

2-125

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

2 - 9700

ЧАВЛЕЙШВИЛИ Михаил Петрович

ДИНАМИЧЕСКИЕ СПИНОВЫЕ ЭФФЕКТЫ  
ПРИ ВЫСОКИХ И НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ

Специальность 01.04.02 - теоретическая  
и математическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1976

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики  
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук Р.М.МУРАДЯН.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Р.Н.ФАУСТОВ,  
кандидат физико-математических наук С.Б.ГЕРАСИМОВ.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт физики высоких энергий (Серпухов).

Автореферат разослан " " 1976 г.

Защита диссертации состоится " " 1976 г.

на заседании специализированного Ученого совета К-56 Лаборатории теоретической физики ОИЯИ (Дубна, Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета

кандидат физико-математических наук

В.И.ЖУРАВЛЕВ

Часто в работах по изучению аналитических свойств амплитуды рассеяния, а также различных моделей, для простоты рассматривают рассеяния бесспиновых частиц с равными массами и говорят о "несущественных осложнениях, связанных со спином". Однако спиновые эффекты важны для получения детальной информации при изучении различных взаимодействий элементарных частиц. В дальнейшем в связи с появлением поляризованных пучков и мишеней они будут играть еще большую роль. Теория элементарных частиц со спином, бывшая когда-то разделом довольно абстрактных исследований, стала весьма актуальной. В изучении вопроса о том, как осуществляется требование лоренц-инвариантности амплитуды рассеяния частиц со спином, был достигнут значительный прогресс, важным элементом которого является выявление сингулярной природы спиральных амплитуд двухчастичных реакций. Оказалось, что учет спина, кроме естественных алгебраических осложнений расчетов, может приводить к нетривиальным следствиям.

В диссертации рассматриваются некоторые следствия пространственно-временной симметрии теории взаимодействий элементарных частиц, в частности, следствия наличия у амплитуды рассеяния кинематических особенностей, связанных со спином участвующих в бинарных реакциях частиц. Мы стремились максимально использовать кинематическую информацию, а также дисперсионные соотношения, которые основываются на общих принципах теории элементарных частиц<sup>/I/</sup>, что позволяет получить информацию об амплитуде рассеяния, не обращаясь к

деталю динамики сильных взаимодействий. Учет спиновых эффектов важен для правильного и возможно более простого динамического описания взаимодействия элементарных частиц, например, в модели Редже, квазипотенциальном подходе и т.п.<sup>/2/</sup>.

Физические спиральные амплитуды, которые описывают процесс рассеяния, помимо динамических особенностей, которые определяются дисперсионными соотношениями, имеют дополнительные кинематические сингулярности, обусловленные наличием у частиц спина. В работе Кохен-Таннуджи, Мореля и Навеле<sup>/3/</sup> была решена задача о выделении кинематических особенностей из спиральных амплитуд произвольного двухчастичного процесса с участием массивных частиц. В работе Адера, Капдевила и Навеле<sup>/4/</sup> были выделены кинематические особенности для реакций с участием фотонов (с учетом калибровочной инвариантности) и определены регуляризованные спиральные амплитуды, которые имеют только динамические особенности.

В диссертации дисперсионные соотношения для комптон-эффекта на мишени с произвольным спином, а также для фоторождения  $\pi$ -мезона на нуклоне рассмотрены в духе  $S$ -матричного подхода.

Помимо особенностей, вызванных наличием у частиц спинов и связанных с выбором амплитуд (способом параметризации  $S$ -матрицы), существуют особенности другого рода, связанные с выбором переменных, разложением амплитуд, а также с массами частиц<sup>/5/</sup>. Эти особенности вызваны тем, что в разных областях физических переменных и при разных массовых конфигурациях амплитуда обладает разными свойствами симметрии<sup>/6/</sup>. Обычно амплитуду рассеяния рассматривают как функцию энергии при фиксированной передаче импульса. Это позволяет представить амплитуду

как функцию на малой группе. При переходе из канала в канал структура малой группы меняется скачком от  $O(2,1)$  к  $E(2)$  и  $O(3)$ , а базис и коэффициенты имеют в соответствующих точках кинематические особенности.

Для изучения амплитуды рассеяния частиц при высоких энергиях весьма эффективным оказался метод, основанный на использовании квазипотенциального уравнения, предложенный А.А.Логуновым и А.Н.Тавхелидзе<sup>/7/</sup>. Было показано, что естественное предположение о гладкости локального квазипотенциала позволяет передать основные закономерности рассеяния частиц при высоких энергиях<sup>/8/</sup>.

При рассмотрении рассеяния адронов в последнее время часто обсуждается метод паде-аппроксимации. Этот математический метод суммирования расходящихся асимптотических рядов оказался плодотворным, в частности, в теоретико-полевых моделях взаимодействия адронов при низких энергиях<sup>/9/</sup>.

В диссертации рассматривались некоторые следствия из условия пространственно-временной симметрии на амплитуду рассеяния при низких и высоких энергиях. Рассмотрены следующие реакции: виртуальный комптон-эффект и рассеяние векторной частицы на нуклоне, низкоэнергетическое поведение спиральных амплитуд рассеяния  $\gamma$ -кванта или гравитона на мишени с произвольным спином, подробно рассмотрен случай мишени со спином  $0(\pi$ -мезон) и  $1/2$ (нуклон). Рассмотрено также низкоэнергетическое поведение фоторождения  $\pi$ -мезона на нуклоне в  $S$ - и  $t$ -каналах. Протон-протонное рассеяние рассмотрено при высоких энергиях.

Диссертация состоит из трех глав, заключения и двух приложений.

Первая глава посвящается аналитическим свойствам спиральных амплитуд. Первые два параграфа имеют вводный характер. Рассматривается спиральный формализм Джакоба-Вика и аналитические свойства спиральных амплитуд, в частности, наличие у них кинематических особенностей, способы их выделения, определение регуляризованных спиральных амплитуд. В § I вводятся обозначения. Рассматриваются разные параметризации S-матрицы - инвариантные, спинорные, спиральные амплитуды.

В § 2 обсуждается понятие кинематических и динамических особенностей, рассматриваются методы выделения кинематических особенностей из спиральных амплитуд, определяются приведенные и регуляризованные спиральные амплитуды. Рассматриваются кроссинг-соотношения для спиральных амплитуд и кинематические ограничения, накладываемые на регуляризованные спиральные амплитуды в определенных точках.

В § 3 проведен кинематический анализ виртуального комптон-эффекта на нуклоне. Так как кинематически сингулярная структура спиральных амплитуд определяется массами ("массовой конфигурацией") и спинами частиц, то полученные результаты справедливы для рассеяния любой частицы со спином I на мишени со спином I/2.

Регуляризованные спиральные амплитуды в определенных точках не являются независимыми, в частности, определенные линейные комбинации t-канальных регуляризованных амплитуд в точке t = 0 обращаются в ноль. В диссертации определены регуляризованные спиральные амплитуды для виртуального комптон-эффекта на нуклоне и получены два ограничения, накладываемые на них в точке t = 0 /10/:

$$F_{11,1/2,1/2}^{t+}(s,t) + \sin^2 \theta_t F_{-1,1/2,1/2}^{t+}(s,t) - 2F_{00,1/2,1/2}^{t+}(s,t) = 0$$

$$F_{11,1/2,1/2}^{t-}(s,t) - \sqrt{2} \left( F_{10,1/2,1/2}^{t+}(s,t) + \cos \theta_t F_{00,1/2,1/2}^{t+}(s,t) \right) = 0.$$

Здесь  $F_{\lambda_1, \lambda_2; \lambda_4, \lambda_3}^{t\pm}(s,t)$  - регуляризованные спиральные амплитуды t-канала, они связаны с физическими спиральными амплитудами  $S_{\lambda_1, \lambda_2; \lambda_4, \lambda_3}^t(s,t)$  следующим образом:

$$F_{\lambda_1, \lambda_2; \lambda_4, \lambda_3}^{t\pm}(s,t) = (t - 4m_N^2)^A (t - 4M_P^2)^B t^C.$$

$$\left[ \frac{S_{\lambda_1, \lambda_2; \lambda_4, \lambda_3}(s,t)}{\left(\sin \frac{\theta_t}{2}\right)^{|\lambda' - \mu'|} \left(\cos \frac{\theta_t}{2}\right)^{|\lambda' + \mu'|}} \pm \frac{S_{-\lambda_1, -\lambda_2; \lambda_4, \lambda_3}(s,t)}{\left(\sin \frac{\theta_t}{2}\right)^{|\lambda' + \mu'|} \left(\cos \frac{\theta_t}{2}\right)^{|\lambda' - \mu'|}} \right],$$

где  $m_N$  - масса нуклона,  $M_P$  - масса частицы со спином I,  $\theta_t$  - угол рассеяние в t-канале,  $\lambda' = \lambda_4 - \lambda_2$ ;  $\mu' = \lambda_1 - \lambda_3$ ,  $f$ ,  $\beta$  и  $C$  - определенные числа, зависящие от спиральностей.

Во второй главе диссертации рассмотрены дисперсионные соотношения для спиральных амплитуд и низкоэнергетические теоремы для некоторых фотон-адронных процессов.

Низкоэнергетические теоремы для комптон-эффекта /II, I2/ утверждают, что при фиксированном угле рассеяния и стремлении энергии падающего фотона E к нулю, амплитуда рассеяния с точностью до  $O(E^2)$  определяется борновским членом. Низкоэнергетические теоремы были также получены для других процессов с участием фотонов /I3/, в том числе для фоторождения  $\pi$ -мезона на нуклоне - теорема Кролла-Рудермана /I4/.

В диссертации предложен новый метод, основанный на использовании регуляризованных спиральных амплитуд, который позволяет получить критерий (достаточное условие) справедливости низкоэнергетических теорем для рассеяния фотонов и гравитонов на мишени с произвольным спином /15,16/, а также рассмотреть другие фотон-адронные процессы, в частности, фоторождение  $\pi$ -мезона на нуклоне при низких энергиях /17,18/.

В § 4 коротко обсуждается предложенный Абарбанелем и Гольдбергом "S-матричный" метод для доказательства низкоэнергетических теорем для рассеяния  $\rho$ -квантов на мишени со спином 0 и 1/2 /19/. Этот метод обладает рядом преимуществ перед имеющимися способами получения низкоэнергетических теорем для комптон-эффекта, в частности, он имеет дело непосредственно с физическими спиральными амплитудами на массовой поверхности. В этом подходе можно, кроме низкоэнергетических теорем, получить ряд правил сумм, например, правило сумм Герасимова /20/. Метод особенно прост при рассмотрении комптон-эффекта на мишени со спином 0. Однако в случае мишени со спином 1/2 получение теорем сталкивается с трудностями. Эти трудности вызваны тем, что указанные авторы используют "приведенные" спиральные амплитуды в S-канале, которые свободны от кинематических особенностей по  $t$ , но содержат особенности по  $S$ .

Для рассмотрения комптон-эффекта на мишени со спином один и выше, а также для других фотон-адронных процессов применение указанного метода затруднительно.

В рамках S-матричного формализма для спиральных амплитуд в диссертации предложен новый простой и общий метод для получения низкоэнергетических теорем, в котором используются регуляризованные спиральные амплитуды. Подчеркнута кинематиче-

ская природа этих теорем, так как существенную роль в их получении играет кинематически-сингулярная структура спиральных амплитуд, которая полностью определяется лоренцевской и калибровочной инвариантностями.

В § 5 рассматривается комптон-эффект на мишени с произвольным спином /16/. Единным образом рассматривается рассеяние фотонов и гравитонов.

Для упругого рассеяния безмассовой частицы на массивной мишени с произвольным спином J регуляризованные амплитуды  $F_{\lambda_3, \lambda_4; \lambda_1, \lambda_2}(s, t)$  связаны с физическими спиральными амплитудами следующим образом:

$$F_{\lambda_3, \lambda_4; \lambda_1, \lambda_2}(s, t) = \sqrt{s}^{|\lambda - \mu|} (s - m^2)^{-2M} \left( s \sin \frac{\theta_s}{2} \right)^{-|\lambda - \mu|} \cdot \left( \cos \frac{\theta_s}{2} \right)^{-|\lambda + \mu|} S_{\lambda_3, \lambda_4; \lambda_1, \lambda_2}(s, t),$$

где  $\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ ,  $\mu = \lambda_3 - \lambda_4$ ,  $M = \max(|\lambda|, |\mu|) - J$ .

Регуляризованные амплитуды содержат только динамические особенности. Для регуляризованной амплитуды дисперсионное соотношение без вычитаний при фиксированном  $S$  имеет вид:

$$F_{\lambda_3, \lambda_4; \lambda_1, \lambda_2}(s, t) = F_{\lambda_3, \lambda_4; \lambda_1, \lambda_2}^B(s, t) + \frac{1}{t} \left\{ \int_{4\mu^2}^{\infty} \frac{dt'}{t' - t} F_{\lambda_3, \lambda_4; \lambda_1, \lambda_2}^{(t)}(s, t') + \int_{u_0}^{\infty} \frac{du'}{u' - u} F_{\lambda_3, \lambda_4; \lambda_1, \lambda_2}^{(u)}(s, u') \right\}.$$

Величина  $F_{\lambda_3, \lambda_4; \lambda_1, \lambda_2}^{(t)}(s, t)$  является абсорбционной частью  $F_{\lambda_3, \lambda_4; \lambda_1, \lambda_2}(s, t)$  в  $t$ - (соответственно  $u$ )

канале. Выделен вклад от одночастичного обмена  $F^{\mu}(s, t)$ . Мы работаем в  $e^2$ -приближении по электромагнитному взаимодействию, поэтому  $U_0 = (m + \mu)^2$ . Одночастичный член имеет полюс в точке  $S = m^2$ . Второй член, вклад от континуума, является неизвестной, но регулярной функцией от  $S$  в точке  $S = m^2$ : она свободна как от кинематических особенностей (содержит регуляризованные амплитуды), так и от динамических особенностей (динамический полюс выделен).

Для физических спиральных амплитуд дисперсионные соотношения имеют вид

$$F_{\lambda_3, \lambda_4; \lambda_1, \lambda_2}(s, t) = F_{\lambda_3, \lambda_4; \lambda_1, \lambda_2}^B(s, t) + \sqrt{s}^{-|\lambda - \mu|} (s - m^2)^{2M} \left( \sin \frac{\theta_s}{2} \right)^{|\lambda - \mu|} \left( \cos \frac{\theta_s}{2} \right)^{|\lambda + \mu|} \cdot \frac{1}{\pi} \left\{ \int_{4\mu^2}^{\infty} \frac{dt'}{t' - t} F_{\lambda_3, \lambda_4; \lambda_1, \lambda_2}(s, t') + \int_{(m + \mu)^2}^{\infty} \frac{du'}{u' - u} F_{\lambda_3, \lambda_4; \lambda_1, \lambda_2}(s, u') \right\}$$

( $F^B$  - борновский член для физической амплитуды, который вычисляется в явном виде).

В низкоэнергетическом пределе, при фиксированном угле рассеяния, когда энергия безмассовой частицы  $E$  стремится к нулю,  $E \rightarrow 0$ ,  $S \rightarrow m^2$  ( $s - m^2 \sim E$ ). Если спиральности  $(\lambda_3, \lambda_4; \lambda_1, \lambda_2)$  таковы, что  $M \equiv [n_{\text{max}}(|\lambda_1|, |\lambda_2|) - J] \geq 1$ , неизвестный вклад от континуума подавляется множителем. Величина таких спиральных амплитуд в низкоэнергетическом пределе определяется борновским членом с точностью до  $O(E^{2M})$ .

Для мишени со спином 0 низкоэнергетические теоремы выполняются для всех спиральных амплитуд. В случае больших спинов достаточное условие выполняется не для всех спиральных амплитуд.

В § 6 рассматривается комптон-эффект на нуклоне. Получены низкоэнергетические теоремы для некоторых  $S$ -канальных амплитуд, затем с помощью кроссинг-соотношений доказаны низкоэнергетические теоремы для всех спиральных амплитуд  $S$ -канала. Приводятся низкоэнергетические выражения с точностью до  $O(E^2)$  для всех спиральных амплитуд.

Далее, в § 7 рассматривается обобщение метода для получения низкоэнергетических теорем для фоторождения. Рассматривается фоторождение  $\pi$ -мезона на нуклоне в пределе, когда масса внешнего мезона равна нулю. Получены низкоэнергетические теоремы для двух комбинаций спиральных амплитуд в  $S$ -канале /18/:

$$\frac{F_{0, \frac{1}{2}; 1, \frac{1}{2}}(E, \theta)}{\sin^2 \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2}} \pm \frac{F_{0, \frac{1}{2}; 1, \frac{1}{2}}(E, \theta)}{\sin \frac{\theta}{2} \cos^2 \frac{\theta}{2}} = F_{\pm}^{\text{Борн}} + O(E^{n_{\pm}}),$$

где  $n_+ = 2$ , а  $n_- = 3$ .

Затем рассматривается  $t$ -канал, где также получено низкоэнергетическое поведение двух независимых комбинаций  $t$ -канальных спиральных амплитуд /17/.

Глава третья посвящается рассмотрению амплитуды рассеяния при высоких энергиях.

В § 8 рассматривается симметрия амплитуды рассеяния и связанные с ней различные возможности разложения амплитуды на полный базис функций. Подчеркнуто, что выбор переменных явля-

ются существенным при описании реакции. В диссертации предложена новая параметризация бинарных процессов путем введения новых переменных  $\Lambda$  и  $\Omega$  вместо  $s$  и  $t$  на основе теоретико-групповых соображений<sup>/21/</sup>, которая оказалась удобной для рассмотрения при высоких энергиях.

$$\Lambda = \frac{\Phi(s,t)}{f(s,t)}, \quad \Omega = \sqrt{-f},$$

где  $\Phi(s,t)$  - функция Киббла,  $\Phi(s,t) = V_\mu V^\mu$ ,

$$V_\mu = \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} p_1^\nu p_2^\rho p_3^\sigma, \quad \text{а}$$

$$f = st + su + ut + as + bt + ct - d$$

( $a, b, c$  и  $d$  зависят от масс участвующих в реакции частиц).

В терминных этих переменных не меняется структура малой группы при переходе из физической области одного канала в физическую область другого, а базис и коэффициент разложения не имеют кинематических особенностей в физических областях. Если рассматривать коллинеарные процессы, то  $\Lambda < 0$  в физической области любого канала, вектор  $V_\mu$  - пространственно-подобен и при фиксированном  $V_\mu$  амплитуда рассеяния есть функция на его малой группе  $O(2,1)$ .

Рассматривается асимптотическое поведение амплитуд при высоких энергиях, где выделены три интересные предельные случая - рассеяние на малые углы при фиксированном  $t$ , рассеяние на углы, близкие к  $\mathcal{A}$  при фиксированном  $u$ , и рассеяние на большие фиксированные углы. Показано, что амплитуда рассеяния при высоких энергиях обладает реджевской асимптоти-

кой при фиксированных  $t$  или  $u$  (это поведение соответствует экспериментально наблюдаемому дифференциальному сечению при малых передачах). Кроме того, предложенный в диссертации подход, основанный на теоретико-групповых соображениях, в области больших фиксированных углов дает дифференциальное сечение, близкое к эмпирической параметризации Криса:

$$\frac{d\sigma}{dt} \sim e^{-d p_1^2 (1 - \frac{1}{4} \sin^2 \theta)}.$$

Таким образом, в рамках предложенной в диссертации новой параметризации возможно единое описание рассеяния на малые и большие углы при высоких энергиях.

В § 9 рассмотрено применение метода паде-аппроксимации к задаче высокоэнергетического рассеяния адронов в квазипотенциальном подходе<sup>/22/</sup>. Решение квазипотенциального уравнения Логгунова и Тавхелидзе<sup>/7/</sup> с квазипотенциалом гауссовского типа<sup>/8/</sup> в области малых углов представляется в виде сходящегося ряда. Показано, что уже диагональная (2,2) паде-аппроксимация дает результат, совпадающий с результатом прямого суммирования ряда. В области углов и энергии, где условие квазиклассичности нарушается, решение квазипотенциального уравнения представляется расходящимся рядом:

$$T(s,t) = i s g \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^{2n}}{(n!)^2} \frac{e^{\frac{a t}{n}}}{n^{3/2}} (i f)^{n-1},$$

где  $g$  и  $a$  - параметры,  $f = \frac{s g e^2}{|t| p} \left(\frac{\mathcal{A}}{a}\right)^{3/2}.$

В диссертации с помощью паде-аппроксимации суммируется расходящийся (асимптотический) ряд, что позволяет описать дан-

ные о протон-протонном рассеянии при высоких энергиях. Отмечено, что применение паде-аппроксимаций может оказаться весьма эффективным при изучении высокоэнергетических решений квазипотенциального уравнения с гладкими квазипотенциалами общего вида.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах /10,15-18,21,22/, доложены на XV международной конференции по высоким энергиям в Киеве (1970), а также на семинарах кафедры теоретической физики, кафедры ядерной физики и Лаборатории ядерной физики Тбилисского университета и семинарах ЛТФ ОИЯИ.

#### Литература

1. Н.Н.Боголюбов, Д.В.Ширков. Введение в теорию квантованных полей. Москва, Гостехиздат, 1957.
2. A.N.Tavkhelidze. Rapporteurs talk at XV-th International Conference on High Energy Physics. p.367. Kiev, Naukova Dumka<sup>1972</sup>.
3. C.Cohen-Tannoudji, A.Morel, H.Navalet. Ann. of Phys., 46, 239 (1968).
4. V.P.Ader, M.Capdeville, H.Nawalet. Nuovo Cim., 56A, 315 (1968).
5. M.Toller. Nuovo Cimento, 37, 631 (1965).
6. Kuo-Hsing Wang. Phys. Rev. D1, 1754 (1971).
7. A.A.Logunov, A.N.Tavkhelidze. Nuovo Cimento, 29, 380 (1963).
8. V.R.Garsevanishvili, V.A.Matveev, L.A.Slepchenko, A.N.Tavkhelidze. Phys. Rev., D4, 847 (1971).
9. J.L.Basdevant. Fortsch. Phys. 20, 283 (1972).

10. М.П.Чавлейшвили. Труды молодых научных работников ТГУ. Том 2, стр. 135, Тбилиси, 1974.
11. F.E.Low. Phys. Rev., 96, 1428 (1954).
12. M.Gell-Mann, M.L.Goldberger. Phys. Rev., 96, 1433 (1954).
13. Л.Д.Соловьев. ТМФ, 15, 59 (1973).
14. W.M.Kroll, M.A.Ruderman. Phys. Rev., 93, 233 (1954).
15. Р.М.Мурадян, М.П.Чавлейшвили. Доклад на XV Международной конференции по физике высоких энергий. Киев, 1970.
16. Р.М.Мурадян, М.П.Чавлейшвили. ТМФ, 8, 16 (1971).
17. М.П.Чавлейшвили. Сообщение ОИЯИ, P2-9417(1975).
18. М.П.Чавлейшвили. Доклады АН СССР, 81, 345 (1976).
19. H.D.Abarbanel, M.L.Goldberger. Phys. Rev., 165, 1594 (1968).
20. С.Б.Герасимов. ЯФ, 2, 598 (1967).
21. К.В.Рерих, М.П.Чавлейшвили, М.Б.Шефтель. Препринт ОИЯИ P2-7937 (1974).
22. В.Р.Гарсеванишвили, М.П.Чавлейшвили. Доклады Болгарской академии наук, 25, II75 (1972).

Рукопись поступила в издательский отдел  
8 апреля 1976 года.