**Спектроскопия трижды тяжёлых тетракварков**

**Савченко Е.М.**

аспирант

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,физический факультет, Москва, Россия;

младший научный сотрудник

*Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук,* Москва, Россия

E–mail: savchenko.em16@physics.msu.ru

В течение последних десятилетий физика экзотических адронов получила бурное развитие. Предсказанные ещё на заре кварковой модели экзотические состояния впервые были обнаружены экспериментально. К таким состояниям относят комбинации кварков и антикварков, отличные от «обычных» трёхкварковых барионов и кварк-антикварковых мезонов. Простейшими экзотическими состояниями являются тетракварк — мезон, состоящий из двух кварков и антикварков, и пентакварк — барион, состоящий и четырёх кварков и одного антикварка. Первыми обнаруженными явно экзотическими состояниями стали заряженные дважды тяжёлые тетракварки со скрытым очарованием $Z\_{c}^{+}$ [1]: для того, чтобы иметь отличный от нуля заряд, они должны, помимо очарованных кварка и антикварка, содержать также пару лёгких кварка и антикварка различных ароматов. Затем была обнаружена пара заряженных дважды тяжёлых пентакварков также со скрытым очарованием $P\_{c}^{+}\left(4380\right),(4450)$ [2]. На данный момент несколько десятков состояний находятся в статусе либо подтверждённых экзотических, либо кандидатов в таковые (недостаточно статистики).

Тетракварки достоверно обнаружены как в секторе дважды тяжёлых (уже упомянутый $Z\_{c}^{+}$ [1] и другие [3]), так и в секторе четырежды тяжёлых (X(6900) и другие [4-6]). Более того, среди дважды тяжёлых есть как состояния, содержащие два тяжёлых кварка [3], так и состояния, содержащие тяжелые кварк и антикварк [1]. Всё это даёт основание полагать, что в ближайшем будущем можно ожидать экспериментального прогресса и в секторе трижды тяжёлых тетракварков.

В данном докладе представлены результаты исследования трижды тяжёлых тетракварков $QQ\overline{Qq}$, $qQ\overline{QQ}$. Исследованы все возможные кварковые составы ($Q=c,b$, $q=u,d,s$) в основных состояниях (1S). В рамках дикварк—антидикварковой картины тетракварков были проведены расчёты масс в Релятивистской Кварковой Модели. Ранее данная модель была успешно использована для расчётов спектров масс четырежды тяжёлых тетракварков [7-10]. Связанное состояние кварков в дикварке и дикварков в тетракварке описывается с помощью численного решения квазипотенциального уравнения [11]. Важной особенностью модели является последовательный учёт релятивистских эффектов. Квазипотенциалы взаимодействия кварков в дикварке и дикварка и антидидкварка в тетракварке построены без использования нерелятивистского разложения. Все параметры и предположения модели (массы кварков и т. д.) были определены в предыдущих работах по исследованию свойств мезонов и барионов [12]. При проведении вычислений учитывается конечный размер дикварков с помощью рассчитанного форм-фактора дикварк-глюонного взаимодействия. Такой учет внутренней структуры дикварка делает расчёты более физически корректными. Полученные массы сравниваются с порогами распадов на пару мезонов (тяжёлый и тяжёло-лёгкий). Состояния тетракварков, лежащие под такими порогами, не могут распадаться за счёт развала на пару мезонов. И поэтому они будут иметь узкую ширину. Распады тетракварков, лежащих чуть выше порога, также будут кинематически подавлены. На основании такого анализа делаются выводы о том, какие состояния вероятно являются более долгоживущими, а потому предпочтительными для экспериментальных поисков.

**Примечание**

Автор выражает благодарность своему научному руководителю, профессору кафедры Квантовой Теории и Физики Высоких Энергий Физического факультета МГУ Галкину В.О. за сотрудничество и помощь в подготовке доклада. Работа выполнена при поддержке Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС», грант № 22-2-10-3-1.

**Литература**

1. [Belle Collaboration] Liu Z. Q. et al. Study of $e^{+}e^{-}\rightarrow π^{+}π^{-}J/ψ $ and Observation of a Charged Charmoniumlike State at Belle // Phys. Rev. Lett. 2013, vol. 110, p. 252002.
2. [LHCb Collaboration] Aaij R. et al. Observation of ${J}/{ψ}p$ Resonances Consistent with Pentaquark States in $Λ\_{b}^{0}\rightarrow {J}/{ψ}K^{-}p$ Decays // Phys. Rev. Lett. 2015, vol. 115, p. 072001.
3. [LHCb Collaboration] Aaij R. et al. Observation of an exotic narrow doubly charmed tetraquark // Nat. Phys. 2022, vol. 18, p.751-754.x
4. [LHCb Collaboration] Aaij R. et al. Observation of structure in the ${J}/{ψ}$-pair mass spectrum // Sci. Bull. 2020, vol. 65, p. 1983-1993.
5. [CMS Collaboration] Observation of New Structures in the ${J}/{ψ}{J}/{ψ}$ Mass Spectrum in $pp$ Collisions at $√s=13$ TeV // CERN Tech. rep. 2022, CMS-PASBPH-21-003, arXiv:2306.07164.
6. [ATLAS Collaboration] Observation of an excess of di-charmonium events in the four-muon final state with the ATLAS detector // Phys. Rev. Lett. 2023, vol. 131, p. 151902.
7. Faustov R.N., Galkin V.O., Savchenko E.M. Masses of the $QQ\overline{Q}\overline{Q}$ tetraquarks in the relativistic diquark-antidiquark picture // Phys. Rev. D 2020, vol. 102, p. 114030.
8. Faustov R.N., Galkin V.O., Savchenko E.M. Heavy tetraquarks in the relativistic quark model // Universe 2021, vol. 7, p. 94.
9. Faustov R.N., Galkin V.O., Savchenko E.M. Fully Heavy Tetraquark Spectroscopy in the Relativistic Quark Model // Symmetry 2022, vol. 14, p. 2504.
10. Галкин В.О., Савченко Е.М. Релятивистское описание спектров масс четырежды тяжёлых тетракварков // УЗФФ 2023, №4, с. 2341504.
11. Ebert D., Faustov R.N., Galkin V.O., Martynenko, A.P. Mass spectra of doubly heavy baryons in the relativistic quark model // Phys. Rev. D 2002, vol. 66, p. 014008.
12. Ebert D., Faustov R.N., Galkin V.O., Lucha W. Masses of tetraquarks with two heavy quarks in the relativistic quark model // Phys. Rev. D 2007, vol. 76, p. 114015.