

Анализ непертурбативных поправок и поиск коротких струн КХД

в e^+e^- - аннигиляции в адроны

М.Е. Кожевникова¹, А.Г. Оганесян^{1,2}, О.В. Теряев¹

¹Объединенный институт ядерных исследований

²Институт теоретической и экспериментальной физики

Проблема существования оператора размерности 2, пропорционального $1/Q^2$, в ряде операторного разложения в квантовой хромодинамике (КХД), а также свойства поправок операторного разложения изучаются уже длительное время. Правила сумм и анализ операторного разложения приведены в работе Шифмана, Вайнштейна и В.И. Захарова в 1979 году [1]. Поведение оператора размерности 2 было изучено в работе [2] Эйдельманом и др., было показано, что оператор размерности 2 сравним с нулём и имеет большие погрешности.

В работе [3] предложена концепция коротких струн, приводящих к поправкам размерности 2. Так, в корнельском потенциале, выражаемом формулой:

$$V(r) \approx -\frac{4\alpha_s(r)}{3r} + kr,$$

второй член kr описывает потенциал короткой струны на малых расстояниях, приводит к поправкам вида k/Q^2 и связан с явлением конфайнмента. В операторном разложении такая поправка отсутствует, а имеющаяся первая поправка имеет вид $\sim \langle G_{\mu\nu}G^{\mu\nu} \rangle / Q^4$. В статье [4] установлена корреляция между короткой струной и порядком теории возмущений.

Функция Адлера (или D -функция) является простым для вычисления двухточечным коррелятором, который, помимо этого, можно выразить через экспериментальные данные. Существуют 2 способа представить D - функцию: с одной стороны, она может быть вычислена при помощи дисперсионного подхода, с другой стороны – при помощи теории возмущений и операторного разложения, а приравнивание двух различных представлений позволяет получить правило сумм. Это хороший аргумент в пользу выбора D -функции для проведения анализа в КХД.

В данной работе изучается поведение и свойства непертурбативных (не связанных с теорией возмущений) поправок к функции Адлера, в частности, возможный вклад оператора размерности 2. В анализе учтены вклады существующих операторов размерностей 4 и 6.

Для проведения анализа использовалось большое количество данных по e^+e^- - аннигиляции в следующие пионные каналы: $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, $e^+e^- \rightarrow 2\pi^+2\pi^-$, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-2\pi^0$, $e^+e^- \rightarrow 3\pi^+3\pi^-$, $e^+e^- \rightarrow 2\pi^+2\pi^-2\pi^0$, полученных на детекторах CMD, CMD-2, BaBar, SND, M3N, DM1, DM2, OLYA, GG2 (исследовались процессы, при которых изоспин $I=1$). Для увеличения точности анализа построена высокоточная модель экспериментальных данных – для реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ построена трёхрезонансная модель для квадрата модуля форм фактора, каждый резонанс которой вычисляется по формуле Брейта-Вигнера, для каждой из остальных реакций построена модель для сечения, включающая по 3 гауссова пика.

Вычислены выражения для полного R - отношения и D - функции.

Приравнивание двух выражений для D - функции приводит к следующему правилу сумм:

$$Q^2 \int_{4m_\pi^2}^{\infty} \frac{R_{\text{exp-th}}(s)ds}{(s+Q^2)^2} = N_c \sum_q e_q^2 \left[1 + \frac{\alpha_s(Q^2)}{\pi} + \sum_{n \geq 1} \Gamma(n) \frac{a_{2n}}{Q^{2n}} \right],$$

где $N_c = 2$ – число кварков (u и d), s - кварк не вносит вклад, так как отсутствует в процессах с $I=1$), e_q – заряд кварка q , a_{2n} – коэффициенты операторного разложения. В данной работе учитываются первые три поправки. Здесь $R_{\text{exp-th}}(s) = R_{\text{exp}}(s) \cdot \theta(s_0 - s) + R_{\text{th}}(s) \cdot \theta(s - s_0)$, а $s_0 \approx 1.57^2$ ГэВ² – порог континуума.

В анализе применяется метод, основанный на преобразовании Бореля, позволяющий минимизировать погрешности, связанные со вкладом в ряд операторного разложения высших поправок, не учитываемых в данной работе, а также погрешности, возникающие при замене экспериментального спектра на реальный, вычисленный теоретически, при значениях $s > s_0$.

Варьировались коэффициенты c_2 и c_4 (после применения преобразования Бореля коэффициенты a_{2n} перешли в c_{2n} , которые затем переведены в $C_{2n} = c_{2n} \cdot \Lambda^{2n}$, где $\Lambda = 0.25 \text{ ГэВ}^2$ – масштабный параметр КХД), коэффициент c_6 (как и C_6) был взят постоянным, вычисленным по имеющемуся значению кваркового конденсата. Численное значение:

$$C_6 = -\frac{448\pi^3}{27}\alpha_s\langle\bar{q}q^2\rangle = -0.115 \text{ ГэВ}^6.$$

В результате анализа показано, что оператор размерности 2 отрицателен по знаку на уровне одного и двух стандартных отклонений и сравним с нулём на уровне трёх стандартных отклонений (см. Рис. 1). Диапазон значений C_2 на уровне одного стандартного отклонения:

$$C_2 = -(0.083 \pm 0.048) \text{ ГэВ}^2.$$

Анализ показывает, что полученные значения оператора размерности 4 согласуются с имеющимися данными, см. статьи [1], [5] и [6]. Диапазоны значений C_4 и, соответственно, для глюонного конденсата на уровне одного стандартного отклонения следующие:

$$C_4 = (0.156 \pm 0.072) \text{ ГэВ}^4, \quad C_4 = \frac{2\pi^2}{3}\left\langle\frac{\alpha_s GG}{\pi}\right\rangle, \quad \left\langle\frac{\alpha_s GG}{\pi}\right\rangle = (0.024 \pm 0.011) \text{ ГэВ}^4.$$

Важным результатом анализа является найденная антикорреляция между операторами размерностей 2 и 4, выражаемая приближённой формулой:

$$C_2 \approx -0.668 \text{ ГэВ}^{-2} \cdot C_4 + 0.300 \text{ ГэВ}^2.$$

Иными словами, найдена антикорреляция между короткой струной и глюонным конденсатом.

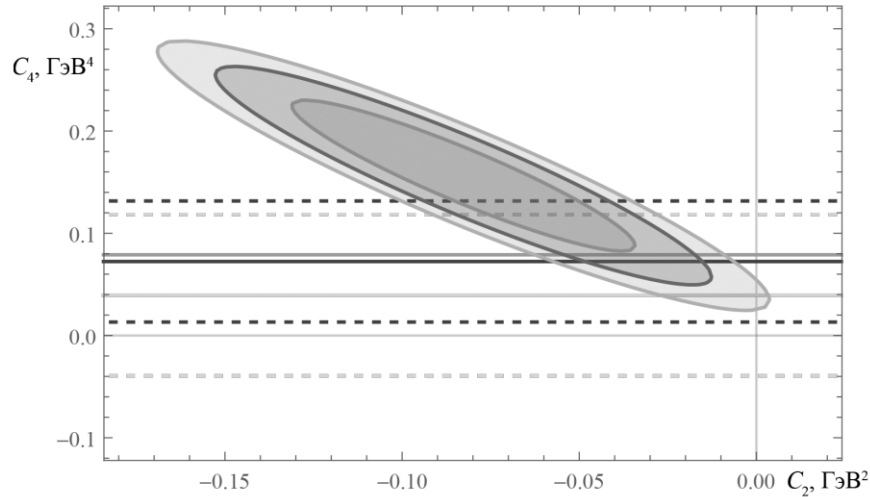


Рис. 1. Области значений коэффициентов C_2 и C_4 при $\chi^2 \leq \chi_{\min}^2 + 1$ (в середине), $\chi^2 \leq \chi_{\min}^2 + 2$ и $\chi^2 \leq \chi_{\min}^2 + 3$. Диапазоны имеющихся данных по C_4 показаны пунктиром, центральные значения – сплошными линиями.

Литература

1. *M. A. Shifman, A. I. Vainshtein, V.I. Zakharov.* QCD and resonance physics. Theoretical foundations // Nucl. Phys. – 1979. – Vol. B147. – Pp. 385-447
2. *Bodenstein S., Dominguez C.A., Eidelman S. I., Spiesberger H., Schilcher K.* Confronting electron-positron annihilation into hadrons with QCD: An Operator product expansion analysis // JHEP 1201 – 2012. – Vol. 039.
3. *K.G. Chetyrkin, S. Narison, V.I. Zakharov.* Short-distance tachyonic gluon mass and 1/Q² corrections // Nucl.Phys. – 1999. – Vol. B550. – Pp. 353-374.
4. *S. Narison, V.I. Zakharov.* Duality between QCD perturbative series and power corrections Phys. Lett – 2009 – Vol. B679. – Pp. 353-374.
5. *B. L. Ioffe, K. N. Zuabluk.* Gluon condensate in charmonium sum rules with 3-loop corrections // Eur. Phys. J. – 2003. – Vol. C27. – Pp. 229-241.
6. *B. V. Geshkenbein, B. L. Ioffe, and K. N. Zyblyuk.* Check of QCD based on the τ -decay data analysis in the complex q^2 plane // Phys. Rev. – 2001. – Vol. D64. – P. 093009.