

М. Б. Волошин. Тяжелый кварковый вне потенциальной модели. Широко применяемая для описания тяжелого кваркония потенциальная модель при всех своих достоинствах не является обоснованной в рамках квантовой хромодинамики (КХД). Поэтому представляют интерес альтернативные методы описания динамики тяжелых кварков, основанные на исходных уравнениях КХД. Естественно, что круг задач, которые могут быть решены такими методами, более ограничен, чем при применении потенциальной модели, однако результаты более надежны и позволяют делать выводы о свойствах самой исходной теории — КХД. В докладе рассмотрены три класса вопросов, относящихся к динамике тяжелого кваркония: 1) спектроскопия уровней, 2) аннигиляционные распады, 3) адронные переходы между уровнями кваркония.

При описании уровней системы кварк-антикварк (кваркония) применяются три различных лишь в техническом отношении подхода для трех различных областей масс кварков. Для сверхтяжелых кварков свойства глуболежащих уровней определяются в основном кулоноподобным потенциалом глюонного обмена. Поправки к кулоноподобному поведению уровней возникают из-за взаимодействия кваркония с глюонным полем крупномасштабных вакуумных флуктуаций (глюонного конденсата), не описываемых теорией возмущений КХД и характеризующихся средним значением квадрата напряженности поля $\langle G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a \rangle$. При этом вычисление поправок к энергии уровней аналогично нахождению сдвига уровней в случайном поле электрического типа.

Для сравнительно легкого кваркония — чармония весьма результативными оказываются правила сумм, основанные на вычислении с помощью КХД поляризации вакуума $P(q^2)$ локальными операторами вида $j = \bar{c}(x) \Gamma c(x)$ при нефизических (ниже порога $4m_c^2$) значениях q^2 . Вычисленное значение $P(q^2)$ приравняется выражению для этой же величины, получаемому в силу дисперсионных соотношений, в виде интеграла от спектральной плотности оператора j , в который дают вклад физические состояния со скрытым чармом. Полученные таким образом правила сумм при учете эффектов глюонного кондансата позволили объяснить массы 3P_J -уровней чармония (χ_J -резонансов) и предсказать массу η_c -мезона до его экспериментального открытия.

Уровни $b\bar{b}$ -кваркония, имеющего промежуточную массу, далеки от кулоноподобных, однако потенциал глюонного обмена играет в их динамике большую роль. Поэтому при выводе правил сумм для системы $b\bar{b}$ необходимо данный потенциал учитывать точно. Это может быть сделано в главном, нерелятивистском приближении путем рассмотрения оператора эволюции в мнимом времени: $\exp(-H\tau)$. При достаточно большом τ проекция оператора эволюции на сектор с определенными квантовыми числами определяется основным состоянием (с данными квантовыми числами). На основе этого чисто нерелятивистского анализа можно оценить величину разности масс основного P-состояния (χ_b) и S-состояния (Υ): $M_P - M_S = 370 \pm 30$ МэВ. На опыте эта разность масс оказалась равной 440 МэВ. Отличие от теоретического предсказания на 10—17%, вероятно, связано с релятивистскими поправками, которые в настоящее время не поддаются количественному анализу. Можно лишь утверждать, что основной вклад дает брейтовское взаимодействие (десятки МэВ), тогда как релятивистские эффекты во взаимодействии с глюонным конденсатом малы (единицы МэВ). Это подтверждается, в частности, расчетом сверхтонкого расщепления $M(\Upsilon) - M(\eta_b)$, который удается провести до конца. В данное расщепление взаимодействие Брейта — Ферми дает вклад, приблизительно равный 33 МэВ, а зависящее от спина взаимодействие с конденсатом — всего порядка 2,5 МэВ.

Рассмотрение ширины распадов 3S_1 -состояний кваркония на пару e^+e^- в рамках указанных методов воспроизводит соответствующие ширины J/ψ - и Υ -резонансов, а для основного 3S_1 -состояния $t\bar{t}$ -кваркония предсказывается ширина

$$\Gamma_{ee}(t\bar{t}) \approx 4 \text{ кэВ} \cdot |1 + (A_Z/A_\gamma)|^2 \text{ при } 2m_t \leq 50 \text{ ГэВ}$$

(A_Z, A_γ — амплитуды аннигиляции через Z-бозон и фотон соответственно). При $2m_t > 50$ ГэВ данная ширина определяется чисто кулоновской формулой.

Также, основываясь на выражаемой правилами сумм дуальности физического и кваркового сечений e^+e^- -аннигиляции, следует ожидать широких резонансов в e^+e^- -аннигиляции с массой около 11 ГэВ, распадающихся на пары В-мезонов.

Ширины аннигиляции тяжелого кваркония в адроны представляют большой интерес в связи с обсуждением непертурбативных эффектов. Данные эффекты в адронной аннигиляции связаны с превращением бесцветной пары $q\bar{q}$ в цветную в результате взаимодействия с глюонным конденсатом и последующей глюонной аннигиляцией цветного состояния $q\bar{q}$ (этот процесс аналогичен двухфотонной аннигиляции ортопозитрония во внешнем магнитном поле). Количественно эффект вычислен лишь в пределе очень тяжелого кваркония. Экстраполяция полученного результата на Υ - и J/ψ -резонансы указывает, что поправка к формуле теории возмущений для отношения $R_h = \Gamma_{\text{адр}}/\Gamma_{ee}$ отрицательна и может достигать десятков процентов для J/ψ и нескольких процентов для Υ . Не исключено, что учет указанного эффекта объясняет различие значений R_h для ψ' и J/ψ -резонансов ($R_h(\psi')/$

$/R_h(J/\psi) = 2,3 \pm 0,5$), а также рассогласование значений $R_h(\Gamma)$ и $R_h(J/\psi)$ с формулой асимптотической свободы для эволюции α_s . Этот же анализ непертурбативных поправок дает для относительной вероятности распада Υ -мезона на прямой фотон и адроны весьма малую (не более процента) поправку по сравнению с формулой теории возмущений. Поэтому последний распад представляется наилучшим объектом для изучения величины константы α_s .

Адронные переходы между уровнями тяжелого кваркония с испусканием двух пионов или η -мезона изучаются в рамках мультипольного разложения для взаимодействия кваркония с мягкими глюонами, конвертирующими в легкие мезоны.

Спектр инвариантных масс системы $\pi\pi$ в распадах $\psi' \rightarrow J/\psi \pi\pi$ и $\Upsilon' \rightarrow \Upsilon \pi\pi$ согласуется с теоретически ожидаемой амплитудой вида $s(m_{\pi\pi}^2 - \lambda m_\pi^2)$, где s и λ — константы. Измеренная группой ARGUS величина $\lambda = 2,5 \pm 0,5$ в последнем распаде также находится в согласии с теоретическим предсказанием. Проблему представляет спектр по $m_{\pi\pi}$ в распаде $\Upsilon'' = \Upsilon \pi\pi$, не согласующийся с указанным видом амплитуды. Возможным решением данной проблемы могло бы явиться существование изовекторного четырехкваркового резонанса $X = (b\bar{b}u\bar{d})$ с массой $M(\Upsilon'') - m_\pi < M(X) < M(\Upsilon'')$. Этот резонанс мог бы быть обнаружен в распадах $\Upsilon''' \rightarrow X\pi$.

Прецизионное измерение разности масс Υ' - и Υ -резонансов позволяет сделать определенное предсказание об относительной вероятности перехода между ними с испусканием η -мезона: $B(\Upsilon' \rightarrow \Upsilon\eta) \approx 0,1\%$, что лишь ненамного меньше экспериментальной верхней границы ($B(\Upsilon' \rightarrow \Upsilon\eta) < 0,2\%$).