

А. А. Быков, И. М. Дремин, А. В. Леонидов. А т о м ы и з к в а р -
к о в и и х с п е к т р о с к о п и я. Доклад посвящен проблеме описания
физических характеристик мезонов, составленных из тяжелого кварка и ан-
тикварка, в рамках потенциальной модели ¹⁻⁴. Интерес к этим частицам свя-
зан прежде всего с тем, что, с одной стороны, накоплен богатейший экспери-
ментальный материал относительно мезонов такого типа ⁵, а с другой — эти
системы имеют много общего с позитронием, простейшим двухчастичным
связанным состоянием, образованным электроном и позитроном. Глубокие
анalogии между двухчастичными связанными состояниями — атомом водо-
рода или позитронием в квантовой электродинамике и кварконием в теории
сильных взаимодействий — обуславливают надежды теоретиков на то, что
изучение свойств кваркониев позволит выяснить природу составляющих их
элементов, т. е. понять как статические свойства тяжелых кварков, так
и динамику их взаимодействия.

Основными экспериментально измеренными характеристиками кварко-
ниев являются энергетические уровни (массы и квантовые числа), лептонные
и адронные ширины распада, а также ширины и мультипольность электро-

магнитных переходов между членами данного семейства мезонов. Следует отметить высокую точность измерения уровней энергии кваркониев, что дает возможность изучать спин-спиновую и спин-орбитальную структуру взаимодействия между кварком и антикварком.

Главное утверждение в модели потенциального описания кваркониев состоит в том, что кварки, входящие в их состав, представляют собой нерелятивистские объекты и могут быть адекватно описаны на языке локального статического потенциала взаимодействия в рамках уравнения Шредингера или уравнения Брейта — Ферми. При этом основной ингредиент теории — потенциал кварк-антикваркового взаимодействия — можно выбирать как чисто феноменологически, так и в соответствии с основными положениями КХД, предсказывающими вполне определенное поведение потенциала на малых и на больших расстояниях. Интересно, что потенциал кварк-антикваркового взаимодействия можно связать с видом β -функции Гелл-Манна — Лоу, управляющей зависимостью константы связи от значения переданного четырех-импульса⁶. Это обеспечивает возможность проверки существующих в литературе интерполяционных формул для β -функции из сравнения полученных в рамках такого подхода результатов по спектроскопии кваркониев с экспериментальными данными.

После того как потенциал взаимодействия задан, можно вычислить, исходя из уравнения Шрёдингера, спектр масс, лептонные ширины распадов, значения ширин радиационных переходов между уровнями, среднеквадратичные радиусы мезонов и некоторые другие характеристики (см. обзор⁴).

Из сравнения экспериментального и вычисленного в потенциальных моделях спектра масс можно сделать выводы о форме потенциала в области расстояний, соответствующих среднеквадратичным радиусам кваркониев. Оказывается, что все содержащиеся в литературе потенциалы ведут себя сходным образом в области расстояний $0,2 \text{ Фм} \leq r \leq 1 \text{ Фм}$ и приводят практически к одинаковым предсказаниям. Чтобы различить потенциалы, необходимо продвинуться в область меньших расстояний ($r < 0,2 \text{ Фм}$), что станет возможным с открытием шестого t -кварка и его связанных состояний с \bar{t} -антикварком (топоний). Из сравнения экспериментальных данных о топонии с результатами вычислений⁷, основанных на использовании различных потенциалов, можно будет сказать, какие из них более адекватно описывают динамику взаимодействия на малых расстояниях. Например, разность $2S$ - и $1S$ -уровней меняется при разных предположениях от 0,5 до 4 ГэВ.

Важную информацию можно извлечь из изучения ширин лептонных распадов кваркониев, так как они представляют собой более чувствительную к форме потенциала характеристику и, следовательно, существенно снижают произвол в выборе потенциала кварк-антикваркового взаимодействия.

Радиационные переходы между уровнями семейства кваркония являются наиболее трудно воспроизводимой характеристикой, так как в рамках потенциальной модели их значение сильно зависит от правильности воспроизведения относительного положения узлов и максимумов волновых функций различных состояний. Кроме того, ширины радиационных переходов весьма чувствительны к релятивистским поправкам и без их учета превышают экспериментальные значения, полученные для семейства J/ψ частиц в 2—4 раза.

Очень существенным вопросом для физики тяжелых кваркониев является учет поправок, связанных с конечностью скоростей движения кварков в таких системах. Он не только связан с уточнением вычисленных на основе уравнений Шрёдингера значений спектра масс, ширин лептонных распадов и электромагнитных переходов, но и позволяет сделать ряд выводов о лоренц-структуре удерживающего потенциала. В частности, общепринятым является мнение, что удерживающая часть является суперпозицией лоренц-скалярного и лоренц-векторного потенциалов, что немедленно отражается, например, на тонкой структуре уровней кваркониев.

Лоренц-скалярную часть потенциала можно интерпретировать при этом как проявление динамической массы кварков⁸, представляющей собой функцию относительного расстояния между ними, что связано, в частности, с различием масс токовых и конституентных кварков.

Детальное изучение потенциалов кварк-антикваркового взаимодействия на малых и промежуточных расстояниях ($r \lesssim 0,5$ Фм), весьма вероятно, поможет также в выяснении нетривиальной структуры вакуума КХД. В частности, наличие в КХД-вакууме длинноволновых флуктуаций не может быть адсорбировано в локальный статический потенциал взаимодействия, в то время как коротковолновые флуктуации могут быть учтены на языке локального потенциала.

На основании полученных результатов (см. обзор⁴) можно утверждать, что потенциальная модель адекватно описывает физику взаимодействия тяжелых кварков в кваркониях. Она обладает большой предсказательной силой, проста в математическом отношении и при этом дает информацию о весьма тонких свойствах динамики взаимодействия кварков — о лоренц-структуре потенциала взаимодействия, об асимптотическом уменьшении константы связи, о независимости потенциалов от аромата кварков и даже о нетривиальной структуре вакуума КХД. Одновременно с этим потенциальная модель является надежным путеводителем для экспериментатора и, несомненно, окажется весьма полезной при изучении связанных состояний гипотетического сверхтяжелого t -кварка и t -антикварка (топония).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Friedman A. Preprint DESY 83—131. — 1983.
2. Quigg C., Rosner J. L. — Phys. Rept., 1979, v. 56, p. 167.
3. Хозе В. А., Шифман М. А. — УФН, 1983, т. 140, с. 3.
4. Быков А. А., Дремин И. М., Леонидов А. В. — УФН, 1984, т. 143, с. 3.
5. Franzini P., Lee-Franzini J. — Phys. Rept., 1982, v. 81, p. 239.
См. также литературу, цитированную в 1-4.
6. Дремин И. М. — Кр. сообщ. физ. (ФИАН СССР), 1982, № 1, с. 45.
Дремин И. М., Леонидов А. В. — ТМФ, 1982, т. 51, с. 178.
7. Быков А. А., Дремин И. М., Леонидов А. В. — ЯФ, 1984.
8. Дремин И. М., Леонидов А. В. — Письма ЖЭТФ, 1983, т. 37, с. 617.