

С 343
Б-611



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

С.М. Биленький

2689

**ВОПРОСЫ ТЕОРИИ РЕАКЦИЙ НА ПОЛЯРИЗОВАННОЙ
ПРОТОННОЙ МИШЕНИ**

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

Дубна 1986

С.М. Биленький

2689

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ РЕАКЦИЙ НА ПОЛЯРИЗОВАННОЙ
ПРОТОННОЙ МИШЕНИ

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



3630 89.

За последние годы достигнут существенный прогресс в физике элементарных частиц. Важнейшие открытия последних лет (открытие несохранения четности в слабых взаимодействиях, открытие резонансов, обнаружение распадов долгоживущих K^0 -мезонов на два π -мезона и др.) привели к значительному развитию теории.

Однако последовательная динамическая теория сильных взаимодействий в настоящее время отсутствует.

Анализ сильных взаимодействий на основе лишь общих принципов теории без конкретных предположений о динамике, проверка общих принципов по-прежнему остаются важным направлением в физике элементарных частиц.

Работы, представленные в диссертации, связаны с этим направлением. Основу диссертации составляет цикл работ ^{/1-14/}, посвященных рассмотрению возможных применений поляризованной протонной мишени в физике высоких энергий.

Первый опыт на поляризованной мишени был выполнен в 1962 году ^{/15/}. В этом эксперименте измерялось сечение рассеяния поляризованного пучка с энергией 20 Мэв поляризованной протонной мишенью. Мишень, использовавшаяся в этом эксперименте, была весьма небольших размеров; поляризация протонов в мишени составляла около 20%. В настоящее время во многих крупных лабораториях мира имеются поляризованные мишени достаточно больших размеров с поляризацией протонов от 50 до 80%.

На поляризованной мишени уже выполнен целый ряд важных опытов: измерена поляризация, возникающая при рассеянии протонов протонами в широком интервале энергий от 1,7 до 6,15 Гэв ^{/16/}, измерен параметр $C_{\text{ан}}$ в р-р рассеянии при энергии 680 Мэв, ^{/17/} измерена поляризация в π^- -р рассеянии в интервале импульсов от 6 до 10 Гэв/с ^{/18/}, выполнены опыты по измерению четностей Σ^- и Ξ^- -гиперонов ^{/19,20/} и др.

Все существующие мишени представляют собой кристалл двадцатичетырехводного двойного нитрата лантана-магния, содержащий ~ 3% водорода по весу. Около одного процента ионов La^{3+} в кристалле замещается парамагнитными ионами Nd^{3+} с эффективным спином электронной оболочки равным 1/2. Кристалл охлаждается до низких температур ($\sim 1^\circ\text{K}$) и помещается в однородное магнитное поле ($\sim 20 \text{ Kgc}$). Перпендикулярно постоянному магнитному полю прикладывается высокочастотное магнитное поле.

При соответствующей частоте и достаточной интенсивности переменного поля протоны кристаллизационной воды поляризуются (физические основы этого метода поляризации, который принято называть методом динамической поляризации, излагаются во втором разделе диссертации).

Использование поляризованной протонной мишени в экспериментах с частицами высоких энергий делает необходимыми теоретические исследования возможностей ее применения.

В работах, представленных в диссертации, рассматриваются в основном следующие вопросы:

- (1) определение внутренних четностей частиц в экспериментах с поляризованной мишенью;
- (2) новые возможности феноменологического анализа, появляющиеся благодаря использованию поляризованной мишени;
- (3) возможности проверки общих принципов в экспериментах с поляризованной мишенью.

Первые работы этого цикла были выполнены до создания поляризованной мишени. В них предложен общий метод определения внутренних четностей странных частиц.

На основе лишь общих требований инвариантности относительно вращений и отражений можно показать ^{/1,2/}, что сечение любой из реакций



в случае, если мишень поляризована, равно:

$$\sigma_{\vec{P}} = \sigma_0 (1 + I \vec{P}_0 \cdot \vec{P}).
 \tag{2}$$

Здесь \vec{P} — поляризация мишени, σ_0 — сечение реакции на неполяризованной мишени, $\vec{P}_0 = P_0 \vec{n}$ — поляризация конечных гиперонов, возникающая в случае неполяризованной мишени (\vec{n} — нормаль к плоскости реакции), а I — относительная внутренняя четность процесса. Относительная четность I равна

$$I = \frac{I_i}{I_f},
 \tag{3}$$

где $I_i (I_f)$ — произведение внутренних четностей начальных (конечных) частиц. Из (2) вытекает, что асимметрия на поляризованной мишени равна

$$\sigma = P_0 (\vec{P} \cdot \vec{n}). \quad (4)$$

Таким образом, для определения относительной четности I необходимо при одной и той же энергии выполнить два эксперимента. В первом эксперименте следует измерить асимметрию σ на поляризованной мишени. Во втором должна быть измерена поляризация гиперонов, возникающая в реакции с неполяризованной мишенью. Величина этой поляризации определяется по распаду гиперонов и для ряда значений углов и энергий в настоящее время известна. Как видно из (4), сравнение результатов этих двух независимых экспериментов позволяет однозначно определить относительную четность I (фактически достаточно сравнить лишь знаки σ и P_0).

Имеются предварительные сообщения, что этим методом в ЦЕРНе и Беркли были определены внутренние четности Ξ - и Σ -гиперонов^{/18,20/}.

Соотношение (2) имеет место для любых процессов типа

$$0 + \frac{1}{2} \rightarrow 0 + \frac{1}{2} \quad (5)$$

(0 и $1/2$ - спины частиц). Это означает, что предложенным методом могут быть определены четности любых частиц, участвующих в реакциях такого типа.

Вопросы определения внутренних четностей странных частиц в реакциях с поляризованной мишенью подробно рассмотрены в третьем разделе диссертации.

Соотношение (2) получено здесь также в ковариантном виде^{/3/}:

$$\sigma_{\xi} = \sigma_0 (1 + I \xi \cdot \xi^0), \quad (8)$$

где ξ_{μ} - 4-вектор начальной поляризации, а ξ_{μ}^0 - 4-вектор поляризации конечных фермионов в реакции с неполяризованными начальными частицами.

Наконец, в третьем разделе диссертации рассмотрены реакции типа

$$0 + \frac{1}{2} \rightarrow 0 + 0 + \frac{1}{2}. \quad (7)$$

Показано^{/4/}, что соотношение (2) справедливо и для реакций этого типа при условии, что отбираются такие случаи, когда импульсы всех частиц лежат в одной плоскости.

В четвертом разделе диссертации рассмотрены реакции

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \rightarrow 0 + 0. \quad (8)$$

На основе требований инвариантности относительно вращений и отражений показано^{/5/}, что измерение полных сечений реакций такого типа в случае, если пучок и мишень

поляризованы, позволяет определить относительную четность процесса I. Показано также, что относительная четность I может быть однозначно определена путем сравнения асимметрии в реакции (8) с поляризованным пучком и неполяризованной мишенью с асимметрией, возникающей в случае неполяризованного пучка и поляризованной мишени.

В следующих трех разделах рассматриваются новые возможности феноменологического анализа процессов рассеяния мезонов нуклонами и нуклонов нуклонами, возникающие в связи с созданием поляризованной протонной мишени.

В пятом разделе рассмотрено рассеяние мезонов нуклонами ^{/8/}. Поляризованная мишень дает возможность измерить в этом случае параметры R и A, характеризующие поляризацию конечных нуклонов, возникающую при рассеянии мезонов на поляризованных нуклонах. Очевидно, что без поляризованной мишени определить параметры R и A невозможно.

Измерение сечения рассеяния мезонов неполяризованной мишенью, поляризации нуклонов отдачи (асимметрии при рассеянии на поляризованной мишени), а также параметров R и A позволяет однозначно (с точностью до общей фазы) восстановить матрицу мезон-нуклонного рассеяния непосредственно по экспериментальным данным при фиксированных значениях угла и энергии. Метод прямого восстановления матрицы рассеяния будет наиболее эффективен в области высоких энергий, где проведение однозначного фазового анализа затруднено. При высоких энергиях, кроме обычной релятивистской кинематики, необходимо, как известно ^{/21,22/}, учитывать также специфический релятивистский поворот спина.

В пятом разделе получены с учетом этого эффекта релятивистские формулы для прямого восстановления матрицы мезон-нуклонного рассеяния по данным при фиксированных значениях угла и энергии. Рассмотрено рассеяние π -мезонов протонами. Вследствие изотопической инвариантности матрица π -мезон-нуклонного рассеяния характеризуется четырьмя скалярными комплексными функциями угла рассеяния и энергии. Получены релятивистские формулы для прямого восстановления этих функций из данных по рассеянию π^+ - и π^- -мезонов протонами и перезарядке. Показано, что для их однозначного определения необходимо при данном значении угла и энергии произвести измерения девяти величин.

В шестом и седьмом разделах диссертации рассматривается рассеяние нуклонов нуклонами ^{/7,8/}. Развита метод прямого восстановления матрицы нуклон-нуклонного рассеяния в релятивистском случае. Получены релятивистские соотношения, связывающие все измеряемые на опыте компоненты поляризационных тензоров второго ранга с компонентами поляризационных тензоров в с.д.и. Показано, как по сечению, поляризации и компонентам поляризационных тензоров второго ранга в с.д.и. могут быть однозначно (с точностью до общей фазы) восстановлены все пять скалярных функций, характеризующих

матрицу нуклон-нуклонного рассеяния. Рассмотрены разные процедуры восстановления, которые могут быть использованы в различных областях углов и энергий. Рассмотрено рассеяние протонов протонами и нейтронов протонами. Получены релятивистские формулы для прямого восстановления матрицы нуклон-нуклонного рассеяния в состоянии с полным изоспином, равным нулю, из данных по $n-p$ и $p-p$ рассеянию.

Обсуждаются возможные опыты по измерению поляризации нуклонов, возникающей при рассеянии поляризованного пучка поляризованной мишенью. Рассматриваются также опыты по измерению корреляции поляризаций конечных нуклонов в случае, когда падающий пучок поляризован (либо когда поляризована мишень). В этих экспериментах впервые становится возможным определение компонент поляризационного тензора третьего ранга. Получены релятивистские формулы для всех измеряемых в этих опытах величин. Показано, что если известны компоненты поляризационного тензора третьего ранга, то процедура прямого восстановления матрицы рассеяния существенно упрощается.

Поляризованная мишень значительно облегчает измерение поляризационных характеристик нуклон-нуклонного рассеяния. В связи с этим программа прямого восстановления матрицы нуклон-нуклонного рассеяния становится в настоящее время реальной.

В восьмом разделе обсуждаются общие свойства полных сечений реакций с поляризованными пучками и поляризованными мишенями ^{/9/}. Спины частиц пучка и мишени предполагаются равными 1/2. Показано, что измерение полных сечений в случае поляризованного пучка и поляризованной мишени позволяет определить полные сечения реакции из синглетного и триплетных состояний. Обобщена оптическая теорема на случай поляризованных начальных частиц.

В девятом разделе рассматриваются процессы аннигиляции

$$\bar{p} + p \rightarrow \bar{l} + l \quad (9)$$

(l - электрон, либо μ -мезон) в общем случае поляризованного пучка антипротонов и поляризованной протонной мишени ^{/10/}.

Зарядовый и магнитный формфакторы, характеризующие в однофотонном приближении амплитуды процессов (9), комплексны (область времениподобных передач). Измерение дифференциальных сечений этих процессов с неполяризованными начальными частицами дает возможность определить только модули формфакторов.

Показано, что изучение процессов аннигиляции (9) в случае поляризованных начальных частиц позволило бы определить также относительную фазу зарядового и магнитного формфакторов протона. Получен критерий применимости однофотонного приближения. Показано, что измерение полных сечений процессов (9) с поляризованным пучком и поляризованной мишенью позволило бы сделать заключения о применимости однофотонного приближения.

В следующих трех разделах диссертации рассматриваются возможности проверки общих принципов теории и возможности проверки SU(4) -симметрии в экспериментах с поляризованной мишенью.

В девятом разделе показано /11/, что поляризованная мишень дает возможность осуществить прямую проверку CPT -инвариантности.

Рассмотрен процесс упругого рассеяния антипротонов протонами:

$$\bar{p} + p \rightarrow \bar{p} + p \quad (10)$$

Показано, что из CPT -инвариантности и инвариантности относительно вращений вытекают следующие соотношения

$$\begin{aligned} \vec{P}^{(1)} \cdot \vec{n} &= \vec{A}^{(2)} \cdot \vec{n} \\ \vec{P}^{(2)} \cdot \vec{n} &= \vec{A}^{(1)} \cdot \vec{n} \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь $\vec{P}^{(1)}$ ($\vec{P}^{(2)}$) - вектор поляризации антипротонов (протонов), возникающей в реакции (10) с неполяризованной мишенью, а $\vec{A}^{(2)}$ ($\vec{A}^{(1)}$) - вектор асимметрии в случае рассеяния неполяризованного пучка антипротонов поляризованной протонной мишенью (поляризованного пучка неполяризованной мишенью).

Экспериментальная проверка соотношений (11) была бы прямой проверкой CPT -инвариантности сильных (а при достаточной точности и электромагнитных) взаимодействий. Рассмотрены возможные нарушения равенств (11) в случае, если матрица процесса не инвариантна относительно CPT -преобразования. Из CPT -инвариантности и инвариантности относительно вращений получены также соотношения между другими поляризационными характеристиками процесса (10).

Поляризованная мишень облегчает измерение поляризации частиц при высоких энергиях.

В одиннадцатом разделе получены асимптотические соотношения между поляризациями частиц в перекрестных реакциях /12/. Эти соотношения основываются на перекрестной симметрии, теореме Фрагмена-Линделефа и принципах инвариантности. В частности показано, что, если при $s \rightarrow \infty$ и фиксированном t поляризация протонов отдачи в процессе упругого рассеяния π^+ -мезонов протонами отлична от нуля, то поляризация протонов отдачи в π^- -рассеянии при тех же значениях s и t также не равна нулю и отличается от поляризации в процессе π^+ -рассеяния лишь знаком; поляризация нейтрона отдачи в процессе перезарядки $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$ обращается в нуль в асимптотической области; обращается в нуль в этой области поляризации Ξ^- -гиперонов в реакции $K^- + p \rightarrow \Xi^- + K^+$; равны по величине и противоположны по знаку поляризации Σ^+ -гиперонов в реакциях $\pi^+ + p \rightarrow \Sigma^+ + K^+$ и $K^- + p \rightarrow \Sigma^+ + \pi^-$.

В двенадцатом разделе диссертации SU(4) и SU(6) симметрии применяются к барион-барионным столкновениям.

На основе SU(4) - симметрии получены соотношения между полными сечениями взаимодействия нуклонов с нуклонами в случае поляризованных начальных частиц. Проверка этих соотношений требует проведения экспериментов с поляризованными пучками нуклонов и поляризованными протонными мишенями.

Показано, что из SU(4) - симметрии следует равенство 1S_0 и 3S_1 амплитуд нуклон-нуклонного рассеяния. Производится сравнение с результатами фазового анализа. Показано, что это предсказание SU(4)-симметрии находится в согласии с экспериментальными данными в интервале энергий от 100 до 400 Мэв.

SU(6) - симметрия применяется к столкновениям барюнов с барионами в S -состоянии. Экспериментальные данные по рассеянию Λ -гиперонов протонами, полученные в самое последнее время, согласуются с предсказаниями SU(6) - симметрии для S- волн.

В тринадцатом разделе рассматривается β -распад поляризованного нейтрона /23/. Вычислены различные наблюдаемые эффекты (корреляция электрон-нейтрино, спектр электронов, полная вероятность распада, асимметрия при распаде поляризованных нейтронов, поляризация электронов) с учетом членов порядка отношения массы электрона к массе нуклона, происходящих от "слабого магнетизма" и учета отдачи протона. Показано, что поправки к корреляции электрон-нейтрино и асимметрии электронов достигают нескольких процентов. Поправки к остальным эффектам составляют доли процента.

Наконец, в последнем четырнадцатом разделе диссертации излагается простой способ получения вытекающих из изотопической инвариантности соотношений между наблюдаемыми величинами (сечения, поляризации) /24/. Показано, что известное правило Шмушкевича /25/ является следствием соотношений ортогональности и симметрии коэффициентов Клебша-Гордана. Получено столь же простое правило для получения соотношений между любыми поляризационными характеристиками процессов. Рассмотрены конкретные примеры.

Результаты работ, представленные в диссертации, докладывались на Международных конференциях по физике высоких энергий.

Л и т е р а т у р а

1. S.M.Bilenky. Nuovo Cimento 10, 1049 (1958).
2. С.М. Биленький. ЖЭТФ, 30, 291 (1959).
3. С.М. Биленький, Р.М. Рындия. ЖЭТФ, 36, 1609 (1959).
4. С.М. Биленький, Р.М. Рындия. ДАН, 124, 63 (1959).
S.M.Bilenky, R.M.Ryndia. Nuovo Cimento, 12, 106 (1959).
5. С.М. Биленький, Р.М. Рындия. ЖЭТФ, 45, 1192 (1963).
6. С.М. Биленький, Р.М. Рындия. ЯФ, 3, вып. 7 (1966).
Препринт ОИЯИ Е-2521, Дубна, 1965.

7. С.М. Биленький, Л.И. Липидус, Р.М. Рындин. Препринт ОИЯИ Р- 2630, Дубна 1966.
8. С.М. Биленький, Л.И. Липидус, Р.М. Рындин. ЖЭТФ, 49, 1653 (1965).
9. S.M.Bilenky, R.M.Ryndin. Phys. Letters., 6, 217 (1963).
С.М. Биленький, Р.М. Рындин. Препринт ОИЯИ Р-1350, Дубна 1963.
10. С.М. Биленький, Р.М. Рындин. ЯФ, 1, 84 (1965).
11. С.М. Биленький. Письма ЖЭТФ, 3, 118 (1966).
12. С.М. Биленький, Нгуен Ван Хьеу, Р.М. Рындин. ЖЭТФ, 46, 10886 (1964).
13. С.М. Биленький, Ю.М. Казаринов, Л.И. Липидус, Р.М. Рындин. ЯФ, 2, 762 (1965).
14. С.М. Биленький, Л.И. Липидус, Р.М. Рындин. УФН, 84, 243 (1964).
15. A.Abragam, M.Borghini, P.Catillon et al. Phys. Letters, 2, 310 (1962).
16. H.Steiner, J.Arens, F.Betz, O.Chamberlain, et al.
Труды XII международной конференции по физике высоких энергий, Дубна, 1964.
17. Dost. UCRL-11877 (1965).
18. M.Borghini, G.Coignet, L.Dick et al. Preprint CERN (1966).
19. B.Dieterle, I.Arens, O.Chamberlain, et al. Bull Amer. Phys. Soc. 10, 700 (1965).
20. M.Borghini. Preprint CERN 66-3 (1966).
21. H.Stapp. Phys. Rev. 103, 425 (1956).
22. Чжоу Гуан чжао, М.И. Широков. ЖЭТФ, 34, 1230 (1958).
23. С.М. Биленький, Р.М. Рындин, Я.А. Смородянский, Хэ Цзо сю. ЖЭТФ, 37, 1758 (1959).
24. С.М. Биленький. ЖЭТФ, 33, 821 (1957).
25. И.М. Шмушкевич. ДАН, 104, 235 (1955).

Рукопись поступила в издательский отдел
8 апреля 1966 г.