

*В. И. Комаров*

## Структура нуклонов в непертурбативной КХД — перспективная задача физики XXI в.

Современная физика оперирует сотнями элементарных частиц. Первые параметры идентификации частицы — среднее значение и дисперсия ее массы. Естественно, что проблема возникновения массы является первостепенной фундаментальной проблемой физики частиц. Открытие механизма генерации массы, предложенного Энглертом и Хиггсом и триумфально подтвержденного в экспериментах, оказалось крупнейшим достижением физики частиц последних десятилетий. Этот механизм стал широко известным научным фактом. Если спросить, как генерируются массы элементарных частиц, большинство, наверняка, ответит — механизмом Хиггса. И это будет неправильный ответ. Неправильный потому, что механизм хиггсовского бозона генерирует массы только лептонов и

токовых кварков и не имеет отношения к массе конститuentных кварков, образующих нуклоны [1]. А эта масса составляет не менее 80 % массы Вселенной в измеряемых компонентах, лептонах и адронах. Для описания генерации массы нуклонов не существует достоверного и общепринятого подхода. Известно лишь, что такая генерация обусловлена спонтанным нарушением киральности вакуума, но вопрос о механизме перехода «легкого» токового кварка (5 МэВ) в «тяжелый» конститuentный кварк (300 МэВ) остается открытым. Каким образом взаимодействие с вакуумом трех токовых кварков высокого импульса преобразует их кинетическую энергию в массу конститuentных кварков, слипающихся в нуклон, — неизвестно. Очевидно, что фундаментальность такого перехода

*V. I. Komarov*

## Nucleon Structure in the Nonperturbative QCD — a Promising Problem of the XXI Century Physics

Modern physics operates with hundreds of elementary particles. The first parameters of the particle identification are a mean value and dispersion of its mass. Naturally, the problem of the origin of mass is the primary fundamental problem of particle physics. The discovery of the mechanism of mass generation, proposed by Englert and Higgs, and triumphantly confirmed in experiments, turned out to be the greatest achievement of particle physics in recent decades. This mechanism has become a widely known scientific fact. If you ask how the masses of elementary particles are generated, most will probably answer — the Higgs mechanism. And that would be the wrong answer. It is incorrect because the Higgs boson mechanism gen-

erates only masses of leptons and current quarks and has nothing to do with the mass of constituent quarks that form nucleons [1]. And this mass is at least 80% of the mass of the observable Universe in the measurable components, leptons and hadrons. There is no reliable and generally accepted approach to describe the generation of the mass of nucleons. It is only known that such generation is caused by spontaneous violation of the vacuum chirality, but the question of the mechanism of the transition of a “light” current quark (5 MeV) into a “heavy” constituent quark (300 MeV) remains completely open. How the interaction with the vacuum of three high-momentum current quarks converts their kinetic energy into the mass of constituent

не уступает фундаментальности механизма Хиггса. Открытие механизма этого перехода требует знания структуры нуклона и динамики взаимодействия конститuentных кварков в концепции *непертурбативной* квантовой хромодинамики. Грандиозные усилия сделаны к настоящему времени для выяснения структуры нуклонов в рамках *пертурбативной* КХД при высоких энергиях. Однако успешно полученная при этом «высокоэнергетическая» структура нуклонов очень далека от «низкоэнергетической». Достаточно вспомнить, что основная масса данных имеет вид одномерных кварковых распределений, в то время как распределения кварков в основном состоянии нуклона, безусловно, имеют пространственно трехмерный характер. В последние десятилетия интенсивно развивается теория обобщенных кварковых распределений, являющихся функцией трех переменных, и делаются попытки связать «высокоэнергетические» и «низкоэнергетические» распределения для единого описания во всей энергетической области. Но проблема состоит не только в размерности кварковых распределений. Различие имеет более принципиальный характер: «высокоэнергетические» данные имеют дело с токовыми кварками, а «низкоэнергетические» — с конститuentными. Поэтому полу-

чить информацию о распределениях конститuentных кварков непосредственно из распределений токовых можно, только «свернув» последние с их распределениями в конститuentных кварках, а соответствующих достоверных данных нет. Поэтому кварковая структура нуклонов в «низкоэнергетической» области остается вполне специальной и самодостаточной задачей.

Большое достоинство в этом аспекте имеет создаваемый комплекс NICA, который энергетически перекрывает обе интересующие области. Переход от мезон-барионной к кварк-глюонной фазе материи традиционно планируется изучать в соударениях тяжелых ядер. Однако для исследования непертурбативной КХД-структуры нуклонов такие соударения имеют весьма существенные осложнения: 1) малая кварковая плотность ядер по сравнению с плотностью нуклонов требует высоких энергий соударения для достижения интересующих барионных и энергетических плотностей; 2) флуктуации нуклонной плотности в начальном состоянии ядер приводят к значительному разбросу локальных барионных и энергетических плотностей в промежуточном состоянии; 3) большое число нуклонов, участников соударения, создает сложный динамический сценарий соударения, в частно-

quarks that stick together into a nucleon is unknown. It is obvious that the fundamental nature of such a transition is not inferior to the fundamental nature of the Higgs mechanism. The discovery of the mechanism of this transition requires knowledge of the structure of the nucleon and the dynamics of the interaction of constituent quarks in the concept of *nonperturbative* quantum chromodynamics. So far, tremendous efforts have been made to elucidate the structure of nucleons in the framework of *perturbative* QCD at high energies. However, the successfully resulting “high-energy” structure of nucleons is very far from the “low-energy” one. Suffice it to recall that the bulk of the data is in the form of one-dimensional quark distributions, while the distributions of quarks in the ground state of a nucleon, of course, are spatially three-dimensional. In recent decades, the theory of generalized quark distributions, which are a function of three variables, has been intensively developed, and attempts have been made to link “high-energy” and “low-energy” distributions for a unified description in the entire energy region. But the problem is not only in the dimension of quark distributions. The difference is of a more fundamental nature: “high-energy” data deal with current quarks, and “low-energy” data —

with constituent ones. Therefore, one can obtain information about the distributions of constituent quarks directly from the distributions of current ones only by “folding” the latter with their distributions in constituent quarks, but there is no relevant reliable data. Therefore, the quark structure of nucleons in the “low-energy” region remains a completely special and self-sufficient problem.

A great advantage in this aspect is the NICA complex being created, which energetically overlaps both areas of interest.

The transition from the meson–baryon to the quark–gluon phase of matter is traditionally planned to be studied in collisions of heavy nuclei. However, for the study of the nonperturbative QCD structure of nucleons, such collisions have very significant complications: 1) the low quark density of nuclei in comparison with the density of nucleons requires high collision energies to achieve the baryon and energy densities of interest; 2) fluctuations of the nucleon density in the initial state of nuclei lead to a significant variance of local baryon and energy densities in the intermediate state; 3) a large number of nucleons participating in the collision creates a complex dynamic scenario of collision, in particular, with the presence of

сти, с присутствием смешанных мезон-барионной и кварк-глюонной фаз. В этом отношении нуклон-нуклонные соударения имеют кардинально более определенные начальные условия и более доступны для интерпретации.

Проект NICA предусматривает создание установки для исследования нуклон-нуклонных соударений (SPD). Одной из приоритетных целей этих экспериментов может стать именно исследование структуры нуклонов в «низкоэнергетической» области, т.е. в области непertурбативной КХД и перехода в пертурбативную область. Оптимальные условия исследования создаются в кинематике соударений, обеспечивающей перекрытие центральных кварковых областей нуклонов. Соударения с большими прицельными параметрами, определяемые мезон-барионными процессами, неэффективны для исследования кварковых степеней свободы возникающих состояний. Поэтому особое значение имеет выделение соударений с прицельными параметрами порядка и менее радиуса кварковой области нуклонов, т.е.  $\approx 0,4$  фм. Соответствующий критерий центральности обсуждался недавно в работе [2].

Центральные  $NN$ -соударения открывают широкий диапазон исследования структуры и динамики взаимодействия нуклонов в режиме непertурбативной КХД. Первостепенный интерес представляет поиск эффектов перехода конститuentных кварков в токовые. Существенно, что область такого перехода, согласно уже давно мотивированным оценкам [3], должна находиться в пределах энергетического диапазона SPD: характерный импульс спонтанного нарушения киральности  $P\chi \approx 1,2$  ГэВ/с. Поэтому изучение энергетической зависимости процессов центрального соударения нуклонов на SPD может оказаться эффективным средством наблюдения обсуждаемого фундаментального перехода.

Среди первоочередных задач должно находиться и изучение дибарионных резонансов. Их КХД-спектроскопия возникла уже в пионерской работе [4] 1960-х гг. Легкие дибарионные резонансы с массами 2,1–2,2 ГэВ [5, 6] первоначально рассматривались как слабосвязанные  $N\Delta(1238)$  пары. Возникшие при этом трудности мезон-барионного описания дибарионных резонансов еще более возросли после наблюдения [7] относительно тяжелого резонанса с массой 2,38 ГэВ, близкой к массе  $\Delta(1238)$   $\Delta(1238)$  пары. Это стиму-

a mixed meson–baryon and quark–gluon phase. In this respect, nucleon–nucleon collisions have radically more definite initial conditions and are more accessible for interpretation.

The NICA project provides for the creation of a facility (SPD) for the study of nucleon–nucleon collisions. One of the priority goals of this facility may be precisely the study of the structure of nucleons in the “low-energy” region, that is, in the region of nonperturbative QCD and transition to the perturbative region. Optimal research conditions are created in the collision kinematics, which provides overlapping of the central quark regions of nucleons. Collisions with large impact parameters determined by meson–baryon processes are ineffective for studying the quark degrees of freedom of the arising states. Therefore, it is of particular importance to distinguish collisions with impact parameters of the order or less than the radius of the quark region of nucleons, that is,  $\approx 0.4$  fm. The corresponding criterion for centrality was discussed recently in [2].

Central  $NN$  collisions open up a wide range of studies of the structure and dynamics of nucleon interaction in the nonperturbative QCD regime. The search for the effects of the transition of constituent quarks to current

ones is of primary interest. It is essential that the region of such a transition, according to long-motivated estimates [3], should be within the SPD energy range: the characteristic impulse of spontaneous chirality breaking is  $P\chi \approx 1.2$  GeV/c. Therefore, the study of the energy dependence of the processes of central collision of nucleons on SPD can be an effective means of observing the discussed fundamental transition.

The study of dibaryon resonances should also be among the top-priority tasks. Their QCD spectroscopy appeared already in the pioneering work [4] of the 1960s. Light dibaryon resonances with masses 2.1–2.2 GeV [5, 6] were initially considered as weakly bound  $N\Delta(1238)$  pairs. The arising difficulties in the meson–baryon description of dibaryon resonances increased even more after the observation [7] of a relatively heavy resonance with a mass of 2.38 GeV, close to the mass of the  $\Delta(1238)$   $\Delta(1238)$  pair. This stimulated a QCD consideration within the chiral constituent quarks model [8]. The QCD nature of the heavier dibaryon resonances is beyond doubt. The existence of such resonances has been shown in the experiments already carried out: 3.0 GeV [9], 2.65 GeV [10]. Therefore, their study in the regime of central  $NN$  colli-

лировало КХД-рассмотрение в рамках киральной модели конститuentных кварков [8]. КХД-природа более тяжелых дибарионных резонансов не вызывает сомнения. Существование таких резонансов показано в уже проведенных экспериментах: 3,0 ГэВ [9], 2,65 ГэВ [10]. Поэтому их изучение в режиме центральных  $NN$ -соударений может стать перспективной программой исследования механизма реакций, определяемого степенями свободы непертурбативной КХД. Поляризационные возможности SPD в этом аспекте трудно переоценить. Среди задач первой очереди следует назвать и исследование зависимости параметров рождаемых мезонов и мезонных корреляций от энергетической и барионной плотности в соударениях.

В целом создание SPD откроет широкую программу исследования структуры нуклонов в непертурбативной КХД. Накопление эмпирической информации и развитие адекватных феноменологических моделей может стать базой для строгой непертурбативной КХД-теории барионов. Такая программа требует, с одной стороны, интенсифицировать теоретическую работу в обсуждаемой проблематике и, с другой стороны, привлечь экспериментаторов к подготовке соот-

ветствующих опытов на SPD. Поэтому первым шагом в решении обсуждаемой задачи должно стать осознание ее фундаментальности.

### Список литературы / References

1. *Roberts C.D.* Insights into the Origin of Mass. Preprint of Institute of Nonperturbative Physics, NJU-INP 005/19; arXiv:1909.12832 [nucl-th] 2019.
2. *Комаров В. И., Баймурзинова Б., Кунсафина А., Цирков Д. А.* Критерии центральности неупругих нуклон-нуклонных соударений // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17, вып. 3. С. 290.
3. *Komarov V.I., Baimurzinova B., Kunsafina A., Tsirkov D.* Centrality Criteria of the Inelastic Nucleon–Nucleon Collisions // Part. Nucl., Lett. 2020. V. 17, No.3 P. 290; arXiv2001.0996 [hep-ph] 2020.
4. *Manohar A., Georgi H.* Chiral Quarks and the Non-Relativistic Quark Model // Nucl. Phys. B. 1984. V. 234. P. 189.
5. *Dyson F. J., Nguen-Huu Xuong.*  $Y=2$  States in  $SU(6)$  Theory // Phys. Rev. Lett. 1964. V. 13. P. 815.
6. *Arndt R. A., Roper L. D., Workman R. L., McNaughton M. W.* Nucleon–Nucleon Partial-Wave Analysis to 1.6 GeV // Phys. Rev. D. 1992. V. 45. P. 3995.
7. *Komarov V.I. et al. (ANKE Collab.).* Evidence for Excitation of Two Resonance States in the Isovector Two-Baryon System with a Mass of 2.2 GeV/ $c^2$  // Phys. Rev. C. 2016. V. 93. P. 065206.
8. *Clement H.* On the History of Dibaryons and Their Final Observation // Prog. Part. Nucl. Phys. 2017. V. 93. P. 195.
9. *Dong Yu., Shen P., Huang F., Zhang Z.* Theoretical Study of the  $d^*(2380) \rightarrow d\pi\pi$  Decay Width // Phys. Rev. C. 2015. V. 91. P. 064002.
10. *Andersen H.L. et al.* Forward Differential Cross Sections for the Reaction  $pp \rightarrow d\pi^+$  in the Range 3.4–12.3 GeV // Phys. Rev. D. 1971. V. 3. P. 1536.
11. *Tsirkov D. et al. (ANKE Collab.).* Recent Dibaryon Studies at ANKE // Eur. Phys. J. 2019. V. 199. P. 02016.

sions can become a promising program for studying the reaction mechanism determined by the degrees of freedom of nonperturbative QCD. It is difficult to overestimate the polarization capabilities of the SPD in this aspect. Among the tasks of the first stage, one should also mention the study of the dependence of the parameters of the produced mesons and meson correlations on the energy and baryon density in collisions.

On the whole, the creation of the SPD will open up a broad program for studying the structure of nucleons in nonperturbative QCD. The accumulation of empirical information and the development of adequate phenomenological models can become the basis for a rigorous nonperturbative QCD baryon theory. Such a program requires, on the one hand, to intensify theoretical work in the discussed problems, and, on the other hand, to involve experimenters in the preparation of the corresponding experiments on the SPD.

Therefore, the first step in solving the discussed problem should be the awareness of its fundamental nature.