11, (2019) 112004, arXiv:1909.06294 [hep-ex].
12. R. R. Prado, [NA61/SHINE Collab.] Recent results from the cosmic ray program of the NA61/SHINE experiment. EPJ Web Conf. 208 (2019) 05006, arXiv:1810.00642 [hep-ex].
13. A. Aduszkiewicz, [NA61/SHINE Collaboration Collab.], "Study of Hadron-Nucleus and Nucleus-Nucleus Collisions at the CERN SPS: Early Post-LS2 Measurements and Future Plans," Tech. Rep. CERN-SPSC-2018-008. SPSC-P-330-ADD-10, CERN, Geneva, Mar, 2018. <https://cds.cern.ch/record/2309890>.
14. A. Aduszkiewicz, [NA61/SHINE Collaboration Collab.], "Reply to the SPSC questions on Addendum CERN-SPSC-2018-008 entitled Study of Hadron-Nucleus and Nucleus-Nucleus Collisions at the CERN SPS: Early Post-LS2 Measurements and Future Plans," Tech. Rep. CERN-SPSC-2018-019. SPSC-P-330-ADD-11, CERN, Geneva, Jun, 2018. <https://cds.cern.ch/record/2621751>.
15. 2020. Technical Design Reports for upgrade of the NA61/SHINE detector subsystems, <https://edms.cern.ch/document/2422986/1>.
16. A.I.Malakhov, V.A.Matveev. New results and research perspectives of experiment NA61/SHINE on SPS at CERN. JINR News, No.3, 2020, pp.12-17.
17. A. Aduszkiewicz, [NA61/SHINE Collaboration Collab.], "Study of Hadron-Nucleus and Nucleus-Nucleus Collisions at the CERN SPS: Early Post-LS2 Measurements and Future Plans," Tech. Rep. CERN-SPSC-2018-008. SPSC-P-330-ADD-10, CERN, Geneva, Mar, 2018. <https://cds.cern.ch/record/2309890>.
18. "Minutes of the 130th Meeting of the SPSC, Thursday and Friday, 7-8 June 2018," Tech. Rep. CERN-SPSC-2018-020. SPSC-130, CERN, Geneva, Jun, 2018. <http://cds.cern.ch/record/2622174>.
19. "Minutes of the 232nd meeting of the Research Board, held on 11 March 2020," Tech. Rep. CERN-DG-RB-2020-495. M-232, CERN, Geneva, Mar, 2020. <http://cds.cern.ch/record/2712812>.
20. Georgy Melkumov (NA61 Collaboration). Recent results of strong interaction program from NA61/SHINE experiment at CERN SPS. EPJ Web of Conferences 204, 01010 (2019).
21. Alexander Malakhov and Gennady Lykasov. Analytical description of hadron production in hadron-hadron and nuclear-nuclear collisions in the mid-rapidity region. EPJ Web of Conferences 204, 01021 (2019).
22. Report from the NA61/SHINE experiment at the CERN SPS. The NA61 Collaboration. CERN-SPSC-2020-023 / SPSC-SR-278.

## 8. Приложение

### 8.1. Рецензия проф. В. Булова

#### Отзыв рецензента на продление проекта NA61/SHIN (Участие ОИЯИ)

NA61/SHINE - это многоцелевой эксперимент по изучению адрон-протонных, адрон-ядерных и ядро-ядерных столкновений. Широкий диапазон импульсов частиц пучка, от пионов до ядер свинца, вместе с большим акцептансом и высоким разрешением детектора NA61/SHINE дает уникальную возможность выполнять необходимые измерения.

Предлагаемый проект является продолжением успешного участия группы сотрудников Лаборатории физики высоких энергий им. Векслера и Балдина и Лаборатории ядерных проблем им. Джелепова ОИЯИ в эксперименте NA61/SHINE на суперпротонном синхротроне (SPS) ЦЕРН.

Предлагается продолжить изучение свойств адронной и ядерной фрагментации в процессах с адронными и ядерными пучками. Более подробно описаны результаты поиска критической точки на фазовой диаграмме ядерной материи путем сканирования энергии и атомных номеров взаимодействующих ядер.

Анализ данных продолжается в следующих областях:

- образование легких ядер при ядерных взаимодействиях;
- рождение гиперонов в  $Be+Be$ ,  $Ar+Sc$ ,  $Xe+La$ ,  $Pb+Pb$  взаимодействиях;
- образование антиматерии в ядро-ядерных взаимодействиях.

Коллаборация NA61 провела большую работу по модернизации установки в 2019-2021 годах. Физики из Лаборатории физики высоких энергий создали новую систему определения времени пролета на основе детекторов MRPC. Эта система должна быть дополнена еще одной стенкой времени пролета для регистрации частиц обоих знаков заряда в 2022 году. Это не очень большая работа, так как газовая система уже создана для обеих стенок и есть резерв для производства детекторов.

В настоящем документе дается обзор программы физических исследований релятивистских взаимодействий ядер и описываются уникальные экспериментальные результаты, полученные за последние три года при активном участии сотрудников ОИЯИ в проекте NA61. Есть также планы совместной работы в рамках эксперимента на период 2022-2024 годов.

Прежде всего, сейчас необходимо провести анализ огромного количества набранных данных, провести полную модернизацию установки и обеспечить выполнение сеансов.

В эксперименте проводится всестороннее и последовательное изучение адронных взаимодействий, начиная с элементарных нуклон-нуклонных процессов и заканчивая столкновениями тяжелых ионов с различными атомными номерами и энергиями пучка (20A·ГэВ-158 A·ГэВ).

Участники проекта являются соавторами многочисленных публикаций и презентаций на эту тему, которые широко цитируются в мировой литературе.

Дальнейшее участие в эксперименте NA61 позволит физикам продолжить систематическое изучение ядерных взаимодействий, начиная от легких ядер и заканчивая тяжелыми, включая ядра средних размеров. Для этой программы исследования на установке NA61 чрезвычайно ценны и все еще вне конкуренции из-за уникальных параметров установки и наличия пучков ядер на SPS в ЦЕРНЕ.

Важно подчеркнуть, что диапазон импульсов пучка, обеспечиваемый SPS для NA61/SHINE, очень важен для сообществ тяжелых ионов, нейтрино и космических лучей. Во всем мире предпринимаются усилия по созданию новых установок, обеспечивающих ионные и адронные пучки в диапазоне импульсов пучка CERN SPS. Это установки с фиксированными мишенями на FAIR, Германия, и J-PARC, Япония, а также коллайдерная установка NICA, Россия. Они начнут работать после того, как будут получены основные результаты проекта. Данные с коллайдерных установок, как правило, дополняют соответствующие результаты на фиксированных мишенях. В частности, измерения очарованных адронов возможны только на установках с фиксированными мишенями, которые обеспечивают достаточно высокую энергию столкновения и скорость набора данных.

NA61/SHINE - это единственный эксперимент, который проводит требуемые измерения в ближайшем будущем. Кроме того, необходимая работа NA61/SHINE после второго длительного отключения ускорителей в ЦЕРНе позволила бы физикам при необходимости эффективно расширить программу новых измерений.

Кроме того, участие группы ОИЯИ в эксперименте NA61 необходимо в рамках подготовки молодых специалистов для проекта NICA. По физике, близкой к программе NICA, в рамках проекта NA61 защищены две докторские и три кандидатские диссертации. В ближайшее время планируется подготовить две кандидатские и докторскую диссертации с использованием результатов эксперимента NA61 и моделирования для проекта NICA.

Опытные сотрудники, защитившие докторские и кандидатские диссертации по результатам эксперимента NA61, в настоящее время успешно работают над проектом NICA.

Скромные финансовые запросы вполне оправданы для получения физических результатов и, как ожидается, станут весомым вкладом в исследовательскую программу ОИЯИ.

Необходимо подчеркнуть, что участие ОИЯИ в эксперименте NA61 очень важно, поскольку исследовательская программа этого эксперимента лежит в основном потоке долгосрочной программы в области релятивистской ядерной физики в ОИЯИ. Она дополняет исследования, проводимые на Нуклотроне (ОИЯИ), RHIC (БНЛ), а полученные экспериментальные результаты необходимы для планирования исследований на ускорительных комплексах NICA (ОИЯИ) и FAIR (ГСИ).

Из вышесказанного видно, что участие группы ОИЯИ в анализе экспериментальных данных NA61 и новых измерениях на этой установке является плодотворным и следует рекомендовать продление участия группы ОИЯИ на следующие 3 года с первым приоритетом.

Доктор физ.мат наук,  
профессор, главный научный сотрудник  
ЛТФ ОИЯИ



В.В.Буров

20.03.2021

## 8.2. Рецензия д.ф.-м.н. А. Балдина

### Отзыв рецензента о продлении проекта NA61/SHINE (участие ОИЯИ)

Эксперимент NA61 использует для исследований пучки тяжелых ионов суперпротонного синхротрона (SPS) ЦЕРН с энергией 20А·ГэВ - 158 А·ГэВ и также более легкие вторичные ядра.

Группа физиков из ОИЯИ активно участвует в исследованиях в рамках эксперимента NA61. Коллаборация NA61 провела большую работу по модернизации установки в 2019-2021 годах. Инженеры и физики Лаборатории физики высоких энергий создали новую времяпролетную систему регистрации, основанную на детекторах MRPC, которая является ключевым детектором для идентификации заряженных частиц. В 2022 году установка будет дополнена еще одной быстрой времяпролетной системой для регистрации частиц обоих знаков заряда.

Проект NA61 имеет широкую исследовательскую программу в наиболее интересной области релятивистской ядерной физики: исследование промежуточной области энергий от единиц до сотен ГэВ/нуклон для различных типов взаимодействующих ядер.

Первоначально программа исследований NA61/SHINE включала измерения выходов заряженных частиц в p+p и центральных столкновениях ядер  ${}^7\text{Be} + {}^9\text{Be}$ , Ar+Sc, p+Pb и Xe + La при импульсах 13, 19, 30, 40, 75, 150/158 ГэВ/с на нуклон. Затем исследовательская программа NA61/SHINE была расширена – теперь она включает в себя изучение коллективных явлений при столкновениях ядро-ядро в одном и том же энергетическом диапазоне.

К настоящему моменту уже получены экспериментальные данные по протон-протонным столкновениям и реакциям p+Pb, Be+Be, Ar+Sc, Xe+La и Pb+Pb. Таким образом, была получена богатая информация по программе набора данных в NA61/SHINE. Особенно важным представляется тот факт, что экспериментальные данные включают реакции с легкими ядрами, начиная с протонов, до наиболее тяжелых ускоряемых ядер.

Необходимо подчеркнуть, что результаты эксперимента вдохновили некоторые теоретические исследования, особенно те, которые относятся к доказательству начала деконфайнмента при пониженной энергии. Эти исследования планируется продолжить и в дальнейшем.

Сотрудники ОИЯИ внесли значительный вклад в создание времяпролетной системы измерения и анализ полученных экспериментальных результатов. Эта часть эксперимента была полностью возложена на группу ЛФВЭ: набор данных, анализ данных и публикация физических результатов. Сотрудничество в рамках NA61 очень эффективно и



одновременно плодотворно для обоих институтов: ЦЕРН и ОИЯИ. В ОИЯИ по результатам эксперимента NA49/NA61 было защищено три кандидатские и две докторские диссертации.

Продолжение этого сотрудничества обеспечит более глубокое понимание свойств ядерной материи при релятивистских энергиях. Участие ОИЯИ в эксперименте NA61 также очень важно для подготовки молодых ученых ОИЯИ для проекта NICA, физическая программа которого содержит задачи, близкие задачам проекта NA61. Опыт работы команды ОИЯИ с различными детекторами на ионных пучках SPS в ЦЕРНЕ трудно переоценить, как и их участие в обработке и анализе данных.

Следует отметить, что релятивистская ядерная физика является одной из основных тематик ОИЯИ. А релятивистская ядерная физика в области промежуточных и низких энергий - основное направление исследований на строящемся коллайдере NICA.

Установка NA61 уникальна и, на мой взгляд, является лучшей в мире из действующих установок, нацеленных на исследования промежуточной области энергий в релятивистской ядерной физике.

Участие группы ОИЯИ в эксперименте NA61 является плодотворным. Полученные физические результаты, безусловно, способствуют укреплению научной репутации ОИЯИ. Кроме того, ожидаемые результаты, несомненно, будут признаны значительным вкладом в развитие долгосрочных исследовательских программ в области релятивистской физики тяжелых ионов в ОИЯИ. Рекомендую одобрить продление участия ОИЯИ в эксперименте NA61 в 2022-2024 годах с первым приоритетом в рамках запрашиваемых ресурсов.

Доктор физико-математических наук,  
начальник сектора ЛФВЭ ОИЯИ

24.02.2021



А.А.Балдин