

**Отзыв официального оппонента
на диссертационную работу
Иванова Вячеслава Львовича
«Изучение процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$ с детектором КМД-3»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук
по специальности 1.3.15. «Физика атомных ядер и элементарных частиц,
физика высоких энергий»**

Аномальный магнитный момент мюона, $(g-2)_\mu$, в настоящий момент является одной из величин, наиболее точно вычисленных в рамках Стандартной модели. Это открывает широкий простор для поисков Новой физики через изучение отклонения экспериментально измеренной величины магнитного момента мюона от теоретических предсказаний. Расхождение составляет более четырех стандартных отклонений, что привлекает особое внимание научного сообщества к измерению аномального магнитного момента мюона. Точность теоретических вычислений ограничена неопределенностью адронного вклада, который может быть получен путем прецизионного измерения сечений рождения адронов в электрон-позитронной аннигиляции. Детектор КМД-3 хорошо приспособлен для подобного рода измерений, и изучение процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$, которому посвящена первая часть диссертации, – необходимый этап этой большой работы.

Хорошо отлаженная экспериментальная установка – основа любых измерений. Вторая часть диссертации посвящена разработке нового метода идентификации заряженных частиц с помощью жидкоксенонового многослойного калориметра КМД-3 – ключевой подсистемы установки. Эффективность разделения треков мюонов, электронов, пионов и каонов играет ключевую роль для выделения изучаемого процесса, дает возможность подавления фонов и, таким образом, обеспечивает возможность получения высококачественных экспериментальных данных. Предложенный в диссертации подход с применением алгоритмов машинного обучения позволяет достичь эффективного разделения конечных состояний $e^+e^-(\gamma)$ и $\pi^+\pi^-(\gamma)$ ниже порога рождения ϕ -резонанса и при отборе конечного состояния K^+K^- в области энергий системы центра инерции порядка 2 ГэВ. Таким образом **актуальность и важность** выполненной работы не вызывают сомнений.

Практическая значимость работы также очевидна: разработанная методика разделения сигналов от заряженных частиц в жидкоксеноновом калориметре КМД-3 открывает дорогу к созданию единой системы идентификации треков, использующей информацию с других подсистем установки: мюонной системы, CsI калориметра и дрейфовой камеры. Подходы, разработанные в предлагаемой работе, могут также быть использованы для

калориметра детектора будущей Супер чарм-тау фабрики, разрабатываемого в настоящее время.

Измеренные сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$ в диапазоне энергий системы центра инерции от 1,59 до 2,007 ГэВ представляют **научный интерес** сами по себе, а вычисленный вклад процесса $e^+e^- \rightarrow \phi\eta$ в аномальный магнитный момент мюона, несомненно, послужит лучшему пониманию природы расхождения наблюдаемых и теоретически определенных значений $(g-2)_\mu$. Важным является также тот факт, что вклад нерезонансного трехчастичного процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$ оказывается нулевым. Тот факт, что неопределенность полученных значений сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$ является рекордно низкой, подчеркивает несомненную **новизну** проделанной работы.

Приведенные в диссертации результаты были представлены на семинарах ИЯФ СО РАН и международных конференциях, опубликованы в трудах конференций и в статьях в рецензируемых журналах, в том числе входящих в список ВАК и индексируемых базой данных Scopus. Поэтому **обоснованность и достоверность** научных положений и выводов очевидна.

Диссертация Иванова В.Л. содержит 117 страниц, состоит из введения, двух глав и заключения, снабжена 99 рисунками. Библиографический перечень содержит 61 ссылку. Во **введении** дается описание структуры диссертации, указаны ее цели и изложены результаты предыдущих исследований по теме работы.

Первая глава посвящена изучению процесса $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$. Приводится краткое описание детектора КМД-3, набора данных, на котором проводилось исследование, приведен алгоритм отбора событий. В каждом диапазоне по энергии системы центра инерции определяется количество сигнальных событий и вычисляется Борновское сечение процесса. Изучен вклад промежуточных состояний ϕ и ϕ' . Из аппроксимации формы сечения получены параметры состояния ϕ' , оказавшиеся более точными, чем ранее измеренные коллаборацией BaBar. Оцениваются систематические ошибки измерений. Вычислен вклад процесса $e^+e^- \rightarrow \phi\eta$ в аномальный магнитный момент мюона.

Во **второй главе** приведено описание алгоритма процедуры идентификации заряженных частиц с помощью жидкоксенонового калориметра установки КМД-3. Приведено описание устройства LXe калориметра, перечислены переменные, отобранные для вычисления классификаторов BDT из пакета TMVA, предназначенного для решения задач машинного обучения. Показана необходимость точного моделирования отклика каналов калориметра для эффективного использования методов машинного обучения. Приведено описание процедуры калибровки каналов калориметра с использованием космических мюонов. Приведены результаты сравнения данных и моделирования до и после калибровки, спектры классификаторов BDT для каждой пары гипотез, а также для кумулятивных классификаторов. Приведены примеры использования подхода для разделения конечных состояний $e^+e^-(\gamma)$ и $\pi^+\pi^-(\gamma)$ в области энергий ниже порога

рождения ϕ -резонанса, а также пар заряженных каонов при более высоких энергиях.

В **заключении** подытожены результаты работы и обсуждаются области их возможного применения.

Несмотря на важность, актуальность, научную новизну описанных в диссертации исследований и достоверность полученных результатов, текст диссертации не лишен некоторого количества **недостатков** и **неточностей**, впрочем, не влияющих на уровень диссертационной работы. Наиболее важные из них перечислены ниже.

1. При описании критериев отбора событий в первой главе периодически используются величины, никак не описываемые в тексте. Например, в последнем предложении пункта «Отбор заряженных каонов» (стр. 13-14), указано «... мы применяем отбор $L_{2K} > -0,3$ ». Выбор величины «0,3» никак не обоснован. Ситуация повторяется в следующем пункте (последняя строка на стр. 15) «...и используем условие $\chi^2 < 75$ для отбора...». Обоснования выбора численного значения критерия «75» в тексте нет.
2. В главе 2.3 «Моделирование отклика полосковых каналов LХе калориметра» в списке введенных упрощений (стр. 49) точечный хит заменяется бесконечной заряженной нитью, что позволяет свести трехмерную задачу к двумерной. Никаких пояснений при этом не приводится. Не подвергая сомнению правильность последующих выкладок, хотелось бы поставить вопрос о правомерности такой замены, учитывая, что изменение размерности пространства, приводит к модификации основных уравнений электродинамики, в частности, закона Кулона.
3. При обсуждении результатов применения разработанного метода идентификации частиц с помощью жидкоксенонового калориметра не приводится полноценного сравнения с уже используемыми методами идентификации. В главе 2.7 приведены величины эффективности и подавления фона, ROC-кривые для использованных VDT-классификаторов, но нет указания, насколько использование алгоритмов машинного обучения выгоднее уже используемых методик.

Частое употребление жаргона и англицизмов («акцептанс», стр.12, «переаппроксимация», стр.28, и др.), использование непереведенного английского текста в большинстве иллюстраций, а также некоторая непоследовательность изложения (например, в строке 1-2 на стр. 55 указывается, что калибровка проводится в 2112 канале в каждом заходе, и лишь на стр. 57 говорится о том, что статистики в каждом заходе для данной процедуры недостаточно и фактически используются события нескольких ближайших суток) скорее можно отнести к небрежностям при написании работы, чем к серьезным недостаткам.

Приведенные выше замечания не снижают главных достоинств диссертационной работы. **Автореферат правильно отражает содержание диссертации.**

Считаю, что диссертация Иванова В.Л. представляет собой законченную квалификационную работу, которая выполнена на высоком уровне и соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий».

Я, Углов Тимофей Валерьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Иванова Вячеслава Львовича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

Углов Тимофей Валерьевич

кандидат физико-математических наук (специальность 01.04.16

– Физика атомного ядра и элементарных частиц),

высококвалифицированный старший научный сотрудник

Лаборатории тяжелых кварков и лептонов

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Физического института им. П.Н. Лебедева

Российской академии наук

Адрес: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53

E-mail: uglov.timofey@gmail.com

Подпись Углова Т.В. удостоверяю:

Савинов Сергей Юрьевич

Помощник директора ФИАН по научной работе,

доктор физико-математических наук

28.04.2023

