

С 343 а

Б-484

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

4 - 6067

П. Береги

ИССЛЕДОВАНИЕ
РЕЗОНАНСНЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ
С ПОМОЩЬЮ ТОЧНО РЕШАЕМОЙ
ТРЕХЧАСТИЧНОЙ МОДЕЛИ

Специальность 055 - физика атомного ядра
и космических лучей

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

кандидат физических наук

И. Ловаш

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

В.В. Балашов

доктор физико-математических наук

Б.Н. Захарьев

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт
теоретической и экспериментальной физики.

Автореферат разослан " " "

1971 г.

Защита диссертации состоится " " "

1971 г.

на заседании Ученого Совета Лаборатории теоретической физики,
г. Дубна.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

4 - 6067

П. Береги

ИССЛЕДОВАНИЕ
РЕЗОНАНСНЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ
С ПОМОЩЬЮ ТОЧНО РЕШАЕМОЙ
ТРЕХЧАСТИЧНОЙ МОДЕЛИ

Специальность 055 - физика атомного ядра
и космических лучей

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Явление резонанса в ядерных реакциях впервые было обнаружено Г. Позе ^{/1/} в эксперименте, в котором тонкая алюминиевая мишень бомбардировалась моноэнергетическими α - частицами. Через несколько лет были также открыты резонансы при рассеянии нейтронов ^{/2/} и протонов ^{/3/}. В первом параграфе первой главы диссертации рассматриваются две стадии развития теории этих, так называемых, резонансных ядерных реакций, первая из которых характеризовалась формальными, а вторая - динамическими подходами. Первые являются математически корректными, но не могут дать сведений о структуре, о динамике атомных ядер. Они ничего не говорят о том, где должны появиться резонансы, какие ширины ожидаются. В динамических теориях учитываются силы, действующие между нуклонами, и вводятся уравнения движения, описывающие движение нуклонов в присутствии этих сил. При этом отказываются от математической точности и общности, и в явлениях стараются охватить то,

что для них наиболее характерно. В этих теориях очень существенным ограничением является то, что в них рассматриваются только случаи, когда система содержит одновременно не более одной частицы в непрерывном спектре, т.е. практически изучаются "эффективные двухчастичные задачи" /4/. Естественным шагом вперед в теории ядерных реакций является правильный учет трехчастичных эффектов, на чем будет сконцентрировано внимание во второй и третьей главах диссертации.

Второй параграф первой главы посвящен описанию трудностей, появляющихся при решении квантово-механической задачи трех тел, а также методам их преодоления. Более подробно рассмотрены уравнения Фаддеева /5/, которые оказываются наиболее практичными при изучении задачи рассеяния трех тел.

Большое преимущество уравнений Фаддеева заключается в том, что при использовании нелокальных сепарабельных двухчастичных потенциалов они приводятся к связанной системе одномерных интегральных уравнений. В данной работе применяются именно такие потенциалы. Поэтому в третьем параграфе первой главы рассмотрены вопросы: метод нахождения решения задачи двух тел в явном виде при использовании таких потенциалов, число возможных в двухчастичных системах связанных состояний и резонансов, которые получаются с их помощью, а также теорема Левинсона для этих потенциалов.

В диссертации показано, что в случае нелокальных сепарабельных потенциалов число возможных резонансов в отличие от максимального числа связанных состояний не зависит от количества так называемых "притягивающих" членов потенциала. При подходящем выборе формфакторов и их параметров можно полу-

чить одно связанное состояние и несколько резонансов даже с потенциалом типа $V(k, k') = -g(k)g(k')$ /6/. Этот факт может быть весьма полезным при решении системы одномерных интегральных уравнений, полученных из уравнений Фаддеева, так как число связанных уравнений, а поэтому и размерность обрабатываемых матриц пропорциональны полному количеству членов, содержащихся в используемых потенциалах.

Вторая глава диссертации посвящена изложению и решению трехчастичной модели /7,8/. Предложенная в диссертации точно решаемая модель очень подходит для исследования справедливости различных теоретических подходов теории ядерных реакций. С ее помощью можно изучать различные (компаунд, квазикомпаунд, потенциальный) резонансы.

Во втором параграфе описана сама модель, состоящая из двух "легких" частиц, имеющих одинаковую массу, и из бесконечно тяжелого ядра (С, 3-я частица). Парные взаимодействия выбираются в виде суммы нелокальных сепарабельных потенциалов и задаются в трехчастичном пространстве следующими матричными элементами:

$$\langle \vec{k}_1, \vec{k}_2 | V(1,3) | \vec{k}'_1, \vec{k}'_2 \rangle = -\delta(\vec{k}_2 - \vec{k}'_2) \sum_{s=1}^2 g_{(2)s}(k_2) g_{(2)s}(k'_1),$$

$$\langle \vec{k}_1, \vec{k}_2 | V(2,3) | \vec{k}'_1, \vec{k}'_2 \rangle = -\delta(\vec{k}_1 - \vec{k}'_1) \sum_{s=1}^2 g_{(1)s}(k_2) g_{(1)s}(k'_2),$$

$$\langle \vec{k}_1, \vec{k}_2 | V(1,2) | \vec{k}'_1, \vec{k}'_2 \rangle = -\delta(\vec{p} - \vec{p}') g_{(3)1}(k) g_{(3)1}(k'),$$

где $\vec{p} = \vec{k}_1 + \vec{k}_2$ - полный импульс двух легких частиц,

$\vec{k} = \frac{1}{2}(\vec{k}_1 - \vec{k}_2)$ - их относительный импульс.

В зависимости от числа связанных и резонансных состояний двухчастичных подсистем "С + частица" частицы называются нейтронами (n) или протонами (p). По определению модели "нейтрон" может находиться в двух связанных (а именно, в 1s- и 2s-) состояниях, а "протон" - в одном связанном (в 1s-) состоянии, и для него существует один одночастичный s-резонанс. С помощью данной модели можно изучать упругое рассеяние легкой частицы на связанном состоянии других двух частиц, реакцию подхвата, рассеяние сложной частицы на остове, реакцию срыва, реакцию трехчастичного развала, а также пороговые явления.

На основе уравнений работы /9/, подобных уравнениям Фаддеева, выведена система интегральных уравнений, решение которой обеспечивает возможность точного расчета сечений всех осуществляющихся в нашей трехчастичной системе реакций. В данной работе внимание концентрируется на резонансных реакциях, происходящих при рассеянии "нейтронов" и "протонов" при отрицательной полной энергии, т.е. ниже порога трехчастичного развала. Резонансы, возможные в различных трехчастичных системах (т.е. в системах "С + p + p", "С + p + n" и "С + n + n"), показаны на рис. 1.

В третьем параграфе проведены расчеты для системы "С + n + n", в которой при упругом рассеянии "нейтрона" на связанной системе "С + n в 1s- состоянии" появляется компаунд резонанс. В данном параграфе изучается справедливость тех предположений микроскопических теорий ядерных реакций, которые

	p-p	p-n	n-n
Потенциальный резонанс	$E_1^p + E_2^p + \epsilon_{12}^{pp}$	$E_2^p + E_1^n + \epsilon_{21}^{pn}$	—
Квази-компаунд резонанс	$E_2^p + E_2^p + \epsilon_{22}^{pp}$	$E_2^p + E_2^n + \epsilon_{22}^{pn}$	—
Компаунд резонанс	—	$E_1^p + E_2^n + \epsilon_{12}^{pn}$	$E_2^n + E_2^n + \epsilon_{22}^{nn}$

Рис. 1. Возможные резонансы в различных трехчастичных системах.

вводятся для преодоления трудностей, связанных с непрерывным спектром. Для этого модель решается точно с помощью уравнений, полученных в предыдущем параграфе, а также приближенно. Были изучены следующие методы: приближение изолированного резонанса, приближение связанных каналов без учета и с учетом обмена.

Типичный вид сечений для точного решения модели показан на рис. 2. На нем изображены результаты для случаев, когда "нейтроны" считаются различимыми, а также когда учитывается их тождественность. В первом случае имеет место "простое" рассеяние (при котором не происходит перераспределения частиц) и обменное, а во втором - только "симметричное" рассеяние, амплитуда перехода которого является суммой амплитуд двух предыдущих процессов.

Приближение связанных каналов, учитывающее обмен, только в одном отношении отличается от точного решения, а именно, при этом приближении две частицы не могут одновременно находиться в непрерывном спектре. Это является основным предположением теорий Блоха-Жиле и Вайденмюллера ^{/4/}. Приближение связанных каналов без учета обмена имеет дополнительное ограничение по сравнению с предыдущим, а именно, только бомбардирующая частица может находиться в непрерывном спектре. Приближение изолированного резонанса, введенное Фешбахом ^{/4/}, содержит дальнейшее ограничение: в случае одного открытого канала бомбардирующая частица только тогда может быть в непрерывном спектре, когда ядро-мишень находится в основном состоянии.

Сущность этих методов иллюстрируется на рис. 3, который показывает разрешенные различными приближениями конфигурации.

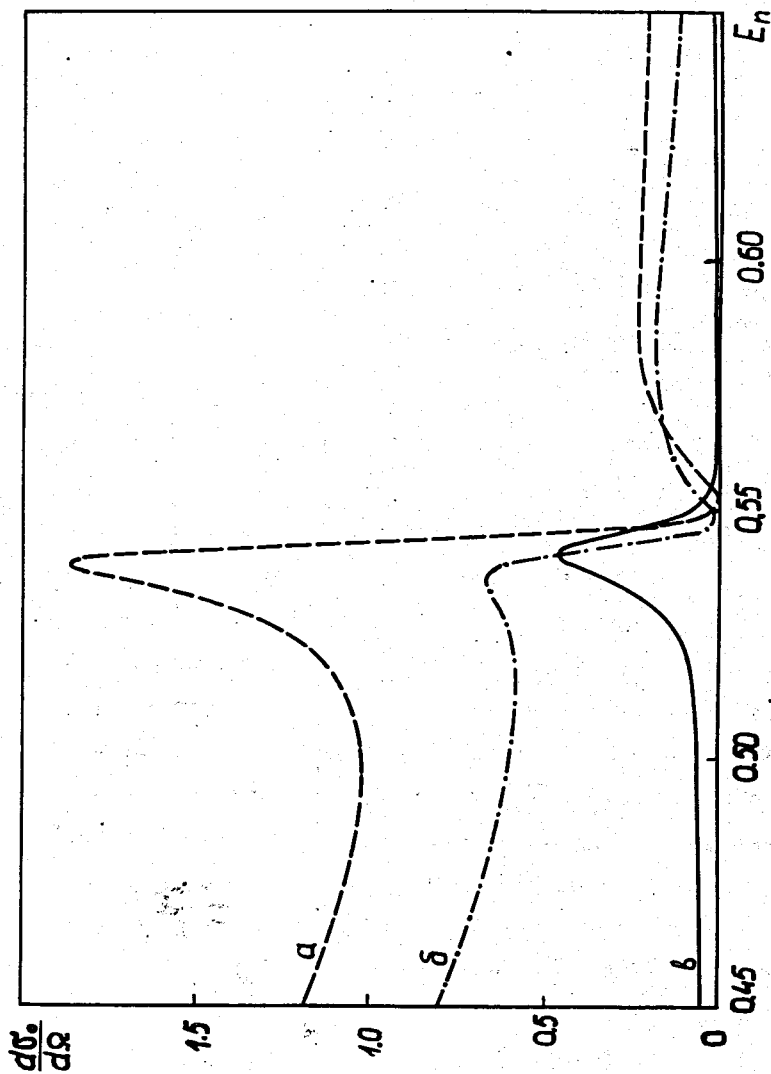


Рис. 2. Сечение $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ упругого рассеяния "нейтрона" на системе "С+п в 1s-состоянии" около комплаунд резонанса для $\lambda = 0.954$. Точное решение. Симметричное (а), простое (б) и

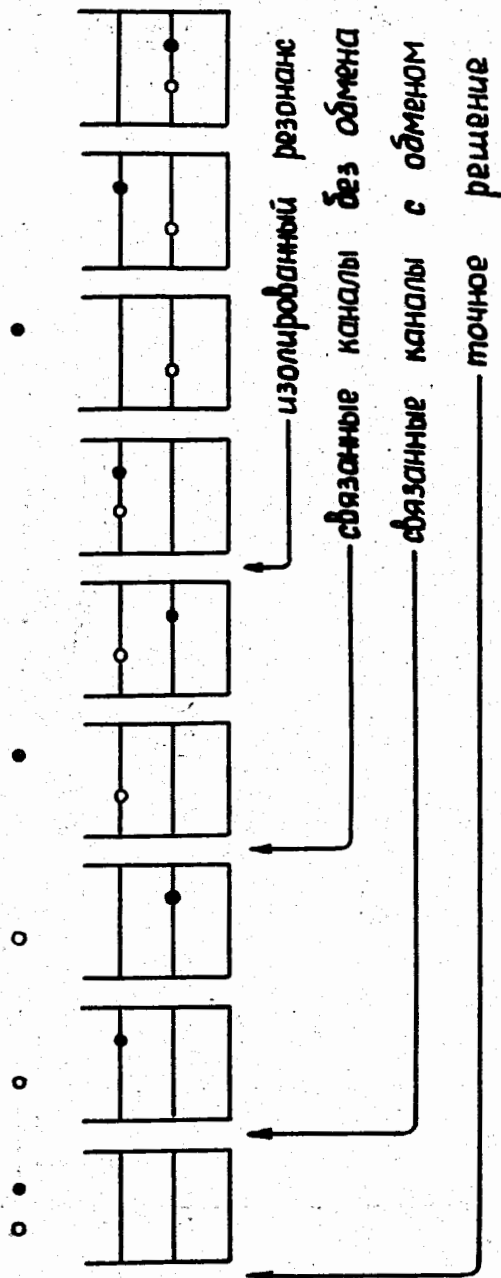


Рис. 3. Разрешенные конфигурации в системе "С+p+n" для различных приближений. (Бомбардирующая частица отмечена черной точкой).

В диссертации приведены результаты расчета сечений, полученных после решения систем интегральных уравнений, соответствующих различным методам, а также проведен анализ этих сечений с помощью формулы Брейта-Вигнера. Сравнивая важнейшие резонансные параметры, а именно, резонансные энергии (сдвиги уровней) и ширины резонансов (см. табл. 1), можно сделать вывод, что все приближенные методы дают результаты, заметно отличающиеся от точного, и эти расхождения сильно растут при увеличении силы "n-n" взаимодействия (параметра λ в таблице). Особенно большими оказались погрешности методов, не учитывающих обмен. Ошибки, вносимые приближенными подходами, могут быть частично скомпенсированы только выбором подходящих эффективных взаимодействий.

В четвертом параграфе второй главы проведены расчеты сечений реакций, возможных в системе "С+p+n", в которой могут иметь место три различных резонанса (потенциальный, квазикомпаунд и компаунд), и в системе "С+p+p", в которой могут появиться потенциальный и квазикомпаунд резонансы. Из полученных результатов делается вывод, что нужно быть осторожным при классификации резонансов по их ширине на "одночастичные", "входные", "компаунд" и т.д., так как утверждение "чем больше ширина резонанса, тем более простым является соответствующее состояние" является неправильным. В системе "С+p+p" обнаружено, что при некотором выборе двухчастичного взаимодействия потенциальный резонанс, отчетливо заметный, когда легкие частицы считаются различимыми, становится незаметным в сечении, если учитывается тождественность этих частиц. Кроме этого показано, что квазикомпаунд резонанс

Таблица I

Энергия резонанса (E_r), ширина (Γ) и сдвиг уровня (ϵ_{22}^{np})
в системе " $C+n+n$ "

	$\lambda = 0.954$			$\lambda = 1.350$			$\lambda = 1.909$		
	E_r	Γ	ϵ_{22}^{np}	E_r	Γ	ϵ_{22}^{np}	E_r	Γ	ϵ_{22}^{np}
Точное решение	0.543	0.0117	-0.042	0.499	0.0330	-0.086	0.333	0.0709	-0.252
Связанные каналы с обменом	0.551	0.0094	-0.034	0.525	0.0253	-0.060	0.478	0.0609	-0.107
Связанные каналы без обмена	0.553	0.0042	-0.032	0.528	0.0104	-0.057	0.486	0.0223	-0.099
Приближение изолиро- ванного резонанса	0.548	0.0054	-0.037	0.519	0.0146	-0.066	0.477	0.0343	-0.108

12

может появиться ниже порога трехчастичного развала, в то время как при слабом " $p-p$ " взаимодействии он должен быть значительно выше этого порога.

Третья глава диссертации посвящена изобарическим аналоговым резонансам. В первом параграфе рассмотрен метод решения модели Лейна /10/ (т.е. двухканальной, двухчастичной задачи) в том случае, когда взаимодействие дается в виде суммы нелокальных сепарабельных потенциалов /11/. Численные расчеты проведены для упругого рассеяния протона на коре (C). Как и следовало ожидать, в сечении имеется резонанс около значения энергии, соответствующего связанному состоянию системы " $A+n$ "; где $|A\rangle$ - состояние аналоговое $|C\rangle$.

Во втором параграфе изложено обобщение точно решаемой трехчастичной модели второй главы /11/. При этом предполагается, что "тяжелая" частица может находиться в двух состояниях: в $|C\rangle$ и $|A\rangle$. С помощью этой модели распространена на трехчастичный случай модель Лейна, часто используемая для изучения изобарических аналоговых резонансов. При этом конкретно рассмотрена задача рассеяния протона на четно-нечетном ядре мишени. Здесь же приведено несколько типичных "трехчастичных" реакций, которые, на наш взгляд, могут быть изучены с помощью предложенной модели.

В Приложении 1а дан удобный способ численного решения интегральных уравнений, ядра которых содержат полюсы в явном или неявном виде. Здесь же указаны некоторые способы значительного уменьшения размерности матриц, обращаемых при решении уравнений Фаддеева. Суть этих методов заключается в исключении некоторых функций из решаемой системы уравнений.

13

В Приложении 1б выведено "интегральное" правило сумм для некоторых функций, фигурирующих в системе интегральных уравнений. С помощью этого правила можно довольно надежно контролировать точность решения этой системы.

В Приложении 1в дано доказательство тождества некоторой амплитуды, полученной из решения системы интегральных уравнений, с амплитудой потенциального рассеяния в системе "С + частица".

В Приложении 2 приведен графический метод определения всех резонансных параметров обобщенной формулы Брейта-Вигнера (включая энергию и ширину резонанса). Изложенный метод может быть применен в случае, когда матричные элементы S - (или T -) матрицы известны как функции энергии налетающей частицы /12/.

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на Международной школе теоретической физики (Предеаль, Румыния, 1969 г.), на Всесоюзном совещании по малонуклонным системам (Дубна, 1970 г.), на семинарах ЛТФ ОИЯИ, в Москве и в Венгрии и опубликованы в работах /6-8,11,12/.

Литература

1. H. Pose. Physik. Zeits., 30, 780 (1929).
H. Pose. Z. Physik., 64, 1 (1930).
2. P. V. Moon, J. R. Tillman. Nature, 135, 904 (1935).
T. Bjerger, C. H. Westcott. Proc. Roy. Soc., A150, 709 (1935).
3. L. R. Hofstadt, M. A. Tuve. Phys. Rev., 47, 507 (1935).
G. Breit, F. L. Yost. Phys. Rev., 47, 508 (1935).

4. H. Feshbach. Ann. Phys. (N.Y.), 5, 357 (1958); 19, 287 (1962).
W. M. MacDonald. Nucl. Phys., 54, 393 (1964); 56, 636 (1964).
В. В. Балашов, П. Долешал, Г. Я. Коренман, В. Л. Коротких, В. Н. Фетисов. ЯФ, 2, 643 (1965).
C. Bloch, V. Gillet. Phys. Lett., 16, 62 (1965).
H. A. Weidenmüller. Nucl. Phys., 75, 189 (1966).
5. Л. Д. Фаддеев. ЖЭТФ, 39, 1459 (1960).
Л. Д. Фаддеев. Труды МИАН, т. 89, (1963).
6. P. Beregi. Препринт ОИЯИ Е4-5837, Дубна (1971).
P. Beregi. Lett. Nuovo Cim., 2, 233 (1971).
P. Beregi. Proc. of Symposium on the Nuclear Three Body Problem, (Budapest, 1971).
7. P. Beregi, I. Lovas, J. Revai, Ann. Phys. (N.Y.), 61, 57 (1970).
8. P. Beregi, I. Lovas, Z. Physik, 241, 410 (1971).
9. E. O. Alt, P. Grassberger, W. Sandhas. Nucl. Phys., B2, 167 (1967).
10. A. M. Lane. Nucl. Phys., 35, 676 (1962).
11. P. Beregi, I. Lovas. Phys. Lett., 33B, 150 (1970).
12. P. Beregi. Сообщение ОИЯИ Е4-5456, Дубна (1970).

Рукопись поступила в издательский отдел
7 октября 1971 года.