



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория высоких энергий

---

СЗ46

Б-17

А.И. Базь

1035

## ТЕОРИЯ ВБЛИЗИПОРОГОВЫХ АНОМАЛИЙ

Автореферат диссертации, представленной на соискание  
учёной степени доктора физико-математических наук

Дубна 1962 год

А.И.Базь

с 346

1035

Б-17

ТЕОРИЯ ВЛИЗИПОРГОВЫХ АНОМАЛИЙ

Автореферат диссертации, представленной на соискание  
учёной степени доктора физико-математических наук

1195 гр.  
5611

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Дубна 1982 год

Вид ядерных сил нам пока не известен. Известно лишь, что они обладают малым радиусом действия и велики по абсолютной величине. В связи с этим возникает вопрос, какие же общие предсказания о поведении различных сечений можно сделать, исходя из этой информации. Впервые эта проблема была сформулирована Вигнером, который в своей, ставшей уже классической, работе <sup>1/1/</sup> рассмотрел:

а/ энергетическую зависимость сечения рассеяния  $\sigma(aa) \sim \sigma$  в пределе малых относительных энергий частиц  $a \sim \sigma$

б/ энергетическую зависимость сечения реакции  $\sigma(ab) \sim \sigma$  при малых относительных энергиях начальных или конечных частиц.

Результаты Вигнера резюмируются в главе I диссертации, где дается их упрощенный вывод. Кроме того, в этой же главе рассматривается случай реакции, когда начальные и конечные частицы имеют равные или почти равные массы /например, реакция перезарядки/. При этом энергетическая зависимость всех процессов определяется видом волновых функций и начальных и конечных частиц <sup>2/</sup>, т.к. обе пары имеют сравнимые энергии. Сечение рассеяния в этом случае, оказывается, имеет вигнеровскую зависимость от энергии, а сечение реакции - отличную от вигнеровской. В случае частиц со спином, процесс рассеяния или реакции характеризуется кроме величины сечения также и значениями поляризации и корреляций поляризаций. Энергетические зависимости этих величин можно тривиально получить, пользуясь методом Вигнера. Это продемонстрировано на примере векторной поляризации при удругом рассеянии.

Теоремы Вигнера можно значительно расширить. Именно, пусть имеется  $N$ -канальная система, т.е.  $N$  - пар частиц  $a_i + X_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ), способных переходить друг в друга

$$a_i + X_i \rightleftharpoons a_k + X_k \quad /1/$$

Вигнер изучил форму сечений упругих процессов  $\sigma_i(a_i, a_i) \sim \sigma_i$ , при малых энергиях и реакций  $\sigma_i(a_i, a_k) \sim \sigma_i$  вблизи  $i$ -ого или  $k$ -ого порогов. Можно поставить общую задачу о нахождении энергетической зависимости сечения процесса <sup>1/</sup> вблизи порога  $m$ -ого канала /т.е. вблизи порога реакции  $X_i(a_i, a_m) \sim \sigma_m$  <sup>2/</sup>. На возможность полного решения этой проблемы впервые было обращено внимание автором <sup>3/</sup> и, независимо, Г. Брайтом <sup>4/</sup>. Ее решение содержится в работах <sup>3/</sup>, <sup>5/</sup> - <sup>7/</sup>. Их содержание изложено во второй главе диссертации.

В §4 разбирается простейший случай двухканальной системы /две пары частиц  $aX$  и  $bY$  / и рассматривается поведение сечения упругого рассеяния  $X(aa)X$  вблизи порога реакции  $X(ab)Y$ . Предполагается, что между  $b$  и  $Y$  нет кулоновского взаимодействия и что все частицы - бесспиновые. Показано, что сечение упругого рассеяния имеет характерную особенность в точке порога; оно имеет вид:

$$\sigma(\theta, E) = \sigma(\theta, E_{\text{пор}}) + |k| \left\{ \begin{array}{l} a(\theta) \\ b(\theta) \end{array} \right\} \begin{array}{l} E > E_{\text{пор}} \\ E < E_{\text{пор}} \end{array} \quad /2/$$

где  $a(\theta)$  и  $b(\theta)$  - некие функции угла рассеяния. Форма и величина особенности полностью определяются величиной сечения реакции и значениями фаз рассеяния в точке порога. Подробно изучается физическая причина возникновения особенности. Она, оказывается, заключается в том, что радиус промежуточной системы, образующейся при столкновении  $a$  с  $X$ , стремится к бесконечности при приближении к точке порога.

В §5 все результаты обобщаются на случай частиц со спином. При этом оказывается, что в точке порога особенности имеются не только в сечении рассеяния, но и в поляризации рассеянных частиц. Общий случай  $N$  - канальной системы рассмотрен в §6. Показано, что сечение любого процесса  $X_i(a_i a_i)X_i$  имеет особенности вблизи порогов всех остальных каналов. Находится величина и форма этих особенностей.

Все результаты §§ 4-6 имеют общий характер. При их выводе использовалась лишь унитарность матрицы рассеяния.

Поведение сечений вблизи порога образования электрически заряженных частиц изучается в §7. Оказывается, что вблизи порога образования одноименно заряженных частиц никаких "острых" особенностей в сечении других процессов нет. /Точнее говоря, производная сечений по энергии непрерывна /. Вблизи порога реакции  $X(ab)Y$ , где  $b$  и  $Y$  - разноименно заряженные частицы, особенности есть и имеют весьма своеобразный характер. Именно, ниже порога сечение рассеяния  $X(aa)X$ , равно как и сечение любых других процессов, имеет бесконечное количество резонансов, беспредельно сгущающихся по мере приближения к точке порога. Выше порога все сечения в некоторой области остаются постоянными. Причина возникновения резонансов проста: ниже порога имеется бесконечное число квазистационарных состояний нашей системы, соответствующих водородоподобным кулоновским состояниям пары  $b+Y$ . Так как канал  $b+Y$  связан со всеми остальными, то эти состояния проявятся в виде резонансов во всех сечениях.

При получении энергетических зависимостей сечений всегда предполагается стабильность всех участвующих в реакции частиц. От этого предположения можно отказаться. Это продемонстрировано в §§ 8-9, где получены формулы

для энергетической зависимости сечения рождения нестабильной частицы вблизи порога, а также для формы особенностей в сечениях всех остальных процессов вблизи этого порога. Основной результат, основанный на рассмотрении полученных точных формул, можно сформулировать следующим образом: наличие у частицы ширины  $\Gamma$  приводит к тому, что порог ее рождения является не точным, а "размазан" по интервалу энергий порядка  $\Gamma$ . Все энергетические зависимости сечений вблизи порога рождения нестабильной частицы получаются из соответствующих выражений для стабильной частицы "размазыванием" - по интервалу энергий  $\approx \Gamma$ .

Формулы первых двух глав являются совершенно общими, не зависящими от вида взаимодействия. Более далеко идущие предсказания можно сделать лишь после введения хоть каких-нибудь предположений о виде взаимодействия. Наиболее естественной и в то же время не сильно ограничивающей класс взаимодействий является модель, позволяющая учитывать взаимодействие в конечном состоянии /м.в.к.с./. Модель заключается в следующем. Пусть имеются две пары частиц  $aX$  и  $bY$ , способных переходить друг в друга /двухканальная система/. Пусть, далее, переход



возможен лишь внутри некоего объема  $r < R$ , а вне его между частицами  $/a$  и  $X$  и  $b$  и  $Y$  / взаимодействие имеет вид обычных статистических потенциалов. В предположении, что возможно такое разбиение конфигурационного пространства на две области /в одной из которых взаимодействие сводится к статическим потенциалам/ и заключается м.в.к.с. Предсказания этой модели хорошо согласуются с результатами опыта.

Анализ следствий, вытекающих из м.в.к.с., приведен в третьей главе диссертации /8/.

Если обозначить через  $U(r)$  потенциал, действующий между  $b$  и  $Y$  при  $r > R$ , то оказывается, что наиболее заметно он проявляется в области энергий вблизи порога рождения пары  $b+Y$ . В §§ 11-12 рассматривается общий характер эффектов, связанных с потенциалом  $U(r)$ . Показано, что если он не очень мал и является в основном притягивающим, то:

1. Сильно возрастают сечения реакции  $X(ab)Y$  и рассеяния  $Y(bb)Y$  вблизипороговой области. При этом сечения имеют характерную энергетическую зависимость.

2. Существенно увеличиваются  $(b+Y)$  - пороговые особенности в сечении рассеяния  $X(aa)X$  / а также в сечениях других процессов, если система имеет несколько каналов/. Кроме того, все эти сечения приобретают своеобразную зависимость от энергии в широкой области вокруг порога.



3. Для довольно большого интервала величин  $U(r)$  / точнее говоря, интервала значений  $\int_R^\infty U(r) r^2 dr$  / характерно следующее явление: у рассматриваемой системы возникает уровень вблизи  $(b+Y)$  порога. Его появление целиком обязано взаимодействию в конечном состоянии  $U(r)$ . Это квазистационарное состояние обладает интересными свойствами: его радиус значительно превышает радиус взаимодействия  $R$  и приведенная ширина канала  $b+Y$ , как правило, аномально велика и приближается к вигнеровскому пределу.

4. Если  $U(r)$  таково, что уровень вблизи порога существует, то, соответственно, сечения всех процессов имеют резонансы вблизи порога  $b+Y$ . В случае, если уровня нет, сечения тем не менее заметно меняются вблизи  $(b+Y)$ -порога и их форма /та характерная зависимость, о которой говорилось выше/ напоминает резонансную. Лишь при малых  $U(r)$  ( $\int_R^\infty U(r) r^2 dr \ll \frac{\hbar^2}{2m}$ ) взаимодействие в конечном состоянии не влияет на форму сечений.

Выясняется физическая причина всех этих эффектов.

В § 13 рассматривается случай систем, имеющих несколько изотопически сопряженных каналов /скажем,  $a_1 + X_1$  и  $a_2 + X_2$  /. Изотопическая инвариантность, как известно, не является точной из-за кулоновских эффектов.

Возникающие при этом поправки считаются обычно малыми. Это, однако, не всегда так. Оказывается, что в некоторых случаях они могут значительно усиливаться взаимодействием в конечных состояниях между  $a_1 + X_1$ . Этот эффект особенно сильно проявляется в области вокруг порогов рождения  $a_1 X_1$ .

Четвертая глава диссертации посвящена 2-м вопросам: во-первых, обсуждению той информации, которую можно извлечь из изучения пороговых аномалий, и, во-вторых, проверке сделанных в третьей главе предсказаний.

Первая группа вопросов рассматривается в § 14. В нем показано, что изучение пороговых особенностей позволяет получить огромное количество информации о свойствах системы. Причина этого заключается в следующем.

При измерении любого сечения вблизи порога меряются три величины: сечение в пороге  $\sigma(\theta, E_{пор})L$  и две функции углов:  $a(\theta)$  и  $b(\theta)$  /см. /2/ /. Эти функции /а и в / выражаются через элементы  $S$ -матрицы рассматриваемой системы в точке порога. Таким образом, опыт вблизи порога дает втрое больше уравнений для определения  $S$ -матрицы, чем обычно:  $\sigma(\theta, E_{пор})$ ,  $a(\theta)$  и  $b(\theta)$  вместо одной величины - сечения  $\sigma(\theta, E_{пор})$ .

Именно это обстоятельство, т.е. то, что пороговые опыты позволяют получить гораздо больше уравнений для определения элементов  $S$ -матрицы, чем опыты вдали от порога, и делает их бесприцельно богатым источником информации.

1/ Пусть мы знаем сечение, поляризацию и корреляцию поляризаций для

упругого канала  $X(aa)X$  вблизи порога неупругого  $X(ab)Y$ . Набор этих данных оказывается достаточным для того, чтобы провести полный однозначный фазовый анализ упругого рассеяния, даже если все фазы рассеяния комплексны. Для сравнения напомним, что в обычном случае /т.е. вдали от порога / для фазового анализа необходимо измерение сечений, поляризаций и т.д. во всех неупругих каналах.

Кроме того, в обычном случае для получения однозначного набора фаз необходимы опыты при разных энергиях. В случае пороговых опытов, эксперименты при других значениях энергии становятся излишними.

2/ Из опытов по одному лишь упругому рассеянию  $X(aa)X$  вблизи порога  $X(ab)Y$  можно получить информацию и о частицах  $bY$ . Именно, можно определить относительную четность пар  $aX$  и  $bY$ , найти величину сечения процесса  $X(ab)Y$  и оценить спины частиц  $b$  и  $Y$ .

3. Точно так же, изучая сечение, поляризацию и т.д. одного какого-либо процесса  $X(ac)Z$  вблизи порога  $X(ab)Y$ , можно наряду с полным фазовым анализом процесса  $X(ac)Z$  найти относительную четность пар  $bY$  и  $cZ$  и величину сечения  $Y(bc)Z$ . Такой способ определения сечения является, пожалуй, единственным в случае нестабильных  $b$ ,  $c$ ,  $Y$  и  $Z$ .

Последний, пятнадцатый параграф диссертации посвящен сравнению предсказаний, сделанных в главе III на основе модели, учитывающей взаимодействие в конечном состоянии с экспериментальным материалом по легким ядрам.

Одно из предсказаний касалось ядерных уровней: их плотность вблизи двухчастичных порогов должна быть повышена. Анализ экспериментальных данных действительно показывает, что плотность уровней вблизи порога примерно в два раза превышает плотность уровней вдали от порогов.

Второе предсказание касалось энергетических зависимостей различных реакций вблизи порогов. Сечения должны иметь характерную энергетическую зависимость, напоминающую резонансную. Эта также подтверждается.

Взаимодействие в конечном состоянии должно также приводить к тому, что уровни, расположенные вблизи порогов, имеют аномально большие приведенные ширины для распада в пороговый канал. Кроме того, вблизи порогов должно наблюдаться нарушение закона сохранения изотопического спина. Оба эти эффекта хорошо проявляются на опыте.

Литература

1. E. Wigner. *Phys. Rev.* 73, 1002 (1947).
2. А. Базь, ЖЭТФ, 32, 478 /1957/.
3. А. Базь, ЖЭТФ, 33, 923 /1957/.
4. G. Breit. *Phys. Rev.* 107, 1612 (1957).
5. А. Базь, ЖЭТФ, 35, 757 /1958/.
6. А. Базь, ЖЭТФ, 36, 1762 /1959/.
7. А. Базь, ЖЭТФ, 40, 1511 /1961/.
8. A. Baz. *Phil Mag. Suppl. (Adv. in Phys.)* 8, 39 (1959).

Рукопись поступила в издательский отдел

6 июля 1962 года.