

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

Объединенного института  
ядерных исследований  
академик РАН В.А. Матвеев



*(Handwritten signature)*

« 25 » 10 2019 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Раджабова Андрея Евгеньевича

«Адронные процессы в вакууме, горячей и плотной среде, поправки к аномальному магнитному моменту мюона в низкоэнергетической модели КХД», представленную к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика

Актуальными задачами современной физики элементарных частиц являются тест Стандартной Модели (СМ), поиск взаимодействий за рамками СМ и исследования новых состояний ядерной материи. Одной из фундаментальных величин для проверки СМ является аномальный магнитный момент мюона (АМММ), для которого с беспрецедентной точностью проверяется согласованность теоретических расчётов с экспериментальными измерениями. В настоящее время существует определенное расхождение между теорией и экспериментом. С точки зрения теории это расхождение требует еще более точных вычислений в следующих порядках теории возмущений, а также более реалистических расчетов вне теории возмущений, связанных с учетом адронных вкладов. С другой стороны для ответа на вопрос, является ли это расхождение физически значимым, нужны новые еще более точные эксперименты, которые в настоящее время проводятся в Лаборатории им. Ферми (США) и J-PARC (Япония). Такой прогресс позволит дать однозначный вывод о существовании или отсутствии вклада взаимодействий за рамками СМ в АМММ. Другой фундаментальной проблемой современной физики элементарных частиц является поиск смешанной фазы ядерной материи в столкновениях тяжёлых ионов. С этой целью в Объединенном институте ядерных исследований строится новый ускорительный комплекс НИКА. Экспериментальная программа комплекса после его ввода в строй и другие подобные эксперименты за рубежом существенно расширят знания о нетривиальной фазовой диаграмме квантовой хромодинамики (КХД) в переменных температуры, плотности, химического потенциала и других параметров ядерной материи. Следует подчеркнуть, что теоретические оценки вклада сильных взаимодействий в АМММ и исследование фазовой диаграммы КХД требуют привлечения методов вне рамок теории

возмущений. Одним из таких методов является использование кварковых моделей низкоэнергетической КХД, детально изученных в диссертационной работе. Поэтому выбор тематики диссертации является актуальным, а используемые методы расчетов современными.

Объем диссертационной работы составляет 238 страниц. Работа состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка литературы, включающего 346 наименований.

Во введении дан обзор текущего состояния исследований по теме диссертационной работы, кратко изложены содержание работы и положения, выносимые на защиту, а также список работ, на которых основана диссертация.

В первой главе автором рассмотрены основные способы построения кварковых моделей и изучены приложения таких моделей к различным процессам в адронном вакууме. Сформулированы модели с локальным и нелокальным сепарабельным ядром взаимодействия, обсуждаются различные варианты определения сохраняющихся токов в случае нелокального ядра взаимодействия. На основе кирального разложения автором диссертационной работы подробно изучен вывод низкоэнергетических соотношений Гольдбергера–Треймана, Гелл-Манна–Окса–Реннера и формулы Вайнберга для пионного рассеяния. Для пионного рассеяния вычислены  $s$ -,  $p$ -, и  $d$ -длины рассеяния во всех изотопических каналах, а также параметр наклона в  $s$ -волне которые оказываются в удовлетворительном согласии с известными феноменологическими данными. Большое внимание в диссертационной работе уделяется исследованию мезонных поправок, для этого автором применяется формализм, основанный на  $1/N_c$  счёте факторов различных диаграмм, где большой параметр  $N_c$  есть число цветов у кварков. Процессы редких распадов мезонов  $\eta \rightarrow \pi^0 \gamma \gamma$  и  $\rho(\omega) \rightarrow \pi^0(\eta) \pi^0 \gamma$  исследуются в рамках локальной модели Намбу–Иона-Лазинио. Отметим разумное согласие полученных результатов с известными экспериментальными результатами. Далее рассмотрен вклад глюонных степеней свободы в электромагнитный форм-фактор Паули для кварка на основе эффективной кварк-глюонной вершины, которая может быть мотивирована моделью вакуума КХД как жидкости инстантонов. Полученный непетурбативный форм-фактор изучен в широкой области энергий.

Во второй главе автор рассматривает приложения кварковой модели к процессам в горячей и плотной ядерной среде, которые возникают в столкновениях тяжёлых ионов при высоких энергиях. Как обсуждается в начале главы наиболее удобным способом введения температуры и химического потенциала в нелокальных моделях является известный формализм мнимого времени Мацубары. В §2.1-2.3 изучены мезонные флуктуации в рамках систематического расширения схемы  $1/N_c$  разложения на случай конечных температур. При конечной температуре получено удовлетворительное согласие с результатами вычислений в рамках решеточной КХД для поведения конденсата кварков и давления. Для связанных состояний каонов автором был найден новый физический эффект возникновения дополнительной «аномальной» моды, пропорциональной разности масс конститuentных кварков при конечной температуре и плотности, а также предложен способ обнаружения подобной моды на эксперименте. В §2.4 изучены возможные сигналы образования кварк-глюонной

плазмы для процессов, запрещённых в адронном вакууме.

Третья глава посвящена изучению адронного вклада в АМММ на основе использования кварковых моделей. Автором диссертационной работы исследованы вклады адронной поляризации вакуума и процесса рассеяния света на свете. Следует отметить, что адронный вклад рассеяния света на свете имеет наибольшую теоретическую неопределенность и является одним из наиболее значительных источников ошибки теоретических вычислений. В вычислениях, выполненных автором, вклад адронной поляризации вакуума используется для проверки предсказательной силы нелокальной кварковой модели и ее параметров. Тогда вклад процесса рассеяния света на свете, вычисленный в кварковой модели, дает однозначное предсказание. Отметим как полноту проведённых расчётов, учитывающих все возможные вклады в лидирующем порядке  $1/N_c$  разложения, так и попытку оценки точности модельных расчётов на основе различного выбора параметров кварковой модели.

В заключении обсуждаются возможные перспективы развития исследований, выполненных в диссертационной работе.

В целом диссертация написана подробно и ясно. Для результатов расчётов проводится систематическое сравнение с известными теоретическими оценками и экспериментальными результатами.

В качестве критических замечаний можно отметить следующее:

- В диссертационной работе приводятся различные способы введения внешних сохраняющихся нелокальных токов, но при этом не обсуждается будут ли они приводить к различным предсказаниям для физических процессов.
- Автором используются различные варианты локальных и нелокальных кварковых моделей. При этом было бы желательным разъяснить, какие из них и для каких процессов являются более предпочтительными.
- При исследовании электромагнитного форм-фактора Паули кварка на основе кварк-глюонной вершины, индуцированной взаимодействием с инстантонами, автором не обсуждаются вопросы калибровочной инвариантности для диаграмм с эффективными вершинами подобного рода.
- Способ оценки теоретической ошибки расчётов адронного вклада от процесса рассеяния света на свете на основе использования различных параметризаций может недооценивать эту ошибку, т.к. учитывается погрешность только в рамках нелокальной модели.
- Было бы интересно провести более глубокое сравнение с другими подходами, например с вычислениями, выполненными в дисперсионной технике.

В то же время указанные замечания не влияют на общую высокую оценку работы, посвящённой актуальным проблемам современной физики фундаментальных взаимодействий и выполненной на высоком научном уровне.

Текст автореферата диссертации правильно отражает ее содержание. Результаты,

представленные в диссертации, опубликованы в 22 статьях в ведущих российских и зарубежных рецензируемых научных журналах, докладывались автором на международных конференциях по физике высоких энергий, обсуждались на семинарах в российских и международных научных центрах и имеют высокую цитируемость.

Диссертация А.Е. Раджабова «Адронные процессы в вакууме, горячей и плотной среде, поправки к аномальному магнитному моменту мюона в низкоэнергетической модели КХД» представляет собой законченное научное исследование по актуальной тематике, отвечает всем требованиям Высшей аттестационной комиссии, установленным в п.9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённым постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, а ее автор Андрей Евгеньевич Раджабов, безусловно, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Материалы диссертации заслушаны на заседании тематического научного семинара «Физика адронов» в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ (ЛТФ ОИЯИ) от 20 сентября 2019 года и одобрены на заседании Научно-технического совета ЛТФ ОИЯИ от 3 октября 2019 года.

Лица, подписавшие отзыв, согласны на обработку персональных данных.

Директор ЛТФ ОИЯИ  
профессор, член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н.  
(01.04.02 - теоретическая физика)

Дмитрий Игоревич Казаков



Отзыв составил:

главный научный сотрудник  
сектора №2 Научного отдела теории  
фундаментальных взаимодействий ЛТФ ОИЯИ  
профессор, д.ф.-м.н. (01.04.02 – теоретическая  
физика)  
Тел.: +7(49621) 6-35-06  
e-mail: ivanovm@theor.jinr.ru

Михаил Алексеевич Иванов



Сведения о ведущей организации:

Международная межправительственная организация  
Объединенный институт ядерных исследований

Адрес организации:

141980, Российская Федерация, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6.

Тел.: +7 (49621) 6-50-59

e-mail: post@jinr.ru