

С 346

А-341

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1 - 2992

Л.С. Ажгирей

ФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ РАССЕЯНИЯ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЯМИ
657 И 435 МЭВ ПРОТОНАМИ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель –
член-корреспондент АН СССР
профессор

М.Г. Мешеряков

Дубна 1966

I - 2992

Л.С. Ажгирей

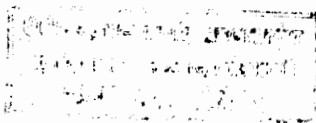
У014 вр.

ФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ РАССЕЯНИЯ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЯМИ
657 И 435 МЭВ ПРОТОНАМИ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель -
член-корреспондент АН СССР
профессор

М.Г. Мешеряков



Исследование нуклон-нуклонного рассеяния имеет большое значение для понимания характера сил, действующих между двумя нуклонами. Наиболее наглядным способом представления результатов опытов по рассеянию является их анализ для определения фазовых сдвигов всех возможных состояний системы при каждой энергии. Если все фазовые сдвиги удастся точно определить, то они, в принципе, содержат всю возможную информацию о междуклонных силах.

Фазовый анализ всей совокупности данных по нуклон-нуклонному рассеянию в области энергий ниже порога образования мезонов позволил установить энергетическую зависимость фазовых сдвигов вплоть до энергии 345 Мэв^{/1-4/}. Выполнение на синхротронном в Дубне большей части программы исследования pp -взаимодействия вблизи 660 Мэв^{/5-11/} открыло возможность проведения фазового анализа в этой области энергий, где необходимо учитывать процессы мезообразования^{/12-15/}.

Реферируемая диссертация посвящена фазовому анализу данных по pp -рассеянию при энергиях 667 и 435 Мэв. Результаты, положенные в основу диссертации, были получены в 1963-1966 гг., опубликованы в работах^{/14-20/} и доложены на V Всесоюзной конференции по теории элементарных частиц в Ужгороде (1963 г.) и на Международной конференции по физике высоких энергий в Дубне (1964 г.).

Диссертация состоит из пяти глав и приложения. В первой главе рассмотрен формальный аппарат, описывающий рассеяние нуклонов нуклонами и используемый при проведении фазового анализа. Здесь кратко рассматриваются также однобозонные обменные модели нуклон-нуклонного рассеяния. Во второй главе подробно описан фазовый анализ pp -рассеяния при 657 Мэв и приведены сведения о характере pp -взаимодействия вблизи 660 Мэв, полученные из фазового анализа. Третья глава посвящена фазовому анализу pp -рассеяния при 435 Мэв; результаты этого анализа сравниваются с экспериментальными данными, полученными после проведения анализа. В четвертой главе приведены результаты дальнейшего уточнения фазовых решений в связи с последними измерениями параметров pp -рассеяния при 430 и 667 Мэв. Пятая глава посвящена фазовому анализу pp -рассеяния при 657 Мэв с учетом однобозонного обмена. Здесь

описывается также определение значений констант связи и масс обмениваемых частиц; приводятся энергетические зависимости фазовых сдвигов нуклон-нуклонного рассеяния в области энергий от 25 до 660 Мэв, вычисленные на основе однобозонной обменной модели. В приложении содержится сводка формул для релятивистских кулоновских фазовых сдвигов, для однобозонных обменных амплитуд pp -рассеяния, дается вывод некоторых соотношений, а также приведены численные значения амплитуд упругого pp -рассеяния при 657 Мэв.

I

Процесс упругого рассеяния нуклонов нуклонами полностью описывается матрицей рассеяния ^{/21/}, которая является оператором в четырехмерном объединенном спиновом пространстве системы двух нуклонов. Предполагая инвариантность матрицы рассеяния относительно пространственных вращений и отражений и обращения времени, а также справедливость гипотезы зарядовой независимости ядерных сил (для pp -системы), 16 ее матричных элементов можно выразить через 5 независимых амплитуд рассеяния ^{/21,22/}:

$$M = \frac{1}{2} a (1 + \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{n} \vec{\sigma}_2 \cdot \vec{n}) + \frac{1}{2} b (1 - \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{n} \vec{\sigma}_2 \cdot \vec{n}) + \frac{1}{2} c (\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{K} \vec{\sigma}_2 \cdot \vec{K} + \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{P} \vec{\sigma}_2 \cdot \vec{P}) + \frac{1}{2} d (\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{K} \vec{\sigma}_2 \cdot \vec{K} - \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{P} \vec{\sigma}_2 \cdot \vec{P}) + \frac{1}{2} e (\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{n} + \vec{\sigma}_2 \cdot \vec{n}),$$

где $\vec{\sigma}_1$ и $\vec{\sigma}_2$ - спиновые операторы сталкивающихся частиц,

$$\vec{K} = \frac{\vec{k} - \vec{k}'}{2k \sin \frac{\theta}{2}}, \quad \vec{P} = \frac{\vec{k} + \vec{k}'}{2k \cos \frac{\theta}{2}}, \quad \vec{n} = \frac{\vec{k} \times \vec{k}'}{k^2 \sin \theta},$$

$\hbar \vec{k}$ и $\hbar \vec{k}'$ - начальный и конечный импульс рассеянного нуклона в с.д.м. Все наблюдаемые в pp -рассеянии величины можно выразить ^{/22/} через амплитуды a, b, c, d, e , которые являются произвольными комплексными функциями энергии и угла рассеяния θ в с.д.м.

Свойство унитарности S -матрицы учитывается в задаче фазового анализа с помощью процедуры разложения амплитуд рассеяния по парциальным волнам путем введения фазовых сдвигов рассеяния ^{/23/}. Из-за короткого радиуса действия ядерных сил только низшие парциальные волны дают заметный вклад в рассеяние; поэтому процесс рассеяния можно приближенно описать сравнительно небольшим числом параметров: фазовых сдвигов и параметров смешивания парциальных волн, ответственных за рассеяние.

В модифицированных схемах фазового анализа вклады состояний с высшими орбитальными моментами вычисляются из мезонной теории ^{/24,25/}. Такой подход, позволяя

сократить число параметров, определяемых из эксперимента, вместе с тем уменьшает многозначность фазового анализа.

Дальнейшим шагом на пути развития мезонной теории ядерных сил явился бы учет в нуклон-нуклонном рассеянии многомезонных обменных процессов. Открытие мезонных резонансов, сильно связанных с нуклон-антинуклонной системой; позволило в известной степени продвинуться в решении этой задачи. В настоящее время предложено несколько однобозонных обменных моделей ^{/26-28/}, в которых силы, действующие между двумя нуклонами, интерпретируются в рамках обмена резонансными системами (η^- , ω^- , ρ^- , ϕ^- -частицы) в дополнение к однопионному обмену. С помощью таких моделей удается качественно воспроизвести основные свойства нуклон-нуклонного рассеяния в интервале от 0 до 320 Мэв.

II

Во второй главе сначала приводятся экспериментальные данные о pp -рассеянии вблизи 660 Мэв, использованные при поиске фазовых решений. Далее подробно описан учет неупругих процессов.

При наличии неупругих процессов необходимо пользоваться комплексными фазовыми сдвигами. Мнимая часть фазового сдвига γ связана с коэффициентом поглощения γ соотношением $\exp(-2\gamma) = \gamma$.

В соответствии с резонансной моделью образования π^- -мезонов в нуклон-нуклонных столкновениях ^{/29/} предполагалось, что имеет место резонансное взаимодействие π^- -мезона с нуклоном в состоянии с $T = 3/2$, $J = 3/2$ и что образование пионов происходит только с S - и P -разлетами резонансной подсистемы и нуклона. При этих предположениях процесс мезообразования оказывается связанным только с начальными $^3P_{0,1,2}$, 1D_2 и $^3F_{2,3}$ - состояниями pp -системы. При поиске фазовых решений поглощение в состояниях $^3P_{0,1,2}$ и $^3F_{2,3}$ описывалось с помощью усредненных по j коэффициентов поглощения γ_1 и γ_3 ^{/13/}, а в состоянии 1D_2 - коэффициентом γ_2 . Полные сечения образования пионов ^{/30-32/} связаны с коэффициентами поглощения соотношениями:

$$\sigma(\pi^+ d) + \sigma(\pi^+ (pn)_S) = (5\pi/2k^2)(1 - \gamma_2^2),$$

$$\sigma(\pi^+ (pn)_P) + \sigma(\pi^0 pp) = (\pi/2k^2)[9(1 - \gamma_1^2) + 12(1 - \gamma_3^2)].$$

Разбиение величины сечения $\sigma(\pi^+ pn)$ на части $\sigma(\pi^+ (pn)_S)$ и $\sigma(\pi^+ (pn)_P)$, отвечающие образованию мезонов в реакции $p + p \rightarrow \pi^+ + p + n$ с S - и P -разлетами, первоначально было сделано в согласии с ^{/33/}, но затем отношение $\sigma(\pi^+ (pn)_S)/\sigma(\pi^+ pn)$ варьировалось, чтобы обеспечить статистически наилучшее описание всех наблюдаемых величин.

Поиск фазовых решений производился на электронно-счетной машине ОИЯИ. Параметры определялись по методу наименьших квадратов, из условия минимума величины χ^2 — суммы взвешенных квадратов отклонений экспериментальных значений от расчетных кривых. Поиск минимумов функционала χ^2 осуществлялся методом линеаризации^{/34/}. Фазовые сдвиги волн с $l \geq 5$ учитывались в одноионном приближении ($f^2 = 0,08$; $m(\pi^0) = 135$ Мэв).

В результате 70 поисков со случайных начальных значений параметров в пределах 1% уровня значимости было найдено одно решение со значением $\chi^2 = 38,7$ (таблица 1, столбец 1) при 33 степенях свободы. Сравнение найденного решения с решениями, полученными в^{/12/} и^{/13/}, показало, что оно описывало экспериментальные данные со значительно большей достоверностью. Аналог этого решения был получен также в^{/35/}.

Результаты измерений параметра A в интервале углов $54^\circ - 128^\circ$ ^{/36/} позволили сделать выбор между различными вариантами фазового анализа pp -рассеяния при 660 Мэв: они согласовались только с угловой зависимостью $A(\theta)$, вычисленной по фазовым сдвигам решения, приведенного в таблице 1 (столбец 1). Результаты уточнения этого решения с учетом данных о параметре A приведены в столбцах 2 и 3 таблицы 1.

Для выяснения того, не существует ли другого решения с низким значением χ^2 , отличного от решения, приведенного в таблице 1, было предпринято исследование наиболее вероятных решений, полученных в других работах. Анализ показал, что в настоящее время вблизи 660 Мэв имеется лишь одно устойчивое решение, статистически удовлетворительно согласующееся с имеющейся информацией о pp -рассеянии. Следует особо подчеркнуть, что не удается статистически надежно представить через фазовые сдвиги данные о pp -рассеянии при 660 Мэв, не учитывая образования мезонов в начальных 3F -состояниях.

Характерным свойством фазового решения для pp -рассеяния при 657 Мэв является то, что значения реальных частей фазовых сдвигов этого решения можно плавно связать, как это показано на рис. 1, с соответствующими кривыми γ_{LAM} -решения^{/2/}, представляющими энергетические зависимости фазовых сдвигов pp -рассеяния в интервале 9,7-345 Мэв, и с фазовыми сдвигами решения 1^{/3/}.

III

Естественно предположить, что плавные кривые, связывающие фазовое решение при 657 Мэв с решением 1 ниже 310 Мэв, в какой-то мере отражают основные особенности энергетического поведения фазовых сдвигов низких состояний pp -системы между 310 и 660 Мэв. В связи с этим представлялось интересным попытаться найти набор фазовых сдвигов, который описывал бы экспериментальные данные при промежуточной энергии.

Т а б л и ц а 1

Реальные части фазовых сдвигов (в градусах) и коэффициенты поглощения при 657 Мэв. В скобках указаны значения фазовых сдвигов, вычисленные в одноионном приближении

	I	2	3
$\delta(^1S_0)$	- 3I, 5 \pm 4, 0	-32, 0 \pm 5, 5	-3I, 9 \pm II, I
$\delta(^3P_0)$	- 52 \pm I 0	-58, 7 \pm 8, 4	-46, 0 \pm I 8, 0
$\delta(^3P_1)$	-36, 9 \pm 3, 7	-34, I \pm 4, 3	-35, 8 \pm 5, 7
$\delta(^3P_2)$	I 8, 8 \pm I, 2	I 9, 3 \pm 3, 4	I 8, 3 \pm 3, 3
ϵ_2	-	-3, 6 \pm 2, 8	- 2, 8 \pm 4, 6
$\delta(^1D_2)$	II, 7 \pm 2, 2	8, 7 \pm 4, 9	7, 5 \pm 6, 9
$\delta(^3F_2)$	-4, 2 \pm I, 8	-5, 0 \pm I, 3	-3, 6 \pm 2, 4
$\delta(^3F_3)$	-0, 2 \pm I, 4	2, 0 \pm I, 9	I, 6 \pm 5, 3
$\delta(^3F_4)$	I, 6 \pm 0, 7	I, 8 \pm 0, 7	2, 3 \pm 0, 9
ϵ_4	(-2, 8I)	-5, 4 \pm I, 4	-5, 7 \pm I, 7
$\delta(^1G_4)$	7, 9 \pm 0, 7	6, 7 \pm I, 4	5, 9 \pm 2, I
$\delta(^3H_4)$	(I, 29)	0, 4 \pm 0, 7	0, 2 \pm 0, 9
r_1	0, 954 \pm 0, 0I 9	0, 936 \pm 0, 022	$r(^3P_0) = 0, 79 \pm 0, I 8$ $r(^3P_1) = I, I 0 \pm 0, 3 I$
r_2	0, 668 \pm 0, 038	0, 678 \pm 0, 037	$r(^3P_2) = 0, 90 \pm 0, I 7$ $r(^1D_2) = 0, 66 \pm 0, 04$ $r(^3F_2) = 0, 89 \pm 0, 07$
r_3	0, 78I \pm 0, 020	0, 795 \pm 0, 020	$r(^3F_3) = 0, 67 \pm 0, I I$
χ^2	36, 7	30, 5	24, 4
число точек	45	49	49
χ^2 / χ^2	I, II	0, 90	0, 80

С этой целью была выбрана энергия 435 Мэв, вблизи которой имелось наибольшее количество экспериментальной информации о pp -рассеянии ($\sigma(\theta)$, $P(\theta)$, $D(90^\circ)$, $C_{\text{кр}}(60^\circ, 90^\circ)$, $C_{\text{нн}}(60^\circ, 90^\circ)$, $\sigma(\pi^+p)$, $\sigma(\pi^+d)$, $\sigma(\pi^0pp)$, σ_s). Поиск фазовых сдвигов производился в области значений параметров, определяемой зависимостями рис. 1. Однако начальные ограничения "шагов" параметров были выбраны достаточно большими (20°), так что при отсутствии фазового решения в рассматриваемой области минимум χ^2 мог быть, вообще говоря, обнаружен в другой области пространства параметров. Результаты расчетов представлены в таблице 2, столбец 1, и показаны на рис. 1. Из рис. 1 видно, что найденное при 435 Мэв решение хорошо согласуется с плавным энергетическим поведением фазовых сдвигов вплоть до 860 Мэв.

В дальнейшем Росс и др. /37/ измерили в pp -рассеянии при 430 Мэв поляризацию и параметры тройного рассеяния D , R , A и A' в области углов от 30° до 120° в с.п.м. Результаты этих измерений совпали с предсказаниями фазового анализа. На рис. 2 показаны угловые зависимости параметров тройного рассеяния при 435 Мэв, вычисленные по фазовым сдвигам, приведенным в таблице 2, столбец 1, и экспериментальные значения /37/, полученные после проведения фазового анализа.

IV

Новые данные о параметрах тройного рассеяния при 430 Мэв были использованы для дальнейшего уточнения фазовых сдвигов pp -рассеяния. Сравнительно большой объем экспериментальной информации, включенной в анализ, позволил отказаться от описания неупругих процессов при помощи усредненных по j коэффициентов поглощения, и мезообразование в каждом из начальных резонансных состояний учитывалось по-отдельности. Результаты уточнения приведены в таблице 2, столбец 2. Выполненный анализ показал, что имеющиеся при энергии около 435 Мэв данные по pp -рассеянию можно статистически удовлетворительно описать с помощью феноменологических фазовых сдвигов 1S_0 , $^3P_{0,1,2}$, 1D_2 , $^3F_{2,3,4}$, 1G_4 -состояний и параметров смешивания ϵ_2 и ϵ_4 . Образование пионов при этой энергии, по-видимому, в основном происходит из начальных 3P_0 - и 1D_2 -состояний pp -системы.

Дальнейшее уточнение фазового решения при 857 Мэв было проведено в связи с новыми измерениями угловых зависимостей поляризации /38,39,40/ и коэффициента спиновой корреляции $C_{\text{нн}}$ /40/ в упругом pp -рассеянии.

В результате выполненных в Дубне опытов по двойному рассеянию протонов свободными протонами /38,39/ была измерена поляризация протонов при 867 Мэв в области углов от $4,4^\circ$ до $48,2^\circ$ в с.п.м. Одновременно было показано, что значения $P(\theta)$ при 835 Мэв, измеренные ранее /7/, являются заниженными. В связи с этим прежние результаты были перенормированы. Соответствующему пересчету подверглись также измеренные ранее значения параметров $D(\theta)$ /8/ и $C_{\text{нн}}(\theta)$ /11/ (за исключением значений $D(90^\circ)$ и $C_{\text{нн}}(90^\circ)$).

Т а б л и ц а 2

Реальные части фазовых сдвигов (в градусах) и коэффициенты поглощения при 435 Мэв

	1	2
$\delta(^1S_0)$	$-16,8 \pm 6,4$	$-10,3 \pm 3,2$
$\delta(^3P_0)$	$-17,7 \pm 3,1$	$-23,6 \pm 9,8$
$\delta(^3P_1)$	$-36,4 \pm 2,6$	$-29,7 \pm 3,1$
$\delta(^3P_2)$	$17,2 \pm 1,4$	$20,5 \pm 2,2$
ϵ_2	-	$-1,8 \pm 1,2$
$\delta(^1D_2)$	$12,4 \pm 0,8$	$13,9 \pm 0,7$
$\delta(^3F_2)$	$1,9 \pm 1,3$	$1,2 \pm 1,2$
$\delta(^3F_3)$	$-0,4 \pm 1,8$	$-1,4 \pm 0,9$
$\delta(^3F_4)$	$4,8 \pm 0,4$	$2,8 \pm 1,1$
ϵ_4	-	$-4,0 \pm 0,5$
$\delta(^1G_4)$	$2,3 \pm 0,9$	$2,2 \pm 0,6$
		$r(^3P_0) = 0,52 \pm 0,22$
		$r(^3P_1) = 0,99 \pm 0,12$
r_1	$0,990 \pm 0,003$	$r(^3P_2) = 1,09 \pm 0,09$
r_2	$0,936 \pm 0,007$	$r(^1D_2) = 0,93 \pm 0,01$
		$r(^3F_2) = 0,93 \pm 0,07$
r_3	-	$r(^3F_3) = 1,03 \pm 0,08$
χ^2	32,2	45,2
Число точек	40	70
χ^2/χ^2	I, II	0,85

Результаты уточнения фазового решения при 657 МэВ с учетом последних данных о pp -рассеянии (таблица 3, столбец 1) показывают, что характер этого решения не меняется. Вместе с тем уточненное решение сравнительно плохо описывает новые данные о поляризации протонов в области малых углов (8 значений $P(\theta)$ в области $4,4^\circ \leq \theta \leq 27,9^\circ$ дают вклад в χ^2 , равный 15). В пятой главе рассматриваются эффекты, учет которых в рамках фазового анализа приводит к лучшему описанию данных по рассеянию в области малых углов.

v

Эксперименты по нуклон-нуклонному рассеянию в области малых углов дают сведения о фазовых сдвигах высших состояний системы двух нуклонов. В предыдущих вариантах фазового анализа pp -рассеяния вблизи 660 МэВ ^{/12,14,15,17,35/} фазовые сдвиги волн с $l > l_{\max}$ вычислялись в однопионном приближении. Однако вклад в нуклон-нуклонное рассеяние может также давать и обмен резонансными системами пионов, причем с увеличением энергии взаимодействия вклад однобозонного обмена в высшие состояния растет. В связи с этим представляет интерес наряду с однопионным обменом учесть также и однобозонный обмен в фазовом анализе нуклон-нуклонного рассеяния вблизи 660 МэВ.

С этой целью сначала были определены константы связи и массы бозонов, обмен которыми может давать вклад в NN -рассеяние. В качестве экспериментальной информации были использованы фазовые сдвиги NN -рассеяния в интервале 25-310 МэВ ^{/41/} (за исключением фазовых сдвигов S -волн и параметра смешивания ϵ_1). Поиск оптимальных параметров осуществлялся методом наименьших квадратов.

В главе описаны некоторые способы явной унитаризации борновских парциально-волновых амплитуд и различные варианты определения полюсных параметров. В случае четырехполюсной модели, учитывающей обмен скалярным (σ), псевдоскалярным (π) и двумя векторными (ω и ρ) мезонами, наилучшему описанию нуклон-нуклонного рассеяния соответствуют следующие значения параметров:

$$\begin{aligned} \xi_\sigma^2 &= 2,9 \pm 0,4, & m_\sigma &= (373 \pm 13) \text{ МэВ}, & \xi_\pi^2 &= 13,1 \pm 0,2, \\ \xi_\omega^2 &= 2,1 \pm 0,5, & f_\omega / g_\omega &= 0,5 \pm 0,1, & m_\omega &= (422 \pm 18) \text{ МэВ}, \\ \xi_\rho^2 &= 0,1 \pm 0,3, & f_\rho / g_\rho &= -5,4 \pm 7,0, & m_\rho &= (800 \pm 120) \text{ МэВ}. \end{aligned}$$

Энергетические зависимости фазовых сдвигов некоторых состояний, вычисленные вплоть до энергии 660 МэВ согласно этим значениям параметров, показаны на рис. 3-6. Найденные значения полюсных параметров были использованы при проведении фазового анализа pp -рассеяния при 657 МэВ с учетом однобозонного обмена.

Другим эффектом, учет которого может сказаться на описании данных по pp -рассеянию в области малых углов, являются релятивистские поправки в кулоновском рассеянии ^{/42/}.

В анализ было включено 118 значений наблюдаемых величин. Результаты различных вариантов анализа приведены в таблице 3. Обозначения OPE или OBE соответствуют здесь вычислению фазовых сдвигов с $l > l_{\max}$ в однопионном или однобозонном приближении. Кулоновское рассеяние вычислялось либо в нерелятивистском приближении (NRC), либо с учетом релятивистских поправок (RC).

Анализ показывает, что учет однобозонного обмена в дополнение к однопионному приводит к лучшему описанию экспериментальных данных. Особенно улучшается описание данных по поляризации протонов в области малых углов (для варианта OBE + NRC вклад в χ^2 для восьми значений поляризации уменьшается до 7,4). Сравнение угловых зависимостей $P(\theta)$ в области малых углов, вычисленных согласно вариантам OPE + NRC и OBE + NRC , произведено на рис. 7. Учет релятивистских кулоновских поправок, как видно из таблицы 3, не сильно сказывается на описании имеющейся экспериментальной информации.

Основные результаты и выводы

1. Выполнен фазовый анализ экспериментальных данных по pp -рассеянию вблизи 660 МэВ. Найденное фазовое решение ^{/14/} хорошо описывало результаты опытов по измерению дифференциального и полного сечений рассеяния, поляризации, параметров тройного рассеяния $D(\theta)$, $R(\theta)$, $A(90^\circ)$, коэффициентов спиновой корреляции $C_{KR}(90^\circ)$, $C_{\pi\pi}(\theta)$ и полных сечений реакций мезообразования. Аналог этого фазового решения был получен также в ^{/35/}.
2. Включение в фазовый анализ результатов измерений угловой зависимости параметра $A(\theta)$ ^{/36/} позволило показать ^{/17/}, что в предположении резонансного характера образования пионов при 660 МэВ ^{/29/} найденное в ^{/14/} фазовое решение является единственным устойчивым решением, статистически удовлетворительно согласующимся с имеющейся вблизи 660 МэВ информацией о pp -рассеянии.
3. Характерной особенностью найденного решения ^{/14/} явилось то, что оно могло быть плавно связано с решением ^{/1-4/} при энергиях ниже 310 МэВ, показывая тем самым, что основные свойства pp -взаимодействия не претерпевают существенных изменений на протяжении энергетического интервала 310-660 МэВ.
4. Фазовый анализ данных по pp -рассеянию около 435 МэВ показал ^{/16/}, что эти данные можно удовлетворительно описать при помощи решения, согласующегося с плавным энергетическим поведением фазовых сдвигов в интервале 310-660 МэВ. Резуль-

Т а б л и ц а 3

Фазовые решения для различных вариантов анализа упругого pp -рассеяния при 657 Мэв

Вариант анализа	OPE + NRC	OPE + RC	OBE + NRC	OBE + RC
χ^2	115,1	107,8	96,1	93,4
$\delta(^1S_0)$	-28,5 \pm 9,6	-30,3 \pm 10,7	-30,0 \pm 10,9	-32,2 \pm 12,1
$\delta(^3P_0)$	-33,5 \pm 14,0	-36,2 \pm 14,1	-37,2 \pm 15,7	-37,6 \pm 15,5
$\delta(^3P_1)$	-28,5 \pm 4,6	-30,0 \pm 5,0	-30,5 \pm 5,3	-31,6 \pm 5,8
$\delta(^3P_2)$	26,1 \pm 4,3	25,2 \pm 4,0	25,6 \pm 4,1	25,3 \pm 4,2
ϵ_2	-3,7 \pm 2,8	-3,0 \pm 3,5	-2,6 \pm 4,1	-2,1 \pm 5,4
$\delta(^1D_2)$	4,8 \pm 4,2	4,5 \pm 5,1	5,4 \pm 5,0	4,9 \pm 6,0
$\delta(^3F_2)$	-2,1 \pm 1,8	-2,4 \pm 2,0	-3,5 \pm 2,6	-3,5 \pm 2,7
$\delta(^3F_3)$	-1,2 \pm 5,9	-0,9 \pm 6,8	-0,7 \pm 6,6	-0,6 \pm 7,8
$\delta(^3F_4)$	4,8 \pm 1,0	4,0 \pm 0,9	3,1 \pm 1,1	2,5 \pm 1,0
ϵ_4	-5,1 \pm 1,2	-5,0 \pm 1,4	-4,9 \pm 1,4	-4,8 \pm 1,8
$\delta(^1G_4)$	4,9 \pm 1,9	4,9 \pm 2,2	5,4 \pm 2,2	5,3 \pm 2,5
$\delta(^3H_4)$	-0,2 \pm 1,2	-0,6 \pm 1,6	-0,6 \pm 1,5	-1,2 \pm 1,8
$\delta(^3H_5)$	-2,4 \pm 1,3	-2,5 \pm 1,3	-2,3 \pm 1,3	-2,6 \pm 1,3
$\delta(^3H_6)$	0,8 \pm 0,8	0,2 \pm 0,9	0,6 \pm 0,8	-0,1 \pm 0,8
$r(^3P_0)$	0,98 \pm 0,21	0,90 \pm 0,22	0,87 \pm 0,21	0,79 \pm 0,19
$r(^3P_1)$	1,26 \pm 0,21	1,24 \pm 0,28	1,21 \pm 0,31	1,18 \pm 0,37
$r(^3P_2)$	0,69 \pm 0,18	0,74 \pm 0,21	0,74 \pm 0,23	0,79 \pm 0,24
$r(^1D_2)$	0,66 \pm 0,04	0,66 \pm 0,04	0,66 \pm 0,04	0,66 \pm 0,44
$r(^3F_2)$	0,97 \pm 0,06	0,96 \pm 0,08	0,95 \pm 0,07	0,95 \pm 0,10
$r(^3F_3)$	0,60 \pm 0,08	0,62 \pm 0,08	0,63 \pm 0,09	0,64 \pm 0,08

таты измерений параметров тройного рассеяния ^{/37/}, выполненных после проведения фазового анализа при 435 Мэв ^{/18/}, оказались в хорошем согласии с предсказанными в ^{/18/} угловыми зависимостями наблюдаемых величин.

5. Фазовый анализ экспериментальной информации о pp -рассеянии вблизи 660 Мэв позволяет сделать заключение, что на протяжении интервала 310-660 Мэв существенную роль в pp -взаимодействии играют одни и те же состояния. Величина фазового сдвига синглетного S -состояния хорошо воспроизводится при помощи разложения, полученного в приближении эффективного радиуса ^{/43/}. Это, видимо, означает, что вплоть до 660 Мэв поведение 1S_0 -фазового сдвига качественно может быть описано на основе потенциальной модели нуклона с твердым отталкивающим сердечником. Расщепление фазовых сдвигов триплетных P -состояний характерно для $\vec{L} \cdot \vec{S}$ -сил, являющихся причиной значительных поляризационных эффектов.

6. Найденные при 657 Мэв значения коэффициентов поглощения свидетельствуют о том, что процессы образования пионов при этой энергии происходят интенсивнее в 1D_2 -и 3F -состояниях, чем в более низких 3P -состояниях. При 435 Мэв мезообразование, по-видимому, происходит, в основном, из начальных 3P_0 -и 1D_2 -состояний pp -системы ^{/18/}. С другой стороны, известно, что при энергиях около 1 Гэв реакции мезообразования хорошо описываются периферической моделью неупругих процессов ^{/44/}. Все это, по-видимому, указывает на то, что с увеличением энергии падающего протона процессы мезообразования смещаются в периферическую область, где существенную роль играют процессы пионного обмена.

7. Результаты измерений параметров pp -рассеяния при 430 Мэв ^{/37/} и результаты измерений поляризации ^{/38,40/} и коэффициента C_{nn} ^{/40/} вблизи 660 Мэв использованы для дальнейшего уточнения фазовых решений при 435 Мэв ^{/18/} и 657 Мэв ^{/39/}.

8. Методом наименьших квадратов из фазовых сдвигов NN -рассеяния в интервале 25-310 Мэв ^{/41/} определены параметры однобозонной обменной модели ^{/19/}. Энергетические зависимости фазовых сдвигов, вычисленные согласно найденным значениям параметров, качественно согласуются с результатами фазовых анализов pp -рассеяния при 435 и 657 Мэв.

9. Выполнен фазовый анализ данных по упругому pp -рассеянию вблизи 660 Мэв с учетом однобозонного обмена и релятивистских кулоновских эффектов ^{/20/}. Описание экспериментальных данных улучшается, если при вычислении фазовых сдвигов высших состояний pp -системы в дополнение к однопионному обмену учесть также обмен скалярным и двумя векторными мезонами. Учет однобозонного обмена особенно важен для описания данных по поляризации протонов в области малых углов.

10. Экспериментальная информация о pp -рассеянии вблизи 660 Мэв, имеющаяся в настоящее время, в общем, достаточна лишь для того, чтобы оценить значения реальных частей фазовых сдвигов и коэффициентов поглощения основных состояний pp -сис-

темы. Более детальные сведения о характере pp -взаимодействия в области одиночного образования пионов можно получить после проведения дальнейших экспериментальных исследований. В связи с этим результаты выполненного анализа могут оказаться полезными при планировании будущих экспериментов.

11. Следующий шаг в направлении уточнения фазовых сдвигов pp -рассеяния при 660 Мэв, особенно более высоких состояний, по-видимому, потребует, помимо новых экспериментальных исследований, с одной стороны, включения в фазовый анализ более полной информации о неупругих процессах, с другой – более последовательного учета, наряду с однопионным обменом, также обменов резонансными пионными системами.

Л и т е р а т у р а

1. M.H. MacGregor, M.J. Moravcsik, H.P. Stapp. Ann. Rev. Nucl. Sci., 10, 291 (1960).
2. G. Breit, M.H. Hull, K.E. Lassila, K.D. Pyatt. Phys. Rev., 120, 2227 (1960); Phys. Rev., 128, 826 (1962).
3. Ю.М. Казаринов, И.Н. Силин. ЖЭТФ, 43, 692 (1962);) ЖЭТФ, 43, 1385 (1962).
4. H.P. Stapp, H.P. Noyes, M.J. Moravcsik. Proc. of 1962 Int. Conf. on High-Energy Phys. at CERN, Geneva, 1962, p. 131.
5. Н.П. Богачев. ДАН СССР, 108, 808 (1956).
6. Н.П. Богачев, И.К. Взоров. ДАН СССР, 99, 931 (1954).
7. М.Г. Мешеряков, С.Б. Нурушев, Г.Д. Столетов. ЖЭТФ, 33, 37 (1957).
8. Ю.П. Кумекин, М.Г. Мешеряков, С.Б. Нурушев, Г.Д. Столетов. ЖЭТФ, 35, 1398 (1958); ЖЭТФ, 38, 1451 (1960).
9. Ю.П. Кумекин, М.Г. Мешеряков, С.Б. Нурушев, Г.Д. Столетов. ЖЭТФ, 43, 1665 (1962).
10. В.И. Никаноров, Г. Петер, А.Ф. Писарев, Х. Позе. ЖЭТФ, 42, 1209 (1962).
11. Б.М. Головин, В.П. Джелепов, Р.Я. Зилькарнеев, Цуй Ва-чуан. ЖЭТФ, 44, 142 (1963).
12. Р.Я. Зилькарнеев, И.Н. Силин. ЖЭТФ, 44, 1108 (1963); ЖЭТФ, 45, 684 (1963).
13. N. Hoshizaki, S. Machida. Prog. Theor. Phys., 29, 49 (1963).
14. Л. Ажгирей, Н. Клепиков, Ю. Кумекин, М. Мешеряков, С. Нурушев, Г. Столетов. ЖЭТФ, 45, 1174 (1963).
15. L. Azhgirey, N. Klepikov, Yu. Kumeikin, M. Mescheryakov, S. Nurushev, G. Stoletov. Phys. Lett., 6, 196 (1963).
16. Л. Ажгирей. ЖЭТФ, 45, 1988 (1963).
17. Л.С. Ажгирей, Н.П. Клепиков, Ю.П. Кумекин, М.Г. Мешеряков, С.Б. Нурушев, Г.Д. Столетов. ЖЭТФ, 48, 1074 (1964).
18. Л.С. Ажгирей. Ядерная физика, 1, 867 (1965).
19. Л.С. Ажгирей, В.И. Чижиков. Препринт ОИЯИ, P-2584, Дубна, 1966.
20. Л.С. Ажгирей. Препринт ОИЯИ, P-2585, Дубна, 1966.

21. L. Wolfenstein, J. Ashkin. Phys. Rev., 85, 947 (1952).
22. Л. Пузиков, Р. Рывдин, Я. Смородинский. ЖЭТФ, 32, 592 (1956).
23. H. Stapp, T.J. Ypsilantis, N. Metropolis. Phys. Rev., 105, 302 (1957).
24. Л.Б. Окунь, И.Я. Померанчук. ЖЭТФ, 36, 300 (1959).
25. P. Cziffra, M. MacGregor, M. Moravcsik, H. Stapp. Phys. Rev., 114, 880 (1959).
26. S. Sawada, T. Ueda, W. Watari, M. Yonezawa. Prog. Theor. Phys., 28, 991 (1962); Prog. Theor. Phys., 32, 380 (1964).
27. A. Scotti, D.Y. Wong. Phys. Rev. Lett., 10, 142 (1963); Phys. Rev., 138, B145 (1965).
28. R.A. Arndt, R.A. Bryan, M.H. MacGregor. Phys. Lett., 21, 314 (1966).
29. S. Mandelstam. Proc. Roy. Soc., A244, 491 (1958).
30. Б.С. Неганов, О.В. Савченко. ЖЭТФ, 32, 1285 (1957).
31. М.Г. Мешеряков, Б.С. Неганов. ДАН СССР, 100, 677 (1955).
32. А.Ф. Дунайцев, Ю.Д. Прокошкин. ЖЭТФ, 36, 1656 (1959).
33. Л.М. Сороко. ЖЭТФ, 35, 278 (1958).
34. С.Н. Соколов, И.Н. Силин. Препринт ОИЯИ, Д-810, Дубна, 1961.
35. И. Быстрицкий, Р. Зилькарнеев. ЖЭТФ, 45, 1169 (1963).
36. Ю.П. Кумекин, М.Г. Мешеряков, С.Б. Нурушев, Г.Д. Столетов. ЖЭТФ, 48, 50 (1964).
37. R. Roth, E. Engels, S. Wright, P. Kloeppel, R. Hardler, L. Pondrom. Bull. Am. Phys. Soc. Ser., 11, 9, 379 (1964); Phys. Rev., 140, B1533 (1965).
38. L. Azhgirey, Yu. Kumeikin, M. Mescheryakov, S. Nurushev, V. Solovyanov, G. Stoletov. Phys. Lett., 18, 203 (1965).
39. Л.С. Ажгирей, Ю.П. Кумекин, М.Г. Мешеряков, С.Б. Нурушев, В.Л. Соловьянов, Г.Д. Столетов. Ядерная физика, 2, 892 (1965).
40. H. Dost. UCRL-11877 (1965).
41. M. H. MacGregor, R.A. Arndt. Phys. Rev., 139, B362 (1965); H.P. Noyes, D.S. Bailey, R.A. Arndt, M.H. MacGregor. Phys. Rev., 139, B380 (1965).
42. Н.П. Клепиков. ЖЭТФ, 45, 376 (1963).
43. H.P. Noyes. Proc. Int. Conf. on Nuclear Forces, vol.1, London, 1960, p.39.
44. E. Ferrari, F. Selleri. Suppl. Nuovo Cim., 24, 453 (1962).

Рукопись поступила в издательский отдел
20 октября 1966 г.

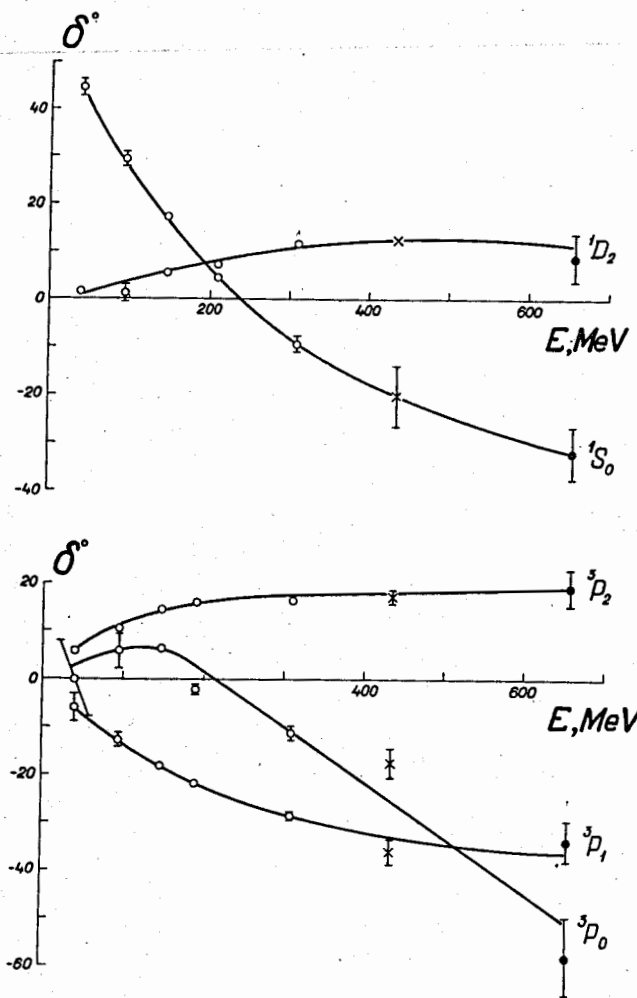


Рис. 1. Энергетическая зависимость фазовых сдвигов pp-рассеяния. Сплошные кривые при энергиях до 345 Мэв представляют YLAM-решение^{/2/}, выше 345 Мэв проведены визуально. Значения фазовых сдвигов: δ - из работы^{/3/}, δ - из таблицы 1, столбец 2; \times - из таблицы 2, столбец 1.

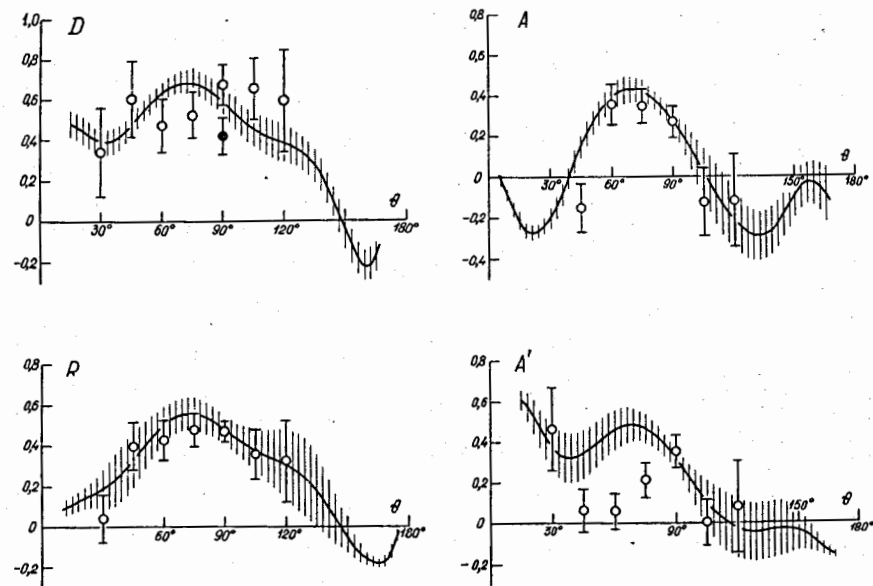


Рис. 2. Угловые зависимости параметров тройного рассеяния при 435 Мэв согласно набору фазовых сдвигов таблицы 2 (столбец 1). Значение параметра $D(90^\circ)$, отмеченное черным кружком, использовалось при проведении фазового анализа. Остальные экспериментальные данные были получены после проведения фазового анализа (работа^{/37/}).

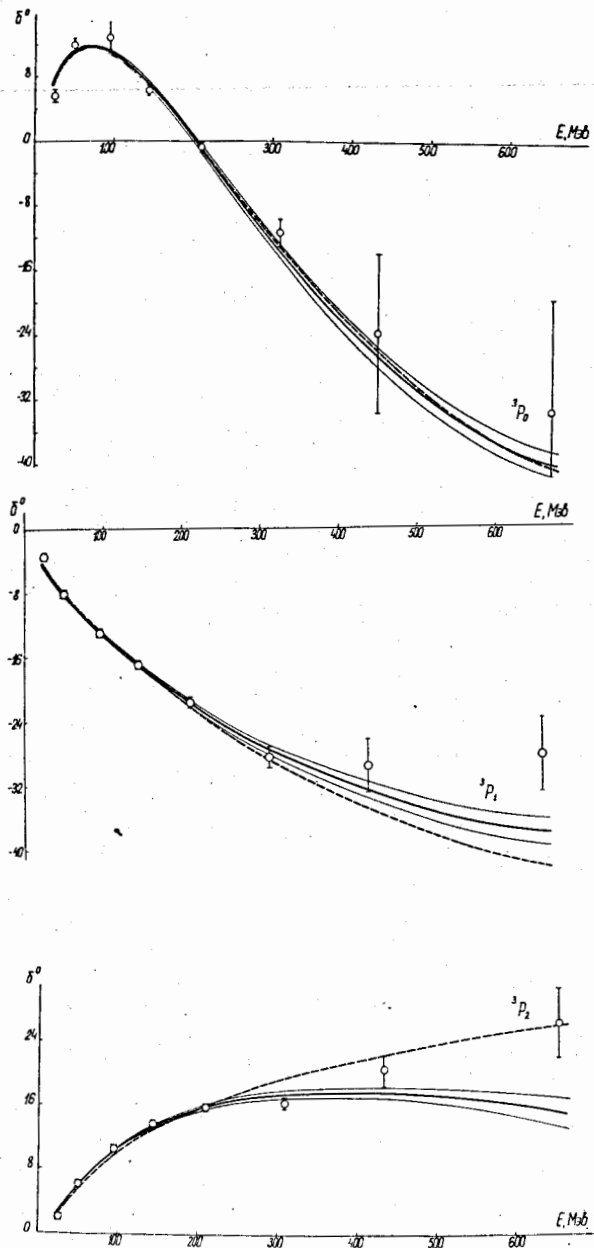


Рис. 3. Энергетические зависимости фазовых сдвигов в 3P_0 , 3P_1 , 3P_2 - состояниях. Сплошные кривые вычислены по параметрам, приведенным в тексте. Тонкими кривыми показан коридор ошибок. Приведены значения фазовых сдвигов, полученные в результате фазовых анализов нуклон-нуклонного рассеяния.

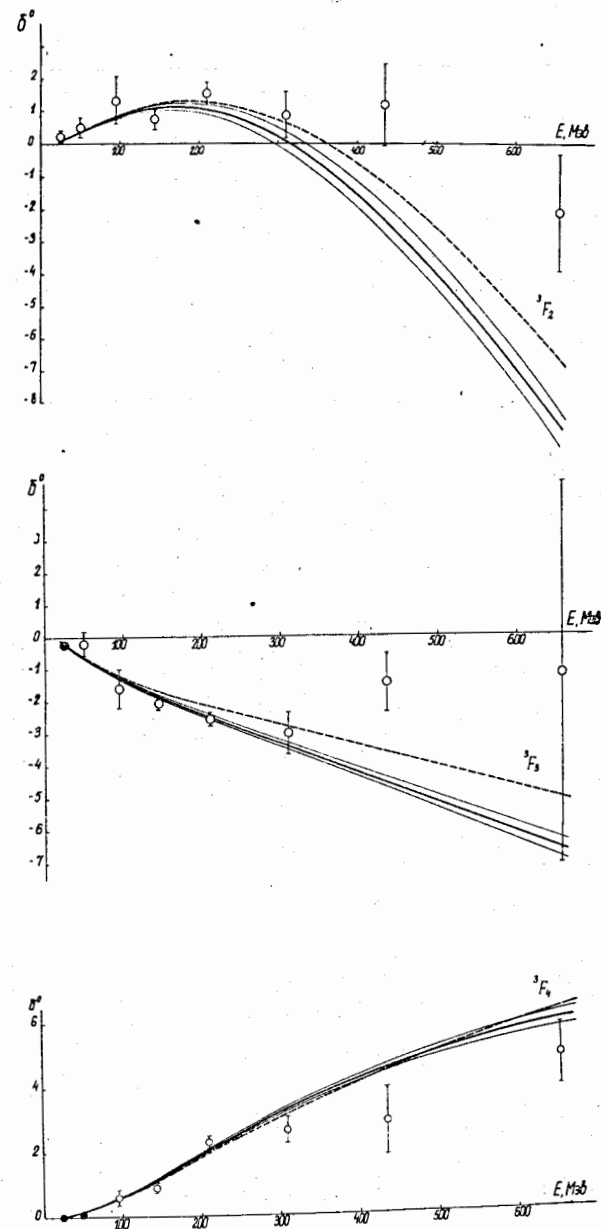


Рис. 4. Энергетические зависимости фазовых сдвигов в 8F_2 , 8F_3 и 8F_4 - состояниях. Черными кружками показаны значения, вычисленные в одноионном приближении.

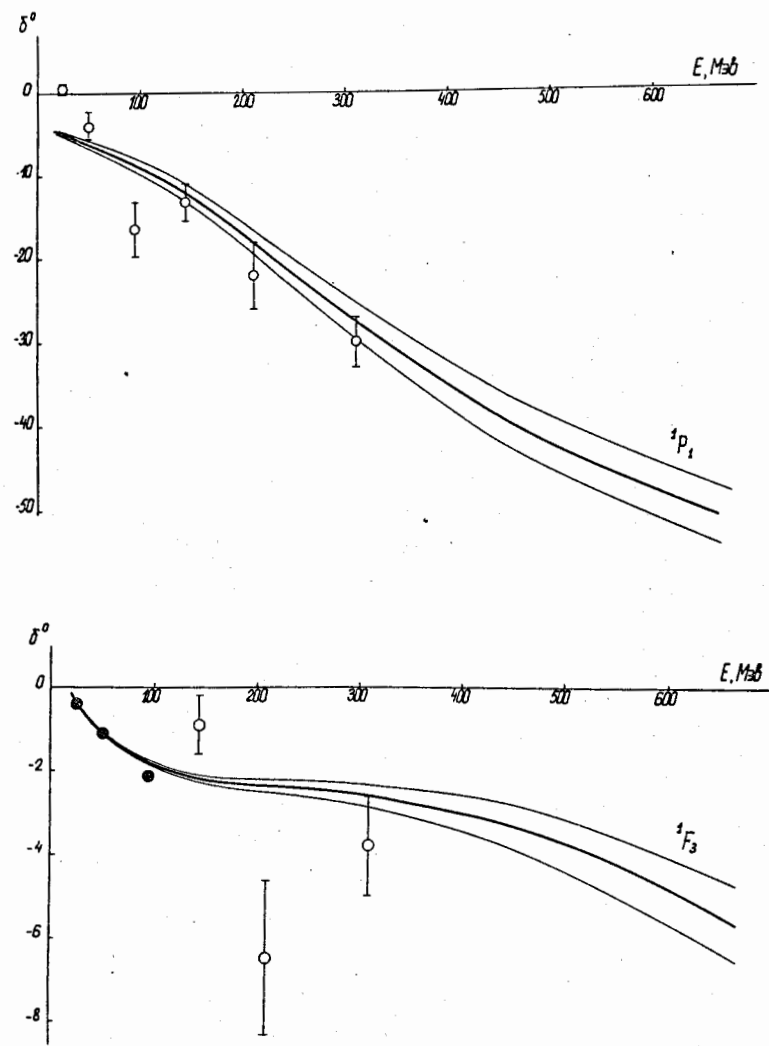


Рис. 5. Энергетические зависимости фазовых сдвигов в 3D_1 - и 3D_2 - состояниях.

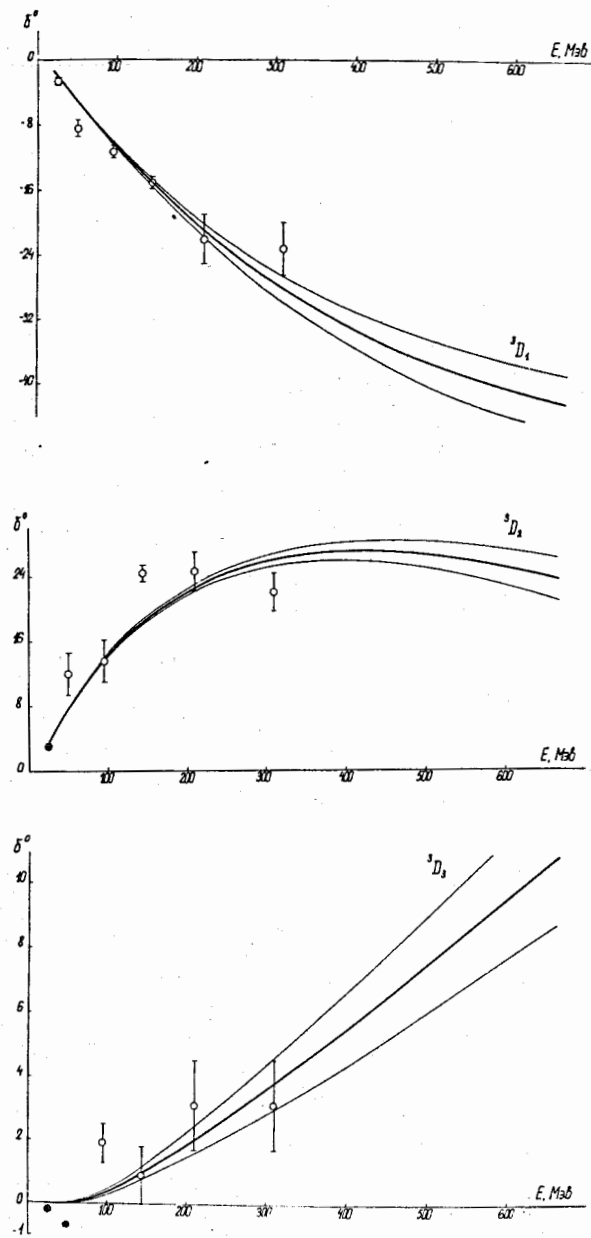


Рис. 6. Энергетические зависимости фазовых сдвигов в 3D_1 -, 3D_2 - и 3D_3 - состояниях.

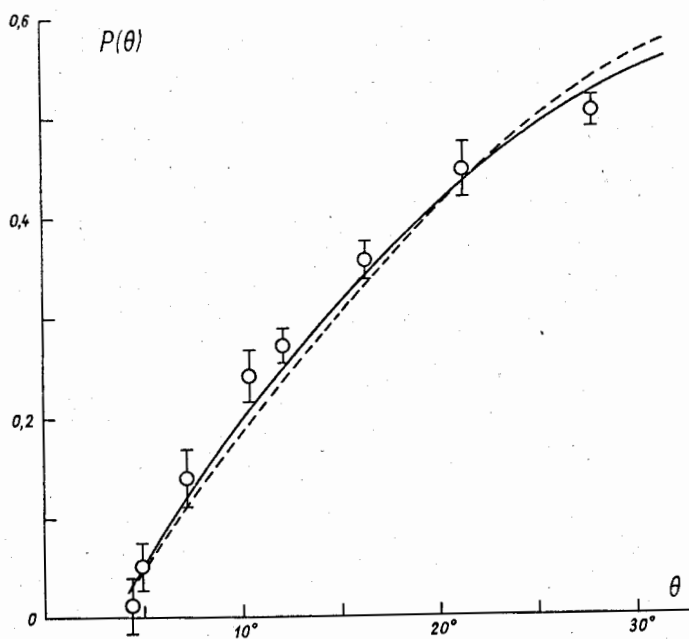


Рис. 7. Угловые зависимости поляризации протонов при 657 Мэв в области малых углов для различных вариантов фазового анализа. Штриховая кривая - вариант OPE + NRC, сплошная кривая - вариант OBE + NRC (таблица 3). Экспериментальные данные из работы /39/.