

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б. И. СТЕПАНОВА  
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»**

На правах рукописи  
УДК 539.12

**ГАВРИШ**  
Вадим Юрьевич

**ПУАНКАРЕ-КОВАРИАНТНАЯ КВАРКОВАЯ МОДЕЛЬ  
ЭЛЕКТРОСЛАБЫХ РАСПАДОВ МЕЗОНОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

**Минск 2020**

Работа выполнена в учреждениях образования «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины» и «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»

Научный руководитель: **Андреев Виктор Васильевич**,  
доктор физико-математических наук, доцент,  
профессор кафедры теоретической физики УО  
«Гомельский государственный университет имени  
Ф. Скорины»

Официальные оппоненты: **Левчук Михаил Иванович**,  
доктор физико-математических наук, главный  
научный сотрудник Центра «Фундаментальные  
взаимодействия и астрофизика» Института физики  
имени Б. И. Степанова НАН Беларуси  
**Макаренко Владимир Владимирович**,  
кандидат физико-математических наук,  
учёный секретарь НИУ «Институт ядерных  
проблем» Белорусского государственного универ-  
ситета

Оппонирующая организация: Государственное научное учреждение «Объединённый институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» НАН Беларуси

Защита состоится 10 апреля 2020 г. в 16.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.02 при Институте физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси по адресу: 220072, Минск, пр. Независимости, 68–2, тел. +375 17 2841559, e-mail: vyblyi@gmail.com.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Учёный секретарь совета  
по защите диссертаций, кандидат  
физико-математических наук

Выблый Ю. П.

## ВВЕДЕНИЕ

Атомы, ядра и адроны, как известно, представляют собой составные системы. В этой связи возникает необходимость как в моделях, служащих для описания связанных систем, так и в методиках вычисления характеристик элементарных частиц с учётом их внутренней структуры. В нерелятивистской динамике составных систем существуют апробированные методы, основанные на применении феноменологических потенциалов двухчастичного взаимодействия. Однако точность современных экспериментальных данных требует учёта релятивистских эффектов для составных систем в широкой области: от адронов до атомов. Эта необходимость продиктована, в частности, существованием адронов, содержащих лёгкие  $u$ -,  $d$ - и  $s$ - кварки. Поскольку такие системы являются чисто релятивистскими, разработка соответствующих моделей с целью вычисления электрослабых характеристик составных квантовых объектов является важной и актуальной задачей.

Электрослабые распады псевдоскалярных и векторных мезонов всегда были удобным средством для апробации различных теоретических подходов и моделей по изучению структуры адронов и получению информации о картине взаимодействия кварков. Интерес к процессам подобного рода возрос в последнее время, поскольку были получены соответствующие экспериментальные данные на различных ускорителях. Описание подобного рода процессов в рамках квантовой хромодинамики (далее КХД) становится затруднительным в силу особенностей  $SU(3)$ -теории; также поведение бегущей константы КХД  $\alpha_S(q^2)$  при малых энергиях делает теорию возмущений неприменимой для решения подобных задач. Эти и другие известные трудности привели к появлению альтернативных подходов и КХД-мотивированных моделей по описанию связанных кварк-антикварковых систем в непертурбативных областях.

В теоретико-групповых подходах, служащих для описания связанных состояний, отметим методы, основанные на группе Пуанкаре, которая к данному моменту времени уже достаточно хорошо исследована. На базе данной группы основан раздел физики элементарных частиц, который носит название релятивистская гамильтонова динамика (РГД), или пуанкаре-инвариантная квантовая механика (ПикМ). Дирак показал, что введение оператора взаимодействия в группе Пуанкаре не является однозначным и предложил три способа разделения операторов на кинематическую и динамическую подгруппы. Предложенные способы разделения операторов, которые сейчас называют мгновенная, точечная и фронтовая динамики, были позже обобщены на случаи двух и более частиц. Впервые методика описания двухчастичной взаимодействующей системы была развита в рамках мгновенной формы динамики; позже подобная техника была обобщена на точечную и фронтовую форму.

Необходимость дальнейшего развития релятивистских кварковых моделей, основанных на пуанкаре-инвариантной квантовой механике, продиктовано получением более точных экспериментальных данных по электромагнитным характеристикам связанных состояний и различным форм-факторам мезонов. Так коллаборациями KLOE-2, NA60 и HERMES были измерены форм-факторы векторных мезонов в реакциях  $\phi \rightarrow \pi\gamma^*$ ,  $\omega \rightarrow \pi\gamma^*$  и  $\phi \rightarrow \eta\gamma^*$ . Полученные данные позволяют не только определить форм-фактор  $F_{VP\gamma^*}(q^2)$ , но и оценить магнитный момент и среднеквадратичный радиус кварков. Также отметим появление новых экспериментальных данных по распадам канала  $V \rightarrow Pe^+e^-$  (так называемые распады Далица), полученные коллаборациями A2, KLOE-2, NA60 и LERTON-G для лёгких мезонов. Помимо вышперечисленных распадов векторных мезонов следует упомянуть обновление данных по каналам распада тяжёлого  $\tau$ -лептона в адроны, что позволило измерить лептонные константы распадов векторных  $\rho^+$ - и  $K^{*+}$ -мезонов. Обновление и уточнение экспериментальных данных по вышперечисленным процессам мотивировало теоретическое описание составных кварковых систем.

Диссертационная работа посвящена вычислению электромагнитных характеристик связанных двухчастичных кварковых систем в модели, основанной на точечной форме пуанкаре-инвариантной квантовой механики. В развитом формализме получены интегральные представления лептонных констант распадов псевдоскалярных и векторных мезонов, а также константы псевдоскалярной плотности с последующим вычислением параметров модели. Отличительной чертой предложенного подхода является расчёт базовых параметров модели без учёта явного вида потенциала кварк-антикваркового взаимодействия. Указанная процедура становится возможной при использовании константы псевдоскалярной плотности и токовых масс кварков.

Развиваемая в диссертации методика расчёта наблюдаемых связанных систем обобщена на случай адронных переходов псевдоскалярных и векторных мезонов с испусканием  $\gamma$ -кванта. Отличительной чертой предложенного анализа является использование векторов состояний в представлении Гейзенберга, где сильные взаимодействия учтены точно. Развитый формализм использован для вычисления интегрального представления константы распада канала  $V(P) \rightarrow P(V)\gamma$ , что дало возможность оценить магнитные моменты кварков и углы смешивания псевдоскалярных мезонов с учётом глюонной компоненты. Проведено исследование поведения форм-фактора  $F_{VP\gamma^*}(q^2)$  векторных мезонов для распада  $V \rightarrow Pl^+\ell^-$  в зависимости от переданного импульса лептонной паре. Показано, что расчёты форм-факторов векторных  $\phi$ - и  $\omega$ -мезонов в предложенной кварковой модели согласуются с экспериментальными данными коллабораций A2, KLOE-2 и NA60.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Связь с научными программами и темами

Исследования по теме диссертации выполнены в рамках государственной программы научных исследований «Конвергенция 2020», подпрограмма 11.2 «Микромир, плазма и Вселенная», задание 2.1.05 «Разработка методов вычисления электрослабых характеристик квантовых систем» (номер госрегистрации 2016079, 2016 – 2020 гг.).

### Цель и задачи исследования

Целью работы является построение релятивистской кварковой модели, основанной на точечной форме пуанкаре-инвариантной квантовой механики, для расчётов характеристик лептонных и радиационных распадов псевдоскалярных и векторных мезонов, состоящие из кварков лёгкого сектора. Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. В рамках точечной формы пуанкаре-инвариантной квантовой механики разработать методику вычисления интегральных представлений констант лептонных распадов псевдоскалярных и векторных мезонов, а также радиационных переходов с учётом структурных характеристик кварков.
2. На основе разработанной методики получить интегральные представления констант радиационных распадов мезонов, электромагнитных форм-факторов процесса  $V(P) \rightarrow P(V)\ell^+\ell^-$  и константы псевдоскалярной плотности.
3. Разработать процедуру определения параметров релятивистской кварковой модели исходя из требования соответствия теоретических расчётов с экспериментальными данными.
4. Провести самосогласованный расчёт констант лептонных и радиационных распадов псевдоскалярных и векторных мезонов, состоящих из  $u$ -,  $d$ - и  $s$ -кварков в рамках разработанной релятивистской кварковой модели.
5. Изучить поведение форм-фактора  $F_{VP\ell^+\ell^-}(q^2)$  в зависимости от переданного импульса для распадов  $\omega \rightarrow \pi^0\ell^+\ell^-$ ,  $\phi \rightarrow \pi^0\ell^+\ell^-$  и  $\phi \rightarrow \eta\ell^+\ell^-$  и провести сравнительный анализ с современными экспериментальными данными и вычислениями, проведёнными в других моделях.

### Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются составные двухчастичные кварковые системы (мезоны), состоящие из лёгких  $u$ -,  $d$ - и  $s$ -кварков.

Предметом исследований является:

1. методика вычисления параметров модели, основанной на точечной форме пуанкаре-инвариантной квантовой механики;
2. интегральные представления для лептонных и адронных констант распадов мезонов;
3. структурные характеристики кварков;
4. поведение форм-факторов распадов  $V \rightarrow P\ell^+\ell^-$ , сопоставление численных расчётов с современными экспериментальными данными.

### **Научная новизна**

В диссертации в рамках точечной формы динамики приведена методика вычисления матричных элементов распадов для радиационных переходов и константы псевдоскалярной плотности. Отличительной чертой процесса вычисления матричных элементов распадов мезонов с учётом кварковой структуры является использование схемы «спиральность» для векторов состояний и метода базисных спиноров.

Процедура определения параметров релятивистской кварковой модели содержит оригинальный способ вычисления конституентных масс кварков с использованием современных значений токовых масс кварков. При расчётах не используются уравнения с потенциалом кварк-антикваркового взаимодействия, что делает разработанный подход независимым от дополнительных параметров. Впервые в рамках точечной формы динамики получены интегральные представления для констант радиационных распадов, а также константы псевдоскалярной плотности. На основе развитой релятивистской кварковой модели мезонов проведён комбинированный расчёт лептонных констант, констант радиационных распадов псевдоскалярных и векторных мезонов, хорошо согласующийся с экспериментальными данными. Впервые вычислено интегральное представление форм-фактора  $F_{VP\ell^+\ell^-}(q^2)$  распада  $V \rightarrow P\ell^+\ell^-$  с последующим численным расчётом форм-факторов процессов  $\omega \rightarrow \pi^0\ell^+\ell^-$ ,  $\phi \rightarrow \pi^0\ell^+\ell^-$  и  $\phi \rightarrow \eta\ell^+\ell^-$  в зависимости от переданного импульса лептонной паре.

Полученные в диссертации результаты вычислений электрослабых характеристик мезонов дают информацию о картине взаимодействия кварков в непертурбативной области. Проведённое самосогласованное описание релятивистских составных систем, содержащих кварки лёгкого сектора, позволяет интерпретировать результаты новых экспериментов, а также использовать развитую методику для расчётов характеристик систем, содержащих тяжёлые кварки.

## Положения, выносимые на защиту

1. Релятивистская кварковая модель для описания распадов лёгких мезонов, основанная на составной кварковой модели и на точечной форме пуанкаре-инвариантной квантовой механики; обобщение методики вычисления констант распадов и форм-факторов псевдоскалярных и векторных мезонов с учётом структурных характеристик кварков.
2. Интегральные представления констант радиационных распадов псевдоскалярных и векторных мезонов, включая константу псевдоскалярной плотности, полученные в рамках точечной формы пуанкаре-инвариантной квантовой механики, которые необходимы для анализа экспериментальных данных мезонов.
3. Самосогласованный расчёт лептонных констант, констант радиационных распадов псевдоскалярных и векторных мезонов на основе развитой релятивистской кварковой модели мезонов, согласующийся с экспериментальными данными.
4. Интегральное представление электромагнитного форм-фактора распада  $V \rightarrow \rightarrow Pl^+\ell^-$ , полученное в рамках релятивистской кварковой модели, основанной на точечной форме пуанкаре-инвариантной квантовой механики; расчёт поведения форм-факторов в процессах  $\omega \rightarrow \pi^0\ell^+\ell^-$ ,  $\phi \rightarrow \pi^0\ell^+\ell^-$  и  $\phi \rightarrow \eta\ell^+\ell^-$ .

## Личный вклад соискателя

Диссертационная работа отражает личный вклад автора в проведённые исследования. Все основные результаты, такие как численные и аналитические расчёты, составляющие основу диссертационной работы, получены автором самостоятельно.

Доктор физико-математических наук, профессор Самарского университета Крутов А. Ф. принимал участие в постановке задач и обсуждении результатов работ [4, 5].

Научным руководителем, доктором физико-математических наук, доцентом Андреевым В.В., была определена тема и цели исследования, а также осуществлялось общее руководство, оказывалась техническая помощь, проводилось обсуждение полученных результатов. Автором диссертации выполнены все аналитические и численные расчёты, а также численное моделирование поведения исследуемых форм-факторов.

### Апробация результатов диссертации

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и семинарах:

- III-й Международной научной конференции «Проблемы взаимодействия излучения с веществом» (Гомель, Беларусь, 9 – 11 ноября 2011 г.);
- XII-й Международной школе-семинаре «Actual problems of microworld physics» (Гомель, Беларусь, 22 июля – 2 августа 2013 г.);
- XIII-й Международной школе-семинаре «Actual problems of microworld physics» (Гомель, Беларусь, 27 июля – 7 августа 2015 г.);
- IV-й Международной конференции «Математическая физика и ее приложения» (Самара, Российская Федерация, 25 августа – 1 сентября 2014 г.);
- XVI Workshop on high energy spin physics «DSPIN-15» (Дубна, Российская Федерация, 8 – 12 сентября 2015 г.);
- IX International conference «Methods of Non-Euclidean Geometry in Physics and Mathematics» (BGL-9) (Минск, Беларусь, Институт физики им. Б. И. Степанова, 27 – 30 октября 2015 г.);
- IV-й Международной научной конференции «Проблемы взаимодействия излучения с веществом» (Гомель, Беларусь, 9 – 11 ноября 2016 г.);
- XVII Workshop on high energy spin physics «DSPIN-17» (Дубна, Российская Федерация, 11 – 15 сентября 2017 г.);
- VI-м Конгрессе физиков Беларуси (Минск, Беларусь, Институт физики им. Б.И. Степанова, 20 – 23 ноября 2017 г.);
- Современные проблемы физики (Минск, Беларусь, Институт физики им. Б.И. Степанова, 13 – 15 июня 2018 г.);
- XIV-й Международной школе-семинаре «Actual problems of microworld physics» (Гродно, Беларусь, 12 – 24 августа 2018 г.);
- XXIV International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems «Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics» (Дубна, Российская Федерация, 17 – 22 сентября 2017 г.);
- V-й Международной научной конференции «Проблемы взаимодействия излучения с веществом» (Гомель, Беларусь, 14 – 16 ноября 2018 г.);
- XI Bolyai-Gauss-Lobachevsky (BGL-2019) Conference: Non-Euclidean, Non-Commutative Geometry and Quantum Physics (Kiev, Ukraine, Bogolyubov Institute for Theoretical Physics, 19 – 24 May 2019);

– XVIII Workshop on high energy spin physics «DSPIN-19» (Дубна, Российская Федерация, 2 – 6 сентября 2019 г.).

Полученные диссертационные результаты также докладывались на республиканских научных конференциях в учреждениях образования «Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины», «Брестский государственный университет им. В. С. Сержицкого» и «Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого».

### **Опубликованность результатов диссертации**

Результаты диссертации опубликованы в 30 научных работах, в том числе в журналах из списка ВАК – 10 [1 – 10] (общий объём 5 авторских листов), 15 статей в сборниках трудов конференций [11 – 25], 5 тезисов докладов [26 – 30] в материалах конференций.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 3 глав, заключения, 4 приложений и списка использованных источников. Полный объём диссертации составляет 102 страницы; работа содержит 9 рисунков на 3 страницах и 6 таблиц на 2 страницах, 4 приложения на 10 страницах. Список использованных источников на 9 страницах включает 141 наименование.

В первой главе изложены математические основы группы Пуанкаре: кратко обсуждается каждая из трёх форм пуанкаре-инвариантной квантовой механики с соответствующими способами введения взаимодействия. В развитом формализме предложена релятивистская модель мезонов, как связанных двухчастичных кварковых состояний, основанная на точечной форме динамики.

Во второй главе изложена методика расчёта электрослабых характеристик псевдоскалярных и векторных мезонов, адаптированная на случай радиационных переходов. Получено интегральное представление константы распадов  $V \rightarrow P\gamma$ ,  $P \rightarrow V\gamma$ , интегральное представление константы псевдоскалярной плотности, а также выражения для констант лептонных распадов псевдоскалярных и векторных мезонов.

В третьей главе проведён анализ базовых параметров модели в зависимости от выбора пробной волновой функции с последующим описанием электрослабых характеристик псевдоскалярных и векторных мезонов лёгкого сектора. Полученные параметры модели и значения аномальных магнитных моментов кварков используются для исследования поведения форм-факторов распадов векторных  $\omega$ - и  $\phi$ -мезонов.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во **введении** указана мотивация темы диссертационного исследования, связанная с появлением современных экспериментальных данных по электромагнитным распадам лёгких мезонов. В связи с этим представлен краткий обзор литературы по существующим на данный момент методам описания характеристик связанных состояний, а также указаны преимущества и недостатки каждого из перечисленных подходов. Важным представляется обсуждение теоретико-групповых подходов для описания составных кварковых систем, в частности использование динамики на световом фронте и мгновенной формы динамики для расчёта различных характеристик мезонов. Отмечено, что методы описания связанных состояний, основанные на точечной форме динамики, менее распространены, поэтому развитие данной формы пуанкаре-инвариантной квантовой механики является важной и актуальной задачей физики мезонов.

В **главе 1** диссертации обсуждается группа Пуанкаре, а также рассмотрены формы динамики с кинематическими и динамическими подгруппами операторов для каждой из форм. В развитом формализме изложена процедура включения взаимодействия в моделях, основанных на пуанкаре-инвариантной квантовой механике. В рамках полученной алгебры обсуждается процедура получения одночастичных состояний группы Пуанкаре с последующим переходом к двухчастичным состояниям. Показано, что для снятия вырождения с базиса двухчастичного состояния

$$|\mathbf{P}, \mathbf{k}, \lambda_1, \lambda_2\rangle = \sqrt{\frac{\omega_{m_q}(\mathbf{p}_1)\omega_{m_{\bar{q}}}(\mathbf{p}_2)}{\omega_{m_q}(\mathbf{k})\omega_{m_{\bar{q}}}(\mathbf{k})V_0}} |\mathbf{p}_1, \lambda_1, \mathbf{p}_2, \lambda_2\rangle, \quad (1)$$

где  $\mathbf{P} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2$  – полный импульс, а  $\mathbf{k}$  – относительный импульс двух частиц, могут быть использованы различные наборы операторов. В первый набор входят операторы орбитального и полного спинового моментов ( $LS$ -связь). В результате получено выражение для вектора состояния мезона массой  $M$  и импульсом  $\mathbf{Q}$  ( $Q^2 = M^2, V = Q/M$ ) [1,2]:

$$|\Psi_{\mathbf{Q}, M, J, \mu}\rangle = \sum_{\lambda_1, \lambda_2} \sum_{\nu_1, \nu_2} \int d^3\mathbf{k} \sqrt{\frac{\omega_{m_q}(\mathbf{p}_1)\omega_{m_{\bar{q}}}(\mathbf{p}_2)}{\omega_{m_q}(\mathbf{k})\omega_{m_{\bar{q}}}(\mathbf{k})V_0}} \Phi_{L, S}^J(\mathbf{k}) \times \quad (2)$$

$$\times \Omega \left\{ \begin{matrix} L & S & J \\ \nu_1 & \nu_2 & \mu \end{matrix} \right\} (\theta_{\mathbf{k}}, \phi_{\mathbf{k}}) D_{\lambda_1, \nu_1}^{1/2}(\mathbf{n}_{W_1}) D_{\lambda_2, \nu_2}^{1/2}(\mathbf{n}_{W_2}) |\mathbf{p}_1, \lambda_1, \mathbf{p}_2, \lambda_2\rangle,$$

где

$$\Omega \left\{ \begin{matrix} L & S & J \\ \nu_1 & \nu_2 & \mu \end{matrix} \right\} (\theta_{\mathbf{k}}, \phi_{\mathbf{k}}) = Y_{Lm}(\theta_{\mathbf{k}}, \phi_{\mathbf{k}}) C \left\{ \begin{matrix} s_1 & s_2 & S \\ \nu_1 & \nu_2 & \lambda \end{matrix} \right\} C \left\{ \begin{matrix} L & S & J \\ m & \lambda & \mu \end{matrix} \right\},$$

$$\omega_m(\mathbf{k}) = \sqrt{\mathbf{k}^2 + m^2}, \quad M_0(\mathbf{k}) = \omega_{m_q}(\mathbf{k}) + \omega_{m_{\bar{Q}}}(\mathbf{k}), \quad \mathbf{k} = |\mathbf{k}|, \quad (3)$$

а  $D_{\lambda,\nu}^{1/2}(\mathbf{n}_W)$  – матрица вращения Вигнера. Во второй набор входят операторы спиральностей (схема «спиральность»), определённые пуанкаре-инвариантным образом. В указанном случае вектор состояния может быть записан в виде [1]:

$$|\Psi_{\mathbf{Q},M,J,\mu}\rangle = \sum_{\tilde{\lambda}_1, \tilde{\lambda}_2} \int d^3\mathbf{k} \Phi_{L,S}^J(\mathbf{k}) \sqrt{\frac{\omega_{m_q}(\mathbf{p}_1)\omega_{m_{\bar{Q}}}(\mathbf{p}_2)}{\omega_{m_q}(\mathbf{k})\omega_{m_{\bar{Q}}}(\mathbf{k})V_0}} \times \\ \times \sqrt{\frac{2L+1}{4\pi}} C \left\{ \begin{matrix} s_1 & s_2 & S \\ \tilde{\lambda}_1 & -\tilde{\lambda}_2 & \lambda \end{matrix} \right\} C \left\{ \begin{matrix} L & S & J \\ 0 & \lambda & \lambda \end{matrix} \right\} D_{\mu\lambda}^{*J}(\phi_{\mathbf{k}}, \theta_{\mathbf{k}}, -\phi_{\mathbf{k}}) |\mathbf{p}_1, \tilde{\lambda}_1, \mathbf{p}_2, \tilde{\lambda}_2\rangle. \quad (4)$$

В главе 2 разработана методика расчёта электрослабых характеристик мезонов [3–5] распадов вида  $h \rightarrow h'X$ , адаптированная на случай радиационных переходов псевдоскалярных и векторных мезонов  $V(P) \rightarrow P(V)\gamma$ . На основе соотношений

$$\langle \mathbf{Q}', M_P | \hat{J}^\alpha(0) | \mathbf{Q}, 1\lambda_V, M_V \rangle = \frac{i}{(2\pi)^3} g_{VP\gamma} \frac{\epsilon^{\alpha\nu\rho\sigma} \varepsilon_\nu(\lambda_V) V_\rho V'_\sigma}{\sqrt{4V_0 V'_0}} \sqrt{M_V M_P}, \quad (5)$$

$$\hat{J}^\alpha(0) = \sum_{q=u,d,s} e_{q,\bar{Q}} \bar{\psi}_{q,\bar{Q}} \Gamma_{q,\bar{Q}}^\alpha \psi_{q,\bar{Q}}, \Gamma_{q,\bar{Q}}^\alpha = F_1(q^2)\gamma^\alpha + F_2(q^2) \frac{i\sigma^{\alpha\beta}}{2m_{q,\bar{Q}}} q_\beta, \quad (6)$$

и выражения (1), предельным переходом  $q = Q - Q' \rightarrow 0$  получено интегральное представление константы радиационного распада [6,7]:

$$g_{VP\gamma}(m_q, m_{\bar{Q}}, \beta_{q\bar{Q}}^V, \beta_{q\bar{Q}}^P) = \int dk k^2 \Phi(\mathbf{k}, \beta_{q\bar{Q}}^V) \Phi^*(\mathbf{k}, \beta_{q\bar{Q}}^P) \left( e_q f_1(\mathbf{k}, m_q, m_{\bar{Q}}) + \right. \\ \left. + \frac{e_q \kappa_q}{2 m_q} f_2(\mathbf{k}, m_q, m_{\bar{Q}}) - e_{\bar{Q}} f_1(\mathbf{k}, m_{\bar{Q}}, m_q) - \frac{e_{\bar{Q}} \kappa_{\bar{Q}}}{2 m_{\bar{Q}}} f_2(\mathbf{k}, m_{\bar{Q}}, m_q) \right), \quad (7)$$

где

$$f_1(\mathbf{k}, m_q, m_{\bar{Q}}) = \frac{1}{3 \omega_{m_q}(\mathbf{k})} \left( \frac{m_q + m_{\bar{Q}}}{\omega_{m_q}(\mathbf{k}) + \omega_{m_{\bar{Q}}}(\mathbf{k})} + \frac{m_q}{\omega_{m_q}(\mathbf{k})} + 1 \right) \quad (8)$$

и

$$f_2(\mathbf{k}, m_q, m_{\bar{Q}}) = -\frac{2}{3} \left( \frac{m_q^2 + \omega_{m_q}(\mathbf{k}) (m_q + \omega_{m_q}(\mathbf{k}))}{\omega_{m_q}^2(\mathbf{k})} \right). \quad (9)$$

В выражении (7)  $e_q$  – электрический заряд кварка в единицах  $e$ , а  $\kappa_q$  – аномальный магнитный момент кварка.

Методика применена для вычисления интегрального представления константы псевдоскалярной плотности [7]

$$g_P(m_q, m_{\bar{Q}}, \beta_{q\bar{Q}}^P) = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{1}{\pi} \int dk k^2 \Phi(k, \beta_{q\bar{Q}}^P) \sqrt{\frac{M_0(k)}{\omega_{m_q}(k) \omega_{m_{\bar{Q}}}(k)}} \times \\ \times \left( \sqrt{W_{m_q}^+(k) W_{m_{\bar{Q}}}^+(k)} + \sqrt{W_{m_q}^-(k) W_{m_{\bar{Q}}}^-(k)} \right), \quad (10)$$

а также для расчёта констант лептонных распадов адронов [1,2,6]

$$f_I(m_q, m_{\bar{Q}}, \beta_{q\bar{Q}}^I) = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{1}{\pi} \int dk k^2 \Phi(k, \beta_{q\bar{Q}}^I) \sqrt{\frac{W_{m_q}^+(k) W_{m_{\bar{Q}}}^+(k)}{M_0(k) \omega_{m_q}(k) \omega_{m_{\bar{Q}}}(k)}} \times \\ \times \left( 1 + a_I \frac{k^2}{W_{m_q}^+(k) W_{m_{\bar{Q}}}^+(k)} \right), \quad a_P = -1, \quad a_V = 1/3, \quad W_m^\pm(k) = \omega_m(k) \pm m. \quad (11)$$

**Глава 3** посвящена описанию электрослабых распадов псевдоскалярных и векторных мезонов. Проведён анализ пробных волновых функций: показано, что выбор осцилляторной  $\Phi_{\text{osc}}(k, \beta_{q\bar{Q}}) = N_{\text{osc}} \exp[-k^2/(2\beta_{q\bar{Q}}^2)]$  волновой функции является наиболее оптимальным для численных расчётов базовых параметров модели [6–8]. Полученные значения конституентных масс кварков сопоставляются с моделями, основанными на мгновенной форме динамики и динамике на световом фронте динамики (см. таблицу 1).

**Таблица 1. – Сопоставление конституентных масс кварков с другими подходами и моделями**

Масса кварка, МэВ	Динамика на световом фронте	Мгновенная форма динамики	Предложенная модель
$m_u$	220	220	$219,5 \pm 9,6$
$m_d$	220	220	$221,9 \pm 9,6$
$m_s$	480	400	$426,2 \pm 59,7$

Вычисленные значения конституентных масс кварков и  $\beta_{q\bar{Q}}^{P,V}$ -параметров волновых функций использованы для расчёта значений (см. таблицу 2) констант лептонных распадов адронов [8] (символом ( $\diamond$ ) отмечены реакции, которые были использованы для фиксации параметров релятивистской кварковой модели).

Использование экспериментальных данных по распадам  $\rho^+ \rightarrow \pi^+ \gamma$ ,  $K^{*+} \rightarrow \rightarrow K^+ \gamma$  и  $K^{*0} \rightarrow K^0 \gamma$  и параметров модели с учётом выражений (7) – (9) дало возможность численной оценки аномальных магнитных моментов  $u$ -,  $d$ - и  $s$ -кварков. Показано, что вычисленные значения  $\kappa_u = -0,123$ ,  $\kappa_d = -0,088$  и

**Таблица 2. – Сопоставление экспериментальных  $f_{V,P}^{(\text{экс.})}$  и теоретических значений констант распадов псевдоскалярных и векторных мезонов**

Канал распада	$f_{V,P}^{(\text{экс.})}$ , МэВ	$f_{V,P}^{(\text{теор.})}$ , МэВ
$(\diamond)\pi^+ \rightarrow \ell\tilde{\nu}_\ell$	$131,61 \pm 0,17$	$131,61 \pm 1,11$
$(\diamond)K^+ \rightarrow \ell\tilde{\nu}_\ell$	$156,87 \pm 0,78$	$156,87 \pm 1,43$
$(\diamond)\tau \rightarrow \rho^+\tilde{\nu}_\tau$	$209,3 \pm 1,5$	$209,3 \pm 1,5$
$(\diamond)\tau \rightarrow K^{*+}\tilde{\nu}_\tau$	$205,3 \pm 6,2$	$205,3 \pm 12,3$
$(\diamond)\omega \rightarrow e^+e^-$	$46,82 \pm 8,12$	$46,82 \pm 2,74$
$\rho^0 \rightarrow e^+e^-$	$156,42 \pm 14,44$	$148,36 \pm 3,12$
$\phi \rightarrow e^+e^-$	$76,21 \pm 1,23$	$76,24 \pm 3,72$

$\kappa_s = -0,198$  коррелируют с магнитными моментами кварков, полученными из экспериментальных данных по магнитным моментам барионов [6–8].

На основе параметров модели и схем смешивания для векторных [4,6,9,10]

$$\begin{aligned}
 |\phi\rangle &= \cos\phi_V\psi_q - \sin\phi_V\psi_s, \\
 |\omega\rangle &= \sin\phi_V\psi_q + \cos\phi_V\psi_s, \\
 |\rho^0\rangle &= \psi_1,
 \end{aligned} \tag{12}$$

и псевдоскалярных мезонов [8–10]

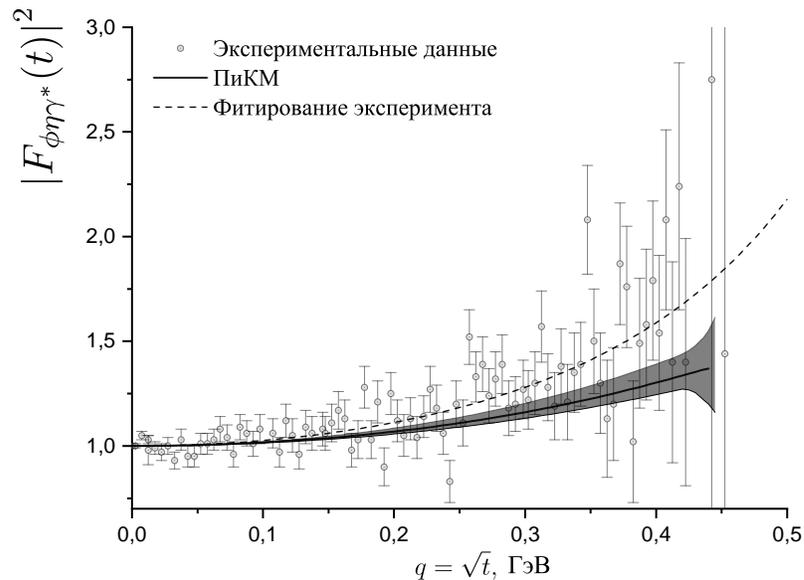
$$\begin{aligned}
 |\pi^0\rangle &= \psi_1, \\
 |\eta\rangle &= X_\eta\psi_q + Y_\eta\psi_s + Z_\eta\psi_G, \\
 |\eta'\rangle &= X_{\eta'}\psi_q + Y_{\eta'}\psi_s + Z_{\eta'}\psi_G, \\
 |G\rangle &= X_G\psi_q + Y_G\psi_s + Z_G\psi_G,
 \end{aligned} \tag{13}$$

(  $|G\rangle$  – глюонная компонента,  $|\psi_1\rangle = (1/\sqrt{2})|u\bar{u} - d\bar{d}\rangle$ ,  $|\psi_q\rangle = (1/\sqrt{2})|u\bar{u} + d\bar{d}\rangle$ ,  $\psi_s = |s\bar{s}\rangle$  ) проведены расчёты констант распадов нейтральных псевдоскалярных и векторных мезонов со значением угла смешивания векторных мезонов  $\theta_V = (31,92 \pm 0,2)^\circ$ ,  $\theta_V = \phi_V - \arctan\sqrt{2}$ . Показано, что имеется хорошее соответствие [9,10] между теоретическими предсказаниями и экспериментальными значениями (см. таблицу 3).

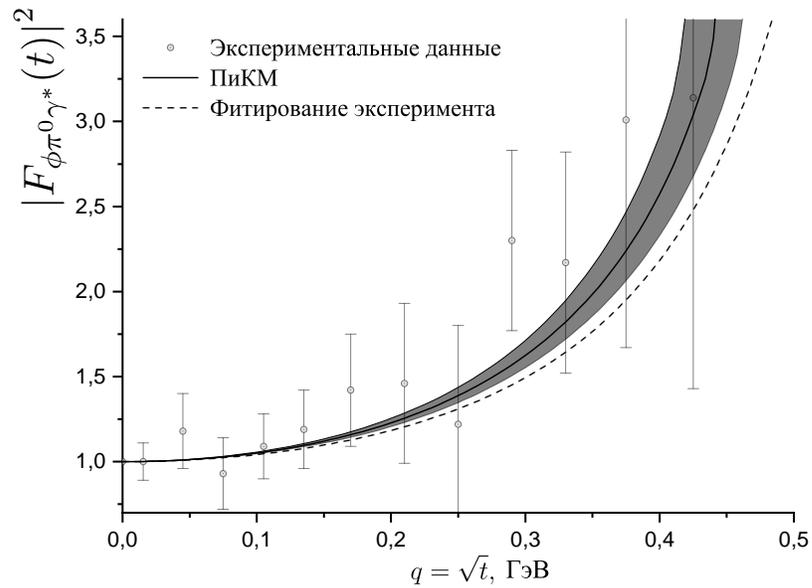
Как результат главы проведено исследование форм-факторов  $\omega$ - и  $\phi$ -мезонов распада  $V \rightarrow P\ell^+\ell^-$  с последующим сопоставлением с современными экспериментальными данными [9,10] по указанным распадам (см. рисунки 1, 2, 3):

**Таблица 3. – Сопоставление экспериментальных данных по радиационным распадам нейтральных мезонов со значениями, полученными в представленной модели**

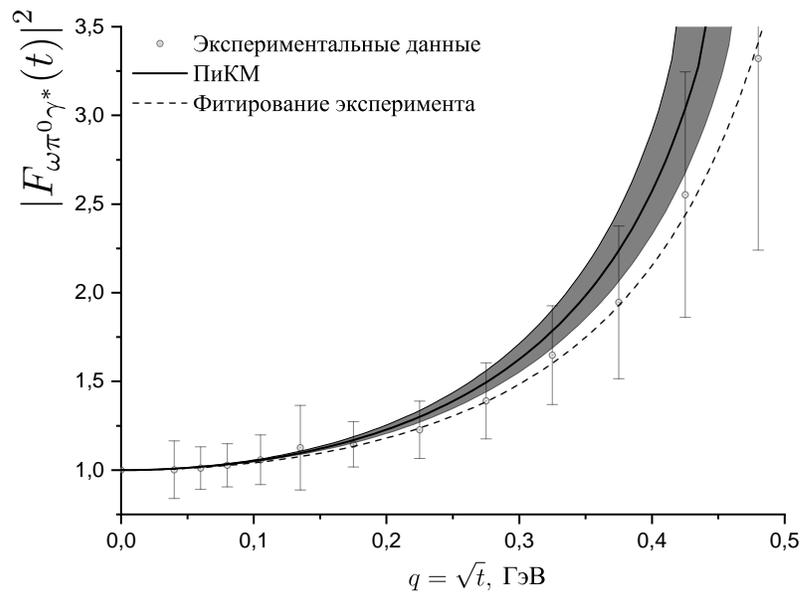
$V(P) \rightarrow P(V)\gamma$	$\Gamma^{(\text{экс.})}, \text{КэВ}$	$\Gamma^{(\text{теор.})}, \text{КэВ}$
$(\diamond) \rho^+ \rightarrow \pi\gamma$	$68 \pm 7$	$68 \pm 2$
$(\diamond) K^{*+} \rightarrow K^+\gamma$	$50 \pm 5$	$50 \pm 3$
$(\diamond) K^{*0} \rightarrow K^0\gamma$	$116 \pm 10$	$116 \pm 5$
$\omega \rightarrow \pi^0\gamma$	$713 \pm 26$ $686 \pm 12$	$702 \pm 21$
$\omega \rightarrow \eta\gamma$	$5,6 \pm 1,3$ $3,8 \pm 1,2$	$6,8 \pm 2,5$
$\phi \rightarrow \pi^0\gamma$	$5,5 \pm 0,2$	$5,5 \pm 2,7$
$\phi \rightarrow \eta\gamma$	$55,4 \pm 1,2$	$55,7 \pm 8,7$
$\phi \rightarrow \eta'\gamma$	$0,26 \pm 0,01$	$0,26 \pm 0,14$
$\rho^0 \rightarrow \pi^0\gamma$	$71,1 \pm 9,9$	$83,2 \pm 9,4$
$\rho^0 \rightarrow \eta\gamma$	$42,1 \pm 5,4$	$44,7 \pm 6,4$
$\eta' \rightarrow \rho^0\gamma$	$56,6 \pm 3,6$	$56,7 \pm 7,4$
$\eta' \rightarrow \omega\gamma$	$5,1 \pm 0,5$	$5,1 \pm 2,2$



**Рисунок 1. – Сопоставление теоретических расчётов с экспериментальными данными при различных  $q$ . На рисунке представлены экспериментальные данные совместно с результатами однопараметрического фитирования**



**Рисунок 2. – Сопоставление теоретических расчётов с экспериментальными данными при различных  $q$ . На рисунке представлены экспериментальные данные совместно с результатами однопараметрического фитирования**



**Рисунок 3. – Сопоставление теоретических расчётов с экспериментальными данными при различных  $q$ . На рисунке представлены экспериментальные данные совместно с результатами однопараметрического фитирования**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Основные научные результаты диссертации заключаются в следующем:**

- разработана релятивистская кварковая модель мезонов, основанная на составной кварковой модели и на точечной форме пуанкаре-инвариантной квантовой механики, удовлетворительно описывающая лептонные и радиационные распады лёгких мезонов, а также поведение переходных форм-факторов  $\omega$ - и  $\phi$ -мезонов в области  $q < 0,5$  ГэВ [1–6, 9, 10];
- разработана методика вычисления электрослабых характеристик связанных кварковых состояний, использованная для радиационных распадов псевдоскалярных и векторных мезонов. На её основе вычислены интегральные представления константы распадов  $V \rightarrow P\gamma$  с учётом аномальных магнитных моментов кварков [2–10];
- получено интегральное представление константы псевдоскалярной плотности, а также выражения для констант лептонных распадов псевдоскалярных и векторных мезонов. Результаты вычислений сопоставлены и совпадают с известными выражениями из мгновенной формы динамики [10,12–14];
- проведён анализ трёх видов пробных волновых функций мезонов в процессе численных расчётов конституентных масс кварков с использованием интегрального представления для константы псевдоскалярной плотности. Установлено, что только осцилляторная волновая функция приводит к результатам, коррелирующим с моделями, основанными на мгновенной и фронтовой формах динамики для мезонов лёгкого сектора [6, 9, 10, 22];
- проведено вычисление параметров модели на основе описания лептонных и радиационных распадов векторных мезонов с последующим вычислением аномальных магнитных моментов  $u$ -,  $d$ - и  $s$ -кварков. Сравнительный анализ показал, что полученные в развиваемой модели значения находятся в разумном соответствии с известными значениями магнитных моментов кварков лёгкого сектора [3, 4, 8–10, 23–25];
- выполнен сравнительный анализ экспериментальных значений и теоретических расчётов радиационных распадов нейтральных псевдоскалярных и векторных мезонов; показано, что имеется хорошее соответствие между теоретическими предсказаниями и экспериментальными значениями [8–10];
- вычислено интегральное представление константы распада  $V \rightarrow P\ell^+\ell^-$  с учётом структуры кварков, входящих в мезон; на основе этого выражения изучено поведение форм-фактора распада векторных  $\omega$ - и  $\phi$ -мезонов канала  $V \rightarrow P\gamma^*$ ; результаты сопоставлены с экспериментальными данным [8–10, 17–19];

- показано, что предложенная релятивистская кварковая модель удовлетворительно описывает поведение форм-факторов  $\omega$ - и  $\phi$ -мезонов в области  $q < 0,5$  ГэВ, где эффекты перераспределения незначительны [9, 10, 20, 25].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы для исследования мезонов как с одним тяжёлым кварком, так и для кваркониев. Помимо исследованных в работе распадов псевдоскалярных и векторных мезонов, предложенная методика может быть применена для расчёта полулептонных распадов адронов, а также для случая чисто адронных переходов. Предложенная схема вычисления поведения форм-факторов канала  $V \rightarrow P\ell^+\ell^-$  может быть использована коллаборациями KLOE-2, NA60 и HERMES при исследовании форм-факторов нейтральных мезонов. Развитая методика также может быть обобщена для трёхкварковых состояний (барионов) с последующим расчётом различных электромагнитных характеристик как нуклонов, так и гиперонов.

Результаты диссертации внедрены в учебный процесс факультета физики и информационных технологий учреждения образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины» для дисциплин специализации «Компьютерное моделирование физических процессов». Разработанные в диссертации методы вычислений также могут быть использованы как учебно-методический материал при обучении студентов физических специальностей, а также магистрантов и аспирантов высших учебных заведений Республики Беларусь.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Гавриш, В. Ю. Матричный элемент распада мезона в лептонную пару / В. Ю. Гавриш, В. В. Андреев // Известия Гомельского государственного университета Франциска Скорины, 2012. – № 6 (75). – С. 10 – 14.
2. Гавриш, В. Ю. Константа радиационного распада в пуанкаре-инвариантной квантовой механике / В. Ю. Гавриш, В. В. Андреев // Известия Гомельского государственного университета Франциска Скорины, 2013. – № 6 (81). – С. 162 – 165.
3. Гавриш, В. Ю. Электромагнитные распады лёгких векторных мезонов / В. Ю. Гавриш, В. В. Андреев // Известия Гомельского государственного университета Франциска Скорины, 2014. – № 6 (87). – С. 199 – 204.
4. Гавриш, В. Ю. Углы смешивания из распадов векторных мезонов / В. Ю. Гавриш, В. В. Андреев, А. Ф. Крутов // Известия Гомельского государственного университета Франциска Скорины, 2017. – № 6 (105). – С. 145 – 151.
5. Гавриш, В. Ю. Методика вычисления электрослабых характеристик мезонов в пуанкаре-инвариантной квантовой механике / В. Ю. Гавриш, В. В. Андреев, А. Ф. Крутов // Проблемы физики, математики и техники, 2018. – № 1 (34). – С. 8 – 19.
6. Гавриш, В. Ю. Электромагнитный форм-фактор векторных мезонов в релятивистской кварковой модели / В. Ю. Гавриш, В. В. Андреев // Журнал Белорусского Государственного Университета. Физика, 2019. – № 1. – С. 63 – 71.
7. Haurysh, V. Yu. Poincaré-covariant quark model of electroweak light mesons decays / V. Yu. Haurysh, V. V. Andreev // The European Physics Journal (Web of Conferences). – 2019. – Vol. 204. – P. 08006.
8. Haurysh, V. Yu. Electroweak decays of unflavored mesons in Poincaré covariant quark model / V. Yu. Haurysh, V. V. Andreev // Turkish Journal of Physics. – 2019. – Vol. 43, no 2. – P. 167 – 177.
9. Haurysh, V. Yu. Dalitz decays of unflavored mesons in Poincaré covariant quark model / V. Yu. Haurysh, V. V. Andreev // Ukraine Journal of Physics. – 2019. – Vol. 64, no 6. – P. 451 – 456.
10. Гавриш, В. Ю. Распады лёгких мезонов в релятивистской кварковой модели / В. Ю. Гавриш, В. В. Андреев // Вести национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук. – 2019. – Т. 55, № 3. – С. 325 – 337.

### Статьи в материалах конференций

11. Гавриш, В. Ю. Вычисление ширин распадов векторных бозонов методом базисных спиноров / В. В. Андреев, В. Ю. Гавриш // Материалы III международной конференции «Проблемы взаимодействия излучения с веществом», Гомель, Беларусь, 9 – 11 ноября, 2011 г.: в 2 частях. / ГГУ им. Ф. Скорины; под науч. ред. А. В. Рогачёва. – Гомель, 2013. – С. 109 – 114.

12. Гавриш, В. Ю. Вычисление константы распада псевдоскалярных мезонов / В. В. Андреев, В. Ю. Гавриш // Материалы III республиканской научной конференции «Актуальные вопросы физики и техники», Гомель, Беларусь, 17 апреля, 2013 г.: в 2 частях. / ГГУ им. Ф. Скорины; под науч. ред. А. В. Рогачёва. – Гомель, 2013. – С. 100 – 103.

13. Гавриш, В. Ю. Расчёт фермионных токов методом базисных спиноров / В. В. Андреев, В. Ю. Гавриш // Материалы республиканской научной конференции «Научные проблемы современной физики», Брест, Беларусь, 26 – 27 сентября, 2013 г.: в 2 частях. / БрГУ; под науч. ред. А. В. Демидчика. – Брест, 2013. – С. 18 – 21.

14. Гавриш, В. Ю. Вычисление параметров пуанкаре ковариантной модели волновых функций псевдоскалярных мезонов / В. В. Андреев, В. Ю. Гавриш // Материалы III республиканской научной конференции «Актуальные вопросы физики и техники», Гомель, Беларусь, 17 апреля, 2014 г.: в 2 частях. / ГГУ им. Ф. Скорины; под науч. ред. А. В. Рогачёва. – Гомель, 2014. – С. 75 – 77.

15. Гавриш, В. Ю. Радиационные распады векторных мезонов в пуанкаре-инвариантной квантовой механике / В. В. Андреев, В. Ю. Гавриш // Материалы II республиканского научного семинара, посвященного 70-летию со дня рождения А. Н. Сердюкова, Гомель, Беларусь, 21 мая, 2014 г. / ГГУ им. Ф. Скорины; под науч. ред. А. В. Рогачёва. – Гомель, 2014. – С. 112 – 116.

16. Гавриш, В. Ю. Константа радиационного распада векторного мезона в пуанкаре-инвариантной квантовой механике / В. В. Андреев, В. Ю. Гавриш // Материалы республиканской научной конференции «Актуальные вопросы теоретической физики, физики конденсированных сред и астрофизики», Брест, Беларусь, 2 – 3 октября, 2014 г. / БрГУ; под науч. ред. А. В. Демидчика. – Брест, 2014. – С. 3 – 8.

17. Haurysh, V. Yu. Fermion current calculation by the method of basis spinors / V. V. Andreev, V. Yu. Haurysh // Proceedings of the 12th International School-Seminar «The Actual Problems of Microworld Physics», Gomel, Belarus, July 22 – August 2, 2013: in 2 vol. / Dubna: JINR; ed. board: V. V. Andreev. – 2013. – P.141 – 150.

18. Гавриш, В. Ю. Углы смешивания векторных  $\omega$ -,  $\phi$ -мезонов в релятивистской кварковой модели / В. В. Андреев, В. Ю. Гавриш // Материалы V республиканской научной конференции «Современные научные проблемы и вопросы преподавания теоретической и математической физики, физики конденсированных сред и астрономии», Брест, Беларусь, 15 – 16 октября, 2015 г. / БрГУ; под науч. ред. В. С. Сержицкого. – Брест, 2015. – С. 72 – 77.

19. Haurysh, V. Yu. Radiative decays of vector mesons in Poincaré-covariant quark model / V. V. Andreev, V. Yu. Haurysh // Proceedings of the IX International conference «Methods of non-euclidean geometry in physics and mathematics» (BGL-9), Minsk, Belarus, October 27 – 30, 2015. / Minsk: B.I. Stepanov Institute of Physics; ed. by Yu. Kurochkin. – Minsk, 2015. – P.322 – 330.

20. Гавриш, В. Ю. Распад  $\phi \rightarrow \eta e^+ e^-$  в точечной форме пуанкаре-инвариантной квантовой механики / В. В. Андреев, В. Ю. Гавриш // Материалы IV республиканской научной конференции, посвященная 90-летию со дня рождения Б. В. Бокутя, Гомель, Беларусь, 9 – 11 ноября, 2016 г. / ГГУ им. Ф. Скорины; под науч. ред. С. А. Хахомова. – Гомель, 2016. – С. 126 – 131.

21. Haurysh, V. Yu. Radiative decays of light vector mesons in Poincaré invariant quantum mechanics / V. V. Andreev, V. Yu. Haurysh // Proceedings, 16th Workshop on High Energy Spin Physics (DSPIN-15): Dubna, Moscow region, Russia, September 8 – 12, 2015. / Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 678. – P. 012041.

22. Haurysh, V. Yu. Constituent quark masses in Poincaré-invariant quantum mechanics / V. V. Andreev, V. Yu. Haurysh // Proceedings, 17th Workshop on High Energy Spin Physics (DSPIN-17): Dubna, Moscow region, Russia, September 11 – 15, 2017. / Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 938. – P. 012030.

23. Гавриш, В. Ю. Параметры релятивистской кварковой модели из электрослабых распадов мезонов / В. В. Андреев, В. Ю. Гавриш // VI Конгресс физиков Беларуси: сборник материалов науч. конференции, Беларусь, г. Минск, 20 – 23 ноября 2017 г. / под. науч. ред. Я.С. Килина. – Минск: Институт физики НАН Беларуси, 2017. – С. 7 – 8.

24. Haurysh, V. Yu. Radiative decays of vector mesons in point form of Poincaré-invariant quantum mechanics / V. V. Andreev, V. Yu. Haurysh // Материалы республиканской научной конференции «Современные проблемы физики», Минск, Беларусь, 13 – 15 июня, 2018 г. / Минск: Институт физики НАН; под науч. ред. В. В. Машко. – Минск, 2018. – С. 20 – 24.

25. Гавриш, В. Ю. Электромагнитный форм-фактор перехода  $\omega \rightarrow \pi^0 \ell^+ \ell^-$  в релятивистской кварковой модели / В. В. Андреев, В. Ю. Гавриш // Материалы V республиканской научной конференции «Проблемы взаимодействия

излучения с веществом», Гомель, Беларусь, 14 – 16 ноября, 2018 г. / ГГУ им. Ф. Скорины; под науч. ред. Д. Л. Коваленко. – Гомель, 2018. – С. 223 – 228.

### Тезисы трудов конференций

26. Гавриш, В. Ю. Расчёт фермионных токов методом базисных спиноров / В. В. Андреев, В. Ю. Гавриш // Научные проблемы современной физики: сборник материалов науч. конференции, Беларусь, г. Брест, 26 – 27 сентября 2013 г. / БрГУ; под. науч. ред. В. С. Сержицкого. – Брест, 2013. – С. 3.

27. Гавриш, В. Ю. Радиационные распады векторных мезонов / В. В. Андреев, В. Ю. Гавриш // Математическая физика и ее приложения: сборник материалов науч. конференции, Российская Федерация, г. Самара, 25 – 30 августа, 2014 г. / СамГТУ; под. науч. ред. И. В. Воловича. – Самара, 2014. – С. 51.

28. Гавриш, В. Ю. Углы смешивания векторных  $\omega$ -,  $\phi$ -мезонов в релятивистской кварковой модели / В. В. Андреев, В. Ю. Гавриш // Современные научные проблемы и вопросы преподавания теоретической и математической физики, физики конденсированных сред и астрономии: сборник материалов научной конференции, Беларусь, г. Брест, 15 – 16 октября 2015 г. / БрГУ; под. науч. ред. В. С. Сержицкого. – Брест, 2015. – С. 3.

29. Haurysh, V. Yu. Poincaré-invariant quark model of light mesons / V. Yu. Haurysh, V. V. Andreev // XXIV International Baldin seminar on high energy physics problems: book of abstracts, Russia, Dubna, 17 – 22 september, 2018. / Joint Institute for nuclear research. – Dubna, 2018. – P. 71.

30. Haurysh, V. Yu. Dalitz decays of unflavored mesons in Poincare covariant quark model / V. V. Andreev, V. Yu. Haurysh // XI Bolyai-Gauss-Lobachevsky: proceedings of the International Conference, Ukraine, Kiev, 19 – 24 may, 2019. / National Academy of Sciences of Ukraine. – Kiev, 2019. – P. 16.

## РЭЗЮМЭ

Гаурыш Вадзім Юр'евіч

ПУАНКАРЭ-КАВАРЫЯТНАЯ КВАРКАВАЯ МАДЭЛЬ  
ЭЛЕКТРАСЛАБЫХ РАСПАДАУ МЕЗОНАУ

**Ключавыя словы:** група Пуанкарэ, кропкавая форма дынамікі, часціцы, распад, кварк, мезон, куты змешвання, форм-фактор, інтэгральнае ўяўленне, анамальны магнітны момант, распады Даліца.

Мэтай дысертацыі з'яўляецца пабудова мадэлі, заснаванай на кропкавай форме дынамікі, з наступным разлікам параметраў мадэлі і магнітных момантаў кваркаў лёгкага сектара, зыходзячы з патрабавання адпаведнасці тэарэтычных разлікаў і эксперыментальных дадзеных; вывучэнне паводзін форм-фактараў распадаў з супастаўленнем з сучаснымі эксперыментальнымі дадзенымі і іншымі мадэлямі.

У рамках мадэлі былі праведзены вылічэнні інтэгральных уяўленняў псеўдаскалярных і вектарных мезонаў, а таксама канстанты псеўдаскалярнай шчыльнасці. Атрыманыя выразы з выкарыстаннем токавых мас кваркаў выкарыстаны для разліку параметраў мадэлі. Паказана, што прапанаваная працэдура атрымання параметраў прыводзіць да вынікаў, карэлюючых з разлікамі ў мадэлях, заснаваных на імгненнай форме дынамікі і дынамікі на светлавым фронце.

Распрацаваная методыка выкарыстана для атрымання інтэгральных уяўленняў канстант радыяцыйных пераходаў  $V(P) \rightarrow P(V)\gamma$ . Названыя выразы выкарыстаны для вылічэння анамальных магнітных момантаў  $u$ -,  $d$ - і  $s$ -кваркаў. Аналіз паказаў, што значэнні анамальных магнітных момантаў кваркаў, атрыманыя ў рамках кропкавай формы дынамікі, знаходзяцца ў разумнай адпаведнасці з вядомымі значэннямі, атрыманымі з барыённых эксперыментальных дадзеных. Як вынік праведзена даследаванне форм-фактараў вектарных  $\omega$ - і  $\phi$ -мезонаў з наступным супастаўленнем мадэльных разлікаў з эксперыментальнымі дадзенымі калабарацыі A2, KLOE-2 і NA60.

Атрыманыя вынікі могуць быць выкарыстаны для даследавання мезонаў як з адным цяжкім кваркам, так і для кварконіяў. Прапанаваная схема вылічэння паводзінаў формаў-фактараў канала  $V \rightarrow P\ell^+\ell^-$  можа быць выкарыстана калабарацыямі KLOE-2, NA60 і HERMES пры даследаванні форм-фактараў нейтральных мезонаў. Развітая методыка таксама можа быць абагульнена для трохкваркавых станаў (барыёнаў) з наступным разлікам розных электрамагнітных характарыстык як нуклонаў, так і гіперонаў.

## РЕЗЮМЕ

Гавриш Вадим Юрьевич

ПУАНКАРЕ-КОВАРИАНТНАЯ КВАРКОВАЯ МОДЕЛЬ  
ЭЛЕКТРОСЛАБЫХ РАСПАДОВ МЕЗОНОВ

**Ключевые слова:** группа Пуанкаре, точечная форма динамики, частицы, распад, кварк, мезон, углы смешивания, форм-фактор, интегральное представление, аномальный магнитный момент, распады Далица.

Целью диссертации является построение модели, основанной на точечной форме динамики, с последующим расчётом параметров модели и магнитных моментов кварков лёгкого сектора, исходя из требования соответствия теоретических расчётов и экспериментальных данных; изучение поведения форм-фактора  $F_{VP\gamma^*}(q^2)$  распадов  $V \rightarrow P\ell^+\ell^-$  с сопоставлением с современными экспериментальными данными и другими моделями.

В рамках модели были проведены вычисления интегральных представлений псевдоскалярных и векторных мезонов, а также константы псевдоскалярной плотности. Полученные выражения с использованием токовых масс кварков использованы для расчёта параметров модели. Показано, что предложенная процедура получения параметров приводит к результатам, коррелирующим с расчётами в моделях, основанных на мгновенной форме динамики и динамики на световом фронте.

Разработанная методика использована для получения интегральных представлений констант радиационных переходов  $V(P) \rightarrow P(V)\gamma$ . Указанные выражения использованы для вычисления аномальных магнитных моментов  $u$ -,  $d$ - и  $s$ -кварков. Анализ показал, что значения аномальных магнитных моментов кварков, полученные в рамках точечной формы динамики, находятся в разумном соответствии с известными значениями, полученными из барионных экспериментальных данных. Как результат проведено исследование форм-факторов векторных  $\omega$ - и  $\phi$ -мезонов с последующим сопоставлением модельных расчётов с экспериментальными данными коллабораций A2, KLOE-2 и NA60.

Полученные результаты могут быть использованы для исследования мезонов как с одним тяжёлым кварком, так и для кваркониев. Предложенная схема вычисления поведения форм-факторов канала  $V \rightarrow P\ell^+\ell^-$  может быть использована коллаборациями KLOE-2, NA60 и HERMES при исследовании форм-факторов нейтральных мезонов. Развитая методика также может быть обобщена для трёхкварковых состояний (барионов) с последующим расчётом различных электромагнитных характеристик как нуклонов, так и гиперонов.

## SUMMARY

**Haurysh Vadzim Yur'evich**

### POINCARÉ-COVARIANT QUARK MODEL OF ELECTROWEAK MESONS DECAYS

**Key words:** Poincaré group, point form of dynamics, particles, decay, quark, meson, mixing angles, form-factor, integral representation, anomalous magnetic moments, Dalitz decays.

The aim of the thesis is developing a model based on point form of dynamics, followed by calculation the model parameters and the magnetic moments of light quark sector based on the requirements of the compliance of theoretical calculations and experimental data; studying the behavior of the form-factor  $F_{VP\gamma^*}(q^2)$  of  $V \rightarrow P\ell^+\ell^-$  decay with a comparison with the modern experimental data and other models.

In the framework of the model calculating of the integral representation of pseudoscalar and vector mesons as well as constant of pseudoscalar density were carried out. The obtained expressions using currents quark masses were used for the calculation model parameters. It's shown that the proposed procedure of obtaining the parameters leads to results that correlate with the calculations in the models, based on instant and light-front form of dynamics.

The developed technique is used for obtaining the integral constant representation of radiative transitions  $V(P) \rightarrow P(V)\gamma$ . This expression is used to calculate the anomalous magnetic moment of  $u$ -,  $d$ - and  $s$ -quarks. The analysis showed that the anomalous magnetic moments of the quark obtained in the point form of dynamics are in reasonable agreement with the values obtained from baryonic experimental data. As a result form-factors research of vector  $\omega$ - and  $\phi$ -mesons was conducted, followed by comparison model calculations with experimental data of collaborations A2, NA60 and KLOE-2.

The results can be used both for studying mesons with heavy quark and for quarkoniums. The proposed scheme can be used for calculating the behavior of  $V \rightarrow P\ell^+\ell^-$  channel form-factors by collaborations KLOE-2, NA60 and HERMES for the study of neutral mesons. The developed technique can also be generalized for three-quark states (baryons) with the following calculation of various electromagnetic characteristics both of nucleons and hyperons.

**Гавриш Вадим Юрьевич**

**ПУАНКАРЕ-КОВАРИАНТНАЯ КВАРКОВАЯ МОДЕЛЬ  
ЭЛЕКТРОСЛАБЫХ РАСПАДОВ МЕЗОНОВ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Подписано к печати « \_\_\_\_ » \_\_\_\_ 2020 г. Формат 60×90 1/16.

Бумага - офисная. Печать офсетная. Усл. печ. л

Уч. изд. л. Тираж \_\_\_\_ экз. Заказ № \_\_\_\_ .

Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси, 220068, Минск,  
Беларусь, пр. Независимости, 68. Отпечатано на ризографе ГНУ «Институт  
физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси».