

ГОДИШНИК НА СОФИЙСКИЯ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“
ФИЗИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ, ЮБИЛЕЙНО ИЗДАНИЕ
130 ГОДИНИ СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ
и 55 ГОДИНИ ФИЗИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ
„Нови научни постижения и направления във Физически факултет“

ANNUAL OF SOFIA UNIVERSITY “ST. KLIMENT OHRIDSKI”
FACULTY OF PHYSICS, JUBILEE EDITION
130th ANNIVERSARY OF SOFIA UNIVERSITY
and 55th ANNIVERSARY OF FACULTY OF PHYSICS
“New scientific achievements and directions in the Faculty of Physics”

НОВО МАСОВО СЪОТНОШЕНИЕ ЗА АДРОННИТЕ РЕЗОНАНСИ СЪС СПИН ЕДИНИЦА И КВАРКОВИТЕ МАСИ

МИХАИЛ ЧИЖОВ^{1,2}, МОМЧИЛ НАЙДЕНОВ²

¹Университетски център за космически изследвания и технологии
²Физически факултет

Михаил Чижов, Момчил Найденов. НОВО МАСОВО СЪОТНОШЕНИЕ ЗА АДРОННИТЕ РЕЗОНАНСИ СЪС СПИН ЕДИНИЦА И КВАРКОВИТЕ МАСИ

Анализирани са следствия от SU(2)- и U(1)-разширения на модела на Намбу и Йона-Лазинио с включени тензорни взаимодействия. Показано е, че новите масови съотношения за адронните резонанси със спин единица са експериментално потвърдени. В рамките на U(1)-модела предсказаната стойност на масата на аксиално-векторния мезон със скрита странност с висока точност е потвърдена тази година (2018) от колаборация BESIII.

Mihail Chizhov, Momchil Naydenov. NOVEL MASS RELATION AMONG SPIN-1 HADRON RESONANCES AND QUARK MASSES

The applications of SU(2) and U(1) extensions of the Nambu–Jona-Lasinio model with tensor interactions are analyzed. It has been shown that novel mass relations among spin-1 hadron resonances have been experimentally confirmed. The predicted mass of axial-vector strangeonium within U(1) model has been confirmed this year by BESIII Collaboration with high precision.

Keywords: NJL model, hadron resonances, mass relation

PACS numbers: 12.39.Ki; 12.39.Fe; 14.40.Cs

За контакти: Михаил Чижов, Физически факултет, Софийски университет „Св. Климент Охридски“, бул. „Джеймс Баучър“ 5, София 1164, България, тел.: 359 2 8161 731, факс (02) 962 52 76, E-mail: mih@phys.uni-sofia.bg

1. УВОД

Предсказанието и обяснението на спектъра на масите на елементарните и субатомните частици остава основен проблем във физиката, който не може да бъде решен дори от завършения Стандартен модел на елементарните частици след епохалното откритие на Хигсовия бозон [1, 2]. Например хигсов механизъм не може да опише придобиването на маси на адронните резонанси. Настоящата работа описва теоретичен модел, предсказващ ново съотношение между масите на адронните резонанси със спин единица, което тази година беше експериментално потвърдено. Новата формула добре описва съотношенията между масите на известните резонанси и дори предсказва масата на нова аксиално-векторна частица със скрита странност $h_1(1380)$ [3].

Тази година международната колаборация BESIII потвърди откритието на нова аксиално-векторна частица със скрита странност $h_1(1380)$ [4] с висока точност на измерване на нейните параметри. Това е трето потвърждение на предишното нейно детектиране от колаборациите LASS [5] и Crystal Barrel [6]. Този факт дава основание параметрите на тази частица да бъдат вписани в основната таблица на субатомните частици [7]. Основният параметър – нейната маса, е измерен с точност от 0.5%. Обаче съвременната теория на силните взаимодействия, квантовата хромодинамика, както и Стандартният модел, са безсилни да предскажат масата на тази частица. Затова нови физични модели относно произхода и стойностите на масите на субатомните и елементарните частици са наложителни.

Всички теоретични предсказания за масата на тази новооткрита частица, посочени в работата на колаборацията BESIII [4], не съвпадат с нейната експериментална стойност. Предимство на предложението тук нов модел за ниско лежащи бозонни кварк-антикваркови състояния е, че предсказва масата на тази частица с точност, по-добра от 1% [3], което съвпада с нейната експериментална стойност в рамките на половин стандартно отклонение, а също така предсказва по-точната стойност на масата на вече известната частица $\rho(1450)$. Това стана възможно след построяването на SU(2)-версията [8] на разширения кварков модел на Намбу и Йона-Лазинио [9, 10].

В заключение ние ще обсъдим динамичното спонтанно нарушение на киралната симетрия и кварковите маси.

2. SU(2)-МОДЕЛ

В тази статия ние ще разгледаме ниско лежащи бозонни кварк-антикваркови състояния от леките u -, d - и s -кварки. За разлика от s -кварка, u - и d -кварките са почти безмасови и групата на симетрия може да бъде разширена до киралната група $SU(2)_V \times SU(2)_A$:

$$\Psi \rightarrow \exp[i\vec{\alpha}\vec{\tau}] \Psi, \quad \bar{\Psi} \rightarrow \bar{\Psi} \exp[-i\vec{\alpha}\vec{\tau}], \quad (1)$$

$$\Psi \rightarrow \exp[i\vec{\beta}\vec{\tau}\gamma^5] \Psi, \quad \bar{\Psi} \rightarrow \bar{\Psi} \exp[i\vec{\beta}\vec{\tau}\gamma^5]. \quad (2)$$

Тук $\Psi = (ud)^T$ е спинорен изодублет, $\vec{\alpha}$ и $\vec{\beta}$ са параметри на преобразованятия (1) и (2), а $\vec{\tau}$ са матриците на Паули. Базисен модел, основан върху тази симетрия, беше представен в [8]. Той включва изосинглетен скаларен σ -мезон, който отговаря за нарушение на киралната симетрия и придобиване на конституентни кваркови маси, и изотриплети на псевдоскаларни пиони $\vec{\pi}$, векторни мезони \vec{V}_μ, \vec{R}_μ и аксиално-векторни мезони \vec{A}_μ, \vec{B}_μ . Нововъдение тук е, че например в сравнение с [11] се добавят нови състояния със спин единица – \vec{R}_μ и \vec{B}_μ , които имат тензорна връзка с кварков ток. По този начин се постига пълен набор от кварк-антикваркови състояния и забележителен ефект на динамично смесване между \vec{V}_μ и \vec{R}_μ заради еднаквите им квантови числа $1^+(1^-)^1$. В резултат на това смесване възникват два физически мезона, които могат да бъдат идентифицирани с ρ и $\rho' = \rho(1450)$. Ново състояние \vec{B}_μ описва триплет b_1 -мезони заради уникалните му квантови числа $1^+(1^+)$. Масите на тези три мезона [7]:

$$m_\rho^{\text{PDG}} = 775.26 \pm 0.25 \text{ [MeV]}, \quad m_{b_1}^{\text{PDG}} = 1229.5 \pm 3.2 \text{ [MeV]}$$

и $m_{\rho'}^{\text{PDG}} = 1465 \pm 25 \text{ [MeV]}$ напълно определят ъгъла на динамично смесване

$$\theta(q^2) = \frac{1}{2} \text{arctg} \frac{\sqrt{q^2}}{86_{-75}^{+82} \text{ [MeV]}}, \quad (3)$$

който зависи от квадрата на импулса на мезона q^2 .

¹ Квантови числа $I^G(J^{PC})$ определят изоспин I , пълен ъглов момент J , G - и P -четности и зарядова четност C за неутралната компонента на изомултиплета.

От израза (3) се вижда, че знаменателят е почти нула в сравнение с числителя за импулси от порядъка 1 GeV. Това означава, че ъгълът на смесване е около 45° и почти не зависи от импулса. Действително, $\theta(m_\rho^2) = 41.8^\circ \pm 2.8^\circ$ и $\theta(m_{\rho'}^2) = 43.3^\circ \pm 3.2^\circ$, което е близо до максимално смесване. От тук можем да направим предположение, че векторните състояния \vec{V}_μ и \vec{R}_μ са максимално смесени във физическите мезони ρ и ρ' .

Ако приемем тази хипотеза, то максималното смесване води до ново съотношение между масите на трите мезона ρ , b_1 и ρ' :

$$R_{I=1} \equiv \frac{2m_\rho^2 - m_\rho m_{\rho'} + 2m_{\rho'}^2}{3m_{b_1}^2} = 1, \quad (4)$$

което може да се сравни с експерименталната стойност $R_{I=1}^{\text{exp}} = 0.96 \pm 0.03$.

3. U(1)-МОДЕЛ

До този момент ние не сме разглеждали пълен набор на възможните състояния в SU(2)-модела поради факта, че физическите скаларни и псевдоскаларни мезони са смесица от всичките u -, d - и s -кварки. Затова е необходимо построяване на SU(3)-модела, което ще бъде цел на бъдещи публикации по тази тема. Обаче адронните резонанси със спин единица се проявяват като почти чисти състояния от u - и d - или s -кварки.

В предишната глава ние вече разгледахме изотриплетни състояния със спин единица от u - и d -кварки. В тази глава ние ще разгледаме синглетни състояния с изоспин нула от u - и d -кварки и състояния от s -кварк със скрита странност. Моделът е напълно аналогичен на предишния, обаче вместо изотриплетни ние ще оперираме с U(1)-синглетни кварк-антикваркови състояния: скаларно σ , псевдоскаларно η или η' вместо $\vec{\pi}$, векторни V_μ и R_μ и аксиално-векторни A_μ и B_μ .

Ние ще разгледаме само сектор със спин единица, защото именно от тези състояния се получават физически мезони в U(1)-модел. В случай на синглетни състояния от u - и d -кварки се получават векторни мезони ω , ω'_\pm ($\omega(1420)$) и аксиално-векторни мезони h_1 , f_1 . Векторните мезони са максимално смесени състояния от V_μ и R_μ с минимална и тензорна връзка към кварките, а h_1 -мезонът е чисто състояние B_μ с тензорна връзка. Масите именно на тези мезони влизат в масово съотношение аналогичното на (4):

$$R_{I=0} \equiv \frac{2m_\omega^2 - m_\omega m_{\omega'} + 2m_{\omega'}^2}{3m_{h_1}^2} = 1. \quad (5)$$

Отчитайки масите на тези три мезона [7] $m_\omega^{\text{PDG}} = 782.65 \pm 0.12$ [MeV], $m_{h_1}^{\text{PDG}} = 1170 \pm 20$ [MeV] и $m_{\omega'}^{\text{PDG}} = 1425 \pm 25$ [MeV] получаваме експерименталната стойност $R_{I=0}^{\text{exp}} = 1.02 \pm 0.07$, която перфектно се съгласува с единица.

Състоянията със скрита странност са много интересни, защото основната таблица в [7] съдържа информация само за ниско лежащи векторни мезони ϕ и $\phi' = \phi(1680)$ с маси $m_\phi^{\text{PDG}} = 1019.461 \pm 0.016$ [MeV] и $m_{\phi'}^{\text{PDG}} = 1680 \pm 20$ [MeV]. Аксиално-векторен мезон със скрита странност $h_1(s\bar{s})$ и квантови числа $0^+(1^{+-})$ отсъства от тази таблица. Използвайки аналогичните на (4) и (5) съотношения, ние можем да предскажем масата на този мезон с точност, по-добра от 1% [3]:

$$m_{h_1(s\bar{s})}^2 = \frac{2m_\phi^2 - m_\phi m_{\phi'} + 2m_{\phi'}^2}{3} = (1415.5 \pm 13.4 \text{ [MeV]})^2. \quad (6)$$

Преди това предсказание в [3] само две колаборации са детектирвали въпросния мезон. Това са LASS [5] и Crystal Barrel [6]. Техните резултати са представени в детайлните таблици [7] съответно с масите 1380 ± 20 [MeV] и 1440 ± 60 [MeV]. Затова името на този мезон $h_1(1380)$ е фиксирано по първите данни на колаборацията LASS. Преди три години колаборация BESIII публикува по-точната стойност на масата на този мезон $1412 \pm 4 \pm 8$ [MeV] [12], обаче без да идентифицира негов изоспин. Тази година същата колаборация потвърди откритието на нова аксиално-векторна частица $h_1(1380)$ [4] с висока точност на измерване на нейните параметри, фиксирайки нейната скрита странност. Основният параметър, нейната маса, е измерен с точност от 0.5%: $1423.2 \pm 2.1 \pm 7.3$ [MeV]. Комбинирайки всички експериментални резултати до този момент със съответните експериментални грешки, получаваме по-точна стойност на масата на този мезон:

$$m_{h_1(s\bar{s})}^{\text{exp}} = 1415.7 \pm 5.5 \text{ [MeV]}, \quad (7)$$

което се намира в абсолютно съгласие (0.05σ) с нашето предсказание (6).

По този начин новото масово съотношение не само работи за известните мезони със спин единица, но може да предскаже и масата на новооткритата частица.

4. КВАРКОВИТЕ МАСИ

В тази глава ние ще обсъдим стойностите на кварковите маси в различните модели. За тази цел ще използваме само експерименталните стойности на масите на мезоните. В SU(2)-модела [8] конститuentната маса на кварка се определя като

$$m_{I=1}^2 = \frac{2(m_\rho^2 + m_{\rho'}^2) - m_{b_1}^2 - \sqrt{[2(m_\rho^2 + m_{\rho'}^2) - 3m_{b_1}^2]^2 + 8m_\rho^2 m_{\rho'}^2}}{24}$$

$$= (162 \pm 7 \text{ [MeV]})^2. \quad (8)$$

Аналогичните формули за U(1)-модела [3] са:

$$m_{I=0}^2 = \frac{2(m_\omega^2 + m_{\omega'}^2) - m_{h_1}^2 - \sqrt{[2(m_\omega^2 + m_{\omega'}^2) - 3m_{h_1}^2]^2 + 8m_\omega^2 m_{\omega'}^2}}{24}$$

$$= (151 \pm 6 \text{ [MeV]})^2 \quad (9)$$

и

$$m_{s\bar{s}}^2 = \frac{2(m_\phi^2 + m_{\phi'}^2) - m_{h_1(s\bar{s})}^2 - \sqrt{[2(m_\phi^2 + m_{\phi'}^2) - 3m_{h_1(s\bar{s})}^2]^2 + 8m_\phi^2 m_{\phi'}^2}}{24}$$

$$= (156 \pm 5 \text{ [MeV]})^2. \quad (10)$$

Интересно е, че всичките стойности за конститuentната маса на кварка се намират в добро съгласие в рамките на експерименталните грешки. Това потвърждава универсалния механизъм на спонтанното нарушение на киралната симетрия, за която Йоичиро Намбу през 2008 г. получава Нобелова награда по физика. Този механизъм е независим от хигсовия механизъм и появяване на токови маси на кварките, които са различни и нямат обяснение и до днес.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В тази работа ние разгледахме ново масово съотношение за адронните резонанси със спин единица в различни модели. Новото съотношение се основава на хипотезата за максимално смесване между векторни състояния със спин единица с минимална и тензорна връзка към кварките. Обаче в SU(2)-модела експерименталното централно значение на отношение $R_{I=1}$ (4) малко се различава от единица.

Това може да се дължи на нарушение на изоспиновата симетрия заради различни и ненулеви маси на u - и d -кварките. В тази работа ние пренебрегваме този ефект и предполагаме, че това малко разминаване идва от недостатъчно точното експериментално измерване на масата на $\rho' = \rho(1450)$ мезона. Тогава от съотношението (4) ние предсказваме близо на порядък по-точна стойност на масата на този резонанс:

$$m_{\rho'} = \frac{m_{\rho} + \sqrt{24m_{b_1}^2 - 15m_{\rho}^2}}{4} = 1499.2 \pm 4.4 \text{ [MeV]}, \quad (11)$$

което в бъдеще може да бъде проверено експериментално.

В рамките на U(1)-модела предсказаната стойност на масата на аксиално-векторения мезон със скрита странност $h_1(s\bar{s})$ [3] с висока точност експериментално е потвърдено тази година [4].

Благодарности. Авторите благодарят за частична финансова подкрепа на договор № 80-10-16 от 17.04.2018 г. на Софийски университет “Св. Климент Охридски”.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ATLAS Collaboration. *Phys. Lett. B*, 2012, **716**, 29.
- [2] CMS Collaboration. *Phys. Lett. B*, 2012, **716**, 31.
- [3] Chizhov, M. V. *JETP Lett.*, 2004, **80**, 73.
- [4] BESIII Collaboration. 2018, arXiv:1804.05536v1 [hep-ex]
- [5] LASS Collaboration. *Phys. Lett. B*, 1988, **201**, 573.
- [6] Crystal Barrel Collaboration. *Phys. Lett. B*, 1997 **415**, 280.
- [7] Particle Data Group. *Phys. Rev. D*, 2018, **98**, 030001.
- [8] Chizhov, M. V., M. N. Naydenov. In: AIP Conference Proceedings, 2019, **2075**, 090025.
- [9] Nambu, Y., G. Jona-Lasinio. *Phys. Rev.*, 1961, **122**, 345.
- [10] Nambu, Y., G. Jona-Lasinio. *Phys. Rev.*, 1961, **124**, 246.
- [11] Osipov, A. A., M. K. Volkov. *Annals Phys.*, 2017, **382**, 50.
- [12] BESIII Collaboration. *Phys. Rev. D*, 2015, **91**, 112008.