

*А. В. Гуськов*

## Указание на существование нового экзотического чармония $\tilde{X}(3872)$ получено в эксперименте COMPASS

Квантовая хромодинамика — теория, описывающая сильные взаимодействия, не налагает прямого запрета на существование связанных состояний, отличных от образованных тремя кварками (барионы) или парой кварк–антикварк (мезоны). Однако до недавнего времени не существовало убедительных и бесспорных экспериментальных свидетельств в пользу мультикварковых состояний. Ситуация изменилась лишь в последние пятнадцать лет в связи с открытием «экзотических» адронов, содержащих тяжелые кварки, таких как  $X(3872)$  (Belle, 2003),  $Z_c^\pm(3900)$  (BESIII, 2013),  $P_c^+(4380)$  и  $P_c^+(4450)$  (LHCb, 2015), свойства и структуру которых затруднительно или даже невозможно интерпретировать в рамках привычной модели адронов. Несмотря на то, что на протяжении последних лет такие чармониоподобные состояния являются предметом пристального внимания экспериментаторов и теоретиков, их природа и свойства до конца не ясны. Были предложены модели, описывающие экзотические чармонии как

*А. V. Guskov*

## Indication of the Existence of a New Exotic Charmonium $\tilde{X}(3872)$ Obtained in the COMPASS Experiment

Quantum chromodynamics, the theory describing strong interactions, does not prohibit explicitly the existence of bound states that are different from those which consist of three quarks (baryons) and quark–antiquark pairs (mesons). Nevertheless, until recently there was no convincing and indisputable experimental evidence of multi-quark states. The situation changed only over the last fifteen years after the discovery of “exotic” hadrons containing heavy quarks such as  $X(3872)$  (Belle, 2003),  $Z_c^\pm(3900)$  (BESIII, 2013),  $P_c^+(4380)$  and  $P_c^+(4450)$  (LHCb, 2015) whose properties and structure cannot be treated within the conventional model of hadrons. In spite of the fact that such charmonium-like states are under the intent look of experimentalists and theorists, their nature is still not clear. Different models that treat the exotic charmonia as tetraquarks,

тетракварки, мезонные молекулы, глоболы, гибридные мезоны и т. д.

В настоящее время известно несколько механизмов рождения экзотических чармониев: распады более тяжелых адронов (прежде всего  $B$ -мезонов), резонансное рождение в электрон-позитронной аннигиляции, рождение в двухфотонном взаимодействии, а также инклюзивное рождение в адронных соударениях при высоких энергиях. Каждый из этих механизмов используется как для поиска новых экзотических состояний, так и для получения информации о свойствах уже известных.

Физиками из Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в эксперименте COMPASS (ЦЕРН) была инициирована программа поиска нового возможного механизма рождения экзотических чармониев — фоторождения на ядерной мишени. Особый интерес представляют два аспекта фоторождения экзотических чармониев. С одной стороны, в таком процессе может быть непосредственно определена интенсивность взаимодействия экзотического состояния с фотоном. С другой стороны, представляет интерес взаимодействие родившегося объекта с ядерной материей, которое зависит от природы частицы. Так, ядро будет достаточно прозрачно для компактных тетракварков,

в то время как взаимодействие слабосвязанной мезонной молекулы с ядерной материей должно приводить к преждевременному разрушению этой системы и сильной зависимости выхода экзотических частиц от атомного номера ядра-мишени.

COMPASS — эксперимент на вторичном пучке суперпротонного синхротрона в ЦЕРН, в задачи которого входит изучение структуры адронов с использованием мюонных и адронных пучков высокой интенсивности. Установка COMPASS представляет собой универсальный детектор, созданный на основе двух спектрометрических магнитов и предназначенный для решения широкого круга научных задач. За 7 лет сеансов с мюонным пучком в период с 2002 по 2011 г. была накоплена статистика по рождению  $J/\psi$ -мезонов в рассеянии виртуальных фотонов на нуклонах, эквивалентная светимости  $14 \text{ pb}^{-1}$  при средней энергии фотона 100 ГэВ.

Поиск фоторождения чармониеподобного резонанса  $Z_c^\pm(3900)$  в реакции  $\gamma^*N \rightarrow Z_c^\pm(3900)N' \rightarrow (J/\psi\pi^\pm)N'$ , итоги которого опубликованы в «Physics Letters B» [1], не дал положительных результатов. За ним последовал поиск фоторождения экзотического состояния  $X(3872)$  в реакции  $\gamma^*N \rightarrow X(3872)\pi^\pm N' \rightarrow (J/\psi\pi^+\pi^-)\pi^\pm N'$ . Открытое в 2003 г. коллаборацией

meson molecules, globballs, hybrid mesons, etc. have been proposed.

At the moment a few production mechanisms for the exotic charmonia are known: the decay of heavier hadrons (first of all  $B$  mesons), the resonant production in the electron–positron annihilation, the production in the two-photon interaction and the inclusive production in hadronic collisions at high energies. Each of them is used for the search for new exotic states and to obtain information about properties of the known ones.

Physicists from JINR’s DLNP initiated the search for a new possible production mechanism for exotic charmonia, the photoproduction off nuclear targets, in the COMPASS experiment (CERN). This production mechanism is interesting from two points of view. First, the strength of exotic charmonium coupling with photon could be determined explicitly in such a process. Secondly, interaction of the produced particle in the nuclear medium should depend on the nature of this object. For instance, nucleus is quite transparent for such compact objects as tetraquarks, while interaction of a meson molecule with nuclear matter should lead to premature decay of this system and strong

dependence of the yield of exotic charmonia on the atomic number of the target nucleus.

COMPASS is an experiment at the secondary beam of the Super Proton Synchrotron at CERN. The purpose of this experiment is the study of hadron structure and hadron spectroscopy with high-intensity muon and hadron beams. The COMPASS setup is a universal detector based on two spectrometric magnets designed for a wide range of physical tasks. The statistics of the  $J/\psi$ -meson production in virtual photon scattering off nucleons collected in the period from 2002 to 2011 after 7 years of data taking with muon beam is equivalent to a luminosity of about  $14 \text{ pb}^{-1}$  for an average photon energy of 100 GeV.

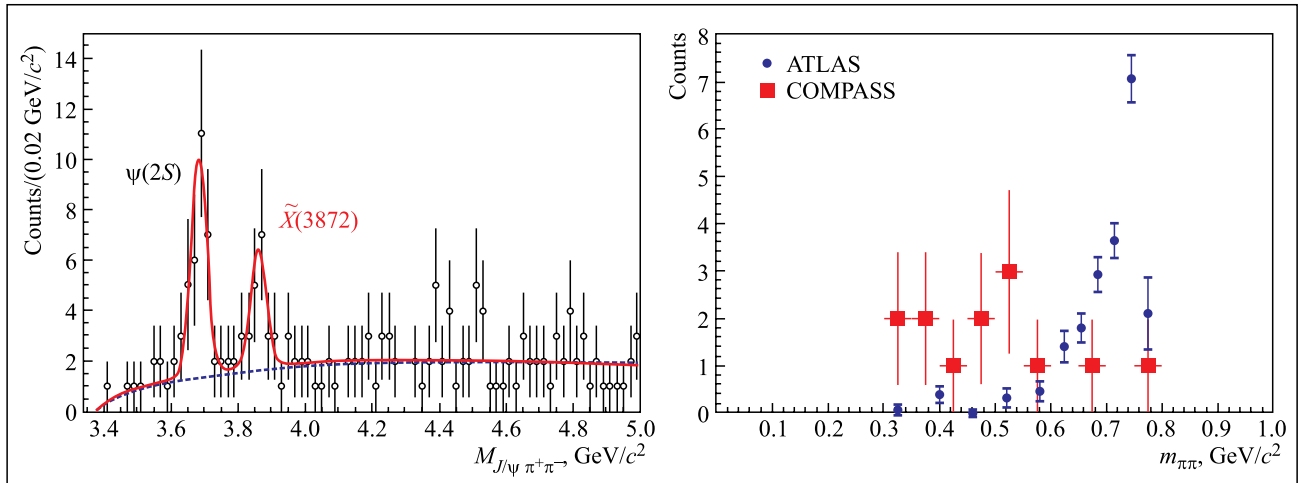
Search for photoproduction of the charmonium-like resonance  $Z_c^\pm(3900)$  in the reaction  $\gamma^*N \rightarrow Z_c^\pm(3900)N' \rightarrow (J/\psi\pi^\pm)N'$  has not led to a positive result. Summary of the search was published in the journal “Physics Letters B” [1]. It was followed by the search for the  $X(3872)$  state in the reaction  $\gamma^*N \rightarrow X(3872)\pi^\pm N' \rightarrow (J/\psi\pi^+\pi^-)\pi^\pm N'$ . The state  $X(3872)$  was discovered in 2003 by the Belle collaboration in the  $B$ -meson decay and remains one of the most mysterious exotic charmonia. The mass of  $X(3872)$  is close to the threshold of  $D^{0*}\bar{D}$  pro-

Belle состояние  $X(3872)$  в распаде  $B$ -мезона остается одним из наиболее загадочных экзотических чармониев. Масса  $X(3872)$  находится вблизи порога рождения  $D^0\bar{D}$ . Собственная ширина его до сих пор не известна, установлен лишь верхний предел  $1,2 \text{ МэВ}/c^2$ . Квантовые числа  $J^{PC} = 1^{++}$  были установлены коллаборацией LHCb. Примерно равные вероятности распада в конечные состояния  $J/\psi 2\pi$  и  $J/\psi 3\pi$  указывают на сильное нарушение изоспиновой симметрии.

В результате поиска  $X(3872)$  со статистической значимостью  $4,1\sigma$  в спектре инвариантных масс подсистемы  $J/\psi\pi^+\pi^-$  конечного состояния, который показан на рисунке слева, был обнаружен сигнал частицы,

масса и ширина которой согласуются с ожидаемыми для  $X(3872)$ ; детальный анализ кинематики распада наблюдаемой частицы показал полное несоответствие хорошо известной кинематике распада  $X(3872)$ . На рисунке справа показано распределение для инвариантных масс двух пионов, рожденных в распаде  $X(3872)$  в эксперименте ATLAS, демонстрирующее сигнал  $\rho^0$ -мезона, а также распределение, наблюдаемое на установке COMPASS. Это неожиданное наблюдение позволило предположить, что обнаруженный сигнал может принадлежать новой частице, получившей название  $\tilde{X}(3872)$ , которая является частицей-партнером  $X(3872)$ , имеет близкую массу, но

Спектр инвариантных масс подсистемы  $J/\psi\pi^+\pi^-$  (слева). Спектры инвариантных масс  $\pi^+\pi^-$ , наблюдаемые в распаде  $X(3872)$  в эксперименте ATLAS и в распаде  $\tilde{X}(3872)$  в эксперименте COMPASS (справа)



Invariant mass spectrum of the subsystem  $J/\psi\pi^+\pi^-$  (left). Invariant mass spectra for  $\pi^+\pi^-$  observed in the decay of  $X(3872)$  in the ATLAS experiment and in the decay of  $\tilde{X}(3872)$  at COMPASS (right)

duction. The full width has not been measured yet, only the upper limit  $1.2 \text{ MeV}/c^2$  is established. The quantum numbers  $J^{PC} = 1^{++}$  were determined by the LHCb collaboration. Approximately equal probabilities to decay into the  $J/\psi 2\pi$  and  $J/\psi 3\pi$  final states point to strong violation of isospin symmetry.

As a result of the performed search for  $X(3872)$ , a signal with the statistical significance of  $4.1\sigma$  in the spectrum of invariant masses of the  $J/\psi\pi^+\pi^-$  subsystem of the final state was found as is shown at the left of the figure. The mass and the width of the observed particle are fully consistent with the expected ones for  $X(3872)$ , while a detailed analysis of the decay kinematics of the observed particle showed a complete disparity with the well-known decay kinematics of  $X(3872)$ . The invariant mass distributions for two pions produced in the decay of  $X(3872)$  observed in the ATLAS experiment, where the  $\rho^0$ -meson signal is visible, and the observed one at COMPASS are

shown at the right of the figure. This surprising observation suggested that the discovered signal may belong to a new particle called  $\tilde{X}(3872)$  that is a partner particle of  $X(3872)$ . It has almost the same mass but a different set of quantum numbers. Existence of such a partner particle is predicted by some theoretical models describing  $X(3872)$  as a state of two quarks and two antiquarks closely bound by strong interaction (tetraquark) [2, 3]. The mass of the new state  $\tilde{X}(3872)$  is  $(3860.1 \pm 10.0) \text{ MeV}/c^2$ , while its Breit–Wigner width is below  $51 \text{ MeV}/c^2$  with 90% probability. The results of the work are published in the journal “Physics Letters B” [4].

It is important to emphasize that this interesting and important result, obtained with the determinative contribution of the JINR group, became possible due to the close collaboration with the JINR team participating in the BESIII experiment.

отличается от  $X(3872)$  набором квантовых чисел. Существование такой частицы-партнера предсказывается некоторыми теоретическими моделями, описывающими  $X(3872)$  как состояние из двух кварков и двух антикварков, тесно связанное сильным взаимодействием (тетракварк) [2, 3]. Масса нового состояния  $\tilde{X}(3872)$  равна  $(3860,1 \pm 10,0)$  МэВ/ $c^2$ , брейт-вингеровская ширина с вероятностью 90% составляет менее 51 МэВ/ $c^2$ . Результаты работы опубликованы в журнале «Physics Letters B» [4].

Следует отметить, что этот важный и интересный результат, в получение которого группа ОИЯИ внесла определяющий вклад, стал возможен благодаря тесному сотрудничеству с коллективом, участвующим от ОИЯИ в эксперименте BESIII.

### **Список литературы / References**

1. *Adolph C. et al.* Search for Exclusive Photoproduction of  $Z_c^\pm(3900)$  at COMPASS // Phys. Lett. B. 2015. V. 742. P. 330.
2. *Maiani L. et al.* Diquark–Antidiquark States with Hidden or Open Charm and the Nature of  $X(3872)$  // Phys. Rev. D. 2005. V. 71. P. 014028.
3. *Maiani L. et al.*  $Z(4430)$  and a New Paradigm for Spin Interactions in Tetraquarks // Phys. Rev. D. 2014. V. 89. P. 114010.
4. *Aghasyan M. et al.* Search for Muoproduction of  $X(3872)$  at COMPASS and Indication of a New State  $\tilde{X}(3872)$  // Phys. Lett. B. 2018. V. 783. P. 334.