



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В.Г. Гришин, М.И. Подгорецкий

P - 1508

РЕЗОНАНСНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
БЫСТРЫХ ЧАСТИЦ С ЯДРАМИ

Дубна 1964

В.Г. Гршина, М.И. Подгорецкий

P-1508

РЕЗОНАНСНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
БЫСТРЫХ ЧАСТИЦ С ЯДРАМИ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Дубна 1964

2230/1, 28

А н н о т а ц и я

Рассмотрены характерные черты резонансного взаимодействия быстрых мезонов с ядрами в той области энергий, где возможно образование изобар N^* или Y^* . Показано, что при этом возможно также образование так называемой ядерной изобары. В случае упругого рассеяния ширина и масса ядерной изобары определяются только шириной соответствующего резонанса и взаимодействием изобары с нуклонами ядра. Увеличение ширины изобарного состояния ядер, связанное с движением нуклонов в ядре, отсутствует. Аналогичное заключение справедливо и для неупругих двухчастичных реакций. Изучение положения и ширины максимума в сечении взаимодействия мезонов с ядрами позволяет получить сведения о характере Y^*N и NN^* взаимодействий. Особенно интересны с этой точки зрения исследования реакций типа $K^-d \rightarrow \Lambda n$, $K^-He_2^4 \rightarrow \Lambda H_1^3$ и т.п.

Abstract

Some characteristic features of the resonance interaction of fast mesons with nuclei in the energy region, where the N^* and Y^* isobar production is possible, are considered. It is shown that the so-called nuclear isobar is also likely to be produced. In the case of elastic scattering the width and the mass of the nuclear isobar are determined only by the width of the corresponding resonance and by the interaction of the isobar with the nucleons of the nucleus. There is no increase in the width of the isobar state of nuclei due to the nucleon motion in the nucleus. A similar conclusion holds also for inelastic two-particle reactions. The study of the position and the width of the maximum in the cross section for meson interaction with nuclei allows to obtain some information about the character of Y^*N and NN^* interactions. From this point of view it is especially interesting to investigate reactions of the type $K^-d \rightarrow \Lambda n$, $K^-He_2^4 \rightarrow \Lambda H_1^3$ and the like.

В последние годы при исследовании взаимодействия элементарных частиц с нуклонами была открыта целая серия резонансов^{1/}. В настоящее время известны шесть (πN) резонансов /в дальнейшем они будут обозначаться, как N^* /, три (KN) резонанса (Y^*), три резонансных системы π -мезонов с гиперонами и несколько резонансных систем мезонов.

Цель настоящей работы заключается в выяснении свойств аналогичных ядерных резонансных состояний, в которых один из нуклонов ядра заменен какой-либо изобарой^{2/}. В дальнейшем обсуждается образование ядерных изобар как в процессах упругого рассеяния мезонов на ядрах, так и в соответствующих неупругих взаимодействиях.

§ 1. Резонансные взаимодействия быстрых частиц с ядрами

Взаимодействие быстрых частиц с ядрами рассмотрим для простоты в двух предельных случаях: "узкого" и "широкого" резонансов. В первом случае время жизни резонанса много больше характерного ядерного времени, т.е. его ширина мала по сравнению с расстояниями Δ между ядерными уравнениями $/\Gamma < 5-10 \text{ Мэв}/$, во втором - имеет место обратная ситуация^{х/}. Все известные N^* и Y^* - изобары имеют $\Gamma = 100 \text{ Мэв}$ и только Y^* с $M = 1520 - \Gamma = 16 \text{ Мэв}$. В последнем случае не исключено появление некоторых свойств, характерных для "узкого" резонанса.

Процесс взаимодействия мезонов с ядрами A в случае "узкого" резонанса можно рассматривать как две последовательные реакции - образование изобарного ядра A' и его распад. Вероятность образования A' определяется амплитудой реакции



и формфактором

^{х/} Аналогичное разделение используется в литературе при обсуждении каскадных процессов с участием u -квантов, например, uu -переходов или резонансного рассеяния u -квантов на ядрах, входящих в состав молекул или кристаллов. Роль Δ в этом случае играет расстояние между уровнями молекулы, кристалла и т.д.

$$F_1(q_1) = \int \Psi_A^* \Psi_A e^{\frac{i \vec{q}_1 \vec{r}}{\hbar}} dr . \quad /2/$$

Здесь Ψ_A - и $\Psi_{A'}$ - волновые функции соответствующих состояний ядер A и A' , \vec{q}_1 - импульс, переданный ядру в реакции

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi \\ \tilde{k} \end{array} \right. + A \rightarrow A' . \quad /3/$$

Распад ядра A' определяется формфактором

$$F_2(q_2) = \int \Psi_{A'}^* \Psi_{A'} e^{\frac{i \vec{q}_2 \vec{r}}{\hbar}} dr , \quad /4/$$

где ψ_f - волновая функция конечного состояния \vec{q}_2 - импульс, переданный ядру при распаде. Таким образом, для долгоживущего резонанса процесс взаимодействия мезонов с ядрами определяется двумя формфакторами F_1 и F_2 и сечением реакции

/1/. Из всех возможных состояний ядра A' в силу закона сохранения энергии реализуется обычно только одно состояние /основное или возбужденное/. В случае же его распада может образоваться целый спектр возможных состояний. Вероятность распада изобарных ядер по различным каналам определяется формфактором $F_2(q_2)$.

В случае "широкого" резонанса взаимодействие быстрых частиц с ядрами уже не имеет смысла рассматривать как две последовательные реакции ввиду малого времени жизни изобарного ядра. Поэтому весь процесс описывается теперь одним формфактором

$$F(q) = \int \Psi_A \Psi_A^* e^{\frac{i \vec{q} \vec{r}}{\hbar}} dr , \quad /5/$$

где q - импульс, переданный ядру, и амплитудой соответствующего элементарного процесса /см. § 2 и § 3/.

§ 2. Упругое рассеяние

При упругом рассеянии быстрых частиц на ядрах в области "узкого" резонанса $\Psi_A = \Psi_{A'}$, $|\vec{q}_1| = |\vec{q}_2|$ и

$$F_1(q_1) = F_2(q_2) = \int \Psi_A^* \Psi_A e^{\frac{i \vec{q} \vec{r}}{\hbar}} dr , \quad /6/$$

т.е. сечение рассеяния определяется одним формфактором.

Следует отметить, что ядерные изобары будут образовываться при другой энергии падающих частиц, чем в случае свободных нуклонов. Частично смещение

вызвано различием масс нуклонов и ядер, т.е. является чисто кинематическим. Во-вторых, смещение резонансов будет также определяться возможным различием в энергиях связи нуклона и изобары в ядре. В связи с этим представляется интересным измерить сечение рассеяния K^- -мезонов на легких ядрах в области Y^* резонанса с $M = 1520$ Мэв и $\Gamma = 16$ Мэв. Здесь можно ожидать смещения положения резонанса, например, из-за того факта, что однонионный обмен между Y^* и N запрещен /изотопический спин $Y^* - \text{резонанса } I = 0$ /, в то время как в NN - взаимодействия он играет существенную роль. Таким образом, исследование положения ядерных резонансов дает возможность изучить некоторые характеристики взаимодействия изобар с нуклонами.

В случае "широкого" резонанса упругое рассеяние описывается формфактором /5/ с $\Psi_1 = \Psi_A$, и в борновском приближении амплитуда этого процесса $F(q, E)$ будет иметь вид /3/

$$F(q, E) = \Psi(q, E) F_3(q), \quad /7/$$

где $\Psi(q, E)$ - амплитуда рассеяния мезонов на свободных нуклонах. Существенно, что при достаточно малых углах рассеяния переданный импульс также мал и поэтому сечение может быть значительным.

В обоих разобранных выше предельных случаях ширина изобарных состояний ядер, как видно из формул /2/ и /7/, будет приблизительно равна ширине соответствующего резонанса. При выводе /2/ и /7/, конечно, предполагалось, что время жизни свободных и связанных изобар одинаково. Если же для изобар, входящих в состав ядер, имеются новые каналы распада, то будет наблюдаться увеличение ширины ядерных резонансов. Укажем в качестве примера реакции



Возможны также и соответствующие многионные процессы. Изучение уширения ядерных резонансов дает возможность оценить сечение этих реакций, которые с интересующей нас точки зрения аналогичны безмезонным распадам гиперфрагментов.

Дифракционное рассеяние быстрых частиц на ядрах несколько усложняет картину резонансного рассеяния. Та часть дифракционного рассеяния, которая соответствует неупругим резонансным реакциям, будет давать пик в сечении рассеяния, ширина которого больше ширины резонанса. Это "размытие" пика вызвано

влиянием фермиевского движения нуклонов в ядре. Оценки показывают, что дифракционный пик для "узкого" резонанса будет иметь $\Gamma = 60 \text{ Мэв}$ при $p_c \approx 300 \text{ Мэв}^{1/4}$. Остальные неупругие процессы будут давать гладкий фон в сечении рассеяния.

При рассеянии быстрых частиц на средних и тяжелых ядрах, когда вероятность столкновения велика, ядра становятся практически "черными" для широкого интервала значений энергий частиц, поэтому никаких резонансных особенностей в сечениях не будет. В связи с этим все замечания, сделанные выше, относятся в основном к легким ядрам.

Имеющиеся экспериментальные данные по сечениям упругого рассеяния π -мезонов на ядрах очень скудны и не позволяют сделать какие-либо заключения о свойствах ядерных резонансов. Отдельные значения сечений, полученные в области Δ^* -резонанса, свидетельствуют, по-видимому, о возникновении ядерной изобары при $p_c \approx 300 \text{ Мэв}^{1/5}$. Полностью отсутствуют данные о рассеянии \bar{k} -мезонов на ядрах в области Υ^* -резонансов. В связи со сказанным ясно, что экспериментальное изучение рассеяния быстрых частиц на ядрах в области резонансов представляет в настоящее время большой интерес.

§ 3. Неупругие процессы

Различного рода неупругие процессы взаимодействия быстрых частиц с ядрами будут также иметь резонансный характер, если элементарный процесс взаимодействия частиц с нуклонами ведет к образованию изобар; ширина и положение ядерных резонансов определяются характером соответствующих реакций.

Рассмотрение начнем с процессов неупругого рассеяния быстрых частиц на ядрах, например,

$$\begin{aligned} & \pi^+ + C_6^{12} \rightarrow C_6^{12*} + \pi^+ \quad \text{10/} \\ \text{или} & \pi^- + C_6^{12} \rightarrow C_6^{12*} + \pi^- \quad \text{11/} \end{aligned}$$

Здесь C_6^{12*} обозначает возбужденное состояние ядра углерода. Вероятность этого процесса определяется формфактором /5/ для "широкого" резонанса и соответственно двумя формфакторами /2/ и /4/ для "узкого" резонанса. Все заключения, сделанные выше относительно положения и ширины ядерного резонанса для упругого рассеяния, остаются справедливыми и в этом случае, если выделяется определенное состояние возбужденного ядра^{х/}.

^{х/} Выделение определенных состояний возбужденных ядер практически можно провести для низких уровней легких ядер, когда $\Delta = /5 - 10/ \text{ Мэв}$.

Однако следует подчеркнуть, что в отличие от упругого рассеяния, где имеется фон, связанный с дифракционным рассеянием, в рассматриваемом случае фон, связанный с другими неупругими процессами, будет отсутствовать.

Это обстоятельство делает особенно перспективным исследование реакций типа /10/ и /11/ с целью изучения вопросов, связанных с Y^*N и NN^* взаимодействием.

Аналогичная ситуация имеет место и для процессов типа

$$\pi^+ + C_6^{12} \rightarrow N_7^{12} + \pi^0, \quad /12/$$

$$N_7^{12} \rightarrow C_6^{12} + e^+, \quad /12'/$$

$$\pi^- + C_6^{12} \rightarrow B_5^{12} + \pi^0, \quad /13/$$

$$B_5^{12} \rightarrow C_6^{12} + e^-. \quad /13'/$$

которые очень удобны для изучения с помощью методов, связанных с регистрацией β -распада.

Известно, что ядра N_7^{12} , B_5^{12} и C_6^{12} / с энергией возбуждения 16, 11 Мэв/ составляют изотопический триплет /8/. Отсюда в силу изотопической инвариантности сечения реакций /10/, /12/ и /13/ должны быть равны между собой. Это обстоятельство может быть использовано при совместном изучении этих процессов.

Приведем еще ряд неупругих реакций, которые удобны для изучения ядерных резонансов, т.к. в этом случае также нет "размытия" резонанса из-за ферми-евского движения нуклонов в ядре:

$$\pi^+ + d \rightarrow p + p, \quad /14/$$

$$\pi^+ + H_1^3 \rightarrow p + d, \quad /15/$$

$$\pi^- + He_2^3 \rightarrow n + d, \quad /15'/$$

$$k^- + d \rightarrow \Lambda + n, \quad /16/$$

$$k^0 + d \rightarrow \Lambda + p, \quad /16'/$$

$$k^- + He_2^4 \rightarrow \Lambda + H_1^3, \quad /17/$$

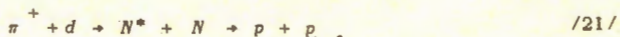
$$k^- + He_2^4 \rightarrow \Sigma^0 + H_1^3, \quad /18/$$

$$k^- + He_2^4 \rightarrow \Sigma^- + He_2^3, \quad /19/$$

и т.п. Между сечениями некоторых из перечисленных выше реакций существуют определенные изотопические соотношения, которые могут оказаться полезными при исследовании этих процессов. Так сечения реакций /15/ и /15'/, /16/ и /16'/ равны между собой, а между сечениями реакций /18/ и /19/ имеется соотношение

$$2\sigma(k^- \text{He}_2^4 + \Sigma^0 \text{H}_1^3) = \sigma(k^- \text{He}_2^4 + \Sigma^- \text{He}_2^3). \quad /20/$$

Экспериментальное исследование реакции /14/ показало, что имеется пик в сечении при $p \approx 280$ Мэв с $\Gamma \approx 100$ Мэв^{17/}. Характеристики этого резонанса совпадают с характеристиками известной N^* - изобары. Теоретические расчеты /8,9,10/ показывают, что поведение сечения реакции /14/ хорошо согласуется с предположением о следующем механизме



Имеющиеся данные о сечениях реакции /15/ также указывают на наличие максимума, соответствующего резонансному взаимодействию π^- - мезонов с нуклонами /11/. В отношении реакций /16/ - /19/ в настоящее время ничего не известно, хотя их исследование кажется весьма интересным.

Изучение энергетической зависимости полного неупругого сечения взаимодействия быстрых мезонов с ядрами также представляет интерес с точки зрения исследования свойств изобарных ядер.

В случае "узкого" резонанса сечение неупругого взаимодействия будет иметь ряд резонансных пиков, соответствующих образованию изобары на нижних уровнях ядра, ширина которых определяется шириной изобары и вероятностью ее распада по новым каналам /см. /8/ и /9//. Кроме отдельных пиков, в сечении будет наблюдаться широкий максимум, связанный с образованием изобары в свободном состоянии. В этом случае следует учитывать и фермиевское движение нуклонов в ядре, которое приведет к дополнительному уширению максимума /4/. Вся эта резонансная картина будет наблюдаться на гладком фоне нерезонансного хода сечения.

В случае широкого резонанса картина неупругого взаимодействия будет еще более сложной, и выделение резонансных пиков в сечении представляет большие трудности.

Экспериментальные данные по сечениям неупругого взаимодействия π^- - мезонов с ядрами Ве и С показывают, что имеется широкий максимум при $p \approx 190$ Мэв/с с $\Gamma \approx 200$ Мэв /12/. Такое значительное уширение резонанса

N^* может быть связано с движением нуклонов в ядре, с новыми каналами распада изобары и т. п. Сечение неупругого взаимодействия π^- -мезонов с ядрами свинца имеет почти постоянное значение в интервале энергий от 70 до 300 Мэв. Этот результат, по-видимому, связан с тем фактом, что ядро свинца является практически черным телом для π^- -мезонов в этом интервале энергий /см. § 2/. Таким образом, изучение полного сечения неупругого взаимодействия частиц с ядрами не является очень удобным для наших целей.

Однако и в этом случае можно выделить такую часть неупругих взаимодействий, которая будет обогащена резонансными событиями. Действительно, если, например, отбирать только те π^+C взаимодействия, в которых есть быстрые протоны и нет π^- мезонов, то тем самым выделяются события в основном связанные с резонансными реакциями типа /21/. Для контроля можно использовать изотопические соотношения. Например, вычисления по схеме, аналогичной /21/, показывают, что для ядер с одинаковым числом протонов и нейтронов число быстрых протонов будет в 10 раз больше, чем число быстрых нейтронов, если пренебречь интерференционными явлениями. Аналогичные соображения можно привести и для случая взаимодействия K^- мезонов с ядрами.

В заключение отметим, что для выделения ядерных изобарных состояний можно также использовать приемы, которые употребляются для выделения резонансных состояний элементарных частиц. Например, вычисление эффективных масс соответствующих систем, кинематику процессов и т.п. С помощью этих методов можно изучать не только ядерные изобары, но и возможные связанные состояния ядер и бозонных резонансов.

Мы признательны Б.Н. Валуеву, В.И. Москалеву, В.И. Огиевскому, Н.И. Петрову, О.В. Савченко, Д.С. Чернавскому за полезные обсуждения и помощь в работе.

Л и т е р а т у р а

1. M. Roos. Rev. Mod. Phys., 35, 314 (1963).
2. A.N.Diddens, E.W.Jenkins, T.E.Kycia and K.F.Filey. Phys. Rev. Lett., 10, 262 (1963);
- И.М. Граменицкий, М.И. Подгорецкий, О.А. Хрусталеv. Препринт ОИЯИ Р-699 Дубна, 1961.
3. Г.Бете. Проблемы современной физики 6, 21, 1958.
4. В.М. Мальцев. Препринт ОИЯИ Р- 132, Дубна, 1958.
5. А.Е. Игнатенко, А.И. Мухин, Б.М. Понтекорво. ДАН, 103, 395, 1955. ; ЖЭТФ, 31, 345, 1956.

6. F. Aizenberg-Selove, T. Lauritsen, Nucl. Phys., 11, (1959).
7. М.Г. Мещеряков, Б.С. Негаев. ДАН, 100, 677, 1955,
Б.С. Негаев, Л.Б. Парфенов ЖЭТФ, 34, 766, 1958.
8. S. Matsuyama, H. Miyazawa, Progr. of Theor. Phys., 9, 492 (1963).
9. S. Mandelstam, Proceedings of the Roy. Soc., 244, 491 (1958).
10. Z. Fraenkel, Phys. Rev. 130, 2407 (1963).
11. Ю.К. Акимов, О.В. Савченко, Л.М. Сороко. Препринт ОИЯИ Р-716, 55, Дубна, 1961.
12. А.Е. Игнатенко, А.И. Мухин, Е.Б. Озеров, Б.М. Понтекорво. ЖЭТФ 31, 545, 1956; ДАН, 103, 395, 1955.

$$\begin{array}{cccc} a + b & \rightarrow & c + d \\ P_1 & & P_3 & P_4 \end{array}$$

$$a + E_{\text{пр}} \rightarrow a + E_{\text{пр}}'$$

$$P_3 - P_1$$

$$P_4 - P_2$$

P-1508

Гришин В.Г., Подгоренский М.И.

Резонансные взаимодействия быстрых частиц с ядрами.

Препринт Объединенного института ядерных исследований.

Дубна, 1964.

P-1508

Grishin V.G., Podgoretsky M.I.

Resonance Interactions of Fast Particles with Nuclei

Preprint, Joint Institute for Nuclear Research.

Dubna, 1964.