

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию 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

Поиск новых взаимодействий за пределами Стандартной Модели (СМ) является чрезвычайно актуальной задачей физики высоких энергий. Одной из стратегий такого поиска является увеличение энергии сталкивающихся частиц, когда становится возможным рождение частиц за пределами СМ. Ярким примером такого подхода являются проводимые в настоящее время эксперименты на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе. Другой стратегией поиска является проведение экспериментов при сравнительно низких энергиях, при этом выделение возможного сигнала неизвестных в настоящее время частиц или взаимодействий требует как проведения прецизионных экспериментов с большой статистикой, так и возможности теоретических расчетов с высокой точностью. Одним из объектов, для которых возможны как прецизионные эксперименты, так и точные теоретические расчеты, является аномальный магнитный момент мюона –  $a_\mu$ .

В эксперименте, проведенном в Брукхейвенской национальной лаборатории была достигнута точность измерений данной величины 0,54 миллионной доли (ppm). В настоящее время активно ведется эксперимент в Лаборатории им. Ферми (США), в котором планируется увеличить точность экспериментального измерения  $a_\mu$  в четыре раза. Измерение  $a_\mu$  принципиально другим методом примерно с таким же улучшением точности готовится также в лаборатории J-PARC в Японии. Выделение возможного сигнала Новой Физики на основе сравнения экспериментальных измерений и предсказания

СМ требуют теоретических оценок с точностью как минимум не хуже экспериментальной, а желательно еще более точных.

В рамках Стандартной Модели в аномальный магнитный момент мюона дают вклад электромагнитные, слабые и сильные взаимодействия. Основной вклад приходится на квантовую электродинамику и известен в настоящее время с точностью, достаточной для будущих экспериментов. Вклад слабых взаимодействий существенно меньше и, хотя точность его знания заметно хуже, чем для вклада КЭД, она также вполне достаточна в сравнении с точностью планируемых экспериментов. Основная теоретическая ошибка связана с вкладом сильных взаимодействий, который определяется малыми передачами импульса, т.е. той областью, в которой известные методы фундаментальной теории сильных взаимодействий – квантовой хромодинамики, не могут использоваться, т.к. константа связи уже не является малым параметром, что требует применения непертурбативных подходов. На помощь приходят дисперсионные методы, позволяющие оценить лидирующий по постоянной тонкой структуры вклад сильных взаимодействий от адронной поляризации вакуума на основе экспериментальных данных по сечению электрон-позитронной аннигиляции в адроны. До недавнего времени таких данных, полученных как методом прямого сканирования на коллайдере ВЭПП-2М в Институте ядерной физики имени Г.И.Будкера СО РАН (ИЯФ) в Новосибирске, так и методом излучения из начального состояния (ISR) на установках ВаВаг в Стэнфорде и КЛОЕ во Фраскати, было достаточно для сравнения с экспериментом. Новые прямые измерения величины  $a_\mu$  требуют заметного повышения точности в  $e^+e^-$  секторе, так что дело за новым поколением экспериментов по измерению электрон-позитронной аннигиляции в адроны на установках ВЭПП-2000 (эксперименты КМД-3 и СНД в ИЯФ), BEPC2 (детектор BES III в Пекине), SuperKEKB (детектор Belle II в Цукубе).

Вклад от процесса рассеяния света на свете, подавленный постоянной тонкой структуры по сравнению с адронной поляризацией вакуума, представляет собой крайне сложную величину для оценок и теоретическая ошибка его вычисления имеет тот же порядок, что и ошибка от адронной

поляризации вакуума. Несмотря на недавние попытки развития дисперсионного подхода для данного вклада не существует надежных способов оценки на основе экспериментальных данных, а предсказания в рамках вычислений КХД на решетке также весьма ограничены в точности. Основным способом данного вклада в настоящее время являются модельные вычисления, при этом часто различные вклады оцениваются в разных подходах. Оценки вклада от процесса рассеяния света на свете в рамках систематического подхода, например в рамках кварковых моделей, согласованные как с феноменологией мезонов, так и асимптотиками КХД представляются крайне актуальными. Также весьма актуальными представляются теоретические исследования сильно взаимодействующей материи в экстремальных условиях исследований ввиду создания комплекса NICA в Объединенном Институте Ядерных Исследований в г. Дубна, нацеленного на поиск новых состояний барионной материи.

Диссертационная работа изложена на 238 страницах машинописного текста и состоит из введения, трех глав, заключения, шести приложений, списка литературы из 346 источников и основывается на 22 публикациях в научных журналах, все из списка ВАК.

Вся совокупность важнейших результатов диссертанта представлена в сформулированных им шести научных положениях. Положение 1 связано с исходным построением модели и проверки её соответствия низкоэнергетическим соотношениям и поэтому имеет отношение ко всем дальнейшим результатам, положение 2 посвящено изучению стабильности построенной модели к возможным поправкам на основе схемы  $1/N_c$  разложения и подчеркивает достоверность результатов, полученных в лидирующем порядке, положение 3 посвящено вкладу в аномальный магнитный момент мюона от процесса рассеяния света на свете в нелокальной кварковой модели, положения 4 и 5 связаны с приложениями модели к конкретным частным процессам, а положение 6 связано с предсказаниями, полученными в расчетах при конечной температуре и барионной плотности. Можно отметить следующее соответствие представленных в положениях результатов с фактическим печатным

материалом диссертации: так результаты положения 1, частично 2, 4, 5 изложены в главе 1 (нелокальная кварковая модель и процессы в вакууме), в главе 2 (исследование поведения в среде) получены результаты, представленные частично в положении 2, а также 6, а положению 3 соответствуют результаты, полученные в главе 3 (адронный вклад в аномальный магнитный момент мюона).

Наиболее интересным представляется результат, сформулированный в положении 3, однако его получение было бы невозможным без результатов в положении 1, а результаты положений 2 и 4 служат в качестве дополнений подтверждающих обоснованность сделанных предположений. Отметим, что в литературе представлены различные предсказания для вклада от процесса рассеяния света на свете, полученные в разнообразных подходах. Подход автора диссертационной работы отличается тем, что включает модельные оценки вкладов кварковой петли и связанных состояний мезонов единым систематическим образом. Достоверность результатов для вклада от процесса рассеяния света на свете связана с тем, что проверены как известные низкоэнергетические соотношения на основе кирального разложения в рамках модели, при этом на основе пионного рассеяния подтверждена правильность используемого набора диаграмм в лидирующем порядке  $1/N_c$  разложения с кварковой петлевой диаграммой и диаграммами с обменом мезоном, проверено, что поправки в следующем за лидирующем порядке  $1/N_c$  разложения к свойствам пиона в нелокальной модели действительно оказываются малыми, соответствие переходных форм-факторов псевдоскалярных мезонов известным экспериментальным измерениям для кинематики с одним реальным и одним виртуальным фотонами, соответствие уже тензора рассеяния фотона на фотоне известным асимптотикам КХД. Для случая конечной температуры и химического потенциала автором работы показан практический механизм реализации относительной роли  $1/N_c$  поправок, а также предсказаны возможные процессы, которые могут служить сигналами образования новых состояний вещества.

***В качестве замечаний можно отметить следующее:***

1. *Теоретическая/модельная ошибка адронного вклада процесса рассеяния света на свете представляется заниженной, т.к. не учитывает предположения, сделанные при построении модели.*
2. *Адронная поляризация вакуума, вычисленная в модели, сравнивается со значением, извлеченным из адронных распадов  $\tau$ -лептона, но не с данными по электрон-позитронной аннигиляции.*
3. *Нет четких выводов о зависимости результатов численных расчетов от величины массы кварков.*

Указанные пожелания и недочеты не имеют принципиального характера и не влияют на ценность рецензируемой работы.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Диссертация содержит умеренное количество опечаток. Все результаты, полученные в диссертационной работе, опубликованы в ведущих научных журналах и представлены на международных конференциях и семинарах.

Таким образом, диссертация Раджабова Андрея Евгеньевича является законченным исследованием, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические модели КХД в низкоэнергетической области, успешно примененные в том числе и для вычисления адронного вклада в аномальный магнитный момент мюона, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

На обработку персональных данных согласен

Официальный оппонент:

Эйдельман Семён Исаакович.



Эйдельман С.И.

Основное место работы, должность: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
главный научный сотрудник.

Ученая степень: доктор физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика ядра и элементарных частиц.

Почтовый адрес: 630090 Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 11.

Рабочий телефон : +7 383 3294376

E-mail: eidelman@inp.nsk.su

Подпись Эйдельмана Семёна Исааковича заверяю:

Дата: 8 ноября 2019 г.



**Башкова А.А.**

**Зав. канцелярией**