

ГИПОТЕЗА О СУЩЕСТВОВАНИИ ВНУТРЕННЕГО ОЧАРОВАНИЯ В ПРОТОНЕ И ПЕНТАКВАРКИ СО СКРЫТЫМ АРОМАТОМ

© 2021 г. А. В. Бережной^{1)*}, А. С. Герасимов^{2)**}

Поступила в редакцию 20.04.2020 г.; после доработки 23.06.2020 г.; принята к публикации 09.07.2020 г.

С использованием экспериментальных данных о существовании пентакварков со скрытым чармом получены новые ограничения на вклад внутреннего чарма в состав протона и проанализированы возможные распределения тяжелых кварков внутри протона.

DOI: 10.31857/S0044002721020045

1. ВВЕДЕНИЕ

Гипотеза о существовании внутреннего очарования в протоне была высказана довольно давно для объяснения расхождения между ранними экспериментами по образованию очарованных частиц и предсказаниями КХД [1]. Однако, по мере накопления новых данных, а также в результате усовершенствования техники вычислений, стало ясно, что предположение о внутреннем очаровании не находит однозначных подтверждений. Тем не менее, из-за элегантности самой модели и из-за время от времени появляющихся трудностей в описании событий с чармом, эта гипотеза уже на протяжении нескольких десятилетий привлекает внимание исследователей, а из-за недавнего наблюдения экспериментом LHCb трех резонансов в спектре $J/\psi p$ [2] (см. также обзор “Пентакварки” в обновленной версии [3] за 2019 г.):

$$P_c(4312)^+ (M = 4311.9 \pm 0.7^{+6.8}_{-0.6} \text{ МэВ}, \quad (1)$$

$$\Gamma = 9.8 \pm 2.7^{+3.7}_{-4.5} \text{ МэВ}),$$

$$P_c(4440)^+ (M = 4440.3 \pm 1.3^{+4.1}_{-4.7} \text{ МэВ},$$

$$\Gamma = 20.6 \pm 4.9^{+8.7}_{-10.1} \text{ МэВ}),$$

$$P_c(4457)^+ (M = 4457.3 \pm 0.6^{+4.1}_{-1.7} \text{ МэВ},$$

$$\Gamma = 6.4 \pm 2.0^{+5.7}_{-1.9} \text{ МэВ}),$$

— мы ожидаем новой волны интереса к обсуждаемой модели.

¹⁾ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

²⁾ НИЦ “Курчатовский институт” — ИФВЭ, Протвино, Россия.

* E-mail: Alexander.Berezhnoy@cern.ch

** E-mail: Anton.Gerasimov@ihep.ru

Ясно, что состояния, распадающиеся сильным образом на J/ψ -мезон и протон, можно интерпретировать как пентакварки состава $uudc\bar{c}$.

Кроме того, не исключено, что по крайней мере одно из этих состояний имеет те же квантовые числа, что и протон [4, 5], а значит, вполне допустимо предположение о смешивании такого пентакварка и протона. Такое предположение открывает новый взгляд на старый вопрос о существовании внутреннего чарма в протоне: теперь можно обсуждать наличие в нем примеси реально существующего бариона, имеющего в своем составе валентные очарованные кварки.

Следует отметить, что изначально в работах [6, 7] экспериментом LHCb было объявлено о наблюдении широкого резонанса $P_c(4380)$ и узкого резонанса $P_c(4450)$. Однако, согласно последнему исследованию [2], $P_c(4550)$ “расщепился” на два узких: $P_c(4440)$ и $P_c(4457)$, а в районе $P_c(4380)$ появился узкий резонанс $P_c(4312)$, в результате чего, как отмечено в обзоре [3], доказательство существования $P_c(4380)$ стало менее убедительным. Поэтому в настоящей работе обсуждаются только три узких резонанса (1). Впрочем, возможность наличия $P_c(4380)$ нельзя совсем сбрасывать со счетов, так новый анализ слабо чувствителен к широким резонансам.

В настоящей работе с использованием исходной пертурбативной модели внутреннего чарма [1] и непертурбативной модели, описывающей смешивание протона и пентакварка, основанной на работе [8], будет выполнено сравнение возможных распределений s -кварков в протоне и вычислено теоретическое ограничение сверху на вклад внутреннего чарма в состав протона.

2. РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ КВАРКОВ В ПРОТОНЕ В РАМКАХ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО АРОМАТА

В работе [1], где впервые обсуждается гипотеза внутреннего очарования, предполагается, что волновая функция протона может быть представлена в виде $|p\rangle = A_0|uud\rangle + A_1|uudc\bar{c}\rangle + \dots$, где $|A_1|^2$ — ненулевая вероятность существования внутренних $c\bar{c}$ -пар. Для оценки такой вероятности привлекается “старая” теория возмущений:

$$G = |A_1|^2 = \left| \frac{\langle u_1 u_2 d c \bar{c} | M | u_1 u_2 d \rangle}{E_{u_1 u_2 d c \bar{c}} - E_{u_1 u_2 d}} \right|^2.$$

Из приведенного выражения в системе бесконечного импульса и в предположении, что $\langle u_1 u_2 d c \bar{c} | M | u_1 u_2 d \rangle = \text{const}$, можно получить, что

$$G(x_{u_1}, x_{u_2}, x_d, x_c, x_{\bar{c}}) \sim \left(M_p^2 - \sum_{i=u_1, u_2, d, c, \bar{c}} \frac{m_{\perp i}^2}{x_i} \right)^{-2},$$

откуда в предположении тяжелых очарованных кварков следует, что

$$G(x_{u_1}, x_{u_2}, x_d, x_c, x_{\bar{c}}) \sim \frac{x_c^2 x_{\bar{c}}^2}{(x_c + x_{\bar{c}})^2} \delta \left(1 - \sum_{i=u_1, u_2, d, c, \bar{c}} x_i \right). \quad (2)$$

Проведя интегрирование в (2), авторы [1] получают одиночное распределение c -кварков в протоне следующего вида:

$$G_c(x_c) \sim x_c^2 \left[(1 - x_c)(1 + 10x_c + x_c^2) - 6x_c(1 + x_c) \ln \frac{1}{x_c} \right]. \quad (3)$$

Нормировка распределения (3), очевидным образом определяющая вероятность найти очарованный кварк в протоне, в [1] теоретически не вычисляется.

В недавней теоретической работе [9] на основе данных эксперимента ATLAS было получено ограничение на внутренний чарм 1.93%. Следует также отметить, что существуют исследования, которые дают и большие ограничения: в работе [10] получено ограничение сверху в 1%, исходя из отношения Λ_{QCD} к разнице энергий пентакварка и протона, а в работе [11] ограничение еще жестче: 10^{-5} .

Напомним, что формула (3) в [1] получена в предположении тяжелого кварка. Это автоматически приводит к мысли о возможности не только внутреннего очарования, но и внутренней прелести. Поэтому в дальнейшем изложении мы вскользь

коснемся и этой проблемы. Ясно, что подход [1] предполагает одну и ту же форму распределения примеси c - и b -кварков в протоне. Напротив, как мы покажем далее, в модели смешивания протона и пентакварка эти распределения должны быть разными. Конечно же, сложно ожидать большого вклада внутренней прелести³⁾, однако с теоретической точки зрения эта тема не лишена интереса.

Для получения распределений кварков в адронах существует успешно зарекомендовавшая себя при вычислении структурных функций для малых q^2 непертурбативная модель [8]. Согласно этой модели вероятность обнаружения в адроне n партонов, из которых m являются валентными, определяется выражением:

$$G(x_1, \dots, x_n) \sim \prod_{i=1}^m x_i^{1-\alpha_i} \prod_{i=1}^n \frac{dx_i}{x_i} \delta \left(1 - \sum_{i=1}^n x_i \right).$$

В обсуждаемой модели для морских партонов вероятность пропорциональна лишь фазовому объему $\frac{dx_i}{x_i}$, а для валентных кварков в ней появляется дополнительный множитель $x_i^{1-\alpha_i}$, где параметр α_i связан с пересечением траектории Редже.

В описанном подходе пентакварк отличается от “обычных” адронов только наличием пяти валентных кварков. При этом значение параметра α_c для валентных c -кварков известно и равно -2.2 [13, 14]. Что касается остальных величин α_i , то они известны из реджевской феноменологии: $\alpha_u = \alpha_d = \alpha_q = 1/2$ и $\alpha_s = 0$.

Следуя [8], можно получить для пентакварка $uudc\bar{c}$ следующие распределения (см. [10]):

$$G_q^{Pc}(x_q) \sim x_q^{-\alpha_q} (1 - x_q)^{-1+\gamma+2(1-\alpha_q)+2(1-\alpha_c)} \quad (4)$$

— для валентных легких кварков;

$$G_c^{Pc}(x_c) \sim x_c^{-\alpha_c} (1 - x_c)^{-1+\gamma+3(1-\alpha_q)+(1-\alpha_c)} \quad (5)$$

— для валентных c - и $\bar{c}$ -кварков.

Так как кварки валентные, то распределения (4) и (5) нормируются на единицу.

Напомним, что в протоне, согласно модели [8], распределения валентных кварков выглядят следующим образом:

$$G_q^p(x_q) \sim x_q^{-\alpha_q} (1 - x_q)^{-1+\gamma+2(1-\alpha_q)}.$$

Из правил кваркового счета следует, что для протона $-1 + \gamma + 2(1 - \alpha_q) = 3$, откуда $\gamma = 3$. Это же

³⁾См., например, работу [12], где подавление вклада внутренней прелести относительно вклада внутреннего чарма оценивается как отношение квадратов масс c -кварка и b -кварка.

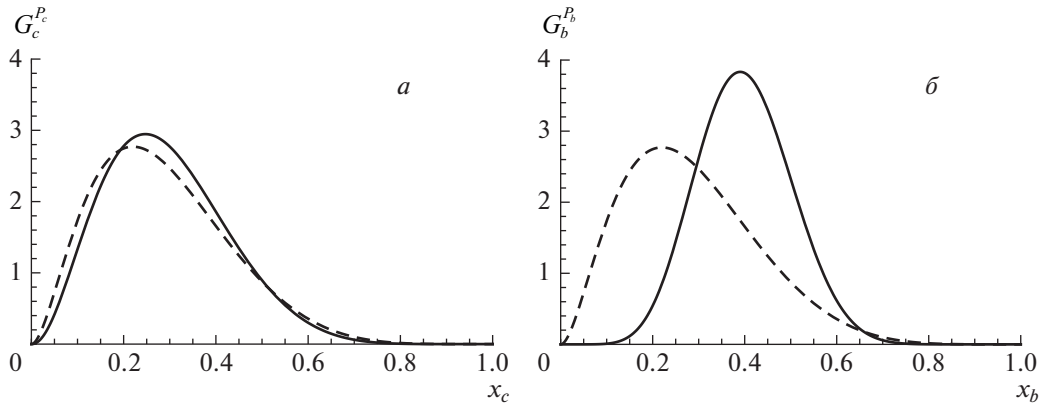


Рис. 1. Распределения c -кварков (а) [10] и b -кварков (б) в протоне согласно модели [1] (штриховая кривая) и в пентакварке согласно модели [8] (сплошная кривая).

значение величины γ мы будем использовать для вычисления распределений кварков в пентакварке, также как это делалось и в работе [10].

Сравнивая форму распределения очарованных кварков в протоне в рамках модели внутреннего чарма (3) с формой распределения очарованных кварков в пентакварке (5), нельзя не отметить их чрезвычайную схожесть (см. рис. 1а). Однако на примере гипотетического пентакварка $uud\bar{b}\bar{b}$ можно показать, что эта схожесть носит случайный характер.

Действительно, распределение валентного b -кварка в таком пентакварке можно получить из (5) заменой параметра $\alpha_c = -2.2$ на $\alpha_b = -8$ [15]:

$$G_b^{P_b}(x_b) \sim x_b^{-\alpha_b}(1-x_b)^{-1+\gamma+3(1-\alpha_q)+(1-\alpha_b)},$$

что существенно меняет его форму. При этом, как мы уже отметили ранее, распределение для “внутренней прелести” в протоне будет точно таким же, что и для внутреннего чарма. В виду указанных обстоятельств разница в форме распределений становится весьма ощутимой (см. рис. 1б), а значит, сходство между (3) и (5) нельзя считать закономерностью.

Следует заметить, что в рамках той же модели можно получить и распределение для странного валентного кварка в пентакварке со скрытой странностью. Так как $\alpha_s = 0$, то в рамках указанной модели такое распределение будет иметь простейший вид

$$G_s^{P_s}(x_s) \sim (1-x_s)^{4.5}. \quad (6)$$

Однако на сегодняшний день пентакварки со скрытой странностью не обнаружены, и их обсуждение носит такой же теоретический характер, что и обсуждение пентакварков со скрытой прелестью. Впрочем, исследование внутренней странности в

протоне и ее связи с гипотетическими пентакварками со скрытой странностью безусловно заслуживает отдельного рассмотрения. Следует также отметить, что, к сожалению, наличие внутренней странности, как и наличие внутреннего чарма, не находит однозначного экспериментального подтверждения (см. теоретический обзор [16], где в этой связи обсуждаются экспериментальные данные эксперимента HERMES [17]).

3. ПРИМЕСЬ ПЕНТАКВАРКА В ПРОТОНЕ

Несмотря на то, что сходство в распределениях c -кварков в протоне в модели внутреннего чарма [1] и в пентакварке в модели Кути–Вайскопфа [8] является случайным, оно наталкивает на мысль о возможном смешивании протона и одного из недавно открытых пентакварков (1) (см. также [10]). Далее, в предположении, что один из этих пентакварков имеет квантовые числа протона, мы получим оценку вероятности такого смешивания и, следовательно, вероятности обнаружения пентакварковой компоненты в протоне.

Новые смешанные состояния протона и пентакварка $X_1|p\rangle + X_2|P_c\rangle$ определяются с помощью матрицы смешивания:

$$\begin{pmatrix} M_p & V \\ V & M_{P_c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix},$$

где M_p и M_{P_c} — массы протона и пентакварка, а V — оператор, связанный с их взаимодействием.

Предполагая малость V относительно разности масс $M_{P_c} - M_p$, находим собственные значения матрицы смешивания:

$$\lambda_1 = M_p + \frac{V^2}{M_{P_c} - M_p},$$

$$\lambda_2 = M_{P_c} - \frac{V^2}{M_{P_c} - M_p}.$$

При этом первому собственному значению отвечает состояние протона с примесью пентакварка

$$|p\rangle' = |p\rangle + \varepsilon|P_c\rangle,$$

где малый параметр

$$\varepsilon = \frac{V}{M_{P_c} - M_p},$$

а второму — состояние пентакварка с примесью протона

$$|P_c\rangle' = |P_c\rangle + \varepsilon|p\rangle.$$

Вид оператора V неизвестен, однако можно предположить, что по величине он ограничен сверху полной шириной пентакварка

$$V \lesssim \Gamma_{P_c}$$

и тогда

$$\varepsilon \lesssim \frac{\Gamma_{P_c}}{M_{P_c} - M_p}.$$

Здесь мы вынуждены отметить, что это наше предположение не имеет строгого обоснования и является лишь догадкой. Наши качественные соображения состоят в том, что пентакварк в основном распадается на протон и J/ψ , а значит, чем больше ширина пентакварка, тем больше должно быть значение оператора перехода в протон. Более обоснованная оценка величины V будет являться целью нашего следующего исследования.

Какой из открытых пентакварков (1) обладает квантовыми числами протона, точно неизвестно, но скорее всего, это состояние с наименьшей массой, так как именно оно является главным кандидатом на основное состояние. Его ширину (9.8 МэВ) мы и будем использовать для оценки величины примеси:

$$\varepsilon \lesssim \frac{9.8 \text{ МэВ}}{4312 \text{ МэВ} - 938 \text{ МэВ}} \approx 3 \times 10^{-3}.$$

Таким образом, вероятность присутствия пентакваркового состояния в протоне составляет $\varepsilon^2 \lesssim 10^{-5}$.

Заметим, что очень похожую задачу смешивания легких барионов с легкими пентакварками рассмотрели в недавней работе [18].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модель внутреннего чарма [1] позволяет определить форму распределения c -кварков в системе большого импульса, однако не предсказывает нормировку этого распределения. Напротив, используемая нами модель, предполагающая смешивание

протона и пентакварка, позволяет не только предсказать форму распределения, но и оценить величину примеси c -кварков в протоне. Форма распределения c -кварков в последней модели предсказывается в рамках подхода Кути–Вайскопфа [8], примененного к пентакварку, а величина примеси оценивается на основе знаний о массах и ширинах открытых недавно экспериментом LHCb пентакварков со скрытым чармом [6, 7].

Заметим, что столь разные подходы приводят к очень похожим по форме распределениям c -кварков в протоне. Однако, по всей видимости, это совпадение носит случайный характер, что было продемонстрировано нами на примере большой разницы в распределениях b -кварков, предсказанных в рамках тех же двух моделей.

В качестве верхней оценки для величины примеси ε c -кварка в протоне $|p'\rangle = |p\rangle + \varepsilon|P_c\rangle$ нами использовалось значение отношения $\Gamma_{P_c}/(M_{P_c} - M_p) \approx 3 \times 10^{-3}$, где $\Gamma(P_c)$ и M_{P_c} — ширина и масса наинизшего пентакваркового состояния из обнаруженных экспериментом LHCb [6, 7]. Данное состояние выбрано из-за того, что, скорее всего, именно оно имеет квантовые числа протона. Тогда вероятность перехода протона в пентакварк $\varepsilon^2 \lesssim 10^{-5}$. Заметим, что это ограничение жестче, чем ограничения, полученные в большинстве других исследований (см., например [1, 9, 10]).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-02-00154 А. Работа А.В. Бережного частично поддерживается фондом “Базис”, грант № 17-12-244-1. Авторы благодарят проф. А.К. Лиходеда за всестороннюю помощь в проведении исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. J. Brodsky, P. Hoyer, C. Peterson, and N. Sakai, Phys. Lett. B **93**, 451 (1980).
2. Roel Aaij *et al.* (LHCb Collab.), Phys. Rev. Lett. **122**, 222001 (2019).
3. M. Tanabashi *et al.* (Particle Data Group), Phys. Rev. D **98**, 030001 (2018).
4. Zhi-Gang Wang, Int. J. Mod. Phys. A **35**, 2050003 (2020).
5. Ruilin Zhu, Xuejie Liu, Hongxia Huang, and Cong-Feng Qiao, Phys. Lett. B **797**, 134869 (2019).
6. Roel Aaij *et al.* (LHCb Collab.), Phys. Rev. Lett. **115**, 072001 (2015).
7. Roel Aaij *et al.* (LHCb Collab.), Phys. Rev. Lett. **117**, 082002 (2016).
8. Julius Kuti and Victor F. Weisskopf, Phys. Rev. D **4**, 3418 (1971).
9. V. A. Bednyakov, S. J. Brodsky, A. V. Lipatov, G. I. Lykasov, M. A. Malyshev, J. Smiesko, and S. Tokar, Eur. Phys. J. C **79**, 92 (2019).
10. М. О. Михасенко, ЯФ **77**, 658 (2014) [Phys. At. Nucl. **77**, 623 (2014)].

11. В. А. Литвин, А. К. Лиходед, ЯФ **62**, 728 (1999) [Phys. At. Nucl. **62**, 679 (1999)].
12. М. V. Polyakov, A. Schafer, and O. V. Teryaev, Phys. Rev. D **60**, 051502(R) (1999).
13. В. Г. Картвелишвили, А. К. Лиходед, ЯФ **42**, 1306 (1985) [Sov. J. Nucl. Phys. **42**, 823 (1985)].
14. С. С. Герштейн, А. К. Лиходед, А. В. Лучинский, ЯФ **70**, 791 (2007) [Phys. At. Nucl. **70**, 759 (2007)].
15. V. G. Kartvelishvili, A. K. Likhoded, and V. A. Petrov, Phys. Lett. B **78**, 615 (1978).
16. S. J. Brodsky, V. A. Bednyakov, G. I. Lykasov, J. Smiesko, and S. Tokar, Prog. Part. Nucl. Phys. **93**, 108 (2017).
17. A. Airapetian *et al.* (HERMES Collab.), Phys. Rev. D **89**, 097101 (2014).
18. K. Xu, A. Kaewsnod, Z. Zhao, X. Liu, S. Srisuphaphon, A. Limphirat, and Y. Yan, Phys. Rev. D **101**, 076025 (2020).

PENTAQUARKS WITH A HIDDEN FLAVOUR AND THE HYPOTHESIS OF INTRINSIC CHARM IN THE PROTON

A. V. Berezhnoy¹⁾, A. S. Gerasimov²⁾

¹⁾*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Russia*

²⁾*NRC “Kurchatov Institute” — IHEP, Protvino, Russia*

Using experimental data about the existence of pentaquarks with hidden charm, new restrictions on the contribution of intrinsic charm to the proton are obtained and possible distributions of heavy quarks inside the proton are analyzed.