

ДИБАРИОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ В АДРОННОЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ. НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

*В. И. Кукулин, М. Н. Платонова **

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

Дается обзор как старых, так и новых экспериментов в области дибарионных резонансов, а также их теоретическая интерпретация. Основное внимание уделено истории исследований в этой и многих смежных областях релятивистской ядерной физики, выполненных в ОИЯИ, начиная с основания Института в середине 1950-х гг. Показано, что дибарионная тематика вместе с тесно примыкающими к ней исследованиями кумулятивных процессов, подпорогового рождения мезонов, одно- и двухпионного рождения в NN -соударениях, короткодействующих NN -корреляций в ядрах и т. п. входят в сферу основной деятельности ОИЯИ.

A review of both old and new experiments on dibaryon resonances, as well as their theoretical interpretation, is given. The main focus is made on the history of research in this and many related areas of relativistic nuclear physics performed at JINR since its foundation in the mid-1950s. It is demonstrated that the dibaryon topic together with closely related studies of cumulative processes, subthreshold meson production, single- and double-pion production in NN collisions, short-range NN correlations in nuclei, etc., forms a rotation axis for the one of the main areas of JINR activity.

PACS: 14.20.Gk; 14.20.Pt

1. ИСТОРИЯ ОИЯИ ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ИССЛЕДОВАНИЙ ДИБАРИОННЫХ РЕЗОНАНСОВ

Исследования в области релятивистской ядерной физики проводились в ОИЯИ с самого основания Института, начиная с пионерских работ М. Г. Мещерякова, А. М. Балдина, Л. С. Ажгирея и многих других**. Если под релятивистской ядерной физикой подразумевать те ядерно-физические и адронные процессы, которые происходят при релятивистских энергиях падающих

*E-mail: platonova@nucl-th.sinp.msu.ru

** Авторы этой статьи приносят свои искренние извинения тем активным исследователям в ОИЯИ, которые внесли значительный вклад в развитие рассматриваемых областей науки, однако не были упомянуты в настоящем обзоре в силу ограниченности его объема.

частиц (для нуклонов это энергии $T_N \gtrsim 1$ ГэВ), то почти вся физика дибарионных резонансов (при типичных массах дибарионов $M_D \simeq 2-2,4$ ГэВ) попадает в эту область. Кроме того, рождение ди- и мультибарионных резонансов неразрывно связано с коллективными явлениями при промежуточных энергиях, относящимися к области так называемых кумулятивных процессов, активно исследуемых в ОИЯИ на протяжении многих десятилетий. Наконец, исследования дибарионных резонансов и релятивистскую ядерную физику объединяет ключевая для всей физики ядра проблема короткодействующих корреляций в ядрах. В связи с этим важно напомнить, что традиционная низкоэнергетическая ядерная физика (прямые и резонансные ядерные реакции, гигантские резонансы в ядрах, α -, β - и γ -распады и т. п.) чувствительна в основном к дальнедействующим корреляциям нуклонов. С другой стороны, явления, связанные с короткодействующими корреляциями нуклонов (и с большими передачами импульса), требуют энергий соударения от нескольких сотен мегаэлектронвольт до нескольких гигаэлектронвольт и относятся, вообще говоря, уже к релятивистской области.

Уже самые первые эксперименты, выполненные в ОИЯИ в 1957 г. под руководством М. Г. Мещерякова на построенном 660-МэВ протонном синхротроне, указали на явную неполноту традиционного описания ядерно-физических процессов при промежуточных энергиях. В частности, в экспериментах Л. С. Ажгирея и др. [1] по выбиванию быстрых дейтронов из легких ядер типа $A(p, pd)$ был найден аномально высокий выход быстрых дейтронов, значительно превышающий предсказания традиционных теоретических подходов. Позднее аналогичные результаты были получены в экспериментах В. И. Комарова и др. [3] по выбиванию быстрых тритонов и α -частиц из легких ядер. В экспериментах Г. А. Лексина и др. [2] по обратному рассеянию быстрых протонов на дейтериевой мишени также был зарегистрирован аномально высокий выход протонов, вылетающих в заднюю полусферу углов. Все эти эксперименты ясно показали, что в ядрах имеются нуклоны со средними импульсами, значительно превосходящими обычные импульсы k_F фермиевского движения нуклонов самосогласованного поля. Аналогичные выводы были сделаны также из анализа других ядерно-физических процессов при промежуточных энергиях, в частности, фоторасщепления дейтронов при $E_\gamma \gtrsim 200$ МэВ.

Для объяснения наблюдаемых эффектов Д. И. Блохинцев в 1957 г. предложил свою знаменитую идею о внутриядерных флуктонах [4], т. е. многонуклонных кластерах, образующихся за счет случайных флуктуаций плотности ядерной материи. К этой идее необходимо было еще добавить механизм, объясняющий огромные силы, действующие между нуклонами внутри флуктонов (о кварках тогда еще ничего не было известно). И только в 1982 г. А. В. Ефремов предложил модель [5], в которой особая прочность флуктонов объяснялась образованием многокварковых мешков.

К рассматриваемому кругу вопросов тесно примыкают так называемый EMC-эффект, открытый в ЦЕРН в 1983 г., а также DIS (deep inelastic scattering), в которых проявляется специфическое «распухание» кварковых облаков во внутриядерных нуклонах. Другими словами, пространственное распределение кварков во внутриядерных нуклонах является более диффузным, чем в свободных нуклонах, что естественно можно объяснить образованием ди- и мультибарионных кластеров в ядрах. Недавно в работе [6] на основе анализа большой серии экспериментов с ГэВ-ными электронами, выполненных в JLab, была установлена прямая связь между эффектами DIS и короткодействующими NN -корреляциями. И поскольку короткодействующие NN -корреляции очень хорошо объясняются дибарионной моделью ядерных сил (см. следующий раздел), результаты работы [6] можно рассматривать как подтверждение дибарионной природы короткодействующих NN -корреляций в ядрах*.

По итогам всех этих работ в 1980-е гг. в мире возник дибарионный «бум», который привел к «открытию» большого числа дибарионных резонансов. К сожалению, впоследствии многие из этих дибарионов были «закрыты», и к началу 1990-х гг. интерес к дибарионной тематике начал угасать. Таким образом, к началу 2000-х гг. остались как вероятные, но не полностью подтвержденные лишь несколько широких изовекторных дибарионных резонансов (в NN -каналах 1D_2 , 3F_3 и др.), обнаруженных еще в 1970-х гг. в экспериментах по упругому рассеянию поляризованных протонов $\vec{p}\vec{p} \rightarrow \vec{p}\vec{p}$ [8]. В итоге стало ясно, что без постановки новых высокоточных экспериментов в 4π -геометрии эту проблему не решить.

2. РЕНЕССАНС ДИБАРИОННОЙ ФИЗИКИ В НАЧАЛЕ XXI В.

Существенный прогресс в этой области наметился лишь на рубеже XX и XXI вв. Со стороны теории была сформулирована дибарионная модель ядерных сил [9], которая связала воедино особенности ядерных сил на коротких расстояниях с образованием промежуточных дибарионных резонансов с соответствующими квантовыми числами. Это позволило качественно понять происхождение столь сильной $LJST$ -зависимости ядерных потенциалов. Такая зависимость не свойственна ни одному другому виду сил в природе и на первый взгляд выглядит как аномалия. Однако если предположить, что в ряде каналов NN -системы доминируют дибарионные резонансы с фиксирован-

*Интересно отметить, что А. М. Балдин был одним из первых, кто хорошо понял ключевую роль дибарионов в ядерной физике, опубликовав еще в 1984 г. работу о конденсации дибарионов в ядерной материи [7].

ными значениями $LJST$, такая зависимость ядерных потенциалов становится вполне закономерной.

Основной экспериментальный прогресс был достигнут коллаборацией WASA-at-COSY, которой удалось, наконец, надежно открыть изоскалярный дибарионный резонанс d^* с квантовыми числами $I(J^P) = 0(3^+)$ и массой $M_{d^*} \simeq 2,38$ ГэВ. Этот резонанс был вначале обнаружен в реакции двухпионного рождения $pn \rightarrow d\pi^0\pi^0$ при энергиях $T_p = 1-1,3$ ГэВ [10], а затем подтвержден в реакциях $pd \rightarrow {}^3\text{He}\pi^0\pi^0$, $dd \rightarrow {}^4\text{He}\pi^0\pi^0$ и, наконец, в упругом $\bar{n}p$ -рассеянии [11]. При этом найденные параметры резонанса оказались в прекрасном согласии с предсказаниями Ф. Дж. Дайсона и Н.-Х. Ксуонга [12], сделанными еще в 1964 г. на основе симметрии $SU(6)$. Следует отметить, что в перечисленных выше реакциях двухпионного рождения наблюдается так называемый АВС-эффект (аномально высокий выход пионных пар вблизи порога), обнаруженный в Беркли еще в начале 1960-х гг. в серии инклюзивных экспериментов $pd \rightarrow {}^3\text{He}X$ [13]. Новые эксперименты коллаборации WASA-at-COSY [10], выполненные в эксклюзивной постановке в полной 4π -геометрии и с очень высокой статистикой, впервые позволили установить однозначную связь между АВС-эффектом и рождением дибарионного резонанса d^* . Однако сам механизм распада резонанса d^* , приводящий к АВС-усилению, все еще оставался неясен.

Недавно авторы настоящей работы предложили новую интерпретацию [14] АВС-эффекта на основе дибарионной модели ядерных сил [9]. Согласно этой интерпретации АВС-усиление возникает в результате интерференции двух механизмов распада дибариона d^* — с излучением легкого скалярного σ -мезона, который затем распадается по дипионному каналу, и двухступенчатого механизма, при котором дибарион d^* сначала испускает пион и переходит в изовекторный 1D_2 -дибарион с $I(J^P) = 1(2^+)$ и массой 2,15 ГэВ, а затем изовекторный дибарион распадается на пион и конечный дейтрон. Важно отметить, что все три дибариона — изоскалярный $0(3^+)$, изовекторный $1(2^+)$ и дибарион $0(1^+)$ — были одновременно предсказаны Ф. Дж. Дайсоном и Н.-Х. Ксуонгом [12] в $SU(6)$ -классификации дибарионных состояний, а в работе [14] были впервые рассмотрены прямые переходы между этими состояниями посредством мезонной эмиссии. В итоге учет интерференции двух вышеуказанных механизмов распада дибариона d^* позволил количественно описать специфические $\pi\pi$ - и πd -корреляции, а также угловые распределения конечных пионов и дейтронов, найденные в экспериментах [10].

В работе [14] был найден еще один важный элемент: масса и ширина σ -мезона, полученные нами из наилучшей подгонки экспериментального спектра инвариантных масс $M_{\pi\pi}$ в области АВС-пика ($m_\sigma \simeq 300$ и $\Gamma_\sigma \simeq 100$ МэВ), оказались существенно ниже, чем принятые значения для свободного σ -мезона, рождающегося как широкий резонанс в $\pi\pi$ -рассеянии

($m_\sigma^0 \sim \Gamma_\sigma^0 \sim 500$ МэВ). Такая сильная перенормировка массы и ширины σ -мезона явно указывает на одно из фундаментальных явлений КХД — частичное восстановление (изначально нарушенной в адронах) киральной симметрии (chiral symmetry restoration — CSR). Причиной CSR в плотной и/или горячей ядерной материи является перенормировка пионных и σ -пропагаторов в среде [15]. Однако и в случае одного возбужденного адрона его внутреннее состояние также характеризуется частичным восстановлением киральной симметрии, тем более сильным, чем выше энергия возбуждения [16]. Тот же эффект должен наблюдаться и в дибарионных резонансах [14]. Наиболее характерным сигналом CSR в адронах является вырождение сильно возбужденных состояний адронов по четности (в спектрах барионов и мезонов появляются так называемые киральные дублеты $1/2^+ - 1/2^-$, $3/2^+ - 3/2^-$ и т. п. [16]).

Еще одним важным индикатором CSR является наблюдаемая при распаде σ -мезона $\gamma\gamma$ -корреляция. В частности, данные Х. Клемента и др. [17] по реакции $pp \rightarrow pp + \gamma\gamma$ при энергиях $T_p \simeq 0,8-1,3$ ГэВ показывают узкий пик при $M_{\gamma\gamma} \simeq 0,31-0,32$ ГэВ, по всей видимости, отвечающий рождению промежуточного σ -мезона в изовекторных (3F_3 и 1G_4) дибарионных резонансах. С ними качественно согласуются данные Х. У. Абраамяна и др. (ЛВЭ ОИЯИ) [18] по реакции $dC \rightarrow \gamma\gamma + X$, в которых был обнаружен пик при $M_{\gamma\gamma} \simeq 360$ МэВ с шириной $\Gamma \simeq 64$ МэВ, отвечающий распаду σ -мезона из мезонного облака дейтронного $0(1^+)$ -дибариона. Эти значения массы и ширины σ -мезона разумным образом согласуются с общими ожиданиями для CSR-эффекта в спектрах возбужденных адронов в предположении о зависимости параметров σ -мезона от энергии возбуждения исходного адрона.

Тогда в соударениях тяжелых ионов при высоких энергиях должен иметь место комбинированный (двухстадийный) CSR-эффект: начальный (затравочный) эффект возникает в плотной и горячей материи внутри сильно возбужденных адронных и дибарионных резонансов при их распаде, а затем этот эффект дополнительно усиливается при распространении пионов и σ -мезонов в плотной и горячей среде.

3. ДИБАРИОННОЕ ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЯДЕРНЫХ СИЛ НА КОРОТКИХ РАССТОЯНИЯХ

Несмотря на отмеченные выше очень интересные проявления дибарионных степеней свободы в ядро-ядерных соударениях при энергиях порядка 1 ГэВ/нуклон и выше, наиболее интригующим аспектом физики дибарионов является их фундаментальная роль в ядерных силах и в структуре ядер. В самом деле, все развитие дибарионной тематики, как экспериментальное, так и теоретическое, на протяжении 40 лет шло под флагом исследований мультикварковой экзотики наподобие пента- или тетракварков. В этом же

ряду находятся и настойчивые (и пока безуспешные) поиски H -дибариона (или $\Lambda\Lambda$ -дигиперона) с двойной странностью, предсказанного А. Джаффе еще в 1977 г.

Однако проведенный нами анализ основных констант ядерных сил (т.е. мезон-нуклонных констант связи, а также соответствующих параметров короткодействующего обрезания в мезон-нуклонных вершинах) [19] ясно показал, что эти константы часто не соответствуют фундаментальным симметриям типа $SU(3)$, уже имеющимся расчетам КХД на решетке и большому числу экспериментальных данных, а просто были найдены из подгонки эмпирических фазовых сдвигов NN - или πd -рассеяний и других аналогичных величин, а также наблюдаемых в малонуклонных системах. Помимо этого ясно, что при наличии традиционного отгалкивающего кора на коротких NN -расстояниях образование флюктонов должно быть чрезвычайно маловероятным. И только дибарионная модель короткодействующих ядерных сил [9] позволила впервые примирить эти два кажущихся взаимоисключающими явления [19].

Доказательство существования дибарионных резонансов в NN -системе. Несмотря на большое число имеющихся экспериментальных данных и теоретических моделей, ясно указывающих на существование дибарионных резонансов, дибарионы пока еще не стали общепризнанными объектами. Мы приводим здесь весьма убедительное доказательство их существования, которое опирается на пионерские работы М. Г. Мещерякова и др., выполненные в ОИЯИ еще в середине 1950-х гг.

Итак, первые указания на существование изовекторного 1D_2 -дибариона были получены М. Г. Мещеряковым и др. [20] в pp -рассеянии при энергиях $T_p \simeq 600$ МэВ. Ф. Дж. Дайсон и Н.-Х. Ксуонг [12] использовали найденную в этих работах массу дибариона $M(^1D_2) \simeq 2,16$ ГэВ для предсказания массы изоскалярного $0(3^+)$ - (или $^3D_3^-$) дибариона и получили значение $M(^3D_3) \simeq 2,35$ ГэВ. Дибарион с теми же квантовыми числами был недавно надежно открыт коллаборацией WASA-at-COSY, причем его масса (2,38 ГэВ) оказалась очень близка к предсказанию [12]. Анализируя цепочку событий, приведших к открытию $0(3^+)$ -дибариона, приходим к выводу, что совпадение теоретически предсказанных еще в 1964 г. параметров этого изоскалярного дибариона с найденными экспериментально (и затем подтвержденными фазовым анализом SAID упругого $\bar{n}p$ -рассеяния [11]) весьма надежно свидетельствует о существовании как изоскалярного $^3D_3^-$, так и изовекторного 1D_2 -дибарионов.

Подведем итог. Целью настоящего краткого обзора было показать основополагающую роль исследований, выполненных в ОИЯИ начиная с основания Института и вплоть до настоящего времени, в открытии и изучении свойств дибарионных резонансов, являющихся, в нашем понимании, основным агентом ядерных сил на коротких расстояниях. Важно подчеркнуть ре-

шающую роль результатов, полученных в ОИЯИ, не только непосредственно в области дибарионной физики, но и во многих важнейших направлениях адронной физики, таких как кумулятивные процессы, подпороговое рождение частиц и т. п., тесно связанных с дибарионной тематикой.

Авторы этого обзора искренне надеются, что современный период скептицизма и сомнений в существовании дибарионных резонансов в скором времени сменится твердым признанием большой важности таких состояний в адронной и ядерной физике.

Авторы выражают признательность О. Д. Далькарову, В. И. Комарову, Ю. Н. Узикову, Х. Клементу и М. Башканову за полезные дискуссии. Работа была выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант № 16-02-00265.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ажгирей Л. С. и др. // ЖЭТФ. 1957. Т. 33. С. 1185.
2. Лексин Г. А. // Там же. Т. 32. С. 440.
3. Комаров В. И., Косарев Г. Е., Савченко О. В. // ЯФ. 1970. Т. 11. С. 711.
4. Блохинцев Д. И. // ЖЭТФ. 1957. Т. 33. С. 1295.
5. Ефремов А. В. // ЭЧАЯ. 1982. Т. 13. С. 613.
6. Weinstein L. et al. // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. P. 052301.
7. Балдин А. М. // Докл. АН СССР. 1984. Т. 279. С. 602.
8. Auer I. P. et al. // Phys. Lett. B. 1977. V. 70. P. 475.
9. Кукулин В. И. // Тр. XXXIII зимней школы ПИЯФ, Гатчина, 1999. С. 207; Kukulin V. I. et al. // J. Phys. G. 2001. V. 27. P. 1851.
10. Adlarson P. et al. // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. P. 242302.
11. Adlarson P. et al. // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 112. P. 202301.
12. Dyson F. J., Xuong N.-H. // Phys. Rev. Lett. 1964. V. 13. P. 815.
13. Abashian A., Booth N. E., Crowe K. M. // Phys. Rev. Lett. 1960. V. 5. P. 258; 1961. V. 7. P. 35.
14. Platonova M. N., Kukulin V. I. // Phys. Rev. C. 2013. V. 87. P. 025202.
15. Volkov M. K. et al. // Phys. Lett. B. 1998. V. 424. P. 235; Hatsuda T., Kunihiro T., Shimizu H. // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82. P. 2840.
16. Glozman L. Ya., Nefediev A. V., Ribeiro J. E. F. T. // Phys. Rev. D. 2005. V. 72. P. 094002.
17. Bashkanov M. et al. // Intern. J. Mod. Phys. A. 2005. V. 20. P. 554.
18. Abraamyan Kh. U. et al. // Phys. Rev. C. 2009. V. 80. P. 034001.
19. Кукулин В. И., Платонова М. Н. // ЯФ. 2013. Т. 76. С. 1549.
20. Мещеряков М. Г., Неганов Б. С. // Докл. АН СССР. 1955. Т. 100. С. 677; Неганов Б. С., Парфенов Л. Б. // ЖЭТФ. 1958. Т. 34. С. 767.