С 323
Х -955

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ИФВЭ 69-89
На правах рукописи

О.А.Хрусталев

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ РАССЕЯНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

041 – теоретическая и математическая физика

А в т о р е ф е р а т

диссертации, представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Дубна 1969

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий.

Официальные оппоненты – доктор физико-математических наук А.М.Балдин, доктор физико-математических наук Б.М.Барбашов и доктор физико-математических наук М.К.Поливанов.

Ведущее научно-исследовательское учреждение – Институт теоретической физики АН УССР.

Автореферат разослан "11" XII 1969 г.

Защита диссертации состоится "__" I 1970 г. на заседании совета Лаборатории Теоретической физики О И Я И.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института.

Содержание работ, положенных в основу данной диссертации, составляет попытку синтеза аксиоматического и динамического описаний рассеяния при высоких энергиях. Сама диссертация состоит из четырех глав основного текста, введения и заключения. В первой главе диссертации исследуется вопрос о том, насколько хорошо согласуются выводы аксиоматического метода об аналитических свойствах амплитуды рассеяния в топологическом произведении s- и t -плоскостей с наглядными представлениями о существовании конечной области эффективного взаимодействия. Показано, что установленная в аксиоматическом методе голоморфность амплитуды рассеяния в топологическом произведении s-плоскости с разрезами вдоль действительной оси и круга $|t| \leq t_0$ в t -плоскости /1,2/ позволяет дать простое описание общих свойств амплитуд реакций сильно взаимодействующих частиц при высоких энергиях, во многом аналогичное квазиклассическому описанию нерелятивистской квантовой механики. Возможность сохранения в квантовой теории поля представления об эффективной области взаимодействия связана с тем, что в этом случае эллипс аналитичности разложения амплитуды рассеяния в ряд полиномов Лежандра вырождается с ростом энергии в отрезок /-1,1/ с той же скоростью, как и эллипс аналитичности для рассеяния нерелятивистской частицы на потенциале Юкавы. Этого результата вполне достаточно, чтобы установить такие верхние границы сечений взаимодействий при высоких энергиях, которые согласуются с полуклассическими представлениями о рассеянии на сильно поглощающем шарике. Модель поглощающего шарика при всей кажущейся грубости, во-первых, почти непосредственно вытекает из общих принципов теории поля и, во-вторых, верно передает характерные черты рассеяния при высоких энергиях. Более того, закономерности, выведенные из точно сформулированных общих принципов теории поля, приобретают почти непосредственный физический смысл и дают возможность воссоздания наглядной картины взаимодействия и в тех случаях, когда непосредственное квазиклассическое описание становится затруднительным. В частности, используя эвристическое понятие радиуса взаимодействия, удалось доказать асимптотическое разделение вкладов t- и u-каналов в амплитуду упругого рассеяния при высоких энергиях /3/.

Далее, во второй главе диссертации, изучается вопрос о том, насколько широко в квантовой теории поля можно пользоваться понятием потенциала. В нерелятивистской квантовой механике область эффективного взаимодействия естественно определяется свойствами потенциала взаимодействия. Поэтому можно думать, что сведение функциональных полевых уравнений для двухчастичной задачи к уравнению типа уравнения Шредингера с использованием всей информации об аналитических свойствах амплитуды рассеяния, полученной на основе общих принципов теории поля, окажется мощным средством исследования амплитуды рассеяния. Среди многих исследований, посвященных получению подобного рода уравнений, в диссертации выбран метод А.А. Логунова и А.Н. Тавхелидзе /4/, в котором эта программа осуществлена с наибольшей полнотой. В этом методе в качестве исходной величины, определяющей весь остальной формализм задачи двух тел, берется двухвременная, вместо четырехвременной, двухчастичная функция Грина. Отказ от явной релятивистской ковариантности в этом методе вполне восполняется преодолением трудностей, связанных с формулировкой граничных условий для волновых функций, их нормировкой и возможностью наиболее полного использования достижений дисперсионного метода в теории рассеяния. В вошедших в диссертацию работах /5,6/ изучались аналитические свойства амплитуды рассеяния в рамках квазипотенциального уравнения Логунова-Тавхелидзе.

При этом показано, что в рамках теории возмущений амплитуда рассеяния имеет, по крайней мере в некоторой области энергий и передач импульса, квазипотенциальную природу, причем потенциал сводится к непрерывной суперпозиции комплексных потенциалов Юкавы с интенсивностями, зависящими от энергии. Если допустить существование гипотетических дисперсионных соотношений по передаче импульса, то можно описать рассеяние в прямом канале реакции с помощью локального квазипотенциала. Преимущества потенциального метода были продемонстрированы на примере рассеяния в случае взаимодействия, описываемого суперпозицией потенциалов Юкавы с интегрируемой спектральной плотностью. Применение метода Фредгольма к решению интегрального уравнения для амплитуды рассеяния позволило выяснить аналитические свойства амплитуды в k- и ℓ-плоскостях и получить реджевскую асимптотику амплитуды рассеяния /7/ при более слабых предположениях и более естественным путем, чем это делается на основе представления Мандельстама для амплитуды рассеяния.

Третья глава диссертации посвящена дальнейшему развитию квазипотенциального метода. С целью расширения класса допустимых квазипотенциалов квазипотенциальное уравнение переведено в координатное пространство, где оно выглядит как обычное уравнение Шредингера с непрерывной суперпозицией нелокальных сепарабельных потенциалов, зависящих от энергии. Проведено исследование аналитических свойств амплитуды рассеяния на таких потенциалах и выяснена роль особенностей, соответствующих массам рассеивающихся частиц, кото -

рые в этом случае могут быть истолкованы как динамические особенности [8]. На основе полученного уравнения проведено систематическое исследование рассеяния на гладких квазипотенциалах, впервые введенных в теорию поля в работе [9]. Показано, что такие потенциалы можно истолковать как потенциалы с переменным радиусом взаимодействия (в отличие от потенциала Юкавы с постоянным радиусом взаимодействия), каждое частное значение которого определяется величиной передачи импульса. Это свойство гладких потенциалов делает их чрезвычайно удобным средством описания рассеяния при высоких энергиях. В частности, с помощью потенциалов с переменным радиусом взаимодействия естественно объясняется смена диффракционного режима рассеяния орировским и далеко идущее сходство упругих процесссов при больших энергиях с двухчастичными процессами, сопровождающимися передачей ненулевых квантовых чисел. Эксперимент показал, что обменное рассеяние при небольших передачах импульса обладает резко выраженным диффракционным пиком, причем ширина его близка к ширине диффракционного пика упругого рассеяния. Это обстоятельство кажется немного странным, если исходить из обычных представлений о природе зависимости сечения рассеяния от передачи импульса. Принято считать, что диффракционный пик в упругом рассеянии обусловлен, главным образом, теневым рассеянием, которое, естественно, отсутствует при обменном рассеянии. Далее, ширина диффракционного пика в обменном рассеянии не очень сильно зависит от того, обменом каких квантовых чисел сопровождается рассеяние. Это тоже трудно согласовать с привычной картиной рассеяния на потенциале Юкавы, при котором более тяжелым квантам обмена соответствует более широкое угловое распределение. Наконец, пик рассеяния вперед в обменном рассеянии возвышается над более пологой частью кривой дифференциального сечения на два-три порядка, и форма этого пика в значительной степени не зависит от энергии. Обе эти характеристики диффракционного пика по традиции относят к упругому рассеянию.

Чтобы объяснить эти свойства обменных процессов, в работе /10/ было предложено рассматривать и упругое и обменное рассеяния как прохождение частицы сквозь поглощающую среду с возможным когерентным возбуждением последней. В этом случае частице тяжело передать большой импульс, но относительно легко передать когерентным образом такие квантовые числа как заряд, спин, странность и т.д. Доводы, оправдывающие такой подход к рассеянию, рассматриваются в четвертой главе диссертации, в третьей же главе приведенные выше экспериментальные факты анализируются с точки зрения потенциального метода. В случае рассеяния на потенциалах с переменным радиусом взаимодействия нет универсальных полюсов в амплитуде рассеяния, характерных для потенциала Юкавы и связанных с массой кванта обмена. Полюса, связанные с радиусом взаимодействия, заменяются на точки перевала парциальных волн, зависящих от импульса частицы и орбитального момента. В качестве величины, которая отбирает тот или иной эффективный радиус взаимодействия, выступает теперь сама передача импульса. Можно ожидать поэтому, что роль массы квантов обмена теперь не столь значительна, как в потенциале Юкавы, вернее, в этом случае вообще трудно говорить о массе кванта обмена. Таким образом, потенциалы с переменным радиусом взаимодействия должны привести к новым универсальным характеристикам рассеяния, значительно отличающимся от более привычных характеристик потенциала Юкавы. В частности, становится понятной универсальность диффракционного пика для упругого и обменного рассеяния - ведь теперь форма пика определяется передачей импульса самой по себе.

В диссертации развит метод оценки шредингеровской амплитуды рассеяния на потенциалах переменного радиуса взаимодействия, основанный на существовании у парциальной волны точки перевала /11/. В случае малых передач импульса этот метод приводит к глауберовскому представлению прицельного параметра /12/, выгодно отличаясь от последнего возможностью исследовать и достаточно большие передачи импульса. Показано, что релятивистская амплитуда рассеяния на гладком квазипотенциале может быть оценена тем же методом, что и шредингеровская амплитуда, что создает предпосылки для количественного описания рассеяния сильно взаимодействующих частиц при высоких энергиях.*)

Наконец, четвертую главу диссертации можно рассматривать как попытку выхода за рамки потенциального метода при описании рассеяния на большие углы при высоких энергиях и одновременно как обоснование необходимости введения гауссовского потенциала (т.е. потенциала с переменным радиусом взаимодействия в смысле предыдущей главы) при описании рассеяния в прямом канале. В этой главе делается попытка вероятностного толкования амплитуды рассеяния при высоких энергиях. Исходной точкой такого толкования служит условие унитарности, в силу которого мнимая часть амплитуды рассеяния представляется матричным элементом δ-функции /14/, и при некоторых условиях она может быть эффективно вычислена при помощи предельных теорем теории вероятностей /15/. Сначала выясняется, при каких условиях вклад n-частичного промежуточного состояния в соотношение унитарности при достаточно больших n может быть вычислен с помощью центральной предельной теоремы. Помимо случая независимых частиц, когда применение центральной предельной теоремы очевидно, рассматривается и более общий случай коррелирующих частиц. Анализ условий применимости центральной предельной теоремы указывает на перспективность использования этой теоремы при описании многочастичных процессов - она, грубо говоря, применима в том случае, если среди

---

*) Несколько иной способ описания рассеяния частиц высоких энергий на гладких квазипотенциалах развит в работе /13/.

n частиц многочастичного состояния нет цепочек сильно коррелирующих частиц длиной порядка $\sqrt{n}$. Далее выясняется роль закона сохранения энергии в функциональной зависимости вклада многочастичного состояния в зависимости от числа частиц n. Оказалось, что в силу сохранения энергии, зависящую от угла рассеяния, часть n-частичного вклада целесообразно толковать как плотность вероятности того, что n промежуточных частиц передадут заданный поперечный импульс. Таким образом, мнимая часть амплитуды рассеяния, (а следовательно, и сама амплитуда) в случае применимости центральной предельной теоремы оказывается функционалом от введенной в работе /16/ случайной величины – числа частиц в промежуточном состоянии, необходимых для передачи заданного поперечного импульса (эта величина аналогична другой, лучше известной случайной величине – времени достижения заданной точки при симметричном случайном блуждании на прямой). Суммирование по всем промежуточным состояниям рандомизирует это случайное блуждание, превращая его в блуждание, при котором вероятность сделать n шагов пропорциональна вероятности рождения n частиц в двухчастичном столкновении.

Естественное предположение о том, что степень корреляции между продольными и поперечными составляющими импульсов частиц в промежуточном состоянии зависит от угла рассеяния, приводит к качественно согласующимся с экспериментом выводам об угловой зависимости амплитуды рассеяния /17/. В дифракционной и орировской областях полученные следствия совпадают с выводами потенциальной теории рассеяния, разработанными в третьей главе диссератации. В области же передач импульса, сравнимых с энергией рассеяния, вероятностное описание приводит к иным, лучше согласующимся с экспериментом, выводам: /18/ зависимость амплитуды рассеяния от передачи импульса в этой области должна ослабляться, зато увеличение энергии рассеяния при заданной передаче импульса должно привести к сильному падению амплитуды рассеяния.

Исходным пунктом для сопоставления развитого в четвертой главе формализма с другими способами описания рассеяния служит возможность толкования вклада n-частичного состояния во мнимую часть амплитуды рассеяния как интеграл перекрытия волновых функций системы из n частиц, родившихся при столкновении двух частиц. Предположение о том, что в случае высоких энергий рассеяние, в основном, определяется вкладом неупругих процессов, естественно приводит к основной гипотезе работы [10] о возможности толкования рассеяния как прохождения частицы сквозь поглощающую среду с возможным когерентным возбуждением. Поскольку начальный и конечный импульсы рассеивающейся частицы в системе центра масс выделяют плоскость рассеяния, то модель рассеяния как прохождения сквозь поглощающую среду близка к модели рассеяния двухмерных структур, предложенной в работе [19]. Применение центральной предельной теоремы позволяет уточнить, что следует понимать под рассеивающейся двухмерной структурой. Переход к эйкональному представлению мнимой части амплитуды рассеяния показывает, что рассеяние при высоких энергиях можно описать в терминах рассеяния эллипсов, главные полуоси которых определяются степенью корреляции продольных и поперечных составляющих импульсов частиц в промежуточных состояниях. Возможность зависимости этой корреляции от угла рассеяния естественным образом объясняет описанную выше смену режимов рассеяния при изменении передачи импульса. Следует отметить, что толкование вклада n-частичного состояния во мнимую часть амплитуды рассеяния как интеграла перекрытия, приводит к более естественному толкованию обсуждаемой двухмерной структуры как σ- и π-связей квантовой химии. В этом случае σ-связь определяется продольной составляющей импульса и вызывает основной эффект – рассеяние вперед. Малая по сравнению с ней π-связь вызывает небольшой, но быстро растущий эффект – отклонение частицы от прямого пути. В этом случае амплитуда рассеяния хорошо описывается используемым в /18/ эйкональным представлением. Однако, по мере роста влияния π- связи, старый базис из $\vec{\sigma}$, $\vec{\pi}$ -векторов оказывается неподходящим для описания рассеяния и в этом случае амплитуда рассеяния слабо зависит от передачи импульса, но быстро убывает с ростом энергии при фиксированной передаче. При малых передачах импульса интеграл перекрытия можно истолковать как свертку формфакторов рассеивающихся частиц, поэтому вероятное описание рассеяния, связанное с описанием рассеяния в терминах двухмерных структур, определяемых интегралом перекрытия, позволяет обосновать гипотезу пропорциональности сечения рассеяния при малых передачах импульса четвертой степени форм-фактора, указав в то же время на возможные причины нарушения этого соотношения при больших передачах импульса.

Возможность эйконального представления амплитуды рассеяния, установленная в четвертой главе диссертации, позволяет связать развитое в диссертации вероятностное описание рассеяния с потенциальным описанием. Если отождествить амплитуду рассеяния, полученную после применения центральной предельной теоремы с глауберовской амплитудой рассеяния, что законно при малых передачах импульса, то можно заключить, что рассеяние частиц высоких энергий можно описать уравнением Шредингера с потенциалом переменного радиуса взаимодействия. Частично этот результат уже был сформулирован в третьей главе диссертации, где было показано, что релятивистское квазипотенциальное уравнение с гладким потенциалом приводит при описании рассеяния качественно к тем же результатам, что и уравнение Шредингера. Полученные в четвертой главе результаты могут служить обоснованием необходимости введения гладких потенциалов. Уже отмечалось, что гладкие потенциалы, будучи потенциалами с непостоянным радиусом взаимодействия, характеризуются совсем другими величинами, чем масса кванта обмена, привычная по потенциалу Юкавы. Описывая рассеяние в терминах многочастичных промежуточных состояний, следует вместо кванта обмена найти некоторую глобальную размерную характеристику n -частичного состояния. При сформулированных выше корреляционных свойствах частиц в промежуточном состоянии в качестве такой величины естественным образом выступает слабо зависящая от энергии дисперсия полного импульса n-частичного состояния, которая затем связывается с шириной диффракционного пика. Таким образом, развитые в диссертации потенциальный и вероятностный методы описания рассеяния естественно дополняют друг друга: потенциальное описание рассеяния позволяет точнее описать фазовые сдвиги отдельных итераций, существенные при переходе из диффракционной области в орировскую. Вероятностное же описание удобно в случае рассеяния на большие углы.

В конце четвертой главы исследована связь развитого в диссертации вероятностного описания рассеяния с обычными статистическими методами. Показано, что в случае пуассоновского распределения числа вторичных частиц, рождающихся при двухчастичных столкновениях, полученные в диссертации формулы для рассеяния на большие углы можно отождествить с формулами обычной статистической теории.

Полученные в диссертации результаты докладывались на всесоюзных и международных конференциях. Основное содержание диссертации опубликовано в работах [2,3,5–8,11,15–17].

Литература

1. A.Martin. N. Cimento, 44A, 1219 (1966);
   G.Sommer. N.Cimento, 52A, 373 (1967).
2. А.А.Логунов, М.А.Мествиришвили, Нгуен Ван Хьеу, О.А.Хрусталев. Препринт ИФВЭ, 68-54-К, Серпухов, 1968;
   (в печати).
3. А.А.Логунов, Нген Ван Хьеу, О.А.Хрусталев. Сб. "Проблемы теоретической физики", М., "Наука", 1969.
4. A.A.Logunov, A.N.Tavkhelidze.N. Cimento, 29, 380 (1963).
5. A.A.Logunov, A.N.Tavkhelidze, I.T.Todorov, O.A.Khrustalev. N. Cimento, 30, 134 (1963).
6. A.A.Logunov, A.N.Tavkhelidze, O.A.Khrustalev.Phys.Lett., 4, 325(1963).
7. Б.А.Арбузов, А.А. Логунов, А.Т.Филиппов, О.А.Хрусталев. ЖЭТФ, 46, 1266 (1964).
8. О.А.Хрусталев. Препринт ИФВЭ 69-24, 1969; ТМФ (в печати).
9. S.P.Alliluyev, S.S.Gerstein, A.A.Logunov. Phys. Lett., 18, 195(1963).
10. N.Byers, C.N.Yang. Phys. Rev., 142, 976 (1966).
11. O.A.Khrustalev, V.I.Savrin, N.E.Tyurin.Communications JINR, 1969.
12. R.Glauber, Lectures in Theor. Phys., New York, 1959.
13. V.R.Garsevanishvili, V.A.Matveev, L.A.Slepchenko, A.N.Tavkhelidze. Phys. Lett., 24B, 1969.
14. L.Van Hove. Revs. Mod. Phys., 36, 655 (1964).
15. А.А.Логунов, О.А.Хресталев. Препринт ИФВЭ 67-64-К, 1967.
16. А.А.Логунов, О.А.Хрусталев. Препринт ИФВЭ, 69-20, 1969.
17. А.А.Логунов, О.А.Хрусталев. Препринт ИФВЭ, 69-21, 1969.
18. J.Allaby et al. Vienna Conference, 1968.
19. T.T.Chou, C.N.Yang.Phys. Rev., 170, 1591 (1968).