

В. И. Комаров, А. В. Куликов, Д. А. Цирков

Первое наблюдение резонанса $J^P = 0^-$ в протон-протонном взаимодействии

Изучение нуклон-нуклонного взаимодействия является неисчерпаемым источником физической информации: при низких энергиях NN -взаимодействие определяет свойства ядерной материи, при высоких энергиях демонстрирует кварк-глюонную структуру, а при энергиях в области ГэВ имеет характерные резонансные свойства. При низких энергиях резонансное поведение не наблюдается, оно проявляется только вблизи порога рождения пиона. Три резонанса в двух-барионной системе, 1D_2 , 3F_3 и 3P_2 , были установлены в протон-протонном рассеянии в области возбуждения $\Delta(1232)$ -изобары еще в 80-х годах прошлого столетия [1]. Эти резонансы существенно определяют динамику протон-ядерных реакций при ГэВ-ных энергиях, в частности, они ответственны за хорошо известный интенсивный пик в сечении реакции $pp \rightarrow d\pi^+$ при энергии протонов 620 МэВ. Только один двухбарион-

ный резонанс был обнаружен недавно [2] в нейтрон-протонном взаимодействии. Он был идентифицирован как 3D_3 - 3G_3 [3], находится в области возбуждения двух Δ -изобар и имеет ширину 70 МэВ, существенно меньшую, чем ширина распада свободной изобары 117 МэВ. Это послужило аргументом в пользу предположения о его истинно кварковой природе. Однако недавние теоретические исследования [4] показали, что этот резонанс, как и известные протон-протонные резонансы, может быть интерпретирован в терминах традиционного мезон-барионного подхода. При этом совершенно необходимо детальное исследование малоизвестного в настоящее время взаимодействия нуклонов с барионными резонансами и барионных резонансов между собой. Это приводит изучение дибарионных резонансов к более общей проблеме различения систем, составленных из адронов, и систем

V. I. Komarov, A. V. Kulikov, D. A. Tsirkov

First Observation of the $J^P = 0^-$ Resonance in Proton–Proton Interaction

Study of the nucleon–nucleon interaction is an inexhaustible source of physics information: at low energies NN interaction defines the properties of nuclear matter, at high energies demonstrates the quark–gluon structure, and at energies in the GeV region exhibits characteristic resonance features. At low energies, no resonance behavior is observed, it shows up only near the pion production threshold. Three resonances in a two-baryon system, 1D_2 , 3F_3 and 3P_2 , have been determined in proton–proton scattering in the region of excitation of the $\Delta(1232)$ -isobar as early as the 80s of the last century [1]. These resonances essentially define the dynamics of the proton–nucleus reactions at GeV energies. In particular, they are responsible for the well-known intense peak in the cross section of the reaction $pp \rightarrow d\pi^+$ at 620-MeV proton energy. Only

one two-baryon resonance has been discovered recently [2] in neutron–neutron interaction. It was identified as 3D_3 - 3G_3 [3], lies in the excitation region of two Δ -isobars and has a width of 70 MeV which is significantly less than the width of a free isobar, 117 MeV. This was an argument in favor of the hypothesis about a true quark nature of this dibaryon. Nevertheless, recent theoretical investigations [4] have shown that this resonance, as well as the known proton–proton resonances, may be interpreted in terms of traditional meson–baryon approach. In doing this, it is mandatory to study in detail the currently scantily explored interactions of baryon resonances with nucleons and baryon resonances with each other. This draws the dibaryon resonance study into more general problem of distinguishing between the systems composed of hadrons

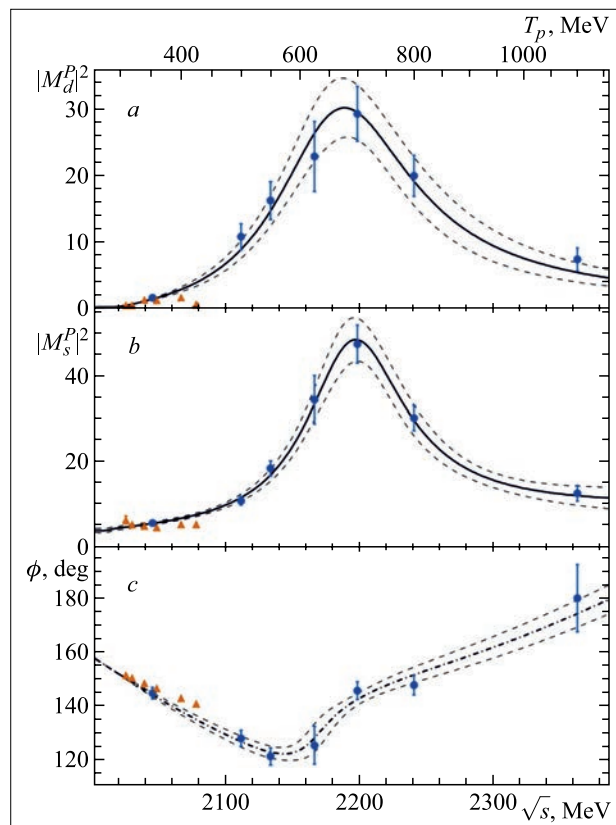
вполне определенной кварковой структуры. Такая проблема была сформулирована в работе [5], где ставился вопрос о том, является дейтрон составной или элементарной частицей. А в настоящее время изучается вопрос об «элементарности» или «композиитности» тетракварков и пентакварков [6], наблюдаемых в последние годы.

Изучение дибарионных резонансов сотрудники ЛЯП проводили на протонном синхротроне COSY (Юлих, Германия) в сотрудничестве ANKE. На поляризованном протонном пучке в диапазоне 353–1100 МэВ исследовалась реакция $pp \rightarrow \{pp\}_S \pi^0$ с образованием s -волнового дипротона $\{pp\}_S$. Измерение этой реакции в более раннем эксперименте WASA-CELSIUS (на неполяризованном пучке) было ограничено максимальной энергией 425 МэВ [7]. Эксперимент на COSY показал, что сечение реакции $pp \rightarrow \{pp\}_S \pi^0$ имеет резонансный пик, аналогичный пику в $pp \rightarrow d\pi^+$, но немного сдвинутый по энергии, с максимумом при 660 МэВ. Измерение угловой и энергетической зависимостей дифференциального сечения и анализирующей способности реакции позволило провести фазовый анализ амплитуд процесса [8]. Неожиданным свойством реакции оказалось проявление 3P_0 амплитуды с ин-

and the systems of quite definite quark structure. Such a problem has been formulated already in [5], where the question was raised of whether the deuteron was a composite or an elementary particle. And at the present time, the problem of “elementarity” or “compositeness” is relevant to tetraquarks and pentaquarks [6] observed in recent years.

The physicists of DLNP carried out investigation of dibaryon resonances at the proton synchrotron COSY within the ANKE collaboration. The reaction $pp \rightarrow \{pp\}_S \pi^0$ with the formation of the s -wave diproton $\{pp\}_S$ was studied using a polarized proton beam in the energy range 353–1100 MeV. Measurement of this reaction in earlier experiment WASA-CELSIUS was limited by a maximum energy of 425 MeV [7]. Experiment at COSY has shown that the cross section of the reaction $pp \rightarrow \{pp\}_S \pi^0$ has a resonance peak, similar to the peak of $pp \rightarrow d\pi^+$, but slightly shifted in energy, with a maximum at 660 MeV. Measurement of the angular and energy dependences of the differential cross section and of the analyzing power of the reaction made it possible to fulfill a phase analysis of the reaction amplitudes [8]. A discovered unexpected

Энергетическая зависимость квадратов амплитуд переходов ${}^3P_2 \rightarrow {}^1S_0 d$ (a), ${}^3P_0 \rightarrow {}^1S_0 s$ (b) и их относительной фазы ϕ (c). Сплошные кривые — аппроксимация брейт-вигнеровской зависимостью. Штриховые линии задают 68%-й доверительный интервал. Голубые точки — результаты ANKE [8], коричневые треугольники — данные WASA-CELSIUS [7]



Energy dependence of the transition amplitude squared ${}^3P_2 \rightarrow {}^1S_0 d$ (a), ${}^3P_0 \rightarrow {}^1S_0 s$ (b), and their relative phase ϕ (c). Solid curves represent approximation by the Breit–Wigner distribution. Dashed lines define 68% confidence interval. Blue points are the ANKE results [8], brown triangles are the WASA-CELSIUS data [7]

property of the reaction was the display of the 3P_0 amplitude, never observed before, with intensity exceeding that of the known resonance amplitude 3P_2 (see figure). A resonance character of the 3P_0 amplitude allowed one to determine reliably the parameters of this $J^P = 0^-$ resonance: $E_R = (2201 \pm 5)$ MeV and $\Gamma = (91 \pm 12)$ MeV.

The spectroscopy of the dibaryon resonances, arising at present, deepens our understanding of the nucleon–nucleon and nucleon–nucleus reaction dynamics. On the other hand, it might be a good method to facilitate clarification of the nature of hadrons with nonstandard quark content: tetraquarks, pentaquarks and hexaquarks.

тенсивностью, превышающей интенсивность известной резонансной амплитуды 3P_2 (см. рисунок). Резонансный характер ранее не наблюдавшейся амплитуды 3P_0 позволил уверенно определить параметры этого $J^P = 0^-$ резонанса: $E_R = (2201 \pm 5)$ МэВ и $\Gamma = (91 \pm 12)$ МэВ.

Возникающая в настоящее время спектроскопия дибарионных резонансов углубляет наше понимание динамики нуклон-нуклонных и нуклон-ядерных реакций. С другой стороны, она может быть хорошим средством, способствующим выяснению природы адронов с нестандартным кварковым составом: тетракварков, пентакварков и гексакварков.

Список литературы / References

1. *Arndt R. A., Roper L. D. et al.* // Phys. Rev. D. 1983. V. 28. P. 97.
2. *Bashkanov M. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. P. 052301.
3. *Adlarson F. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 112. P. 202301.
4. *Gal A., Garcilazo H.* // Nucl. Phys. A. 2014. V. 928. P. 73.
5. *Weinberg S.* // Phys. Rev. B. 1965. V. 137. P. 672.
6. *Chen H.-X. et al.* // Phys. Rep. 2016. V. 639. P. 1.
7. *Bilger R. et al.* // Nucl. Phys. A. 2001. V. 693. P. 633.
8. *Komarov V. et al.* // Phys. Rev. C. 2016. V. 93. P. 065206.