

034648
Д-189

13/viii

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

1 - 5121



А.У. Абдурахимов, П.П. Керачев, Е.Н. Кладницкая,
Нгуен Дин Ты, В.Н. Пенев, М.И. Соловьев,
Х.Я. Супичаков, Ю.В. Тевзадзе, А.И. Шкловская

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

π^- p- ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В 2-МЕТРОВОЙ
ПРОПАНОВОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЕ
ПРИ ИМПУЛЬСЕ ПЕРВИЧНЫХ π^- -МЕЗОНОВ
2,75 ГЭВ/С

Часть II

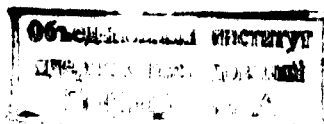
1970

1 - 5121

А.У. Абдурахимов, П.П. Керачев, Е.Н. Кладницкая,
Нгуен Дин Ты, В.Н. Пенев, М.И. Соловьев,
Х.Я. Супичаков, Ю.В. Тевзадзе, А.И. Шкловская

**π^- - ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В 2-МЕТРОВОЙ
ПРОПАНОВОЙ ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЕ
ПРИ ИМПУЛЬСЕ ПЕРВИЧНЫХ π^- -МЕЗОНОВ
2,75 ГЭВ/С**

Часть II



В в е д е н и е

В настоящей работе изложены результаты обработки около 1000 π^-p^- -взаимодействий, полученных в 2-метровой пузырьковой камере/1/ при импульсе первичных π^- -мезонов 2,75 Гэв/с. Отбор событий, исследование работы программы геометрической реконструкции 1-61/2/, определение ошибок в параметрах и т.д. изложены в 1 части работы /8/. Здесь мы остановимся подробнее на разделении событий по отдельным каналам реакций с использованием программы 10-30/3/, а также сравним между собой результаты обчёта по системе программ для машин БЭСМ-4 и нашей программе геометрической и кинематической обработки событий "ГЕО-ФИТ-1"/4/ для машин CDC-1604A и БЭСМ-6.

§1. Распределения величин χ^2 для отдельных каналов.

Средние значения χ^2

После обработки по кинематической программе 10-30/3/ все события были проверены еще раз, причем требовалось соответствие выбранной гипотезе

- а) ионизации частиц,
- б) наличия γ -квантов,
- в) величины недостающей массы.

Событие считалось удовлетворяющим данной гипотезе, если величина χ^2_{\min} не превышала значения, соответствующего 1% уровню достоверности. Противоречий между требованиями (а), (б), (в) и кинема-

тической идентификацией не обнаружено. Все события, имеющие большие отрицательные значения квадратов недостающих масс $M^2 < -1.10^6 (M\text{эв})^2$, как правило, не удовлетворяли гипотезам, имеющим число уравнений связи $f \geq 1$. Такие события, по-видимому, еще перед программой идентификации можно отбрасывать как взаимодействия π^- -мезонов с нуклонами ядра углерода. Распределения квадратов недостающих масс для разных каналов реакций $\pi^- p$ приведены на рис. 1,2.

На рис. 3-5 приведены распределения величин χ^2 для однозначно идентифицированных событий. События, в которых наряду с гипотезой, имеющей 4 уравнения связи -4CFIT, проходит еще какая-либо другая, на основании моделирования процессов были отнесены к гипотезе 4CFIT/6/.

В табл. I приведены средние значения χ^2 для различных каналов реакции при условии ограничения значениями χ^2 , соответствующими 1% уровню достоверности. В этой таблице приведены данные только для однозначно идентифицированных гипотез.

Таблица I

№№	Реакция	Число событий	Среднее χ^2	Средняя величина M^2 нед. (Гэв) ²
I	$\pi^- p \rightarrow \pi^- p$	82	5,90	-0,0220
II	$\pi^- p \rightarrow \pi^- p \pi^0$	98	2,16	0,034
III	$\pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^+ n$	128	1,86	1,090
IV	$\left. \begin{array}{l} \pi^- p \rightarrow \pi^- p k \pi^0 \quad (k > 1) \\ \pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^+ n k \pi^0 \quad (k \geq 1) \end{array} \right\}$	213	-	-
V				
VI	$\pi^- p \rightarrow \pi^- p \pi^+ \pi^-$	8	3,63	0,0218
VII	$\pi^- p \rightarrow \pi^- p \pi^+ \pi^- \pi^0$	25	2,55	0,0094
VIII	$\pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^+ n$	24	2,04	0,7681
IX	$\left. \begin{array}{l} \pi^- p \rightarrow \pi^- p \pi^+ \pi^- k \pi^0 \quad (k > 1) \\ \pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^+ n k \pi^0 \quad (k \geq 1) \end{array} \right\}$	27	-	-
X				
Всего		605		

Имеется некоторое число событий, удовлетворяющих более чем одной гипотезе. Таблица II демонстрирует этот факт.

Таблица II

Реакция	Число событий	Среднее χ^2	Средняя величина $M_{\text{нед.}}^2$ (Гэв) ²
$\pi^- p \rightarrow \pi^- p$	10	5,13	-0,00175
$\pi^- p \rightarrow \pi^- p \pi^0$		2,89	-0,00049
$\pi^- p \rightarrow \pi^- p \pi^0$	88	2,11	0,14659
$\pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^+ n$		1,70	0,88728
$\pi^- p \rightarrow \pi^- p \pi^+ \pi^- \pi^0$	13	1,27	0,00067
$\pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^+ n$		2,78	0,59019
Всего	111		

§2. Соотношение отдельных каналов. Сечения

Для оценки соотношений отдельных каналов, а также оценки сечений мы отобрали часть пленок, наилучших по качеству, где мы считаем, что потери событий минимальны.

Относительно упругих взаимодействий нужно отметить, что (а) все события, которые удовлетворяют, кроме упругой гипотезы, еще какой-нибудь другой, относились к упругим взаимодействиям; (б) поскольку среднее значение χ^2 для упругой гипотезы при границе обрезания χ^2 -распределения, равной 14, завышено относительно теоретического значения примерно на 20%, то для упругих событий значение границы обрезания принималось равным 20; (в) на основе анализа распределения по переданному импульсу для упругих взаимодействий оценено, что потери упругих событий с медленными протонами (импульс до 250 Мэв/с) составляют (26+3)%. Эта поправка учтена при оценке соотношений между каналами.

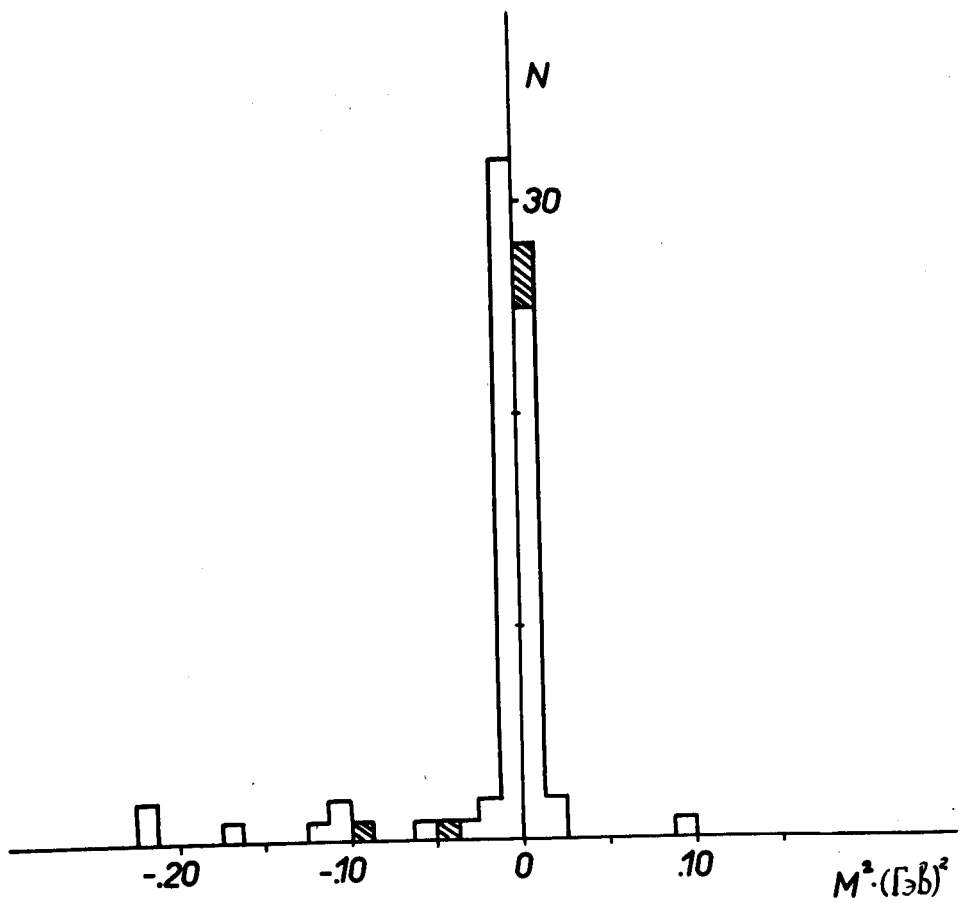


Рис. 1. Распределение квадратов недостающих масс для реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^- p$.

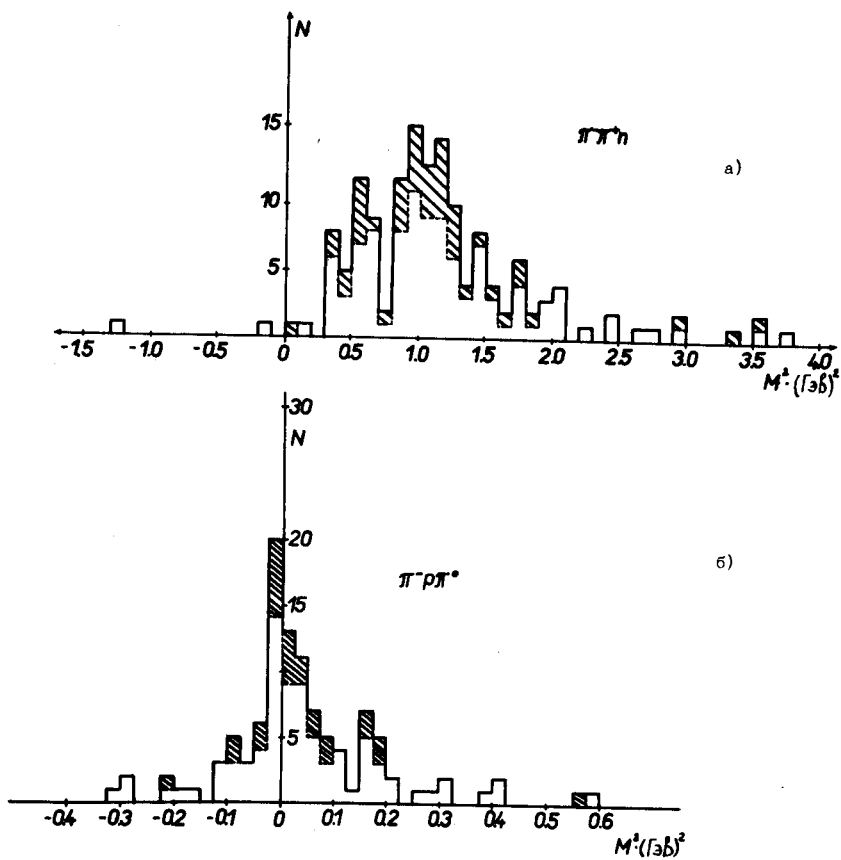


Рис. 2. Распределения квадратов недостающих масс для каналов реакции а) $\pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^+ n$; б) $\pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^0$. Заштрихованные области относятся к неоднозначно идентифицированным событиям.

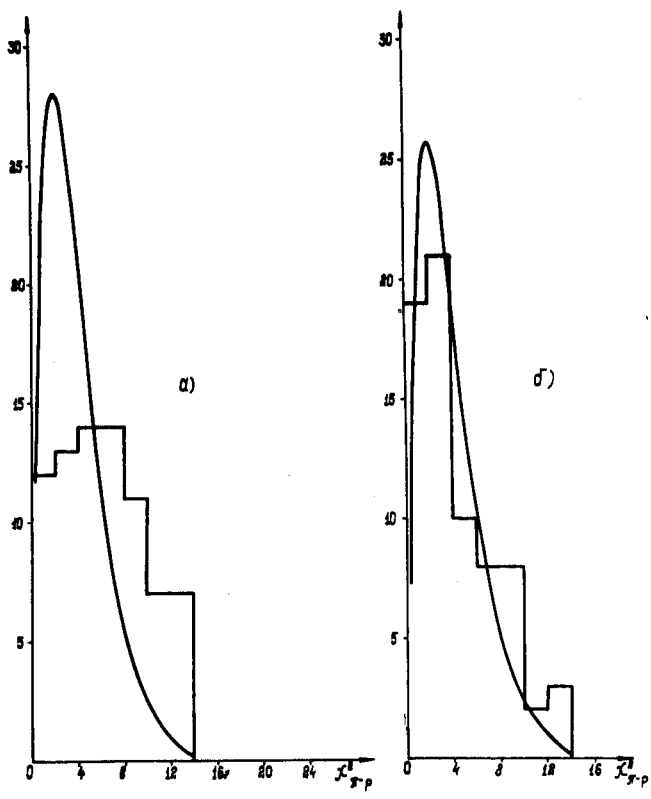


Рис. 3. χ^2 распределения для упругой гипотезы $\pi^- p \rightarrow \pi^- p$ а) по программе "10-30", б) по программе "ГЕОФИТ".

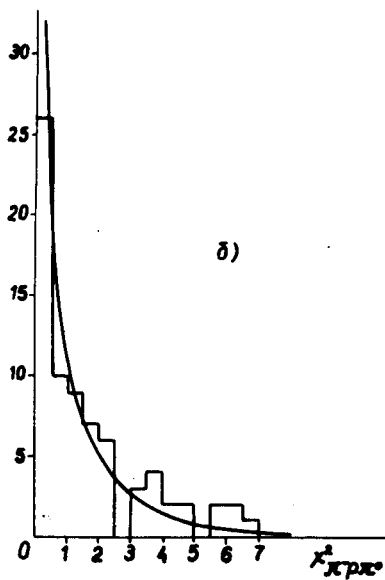
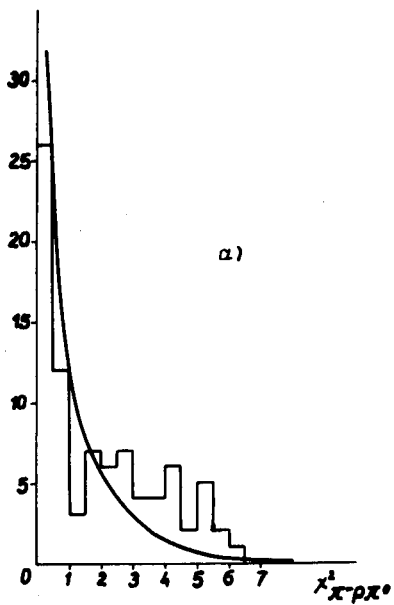


Рис. 4. χ^2 распределения для канала $\pi^- p \rightarrow \pi^- p \pi^0$
 а) по программе "10-30", б) по программе "ГЕОФИТ".

Все события, удовлетворяющие гипотезам $\pi^- p \rightarrow \pi^- p \pi^0$ и $\pi^- p \rightarrow \pi p \pi$ (неразделенные события), были разделены между этими каналами пропорционально известным величинам сечений^{/5/}.

В табл. III приведены вклады (в %) отдельных каналов реакции в полное сечение 2-лучевых взаимодействий в сравнении с данными, полученными нами на основе результатов работы^{/5/}, выполненной при импульсе 2,7 Гэв/с. Число событий по трем реакциям нормировалось на 61% (столько процентов составляют сечения этих реакций в работе^{/5/}).

Таблица III

Реакция	Вклад в сечение 2-лучевых взаимодействий (в %), наши данные	Данные из ^{/5/}	Сечения из ^{/5/} (мб)
$\pi^- p \rightarrow \pi^- p$	22 ± 2	34	$7,7 \pm 0,4$
$\pi^- p \rightarrow \pi^- p \pi^0$	17 ± 2	10	$2,4 \pm 0,2$
$\pi^- p \rightarrow \pi^+ \pi^- n$	22 ± 3	17	$3,9 \pm 0,2$
$\pi^- p \rightarrow p \pi^- (k \pi^0) (k > 1)$	9		$2,0 \pm 0,2$
$\pi^- p \rightarrow \pi^+ \pi^- n (k \geq 1)$	30		$7,0 \pm 0,3$

Из таблицы III видно, что соотношение между каналами реакций иное, чем в работе^{/5/}. Доля упругих взаимодействий сравнима с вкладом реакций с π^0 -мезоном и нейтроном, тогда как в^{/5/} она превышает вклад других каналов.

Нарушения в соотношении каналов могут быть вызваны: (а) Недостаточной эффективностью разделения отдельных каналов реакции. В частности, возможно "перекачивание" событий из каналов с 2-мя и больше нейтральными частицами в каналы с одной нейтральной частицей. Для того чтобы убедиться в том, что так может происходить, нами было смо-

делировано 100 событий реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^- p 2\pi^0$ ^{x/}. Оказалось, что гипотезе упругого взаимодействия не удовлетворяет ни одно из этих событий, в то время как гипотезам $\pi^- p \rightarrow \pi^- p \pi^0$ и $\pi^- p \rightarrow \pi p n$ удовлетворяют соответственно 27 и 49% событий этой реакции.

(б) Примесь взаимодействий на квазисвободных протонах ядер углерода, которая, как это показано нами, может быть различной для разных каналов. В таблице IV приведены результаты моделирования взаимодействий π^- -мезонов с энергией 2,75 Гэв на квазисвободных протонах. Как видно, ни один из каналов не дает существенного вклада в канал упругих взаимодействий. С другой стороны, взаимодействия на квазисвободных протонах будут завышать количества событий, относящихся к каналам $\pi^- p \rightarrow \pi^- p \pi^0$ $\pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^+ n$. Значительный вклад в последние реакции, по-видимому, дадут также π^- -с-реакции с несколькими нейтральными частицами.

Таблица IV

Данная гипотеза	Количество (в %) смоделированных событий, удовлетворяющих данной гипотезе		
	$\pi^-(p) \rightarrow \pi^- p$	$\pi^-(p) \rightarrow \pi^- p \pi^0$	$\pi^-(p) \rightarrow \pi^- \pi^+ n$
$\pi^- p \rightarrow \pi^- p$	3	0	0
$\pi^- p \rightarrow \pi^- p \pi^0$	30	47	58
$\pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^+ n$	77	81	98

Очевидно, что учёт эффектов (а) и (б) существенно улучшит соотношения каналов реакции.

§3. Сходимость итерационных процессов

В программе 10-30^{/3/} для выделения наиболее вероятной гипотезы методом наименьших квадратов минимизируется следующий функционал

^{x/} Способ моделирования описан в ^{/6/}.

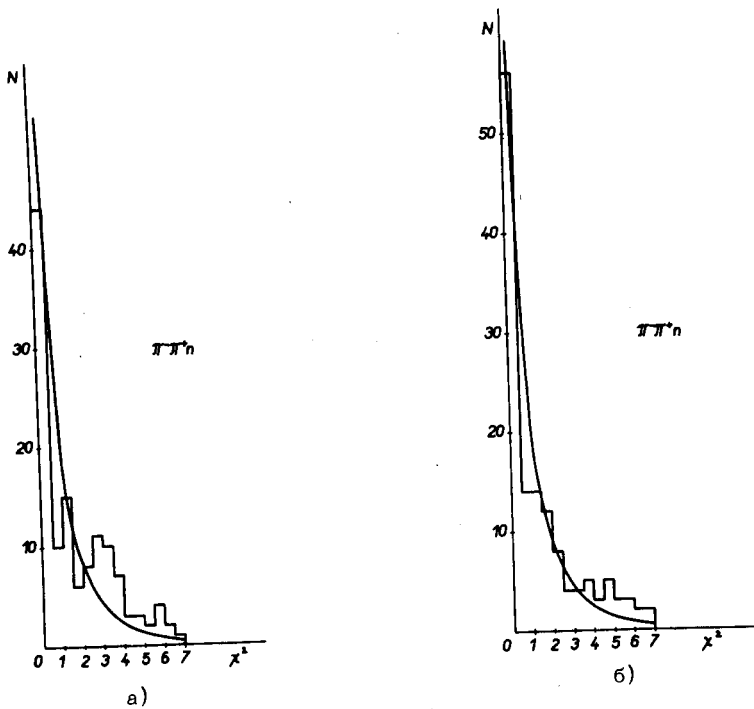


Рис. 5. χ^2 распределения для канала $\pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^+ n$ а) по программе "10-30"; б) по программе "ГЕОФИТ".

$$M_1 = \sum_{i=1}^{3n} \left(\frac{a_i^{\ominus} - a_i^{\top}}{\Delta a_i} \right) + T \sum_{k=1}^m \frac{f_k^2}{(\Delta f_k)^2}, \quad (1)$$

где f_k - уравнения связи, n - число следов, m - число уравнений связи, a_i - экспериментальные значения параметров, Δa_i - ошибки параметров. После минимизации функционала M_1 делается еще одна итерация по методу Лагранжа с использованием уточненных параметров, полученных при минимизации функционала M_1 , и с учётом корреляций между параметрами. В результате этой итерации рассчитывается значение минимума функционала

$$M_3 = \sum_{i,j=1}^{3n} (a_i^{\ominus} - a_i^{\top}) G_{i,j} (a_j^{\ominus} - a_j^{\top}) + \sum \lambda_k f_k, \quad (2)$$

где λ_k - неопределенные множители Лагранжа, $G_{i,j}$ - матрица ошибок. При минимизации M_1 для получения устойчивого минимума делалось в среднем по 8 итераций.

Расчёты с использованием минимизации функционала M_1 методом наименьших квадратов требуют много машинного времени, а также наличия значительной памяти у электронно-счётной машины. Нами была исследована возможность подгонки событий с использованием только метода неопределенных множителей Лагранжа/7/. Минимизировался функционал вида (2) для смоделированных событий. Моделирование проводилось по программе типа ФОРС, написанной на языке "ФОРТРАН", причем кинематическая программа была присоединена к моделирующей программе. Было показано, что подгонка той гипотезы, которая смоделирована, всегда идет хорошо и сходимость, т.е. удовлетворение законов сохранения, имеет место после 2-3 итераций. Подгонка по ложным гипотезам часто не дает сходимости (см. таблицу V).

Таблица V

Моделированная гипотеза	% событий, в которых нет сходимости при подгонке по гипотезе				
	$\pi\pi\rho\pi$ 4CFIT	$(\pi^0)\pi\pi\rho\pi$	$\rho\pi\pi\pi$	$(\pi^0)\rho\pi\pi\pi$	$(n)\pi\pi\pi\pi$
$\pi^-p \rightarrow \pi\pi\rho\pi$	0	47	31	80	2
	$\pi\pi\pi\pi$	$(\pi^0)\pi\pi\pi\pi$	$(n)\pi\pi\pi\pi$	$(\pi^0)\rho\pi\pi\pi$	
	4CFIT				
$\pi^-p \rightarrow \pi\pi\pi\pi$	0	74	0	55	
	$\rho\pi\pi\pi^0$	$(\pi^0)\rho\pi\pi\pi^0$	$(\pi^0)\rho\pi\pi\pi$	$(n)\pi\pi\pi\pi$	
	4CFIT				
$\pi^-p \rightarrow \rho\pi\pi\pi^0$	0	60	0	1,7	

Особенно плоха сходимость для тех гипотез, где предполагается образование π^0 -мезона, не зарегистрированного установкой. Введение так называемой процедуры дробления шага, состоящей в том, что в качестве начальных значений для последующей итерации берутся значения параметров, средние между значениями, полученными в двух предыдущих итерациях, не дает существенных результатов. Ясно, что при анализе результатов подгонки необходимо обращать внимание на сходимость итерационного процесса. Если сходимости нет, то гипотеза заведомо ложная. Можно считать, что если потребовать, кроме соответствия величины χ^2 выбранной гипотезе еще и наличия сходимости, то все реальные гипотезы останутся.

§4. Обработка данных по программе

геометрической реконструкции и кинематической обработки событий

"ГЕОФИТ"

В нашей группе на основе алгоритмов геометрической программы 1-61/2/ и известного метода минимизации функционала с использованием коэффициентов Лагранжа^{7/} была создана единая программа^{4/} обработки

событий для машин CDC-1604A и БЭСМ-6 на языке "ФОРТРАН" под названием "ГЕОФИТ-1".

Как отмечено в/4/, в программу геометрической реконструкции внесено несколько изменений по сравнению с программой 1-61. В частности, ошибки координат теперь рассчитываются для каждой точки следа, а не для средней точки следа, как ранее, оптимальные значения параметров для всех следов, кроме особых треков, считались с использованием полной матрицы ошибок; интегрирование уравнений движения при этом производилось по методу "парабол". Введен ряд упрощений и изменений в процедуры расчёта параметров "особых" треков, "сшивания" треков, поиска изломов и т.д.

Свыше 500 событий, ранее обсчитанных по системе программ для машины БЭСМ-4, было сосчитано также по новой программе "ГЕОФИТ-1".

Никаких систематических отличий в величинах параметров следов, вычисленных по программе 1-61 и по новой программе "ГЕОФИТ-1", нами не обнаружено. В таблице VI приведены средние величины χ_{xy}^2 и χ_z^2 для следов протонов и π^\pm -мезонов для разных каналов реакции.

Таблица VI

Реакция	π^\pm - мезоны		протоны	
	χ_{xy}^2	χ_z^2	χ_{xy}^2	χ_z^2
$\pi^- p \rightarrow \pi^- p$	1,99	1,58	0,65	0,77
$\rightarrow \pi^- p \pi^0$	2,16	1,71	1,28	1,42
$\rightarrow \pi^- \pi^+ n$	1,64	1,69	-	-
Среднее	1,93	1,65	0,86	1,09

Как видно из табл. VI, величины χ_{xy}^2 и χ_z^2 не отличаются существенно от ранее полученных /8/. Таким образом, вычисляемые ошибки для каждой точки следа в программе "ГЕОФИТ" также нуждаются в коррекции. (Напомним, что χ_{xy}^2 и χ_z^2 отнесены к числу степеней свободы, а потому их средние значения должны быть равны единице).

Подгонка событий по новой программе "ГЕОФИТ-1" проводилась путем минимизации функционала/2/ с помощью неопределенных множителей Лагранжа, причем решение находилось по методу "исключения" неизмеряемых параметров из уравнений связи. Сходимость итерационного процесса, т.е. удовлетворение уравнений связи с точностью до 1 Мэв, наблюдалось обычно после 2-3 итераций (см. §3). Считалось, что событие удовлетворяет какой-либо гипотезе, если, кроме удовлетворения критерию χ^2 , есть еще и сходимость итерационного процесса (см. §3).

Для событий, удовлетворяющих определенной гипотезе, нами не отмечено никаких систематических отклонений величин подобранных параметров следов частиц от их геометрических значений. О точности подбора параметров говорит спектр импульсов первичных π^- -мезонов, который не отличается от ранее полученного. Среднее значение \bar{P} импульса первичного π^- -мезона по новым данным $\bar{P}_{\pi^-} = 2696 \pm 20$. Это значение в точности совпадает с ранее полученным значением/8/. Сравнение результатов подгонки одних и тех же событий по двум программам дает интересные результаты.

Во-первых, величины средних значений χ^2 для всех каналов в расчетах по новой программе "ГЕОФИТ-1" меньше и ближе к теоретическим значениям (табл. VII). Сами распределения χ^2 для отдельных каналов (рис. 3-5) также лучше описываются теоретическими кривыми.

Таблица VII

χ^2	по результатам "ГЕОФИТ" (1% достоверность)	"10-30"	Число событий		Заключения совпадают III
			I	II	
$\pi^- p \rightarrow \pi^- p$	4,40	5,90	14	0	41
$\rightarrow \pi^- p \pi^0$	1,60	2,16	10	6	82
$\rightarrow \pi^- \pi^+ n$	1,54	1,86	12	4	161

Во-вторых, хотя заключения обоих расчётов о большинстве событий совпадают (см. таблицу VII, последняя колонка), новая программа пропускает в статистику, особенно в канал упругих взаимодействий, значительное число событий, которые ранее в расчёте по программе 10-30 имели большие χ^2 и не удовлетворяли поэтому никаким гипотезам. В таблице VII в колонке 1 приведено количество событий, которые не удовлетворяли указанным гипотезам ранее, но согласуются с ними сейчас. И, наоборот, в колонке 2 указано, сколько событий согласовалось с гипотезами по старым расчётам и выброшено сейчас.

§6. Выводы и заключительные замечания

Работа по поиску и обработке ≈ 1000 событий разных типов была необходима для отладки на "живом" материале двух систем программ для разного класса электронно-счётных машин. В процессе массового счёта выяснялись не только ошибки и неточности в работе программ, но и выбирался оптимальный путь соединения программ и проверки результатов обсчёта. Сейчас для системы программ для машин БЭСМ-4 сотрудниками ЛВТА делается выход на программы физической обработки результатов "SLICE" и "SUMX". Увеличиваются также возможности программы "ГЕОФИТ-1": - к ней присоединяются программы проверки и физической обработки материала и делается выход к программе построения графиков "SUMX". Как показала проверка, результаты расчёта геометрических параметров треков по обоим системам совпадают. Подгонка "звезд" по программе "ГЕОФИТ" даёт, по-видимому, более точные значения χ^2 и более близкие к истинным значения подобранных параметров. Нужно отметить быстрое действие и удобство новой программы. Обсчёт 5-лучевого взаимодействия вместе с подгонкой по 3-м гипотезам занимает на машине CDC-1604A40 секунд. По системе программ на БЭСМ-4 аналогичный расчёт занимает 3 минуты 30 секунд чистого времени счёта. Кроме того, нужно ещё время для переписи с ленты на ленту и проверки событий по тестам.

а) Результаты методической работы по выяснению точностей определения координат точек разных типов, определению радиуса ложной кривизны, исследованию ошибок параметров говорят о том, что есть возможность проводить научные исследования с помощью 2-метровой пропановой камеры/8/.

б) Исследование минимизации функционалов для определения параметров треков показало, что дисперсии ошибок измерения координат на пленке, принятые равными 10^{-6} см², нуждаются в коррекции /8/.

в) Исследование нормированных отклонений между данными геометрической и кинематической программ приводит к заключению, что подбор параметров, кроме $\text{tg } \alpha$, в программах происходит удовлетворительно и ошибки параметров имеют нормальные распределения. Исследование $\text{tg } \alpha$ будет проведено дополнительно.

г) Результаты разделения по каналам реакций убеждают в том, что наиболее чисто мы можем выделить реакции с большим числом степеней свободы. В каналах с одной степенью свободы имеют место значительные примеси от взаимодействий на квазисвободных протонах и от других каналов.

В заключение считаем приятным долгом поблагодарить сотрудников ЛВЭ - Л. Иеник, А.А. Кузнецова, Г.И. Копылова, В.Г. Гришина, сотрудников ЛВТА - В.И. Мороза, Г.Н. Тентюкову, Н.Ф. Маркову, А. Макаренко-ву, а также сотрудников филиала МГУ К.П. Вишневскую и В.М. Попову за обсуждения и помощь.

Авторы выражают свою признательность измерителям и лаборантам - Л. Гончаровой, А. Гладкой, В. Ваксиной, Г.А. Коротковой, Д.В. Линдфорс, Л.М. Жуковой.

Л и т е р а т у р а

- 1, M.P. Balandin, N.G. Borisov, Wan-Yung-chang, R.P. Kukhareva, V.A. Moiseenko, V.I. Snyatkov, M.I. Soloviev, I.V. Chuvilo, N.I. M. 20, 110 (1963).
2. Н.Ф. Маркова, В.И. Мороз и др. Препринт ОИЯИ, Р10-3768, Дубна, 1968.

3. З.М. Иванченко, А.Ф. Лукьянцев и др. Препринт ОИЯИ, Р11-3983, Дубна, 1968.
4. А.У. Абдурахимов, Нгуен Дин Ты, В.Н. Пенев. Препринт ОИЯИ, 1-5140, Дубна, 1970.
5. P.H. Miller, L. Gutay et al. *Phys.Rev.*, 153, 1423 (1967).
6. Е.Н. Кладницкая, В.Е. Комолова и др. а) Препринт ОИЯИ, 1-4283, Дубна, 1969; б) Препринт ОИЯИ, 1-4468, Дубна, 1969.
7. R. Wóck CERN 60-30, CERN 61-29
J.P. Berge, F.I. Salmitz, H.D. Taft . *The review of scientific instruments* 32, N 5 (1961).
8. А.У. Абдурахимов и др. Препринт ОИЯИ, 1-5111, Дубна, 1970.

Рукопись поступила в издательский отдел

16 мая 1970 года.