



МРНТИ 29.05.23

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2024-149-4-88-99>

научная статья

Вычисление форм-факторов и полулептонных брэнчингов перехода $B \rightarrow \rho$ в рамках ковариантной модели кварков

М.Н. Ильясов^{1,2} , А.Н. Исадыков^{*1,3} 

¹ Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

² Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

³ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

(E-mails: ¹vifi5960@gmail.com, ²a.issadykov@inp.kz)

Аннотация. В данной работе исследован переход $B \rightarrow \rho$ в рамках ковариантной модели кварков с конфайнментом. Ковариантная модель кварков с конфайнментом является квантово-полевым подходом к адронным взаимодействиям, основанный на лагранжиане взаимодействия адронов, взаимодействующих с составляющими их кварками. Важным отличием модели от других теоретических моделей является то, что численные результаты (форм-факторы, брэнчинги, ширины и угловые наблюдаемые) вычисляются во всем кинематическом диапазоне переданного импульса q^2 . Переход $B \rightarrow \rho$ является предметом интереса для области физики высоких энергий. В разных теоретических подходах были получены форм-факторы и брэнчинги. Экспериментаторы из коллаборации LHCb в будущем планируют померить данный распад, поскольку этот переход идет с изменяющимся ароматом нейтрального тока. В этой работе нами были вычислены форм-факторы для перехода $B \rightarrow \rho$ во всем кинематическом диапазоне переданного импульса q^2 . Мы сравнили численные результаты из нашей модели с предсказаниями из других теоретических подходов. Для сравнения с другими теоретическими подходами мы привели наши форм-факторы в вид форм-факторов Бауэр-Стеч-Вирбель (BSW). Теоретические предсказания находятся в удовлетворительном согласии между собой. Используя эти форм-факторы, были рассчитаны брэнчинги для полулептонного распада $B^+ \rightarrow \rho^+ l^+ l^-$, где l^- - лептоны. Нами были построены графики с поведением форм-факторов и брэнчингов в зависимости от квадрата переданного импульса. Результаты, полученные в ходе данной работы, продемонстрировали высокую степень согласия с предсказаниями других теоретических моделей, таких, как правила сумм на световом конусе, квантовая хромодинамика на решетке и релятивистская модель кварков. Это подтверждает надежность и точность ковариантной модели кварков с конфайнментом для изучения редких распадов, в которых участвуют тяжелые кварки.

Ключевые слова: Стандартная модель, квантовая теория поля, В мезоны, форм-факторы, брэнчинг.

Поступила 24.10.2024. После доработки 11.11.2024. Принята к печати 19.11.2024. Доступно онлайн 25.12.2024

¹*автор для корреспонденции

Введение

Процессы $b \rightarrow sl^+ l^-$ и $b \rightarrow dl^+ l^-$ запрещены на уровне дерева в Стандартной модели и чувствительны к вкладам Новой физики в петлях. Переход $b \rightarrow d$ подавляется сильнее, чем переход $b \rightarrow s$ из-за значения элементов матрицы СКМ.

Тем не менее интересно изучить распады, проходящие через переход с изменяющимся ароматом нейтрального тока (FCNC). Распады перехода $b \rightarrow d$ наблюдались коллаборацией *LHCb* для распадов $B \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$ [1,2] и $B^S_0 \rightarrow K^{(*)0} \mu^+ \mu^-$ [3]. Последний распад особо интересен в свете того, что партнер данного перехода $B \rightarrow K^* l^+ l^-$ активно изучается в свете поиска Новой физики в виду большого отклонения теоретических значений от экспериментальных данных [4-6].

Поиск редкого распада $B^0 \rightarrow \rho^0 (\pi^+ \pi^-) \mu^+ \mu^-$ описан в статье коллаборации *LHCb* [7]. Формфакторы $B \rightarrow \rho$ перехода изучались в модели правилах сумм светового конуса [8,9] и в других теоретических подходах, таких, как [10-13]. В данной работе мы вычисляем формфакторы и брэнчинги для $B \rightarrow \rho$ перехода в рамках ковариантной модели кварков (*CCQM*). Принципиальным отличием нашей модели от других моделей является то, что результаты (форм-факторы, брэнчинги, ширины и угловые наблюдаемые) получены во всем кинематическом диапазоне переданного импульса q^2 . В то время как в других моделях эти значения получены лишь для малых q^2 и далее аппроксимированы специальной функцией.

Ковариантная модель кварков

Ковариантная модель кварков с конфайнментом представляет собой эффективный квантово-полевой подход к адронным взаимодействиям, основанный на лагранжиане взаимодействия адронов, взаимодействующих с образующими их кварками. Значение константы связи следует из условия композитности $Z_N = 0$ [14-16], где Z_N – константа перенормировки волновой функции адрона. Матричные элементы физических процессов генерируются набором кварковых петлевых диаграмм согласно разложению $1/N_c$. Ультрафиолетовые расходимости кварковых петель регуляризованы за счет включения вершинных функций для адрон-кварковых вершин. Эти функции также описывают эффекты конечного размера, связанные с неточечными адронами. Конфайнмент кварков встроен через инфракрасное обрезание на верхнем пределе масштабного интегрирования, чтобы избежать появления сингулярностей в матричных элементах. Параметр инфракрасного обрезания λ универсален для всех процессов. Ковариантная модель ограниченных кварков имеет ограниченное число параметров: массы легких и тяжелых составляющих кварков, параметры размера, которые описывают размер распределения составляющих кварков внутри адрона, и параметр инфракрасного обрезания λ . Они определяются подгонкой к имеющимся экспериментальным данным. Мы фиксируем параметры Λ в соответствии с экспериментальным значением констант лептонного распада.

В рамках Стандартной модели редкие распады типа $b \rightarrow d$ описываются с использованием эффективного гамильтониана, который может быть выражен через разложение операторного произведения. Эффективный гамильтониан для распада

$b \rightarrow dl^+ l^-$ имеет вид [17-22]:

$$H_{SM}^{eff} = -\frac{4G_F}{\sqrt{2}} V_{td}^* V_{td} (\sum_{i=10}^{10} C_i(\mu) O_i(\mu) + \lambda_u \sum_{i=10}^{10} C_i(\mu) [O_i(\mu) - O_i^u(\mu)]) \quad (1)$$

где C_i – коэффициенты Вильсона, а O_i – набор локальных операторов, полученных в рамках SM для перехода $b \rightarrow dl^+ l^-$. Операторы включают такие вклады, как токи кварков, глюонов и фотонов, взаимодействующих с кварками внутри мезонов.

Форм-факторы перехода $B \rightarrow \rho$ выражены в следующем виде в рамках ковариантной модели кварков с конфайнментом

$$\langle \rho(p_2, \epsilon) | \bar{d} O^\mu b | B(p_1) \rangle = \frac{\epsilon_\nu^\dagger}{m_1 + m_2} [-g^{\mu\nu} P \cdot q A_0(q^2) + P^\mu P^\nu A_+(q^2) + q^\mu P^\nu A_-(q^2) + i \epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} P_\alpha q_\beta V(q^2)], \quad (2)$$

$$\langle \rho(p_2) | \bar{d} \sigma^{\mu\nu} q_\nu (1 + \gamma^5) b | B(p_1) \rangle = \epsilon_\nu^\dagger (- (g^{\mu\nu} - \frac{q^\mu q^\nu}{q^2}) P \cdot q a_0(q^2) + (P^\mu P^\nu - q^\mu P^\nu P \cdot \frac{q}{q^2}) a_+(q^2) + i \epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} P_\alpha q_\beta g(q^2))$$

где $P = p_1 + p_2$, $q = p_1 - p_2$. В приведенных выше уравнениях p_1 и p_2 импульсы B мезона с массой m_1 и дочернего мезона с массой m_2 , ϵ – вектор поляризации дочернего мезона, а $O^\mu = \gamma^\mu (1 - \gamma^5)$ – слабая матрица Дирака. Также условие «оболочки» требует, чтобы $p_1^2 = m_1^2 = m_b^2$ и $p_2^2 = m_2^2 = m_\rho^2$.

Таблица 1. Параметры ковариантной модели кварков

$m(u/d)$	m_s	m_c	m_b	λ	Λ_B	Λ_ρ	m_B	m_ρ	
0.241	0.428	1.67	4.68	0.181	1.963	0.624	5.279	0.775	ГЭВ

Форм-факторы вычисляются для различных значений переданного импульса q^2 с использованием кодов, написанных на языках программирования FORTRAN и Mathematica. Полученные форм-факторы выражаются через параметризацию двойного полюса, что позволяет упростить дальнейшие вычисления:

$$F(q^2) = \frac{F(0)}{1 - as + bs^2}, s = \frac{q^2}{m_B^2} \quad (3)$$

где $F(0)$, a и b – параметры, определяемые из численных расчетов, а m_B – масса B мезона.

Эта параметризация обеспечивает точное представление форм-факторов на всем диапазоне q^2 и позволяет использовать их в последующих вычислениях брэнчингов распада и других наблюдаемых величин. Ширина этих распадов вычисляется путем интегрирования по q^2 дифференциального распределения [23]

$$\frac{d\Gamma(b \rightarrow dl^+ l^-)}{dq^2} = \frac{G_F^2}{(2\pi)^3} \left(\frac{\alpha \lambda_d}{2\pi} \right)^2 \frac{|\mathbf{p}_2| q^2 \beta_l}{12 m_1^2} \mathcal{H}_{tot} \quad (4)$$

$$\mathcal{H}_{tot} = \frac{1}{2} (\mathcal{H}_U^{11} + \mathcal{H}_U^{22} + \mathcal{H}_L^{11} + \mathcal{H}_L^{22}) + \delta_{ll} \left(\frac{1}{2} \mathcal{H}_U^{11} - \mathcal{H}_U^{22} + \frac{1}{2} \mathcal{H}_L^{11} - \mathcal{H}_L^{22} + \frac{3}{2} \mathcal{H}_S^{22} \right)$$

В дальнейшем мы используем краткое обозначение $m_1 = m_B$, а m_2 – это масса ρ мезона, $\beta_l = \sqrt{1 - 4m_l^2/q^2}$, $\delta_{ll} = 2m_l^2/q^2$ – коэффициент подавления сдвига спиральности, $|\mathbf{p}_2| = \lambda^{1/2}(m_1^2, m_2^2, q^2)/(2m_1)$ – импульс ρ мезона в системе отсчета с помощью функции Келлена $\lambda(a, b, c) = a^2 + b^2 + c^2 - 2(ab + ac + bc)$. Также $\lambda_d = |V_{tb}^* V_{td}|$ – произведение элементов матрицы Каббиво-Кабаяши-Москава (СКМ) [24], отвечающие за переходы между соответствующими кварками.

В приведенном выше уравнении билинейные комбинации структурной функции спиральности для каналов распада $B \rightarrow \rho$ определяются как [20]:

$$\mathcal{H}_U^{ii} = |H_{+1+1}^i|^2 + |H_{-1-1}^i|^2 \quad \mathcal{H}_L^{ii} = |H_{00}^i|^2 \quad \mathcal{H}_S^{ii} = |H_{t0}^i|^2 \quad (5)$$

где амплитуды выражаются через форм-факторы, входящие в матричный элемент $b \rightarrow d^* l$ редкого распада, как:

$$\begin{aligned} H_{t0}^i &= \frac{1}{m_1 + m_2} \frac{1}{2m_2\sqrt{q^2}} (Pq(-A_0^i + A_+^i) + q^2 A_-^i) \\ H_{\pm 1 \pm 1}^i &= \frac{1}{m_1 + m_2} (-PqA_0^i \pm 2m_1 |\mathbf{p}_2| V^i) \\ H_{00}^i &= \frac{1}{m_1 + m_2} \frac{1}{2m_2\sqrt{q^2}} (-Pq(m_1^2 - m_2^2 - q^2)A_0^i + 4m_1^2 |\mathbf{p}_2|^2 A_+^i) \end{aligned} \quad (6)$$

Численные результаты

В данной работе были вычислены форм-факторы для перехода $B \rightarrow \rho$, определенные в уравнении (2), в рамках ковариантной модели кварков во всей кинематической области квадрата переданного импульса q^2 и приведены в таблице 2.

Таблица 2. Форм-факторы перехода $B \rightarrow \rho$ в рамках модели.

Форм-фактор	F(0)	a	b
A_+	0.227 ± 0.018	1.355	0.355
A_-	-0.240 ± 0.019	1.415	0.404
A_0	0.319 ± 0.026	0.528	-0.295
V	0.259 ± 0.021	1.472	0.452
a_0	0.233 ± 0.019	0.575	-0.254
a_+	0.233 ± 0.019	1.362	0.360
g	0.233 ± 0.019	1.477	0.457

На рисунке 1 представлены все форм-факторы перехода $B \rightarrow \rho$ во всей кинематической области $0 \leq q^2 \leq q_{\max}^2$. Форм-факторы приведены следующими линиями: сплошная черная линия – A_0 , прерывистая желтая – A_+ , прерывистая зеленая – A_- , пунктирная оранжевая – V , сплошная красная линия – a_0 , сплошная синяя – a_+ и сплошная салатная – g .

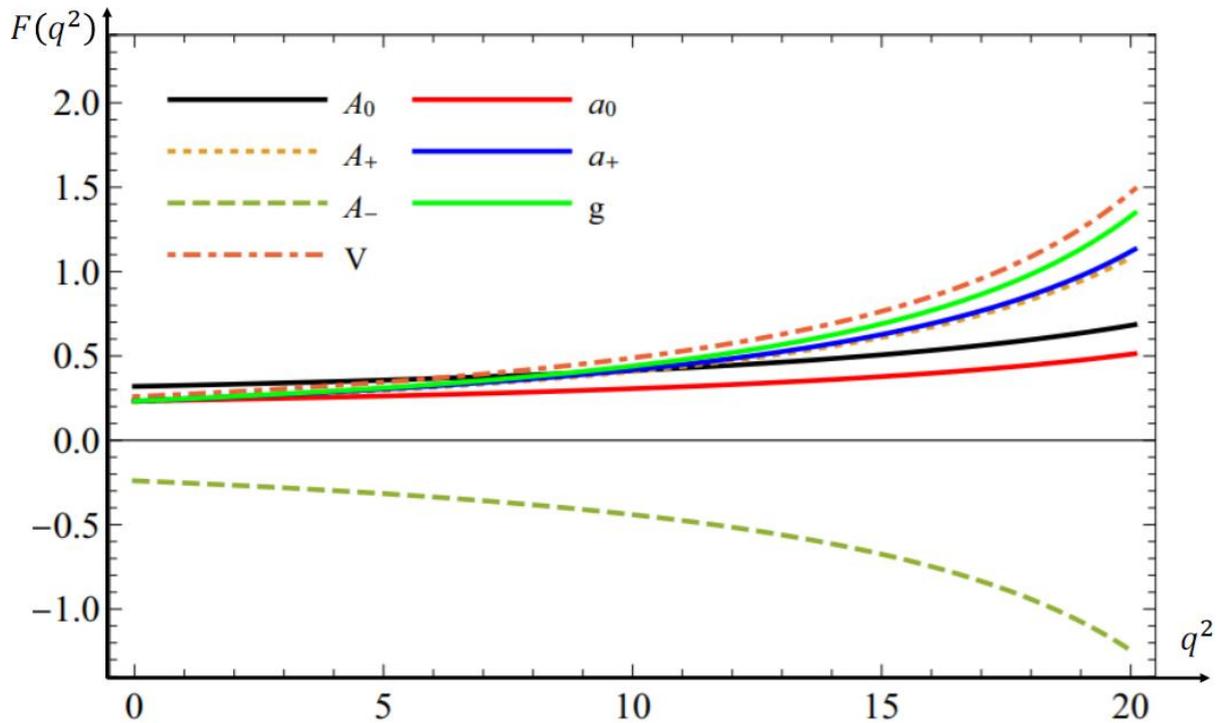


Рисунок 1. Визуализация форм-факторов перехода $B \rightarrow \rho$.

Определив параметры модели и форм-факторы перехода, мы также сравниваем наши результаты с предсказаниями из других теоретических подходов. Для сравнения с другими теоретическими подходами мы используем уравнение, позволяющие приводить наши форм-факторы в вид форм-факторов Бауэр-Стеч-Вирбель (BSW) из работы [25]. Обозначив их надстрочным индексом, чтобы отличать от наших форм-факторов, мы получаем следующие соотношения:

$$\begin{aligned}
 A_0 &= \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} A_1^c & A_+ &= A_2^c \\
 A_- &= \frac{2m_2(m_1 + m_2)}{q^2} (A_3^c - A_0^c) & V &= V^c \\
 a_+ &= T_2^c + \frac{q^2}{m_1^2 - m_2^2} T_3^c & a_0 &= T_2^c \\
 & & g &= T_1^c
 \end{aligned} \tag{8}$$

Кроме того, мы также отмечаем, что форм-факторы, указанные выше, должны удовлетворять следующим ограничениям:

$$\begin{aligned}
 A_0^c(0) &= A_3^c(0) \\
 2m_2 A_3^c(q^2) &= (m_1 + m_2) A_1^c(q^2) - (m_1 - m_2) A_2^c(q^2)
 \end{aligned} \tag{9}$$

Поскольку $a_0(0) = a_+(0) = g(0)$, мы представляем форм-факторы

$$A_0^c = \frac{(m_1 - m_2)[A_0(0) - A_+(0)]}{2m_2}, A_1^c(0) = \frac{A_0(0)(m_1 - m_2)}{m_1 + m_2}, A_2^c(0) = A_+(0),$$

$T_1^c = g(0)$ и $T_3^c(0) = \lim_{q^2 \rightarrow 0} (m_1^2 - m_2^2)(a_+ - a_0)/q^2$. Необходимо отметить, что для сравнения с другими теоретическими подходами мы опускаем верхний индекс для упрощения. Сравнение форм-факторов, полученных в рамках нашей модели ССQM для перехода $B \rightarrow \rho$, с данными из других теоретических моделей приведены в таблице 3. Теоретические предсказания находятся в удовлетворительном согласии между собой, кроме форм-фактора T_3 из работы [9]. Указаны ошибки для значений, где они были вычислены в рамках моделей.

Таблица 3. Сравнение форм-факторов перехода $B \rightarrow \rho$ с данными из других теоретических подходов

	Наша модель ССQM	LCSR [8]	LCSR [9]	LCSR [10]	LCSR [11]	RQM [12]	CQM [13]
$V(0)$	0.259±0.021	0.323	0.327±0.031	0.27±0.14	0.298	0.295±0.015	0.31
$A_0(0)$	0.266±0.013	0.303	0.356±0.042	-	0.260	0.231±0.012	0.30
$A_1(0)$	0.238±0.019	0.242	0.262±0.026	-	0.227	0.269±0.014	0.26
$A_2(0)$	0.227±0.018	0.221	0.297±0.035	0.19±0.11	0.215	0.282±0.014	0.24
$T_{1,2}(0)$	0.233±0.019	0.267	0.267±0.026	0.24±0.12	0.260	0.290±0.015	0.27
$T_3(0)$	0.179±0.014	0.176	0.747±0.076	-	0.184	0.124±0.007	0.19

Таблица 4 содержит результаты расчета брэнчингов для переходов $B \rightarrow \rho l^+ l^-$, которые были вычислены с использованием полученных форм-факторов. Сравнение с экспериментальными данными и теоретическими предсказаниями показало, что брэнчинги, предсказанные в нашей модели, находятся в хорошем согласии с данными из работ [26] и [12, 27]. Также на рисунке 2 красной кривой представлен брэнчинг для канала $B^+ \rightarrow \rho^+ \mu^+ \mu^-$ и синей кривой представлен брэнчинг для канала $B^+ \rightarrow \rho^+ \tau^+ \tau^-$ в единицах 10^{-9} .

Таблица 4. Значение брэнчингов распада $B \rightarrow \rho l^+ l^-$ в единицах 10^{-9}

	Наша модель ССQM	LCSR [26]	RQM [12, 27]
$B^+ \rightarrow \rho^+ e^+ e^-$	4.82±2.39	4.0±0.4	-
$B^+ \rightarrow \rho^+ \mu^+ \mu^-$	4.05±1.45	3.9±0.4	4.4±0.5
$B^+ \rightarrow \rho^+ \tau^+ \tau^-$	0.63±0.14	0.40±0.04	0.75±0.08

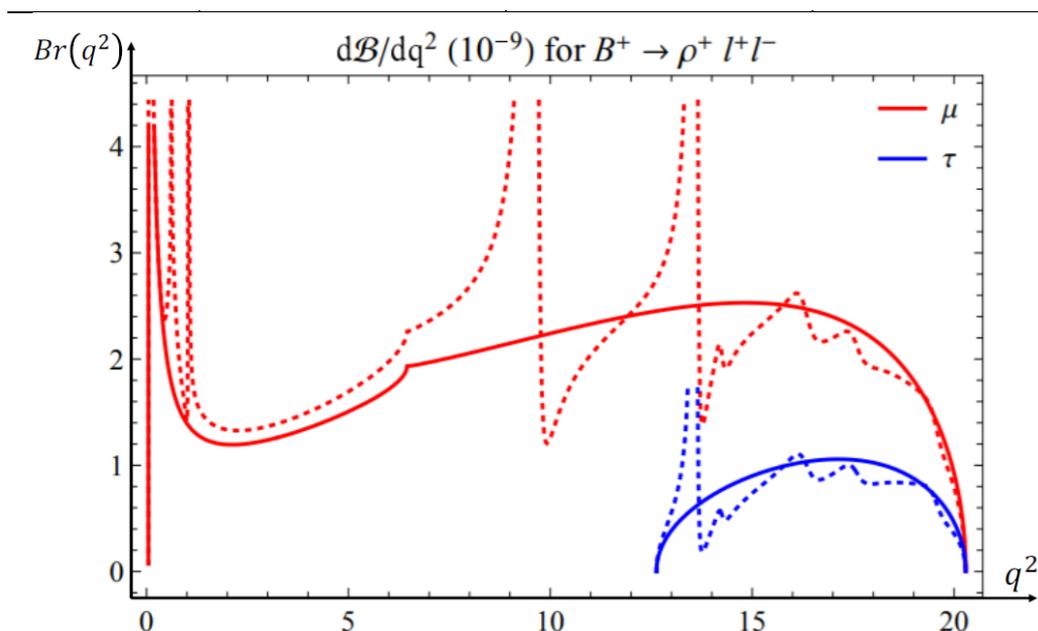


Рисунок 2. Численные значения брэнчингов для каналов $B^+ \rightarrow \rho^+ \mu^+ \mu^-$ и $B^+ \rightarrow \rho^+ \tau^+ \tau^-$

Заклучение

В данной работе были исследованы распады $B \rightarrow \rho$ в рамках ковариантной модели кварков с конфайнментом. Используя этот подход, удалось вычислить форм-факторы переходов для полного диапазона значений переданного импульса q^2 , что позволило предсказать брэнчинги распада $B \rightarrow \rho l^+ l^-$.

Результаты, полученные в ходе данной работы, продемонстрировали высокую степень согласия с предсказаниями других теоретических моделей, таких, как правила сумм на световом конусе, квантовая хромодинамика на решетке и релятивистская модель кварков. Это подтверждает надежность и точность модели для изучения редких распадов, в которых участвуют тяжелые кварки.

Благодарность

Работа выполнена в рамках проекта (грант №BR21881941) при поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

Вклад авторов

Исадыков А. – руководство по исследованию, теоретические расчеты, утверждение окончательного варианта статьи для публикации;

Ильясов М. – анализ и интерпретация результатов работы, написание текста.

Список литературы

1. Aaij R. et al. [LHCb], $B \rightarrow \pi l l$ Form Factors for New Physics Searches from Lattice QCD // JHEP 1212, 125 (2012), arXiv:1507.01618 – **журнал на англ языке**
2. Aaij R. et al. [LHCb], First measurement of the differential branching fraction and CP asymmetry of the $B_{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} \mu^+ \mu^-$ decay // JHEP 1510, 034 (2015), arXiv:1509.00414. – **журнал на англ языке**
3. Aaij R. et al. [LHCb], JHEP 1807, 020 (2018)
4. Aaij R. et al. [LHCb], Measurement of Form-Factor-Independent Observables in the Decay $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ // Phys. Rev. Lett.- Vol. 111, (2013), 191801, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.191801> – **журнал на англ языке**
5. Aaij R. et al. [LHCb], Test of lepton universality with $B^0 \rightarrow K^{*0} l^+ l^-$ decays // JHEP 08, (2017), 055 [https://doi.org/10.1007/JHEP08\(2017\)055](https://doi.org/10.1007/JHEP08(2017)055) – **журнал на англ языке**
6. Aaij R. et al. [LHCb], Test of Lepton Universality Using $B^+ \rightarrow K^+ \ell^+ \ell^-$ Decays // Phys. Rev. Lett.- Vol. 113, (2014), 151601, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.151601> – **журнал на англ языке**
7. Aaij R. et al. [LHCb], Study of the rare B_s^0 and B^0 decays into the $\pi^+ \pi^- \mu^+ \mu^-$ final state // Phys. Lett. B, Vol. 743, (2015), 46, arXiv:1412.6433. – **журнал на англ языке**
8. Ball P. and Zwicky R., $B, d, s \rightarrow \rho, \omega, K^*, \phi$ decay form factors from light-cone sum rules reexamined // Phys. Rev. D, Vol. 71, (2005), 014029, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.71.014029> – **журнал на англ языке**
9. Bharucha A. et al., $B \rightarrow V \ell^+ \ell^-$ in the Standard Model from light-cone sum rules // JHEP 1608, 098 (2016), [https://doi.org/10.1007/JHEP08\(2016\)098](https://doi.org/10.1007/JHEP08(2016)098) – **журнал на англ языке**
10. Gubernari N. et al., $B \rightarrow P$ and $B \rightarrow V$ form factors from B-meson light-cone sum rules beyond leading twist // JHEP 01, 150 (2019), [https://doi.org/10.1007/JHEP01\(2019\)150](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2019)150)
11. Lu C.D. et al., Heavy-to-light form factors on the light cone // Phys. Rev. D, Vol. 76, (2007), 014013, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.76.014013> – **журнал на англ языке**
12. Faustov R.N. and Galkin V.O., Rare $B \rightarrow \pi \ell \ell^-$ and $B \rightarrow \rho \ell \ell^-$ decays in the relativistic quark model // Eur. Phys. J. C.- Vol. 74(6), (2014), 2911, <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-014-2911-6> – **журнал на англ языке**
13. Melikhov D. and Stech B., Weak form factors for heavy meson decays: An update // Phys. Rev. D.- Vol. 62, (2000), 014006, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.62.014006>
14. Weinberg S., Elementary particle theory of composite particles // Phys. Rev. -Vol. 130, (1963), No 776. – **журнал на англ языке**
15. Salam A., Lagrangian theory of composite particles // Nuovo Cimento -Vol. 25, (1962), No. 224. – **журнал на англ языке**
16. Hayashi K. et al., Compositeness criteria of particles in quantum field theory and S-matrix theory // Fortsch. Phys. -Vol. 15, (1967), No. 625. – **журнал на англ языке**
17. Buras A.J. and Munz M., Effective Hamiltonian for $B \rightarrow X s e^+ e^-$ beyond leading logarithms in the naive dimensional regularization and 't Hooft-Veltman schemes // Phys. Rev. D.- Vol. 52, (1995), 186, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.186> – **журнал на англ языке**
18. Kruger F. and Sehgal L., CP violation in the decay $B \rightarrow X d e^+ e^-$ // Phys. Rev. D.- Vol. 55, (1997), 2799, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.55.2799> – **журнал на англ языке**
19. Buchalla G. et al., Weak decays beyond leading logarithms // Rev. Mod. Phys.- Vol. 68, (1996), 1125, <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.68.1125> – **журнал на англ языке**

20. Issadykov A., Soni N.R., Gadaria A.N., Patel J.J., Pandya J.N., $B \rightarrow \pi$ Decay Form Factors from Covariant Confined Quark Model // Proceedings of Science, 2022, 380, 171 -**сборник**

21. Issadykov A., $B \rightarrow \rho$ decay form factors from covariant confined quark model // AIP Conference Proceedings, 2019, 2163, 090006, <https://doi.org/10.1063/1.5130128> -**журнал на англ языке**

22. Soni N.R., Issadykov A., Gadaria A.N., Patel J.J., Pandya J.N., Rare $b \rightarrow d$ decays in covariant confined quark model // European Physical Journal A, 2022, 58(3), 39, <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-022-00685-y> -**журнал на англ языке**

23. Faessler A. et al., The exclusive rare decays $B \rightarrow K^* \ell \ell$ and $B_c \rightarrow D(D^*) \ell \ell$ in a relativistic quark model // Eur. Phys. J. Direct.- Vol. 4(18), (2002), <https://doi.org/10.1007/s1010502c0018> -**журнал на англ языке**

24. R.L. Workman et al. (Particle Data Group), Review of Particle Physics // PTEP -Vol. 083C01, (2022), <https://doi.org/10.1093/ptep/ptac097> -**журнал на англ языке**

25. Wirbel M. et al., Exclusive semileptonic decays of heavy mesons // Z. Phys. C, Vol. 29, (1985), 637, <https://doi.org/10.1007/BF01560299> -**журнал на англ языке**

26. Wu Y.L. et al., $B(s)$, $D(s) \rightarrow \pi, K, \eta, \rho, K^*, \omega, \phi$ transition form factors and decay rates with extraction of the ckm parameters $|V_{ub}|$, $|V_{cs}|$, $|V_{cd}|$ // Int. J. Mod. Phys. A.- Vol. 21, (2006), No. 30, pp. 6125-6172. <https://doi.org/10.1142/S0217751X06033209> -**журнал на англ языке**

27. Faustov R.N. and Galkin V.O., Rare B_s decays in the relativistic quark model // Eur. Phys. J. C.- Vol.73(10), (2013), 2593 <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-013-2593-5> -**журнал на англ языке**

М.Н. Ильясов^{1,2}, А.Н. Исадыков^{*1,3}

¹Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан,

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,

³Біріккен ядролық зерттеулер институты, Дубна, Ресей

(E-mails: ¹vifi5960@gmail.com, ²a.issadykov@inp.kz)

Кварктардың ковариантты моделі негізінде $B \rightarrow \rho$ ыдырауының форм-факторы және жартылай лептондық брэнчингтерін есептеу

Андатпа. Бұл жұмыста $B \rightarrow \rho$ ауысуы шектелген кварктардың коварианттық моделі шеңберінде зерттелінді. Шектелген кварктардың коварианттық моделі адрондық әрекеттесулердің кванттық өріс негізіндегі тәсілі болып табылады, адрондардың құрамдас кварктарымен әрекеттесетін өзара әрекеттесуінің Лагранжианына негізделген. Модельдің басқа теориялық модельдерден маңызды айырмашылығы - сандық нәтижелер (форм факторлар, брэнчингтер, ен және бұрыштық бақыланатын мәндер) берілген q^2 импульстің барлық кинематикалық диапазонында есептелетіндігі. $B \rightarrow \rho$ ауысуы жоғары энергиялар физикасы саласы үшін қызығушылық тудыратын пән болып табылады. Форм факторлар мен брэнчингтер әртүрлі теориялық тәсілдерде есептелінген. ЛНСб коллаборациясы экспериментшілері бұл ыдырауды болашақта өлшеуді жоспарлап отыр, өйткені бұл ауысу бейтарап токтың өзгеретін дәмімен жүреді. Бұл жұмыста берілген q^2 импульстің барлық кинематикалық диапазонында $B \rightarrow \rho$ ауысуының форм факторларын есептедік. Моделіміздің сандық нәтижелерін басқа теориялық

тәсілдердегі болжамдармен салыстырдық. Басқа теориялық тәсілдермен салыстыру үшін біз форм факторларымызды Бауэр-Штех-Вирбель (BSW) форм факторлары ретінде көрсеттік. Теориялық болжамдар бір-бірімен қанағаттанарлық сәйкес келеді. Осы формфакторларын пайдалана отырып, $B^+ \rightarrow \rho^+ l^+ l^-$ жартылай лептоникалық ыдырауы үшін брэнчингтер есептелді, мұндағы l -лептондар. Біз берілген импульстің квадратына байланысты формфакторлар мен брэнчингтердің әрекетін көрсететін графиктерді құрдық. Бұл жұмыстан алынған нәтижелер жарық конусының қосындысы ережелері, тор кванттық хромодинамика және релятивистік кварк моделі сияқты басқа теориялық модельдердің болжамдарымен жоғары дәрежеде сәйкестігін көрсетті. Бұл ауыр кварктардың қатысуымен сирек кездесетін ыдырауларды зерттеуге арналған шектелген кварктардың коварианттық моделінің сенімділігі мен дәлдігін растайды.

Түйін сөздер: Стандартты модель, өрістің кванттық теориясы, B мезондар, форм- факторлар, брэнчинг.

^{1,2}M.N. Ilyassov, ^{1,3}A.N. Issadykov*

¹ Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan,

² al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

³ Joint institute for nuclear research, Dubna, Russia

(E-mails: 1vifi5960@gmail.com, 2a.issadykov@inp.kz)

Calculation of form factors and semi-lepton branchings of the $B \rightarrow \rho$ transition in the covariant quark model

Abstract. This paper present a study of the $B \rightarrow \rho$ transition in the framework of the covariant confined quark model. The covariant confined quark model is a quantum field approach to hadron interactions based on the Lagrangian of the interaction of hadrons interacting with their constituent quarks. An important difference from other theoretical models is that the numerical results (form factors, branchings, widths and angular observables) are calculated over the entire kinematic range of the transferred momentum q^2 . The $B \rightarrow \rho$ transition is a subject of interest in high energy physics. Form factors and branchings have been obtained in different theoretical approaches. Experimentalists from the LHCb collaboration plan to measure this decay in the future, since this transition occurs with a changing flavor of neutral current. In this work we have calculated the form factors for the $B \rightarrow \rho$ transition over the entire kinematic range of the transferred momentum q^2 . We have compared the numerical results from our model with the predictions of other theoretical approaches. We have converted our form factors into the Bauer-Stech-Wirbel (BSW) form factors for comparison with other theoretical approaches. The theoretical predictions are in satisfactory agreement with each other. Using these form factors we have calculated the branchings for the semileptonic decay $B^+ \rightarrow \rho^+ l^+ l^-$, where l are leptons. We have plotted the behavior of the form factors and branchings as functions of the squared momentum transfer. The results obtained in this work have demonstrated a high degree of agreement with the predictions of other theoretical models such as the light-cone sum rules, lattice quantum chromodynamics, and the relativistic quark model. This confirms the reliability and accuracy of the covariant confined quark model for studying rare decays involving heavy quarks.

Keywords: standard model, quantum field theory, B mesons, form factors, branching.

References

1. Aaij R. et al. [LHCb], $B \rightarrow \pi l l$ Form Factors for New Physics Searches from Lattice QCD // JHEP 1212, 125 (2012), arXiv:1507.01618
2. Aaij R. et al. [LHCb], First measurement of the differential branching fraction and CP asymmetry of the $B_{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} \mu^{+} \mu^{-}$ decay // JHEP 1510, 034 (2015), arXiv:1509.00414.
3. Aaij R. et al. [LHCb], JHEP 1807, 020 (2018)
4. Aaij R. et al. [LHCb], Measurement of Form-Factor-Independent Observables in the Decay $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^{+} \mu^{-}$ // Phys. Rev. Lett.- Vol. 111, (2013), 191801, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.191801>
5. Aaij R. et al. [LHCb], Test of lepton universality with $B^0 \rightarrow K^{*0} l^{+} l^{-}$ decays // JHEP 08, (2017), 055 [https://doi.org/10.1007/JHEP08\(2017\)055](https://doi.org/10.1007/JHEP08(2017)055)
6. Aaij R. et al. [LHCb], Test of Lepton Universality Using $B^{+} \rightarrow K^{+} \ell^{+} \ell^{-}$ Decays // Phys. Rev. Lett.- Vol. 113, (2014), 151601, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113>.
7. Aaij R. et al. [LHCb], Study of the rare B_{s0} and B^0 decays into the $\pi^{+} \pi^{-} \mu^{+} \mu^{-}$ final state // Phys. Lett. B, Vol. 743, (2015), 46, arXiv:1412.6433.
8. Ball P. and Zwicky R., $B, d, s \rightarrow \rho, \omega, K^{*}, \phi$ decay form factors from light-cone sum rules reexamined // Phys. Rev. D, Vol. 71, (2005), 014029, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.71.014029>
9. Bharucha A. et al., $B \rightarrow V \ell^{+} \ell^{-}$ in the Standard Model from light-cone sum rules // JHEP 1608, 098 (2016), [https://doi.org/10.1007/JHEP08\(2016\)098](https://doi.org/10.1007/JHEP08(2016)098)
10. Gubernari N. et al., $B \rightarrow P$ and $B \rightarrow V$ form factors from B-meson light-cone sum rules beyond leading twist // JHEP 01, 150 (2019), [https://doi.org/10.1007/JHEP01\(2019\)150](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2019)150)
11. Lu C.D. et al., Heavy-to-light form factors on the light cone // Phys. Rev. D, Vol. 76, (2007), 014013, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.76.014013>
12. Faustov R.N. and Galkin V.O., Rare $B \rightarrow \pi \ell \ell^{-}$ and $B \rightarrow \rho \ell \ell^{-}$ decays in the relativistic quark model // Eur. Phys. J. C.- Vol. 74(6), (2014), 2911, <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-014-2911-6>
13. Melikhov D. and Stech B., Weak form factors for heavy meson decays: An update // Phys. Rev. D.- Vol. 62, (2000), 014006, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.62.014006>
14. Weinberg S., Elementary particle theory of composite particles // Phys. Rev. -Vol. 130, (1963), No 776.
15. Salam A., Lagrangian theory of composite particles // Nuovo Cimento -Vol. 25, (1962), No. 224.
16. Hayashi K. et al., Compositeness criteria of particles in quantum field theory and S-matrix theory // Fortsch. Phys. -Vol. 15, (1967), No. 625.
17. Buras A.J. and Munz M., Effective Hamiltonian for $B \rightarrow X s e^{+} e^{-}$ beyond leading logarithms in the naive dimensional regularization and 't Hooft-Veltman schemes // Phys. Rev. D.- Vol. 52, (1995), 186, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.186>
18. Kruger F. and Sehgal L., CP violation in the decay $B \rightarrow X d e^{+} e^{-}$ // Phys. Rev. D.- Vol. 55, (1997), 2799, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.55.2799>
19. Buchalla G. et al., Weak decays beyond leading logarithms // Rev. Mod. Phys.- Vol. 68, (1996), 1125, <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.68.1125>
20. Issadykov A., Soni N.R., Gadaria A.N., Patel J.J., Pandya J.N., $B \rightarrow \pi$ Decay Form Factors from Covariant Confined Quark Model // Proceedings of Science, 2022, 380, 171
21. Issadykov A., $B \rightarrow \rho$ decay form factors from covariant confined quark model // AIP Conference Proceedings, 2019, 2163, 090006, <https://doi.org/10.1063/1.5130128>

22. Soni N.R., Issadykov A., Galaria A.N., Patel J.J., Pandya J.N., Rare $b \rightarrow d$ decays in covariant confined quark model // European Physical Journal A, 2022, 58(3), 39, <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-022-00685-y>
23. Faessler A. et al., The exclusive rare decays $B \rightarrow K^* \ell$ and $B_c \rightarrow D(D^*) \ell$ in a relativistic quark model // Eur. Phys. J. Direct.- Vol. 4(18), (2002), <https://doi.org/10.1007/s1010502c0018>
24. R.L. Workman et al. (Particle Data Group), Review of Particle Physics // PTEP -Vol. 083C01, (2022), <https://doi.org/10.1093/ptep/ptac097>
25. Wirbel M. et al., Exclusive semileptonic decays of heavy mesons // Z. Phys. C, Vol. 29, (1985), 637, <https://doi.org/10.1007/BF01560299>
26. Wu Y.L. et al., $B(s)$, $D(s) \rightarrow \pi, K, \eta, \rho, K^*, \omega, \phi$ transition form factors and decay rates with extraction of the ckm parameters $|V_{ub}|$, $|V_{cs}|$, $|V_{cd}|$ // Int. J. Mod. Phys. A.- Vol. 21, (2006), No. 30, pp. 6125-6172. <https://doi.org/10.1142/S0217751X06033209>
27. Faustov R.N. and Galkin V.O., Rare B_s decays in the relativistic quark model // Eur. Phys. J. C.- Vol.73(10), (2013), 2593 <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-013-2593-5>

Сведения об авторах:

Исадыков А.Н. – автор для корреспонденции, PhD, заведующий лабораторией, Институт ядерной физики МЭ РК, ул. Ибрагимова, 1, 050032, Алматы, Казахстан.

Ильясов М.Н. – магистрант, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, проспект аль-Фараби, 71, 050038, Алматы, Казахстан.

Issadykov A.N. – corresponding author, PhD, head of lab, Institute for Nuclear Physics ME RK, Ibragimov Street, 1, 050032, Almaty, Kazakhstan

Ilyassov M.N. – master student, Kazakh National University, Al-Farabi Avenue, 71, 050038, Almaty, Kazakhstan.

Исадыков А.Н. – хат-хабар авторы, PhD, зертхана меңгерушісі, Ядролық физика институты ЭМ ҚР, Ибрагимов көш., 1, 050032, Алматы, Қазақстан

Ильясов М.Н. – магистрант, Қазақ Ұлттық университеті, әл-Фараби даңғылы, 71, 050038, Алматы, Қазақстан.



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).