

*Форма открытия (продления) Проекта /  
Подпроекта КИП*

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 202\_ г.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОТКРЫТИЯ / ПРОДЛЕНИЯ  
ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КРУПНОГО ИНФРАСТРУКТУРНОГО ПРОЕКТА  
ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ**

**1. Общие сведения о проекте / подпроекте крупного инфраструктурного проекта  
(далее КИП)**

**1.1. Шифр темы / КИП** (для продлеваемых проектов) – *шифр темы включает дату открытия, дата окончания не указывается, т. к. она определяется сроками завершения проектов в теме.*

**1.2. Шифр проекта / подпроекта КИП** (для продлеваемых проектов и подпроектов)

02-2-1123-2023/2025

**1.2. Лаборатория**

ЛЯП, ЛТФ, ЛИТ

**1.3. Научное направление**

Изучение фундаментальных взаимодействий в электрон-позитронных и адронных столкновениях

**1.4. Наименование проекта / подпроекта КИП**

BESIII

**1.5. Руководитель(и) проекта / подпроекта КИП**

Денисенко Игорь Игоревич

**1.6. Заместитель(и) руководителя проекта / подпроекта КИП (научный руководитель проекта/ подпроекта КИП)**

Жемчугов Алексей Сергеевич

## 2. Научное обоснование и организационная структура

### 2.1. Аннотация

Эксперимент BESIII на электрон-позитронном коллайдере BEPCII работает в ИФВЭ АН КНР (Пекин, Китай) начиная с 2008 года. В основные задачи эксперимента входят исследования в области спектроскопии адронов, проверка предсказаний квантовой хромодинамики, изучение распадов очарованных частиц, а также проверка предсказаний Стандартной модели и поиски "новой физики" за ее пределами. На сегодняшний день эксперимент BESIII играет ключевую роль в исследованиях чармония, очарованных частиц и тау-лептонов и является одним из лидеров в изучении экзотических XYZ-состояний, открытых за последние десятилетия.

Группа сотрудников ОИЯИ участвует в эксперименте BESIII с 2005 года. Данный проект нацелен на продолжение участия группы ОИЯИ в анализе данных BESIII для получения новых результатов в следующих областях: адронной спектроскопии и поиске экзотических адронов; изучении свойств рождения и распада состояний чармония и чармониеподобных структур; изучению функций фрагментации с-кварка в области низких энергий. В частности, предлагается следующие направления исследований: выполнить анализ каналов радиационных распадов  $J/\psi$  и  $\psi(2S)$  для подтверждения полученных ранее указаний на рождение скалярного глюбола; опубликовать полученные результаты измерения инклюзивного сечения прямого рождения состояний чармония в электрон-позитронной аннигиляции с энергией выше 4 ГэВ; измерить разности фаз между амплитудами сильного и электромагнитного взаимодействия в ряде эксклюзивных распадов  $J/\psi$ .

В настоящее время группа ОИЯИ является одним из ведущих разработчиков программного обеспечения в коллаборации BESIII. В рамках данного проекта будут продолжены работы по поддержке программных пакетов, разработанных ранее группой ОИЯИ. Также запланированы исследование и разработка алгоритмов машинного обучения для их последующего применения как в рамках эксперимента BESIII, так и в рамках других экспериментов.

Бюджет проекта составляет 175 тыс. долларов США на 2024-2028 год.

### 2.2. Научное обоснование (цель, актуальность и научная новизна, методы и подходы, методики, ожидаемые результаты, риски)

#### *Цели проекта*

Целями проекта являются исследование адронных спектров КХД и поиск экзотических состояний, изучение рождения и распадов состояний чармония, поиск экзотических состояний чармония и чармониеподобных структур и определение функций фрагментации с-кварка на данных эксперимента BESIII.

#### *Спектроскопия легких адронов и поиск скалярного и тензорного глюболов*

Гипотеза о существовании частиц, состоящих из глюонов, так называемых глюболов, была сформулирована около 50 лет назад. Сейчас такие частицы предсказываются в ряде непертурбативных модификаций КХД, включая решеточную КХД и дуальные модели (см. PLB 816,136227 (2021)). Однако в анализе экспериментальных данных существование таких состояний не было надежно подтверждено. В радиационных распадах  $J/\psi$  с аннигиляцией с-пары в глюоны возникают уникальные условия для рождения глюболов, и анализ соответствующих экспериментальных данных может пролить свет на их существование.

Результаты недавних вычислений в (unquenched) решеточной КХД предсказывают, что легчайшее глюобольное состояние обладает квантовыми числами скалярного глюбола и массой

близкой к 1,8 ГэВ. Идентификация глюболов в данных усложнена возможным их смешиванием с обычными мезонами с близкой массой и с теми же квантовыми числами и требует детального понимания свойств рождения и распада скалярных мезонов. Наиболее подходящим подходом для совместного анализа радиационных распадов  $J/\psi$  в различные мезонные состояния является использование К-матрицы или N/D метода. Такой анализ был проведен при определяющем вкладе группы ОИЯИ в BESIII [PLB 816,136227 (2021)], и в нем были получены указания на рождение скалярного глюбола. Недостатком анализа было отсутствие данных BESIII по много-мезонным (четырёх-мезонным и более) конечным состояниям, вследствие чего использовались грубые результаты коллаборации BESIII по анализу  $J/\psi \rightarrow \gamma 4\pi$ . Парциально-волновой анализ таких распадов, в частности  $J/\psi \rightarrow \gamma 4\pi 0$ , позволит получить ключевую информацию для подтверждения ранее полученных указаний на рождение скалярного глюбола.

Поиск тензорного глюбола ( $JPC=2^{++}$ ) тесно связан с предыдущей задачей. Решеточные вычисления предсказывают, что его массы находится в интервале 2,2 – 2,6 ГэВ. Упомянутые ранее указания на рождение скалярного глюбола позволяют оценить парциальную ширину радиационного распада  $J/\psi$  на тензорный глюбол, которая хорошо согласуется с решеточными вычислениями. В тоже время, сумма парциальных ширин радиационных распадов  $J/\psi$  на тензорные мезоны в 3 – 4 раза меньше предсказаний РКХД для глюбола. Это расхождение указывает на необходимость изучения ранее не исследованных каналов радиационных распадов  $J/\psi$ . Кроме того, в силу большего фазового объема и доступного интервала инвариантных масс, значительный интерес представляют радиационные распады  $\psi(2S)$  на  $\pi^0\pi^0$ ,  $K_S K_S$ ,  $\eta\eta$  и  $4\pi$  и конечные состояния. Беспрецедентная статистика распадов  $\psi(2S)$ , набранная в 2021 году коллаборацией BESIII, позволяет провести такие исследования.

#### *Изучение инклюзивного рождения состояний чармония*

Рождение состояний чармония является одним из основных инструментов изучения глюонной структуры адронов в эксперименте SPD [arXiv:1904.04779 – SPD CDR], а также в предложенной программе экспериментов с фиксированной мишенью на БАК [Phys.Rept.911,1(2021)] и EIC [arXiv:1212.1701 – EIC White Book]. При столкновении адронов происходит слияние глюонов с рождением пары  $c\bar{c}$  и ее последующей непертурбативной адронизацией в состояния чармония. В эксперименте распад  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$  может быть восстановлен и может использоваться для восстановления более тяжелых состояний чармония. Основной проблемой этого метода является недостаточное понимание механизма адронизации  $c\bar{c}$  пары.

Электрон-позитронная аннигиляция позволяет изучать механизмы рождения чармония без неопределенностей, связанных с начальными адронными состояниями. Такие данные по инклюзивному рождению  $J/\psi$ , полученные на В-фабриках, использовались при проверке универсальности матричных элементов НРКХД [PoS ICHEP2012,278 (2013)]. Было показано, что существуют значительные проблемы с одновременным описанием данных В-фабрик, фоторождения, дифференциальных сечений и поляризации, измеренных в коллайдерных экспериментах. Коллаборация BESIII набрала уникальные по объему данные для энергий столкновений вплоть до 4,95 ГэВ (около 5  $\text{fb}^{-1}$  выше 4,6 ГэВ). Новые измерения инклюзивных сечений рождения состояний чармония, их относительной величины и, что важнее всего, поляризации дадут важную информацию для разработки теоретических подходов и проверки их универсальности. Исключительный интерес представляют потенциальные измерения с  $\chi_c$  и  $\eta_c$  в силу крайней скудности имеющихся экспериментальных данных.

Кроме того, инклюзивное сечение рождения  $J/\psi$  and  $\psi(2S)$ , а также поляризация при энергиях столкновений выше 3,8 ГэВ могут быть чувствительными к рождению известных и неизвестных чармониеподобных состояний. Сравнение инклюзивного прямого рождения  $J/\psi$  и

$\psi(2S)$  с суммой эксклюзивных процессов может ограничить сечение неисследованных конечных состояний в  $e^+e^-$  аннигиляции.

Статья по сечению инклюзивного прямого рождения  $J/\psi$  в диапазоне энергий от 3,81 до 4,95 ГэВ, подготовленная группой ОИЯИ, проходит внутреннее реферирование в коллаборации BESIII. Эта работа создает задел для дальнейших исследований в этой области.

#### *Изучение функций фрагментации $c$ -кварка*

Функция фрагментации  $D_q^h(z)$  описывает вероятность найти адрон  $h$ , несущий долю энергии  $z$  исходного кварка, среди продуктов его адронизации. Из-за непертурбативной природы эти функции не могут быть выведены из основных принципов теории, но могут быть измерены экспериментально (см. например Rev.Mod.Phys.82,2489 (2010))

В отличие от функции фрагментации легких кварков, которые измерены с хорошей точностью, функции фрагментации  $c$ -кварка (CFF) известны довольно плохо. Так, фактически отсутствуют экспериментальные данные по CFF ниже энергий  $B$ -фабрик. Знание CFF критически важно для интерпретации измерений с  $D$ -мезонами в эксперименте SPD на коллайдере NICA. Монте-Карло моделирование с помощью Pythia8 показывает, что практически все события будут происходить в кинематической области, где CFF не измерялись.

В этом проекте мы предлагаем впервые выполнить анализ инклюзивного рождения  $D$ -мезонов в  $e^+e^-$  столкновениях в области энергий между чармонием и боттомонием. К настоящему моменту BESIII набрал уникальные по объему данные с общей светимостью в  $5 \text{ fb}^{-1}$  в интервале энергий от 4,60 ГэВ до 4,95 ГэВ. На первом этапе эти данные будут использованы для измерения инклюзивного сечения рождения пар  $D$ -мезонов. Информация о неполяризованных функциях фрагментации будет извлекаться из импульсных спектров  $D$ -мезонов. Информация о поляризованных FFC может быть получена из асимметрии Коллинза. Последняя извлекается из распределения по азимутальному углу между двумя плоскостями: первая содержит импульсы обоих  $D$ -мезонов, вторая – импульс одного из  $D$ -мезонов и направление пучков частиц.

Отбор событий будет основываться на восстановлении двух  $D$ -мезонов и по меньшей мере одного заряженного трека не ассоциированного с  $D$ -мезонами. Для минимизации комбинаторного фона  $D$ -мезоны будут реконструированы из распадов с простой топологией: не более трех заряженных частиц и не более одного  $\pi^0$  или  $\eta$ . Так можно восстановить около 15% всех распадов, что соответствует статистике в несколько тысяч событий на каждой энергии набора данных.

#### *Исследование и развитие алгоритмов реконструкции событий в детекторе BESIII с использованием методов машинного обучения*

В последние годы методы глубокого обучения приобретают все большую популярность благодаря их способности обнаруживать скрытые нелинейные зависимости в данных и распараллеливать операции линейной алгебры, лежащие в основе этих методов. Перспективность использования методов глубокого обучения нейронных сетей для решения задачи реконструкции событий связана с возможностью создания эффективных алгоритмов «глубокого трекинга», значительно превосходящих по быстродействию классические алгоритмы.

Два новых подхода к задаче трекинга были разработаны в рамках совместного проекта РФФИ и NSFC № 19-57-53002 и уже успешно применялись для распознавания треков в эксперименте BESIII [Никольская А. и др., Локальная стратегия отслеживания частиц с помощью

TrackNETv2 на внутреннем детекторе BES-III CGEM, Материалы конференции AIP (2021 г.) - Vol. 2377. - № 1. - С. 060004; Щавелев Э. и др., Глобальная стратегия отслеживания на основе графовой нейронной сети для внутреннего детектора BES-III CGEM, Материалы конференции AIP (2021) - Vol. 2377. - № 1. - С. 060001; Гончаров П. и др., Отслеживание  $BM@N$  с помощью новых методов глубокого обучения, EPJ Web of Conferences (2020), том. 226. - С. 03009].

Первый подход, TrackNetv3, основан на использовании рекуррентной нейронной сети (RNN), которая позволяет сочетать экстраполяцию трека с проверкой гипотезы о том, что набор точек принадлежит истинному треку и совместим с гладкой кривой. По сути, он воспроизводит идею фильтра Калмана с той разницей, что физические параметры, описывающие трек, аппроксимируются нейронной сетью с помощью синаптических весов, определяемых при ее обучении. Второй подход, RDGraphNet, использует графовую сеть и позволяет реализовать глобальный поиск треков в событии, что особенно привлекательно при анализе событий с большой множественностью. В ходе проекта эти подходы будут адаптированы для поиска и восстановления треков частиц в основном трековом детекторе эксперимента BESIII. Основная сложность исследования заключается в адаптации нейронных сетей для восстановления треков в трековых детекторах, где возникает лево-право неопределенность. Для прототипирования нейронных сетей и изучения качества их работы будет использован программный комплекс «Ариадна» [Гончаров П. и др., Ариадна: библиотека PyTorch для реконструкции треков частиц с использованием глубокого обучения, Материалы конференции AIP (2021), том. 2377. - № 1. - С. 040004].

Также будут разработаны алгоритмы на основе сверточных сетей для поиска кластеров в электромагнитном калориметре BESIII.

Еще одно применение методов машинного обучения – поиск вершин в событии. Программа LOOT применялась для решения задачи нахождения первичной вершины во внутреннем трековом детекторе BESIII. Эта программа основана на глубокой сверточной нейронной сети, которая обрабатывает все “хиты” в событии сразу, как трехмерное изображение. Благодаря улучшению функции потерь и применению подходящей метрики авторы [Е. Резвая, П. Гончаров, Ю. Нефедов, Г. Ососков, А. Жемчугов, Усовершенствования модели LOOT для нахождения первичной вершины на основе анализа результатов разработки, <http://ceur-ws.org/Vol-3041/138-142-paper-25.pdf>] получили оценку координат первичной вершины с приемлемой точностью.

За годы работы в эксперименте BESIII отлажена процедура реконструкции событий на основе классических алгоритмов. Сравнение результатов ее работы и алгоритмов машинного обучения позволит детально изучить эффективность последних, а также их устойчивость к шуму и другим особенностям реальных данных. Эти результаты могут быть полезны не только для эксперимента BESIII, но и для планируемых коллайдерных экспериментов, в том числе и в рамках проекта NICA.

### **2.3. Предполагаемый срок выполнения** 2029

### **2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ** ЛЯП, ЛИТ, ЛТФ

#### **2.4.1. Потребности в ресурсах МИВК**

	<b>Распределение по годам</b>
--	-------------------------------

<b>Вычислительные ресурсы</b>	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
Хранение данных (ТБ)					
- EOS	-	-	-	-	-
- Ленты	-	-	-	-	-
Tier 1 (ядро-час)	-	-	-	-	-
Tier 2 (ядро-час)	120000	120000	120000	120000	120000
СК «Говорун» (ядро-час)					
- CPU	-	-	-	-	-
- GPU	-	-	-	-	-
Облака (CPU ядер)	60000	60000	60000	60000	60000

## 2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации

<b>Организация</b>	<b>Страна</b>	<b>Город</b>	<b>Участники</b>	<b>Тип соглашения</b>
Коллаборация BESIII	Китай, США, Германия, Италия, Россия, Нидерланды, Швеция, Корея, Япония, Индия, Пакистан	Пекин	ИФВЭ АН КНР*	соглашение о сотрудничестве

\*Полный список участвующих институтов можно найти на официальном сайте коллаборации [bes3.ihep.cn](http://bes3.ihep.cn).

## 2.6. Организации-соисполнители (те сотрудничающие организации/партнеры без финансового, инфраструктурного участия которых выполнение программы исследований невозможно. Пример — участие ОИЯИ в экспериментах LHC в CERN)

ИФВЭ АН КНР

## 3. Кадровое обеспечение

### 3.1. Кадровые потребности в течение первого года реализации

<b>№ № п/п</b>	<b>Категория работника</b>	<b>Основной персонал, сумма FTE</b>	<b>Ассоциированный персонал, сумма FTE</b>
1.	научные работники	7.8	0.3
2.	инженеры		
3.	специалисты		
4.	служащие		
5.	рабочие		
	<b>Итого:</b>	<b>7.8</b>	<b>0.3</b>

### 3.2. Доступные кадровые ресурсы

#### 3.2.1. Основной персонал ОИЯИ

№ № п/п	Категория работников	ФИО	Подразделение	Должность	Сумма FTE
1.	научные работники	Бакина О.В. Бойко И.Р. Шелков Г.А. Дедович Д.В. Денисенко И.И. Гуськов А.В. Нефедов Ю.А. Егоров П.А. Погодин С.Н. Жемчугов А.С. Бытьев В.В. Кореньков В.В. Ососков Г.А. Пелеванюк И.С.	ЛЯП ЛЯП ЛЯП ЛЯП ЛЯП ЛЯП ЛЯП ЛЯП ЛЯП ЛЯП ЛТФ ЛИТ ЛИТ ЛИТ	н.с. с.н.с. в.н.с н.с. нач. сект. нач. отдела с.н.с. ст.-иссл. ст.-иссл. зам. нач. отд. с.н.с. н. рук. лаб. г.н.с. н.с.	1 0.3 0.1 0.3 0.5 0.1 1 1 1 0.5 0.5 0.1 0.2 0.2
2.	инженеры				
3.	специалисты				
4.	рабочие				
	<b>Итого:</b>				<b>7.8</b>

#### 3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ

№ № п/п	Категория работников	Организация-партнер	Сумма FTE
1.	научные работники	НИЦ «Курчатовский Институт» - ПИЯФ	0.3
2.	инженеры		
3.	специалисты		
4.	рабочие		
	<b>Итого:</b>		<b>0.3</b>

### 4. Финансовое обеспечение

#### 4.1. Полная сметная стоимость проекта / подпроекта КИП

Прогноз полной сметной стоимости (указать суммарно за весь срок, за исключением ФЗП).  
Детализация приводится в отдельной форме.  
175 тыс. USD.

#### 4.2. Внебюджетные источники финансирования

Предполагаемое финансирование со стороны соисполнителей/заказчиков — общий объем.

Руководитель проекта / подпроекта КИП \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ /

Дата представления проекта / подпроекта КИП в ДНОД \_\_\_\_\_

Дата решения НТС Лаборатории \_\_\_\_\_, номер документа \_\_\_\_\_

Год начала проекта / подпроекта КИП \_\_\_\_\_

(для продлеваемых проектов) — год начала работ по проекту \_\_\_\_\_

**Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления  
Проекта / Подпроекта КИП**

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах	Стоимость, распределение по годам				
			1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
	Международное сотрудничество (МНТС)	125	25	25	25	25	25
	Материалы						
	Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы)	50	10	10	10	10	10
	Пуско-наладочные работы						
	Услуги научно-исследовательских организаций						
	Приобретение программного обеспечения						
	Проектирование/строительство						
	Сервисные расходы (планируются в случае прямой принадлежности к проекту)						
<b>Необходимые ресурсы</b>	Ресурсы						
	— сумма FTE,	39	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8
	— ускорителя/установки,						
	— реактора,.....						



Источники и финансирования	Б ю д ж е т н ы е ср ед ст ва	Бюджет ОИЯИ ( <i>статьи бюджета</i> )						
	В не б ю д ж е т (д оп · с м е т а)	Вклады соисполнителей  Средства по договорам с заказчиками  Другие источники финансирования						

Руководитель проекта / подпроекта КИП \_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/

Экономист Лаборатории \_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/

## ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

НАИМЕНОВАНИЕ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

ШИФР ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

ШИФР ТЕМЫ / КИП

ФИО РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

СОГЛАСОВАНО

ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
ИНСТИТУТА

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ЛАБОРАТОРИИ

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ / КИП

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА /  
ПОДПРОЕКТА КИП

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

ОДОБРЕН ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

