

РОЖДЕНИЕ π^+ -МЕЗОНОВ В СОУДАРЕНИЯХ ПРОТОНОВ НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ С ЯДРАМИ С И Сu

Ю. К. АКИМОВ, И. И. ГАЙСАК, Ф. Ф. ГУБЕР¹⁾, В. А. КРАСНОВ¹⁾,
А. Б. КУРЕПИН¹⁾, С. И. МЕРЗЛЯКОВ, К. О. ОГАНЕСЯН, Е. А. ПАСЮК,
С. Ю. ПОРОХОВОЙ, А. И. РЕШЕТИН¹⁾

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

(Поступила в редакцию 30 июня 1980 г.)

Измерены дифференциальные и двойные дифференциальные сечения рождения положительных пионов протонами с энергией 240 МэВ на ядрах С и Сu. Получена энергетическая зависимость дифференциального сечения для ядра Сu под углом 90° в диапазоне энергий протонов 240—500 МэВ.

Введение

Исследование процессов рождения пионов в соударениях нуклонов с ядрами является важным источником информации о механизме пион-ядерного взаимодействия и о структуре ядра. Область энергий падающих нуклонов ниже пороговой энергии рождения пионов в соударениях свободных нуклонов (~290 МэВ) представляется особенно интересной из-за того, что здесь рождение пиона целиком обусловлено ядерными эффектами. В этой области энергий мала роль поглощения и рассеяния пионов, образовавшихся внутри ядра и, следовательно, процесс рождения более чувствителен к деталям внутренней структуры ядра.

В настоящее время хорошо исследовано рождение пионов на ядрах при энергиях выше 400 МэВ. Большое количество экспериментальных данных по инклюзивному рождению заряженных и нейтральных пионов в соударениях протонов и нейтронов с ядрами при энергиях 600—700 МэВ было получено в пятидесятых и шестидесятых годах на синхроциклотроне ОИЯИ в Дубне [1-4]. Образование заряженных пионов обоих знаков протонами на многих ядрах было измерено при энергиях 400—500 [5], 580 [8], 585 [7] и 730 МэВ [8]. Для указанного интервала энергий характерными являются энергетические распределения рожденных пионов с широким максимумом и с сечениями в максимуме спектров от нескольких десятков до сотен мкбн/МэВ·ср. Экспериментальные данные качественно согласуются с простой полуклассической моделью, в которой в импульсном приближении рассматривается рождение пионов на отдельных нуклонах ядра при доминирующем вкладе изобарного механизма с учетом эффектов поглощения, рассеяния (в том числе с перезарядкой) пионов в ядре [9].

В последние годы началось интенсивное исследование когерентного рождения пионов на ядрах, т. е. рождения при фиксированных конечных состояниях остаточного ядра. Такие исследования были проведены для энергий протонов, меньших 200 МэВ, в основном на ускорителях в Упса-

¹⁾ Институт ядерных исследований АН СССР.

ле [10] и в Сакле [11]. С вводом в строй мезонных фабрик появились работы по когерентному рождению при энергиях протонов 600–700 МэВ [12, 13].

Вследствие большого передаваемого импульса сечение рождения должно быть чувствительно к свойствам ядра на малых расстояниях. Однако теоретическое описание до сих пор не позволяет надежно извлекать из экспериментальных данных величину форм-фактора при больших импульсах. Экспериментальное изучение когерентного рождения затруднено из-за малого сечения процесса, составляющего ~ 100 нбн/ср для π^+ -мезонов и существенно меньшего для π^- -мезонов. В теоретических расчетах необходимо учитывать вклад многоступенчатых процессов. Ряд элементарных процессов, необходимых для понимания когерентного рождения, может быть изучен при исследовании инклюзивных спектров рождения. Следует также отметить, что, в то время как в реакции когерентного рождения ядро остается в основном или слабовозбужденном состоянии, инклюзивные спектры связаны главным образом с высокоэнергетическими возбуждениями.

В интервале энергий падающих протонов 200–350 МэВ в настоящее время нет данных ни по когерентному, ни по инклюзивному рождению пионов. Определенные преимущества при этих энергиях возникают из-за возможности введения достаточно обоснованных упрощающих предположений при теоретических расчетах [14].

В настоящей работе проведены измерения инклюзивных двойных дифференциальных сечений рождения π^+ -мезонов при соударениях протонов с энергией ~ 240 МэВ с ядрами углерода и меди под тремя углами: 60, 90 и 120°.

Под углом 90° измерена экспериментальная зависимость дифференциального сечения рождения пионов на ядре меди в интервале энергий 240–500 МэВ. Интерес к исследованию функции возбуждения в этой области энергий обуславливается возможным проявлением особенностей, связанных с предполагаемым образованием изобары Δ_{33} в связанном состоянии в ядре при энергиях протонов ~ 300 МэВ и дибарионного состояния при энергии 370 МэВ, существование которого до сих пор остается проблематичным. Поскольку о ширине этих состояний сейчас трудно сделать уверенные предсказания, целесообразны измерения функции возбуждения в широком интервале энергий.

Измерения выхода пионов при энергии протонов ~ 250 МэВ преследовали также прикладные цели: определить возможные интенсивности низкоэнергетических пучков пионов и их спектральный состав при использовании для генерации пионов сильноточных ускорителей с более низкой энергией, чем работающие сейчас мезонные фабрики.

Экспериментальная установка

Измерения проводились на протонном пучке синхроциклотрона ОИЯИ. Для регистрации пионов были использованы сцинтилляционный время-пролетный спектрометр [15] и спектрометр полного поглощения пионов [16], разработанные в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ совместно с ИЯИ АН СССР по программе «Пион». Характеристики этих детектирующих устройств позволяют регистрировать и спектрометрировать π^+ -мезоны с энергиями до 100 МэВ, т. е. в диапазоне, перекрывающем энергии генерируемых пионов.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Выведенный пучок протонов синхроциклотрона с энергией 650 МэВ замедлялся с помощью углеродных фильтров, далее проходил через отклоняющий магнит, стальной коллиматор в 4-метровой бетонной стене, через фокусирующие линзы и попадал на мишень.

Энергия падающих протонов устанавливалась с помощью подбора толщины углеродных фильтров. Среднее значение и разброс энергий протонов

определялись путем измерения пробегной кривой сцинтиляционным телескопом. Средняя энергия протонов в середине мишени была выбрана 240 МэВ. При этом полная ширина спектра на полувысоте составляла 12 МэВ.

Для измерения абсолютного числа падающих на мишень протонов использовался метод измерения рассеянного пучка [6] с помощью сцинтиляционного телескопа (рис. 1). Было показано экспериментально, что при заданных энергиях протонов, типе мишени и угле рассеяния коэффициент пересчета, связывающий число падающих и рассеянных протонов, не зависит от интенсивности прямого пучка.

Для определения коэффициента пересчета были использованы три способа: метод мониторингирования прямого пучка при пониженных интенсив-

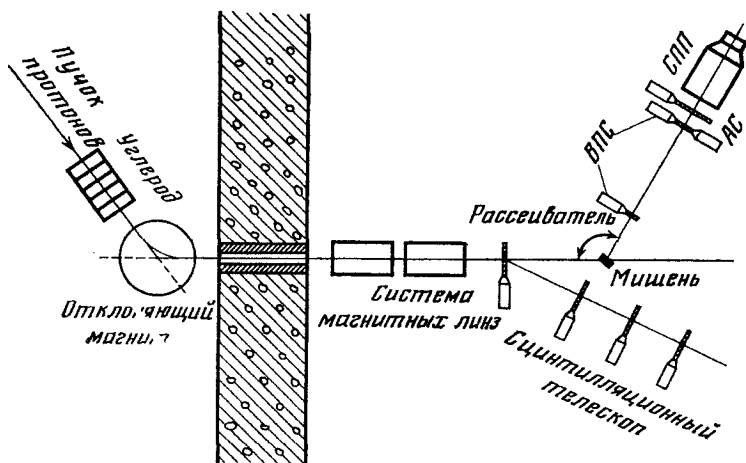


Рис. 1. Блок-схема эксперимента

ностях, активационный анализ и метод измерения числа треков от осколков деления при взаимодействии пучковых протонов со свинцовой мишенью.

Ошибки в определении коэффициента пересчета каждым из указанных способов оценивались в 10%. Для получения абсолютного числа протонов, попадающих на мишень в рабочих измерениях, значения коэффициента пересчета, полученные тремя способами, усреднялись.

Интенсивность протонного пучка на мишени в рабочих измерениях составляла $\sim 3 \cdot 10^8$ с⁻¹. Измерения проводились для мишеней площадью 3×3 см² из меди и углерода толщиной соответственно 1,73 и 1,64 г/см².

Образованные в мишени пионы регистрировались системой из последовательно расположенных сцинтиляционных время-пролетного спектрометра (ВПС) и спектрометра полного поглощения — π^+ -детектора (СПП). Система детекторов была смонтирована на жесткой раме, вращающейся вокруг неподвижной мишени. Диапазон возможных углов измерений составлял 15—140°. Размеры первого счетчика ВПС составляли $4 \times 4 \times 0,3$ см³, второго счетчика — $8 \times 8 \times 0,5$ см³. Базовое расстояние между время-пролетными счетчиками могло варьироваться. В описываемых измерениях оно было выбрано 100 см. Счетчики просматривались фотоумножителями ХР-1020: первый счетчик — одним ФЭУ, а второй — двумя ФЭУ для компенсации временного разброса, связанного с конечным временем прохождения света через сцинтиллятор. Разрешающее время ВПС составляло 500 пс.

В СПП использовался цилиндрический пластмассовый сцинтиллятор на основе полистирола. Диаметр детектора 180, длина 250 мм. На такой длине укладываются пробеги пионов с энергиями до 100 МэВ и протонов с энергиями до 200 МэВ. Энергетическое разрешение СПП для пионов в исследу-

дуюмом интервале энергий составляло 1,5—2 МэВ. Время интегрирования сигнала с СПП было выбрано равным 100 нс. При таком времени интегрирования ~98% остановившихся в детекторе π^+ -мезонов распадаются с испусканием монохроматического мюона, который вносит постоянную добавку 4,1 МэВ в энерговыделение. Перед СПП располагался антисовпадательный счетчик с отверстием диаметром 80 мм для исключения частиц, траектории которых могут выходить через боковую поверхность детектора. Характеристики ВПС и СПП были исследованы в калибровочных измерениях на пучках пионов и протонов. При разных значениях энергий пионов и протонов измерены световыходы и разрешающие способности ВПС и СПП.

Сигналы от всех детекторов поступали на блоки регистрирующей электроники и далее на ЭВМ НР-2116С. Информация о времени пролета частицы в ВПС и энерговыделении в СПП накапливалась в ЭВМ в виде дву-

Таблица 1

θ , град	$d\sigma/d\Omega$, мкбн/ср	
	C	Cu
60	12,0±0,6	41,6±2,6
90	8,2±0,3	32,0±1,8
120	6,2±0,3	26,6±1,4

Таблица 2

T_p , МэВ	$d\sigma/d\Omega$, мкбн/ср	T_p , МэВ	$d\sigma/d\Omega$, мкбн/ср
237	32,0±1,8	375	914±25
275	234±10	400	1283±65
300	325±11	450	1808±68
325	576±15	500	2505±77
350	689±21		

мерных распределений «время пролета — энергия» и далее записывалась на магнитную ленту. Измеренные распределения изображались на экране дисплея для предварительной экспресс-обработки информации и выбора режимов работы спектрометрических трактов. Граница области двумерного распределения, соответствующая пионам, выбиралась из калибровочных зависимостей, полученных для ВПС и СПП с учетом их разрешающих способностей.

Проекция на оси времени и энергии областей двумерных распределений, соответствующих пионам, дают время-пролетные и энергетические спектры пионов. Из обеих проекций можно получить энергетическое распределение пионов, рожденных в мишени. Сравнение результатов восстановленных обоими способами распределений является дополнительным критерием корректности калибровки и всей методики в целом.

В качестве контрольных измерений и для проверки возможностей методики были проведены измерения выходов пионов и протонов под углом 120° из медной мишени при энергии падающих протонов 620 МэВ с абсолютной точностью ~15%. Полученное значение дифференциального сечения выхода протонов с энергиями выше 70 МэВ $d\sigma/d\Omega=3,7$ мбн/ср близко к данным работы [17], из которой для энергии протонов 640 МэВ под углом 140° можно оценить сечение $d\sigma/d\Omega=4,8$ мбн/ср. Измеренный выход π^+ -мезонов $d\sigma/d\Omega=5$ мбн/ср более чем в 2 раза превышает данные работы [6] при энергии 580 МэВ и согласуется с результатами последних измерений при энергии 585 МэВ [7].

Результаты

На рис. 2 и 3 представлены двойные дифференциальные сечения рождения пионов протонами с энергией 240 МэВ на ядрах C и Cu под углами 60, 90 и 120°, восстановленные по экспериментальным спектрам в спектрометре полного поглощения пионов (СПП). В табл. 1 представлена угловая зависимость (по трем углам измерений) проинтегрированных по энергии дифференциальных сечений ($T_p=240$ МэВ). На рис. 4 и в табл. 2 представлена энергетическая зависимость дифференциальных сечений рождения

пионов под углом 90° на ядре Cu, измеренная в интервале энергий 240—500 МэВ.

В качестве нижней границы измеренных спектров была выбрана энергия 30 МэВ (рис. 2 и 3). Проинтегрированные по энергии дифференциальные сечения на рис. 4 также соответствуют области энергий пионов выше 30 МэВ. Выбор нижней границы был в основном связан с тем, что при

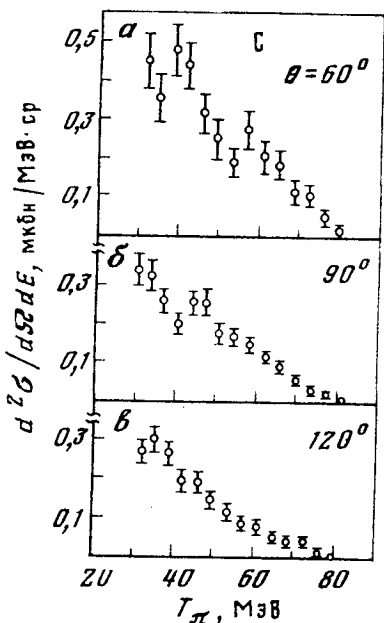


Рис. 2

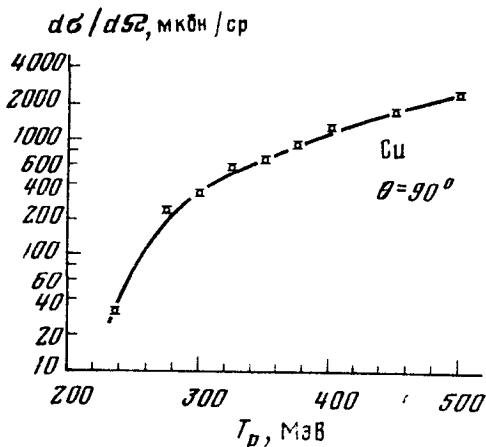


Рис. 4

Рис. 2. Спектр двойных дифференциальных сечений рождения пионов протонами с энергией 240 МэВ на ядре углерода под углами 60° (а), 90° (б) и 120° (в)

Рис. 3. То же, что на рис. 2, для Cu

Рис. 4. Энергетическая зависимость суммарных дифференциальных сечений рождения π^+ - и π^- -мезонов под углом 90° на ядре Cu. Кривая проведена по экспериментальным точкам

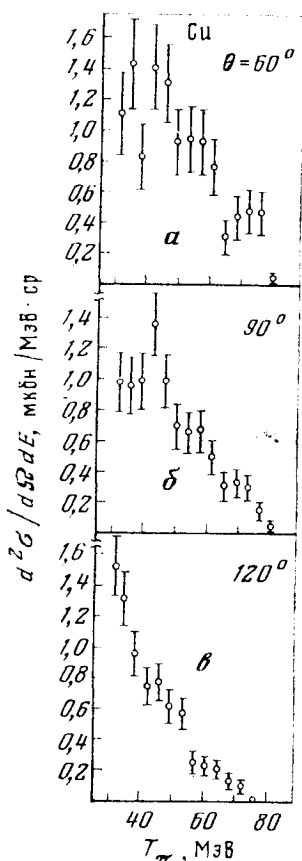


Рис. 3

энергиях, меньших 30 МэВ, спектры пионов искажены из-за разброса потерь энергии в мишени. При измерении энергетической зависимости (рис. 4) при энергиях протонов выше 400 МэВ часть спектров пионов со стороны больших энергий также искажалась из-за того, что пробеги пионов превышали размер СПП. Но на значениях проинтегрированных по энергии дифференциальных сечений это обстоятельство не сказалось.

На рисунках приведены статистические ошибки измерений. При сопоставлении абсолютных значений сечений необходимо, как указывалось выше, учитывать дополнительно 10%-ную неточность, связанную с мониторингом пучка протонов.

Результаты измерений поправлены на фон, который измерялся в отсутствие мишени. Он составлял $\sim 3\%$ эффекта от углерода и $\sim 1\%$ эффекта от меди. Фон связан с пионами, образованными в объеме воздуха, просматриваемом детектирующей системой.

Обработка результатов измерений

При восстановлении энергетических спектров пионов в мишени учитывались потери энергии в счетчиках, воздухе и в самой мишени, вводилась поправка на распад и многократное рассеяние. Учитывалось также постоянное энерговыделение, вносимое мюоном от распада пиона.

Ионизационные потери вычислялись по программе, описанной в работе [18]. Для вычисления поправок на многократное рассеяние, а также эффективного телесного угла была использована программа [19]. При вычислении телесного угла оценено влияние юстировки на величину светосилы. Ошибка, связанная с юстировкой, имела величину меньше 2%.

Проведена оценка влияния на форму энергетических спектров пионов и на величину дифференциальных сечений следующих физических процессов: 1) неупругого взаимодействия пионов и протонов в СПП, 2) последовательного $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ -распада и 3) генерации π^- -мезонов.

1) В результате процесса неупругого взаимодействия пионов в сцинтилляторе СПП энергетические спектры пионов сдвигаются в сторону меньших энергий. Однако сечение неупругого взаимодействия для подавляющей части исследуемых спектров пионов не превышает нескольких процентов. Так, вклад неупругих процессов при энергии 20 МэВ (30 МэВ в мишени) составляет 1%, при 50 МэВ $\sim 3\%$, при 80 МэВ $\sim 12\%$. Поэтому при приведенной точности измерений спектров влияние этого фактора будет незначительным.

Вклад неупругого взаимодействия протонов был оценен методом Монте-Карло с использованием литературных данных по (p, pn)-реакциям на углероде, сечений взаимодействия нейтронов и спектров протонов отдачи на ядрах детектора. Для измерений под углами начиная с 60° , результаты которых приводятся в настоящей работе, примесью протонов в области спектров пионов с энергиями выше 20 МэВ можно пренебречь.

2) При выбранном времени интегрирования сигнала в СПП, равном 100 нс, в среднем в 3,5% случаев μ^+ -мезон от распада π^+ -мезона успевает в свою очередь распасться с испусканием позитрона с неопределенным энерговыделением. Расчеты показали, что в половине случаев такие события выходят из пионной области на двумерном распределении. Поправка в $\sim 2\%$ из-за несмотренного эффекта внесена в результаты измерений.

3) В энергетических спектрах вклад π^- -мезонов приводит в основном к сдвигу спектров в сторону больших энергий из-за дополнительного энерговыделения при ядерном захвате остановившегося π^- -мезона. Приблизительную оценку примеси π^- -мезонов можно сделать, используя имеющиеся данные при других энергиях. Под углом 90° на ядре ^{12}C при энергии падающих протонов 18,5 МэВ в работе [10] получено отношение выходов π^+ -мезонов и π^- -мезонов ~ 45 . При энергии протонов 350 МэВ это же отношение составляет ~ 11 [20]. Следовательно, можно ожидать, что примесь π^- -мезонов в приведенных в настоящей работе данных при энергии протонов 240 МэВ не превышает 4—5%. В выходах пионов при больших энергиях вклад π^- -мезонов растет. Так, при энергии 450 МэВ отношение выходов π^+ -мезонов и π^- -мезонов на углероде под углом 90° составляет 7,2 [21]. Поэтому энергетическая зависимость на рис. 4 отражает зависимость суммарного выхода π^+ - и π^- -мезонов.

Обсуждение результатов

Полученные сечения рождения пионов на ядрах и инклюзивные спектры пионов низких энергий представляют собой первые экспериментальные данные при энергиях протонов ниже 350 МэВ. Теоретическое описание процесса рождения пионов на ядрах в этой области энергий существенно отличается от описания рождения пионов при энергиях 600—700 МэВ, где большой вклад вносит образование изобары [9]. Наблюдается качественное согласие с полученными результатами расчетов околорогового рождения пионов протонами при энергии 250 МэВ [13]. Более детальное сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными позволит изучить вопрос о применимости используемого импульсного приближения и определить относительный вклад процессов рождения с образованием дейтрона и свободных нуклонов. Отметим, что одновременное описание процессов когерентного рождения с возбуждением изолированных состояний ядер в конечном состоянии [10-13], в том числе с использованием поляризованных протонов [22], возможно, позволит внести ясность в рассмотрение ряда проблем пион-ядерного взаимодействия.

Отсутствие заметных нерегулярностей в энергетической зависимости сечения, по-видимому, свидетельствует о малом вкладе процессов с образованием барионных состояний или с образованием изобарных конфигураций. Поэтому ввиду малости возможных эффектов желательно провести измерение с большей точностью и в большем числе точек по энергии.

Обращает на себя внимание резкая зависимость дифференциальных сечений от энергии при энергиях протонов до 300 МэВ, которую следует учитывать при проектировании экономичных сильноточных ускорителей для практического использования пионных пучков. Сравнение с данными о рождении π^+ -мезонов при энергии 585 МэВ [7] показывает, что дифференциальное сечение при энергии 250 МэВ меньше примерно в 80 раз. Величина двойного дифференциального сечения при энергии пионов 30—40 МэВ составляет ~5% соответствующего сечения при энергиях протонов ~600 МэВ.

Авторы выражают признательность В. П. Джелепову и В. М. Лобашеву за внимание к работе.

Литература

- [1] Л. С. Ажгирей и др. ЖЭТФ, 34, 1357, 1958. В. Г. Вовченко и др. ЖЭТФ, 39, 1557, 1960.
- [2] А. Г. Мешковский и др. ЖЭТФ, 32, 602, 1957; 34, 1426, 1958.
- [3] Ю. Д. Прокошкин, А. А. Тяпкин. ЖЭТФ, 33, 313, 1957. А. Е. Dunaitsev, Yu. D. Prokoshkin. Nucl. Phys., 56, 300, 1964.
- [4] К. О. Оганесян. ЖЭТФ, 54, 1273, 1968.
- [5] D. Bryman et al. Proc. Intern. Conf. on Meson-Nuclear Physics, AIP № 33, 264, 1976.
- [6] P. W. James et al. TRIUMF report VPN-75-1, 1975.
- [7] J. F. Crawford et al. SIN Newsletters № 12, 37, 1979.
- [8] D. Cochran et al. Phys. Rev., D6, 3085, 1972.
- [9] M. Sternheim, R. Silbar. Phys. Rev., D6, 3117, 1972.
- [10] S. Dahlgren et al. Nucl. Phys., A277, 245, 1974.
- [11] Y. Le Bornec et al. Phys. Lett., 49B, 434, 1974; 61B, 47, 1976.
- [12] P. Couvert et al. Phys. Rev. Lett., 41B, 530, 1978.
- [13] V. Hoistad et al. AIP Conf. Proc. Intern. Conf. on Meson-Nuclear Physics, № 54, Houston, 1979, p. 189.
- [14] А. С. Ильинов и др. В кн. Тр. Всес. семинара по программе экспериментальных исследований на мезонной фабрике ИЯИ АН СССР, М., Изд. ИЯИ АН СССР, 1979.
- [15] Ю. К. Акимов и др. ОИЯИ 13-117176 1978; ОИЯИ 13-11718, 1978.
- [16] Yu. K. Akimov et al. JINR E13-80-10, 1980.
- [17] В. И. Комаров и др. ОИЯИ E1-11513, 1978.
- [18] M. W. McNaughton, AERE-R7072, Harwell, 1972.
- [19] K. L. Brown, Ch. Iselin, CERN 74-2, 1974.
- [20] W. F. Dudziak, UCRL-2564, 1954.
- [21] E. Lillethun, Phys. Rev. 125, 665, 1962.
- [22] E. Auld et al. Phys. Rev. 41, 462, 1978.

PRODUCTION OF π^+ MESONS IN LOW ENERGY PROTON COLLISIONS WITH NUCLEI C AND Cu

**Yu. K. AKIMOV, I. I. GAYSAK, P. F. GUBER, V. A. KRASNOV, A. B. KUREPIN,
S. I. MERZLYAKOV, K. O. OGANESYAN, E. A. PASYUK, S. Yu. POROKHOVOY,
A. I. RESHETIN**

Differential and double differential cross sections are measured for production of positive pions, induced by protons with energy of 240 MeV off nuclei C and Cu. The energy dependence of the differential cross section is obtained for the nucleus Cu under the angle of 90° in the proton energy range 240—500 MeV.