

0-361

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна



P1 - 3399

К.О. Оганесян

ОБРАЗОВАНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ПИОНОВ
ПРИ СОУДАРЕНИЯХ НЕЙТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ
600 МЭВ С ЯДРАМИ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1967.

P1 - 3399

К.О. Оганесян

ОБРАЗОВАНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ПИОНОВ
ПРИ СОУДАРЕНИЯХ НЕЙТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ
600 МЭВ С ЯДРАМИ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

Направлено в ЖЭТФ



5212/2 мр.

1. В в е д е н и е

Наряду с изучением процессов рождения мезонов в нуклон-нуклонных соударениях большой интерес представляет исследование образования пионов при столкновениях нуклонов с ядрами. Относительно большие сечения образования мезонов и простота в изготовлении мишеней позволяют в исследованиях по рождению мезонов на ядрах получать много информации о рождении пионов в элементарных актах и проверить некоторые следствия гипотезы зарядовой независимости. Кроме того, пионы, рожденные на ядрах, могут служить эффективным средством для исследования строения ядра, в частности, таких его характеристик, как пространственное и импульсное распределение нуклонов в ядрах.

Рождению пионов на сложных ядрах при бомбардировке их протонами посвящено значительное количество экспериментальных работ. В области энергий протонов 600–700 Мэв основные результаты получены в исследованиях на синхротроне Объединенного института ядерных исследований. Однако следует отметить, что имеющиеся результаты получены в ограниченном интервале углов, что затрудняет полный анализ характеристик процессов образования пионов на сложных ядрах.

Эксперименты по образованию заряженных пионов при взаимодействии нейтронов с ядрами практически не производились. Здесь следует подчеркнуть, что опыты по образованию заряженных мезонов в соударениях нейтронов с ядрами не являются простым повторением зарядовосимметричных опытов с протонами, а позволяют получить во взаимном сопоставлении новую информацию о процессах, протекающих при взаимодействии пионов с ядерным веществом.

Анализ результатов взаимодействия нейтронов с ядрами позволяет проверить ряд предположений о роли тех или иных ядерных процессов, которые вводятся для объяснения наблюдаемых характеристик рождения пионов в $(p+\text{ядро})$ -соударениях. К числу таких эффектов можно отнести: влияние неравномерности

плотности распределения нейтронов и протонов на поверхности ядра, перезарядка пионов, роль кулоновского барьера, принципа Паули и др.

В настоящей работе в широком интервале углов изучалось образование заряженных пионов в соударениях нейтронов с ядрами с помощью магнитного спектрометра^{х)}. Исследования проводились на ядрах Be^9 , C^{12} , Al^{27} , Si^{64} и Pb^{207} на нейтронном пучке синхротрона ОИЯИ. Проведенные измерения, когда в одних и тех же условиях и с помощью одной и той же методики получены энергетические спектры, угловые распределения и зависимости выхода пионов от атомного номера ядра, дают возможность на основании сопоставления всей совокупности результатов получить достаточно полную картину процессов, связанных с рождением пионов на сложных ядрах.

П. Эксперимент

Измерения производились на 18-канальном магнитном спектрометре, описание и расчет основных характеристик которого даны в работе^{/1/}. Пучок нейтронов от синхротрона бомбардировал мишени из исследуемых элементов, располагающиеся на оси вращения спектрометра. Пионы обоих знаков, генерированные в мишенях, анализировались спектрометром под пятью углами: 16° , 30° , 60° , 90° и 123° по отношению к нейтронному пучку. Напряженность магнитного поля спектрометра под каждым из углов подбиралась таким образом, чтобы могли регистрироваться пионы с максимально возможными в нуклон-нуклонных соударениях импульсами. При таком выборе поля лишь незначительная часть со стороны высоких энергий из спектров пионов на сложных ядрах не детектировалась спектрометром. Нижняя граница энергий регистрируемых пионов определялась потерями энергии при прохождении пионов через мишень и счетчики спектрометра и составляла ~ 25 Мэв.

Спектр нейтронов имеет широкое энергетическое распределение. Вопросы об эффективной энергии нейтронов и интерпретации результатов при исследованиях на данном пучке также обсуждены в работе^{/1/}. Слабая зависимость значения эффективной энергии от функции возбуждения образования пионов позволяет отнести результаты, как и в^{/1/}, к определенной эффективной энергии нейтронов ~ 600 Мэв.

^{х)} Эксперимент был выполнен в 1962 г., но по ряду обстоятельств обработка результатов и их анализ задержались и были произведены лишь в последнее время.

Мишени были изготовлены в виде прямоугольных пластин, толщины которых были выбраны для всех образцов с близкими величинами ионизационных потерь для пионов.

Фон без мишеней был незначительным, не превышая в самых худших условиях (измерения π^+ -мезонов под малыми углами) нескольких процентов, и был связан в основном с системой крепления мишеней в пучке.

В результаты измерений вносился ряд поправок, наиболее существенной из которых являлась поправка на примесь электронов и позитронов.

Примесь бета-частиц определялась по такой же схеме, как и в /1/. Абсолютная нормировка выхода электронов производилась экспериментально. Для определения же формы энергетического спектра и угловых распределений электронов использовались данные по образованию γ -квантов при взаимодействии протонов с ядрами /2-4/.

В таблице 1 приведены усредненные по всем углам результаты расчета примеси электронов и позитронов в процентах к числу пионов.

Т а б л и ц а 1

	Be	C	Al	Cu	Pb
e^+ / π^+	22%	23%	25%	33%	70%
e^- / π^-	3,5%	3,8%	4,7%	6,0%	10%

Электроны и позитроны, источником которых являются γ -кванты от распада π^0 -мезонов, образуются практически в равных количествах (комpton-эффект на ядрах дает ничтожный вклад). Выход же π^+ -мезонов при взаимодействии нейтронов с ядрами в несколько раз превышает выход π^+ -мезонов. Поэтому позитроны с ядрами в несколько раз превышает выход π^+ -мезонов. Поэтому позитроны вносят значительно больший вклад в спектр π^+ -мезонов, чем электроны в спектр π^- -мезонов. В результате этого точность измерений спектров в области малых энергий для π^- -мезонов оказывается значительно лучшей.

Почти вся примесь электронов и позитронов определяется конверсией γ -квантов в самих мишенях. При переходе к более тяжелым ядрам толщины выбранных мишеней, выраженные в радиационных длинах, растут и соответственно увеличивается примесь электронов и позитронов.

Как видно из таблицы 1, примесь позитронов особенно велика для ядер Ca и Pb . Это приводит к большим ошибкам в спектрах π^+ -мезонов, практически исключая из рассмотрения их низкоэнергетические части, поскольку основная часть спектров электронов накладывается на область малых энергий.

В результаты измерений кроме поправок на электроны вводились расчетные поправки на распад пионов, на примесь мюонов, на поглощение пионов в протонном фильтре.

Для определения абсолютной величины сечений производилось сравнение выхода пионов с выходом протонов отдачи от упругого ($p-p$)-рассеяния, дифференциальное сечение которого измерено в работе Казаринова и Симонова^{/5/}. Выход упруго рассеянных протонов определялся в разностных измерениях с полиэтиленом и графитом под углом 80° .

Дифференциальные сечения упругого ($p-p$)-рассеяния в^{/5/} измерялись на том же пучке нейтронов с отсечкой по спектру нейтронов со стороны низких энергий 450 Мэв. Поэтому при выбранном способе нормировки сечений необходимо вводить поправку на часть пионов, которые образуются нейтронами с энергиями, меньшими 450 Мэв. Величина этой поправки для сложных ядер существенно превышает соответствующую поправку для образования пионов в ($p-p$)-соударениях. Это связано с тем, что порог образования мезонов на ядрах сдвинут в сторону меньших энергий. Кроме того, из-за разницы механизмов образования π^+ - и π^- -мезонов (π^+ -мезоны образуются в соударениях нейтронов с протонами ядер, а большая часть π^- -мезонов образуется в ($p-n$)-соударениях) величины рассматриваемых поправок для π^+ - и π^- -мезонов должны различаться.

Для определения этих поправок были построены функции возбуждения образования заряженных пионов и соответствующие им эффективные спектры нейтронов на основании имеющихся данных по взаимодействию протонов с ядрами^{/6/}. При этом из-за ограниченности экспериментальных данных было сделано достаточно точное для наших целей предположение о том, что относительное количество пионов, образуемых нейтронами с энергиями, меньшими 450 Мэв, к полному числу пионов от всего спектра нейтронов одинаково для всех исследуемых ядер. Найденные величины поправок составляют 8% сечения для π^+ -мезонов и 12% - для π^- -мезонов.

III. Результаты измерений

Результаты измерений спектров заряженных пионов, полученные после внесения всех поправок, представлены на рис. 1-10. На рисунках изображены спектры пионов для всех пяти исследованных элементов под каждым из пяти углов измерений. На рис. 1-5 даны результаты для π^+ -мезонов, на рис. 6-10 - для π^- -мезонов.

Как указывалось выше, из-за больших величин сечений точность измерений спектров π^- -мезонов выше, чем для π^+ -мезонов. Учет примеси электронов приводит к возрастанию ошибок в спектрах пионов обоих знаков в области низких энергий. Неточность особенно велика для спектров π^+ -мезонов на ядрах свинца.

Выбранные значения величины магнитного поля позволяли под каждым из углов измерять подавляющую часть спектров пионов за исключением "хвостов" в области больших энергий. Для того чтобы проследить за формой спектров до максимальных энергий пионов, были проведены измерения с большими, чем при основных измерениях значениями магнитного поля. Одновременно с уточнением формы спектров эти измерения давали возможность контролировать работу различных каналов спектрометра. На рис. 11 и 12 нанесены результаты измерений для меди под углом 60° при трех значениях магнитного поля. Из рис. 11 видно, что спектр π^- -мезонов простирается почти до 300 Мэв. Для π^+ -мезонов (рис. 12) плохая статистическая точность не позволяет проследить спектр в области больших энергий.

В таблице 2 представлены дифференциальные сечения образования π^+ -мезонов, а в таблице 3 - π^- -мезонов, найденные в результате интегрирования по энергии спектров мезонов (рис. 1-10). Для сравнения приведены также данные для водорода^{1/}. Приведенные в таблицах 2 и 3 ошибки представляют ошибки относительных измерений.

При нормировке абсолютных значений дифференциальных сечений учтены мезоны, образуемые нейтронами с энергиями, меньшими 450 Мэв. Небольшой относительный вклад этих пионов (~10%) не влияет существенно на форму спектров (рис. 1-10) и приводит лишь к небольшому увеличению числа пионов низких энергий.

На рис. 13 и 14 представлены угловые распределения пионов от исследуемых ядер в системе центра масс двух сталкивающихся нуклонов. На этих

Таблица 2

П⁺-мезонн

однр	16°		30°		60°		90°		123°	
	$10^{-27} \frac{\text{см}^2}{\text{стерад}}$	относ. ед.	$10^{-27} \frac{\text{см}^2}{\text{стерад}}$	относ. ед.	$10^{-27} \frac{\text{см}^2}{\text{стерад}}$	относ. ед.	$10^{-27} \frac{\text{см}^2}{\text{стерад}}$	относ. ед.	$10^{-27} \frac{\text{см}^2}{\text{стерад}}$	относ. ед.
H	$0,45 \pm 0,03$	$0,295 \pm 0,019$	$0,29 \pm 0,02$	$0,256 \pm 0,020$	$0,135 \pm 0,012$	$0,227 \pm 0,020$	$0,06 \pm 0,003$	$0,158 \pm 0,009$	$0,032 \pm 0,003$	$0,091 \pm 0,009$
Be	$0,99 \pm 0,05$	$0,63 \pm 0,03$	$0,74 \pm 0,04$	$0,64 \pm 0,04$	$0,37 \pm 0,02$	$0,62 \pm 0,03$	$0,22 \pm 0,02$	$0,55 \pm 0,035$	$0,18 \pm 0,01$	$0,52 \pm 0,03$
C	$1,57 \pm 0,07$	$1,00 \pm 0,04$	$1,15 \pm 0,05$	$1,00 \pm 0,04$	$0,60 \pm 0,02$	$1,00 \pm 0,03$	$0,40 \pm 0,025$	$1,00 \pm 0,06$	$0,35 \pm 0,03$	$1,00 \pm 0,06$
Al	$2,97 \pm 0,16$	$1,89 \pm 0,20$	$2,12 \pm 0,08$	$1,84 \pm 0,07$	$1,19 \pm 0,05$	$1,98 \pm 0,11$	$0,75 \pm 0,04$	$1,88 \pm 0,11$	$0,64 \pm 0,05$	$1,83 \pm 0,14$
Ca	$3,76 \pm 0,24$	$2,39 \pm 0,15$	$2,98 \pm 0,15$	$2,59 \pm 0,13$	$1,73 \pm 0,12$	$2,88 \pm 0,20$	$1,05 \pm 0,08$	$2,63 \pm 0,20$	$1,30 \pm 0,10$	$3,71 \pm 0,30$
Pb	$4,90 \pm 0,70$	$3,12 \pm 0,40$	$4,32 \pm 0,50$	$3,74 \pm 0,40$	$2,36 \pm 0,23$	$3,94 \pm 0,30$	$1,66 \pm 0,15$	$4,16 \pm 0,41$	$2,02 \pm 0,20$	$5,76 \pm 0,60$

Таблица 3

П^π-мезоны

Ядро	16°		30°		60°		90°		123°	
	$10^{-27} \frac{\text{см}^2}{\text{стерад}}$	относ. ед.	$10^{-27} \frac{\text{см}^2}{\text{стерад}}$	относ. ед.	$10^{-27} \frac{\text{см}^2}{\text{стерад}}$	относ. ед.	$10^{-27} \frac{\text{см}^2}{\text{стерад}}$	относ. ед.	$10^{-27} \frac{\text{см}^2}{\text{стерад}}$	относ. ед.
H	0,49±0,03	0,051± ±0,003	0,33±0,02	0,044± ±0,003	0,138±0,008	0,038± ±0,003	0,058±0,003	0,024± ±0,001	0,030±0,003	0,015± ±0,002
Be	8,70±0,20	0,90± ±0,02	7,13±0,20	0,97± ±0,03	3,45±0,10	0,97± ±0,03	2,46±0,08	1,02± ±0,03	2,05±0,07	1,01± ±0,04
C	9,66±0,20	1,00± ±0,02	7,32±0,12	1,00± ±0,02	3,56±0,14	1,00± ±0,04	2,40±0,15	1,00± ±0,05	2,02±0,16	1,00± ±0,08
Al	15,1±0,3	1,56± ±0,04	12,7±0,3	1,74± ±0,04	6,55±0,14	1,83± ±0,04	4,40±0,10	1,83± ±0,03	3,52±0,10	1,74± ±0,05
Cu	21,1±0,4	2,18± ±0,04	18,2±0,4	2,49± ±0,05	10,0±0,03	2,80± ±0,09	6,55±0,20	2,83± ±0,07	6,30±0,20	3,12± ±0,20
Pb	37,3±4,0	3,86± ±0,41	33,7±1,8	4,60± ±0,20	19,6±1,0	5,50± ±0,28	13,1±0,7	5,46± ±0,25	12,4±1,2	6,14± ±0,60

рисунках также приведены угловые распределения для π^+ - и π^- -мезонов, образованных в (п-р) -соударениях^{/1/}. При этом дифференциальные сечения для π^- -мезонов от (п-р) -соударений на рис. 14 увеличены в 10 раз. Кривые проведены по экспериментальным точкам.

В результате интегрирования найденных угловых распределений получены значения полных сечений образования заряженных пионов на ядрах, которые представлены в таблице 4.

Зависимость сечения образования пионов от атомного номера ядра А представлена на рис. 15-17. На рис. 15 представлена зависимость от атомного номера дифференциальных сечений образования π^+ -мезонов под пятью углами измерений. На рис. 16 представлена аналогичная зависимость сечений образования π^- -мезонов. Относительная зависимость от А для полных сечений образования π^+ и π^- -мезонов (выход пионов на углероде принят за единицу) представлена на рис. 17. Здесь же приведена аналогичная зависимость для образования π^0 -мезонов при взаимодействии протонов с энергией 660 Мэв с ядрами, найденная Дунайцевым и Прокошкиным^{/4/}. На рис. 18 представлены угловые зависимости отношения выходов π^- к π^+ для всех исследованных ядер.

Т а б л и ц а 4

Ядро	σ^+		σ^-		$(A/12)^{2/3}$
	10^{-27} см^2	относ. ед.	10^{-27} см^2	относ. ед.	
H	$1,3 \pm 0,2$	$0,19 \pm 0,03$	$1,3 \pm 0,2$	$0,032 \pm 0,005$	-
Be	$4,01 \pm 0,23$	$0,58 \pm 0,03$	$40,2 \pm 1,6$	$0,98 \pm 0,04$	0,82
C	$6,9 \pm 0,4$	$1,00 \pm 0,06$	$41,0 \pm 2,0$	$1,00 \pm 0,05$	1,00
Al	$13,1 \pm 0,6$	$1,90 \pm 0,09$	$73,0 \pm 2,5$	$1,78 \pm 0,06$	1,71
Cu	$21,0 \pm 0,15$	$3,04 \pm 0,22$	115 ± 4	$2,81 \pm 0,10$	3,01
Pb	$29,7 \pm 3,0$	$4,31 \pm 0,43$	220 ± 23	$5,36 \pm 0,56$	6,66

Ввиду многочисленности результатов и выводов, которые можно сделать на основании полученного экспериментального материала, обсуждение данных настоящих опытов проводится в отдельной работе^{17/}.

Автор пользуется случаем выразить глубокую благодарность члену-корреспонденту АН СССР В.П. Желепову, без поддержки и постоянного внимания которого настоящая работа не могла бы быть выполнена. Автор также благодарит В.С. Киселева и В.Б. Флягина за помощь в измерениях и обсуждениях.

Л и т е р а т у р а

1. В.П. Желепов, В.С. Киселев, К.О. Оганесян, В.Б. Флягин. ЖЭТФ, 50, 1492 (1966).
2. М.С. Козодаев, А.А. Тяпкин, Ю.Д. Баюков, А.А. Марков, Ю.Д. Прокошкин. Изв. АН СССР, сер. физ. 19, 589 (1955).
3. Ю.Д. Баюков, М.С. Козодаев, А.А. Тяпкин. ЖЭТФ, 32, 667 (1957).
4. A. F. Dunaitzev, Yu. D. Prokoshkin, Nucl. Phys., 56, 300 (1964.).
5. Ю.М. Казаринов, Ю.Н. Симонов. ЖЭТФ, 31, 169 (1956).
6. E. Lilletun, Phys. Rev., 125, 665 (1962).
7. К.О. Оганесян. Препринт ОИЯИ Р1-3400, Дубна 1967.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 июня 1967 г.

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE} \cdot 10^{-30} \frac{\text{см}^2}{\text{стерад МэВ}}$$

$\pi^+ 16^\circ$

- \triangle Be
- \square C
- \blacksquare Al
- \diamond Cu
- \circ Pb

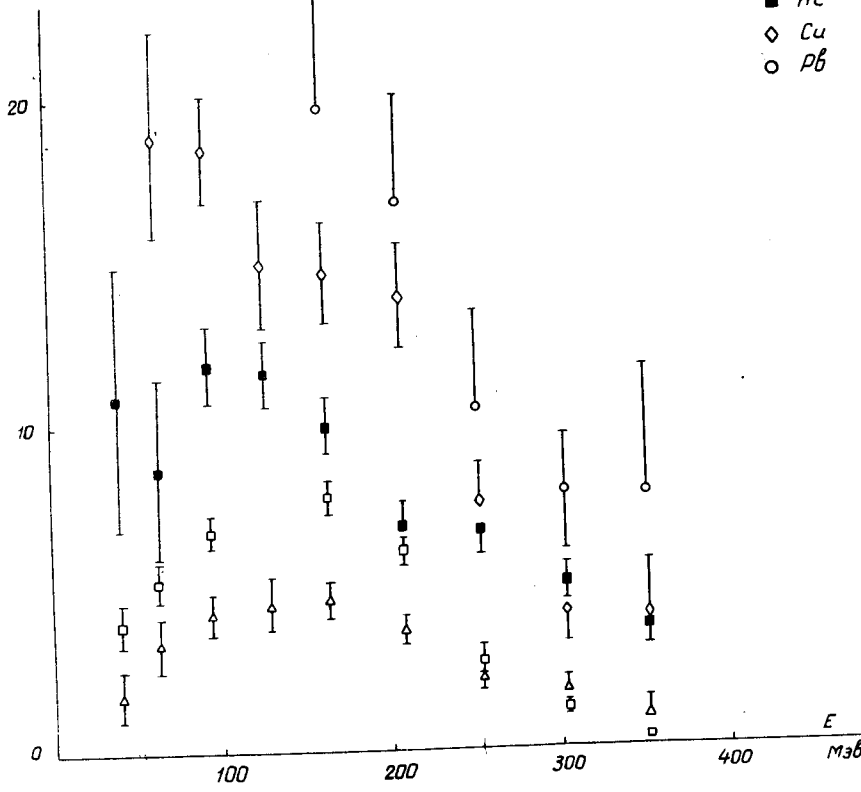


Рис. 1. Спектры π^+ -мезонов под углом 16° .

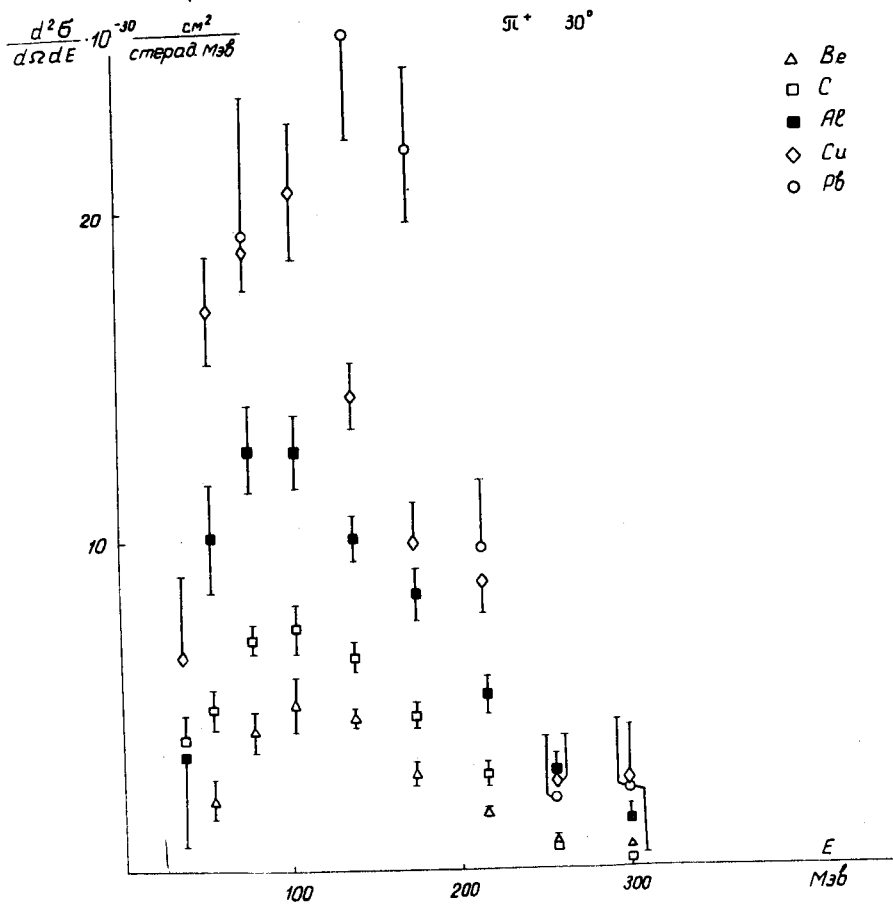


Рис. 2. Спектры π^+ -мезонов под углом 30° .

$$\frac{d^2 \sigma}{d\Omega dE} \cdot 10^{-30} \frac{\text{cm}^2}{\text{атом. МэВ}}$$

 $\pi^+ 60^\circ$

- \triangle Be
- \square C
- \blacksquare Al
- \diamond Cu
- \circ Pb

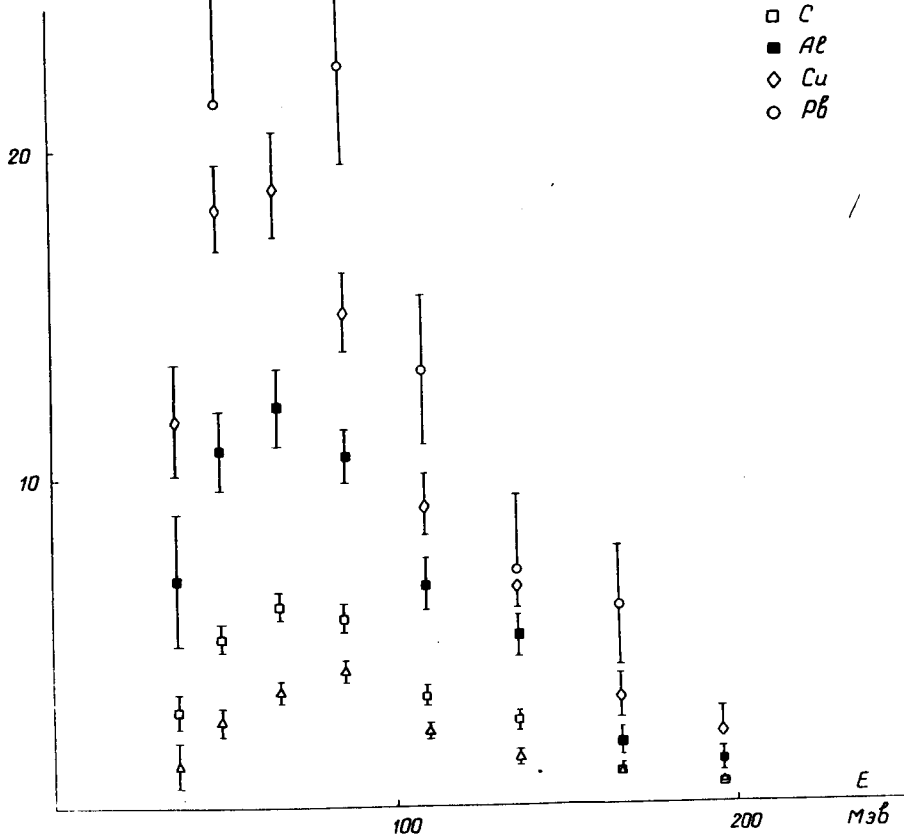


Рис. 3. Спектры π^+ -мезонов под углом 60° .

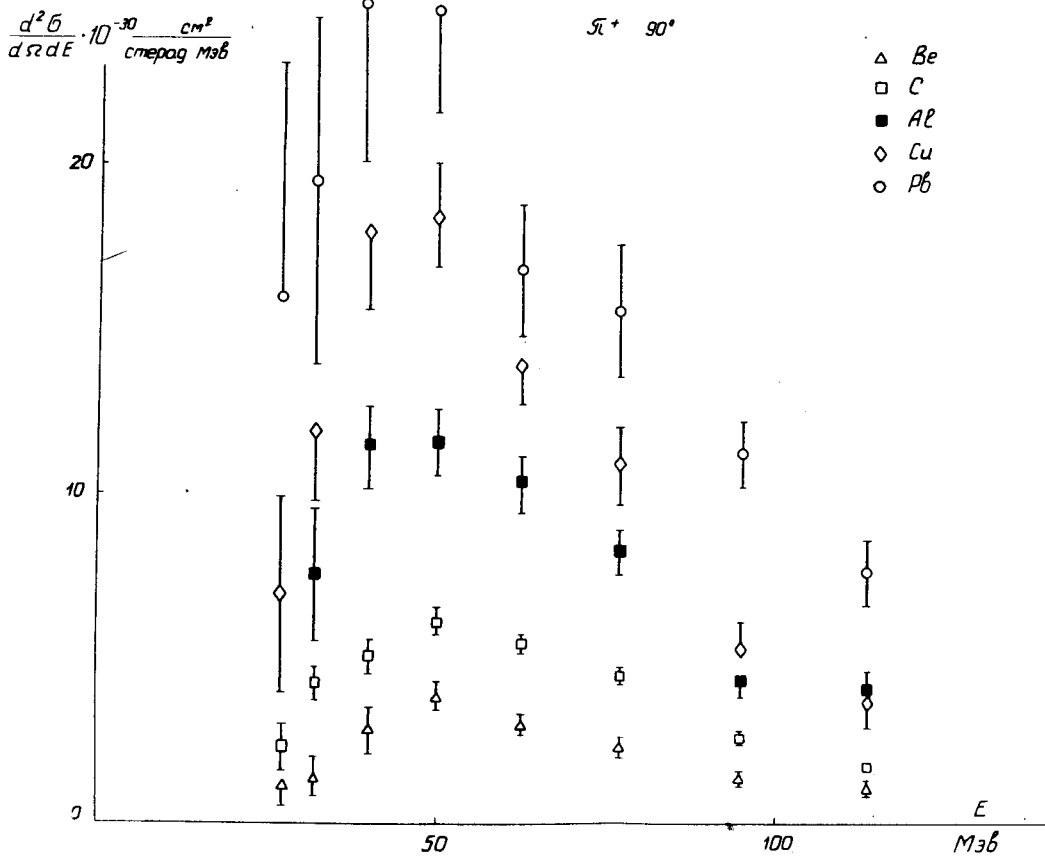


Рис. 4. Спектры π^+ - мезонов под углом 90° .

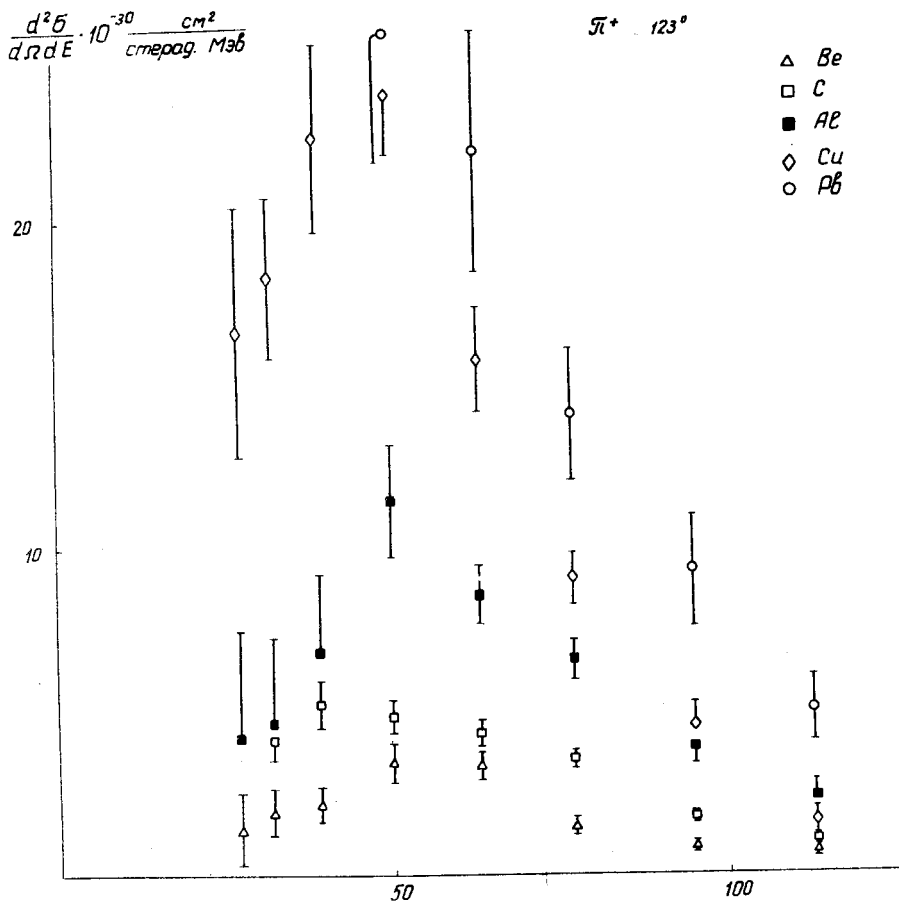


Рис. 5. Спектры π^+ -мезонов под углом 123° .

$$\frac{d^2 \sigma}{d\Omega dE} \cdot 10^{-30} \frac{\text{см}^2}{\text{стерад МэВ}}$$
 $\pi^- \quad 16^\circ$

- △ Be
- C
- Al
- ◇ Cu
- Pb

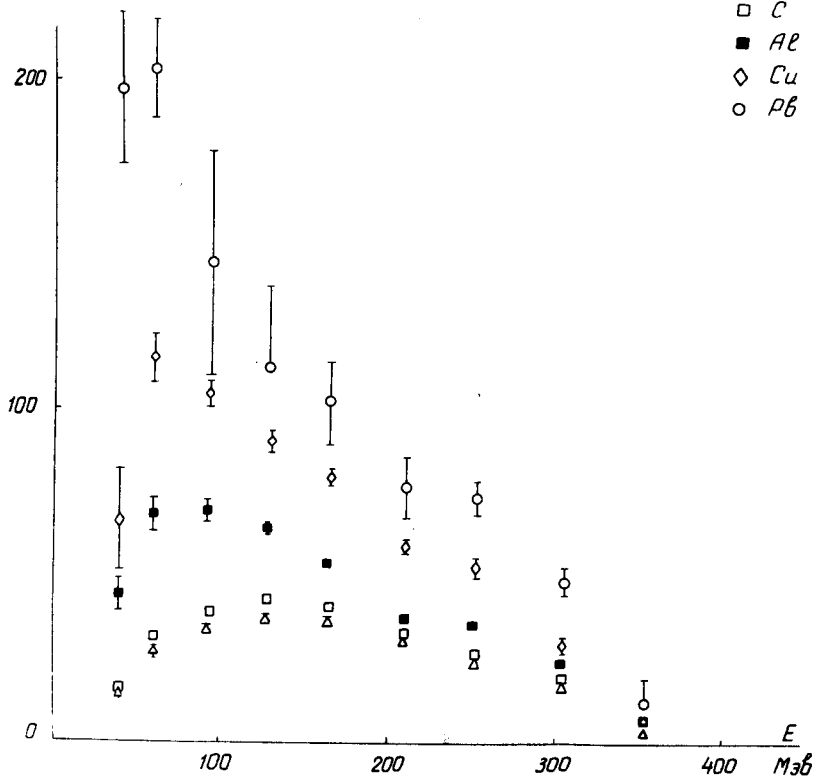


Рис. 6. Спектры π^- -мезонов под углом 16° .

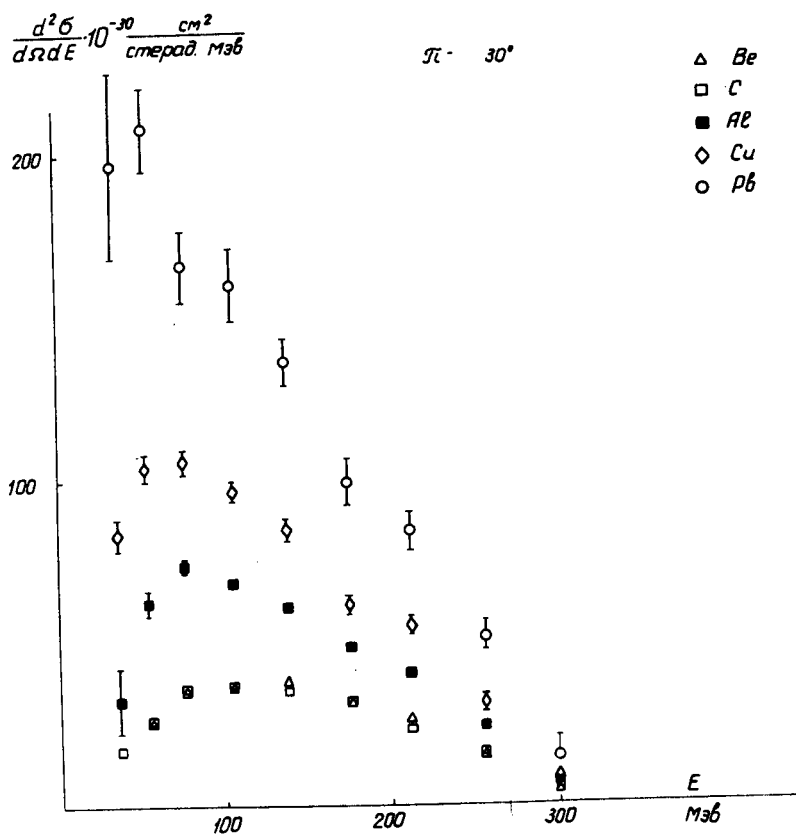


Рис. 7. Спектры π^- -мезонов под углом 30° .

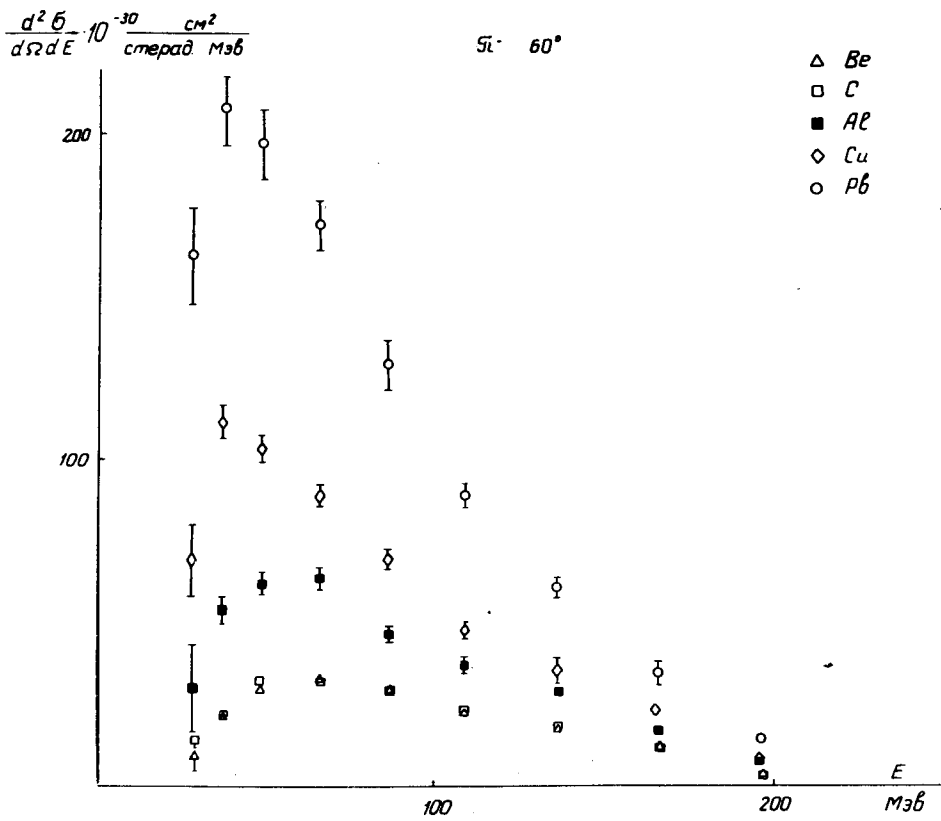


Рис. 8. Спектры π^- -мезонов под углом 60° .

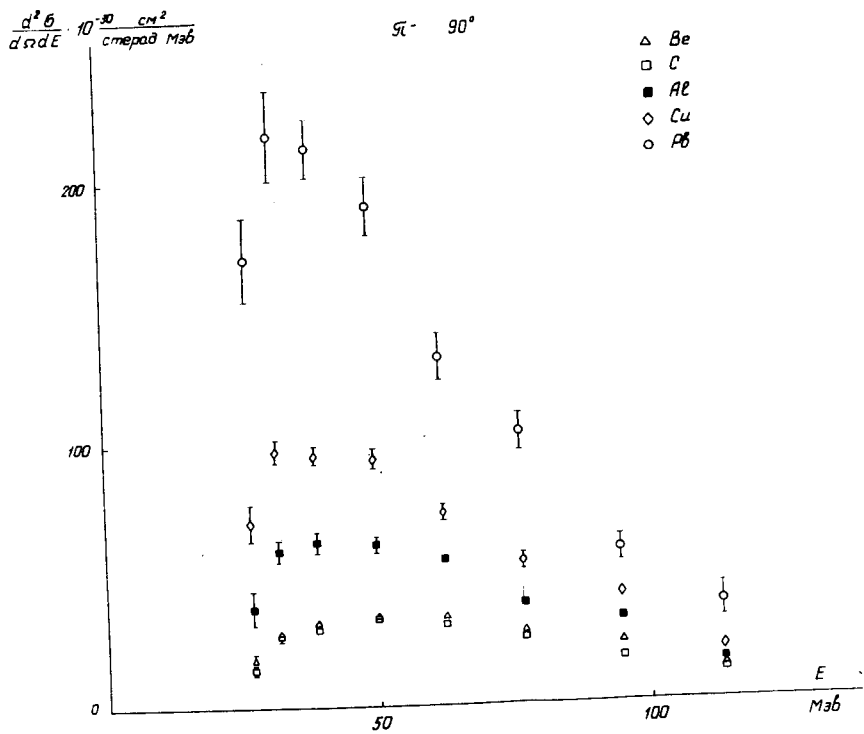


Рис. 9. Спектры π^- -мезонов под углом 90° .

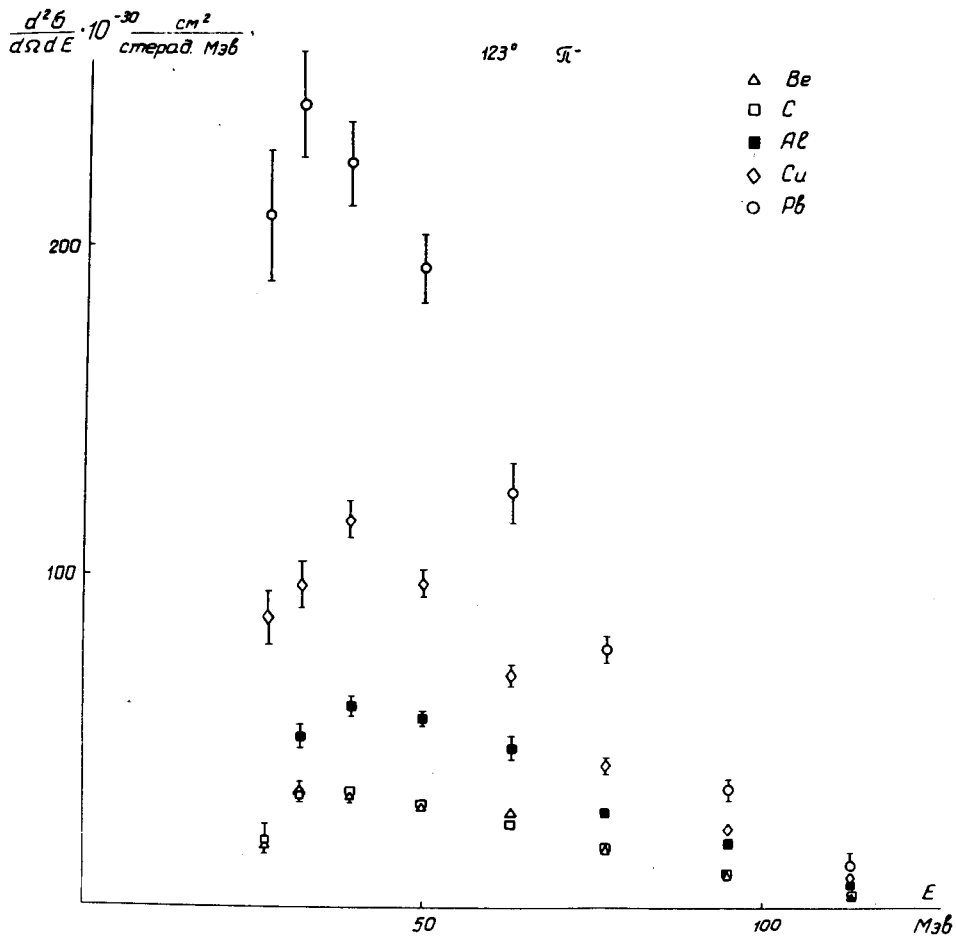


Рис. 10. Спектры π^- -мезонов под углом 123° .

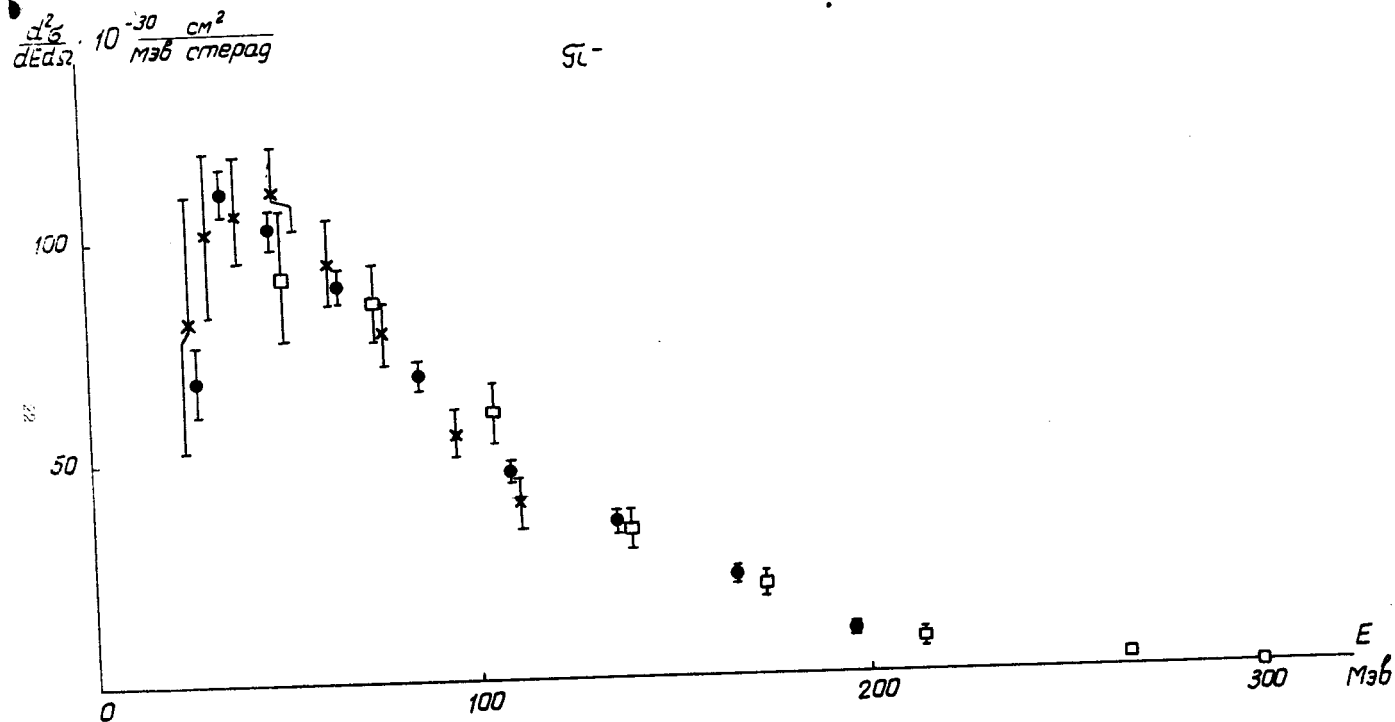


Рис. 11. Спектр μ^- -мезонов на ядре меди под углом 60° при разных значениях магнитного поля: x - 8000 э, ● - 12000 э, □ - 15000 э.

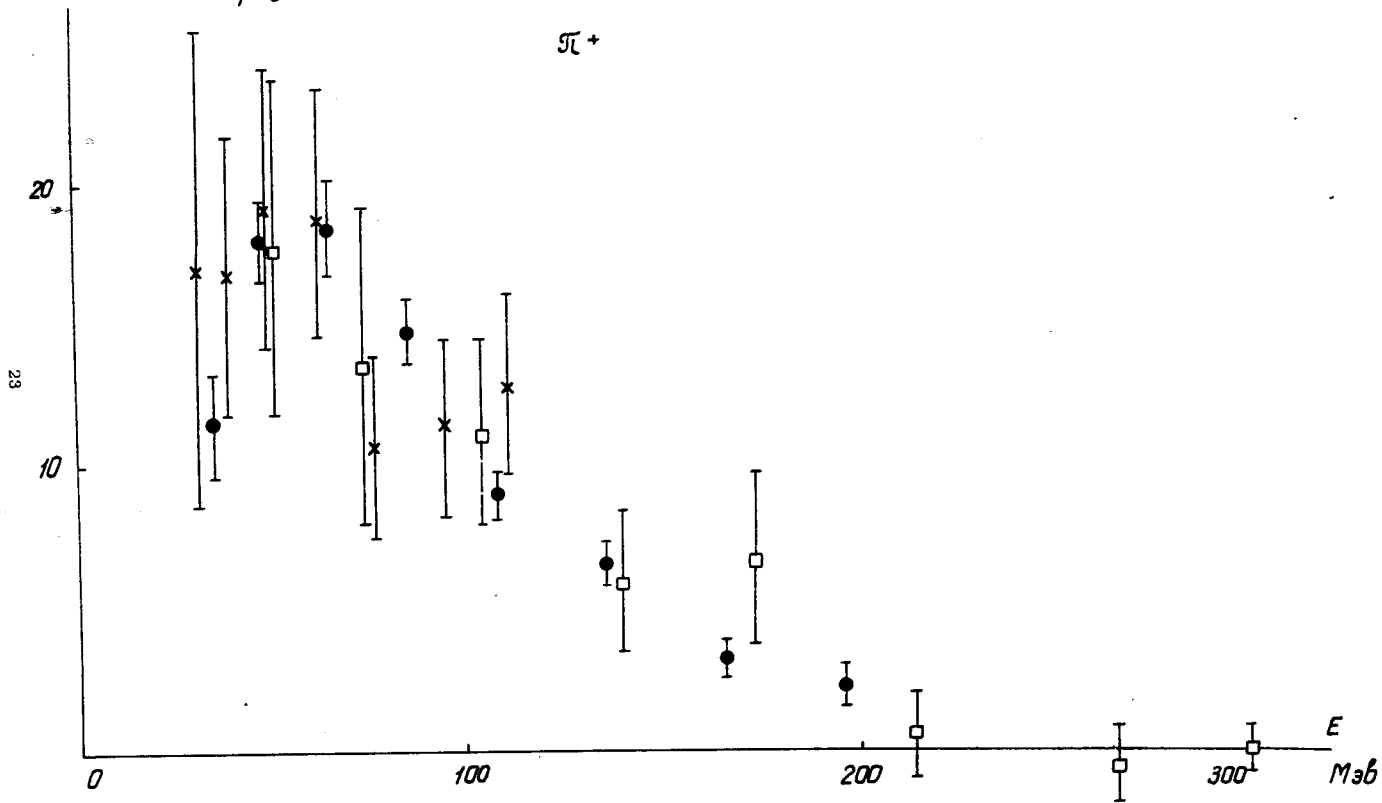
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot 10^{-30} \frac{\text{см}}{\text{МэВ стерад}}$$


Рис. 12. Спектр π^+ -мезонов на ядре меди под углом 60° при разных значениях магнитного поля: x - 8000 э, ● - 12000 э, □ - 15000 э.

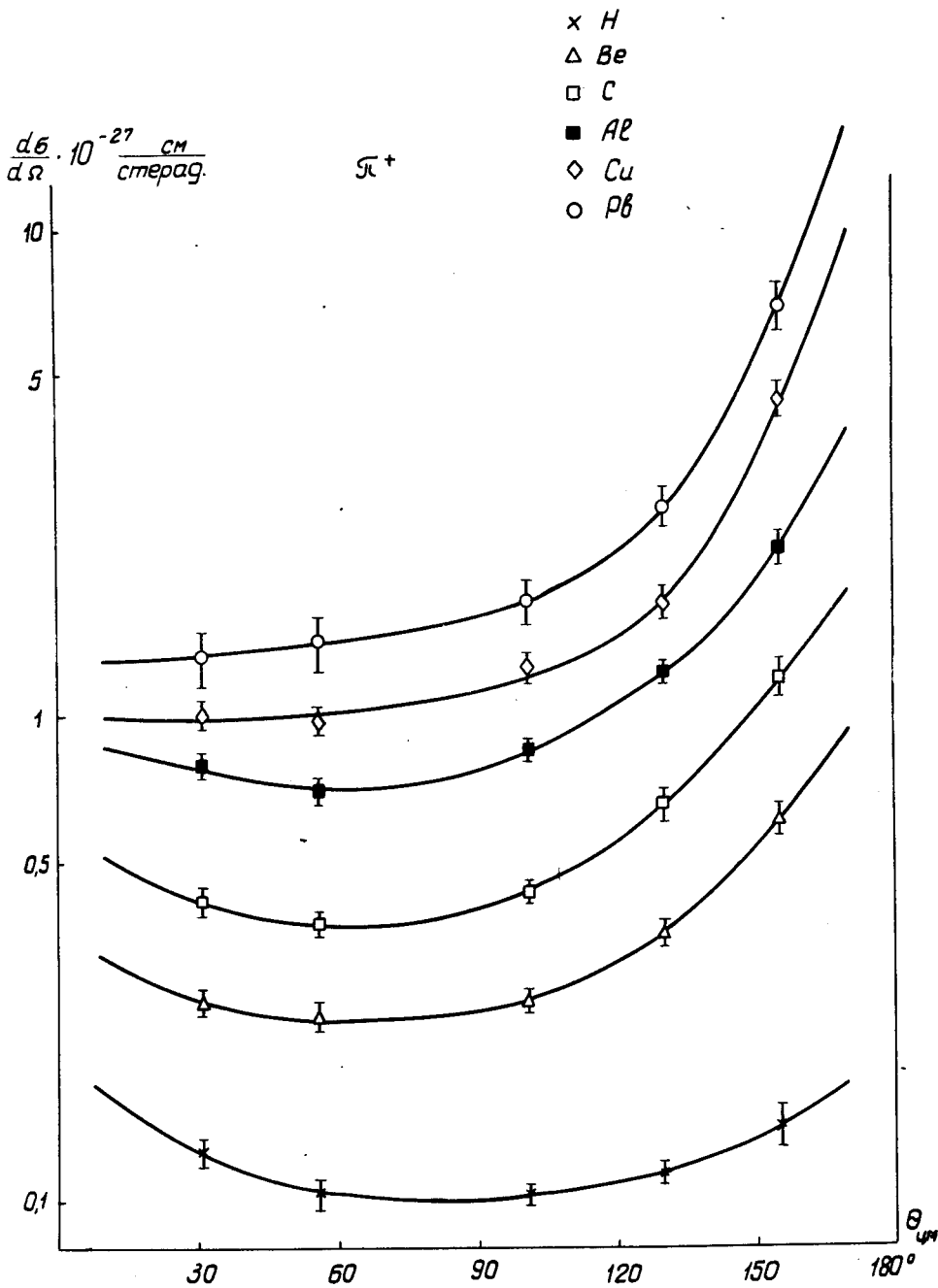


Рис. 13. Угловые распределения π^+ -мезонов в системе ц.м.

$$\frac{d\delta}{d\Omega} \cdot 10^{-27} \frac{\text{см}^2}{\text{стерад}}$$

ст⁻

- × H
- △ Be
- C
- Al
- ◇ Cu
- Pb

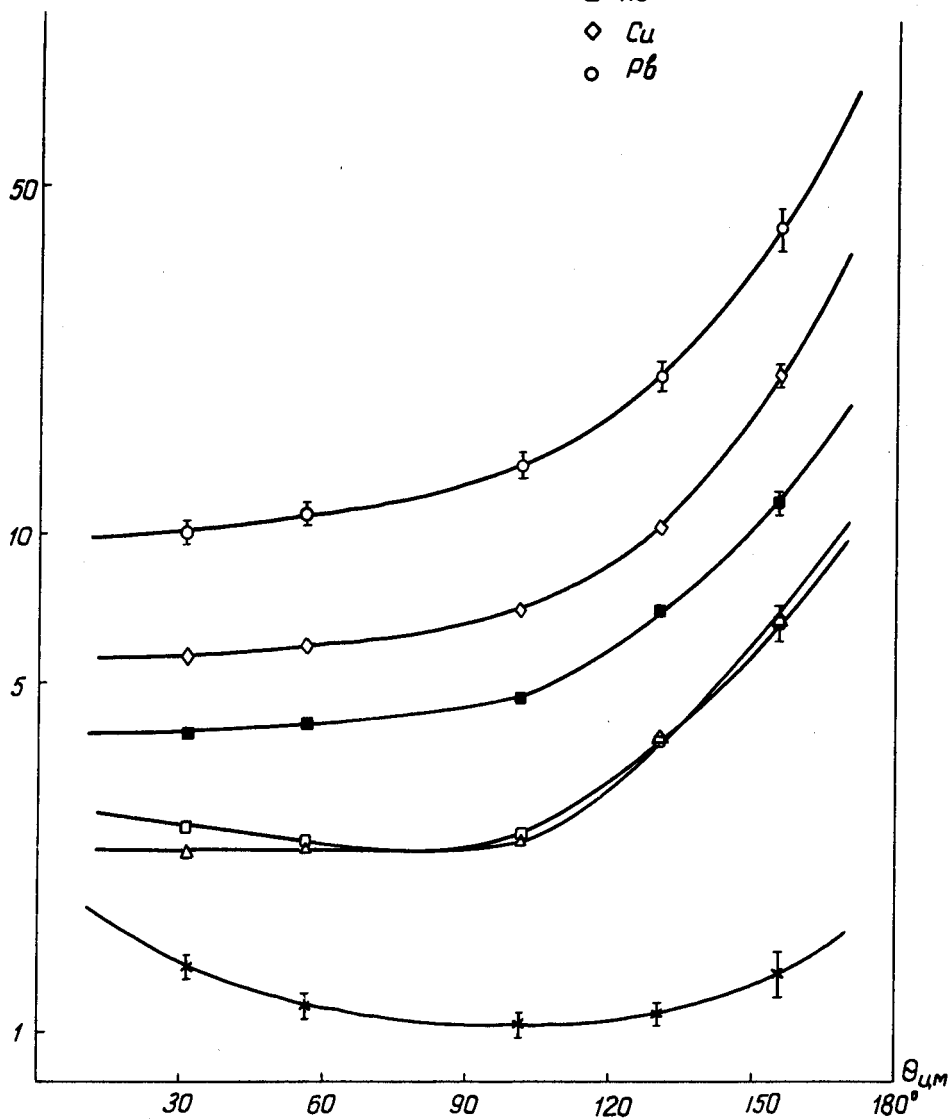


Рис.14. Угловые распределения π^- -мезонов в системе ц.м.

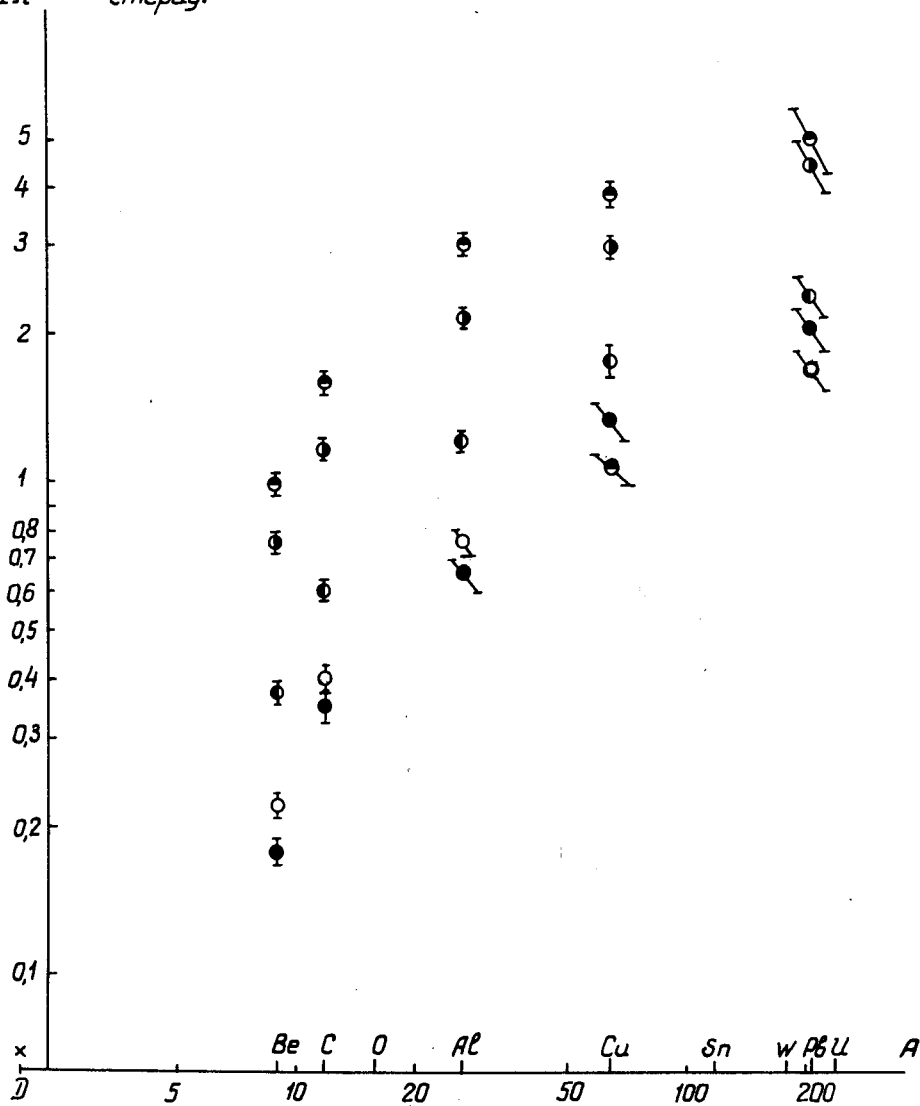
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot 10^{-27} \frac{\text{см}^2}{\text{стерад.}}$$


Рис. 15. Зависимость дифференциальных сечений образования γ^+ -мезонов от атомного номера \bullet - угол 18° , \circ - 30° , \bullet - 60° , \circ - 80° , \circ - 90° , \bullet - 123° .

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot 10^{-27} \frac{\text{см}^2}{\text{стерад}}$$

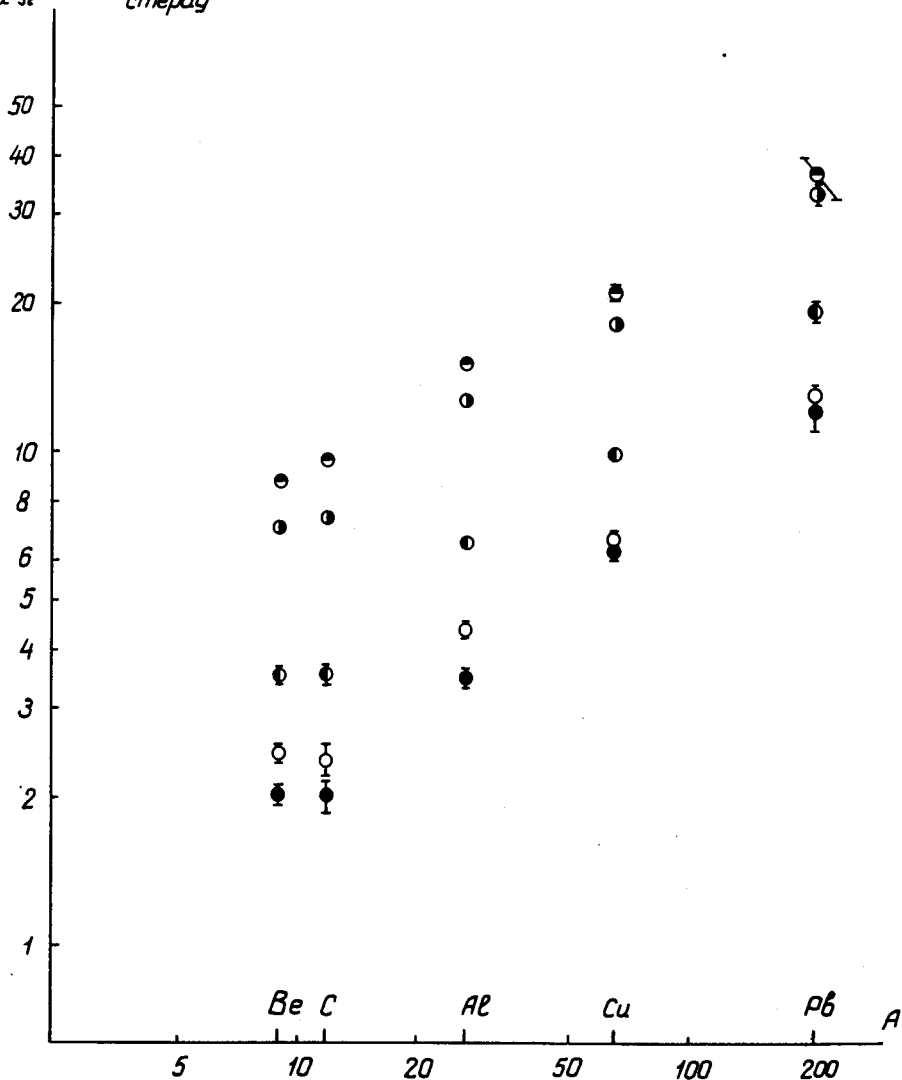


Рис. 16. Зависимость дифференциальных сечений образования π^- -мезонов от атомного номера ● - угол 18° , ◐ - 30° , ◑ - 60° , ○ - 90° , ● - 123° .

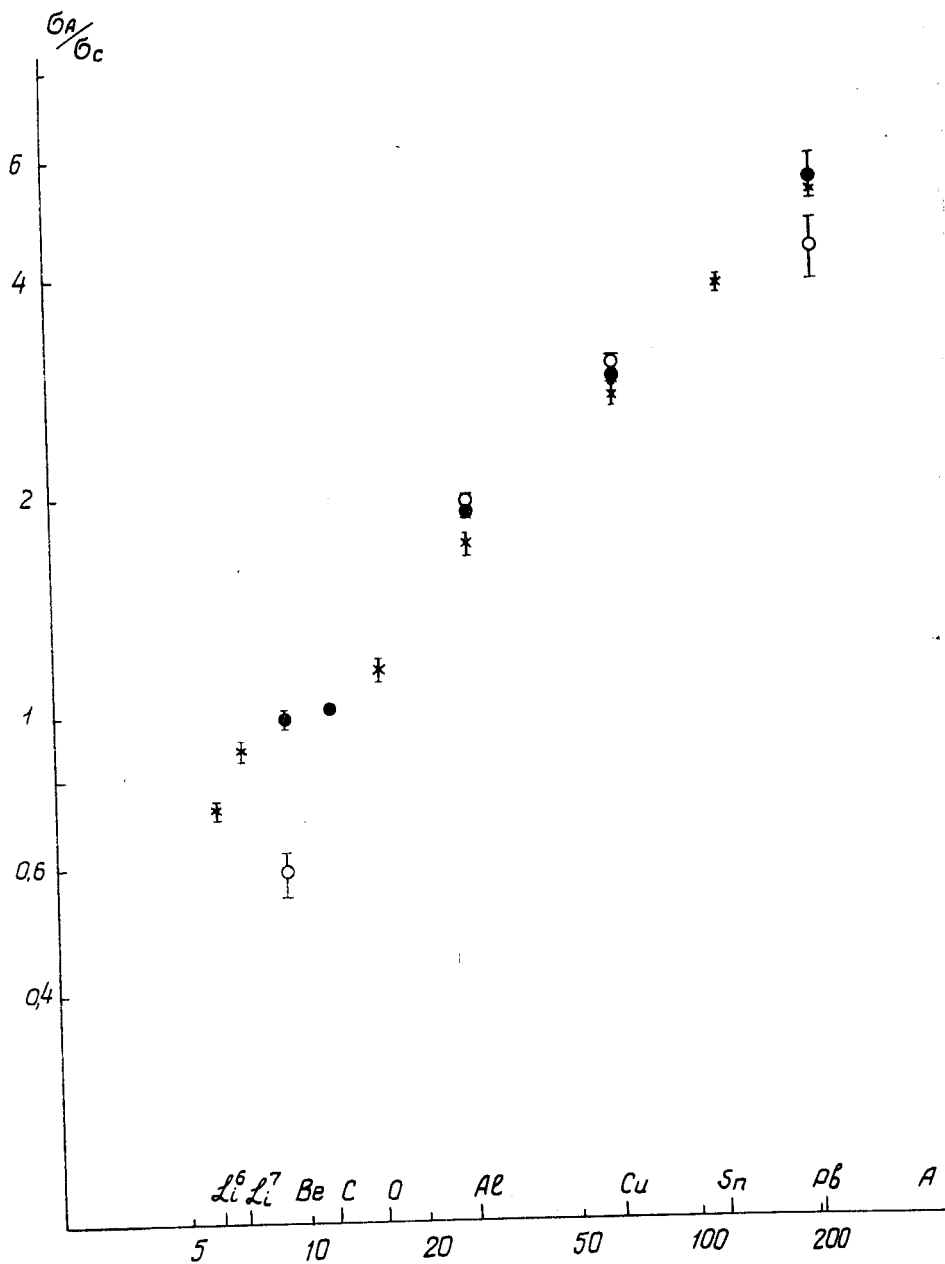


Рис. 17. Зависимость полных сечений образования пионов от атомного номера в относительных единицах \circ - полные сечения образования π^+ -мезонов, настоящая работа; \bullet - полные сечения образования π^- -мезонов, настоящая работа, \times - полные сечения образования π^0 -мезонов в (P-ядро)-соударениях.

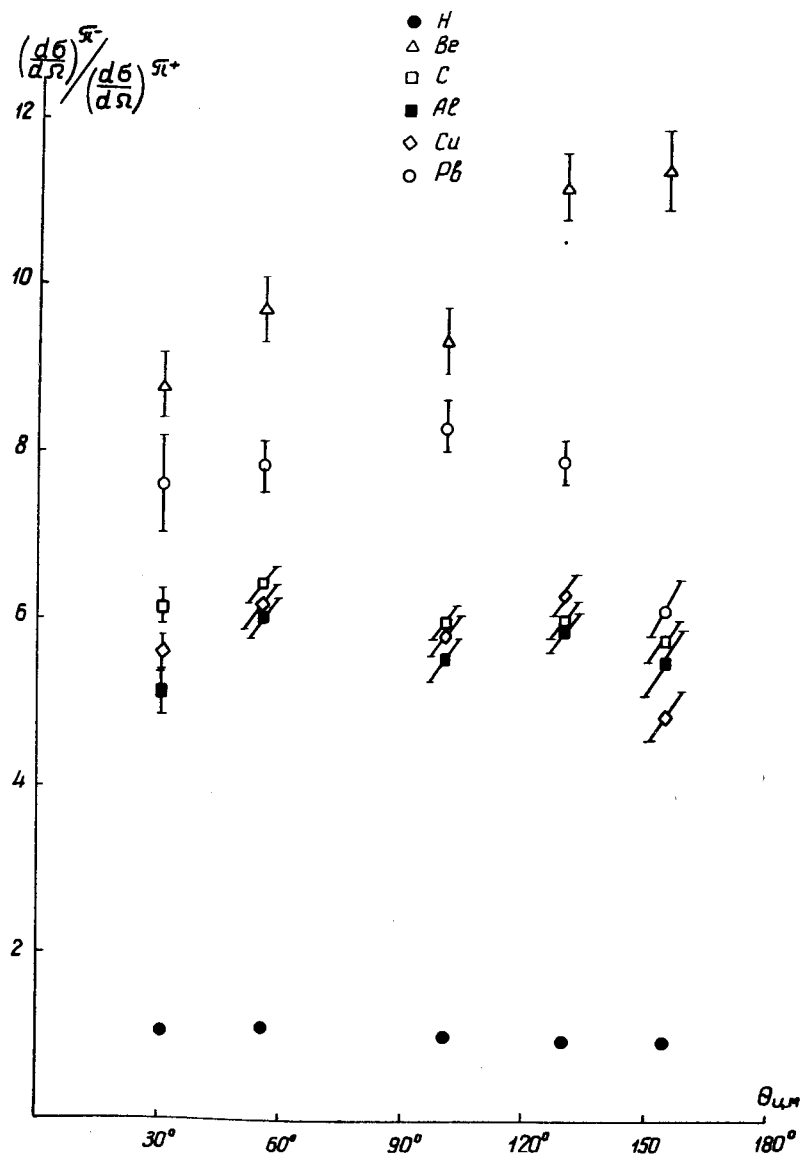


Рис. 18. Отношение выходов π^- к π^+ -мезонам в зависимости от угла в системе ц.м.