

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 539.1.07

### ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕЙТРАЛЬНЫХ МЕЗОНОВ В МЕЗОН- ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ НА УСТАНОВКЕ ГИПЕРОН-М

© 2021 г. С. В. Евдокимов<sup>a</sup>, \*, В. И. Изучеев<sup>a</sup>, Е. С. Кондратюк<sup>a</sup>, Б. В. Полищук<sup>a</sup>,  
С. А. Садовский<sup>a</sup>, А. А. Шангараев<sup>a</sup>, Ю. В. Харлов<sup>a</sup>

<sup>a</sup>НИЦ “Курчатовский институт – ИФВЭ”, Протвино, Московская обл., 142281 Россия

\*E-mail: Sergey.Evdokimov@ihep.ru

Поступила в редакцию 10.06.2021 г.

После доработки 28.06.2021 г.

Принята к публикации 12.07.2021 г.

Согласно современным теоретическим представлениям параметры нейтральных мезонов, такие как их масса и ширина, тесно связаны со средой, в которой находятся мезоны. Экспериментальные данные по изучению мезонов в ядерной среде являются востребованными для развития теоретических моделей, описывающих процессы в области непертурбативной квантовой хромодинамики (КХД). В эксперименте Гиперон-М на ускорителе У70 проводятся измерения масс и ширин нейтральных мезонов, рождающихся в мезон-ядерных взаимодействиях на различных ядрах. В данной работе описана методика прецизионного измерения параметров нейтральных мезонов, представлены результаты по измерению массы и ширины  $\omega(782)$ -мезона и предварительные результаты по измерению массы и ширины  $f_2(1270)$ -мезона. Измерения указывают на отсутствие зависимости изучаемых величин от ядерной среды.

**Ключевые слова:** модификация, масса, ширина, мезоны, мезон-ядерные взаимодействия, У70

**DOI:** 10.56304/S2079562920060202

#### ВВЕДЕНИЕ

Спонтанное нарушение киральной симметрии КХД с легкими кварками приводит к появлению Намбу-Голдстоуновских бозонов [1]. Их массы связаны с кварк-антикварковым конденсатом в вакууме  $\langle q\bar{q} \rangle_0$  соотношениями Гелл-Манна—Оакса—Реннера [2]. Другие мезоны по сути своей являются возбуждениями КХД-вакуума, и их свойства также связаны с кварк-антикварковым конденсатом. В ядерной среде при ненулевой плотности происходит изменение величины  $\langle q\bar{q} \rangle_N$  [3], приводящее к изменению свойств мезонов, таких как их масса и ширина. Процессы адронизации кварков описываются непертурбативной КХД. Таким образом, исследования свойств адронов в ядерной материи позволяют получить новые данные и лучше понять механизмы, работающие в этой области КХД. Теоретические модели предсказывают различные эффекты модификации свойств адронов в ядерной среде. Детальные обзоры по изучению модификации свойств адронов можно найти в работах [4–6].

Существующие экспериментальные исследования по этой тематике также весьма противоречивы. Например, эксперимент CBESLA/TAPS сообщил о наблюдении уширения  $\omega$ -мезона, рождаю-

щегося на различных ядрах, до 130–150 МэВ/ $c^2$  [7]. В 2005 году эта же коллаборация сообщила об уменьшении массы  $\omega$ -мезона, рождающегося в фотоядерных реакциях на ядре Nb, на 14% [8]. Повторный анализ данных не подтвердил этот результат [9]. Однако позднее в работе [10] пришли к заключению, что данные эксперимента не исключают возможность смещения массы  $\omega$ -мезона на 16%, и для исключения этого эффекта требуются более статистически обеспеченные измерения с систематическими погрешностями много меньшими достигнутых коллаборацией CBESLA/TAPS значений. Разнообразие моделей и противоречие существующих экспериментальных данных делают данную тематику исследований чрезвычайно интересной и востребованной научным сообществом.

В данной работе изложены результаты исследований масс и ширин нейтральных мезонов, рождающихся в мезон-ядерных взаимодействиях в эксперименте Гиперон-М на ускорителе У70 [11]. В разд. 1 представлено краткое описание эксперимента. В разд. 2 изложен метод оценки параметров и рассмотрены опубликованные результаты исследований для  $\omega(782)$  мезона. В разд. 3 обсуждаются ранее опубликованные результаты исследований для  $f_2(1270)$  мезона на статистике сеансов эксперимента Гиперон-М, проведенных в 2008–2009 гг.,

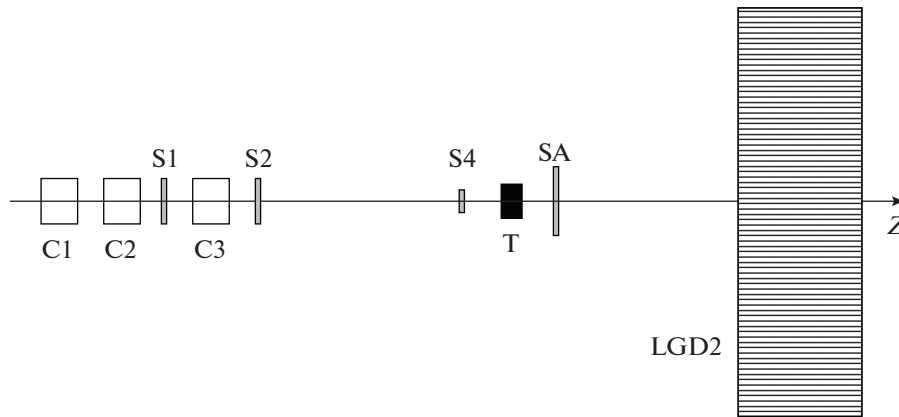


Рис. 1. Схема установки Гиперон-М.

и представлены предварительные результаты, полученные на полной статистике сеансов 2008–2018 гг. Результаты исследований суммированы в разд. 4.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТ ГИПЕРОН-М

Экспериментальная установка Гиперон-М состоит из пучкового телескопа сцинтилляционных счетчиков S1, S2, S3, черенковских пороговых счетчиков C1, C2, C3, ядерной мишени T, триггерного сцинтилляционного счетчика антисовпадений SA и электромагнитного калориметра LGD2. Схема установки изображена на рис. 1.

Пучок вторичных несепарированных положительно заряженных частиц с импульсом 7 ГэВ/с детектируется с помощью пучкового телескопа. Пучок имеет состав 53%  $\pi^+$ , 7%  $K^+$ , 40%  $p$  и интенсивность, варьируемую от сеанса к сеансу в пределах  $\sim(0.2-1.5) \cdot 10^6$  част./с. Черенковские пороговые счетчики C1, C2, C3 используются для идентификации пионов, каонов и протонов. Частицы пучка взаимодействуют с ядерной мишенью T, а с помощью сцинтилляционного счетчика SA, включенного в триггер в режиме антисовпадений и закрывающего собой апертуру электромагнитного калориметра LGD2, выделяются события полуклассического рождения нейтральных мезонов:

$$\pi^+(K^+, p) + {}^A_Z \rightarrow M_{\rightarrow n\gamma}^0 + X. \quad (1)$$

Фотоны от распада нейтральных мезонов  $M^0 \rightarrow n\gamma$  детектируются калориметром LGD2, представляющим собой матрицу  $24 \times 24$  из блоков свинцового стекла размером  $85 \times 85 \times 350$  мм<sup>3</sup> с приклеенными к их торцевой поверхности фотоумножителями. Передняя поверхность калориметра располагалась на расстоянии 370 см от ми-

шени T. Использовались 7 различных мишеней: Be, C, CH(полистирол), Al, Cu, Sn, Pb. Мишени были выбраны таким образом, чтобы иметь возможность изучать эффекты модификации свойств мезонов в зависимости от радиуса ядра-мишени, который варьировался при этом от 2.3 до 7 фм.

Регистрируемые фотоны в калориметре использовались для дальнейшего физического анализа: для реконструкции 4-импульсов распавшихся нейтральных мезонов, получения спектров их инвариантных масс и других кинематических распределений. Более подробно установка, система сбора данных эксперимента, алгоритмы калибровки детектора LGD2 и реконструкции событий описаны в работах [12–17].

## 2. ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ И ШИРИНЫ $\omega(782)$ МЕЗОНА

Нейтральные мезоны представляют собой резонансы в спектре инвариантных масс, описывающихся распределением Брейта–Вигнера [18]:

$$BW_l(m, m_R, \Gamma_R) = \left| \frac{m}{\sqrt{q}} \frac{m_R \Gamma}{m_R^2 - m^2 - i m_R \Gamma} \right|^2, \quad (2)$$

$$\Gamma = \Gamma_R \left( \frac{q}{q_R} \right)^{2l+1} \frac{D_l(r q_R)}{D_l(r q)},$$

где  $m_R$  и  $\Gamma_R$  – масса и ширина резонанса,  $l$  – его спин,  $q$  – импульс вылетающей частицы в системе покоя резонанса,  $q_R$  – импульс вылетающей частицы в системе покоя резонанса при  $m = m_R$ ,  $r = 1$  фм – характерный радиус взаимодействия,  $D_l(x)$  – факторы Блатта–Вайскопфа [19]. Истинное распределение искажается аппаратными эффектами, связанными с работой установки. Поэтому реконструированный спектр инвари-

антных масс резонанса представляет собой функцию, зависящую как от параметров резонанса — его массы и ширины, так и аппаратурной функции эксперимента. Для нахождения параметров резонанса с учетом аппаратурной функции был предложен, см. [20], следующий метод: вначале с помощью Монте-Карло (МК) моделирования находится параметризация формы реконструированного МК спектра как произведение функции Брейта-Вигнера ((2)) с табличными значениями параметров резонанса и аппаратурной функции эксперимента со свободными параметрами, что позволяет определить параметризацию аппаратурной функции. Затем полученная аппаратурная функция вместе с функцией Брейта-Вигнера, но со свободными параметрами резонанса используется уже для фитирования данных эксперимента, и таким образом находятся значения массы и ширины резонанса. Этот метод был применен для измерения параметров  $f_2(1270)$ -мезона по данным сеансов 2008–2009 гг. на установке Гиперон-М в работе [20], и позднее — для измерения массы и ширины  $\omega(782)$ -мезона по данным сеансов 2008–2018 гг. в работе [21]. В последней работе параметризация реконструированного экспериментального спектра масс  $\pi^0\gamma$ -систем была выбрана в виде

$$F_{\omega}(m, m_{\omega}, \Gamma_{\omega}) = \left| \frac{m}{\sqrt{q} m_{\omega}^2 - m^2 - i m_{\omega}(\Gamma + \Gamma_a)} \right|^2 \times \sum_{i=0}^n a_i H_i \left( \frac{m - m_{\omega}}{m_0} \right), \quad (3)$$

где  $H_i$  — функции Эрмита, которые используются для параметризации аппаратурной функции;  $m_0$ ,  $\Gamma_a$  и  $a_i$  — параметры аппаратурной функции, значения которых были получены в результате МК моделирования эксперимента.

Для построения экспериментального спектра масс  $\pi^0\gamma$ -систем в работе [21] отбирались события с тремя фотонами в конечном состоянии, и проводился их кинематический 1С фит. Все возможные комбинации фотонов проверялись при этом на совместимость с двумя конкурирующими гипотезами:  $\pi^0\gamma$  и  $\eta\gamma$ . События с  $\chi^2_{\pi^0\gamma} < 5.0$  и  $\chi^2_{\pi^0\gamma} > \chi^2_{\eta\gamma}$  использовались для построения реконструированного спектра инвариантных масс. На рис. 2 приведены полученные в результате спектры  $\pi^0\gamma$ -масс в эксперименте и в результате МК моделирования на Ве мишени. Аналогичным образом были профитированы данные и по шести другим ядерным мишеням: С, СН(полистирол), Al, Cu, Sn, Pb. При этом измерение на СН мишени является

здесь контрольным: в силу малого сечения реакции ((1)) на водороде она происходит в основном на ядрах углерода. Поэтому разница между измерениями на углеродной и полистирольной мишенях показывает уровень систематических погрешностей проведенных измерений. Полученные значения массы и ширины  $\omega(782)$ -мезона приведены на рис. 3, взятому из работы [21], из которого ясно видно, что измеренные масса и ширина  $\omega(782)$ -мезона не зависят от радиуса ядра-мишени. Значения на разных мишенях согласуются друг с другом в пределах статистических погрешностей измерений. По совокупности данных со всех мишеней в указанной работе они были определены путем фитирования зависимостей, приведенных на рис. 3 константами:

$$m_{\omega} = 782.30 \pm 0.13 (\text{стат.}) \pm 0.26 (\text{сист.}) \text{ МэВ}/c^2, \quad (4)$$

$$\Gamma_{\omega} = 8.78 \pm 0.30 (\text{стат.}) \pm 0.35 (\text{сист.}) \text{ МэВ}/c^2,$$

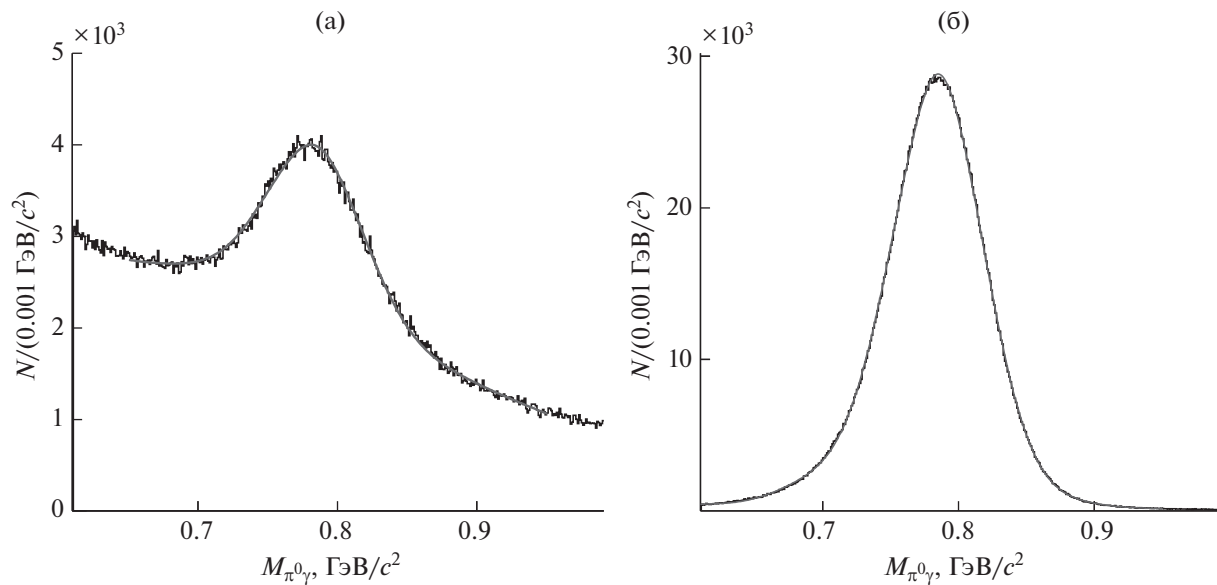
что согласуется в пределах погрешности измерения с мировыми данными PDG-2020 [22]:  $m_{\omega}^{\text{PDG}} = 782.66 \pm 0.13 \text{ МэВ}/c^2$ ,  $\Gamma_{\omega}^{\text{PDG}} = 8.68 \pm 0.13 \text{ МэВ}/c^2$ .

### 3. ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ И ШИРИНЫ $f_2(1270)$ МЕЗОНА

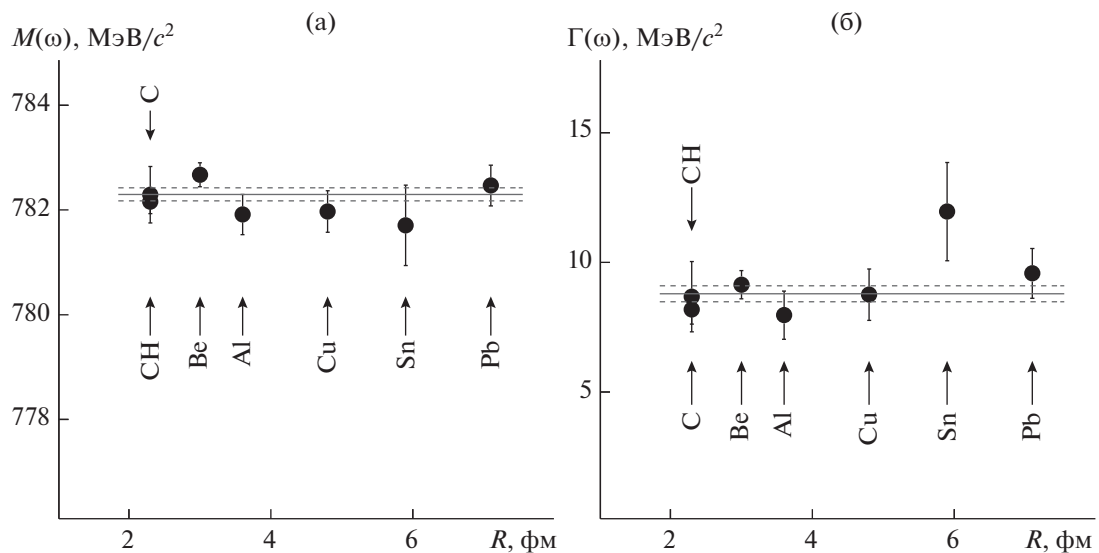
Как уже отмечалось выше, в работе [20] были представлены измерения массы и ширины  $f_2(1270)$ -мезона в эксперименте Гиперон-М на ряде ядерных мишеней по данным сеансов 2008–2009 гг. Этот мезон регистрировался в канале распада  $f_2(1270) \rightarrow 2\pi^0$ . Для выделения  $2\pi^0$ -систем в эксперименте отбирались события с 4 фотонами в конечном состоянии. К ним применялась процедура кинематического 2С фита с двумя конкурирующими гипотезами:  $2\pi^0$  и  $\eta\pi^0$ . Для анализа отбирались события, для которых  $\chi^2_{2\pi^0} < 5.0$  и  $\chi^2_{2\pi^0} > \chi^2_{\eta\pi^0}$ . Параметризация полученного в результате указанного отбора спектра масс  $2\pi^0$ -систем была выбрана в виде

$$F(m, m_{f_2}, \Gamma_{f_2}) = \text{BW}_2(m, m_{f_2}, \Gamma_{f_2}) P_{11}((m - m_{f_2})/m_0), \quad (5)$$

где  $m_{f_2}, \Gamma_{f_2}$  — масса и ширина  $f_2(1270)$  мезона, а  $P_{11}((m - m_{f_2})/m_0)$  — полином степени 11, коэффициенты которого были определены из МК моделирования путем фитирования реконструированного спектра  $f_2(1270)$  мезона функцией (5) с фиксированными значениями параметров  $m_{f_2}$  и  $\Gamma_{f_2}$ . В результате были получены следующие значения параметров резонанса:



**Рис. 2.** Реконструированные спектры масс  $\pi^0\gamma$ -событий в эксперименте (а) и МК моделировании (б) на Be мишени. Сплошными линиями показаны фитирования спектров параметризацией (3). Рисунок воспроизведен из работы [21].

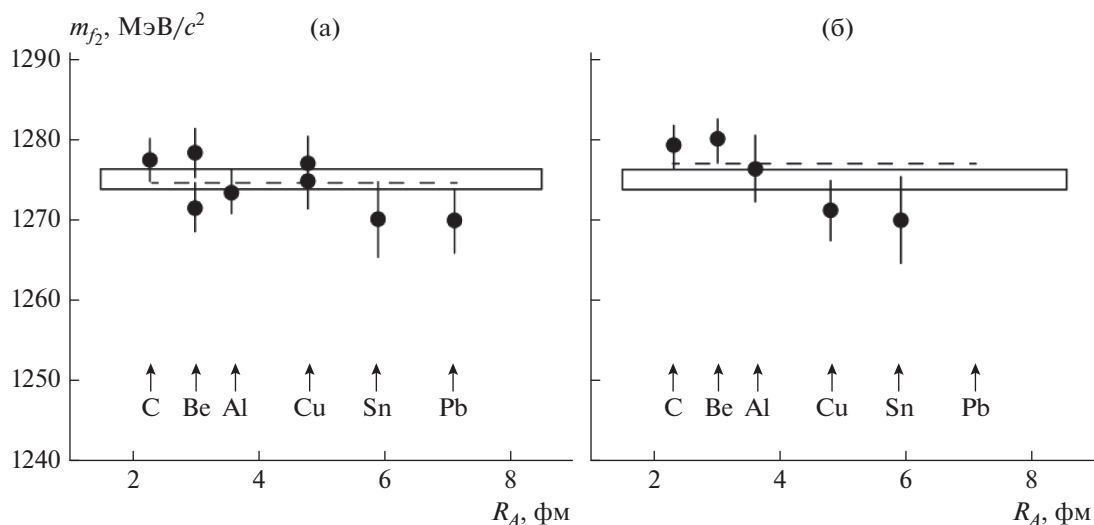


**Рис. 3.** Результаты измерений массы (а) и ширины (б)  $\omega(782)$  мезона на различных ядерных мишенях по данным сеансов 2008–2018 гг. Сплошными линиями показаны результаты фитирования зависимостей константами, а штриховыми – погрешности измерения. Рисунок воспроизведен из работы [21].

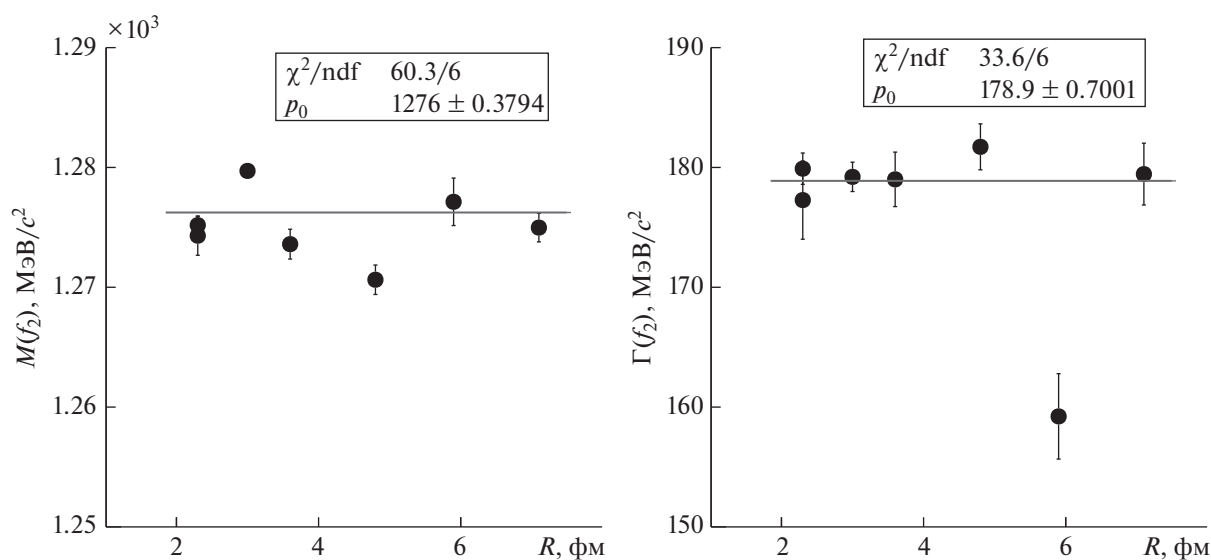
$$\begin{aligned} m_{f_2} &= 1275.8 \pm 1.0 (\text{стат.}) \pm 0.4 (\text{сист.}) \text{ МэВ}/c^2, \\ \Gamma_{f_2} &= 190.3 \pm 1.9 (\text{стат.}) \pm 1.8 (\text{сист.}) \text{ МэВ}/c^2, \end{aligned} \quad (6)$$

которые позволили уточнить мировые данные и были включены в PDG-2014 [23]. Измеренные в этой работе значения масс  $f_2(1270)$  мезона приведены на рис. 4. Полученные зависимости не исключают наличия тенденции уменьшения массы

$f_2(1270)$ -мезона с увеличением радиуса ядра-мишени. Однако статистические погрешности измерений не позволяют сделать окончательный вывод. Набранная позднее статистика была увеличена в  $\sim 5$  раз, что открывает дополнительные возможности по уточнению проведенных измерений. Это обстоятельство простимулировало дальнейший анализ данных на полной статистике



**Рис. 4.** Результаты измерения массы  $f_2(1270)$  мезона в работе [20] на различных ядерных мишенях по данным сеансов 2008 (а) и 2009 (б) годов в эксперименте Гиперон-М. Штриховыми линиями показаны результаты фитирования полученных данных константами. Прямоугольной областью отмечено табличное значение массы  $f_2(1270)$  мезона. Рисунок воспроизведен из работы [20].



**Рис. 5.** Предварительные результаты измерений массы (слева) и ширины (справа)  $f_2(1270)$ -мезона на различных ядерных мишенях по данным сеансов 2008–2018 гг. эксперимента Гиперон-М. Сплошными линиями показаны результаты фитирования  $R_A$ -зависимостей параметров резонанса константами.

сеансов 2008–2018 гг. с целью поиска возможной модификации массы  $f_2(1270)$ -резонанса.

Статистика сенсов 2008–2018 гг. была просуммирована по каждой ядерной мишени отдельно. При этом использовалась аналогичная процедура анализа данных, как и в работе [20]. Полученные предварительные результаты представлены на

рис. 5. Результаты показывают отсутствие какой-либо зависимости параметров  $f_2(1270)$ -мезона от радиуса ядра-мишени. Фитирование полученных спектров дает следующие результаты:

$$\begin{aligned} m_{f_2} &= 1276.0 \pm 0.3 (\text{стат.}) \text{ МэВ}/c^2, \\ \Gamma_{f_2} &= 184.6 \pm 0.5 (\text{стат.}) \text{ МэВ}/c^2. \end{aligned} \quad (7)$$

При этом статистические точности суммарных измерений массы ( $0.3 \text{ МэВ}/c^2$ ) и ширины ( $0.5 \text{ МэВ}/c^2$ ) допускают возможность уточнения мировых данных, которые в настоящее время равны

$m_{f_2} = 1275.5 \pm 0.8 \text{ МэВ}/c^2$ ,  $\Gamma_{f_2} = 186.7^{+2.2}_{-2.5} \text{ МэВ}/c^2$ , см. [22].

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В эксперименте Гиперон-М проводятся систематические измерения параметров нейтральных мезонов, рождающихся в ядерной материи различных атомных ядер. Полученные результаты измерения массы и ширины  $\omega(782)$ -мезонов на семи ядерных мишенях: Be, C, CH, Al, Cu, Sn, Pb, — свидетельствуют об отсутствии зависимости указанных параметров резонанса от радиуса ядра-мишени, на котором они образовались. Совокупные результаты измерений параметров по всем мишеням хорошо согласуются с мировыми данными PDG-2020 по  $\omega(782)$ -мезону.

Проведенные в 2008–2009 гг. измерения массы и ширины  $f_2(1270)$ -мезона не исключают возможного эффекта модификации его параметров в зависимости от радиуса ядра-мишени. Для уточнения этих результатов в настоящее время проводятся прецизионные измерения указанных параметров на полной статистике эксперимента Гиперон-М по данным сеансов 2008–2018 гг. Представленные предварительные результаты указывают на отсутствие эффектов модификации параметров  $f_2(1270)$ -мезона в зависимости от радиуса ядра-мишени. Обработка данных продолжается.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00266.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

- Goldstone J., Salam A., Weinberg S. // Phys. Rev. 1962. V. 127. P. 965.
- Gell-Mann M., Oakes R.J., Renner B. // Phys. Rev. 1968. V. 175. P. 2195.
- Cohen T.D., Furnstahl R.J., Griegel D.K. // Phys. Rev. C. 1992. V. 45. P. 1881.
- Post M., Leupold S., Mosel U. // Nucl. Phys. A. 2004. V. 741. P. 81.
- Hayano R.S., Hatsuda T. // Rev. Mod. Phys. 2010. V. 82. P. 2949.
- Bogner S.K., Furnstahl R.J., Schwenk A. // Prog. Part. Nucl. Phys. 2010. V. 65. P. 94.
- Kotulla M., Trnka D., Muhlisch P., et al. (CBELSA/TAPS Collab.) // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. P. 192302; Phys. Rev. Lett. . 2015. V. 114. P. 199903 (E).
- Trnka D., Anton G., Bacelar J.C.S., et al. (CBELSA/TAPS Collab.) // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 94. P. 192303.
- Nanova M., Metag V., Anton G., et al. (CBELSA/TAPS Collab.) // Phys. Rev. C. 2010. V. 82. P. 035209.
- Mosel U. // EPJ Web Conf. 2017. V. 134. P. 03004.
- Aseev A.A., Bogolyubskii M.Yu., Viktorov V.A., et al. (Hyperon-M Collab.) // IHEPh Preprint No. 2002-3. 2002. Protvino: Inst. High Energy Phys.
- Bogolyubskii M.Yu., Viktorov V.A., Petrov V.S., et al. (Hyperon-M Collab.) // Instrum. Exp. Tech. 2006. V. 49. P. 61.
- Bogolyubsky M.Yu., Viktorov V.A., Onuchin V.A., et al. (Hyperon-M Collab.) // Instrum. Exp. Tech. 2007. V. 50. P. 664.
- Akimenko S.A., Bannikov A.V., Belousov V.I., Blik A.M., Kolosov V.N., Kut'in V.M., Krumshstein Z.V., Pavlinov A.I., Solov'ev A.S. // IHEPh Preprint No. 82-149. 1982. Serpukhov: Inst. High Energy Phys.
- Akimenko S.A., Bannikov A.V., Belousov V.I., Blik A.M., Kolosov V.N., Kut'in V.M., Krumshstein Z.V., Pavlinov A.I., Solov'ev A.S. // Prib. Tekh. Eksp. . 1984. No. 1. P. 66.
- Batusov V.Yu., Rusakov N.L. // JINR Preprint R1-95-423. 1995. Dubna: JINR.
- Bogolyubskii M.Yu., Patalakha D.I., Polishchuk B.V., Sadovsky S.A., Solov'ev A.S., Stolpovsky M.V., Kharlov Yu.V. // Instrum. Exp. Tech. 2011. V. 54. P. 682.
- Alde D., Binon F.G., Boutemour M. et al. (GAMS Collab.) // Eur. Phys. J. A. 1998. V. 3. P. 361.
- Blatt J., Weisskopf W. Theoretical Nuclear Physics. 1952. New York: John Wiley & Sons. P. 359.
- Bogolyubskii M.Yu., Evdokimov S.V., Izucheev V.I., Patalakha D.I., Polishchuk B.V., Sadovsky S.A., Soloviev A.S., Stolpovsky M.V., Kharlov Yu.V., Kuzmin N.A., Obudovsky V.P., Petukhov Yu.P., Sychkov S.Ya. // Phys. At. Nucl. 2013. V. 76. P. 1324.
- Evdokimov S.V., Izucheev V.I., Kondratyuk E.S., Polishchuk B.V., Sadovsky S.A., Kharlov Y.V., Shangaraev A.A. // JETP Lett. 2021. V. 113. P. 289.
- Zyla P.A. et al. (Particle Data Group) // Prog. Theor. Exp. Phys. 2020. V. 2020. P. 083C01.
- Olive K.A. et al. (Particle Data Group) // Chin. Phys. C. 2014. V. 38. P. 090001.

## Measurement of Parameters of Neutral Mesons Produced in Meson-Nucleus Interactions in Hyperon-M Experiment

S. V. Evdokimov<sup>1</sup>, \*, V. I. Izucheev<sup>1</sup>, E. S. Kondratyuk<sup>1</sup>, B. V. Polishchuk<sup>1</sup>,  
S. A. Sadvovskiy<sup>1</sup>, A. A. Shangaraev<sup>1</sup>, and Yu. V. Kharlov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Logunov Institute of High Energy Physics, National Research Centre “Kurchatov Institute”,  
Protvino, Moscow oblast, 142281 Russia*

*\*e-mail: Sergey.Edokimov@ihep.ru*

Received June 10, 2021; revised June 28, 2021; accepted July 12, 2021

According to modern theories parameters of neutral mesons such as their mass and width are tightly related to medium in which mesons are present. Experimental data on the study of mesons in a nuclear medium are in demand for the development of theoretical models describing processes in the field of nonperturbative quantum chromodynamics (QCD). In the Hyperon-M experiment at the U70 accelerator, measurements are made of the masses and widths of neutral mesons produced in meson-nuclear interactions on various nuclei. This paper describes a technique for precision measurement of the parameters of neutral mesons, presents the results on the measurement of the mass and width of the  $\omega(782)$ -meson and preliminary results on the measurement of the mass and width of the  $f_2(1270)$ -meson. The measurements indicate that there is no dependence of the quantities under study on the nuclear environment.

**Keywords:** modification, mass, width, mesons, meson-nucleus interactions, U70