

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

Перспективы изучения ароматных адронов и экзотических мультикварковых состояний в современной физике

Главной задачей физики сильных взаимодействий является понимание природы адронов, из которых состоит окружающая материя. Основная исследовательская активность связана с двумя фундаментальными вопросами: из чего состоят адроны и как они рождаются в рамках квантовой хромодинамики и сильновзаимодействующей компоненты Стандартной модели. Для решения этих вопросов адронная спектроскопия является ценным и проверенным временем инструментом, поскольку позволяет понять структуру мезонов, барионов и экзотических состояний и процесс их образования. В таком контексте открытие большинства новых адронных состояний, в частности наблюдаемое избытие экзотических состояний X , Y , Z [1], действительно впечатляет, поскольку эти объекты бросают вызов общепринятому представлению об адронах как о кварк-антикварковых или трехкварковых цветовых синглетных состояниях.

Экспериментальные исследования структуры и спектра адронов представлены с помощью процессов адрон-адронного рассеяния, фото- и электророждения на нуклонах или распадов тяжелых мезонов на мировых ускорительных комплексах. За последнее десятилетие в этих исследованиях получен большой объем данных, которые улучшили осведомленность о спектре барионов и мезонов и позволили установить существование новых состояний наряду с эмпирическим определением их углового момента, структуры и спина. Недавние достижения связаны с наблюдением мультикварковых состояний, которые не укладываются в общепринятую классификацию адронов. Их можно интерпретировать как давно востребованные физическим сообществом системы пента- и тетракварков [2, 3].

Однако определение новых состояний и их фундаментальных свойств, таких как масса, ширина, спин

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

The Perspective Study of Flavour Hadrons and Exotic Multiquark States in Modern Physics

The major goal in strong-interaction physics is to understand the nature of hadrons that make up visible matter. The main research activity revolves around two fundamental questions: what are hadrons made of and how does quantum chromodynamics, the strong-interaction component of the Standard Model, produce them? Although these questions are simple, the answers still have not been found. To address these questions, hadron spectroscopy is a valuable and time-honored tool, as it enables us to understand the structure of mesons, baryons and exotics and how they are produced. In this context, the recent discovery of many new hadronic states, in particular, the abundance of observed X , Y , Z exotic states [1], is exciting, as these objects challenge the common-place view of hadrons as either quark-antiquark or three-quark color-singlet states.

Experimental studies of the hadron structure and spectrum are performed via hadron-hadron scattering processes, photo- and electroproduction by nucleons or, more recently, by means of heavy-meson decays at worldwide accelerator facilities. In the last decade, these studies have yielded an enormous amount of data, which have already

improved our knowledge of the baryon and meson spectrum, and enabled us to establish the existence of new states, together with an empirical determination of their angular momentum, content and spin. Recent highlights are observations of multiquark states outside our well-known hadronic pictures. The states are interpreted as the penta- and tetraquark systems long sought after by physics community [2, 3].

However, identifying new states and their fundamental properties, such as mass, width, spin and parity, requires complex analysis, which is often subject to model assumptions. For many of the new states, we still do not know the value of their spin and parity. Different theoretical models for the structure of the new states give different predictions of their quantum numbers. Therefore, the composition of many states remains controversial. Indeed, some of these newly discovered hadrons seem to fit the picture of compact multiquark states, while others can be classified as molecular states or both, i.e., the superposition of a constituent-quark core and a meson cloud. Thus, one of the main goals of modern physics is to discuss how to distinguish them.

и четность, требует серьезного анализа, который зачастую обусловлен модельными допущениями. Для большинства новых состояний до сих пор остаются неизвестными их спин и четность. Существующие теоретические модели, описывающие структуру подобных состояний, предписывают им различные квантовые числа. Поэтому структура большинства состояний остается противоречивой. Действительно, некоторые из таких недавно обнаруженных адронов можно рассматривать как компактные мультикварковые состояния, в то время как другие могут быть интерпретированы как молекулярные состояния или как суперпозиция кварковой составляющей и мезонного облака. Поэтому одна из главных задач современной физики заключается в том, чтобы понять, как их различать.

Мы ожидаем бурную активность в данной области физики к концу настоящего десятилетия в связи с появлением ускорителей и экспериментов нового поколения, в частности PANDA в GSI (Германия), NICA (Дубна) и EIC (Брукхейвен, США). Современные попытки будут дополнять текущие экспериментальные программы, такие как BES-III (Китай), Belle-II и J-PARC (Япония), LHCb (ЦЕРН), особенно благодаря высоким значениям светимости. Поэтому крайне важно подготовиться к будущим экспериментам с учетом новых разработок и достижений в области теории, феноменологии и инструментов анализа, используемых в современных

экспериментах. В частности, взаимодействие между теоретиками и экспериментаторами очень важно для разработки стратегий и совершенствования методов и приемов, которые позволяют сравнивать экспериментальные данные с теоретическими или, точнее, позволяют извлекать физически значимые величины, которые могут быть рассчитаны теоретиками.

В конце 2021 г. мировое научное сообщество предложило международную научную встречу по этой важной и актуальной тематике под названием «Настоящее и будущее спектроскопии тяжелых ароматных мезонов и экзотических адронов», проведение которой запланировано с 8 мая по 2 июня 2023 г. в Исследовательском центре Гархинга (Германия). Научно-консультативный совет совместно с программным комитетом Мюнхенского института астрофизики и физики элементарных частиц (MIAPP) одобрил и утвердил программу, назначив международный организационный комитет в следующем составе: Михаил Барабанов (ОИЯИ), Стефан Пол (Мюнхенский технический университет), Елена Сантопинто (INFN), Бруно Эль-Бенних (Университет Сан-Паулу), Лаура Толос (ICE). В рамках предстоящей программы будут подробно рассмотрены наиболее важные теоретические вопросы, тесно связанные с экспериментами как на существующих установках LHC, J-PARC, BES-III, так и на строящихся — FAIR, NICA, EIC.

We expect vigorous activity in the field by the end of this decade with the advent of a new generation of accelerators and experiments, in particular, PANDA in GSI, NICA in Dubna and EIC in Brookhaven. These new efforts will add to and complement the ongoing experimental programmes, namely, BES III in China, Belle II and J-PARC in Japan and LHCb at CERN, which will profit from the high luminosity. It is, therefore, of the utmost importance to prepare future experiments with guidance from new developments in theory, phenomenology and the analysis tools used in current experiments. In particular, the interaction between theorists and experimentalists is important in order to elaborate strategies and improve methods and techniques that enable experimental data to be compared with theory or, more precisely, enable the extraction of physically relevant quantities that can be calculated by theorists.

In late 2021, the worldwide scientific community proposed the international scientific programme on this important and relevant topic entitled “The Present and Future of Heavy Flavour and Exotic Hadron Spectroscopy” scheduled for the dates from 8 May to 2 June 2023, Garching’s research centre, Germany. The Scientific Advisory Board together with the Programme Committee of the Munich Institute for Astro- and Particle Physics (MIAPP) approved a programme and assigned the International Organizing

Committee consisting of Mikhail Barabanov (JINR), Stephan Paul (TUM), Elena Santopinto (INFN), Bruno El-Bennich (University of São Paulo), and Laura Tolos (ICE). The most important theoretical issues in tight application to the experiments at the existing facilities LHC, J-PARC, BES III and the incoming ones FAIR, NICA, EIC will be presented and discussed during this programme.

MIAPP, located at Garching’s research centre in the vicinity of Munich, Germany, one of the biggest and most modern centres for science and research in Europe, plays a key role in scientific exchange. It hosts several topical programmes in astrophysics, cosmology, nuclear and particle physics per year. These programmes contrast from ordinary conferences in terms of length, interaction and time to work. Each programme is organized by a group of scientists renowned for the topic of the programme, included in the Organizing Committee, and lasts four weeks. The schedule typically consists of regular seminars and contributions, but leaves much time for collaborations and discussions between the participants in a casual, relaxed atmosphere. MIAPP provides a creative environment, where participants can present their own work, discuss new aspects and work on scientific questions while being away from their daily commitments. The key to the success of this concept is that all participants should stay at the research centre for an extended time.

MIAPP, расположенный в Исследовательском центре Гархинга в окрестностях Мюнхена — одном из крупнейших и наиболее современных центров науки и исследований в Европе, — играет ключевую роль в обмене научной информацией. В нем ежегодно проводится несколько тематических программ по астрофизике, космологии, ядерной физике и физике элементарных частиц. Эти программы отличаются от обычных конференций продолжительностью, взаимодействием и временем непосредственной работы участников. Каждая программа организуется группой ученых, известных в определенной области физики, входящих в оргкомитет, и продолжается в течение четырех недель. Расписание обычно состоит из ежедневных семинаров и устных докладов, при этом остается достаточно времени для обсуждений и дискуссий между участниками в повседневной, непринужденной обстановке. MIAPP создает творческую атмосферу, благодаря которой участники программы могут представлять свои результаты, обсуждать новые научные аспекты и при этом продолжать выполнять свои повседневные обязанности, находясь вдали от постоянного места работы. Ключом к успеху такой концепции является тот факт, что все участники программы должны оставаться в исследовательском центре в течение длительного времени.

Основная цель программы «Настоящее и будущее спектроскопии тяжелых ароматных мезонов и экзоти-

ческих адронов» заключается в том, чтобы объединить теоретиков и экспериментаторов для непосредственного обсуждения наиболее актуальных проблем физики ароматных мезонов, кваркония, мультикварковых и экзотических состояний [4–7]. Помимо обычных ежегодных совещаний программа обеспечит прекрасную возможность обсудить с экспертами новые идеи и предложения, связанные с теоретическими и экспериментальными методами, а также позволит рассмотреть инструменты анализа и модели, которые являются связующим звеном между теорией и экспериментом. Это особенно ценно для молодых физиков, практически не имеющих возможности встречаться.

Чтобы сбалансировать большое количество теоретических вопросов с феноменологическими и экспериментальными аспектами, в программу будут включены следующие основные разделы: эффективные теории тяжелого кваркония, кварковая модель экзотических адронов, тяжелые адроны в КХД на решетке, рождение тяжелых адронов и распады, взаимодействия очарованных мезонов с ядерной материей.

Подробная информация, связанная с предстоящей научной программой «Настоящее и будущее спектроскопии тяжелых ароматных мезонов и экзотических адронов», опубликована на сайте MIAPP: <https://www.munich-iapp.de/heavyflavour>.

Список литературы / References

1. Olsen S. // Front. Phys. 2015. V. 10. P. 101401.
2. Brambilla N., Eidelman S., Olsen S., Pakhlov P. // Eur. Phys. J. C. 2011. V. 71. P. 1534.
3. Barabanov M., Olsen S. // Phys. Atom. Nucl. 2016. V. 79, No. 1. P. 126.
4. Patrignani C. et al. // Chin. Phys. C. 2017. V. 40. P. 100001.
5. Barabanov M., Roberts C., Santopinto E. // Prog. Part. Nucl. Phys. 2021. V. 116. P. 103835.
6. Takeuchi S., Shimizu K., Takizawa M. // Prog. Theor. Exp. Phys. 2015. V. 2015, No. 7. P. 079203.
7. Gell-Mann M. // Phys. Lett. 1964. V. 8. P. 217.

The main goal of the programme “The Present and Future of Heavy Flavour and Exotic Hadron Spectroscopy” is to bring together theorists and experimentalists in direct discussions on the most urgent physics issues in flavoured mesons, quarkonia, multi-quarks and exotic states [4–7]. Beyond the usual framework of annual workshops, the programme will provide a great opportunity to discuss new ideas and proposals for theoretical and experimental techniques with experts in the fields. It will also allow analysis tools and models to be detailed, which constitute bridges between theory and experiment. This is especially valuable for younger physicists, who rarely have the opportunity to meet.

In the programme, we will deal with the following main topics, thereby balancing more theoretical issues with phenomenological and experimental topics and interests: effective theories for heavy quarkonium, exotic hadrons in quark model approaches, heavy hadrons with lattice QCD, heavy hadron production and decays, interactions of charmed mesons with nuclear matter.

The detailed information related to the scheduled scientific programme “The Present and Future of Heavy Flavour and Exotic Hadron Spectroscopy” is published on the MIAPP website <https://www.munich-iapp.de/heavyflavour>.