

1A
Д-40

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

В.П. ДЖЕЛЕЛОВ, Б.М. ПОНТЕКОРВО

Д-405

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФИЗИКЕ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ
НА СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ ЛАБОРАТОРИИ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ x)

1957 г.

x) Статья опубликована в журнале "Атомная энергия" № 11.1957. т 3,

УФК, 1958, т 64, в. 1, с 15-5

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

В.П. ДЖЕЛЕЛОВ, Б.М. ПОНТЕКОРВО

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФИЗИКЕ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ
НА СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ ЛАБОРАТОРИИ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ x)

1957 г.

x) Статья опубликована в журнале "Атомная энергия" № II.1957.

ОИЯИ
БИБЛИОТЕКА

Дается обзор экспериментальных исследований, выполненных с частицами высоких энергий на синхротроне Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований со времени пуска ускорителя до июля 1957 года.

В в е д е н и е .

Сорок лет, прошедшие с момента свершения нашим народом Великой Октябрьской социалистической революции, ознаменовались громадными успехами в различных областях отечественной науки и техники. Особенно быстрым темпом развивалась за эти годы наука об атомном ядре.

Последние пятнадцать лет ее развития как в Советском Союзе, так и в наиболее сильных экономически зарубежных странах (США, Англия) привели к успешному решению ряда важнейших задач практического применения атомной энергии — созданию мощных атомных реакторов и электростанций и появлению новой области техники — ядерной энергетики. Основной научной базой для этой области техники явились физические исследования с частицами низких энергий.

Этот же период развития науки об атомном ядре характеризуется рождением новой области ядерной физики — физики частиц высоких и сверхвысоких энергий и мощных ускорителей. История ее почти не выходит за рамки последнего десятилетия и она не связана пока с решением каких-либо практических проблем.

Основным предметом изучения этой ^{новой} области физики является исследование природы и свойств элементарных частиц — нуклонов, мезонов, гиперонов, античастиц, представляющих собой простейшие из известных в настоящее время структурных элементов вещества.

Разнообразные исследования, выполненные с космическими лучами и на мощных ускорителях, показали, что элементарные частицы могут создаваться при столкновениях частиц с энергиями в сотни миллионов и миллиардов электрон-вольт. Физика высоких и сверх-высоких энергий ставит своими главными целями возможно более полное определение всего набора элементарных частиц, установление законов взаимодействия их между собой, а также изучение процессов взаимных превращений одних частиц в другие.

Если учесть, что в настоящее время физикам уже известны двадцать шесть различных элементарных частиц, и принять во внимание тот факт, что, несмотря на титанический труд, затраченный учеными всего мира, до сих пор не установлен основной закон, определяющий взаимодействие между главными структурными элементами ядра - нуклонами, то можно ясно представить, насколько обширны неизведанные горизонты новой физики. Вместе с этим многовековой опыт развития мировой науки подсказывает нам, что обычно, когда ученые входили в новую, большую область познания, они извлекали из нее неожиданно много принципиально важного и полезного для человека.

Всем этим определяется большая перспективность исследований с частицами высоких энергий.

В нашей статье мы попытаемся дать представление об основных научных исследованиях, выполненных советскими физиками с частицами высоких энергий на самом большом в мире синхротроне Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований^{х)}.

х) Желая наиболее полно представить в этой статье результаты основных исследований, выполненных на шестиметровом синхротроне, а также учитывая, что статья рассчитана на более широкий, чем обычно, круг читателей, мы приняли за основу следующий порядок освещения материала. Сжатый текст и снабженные более подробными (чем практикуется) надписями опытные данные в виде графиков, заимствованных из оригинальных работ.

ПУСК СИНХРОЦИКЛОТРОНА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЧКОВ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В нашей стране начало систематическому и детальному изучению этой области физики было положено 14-го декабря 1949 г., когда в Институте ядерных проблем АН СССР, ныне Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, был введен в действие пятиметровый синхротрон и на нем были получены дейтроны с энергией 280 Мэв и альфа-частицы с энергией 560 Мэв⁽¹⁾. Практически в это же время в Физическом институте АН СССР был пущен синхротрон, ускоряющий электроны до энергии 250 Мэв^х). Создание мощных синхротронов, являющихся большими и сложными инженерными сооружениями, оказалось под силу только наиболее развитым капиталистическим странам (США, Англия). Поэтому синхротрон Объединенного института ядерных исследований является ярким свидетельством высокого уровня развития промышленности и культуры производства, достигнутого в Союзе за годы советской власти. Большие затраты, произведенные в связи с созданием мощных ускорителей в нашей стране, являются олицетворением исключительного внимания и заботы о развитии передовой науки со стороны Коммунистической партии, Советского правительства и народа.

В основе действия ускорителей на высокие энергии заложен принцип фазовой устойчивости движения частиц в циклических резонансных ускорителях, открытый В.И.Векслером (1944) и Мак Милланом (1945).

Мы не касаемся большого круга исследований, выполненных радиохимическими методами, так как они будут описаны в другой статье (А.Н.Мурин). В связи с тем, что перед нами стояла цель - осветить работы, выполненные на ускорителе советскими физиками, работы, проведенные на мощных ускорителях за границей, не обсуждаются и не цитируются.

х) В нашей статье мы касаемся научных исследований, выполненных только на синхротроне.

Сооружение мощного синхротрона явилось результатом почти трехлетней интенсивной деятельности большого коллектива ученых и инженеров ряда научно-исследовательских институтов. В течение ряда лет эти работы находились в поле внимания и деятельности академика И.В.Курчатова, что весьма плодотворно сказалось на их успешном решении.

Основное оборудование для этого мощного ускорителя было изготовлено на заводах Министерства электропромышленности СССР.

В конце 1950 года пятиметровый синхротрон был переведен в режим ускорения протонов до энергии около 500 Мэв (I).

Значительная часть первых физических исследований на ускорителе была посвящена определению параметров создаваемых им пучков частиц высоких энергий (интенсивности, энергетические и угловые распределения и т.п.).

В таблице I приводятся основные результаты этих опытов, выполненных при работе ускорителя в разных режимах.

Таблица I.

Ускоря- емые частицы и их энергия	Ток на внутр. мишень (μA)	Плотность выведен- ного пуч- ка на рас- стоянии 10м от магнитн. канала ($cm^{-2}сек^{-1}$)	Плотность пучка ней- тронов в макс.угл. распредел. на расст. 2м от вну- тр.мишени ($cm^{-2}сек^{-1}$)	Энергия нейтрон. в макс. энерг. распре- делении (Мэв)	Полуши- рина углового распред. нейтро- нов (радиан)	Процесс, в резуль- тате кот. образуют- ся ней- троны.
Дейтронн 280 Мэв	I	-	$8 \cdot 10^7$	120	0,17	Стрип- пинг
Альфа- частицы 560 Мэв	0,025	-	$2 \cdot 10^5$	120	0,35	Расщепл. альфа- частиц
Протонн 480 Мэв	0,2-0,3	$1 \cdot 10^6$ ($E_p=460Mэв$)	$5 \cdot 10^6$	380	0,55	Обмен. взаимод.

Ядерные исследования, проведенные на пятиметровом варианте синхроциклотрона, будут освещены несколько ниже.

РЕКОНСТРУКЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ И ЕГО СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

После выполнения значительной программы ядерных исследований с дейтронами, альфа-частицами и протонами в полмиллиарда электрон-вольт, в 1953 году была проведена реконструкция ускорителя, при которой диаметр полюсов электромагнита был увеличен до 6-ти метров и энергия ускоренных протонов доведена до 680 Мэв⁽¹⁾. Вид здания, в котором размещен ускоритель и общий вид шестиметрового синхроциклотрона, приведены на рис.1 и 2^{х)}.

Во время реконструкции в зале синхроциклотрона были сооружены измерительный павильон, хорошо защищенный монолитным бетоном от сопутствующих излучений, мезонная лаборатория и кабина для опытов с поляризованным пучком протонов (рис.3). В защитной стене павильона имеется амбразура для установки коллиматоров и вывода пучков.

Улучшение условий ускорения частиц в центральной области камеры, произведенное в этом году, позволило увеличить ток ускоренных протонов на выходе ускорителя почти в два раза и довести его от $0,3 \mu A$ ⁽¹⁾ до $0,5 \mu A$ ⁽⁴⁾.

Из камеры ускорителя выводится в атмосферу 14 различных пучков частиц^(5,6) (протонов, нейтронов, π^{\pm} и $m\pi^{\pm}$ -мезонов, гамма-квантов и т.п. (рис.3). Вывод пучка протонов в атмосферу осуществлен по методу возбуждения радиальных колебаний, детально разработанному в нашей Лаборатории.⁽⁷⁾ Плотность пучка протонов, выведенного в измерительный павильон, дополнительно повышается в результате фокусировки его при помощи квадрупольных линз⁽⁸⁾

х) Детали устройства шестиметрового синхроциклотрона описаны ранее в ряде специальных статей (1,2,3), и поэтому мы не освещаем их в данной работе.

и составляет на расстоянии 15 метров от выпускного окна камеры ускорителя $1,5 \cdot 10^9$ протонов/см²сек.

Высокая плотность выведенного пучка протонов позволила создать еще несколько пучков частиц высоких энергий от внешней мишени: три пучка π -мезонов (коллиматоры 8, 9 и 10) и один пучок поляризованных протонов (коллиматор 6) (рис. 3). Для повышения плотности пучков заряженных частиц в настоящее время, наряду с квадрупольными линзами, широко используются также специальные фокусирующие устройства, предложенные в нашей Лаборатории (9) и устанавливаемые в зазорах отклоняющих электромагнитов.

В таблице 2 приводятся данные о плотностях и энергиях частиц в различных выведенных пучках на июль 1957 года.

Таблица 2

Интенсивности пучков частиц высоких энергий от шестиметрового синхроциклотрона в измерительном павильоне, а также в мезонной и поляризационной лабораториях.

Название частиц	Энергия (Мэв)	Номер коллиматора	Плотность пучка (см ⁻² сек ⁻¹)
Протоны	675 \pm 6	7, а также 6 или 8	$1,5 \cdot 10^9$
Поляризован. протоны	640 \pm 10	4	$4 \cdot 10^5$
	610	6	$6 \cdot 10^5$
Нейтроны	На всю область спектра $500 \leq E_n \leq 650$	11, 12, 13	$(3+4) \cdot 10^4$
Поляризован. нейтроны	На всю область спектра $450 \leq E_n \leq 600$	16	10^4
π^+ -мезоны	150	8	450
	300	8	1000
	310	9	1600
	360	8	150
π^- -мезоны	300	1	500
	330	1	200
	370	3	70
μ^+ -мезоны	90	8	20+ 30
μ^- -мезоны	25	12	60
Гамма-кванты от распада π^0 мез.	$10 \leq E_\gamma \leq 600$	12	$3 \cdot 10^3$

В начале 1957 года рабочее время ускорителя было увеличено от 100 часов^(I) до 140 часов в неделю.

Увеличение интенсивности пучков частиц и рабочего времени синхроциклотрона весьма значительно расширило экспериментальные возможности вообще и позволило перейти к изучению, например, таких маловероятных эффектов, как рождение мезонов мезонами близ порога.

Прежде чем перейти к изложению результатов исследований, выполненных на синхроциклотроне со времени его пуска, укажем, что часть из разрабатывавшихся на нем проблем уже освещалась в обзорных докладах в 1955 г. на сессии АН СССР по мирному использованию атомной энергии⁽¹⁰⁾.

НЕКОТОРЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ,
ВЫПОЛНЕННЫЕ С ДЕЙТРОНАМИ, ИМЕЮЩИМИ ЭНЕРГИЮ 280 МЭВ И
АЛЬФА-ЧАСТИЦАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 560 МЭВ

Получение на пятиметровом синхроциклотроне дейтронов и альфа-частиц с энергиями, в полтора раза превышающими достигнутые на американских ускорителях, позволило продолжить изучение ядерных процессов, вызываемых этими частицами в сторону больших энергий, а также произвести ряд поисковых экспериментов.

В этом параграфе мы очень кратко осветим основные работы, выполненные в период, когда ускоритель работал в режиме ускоренной дейтронов и альфа-частиц (первая половина 1950 года).

I. Определение масс мезонов, возникающих под действием частиц с энергией полмиллиарда электрон-вольт

В 1949-50 г.г. особенно много дискутировался вопрос о существовании в космических лучах мезонов различных масс. В связи с этим на пятиметровом синхроциклотроне были поставлены опыты по анализу масс мезонов, рождаемых частицами с энергией около 500 Мэв.

Эксперименты, выполненные двумя группами исследователей^(II, I2) различными методами, показали, что альфа-частицы с энергией 560 Мэв и протоны с энергией 490 Мэв^(I3) (опыты, проведенные в 1951 г.) производят лишь π^- -мезоны. Выход мезонов других масс, если бы таковые^И рождались, оценивался в работе^(I3) величиной как минимум в 200 раз меньшей, чем выход отрицательных π^- -мезонов.

2. Деление ядер под действием π^- -мезонов

Другим, также поисковым опытом явилась попытка наблюдать деление ядер тяжелых элементов под действием отрицательных

π^- -мезонов, остановившихся в фотозумльсии, содержащей уран и вольфрам. Впервые это явление было обнаружено в опытах^(I4, I5) и в дальнейшем изучалось в работах^(I6).

3. Расщепление альфа-частиц с энергией 560 Мэв на отдельные нуклоны

В опытах^(I7) при облучении пучком альфа-частиц с энергией 560 Мэв внутренних мишеней из различных веществ было обнаружено появление интенсивных потоков нейтронов и протонов со средней энергией около 120 Мэв, направленных в относительно узком конусе вперед по направлению движения альфа-частиц. Часть результатов этих опытов, касавшаяся потока нейтронов, углового распределения и энергии нейтронов, приведена в таблице I (строка 2). В одновременно проводившихся экспериментах^(I8) по облучению альфа-частицами фотозумльсий был установлен относительно высокий выход ядерных расщеплений, сопровождающихся испусканием в одном акте одного или пары протонов в направлении, близком к направлению движения налетающей альфа-частицы с энергией, равной в среднем одной четверти энергии альфа-частицы.

Все эти опытные факты позволяют заключить, что в результате соударения налетающая на ядро альфа-частица с большой вероятностью полностью разрушается, ее нуклоны испускаются в виде относительно узкого пучка в направлении движения альфа-частицы. Как установлено ⁽¹⁷⁾ по полному выходу нейтронов, процесс развала альфа-частиц с энергией 560 Мэв почти не уступает процессу "стриппинга" дейтронов с энергией 280 Мэв (таблица I).

4. "Стриппинг" дейтронов

Это явление было обнаружено в Беркли и исследовалось там при энергии дейтронов 190 Мэв. В работе ⁽¹⁹⁾ явление отщепления частиц от дейтрона изучалось при энергии 280 Мэв с различными мишенями. Часть из опытных данных этой работы приведена в таблице I (строка 1). Показано, что угловое распределение образующихся в этом процессе нейтронов, а также полное сечение реакции находятся в удовлетворительном количественном согласии с расчетами, выполненными на основе представлений о механизме явления, развитых Сербером.

5. Обнаружение жесткого гамма-излучения от мишени синхроциклотрона

В опытах ⁽²⁰⁾ при бомбардировке внутренней мишени ускорителя альфа-частицами с энергией 560 Мэв было обнаружено жесткое гамма-излучение, повидимому, обязанное своим происхождением распаду образовавшихся при этом π^0 -мезонов.

6. Деление ядер под действием нейтронов

Новым фактом, обнаруженным в опытах с нейтронами, имеющими энергию 120 Мэв, явилось наблюдение деления ядер элементов средней части периодической системы таких, как диспрозий, эрбий и родий ⁽²¹⁾. Уместно заметить, что в этот же период радиохимическими

методами было установлено деление серебра при бомбардировке его альфа-частицами с энергией 560 Мэв⁽²²⁾. Так как согласно теоретическим представлениям⁽²³⁾ деление ядер этой части периодической системы должно происходить преимущественно из возбужденного состояния, то результаты указанных экспериментов явились первым подтверждением существования такого механизма деления ядер. Деление ядер более тяжелых элементов (с $Z \geq 73$) под действием нейтронов высоких энергий изучалось в работах^(21,24).

7. Искусственная альфа-радиоактивность

В работе⁽²⁵⁾ изучалось образование альфа-активных ядер при бомбардировке мишеней из различных веществ альфа-частицами с энергией 560 Мэв. Результатом исследований является обнаружение неизвестных до этого альфа-активных ядер Gd, Tb и Dy, образующихся из Ho, Yb, Er и Tm.

8. Ряд работ был посвящен исследованию ядерных расщеплений, вызываемых π -мезонами⁽²⁶⁾ и дейтронами высоких энергий⁽²⁷⁾. Изучалось также неупругое взаимодействие нейтронов высоких энергий с ядрами⁽²⁸⁾. В работе (28a) было исследовано испускание вторичных нейтронов ядрами от Be до Pb под действием нейтронов со средними энергиями 120 и 380 Мэв.

УПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ НУКЛОНОВ НУКЛОНАМИ

Одно из центральных мест среди проблем, изучаемых современной ядерной физикой, занимает проблема ядерных сил - сил, действующих между нуклонами.

Результаты экспериментов по рассеянию нуклонов, выполненных с частицами малых энергий, позволили установить, что по своей природе ядерные силы не являются электромагнитными, отличаются от последних высокой интенсивностью и очень малым радиусом действия, сложным образом зависят от спинов частиц.

Ряд других опитных фактов указал еще на одно важное свойство этих сил - их симметрию (приблизительное равенство ядерных взаимодействий между двумя протонами и между двумя нейтронами) и позволил высказать далеко идущую гипотезу о зарядовой независимости ядерного взаимодействия нуклонов. В основе этой гипотезы лежит предположение о равенстве ядерных взаимодействий между двумя любыми парами нуклонов в состояниях с одинаковыми полными спинами и орбитальными моментами.

Принципиально новые сведения о ядерных силах удается получить из опытов по рассеянию нуклонов на нуклонах при энергиях частиц в сотни Мэв, когда длина волны налетающей частицы становится существенно меньшей радиуса действия ядерных сил ($\lambda \ll r_0/mc = 1,4 \cdot 10^{-13}$ см) и возникает возможность исследовать наиболее глубоко лежащие области силового поля нуклонов. При этом для выяснения влияния на характер рассеяния сил, зависящих от спина, наряду с ~~вышесказанными~~ опытами с неполяризованными пучками частиц, необходимо исследовать также рассеяние поляризованных пучков нуклонов на нуклонах.

Следует подчеркнуть, что методы, применявшиеся для теоретического анализа опытного материала, полученного при малых энергиях, оказываются совершенно непригодными в новой области энергий. В связи с этим, а также в связи с отсутствием строгой теории ядерных сил следствия, получаемые на основе гипотезы зарядовой независимости ядерных сил, оказываются плодотворными. Использование аппарата изотопического спина позволяет несколько продвинуться в анализе результатов экспериментов с частицами высоких энергий и выявить некоторые новые ~~экспериментальные~~ закономерности в ядерном взаимодействии нуклонов ⁽²⁹⁾. Применение этого аппарата позволяет разбить весь комплекс состояний, в которых может находиться система из двух нуклонов при высокой энергии столкновения, на две группы со значениями полного изотопического спина

$T=I$ и $T=0$ и проводить изучение взаимодействия в этих группах состояний раздельно. Сведения о взаимодействии двух нуклонов в состояниях с $T=I$ можно получить, изучая рассеяние любой пары нуклонов ($p-p$, $p-n$, $n-p$), исследование же взаимодействия нуклонов в состояниях с $T=0$ требует постановки опытов по рассеянию различных нуклонов - ($n-p$).

В связи с большой принципиальной важностью исследований рассеяния нуклонов нуклонами они проводились на синхроциклотроне Лаборатории ядерных проблем широким фронтом, начиная с осени 1950 г. Опыты были выполнены с нуклонами, имеющими энергии от 380 до 660 Мэв, т.е. в области энергий, которая в то время не была изучена.

I. Упругое рассеяние протонов протонами и поляризация при упругом $p-p$ -рассеянии

В исследованиях, выполненных Сегре, Чемберленом и др. (США) в 1949 г., было установлено, что в области энергий 150-340 Мэв сечение упругого рассеяния протонов протонами не зависит от угла и энергии. Это свидетельствовало об очень высокой интенсивности ядерного взаимодействия между двумя протонами при энергиях в сотни Мэв.

На синхроциклотроне Лаборатории ядерных проблем это явление изучалось, начиная с 1952 г. в работах ⁽³⁰⁻³²⁾ при энергиях протонов от 460 до 660 Мэв. В этих работах ^{впервые} была обнаружена резкая анизотропия в рассеянии протонов высокой энергии протонами и возрастание дифференциальных сечений с уменьшением угла рассеяния.

Аналогичные результаты были получены второй группой исследователей ^(33,34), применявших в своих опытах другую методику.

Данные опытов, полученные в работах (30-34) для трех энергий налетающих протонов, приведены на рис.4.

Наряду с существованием резкой анизотропии, заслуживает быть отмеченным найденное постоянство полного сечения упругого рассеяния протонов протонами в изученном интервале энергий (30,32).

Для осуществления однозначного фазового анализа опытных данных по упругому рассеянию нуклонов необходимо, кроме результатов опытов с неполяризованными нуклонами, иметь сведения о рассеянии поляризованных частиц.

На рис.5 приведены результаты исследования углового распределения поляризации, возникающей при упругом рассеянии протонов с энергией 635 Мэв протонами, полученные в работе (35).

2. Упругое рассеяние нейтронов нейтронами.

В работах (36,37), выполненных в Лаборатории ядерных проблем в 1952 и 1955-56 г.г. благодаря применению оригинальной методики, были впервые получены данные о рассеянии нейтронов нейтронами. Измерения дифференциальных сечений упругого рассеяния нейтронов нейтронами были выполнены при энергиях нейтронов 300 и 590 Мэв.

Обнаружено равенство (в пределах точности опытов) дифференциальных сечений упругого рассеяния нейтронов нейтронами и протонов протонами при одинаковых энергиях нуклонов во всей изученной области углов рассеяния (рис.6). Равными оказались и полные сечения (п-п) и (р-р)-взаимодействий (38,39). Этот результат опытов наиболее непосредственно подтверждает справедливость гипотезы зарядовой симметрии ядерных сил в области высоких энергий и позволяет считать все основные выводы, касающиеся ядерного взаимодействия двух протонов, справедливыми для взаимодействия двух нейтронов.

3. Упругое рассеяние нейтронов протонами

Главное значение опытов по рассеянию нейтронов протонами состоит в том, что при помощи них удается получить ценные сведения о ядерном взаимодействии между неодинаковыми нуклонами. Первые опыты по рассеянию нейтронов высоких энергий протонами, выполненные Сегре и др. в 1948 г. в Беркли с нейтронами 40 и 90 Мэв, в которых было обнаружено интенсивное рассеяние нейтронов назад (в с.ц.м.), явились непосредственным доказательством того, что ядерные силы, действующие между нейтроном и протоном, имеют обменный характер.

На синхроциклотроне Лаборатории ядерных проблем рассеяние нейтронов протонами систематически изучалось в области энергий нейтронов от 380 до 580 Мэв в работах (40,43). Результаты этих исследований приведены на рис.7.

Данные опытов с нейтронами 380 Мэв, выполненных в 1950-51г.г. показывают, что дифференциальные сечения (п-р)-рассеяния практически не меняются в широкой области углов, прилегающих к 90° , и имеют относительно большую величину. Это позволило сделать вывод о том, что при высоких энергиях интенсивность взаимодействия в системе нейтрон-протон очень велика, так же как это имеет место в системе протон-протон. Таким образом, на основании опытов по рассеянию нуклонов было установлено, что ядерное взаимодействие при высокой энергии между любыми парами нуклонов характеризуется очень большой интенсивностью.

Данные опытов при 580 Мэв (42,43), так же как и при 380 Мэв показывают, что и в этой области энергий резко появляется обменный характер ядерного взаимодействия между нейтроном и протоном что вклад обменных сил во взаимодействие нуклонов остается большим вплоть до энергии 600 Мэв.

Заслуживает быть отмеченным, что вся совокупность имеющихся опытных данных по упругому рассеянию нуклонов высокой энергии нуклонами не противоречит гипотезе о зарядовой независимости ядерных сил.

Результаты анализа данных по нуклонному рассеянию, выполненного^(29,41) на основе представлений, лежащих в основе этой гипотезы, свидетельствуют о резком различии в характере изменения с углом и энергией сечений взаимодействия нуклонов $\sigma_{1,0}(\theta)$ и $\sigma_{0,1}(\theta)$ в состояниях с различными изотопическими спинами и тем самым указывают на различие в характере взаимодействия нуклонов в этих состояниях.

4. Обменное рассеяние нейтронов дейтронами при энергии 380 Мэв

Результаты всех опытов по рассеянию неполяризованных нейтронов протонами, указывая на большую роль во взаимодействии нуклонов сил обменного характера, не позволяли сделать каких-либо заключений о зависимости этих сил^{от} спина. Оригинальный путь для выяснения этого вопроса был указан в работе⁽⁴⁴⁾, в которой предлагалось выполнить сравнительные опыты по наблюдению быстрых протонов от обменных столкновений нейтронов высоких энергий с дейтронами и свободными протонами.

В экспериментах такого рода⁽⁴⁵⁾ было обнаружено, что в области малых углов рассеяния сечения испускания протонов высокой энергии при обменном рассеянии нейтронов дейтронами значительно меньше сечений, наблюдаемых при рассеянии нейтронов на свободных протонах (рис.8). Этот факт позволил сделать вывод о том, что при обменных (п-р) -соударениях с^р значительной вероятностью происходит одновременно и обмен спинами, или, иными словами, что вклады, вносимые спиново-обменными и спиново-необменными

силами в обменное взаимодействие нейтрона с протоном, одного порядка.

5. Упругое рассеяние протонов дейтронами и прямое выбивание дейтронов протонами из легких ядер

Уже в опытах ⁽⁴⁶⁾, выполненных в 1952 г. при энергии протонов 460 Мэв было установлено, что упругое рассеяние протонов дейтронами на большие углы сопровождается передачей дейтрону энергии до 300 Мэв. Наиболее полные данные об угловой зависимости дифференциальных сечений (p-d)-рассеяния были получены для энергии протонов 660 Мэв ⁽⁴⁷⁾ (рис.9). Особого внимания заслуживает найденное в этих опытах рассеяние протонов на углы порядка 130° - 150° в с.ц.м., когда дейтрону, улетающему вперед как целое, передаются энергии до 500-600 Мэв, в сотни раз превышающие энергию связи дейтрона. Наблюдаемые факты для своей интерпретации требуют привлечения механизма коллективного трехчастичного взаимодействия нуклонов.

С целью изучения соударений протонов высоких энергий с квази-дейтронными группами в ядрах на метрическом синхротроне были поставлены специальные опыты.

В работе ⁽⁴⁸⁾ при бомбардировке протонами с энергией 675 Мэв ядер легких элементов было обнаружено испускание дейтронов с энергиями около 600 Мэв вперед под малым углом к направлению пучка протонов так же, как это имело место в случае наблюдавшихся в этих же опытах упругих (p-d)-соударений при той же энергии частиц и угле наблюдения (рис.10).

Качественное объяснение наблюдаемому явлению можно дать, если опираться на представления о существовании в ядрах коротко-временных сильно взаимодействующих групп нуклонов ⁽⁴⁹⁾ или использовать предсказания высокоимпульсной модели ядра, развиваемой в последнее время Брэкнером.

Все эти опыты в совокупности с экспериментами (например, (50)), в которых наблюдалось испускание под действием частиц высоких энергий тяжелых фрагментов (Т, Не, Ли, Ве и т.п.) с энергиями, превышающими потенциальный барьер, указывает путь для исследования непарных сил, действующих ~~на~~ между нуклонами в ядрах.

6. Полные сечения ядерного взаимодействия нуклонов с нуклонами и дейтронами

Результаты основных опытов, проведенных на шестиметровом синхротронном ускорителе различными исследователями (32, 38, 39, 41, 51) в связи с определением полных сечений ядерного взаимодействия и упругого рассеяния нуклонов, приведены на рис. II. Полученные данные позволяют сделать следующие заключения.

1. В изученной области энергий 380-660 Мэв наблюдается резкое увеличение сечений образования мезонов в соударениях как одних нуклонов, так и различных нуклонов.

2. Полные сечения упругого рассеяния нуклонов нуклонами в состояниях с различными изотопическими спинами $T=0$ и $T=1$ также как и при меньших энергиях, обнаруживают различную зависимость от энергии: $\sigma_{T=1}^t = \sigma_{pp}^t$ остается постоянным, а $\sigma_{T=0}^t$ уменьшается с энергией (41). Это может указывать на ослабление с ростом энергии полной интенсивности взаимодействия нуклонов в состояниях с $T=0$.

Резюмируя результаты экспериментальных исследований, выполненных в связи с изучением процессов упругого рассеяния нуклонов и дейтронами, можно сказать, что они позволяют составить представление о главных особенностях нуклон-нуклонного взаимодействия в изученной области энергий (до 0,7 Бэв):

1. Во взаимодействии нуклонов при высоких энергиях участвуют очень интенсивные силы различного типа: центральные, тензорные, обменные, сложным образом зависящие от спина.

2. Вклады в ядерное взаимодействие нуклонов от сил разных типов соизмеримы.

3. Взаимодействие нуклонов является зарядово независимым.

Несомненно, что будущая теория ядерных сил должна будет в качестве критерия практики использовать эти опытные факты.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЗОНОВ И НУКЛОНОВ

Проблему ядерных сил нельзя полностью отделить от изучения свойств всех других элементарных частиц. В действительности, известно, что имеется связь между элементарными частицами и полями сил. Например, взаимодействия между заряженными частицами осуществляются посредством фотонов, как говорят, фотоны являются квантами электромагнитного поля, и поэтому свойства фотонов тесно связаны с характером электромагнитных сил, действующих между заряженными частицами.

Аналогично свойства π -мезонов, как сейчас установлено, тесно связаны с силами, действующими между нуклонами, т.е. в ядерных силах. Поэтому понятно насколько важное место в физике элементарных частиц занимает изучение свойств π -мезонов.

Мезонная теория - формальная теория мезонных полей - исходит именно из предположения, впервые высказанного Юкава, что ядерные силы обусловлены мезонами. Эта идея без сомнения правильна, но, к сожалению, мезонная теория находится еще на относительно ранней степени развития.

В настоящий момент, когда любая конкретная форма мезонной теории оказывается неспособной дать что-нибудь, кроме, в лучшем случае, качественного согласия с экспериментами, основной задачей

экспериментальной физики в области высоких энергий является получение данных для феноменологического описания взаимодействия разных частиц друг с другом. В действительности, как показала практика, при отсутствии общей картины, объединяющей различные явления физики элементарных частиц, невозможно создать последовательную мезонную теорию. Таким образом, феноменологическое описание взаимодействия частиц, и прежде всего, π -мезонов и нуклонов является первым шагом к созданию мезонной теории ядерных сил.

Как в СССР, так и за границей исследования, на основании которых могли быть получены сведения об общей картине взаимодействия частиц, проводились по многим направлениям: кроме рассеяния нуклонов нуклонами, при разных энергиях налетающих частиц и углах рассеяния, изучались рассеяние мезонов нуклонами, а также рождение мезонов на нуклонах нуклонами, мезонами и гамма-квантами.

I. Рассеяние π -мезонов на нуклонах и на сложных ядрах

Большой шаг вперед в исследовании свойств π -мезонов был сделан в период 1950-54 г.г. в классических измерениях их четности и спина Пановским и Штайнбергером, а также в измерениях полных и дифференциальных сечений рассеяния π -мезонов на нуклонах в области энергий до ~ 200 Мэв Ферми и др. Исследования рассеяния мезонов на нуклонах начались в Лаборатории ядерных проблем в 1954г. после того, когда были получены хорошо коллимированные пучки π -мезонов (6). Исследования ставили целью получение сведений в области энергий π -мезонов, лежащей выше 200 Мэв, где данные практически отсутствовали. Ряд работ был посвящен как изучению зависимости от энергии полных сечений взаимодействия π^+ и π^- -мезонов с водородом и дейтерием (52, 53, 54, 55) (рис. 12) в области энергий 140-400 Мэв, так и исследованию угловых распределений

π -мезонов, рассеянных на водороде в реакциях $\pi^+ + p \rightarrow \pi^+ + p$,
 $\pi^- + p \rightarrow \pi^- + p$, $\pi^+ + p \rightarrow \pi^0 + p$,
при разных энергиях мезонов 175, 200, 240, 270⁽⁵⁶⁾, 307⁽⁵⁷⁻⁶⁰⁾,
330 и 360 Мэв⁽⁶²⁾.

Часть полученных результатов представлена на рис. I3 и I4. Опыты по угловому распределению π -мезонов на водороде были выполнены как при помощи сцинтилляционных счетчиков, так и при помощи метода фотопластинок.

Совокупность данных, в частности, равенство сечений взаимодействия π^+ и π^- -мезонов с дейтерием, подтверждает принцип зарядовой симметрии для систем из мезонов и нуклонов. Данные подтверждают также более строгий принцип зарядовой независимости. Хотя принцип зарядовой независимости находит естественное место в мезонной теории ядерных сил, необходимо подчеркнуть, что выводы о справедливости этого принципа были сделаны без использования мезонной теории, на основании феноменологического анализа данных по рассеянию мезонов нуклонами и обсуждаемых ниже данных по образованию мезонов нуклонами.

Опыты подтвердили, что в области энергий до 300 Мэв взаимодействие мезон-нуклон является особенно сильным в состоянии с изотопическим спином $3/2$ и полным угловым моментом $3/2$, причем величина сечения рассеяния в этом состоянии достигает максимально возможного значения при энергии π -мезонов около 190 Мэв. Относительно часто говорят, что взаимодействие мезон-нуклон имеет "резонансный" характер. Возможно, что резонанс связан со структурой нуклона⁽⁶³⁾, хотя утверждать это в настоящее время никак нельзя. Исследование мезон-нуклонного взаимодействия в области высоких энергий позволило заключить^(52,54), что вклад в рассеяние состояния с изотопическим спином $1/2$ становится заметным при энергии $E_{\pi} \geq 300$ Мэв.

Высокая точность измерений угловых распределений рассеяния на водороде π^+ -мезонов при энергии больше, чем 200 Мэв, впервые позволила произвести фазовый анализ с учетом не только S и P состояний, но также и D-состояний. Из анализа следует⁽⁵⁶⁾, что радиус мезон-нуклонного взаимодействия составляет около $7 \cdot 10^{-14}$ см.

Все данные, полученные на синхротронной Лаборатории ядерных проблем^(55,56,58,59,61,62), совместимы с одной величиной константы связи g^2 , примерно равной 0,1.

Взаимодействию мезонов со сложными ядрами посвящен ряд работ, выполненных при помощи самых разнообразных экспериментальных методов: сцинтилляционных счетчиков⁽⁶⁴⁻⁶⁶⁾, фотопластинок^(67,68), камеры Вильсона⁽⁶⁹⁾, диффузионной камеры^(70,71). Некоторые из полученных данных показаны на рис. 15, 16, 17.

Данные полученные в работе⁽⁶⁸⁾ по неупругому рассеянию π^+ -мезонов на ядрах фотоэмульсии, показали, что между ядрами и π^+ -мезонами с энергией 160 Мэв действуют силы притяжения, причем глубина соответствующей потенциальной ямы составляет примерно 25 Мэв.

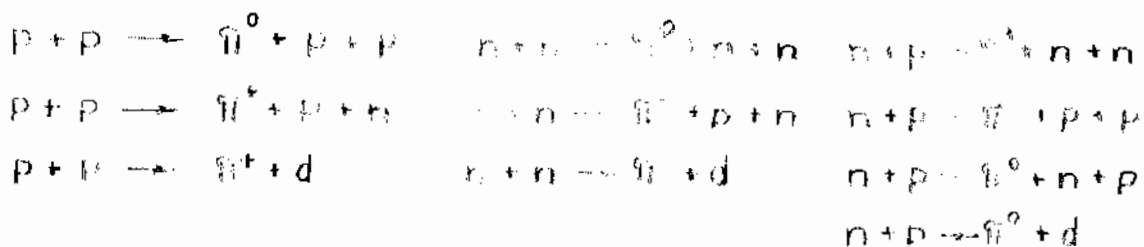
2. Образование мезонов нуклонами

а) Ранние опыты.

Многочисленные исследования на синхротронной были посвящены проблеме одиночного рождения заряженных и нейтральных π^+ -мезонов при соударении нуклонов. Ясно, что процессы рождения заряженных мезонов в нуклон-нуклонных соударениях с теоретической точки зрения являются более сложными, чем процессы рассеяния мезонов нуклонами.

Для того, чтобы составить достаточно полную картину явлений мезообразования в нуклон-нуклонных столкновениях изучались различными методами качественные и количественные характеристики этих процессов.

При соударении двух нуклонов π -мезоны могут образовываться в следующих процессах:



В 1951-52 г.г. на пятиметровом варианте синхротрона были получены сведения о реакциях рождения π^0 -мезонов в $(p-p)^{(72)}$ и $(n-p)^{(72)}$ -соударениях при энергии нейтронов 400 Мэв и о реакциях $p-p \rightarrow \pi^0 + p + p$ $(73-75)$, $n+p \rightarrow \pi^+ + d$ (76) с протонами, имеющими энергии 460 Мэв. Кроме того, изучались процессы образования π^0 -мезонов протонами $(77,78)$ и нейтронами (79) на сложных ядрах.

Итоги этих работ таковы:

1. На основании результатов трудоемких и точных измерений спектров гамма-квантов от распада π^0 -мезонов, образованных на сложных ядрах при бомбардировке их протонами с энергией 460 Мэв, был сделан вывод о том, что мезоны в основном рождаются в P-состоянии $(77,7)$.

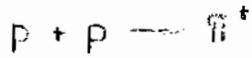
2. Измерения вероятности образования π^0 -мезонов на ядрах разного атомного веса позволили оценить $(72,73)$ длину свободного пробега мезонов в ядерном веществе.

3. Впервые были поставлены эксперименты, в которых исследовалось образование π^0 -мезонов нейтронами на нуклонах и на сложных ядрах (80) .

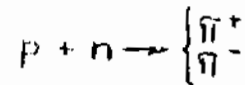
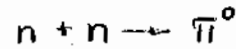
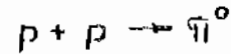
4. Было показано (72) , что около порога мезообразования рождение π^0 -мезонов в столкновениях двух нейтронов запрещено, также как запрещено рождение таких мезонов в столкновениях двух протонов (опыты, выполненные в Беркли). Это сходство $(p-p)$ и $(n-p)$ -взаимодействий указывало на справедливость гипотезы зарядовой симметрии непосредственно для систем, состоящих из нуклонов и мезонов.

5. Опыты по образованию π^0 -мезонов в (п-р) и (п-п)-столкновениях позволили дать⁽⁷²⁾ следующую качественную схему процессов образования π -мезонов около порога мезообразования:

Процессы вероятные



Процессы маловероятные



Было указано⁽⁸¹⁾ впервые, что малая вероятность образования заряженных мезонов в (п-р)-столкновениях связана с тем, что мезон-нуклонное взаимодействие особенно сильно в состоянии с изотопическим спином и угловым моментом $3/2$, т.е. в состоянии, которое ярко проявляется в опытах по взаимодействию π -мезонов с нуклонами.

6. При бомбардировке водорода протонами с энергией 460 Мэв было показано⁽⁷³⁻⁷⁵⁾, и это находится в согласии с данными, полученными Маршаллом в Чикаго, что с повышением энергии снимается запрет, который имеет место для реакции $p + p \rightarrow \pi^0 + p + p$ при меньших энергиях. Аналогичный вывод о том, что запрет для образования π -мезонов в (п-п)-столкновениях снимается при высоких энергиях был также получен в работе⁽⁸²⁾, когда после реконструкции синхротронотрона был получен пучок нейтронов с энергией 580 Мэв.

7. Подробно исследовалась⁽⁷⁶⁾ реакция $p + p \rightarrow \pi^+ + d$ при энергии протонов 460 Мэв. Полученное угловое распределение указывает на то, что мезоны в этой реакции преимущественно рождаются в Р-состоянии, при этом эффект от испускания мезонов в D-состоянии незначителен.

б) Энергетическая зависимость сечения процессов мезообразования и угловые распределения мезонов, образованных нуклонами в разных реакциях.

После получения на синхротронной протонной установке с энергией 680 МэВ прямыми или косвенными путями были исследованы все процессы рождения мезонов, перечисленные выше. Поскольку рамки настоящей статьи не позволяют дать полный обзор опытов, в изложении в значительной мере мы опираемся на рисунки.

Эксперименты⁽⁸³⁾ по изучению рождения π^+ -мезонов при соударениях с протонами протонов с энергией от 460 до 660 МэВ позволили впервые установить, что зависимость полного сечения реакции $p + p \rightarrow \pi^+ + d$ имеет резонансный характер (рис.18). Из анализа угловых распределений мезонов, испускаемых в указанной реакции (рис.19), следует, что в рассматриваемой области энергий мезоны в основном рождаются в P-состоянии. Этот вывод был сделан также на основании экспериментального изучения⁽⁸⁵⁾ при энергии нейтронов около 600 МэВ углового распределения π^+ -мезонов, образующихся в реакции $n + p \rightarrow \pi^+ + d$ (рис.19), которая с точки зрения изотопической инвариантности является тождественной с реакцией $p + p \rightarrow \pi^+ + d$. Наряду с двухчастичной реакцией, протекающей при соударении двух протонов, исследовалась также реакция $p + p \rightarrow \pi^+ + n + p$ при энергии протонов 660 МэВ⁽⁸⁶⁾ (рис.20).

Образование π^+ -мезонов на протонах и дейтронах было изучено в области энергии до 680 МэВ при бомбардировке их протонами^(87,90) и нейтронами^(82,91).

Отношение сечений $\sigma_{pp}^{\pi^+} / \sigma_{pp}^{\pi^0}$ при 660 МэВ близко к двум^(87,89) величине, которую предсказывает гипотеза зарядовой независимости в том случае, когда в конечном состоянии система мезон-нуклон имеет изотопический спин $3/2$ ⁽⁹²⁾.

Энергетическая зависимость сечений образования π^0 -мезонов протонами на протонах и на дейтронах была исследована при помощи как внутреннего^(88,93), так и выведенного^(89,90) пучка протонов. На рис.21 представлены данные наиболее точных измерений, в которых была установлена совершенно иная, чем предполагалось ранее, энергетическая зависимость полного сечения образования π^0 -мезонов в (p-p) -соударениях⁽⁸⁸⁾.

Угловое распределение π^0 -мезонов, рождающихся в нуклон-нуклонных столкновениях, было изучено при энергии 445,500,555 Мэв⁽⁸⁸⁾ и 660 Мэв^(88,89,93). Было найдено, что угловое распределение, которое при малых энергиях анизотропно, становится практически изотропным с увеличением энергии до 660 Мэв. По-видимому, это связано с тем, что при энергии около 600 Мэв начинает проявляться сильное взаимодействие в конечном состоянии между π^0 -мезоном и одним из нуклонов.

При исследовании углового распределения гамма-квантов от распада π^0 -мезонов, образованных на ядрах, было обнаружено^(87,89,93) интересное явление асимметрии (рис.22), связанное с тем, что длина пробега мезонов и протонов в ядерном веществе мала по сравнению с размерами ядра. Сведения о поглощении мезонов в ядерном веществе были получены также на основании измерений выходов π^0 -мезонов из разных ядер при бомбардировке их протонами⁽⁸⁷⁾ и нейтронами^(79,82).

в) Энергетические спектры частиц, испускаемых при неупругих соударениях двух нуклонов.

Спектры частиц, испускаемых при неупругих соударениях нуклонов с нуклонами и ядрами, были исследованы различными экспериментальными методами: методом анализа при помощи парного магнитного спектрометра спектров γ -квантов от распада

π^0 -мезонов, образованных в соударениях с протонами⁽⁹⁴⁾ (рис.23) и ядрами^(95,96) (рис.24); методом магнитного анализа вторичных протонов и дейтронов, испускаемых в процессе столкновения двух протонов⁽⁹⁷⁾ (рис.25); методом магнитного анализа заряженных мезонов от (p-p)-соударений^(98,99) (рис.26) и от соударения протонов с ядрами^(100,101) (рис.27); наконец, для анализа спектров заряженных мезонов, образующихся в (p-p)-столкновениях, применялся метод фотопластинок⁽¹⁰²⁾ (рис.28).

Анализ спектров гамма-квантов от распада π^0 -мезонов, образуемых протонами на легких ядрах, показал, что с ростом энергии протонов от 470 до 660 Мэв происходит смягчение спектра и уменьшение анизотропии углового распределения мезонов, образующихся в (p-p)-соударениях⁽⁹⁵⁾. Причина этого, по-видимому, лежит также в появлении с ростом энергии сильного взаимодействия π^0 -мезонов с одним из нуклонов. При помощи той же методики впервые были получены сведения об угловом и энергетическом распределении

π^0 -мезонов, образующихся при столкновении протонов с энергией 660 Мэв с водородом⁽⁹⁴⁾.

В результате анализа спектров π^+ -мезонов, образующихся в реакции $p + p \rightarrow \pi^+ + p + n$ при энергии протонов 556 и 657 Мэв, было показано, что в этой области энергий матричный элемент реакции пропорционален импульсу мезона⁽⁹⁸⁾.

Интересный результат был получен⁽¹⁰¹⁾ из измерений потоков заряженных⁽¹⁰¹⁾ и нейтральных⁽¹⁰³⁾ мезонов, испускаемых из разных ядер при бомбардировке их протонами. Найдено, что отношение числа заряженных мезонов к числу π^0 -мезонов, образованных протонами на ядрах с изотопическим спином 0, равно двум, что подтверждает еще раз гипотезу зарядовой независимости ядерных сил; при этом характер проверки относится к области малых и высоких энергий одновременно.

г) Итоги исследований процессов образования мезонов нуклонами.

В заключение можно заметить, что такое систематическое исследование процессов рождения как нейтральных, так и заряженных π -мезонов до сих пор является единственным.

2. Рождение π -мезонов мезонами.

Уже относительно давно известно, что при соударениях π -мезонов с нуклонами могут рождаться мезоны (множественное образование). Однако, процессы рождения мезонов мезонами до последнего времени были изучены только в области энергий, значительно превышающих порог мезообразования. Исследование этих процессов вблизи порога недавно было предпринято в Лаборатории ядерных проблем, где рождение мезонов мезонами исследовалось на жидком водороде⁽¹⁰⁴⁾ при помощи сцинтилляционных счетчиков и на сложных ядрах⁽¹⁰⁵⁾ при помощи фотопластинок. На рис.29 представлены полученные впервые данные об энергетической зависимости суммарной вероятности реакций $\pi + p \longrightarrow \begin{cases} \pi^0 + \pi^- + p \\ \pi^+ + \pi^- + n \end{cases}$. Все попытки вычислить вероятность этих процессов при помощи мезонной теории не были удачными. С методической точки зрения может представлять интерес сравнение опытных данных с приведенной на том же рисунке кривой, рассчитанной Франклином на основании теории Чью и Лоу (Phys. Rev. 105, 1101, 1957) и дающей пока значительно лучшее согласие с опытом по сравнению с другими расчетами.

4. З а к л ю ч е н и е .

Подводя итоги совокупности исследований процессов взаимодействия мезонов с нуклонами и сложными ядрами, а также образования мезонов нуклонами на нуклонах и на сложных ядрах, можно утверждать, что они позволяют составить достаточно полную феноменологическую картину взаимодействия мезонов и нуклонов в области

энергий до 0,7 Бэв. При этом основными характеристиками этого взаимодействия, которые должны быть учтены будущей теорией, являются следующие:

а) взаимодействия мезонов и нуклонов являются зарядово независимыми;

б) взаимодействие мезон-нуклон особенно сильно в состоянии с изотопическим спином $T=3/2$ и угловым моментом $J=3/2$.

μ - М Е З О Н Ы

Известно, что μ -мезоны являются не ядерноактивными частицами, т.е. их взаимодействие с нуклонами значительно меньше, чем π -мезон-нуклонное взаимодействие. Однако вопрос о том, существуют ли относительно слабые ядерные силы, обусловленные виртуальным испусканием пар μ -мезонов ($\mu^+ \mu^0$), является открытым. Попытка детектировать⁽¹⁰⁶⁾ гипотетический μ^0 -мезон показала, что эта частица, если она существует, испускается из ядер при бомбардировке их протонами с энергией 670 Мэв с вероятностью меньше или порядка 10^{-4} вероятности испускания π^0 -мезонов. Следовательно, вклад парного взаимодействия ($\mu^+ \mu^0$) в ядерные силы незначителен.

Большой интерес к проблеме распада μ -мезона проявился после открытия в США несохранения четности в слабых взаимодействиях. В работе⁽¹⁰⁷⁾ методом фотопластинок исследовалась асимметрия электронов, испускаемых в распаде μ -мезонов (в процессе $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu + \bar{\nu}$), по отношению к направлению испускания этих μ -мезонов в процессе $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$. Полученные результаты подтвердили вывод о несохранении четности и с хорошей точностью определили вид углового распределения электронов.

В связи с предложенной Л.Ландау⁽¹⁰⁸⁾ теорией продольного нейтрино, согласно которой масса нейтрино равна нулю и нейтрино всегда поляризовано по направлению его движения, большой интерес представляет сравнение данных с этой теорией. В трудоемких опытах⁽¹⁰⁹⁾ была определена зависимость асимметрии электронов, испускаемых в процессе распада μ^+ -мезонов, в фотопластинках, от энергии электронов. Измерения показали, что асимметрия увеличивается для энергичной части спектра: знак эффекта согласуется с предсказаниями теории продольного нейтрино. В настоящее время проводятся и другие опыты по этой фундаментальной проблеме.

СТРАННЫЕ ЧАСТИЦЫ.

В Лаборатории ядерных проблем исследовались также процессы рождения Λ^0 -частиц. На основании теоретических соображений как в СССР, так и за границей было предсказано явление⁽¹¹⁰⁾ совместного рождения тяжелого мезона с гипероном. Это впоследствии было подтверждено прямыми опытами, проведенными на космотроне в США. Гипотезе совместного рождения Λ^0 -частицы и K -мезона противоречит реакция нуклон + нуклон \rightarrow нуклон + Λ^0 , но не противоречит реакция нуклон + нуклон \rightarrow $\Lambda^0 + \Lambda^0$.

В работе⁽¹¹¹⁾ сделана попытка наблюдать рождение Λ^0 -частиц при бомбардировке внутренней мишени синхроциклотрона протонами с энергией 680 Мэв, вполне достаточной даже для образования двух Λ^0 -частиц. Опыт показал, что Λ^0 -частицы в этих условиях не рождаются. Это не только явилось дополнительным и сильным аргументом в пользу предположений²⁾ о совместном рождении Λ^0 -частицы и тяжелого мезона, но позволило также сделать вывод относительно величины изотопического спина K^0 -мезона, участвующего во взаимодействии Λ^0 -частицы с нуклоном. Из работы следует,²⁾ что K^0 -мезон и его античастица (\bar{K}^0) не являются тождественными.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ СО СЛОЖНЫМИ ЯДРАМИ

Аргументом нельзя ответить на вопрос является ли взаимодействие Π -мезонов и нуклонов с ядрами суммой их попарных взаимодействий с отдельными нуклонами ядер. Основным интерес исследований взаимодействия этих частиц с ядрами связан с тем, что они могут дать неожиданные сведения о ядерных силах, которые нельзя получить из опытов по рассеянию частиц на нуклонах.

Мы уже упоминали значительное количество работ, в которых изучалось взаимодействие нуклонов и Π -мезонов со сложными ядрами.

Ввиду ограниченности рамок этой статьи, мы не можем даже кратко обсудить все работы, в которых это взаимодействие исследуется в разных аспектах. Однако, для того, чтобы дать возможность составить представление об изучаемых в них вопросах, мы приводим в списке литературы ряд таких работ с полным названием (II2-I20).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И АППАРАТУРА

Широкая программа ядерных исследований с частицами и гамма-квантами высоких энергий, проведенных на синхротроне потребовала разработки новых методов регистрации частиц и создания сложных экспериментальных установок.

Рамки этой статьи не позволяют сколько-нибудь подробно описать весь арсенал в большинстве своем тонкой и разнообразной экспериментальной аппаратуры, построенной и использованной в течение восьми лет в работах на синхротроне различными группами физиков. Однако, говоря обо всей этой проблеме, следует подчеркнуть, что по трудности и новизне научно-технических решений, а также по объему исследовательских и конструкторских работ

создание необходимых методов и аппаратуры для опытов с частицами высоких энергий принадлежит к числу сложнейших задач, которые в течение последних лет приходилось решать физикам и инженерам.

Для того, чтобы дать хотя бы общее представление об этой стороне исследований и проиллюстрировать масштабы проведенных научно-методических разработок, кратко остановимся лишь на некоторых приборах, применявшихся в опытах. С этой же целью в приложении к статье мы помещаем ряд фотографий типичных экспериментальных установок. Общее число установок достигает полусотни. Во время экспериментов они обычно располагаются на путях пучков ^{частиц}, в основном инженерном павильоне (рис.30), а также в мезонной и поляризацонной лабораториях. Управление ими осуществляется дистанционно из особого зала, где сосредоточены выходные регистрирующие устройства.

В исследованиях рассеяния нуклонов и π -мезонов нуклонами и ядрами широко использовались телескопы из кристаллических и жидкостных сцинтилляционных счетчиков в сочетании с фотоэлектронными умножителями, включенными в схемы совпадений с разрешающим временем до 10^{-8} сек. На рис. 31 приведена типичная схема опытов по рассеянию π -мезонов протонами, а на рис.32 дана фотография типичной установки для измерения рассеяния нуклонов нуклонами. В подобных же опытах применялись и применяются высокоэффективные годоскопические системы из нескольких сот счетчиков Гейгера с импульсным питанием (рис.33), счетчики черенковского излучения, диффузионные камеры диаметром до 40 см, наполненные водородом и гелием под давлением до 20 атм., (рис.34), пузырьковые камеры с пропаном (рис.35) и камера Вильсона диаметром 40 см в магнитном поле (рис.36).

Экспериментальные установки, ^{на} которых изучается рассеяние частиц или рождение мезонов, часто оборудуются специальными мишенями, наполненными жидким водородом или дейтерием. На рис. 37 приведен общий вид одной из таких установок.

Основная часть исследований процессов образования заряженных и нейтральных π -мезонов в соударениях нуклонов с нуклонами и ядрами была произведена при помощи многоканальных магнитных спектрометров в сочетании с газовыми или сцинтилляционными счетчиками (рис. 38). Электромагниты этих спектрометров имеют полюса с линейными размерами порядка метра и обеспечивают в зазорах порядка 10-15 см поле в 15000-17000 эрстед. Вес магнитов составляет 35-50 тонн. Примерно такие же параметры имеют и электромагниты-соленоиды от камер Вильсона и диффузионных камер.

В опытах по образованию заряженных π -мезонов в соударениях нейтронов с протонами применяется пузырьковая камера, наполненная жидким водородом (рис. 39).

Элементарные акты взаимодействия частиц высоких энергий с нуклонами и ядрами наблюдались также при помощи толстослойных фотоэмульсий и эмульсионных камер. При просмотре эмульсий применялись микроскопы, оборудованные угломерными устройствами и столиками увеличенных размеров с очень точной подачей. Для маркировки эмульсионных камер применяется специальный пресс с подсвечиваемой сеткой, разработанный и изготовленный в лаборатории.

В ряде опытов возникает необходимость предварительно фокусировать пучки частиц высоких энергий. Это осуществляется электромагнитными квадруполями линзами, вид одной из которых приведен на рис. 40.

Сложные условия физических экспериментов потребовали создания целого комплекса специфической электронной аппаратуры: широкополосные усилители, многоканальные анализаторы и т.п. Возникла также необходимость в разработке стереофотоаппаратов, репроекторов

и стереокомпараторов, применяемых при съемке и обработке фотографий треков частиц в камерах Вильсона, диффузионных и пузырьковых камерах. Фотографии ряда созданных в связи с этим в Лаборатории типовых приборов приводятся на рис.рис.41,42.

Значительный объем ядерных исследований на шестиметровом синхротронном циклотроне был также выполнен при помощи радиохимических методов^{х)}.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя кратко итоги физических исследований, выполненных на шестиметровом синхротронном циклотроне Лаборатории ядерных проблем с момента его запуска, можно сказать, что эти исследования внесли ценный вклад в физику высоких энергий. Они расширили наши знания в этой области современной физики и наряду с этим помогли выявить круг новых важных проблем и наметить эффективные пути для их изучения.

В значительной мере благодаря этим исследованиям молодая наука - физика частиц высоких энергий прочно заняла свое место среди других наук в нашей стране.

Работа на шестиметровом синхротронном циклотроне явилась хорошей школой, в которой воспитался у нас в Союзе значительный коллектив ученых из ряда научно-исследовательских институтов, овладевших современной физикой, а также инженеров и конструкторов различных специальностей, ~~которые~~ освоивших новую совершенную технику.

х) См. статью А.Н.Мурина

В течение последнего 1956-57 года в связи с организацией Объединенного института ядерных исследований лаборатории Института пополнились значительным числом ученых из других стран -участниц Института и, таким образом, превратились в международный центр ядерных исследований, одной из задач которого является подготовка кадров физиков для всех двенадцати стран-участниц Института.

В славный сороковой год Великого Октября в связи с пуском в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований гигантского синхротрона на 10 Бэв перед современной ядерной физикой открылись дополнительные богатые перспективы для дальнейшего развития.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Д.В.Ефремов, М.Г.Мецерыков, А.Л.Мицц, В.П.Джеленов, П.Л.Иванов, В.С.Катцшев, Е.Г.Комар, И.Ф.Малышев, И.А.Моноссон, И.Х.Невяжский, Б.И.Поляков, А.В.Честной. Атомная энергия, 4,5 (1956).
2. М.Г.Мецерыков, А.В.Честной, В.П.Джеленов, В.С.Катцшев, А.А.Кропип, Б.И.Замолодчиков, В.П.Дмитриевский, Е.Л.Григорьев, А.А.Реут, А.Л.Савенков, А.Г.Вахрамеев, Т.И.Томилииа, В.В.Батюиа, А.Е.Игнатенко, С.И.Юров, Отчет ИАП АИ СССР (1955).
3. А.Л.Мицц, И.Х.Невяжский, Б.И.Поляков, Симпозиум ЦЕРП"а, I, 419 (1956).
4. Б.И.Замолодчиков, Отчет ЛАП ОИЯИ (1957).
5. В.П.Джеленов, В.П.Дмитриевский, В.С.Катцшев, И.С.Козодаев, И.Г.Мецерыков, К.И.Тараканов, А.В.Честной, Атомная энергия, 4, 13 (1956).
6. А.Е.Игнатенко, В.В.Кривицкий, А.И.Мухин, Б.И.Лонтекорво, А.А.Реут, К.И.Тараканов, Атомная энергия, 5,2 (1956).
7. В.П.Дмитриевский, В.И.Данилов, Ю.П.Денисов, И.Л.Заплатин, В.С.Катцшев, А.А.Кропип, А.В.Честной, ПТЭ, I,II (1957).
8. А.А.Кропип, Отчет ЛАП ОИЯИ (1957).
9. В.И.Данилов, В.П.Дмитриевский, А.В.Честной, ПТЭ,3,9 (1956).
10. М.Г.Мецерыков, Доклад на сессии АИ СССР по мирному использованию атомной энергии (1955); А.П.Виноградов, Доклад на Сессии АИ СССР по мирному использованию атомной энергии (1955).
11. И.И.Богачев, Отчет ИАП АИ СССР (1950).
12. Р.Л.Герасимова, И.И.Гуревич, К.И.Мухин, Отчет ИАП АИ СССР (1950).
13. И.И.Богачев, Отчет ИАП АИ СССР (1951).

14. Н.А.Перфилов, Н.С.Иванова, Отчет ИЯП АН СССР (1950), ЖЭТФ, 29, 551 (1955); Н.А.Перфилов, О.В.Ложкин, В.П.Шамов, ЖЭТФ, 28, 656 (1955).
15. Г.Е.Беловицкий, Л.В.Сухов, Т.А.Романова, И.М.Франк, Отчет ИЯП АН СССР (1950), ЖЭТФ, 28, 729 (1955).
16. Н.А.Перфилов и др., Труды РИАН СССР, 7, 3-98 (1956).
17. В.П.Джелепов, Ю.М.Казаринов, Б.В.Гавриловский, Б.М.Головин, Отчет ИЯП АН СССР (1950).
18. М.Г.Медеряков, Е.Л.Григорьев, Н.П.Богачев, Л.М.Сороко, Отчет ИЯП АН СССР (1950).
19. Б.В.Гавриловский, Отчет ИЯП АН СССР (1950).
20. М.С.Козодаев, А.А.Марков, Отчет ИЯП АН СССР (1950).
21. В.П.Джелепов, Б.М.Головин, Ю.М.Казаринов, Отчет ИЯП АН СССР (1950) и (1951).
22. Б.В.Курчатов, В.Н.Мехедов, М.Я.Кузнецова, Л.В.Курчатова, Отчет ИЯП АН СССР (1950); Б.В.Курчатов, В.Н.Мехедов, Н.М.Борисова, М.Я.Кузнецова, Л.Н.Курчатова, Л.В.Чистякова, Сессия АН СССР по мирному использованию атомной энергии (Отд.хим.наук, 178, 1955).
23. Б.Т.Гейликман, Отчет АН СССР (1950).
24. ~~А.А.Резун~~ Г.И.Селиванов, В.В.Юрьев, Отчет ИЯП АН СССР (1950); В.И.Гольданский, В.С.Пенкина, Э.З.Тарумов, Отчет ИЯП АН СССР (1951), ДАН СССР, 101, 1027 (1955), ЖЭТФ, 29, 778 (1955).
25. С.А.Баранов, Отчет ИЯП АН СССР (1950).
26. М.Г. ~~Васильев~~ ^{Меншеринов}, Н.П.Богачев, Б.С.Неганов, Е.В.Лискарев, Отчет ИЯП АН СССР (1951); Е.Л.Григорьев, Л.М.Сороко, Отчет ИЯП АН СССР (1950); Н.П.Эданов, Э.С.Соколова, Отчет РИАН СССР (1952); А.П.Эданов, Э.С.Соколова, Отчет РИАН СССР (1952).

27. Л.Н.Соловьева, ЖЭТФ, 31, 12 (1956); А.П.Дданов, Ф.Г.Лепехина, Отчет ИАН СССР (1951).
28. В.И.Гольданский, А.Н.Ковальский, В.С.Пенькина, Э.З.Тарумов, Отчет ИЯП АН СССР (1951), ДАН СССР, 106, 219 (1956).
29. Я.А.Сморodinский, Отчет АН СССР (1953), Проблемы современной физики, в.7,7 (1954).
30. М.Г.Мещеряков, Н.П.Богачев, Б.С.Неганов, Е.В.Писарев, Отчет ИЯП АН СССР (1952), ДАН СССР, 99, 955 (1954); Б.С.Неганов, Отчет ИЯП АН СССР (1954); М.Г.Мещеряков, Б.С.Неганов, Л.М.Сороко, И.К.Взоров, ДАН СССР, 99, 959 (1954); М.Г.Мещеряков, Н.П.Богачев, Б.С.Неганов, Изв.АН СССР, сер.физ.19, 548 (1955).
31. Н.П.Богачев, И.К.Взоров, Отчет ИЯП АН СССР (1954) ДАН СССР, 99, 931 (1954).
32. Н.П.Богачев, ДАН СССР, 108, 805 (1956).
33. С.Я.Селектор, С.Я.Никитин, Е.Г.Богомолов, Е.Г.Зомбковский, Изв.АН СССР, сер.физ.19, 561 (1955), ДАН СССР, 99, 967 (1954).
34. Е.Г.Богомолов, Е.Г.Зомбковский, С.Я.Никитин, С.Я.Селектор, Симпозиум ЦЕРН, 2,129 (1956).
35. М.Г.Мещеряков, С.Б.Нурушев, Г.Д.Столетов, ЖЭТФ (в печати).
36. В.П.Джелепов, Б.М.Головин, В.И.Сатаров, Отчет ИЯП АН СССР (1952), ДАН СССР, 99, 934 (1954).
37. Б.М.Головин, В.П.Джелепов, ЖЭТФ, 31, 194, (1956).
38. В.П.Джелепов, В.И.Сатаров, Б.М.Головин, Отчет ИЯП АН СССР (1951), ДАН СССР, 104, 717 (1955), ЖЭТФ, 29, 369 (1955).
39. В.П.Джелепов, В.И.Москалев, С.З.Медведь, ДАН СССР, 104, 380 (1955).
40. В.П.Джелепов, Ю.М.Казаринов, Отчет ИЯП АН СССР (1951), ДАН СССР, 99, 939 (1954).
41. В.П.Джелепов, Ю.М.Казаринов, Б.М.Головин, В.Б.Флягин, В.И.Сатаров, Изв.АН СССР, сер.физ.19, 573 (1955); В.П.Джелепов, Ю.М.Казаринов, Б.М.Головин, Ю.И.Симонов, Симпозиум ЦЕРН, 2,115 (1956)
42. В.И.Гольданский, А.Е.Игнатенко и др. Доклад на Гордоновской конференции (США, 1957)г.

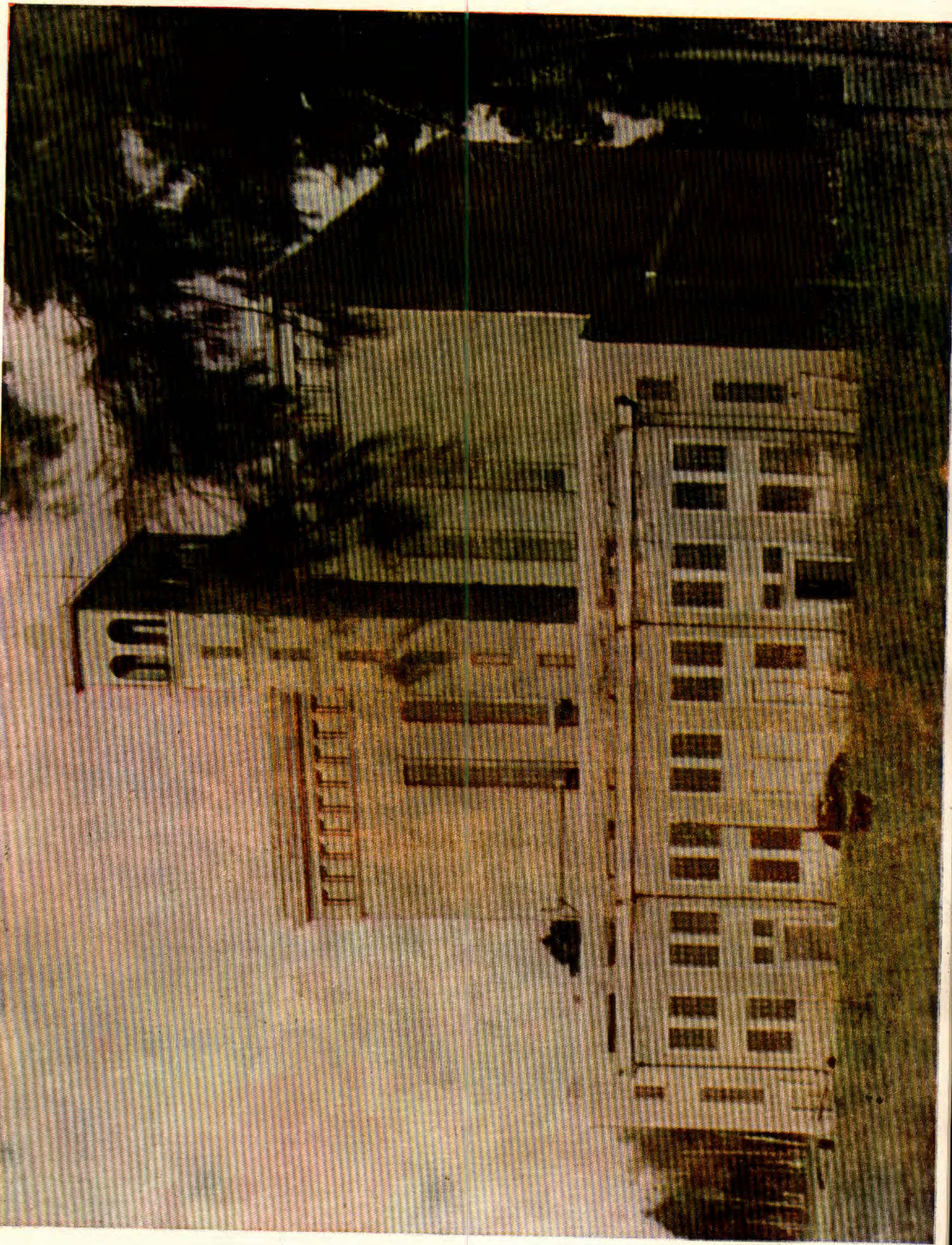
42. Ю.М.Казаринов, Ю.Н.Симонов, ЖЭТФ, 31, 169 (1956).
43. Н.С.Амаглобели, Ю.М.Казаринов, Отчет ЛЯП ОИЯИ (1957).
44. И.Я.Померанчук, ДАН СССР, 78, 249, (1955), ЖЭТФ, 21, IIIЗ, (1951) .
45. В.П.Джелепов, Ю.М.Казаринов, В.Б.Флягин, Отчет ИЯП АН СССР (1952), ДАН СССР, 100, 655 (1955).
46. М.Г.Мещеряков, Е.В.Пискарев, Н.П.Богачев, Б.С.Неганов, Отчет ИЯП АН СССР (1952); М.Г.Мещеряков, Н.П.Богачев, Г.А.Лексин, Б.С.Неганов, Е.В.Пискарев, Симпозиум ЦЕРН, 2, 125 (1956).
47. Г.А.Лексин, ЖЭТФ, 32, 445 (1957).
48. Л.С.Ажгирей, И.К.Взоров, В.П.Зрелов, М.Г.Мещеряков, Б.С.Неганов, А.Ф.Шабудин, ЖЭТФ (в печати).
49. Д.И.Блохинцев, ЖЭТФ (в печати).
50. В.М.Сидоров, Е.Д.Григорьев, ЖЭТФ (в печати); О.В.Ложкин, Н.А.Перфилов, ЖЭТФ, 31, 913 (1956).
51. В.П.Джелепов, В.И.Москалев, ДАН СССР, 110, 539 (1956).
52. А.Е.Игнатенко, А.И.Мухин, Е.Б.Озеров, Б.М.Понтекорво, ДАН СССР, 103, 45 (1955).
53. А.Е.Игнатенко, А.И.Мухин, Е.Б.Озеров, Б.М.Понтекорво, ДАН СССР, 103, 209 (1955).
54. А.Е.Игнатенко, А.И.Мухин, Е.Б.Озеров, Б.М.Понтекорво, ЖЭТФ, 30, 7 (1956).
55. А.И.Мухин, Е.Б.Озеров, Б.М.Понтекорво, ЖЭТФ, 31, 371 (1956).
56. А.И.Мухин, Б.М.Понтекорво, ЖЭТФ, 31, 550, (1956).
57. М.С.Козодаев, Р.М.Суляев, А.И.Филиппов, Ю.А.Черников, ДАН СССР, 107, 236 (1956).
58. Л.С.Дулькова, Т.А.Романова, И.Б.Соколова, Л.В.Сухов, К.Д.Толстов, М.Г.Шафранова, ДАН СССР, 107, 43 (1956); Л.С.Дулькова, И.Б.Соколова и М.Г.Шафранова, ДАН СССР, 111, 992 (1956).

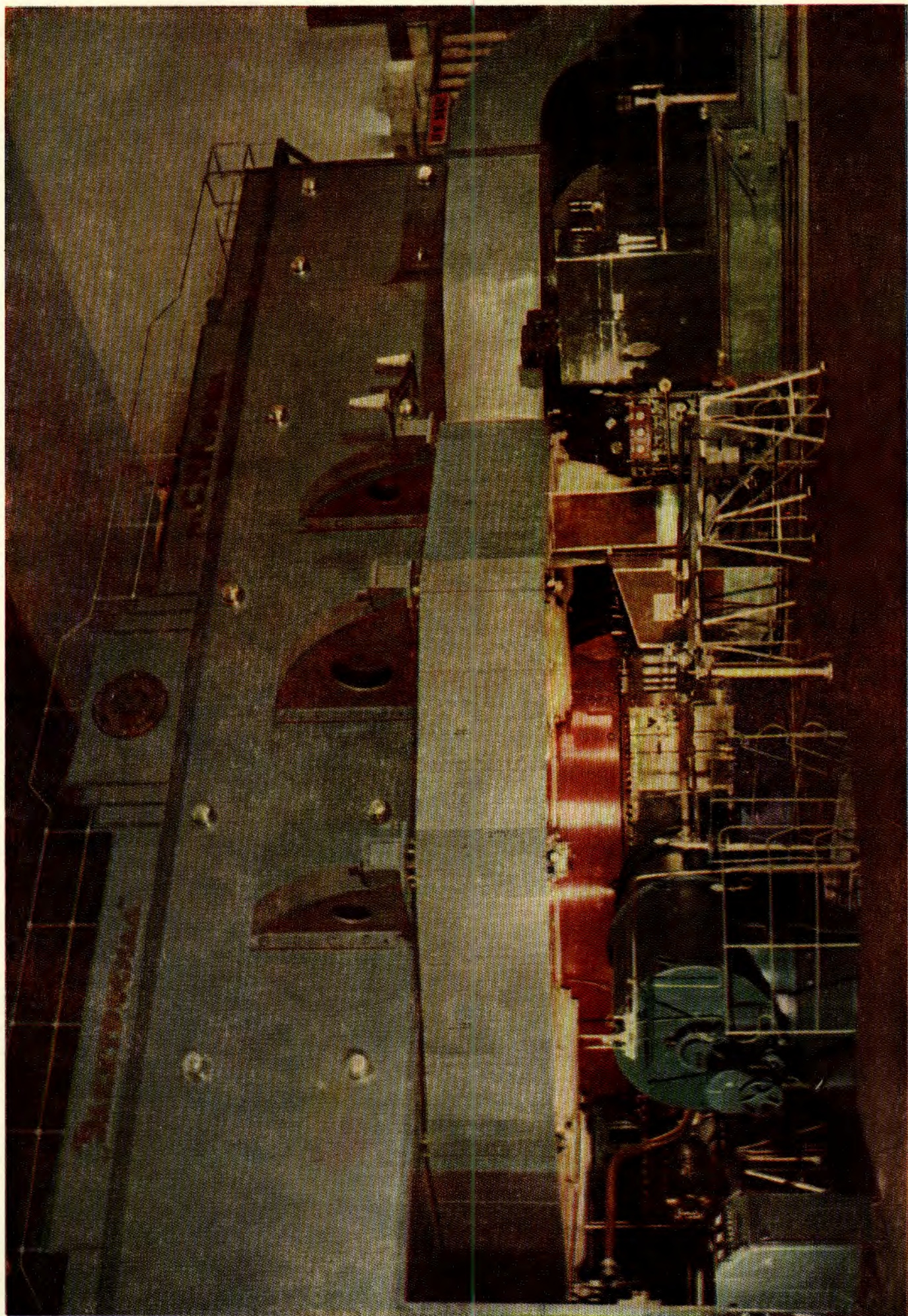
59. В.Г.Зинов, С.М.Коренченко, ЖЭТФ (в печати).
60. Е.Л.Григорьев, Н.А.Митин, ЖЭТФ, 31, 37 (1956).
61. В.Г.Зинов, С.М.Коренченко, Готовится к печати.
62. Н.А.Митин, Е.Л.Григорьев, ЖЭТФ, 32, 440 (1957).
63. И.Е.Тамм, Ю.А.Гольфанд, В.Я.Файнберг, ЖЭТФ, 26, 649 (1954).
64. А.Е.Игнатенко, А.И.Мухин, Е.Б.Озеров, Б.М.Понтекорво, ДАН СССР, 103, 395 (1955).
65. А.Е.Игнатенко, А.И.Мухин, Е.Б.Озеров, Б.М.Понтекорво, ЖЭТФ, 31, 545 (1956).
66. В.Г.Иванов, В.Т.Осипенков, Н.И.Петров, В.А.Русakov, ЖЭТФ, 31, 1097, (1956).
67. Н.А.Митин, Е.Л.Григорьев, ДАН СССР, 103, 219 (1955).
68. Л.П.Кудрин и Б.А.Николюский, ДАН СССР, III, 795 (1956).
69. В.П.Джелепов, В.Г.Иванов, М.С.Козодаев, В.Т.Осипенков, Н.И.Петров, В.А.Русakov, ЖЭТФ, 31, 923 (1956).
70. М.С.Козодаев, Р.М.Суляев, А.И.Филиппов, Ю.А.Цербаков, ЖЭТФ, 31, 701 (1956).
71. М.С.Козодаев, Р.М.Суляев, А.И.Филиппов, Ю.А.Цербаков, ЖЭТФ (в печати).
72. Б.М.Понтекорво, Г.И.Селиванов, Отчет ИЯП АН СССР (1952), ДАН СССР, 102, 495 (1955).
73. М.С.Козодаев, А.А.Тяпкин, Р.А.Ванецян, Отчет ИЯП АН СССР (1953).
74. Б.М.Понтекорво, Г.И.Селиванов, В.А.Жуков, Отчет ИЯП АН СССР (1953).
75. Л.М.Сороко, Отчет ИЯП АН СССР (1953).
76. М.Г.Мещеряков, Б.С.Неганов, Н.П.Богачев, В.М.Сидоров, Отчет ИЯП АН СССР (1953), ДАН СССР, 100, 673 (1955).
77. М.С.Козодаев, А.А.Тяпкин, А.А.Марков, Ю.Д.Бажков, Отчет ИЯП АН СССР (1953).

78. М.С.Козодаев, А.А.Тяпкин, Ю.Д.Барков, А.А.Марков, Ю.Д.Прокошкин, Изв. АН СССР, сер. физ. 19, 589 (1955).
79. Б.М.Понтекорво, Г.И.Селиванов, Отчет ИЯП АН СССР (1952) ДАН СССР, 102, 253 (1955).
80. Б.М.Понтекорво, Г.И.Селиванов, Отчет ИЯП АН СССР (1951)
81. Б.М.Понтекорво, Г.А.Змородинский, Материалы Второй конференции по физике частиц высоких энергий, Дубна (1953).
82. В.П.Джелепов, К.О.Оганесян, В.Б.Флягин, ЖЭТФ, 32, 678 (1957).
83. М.Г.Мецерыков, Б.С.Неганов, ДАН СССР, 100, 677 (1955).
84. Б.С.Неганов, Готовится к печати.
85. В.П.Джелепов, В.С.Киселев, К.О.Оганесян, В.Б.Флягин, Готовится к печати.
86. Б.С.Неганов, О.В.Савченко, ЖЭТФ (в печати)
87. А.А.Тяпкин, М.С.Козодаев, Ю.Д.Прокошкин, ДАН СССР, 100, 689 (1955).
88. Ю.Д.Прокошкин, А.А.Тяпкин, ЖЭТФ, 32, 750 (1957).
89. Б.Д.Балашов, В.А.Жуков, Б.М.Понтекорво, Г.И.Селиванов, Отчет ИЯП АН СССР (1955).
90. Л.М.Сороко, ЖЭТФ, 30, 296 (1956).
91. В.П.Джелепов, К.О.Оганесян, В.Б.Флягин, ЖЭТФ, 29, 886, (1955).
92. Л.И.Лалидус, Отчет ИЯП АН СССР (1955).
93. Ю.Д.Прокошкин, А.А.Тяпкин, Отчет ИЯП АН СССР ((955); Ю.Д.Прокошкин, Симпозиум ЦЕРН, 2, 385 (1956).
94. Ю.Д.Барков, А.А.Тяпкин, ЖЭТФ, 32, 953 (1957).
95. Ю.Д.Барков, М.С.Козодаев, А.А.Тяпкин, ЖЭТФ, 32, 667 (1957).
96. Ю.Д.Барков, А.Н.Синаев, А.А.Тяпкин, ЖЭТФ, 32, 385 (1957).
97. М.Г.Мецерыков, Б.С.Неганов, И.К.Взоров, В.П.Зрелов, А.Ф.Шабудин, ДАН СССР, 109, 499 (1956).
98. М.Г.Мецерыков, В.П.Зрелов, Б.С.Неганов, И.К.Взоров, А.Ф.Шабудин, ЖЭТФ, 31, 45 (1956).

99. А.Г.Мешковский, Ю.С.Плигин, Я.Я.Шаламов, В.А.Шебанов, ЖЭТФ, 31, 560 (1956).
100. М.Г.Мещеряков, И.К.Взоров, В.П.Зрезов, Б.С.Неганов, А.Ф.Шабудин, ЖЭТФ, 31, 65 (1956).
101. А.Г.Мешковский, Ю.С.Плигин, Я.Я.Шаламов, В.А.Шебанов, ЖЭТФ, 31, 987 (1956); ЖЭТФ (в печати).
102. В.И.Сидоров, ЖЭТФ, 28, 727, (1955).
103. Ю.Д.Прокошкин, А.А.Тяпкин, ЖЭТФ (в печати).
104. В.Г.Зинов, С.М.Коренченко. Готовится к печати.
105. В.В.Кривицкий, ~~И.А.Резун~~, ДАН СССР, 112, 232 (1957)
106. А.Н.Новиков, Б.М.Понтекорво, Г.И.Селиванов, ЖЭТФ, 29, 889 (1955).
107. И.И.Гуревич, А.П.Мишакова, Б.А.Никольский, Л.В.Суркова, ЖЭТФ (в печати).
108. Л.Д.Ландау, ЖЭТФ, 26, 649 (1957).
109. А.О.Вайсенберг, В.А.Смирницкий, ЖЭТФ (в печати).
110. Б.М.Понтекорво, Отчеты ИЯП АН СССР (1951, 1953), ЖЭТФ, 29, 140, (1955).
111. М.П.Баландин, Б.Д.Бадашов, В.А.Жуков, Б.М.Понтекорво, Г.И.Селиванов, ЖЭТФ, 29, 265 (1955).
112. В.П.Шамов, О.В.Ложкин. Асимметрия пробегов осколков при делении тяжелых ядер сверхбыстрыми частицами, ЖЭТФ, 29, 286 (1955); Н.А.Перфилов и Э.И.Остроумов. О процессах звездообразования и деления при действии на ядра вольфрама и висмута протонами с энергией 460 Мэв, ДАН СССР, 103, 227, (1955); В.И.Остроумов, Деление ядер урана быстрыми протонами, ДАН СССР, 103, 409 (1955); Иванова Н.С., Н.А.Перфилов и В.П.Шамов, Деление ядер урана протонами с энергией 460 Мэв, ДАН СССР, 103, 573 (1955).

- II3. Е.Л.Григорьев. Обнаружение поляризации пучков быстрых частиц при помощи ядерных фотоэмульсий, ЖЭТФ, 28, 761 (1955).
- II4. М.Г.Щедеряков, С.Б.Нурушев, Г.Д.Столетов. Поляризация протонов с энергией 660 Мэв в ядерном рассеянии, ЖЭТФ, 31, 361, (1956).
- II5. В.В.Алперт, Л.М.Барков, Р.И.Герасимова, И.И.Гуревич, К.Н.Мухин, Б.А.Никольский и Э.З.Топоркова. Рождение медленных π^- -мезонов на ядрах фотоэмульсии под действием протонов с энергией 460 Мэв и нейтронов с эффективной энергией 400 Мэв, ЖЭТФ, 30, 1025 (1956); В.В.Алперт, Л.М.Барков, Р.И.Герасимова, И.И.Гуревич, А.П.Мишакова, К.Н.Мухин, Б.А.Никольский. Рождение медленных π^- -мезонов на ядрах эмульсии под действием протонов с энергией 660 Мэв, ЖЭТФ, 30, 1034, (1956).
- II6. А.А.Ревт, С.М.Коренченко, В.В.Юрьев, Б.М.Понтекорво. Попытка обнаружения ядра H^4 среди продуктов расщепления углерода протонами с энергией 300 Мэв, ДАН СССР, 102, 723 (1955).
- II7. Е.Л.Григорьев, Л.П.Соловьева. Ядерные расщепления, производимые в фотоэмульсии протонами с энергией 660 Мэв, ЖЭТФ, 31, 932 (1956).
- II8. В.С.Киселев, В.Б.Флягин. Энергетические распределения нейтронов, испускаемых при бомбардировке бериллия протонами с энергией 680 Мэв, ЖЭТФ, 32, 957 (1957); В.П.Джелепов, Ю.М.Казаринов, Б.М.Головин, В.Б.Флягин. Отчет ИЯП АН СССР (1953). Испускание нейтронов высокой энергии под действием протонов с энергией 480 Мэв.
- II9. Д.П.Кумекин. Поляризация при квазиупругом (p-p) -рассеянии протонов с энергией 635 Мэв на дейтронах. ЖЭТФ (в печати).
- II0. Б.М.Понтекорво, А.Е.Игнатенко. Измерение полных сечений взаимодействия нейтронов с энергией 300 Мэв с ядрами при помощи звездного детектора, Отчет ИЯП АН СССР (1951); В.И.Москвалев, Б.В.Гавриловский. Полные сечения взаимодействия протонов с энергией 650 Мэв с ядрами, ДАН СССР, 110, 972 (1956).





ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис.1 Здание, в котором размещен синхротриклотрон.
- Рис.2 Общий вид синхротриклотрона. Между полюсами электромагнита расположена ускорительная камера; слева виден мощный высоковакуумный насос, в центре высокочастотный генератор и вариатор частоты.
- Рис.3. План здания и схема пучков частиц от шестиметрового синхротриклотрона.
- Рис.4 Упругое рассеяние протонов протонами при энергиях 460, 560 и 660 Мэв.
- Рис.5 Зависимость поляризации $P(\theta)$ в упругом рассеянии протонов протонами от угла рассеяния при энергии 635 Мэв. Анализ данных позволяет сделать заключение о заметном вкладе в рассеяние от триплетных F -состояний.
- Рис.6. Упругое рассеяние нейтронов нейтронами при энергиях 300 и 590 Мэв.
- Рис.7. Упругое рассеяние нейтронов протонами при энергиях 380 и 580 Мэв. Анализ данных при энергии 580 Мэв свидетельствует об участии в рассеянии состояний с орбитальным моментом до $l = 5$. Резкое возрастание сечений (п-р)-рассеяния в области малых углов при энергии 580 Мэв связано, по-видимому, с увеличением вероятности неупругих процессов (образование мезонов) в интервале энергий 380-590 Мэв, которое придает рассеянию дифракционный характер.
- Рис.8. Обменное рассеяние нейтронов протонами и дейтронами при энергии 380 Мэв.
- Рис.9. Упругое рассеяние протонов дейтронами при энергии 660 Мэв. Полное сечение упругого (р-d)-рассеяния при этой энергии составляет около 2-3% от полного сечения (р-d)-взаимодействия.

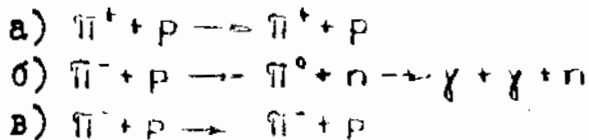
Рис.10. Импульсный спектр протонов и дейтронов, испускаемых из лития под углом $7,6^\circ$ в направлении пучка протонов с энергией 675 Мэв. Дейтроны испускаются в результате соударений налетающих протонов с квазидейтронными группами внутри ядер лития. Вверху справа приведен импульсный спектр дейтронов от упругих $(p-p)$ -соударений для этого же угла наблюдения и той же энергии падающих протонов.

Рис.11. Энергетическая зависимость полных сечений взаимодействия нуклонов с нуклонами и дейтронами, а также полных сечений упругого $(p-p)$ и $(p-d)$ -рассеяния.

Рис.12. Полные сечения взаимодействия π^+ и π^- -мезонов с водородом и дейтерием. "Резонансное" поведение сечения вблизи 190 Мэв характеризует мезон-нуклонное взаимодействие в состоянии с изотопическим спином $3/2$ и полным угловым моментом $3/2$. При энергии $E_\pi > 300$ Мэв вклад в рассеяние состояния с изотопическим спином $1/2$ становится заметным.

Рис.13. Угловое распределение π^+ -мезонов, упруго рассеянных на водороде при различных энергиях. Из рисунка видно, что угловое распределение является симметричным по отношению 90° вблизи "резонансной" энергии (190 Мэв). При энергии больше "резонансной" преобладает рассеяние вперед.

Рис.14. Рассеяние π -мезонов на водороде при энергии 307 Мэв в процессах



На основании данных, приведенных на этом рисунке, а также на рисунке 13, можно получить величину константы связи мезон-нуклонного взаимодействия f^2 , которая оказывается равной $\sim 0,1$.

Рис.15. Энергетическая зависимость полных сечений взаимодействия π -мезонов с легкими атомными ядрами ⁽⁶⁴⁾. Кривые напоминают энергетическую зависимость полных сечений взаимодействия π^+ и π^- -мезонов с нуклонами. Анализ показывает ⁽⁶⁵⁾, что взаимодействие π -мезонов в ядре происходит, в основном, с отдельными нуклонами ядра.

Рис.16. Неупругое рассеяние на ядрах углерода и свинца π^- -мезонов с энергией 230 Мэв и 250 Мэв, соответственно ⁽⁶⁹⁾. Анализ результатов показал ⁽⁶⁹⁾, что существует корреляция между сбросом энергии и углом рассеяния π^- -мезона, свидетельствующая о том, что неупругое рассеяние π^- -мезонов в угловой интервал от 60° до 180° происходит преимущественно за счет однократного рассеяния π^- -мезонов отдельными ядерными нуклонами. Пунктирная кривая, представляющая зависимость упругого рассеяния π^+ -мезонов с энергией 240 Мэв на водороде, приведена для сравнения.

Рис.17. Упругое рассеяние π^+ и π^- -мезонов на ядрах гелия. Виден совершенно различный характер поведения дифференциальных сечений упругого рассеяния в области малых углов, который связан с разными знаками интерференции кулоновского и ядерного взаимодействия для π^+ и π^- -мезонов.

Рис.18. Энергетическая зависимость полного сечения реакции $p+p \rightarrow \pi^+d$. E_π - кинетическая энергия рожденного мезона в с.д.м. Обращает на себя внимание максимум, который связан с сильным "резонансным" взаимодействием мезона с нуклоном в состоянии с изотопическим спином $3/2$ и полным угловым моментом $3/2$.

Рис.19. Угловое распределение π^- -мезонов, испускаемых в реакциях $p+p \rightarrow \pi^+d$ и $n+p \rightarrow \pi^0d$ при энергиях налетающих протонов 650 Мэв и нейтронов 600 Мэв. Данные для второй реакции приведены в относительных единицах. Одинаковое поведение дифференциальных сечений для обеих реакций является следствием принципа зарядовой независимости процессов (сильного) взаимодействия элементарных частиц и поэтому подтверждает этот принцип.

Рис.20. Угловое распределение π^+ -мезонов от реакции $p+p \rightarrow \pi^+p+n$ при энергии протонов 657 Мэв.

Рис.21. Энергетическая зависимость полных сечений образования π^0 -мезонов в (p-p) и (p-n)-соударениях. E_p - энергия протонов, P_{max} - максимальный импульс π^0 -мезонов в с.д.м. в единицах μc . Как видно из рисунка, $\sigma_{pp}^{\pi^0}$ растет с энергией протонов значительно быстрее, чем $\sigma_{pn}^{\pi^0}$, что связано с наличием "запрета" образования π^0 -мезонов в (p-p)-соударениях вблизи порога.

Рис.22. Угловое распределение γ -квантов от распада π^0 -мезонов, образованных на углероде протонами с энергией 660 Мэв. $\theta_{\text{эфф}}$ -эффективный угол в с.с.м. сталкивающихся нуклонов. Уменьшение интенсивности испускания γ -квантов под малыми углами обусловлено тем, что ядро является "толстым" поглотителем как для π^0 -мезонов, так и для налетающих нуклонов.

Рис.23. Энергетический спектр γ -квантов под углом наблюдения 0° от распада π^0 -мезонов, образованных в (p-p)-столкновениях при энергиях протонов 660 Мэв. Этот спектр характеризует как угловое распределение, так и энергетические распределения π^0 -мезонов, которые, благодаря их очень малому времени жизни ($\tau < 10^{-15}$ сек) прямым путем наблюдать невозможно.

Рис.24. Энергетический спектр γ -квантов от распада π^0 -мезонов, образованных протонами с энергией 660 Мэв на ядрах углерода.

а) Угол наблюдения 0° .

б) Угол наблюдения 180° .

Максимум энергии спектра около 600 Мэв обусловлен теми из лобовых столкновений, которые соответствуют случаям, когда один из двух γ -квантов от распада π^0 -мезонов получает практически всю энергию.

Рис.25. Импульсный спектр вторичных частиц от (p-p)-соударений в лабораторной системе координат. Спектр отражает наличие следующих реакций:

а) упругое (p-p)-рассеяние (пик протонов при 4260 к.гаусс.см);

б) реакция $p + p \rightarrow \pi^+ + d$, приводящая к испусканию двух групп дейтронов с импульсами 2880 и 4520 к.гаусс.см;

в) реакции $p + p \rightarrow \pi^+ + p + n$ и $p + p \rightarrow \pi^0 + p + p$, которым соответствует непрерывный спектр протонов.

Рис.26. Энергетический спектр π^+ -мезонов от реакций $p + p \rightarrow \pi^+ + p + n$ (1) и $p + p \rightarrow \pi^+ + d$ (2) под углами 24° , 29° и 46° в лабораторной системе при энергии налетающих протонов 660 Мэв. Пик в спектре обусловлен двухчастичной реакцией (2).

Рис. 27. Энергетические распределения π^+ и π^- -мезонов, образованных протонами с энергией 660 Мэв на ядрах углерода под углом 24° к направлению налетающего протонного пучка (100). Наблюдаемое малое количество π^- -мезонов связано с тем, что π^+ -мезоны могут рождаться в ядре в (p-p) и (p-p)-столкновениях в то время, как π^- -мезоны могут рождаться только в (p-p)-столкновениях, которые являются относительно неэффективными для образования заряженных мезонов.

Рис. 28. Спектр π^+ и π^- -мезонов, образованных нейтронами с энергией 600 Мэв на водороде. Угол наблюдения 90° . Данные показывают равенство (в пределах ошибок) выходов π^+ и π^- -мезонов, что подтверждает принцип зарядовой симметрии.

Рис. 29. Сечение рождения заряженных мезонов на водороде π^- -мезонами вблизи порога в реакциях $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + \pi^- + p$ и $\pi^- + p \rightarrow \pi^+ + \pi^- + n$ (104). Расчетный порог для реакции образования мезонов мезонами на водороде приблизительно равен 170 Мэв. Сплошная кривая - результат расчета Франклина на основании теории Чью и Лоу.

Рис. 30. Измерительный павильон с расположенными на пучках частиц экспериментальными установками.

Рис. 31. Типичная схема опытов по изучению рассеяния заряженных π -мезонов высоких энергий протонами.

Рис. 32. Экспериментальная установка для исследования рассеяния протонов высоких энергий протонами и нейтронами. Система телескопов из сцинтилляционных счетчиков регистрирует обе вторичные частицы.

Рис. 33. Годоскопическая система счетчиков используется в опытах по изучению рассеяния π^- -мезонов высоких энергий на водороде. Система управляющих счетчиков охватывает телесный угол два стерadiana. Разрешающее время системы $2 \cdot 10^{-6}$ сек. Импульсное питание позволяет использовать обычные газоразрядные счетчики для регистрации частиц высоких энергий в условиях большого фона посторонних излучений, создаваемого мощным ускорителем.

Рис. 34. Установка с диффузионной камерой высокого давления в магнитном поле; используется для изучения взаимодействия протонных высоких энергий с протонами и ядрами гелия. Камера диаметром 300мм наполняется водородом или гелием при давлении 20 атм. В рабочем объеме камеры создается импульсное поле напряженностью 16000 эрстед. Слева видна часть ярма отклоняющего электромагнита.

Рис. 35. Пузырьковая камера объемом четыре литра с протонным наполнением; предназначена для эффективной регистрации процессов взаимодействия и распада элементарных частиц.

Рис. 36. Установка с камерой Вильсона в магнитном поле применяется для исследования взаимодействия Π -мезона высоких энергий с атомными ядрами. Рабочие размеры камеры: диаметр 400мм, высота 100мм. Напряженность импульсного магнитного поля составляет 13500 эрстед. Сзади виден отклоняющий электромагнит.

Рис. 37. Общий вид установки для исследования неупругих столкновений поляризованных протонов с протонами. Регистрация вторичных частиц осуществляется телескопами из сцинтилляционных счетчиков большого размера. Водородно-дейтериевая мишень (на фотографии окружена коухом) обеспечивает сохранность жидкого водорода в рабочем цилиндре диаметром 3,9 см в течение 50 часов. Для проведения фоточувствительных измерений жидкий водород может удаляться из рабочего цилиндра в специальный резервуар, а затем без потерь перекачиваться обратно.

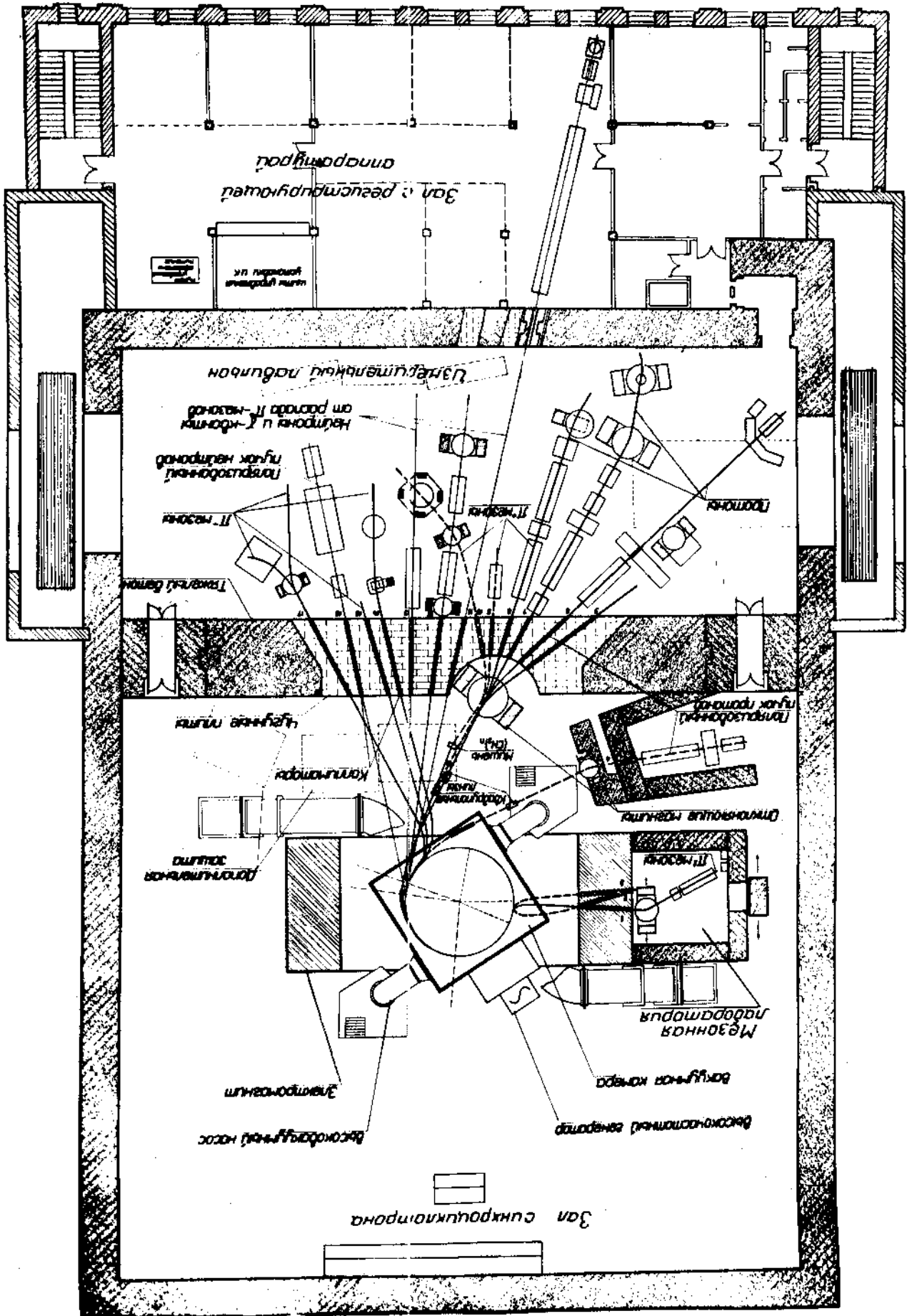
Рис. 38. Магнитный спектрометр. Применяется в опытах по исследованию реакции $n+p \rightarrow \pi^0+d$. Установка регистрирует одновременно оба продукта реакции: дейтрон детектируется пропорциональными счетчиками с одновременным анализом по импульсу в магнитном поле, π^0 -мезон регистрируется по γ -квантам распада с помощью телескопов из сцинтилляционных счетчиков.

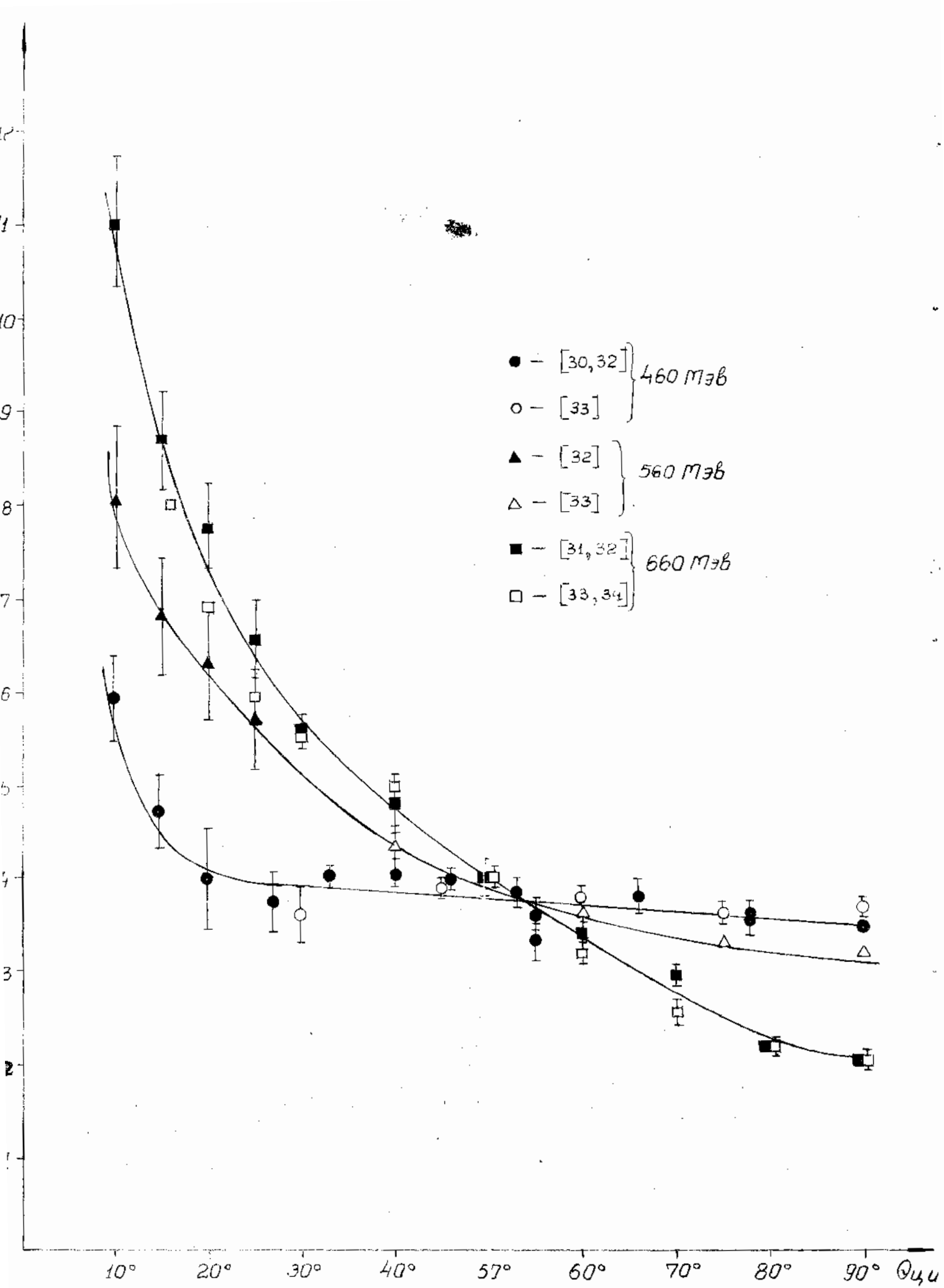
Рис. 39. Пузырьковая жидководородная камера объемом один литр с системой управления (Теплотехническая Лаборатория АН СССР). Применяется для исследования процессов взаимодействия частиц высоких энергий с водородом.

Рис. 40. Трехсекционная магнитная линза для фокусировки пучка заряженных частиц высоких энергий. Фокусное расстояние линзы для протонов с импульсом 1200 Мэв/с равно 2,5 м, апертура 80 мм, градиент магнитного поля равен 2000 эрс/см.

Рис. 41. Двенадцатиканальный усилитель сигналов, поступающих от сцинтилляционных счетчиков. Усиление каждого канала составляет 40 децибелл, верхняя граница полосы пропускания 140 мГц.

Рис. 42. Репроектор-прибор для определения пространственного расположения следов заряженных частиц по стереофотографиям, полученным с помощью камеры Вильсона, диффузионной и пузырьковой камер. Диаметр экрана 400 мм.





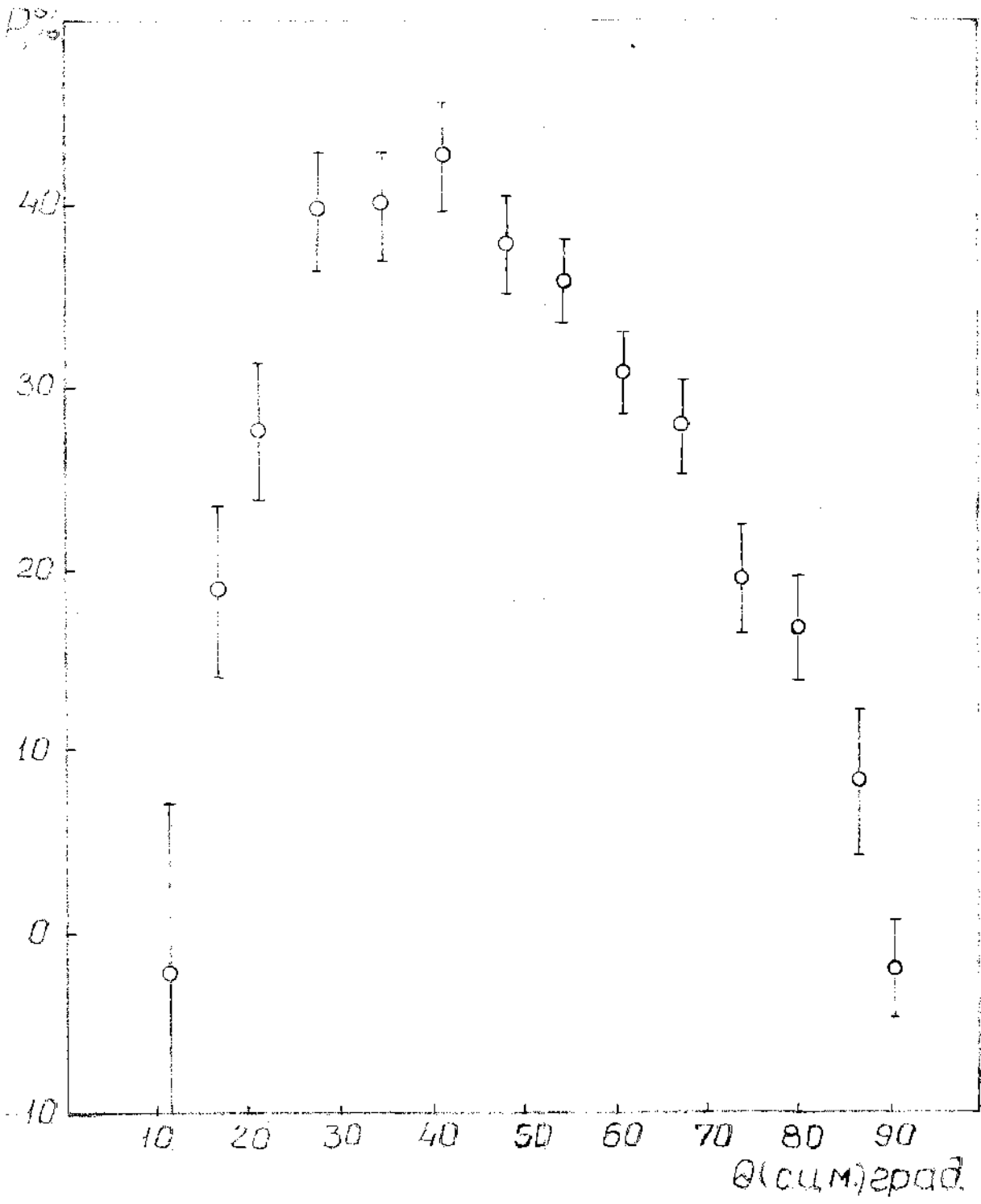


Рис 5

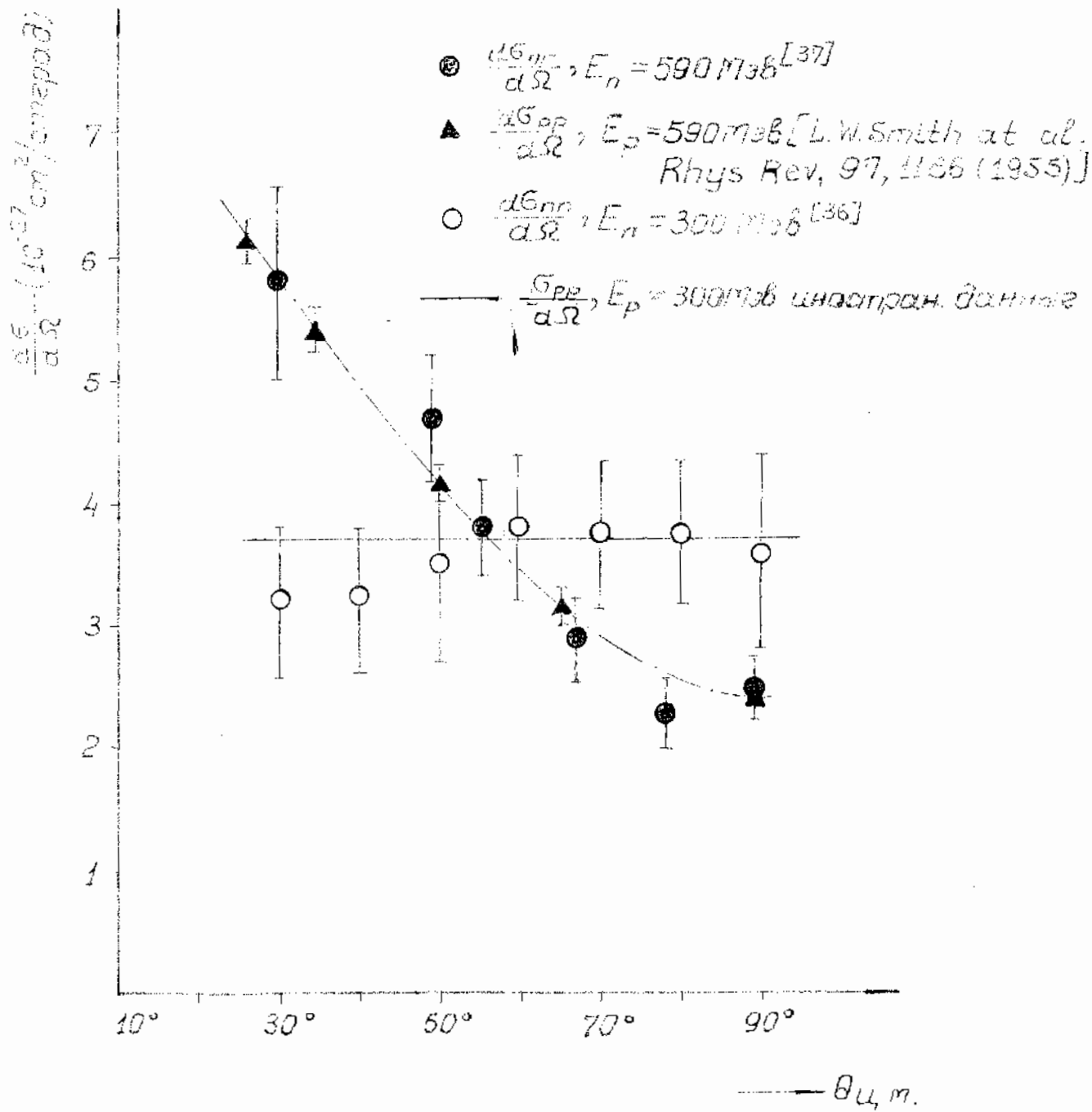


Рис 6.

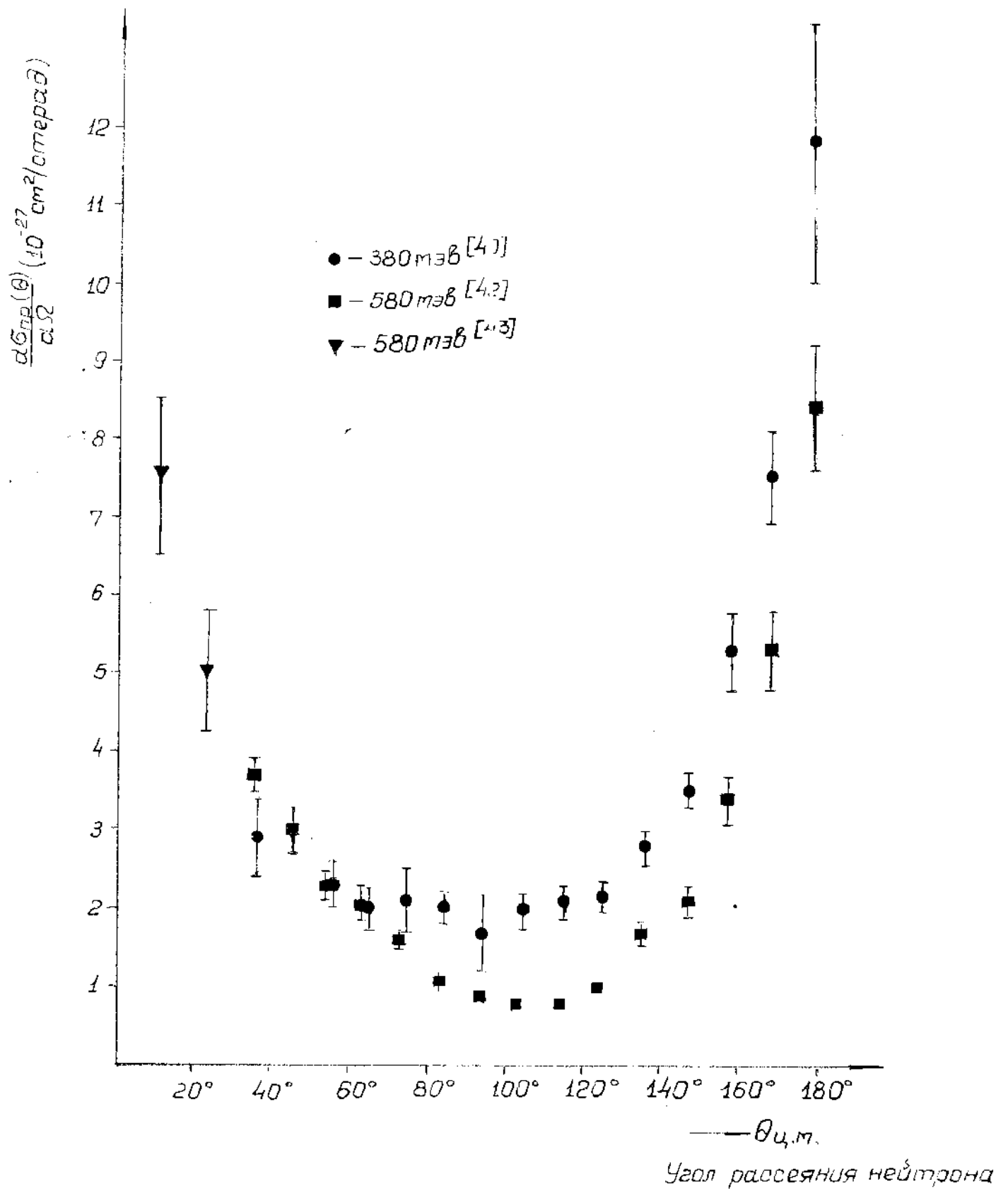


Рис. 7.

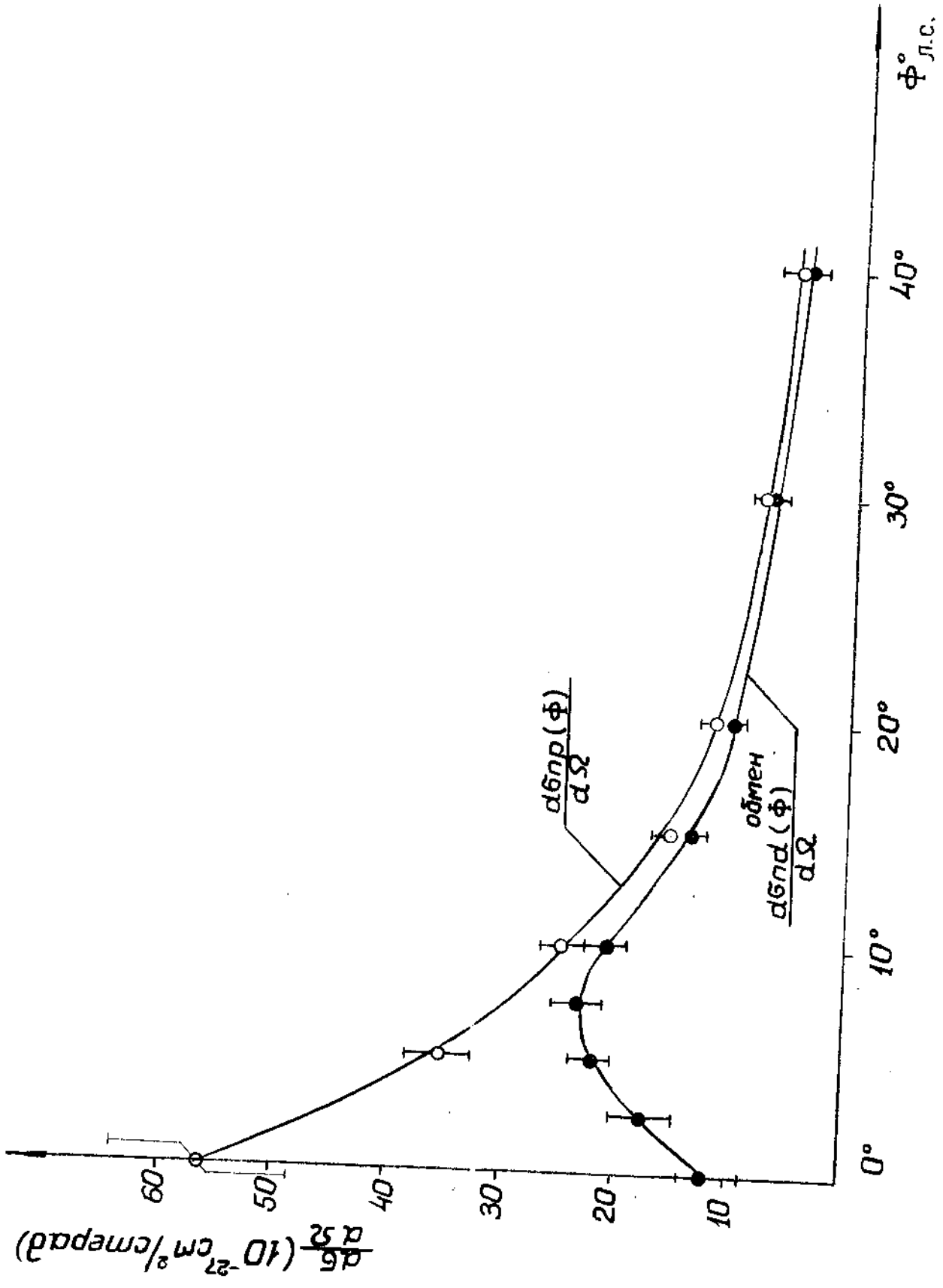


Рис. 8.

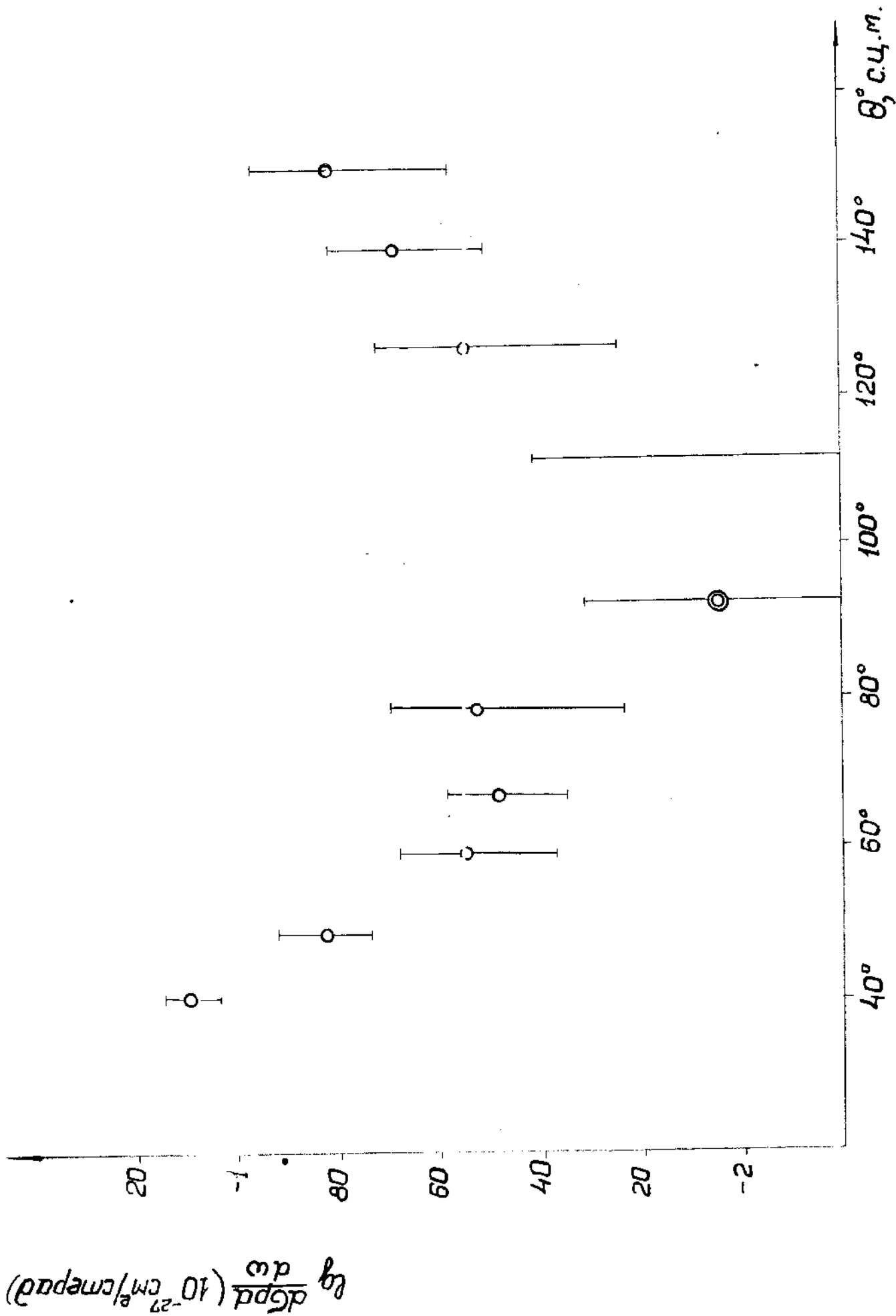


Рис. 9.

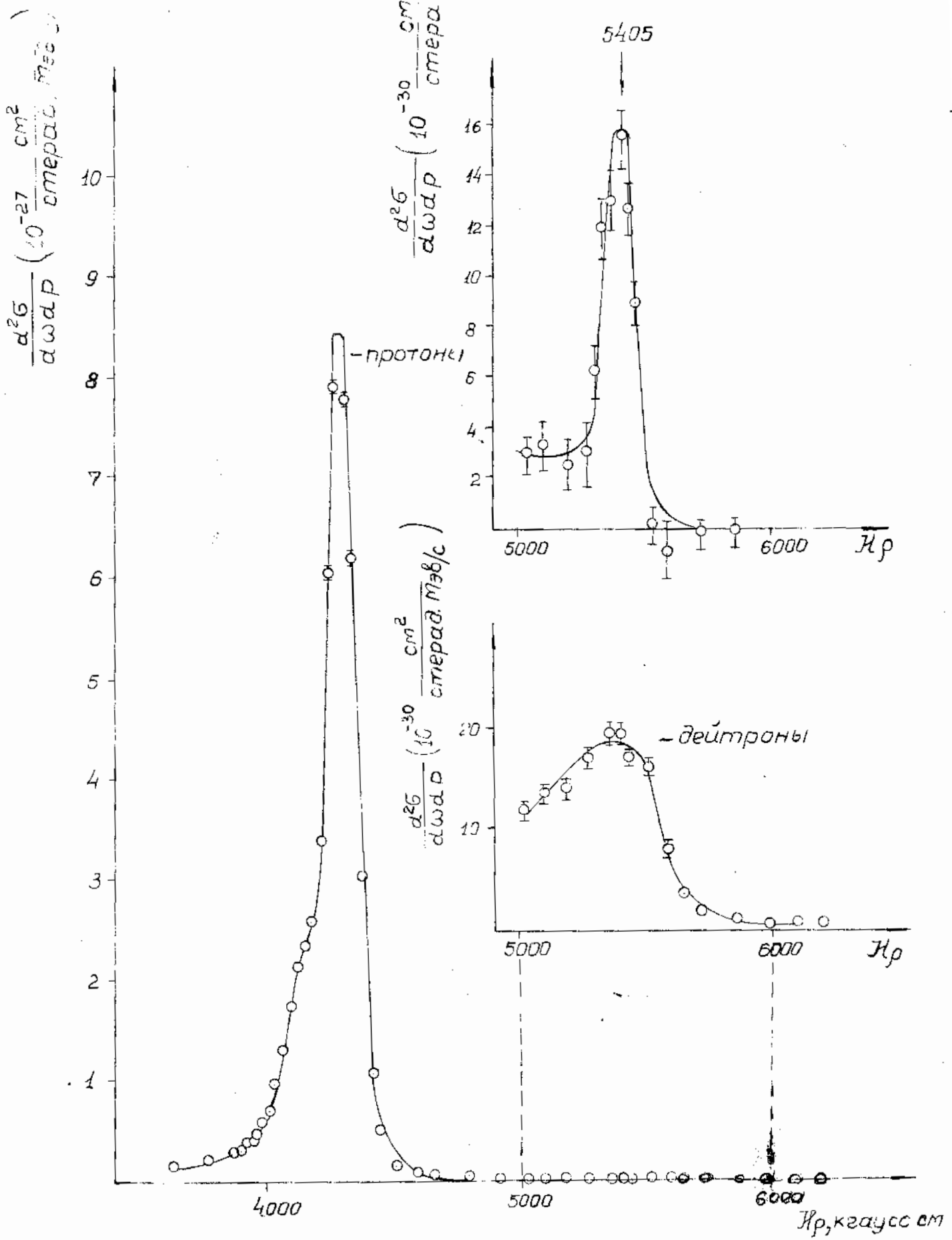


Рис. 10

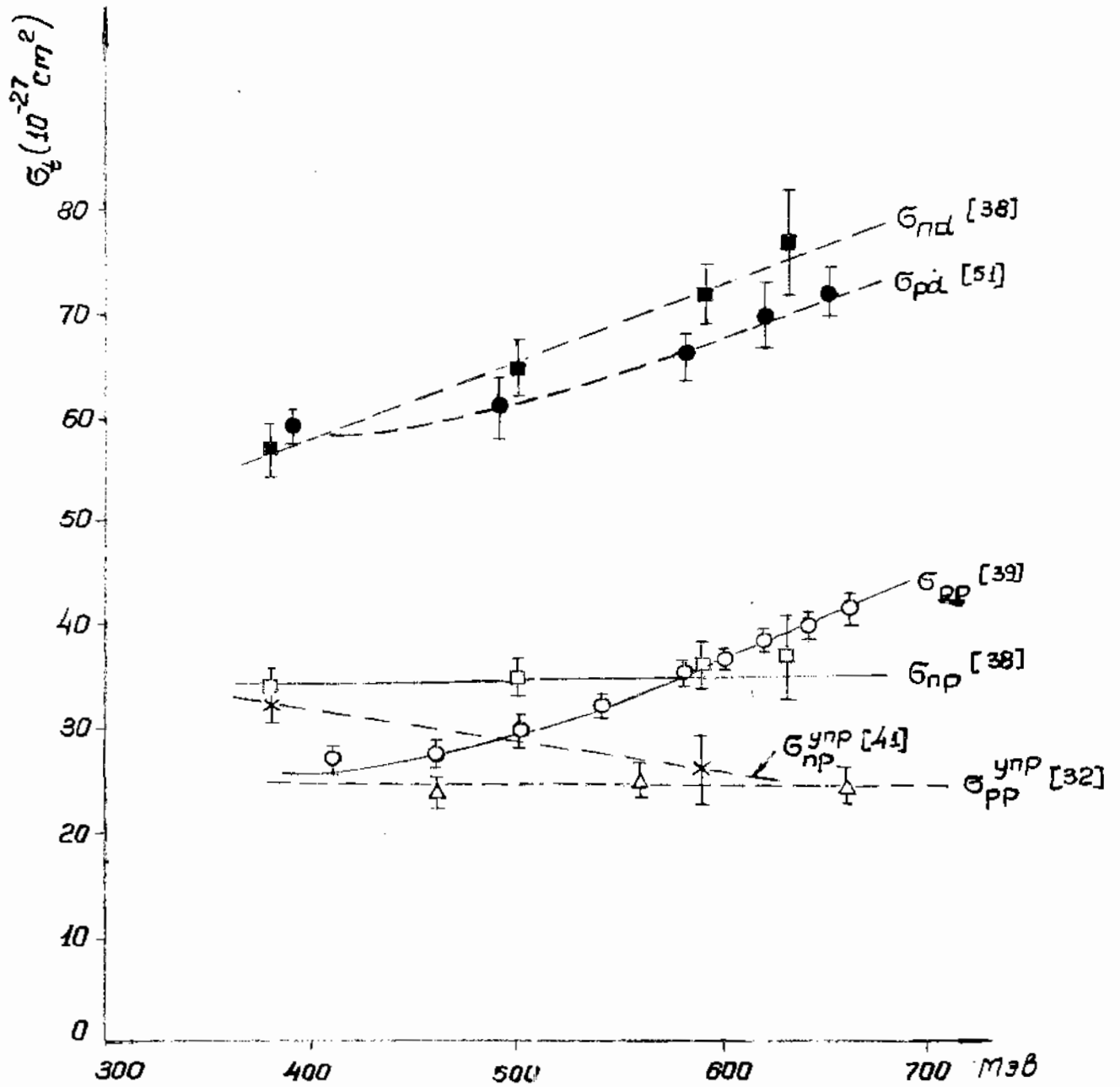


Рис. 11.

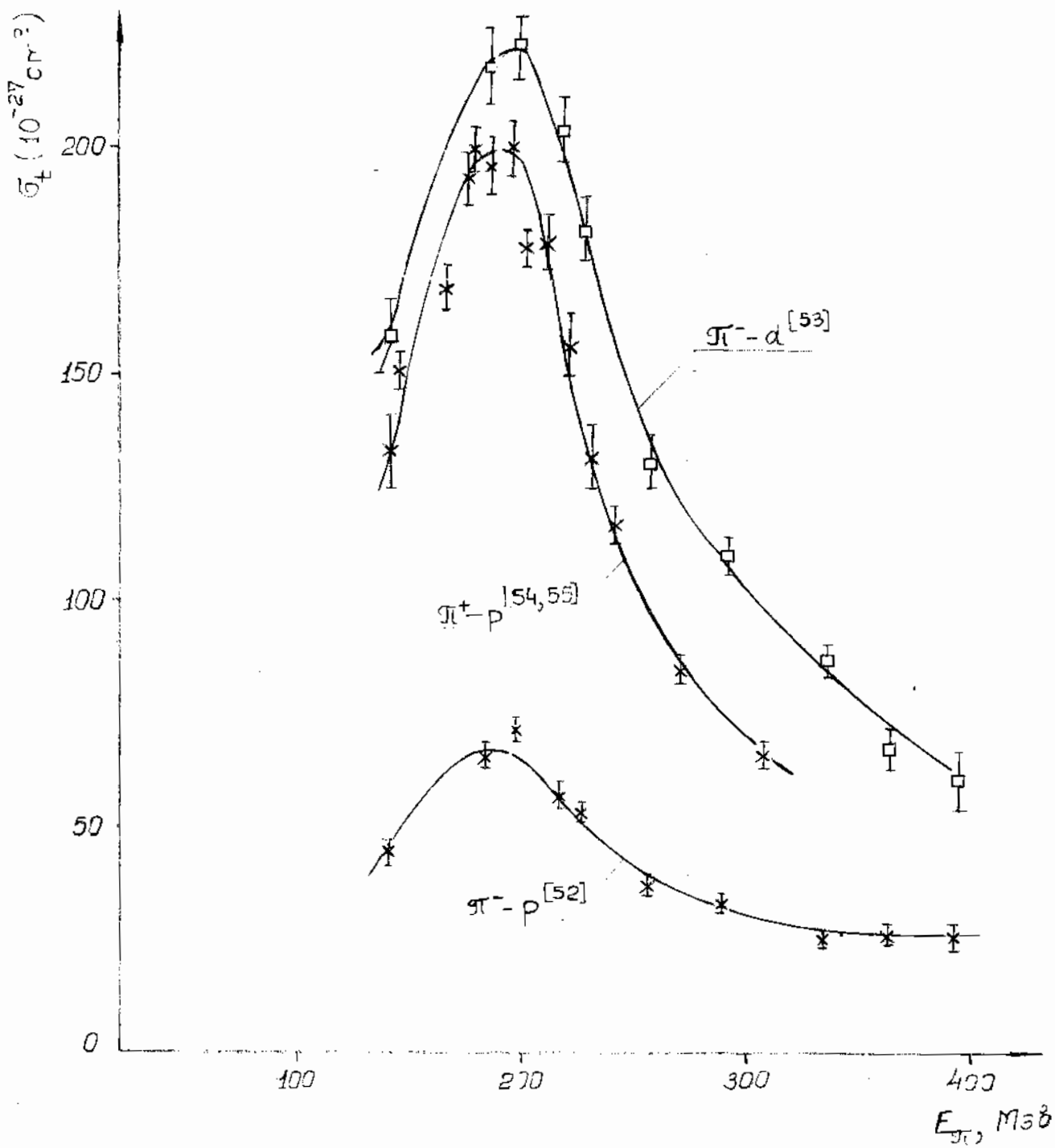
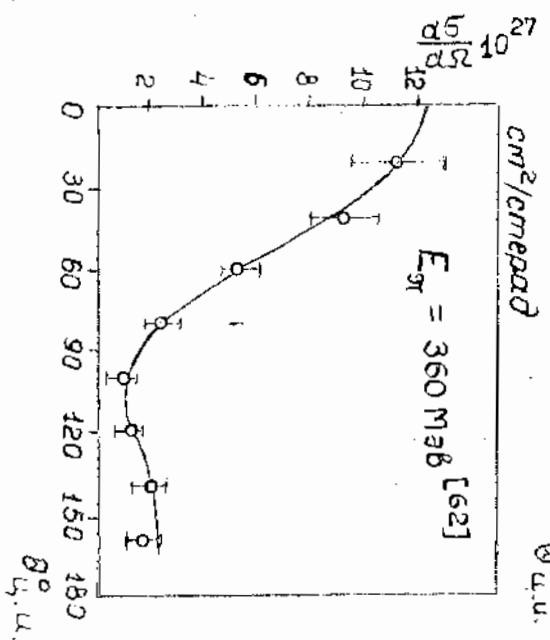
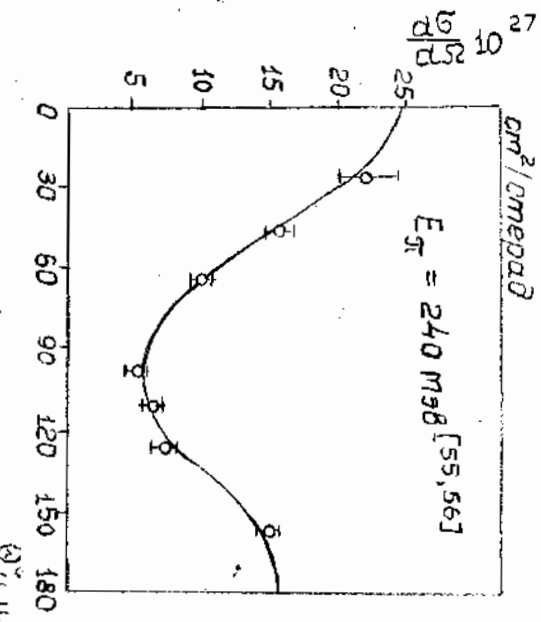
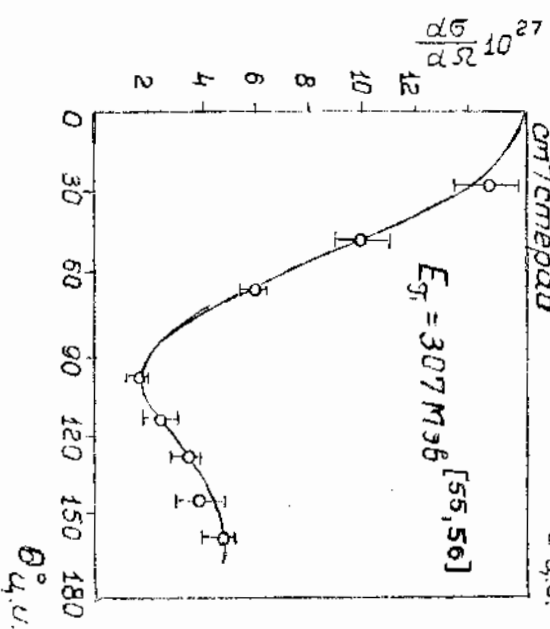
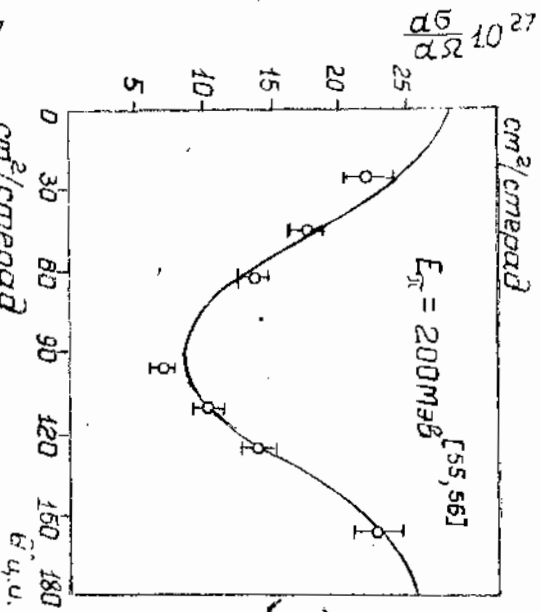
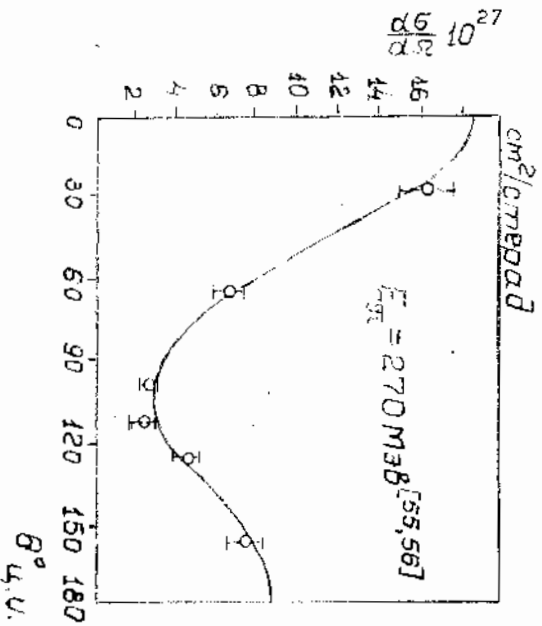
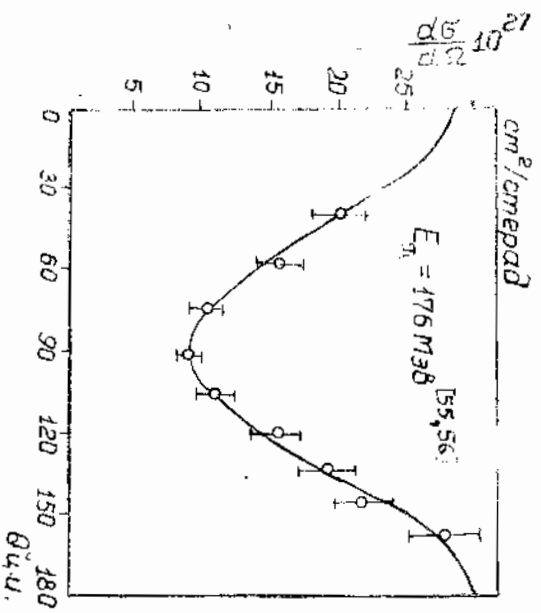


Рис. 12.



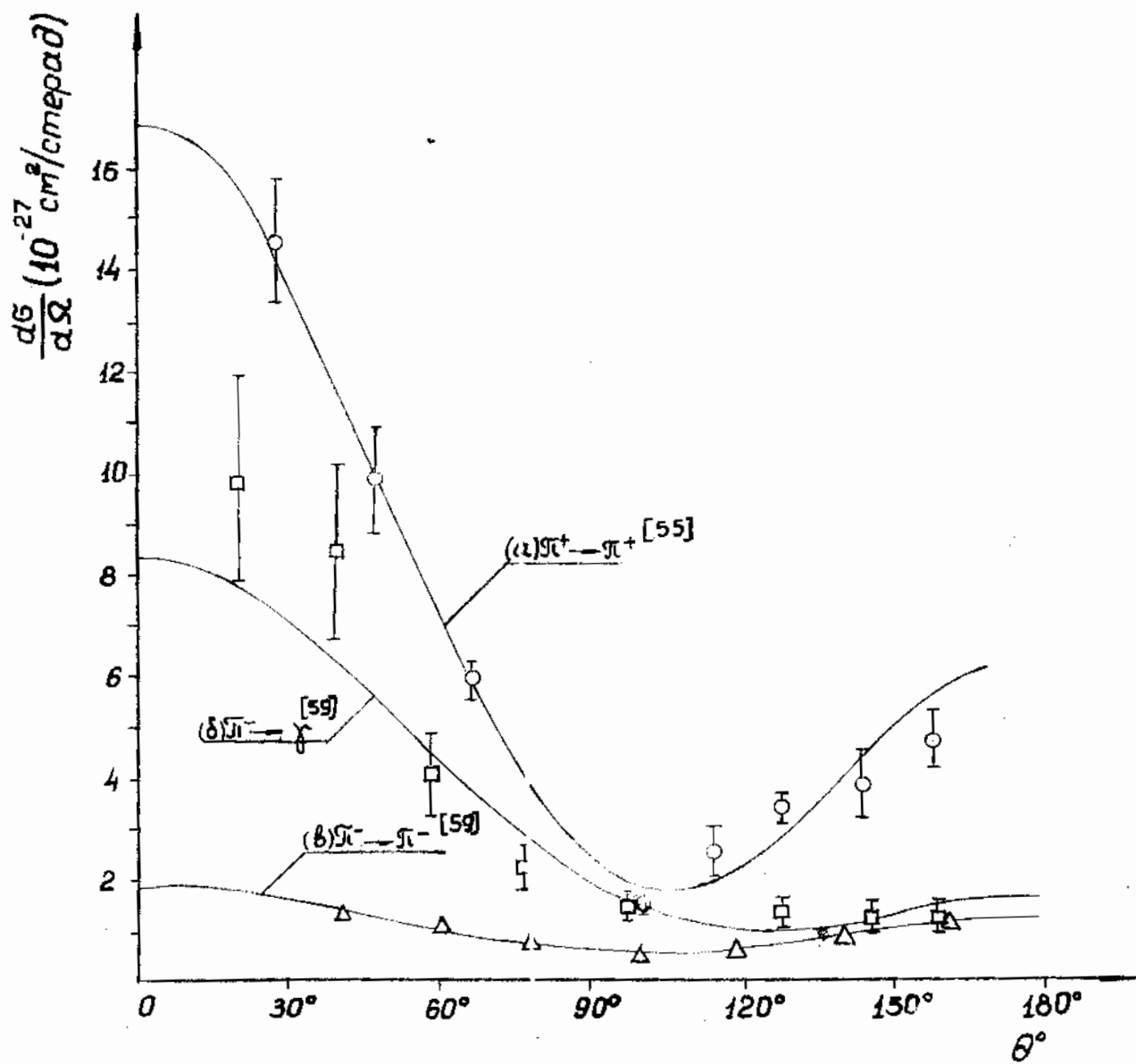


Рис. 14

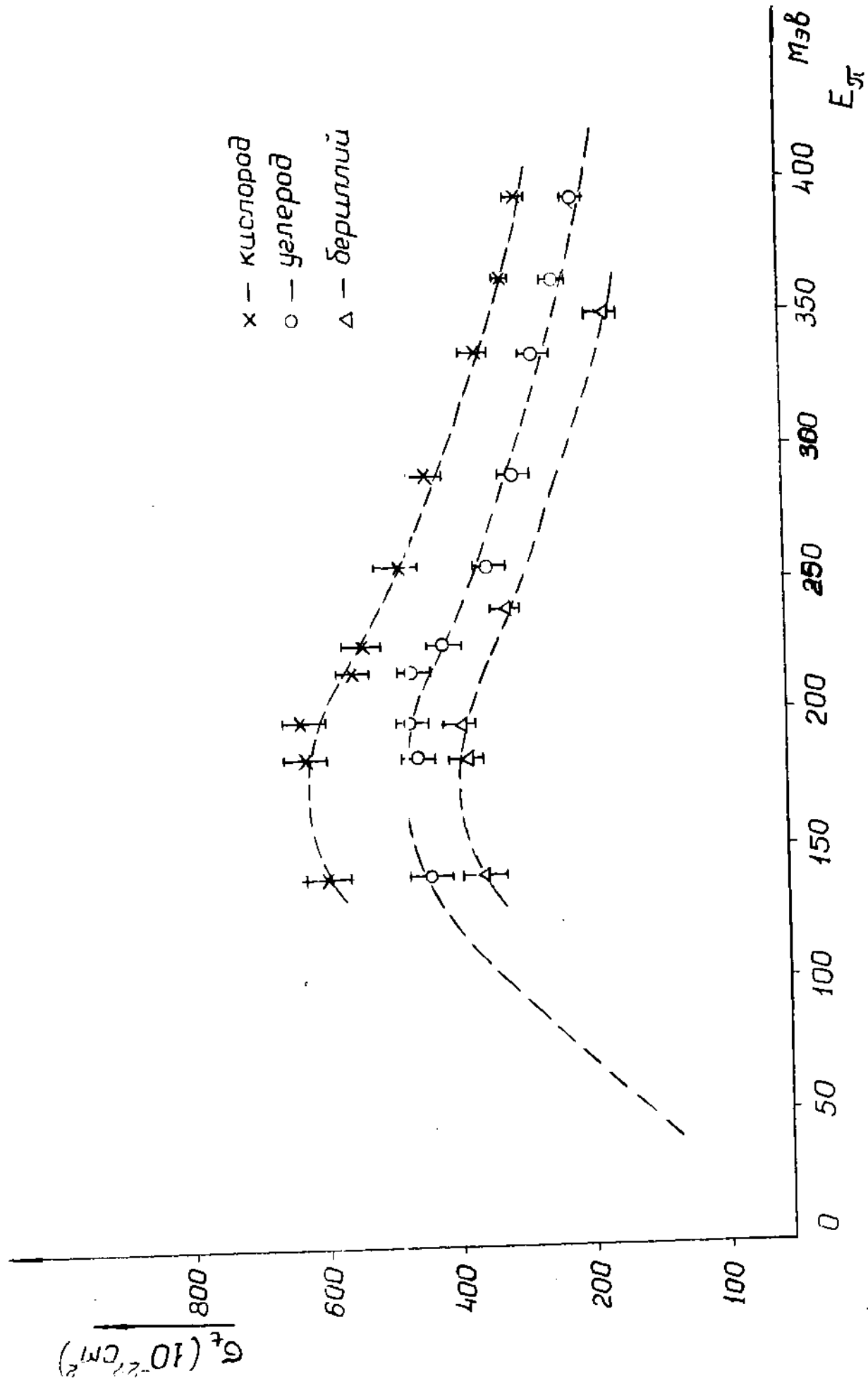


Рис. 15.

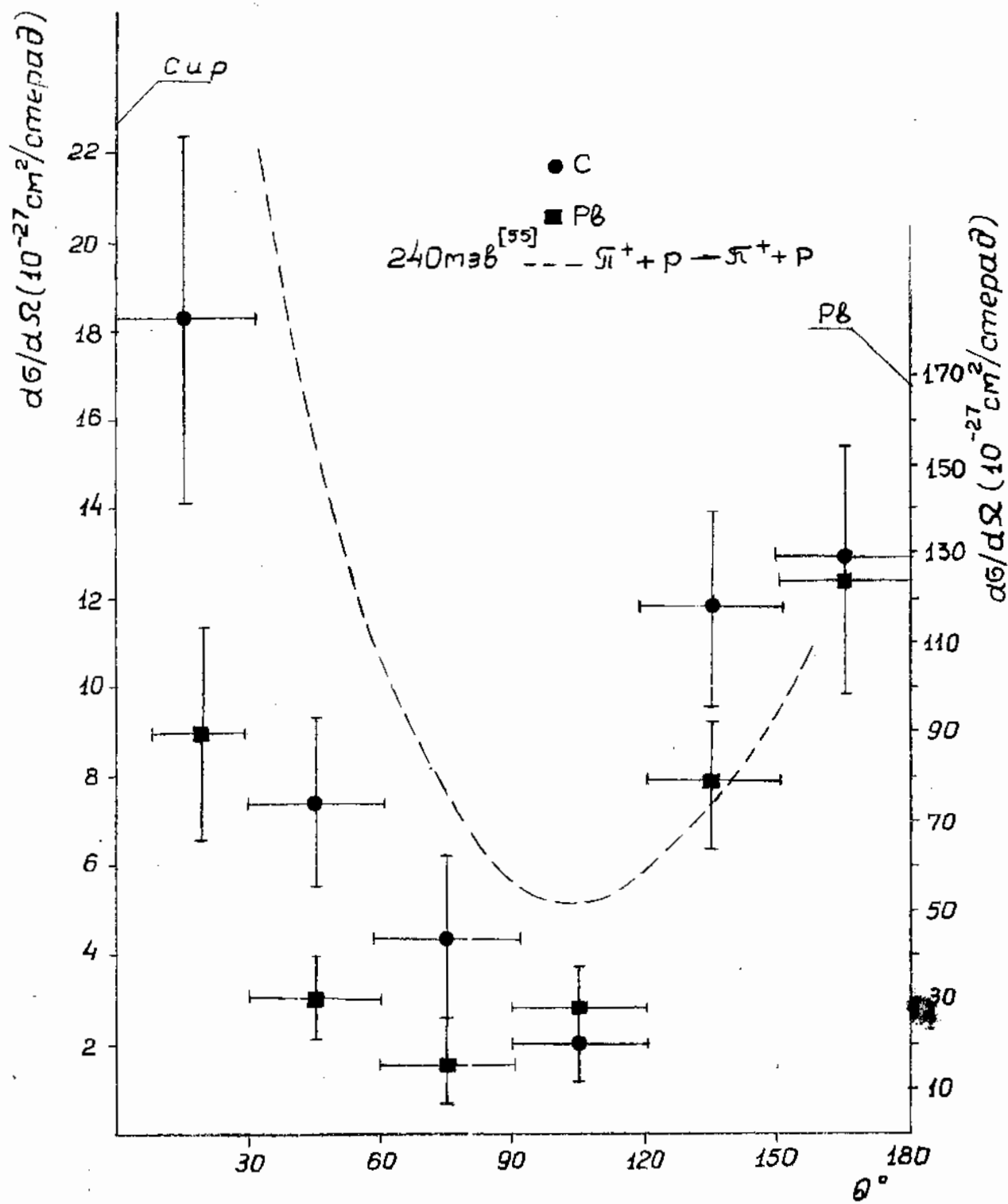
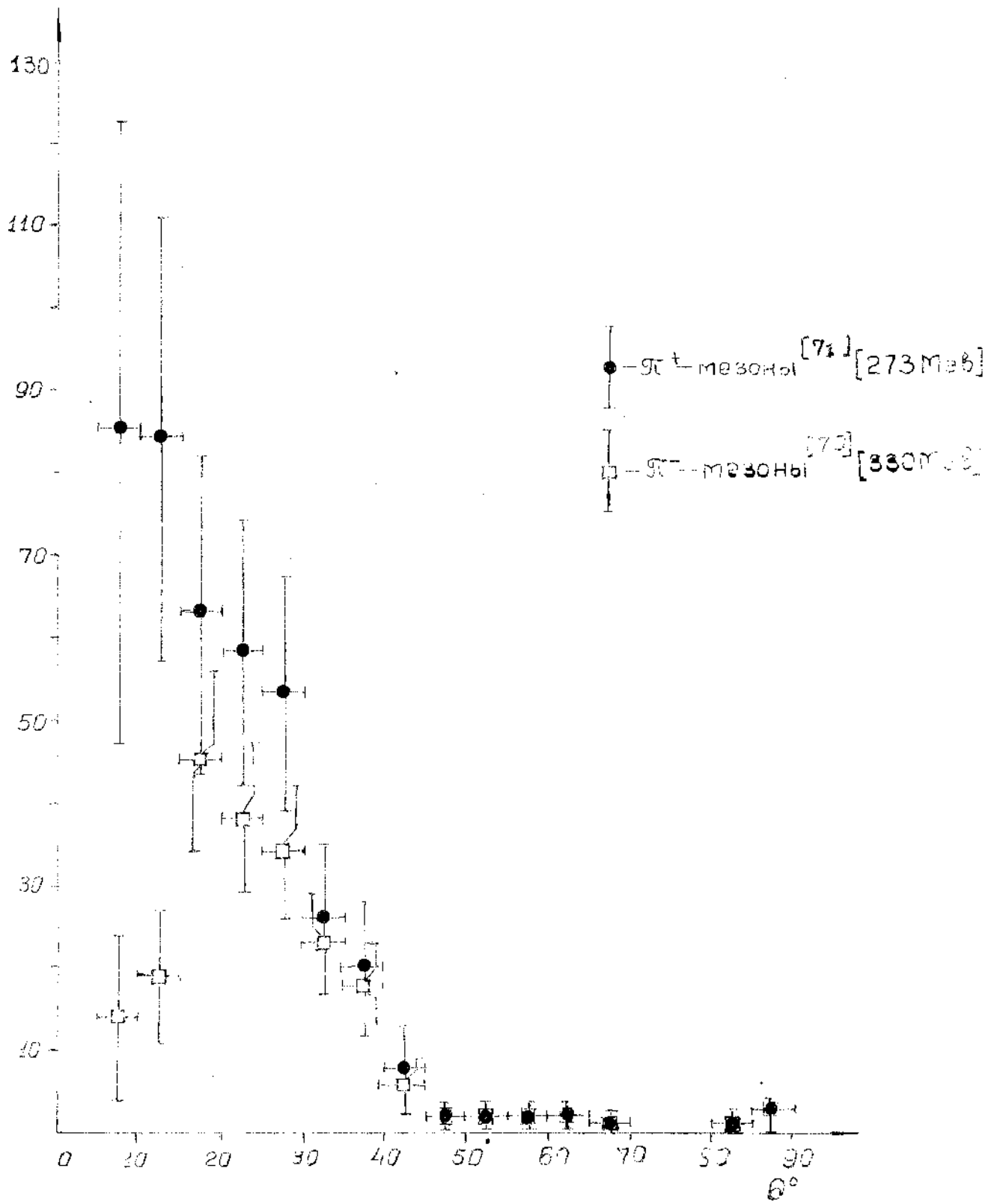


Рис. 16.

$\frac{d\sigma(\pi^+\pi^0)}{d\Omega} \cdot \frac{1}{\Gamma} \cdot \frac{1}{\beta^2}$



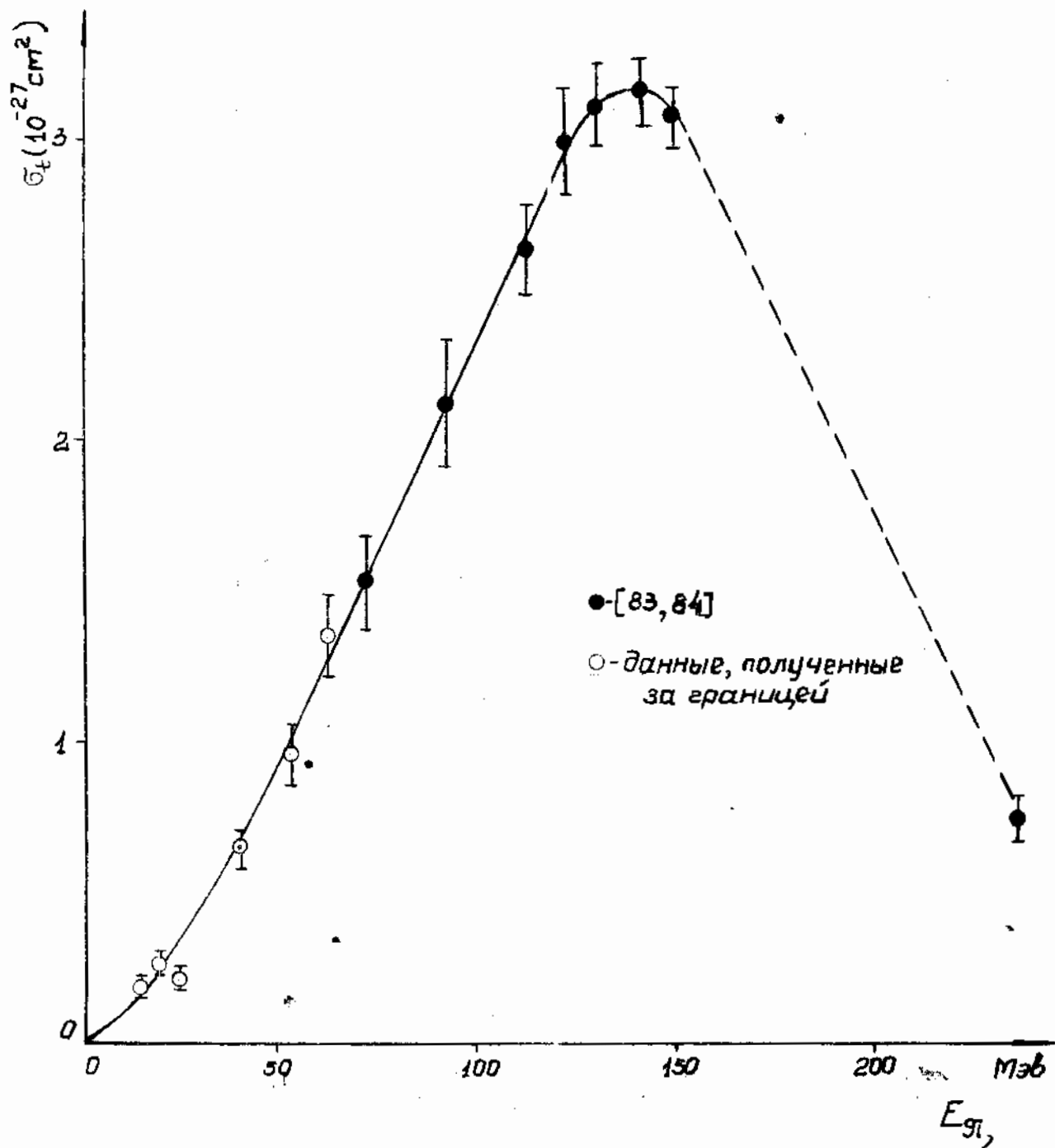
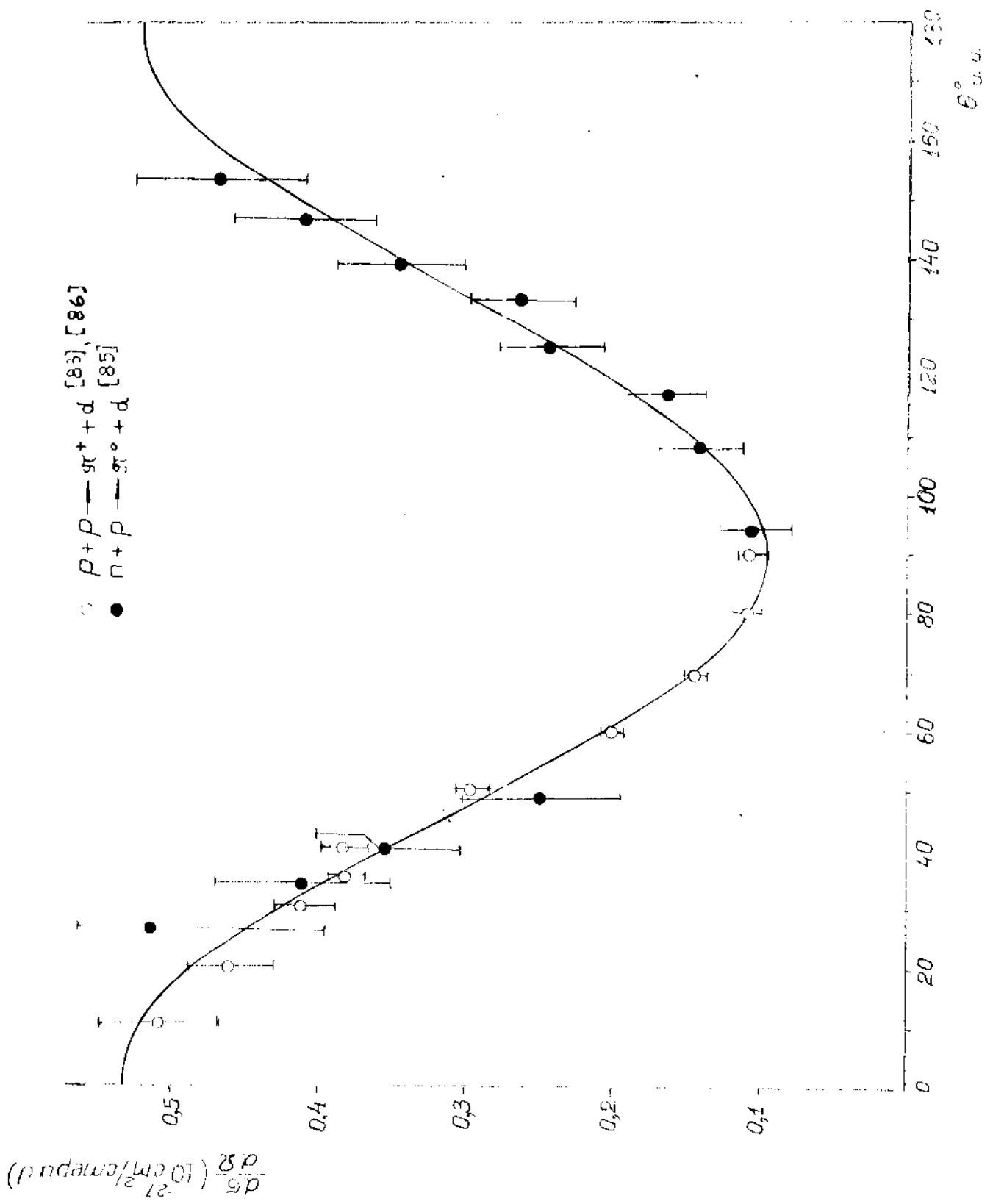


Рис. 18.



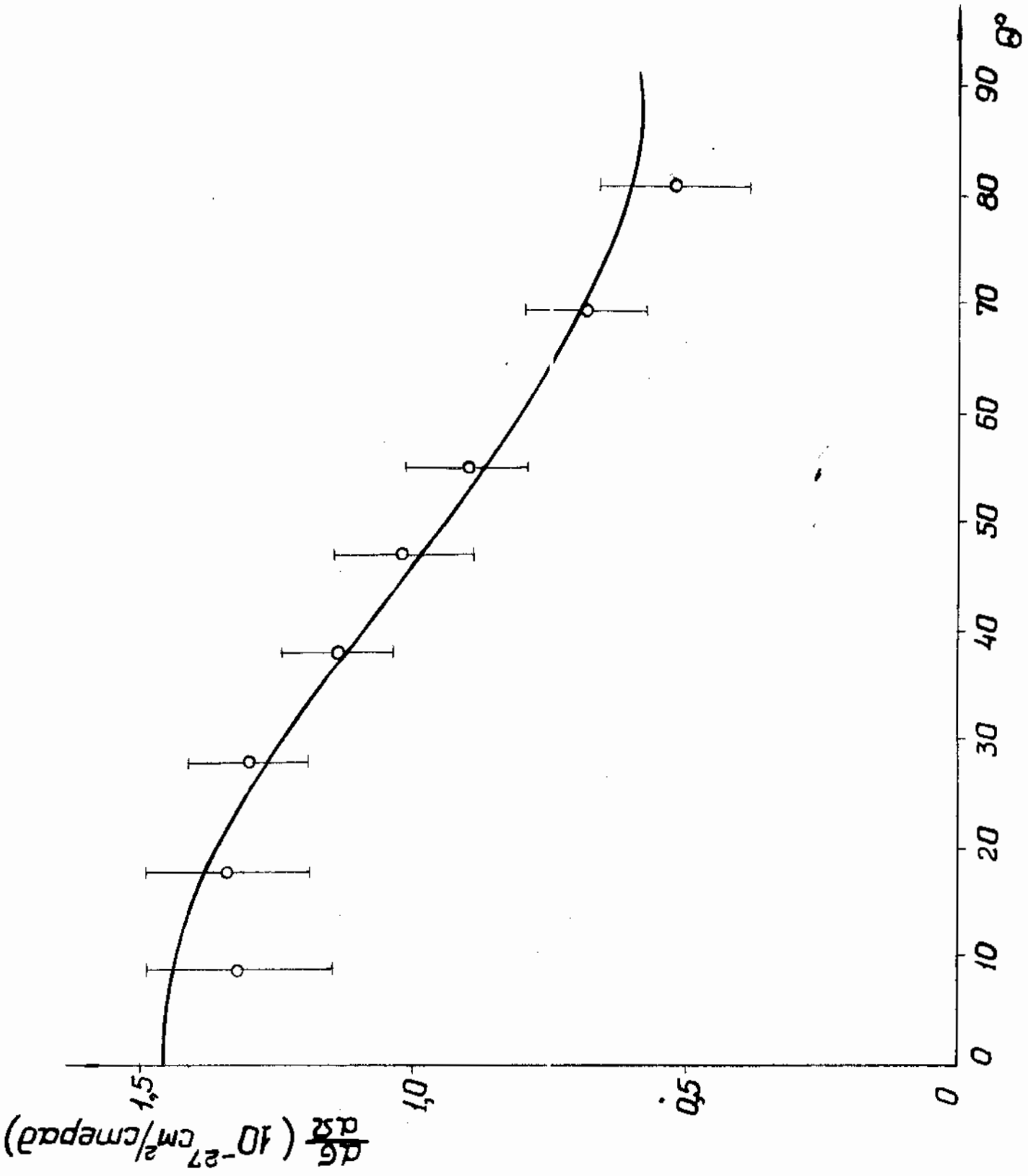


Рис. 20

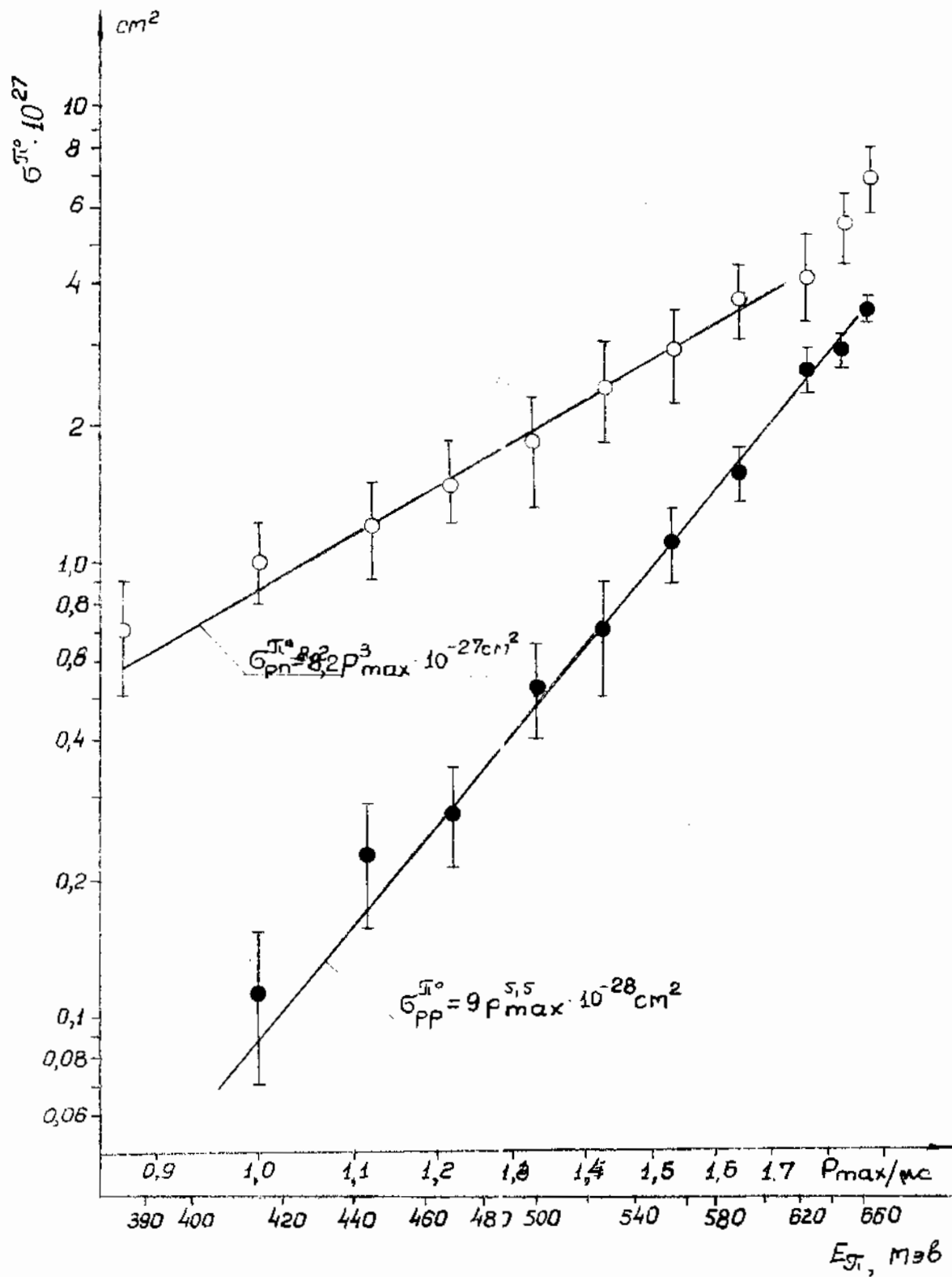


Рис. 21.

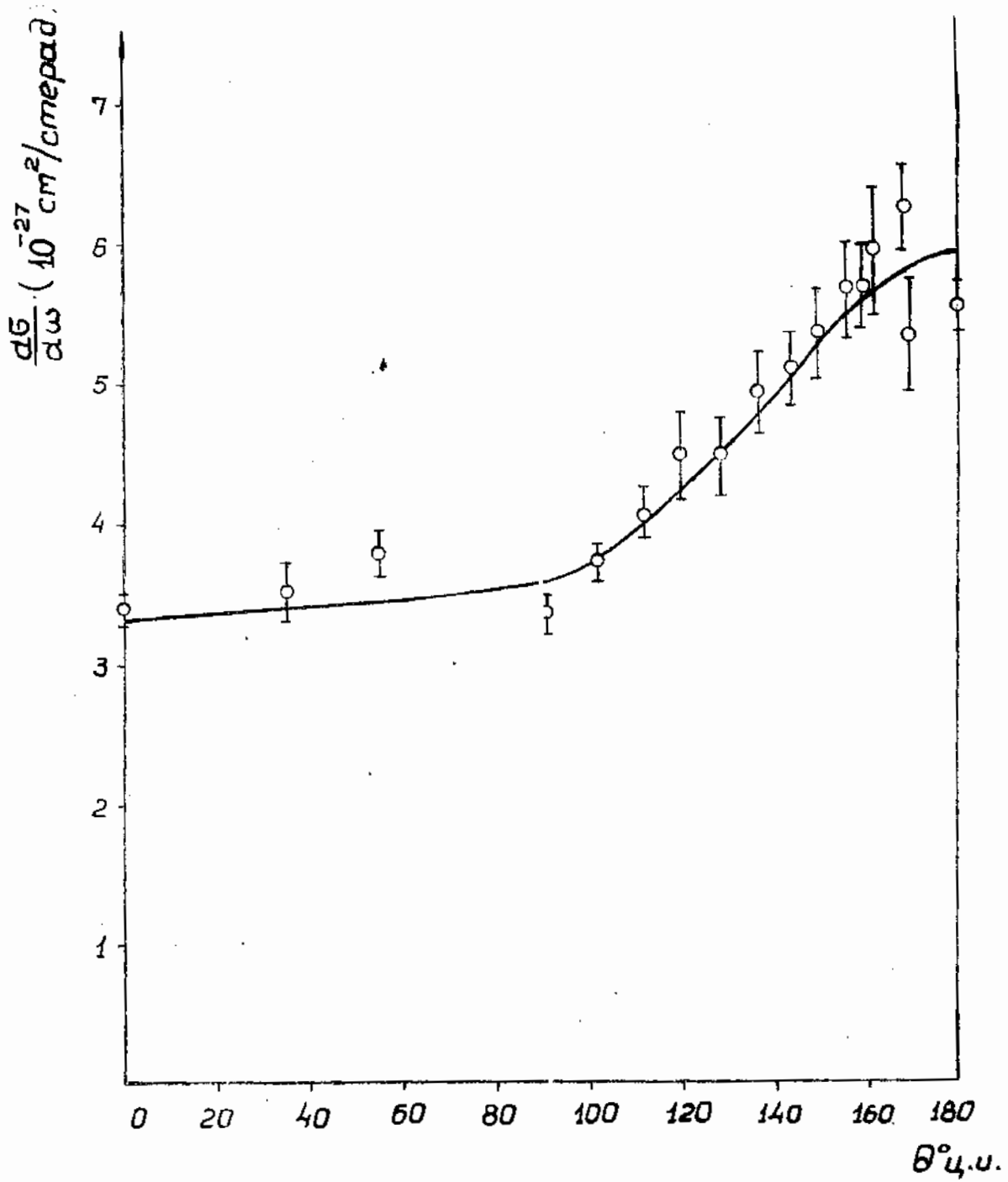


Рис. 22.

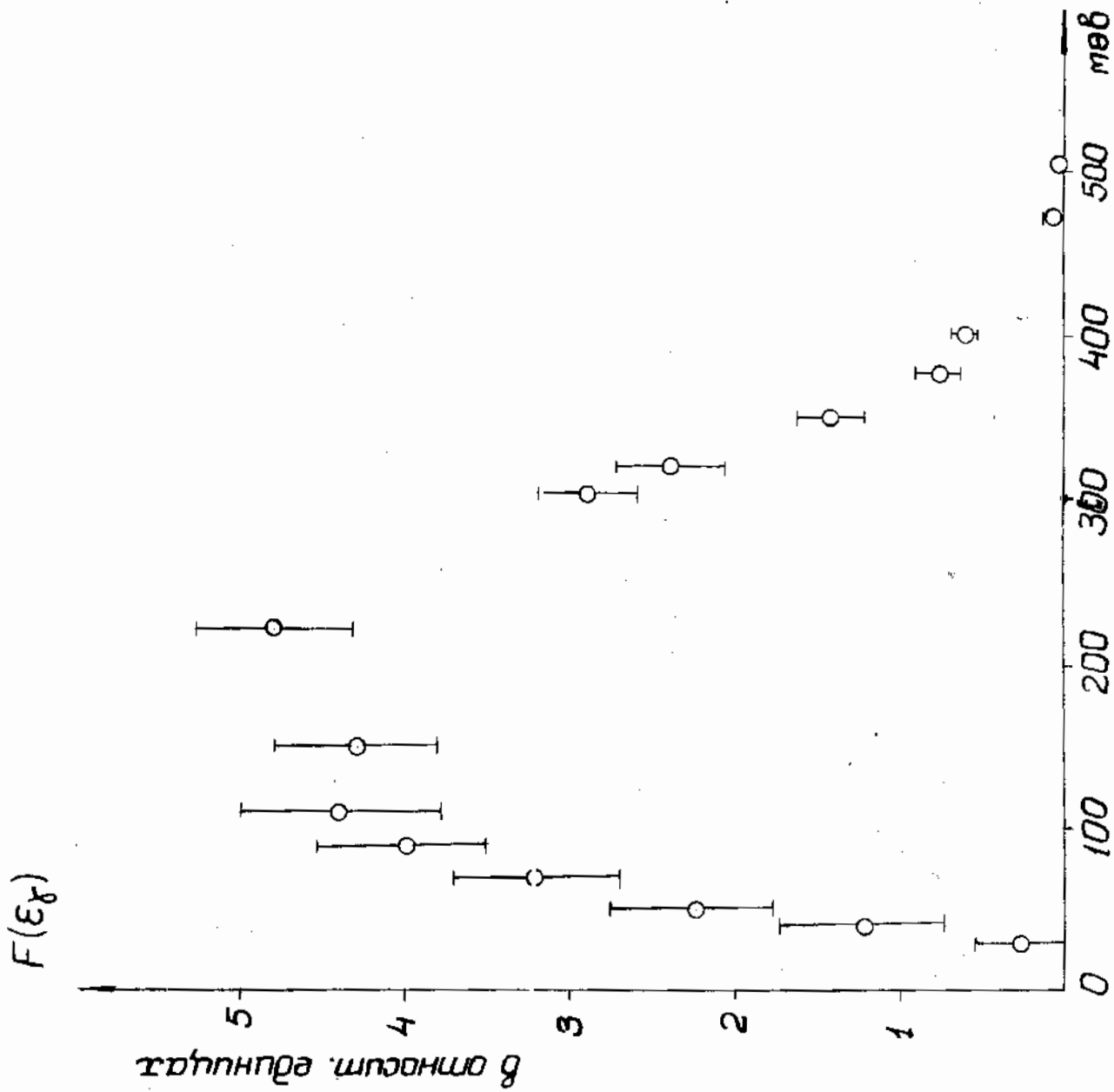
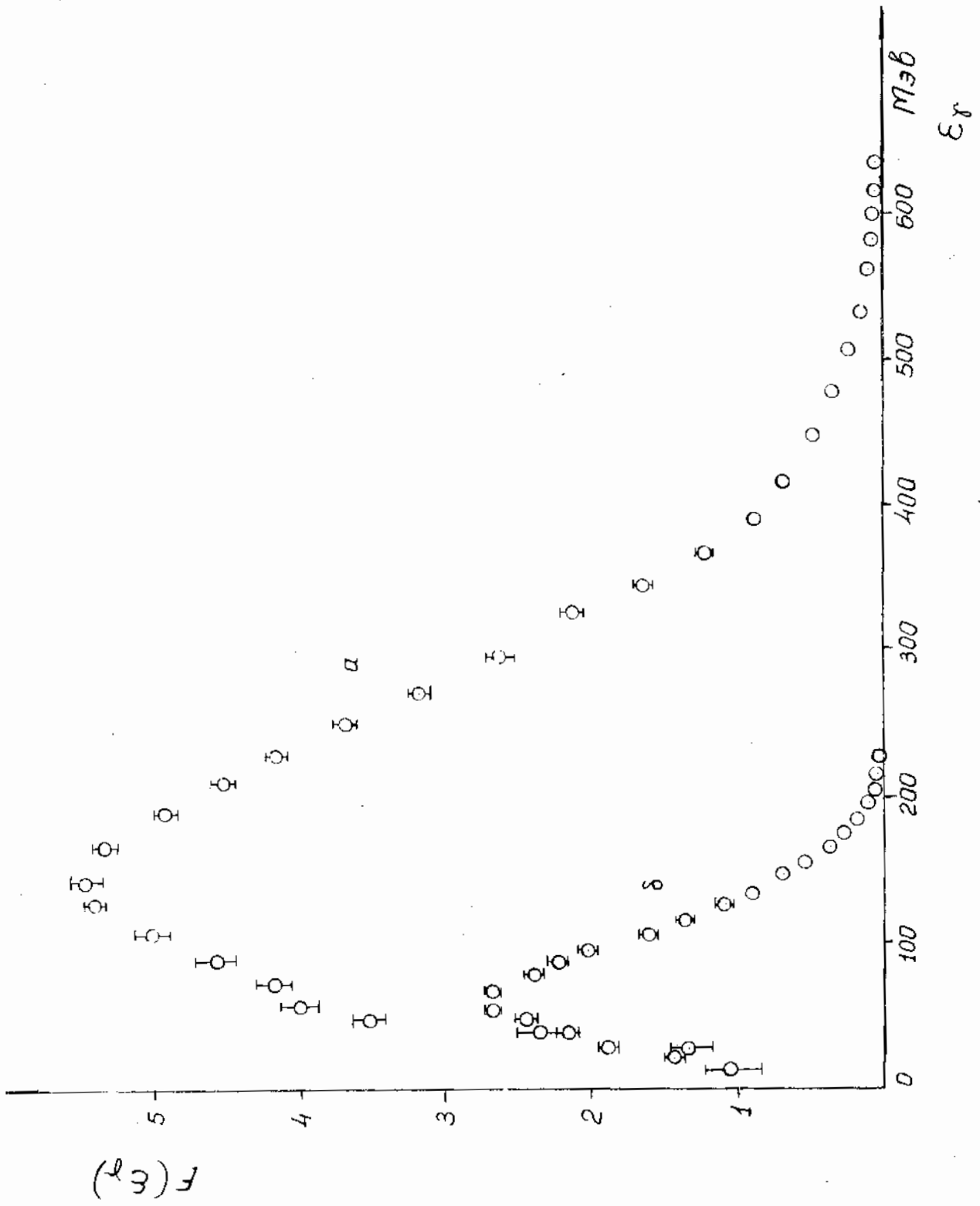


Рис. 23. ϵ_γ



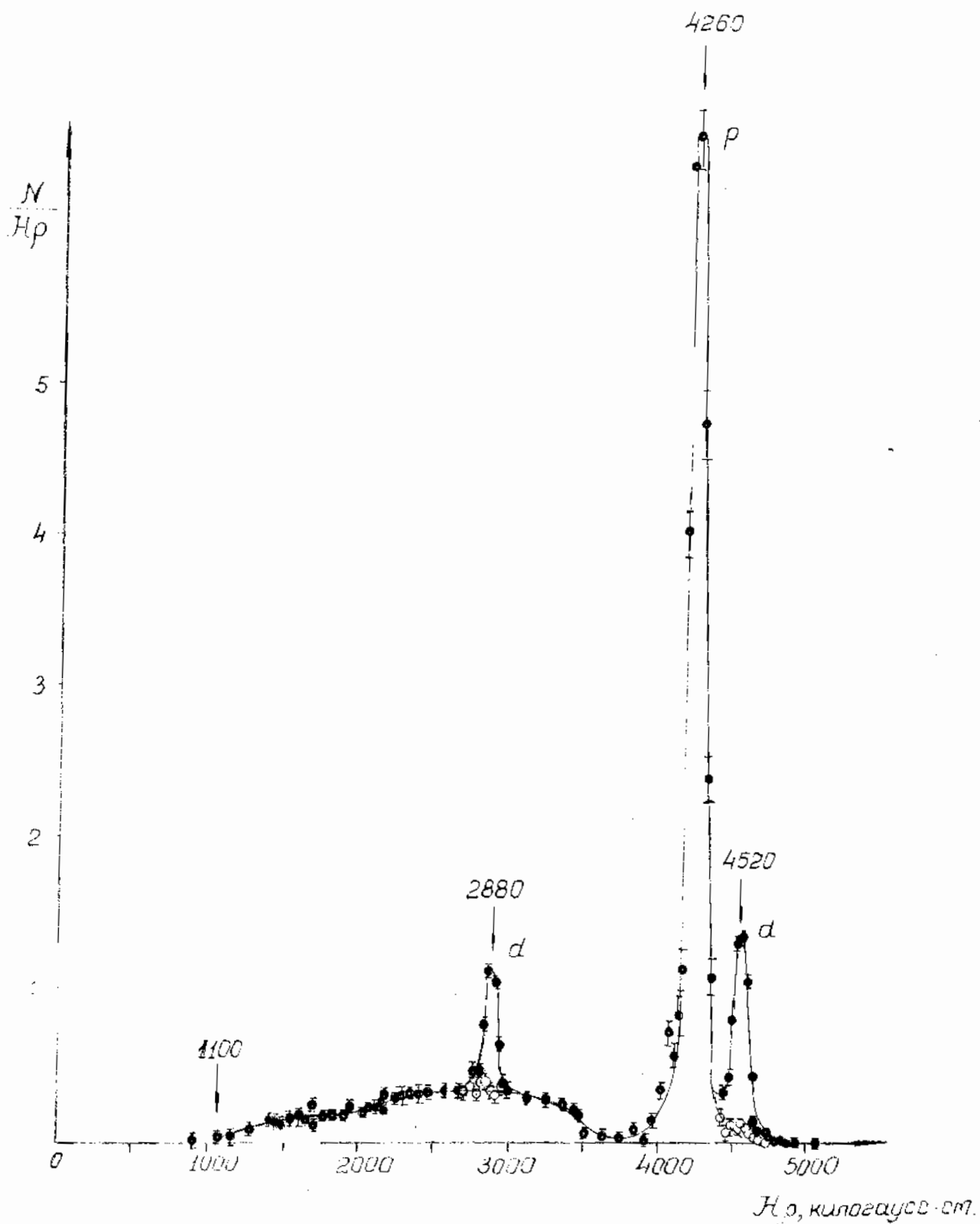
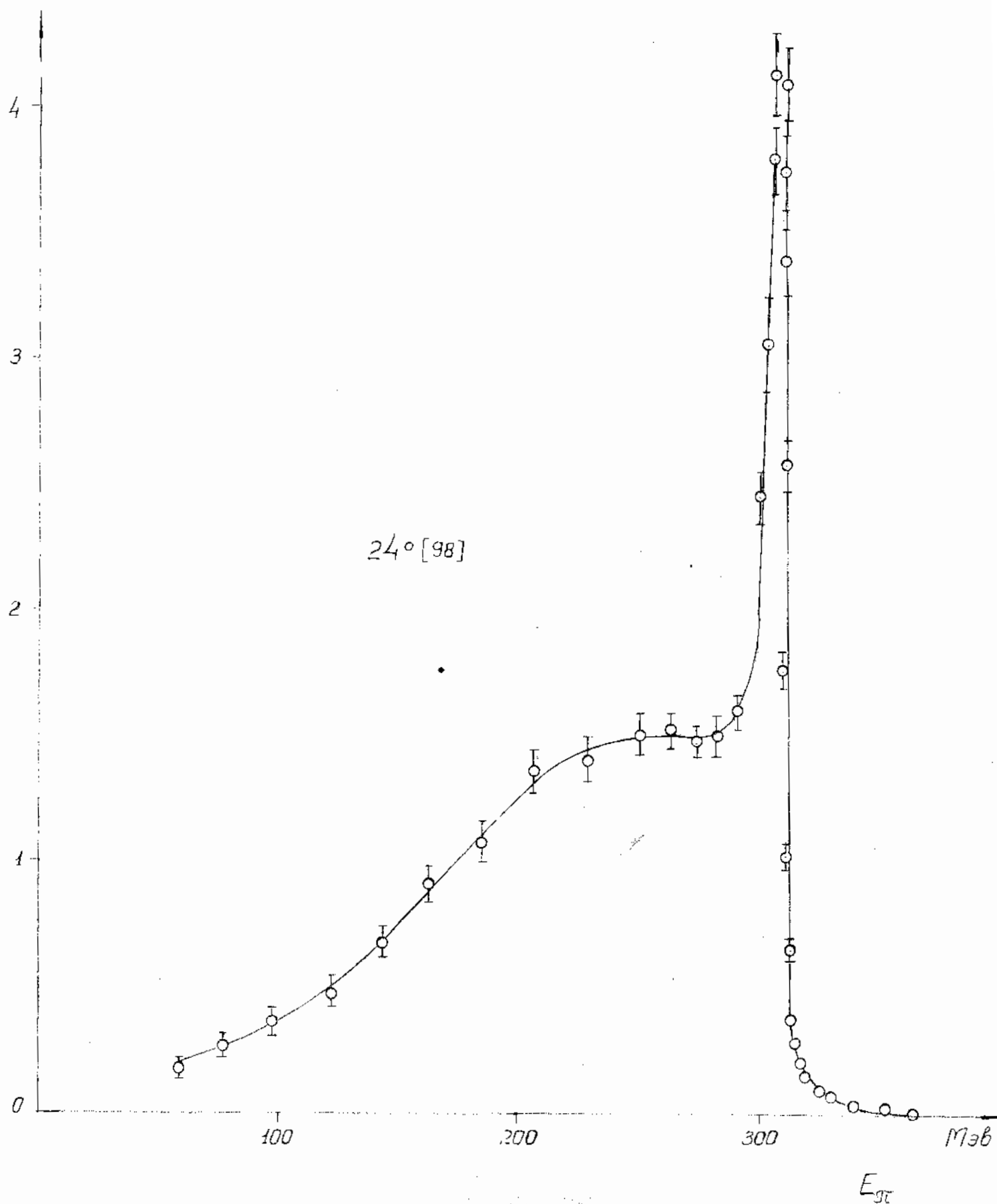
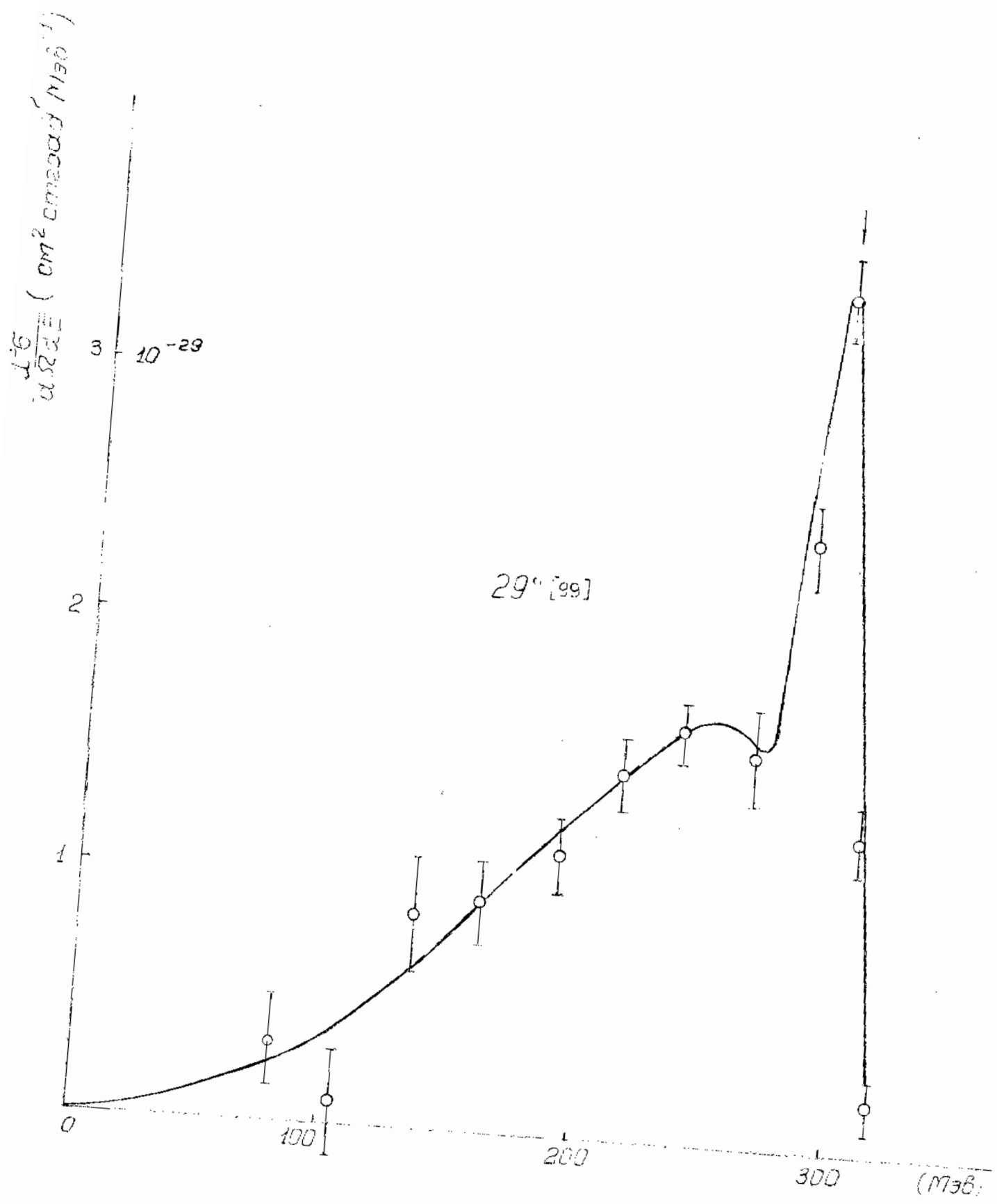


рис. 2.

0.02 [98]





Pu: 26(8)

3 10^{-29}

46° [99.]

2

1

0

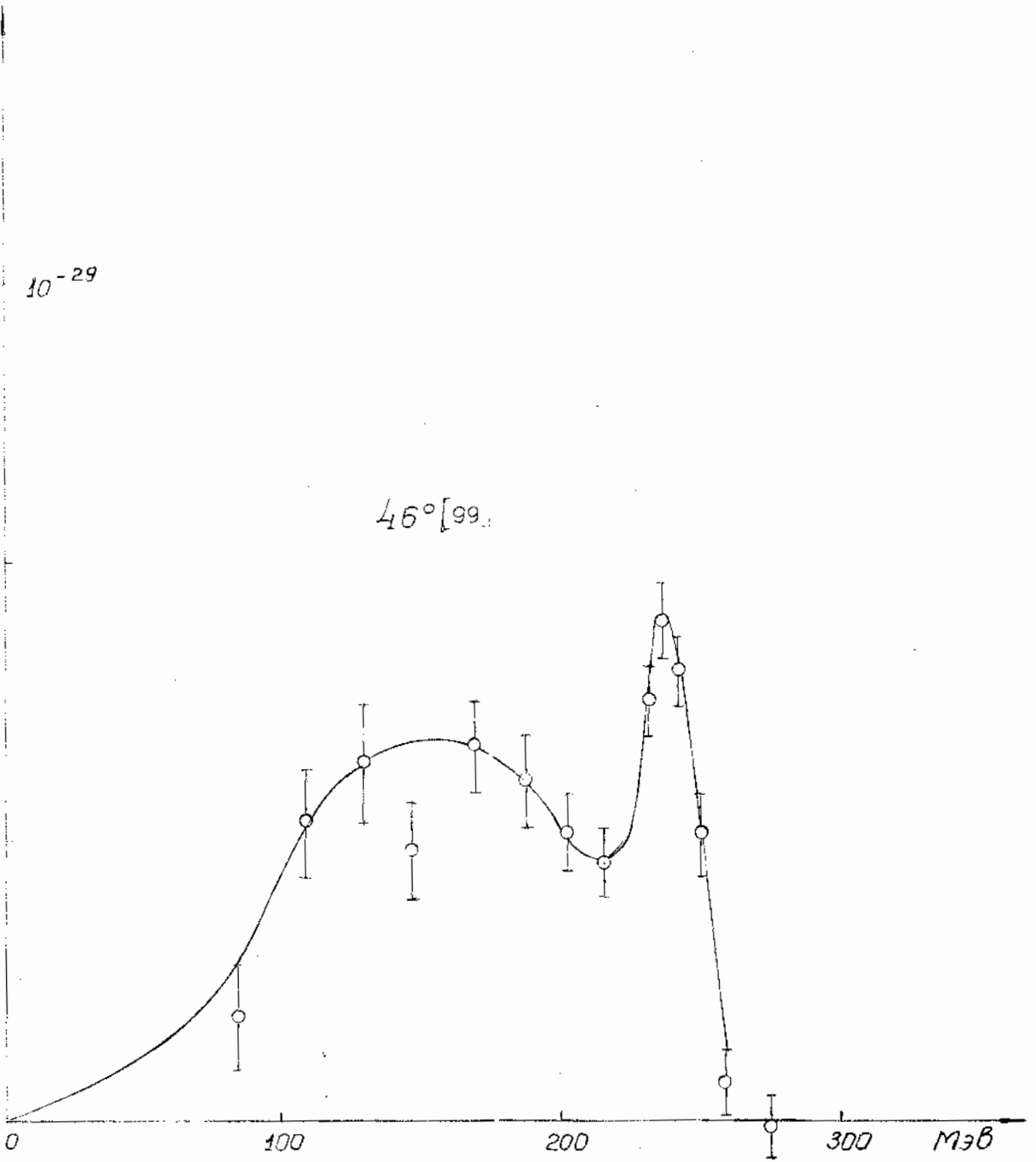
100

200

300

МэВ

Рис 26.(b)



$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}$ в относит. единицах

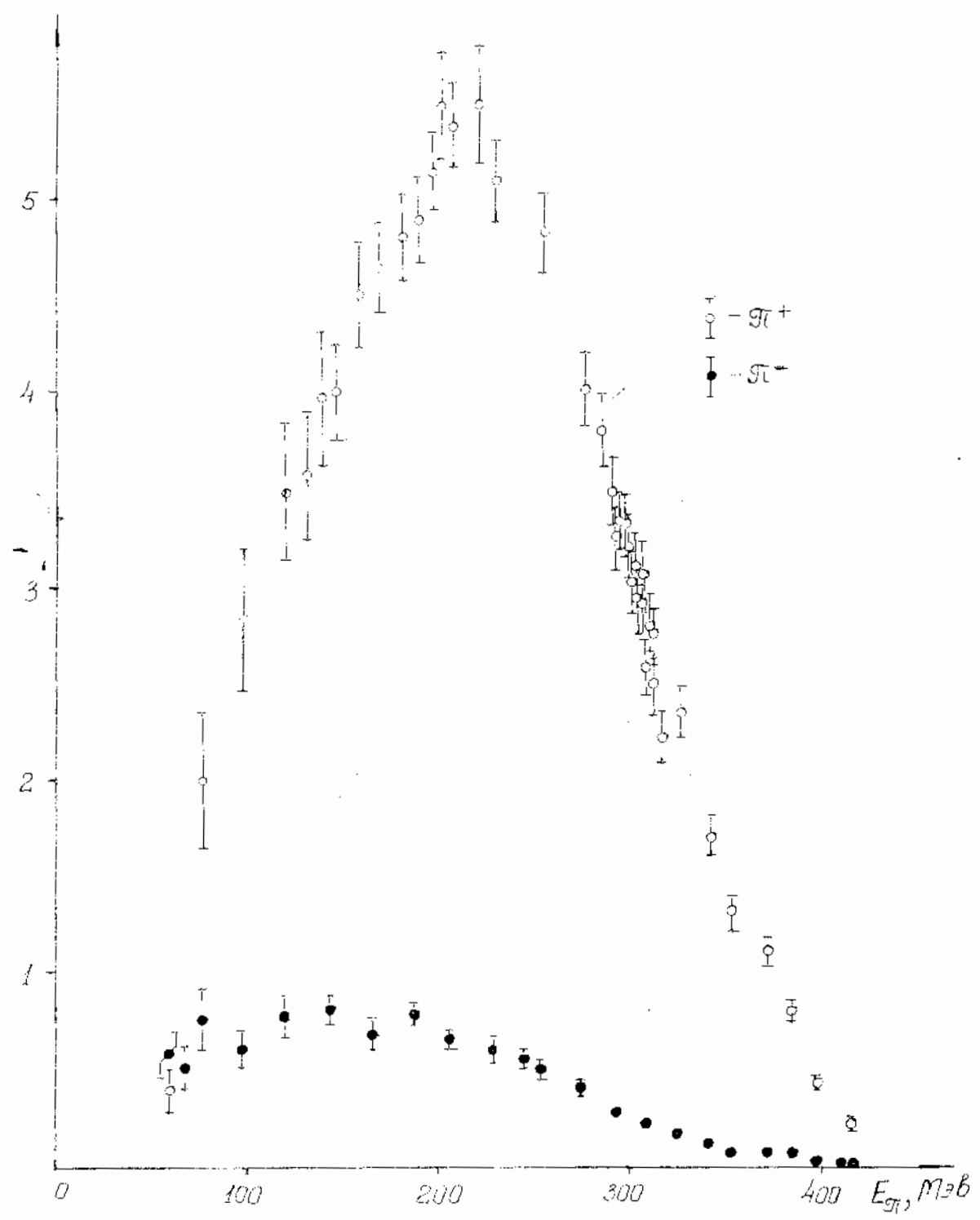


Рис. 27

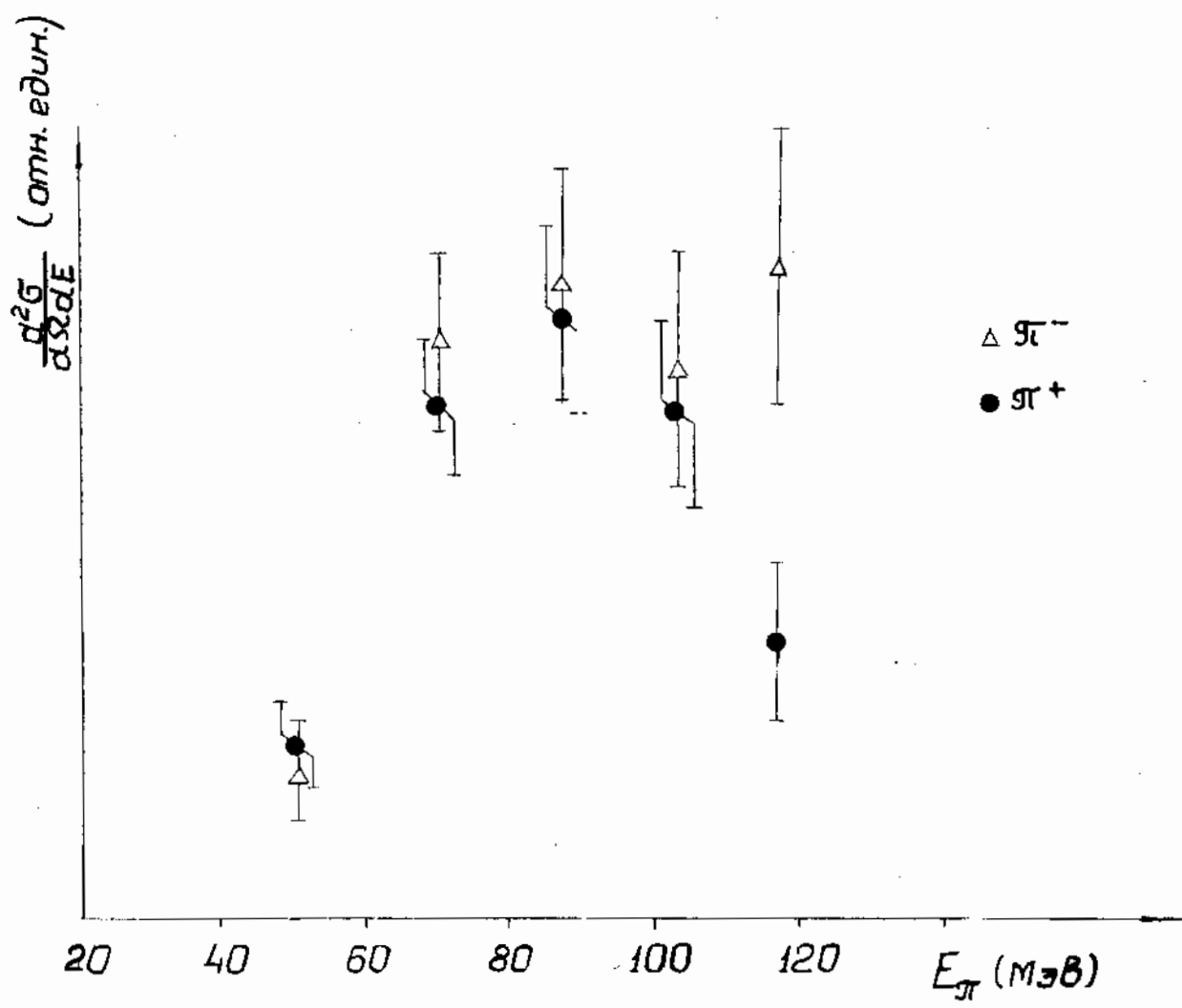


Рис. 28

PUC. 29

E_{gr}

M₉₈

350

300

250

200

1

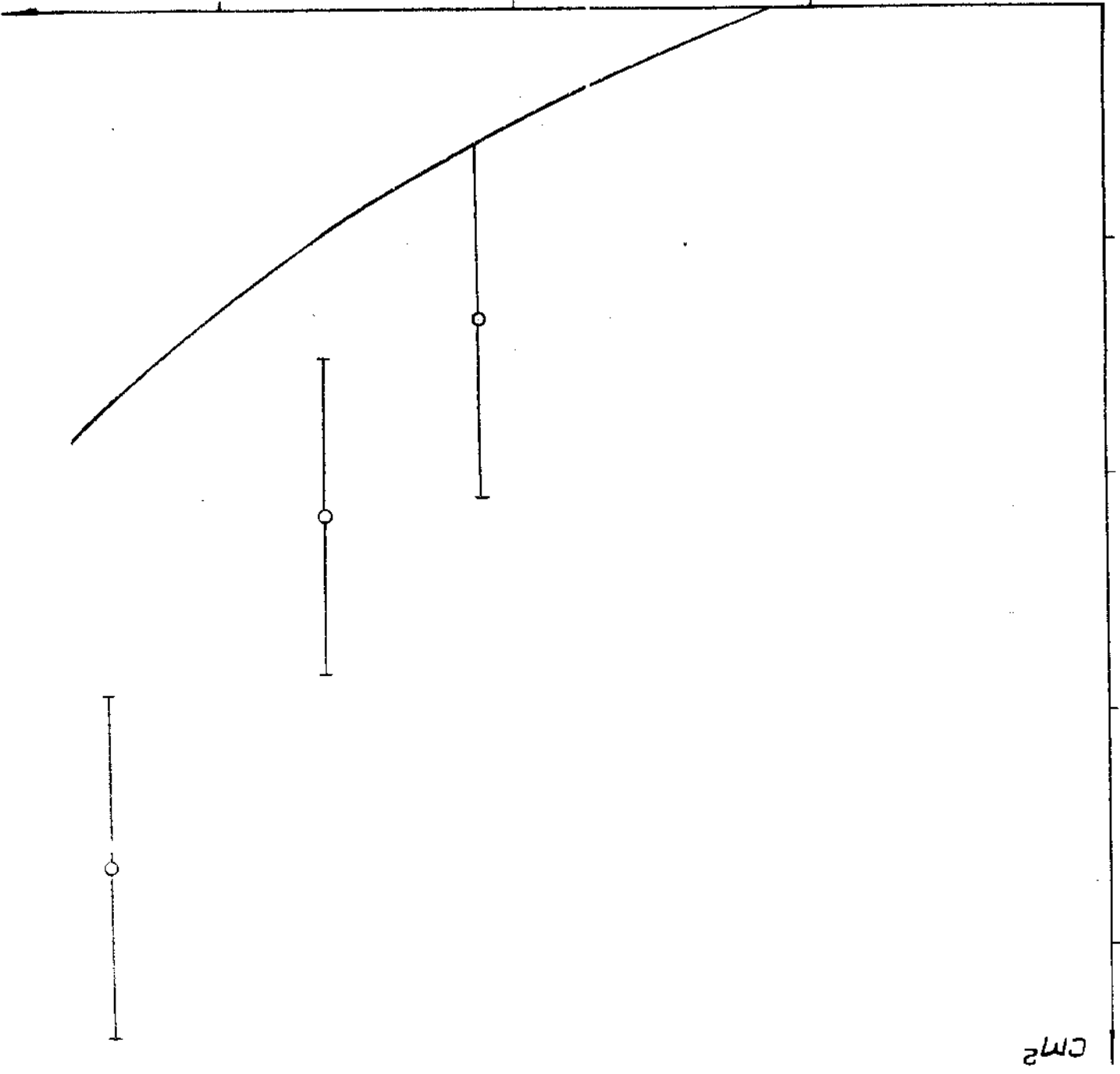
2

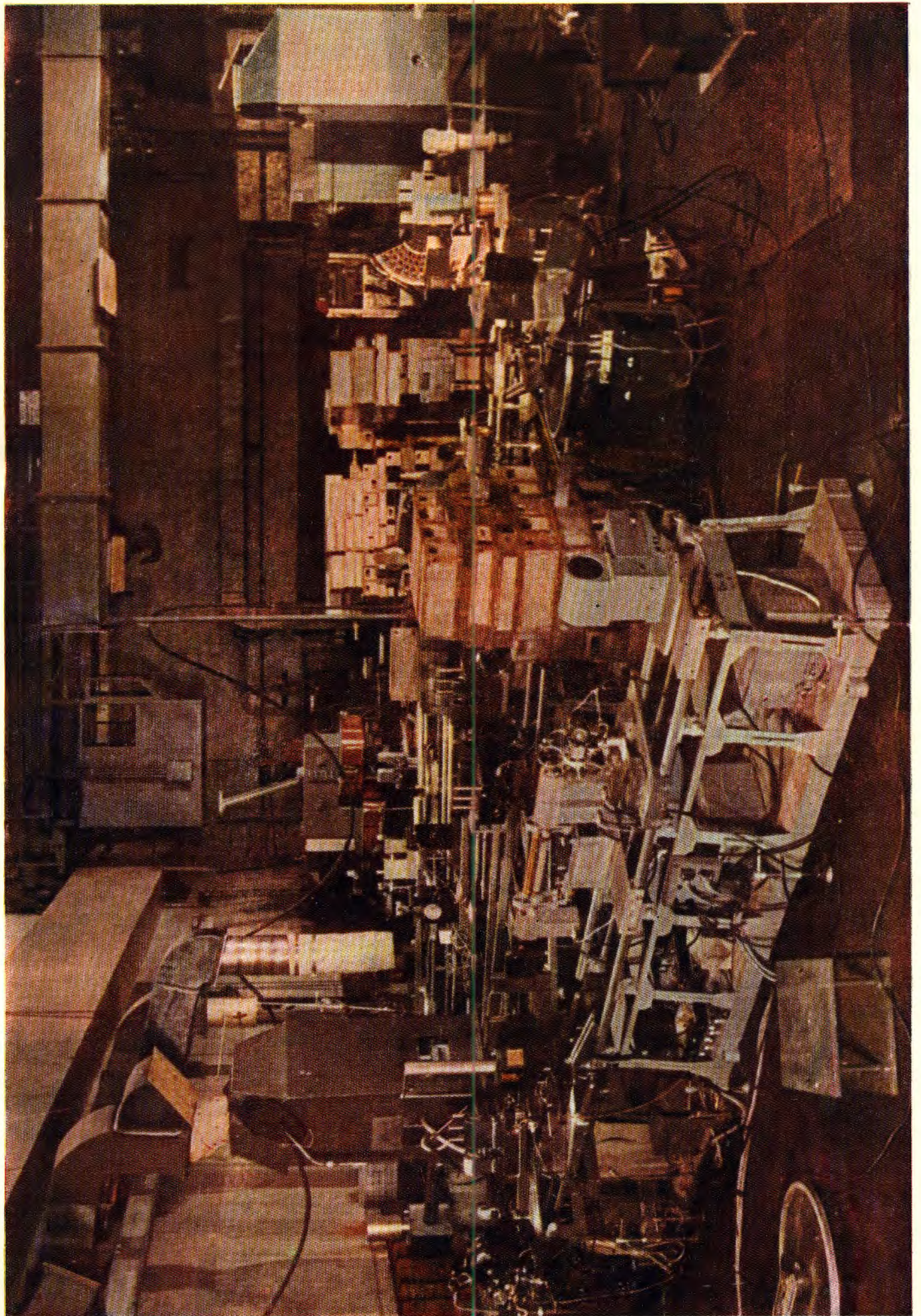
3

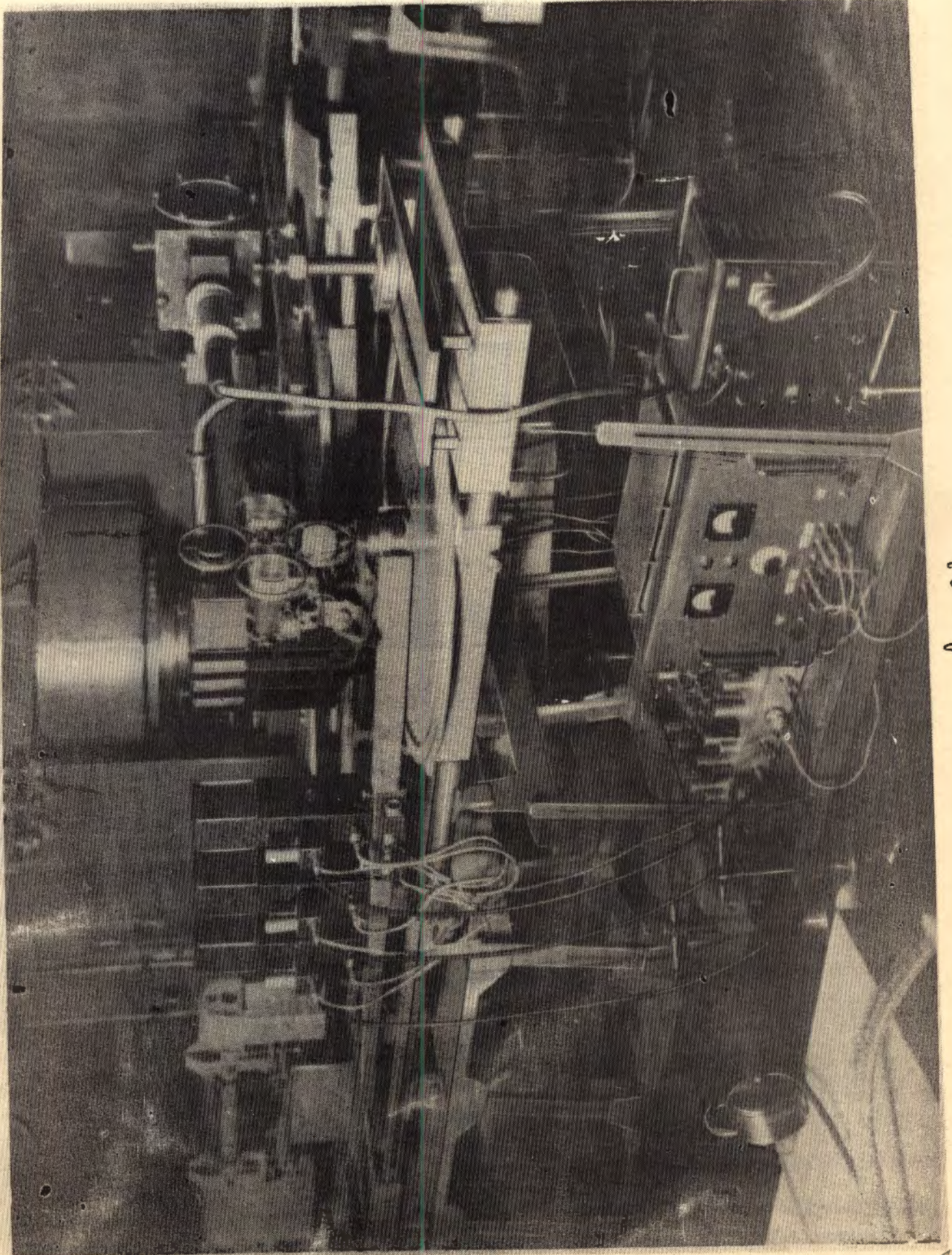
4

CM²

5.10.27







Page 32



Рис. 33.

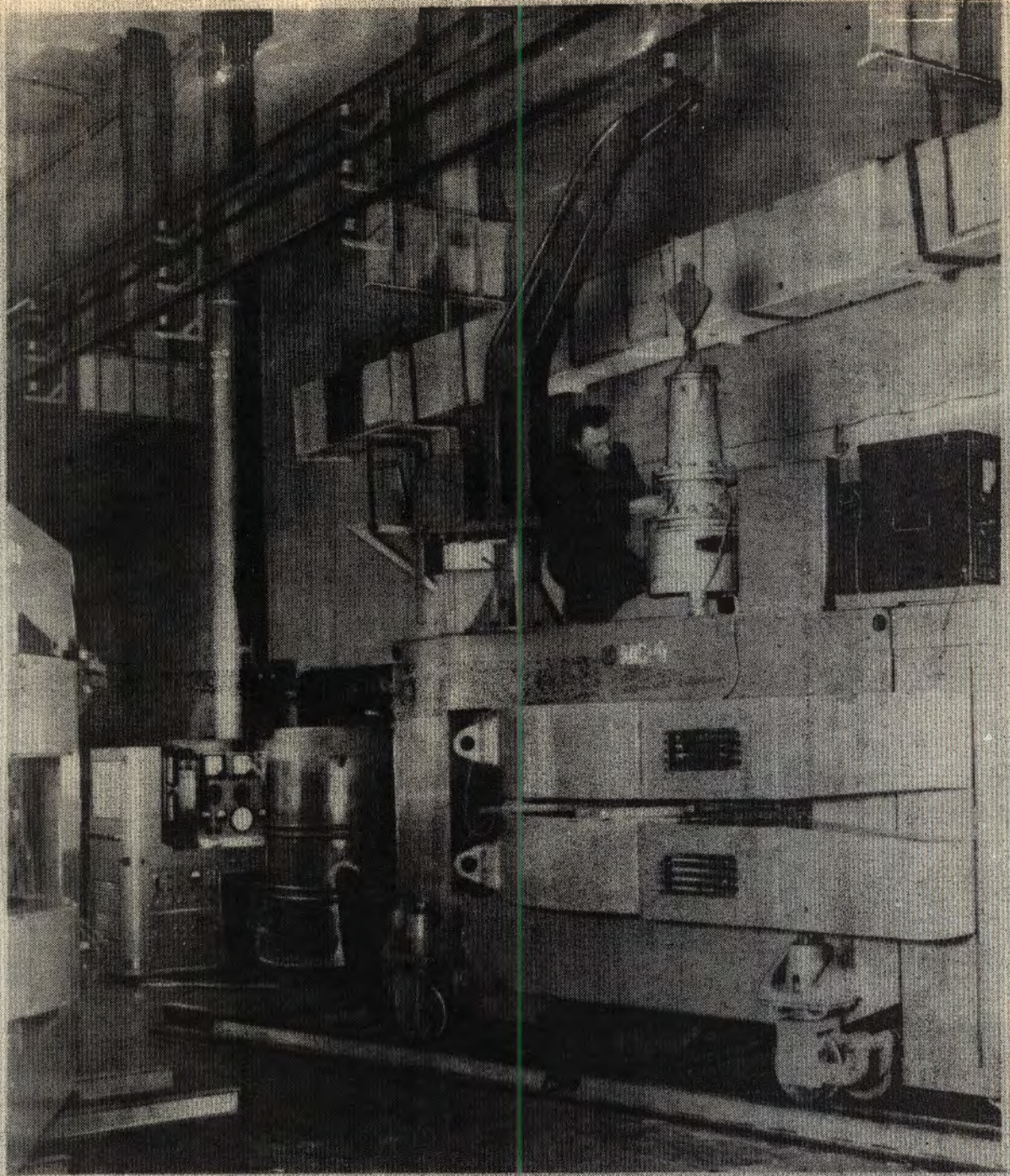
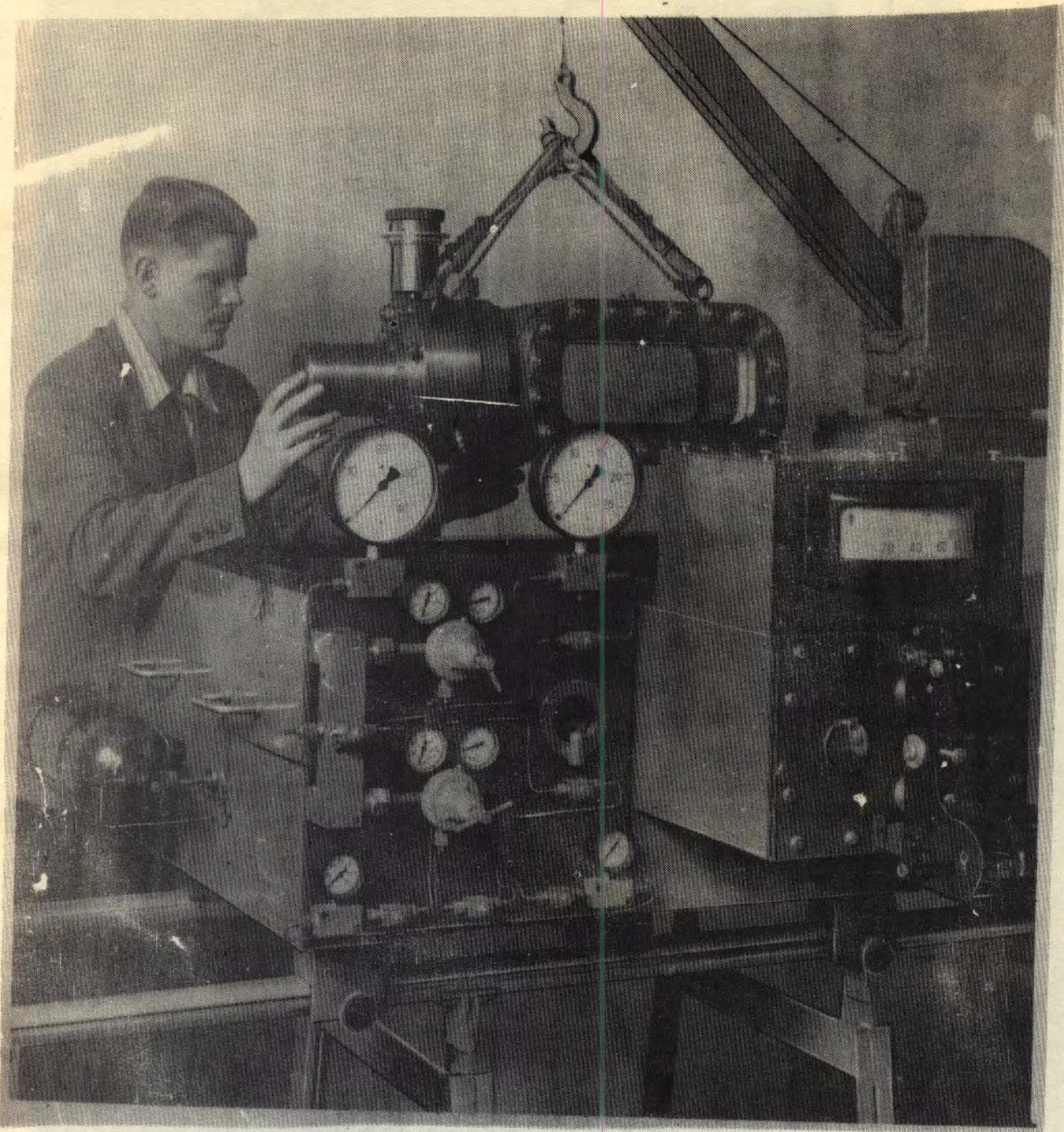


Рис 34



Luc 35

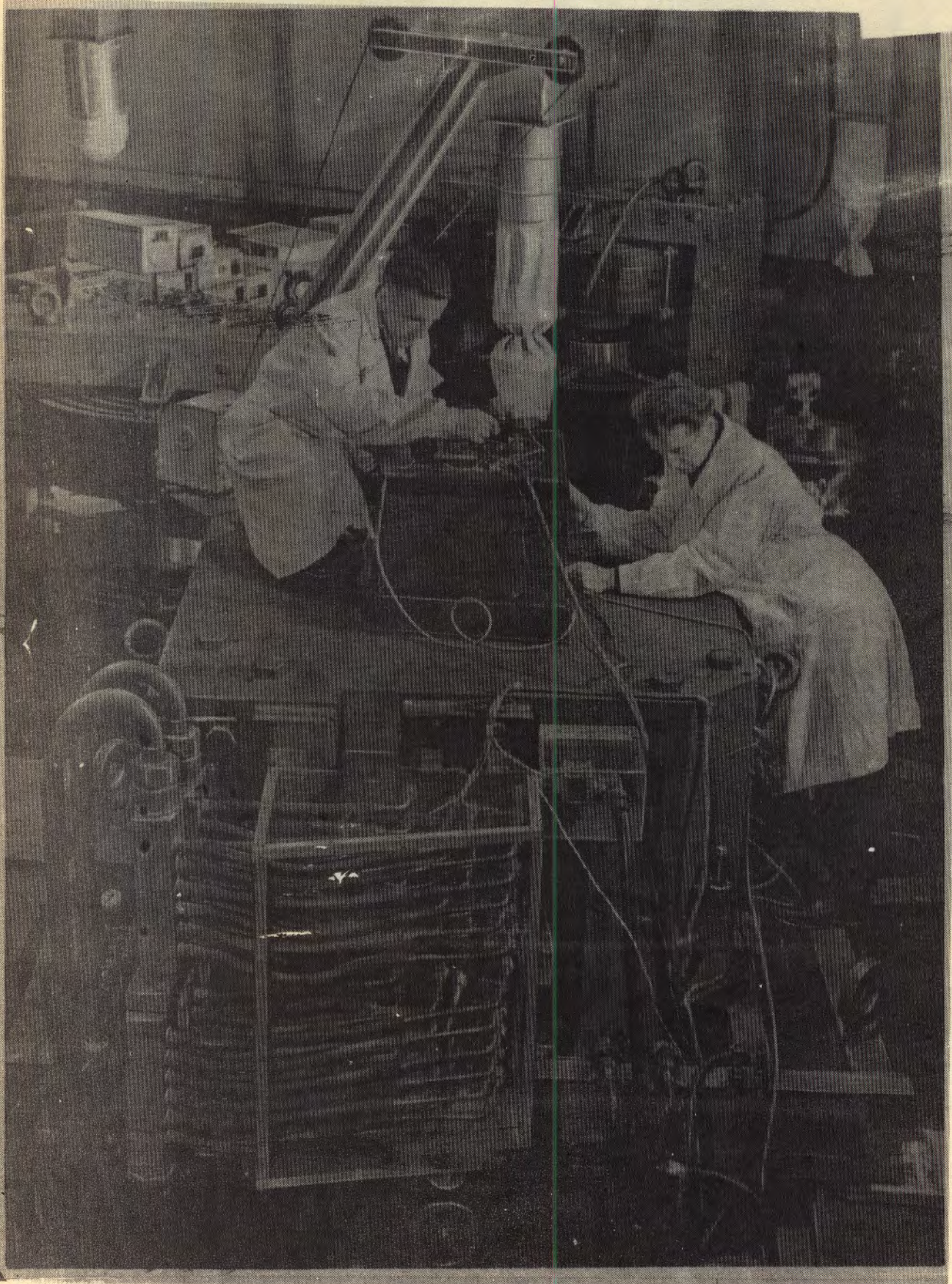


Рис 36

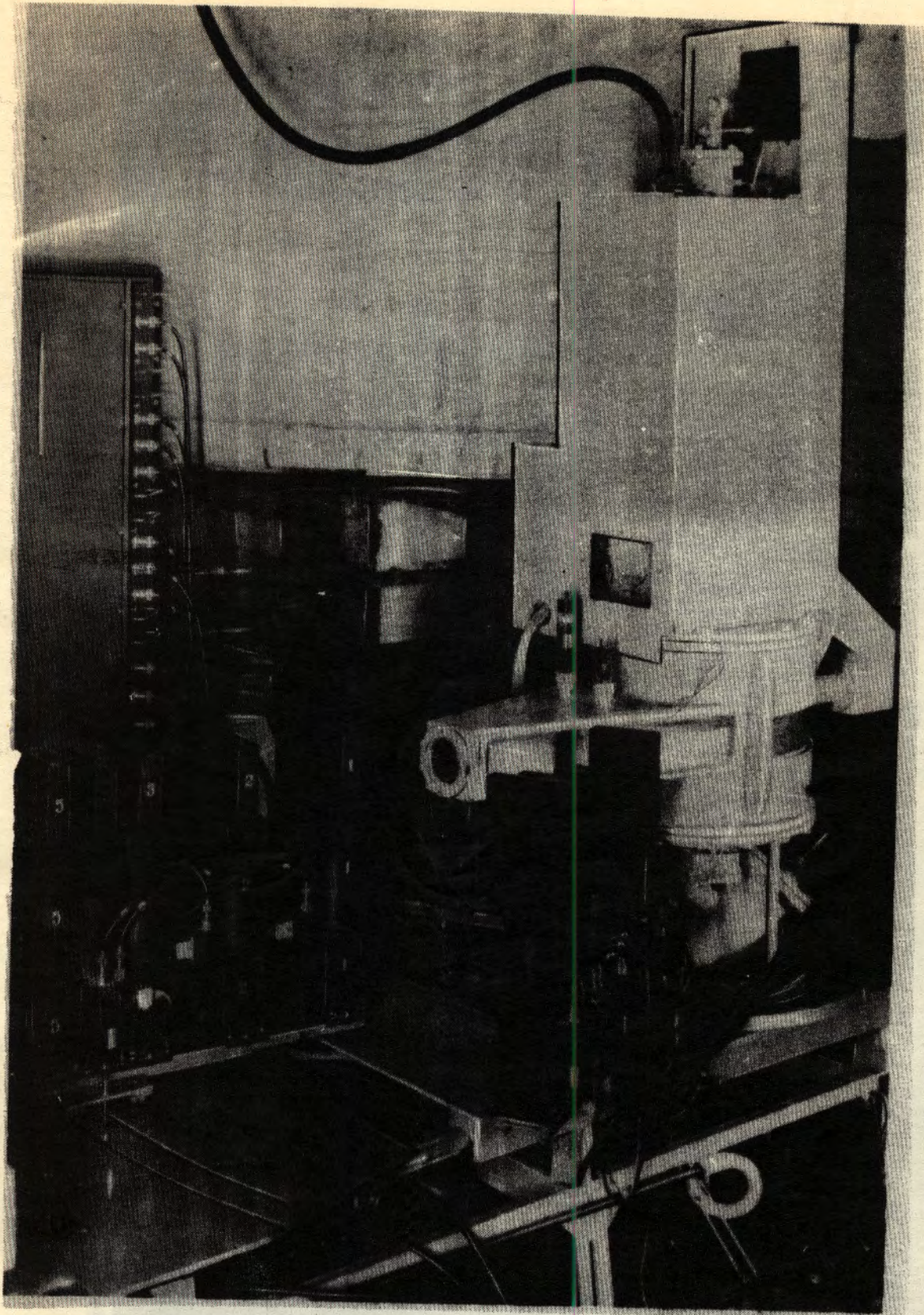
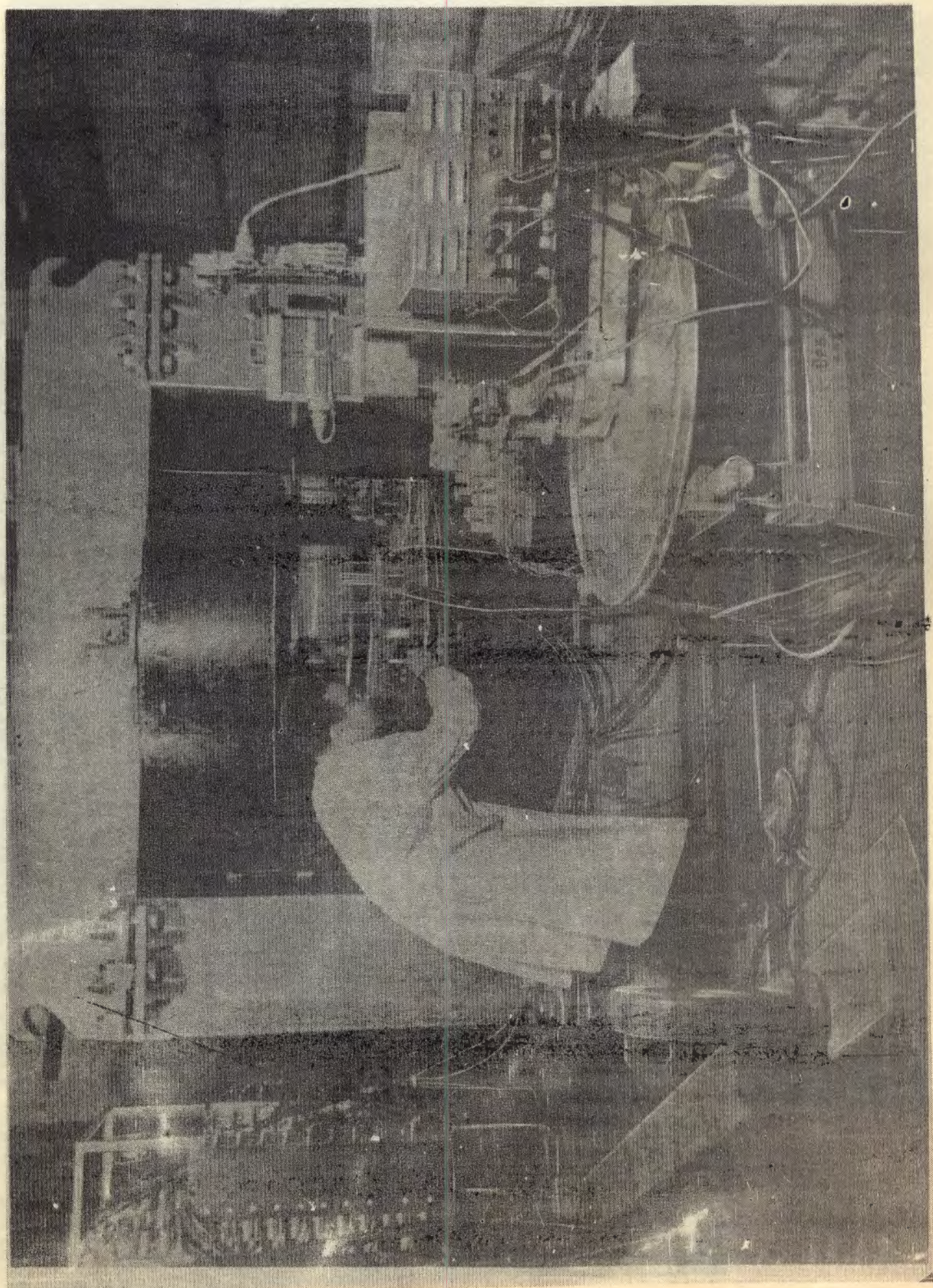
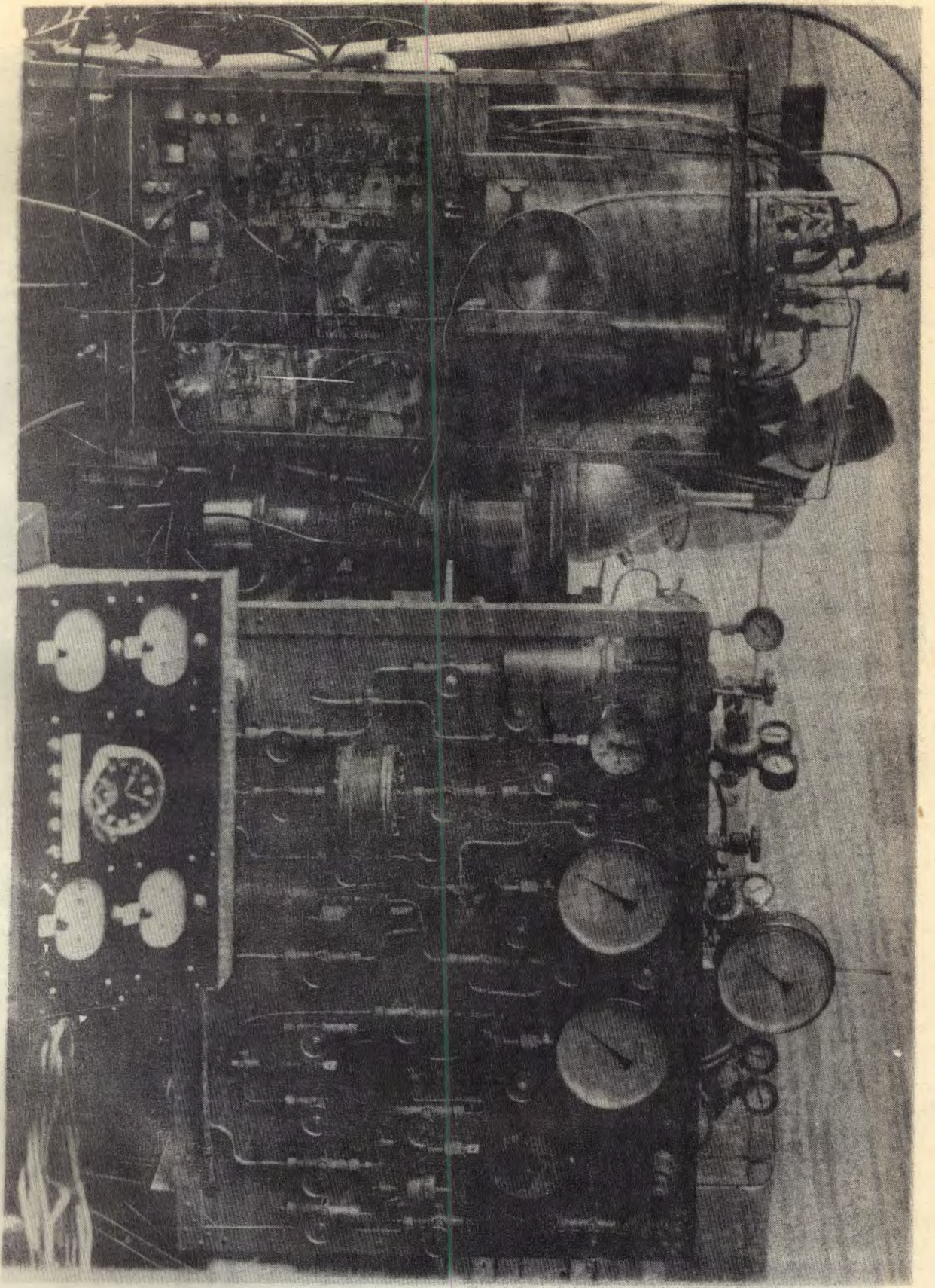


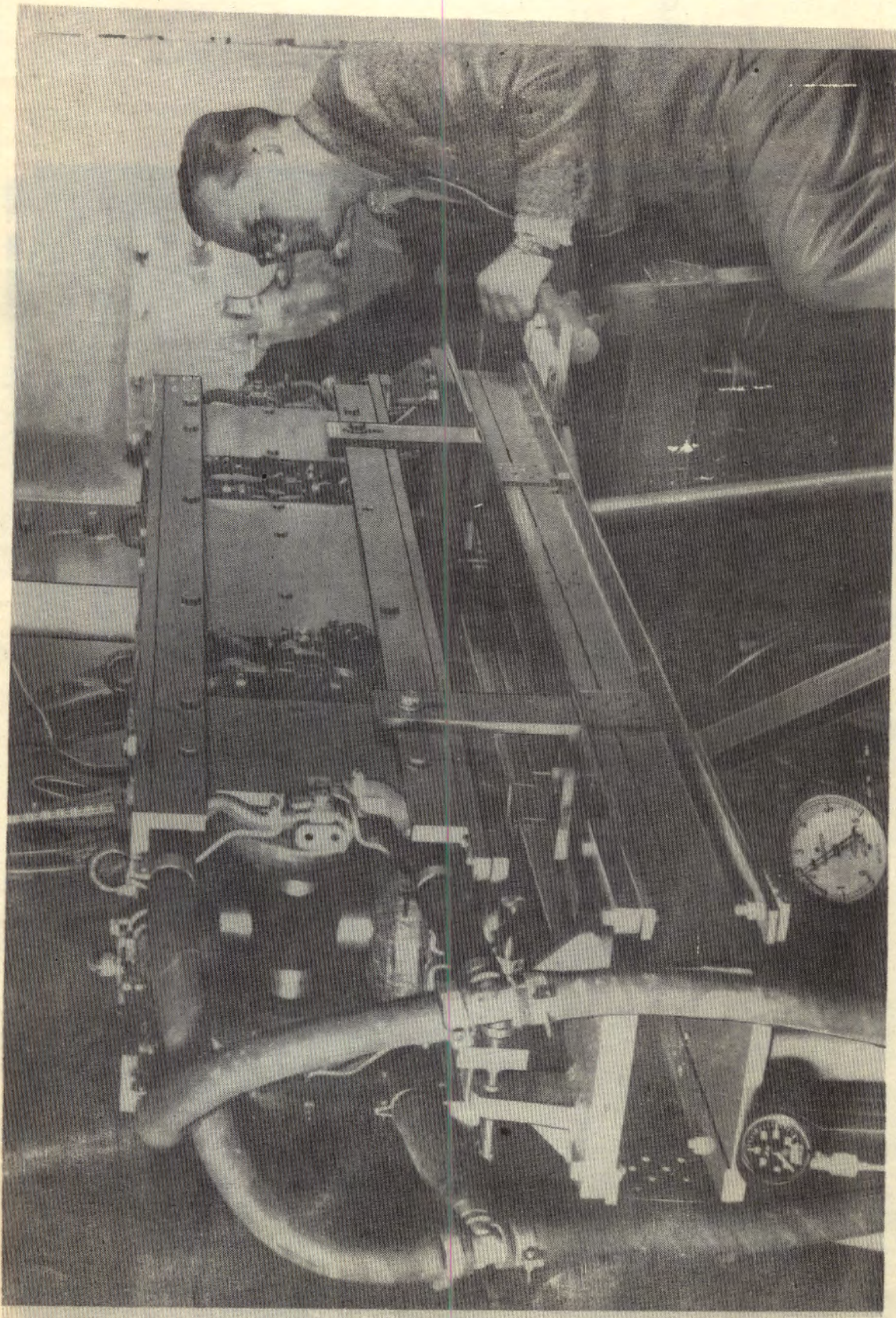
Рис. 37



Puc 38



Pue 39



Puc 40

100235

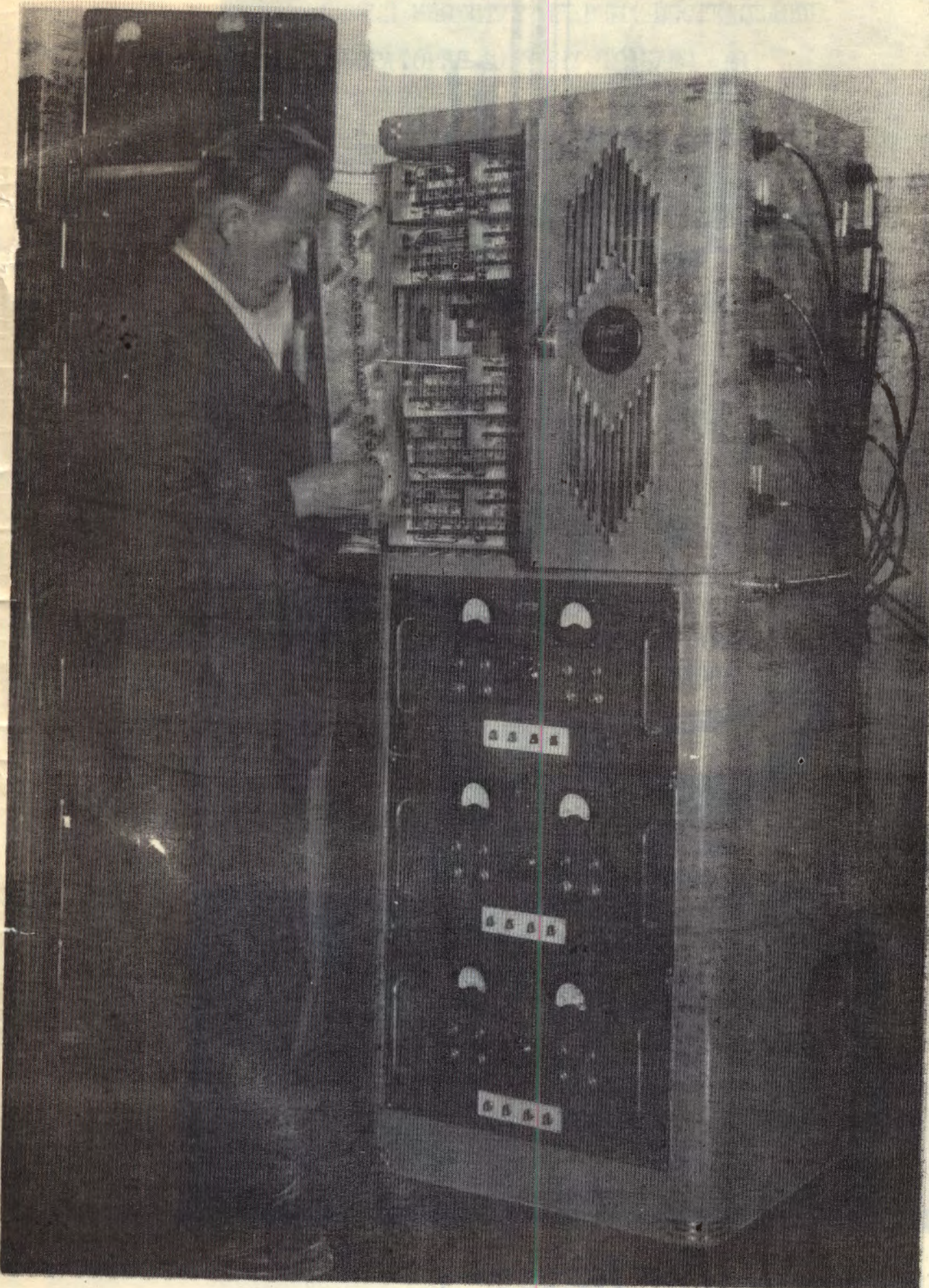


Рис. 41

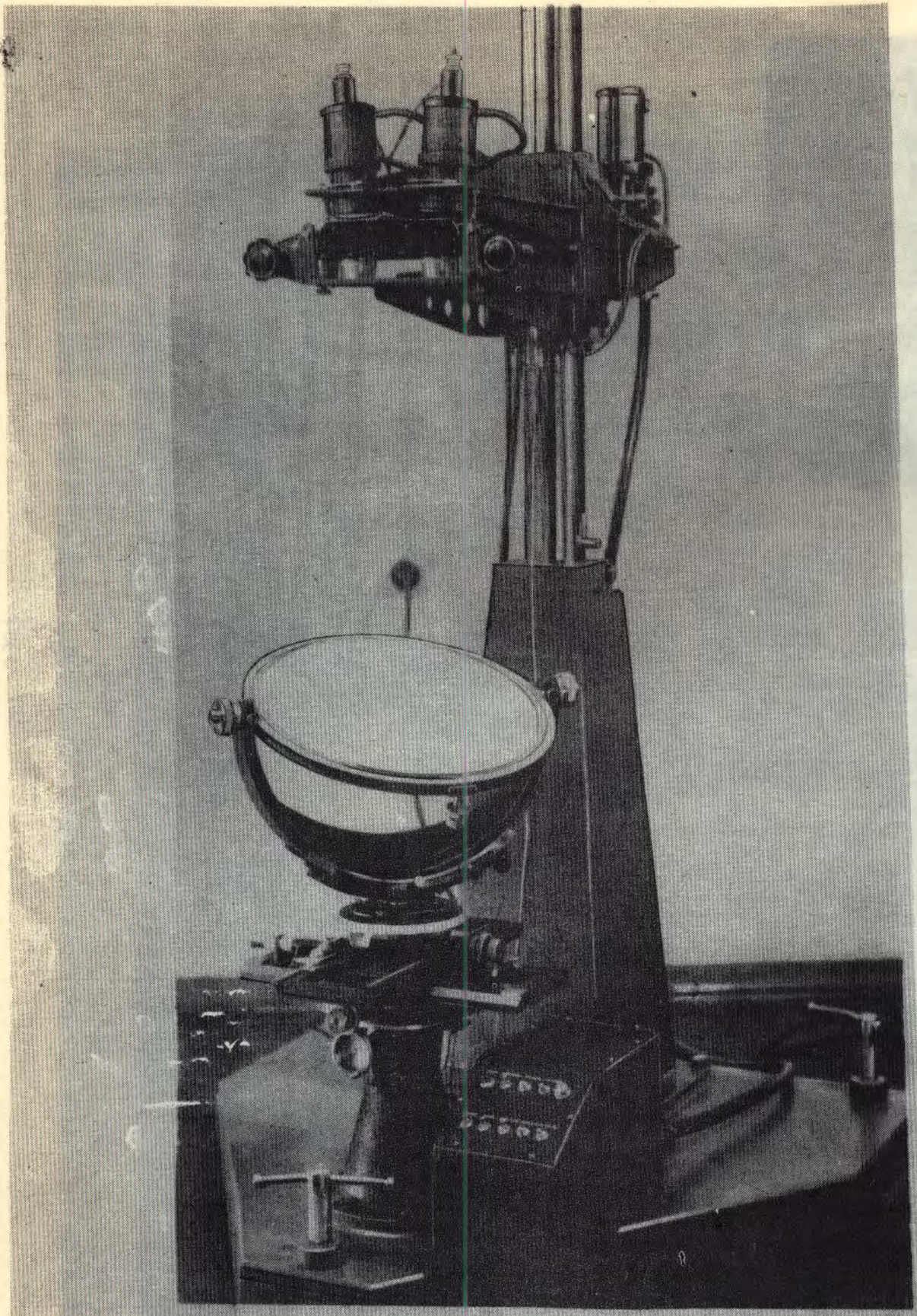


Рис. 42

Рис. 41