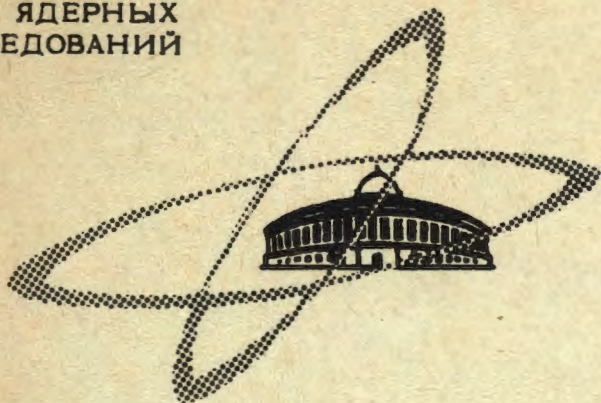


Д-324

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна



1 - 4026

А.В.Демьянов, В.С.Роганов

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

СЕПАРИРОВАННЫЕ МЮОННЫЕ ПУЧКИ
МАЛЫХ ЭНЕРГИЙ

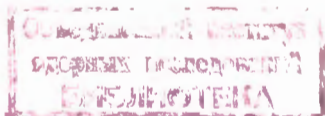
1968

1 - 4026

А.В.Демьянов, В.С.Роганов

СЕПАРИРОВАННЫЕ МЮОННЫЕ ПУЧКИ
МАЛЫХ ЭНЕРГИЙ

Направлено в АЭ



75/10/3 up.

В последние годы значительно возрос интерес к исследованиям с останавливающимися пионами и мюонами, существенно увеличилась необходимость в проведении экспериментов с пучками частиц небольших энергий высокой интенсивности. Для пучков пионов и сопутствующих им мюонов, полученных с внутренней мишени ускорителя, как известно, существует нижний предел по энергиям вследствие вывода частиц из области сильного магнитного поля ускорителя. Так, для синхроциклотронов ОИЯИ и ЦЕРНа доступная наименьшая пионная энергия равна примерно 70 Мэв. Дальнейшее понижение энергии пучка частиц с помощью магнитных экранов, ослабляющих магнитное поле ускорителя, как это сделано, например, для ускорителя Колумбийского университета ^{1/}, приводит к ощутимым потерям интенсивности, не говоря уже о неудобстве расположения таких магнитных каналов рядом с ускорителем. Мезонные пучки малых энергий, образованные при вылете частиц из мишеней, расположенных на выведенных протонных пучках, вряд ли в данное время могут конкурировать с пучками от внутренней мишени вследствие малого коэффициента вывода протонов из ускорителя, значительного энергетического разброса мезонов и большого фона рассеянных частиц.

Благодаря вводу в действие за последние несколько лет мезонных каналов в ЦЕРНе, ОИЯИ и Чикаго, открыта новая возможность получения мюонных пучков малых энергий.

В таких каналах мюоны, образовавшиеся в результате распада пионов на лету, удерживаются в пучке системой квадрупольных магнитов. При этом преимущественно фокусируются мюоны, имеющие небольшие углы разлета относительно пионного импульса P_{π} , т.е. мюоны с импульсом около $0,5 P_{\pi}$, летящие назад в системе центра масс, и с импульсом около P_{π} , летящие вперед. Таким образом, с помощью мезонных каналов возможно получение мюонов с импульсом примерно вдвое меньшим, чем импульс частиц, образованных на внутренней мишени ускорителя и захваченных в канал. Кроме того, пучки из мезонного канала с такими импульсами обладают тем преимуществом, что пионные примеси в них составляют доли процента.

В настоящей работе сообщается о пучках отрицательных мюонов малого импульса, образованных в мезонном канале синхроциклотрона ОИЯИ. При конструировании канал настраивался на пучки мюонов больших импульсов порядка $250 \text{ Мэв} \cdot \text{с}^{-1}$ и пучки с импульсом около $150 \text{ Мэв} \cdot \text{с}^{-1}$, образованные от пионов с импульсом примерно $260 \text{ Мэв} \cdot \text{с}^{-1}$, для которых оптимальным является сечение рождения протонами на ядрах бериллия. Для этого мюонного пучка число остановок составляет приблизительно $240 \text{ сек}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$ в максимуме пробегной кривой, и можно остановить около $12 \cdot 10^4$ мюонов в углеродной мишени диаметром 10 см толщиной 7 г/см^2 . Однако в ряде экспериментов, где невозможно применение толстых мишеней, использование большой удельной плотности остановок в таком пучке сопровождается значительным числом частиц, проходящих через мишень и создающих дополнительные фоновые загрузки.

Пучки мюонов небольших энергий образовывались двумя способами:

- 1) На пути пучка до анализирующего магнита располагался замедлитель, в котором терялась часть энергии, и пучок меньшего импульса анализировался магнитом. Этот способ приводил к значительным потерям в интенсивности.

2). Создавались такие условия ввода пионов в канал, которые позволяли в соответствующем режиме работы канала получать на выходе анализирующего магнита мюоны малых импульсов.

В мезонном канале синхроциклотрона ОИЯИ /2/ первая линза, расположенная в непосредственной близости от ускорителя, позволяет существенно изменить условия ввода частиц в канал, она используется как для фокусировки пучка, так и для его отклонения. Свойства пучка (его импульс, интенсивность, состав) в сильной степени зависят от положения мишени по радиусу R и азимуту ϕ внутри ускорителя, от тока в первой линзе I_1 , от тока питания всего канала I_k , от тока анализирующего магнита I_M , от тока фокусирующей линзы I_ϕ на выходе магнита. При заданном импульсе током анализирующего магнита I_M с помощью параметров R , ϕ , I_1 , I_k , I_ϕ были получены пучки мюонов небольших энергий.

На рис.1 показана схема расположения установки со звездным детектором для определения характеристик пучков: интенсивности, кривой пробегов, импульса, состава. Подробно эта установка описана в отдельной работе. Счетчики 1 и 2 служат для мониторингования пучка. Между счетчиками 2 и 3 располагается фильтр, толщину которого можно менять. Совпадения (234) определяют число частиц, попадающих после фильтра в счетчик 4. Совпадения-антисовпадения (234 $\bar{5}$) (разрешающая способность ≈ 5 нсек, эффективность антисовпадений лучше 0,9995) определяют число остановок в сцинтилляторе звездного детектора (4), а комбинация (2344 в 5) регистрирует остановки в звездном детекторе, давшие амплитуду вспышки в сцинтилляторе 4 больше определенного порога. Звездный детектор практически не чувствителен к мюонам, его эффективность $\epsilon_\mu < 0,003\%$ при пионной эффективности ϵ_π в несколько процентов.

$$\epsilon_\mu / \epsilon_\pi < 0,0008.$$

На рис.2 приведены импульсные спектры частиц, выходящих из мезонного канала, полученные при разных условиях захвата пионов в канал и различных режимах работы. Такие режимы найдены с целью получения чистых мюонных пучков с импульсами $150 \text{ Мэв} \cdot \text{с}^{-1}$ (кривая 1), $115 \text{ Мэв} \cdot \text{с}^{-1}$ (кривая 2) и $90 \text{ Мэв} \cdot \text{с}^{-1}$ (кривая 3). На этих спектрах левые максимумы соответствуют мюонным пучкам с пионными примесями порядка процента, а правые - пионным пучкам, имеющим в своем составе около одной трети мюонов. Из рисунка видно, что интенсивности мюонов с указанными импульсами отличаются в несколько раз. Однако для остановок мюонов картина другая.

На рис.3 показаны кривые пробегов для мюонного пучка с импульсом $115 \text{ Мэв} \cdot \text{с}^{-1}$, а на рис.4 - для пионного пучка с импульсом $193 \text{ Мэв} \cdot \text{с}^{-1}$. На тех же рисунках приведены кривые пических остановок ($2344 \text{ г} \bar{5}$), полученные с помощью звездного детектора. В этом мюонном пучке с энергией 50 Мэв число остановок мюонов в максимуме около $21 \cdot 10^3 \text{ см}^2 \text{ сек}^{-1} \text{ г}^{-1}$ (около $240 \text{ сек}^{-1} \text{ г}^{-1}$) с пионной примесью в остановках $\chi_{\pi} < 0,07\%$, полная примесь пионов в пучке меньше $0,4\%$.

В пионном пучке, где имеется также около 45% мюонов, число остановок пионов (левый максимум) составляет примерно $83 \cdot 10^3 \text{ см}^2 \text{ сек}^{-1} \text{ г}^{-1}$, а полуширина пробежной кривой - около $\pm 3 \text{ г Cu} (\pm 2,1 \text{ г C})$, т.е. $\Delta P_{\pi} / P_{\pi} \leq \pm 3,3\%$.

Рис.5 иллюстрирует получение частиц меньших импульсов путем расположения замедлителя в пучке перед анализирующим магнитом. (канал работает в режиме, соответствующем кривой 2 рис.2). Пробежные кривые получены для разных токов анализирующего магнита. На этом рисунке кривая остановок, показанная пунктиром для 45 Мэв , и кривая остановок для 34 Мэв , найдены изменением энергии пучка при использовании $5,7 \text{ г/см}^2$ меди перед анализирующим магнитом. Видно, что пучок с энергией 45 Мэв с добавочным поглотителем имеет интен-

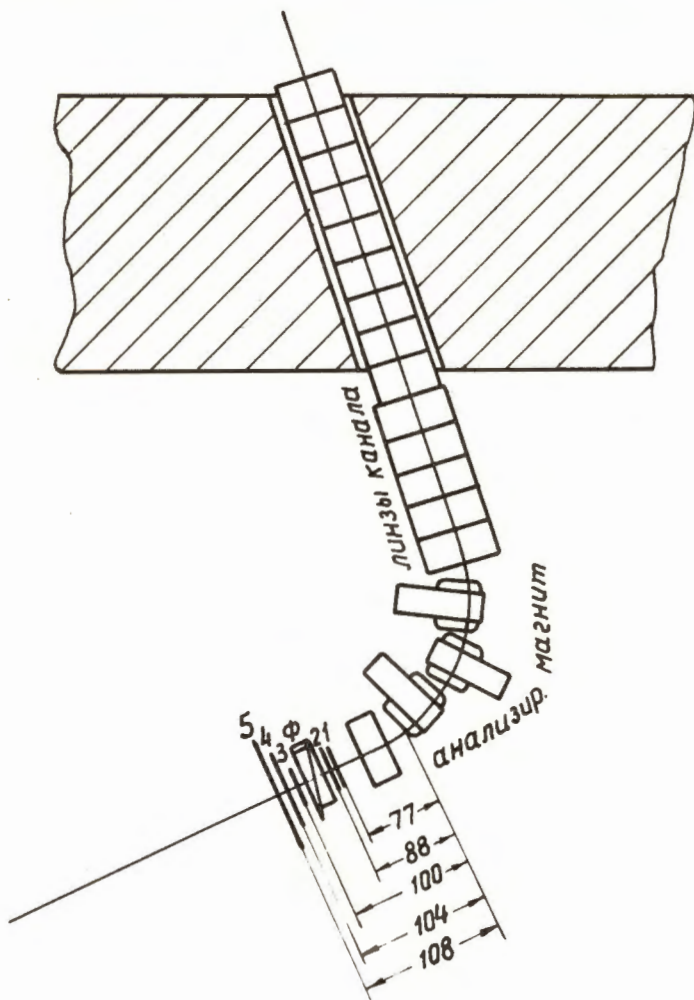


Рис.1. Схема расположения телескопа сцинтилляционных счетчиков на пучках мезонного канала. Все счетчики-толщиной 1 см. Счетчики 1,2,3-диаметром 10 см, счетчик 4-15x15 см², счетчик 5-диаметром 25 см. Между счетчиками 2 и 3 - медный поглотитель, толщину которого можно менять.

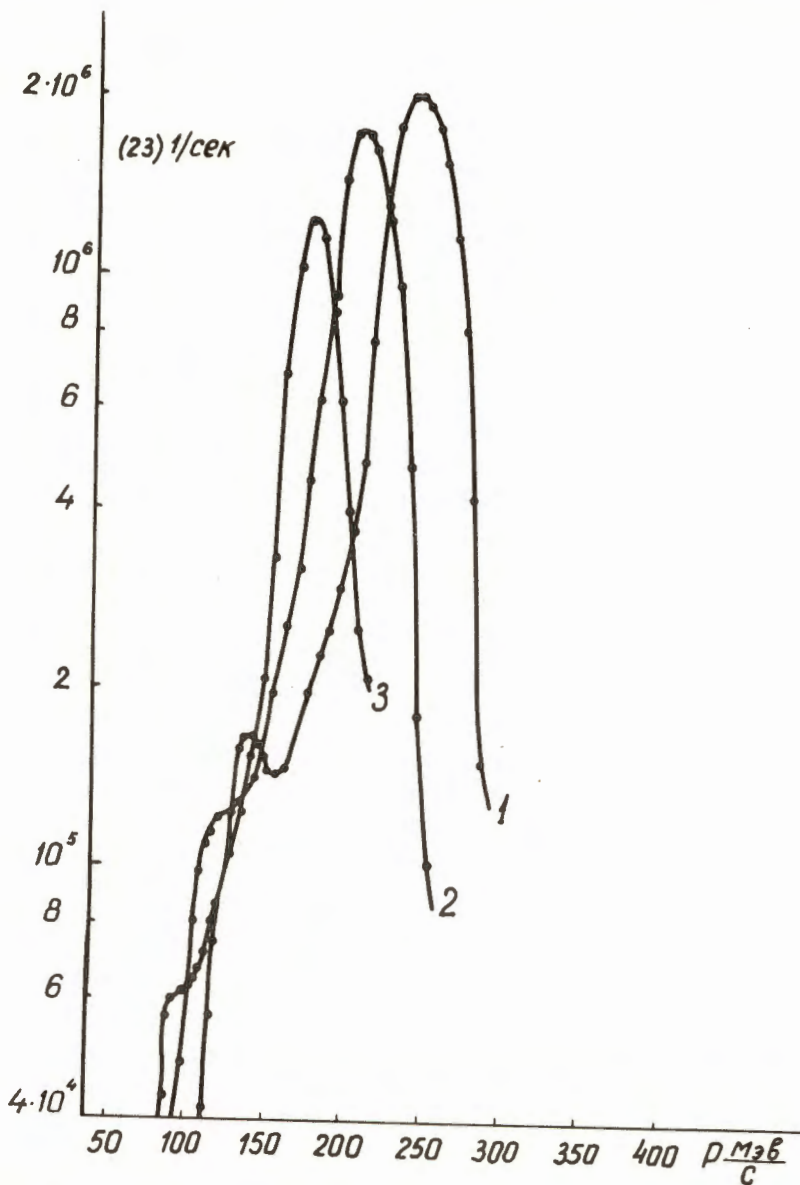


Рис.2. Распределение по импульсам частиц, расположенных после анализирующего магнита, для различных условий ввода и режимов работы мезонного канала.

Кривая 1: $R = 268 \text{ см}; \quad \phi = -9,5^\circ; \quad I_1 = 150 \text{ а}; \quad I_k = 430 \text{ а}.$
 Кривая 2: $R = 267 \text{ см}; \quad \phi = -6,5^\circ; \quad I_1 = 550 \text{ а}; \quad I_k = 350 \text{ а}.$
 Кривая 3: $R = 269 \text{ см}; \quad \phi = -5,7^\circ; \quad I_1 = -825 \text{ а}; \quad I_k = 270 \text{ а}.$

Величина тока в фокусирующей линзе I_ϕ меняется в зависимости от величины импульса.

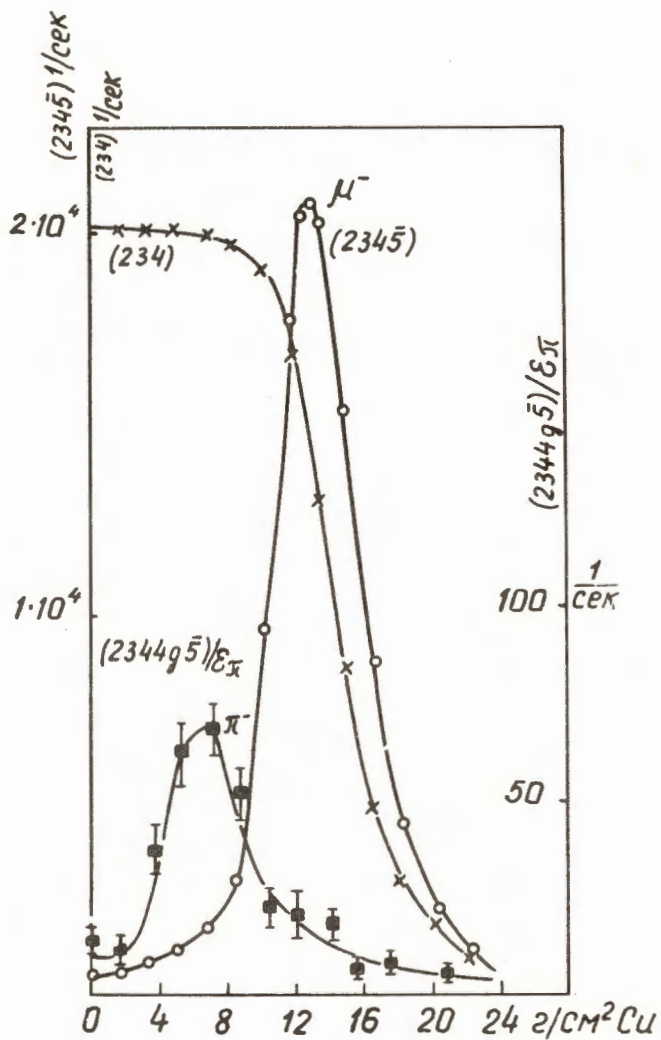


Рис.3. Интегральная (234), дифференциальная (234 5) пробежные кривые и счет пионных примесей $(2344g5) / \epsilon_{\pi}$ для мюонного пучка с импульсом $115 \text{ Мэв} \cdot \text{с}^{-1}$ ($R = 267 \text{ см}$, $\phi = -6,5^\circ$, $I_1 = -550 \text{ а}$, $I_k = 350 \text{ а}$, $I_M = 160 \text{ а}$, $I_{\phi} = 200 \text{ а}$).

сивность остановок на 30% меньше, чем тот же пучок без этого поглотителя. Однако пучок с энергией 34 Мэв, образованный без поглотителя в этом режиме работы канала, имеет остановок по крайней мере в 1,5 раза меньше, чем показано на рисунке. Другими словами, сбросом энергии частиц с помощью дополнительного фильтра для получения пучка с меньшим импульсом нужно пользоваться, если этого уменьшения импульса нельзя добиться изменением условий работы мезонного канала. Следует также отметить, что дополнительные фильтры в канале увеличивают пионные примеси в пучке.

На рис.6 показаны распределения остановок по пробегам для мюонных пучков с энергией 30, 33, 36 Мэв, соответствующие режиму работы канала для кривой 3 рис.2. Видно, что даже у пучка с энергией 30 Мэв плотность остановок в максимуме довольно велика и составляет $12 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ г}^{-1}$ ($140 \text{ сек}^{-1} \text{ г}^{-1}$). Пучок с энергией 33 Мэв для второго режима работы канала имеет интенсивность в 3 раза большую, чем аналогичный пучок (рис.5) с дополнительным поглотителем в канале. Рис.7 иллюстрирует сравнение пробегных кривых для мюонных пучков разных энергий, полученных в различных режимах работы мюонного канала (см. рис.2). Сравнение показывает, что при уменьшении энергии пучков с 67 Мэв более чем вдвое ширина пробегных кривых уменьшается в 2,5 раза, а плотности остановок мюонов - лишь на 40%. Эти данные определенно показывают преимущества работы с пучками меньших энергий для остановок мюонов в тонких мишенях.

В табл. 1 суммированы результаты по пучкам отрицательных мюонов небольших энергий и режимам работы канала для получения этих пучков (без временной растяжки).

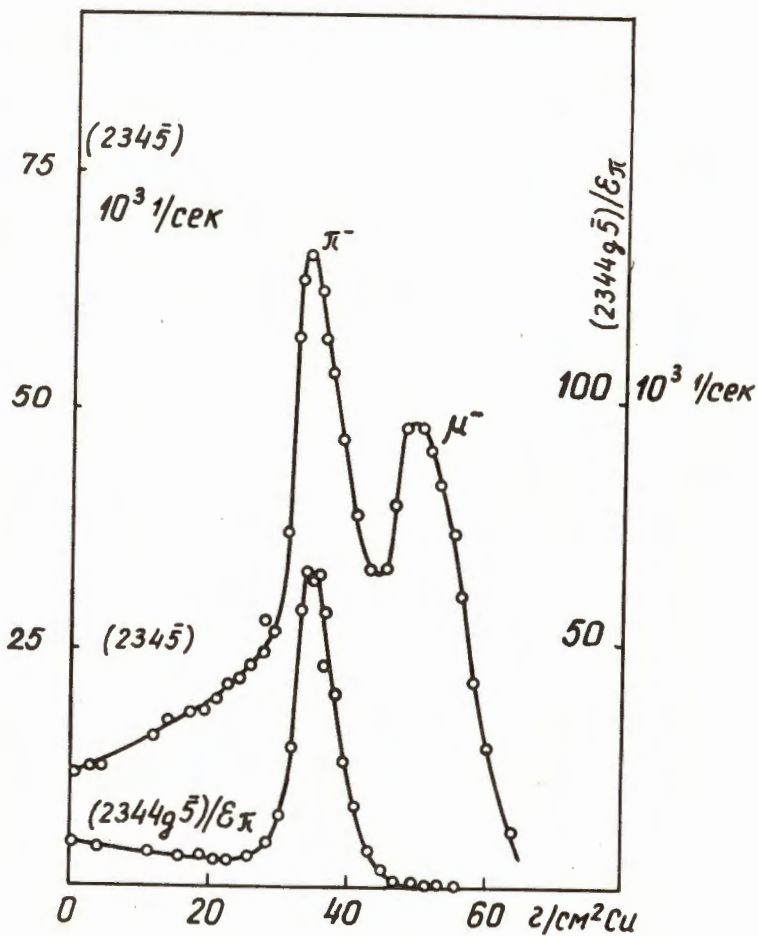


Рис.4. Дифференциальная кривая пробегов (2345) и счет пионных остановок $(2344g5)/\epsilon_{\pi}$ для пучка пионов с импульсом 195 Мэв.с⁻¹ ($R=269$ см, $\phi=-5,7^{\circ}$, $I_1=-825$ а, $I_k=270$ а, $I_M=270$ а, $I_{\phi}=320$ а).

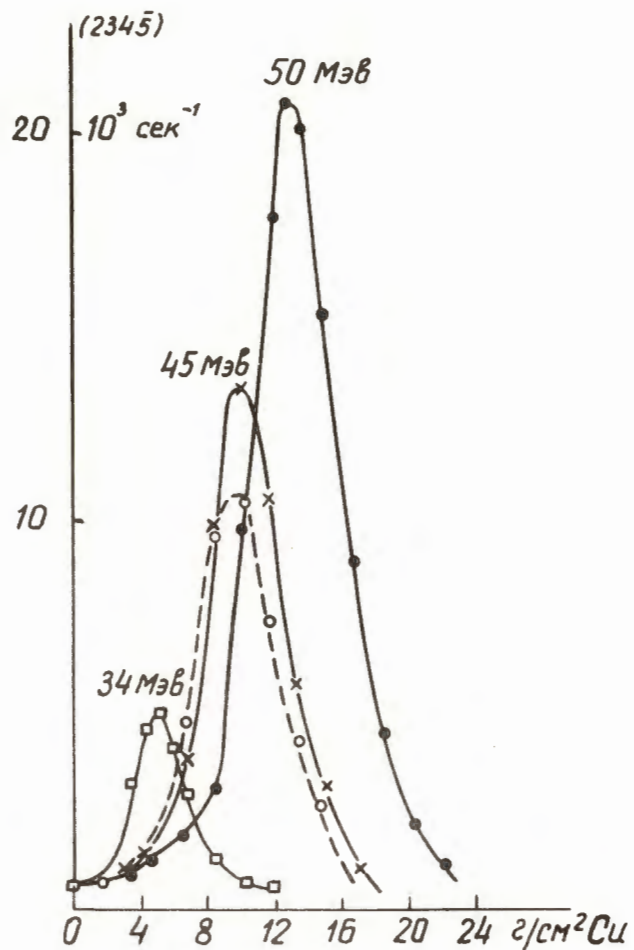


Рис.5. Пробежные кривые для пучков мюонов с энергией 34, 45, 50 Мэв. Режим работы канала соответствует кривой 2 рис.2. Пунктирная кривая и кривая для 34 Мэв получены с поглотителем $5,7 \text{ г/см}^2 \text{ Си}$ перед анализирующим магнитом.

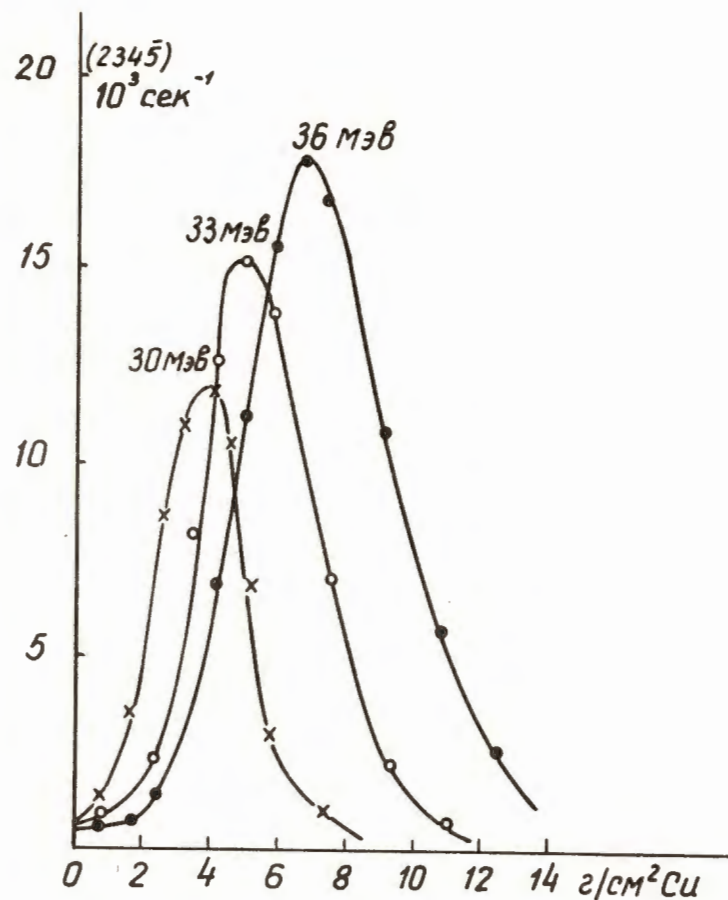


Рис.6. Пробежные кривые для пучков мюонов с энергией 30, 33, 36 Мэв. Режим работы канала соответствует кривой 3 рис.2.

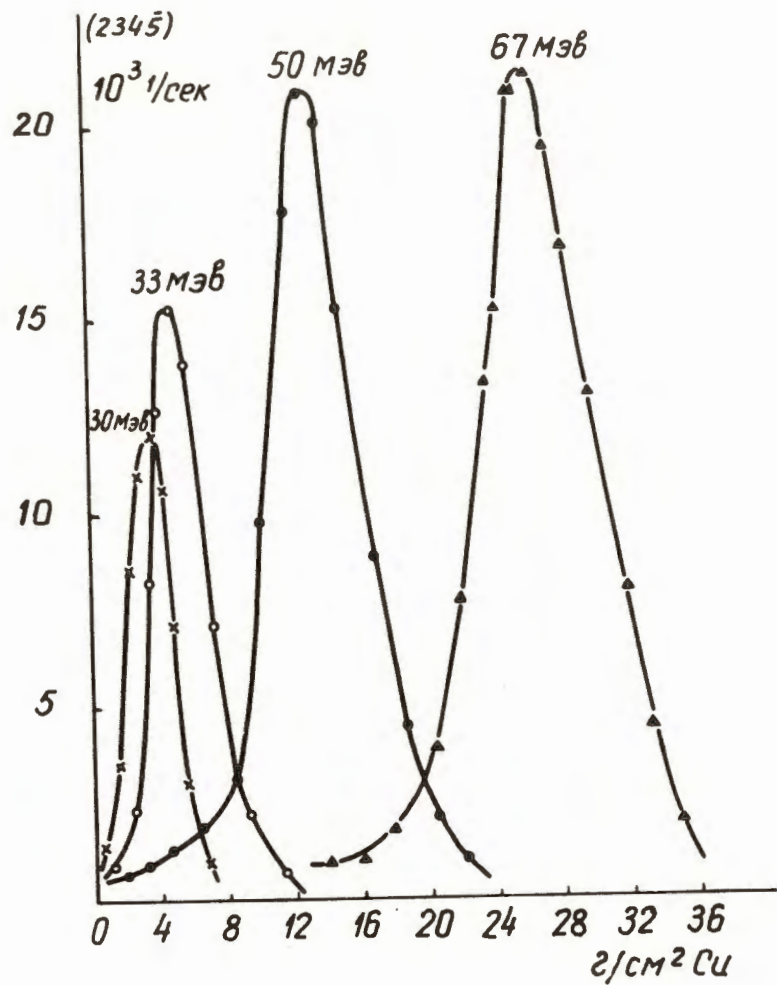


Рис.7. Число остановок мюонов в зависимости от толщины медного поглотителя для пучков с энергией 30,33,50,67 Мэв.

Таблица 1

R (см)	ϕ (град)	I_1 (а)	I_k (а)	I_M (а)	E_μ (Мэв)	$R_\mu \pm \Delta L_c$ (г.см. $^{-1}$)	$N_{ост}^{(2345)}$ (10^3сек^{-1})	$N_{\mu}^{(23)}$ (10^3сек^{-1})	примесь χ (%)	
268	-9,5	-150	430	200	67	150	2,6	180	21	0,2
267	-6,5	-550	350	153	50	115	2,1	125	19	0,07
267	-6,5	-550	350	147	45	110	1,9	76	14	
269	-5,7	-825	270	128	36	98	1,7	44	18	0,3
269	-5,7	-825	270	121	33	91	1,3	31	15	0,3
269	-5,7	-825	270	115	30	86	1,1	22	12	0,3

Здесь ΔL_c -полуширина на полувысоте кривой пробегов (в г.см $^{-2}$ углерода); $N_{(23)}$ - интенсивность пучка, прошедшего через 2 счетчика диаметром 10 см (в 10^3 1/сек); $N_{ост}^{(2345)}$ - число остановок в счетчике толщиной 1 г/см 2 с диаметром 10 см (в 10^3 1/сек) в максимуме пробежной кривой.

В последней колонке таблицы приведена примесь пионов в максимуме остановок мюонов, найденная; как это указано выше.

Видно, что во всех пучках пионная примесь незначительна. Наименее энергичный пучок имеет полуширину пробегной кривой примерно $1,1 \text{ г/см}^2$ углерода и поток около $20 \cdot 10^3 \text{ сек}^{-1}$. Кроме того, заметим, что интенсивность пучков положительных мюонов с энергией 33 Мэв, полученных реверсом всех магнитных полей, примерно втрое меньше, чем это показано в таблице для аналогичного пучка отрицательных мюонов.

Как уже отмечалось, при работе с тонкими мишенями для уменьшения генетического фона, связанного с пучком, важно иметь наибольшую плотность остановок в мишени при наименьшей интенсивности частиц, проходящих через нее. На рис.8 приведена интенсивность остановок мюонов (для мишени в 1 г/см^2 в максимуме пробегной кривой L_μ), выраженная через интенсивность пучка $(234\bar{5})_{L_\mu} / (23)_{L_\mu}$ (кривая β) и через интенсивность мюонов, прошедших мишень $(234\bar{5})_{L_\mu} / (234)_{L_\mu}$ (кривая α), для пучков разных энергий. Из рисунка видно, что для наиболее энергичного пучка интенсивность в 8 раз больше, чем интенсивность остановок в 1 г/см^2 , а для наименее энергичного — лишь в 1,6 раза. Кроме того, для пучка с энергией 67 Мэв через мишень 1 г/см^2 проходит в 5,6 раза больше частиц, чем останавливается в ней, а для пучка с энергией 30 Мэв это соотношение значительно лучше — только 1,4. Таким образом, пучки частиц малых энергий для экспериментов с остановками мюонов в тонких мишенях пригодны в значительно большей степени.

Полученный мюонный пучок с энергией 30 Мэв практически является пучком с наименьшей энергией, которая может быть получена из мезонного канала без дополнительного поглотителя. Мюоны этого пучка образованы при распаде назад в системе центра масс пионов с энергией

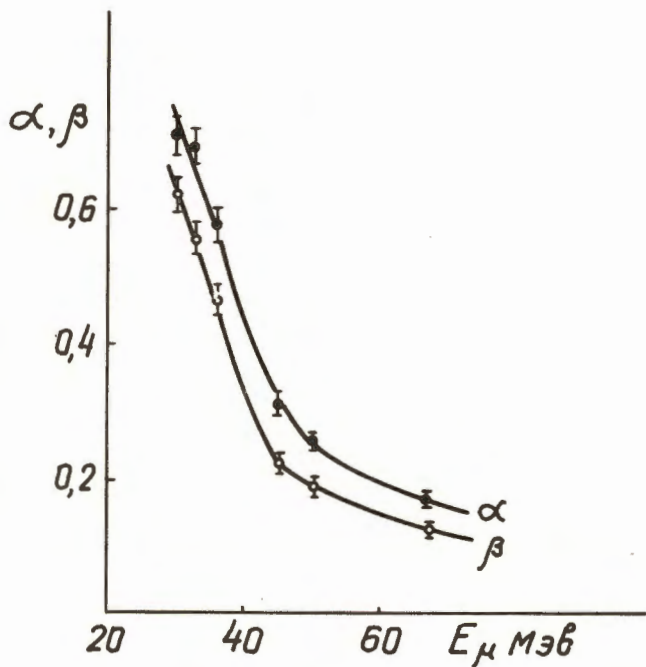


Рис.8. Интенсивность остановок мюонов (для мишени толщиной 1 г/см^2 в максимуме L_μ пробежной кривой), отнесенная к интенсивности пучка $\beta = (2345)_{L_\mu} / (23)_{L_\mu}$ и к интенсивности мюонов, прошедших мишень $\alpha = (2345)_{L_\mu} / (234)_{L_\mu}$, в зависимости от энергии пучка.

75 Мэв (кривая 3 рис.2). Как отмечалось выше, эта энергия является наименьшей для пионов, которые могут выйти из синхротрона ОИЯИ. Однако получение мюонов еще меньшей энергии практически вряд ли необходимо, поскольку в качестве тонких мишеней обычно используют газ при высоком давлении, когда толщина стенок мишеней, как правило, несколько велика даже для мюонного пучка с энергией 30 Мэв.

В заключение авторы выражают искреннюю признательность члену-корреспонденту АН СССР В.П.Джелепову и проф. А.И.Мухину за интерес к работе и помощь; В.Г.Варламову, Ю.М.Грашину, А.А.Кропину и А.М.Чатрчян за помощь в проведении экспериментов.

Л и т е р а т у р а

1. D.Koppel, R.Bingham, E.T.Both. Rev. Sci. Instr., 28, No. 8 (1957), 645.
2. Ю.М.Грашин, Б.А.Долгошеин, В.Г.Кириллов-Угрюмов, А.А.Кропин, В.С.Роганов, А.В.Самойлов, С.В.Сомов. Препринт ОИЯИ, Р-1902, Дубна, 1964; Атомная энергия, т.18, №4 (1965), 384.

Рукопись поступила в издательский отдел
9 августа 1968 года.