

УДК 517.958:539.1; 539.126.4

РОЖДЕНИЕ D -МЕЗОНОВ НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ В РЕДЖЕВСКОМ ПРЕДЕЛЕ КХД*

А. В. Карпишков, М. А. Нефёдов,
В. А. Салеев, А. В. Шипилова

Самарский государственный университет,
Россия, 443011, Самара, ул. Академика Павлова, 1.

Аннотация

В работе рассматривается инклюзивное рождение очарованных D^0 , D^+ , D^{*+} и D_s^+ мезонов в протон-антипротонных соударениях на коллайдере Тэватрон и протон-протонных соударениях на Большом адронном коллайдере (БАК). Теоретические расчёты проведены в лидирующем порядке теории реджезованных партонов (ТРП), основанной на эффективной квантовой теории поля Л. Н. Липатова и подходе k_T -факторизации при высоких энергиях. В работе были использованы универсальные функции фрагментации (ФФ), полученные фитированием данных рождения D -мезонов на линейном электрон-позитронном коллайдере LEP1. Нами описаны распределения D -мезонов по поперечному импульсу, измеренные в центральной области быстрот коллаборациями CDF на Тэватроне ($|y| < 1$) и ALICE на БАК ($|y| < 0.5$) в пределах ошибок измерений и без привлечения свободных параметров. На стадии численных расчётов нами использовались неинтегрированные глюонные функции распределения (ФР) Кимбера, Мартина и Рыскина (КМР).

Ключевые слова: квантовая хромодинамика, k_T -факторизация, теория реджезованных партонов, физика высоких энергий, очарованные мезоны.

doi: <http://dx.doi.org/10.14498/vsgtu1402>

© 2015 Самарский государственный технический университет.

Образец для цитирования

Карпишков А. В., Нефёдов М. А., Салеев В. А., Шипилова А. В. Рождение D -мезонов на Большом адронном коллайдере в реджевском пределе КХД // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2015. Т. 19, № 3. С. 441–461. doi: [10.14498/vsgtu1402](http://dx.doi.org/10.14498/vsgtu1402).

Сведения об авторах

Антон Витальевич Карпишков (karpishkov@rambler.ru), аспирант, каф. общей и теоретической физики.

Максим Александрович Нефёдов (nefedovma@gmail.com), аспирант, каф. общей и теоретической физики.

Владимир Анатольевич Салеев (д.ф.-м.н., проф.; saleev@samsu.ru; автор, ведущий переписку), профессор, каф. общей и теоретической физики.

Александра Викторовна Шипилова (к.ф.-м.н.; alexshipilova@samsu.ru), научный сотрудник, лаб. математического моделирования материалов Межвузовского Центра теоретического материаловедения СамГУ.

* Настоящая статья представляет собой расширенный вариант доклада [1], сделанного авторами на Четвёртой международной конференции «Математическая физика и её приложения» (Россия, Самара, 25 августа — 1 сентября 2014).

Введение. Изучение рождения очарованных мезонов с большими поперечными импульсами в высокоэнергетических адронных столкновениях представляет возможность для проверки пертурбативной квантовой хромодинамики (КХД). В процессах рождения таких мезонов $\mu \geq t$, где μ — характерный энергетический масштаб сильного взаимодействия, имеющий порядок поперечного импульса рождённой частицы, а t — масса тяжёлого кварка, что обеспечивает малость константы сильного взаимодействия $\alpha_s(\mu) \ll 1$. Эти процессы также несут информацию о новом динамическом режиме пертурбативной КХД, называемом пределом Редже, который характеризуется условием $\sqrt{S} \gg \mu \gg \Lambda$, где $\sqrt{S}$ — инвариантная энергия столкновения в системе центра масс сталкивающихся адронов, а Λ — асимптотический масштабный параметр КХД. В пределе Редже появляется новый малый параметр $x \sim \mu/\sqrt{S}$, который с увеличением энергии становится всё более малым, что приводит к появлению вклада логарифмов нового типа $(\alpha_s \log(1/x))^n$ во всех порядках теории возмущений по константе сильного взаимодействия.

Существуют различные пертурбативные поправки, доминирующие в разных процессах и областях фазового пространства. Так, в случае рождения тяжёлых конечных состояний (бозонов Хиггса, пар кварков ($t\bar{t}$), парных струй с большими инвариантными массами или Дрелл—Яновских пар) начальные партоны имеют относительно большую долю импульса $x \sim 0.1$ и поправки в основном обусловлены излучением мягких коллинеарных глюонов, которые могут увеличивать сечение на фактор 2. Напротив, относительно лёгкие конечные состояния (тяжёлые кварконии с малыми поперечными импульсами, одиночные струи, прямые фотоны или парные струи с малыми инвариантными массами) рождаются путём слияния партонов с малыми значениями x , характерное значение $x \sim 10^{-3}$ для энергий $\sqrt{S} \sim 1$ ТэВ. Радиационные поправки к этим процессам обусловлены рождением дополнительных жёстких струй. Единственный способ описания подобных процессов в традиционной коллинеарной партонной модели (КПМ) — это вычисление поправок высших порядков по степеням константы сильного взаимодействия $\alpha_s = g_s^2/4\pi$ к амплитудам рассеяния, что представляет собой сложную задачу для некоторых процессов уже в следующем за лидирующим порядке (СЛП). Чтобы преодолеть эти трудности и учесть значительную часть поправок высших порядков в режиме малых x , был предложен подход k_T -факторизации, или факторизации при высоких энергиях [2–4].

Недавно коллаборация ALICE измерила дифференциальные сечения $d\sigma/dp_T$ для инклюзивного рождения D^0 , D^+ , D^{*+} и D_s^+ мезонов [5, 6] в протон-протонных столкновениях на ускорителе БАК в ЦЕРНе ($\sqrt{S} = 7$ ТэВ) как функцию поперечного момента (p_T) D -мезонов в центральной области быстрот, $|y| < 0.5$. Эти измерения дополняют данные коллаборации CDF [7], полученные ранее в протон-антипротонных столкновениях на ускорителе Тэватрон в области быстрот $|y| < 1.0$ и при энергии столкновения $\sqrt{S} = 1.96$ ТэВ.

Спектры D -мезонов изучались в СЛП КПМ в рамках двух подходов: в так называемых схемах GM-VFN [8–12] и FONNL [13]. В первой схеме, реализованной в работах [14–16], фрагментационные логарифмы, доминирующие при $p_T \gg t$, пересуммированы путём введения функций фрагментации, удовлетворяющих эволюционным уравнениям Докшицера—Грибова—Липатова—Альтарелли—Паризи (ДГЛАП) [17–19]. При этом сохранена за-

зависимость сечения жёсткого рассеяния от массы очарованного кварка для правильного описания спектров D -мезонов в области $p_T \sim m$. ФФ партонов в D -мезоны были получены как в лидирующем, так и в следующем за ним порядках в схеме GM-VFN с помощью фитирования данных, полученных в e^+e^- аннигиляции. Для этого использовались данные коллаборации OPAL с ускорителя LEP1 в ЦЕРНе [20, 21]. Напротив, в подходе FONNL поправки к лидирующему порядку в сечение рождения D -мезонов вычислены с использованием непertурбативных ФФ c -кварков в D -мезон, не являющихся результатом ДГЛАП [17–19] эволюции. Схема FONNL была развита в работах [22, 23] и заключается в вычислении квадратов модулей матричных элементов партонных подпроцессов в СЛП и суммировании логарифмов с большими поперечными импульсами в главном логарифмическом приближении для процессов рождения тяжёлых кварков. Для обеспечения самосогласованности вычислений в FONNL схеме [22, 23] процесс получения непertурбативных ФФ и схема вычислений сечений тяжёлых кварков связаны между собой и должны использоваться вместе. Спектры D -мезонов, измеренные коллаборацией CDF [7] на Тэватроне, а также коллаборацией ALICE [5, 6] на БАК, достаточно хорошо описываются в подходах GM-VFNS [14–16] и FONNL [22, 23] в рамках экспериментальных погрешностей.

Целью настоящей работы является исследование рождения D -мезонов на Тэватроне и БАК в рамках подхода факторизации при высоких энергиях, называемого также подходом k_T -факторизации [2–4], дополненной калибровочно-инвариантными амплитудами с реджезованными глюонами в начальном состоянии [42–45]. Далее такую комбинацию мы будем называть теорией реджезованных партонов (ТРП).

Исследование фрагментационного рождения D -мезонов в k_T -факторизации было проведено в недавней работе [24] с использованием виртуальных глюонов в начальном состоянии и формализма партонных ФР, зависящих от поперечного импульса. В работе [24] показано, что учёт рождения D -мезонов только через процесс глюонного слияния в $c\bar{c}$ -пару недостаточен для описания экспериментальных данных коллаборации ALICE [5]. Согласно расчётам в работе [24], этот результат может свидетельствовать о необходимости учёта вклада многопартонного рассеяния в рождение D -мезонов.

Мы считаем ТРП теоретически более последовательной, так как она основана на калибровочно-инвариантной эффективной теории процессов в квазимультiredжевской кинематике (КМРК) КХД, а также сохраняет калибровочную инвариантность амплитуд и может быть обобщена на вычисления в СЛП. Недавно ТРП была успешно применена для анализа инклюзивного рождения одиночных струй [25], парных струй [26], прямых фотонов [27, 28], фотона и струи [29], лептонных пар Дрелла—Яна [30], b -кварковых струй [31, 32], рождения чармония и боттомония [33–38] на Тэватроне и БАК. Данные исследования продемонстрировали преимущества схемы факторизации при высоких энергиях, основанной на подходе реджезованных партонов, при описании экспериментальных данных в сравнении с вычислениями в КПМ.

1. Модель. Феноменология сильных взаимодействий при высоких энергиях указывает на доминирующую роль процесса слияния глюонов в кварк-антикварковую пару при рождении тяжёлых мезонов. Как показано в работе [15], значительный вклад в сечение рождения D -мезонов вносит фраг-

ментация глюонов и s -кварков в D -мезон, в то время как вклад фрагментации лёгких кварков пренебрежимо мал. Исходя из этого в нашей работе мы рассмотрим только вклады фрагментации s -кварков и глюонов в рождение различных D -мезонов.

В адронных столкновениях сечения жёстких процессов могут быть представлены в виде свёртки зависящих от масштаба партонных (кварковых или глюонных) распределений и квадрата модуля амплитуды жёсткого партонного рассеяния. Указанные распределения соответствуют плотностям партонов в протоне с продольной долей импульса x , проинтегрированным по всем значениям поперечного импульса вплоть до $k_T = \mu$. Их эволюция от масштаба μ_0 , который связан с непertурбативным режимом, до характерного масштаба μ описывается уравнениями эволюции ДГЛАП [17–19], которые позволяют просуммировать большие логарифмы вида $\log(\mu^2/\Lambda_{QCD}^2)$ (коллинеарные логарифмы). Характерный масштаб μ процессов жёсткого рассеяния обычно имеет порядок поперечной массы $m_T = \sqrt{m^2 + |\mathbf{p}_T|^2}$ рождающейся частицы (или адронной струи) с (инвариантной) массой m и поперечным импульсом $\mathbf{p}_T$. С увеличением энергии, когда величина $x \sim \mu/\sqrt{S}$ становится малой, всё более весомый вклад начинает вносить новый тип логарифмов $\log(1/x)$. Их вклад может становиться даже большим, чем вклад коллинеарных логарифмов. Такие логарифмы входят как в партонные распределения, так и в партонные сечения и могут быть пересуммированы в подходе Балицкого—Фадина—Кураева—Липатова (БФКЛ) [39–41]. Этот подход описывает КХД амплитуды рассеяний в области больших S и фиксированного переданного импульса t , при $S \gg |t|$ (область Редже), с различными цветовыми состояниями в t -канале.

Реджезация глюонов имеет место в условиях специальной кинематики процессов при высоких энергиях. При больших $\sqrt{S}$ доминирующие вклады в сечения КХД процессов даёт мультиреджевская кинематика (МРК), в которой все частицы имеют ограниченные (не растущие с $\sqrt{S}$) поперечные импульсы или объединены в струи с ограниченной инвариантной массой каждой струи и большими (растущими с $\sqrt{S}$) инвариантными массами любой пары струй. В порядке логарифмического приближения, следующем за лидирующим, струя может содержать пары партонов (два глюона или кварк-антикварковую пару). Такая кинематика называется квазимультiredжевской кинематикой (КМРК). Несмотря на большое количество диаграмм Фейнмана, дающих ненулевые вклады, оказывается, что в борновском приближении МРК амплитуды приобретают простую факторизованную форму. Более того, радиационные поправки к таким амплитудам не искажают эту форму, а их зависимость от энергии обусловлена факторами Редже $s_i^{\omega(q_i)}$, где s_i — инвариантные массы пар соседних струй, а $\omega(q_i)$ можно интерпретировать как отклонение параметра траектории Редже глюона от единицы, зависящее от переданного импульса. Такое явление называется реджезацией глюона.

Важная роль отведена вершинам взаимодействий реджезованных глюонов с обычными глюонами и кварками. Для их определения можно использовать один из двух способов: «классический» БФКЛ метод, основанный на свойствах аналитичности и унитарности амплитуд рождения частиц в условиях реджевской кинематики [42], или они могут быть получены непосред-

ственно из неабелевого калибровочно инвариантного эффективного действия для взаимодействий реджезованных партонов с обычными партонами в КХД. Этот метод впервые был предложен в работе [43] для реджезованных глюонов, а в работе [44] — для реджезованных кварков. Полный набор правила Фейнмана для индуцированных и эффективных вершин можно найти в работах [44, 45].

Новым объектом в подходе БФКЛ являются неинтегрированные по поперечному импульсу партонные ФР $\Phi(x, t, \mu^2)$, зависящие от виртуальности партона $t = -|\mathbf{q}_T|^2$, где $\mathbf{q}_T$ — его поперечный импульс. Неинтегрированные ФР связаны с соответствующими коллинеарными ФР через условие нормировки:

$$xG(x, \mu^2) = \int^{\mu^2} dt \Phi(x, t, \mu^2).$$

В ЛП ТРП D -мезоны рождаются путём фрагментации глюонов, рождённых в процессах $2 \rightarrow 1$, или c -кварков из процессов $2 \rightarrow 2$:

$$\mathcal{R} + \mathcal{R} \rightarrow g, \quad (1)$$

$$\mathcal{R} + \mathcal{R} \rightarrow c + \bar{c}, \quad (2)$$

где $\mathcal{R}$ — реджезованный глюон. В соответствии с правилами, описанными в работе [45], амплитуды рассматриваемых процессов (1) и (2) могут быть получены из диаграмм Фейнмана, изображённых на рис. 1 и 2, где штриховой линией обозначены реджезованные глюоны.

Определим 4-векторы

$$(n^+)^{\mu} = P_2^{\mu}/E_2, \quad (n^-)^{\mu} = P_1^{\mu}/E_1,$$

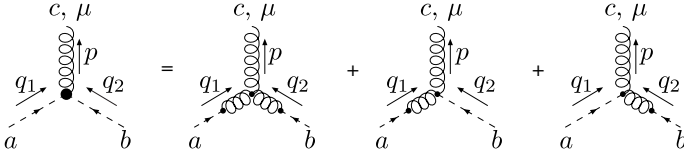


Рис. 1. Диаграммы Фейнмана для подпроцессов (1)
[Figure 1. Feynman diagrams for the subprocess (1)]

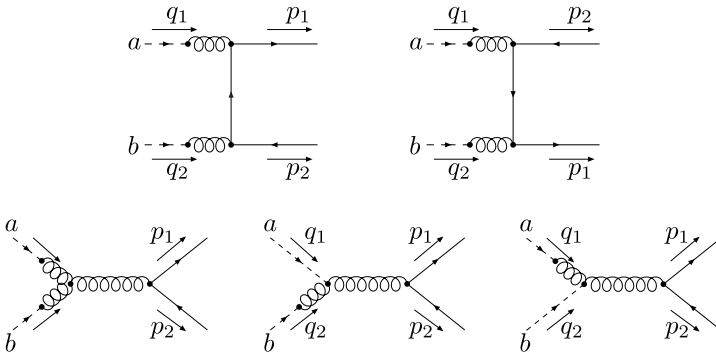


Рис. 2. Диаграммы Фейнмана для подпроцессов (2)
[Figure 2 Feynman diagrams for the subprocess (2)]

где $P_{1,2}^\mu$ — 4-импульсы сталкивающихся протонов, а $E_{1,2}$ — их энергии. Тогда выполняются следующие соотношения:

$$(n^\pm)^2 = 0, \quad n^+ \cdot n^- = 2, \quad S = (P_1 + P_2)^2 = 4E_1 E_2.$$

Для произвольного 4-импульса k^μ имеем $k^\pm = k \cdot n^\pm$. Четырёхмерные импульсы реджезованных глюонов могут быть представлены в виде

$$q_1^\mu = \frac{q_1^+}{2}(n^-)^\mu + q_{1T}^\mu, \quad q_2^\mu = \frac{q_2^-}{2}(n^+)^\mu + q_{2T}^\mu,$$

где $q_T = (0, \mathbf{q}_T, 0)$. Амплитуда рождения глюона через столкновение двух реджезованных глюонов может быть представлена в виде скалярного произведения эффективной вершины Фаина—Кураева—Липатова $C_{\mathcal{R}\mathcal{R}}^{g,\mu}(q_1, q_2)$ и 4-вектора поляризации конечного глюона $\varepsilon_\mu(p)$:

$$\mathcal{M}(\mathcal{R} + \mathcal{R} \rightarrow g) = C_{\mathcal{R}\mathcal{R}}^{g,\mu}(q_1, q_2)\varepsilon_\mu(p),$$

где

$$C_{\mathcal{R}\mathcal{R}}^{g,\mu}(q_1, q_2) = -\sqrt{4\pi\alpha_s} f^{abc} \frac{q_1^+ q_2^-}{2\sqrt{t_1 t_2}} \times \\ \times \left[(q_1 - q_2)^\mu + \frac{(n^+)^\mu}{q_1^+} (q_2^2 + q_1^+ q_2^-) - \frac{(n^-)^\mu}{q_2^-} (q_1^2 + q_1^+ q_2^-) \right], \quad (3)$$

a и b — цветовые индексы реджезованных глюонов со входящими 4-импульсами q_1 и q_2 , f^{abc} ($a = 1, \dots, N_c^2 - 1$) — антисимметричная структурная константа цветовой калибровочной группы $SU_C(3)$. Квадрат амплитуды партонного подпроцесса $\mathcal{R} + \mathcal{R} \rightarrow g$ можно получить непосредственно из (3):

$$|\overline{\mathcal{M}(\mathcal{R} + \mathcal{R} \rightarrow g)}|^2 = \frac{3}{2} \pi \alpha_s \mathbf{p}_T^2. \quad (4)$$

Амплитуда процесса (2) может быть представлена в виде суммы трёх амплитуд

$$\mathcal{M}(\mathcal{R} + \mathcal{R} \rightarrow c + \bar{c}) = \mathcal{M}_1 + \mathcal{M}_2 + \mathcal{M}_3,$$

где

$$\mathcal{M}_1 = -i\pi\alpha_s \frac{q_1^+ q_2^-}{\sqrt{t_1 t_2}} T^a T^b \bar{U}(p_1) \gamma^\alpha \frac{\hat{p}_1 - \hat{q}_1}{(p_1 - q_1)^2} \gamma^\beta V(p_2) (n^+)^\alpha (n^-)^\beta, \\ \mathcal{M}_2 = -i\pi\alpha_s \frac{q_1^+ q_2^-}{\sqrt{t_1 t_2}} T^b T^a \bar{U}(p_1) \gamma^\beta \frac{\hat{p}_1 - \hat{q}_2}{(p_1 - q_2)^2} \gamma^\alpha V(p_2) (n^+)^\alpha (n^-)^\beta, \\ \mathcal{M}_3 = 2\pi\alpha_s \frac{q_1^+ q_2^-}{\sqrt{t_1 t_2}} T^c f^{abc} \frac{\bar{U}(p_1) \gamma^\mu V(p_2)}{(p_1 + p_2)^2} \times \\ \times \left[(n^-)^\mu \left(q_2^+ + \frac{q_2^2}{q_1^-} \right) - (n^+)^\mu \left(q_1^- + \frac{q_1^2}{q_2^+} \right) + (q_1 - q_2)^\mu \right],$$

T^a — генераторы фундаментального представления цветовой калибровочной группы $SU_C(3)$.

Квадрат модуля амплитуды в случае безмассовых кварков записывается в следующем виде:

$$|\overline{\mathcal{M}(\mathcal{R} + \mathcal{R} \rightarrow c + \bar{c})}|^2 = 16\pi^2 \alpha_s^2 \frac{(x_1 x_2 S)^2}{t_1 t_2} \left(\frac{1}{2N_c} \mathcal{A}_{\text{Ab}} + \frac{N_c}{2(N_c^2 - 1)} \mathcal{A}_{\text{NAb}} \right), \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_{\text{Ab}} &= \frac{t_1 t_2}{\hat{t} \hat{u}} - \left(1 + \frac{p_2^+}{\hat{u}} (q_1^- - p_2^-) + \frac{p_2^-}{\hat{t}} (q_2^+ - p_2^+) \right)^2, \\ \mathcal{A}_{\text{NAb}} &= \frac{2}{S^2} \left(\frac{p_2^+ (q_1^- - p_2^-) S}{\hat{u}} + \frac{S}{2} + \frac{\Delta}{\hat{s}} \right) \left(\frac{p_2^- (q_2^+ - p_2^+) S}{\hat{t}} + \frac{S}{2} - \frac{\Delta}{\hat{s}} \right) - \\ &\quad - \frac{t_1 t_2}{q_1^- q_2^+ \hat{s}} \left(\left(\frac{1}{\hat{t}} - \frac{1}{\hat{u}} \right) (q_1^- p_2^+ - q_2^+ p_2^-) + \frac{q_1^- q_2^+ \hat{s}}{\hat{t} \hat{u}} - 2 \right), \\ \Delta &= \frac{S}{2} \left(\hat{u} - \hat{t} + 2q_1^- p_2^+ - 2q_2^+ p_2^- + t_1 \frac{q_2^+ - 2p_2^+}{q_2^+} - t_2 \frac{q_1^- - 2p_2^-}{q_1^-} \right). \end{aligned}$$

В (4) и (5) верхняя черта указывает на усреднение (суммирование) по всем начальным (конечным) спиновым и цветовым состояниям,

$$t_1 = -q_1^2 = |\mathbf{q}_{1T}|^2, \quad t_2 = -q_2^2 = |\mathbf{q}_{2T}|^2,$$

а также

$$\hat{s} = (q_1 + q_2)^2 = (p_1 + p_2)^2, \quad \hat{t} = (q_1 - p_1)^2 = (q_2 - p_2)^2, \quad \hat{u} = (q_2 - p_1)^2 = (q_1 - p_2)^2.$$

Квадрат модуля амплитуды (5) совпадает с результатом, ранее полученным в работе [2–4]. Мы проверили, что в коллинеарном пределе $q_{(1,2)T} = 0$, квадрат модуля амплитуды (5) после усреднения по азимутальным углам переходит в квадрат модуля амплитуды соответствующего партонного подпроцесса в коллинеарной модели, а именно $g + g \rightarrow c + \bar{c}$. Мы проводим наш анализ в области $\sqrt{S}, p_T \gg m_c$, что оправдывает использование схемы ZM–VFNS, где массы очарованных кварков в амплитуде жёсткого процесса можно пренебречь.

В подходе k_T -факторизации дифференциальное сечение рассеяния подпроцесса (1) имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{dy dp_T} (p + p \rightarrow g + X) &= \\ &= \frac{1}{p_T^3} \int d\phi_1 \int dt_1 \Phi(x_1, t_1, \mu^2) \Phi(x_2, t_2, \mu^2) \overline{|\mathcal{M}(\mathcal{R} + \mathcal{R} \rightarrow g)|^2}, \quad (6) \end{aligned}$$

где ϕ_1 — азимутальный угол между $\mathbf{p}_T$ и $\mathbf{q}_{1T}$.

Аналогичная формула для подпроцесса (2) может быть записана в виде

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{dy_1 dy_2 dp_{1T} dp_{2T}}(p + p \rightarrow c(p_1) + \bar{c}(p_2) + X) = \\ = \frac{p_{1T} p_{2T}}{16\pi^3} \int d\phi_1 \int d\Delta\phi \int dt_1 \times \\ \times \Phi(x_1, t_1, \mu^2) \Phi(x_2, t_2, \mu^2) \frac{|\mathcal{M}(\mathcal{R} + \mathcal{R} \rightarrow c + \bar{c})|^2}{(x_1 x_2 S)^2}, \quad (7) \end{aligned}$$

где $x_1 = q_1^+/P_1^+$, $x_2 = q_2^-/P_2^-$; $\Delta\phi$ — азимутальный угол между $\mathbf{p}_{1T}$ и $\mathbf{p}_{2T}$; быстроту конечного партонa с 4-импульсом p можно представить в виде $y = (1/2) \ln(p^+/p^-)$. Легко показать, что в пределе $t_{1,2} \rightarrow 0$ мы возвращаемся от (6) и (7) к стандартной формуле факторизации КПМ.

Важной составляющей в нашей модели являются неинтегрированные глюонные ФР, которые мы получаем согласно методу Кимбера, Мартина и Рыскина (КМР) [46]. Эти распределения получены введением вспомогательной функции, зависящей от одного масштаба и удовлетворяющей объединённому БФКЛ/ДГЛАП уравнению эволюции, в котором лидирующие БФКЛ логарифмы $\alpha_S \log(1/x)$ полностью пересуммированы, а также учитываются приближённо лидирующие БФКЛ эффекты главной (кинематической) части. Эта процедура получения неинтегрированных ФР требует меньших вычислительных усилий, чем точное решение уравнений эволюции с двумя масштабами, например, таких, как уравнение Чиафалони—Катани—Фиорани—Марчезини [47–49].

Использование формулы k_T -факторизации и неинтегрированных ФР с продольной кинематической переменной (x) требует реджезации t -канальных партонoв. В соответствии с [43, 44] реджезованные партонoы несут только одну большую компоненту 4-импульса, и, следовательно, их виртуальность обусловлена поперечным импульсом. Такая кинематика t -канальных партонoв соответствует МРК частиц, рождённых в жёстком процессе. В наших предыдущих работах [33–38], посвящённых процессам рождения тяжёлых кваркониев, мы показали, что эти неинтегрированные ФР КМР дают лучшее описание p_T -спектров, измеренных на Тэватроне [50–56] и БАК [57–59].

В модели фрагментации образование D -мезона глюоном или s -кварком описывается функцией фрагментации (ФФ) $D_{c,g}(z, \mu^2)$. В соответствии с теоремой факторизации фрагментационной модели формула для сечения рождения D -мезона имеет вид [60]

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma(p + p \rightarrow D + X)}{dp_T dy} = \\ = \sum_i \int_0^1 \frac{dz}{z} D_{i \rightarrow D}(z, \mu^2) \frac{d\sigma(p + p \rightarrow i(p_i = p_D/z) + X)}{dp_i dy_i}, \end{aligned}$$

где $D_{i \rightarrow D}(z, \mu^2)$ — ФФ партонa i в D -мезон на масштабе μ^2 ; z — доля продольного импульса фрагментирующей частицы, уносимая D -мезоном. В приближении нулевой массы параметр фрагментации z может быть определён как $p_D^\mu = z p_i^\mu$; p_D и p_i — 4-импульсы D -мезона и партонa соответственно, а $y_D = y_i$. В наших вычислениях мы использовали ФФ ЛП из работы [14], где непертурбативные ФФ партонoв в D^0 , D^+ , D^{*+} и D_s^+ мезоны получены

на основе данных коллаборации OPAL на коллайдере LEP1 [20, 21]. Эти ФФ универсальны и нарушение μ -скейлинга в них подчиняется уравнениям эволюции ДГЛАП. В работах [14–16] параметризации на начальном масштабе $\mu_0 = m_c$ для ФФ взяты в следующем виде:

$$D_c(z, \mu_0^2) = N_c \frac{z(1-z)^2}{[(1-z) + \epsilon_c]^2}, \quad D_{g,q}(z, \mu_0^2) = 0.$$

Поскольку вклад фрагментации глюона при $\mu > \mu_0$ обусловлен пертурбативным переходом глюонов в $c\bar{c}$ -пару, подчиняющимся уравнениям ДГЛАП эволюции, то часть c -кварков, рождённых в подпроцессе (2), с их последующим переходом в D -мезон уже учтена в рождении D -мезона путём фрагментации глюона. В этом случае, чтобы избежать двойного счёта, мы должны вычесть этот вклад. Это может быть эффективно осуществлено введением обрезания по $\hat{s}$ снизу, то есть по порогу рождения $c\bar{c}$ -пары в формуле (7), а именно $\hat{s} > 4m_c^2$.

2. Результаты расчётов. Первое измерение спектров D -мезонов по поперечному импульсу в адрон-адронных столкновениях было выполнено коллаборацией CDF на коллайдере Тэватрон [7] при энергии $\sqrt{S} = 1.96$ ТэВ. D^0 , D^+ , D^{*+} и D_s^+ мезоны детектировались в центральной области по быстрой $|y| < 1.0$ и имели поперечные импульсы вплоть до 20 ГэВ. На рис. 3 показаны данные для $d\sigma/dp_T$, в которых усреднён вклад частиц и античастиц в сравнении с нашими предсказаниями в подходе реджезованных партон-ов. Штриховые линии отвечают вкладу процесса (1), в то время как штрихпунктирные линии соответствуют вкладу процесса (2). Сумма обоих вкладов показана в виде сплошной линии. Мы оценили теоретическую погрешность, возникающую из-за произвола в определении масштабов факторизации и перенормировки, путём варьирования масштабов в пределах $\mu/2$ и 2μ около среднего значения $\mu = p_T$. Теоретические неопределённости показаны на рисунках заштрихованными областями. Мы обнаружили хорошее согласие между нашими предсказаниями и экспериментальными данными в широком интервале по поперечным импульсам D -мезонов в рамках экспериментальных и теоретических погрешностей. Однако наши предсказания хуже описывают экспериментальные данные при малых p_T , что может быть сигналом о значимости эффектов конечной массы c -кварков в области, где $p_T \approx m$. В нашем подходе увеличение энергии столкновения при сохранении других кинематических условий должно привести к лучшему согласию между теорией и экспериментом, поскольку мы ожидаем усиления логарифмических вкладов вида $\log(p_T/\sqrt{S})$ над другими эффектами.

Наши ожидания действительно подтверждаются при описании данных, полученных на БАК при энергии $\sqrt{S} = 7$ ТэВ коллаборацией ALICE [5]. Предыдущие предсказания, сделанные в СЛП КПИМ, находятся в согласии с данными ALICE, однако мы можем видеть, что FONNL схема [23] имеет тенденцию к превышению относительно данных, а схема GM-VFNS [16] — к занижению. На рис. 4 мы сравниваем наши предсказания с данными ALICE [5], сохраняя обозначения кривых такими же, как на рис. 3. Энергии столкновений на БАК в 2–3.5 раза больше, чем на Тэватроне, а интервал быстрот D -мезонов более узкий ($|y| < 0.5$), поэтому на БАК характерное значение x

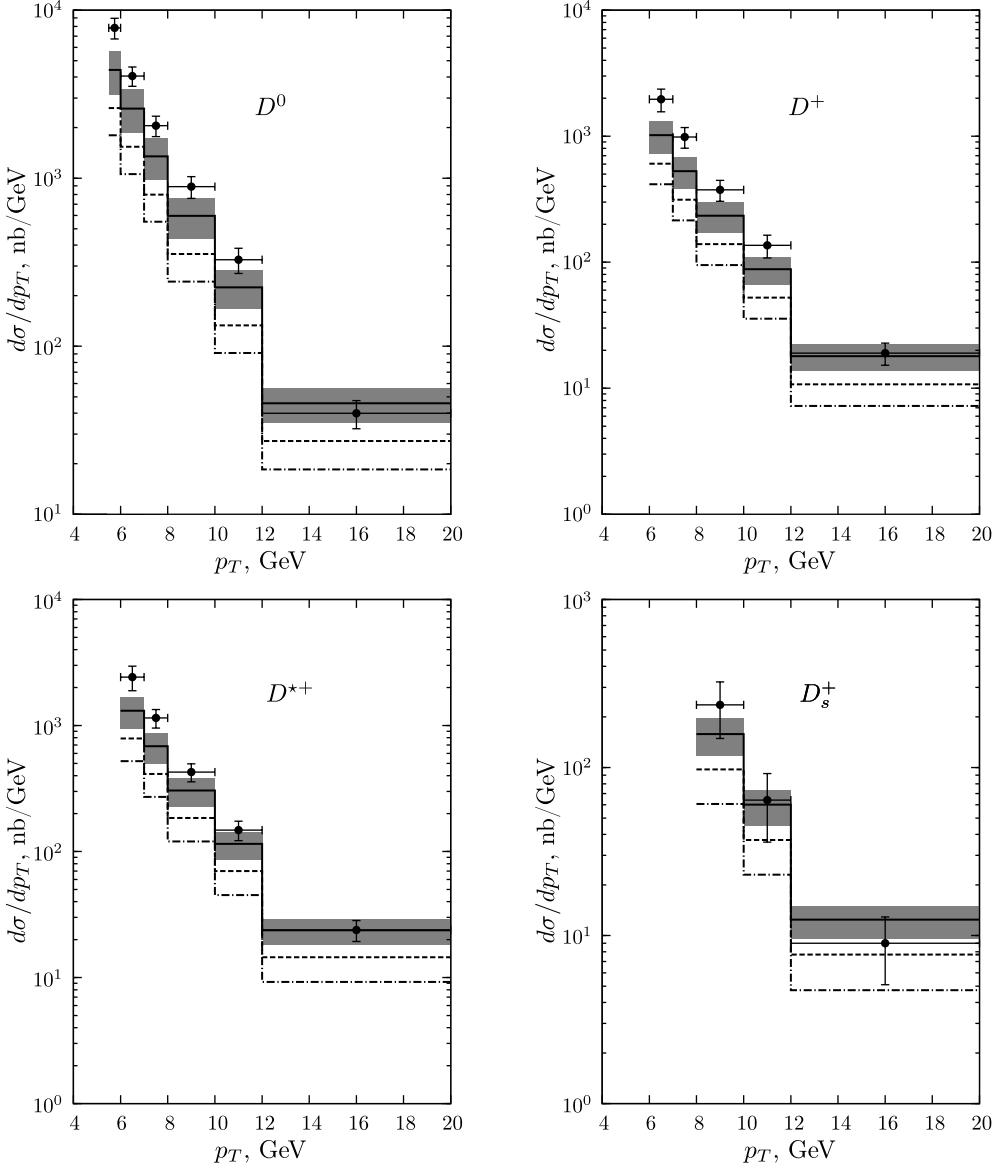


Рис. 3. Распределения по поперечному импульсу D^0 (вверху слева), D^+ (вверху справа), D^{*+} (внизу слева), и D_s^+ (внизу справа) мезонов в $p\bar{p}$ рассеянии при $\sqrt{S} = 1.96$ ТэВ и $|y| < 1.0$. Штриховая линия обозначает вклад глюонной фрагментации, штрих-пунктирная — вклад c -кварковой фрагментации, сплошная — их сумма. Данные коллаборации CDF Тэватрона взяты из [7]

[Figure 3. Transverse momentum distributions of D^0 (left, top), D^+ (right, top), D^{*+} (left, bottom), and D_s^+ (right, bottom) mesons in $p\bar{p}$ scattering with $\sqrt{S} = 1.96$ TeV and $|y| < 1.0$. The dashed line represents the contribution of gluon fragmentation, the dash-dotted line is the c -quark-fragmentation contribution, and the black solid line is their sum obtained with KMR UPDF. The CDF data at Tevatron are from Ref. [7]]

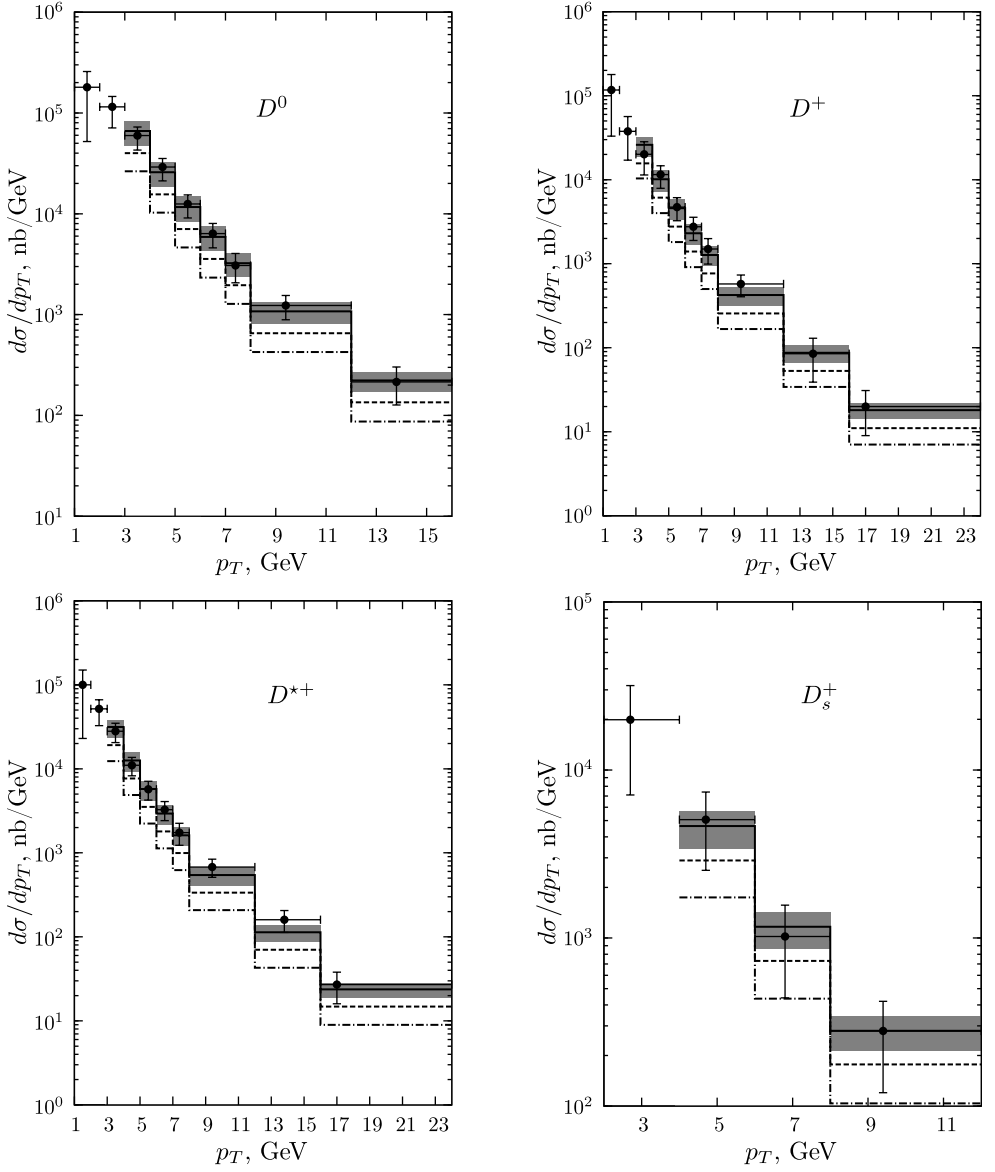


Рис. 4. Распределения по поперечному импульсу D^0 (вверху слева), D^+ (вверху справа), D^{*+} (внизу слева), и D_s^+ (внизу справа) мезонов в pp рассеянии при $\sqrt{S} = 7$ ТэВ и $|y| < 0.5$. Обозначения те же, что и на рис. 3. Данные коллаборации ALICE БАК взяты из [5]

[Figure 4. Transverse momentum distributions of D^0 (left, top), D^+ (right, top), D^{*+} (left, bottom), and D_s^+ (right, bottom) mesons in pp scattering with $\sqrt{S} = 7$ TeV and $|y| < 0.5$. The notations are as in Fig. 3. The ALICE data at LHC are from Ref. [5]]

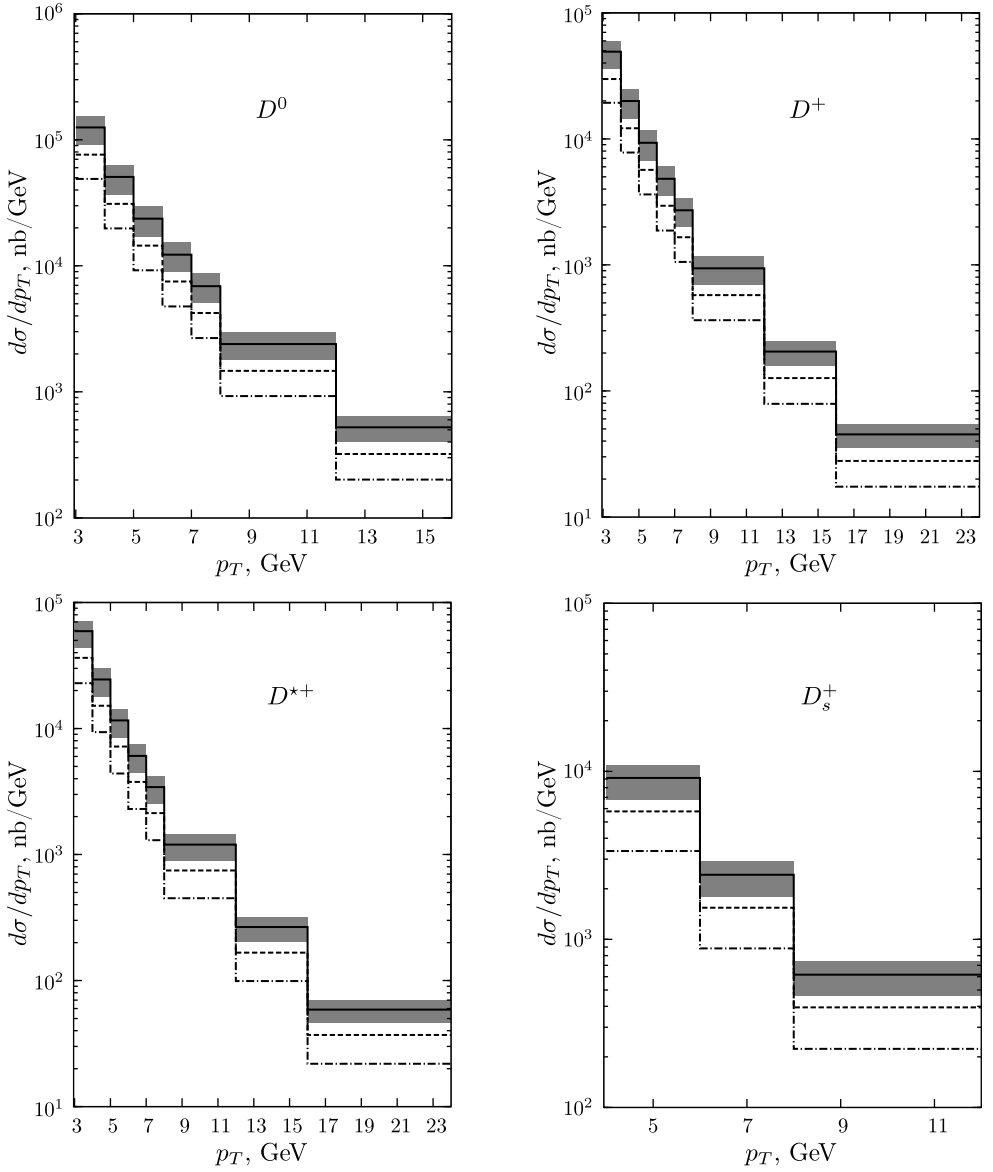


Рис. 5. Теоретические предсказания для распределений по поперечному импульсу для D^0 (вверху слева), D^+ (вверху справа), D^{*+} (внизу слева), и D_s^+ (внизу справа) мезонов в pp рассеянии при $\sqrt{S} = 14$ ТэВ и $|y| < 0.5$, полученные в ЛП ТРП. Линии имеют те же обозначения, что и на рис. 3.

[Figure 5. Theoretical predictions for the transverse momentum distributions of D^0 (left, top), D^+ (right, top), D^{*+} (left, bottom), and D_s^+ (right, bottom) mesons in pp scattering at $\sqrt{S} = 14$ TeV and $|y| < 0.5$ obtained in the LO PRA. The notations are as in Fig. 3]

на порядок меньше, чем в случае рождения D -мезонов на Тэватроне. Наконец, на рис. 5 мы представили наши предсказания для планируемой энергии столкновений на БАК, равной $\sqrt{S} = 14$ ТэВ, сохраняя другие кинематические параметры такими же, как и в работе [5].

Рассматривая рождение D -мезонов в центральной области быстрот, мы видим, что МРК подпроцесс (1) остаётся доминирующим при всех энергиях столкновений. В этом случае мы подтверждаем теоретическое предположение, упомянутое в предыдущем разделе, что МРК является лидирующим логарифмическим приближением в высокоэнергетических процессах рождения в БФКЛ подходе, в то время как КМРК оказывается следующим за лидирующим.

Заключение. В работе проведено исследование фрагментационного рождения D^0 , D^+ , D^{*+} и D_s^+ мезонов в протон-(анти)протонных столкновениях в области центральных быстрот на Тэватроне и БАК в рамках теории реджезованных партонов. Мы использовали калибровочно инвариантные амплитуды жёстких партонных подпроцессов в ЛП теории с реджезованными глюонами в начальном состоянии вместе с неинтегрированными партонными ФР, предложенными Кимбером, Мартином и Рыскиным. Для описания непертурбативных переходов рождённых глюонов и s -кварков в D -мезоны мы применяли универсальные ФФ, полученные фитированием данных в e^+e^- аннигиляции с коллайдера LEP1. Полученные нами результаты для рождения D -мезонов в центральной области быстрот находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными БАК и хорошо согласуются с данными Тэватрона при больших поперечных импульсах.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-02-00021-а) и гранта Президента РФ по государственной поддержке молодых российских ученых-кандидатов наук (грант МК-4150.2014.2).

ORCIDs

Антон Витальевич Карпишков: <http://orcid.org/0000-0003-0762-5532>

Максим Александрович Нефёдов: <http://orcid.org/0000-0002-1046-9625>

Владимир Анатольевич Салеев: <http://orcid.org/0000-0003-0505-5564>

Александра Викторовна Шипилова: <http://orcid.org/0000-0003-3965-3757>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карпишков А. В., Салеев В. А., Шипилова А. В. Рождение D -мезонов на Большом адронном коллайдере в реджевском пределе КХД // *Четвертая международная конференция «Математическая физика и ее приложения»*: материалы конф.; ред. чл.-корр. РАН И. В. Волович; д.ф.-м.н., проф. В. П. Радченко. Самара: СамГТУ, 2014. С. 191–192.
2. Collins J. C., Ellis R. K. Heavy-quark production in very high energy hadron collisions // *Nucl. Phys. B*, 1991. vol. 360, no. 1. pp. 3–30. doi: [10.1016/0550-3213\(91\)90288-9](https://doi.org/10.1016/0550-3213(91)90288-9).
3. Gribov L. V., Levin E. M., Ryskin M. G. Semihard processes in QCD // *Phys. Rep.*, 1983. vol. 100, no. 1–2. pp. 1–150. doi: [10.1016/0370-1573\(83\)90022-4](https://doi.org/10.1016/0370-1573(83)90022-4).
4. Catani S., Ciafaloni K. M., Hautmann F. High energy factorization and small- x heavy flavour production // *Nucl. Phys. B*, 1991. vol. 366, no. 1. pp. 135–188. doi: [10.1016/0550-3213\(91\)90055-3](https://doi.org/10.1016/0550-3213(91)90055-3).
5. ALICE Collaboration (Abelev B., et al.) Measurement of charm production at central rapidity in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV // *JHEP*, 2012. vol. 2012, 128, arXiv: [1111.1553](https://arxiv.org/abs/1111.1553) [hep-ex]. doi: [10.1007/JHEP01\(2012\)128](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2012)128).
6. ALICE Collaboration (Abelev B., et al.) D_s^+ meson production at central rapidity in

- proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV // *Phys. Lett. B*, 2012. vol. 718, no. 2. pp. 279–294, arXiv: [1208.1948](#) [hep-ex]. doi: [10.1016/j.physletb.2012.10.049](#).
7. CDF II Collaboration (Acosta D., et al.) Measurement of Prompt Charm Meson Production Cross Sections in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV // *Phys. Rev. Lett.*, 2003. vol. 91, no. 24, 241804, arXiv: [hep-ex/0307080](#). doi: [10.1103/PhysRevLett.91.241804](#).
8. Kramer G., Spiesberger H. Inclusive D^* production in photon-photon collisions at next-to-leading order QCD // *Eur. Phys. J. C*, 2001. vol. 22, no. 2. pp. 289–301, arXiv: [hep-ph/0109167](#). doi: [10.1007/s100520100805](#).
9. Kramer G., Spiesberger H. Inclusive D production in $\gamma\gamma$ collisions: including the single-resolved contribution with massive quarks // *Eur. Phys. J. C*, 2003. vol. 28, no. 4. pp. 495–513, arXiv: [hep-ph/0302081](#). doi: [10.1140/epjc/s2003-01186-4](#).
10. Kramer G., Spiesberger H. Inclusive photoproduction of D^* mesons with massive charm quarks // *Eur. Phys. J. C*, 2004. vol. 38, no. 3. pp. 309–318, arXiv: [hep-ph/0311062](#). doi: [10.1140/epjc/s2004-02054-5](#).
11. Kniehl B. A., Kramer G., Schienbein I., Spiesberger H. Inclusive $D^{*\pm}$ production in $p\bar{p}$ collisions with massive charm quarks // *Phys. Rev. D*, 2005. vol. 71, no. 1, 014018, arXiv: [hep-ph/0410289](#). doi: [10.1103/physrevd.71.014018](#).
12. Kniehl B. A., Kramer G., Schienbein I., Spiesberger H. Collinear subtractions in hadroproduction of heavy quarks // *Eur. Phys. J. C*, 2005. vol. 41, no. 2. pp. 199–212, arXiv: [hep-ph/0502194](#). doi: [10.1140/epjc/s2005-02200-7](#).
13. Cacciari M., Greco M., Nason P. The p_T spectrum in heavy-flavour hadroproduction // *J. High Energy Phys.*, 1998. vol. 1998, no. 05, 007, arXiv: [hep-ph/9803400](#). doi: [10.1088/1126-6708/1998/05/007](#).
14. Kniehl B. A., Kramer G. Charmed-hadron fragmentation functions from CERN LEP1 revisited // *Phys. Rev. D*, 2006. vol. 74, no. 3, 037502, arXiv: [hep-ph/0607306](#). doi: [10.1103/physrevd.74.037502](#).
15. Kniehl B. A., Kramer G., Schienbein I., Spiesberger H. Reconciling Open-Charm Production at the Fermilab Tevatron with QCD // *Phys. Rev. Lett.*, 2006. vol. 96, no. 1, 012001, arXiv: [hep-ph/0508129](#). doi: [10.1103/physrevlett.96.012001](#).
16. Kniehl B. A., Kramer G., Schienbein I., Spiesberger H. // *Eur. Phys. J. C*, 2012. vol. 72, no. 7, 2082, arXiv: [1202.0439](#) [hep-ph]. doi: [10.1140/epjc/s10052-012-2082-2](#).
17. Грибов В. Н., Липатов Л. Н. Глубоко неупругое ep -рассеяние в теории возмущений // *Ядерная физика*, 1972. Т. 15, № 4. С. 781–807.
18. Докшицер Ю. Л. Вычисление структурных функций глубоко-неупругого рассеяния и e^+e^- -аннигиляции по теории возмущений в квантовой хромодинамике // *ЖЭТФ*, 1977. Т. 73, № 4. С. 1216–1240.
19. Altarelli G., Parisi G. Asymptotic freedom in parton language // *Nucl. Phys. B*, 1977. vol. 126, no. 2. pp. 298–318. doi: [10.1016/0550-3213\(77\)90384-4](#).
20. OPAL Collaboration (Ackerstaff K., et al.) Measurement of $f(c \rightarrow D^{*+}X)$, $f(b \rightarrow D^{*+}X)$ and $\Gamma_{c\bar{c}}/\Gamma_{had}$ using $D^{*\pm}$ mesons // *Eur. Phys. J. C*, 1998. vol. 1, no. 3. pp. 439–459. doi: [10.1007/s100520050095](#).
21. OPAL Collaboration (Alexander G., et al.) A study of charm hadron production in $Z^0 \rightarrow c\bar{c}$ and $Z^0 \rightarrow b\bar{b}$ decays at LEP // *Z. Phys. C – Particles and Fields*, 1996. vol. 72, no. 1. pp. 1–16. doi: [10.1007/BF02909127](#).
22. Cacciari M., and Nason P. Charm cross sections for the Tevatron Run II // *JHEP*, 2003. vol. 2003, no. 09, 006, arXiv: [hep-ph/0306212](#). doi: [10.1088/1126-6708/2003/09/006](#).
23. Cacciari M., Frixione S., Houdeau N., Mangano M. L., Nason P., Ridolfi G. Theoretical predictions for charm and bottom production at the LHC // *JHEP*, 2012. vol. 2012, no. 10, 137, arXiv: [1205.6344](#) [hep-ph]. doi: [10.1007/jhep10\(2012\)137](#).
24. Maciula R., Szczurek A. Open charm production at the LHC: k_t -factorization approach // *Phys. Rev. D*, 2013. vol. 87, no. 9, 094022, arXiv: [1301.3033](#) [hep-ph]. doi: [10.1103/physrevd.87.094022](#).

25. Kniehl B. A., Saleev V. A., Shipilova A. V., Yatsenko E. V. Single jet and prompt-photon inclusive production with multi-Regge kinematics: From Tevatron to LHC // *Phys. Rev. D*, 2011. vol. 84, no. 7, 074017, arXiv: [1107.1462](#) [hep-ph]. doi: [10.1103/physrevd.84.074017](#).
26. Nefedov M. A., Saleev V. A., Shipilova A. V. Dijet azimuthal decorrelations at the LHC in the parton Reggeization approach // *Phys. Rev. D*, 2013. vol. 87, no. 9, 094030, arXiv: [1304.3549](#) [hep-ph]. doi: [10.1103/physrevd.87.094030](#).
27. Saleev V. A. Deep inelastic scattering and prompt photon production within the framework of the quark Reggeization hypothesis // *Phys. Rev. D*, 2008. vol. 78, no. 3, 034033, arXiv: [0807.1587](#) [hep-ph]. doi: [10.1103/physrevd.78.034033](#).
28. Saleev V. A. Prompt photon photoproduction at HERA within the framework of the quark Reggeization hypothesis // *Phys. Rev. D*, 2008. vol. 78, no. 11, 114031, arXiv: [0812.0946](#) [hep-ph]. doi: [10.1103/physrevd.78.114031](#).
29. Kniehl B. A., Nefedov M. A., Saleev V. A. Prompt-photon plus jet associated photoproduction at HERA in the parton Reggeization approach // *Phys. Rev. D*, 2014. vol. 89, no. 11, 114016, arXiv: [1404.3513](#) [hep-ph]. doi: [10.1103/physrevd.89.114016](#).
30. Nefedov M. A., Nikolaev N. N., Saleev V. A. Drell-Yan lepton pair production at high energies in the parton Reggeization approach // *Phys. Rev. D*, 2013. vol. 87, no. 1, 014022, arXiv: [1211.5539](#) [hep-ph]. doi: [10.1103/physrevd.87.014022](#).
31. Kniehl B. A., Saleev V. A., Shipilova A. V. Inclusive b and $b\bar{b}$ production with quasi-multi-Regge kinematics at the Tevatron // *Phys. Rev. D*, 2010. vol. 81, no. 9, 094010, arXiv: [1003.0346](#) [hep-ph]. doi: [10.1103/physrevd.81.094010](#).
32. Saleev V. A., Shipilova A. V. Inclusive b -jet and $b\bar{b}$ -dijet production at the LHC via Reggeized gluons // *Phys. Rev. D*, 2012. vol. 86, no. 3, arXiv: [1201.4640](#) [hep-ph]. doi: [10.1103/physrevd.86.034032](#).
33. Kniehl B. A., Vasin D. V., Saleev V. A. Charmonium production at high energy in the k_T -factorization approach // *Phys. Rev. D*, 2006. vol. 73, no. 7, 074022, arXiv: [hep-ph/0602179](#). doi: [10.1103/physrevd.73.074022](#).
34. Kniehl B. A., Saleev V. A., Vasin D. V. Bottomonium production in the Regge limit of QCD // *Phys. Rev. D*, 2006. vol. 74, no. 1, 014024, arXiv: [hep-ph/0607254](#). doi: [10.1103/physrevd.74.014024](#).
35. Saleev V. A., Vasin D. V. Direct J/ψ and ψ' hadroproduction via fragmentation in the collinear parton model and k_T -factorization approach // *Phys. Rev. D*, 2003. vol. 68, no. 11, 114013, arXiv: [hep-ph/0304114](#). doi: [10.1103/physrevd.68.114013](#).
36. Салеев В. А., Васин Д. В. Адронное рождение прямых J/ψ - и ψ' -мезонов в процессах фрагментации глюонов и c -кварков при высоких энергиях // *Ядерная физика*, 2005. Т. 68, № 1. С. 95–105.
37. Saleev V. A., Nefedov M. A., Shipilova A. V. Prompt J/ψ production in the Regge limit of QCD: From the Tevatron to the LHC // *Phys. Rev. D*, 2012. vol. 85, no. 7, 074013, arXiv: [1201.3464](#) [hep-ph]. doi: [10.1103/physrevd.85.074013](#).
38. Nefedov M. A., Saleev V. A., Shipilova A. V. Prompt $\Upsilon(nS)$ production at the LHC in the Regge limit of QCD // *Phys. Rev. D*, 2013. vol. 88, no. 1, 014003, arXiv: [1305.7310](#) [hep-ph]. doi: [10.1103/physrevd.88.014003](#).
39. Кураев Э. А., Липатов Л. Н., Фадин В. С. Мультиреджевские процессы в теории Янга–Миллса // *ЖЭТФ*, 1976. Т. 71, № 3. С. 840–855.
40. Балицкий Я. Я., Липатов Л. Н. Сингулярность Померанчука в квантовой хромодинамике // *Ядерная физика*, 1978. Т. 28. С. 1597–1611.
41. Fadin V. S., Kuraev E. A., Lipatov L. N. On the Pomernanchuk singularity in asymptotically free theories // *Phys. Lett. B*, 1975. vol. 60, no. 1. pp. 50–52. doi: [10.1016/0370-2693\(75\)90524-9](#).
42. Fadin V. S., Fiore R. Calculation of Reggeon vertices in QCD // *Phys. Rev. D*, 2001. vol. 64, no. 11, 114012, arXiv: [hep-ph/0107010](#). doi: [10.1103/physrevd.64.114012](#).
43. Lipatov L. N. Gauge invariant effective action for high energy processes in QCD // *Nucl. Phys. B*, 1995. vol. 452, no. 1–2. pp. 369–397, arXiv: [hep-ph/9502308](#). doi: [10.1016/0550-3213\(95\)00390-e](#).

44. Lipatov L. N., Vyazovsky M. I. Quasi-multi-Regge processes with a quark exchange in the t -channel // *Nucl. Phys. B*, 2001. vol. 597, no. 1–3. pp. 399–409, arXiv: [hep-ph/0009340](#). doi: [10.1016/s0550-3213\(00\)00709-4](#).
45. Antonov E. N., Cherednikov I. O., Kuraev E. A., Lipatov L. N. Feynman rules for effective Regge action // *Nucl. Phys. B*, 2005. vol. 721, no. 1–3. pp. 111–135, arXiv: [hep-ph/0411185](#). doi: [10.1016/j.nuclphysb.2005.05.013](#).
46. Kimber M. A., Martin A. D., Ryskin M. G. Unintegrated parton distributions // *Phys. Rev. D*, 2001. vol. 63, no. 11, 114027, arXiv: [hep-ph/0101348](#). doi: [10.1103/physrevd.63.114027](#).
47. Ciafaloni M. Coherence effects in initial jets at small Q^2/s // *Nucl. Phys. B*, 1988. vol. 296, no. 1. pp. 49–74. doi: [10.1016/0550-3213\(88\)90380-x](#).
48. Catani S., Fiorani F., Marchesini G. QCD coherence in initial state radiation // *Phys. Lett. B*, 1990. vol. 234, no. 3. pp. 339–345. doi: [10.1016/0370-2693\(90\)91938-8](#).
49. Catani S., Fiorani F., Marchesini G. Small- x behaviour of initial state radiation in perturbative QCD // *Nucl. Phys. B*, 1990. vol. 336, no. 1. pp. 18–85. doi: [10.1016/0550-3213\(90\)90342-b](#).
50. CDF Collaboration (Abe F., et al.) J/ψ and $\psi(2S)$ Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV // *Phys. Rev. Lett.*, 1997. vol. 79, no. 4, 572. doi: [http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.79.572](#).
51. CDF Collaboration (Abe F., et al.) Production of J/ψ Mesons from χ_c Meson Decays in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV // *Phys. Rev. Lett.*, 1997. vol. 79, no. 4, 578. doi: [10.1103/PhysRevLett.79.578](#).
52. CDF Collaboration (Affolder T., et al.) Measurement of J/ψ and $\psi(2S)$ Polarization in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV // *Phys. Rev. Lett.*, 2000. vol. 85, no. 14, 2886. doi: [10.1103/PhysRevLett.85.2886](#).
53. CDF Collaboration (Acosta D., et al.) Measurement of the J/ψ meson and b -hadron production cross sections in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1960$ GeV // *Phys. Rev. D*, 2005. vol. 71, no. 3, 032001, arXiv: [hep-ex/0412071](#). doi: [10.1103/PhysRevD.71.032001](#).
54. CDF Collaboration (Abe F., et al.) Υ Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV // *Phys. Rev. Lett.*, 1995. vol. 75, no. 24, 4358. doi: [10.1103/PhysRevLett.75.4358](#).
55. CDF Collaboration (Acosta D., et al.) Υ Production and Polarization in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV // *Phys. Rev. Lett.*, 2002. vol. 88, no. 16, 161802. doi: [10.1103/PhysRevLett.88.161802](#).
56. C0 Collaboration (Abazov V. M., et al.) Measurement of Inclusive Differential Cross Sections for $\Upsilon(1S)$ Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV // *Phys. Rev. Lett.*, 2005. vol. 94, no. 23, 232001, arXiv: [hep-ex/0502030](#). doi: [10.1103/PhysRevLett.94.232001](#); Erratum // *Phys. Rev. Lett.*, 2008. vol. 100, no. 4, 049902. doi: [10.1103/PhysRevLett.100.049902](#).
57. ATLAS Collaboration (Aad G., et al.) Measurement of upsilon production in 7 TeV pp collisions at ATLAS // *Phys. Rev. D*, 2013. vol. 87, 052004, arXiv: [1211.7255](#) [hep-ex]. doi: [10.1103/PhysRevD.87.052004](#).
58. CMS Collaboration (Khachatryan V., et al.) Upsilon production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV // *Phys. Rev. D*, 2011. vol. 83, 112004. doi: [10.1103/PhysRevD.83.112004](#).
59. LHCb Collaboration (Aaij R., et al.) Measurement of Υ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV // *Eur. Phys. J. C*, 2012. vol. 72, 2025, arXiv: [1202.6579](#) [hep-ex]. doi: [10.1140/epjc/s10052-012-2025-y](#).
60. Mele B., Nason P. The fragmentation function for heavy quarks in QCD // *Nucl. Phys. B*, 1991. vol. 361, no. 3. pp. 626–644. doi: [10.1016/0550-3213\(91\)90597-q](#).
61. Fadin V. S., Lipatov L. N. Next-to-leading corrections to the BFKL equation from gluon and quark production // *Nucl. Phys. B*, 1996. vol. 477, no. 3. pp. 767–805, arXiv: [hep-ph/9602287](#). doi: [10.1016/0550-3213\(96\)00334-3](#).

Поступила в редакцию 24/I/2015;
в окончательном варианте — 17/III/2015;
принята в печать — 08/IV/2015.

MSC: 81T13, 81U35

 **D -MESON PRODUCTION AT LARGE HADRON COLLIDER
IN THE REGGE LIMIT OF QCD*****A. V. Karpishkov, M. A. Nefedov,
V. A. Saleev, A. V. Shipilova**

Samara State University,

1, Academician Pavlov st., Samara, 443011, Russian Federation.

Abstract

We study the inclusive production of D^0 , D^+ , D^{*+} , and D_s^+ mesons in proton-antiproton collisions at the Tevatron and in proton-proton collisions at LHC at leading order in the parton Reggeization approach endowed with universal fragmentation functions fitted to e^+e^- annihilation data from CERN LEP1. We have described D -meson transverse momentum distributions measured in the central region of rapidity by the CDF Collaboration at Tevatron ($|y| < 1$) and ALICE Collaboration at LHC ($|y| < 0.5$) within uncertainties and without free parameters, using Kimber–Martin–Ryskin unintegrated gluon distribution function in a proton. The $2 \rightarrow 1$ hard subprocess of gluon production via a fusion of two Reggeized gluons in the PRA framework is proposed for the first time in the case of D -meson fragmentation production and proved to be a dominant one. We found our results for D -meson central-rapidity production are in the good agreement with experimental data from the LHC and with large-transverse-momenta Tevatron data. The achieved degree of agreement for the LHC exceeds the one obtained by NLO calculations in the conventional collinear parton model and previous LO calculations in k_T -factorization without taking into account the $2 \rightarrow 1$ subprocess. The predictions for the D -meson production in the central rapidity region for the expected LHC energy of $\sqrt{S} = 14$ TeV are also presented.

© 2015 Samara State Technical University.

Please cite this article in press as:

Karpishkov A. V., Nefedov M. A., Saleev V. A., Shipilova A. V. D -meson production at Large Hadron Collider in the Regge limit of QCD, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. & Math. Sci.], 2015, vol. 19, no. 3, pp. 441–461. doi: [10.14498/vsgtu1402](http://dx.doi.org/10.14498/vsgtu1402). (In Russian)

Authors Details:

Anton V. Karpishkov (karpishkov@rambler.ru), Postgraduate Student, Dept. of General & Theoretical Physics.

Maxim A. Nefedov (nefedovma@gmail.com), Postgraduate Student, Dept. of General & Theoretical Physics.

Vladimir A. Saleev (Dr. Phys. & Math. Sci.; saleev@samsu.ru; Corresponding Author), Professor, Dept. of General & Theoretical Physics.

Alexandra A. Shipilova (Cand. Phys. & Math. Sci.; alexshipilova@samsu.ru), Scientific Researcher, Lab. of Mathematical Modeling of Materials, the Samara Center of Theoretical Materials Science, SSU.

*This paper is an extended version of the paper [1], presented at the Mathematical Physics and Its Applications 2014 Conference.

Keywords: quantum chromodynamics, k_T -factorization, parton reggeization approach, high energy physics, charmed mesons.

doi: <http://dx.doi.org/10.14498/vsgtu1402>

Acknowledgments. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Project No. 14-02-00021-a) and by the Grant of President of Russian Federation (Grant No. MK-4150.2014.2).

ORCIDs

Anton V. Karpishkov: <http://orcid.org/0000-0003-0762-5532>

Maxim A. Nefedov: <http://orcid.org/0000-0002-1046-9625>

Vladimir A. Saleev: <http://orcid.org/0000-0003-0505-5564>

Alexandra A. Shipilova: <http://orcid.org/0000-0003-3965-3757>

REFERENCES

1. Karpishkov A. V., Saleev V. A., Shipilova A. V. D -meson production at Large Hadron Collider in the Regge limit of QCD, *The 4nd International Conference "Mathematical Physics and its Applications"*, Book of Abstracts and Conference Materials; eds. I. V. Volovich; V. P. Radchenko. Samara, Samara State Technical Univ., 2014, pp. 191–192 (In Russian).
2. Collins J. C., Ellis R. K. Heavy-quark production in very high energy hadron collisions, *Nucl. Phys. B*, 1991, vol. 360, no. 1, pp. 3–30. doi: [10.1016/0550-3213\(91\)90288-9](https://doi.org/10.1016/0550-3213(91)90288-9).
3. Gribov L. V., Levin E. M., Ryskin M. G. Semihard processes in QCD, *Phys. Rep.*, 1983, vol. 100, no. 1–2, pp. 1–150. doi: [10.1016/0370-1573\(83\)90022-4](https://doi.org/10.1016/0370-1573(83)90022-4).
4. Catani S., Ciafaloni K. M., Hautmann F. High energy factorization and small- x heavy flavour production, *Nucl. Phys. B*, 1991, vol. 366, no. 1, pp. 135–188. doi: [10.1016/0550-3213\(91\)90055-3](https://doi.org/10.1016/0550-3213(91)90055-3).
5. ALICE Collaboration (Abelev B., et al.) Measurement of charm production at central rapidity in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, *JHEP*, 2012, vol. 2012, 128, arXiv: [1111.1553](https://arxiv.org/abs/1111.1553) [hep-ex]. doi: [10.1007/JHEP01\(2012\)128](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2012)128).
6. ALICE Collaboration (Abelev B., et al.) D_s^+ meson production at central rapidity in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, *Phys. Lett. B*, 2012, vol. 718, no. 2, pp. 279–294, arXiv: [1208.1948](https://arxiv.org/abs/1208.1948) [hep-ex]. doi: [10.1016/j.physletb.2012.10.049](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.10.049).
7. CDF II Collaboration (Acosta D., et al.) Measurement of Prompt Charm Meson Production Cross Sections in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV, *Phys. Rev. Lett.*, 2003, vol. 91, no. 24, 241804, arXiv: [hep-ex/0307080](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0307080). doi: [10.1103/PhysRevLett.91.241804](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.241804).
8. Kramer G., Spiesberger H. Inclusive D^* production in photon-photon collisions at next-to-leading order QCD, *Eur. Phys. J. C*, 2001, vol. 22, no. 2, pp. 289–301, arXiv: [hep-ph/0109167](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0109167). doi: [10.1007/s100520100805](https://doi.org/10.1007/s100520100805).
9. Kramer G., Spiesberger H. Inclusive D production in $\gamma\gamma$ collisions: including the single-resolved contribution with massive quarks, *Eur. Phys. J. C*, 2003, vol. 28, no. 4, pp. 495–513, arXiv: [hep-ph/0302081](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0302081). doi: [10.1140/epjc/s2003-01186-4](https://doi.org/10.1140/epjc/s2003-01186-4).
10. Kramer G., Spiesberger H. Inclusive photoproduction of D^* mesons with massive charm quarks, *Eur. Phys. J. C*, 2004, vol. 38, no. 3, pp. 309–318, arXiv: [hep-ph/0311062](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0311062). doi: [10.1140/epjc/s2004-02054-5](https://doi.org/10.1140/epjc/s2004-02054-5).
11. Kniehl B. A., Kramer G., Schienbein I., Spiesberger H. Inclusive $D^{*\pm}$ production in $p\bar{p}$ collisions with massive charm quarks, *Phys. Rev. D*, 2005, vol. 71, no. 1, 014018, arXiv: [hep-ph/0410289](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0410289). doi: [10.1103/physrevd.71.014018](https://doi.org/10.1103/physrevd.71.014018).
12. Kniehl B. A., Kramer G., Schienbein I., Spiesberger H. Collinear subtractions in hadroproduction of heavy quarks, *Eur. Phys. J. C*, 2005, vol. 41, no. 2, pp. 199–212, arXiv: [hep-ph/0502194](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0502194). doi: [10.1140/epjc/s2005-02200-7](https://doi.org/10.1140/epjc/s2005-02200-7).
13. Cacciari M., Greco M., Nason P. The p_T spectrum in heavy-flavour hadroproduction, *J. High Energy Phys.*, 1998, vol. 1998, no. 05, 007, arXiv: [hep-ph/9803400](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9803400). doi: [10.1088/1126-6708/1998/05/007](https://doi.org/10.1088/1126-6708/1998/05/007).

14. Kniehl B. A., Kramer G. Charmed-hadron fragmentation functions from CERN LEP1 revisited, *Phys. Rev. D*, 2006, vol. 74, no. 3, 037502, arXiv: [hep-ph/0607306](#). doi: [10.1103/physrevd.74.037502](#).
15. Kniehl B. A., Kramer G., Schienbein I., Spiesberger H. Reconciling Open-Charm Production at the Fermilab Tevatron with QCD, *Phys. Rev. Lett.*, 2006, vol. 96, no. 1, 012001, arXiv: [hep-ph/0508129](#). doi: [10.1103/physrevlett.96.012001](#).
16. Kniehl B. A., Kramer G., Schienbein I., Spiesberger H., *Eur. Phys. J. C*, 2012, vol. 72, no. 7, 2082, arXiv: [1202.0439](#) [hep-ph]. doi: [10.1140/epjc/s10052-012-2082-2](#).
17. Gribov V. N., Lipatov L. N. Deep inelastic ep scattering in perturbation theory, *Sov. J. Nucl. Phys.*, 1972, vol. 15, no. 4, pp. 438–450.
18. Dokshitzer Yu. L. Calculation of structure functions of deep-inelastic scattering and e^+e^- annihilation by perturbation theory in quantum chromodynamics, *Sov. Phys. JETP*, 1977, vol. 46, no. 4, pp. 641–653, http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/e_046_04_0641.pdf.
19. Altarelli G., Parisi G. Asymptotic freedom in parton language, *Nucl. Phys. B*, 1977, vol. 126, no. 2, pp. 298–318. doi: [10.1016/0550-3213\(77\)90384-4](#).
20. OPAL Collaboration (Ackerstaff K., et al.) Measurement of $f(c \rightarrow D^{*+}X)$, $f(b \rightarrow D^{*+}X)$ and Γ_{cc}/Γ_{had} using $D^{\pm}$ mesons, *Eur. Phys. J. C*, 1998, vol. 1, no. 3, pp. 439–459. doi: [10.1007/s100520050095](#).
21. OPAL Collaboration (Alexander G., et al.) A study of charm hadron production in $Z^0 \rightarrow c\bar{c}$ and $Z^0 \rightarrow b\bar{b}$ decays at LEP, *Z. Phys. C – Particles and Fields*, 1996, vol. 72, no. 1, pp. 1–16. doi: [10.1007/BF02909127](#).
22. Cacciari M., and Nason P. Charm cross sections for the Tevatron Run II, *JHEP*, 2003, vol. 2003, no. 09, 006, arXiv: [hep-ph/0306212](#). doi: [10.1088/1126-6708/2003/09/006](#).
23. Cacciari M., Frixione S., Houdeau N., Mangano M. L., Nason P., Ridolfi G. Theoretical predictions for charm and bottom production at the LHC, *JHEP*, 2012, vol. 2012, no. 10, 137, arXiv: [1205.6344](#) [hep-ph]. doi: [10.1007/jhep10\(2012\)137](#).
24. Maciula R., Szczurek A. Open charm production at the LHC: k_t -factorization approach, *Phys. Rev. D*, 2013, vol. 87, no. 9, 094022, arXiv: [1301.3033](#) [hep-ph]. doi: [10.1103/physrevd.87.094022](#).
25. Kniehl B. A., Saleev V. A., Shipilova A. V., Yatsenko E. V. Single jet and prompt-photon inclusive production with multi-Regge kinematics: From Tevatron to LHC, *Phys. Rev. D*, 2011, vol. 84, no. 7, 074017, arXiv: [1107.1462](#) [hep-ph]. doi: [10.1103/physrevd.84.074017](#).
26. Nefedov M. A., Saleev V. A., Shipilova A. V. Dijet azimuthal decorrelations at the LHC in the parton Reggeization approach, *Phys. Rev. D*, 2013, vol. 87, no. 9, 094030, arXiv: [1304.3549](#) [hep-ph]. doi: [10.1103/physrevd.87.094030](#).
27. Saleev V. A. Deep inelastic scattering and prompt photon production within the framework of the quark Reggeization hypothesis, *Phys. Rev. D*, 2008, vol. 78, no. 3, 034033, arXiv: [0807.1587](#) [hep-ph]. doi: [10.1103/physrevd.78.034033](#).
28. Saleev V. A. Prompt photon photoproduction at HERA within the framework of the quark Reggeization hypothesis, *Phys. Rev. D*, 2008, vol. 78, no. 11, 114031, arXiv: [0812.0946](#) [hep-ph]. doi: [10.1103/physrevd.78.114031](#).
29. Kniehl B. A., Nefedov M. A., Saleev V. A. Prompt-photon plus jet associated photoproduction at HERA in the parton Reggeization approach, *Phys. Rev. D*, 2014, vol. 89, no. 11, 114016, arXiv: [1404.3513](#) [hep-ph]. doi: [10.1103/physrevd.89.114016](#).
30. Nefedov M. A., Nikolaev N. N., Saleev V. A. Drell-Yan lepton pair production at high energies in the parton Reggeization approach, *Phys. Rev. D*, 2013, vol. 87, no. 1, 014022, arXiv: [1211.5539](#) [hep-ph]. doi: [10.1103/physrevd.87.014022](#).
31. Kniehl B. A., Saleev V. A., Shipilova A. V. Inclusive b and $b\bar{b}$ production with quasi-multi-Regge kinematics at the Tevatron, *Phys. Rev. D*, 2010, vol. 81, no. 9, 094010, arXiv: [1003.0346](#) [hep-ph]. doi: [10.1103/physrevd.81.094010](#).
32. Saleev V. A., Shipilova A. V. Inclusive b -jet and $b\bar{b}$ -dijet production at the LHC via Reggeized gluons, *Phys. Rev. D*, 2012, vol. 86, no. 3, arXiv: [1201.4640](#) [hep-ph]. doi: [10.1103/physrevd.86.034032](#).

33. Kniehl B. A., Vasin D. V., Saleev V. A. Charmonium production at high energy in the k_T -factorization approach, *Phys. Rev. D*, 2006, vol. 73, no. 7, 074022, arXiv: [hep-ph/0602179](#). doi: [10.1103/physrevd.73.074022](#).
34. Kniehl B. A., Saleev V. A., Vasin D. V. Bottomonium production in the Regge limit of QCD, *Phys. Rev. D*, 2006, vol. 74, no. 1, 014024, arXiv: [hep-ph/0607254](#). doi: [10.1103/physrevd.74.014024](#).
35. Saleev V. A., Vasin D. V. Direct J/ψ and ψ' hadroproduction via fragmentation in the collinear parton model and k_T -factorization approach, *Phys. Rev. D*, 2003, vol. 68, no. 11, 114013, arXiv: [hep-ph/0304114](#). doi: [10.1103/physrevd.68.114013](#).
36. Saleev V. A., Vasin D. V. Hadroproduction of direct J/ψ and ψ' mesons in the fragmentation of gluons and c quarks at high energies, *Phys. Atom. Nucl.*, 2005, vol. 68, no. 1, pp. 94–103. doi: [10.1134/1.1858562](#).
37. Saleev V. A., Nefedov M. A., Shipilova A. V. Prompt J/ψ production in the Regge limit of QCD: From the Tevatron to the LHC, *Phys. Rev. D*, 2012, vol. 85, no. 7, 074013, arXiv: [1201.3464](#) [hep-ph]. doi: [10.1103/physrevd.85.074013](#).
38. Nefedov M. A., Saleev V. A., Shipilova A. V. Prompt $\Upsilon(nS)$ production at the LHC in the Regge limit of QCD, *Phys. Rev. D*, 2013, vol. 88, no. 1, 014003, arXiv: [1305.7310](#) [hep-ph]. doi: [10.1103/physrevd.88.014003](#).
39. Kuraev E. A., Lipatov L. N., Fadin V. S. Multiregge processes in the Yang-Mills theory, *Sov. Phys. JETP*, 1976, vol. 44, no. 3, pp. 443–451, http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/e_044_03_0443.pdf.
40. Balitsky I. I., Lipatov L. N. The Pomeranchuk Singularity, Process, Theory, *Sov. J. Nucl. Phys.*, 1978, vol. 28, pp. 822–829.
41. Fadin V. S., Kuraev E. A., Lipatov L. N. On the Pomeranchuk singularity in asymptotically free theories, *Phys. Lett. B*, 1975, vol. 60, no. 1, pp. 50–52. doi: [10.1016/0370-2693\(75\)90524-9](#).
42. Fadin V. S., Fiore R. Calculation of Reggeon vertices in QCD, *Phys. Rev. D*, 2001, vol. 64, no. 11, 114012, arXiv: [hep-ph/0107010](#). doi: [10.1103/physrevd.64.114012](#).
43. Lipatov L. N. Gauge invariant effective action for high energy processes in QCD, *Nucl. Phys. B*, 1995, vol. 452, no. 1–2, pp. 369–397, arXiv: [hep-ph/9502308](#). doi: [10.1016/0550-3213\(95\)00390-e](#).
44. Lipatov L. N., Vyazovsky M. I. Quasi-multi-Regge processes with a quark exchange in the t -channel, *Nucl. Phys. B*, 2005, vol. 597, no. 1–3, pp. 399–409, arXiv: [hep-ph/0009340](#). doi: [10.1016/s0550-3213\(00\)00709-4](#).
45. Antonov E. N., Cherednikov I. O., Kuraev E. A., Lipatov L. N. Feynman rules for effective Regge action, *Nucl. Phys. B*, 2005, vol. 721, no. 1–3, pp. 111–135, arXiv: [hep-ph/0411185](#). doi: [10.1016/j.nuclphysb.2005.05.013](#).
46. Kimber M. A., Martin A. D., Ryskin M. G. Unintegrated parton distributions, *Phys. Rev. D*, 2001, vol. 63, no. 11, 114027, arXiv: [hep-ph/0101348](#). doi: [10.1103/physrevd.63.114027](#).
47. Ciafaloni M. Coherence effects in initial jets at small Q^2/s , *Nucl. Phys. B*, 1988, vol. 296, no. 1, pp. 49–74. doi: [10.1016/0550-3213\(88\)90380-x](#).
48. Catani S., Fiorani F., Marchesini G. QCD coherence in initial state radiation, *Phys. Lett. B*, 1990, vol. 234, no. 3, pp. 339–345. doi: [10.1016/0370-2693\(90\)91938-8](#).
49. Catani S., Fiorani F., Marchesini G. Small- x behaviour of initial state radiation in perturbative QCD, *Nucl. Phys. B*, 1990, vol. 336, no. 1, pp. 18–85. doi: [10.1016/0550-3213\(90\)90342-b](#).
50. CDF Collaboration (Abe F., et al.) J/ψ and $\psi(2S)$ Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV, *Phys. Rev. Lett.*, 1997, vol. 79, no. 4, 572. doi: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.79.572>.
51. CDF Collaboration (Abe F., et al.) Production of J/ψ Mesons from χ_c Meson Decays in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV, *Phys. Rev. Lett.*, 1997, vol. 79, no. 4, 578. doi: [10.1103/PhysRevLett.79.578](#).

52. CDF Collaboration (Affolder T., et al.) Measurement of J/ψ and $\psi(2S)$ Polarization in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV, *Phys. Rev. Lett.*, 2000, vol. 85, no. 14, 2886. doi: [10.1103/PhysRevLett.85.2886](#).
53. CDF Collaboration (Acosta D., et al.) Measurement of the J/ψ meson and b -hadron production cross sections in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1960$ GeV, *Phys. Rev. D*, 2005, vol. 71, no. 3, 032001, arXiv: [hep-ex/0412071](#). doi: [10.1103/PhysRevD.71.032001](#).
54. CDF Collaboration (Abe F., et al.) Υ Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV, *Phys. Rev. Lett.*, 1995, vol. 75, no. 24, 4358. doi: [10.1103/PhysRevLett.75.4358](#).
55. CDF Collaboration (Acosta D., et al.) Υ Production and Polarization in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV, *Phys. Rev. Lett.*, 2002, vol. 88, no. 16, 161802. doi: [10.1103/PhysRevLett.88.161802](#).
56. C0 Collaboration (Abazov V. M., et al.) Measurement of Inclusive Differential Cross Sections for $\Upsilon(1S)$ Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV, *Phys. Rev. Lett.*, 2005, vol. 94, no. 23, 232001, arXiv: [hep-ex/0502030](#). doi: [10.1103/PhysRevLett.94.232001](#) ; Erratum, *Phys. Rev. Lett.*, 2008, vol. 100, no. 4, 049902. doi: [10.1103/PhysRevLett.100.049902](#).
57. ATLAS Collaboration (Aad G., et al.) Measurement of upsilon production in 7 TeV pp collisions at ATLAS, *Phys. Rev. D*, 2013, vol. 87, 052004, arXiv: [1211.7255](#) [hep-ex]. doi: [10.1103/PhysRevD.87.052004](#).
58. CMS Collaboration (Khachatryan V., et al.) Upsilon production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, *Phys. Rev. D*, 2011, vol. 83, 112004. doi: [10.1103/PhysRevD.83.112004](#).
59. LHCb Collaboration (Aaij R., et al.) Measurement of Υ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, *Eur. Phys. J. C*, 2012, vol. 72, 2025, arXiv: [1202.6579](#) [hep-ex]. doi: [10.1140/epjc/s10052-012-2025-y](#).
60. Mele B., Nason P. The fragmentation function for heavy quarks in QCD, *Nucl. Phys B*, 1991, vol. 361, no. 3, pp. 626–644. doi: [10.1016/0550-3213\(91\)90597-q](#).
61. Fadin V. S., Lipatov L. N. Next-to-leading corrections to the BFKL equation from gluon and quark production, *Nucl. Phys. B*, 1996, vol. 477, no. 3, pp. 767–805, arXiv: [hep-ph/9602287](#). doi: [10.1016/0550-3213\(96\)00334-3](#).

Received 24/I/2015;
received in revised form 17/III/2015;
accepted 08/IV/2015.