М. Ю. Барабанов, А. С. Водопьянов, А. Кищель

Теоретические и экспериментальные перспективы в физике ароматных адронов, кваркония и мультикварков

Одной из первостепенных задач адронной физики является изучение природы самих адронов. Поэтому основная цель исследований связана с двумя фундаментальными вопросами: из чего состоят адроны и как они рождаются в рамках КХД — сильновзаимодействующей компоненты Стандартной модели? Адронная спектроскопия является полезным и проверенным временем инструментом для понимания КХД. Экспериментальные исследования структуры и спектра адронов в процессах адрон-адронного рассеяния, фотон-, мезон- и электронного рождения из нуклонов на мировых установках привели к огромному росту имеющихся данных, которые значительно улучшили наши знания о спектре барионов и мезонов, установив при этом существование новых форм материи [1, 2]. Несмотря на это, многие обнаруженные состояния остаются загадочными и не находят однозначной интерпретации в рамках существующих теоретических моделей. Это стимулирует дальнейшие поиски, идеи и подходы для выяснения их природы [3, 4]. Существующие экспериментальные установки, такие как BES-III, Belle II и LHCb, а также строящиеся FAIR, NICA и модернизированная версия J-PARC представляют собой подходящие инструменты для достижения указанной цели.

Исследование тяжелых ароматных адронов и чармониеподобных состояний является одним из наиболее актуальных и перспективных направлений в современной физике элементарных частиц. Именно очарованный кварк располагается в не совсем благоприятной области масс, поскольку не является ни легким кварком, для которого оправдана цветовая симметрия, ни достаточно тяжелым для того, чтобы можно было

M. Yu. Barabanov, A. S. Vodopyanov, A. Kisiel

Theoretical and Experimental Challenges in Flavor Hadrons, Quarkonium and Multiquark Physics

One of the primary efforts in hadron physics is to understand the nature of hadrons. Therefore, a great deal of research activity revolves around two fundamental questions: what constituents are the hadrons made of and how does QCD, the strong interaction component of the Standard Model, produce them? To understand the measurable content of QCD, hadron spectroscopy is a valuable and time-tested tool. Experimental investigations of hadron structure and spectrum via hadron–hadron scattering processes, photon-, meson- and electro-production from nucleons at facilities worldwide have produced an enormous growth of available data that vastly improved our knowledge of baryon and meson spectrum, establishing the existence of new states of matter [1, 2]. Even so, many observed states remain puzzling and cannot be uniquely explained in the framework of the existing theoretical approaches. This stimulates and motivates for new searches and ideas to understand their nature [3, 4]. The existing facilities and experiments: BES-III, Belle II and LHCb, and the planned ones: FAIR, NICA and the J-PARC upgraded represent excellent tools to this end.

The physics of heavy-flavor hadrons and charmonium-like mesons is one of the most relevant and promising areas in modern particle physics. The charm quark, in particular, sits in an uncomfortable mass region as it is neither a light quark for which a flavor symmetry extension is justified, nor is heavy enough to allow for a reliable heavy-quark expansion and associated factorization theorems as

использовать проверенную теорему факторизации, как в случае прелестного кварка. Это привело к появлению различных моделей для описания спектра тяжелых адронов, их распадов, осцилляций и формфакторов, среди которых релятивистские кварковые модели, правила сумм КХД, эффективные кварковые подходы, КХД на решетке, непертурбативные подходы, такие как уравнения Дайсона–Швингера и Бете–Солпитера, модели Намбу–Йона-Лазинио, а также эффективные лагранжианы и модели связанных каналов.

С другой стороны, эксперименты по адронной спектроскопии находились в центре внимания физики прошлого столетия. Их результаты привели, например, к развитию квантовой механики и атомной физики, а также кварковой модели. Однако, если бы мы действительно понимали сильное взаимодействие, адронная спектроскопия казалась бы скорее скучным, чем перспективным занятием. В действительности дело обстоит наоборот: в то время как экспериментальные и теоретические исследования становятся более утонченными и сложными, количество нерешенных проблем увеличивается. Даже, казалось бы, хорошо изученные состояния с тяжелыми кварками продолжают преподносить множество сюрпризов. Это указывает на то, что наше понимание динамики взаимодействия на больших расстояниях все еще находится на довольно примитивной стадии, и нам еще многое предстоит узнать из будущих экспериментов по спектроскопии.

В частности, новые формы материи, такие как мультикварковые состояния, глюболы или гибриды, способны углубить наши знания о сильном взаимодействии и адронной материи. В этом смысле будущие экспериментальные установки FAIR и модернизированная версия J-PARC будут служить *XYZ*-фабриками, производящими не только множество неуловимых состояний, таких как $X(3872)$ или $Z_c(3900)^{\pm}$, но и многих других с беспрецедентной статистикой. Физика *D*-мезонов также продолжит свое развитие, поскольку квантовые числа мезонов $D^*(2007)^0$, $D^*(2010)^{\pm}$, $D^*_{s0}(2317)^{\pm}$, $D_1(2420)^{\pm}$, $D_{s1}(2536)^{\pm}$, $D^*_y(2600)$, $D^*(2640)^{\pm}$, $D_{s3}(3040)^{\pm}$, например, до сих пор ожидают экспериментального подтверждения и являются объектом повышенного интереса для экспериментов BES-III и PANDA. Высокая разрешающая способность будущих экспериментальных установок позволит выполнить прецизионные измерения линейных размеров этих частиц, в конечном итоге выявляя их истинную природу, а именно выяснить, являются ли они мезонами, тетракварками или адронными молекулами [5, 6]. С другой стороны, структура адронов и

---

for the beauty quark. Various complementary theoretical tools have emerged to determine the heavy hadrons spectrum, their decays, oscillations and form factors; among them are relativistic quark models, QCD sum rules, heavy-quark effective theory, lattice QCD, nonperturbative continuum approaches such as Dyson–Schwinger and Bethe–Salpeter equations and Nambu–Jona-Lasinio models, as well as effective Lagrangians and coupled-channel models.

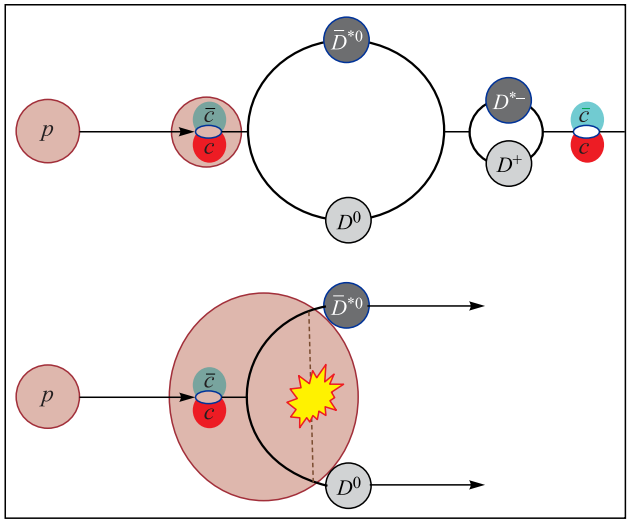
On the other hand, spectroscopy experiments were at the heart of physics in the past century. Their results led, for example, to the development of quantum mechanics and atomic physics, but also to the quark model. However, if we really understood the strong interaction, hadron spectroscopy would nowadays be a dull rather than a challenging enterprise. In fact, the contrary seems to be the case: while the experimental and theoretical studies become more refined and complex, the open problems are emphasized. Even the heavy-quark states that were thought to be well understood, have continued to produce many surprises. This indicates that our understanding of long-distance dynamics is still at a somewhat primitive stage, and we still have a great deal to learn from future spectroscopy experiments.

In particular, new forms of hadronic matter like multiquark states, glueballs or hybrids will deepen our understanding of the strong interaction and hadronic matter. In this context the future experimental facilities such as FAIR and J-PARC upgraded will not only be a *XYZ*-factory producing copious amounts of elusive states like $X(3872)$ or $Z_c(3900)^{\pm}$ but many others with unprecedented statistics. *D*-meson physics will also be pursued, as the quantum numbers of the $D^*(2007)^0$, $D^*(2010)^{\pm}$, $D^*_{s0}(2317)^{\pm}$, $D_1(2420)^{\pm}$, $D_{s1}(2536)^{\pm}$, $D^*_y(2600)$, $D^*(2640)^{\pm}$, $D_{s3}(3040)^{\pm}$ mesons, for instance, still await experimental confirmation and are of strong interest for the BES-III and PANDA experiments. The high resolution of future facilities will also allow one to make precision measurements of line shapes of these particles, eventually revealing their true nature, namely whether they are mesons, tetraquarks or hadronic molecules [5, 6]. On the other hand, the structure of hadrons and their formation imply the even deeper question of how confinement is realized in QCD. From a different viewpoint, one may likewise ask under which conditions hadrons can be deconfined using temperature and density as parameters. To this end, the existing heavy-ion colliders, as well as the forthcoming ones such as NICA, represent the primary source to shed light on the phase diagram and deconfinement.

процесс их формирования подразумевают еще более сложный вопрос о том, как в действительности реализуется конфайнмент в КХД. Вопрос можно поставить и иначе, используя в качестве параметров температуру и плотность: при каких условиях реализуется деконфайнмент? Существующие коллайдеры тяжелых ионов и будущие коллайдеры, такие как NICA, представляют собой основной источник, который может пролить истинный свет на фазовую диаграмму и деконфайнмент.

Эксперименты с протон-протонными и протон-ядерными столкновениями с $\sqrt{S_{pN}}$ до 27 ГэВ и светимостью L до 10^{32} см$^{-2}\cdot$с$^{-1}$, планируемые на NICA, могут способствовать изучению структуры $X(3872)$ и, возможно, некоторых других XYZ-мезонов. В экспериментах рождения вблизи порога в области энергий порядка $\sqrt{S_{pN}} \approx 8$ ГэВ подобные состояния могут рождаться с характерными кинетическими энергиями около нескольких сотен мегаэлектронвольт в системе центра масс. Согласно наиболее демократичной интерпретации $X(3872)$ представляет гибридное состояние с доминирующей молекулярной компонентой [7, 8]. Поскольку вероятность выживания подобной «молекулы» с размером $r_{\rm rms} \sim 9$ фм внутри ядерного вещества очень мала, ее рождение на ядерной мишени с размером $r_{\rm rms} \sim 5$ фм и более ($A \sim 60$ и более) будет сильно подавлено. Таким образом, если гибридная интерпретация $X(3872)$ верна, то зависимость рождения от атомного номера ядра при фиксированном значении энергии $\sqrt{S_{pN}}$ будет носить совершенно иной характер, нежели для случая, когда $X(3872)$ представляет собой долгоживущее компактное состояние чармония ψ' (рисунок).

Вверху: рождение $X(3872)$ на протонной мишени ($r_{\rm rms} \sim 1$ фм). Видно, что $X(3872)$ покидает область взаимодействия до того, как сформируется связанная $D\overline{D}^*$-компонента. Внизу: рождение $X(3872)$ на ядерной мишени. Видно, что наличие ядерного вещества нарушает когерентность (<200 кэВ) между отдельно выраженными D^0- и $\overline{D}^{*0}$-состояниями (изображено пунктирной линией)



Top: $X(3872)$ production on a proton target ($r_{\rm rms} \sim 1$ fm). Here $X(3872)$ escapes the target region before it establishes a significant $D\overline{D}^*$ component. Bottom: $X(3872)$ production on a nuclear target. Here the presence of nuclear material disrupts the coherence (<200 keV) between the well-separated D^0 and $\overline{D}^{*0}$ states (represented by the dashed line)

The experiments with proton–proton and proton–nuclei collisions with $\sqrt{S_{pN}}$ up to 27 GeV and luminosity L up to 10^{32} cm$^{-2}\cdot$s^{-1} planned at the NICA facility may be suited to test the structure of $X(3872)$ and, possibly, some other XYZ mesons. In near threshold production experiments in the $\sqrt{S_{pN}} \approx 8$ GeV energy range, these states can be produced with typical kinetic energies of a few hundred MeV in the center of mass system. Following the most democratic interpretation, $X(3872)$ represents a hybrid structure with a most dominant molecular component [7, 8]. Since the survival probability of an $r_{\rm rms} \sim 9$ fm "molecule" inside nuclear matter should be very small, its production on a nuclear target with $r_{\rm rms} \sim 5$ fm or more (A ~ 60 or larger) should be strongly quenched. Thus, if the hybrid picture is correct, the atomic number dependence of $X(3872)$ production at fixed $\sqrt{S_{pN}}$ should have a dramatically different behavior than that of ψ', which is long-lived compact charmonium state (see the figure).

Few years ago the Memorandum of Understanding was signed between the Joint Institute for Nuclear Research (JINR) and the European Centre for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas (ECT*, Italy). ECT* provides dedicated and structured combination of scientific activities for a large international scientific community. It promotes coordination of research efforts in nuclear and hadron physics and the related areas. Following the Memorandum, the two institutions will seek further opportunities to cooperate in the scientific research.

In 2019, it was decided by the ECT* Scientific Board and the current ECT* director at that time, Prof. Jochen Wambach, to hold an international workshop on this important and relevant topic entitled "Theoretical and experimental challenges in flavor hadrons, quarkonia and multiquark physics". The Scientific Board approved the international organizing committee. To introduce and promote the topics of the incoming events to a wider audience, ECT* has proposed the series of "colloquia style" presentations. The recorded presentation of the topic related to the workshop is available on the website https://youtu.be/XweiOIq6vIA.

Несколько лет назад был подписан меморандум о взаимопонимании между ОИЯИ и Европейским центром теоретических исследований в области ядерной физики и смежных областях (ECT*, Италия). ECT* обеспечивает целенаправленную и структурированную научную деятельность в мировом научном сообществе. Это способствует координации усилий в области ядерной и адронной физики, а также в смежных областях. В соответствии с меморандумом две научные организации будут искать дальнейшие пути сотрудничества в области научных исследований.

В 2019 г. Ученый совет ECT* совместно с действующим в то время директором центра профессором Й. Вамбахом приняли решение провести международное рабочее совещание по этой важной и актуальной тематике под названием «Теоретические и экспериментальные перспективы в физике ароматных адронов, кваркония и мультикварков». Был утвержден международный оргкомитет. Чтобы познакомить широкую аудиторию с тематикой предстоящих совещаний, ECT* предложил серию презентаций в стиле коллоквиумов. Записанная презентация, связанная с тематикой совещания, доступна по ссылке https://youtu.be/XweiOIq6vIA.

Список литературы / References

1. *Brambilla N., Eidelman S., Olsen S., Pakhlov P.* // Eur. Phys. J. C. 2011. V. 71. P. 1534.

2. *Barabanov M. Yu., Vodopyanov A. S., Olsen S. L.* // Phys. At. Nucl. 2014. V. 77, No. 1. P. 126.

3. *Olsen S.* // Front. Phys. 2015. V. 10. P. 101401.

4. *Patrignani C. et al.* // Chin. Phys. C. 2017. V. 40. P. 100001.

5. *Barabanov M. Yu., Vodopyanov A. S., Zinchenko A. I.* // Nuovo Cim. C. 2019. V. 42. P. 110.

6. *Barabanov M., Roberts C., Santopinto E.* // Prog. Part. Nucl. Phys. 2021. V. 116. P. 103835.

7. *Takeuchi S., Shimizu K., Takizawa M.* // Prog. Theor. Exp. Phys. 2015. V. 2015, No. 7. P. 079203.

8. *Esposito A., Pilloni A., Polosa A. D.* arXiv: 1603.07667 [hep-ph].