

Краткое сообщение

УДК 539.12.01

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-161-165

О четырехкварковой природе легких скалярных мезонов

Николай Николаевич Ачасов *

Институт математики им. С. Л. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

achasov@math.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9115-5080>

Аннотация

Рассказывается о вкладе новосибирских физиков в открытие четырехкварковой природы легких скалярных мезонов $f_0(980)$ и $a_0(980)$.

Ключевые слова

четырёхкварковые состояния, лёгкие скалярные мезоны, результаты экспериментов

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМ СО РАН, проект № 0314-2019-0021.

Автор благодарен А. В. Киселёву и Г. Н. Шестакову за помощь в оформлении статьи

Для цитирования

Ачасов Н. Н. О четырехкварковой природе легких скалярных мезонов // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 161–165. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-161-165

Four-Quark Nature of Light Scalar Mesons

Nikolay N. Achasov

Sobolev Institute of Mathematics
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation

achasov@math.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9115-5080>

Abstract

The contribution of Novosibirsk physicists to the discovery of the four-quark nature of light scalar mesons $f_0(980)$ and $a_0(980)$ is described.

Keywords

four-quark states, light scalar mesons, experimental results

Funding

The work was carried out within the framework of the state task of the Institute of Mathematics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, project no. 0314-2019-0021.

The author is grateful to A. V. Kiselev and G. N. Shestakov for help in preparing the article

For citation

Achasov N. N. Four-Quark Nature of Light Scalar Mesons. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 161–165. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-161-165

В конце 1950-х – 1970-х гг. в физике сложилось понимание того, что мезоны, которые участвуют в сильных взаимодействиях, представляют собой кварк-антикварковые пары. Физические измерения требовали кроме того, чтобы у кварков были дополнительные степени свободы, которые получили название «цвет». Вместе с тем физические измерения требовали

* achasov@math.nsc.ru

также, чтобы эти степени свободы не наблюдались. Так возникла гипотеза удержания цвета – конфинемента (confinement) и появилась модель MIT-мешка [1]. В ней возникли четырехкварковые легкие скалярные мезоны с массой около 1 ГэВ и четырехкварковые тензорные мезоны с изотопическим спином 2 (тензорные-изотензорные мезоны) с массой около 1,5 ГэВ. Первые физические эффекты для четырехкварковых мезонов были получены в работах [2–5].

В работах [4; 5] были получены яркие предсказания:

1) подавленность ширины распадов $\Gamma(f_0(980) \rightarrow \gamma\gamma) \approx \Gamma(a_0(980) \rightarrow \gamma\gamma) \approx 0,27$ кэВ.

2) яркое проявление широкого резонанса при 1,5 ГэВ в реакции $\gamma\gamma \rightarrow \rho^0\rho^0$ и отсутствие его в реакции $\gamma\gamma \rightarrow \rho^+\rho^-$.

Эксперимент подтвердил эти предсказания. Детальное обсуждение этих предсказаний можно найти в обзоре Н. Н. Ачасова и Г. Н. Шестакова [6].

Остановимся теперь на результатах сугубо новосибирских. В Институте математики им. С. Л. Соболева СО РАН были разработаны теоретические основы изучения природы легких скалярных мезонов в радиационных распадах ϕ -мезона [7]. Эксперименты, проведенные в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, а затем на ϕ -фабрике во Фраскати (Италия), привели к открытию этих распадов, подтверждению предсказанного для них механизма и получению веских доводов в пользу четырехкварковой природы легких скалярных мезонов $f_0(980)$ и $a_0(980)$ [8–14].

В работе [7] была предложена модель каонной петли для распадов

$$\begin{aligned} \phi(1020) \rightarrow K^+K^- \rightarrow \gamma a_0^0(980) \rightarrow \gamma\eta\pi^0 \\ \text{и} \\ \phi(1020) \rightarrow K^+K^- \rightarrow \gamma f_0(980) \rightarrow \gamma\pi\pi. \end{aligned} \quad (1)$$

В работе [15] было показано, что эта модель описывает четырехкварковые переходы и накладывает сильные ограничения на разложение амплитуд распадов (1) по большому числу цветов N_C [16]. Анализ этих ограничений дал новые свидетельства в пользу четырехкварковой природы легких скалярных мезонов $a_0(980)$ и $f_0(980)$.

В работах [17–19] было показано, что описание распадов (1) требует виртуальные импульсы $K^+(K^-)$ больше, чем 2 ГэВ. В случае рыхлых $K\bar{K}$ -молекул с энергией связи около 20 МэВ виртуальные импульсы $K^+(K^-)$ были бы около 100 МэВ. Кроме того, следует отметить, что рождение легких скалярных мезонов в пион-нуклонном рассеянии при больших переданных импульсах тоже указывает на их компактность [20].

На рис. 1 и 2 показано сравнение данных KLOE (Фраскати) с расчетами Н. Н. Ачасова и А. В. Киселева [21; 22].

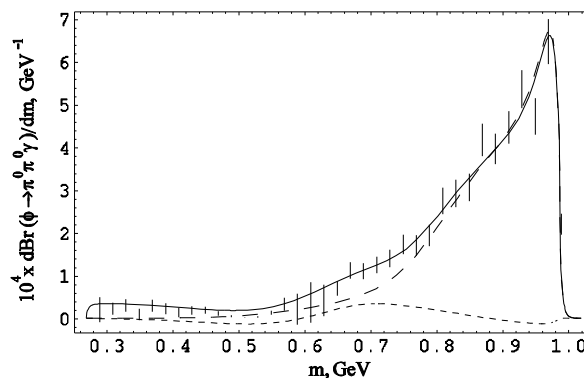


Рис. 1. Данные KLOE [13]. Наша подгонка [21]

Fig. 1. The KLOE data [13]. Our fit [21]

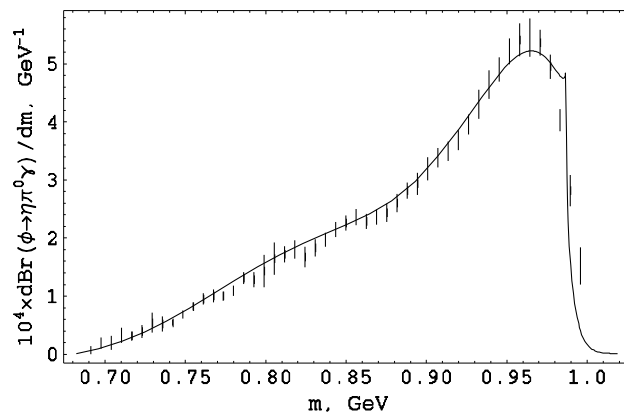


Рис. 2. Данные KLOE [14]. Наша подгонка [22]
 Fig. 2. The KLOE data [14]. Our fit [22]

Исследование экзотических (многокварковых) сильно взаимодействующих состояний (адронов) – это изучение путей реализации квантовой хромодинамики на малых и промежуточных расстояниях, т. е. удержания цвета – конфайнмента. Именно поэтому изучение экзотических адронов стало в настоящее время главным направлением в физике элементарных частиц и квантовой теории поля.

Много полезных подробностей можно найти в наших обзорах [6; 23–26].

Список литературы

1. **Jaffe R. L.** Multiquark hadrons. I. Phenomenology of Q^2Q^{-2} mesons. *Phys. Rev. D*, 1977, no. 15, p. 267. DOI 10.1103/PhysRevD.15.267
2. **Achasov N. N., Devyanin S. A., Shestakov G. N.** $S^* - \delta^0$ mixing as a threshold phenomenon. *Phys. Lett.*, 1979, vol. 88B, pp. 367–371.
3. **Ачасов Н. Н., Девянин С. А., Шестаков Г. Н.** Природа скалярных резонансов // ЯФ 1980. Т. 32. С. 1098–1110.
4. **Achasov N. N., Devyanin S. A., Shestakov G. N.** *Phys. Lett.*, 1982, vol. 108B, pp. 134–139.
5. **Achasov N. N., Devyanin S. A., Shestakov G. N.** *Z. Phys. C*, 1982, vol. 16, pp. 55–64.
6. **Ачасов Н. Н., Шестаков Г. Н.** Итоги поисков четырехкварковых состояний в $\gamma\gamma$ -столкновениях // УФН. 1991. № 161 (6). С. 53–108.
7. **Achasov N. N., Ivanchenko V. N.** On a search for four-quark states in radiative decays of ϕ mesons. *Nucl. Phys.*, 1989, vol. B315, pp. 465–476.
8. **Achasov M. N. et al.** (SND Collab.) Evidence of the $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ decay. *Phys. Lett. B*, 1998, vol. 438, pp. 441–445.
9. **Achasov M. N. et al.** (SND Collab.) First observation of $\phi(1020) \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ decay. *Phys. Lett. B*, 1998, vol. 440, pp. 442–448.
10. **Achasov M. N. et al.** (SND Collab.) The $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ decay. *Phys. Lett. B*, 2000, vol. 479, pp. 53–58.
11. **Achasov M. N. et al.** (SND Collab.) The $\phi(1020) \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ decay. *Phys. Lett. B*, 2000, vol. 485, pp. 349–356.
12. **Akhmetshin R. R. et al.** (CMD-2 Collab.) Study of the ϕ decays into $\pi^0\pi^0\gamma$ and $\eta\pi^0\gamma$ final states. *Phys. Lett. B*, 1999, vol. 462, pp. 380–388.
13. **Aloisio A. et al.** (KLOE Collab.) Study of the decay $\phi \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ with the KLOE detector. *Phys. Lett. B*, 2002, vol. 537, pp. 21–27.

14. **Ambrosino F. et al.** (KLOE Collab.) Study of the $a_0(980)$ meson via the radiative decay $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ with the KLOE detector. *Phys. Lett. B*, 2009, vol. 681, pp. 5–13.
15. **Achasov N. N.** Radiative decays of ϕ -meson about nature of light scalar resonances. *Nucl. Phys. A*, 2003, vol. 728, pp. 425–438.
16. **'t Hooft G.** A planar diagram theory for strong interactions. *Nucl. Phys.* 1974, vol. B72, pp. 461–473.
17. **Achasov N. N., Kiselev A. V.** Once more about the $K\bar{K}$ molecule approach to the light scalars. *Phys. Rev. D*, 2007, vol. 76, p. 077501.
18. **Achasov N. N., Kiselev A. V.** Reply to ‘‘Comment on ‘Once more about the molecule approach to the light scalars’’’. *Phys. Rev. D*, 2008, vol. 78, p. 058502.
19. **Achasov N. N., Gubin V. V., Shevchenko V. I.** Production of $K\bar{K}$ scalar molecules in ϕ radiative decays. *Phys. Rev. D*, 1997, vol. 56, pp. 203–211.
20. **Achasov N. N., Shestakov G. N.** New explanation of the GAMS results on the $f_0(980)$ production in the reaction $\pi^-p \rightarrow \pi^0\pi^0n$. *Phys. Rev. D*, 1998, vol. 58, p. 054011.
21. **Achasov N. N., Kiselev A. V.** Analytical $\pi\pi$ scattering amplitude and the light scalars-II. *Phys. Rev. D*, 2012, vol. 85, p. 094016.
22. **Achasov N. N., Kiselev A. V.** $a_0(980)$ physics in semileptonic D^0 and D^+ decays. *Phys. Rev. D*, 2018, vol. 98, p. 096009.
23. **Ачасов Н. Н., Шестаков Г. Н.** Сильное нарушение изотопической симметрии при рождении лёгких скалярных мезонов // УФН. 2019. № 189. С. 3–32.
24. **Ачасов Н. Н., Шестаков Г. Н.** Лёгкие скалярные мезоны в фотон-фотонных столкновениях // УФН. 2011. № 181. С. 827–857.
25. **Ачасов Н. Н.** О природе скалярных $a_0(980)$ - и $f_0(980)$ -мезонов // УФН. 1998. № 168. С. 1257–1261.
26. **Ачасов Н. Н., Девянин С. А., Шестаков Г. Н.** Проблема скалярных мезонов // УФН. 1984. № 142. С. 361–393.

References

1. **Jaffe R. L.** Multiquark hadrons. I. Phenomenology of Q^2Q^{-2} mesons. *Phys. Rev. D*, 1977, no. 15, p. 267. DOI 10.1103/PhysRevD.15.267
2. **Achasov N. N., Devyanin S. A., Shestakov G. N.** $S^* - \delta^0$ mixing as a threshold phenomenon. *Phys. Lett.*, 1979, vol. 88B, pp. 367–371.
3. **Achasov N. N., Devyanin S. A., Shestakov G. N.** Nature of scalar resonances. *Sov. J. Nucl. Phys.*, 1980, vol. 32, pp. 566–573.
4. **Achasov N. N., Devyanin S. A., Shestakov G. N.** *Phys. Lett.*, 1982, vol. 108B, pp. 134–139.
5. **Achasov N. N., Devyanin S. A., Shestakov G. N.** *Z. Phys. C*, 1982, vol. 16, pp. 55–64.
6. **Achasov N. N., Shestakov G. N.** Summary of the search for four-quark states in $\gamma\gamma$ collisions. *Sov. Phys. Usp.*, 1991, vol. 34 (6), pp. 471–496.
7. **Achasov N. N., Ivanchenko V. N.** On a search for four-quark states in radiative decays of ϕ mesons. *Nucl. Phys.*, 1989, vol. B315, pp. 465–476.
8. **Achasov M. N. et al.** (SND Collab.) Evidence of the $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ decay. *Phys. Lett. B*, 1998, vol. 438, pp. 441–445.
9. **Achasov M. N. et al.** (SND Collab.) First observation of $\phi(1020) \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ decay. *Phys. Lett. B*, 1998, vol. 440, pp. 442–448.
10. **Achasov M. N. et al.** (SND Collab.) The $\phi \rightarrow \eta\pi^0\gamma$ decay. *Phys. Lett. B*, 2000, vol. 479, pp. 53–58.
11. **Achasov M. N. et al.** (SND Collab.) The $\phi(1020) \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ decay. *Phys. Lett. B*, 2000, vol. 485, pp. 349–356.
12. **Akhmetshin R. R. et al.** (CMD-2 Collab.) Study of the ϕ decays into $\pi^0\pi^0\gamma$ and $\eta\pi^0\gamma$ final states. *Phys. Lett. B*, 1999, vol. 462, pp. 380–388.

13. **Aloisio A. et al.** (KLOE Collab.) Study of the decay $\phi \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ with the KLOE detector. *Phys. Lett. B*, 2002, vol. 537, pp. 21–27.
14. **Ambrosino F. et al.** (KLOE Collab.) Study of the $a_0(980)$ meson via the radiative decay $\phi \rightarrow \eta \pi^0 \gamma$ with the KLOE detector. *Phys. Lett. B*, 2009, vol. 681, pp. 5–13.
15. **Achasov N. N.** Radiative decays of ϕ -meson about nature of light scalar resonances. *Nucl. Phys. A*, 2003, vol. 728, pp. 425–438.
16. **'t Hooft G.** A planar diagram theory for strong interactions. *Nucl. Phys.* 1974, vol. B72, pp. 461–473.
17. **Achasov N. N., Kiselev A. V.** Once more about the $K\bar{K}$ molecule approach to the light scalars. *Phys. Rev. D*, 2007, vol. 76, p. 077501.
18. **Achasov N. N., Kiselev A. V.** Reply to “Comment on ‘Once more about the molecule approach to the light scalars’”. *Phys. Rev. D*, 2008, vol. 78, p. 058502.
19. **Achasov N. N., Gubin V. V., Shevchenko V. I.** Production of $K\bar{K}$ scalar molecules in ϕ radiative decays. *Phys. Rev. D*, 1997, vol. 56, pp. 203–211.
20. **Achasov N. N., Shestakov G. N.** New explanation of the GAMS results on the $f_0(980)$ production in the reaction $\pi^- p \rightarrow \pi^0 \pi^0 n$. *Phys. Rev. D*, 1998, vol. 58, p. 054011.
21. **Achasov N. N., Kiselev A. V.** Analytical $\pi\pi$ scattering amplitude and the light scalars-II. *Phys. Rev. D*, 2012, vol. 85, p. 094016.
22. **Achasov N. N., Kiselev A. V.** $a_0(980)$ physics in semileptonic D^0 and D^+ decays. *Phys. Rev. D*, 2018, vol. 98, p. 096009.
23. **Achasov N. N., Shestakov G. N.** Strong isospin symmetry breaking in light scalar meson production. *Phys. Usp.*, 2019, vol. 62, pp. 3–31.
24. **Achasov N. N., Shestakov G. N.** Light scalar mesons in photon-photon collisions. *Phys. Usp.*, 2011, vol. 54, pp. 799–828.
25. **Achasov N. N.**, On the nature of the $a_0(980)$ and $f_0(980)$ scalar mesons. *Phys. Usp.*, 1998, vol. 41, pp. 1149–1153.
26. **Achasov N. N., Devyanin S. A., Shestakov G. N.** The problem of scalar mesons. *Sov. Phys. Usp.*, 1984, vol. 27, pp. 161–180.

Информация об авторе

Николай Николаевич Ачасов, доктор физико-математических наук, профессор
WoS Researcher ID AAG-5621-2019
Scopus Author ID 7006572313

Information about the Author

Nikolay N. Achasov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor
WoS Researcher ID AAG-5621-2019
Scopus Author ID 7006572313

*Статья поступила в редакцию 20.01.2022;
одобрена после рецензирования 01.03.2022; принята к публикации 01.03.2022
The article was submitted 20.01.2022;
approved after reviewing 01.03.2022; accepted for publication 01.03.2022*