

93-374



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

P9-93-374

А.В.Демьянов, А.Е.Дребушко, Г.А.Кононенко,
Т.Н.Мамедов, В.С.Роганов

ПУЧКИ СЕПАРИРОВАННЫХ МЮОНОВ
НЕБОЛЬШИХ РАЗМЕРОВ В НИЗКОФОНОВОЙ
ЛАБОРАТОРИИ ФАЗОТРОНА ОИЯИ

1993

1. Введение

Ряд экспериментов, проводимых на сепарированном мюонном пучке, требует получения пучков небольших размеров. Их формирование осложняется тем обстоятельством, что мюоны являются частицами третьего поколения, образованными при распаде пионов в канале транспортировки. Поэтому пучки имеют довольно большой эмиттанс (порядка сотен см·мрад), так что получение пучков небольших размеров (несколько см²) возможно лишь при потере интенсивности с использованием для этой цели коллиматоров, поскольку без них наименьшая площадь сечения в сфокусированном мюонном пучке имеет размеры на порядок больше.

Наличие дрейфового промежутка длиной несколько метров, а затем фокусирующего дублета квадрупольных линз с достаточно большой апертурой в конце тракта транспортировки позволяет получить пучки частиц небольших размеров без существенных потерь в интенсивности. Однако в этом случае необходимо использовать квадрупольные или иные линзы с апертурой до 40–50 см, чтобы пучок проходил через них, по возможности, без потерь, что представляет значительные технические трудности в данном варианте тракта транспортировки пучков частиц на установку по исследованию реакций μ -катализа.

Коллиматор наиболее оптимально располагать (с наименьшей потерей интенсивности) вблизи исследуемой мишени. При этом пучок фокусируется на мишень, а размеры его ограничиваются коллиматором. Этот способ реализуется в том случае, когда фон сопутствующих частиц из коллиматора, образованных при взаимодействии пучка с веществом коллиматора, несуществен для проводимых исследований.

В исследованиях по изучению реакций μ -катализа этот способ неприемлем, поскольку в веществе коллиматора образуются нейтроны от μ -захвата (в среднем около двух нейтронов на остановившийся мюон). Нейтроны будут регистрироваться с высокой эффективностью нейтронными детекторами большого объема, используемыми в эксперименте. Для этого случая коллиматоры должны размещаться вдали (на расстоянии в несколько метров) от мишени, что позволяет на несколько порядков уменьшить фон нейтронов от материала коллиматора в области мишени.

В настоящей работе описывается формирование пучка сепарированных мюонов в низкофоновой лаборатории для получения достаточной интенсивности остановок мюонов в мишени малых размеров, вытянутой по вертикали.

2. Формирование сепарированных мюонных пучков небольших размеров

В случае, когда коллиматор нельзя располагать вблизи исследуемой мишени, пучок небольших размеров можно сформировать либо щелевыми коллиматорами с последующей фокусировкой рядом линз, либо с помощью достаточно протяженного дрейфового промежутка в части канала транспортировки с последующей коллимацией и фокусировкой пучка оконечной системой линз.

При формировании пучка с помощью коллиматоров необходимо определять их число, расположение в канале, размеры отверстий в них, выбрать материал и его толщину. Кроме того, необходимо учитывать техническую возможность размещения коллиматоров внутри вакуумного канала без существенных переделок имеющегося непрерывного канала II транспортировки мюонов в низкофоновую лабораторию, а также условия для создания дрейфового промежутка путем отключения части линз.

Как известно^[1], сечение пучка мюонов, транспортируемых с помощью тракта II в низкофоновую лабораторию, имеет форму вытянутую по вертикали за четной по номеру линзой, а за нечетной — по горизонтали. Таким образом, если формировать пучок с помощью коллиматорных щелей (для обрезания частиц с большими углами наклона к оси пучка), щель должна располагаться вертикально за той линзой, где пучок вытянут горизонтально, и горизонтально там, где пучок вытянут по вертикали. В описываемом канале горизонтальная щель располагалась за линзой № 52, а вертикальная — за линзой № 55, что определялось возможностью создания в этом месте разрыва вакуумпровода (с последующим восстановлением вакуума). Такое расположение коллиматоров устраняло из пучка частицы с относительно большими углами наклона к оси пучка, что позволяло сформировать пучок небольших размеров.

Толщина коллиматора выбиралась из условия, чтобы мюоны пучка полностью поглощались в нем. Пробеги мюонов с импульсом 90 и 125 МэВ/с с учетом импульсного разброса в пучке меньше 10 и 25 г/см² меди соответственно. Суммарная выбранная толщина двух щелевых коллиматоров составляла 6 см латуни, так что мюоны полностью поглощались в веществе коллиматора.

В пучке мюонов имеются небольшие примеси пионов (меньше 1%) и электронов (около 10%). Пробеги пионов еще меньше, чем мюонов. Что касается электронов, то для таких импульсов их пробеги составляют сотни г/см² вещества. Однако они частично выбывают из пучка за счет конверсии в гамма-кванты и многократного рассеяния, поскольку на длине в несколько радиационных единиц вещества коллиматора углы многократного рассеяния значительно превосходят расходимость пучка, допускаемую системой транспортировки тракта.^[1,2]

Коллиматоры изготавливались в виде дисков с наружным диаметром, соответствующим внутреннему диаметру вакуум-провода (19.6 см). Вдоль диаметра диска была проделана щель, длина которой соответствовала диаметру. Ширина щели выбиралась равной размеру пучка, который должен быть сформирован в горизонтальной или вертикальной плоскостях. Фактически была исследована комбинация двух щелей шириной 2 см в горизонтальной и 2 см в вертикальной плоскостях, а также горизонтальная щель шириной 4 см (за линзой № 52) для формирования пучка в вертикальной плоскости размером около 5 см и вертикальная щель шириной 2 см (за линзой № 55) для формирования пучка в горизонтальной плоскости размером около 2 см.

Формирование и транспортировка мюонных пучков небольших размеров осуществлялась следующим образом. За основу брался пучок с импульсом 125 МэВ/с^[1] и транспортировался по непрерывному тракту в низкофоновую лабораторию за линзу № 62, с целью сфокусировать пучок на сцинтиляционный счетчик С4 (размером 2.5x2.5x0.5 см). Этот детектор размещался в месте расположения мишени для исследования реакций μ -катализа, примерно в 33 см от фланца линзы № 62. Полученный режим работы тракта использовался как базовый. Затем в тракт за линзами № 52 и № 55 помещались щелевые коллиматоры, восстанавливался вакуум. Методом последовательных приближений величин токов линз подбирался режим работы тракта II.

Матрица транспортировки пучка для полученного режима, рассчитанная с помощью программы TRANSPORT^[3], использовалась для отображения детектора частиц С4 и щелевых коллиматоров в горизонтальной и вертикальной плоскостях на вход в прямолинейный промежуток тракта II (вход в линзу № 37), подобно тому, как это проводилось в работе^[4]. В этих плоскостях отображение детектора и отображение коллиматоров сравнивались друг с другом, и при этом совпадение отображений было вполне удовлетворительно.

Аналогичная процедура проводилась при создании дрейфового промежутка (длиной 6 м) посредством отключения линз с № 53 до № 60 в отсутствии щелевых коллиматоров, при этом пучок ограничивала апертура линз. Однако в этом случае совпадение площадей, вырезанных на фазовых плоскостях границами детектора С4 и апертурами линз, было несколько хуже.

Формирование пучков мюонов было выполнено для импульсов 125 и 90 МэВ/с (толщина стенок мишени для исследования реакций μ -катализа не позволяла уменьшить импульс). Плотность остановок с уменьшением импульса растет при одинаковой интенсивности потока мюонов. Так, для 90 МэВ/с она в 2.5 раза выше, чем для 125 МэВ/с. Но с уменьшением импульса существенно уменьшается интенсивность сепарированных мюонных пучков.

Импульсное разрешение магнитного анализатора (≈ 0.1 ^[1]) не зависит от импульса, а зависит от геометрии расположения и апертуры магнитов МЛ-31 и угла поворота пучка мюонов в магнитном анализаторе. Увеличить число остановок в тонком слое вещества можно путем улучшения разрешения магнитного анализатора. Однако уменьшение апертуры магнитов МЛ-31 с помощью щелевых и круглых коллиматоров, а также уменьшение размеров пучка на входе в магнитный анализатор лишь уменьшало интенсивность, практически не влияя на разрешение, вследствие градиентной фокусировки в горизонтальной и вертикальной плоскостях магнита МЛ-31.

3. Параметры сепарированных мюонных пучков небольших размеров с импульсами 125 МэВ/с и 90 МэВ/с

Исследования параметров пучков были проведены на выходе мюонного тракта II (за линзой № 62). Интенсивность пучка измерялась телескопом двух сцинтиляционных счетчиков, примесь электронов в пучке мюонов определялась по времени пролета, профиль пучка в двух плоскостях измерялся путем сканирования специальным двухкоординатным устройством, в котором использовались два счетчика с тонкими сцинтилляторами диаметром 0.2 и длиной 10 см.^[1,2]

Число остановок в максимуме кривой остановок измерялось с помощью сцинтиляционных счетчиков С1, С2, С3, С4, С5. После двух первых счетчиков С1, С2 устанавливался медный фильтр (тормозитель) переменной толщины, за которым располагались счетчики С3, С4, С5. Размеры счетчиков С1, С2, С3 - 10x10x1 см, С4 - 2.5x2.5x0.5 см, С5 - 20x20x1 см.

Остановки происходили в счетчике С4. Кривой пробегов является зависимость счета совпадений N_{123} или N_{1234} от толщины фильтра L , а кривой остановок — зависимость от L счета совпадений-антисовпадений N_{12345} , отнесенная к счету монитора N_{12} или к счету N_{1234} при нулевой толщине фильтра (интенсивность пучка, проходящего через малый счетчик С4). Счетчик С4 размещался в месте расположения мишени для исследования реакций μ -катализа.

При наличии двух щелей шириной 2 см, расположенных за линзой № 52 (горизонтально) и за линзой № 55 (вертикально), через малый счетчик С4 (счет N_{1234}) проходит около половины интенсивности, попадающей на большой счетчик С3 (счет N_{123}). Эта доля значительно выше, чем отношение $N_{1234}/N_{123}=0.13$ для $L_{Ca}=0$ в случае отсутствия коллиматорных щелей. Кроме того, рассеяние частиц

в фильтре пренебрежимо для счетчиков, которые существенно больше пучка, и играет значительную роль, когда размеры пучка сравнимы с размерами счетчика. В этом случае существенным становится и влияние расходимости пучка, падающего на тормозитель.

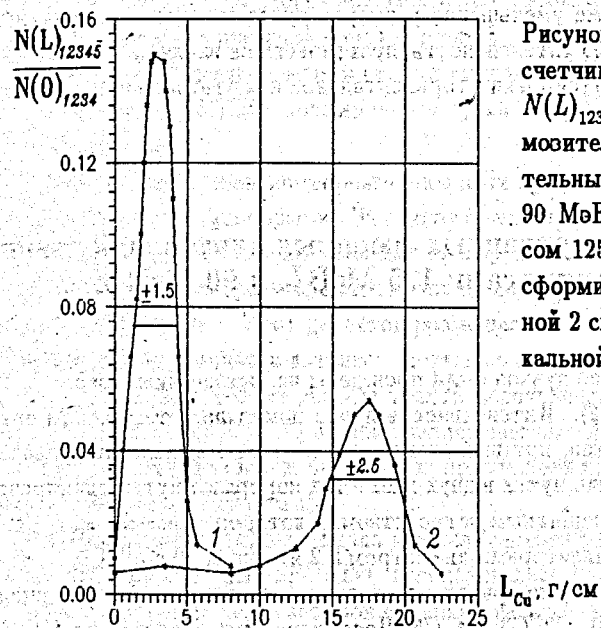


Рисунок 1. Кривые остановок в счетчике С4 (2.5x2.5x0.5 см) $N(L)_{12345}/N(0)_{1234}$ для медного тормозителя толщиной L пучка отрицательных мюонов с импульсом 90 МэВ/с (кривая 1) и с импульсом 125 МэВ/с (кривая 2). Пучки сформированы двумя щелями шириной 2 см в горизонтальной и вертикальной плоскостях

На рис. 1 даны результаты измерения кривых остановок пучка отрицательных мюонов с импульсами 90 МэВ/с (кривая 1) и 125 МэВ/с (кривая 2) при торможении в медном фильтре, когда за линзами $No 52$ и $No 55$ установлены щели шириной 2 см. Приведена доля остановок от числа мюонов, падающих на счетчик С4 при нулевой толщине фильтра. Из рисунка видно, что для пучка с импульсом 90 МэВ/с эта доля в максимуме кривой почти вдвое выше, чем для пучка с импульсом 125 МэВ/с. Однако число остановок в максимуме в счетчике С4 (весом около 3.2 г) для пучков с этими импульсами оказывается примерно одинаковым (даже несколько больше для 125 МэВ/с, см. таблицу 1) из-за существенного (почти вдвое) уменьшения интенсивности пучка мюонов с импульсом 90 МэВ/с по сравнению с пучком 125 МэВ/с. Как следует из рис. 1, импульсный разброс для пучков этих импульсов составляет $\pm 5\%$.

В таблице 1 даны результаты измерений интенсивности и числа остановок с точностью примерно 3% (в максимуме кривой остановок) в счетчике С4 для пучков

отрицательных мюонов с импульсами 90 и 125 МэВ/с. Данные приведены для выведенного из ускорителя, растянутого во времени пучка протонов с интенсивностью 1 мкА. Указаны различные варианты формирования пучка: без дополнительных коллиматоров, с двумя щелями шириной 2 см каждая, с двумя щелями, одна из которых шириной 4 см, другая – 2 см, а также посредством протяженного дрейфового промежутка, образованного путем отключения линз $NN_0 53 - 60$.

Таблица 1. Интенсивность N_{12} и число остановок N_{12345} в счетчике С4 (2.5x2.5x0.5 см) пучков отрицательных мюонов для разных вариантов формирования пучка (интенсивность выведенного пучка протонов 1 мкА)

Параметры	Вариант формирования							
	Без дополнительных коллиматоров		2 щели шириной 2 см		2 щели шириной 4 см и 2 см		Выключены линзы $NN_0 53-60$	
P_{μ} , МэВ/с	90	125	90	125	90	125	90	125
N_{12} , c^{-1}	$2.3 \cdot 10^4$	$6.0 \cdot 10^4$	$1.0 \cdot 10^3$	$3.0 \cdot 10^3$	$2.2 \cdot 10^3$	$8.0 \cdot 10^3$	$1.9 \cdot 10^3$	$5.6 \cdot 10^3$
N_{12345} , c^{-1}	450	600	65	80	115	135	70	70

Из таблицы видно, что наибольшее число остановок в секунду имеется для варианта работы с двумя щелями шириной соответственно 4 и 2 см. Надо заметить, что в этом случае доля мюонов, падающих на счетчик С4 (N_{1234}), от числа частиц в пучке (N_{12}) составляет 0.45. Для реальной мишени по изучению реакций μ -катализа это отношение возрастает примерно в полтора раза, поскольку вертикальный размер мишени более чем вдвое превышает размеры счетчика С4.

Важным параметром пучка мюонов является примесь электронов в пучке. Она измерялась по времени пролета: Для частиц, проходящих через счетчик С4 (N_{1234}), примесь составляла около 4% при импульсе 90 МэВ/с и 3% при импульсе 125 МэВ/с (с точностью около $\pm 0.3\%$) независимо от варианта формирования пучка. Эта примесь возрастала в 2.5–3 раза при измерении примеси во всем пучке (N_{123}) независимо от варианта работы. Отсюда можно заключить, что установка коллиматоров не увеличила числа электронов по отношению к числу мюонов в пучке, а пространственное распределение электронов в пучке иное, чем мюонов.

Пространственное распределение пучка мюонов является существенной его характеристикой. На рис. 2 показано распределение интенсивности пучка отрицательных мюонов с импульсом 90 МэВ/с в горизонтальной и вертикальной плоскостях для трех вариантов формирования пучка: кривые 1 и 2 получены со щелевыми

коллиматорами, а кривая 3 для дрейфового промежутка в линзах $NN_0 53-60$. Из рисунка видно, что форма пучка на мишени для изучения реакций μ -катализа для всех трех вариантов работы вполне применима. Это же следует из таблицы 2, в которой даны полуширины и расходимости пучков с импульсами 90 и 125 МэВ/с в горизонтальной и вертикальной плоскостях для четырех вариантов формирования пучков.

Из таблицы 2 следует, что при работе с дрейфовым промежутком в линзах $NN_0 53-60$ расходимости пучка существенно (в несколько раз) больше, чем в вариантах формирования щелями, и становятся сравнимыми с углами рассеяния^[4] мюонов при их торможении в фильтре вблизи максимума кривой остановок. Это подтверждается измерениями уширения пучка при установке тормозителя, соответствующего максимуму остановок. В случае двух щелей шириной 2 и 4 см уширение пучка составляло ± 0.8 см и ± 0.2 см в горизонтальной и вертикальной плоскостях для пучка с импульсом 90 МэВ/с, а при работе с дрейфовым промежутком соответственно ± 0.8 см и ± 1.6 см. Большая расходимость пучка привела к уменьшению числа остановок (см. табл. 1) при работе с дрейфовым промежутком. Кроме того, в этом случае ограничивающий пучок коллиматор (апертура линзы $N_0 61$, т.е. источник дополнительного фона) находится ближе к мишени для исследования реакций μ -катализа, чем щелевые коллиматоры (линзы $N_0 52$ и $N_0 55$).

Таблица 2. Пространственные характеристики пучков отрицательных мюонов с импульсом 90 МэВ/с и 125 МэВ/с для разных вариантов формирования пучка (Δx и Δy — полуширины, ϑ_x и ϑ_y — расходимость в горизонтальной и вертикальной плоскостях)

Параметры	Вариант формирования					
	Без дополнительных коллиматоров	2 щели шириной 2 см		2 щели шириной 4 см и 2 см		Выключены линзы $NN_0 53-60$
P_μ , МэВ/с	125	90	125	90	90	125
$\pm \Delta x$, см	2.6	0.8	1.2	0.6	0.8	0.6
$\pm \vartheta_x$, град	3.0	2.0	0.2	3.0	6.4	7.4
$\pm \Delta y$, см	5.2	1.4	1.6	2.6	1.4	1.6
$\pm \vartheta_y$, град	3.0	1.8	0.2	1.8	2.9	1.1

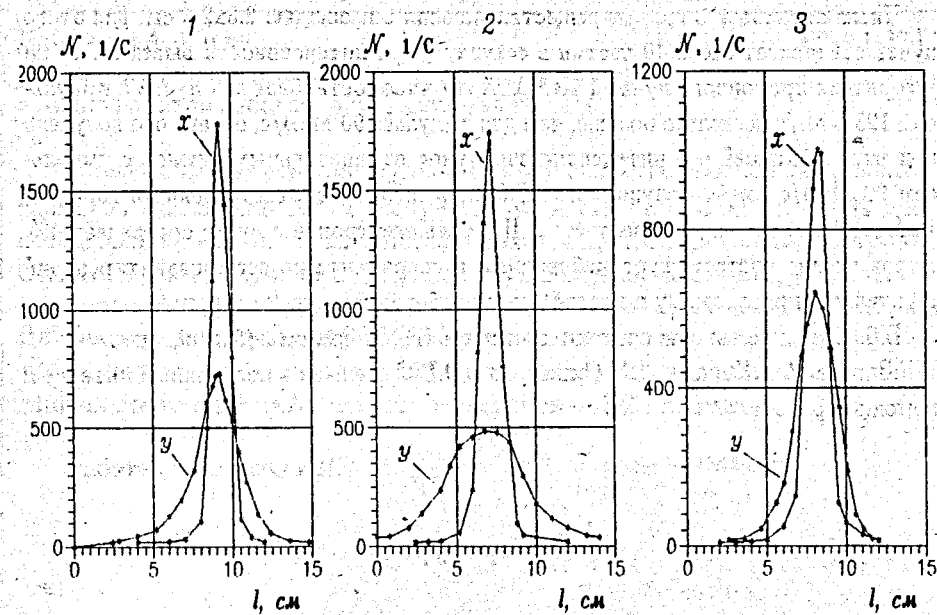


Рисунок 2. Распределение интенсивности пучка отрицательных мюонов с импульсом 90 МэВ/с в горизонтальной (x) и вертикальной (y) плоскостях для разных вариантов формирования: кривая 1 — две щели шириной 2 см каждая, кривая 2 — две щели шириной 4 см и 2 см, кривая 3 — дрейфовый промежуток в линзах $N_0 53-60$

4. Заключение

В результате настоящей работы сформированы сепарированные мюонные пучки небольших размеров для исследования реакций μ -катализа в низкофоновой лаборатории. Наиболее подходящим является пучок с импульсом 90 МэВ/с, полученный с помощью двух щелевых коллиматоров: с шириной щели 4 см, расположенный горизонтально за линзой $N_0 52$, и с шириной щели 2 см, расположенный вертикально за линзой $N_0 55$.

Число остановок в грамме вещества мишени с площадью 2.5×2.5 см для этого пучка составляет около 40 частиц в секунду (при интенсивности выведенного из ускорителя протонного пучка 1 мкА). Хотя число остановок для пучка с импульсом 125 МэВ/с несколько больше, чем для импульса 90 МэВ/с, однако оно получено при втрое большей его интенсивности. Пучок отрицательных мюонов с импульсом 90 МэВ/с имеет полуширину ± 0.6 см и ± 2.6 см соответственно в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Примесь электронов в пучке составляет 4%. Пучок вполне соответствует требованиям, эксперимента по исследованию реакций μ -катализа, проводимому в низкофоновой лаборатории на этом пучке.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить В.Г.Зинова, А.Д.Конина, Л.М.Онищенко и О.В.Савченко за постоянный интерес и помощь в работе.

Литература

1. Андреев Е.М. и др. ОИЯИ, 9-92-225, Дубна, 1992.
2. Демьяков А.В. и др. ОИЯИ, 9-92-231, Дубна, 1992.
3. Brown K.L. et al. CERN, 73-16, Geneva, 1973.
4. Демьяков А.В. и др. ОИЯИ, 1-4156, Дубна, 1968.