

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

2 - 7081

X - 558

ХЛЕСКОВ
Владимир Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕТА
СО СВЕТОМ МЕТОДОМ
ДИСПЕРСИОННЫХ СООТНОШЕНИЙ

Специальность 01.04.02 - теоретическая
и математическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1973

2 - 7081

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединённого института ядерных исследований и на физическом
факультете Московского государственного университета

ХЛЕСКОВ
Владимир Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕТА
СО СВЕТОМ МЕТОДОМ
ДИСПЕРСИОННЫХ СООТНОШЕНИЙ

Специальность 01.04.02 - теоретическая
и математическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Научные руководители:

доктор физико-математических наук П.С. ИСАЕВ,
доктор физико-математических наук Б.М. БАРБАШОВ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Б.А. АРЕУЗОВ,
доктор физико-математических наук Р.М. МУРАДЯН

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Физический институт им. П.Н. Лебедева АН СССР, г. Москва.

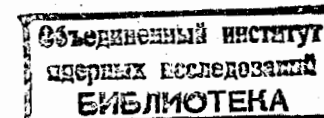
Автореферат разослан "8" сентя 1973 года

Защита диссертации состоится " " _____ 1973 года на
заседании Учёного совета Лаборатории теоретической физики

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Учёный секретарь Совета

Р.А. АСАНОВ



Фундаментальным процессам взаимодействия света со светом в последние годы уделяется много внимания. Это объясняется тем, что в ряде работ было указано на возможность их экспериментального изучения в двухфотонных процессах на встречных пучках^{/1-3/}.

Наиболее удивительная характерная черта полного сечения двухфотонного процесса рождения адронов состоит в том, что оно логарифмически растет с ростом энергии сталкивающихся частиц^{/4,5/}. Уже при энергии $I - 1,5$ Гэв двухфотонный процесс становится существенным конкурентом процессу аннигиляции электрон-позитронных пучков в адроны, сечение которого падает обратно пропорционально квадрату эффективной массы конечного адронного состояния.

В низшем порядке теории возмущений для двухфотонных процессов взаимодействия встречных пучков был развит метод эквивалентных фотонов или метод Вильямса-Вайцеккера. Этот метод даёт выражение для полного сечения процесса $ee \rightarrow ee + \text{адроны}$ через сечение аннигиляции в адроны двух фотонов, обладающих заданными спектрами.

Детальное рассмотрение приближения эквивалентных фотонов проведено, например, в обзорной работе^{/6/}.

Экспериментальное изучение взаимодействия света со светом возможно также в процессах аннигиляции электрон-позитронных пучков в адроны с одним выделенным γ -квантом $ee \rightarrow \text{адроны} + \gamma$.

Для двухфотонного конечного состояния этот процесс рассмотрен в работе^{/7/}. Если конечное адронное состояние не детализуется, то сечение реакции оказывается однозначно связано с абсорбтивной частью $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ амплитуды^{/8/}.

Диссертация посвящена детальному теоретическому анализу процессов взаимодействия света со светом с образованием пар Λ -мезонов и K -мезонов, процесса рассеяния света на свете, а также вопросам экспериментальной проверки этих процессов на встречных электрон-позитронных пучках.

Во "Введении" дан краткий обзор литературы, посвящённой двухфотонным процессам взаимодействия встречных пучков и процессам взаимодействия света со светом, а также представлен план изложения материала.

Возможность исследования процессов взаимодействия света со светом на встречных пучках рассмотрена в I главе диссертации.

Кинематические условия, при которых наиболее существенными будут лишь двухфотонные процессы во встречных пучках, задаются требованиями малости "масс" виртуальных фотонов в сравнении с их энергией^{/9/}:

$$\frac{|(p_+ - p'_+)|^{1/2}}{(E_+ - E'_+)} \ll 1, \quad \frac{|(p_- - p'_-)|^{1/2}}{(E_- - E'_-)} \ll 1. \quad (I)$$

Условие (I) соответствует рассеянию электронов и позитронов под углами, близкими к нулевому.

Показано, что требование (I), при кинематических ограничениях, тем не менее, позволяет в достаточно широких пределах менять энергию виртуальных фотонов.

В § I первой главы диссертации рассмотрены поляризационные свойства виртуальных фотонов в двухфотонных процессах^{/9/}.

В произвольной системе координат поляризованные матрицы плотности $e_1^{\mu\nu}$ и $e_2^{\nu\nu'}$ виртуальных фотонов определяются выражениями^{/10/}:

$$e_1^{\mu\nu} = -\frac{1}{2} g^{\mu\nu} - \frac{p_-^{\mu} p_-^{\nu} + p_-^{\nu} p_-^{\mu}}{(p_- - p_-')^2}$$

$$e_2^{\nu\nu'} = -\frac{1}{2} g^{\nu\nu'} - \frac{p_+^{\nu} p_+^{\nu'} + p_+^{\nu'} p_+^{\nu}}{(p_+ - p_+')^2}$$

Здесь p_-, p_+, p_-, p_+ - 4-импульсы начальных и конечных электронов и позитронов.

В диссертации проведён расчёт всех компонент тензоров поляризации виртуальных фотонов. Для исключения временных компонент поляризационных матриц плотности использовано условие калибровочной инвариантности.

Полученная трехмерная поляризационная матрица плотности для $\partial_e = (\vec{p}_-, \vec{p}_-) = 0$ и $k^2 \rightarrow 0$ переходит в матрицу плотности полностью неполяризованного поперечного света. Найден явный вид матрицы в случае рассеяния лептонов вперёд и получены требования, при которых виртуальные фотоны по своим поляризационным свойствам близки к реальному неполяризованному и реальному эллиптически поляризованному свету.

В § 2 в четвёртом порядке теории возмущений найдена связь дифференциальных сечений процессов $ee \rightarrow ee + A^+ A^-$ и $\gamma\gamma \rightarrow A^+ A^-$, которая делает возможным в определённых кинематических условиях изучение процессов $\gamma\gamma \rightarrow \bar{l}l$ и $\gamma\gamma \rightarrow k\bar{k}$ на встречных пучках.

В § 3 обсуждается принципиальная возможность изучения рассеяния света на свете на большие углы. Здесь проведено сравнение дифференциальных сечений двухфотонного процесса $ee \rightarrow ee + \gamma\gamma$ и процесса двойного тормозного излучения^{/11/}. Проведенное сопоставление дифференциальных сечений двух процессов в случае рождения фотонов под достаточно большими углами к первоначальным пучкам ($\vartheta \gtrsim 8-10^\circ$) показывает, что двухфотонная диаграмма вносит в процесс $ee \rightarrow ee + \gamma\gamma$ доминантный вклад^{/12/}. В таком случае связь дифференциальных сечений процессов $ee \rightarrow ee + \gamma\gamma$ и $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ может быть, в принципе, использована для экспериментального изучения процесса рассеяния света на свете на большие углы. Теоретический анализ процессов $\gamma\gamma \rightarrow \pi\pi$, $\gamma\gamma \rightarrow K\bar{K}$ и $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ проведён в диссертации с помощью метода дисперсионных соотношений.

Впервые дисперсионные соотношения были доказаны Н.Н. Боголюбовым для процесса рассеяния π -мезонов на нуклонах. Метод дисперсионных соотношений успешно применялся при низких энергиях для описания всевозможных процессов, таких, например, как $\pi\pi$ -рассеяние, комптоновское рассеяние, πN -рассеяние, πK -рассеяние и другие.

Дисперсионный анализ реакции взаимодействия двух виртуальных фотонов с образованием пары π -мезонов в области энергий до 1,3 - 1,5 Гэв проведён во 2-ой главе диссертации.

В § 1 рассмотрены кинематика процесса $\gamma\gamma \rightarrow \pi\pi$, следствия зарядовой инвариантности и рассчитаны вклады ω , ρ , π обменных диаграмм в изотопические амплитуды реакции^{/13-15/}.

В § 2 получены дисперсионные уравнения для изотопических амплитуд, согласованные с низкоэнергетической теоремой. Для нормировки амплитуд реакций $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$ и $\gamma\gamma \rightarrow \pi^0\pi^0$ в том-соновском пределе $t \rightarrow 0$, $\mu_\pi^2 \rightarrow 0$ на заряды π -мезонов, использованы дисперсионные уравнения с одним вычитанием^{/16/}. Метод получения дисперсионных уравнений для парциальных волн реакции $\gamma\gamma \rightarrow \pi\pi$ путем фиксации определённых углов рассеяния изложен в § 3 второй главы.

Уравнения для парциальных амплитуд получены с помощью условия двухчастичной унитарности:

$$\text{Im } \tilde{T}_{\alpha\beta}^{(\pi)}(t)_e = e^{-i\delta_e^{(\pi)}(t)} \sin \delta_e^{(\pi)}(t) \tilde{T}_{\alpha\beta}^{(\pi)}(t)_e,$$

где $\delta_e^{(\pi)}(t)$ есть фазы парциальных волн $\pi\pi$ -рассеяния с изоспином T , $\tilde{T}_{\alpha\beta}^{(\pi)}(t)_e$ - парциальные амплитуды реакции $\gamma\gamma \rightarrow \pi\pi(T)$. Дисперсионные сингулярные интегральные уравнения для парциальных s - и d -волн решаются сведением к краевой задаче Римана, которая может быть точно решена известными методами^{/17/}.

Степень неоднозначности решения краевой задачи Римана связана с индексом задачи α :

$$\alpha = \frac{1}{2\pi i} \int_{4\mu_\pi^2}^{\infty} d \ln e^{2i\delta_e^{(\pi)}(t)},$$

причём $\alpha=0$ для $\delta_2^{(\pi)}(\infty)=0$ и $\alpha=1$ для $\delta_2^{(\pi)}(\infty)=\bar{\pi}$.

В диссертации рассмотрены два типа параметризации фаз $\pi\pi$ -рассеяния: с нулевой асимптотикой и с асимптотикой, равной $\bar{\pi}$, т.е. использованы решения, соответствующие индексам $\alpha=0$ и $\alpha=1$. Указывается на принципиальное различие решений в случае фаз $\pi\pi$ -рассеяния, содержащих резонансы^{/18/}. Следует отметить, что ранее этому обстоятельству не уделялось должного внимания^{/19,20/}.

В § 4 представлены основные результаты численных расчётов S - и d - парциальных сечений процесса $\gamma\gamma \rightarrow \pi\pi$. Для фаз $\pi\pi$ -рассеяния в расчётах использованы аналитические кривые с правильным пороговым поведением, которые в области энергий до 1 Гэв хорошо согласованы с экспериментально известными значениями^{/16/}. Рассмотрено влияние экспериментальной down,down-up неоднозначности фазы $\delta_2^0(t)$ $\pi\pi$ -рассеяния на сечение S -волны процесса $\gamma\gamma \rightarrow \pi\pi$, влияние вкладов, приближающих левые разрезы, влияние порогового и высокоэнергетического поведения фаз $\pi\pi$ -рассеяния на сечение S -волны процесса $\gamma\gamma \rightarrow \pi\pi$, а также влияние неупругих процессов.

Методом эквивалентных фотонов из S -волн реакции получены полные сечения взаимодействия встречных пучков $ee \rightarrow ee + \pi\pi$.

В §5 второй главы в результате зависимости амплитуды процесса $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^-$ от "масс" виртуальных фотонов рассчитана электромагнитная разность масс π^\pm и π^0 мезонов^{/15/}.

Глава III диссертации посвящена дисперсионному анализу процесса $\gamma\gamma \rightarrow K\bar{K}$ с учётом двухпионного промежуточного состояния^{/21/}.

В начале главы приведены соображения, позволяющие считать двухпионный вклад в реакцию $\gamma\gamma \rightarrow K\bar{K}$ основным в области энергий, близких к порогу процесса.

Кинематика реакции $\gamma\gamma \rightarrow K\bar{K}$ описана в § I третьей главы. Здесь же рассмотрены следствия зарядовой инвариантности.

Условие двухчастичной унитарности с двухпионным промежуточным состоянием записывается для парциальных амплитуд $T_{\mu\nu}^{(\tau=0)}(t)_e$ процесса $\gamma\gamma \rightarrow K\bar{K}$ в виде:

$$\text{Im } T_{\mu\nu}^{(\tau=0)}(t)_e = \frac{1}{32\pi} \sqrt{1 - \frac{4\mu_K^2}{t}} \tilde{T}_{\mu\nu}^{(\tau=0)}(t)_e \Pi_e^*(t),$$

$l=S,d$

где: $\tilde{T}_{\mu\nu}^{(\tau=0)}(t)_e$ - парциальные амплитуды процесса $\gamma\gamma \rightarrow \pi\pi$ ($\tau=0$); $\Pi_e(t)$ - парциальные волны реакции $\pi\pi \rightarrow K\bar{K}(\tau=0)$, которые считаются известными (S -волна рассчитана в работе^{/22/}, d -волна может быть аппроксимирована f -мезоном).

В § 2 получены дисперсионные уравнения для парциальных волн реакции $\gamma\gamma \rightarrow K\bar{K}(\tau=0)$, которые в случае мягких K -мезонов $P \rightarrow 0$, $P' \rightarrow 0$ (P, P' - 4-х импульсы K -мезонов) нормированы на томсоновский предел.

Результаты численных расчётов S и d -парциальных сечений представлены в § 3. Здесь же приведены полные сечения процесса $ee \rightarrow ee + K\bar{K}(\tau=0)$, полученные из S -волн реакции $\gamma\gamma \rightarrow K\bar{K}(\tau=0)$ методом эквивалентных фотонов.

В главе IV диссертации рассмотрен фундаментальный процесс рассеяния света на свете. Этот процесс относится к нелинейным эффектам в квантовой электродинамике^{/23/}, которые нарушают классическую электродинамику Максвелла.

К настоящему времени рассеяние света на свете сравнительно хорошо изучено лишь в рамках квантовой электродинамики^{/24-26/}. Из возможных адронных промежуточных состояний в процессе $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ рассмотрены лишь псевдоскалярные мезоны^{/27/}, а также оценены двух-

фотонные ширины некоторых адронных резонансов. Несомненный интерес поэтому представляет изучение вкладов возможных двухчастичных адронных состояний в реакцию рассеяния γ -квантов.

В диссертации в § I и 2 главы 4 исследован вопрос о том, какой вклад в реакцию $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ вносит двухпионное состояние^{/12,28/}. Проведены численные расчёты s - и d -парциальных сечений рассеяния света на свете через $\pi\pi$ -промежуточное состояние. Показано, что амплитуды $\gamma\gamma \rightarrow \pi\pi \rightarrow \gamma\gamma$ не интерферируют с амплитудами рассеяния света на свете через псевдоскалярные мезоны.

Для расчёта парциальных s - и d -волн использовались дисперсионные уравнения с одним вычитанием, двухчастичное условие унитарности с двухпионным промежуточным состоянием, а также известные из II главы парциальные амплитуды реакции $\gamma\gamma \rightarrow \pi\pi$.

§ 3 главы IV посвящён процессу рассеяния света на свете через $K\bar{K}(T=0)$ промежуточное двухчастичное состояние^{/21/}. На основе дисперсионного представления для реальной части амплитуды и на основе двухчастичного условия унитарности в этом параграфе рассчитаны s - и d -парциальные сечения реакции $\gamma\gamma \rightarrow K\bar{K}(T=0) \rightarrow \gamma\gamma$, при этом были использованы ранее рассчитанные амплитуды процесса $\gamma\gamma \rightarrow K\bar{K}(T=0)$.

В § 4 проведено качественное сравнение вкладов различных промежуточных состояний в процесс рассеяния света на свете: вклада e^+e^- пар^{/26,29/}, вклада псевдоскалярных мезонов^{/27/}, вклада $e^+e^-e^+e^-$ промежуточного состояния^{/30/} и вкладов $\pi\pi$ и $K\bar{K}$ двухчастичных промежуточных состояний, которые рассчитаны в § I,2,3 данной главы. Приведены оценки вклада $\mu^+\mu^-$ петель в сравнении с вкладом e^+e^- пар в процесс $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$.

Сделан вывод о том, что для рассеяния фотонов на большие углы вклад двухпионного состояния в области энергий 400 Мэв $\lesssim E_{2\gamma} \lesssim 1200$ Мэв является наиболее существенным.

В "Заключении" перечислены основные результаты, которые получены в диссертации.

В "Приложении А" приведены расчёты компонент поляризационных матриц плотности виртуальных фотонов.

Сечение двойного тормозного излучения рассмотрено в "Приложении Б".

В "Приложении В" получены вклады ω и ρ обменных диаграмм в дисперсионные уравнения для изотопических амплитуд реакции $\gamma\gamma \rightarrow \pi\pi$.

Численные результаты - графики сечений процессов - приведены в "Приложении Г".

Основные результаты диссертации изложены в работах^{/9,12-16,18,21,28/} и докладывались на семинарах Лаборатории теоретической физики, в ФИАН'е, в ИФВЭ и МИАН'е, а также на сессии Отделения ядерной физики АН СССР.

Литература:

- I. N.Arteago-Romero, A.Jaccarini, P.Kessler, C.R.Acad.Sc., Paris, 269E, 153, 1129 (1969).
2. В.Е. Балакин, В.М. Буднев, И.Ф. Гинзбург, Письма в ЖЭТФ, II; 559 (1970).
3. S.J.Brodsky, T.Kinoshita, H.Terasawa, Phys.Rev.Lett., 25, 972 (1970).
4. Л. Ландау, Е. Лифшиц, Sow.Phys. 6, 244 (1934).
5. Von Weizsacker K.F.Z. Phys.88, 612 (1934); Williams E.J. Kgl.danske vid. selskab. Mat-fys.medd., 13, N4 (1934).
6. В.М. Буднев, И.Ф. Гинзбург, Г.В. Меледин, В.Г. Сербо . ЭЧАЯ т. 4, в. I, 239 (1973).
7. M.J.Cremtz, M.B.Einhorn, Phys.Rev.Lett., 24, 341 (1970).
8. Z.Kunszt, R.M.Muradyan, V.M.Ter-Antonyan, JINR, E2-5347, Dubna (1970).
9. П.С. Исаев, В.И. Хлесков. Сообщение ОИЯИ, P2-5505, Дубна, (1971).
10. C.W.Akerlof, W.W.Ash, K.Berkelman, C.A.Lichtenstein, A.Ramanauskas and R.H.Sieman, Phys.Rev. 163, 1482 (1967).
- II. В.Н. Байер, В.М. Галицкий. ЖЭТФ, 49, 661 (1965).
12. П.С. Исаев, В.И. Хлесков. Письма в ЖЭТФ, 16, 190 (1972).
13. П.С. Исаев, В.И. Хлесков. Сообщение ОИЯИ, E2-6160, Дубна, (1971).
14. В.И. Хлесков. Письма в ЖЭТФ, 15, 123 (1972).
15. П.С. Исаев, В.И. Хлесков. Сообщение ОИЯИ, P2-6333, Дубна (1972).

16. П.С.Исаев, В.И. Хлесков. ЯФ,16, IOI2 (1972); ОИЯИ, E2-6527, Дубна (1972).
17. Ф.Д. Гахов. "Краевые задачи". Физматгиз, Москва (1958).
18. П.С. Исаев, В.И. Хлесков. Сообщение ОИЯИ, P2-6943, Дубна, (1973).
19. D.H.Lyth, Nucl.Phys., B30, 145 (1971).
20. G.Schierholz, K.Sundermeyer, DESY 71/49, August (1971).
21. П.С. Исаев, В.И. Хлесков. ЯФ, 17, 368 (1973); ОИЯИ, E2-6666, Дубна, (1973).
22. П.С. Исаев, В.А. Матвеев. ЯФ, 4, 198 (1966).
23. P.P.Kane, G.Basavaraju, Rev.Mod.Phys., 39, 59 (1967).
24. A.Ahiezer, Sow.Phys. 11, 263 (1937).
25. H.Euler, Ann.d.Phys. 26, 398 (1936).
26. R.Karplus, M.Neuman, Phys.Rev., 80, 380 (1950); 93, 776 (1951).
27. Z.Kunszt, R.M.Muradyan, V.M.Ter-Antonyan, JINR, E2-5424, Dubna (1970).
28. P.S.Isaev, V.I.Khleskov, JINR, E2-6473, Dubna (1972).
29. B.de Tollis, Nuovo Cimento, 32, 757 (1964); 35, 1182 (1965).
30. Л.Н. Липатов, Г.В. Фролов. ЯФ, 13, 588 (1971).

Рукопись поступила в издательский отдел
18 апреля 1973 года.