

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
СО АН СССР

Л.М.Барков, Г.А.Блинов, И.Б.Вассерман,
Г.Я.Кезерашвили, И.А.Кооп, В.С.Охупкин,
Е.А.Переведенцев, С.И.Редин, Н.М.Рыскулов
А.Н.Скринский, Е.П.Солодов, Б.И.Хазин,
Ю.М.Шатунов, А.И.Шехтман,

**ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА
ПО ИЗУЧЕНИЮ МНОЖЕСТВЕННОГО РОЖДЕНИЯ
ПИОНОВ НА ВСТРЕЧНЫХ
ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ ПУЧКАХ
С ПОМОЩЬЮ КРИОГЕННОГО
МАГНИТНОГО ДЕТЕКТОРА**

препринт 82—124



Новосибирск

На электрон-позитронном накопителе ВЭПП-2М изучалось множественное рождение пионов при суммарной энергии частиц 1.384 ГэВ. Эксперимент проведен с помощью криогенного магнитного детектора, позволяющего провести импульсный анализ зарегистрированных событий. Показано, что рождение пионов при суммарной энергии частиц 1.384 ГэВ. Эксперимент проведен с помощью криогенного магнитного детектора, позволяющего провести импульсный анализ зарегистрированных событий. Показано, что рождение четырех пионов достаточно хорошо описывается промежуточным состоянием с одним ρ^0 -мезоном. Измерено сечение рождения четырех заряженных пионов, которое оказалось равным 25.1 ± 3.5 нб. Получен также верхний предел на сечение рождения пяти пионов.

1. Введение

Изучение реакций множественного рождения пионов в e^+e^- аннигиляции при полной энергии до 2 ГэВ проводилось несколькими экспериментальными группами в Орсе [1-4], Новосибирске [5], Фраскати [6-8]. Имеющиеся экспериментальные данные о сечении рождения четырех заряженных пионов характеризуются большим разбросом полученных значений вне приведенных ошибок измерения, что указывает на присутствие значительных систематических погрешностей при проведении экспериментов, поэтому новые измерения в этой области энергий представляют несомненный интерес.

На установке ВЭПП-2М [9] начались эксперименты с криогенным магнитным детектором (КМД) [10], который позволяет проводить импульсный анализ событий. Благодаря применению низкой температуры и повышенного давления газовой смеси в шестизазорной оптической искровой камере, получено пространственное разрешение 60 мкм, что при максимальном магнитном поле в центре детектора 32 кГс обеспечивает импульсное разрешение 2.5% при импульсе частиц 0.5 ГэВ/с. Телесный угол установки 0.6·4л. Высокое пространственное и импульсное разрешение детектора позволяют хорошо отделять события множественного рождения заряженных пионов от фона циркулирующих пучков и космических частиц.

В данной работе приведены результаты эксперимента с КМД по изучению процесса рождения четырех пионов при $2E = 1.348$ ГэВ. Проведен анализ динамики процесса и получено значение полного сечения. Получен также верхний предел на сечение рождения пяти пионов.

2. Постановка эксперимента

Эксперимент ставился с целью выяснения возможностей детектора по изучению многоадронных событий. Измерения проводились при величине магнитного поля в центре детектора 20 кГс.

В эксперименте использовались два типа запуска искровой камеры.

В первом типе запуска, для регистрации многотрековых событий, сектора внутренней и внешней цилиндрических многопроволочных пропорциональных камер (МПК), описанных в работе [11], были включены таким образом, что сигнал на запуск выдавался, если в камере появлялись минимум три заряженные частицы с импульсом не менее 90 МэВ/с каждая. Для подавления фоновых запусков использовалась мажоритарная схема антисовпадений, которая запрещала запуск, если число сработавших секторов внутренней или внешней МПК было больше четырех.

Второй тип запуска использовался для определения интеграла светимости по событиям электрон-позитронного рассеяния на большие углы. Для регистрации этих событий применялось такое включение секторов МПК на совпадение, при котором регистрировались коллинеарные события, вылетающие в азимутальном угле 45 градусов вблизи горизонтальной плоскости. При этом эффективность регистрации для коллинеарных событий была уменьшена приблизительно в четыре раза и значительно подавлялся фон от космических частиц и частиц, вылетающих из пучка. Для подавления фоновых запусков использовалась мажоритарная схема антисовпадений, запрещающая появление более двух частиц, что в несколько раз уменьшает число фоновых запусков.

Набранный интеграл светимости в эксперименте составил 10.79 ± 0.46 обратных нанобарн.

3. Выделение событий множественного рождения.

В эксперименте получено около 90 тысяч фотографий. Для поиска многоадронных событий все снимки просматривались несколько раз и отбирались события с числом треков больше

двух, пересекающих стенку вакуумной камеры накопителя. При этом требовалось, чтобы каждый трек содержал не менее трех искр. Многократный просмотр показал высокую эффективность поиска. Всего найдено 102 кандидата на события множественного рождения пионов. Координаты искр на отобранных фотографиях измерялись с помощью полуавтоматического устройства для обработки снимков (JEP UNIOR).

На рис.1 приведена фотография многотрекового события. Благодаря наличию призм, часть изображения искры на снимке оказывается смещенной. По величине этого смещения определяется координата искр по глубине.

Около 3000 кадров содержат два трека от частиц, проходящих через стенку вакуумной камеры накопителя. Эти кадры обрабатывались с помощью сканирующего автомата [10] для выделения событий электрон-позитронного рассеяния.

Траектории заряженных частиц в объеме искровой камеры восстанавливались по координатам искр на пленке для всех типов событий. По совокупности траекторий событий электрон-позитронного рассеяния определялось положение оси пучков. Использование информации о положении оси пучков, которые имеют очень малые размеры 0.3мм-0.02мм [12], улучшает угловое и импульсное разрешения детектора для событий, вылетающих из пучка, особенно для треков с малым числом искр, из-за эффективного увеличения измеряемой длины траекторий.

После проведения траекторий, для каждого события вычислялось отклонение точки взаимодействия от оси пучков (ΔR). Для трех и более треков точкой взаимодействия считается точка, сумма квадратов расстояний от которой до траекторий всех частиц минимальна. На рис.2А приведено распределение многотрековых событий по параметру ΔR . Для событий, рождающихся при электрон-позитронном взаимодействии, ΔR описывается распределением с $\sigma 0.3$ мм, поэтому такие события не должны попадать за границу $\Delta R = 1$ мм. Однако, в число событий с $\Delta R > 1$ мм могут попасть многопионные события, если один из пионов в результате взаимодействия в вакуумной камере накопителя рассеялся на угол больший 10° или распался. Найдено

четыре события (два трехтрековых и два четырехтрековых), у которых один из треков не проходит через место встречи и, поэтому, $\Delta R > 1$ мм. Траектории у таких треков не восстанавливаются, что приводит к потере трехтрековых событий, а два четырехтрековых события переведены в класс трехтрековых. У остальных 17 отброшенных событий ни одна из частиц не проходит вблизи пучка.

После отбора по ΔR осталось 83 события. На рис.2В приведено распределение среднеквадратичных отклонений измеренных точек от проведенных траекторий (σ) для этих событий (275 треков), демонстрирующее пространственное разрешение детектора для многоадронных событий в плоскости, перпендикулярной магнитному полю.

Для дальнейшего анализа вычислялось отклонение (E_x) суммарной энергии зарегистрированных частиц от полной энергии эксперимента в предположении, что все частицы являются пионами. По этому параметру отброшено два события. Эти события представляют собой фон от событий электрон-позитронного рассеяния на большие углы с рождением добавочных частиц в стенке вакуумной камеры.

После проведенного отбора было проверено, что полный заряд четырехтрековых событий равен нулю, а трехтрековые события имеют заряд ± 1 .

Для всех оставшихся событий вычислялся квадрат массы улетевшей частицы (Mx^2). На рис.3А и 3В приведены распределения по квадрату массы улетевшей частицы для четырех- и трехтрековых событий. 29 событий в пике с $Mx^2 = 0$ на рис.3А относятся к реакции рождения четырех заряженных пионов, а событие с $Mx^2 = 2.9 \cdot 10^4 \text{ МэВ}^2$ может быть отнесено к процессу рождения пяти пионов, т.к. отличие от $M^2(\pi^0) = 1.82 \cdot 10^4 \text{ МэВ}^2$ соответствует разрешению детектора по этому параметру. Для этого события $E_x = 280 \text{ МэВ}$, что также соответствует средней энергии частиц в реакции с пятью пионами.

Разрешение КМД по квадрату массы недостающей частицы для трехтрековых событий составляет $2.5 \cdot 10^4 \text{ МэВ}^2$, что хорошо согласуется с экспериментальным распределением рис.3В. Од-

нако три события выпадают за три стандартных отклонения в сторону больших масс (эта граница указана стрелкой). Расчеты показывают, что за этой границей должно лежать одно событие, соответствующее излучению жесткого γ -кванта начальными электронами. Для двух из трех выпавших событий направление недостающего импульса находится в пределах телесного угла установки. При просмотре фотографий этих событий обнаружено по одной искре, хорошо совпадающей с предсказанным направлением в плоскости перпендикулярной оси пучков и сильно отличающимся углом с осью пучков. Эти два события были интерпретированы как события с излучением жесткого γ -кванта, испущенного вдоль оси пучков начальными частицами, а пропадание трека связано с неэффективностью искровой камеры.

Оставшееся одно событие может быть отнесено к реакции рождения пяти пионов, но может быть и фоновым.

Таким образом в этом эксперименте зарегистрировано 79 событий отвечающих рождению четырех заряженных пионов (50 трехтрековых и 29 четырехтрековых событий). Вклад в это число фоновых процессов (в основном от рождения двух заряженных и двух нейтральных пионов с распадом одного из нейтральных пионов на γ -квант и далиц-пару) по оценкам составляет < 1 события.

По-видимому, одно четырехтрековое событие можно с большой степенью вероятности отнести к процессу рождения пяти пионов, и, может быть, одно трехтрековое событие относится к этому процессу.

4. Динамика процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$.

Инвариантные массы пары пионов разного знака, пары пионов одного знака и трех пионов приведены на рис.4А,В,С. Четкий сигнал от ρ^0 -мезона виден в спектре масс пары пионов разного знака. Сплошной линией показан расчетный спектр, полученный в модели рождения четырех заряженных пионов через промежуточное состояние с одним ρ^0 -мезоном и с учетом тождественности пионов [13]. При этом учитываются условия за-

пуска и телесный угол установки. Согласие с экспериментом достаточно хорошее (χ -квадрат равен 31.3 при 27 степенях свободы. $CL=25\%$).

На рис.5 приведены экспериментальные распределения по углам между зарегистрированными частицами. Сплошной линией показано предсказание используемой модели. Угловые распределения также достаточно хорошо описываются этой моделью и, таким образом, она может быть использована для расчета эффективности регистрации.

Другие теоретические возможности не изучались из-за недостаточной статистики.

5. Расчет эффективности регистрации.

Расчет проводился методом монте-карло. В выбранной модели, с ρ^0 -мезоном в промежуточном состоянии, разыгрывалась энергия и направление вылета каждой частицы с учетом размеров пучка в месте встречи. Проводились траектории частиц в КМД с учетом неоднородности магнитного поля и находились сектора внутренней и внешней МПК, через которые проходят частицы. Если в детектор попадает три или четыре частицы и сектора удовлетворяют логике запуска, то событие считается зарегистрированным. Следует отметить, что такая, чисто геометрическая эффективность регистрации, довольно высока, и составляет 52%. Однако, при расчете необходимо учесть следующие эффекты, приводящие к потерям событий:

- вероятность срабатывания соседних секторов запускающей системы. Если одна из частиц проходит вблизи границы секторов внутренней или внешней МПК, то срабатывают одновременно оба эти сектора. Поскольку мажоритарная схема антисовпадений запрещает срабатывание более четырех секторов каждой МПК, возможны потери событий. Вероятность срабатывания соседних секторов измерялась с помощью космических частиц, проходящих через центр детектора, и оказалась равной для внутренней МПК 0.070 ± 0.007 . Для внешней МПК соответствующая вероят-

ность зависит от кривизны траектории частицы в магнитном поле и для данного эксперимента была оценена 0.03 ± 0.01 .

- вероятность ядерного поглощения пионов в веществе искровой камеры и элементах конструкции перед внешней МПК, при котором не происходит запуска соответствующего сектора внешней МПК. Вероятность ядерного поглощения пионов оценивалась по экспериментальным работам [14-16] и оказалась равной 0.02 ± 0.01 .

- вероятность пропадания трека из-за неэффективности искровой камеры (число искр меньше трех) или невозможности восстановить трек в результате распада или рассеяния.

Так как направление вылета недостающих частиц восстанавливается по углам и импульсам зарегистрированных, можно найти тректрековые события, для которых недостающая частица летит в пределах телесного угла установки, но трек не восстанавливается или не зафиксирован. Обозначим число таких событий $N_{(4-1)}$. Для нахождения числа событий с пропаданием одного из четырех треков строилось распределение по Z-координате пересечения траекторий зарегистрированных и незарегистрированных (восстановленных по трем оставшимся) частиц с внешней МПК, которая определяет телесный угол детектора. На рис.6 приведены экспериментальные распределения по этому параметру. Гладкой кривой приведено распределение для моделированных событий. Стрелками показаны границы чувствительной области. У 16 из 50 тректрековых событий (рис.6B) недостающая частица летит в детектор, но не зарегистрирована, т.е. $N_{(4-1)}=16$. По этим событиям вероятность пропадания трека (E_4) можно определить в предположении, что она не зависит от угла, следующим образом: Если в N событиях все четыре частицы летят в детектор, то число четырехтрековых событий будет $N_4 = N(1-E_4)^4$, а число событий с пропаданием одного трека $N_{(4-1)} = 4NE_4(1-E_4)^3$. В этом эксперименте зарегистрировано $N_4 = 29$ событий с четырьмя треками. Отсюда однозначно находится величина $E_4 = N_{(4-1)} / (N_{(4-1)} + 4N_4) = 0.121 \pm 0.033$. Надо отметить, что пропадание одного из четырех треков не приводит к потере со-

бытий, а переводит их из класса четырехтрековых в класс трехтрековых, а вероятность пропадания двух треков из четырех мала. Расчет в предположении сильной зависимости эффективности от угла с осью Z дает мало отличающийся результат.

Величину вероятности E_4 можно получить другим, независимым, способом, анализируя события по числу искр на треках. На рис.7А точками с ошибкой приведено распределение по числу искр на треках для событий с четырьмя треками. Аппроксимируя точки в область с малым числом искр, можно оценить сколько событий потеряно. При этом зависимость от способа аппроксимации слабая. Гистограммой показано теоретическое распределение в предположении, что вероятность WN иметь на треке N искр меняется экспоненциально. В этой модели $E_4 = W_0 + W_1 + W_2$ и для нее получена величина $E_4 = 0.108 \pm 0.042$, которая достаточно хорошо согласуется с полученной ранее. Следует отметить, что в величину W_0 включена вероятность пропадания трека в результате ядерного взаимодействия или распада, для которой расчеты дают величину 0.011. (согласно этой вероятности в результате ядерного взаимодействия или распада должно пропасть 3 трека из 280 зарегистрированных, как отмечалось выше, таких треков найдено 4.)

Для событий, у которых все частицы летят в пределах телесного угла установки, можно проверить, насколько хорошо используемая гипотеза предсказывает количество искр на незарегистрированных треках. Для этого фотографии шестнадцати событий, у которых недостающая частица летит в камеру, просматривались и искались искры в направлении улетевшей частицы. Для одиннадцати событий такие искры были найдены. На рис.7В приведено распределение по искрам для событий с четырьмя частицами в камере, при этом добавлено распределение искр на невосстановленных треках. Гистограммой показано теоретическое распределение.

Так как согласие используемой гипотезы с экспериментом достаточно хорошее, вероятность пропадания трека для событий с тремя частицами в камере (одна вне пределов телесного

угла установки) определялась аналогичным образом по числу искр на треках и оказалась равной $E_3 = 0.071 \pm 0.034$. соответствующие распределения показаны на рис.7С. Отметим, что именно в этом случае происходит реальная потеря событий (полная эффективность уменьшается на 20%), и точность в определении этой вероятности определяет ошибку в эффективности регистрации.

С учетом указанных факторов получена эффективность регистрации детектора для процесса рождения четырех пионов, которая оказалась равной $\epsilon = 0.299 \pm 0.022$. Отношение числа четырехтрековых событий к числу трехтрековых в эксперименте составляет 0.57 ± 0.13 , что в пределах ошибок согласуется с соответствующей расчетной величиной 0.46 ± 0.09 .

Эффективность регистрации при рождении пяти пионов слабо зависит от динамики процесса и ее расчет в модели лоренц-инвариантного фазового объема дает величину 0.21 ± 0.03 .

6. Сечения рождения четырех и пяти пионов

Используя эффективности регистрации и величину набранного интеграла светимости, вычислялись сечения рождения четырех и пяти пионов. При этом учитывались радиационные поправки согласно работе [17] на излучение реальных и виртуальных фотонов и поляризацию вакуума (+2.5%).

Сечение рождения четырех заряженных пионов оказалось равным $\sigma(\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-) = 25.1 \pm 3.5$ нб. Систематическая ошибка не превышает 10% и складывается из ошибки определения интеграла светимости (4%), ошибки расчета радиоправок (1%), ошибки расчета эффективности (4%) и ошибки в числе событий из-за вклада фоновых процессов (<1%).

Для реакции $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ по двум зарегистрированным событиям (одно трехтрековое и одно четырехтрековое) можно поставить верхний предел на сечение $\sigma(\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-) < 2.1$ нб при 95% уровне достоверности.

Сечение рождения четырех заряженных пионов, полученное в данной работе, вместе с данными других экспериментов в этой области энергий приведены на рис.8. Отличие от результатов

работы [5] составляет два стандартных отклонения.

Изучение процессов множественного рождения пионов в области энергий ВЭПП-2М до 1.4 ГэВ с помощью криогенного магнитного детектора будут продолжены. уже набрана экспериментальная статистика в интервале 1.10-1.35 ГэВ с большим в десять раз интегралом светимости. при этом удалось существенно улучшить фоновые условия и провести эксперимент с максимальным магнитным полем детектора.

В заключении авторы считают своим приятным долгом поблагодарить коллектив комплекса ВЭПП-2М, обеспечившим работу комплекса совместно с детектором, а также Ю.Н.Пестова, В.П.Смахтина и С.И.Эйдельмана за полезные обсуждения и замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. *G.Cosme et al.*, Phys. Lett. 63B (1976) 349
2. *G.Cosme et al.*, Nucl. Phys. 152B (1979) 215
3. *A.Cordiart et al.*, Phys.Lett. 81B (1979) 389
4. *A.Cordiart et al.*, Phys.Lett. 106B (1979) 155
5. *V.A.Sidorov et al.*, International simposium on lepton and photon interaction at high energies, Batavia, USA, 1979.
6. *B.Esposito et al.*, Lett.Nuovo Cimento 25 (1979) 5
7. *B.Esposito et al.*, Lett.Nuovo Cimento 28(1980)195
8. *C.Vacci et al.*, Phys. Lett. 95B (1980) 139
9. *Г.М.Тумайкин*. Материалы 10 международной конференции по ускорителям высоких энергий, Серпухов, 1977, Том 1, стр.443.
10. *Л.М.Барков и др.*, Препринт ИЯФ 76-121, Новосибирск, 1976
L.M.Barkov et al., Nucl.Instr.Meth. (1982)
11. *Л.М.Барков и др.* Материалы международного совещания по методике проволочных камер, ОИЯИ, D13-11807, Дубна, 1978
12. *Л.М.Барков и др.* Препринт ИЯФ 79-93, Новосибирск, 1979
13. *С.И.Эйдельман*. Письма в ЖЭТФ 26 (1977) 563
14. *Л.М.Барков, Б.А.Никольский*, УФН, 61 (1957) 313
15. *K.Nakai et al.* Phis.Rev.Lett., 44 (1980) 1446
16. *D.Ashery et al.*, Phis.Rev. 23C (1981) 2173
17. *J.D.Jackson and D.L.Scharre*, Nucl. Inst. Meth. 128 (1975)

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ:

- Рис.1 Фотография многотрекового события.
- Рис.2 А-распределение многотрековых событий по параметру ΔR . Стрелкой указана поставленная граница. В-распределение многотрековых событий по среднеквадратичному отклонению измеренных точек трека от проведенных траекторий.
- Рис.3 А-квадрат недостающей массы для событий с четырьмя треками. В-квадрат недостающей массы для событий с тремя треками. Плавная кривая-расчет с учетом разрешения КМД и радпоправок.
- Рис.4 А-инвариантная масса двух пионов разного знака. В-инвариантная масса двух пионов одного знака. С-инвариантная масса трех пионов. Сплошной линией показано предсказание модели рождения четырех пионов через промежуточное состояние.
- Рис.5 Распределение событий по углу между треками зарегистрированных частиц. А- частицы разного знака, В- частицы одного знака. Сплошной линией показаны результаты моделирования.
- Рис.6 Распределение событий по Z-координате точки пересечения траекторий с внешним запускаяющим счетчиком. А- для зарегистрированных частиц, В- для не зарегистрированных частиц. Сплошной линией показаны результаты моделирования.
- Рис.7 Распределение событий по числу искр на треках. А- события с четырьмя зарегистрированными треками. В- события с четырьмя треками в пределах телесного угла КМД. С- события с тремя треками.
- Рис.8 Сечение рождения четырех заряженных пионов в области 0.9-2.2 ГэВ

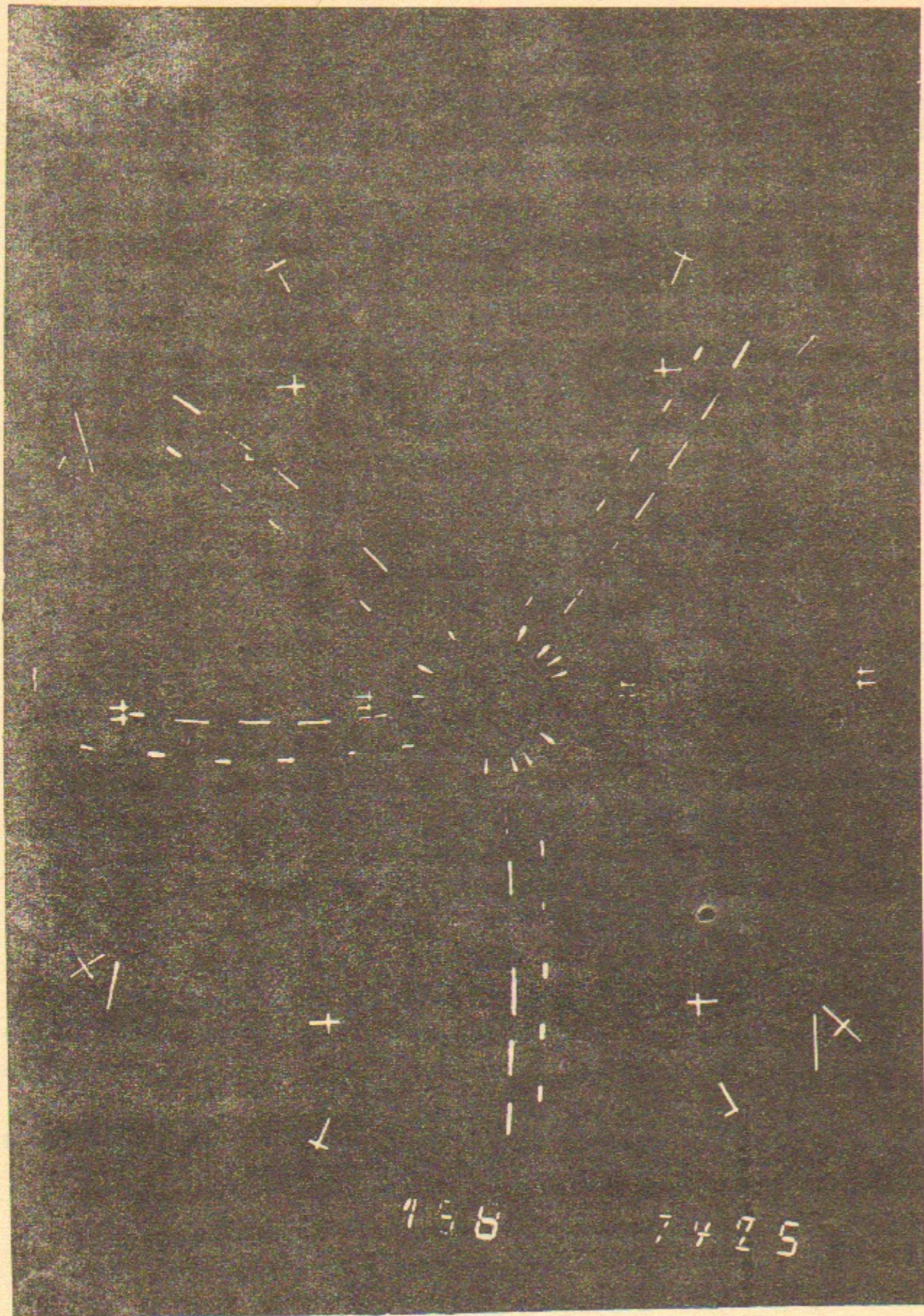


Рис. 1

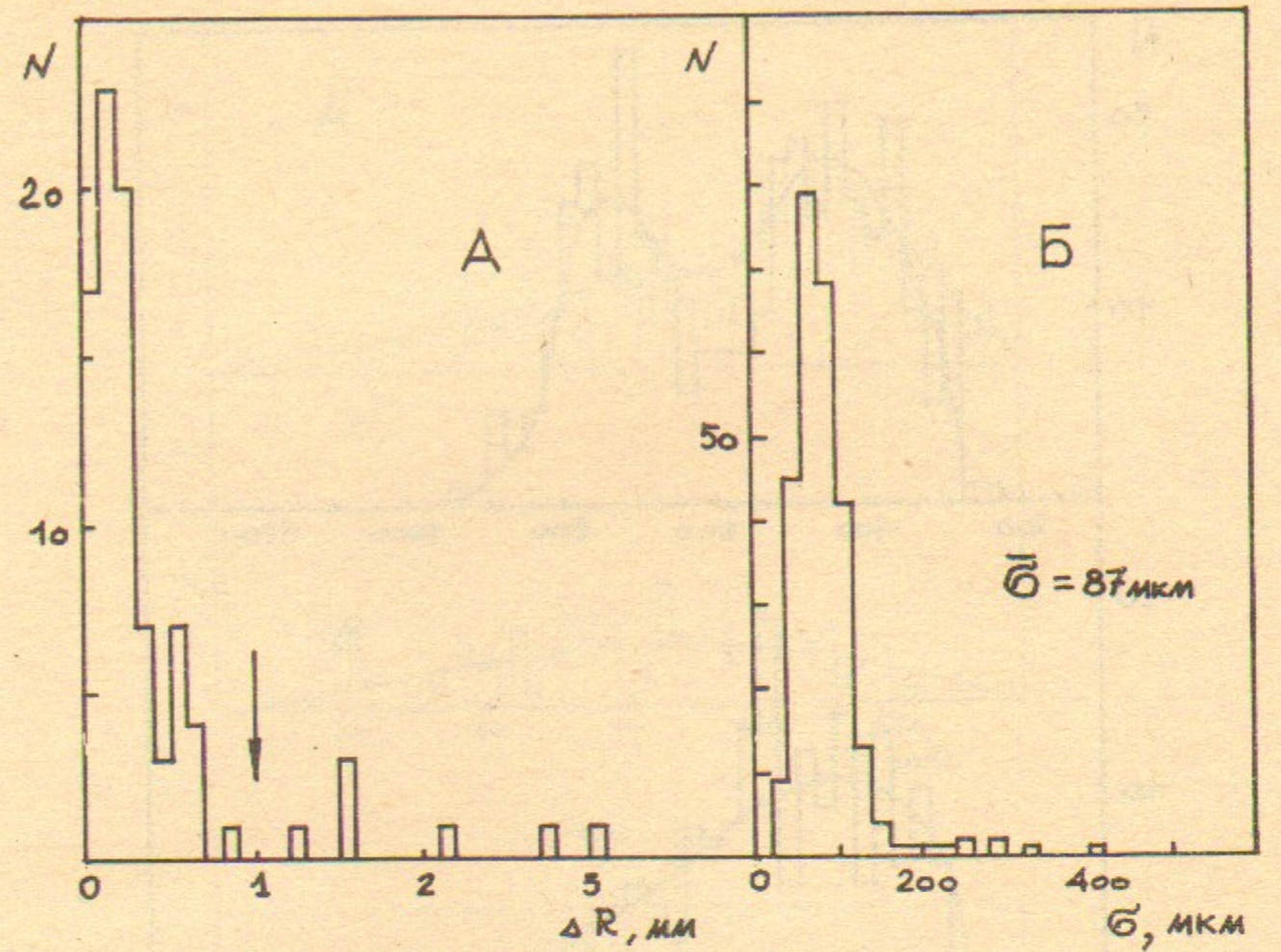


Рис. 2

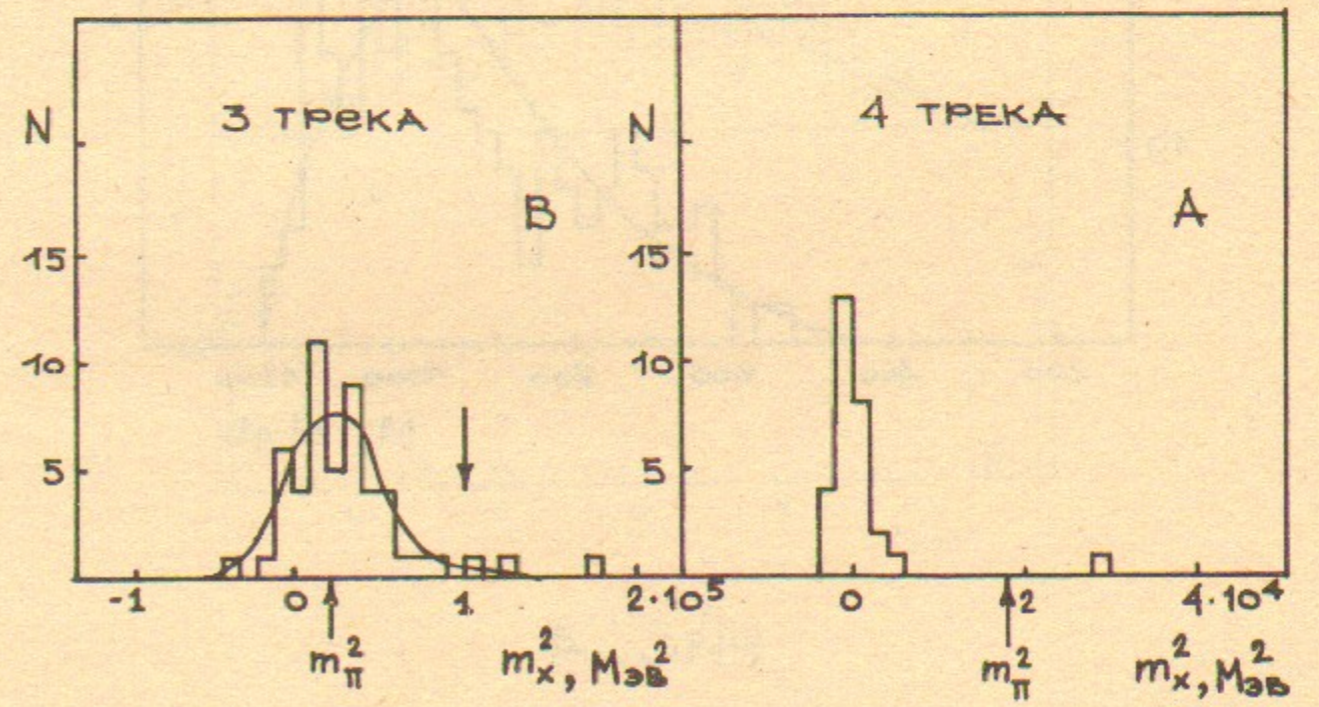


Рис. 3

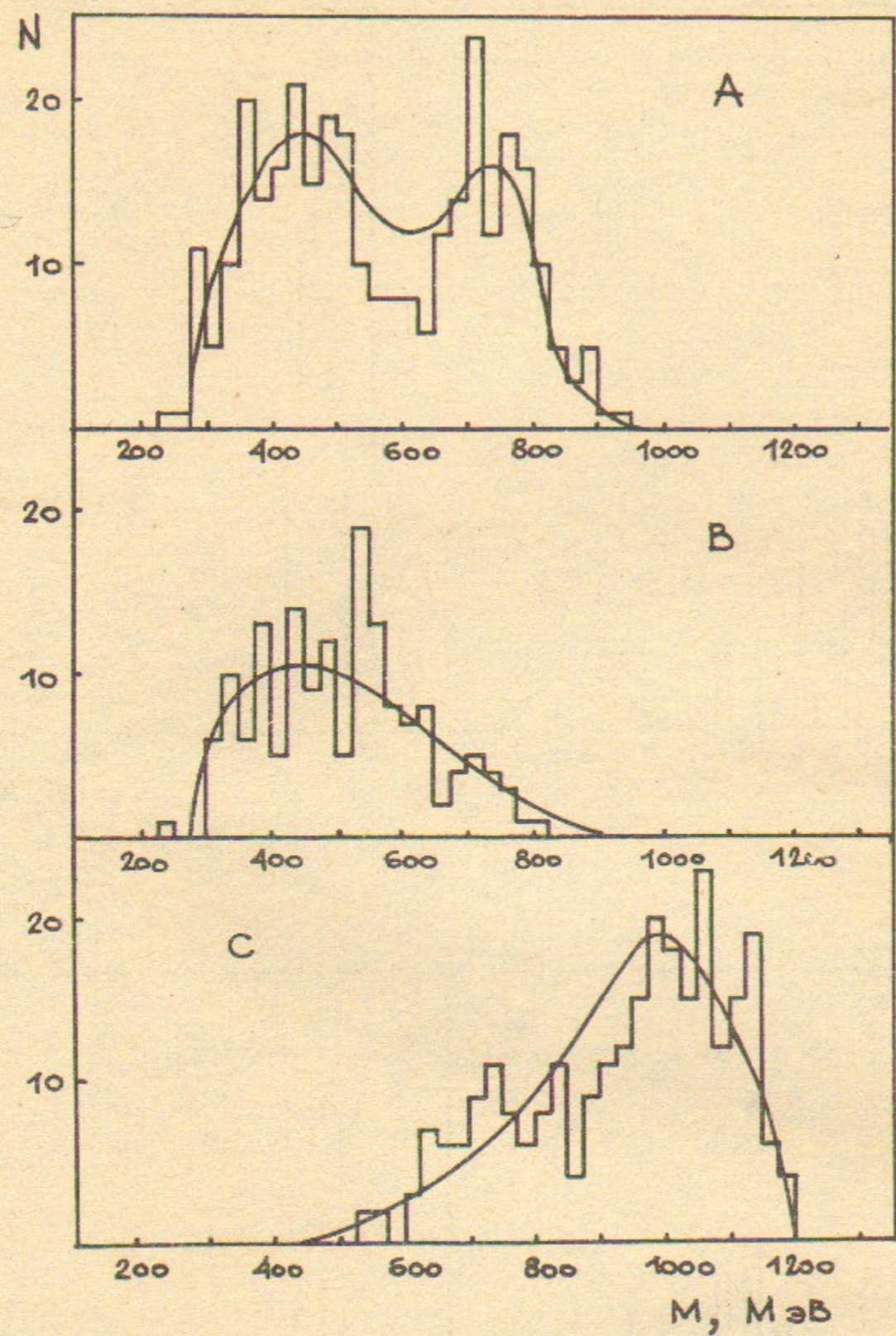


РИС. 4.

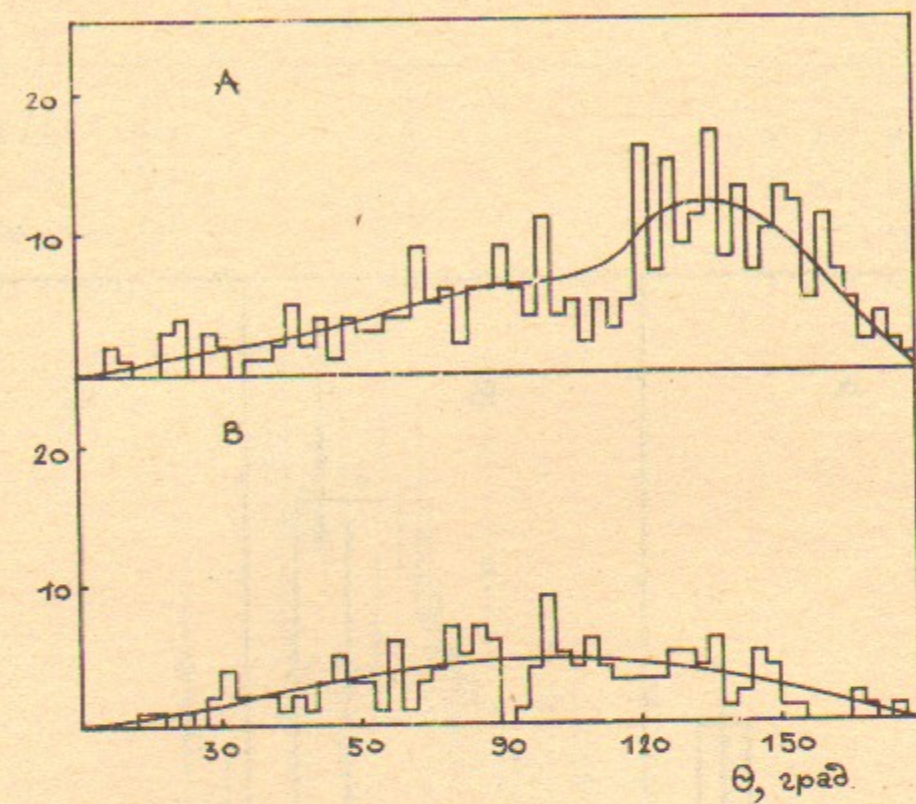


РИС. 5

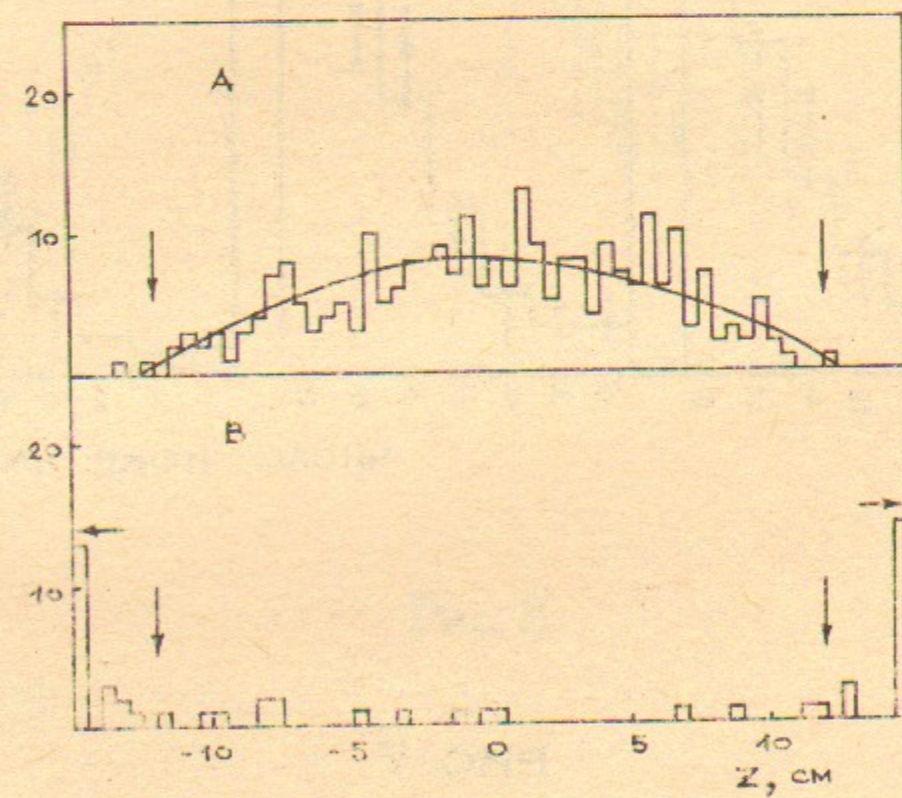


РИС. 6

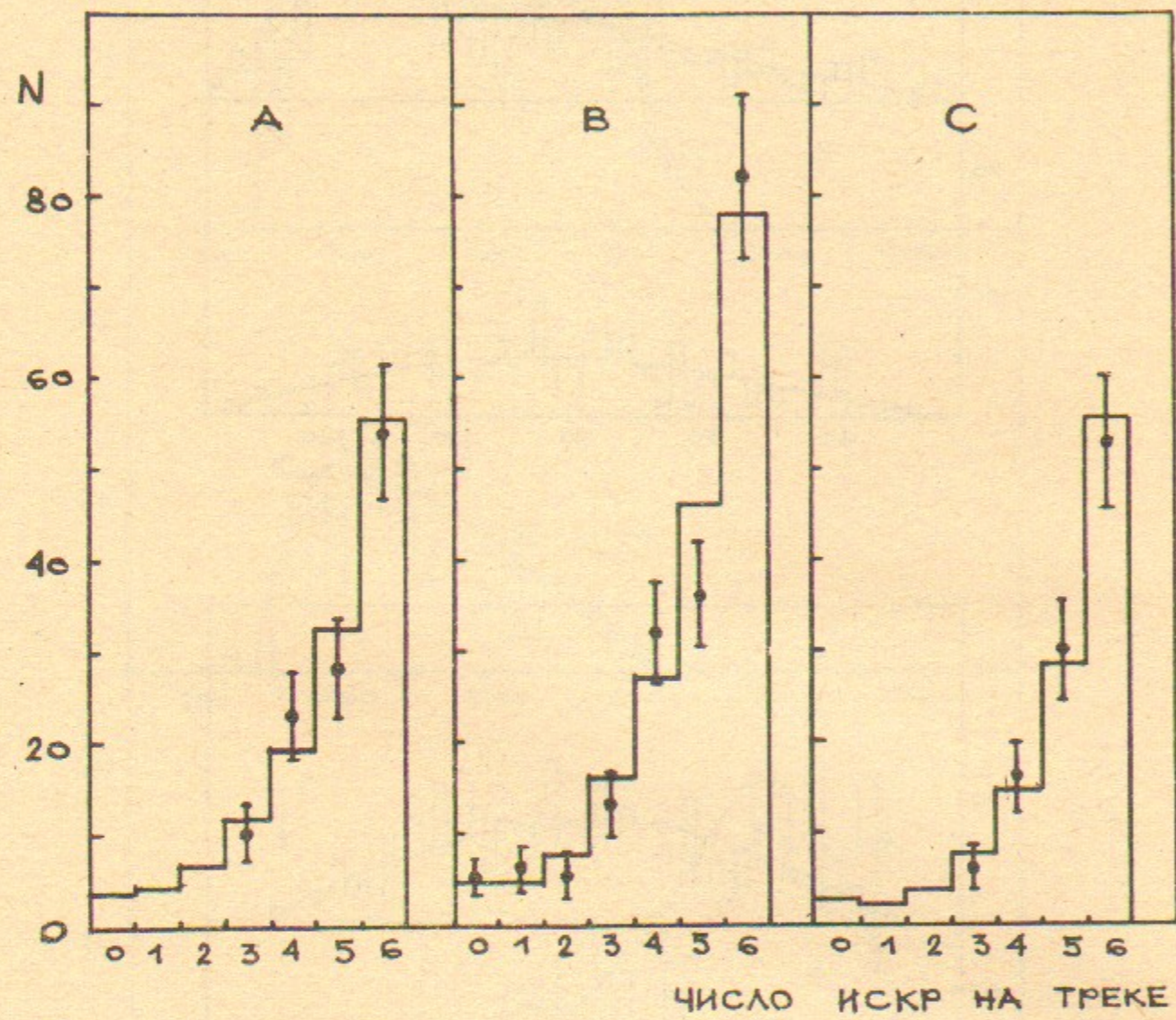


Рис. 7

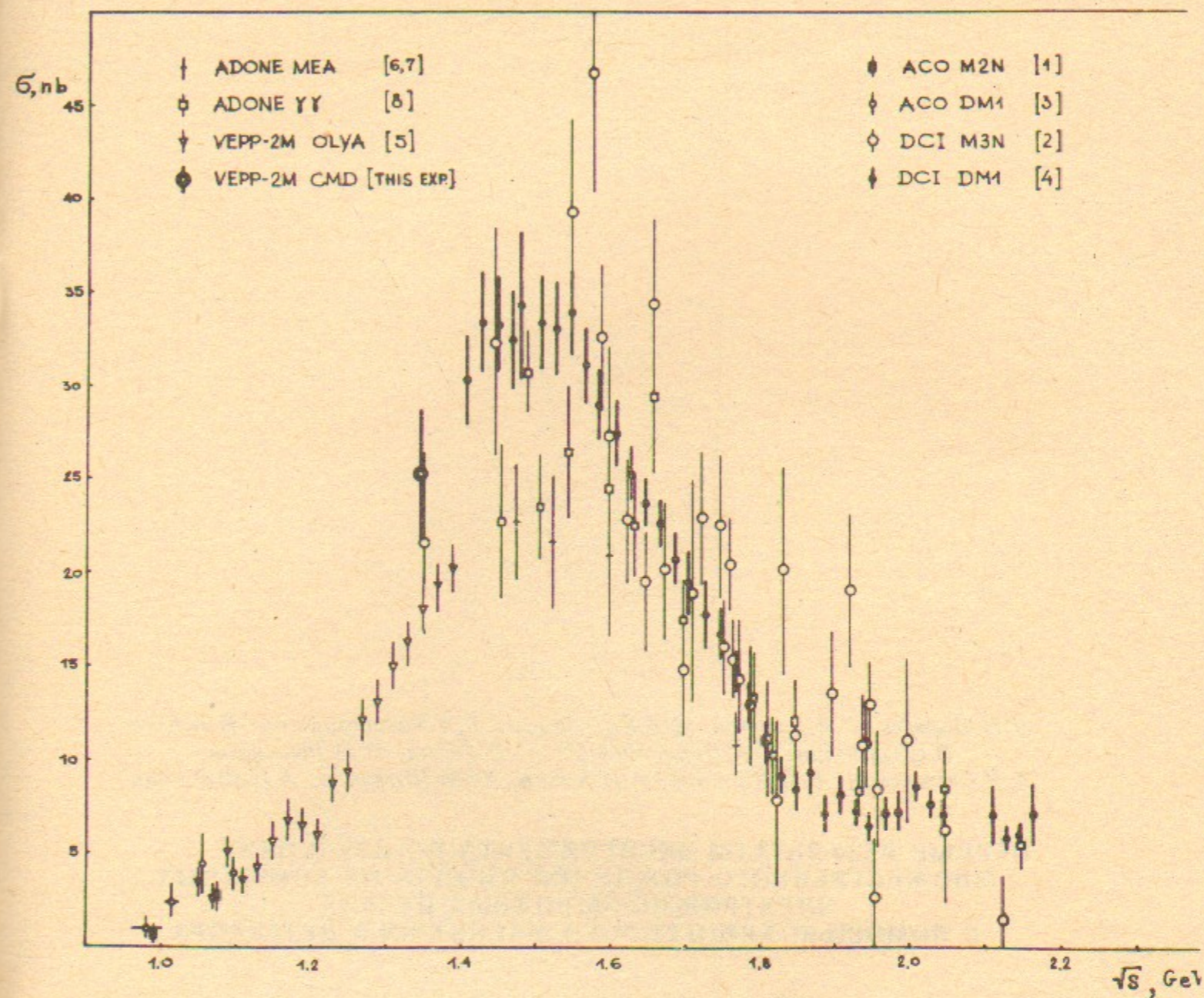


Рис. 8