

92-231



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

9-92-231

**А.В.Демьянов, А.Е.Дребушко, Т.Н.Мамедов,
В.С.Роганов, В.М.Цупко-Ситников**

**ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ ФАЗОТРОНА
В НИЗКОФОНОВОЙ ЛАБОРАТОРИИ**

1992

1. Введение

Эффективность использования фазотрона ОИЯИ, помимо других обстоятельств, определяется разнообразием пучков, которые можно на нем получить. Кроме нуклонных и мезонных пучков для решения ряда задач необходимы пучки электронов (позитронов) с небольшим импульсным разбросом.

Ранее на синхротронном фазотроне ОИЯИ были пучки электронов с интенсивностью лишь несколько сот электронов в секунду (см., например, ^{1/1/}). В настоящей работе описываются полученные на фазотроне ОИЯИ пучки электронов (позитронов) разных энергий значительно большей интенсивности с импульсным разбросом в несколько процентов

2. Формирование пучков электронов (позитронов) от фазотрона

На фазотроне ОИЯИ пучки электронов (позитронов) образуются от внешней мезообразующей мишени, расположенной на пучке выведенных из ускорителя протонов, транспортируемых через тракт $T^{1/2/}$ до тормозителя. При взаимодействии протонов с ядрами этой мишени рождаются нейтральные пионы, которые распадаются на γ -кванты. γ -кванты в мишени конвертируются в электроны и позитроны. Электроны (позитроны), образованные в мишени под углом 25° к направлению протонного пучка, захватываются в канал $I^{1/3/}$ и далее по этому каналу транспортируются в четвертую лабораторию или по каналу $II^{1/4/}$ - в низкофоновую лабораторию (рис.1). Естественно, интенсивность электронных (позитронных) пучков зависит помимо протяженности мишени по протонному пучку (20 см бериллия или углерода) и его интенсивности также от толщины мишени в направлении канала транспортировки электронного (позитронного) пучка, поскольку на этой толщине происходит конверсия γ -квантов (радиус мишени 3 см).

Возможность получения электронных (позитронных) пучков на фазотроне видна из рис.2 (см. ^{1/5/}), где приведены энергетические спектры γ -квантов от распада нейтральных пионов, образованных протонами с энергией 660 МэВ на ядрах углерода. На рис.2 приведены

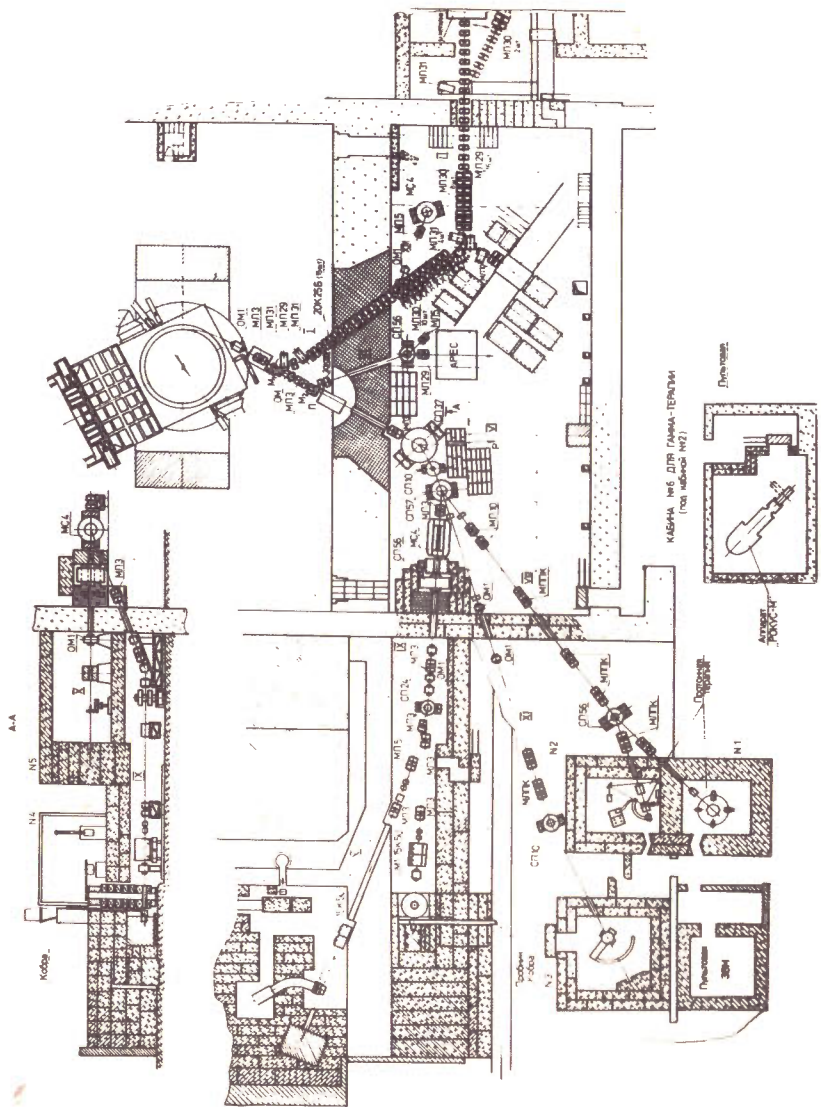


Рис. 1. Схема разводки каналов пучков фазотрона ОИЯИ.

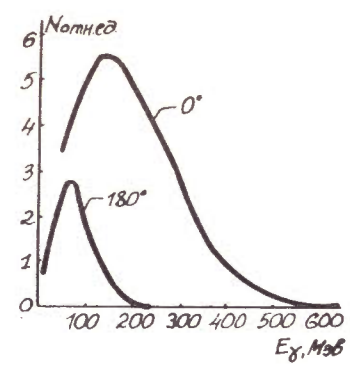


Рис. 2. Энергетический спектр γ -квантов от распада нейтральных пионов π^0 , образованных протонами с энергией 660 МэВ на ядрах углерода под углами 0° и 180° к протонному пучку.

относительная зависимость интенсивности от энергии электронов (позитронов) и их энергетический диапазон, учитывая, что электроны (позитроны) разных энергий образуются практически с равной вероятностью с суммарной энергией пары, близкой энергии γ -кванта.

На фазотроне ОИЯИ электронные (позитронные) пучки можно получить не только на выходах каналов I и II, но и за линзой № 20А канала I, линзами № 52 и № 57 канала II, т.е. там, где можно организовать разрыв вакуумпровода каналов и расположить аппаратуру, а также на выходе канала III от другой мезонообразующей мишени. Параметры этих пучков, геометрия и их состав будут различаться.

В настоящей работе приводятся сведения по электронным (позитронным) пучкам на выходе канала II за линзой № 62 в низкофоновой лаборатории. Параметры этих пучков в других точках канала II можно оценить без дополнительных измерений. Импульс и его разброс остаются неизменными. Вклад пионов можно рассчитать по известной величине примеси пионов за линзой № 62, учитывая их распад. Что касается геометрии, то пучок вытянут по вертикали и сжат по горизонтали за четной линзой и, наоборот, за нечетной, с параметрами, приблизительно соответствующими данным за линзой № 62.

Удобство использования низкофоновой лаборатории, помимо значительного снижения уровня фоновых излучений, состоит также в доступности аппаратуры на пучке во время эксперимента, что существенно, в частности, в процессе калибровки детекторов на

электронных (позитронных) пучках. Кроме того, значительная длина канала П (32 м от мишени, в которой образуются электроны) приводит к тому, что примесь пионов в этих пучках существенно уменьшается к концу канала из-за их распада.

Электронные (позитронные) пучки являются смешанными, в их составе имеются примеси не только пионов, но также мюонов, а в позитронных пучках - и протонов. Протоны легко устраняются из пучка с помощью фильтров (например, для протонов с импульсом 200 МэВ/с достаточно 0,5 г/см² графита). Электроны (позитроны), пионы и мюоны разделяются по времени пролета, как это сделано, например, при изучении состава мюонных пучков тракта П^{4/}. Кроме того, электроны (позитроны) можно регистрировать с помощью порогового водяного черенковского счетчика (см. /6/), не чувствительного к пионам и мюонам определенного импульса.

Для получения электронных (позитронных) пучков в низкофоновой лаборатории необходима одновременная работа протонного тракта Т^{2/}, части мезонного тракта I^{3/} и тракта П^{4/}. При этом магнитные анализаторы трактов I и П настраиваются на один и тот же импульс. Одновременно работают 6 магнитов, 59 электромагнитных линз и 23 источника питания. Мезонные тракты I и П включают в себя линзы и магниты с аппаратурой 20 см, вакуумные каналы с форвакуумом. Режимы работы трактов для разных импульсов и знаков частиц приведены в таблице 1.

Работа на электронных (позитронных) пучках обычно осуществляется с растянутым во времени протонным пучком. При этом интенсивность протонного пучка, выведенного из ускорителя, может достигать 2 мкА. Другие параметры протонного пучка можно найти в работе /2/.

3. Базовые пучки мюонов с импульсом 125 МэВ/с

Как уже отмечалось выше, важным для электронных (позитронных) пучков является знание импульса пучка с достаточной точностью. В основном, импульс пучка фиксируется токами двух отклоняющих магнитов МЛЗ1 (№ 36 и 32) тракта П. При этом в качестве базового берется пучок мюонов с импульсом 125 МэВ/с и разбросом по импульсу (полуширина на полувисоте) ± 6 МэВ/с (обе величины измеряются с точностью масштаба 0,3 МэВ/с).

Особенностью настоящей работы является использование для измерения импульсов пучков электронов (позитронов) кривых пробегов

Таблица 1. Режимы работы элементов трактов при транспортировке пучков в низкофоновую лабораторию

Пучок частиц		μ^-	μ^-	e^-	e^+	
Импульс частиц (МэВ/с)		125	125	125	350	
Тракт, элемент	Источ. питания	Магнит, линза	Ток ист. питания (А)	Напряж. на шунте (МВ)	Напряж. на шунте (МВ)	Напряж. на шунте (МВ)
Тракт Т						
I-1	МГ-19	ОМ1	-350	-35,0	-35,0	-35,0
I-2,3	16 АП	МЛЗ	-350	-17,5	-17,5	-17,5
III-6	МГ-21	ОМ2	-50	-5,0	-6,3	-13,7
VIII-4	8 АП	МЛЗ	-380	-19,0	-19,0	-19,0
VIII-5	10АП	МЛЗ	-380	-19,0	-19,0	-19,0
Тракт I						
I-4	12АП	МЛЗ1	+300	+15,0	+9,0	-25,2
I-5	18АП	МЛ29	+380	+19,0	+11,5	-32,2
I-6	20АП	МЛЗ1	-230	-11,5	-7,0	+19,6
I-7	21АП	20К25	-250	-12,5	-13,0	+12,5
I-8,9	19АП	20К25	-420	-21,0	-21,0	+21,0
I-10÷19	МГ17	20К25	-480	-36,3	-28,4	+36,3
I-20,20А	23АП	20К25	+440	+22,0	+21,0	-22,0
I-21÷28	МГ16	МЛ30	-445	-33,5	-35,5	+33,5
I-29,30	25АП	МЛ30	+416	+20,8	+20,8	-20,8
Тракт П						
П-36	13АП	МЛЗ1	-178	-8,9	-8,9	+24,3*
П-32	22АП	МЛЗ1	-152	-7,6	-7,6	+21,3
П-37,38	14АП	МЛ30	+310	+15,5	+15,5	-15,5
П-39÷44	26АП	МЛ30	+246	+24,6	+24,6	-24,6
П-45÷52	МГ15	МЛ29	+193	+14,5	+14,5	-14,5
П-53÷57	МГ22	МЛ29Б	+200	+20,0	+20,0	-20,0
П-58÷60	6АП	МЛ29А	-210	-10,5	-10,5	+10,5
П-61	7АП	МЛ29А	-250	+12,5	+12,5	-12,5
П-62	МГ20	МЛ29А	+230	+35,5	+35,5	-35,5

* Вместо 13АП на таких токах используется 15АП.

Таблица 1 (продолжение)

Пучок частиц		e^+	e^-	e^-	e^-
Импульс частиц (МэВ/с)		250	90	62	31
Тракт, элемент	Источ. питания	Напряж. на шунте (МВ)	Напряж. на шунте (МВ)	Напряж. на шунте (МВ)	Напряж. на шунте (МВ)
Тракт Т					
Т-1	МГ19	-35,0	-35,0	-35,0	-35,0
Т-2,3	16АП	-17,5	-17,5	-17,5	-17,5
Т-6	МГ-21	-13,1	-6,45	-7,25	-7,65
Т-4	8АП	-19,0	-19,0	-19,0	-19,0
Т-5	10АП	-19,0	-19,0	-19,0	-19,0
Тракт I					
И-4	12АП	-18,0	+6,5	+4,5	+2,25
И-5	18АП	-22,5	+8,3	+5,8	+2,86
И-6	20АП	+14,0	-5,05	-3,5	-1,75
И-7	21АП	+12,5	-9,4	-6,5	-3,25
И-8,9	19АП	+21,0	-15,1	-10,5	-5,25
И-10÷19	МГ17	+36,3	-20,4	-14,2	-7,1
И-20,20А	23АП	-22,0	+15,1	+10,5	+5,25
И-21÷28	МГ16	+33,5	-25,5	-17,8	-8,9
И-29,30	25АП	-20,8	+14,4	+10,0	+5,0
Тракт П					
П-36	13АП	+17,8	-6,4	-4,35	-2,3
П-32	22АП	+15,2	-5,45	-3,8	-1,9
П-37,38	14АП	-15,5	+11,5	+8,0	+4,0
П-39÷44	26АП	-24,6	+18,2	+12,6	+6,3
П-45÷52	МГ15	-14,5	+10,4	+7,25	+3,61
П-53÷57	МГ22	-20,0	+15,1	+10,5	+5,25
П-58÷60	6АП	+10,5	-8,2	-5,75	-2,86
П-61	7АП	-12,5	-9,0	-6,25	-3,12
П-62	МГ20	-35,5	+25,6	+17,6	+8,8

(или остановок) сопутствующих частиц в пучках, поскольку относительно короткие пробеги этих частиц позволяют более точно определить импульс, чем по пробегам электронов (позитронов). Это измерение особенно важно для относительно больших импульсов, где начинает сказываться на магнитные характеристики насыщение ярма анализирующих магнитов.

Режим работы трактов для получения в низкофоновой лаборатории в качестве базового пучка сепарированных мюонов с импульсом 125 МэВ/с приведен в таблице 1 (см. работу^{4/}). В этой же работе даны параметры этого пучка (см. табл.2).

Таблица 2. Параметры пучков в низкофоновой лаборатории

Пучок частиц	e^-	e^-	e^-	e^-	e^+	μ^-	μ^+	e^+	e^+
Импульс частиц (МэВ/с)	31	62	90	125	125	125	125	250*	350*
Интенсивн. (в сек на 1 мКА)	$1,4 \times 10^5$	2×10^5	4×10^5	6×10^5	6×10^5	6×10^4	2×10^5	10^6	4×10^5
Состав:									
е	1	1	1	1	1	0,1	0,03	1	1
μ	<0,002	0,012	0,053	0,17	0,64	1	1	~0,4	0,46
П	<0,002	<0,002	<0,002	0,04	0,12	0,004	0,004	~1	1,25

* Данные для импульсов 350 и 250 МэВ/с приведены при наличии фильтров 3,5 и 1,5 см из плексигласа перед счетчиком С1. В случае отсутствия фильтров в пучке имеются протоны с интенсивностью ~0,7 от указанной в таблице 2.

На выходе мезонного тракта П (за линзой № 62) в низкофоновой лаборатории для получения режимов работы и измерения параметров пучков используется следующая диагностическая аппаратура^{3,4/}. Интенсивность измеряется телескопом из двух сцинтилляционных счетчиков, состав пучков определяется по времени пролета, профиль пучка в двух плоскостях измеряется путем сканирования специальным двухкоординатным устройством, в котором используется два счетчика с тонкими сцинтилляторами (диаметр 0,2 см, длина 10 см).

Импульс частиц в пучке определяется по кривой остановок или по кривой пробегов. После первых двух счетчиков (С1 и С2) устанавливается фильтр переменной толщины, за которым располагаются счетчики С3 и С4. Размеры счетчиков С1, С2, С3 -

$10 \times 10 \times 1 \text{ см}^2$, счетчика С4 – $20 \times 20 \times 1 \text{ см}^2$. Остановки происходят в счетчике С3. Кривой пробегов является зависимость счета совпадений $N(123)$ от толщины фильтра, а кривой остановок – зависимость счета совпадений-антисовпадений $N(1234)$, отнесенные к счету монитора $N(12)$.

Измеренный состав и интенсивности базовых пучков положительных и отрицательных мюонов с импульсом 125 МэВ/с приведены в таблице 2 (точность определения примесей масштаба долей процента). Полуширины пучка в вертикальной и горизонтальной плоскостях составляют соответственно $\pm 5,2 \text{ см}$ и $\pm 2,6 \text{ см}$, расходимость около $\pm 3^\circ$ в вертикальной плоскости и приблизительно такая сходимость в горизонтальной.

Для разделения электронов от мюонов и пионов в пучке был использован пороговый водяной черенковский счетчик (см. также /6/). В качестве радиатора взята бидистиллированная вода. Для смещения спектра черенковского излучения в области чувствительности фотокатода фотоумножителя в воде растворяли дикалиевую соль аминок-Г-кислоты в количестве 100 мг/л согласно результатам исследований /7/. Раствор находился в контейнере из плексигласа толщиной 1 мм с внутренними размерами $100 \times 100 \times 50 \text{ мм}^3$. Контейнер обернут белой бумагой. Счетчики располагали на пучке так, что толщина радиатора по пучку составляла 50 мм. Поскольку для воды коэффициент преломления света 1,33, пороговое значение скорости частиц для черенковского излучения составляет примерно 0,75 с. Это соответствует импульсу 160 МэВ/с, 121 МэВ/с и 0,58 МэВ/с для пионов, мюонов и электронов.

Эффективность регистрации частиц черенковским счетчиком проверялась на сепарированных пучках положительных мюонов с импульсом 125 МэВ/с путем сравнения интенсивности пиков, соответствующих электронам и мюонам в спектре, измеряемом по методу пролета /3/. Черенковский счетчик С был расположен за двумя пластическими счетчиками вплотную. Размеры счетчика 2 в плоскости, перпендикулярной оси пучка, были меньше, чем соответствующие размеры черенковского счетчика, и составляли $80 \times 80 \text{ мм}^2$. Стоп-сигналом для времяпролетного метода служило совпадение сигналов из счетчиков С1 и С2 $N(12)$ или совпадение $N(12\bar{0})$. Сравнение интенсивности пиков, полученное в первом и во втором случае, показало, что эффективность регистрации черенковским счетчиком составляет не менее 98% для электронов и не более 0,3% – для мюонов в пучке с импульсом 125 МэВ/с.

4. Пучки электронов (позитронов) с импульсом 125 МэВ/с

Режим работы для пучков сепарированных мюонов с импульсом 125 МэВ/с служил основой формирования пучков с другими импульсами. Режим "смешанных" пучков с импульсом 125 МэВ/с, в котором преобладают электроны, получен из этого режима путем перестройки первого анализатора тракта I на этот импульс (см. табл.1). Спектр частиц пучка электронов с импульсом 125 МэВ/с, измеренный по времени пролета, показан на рис.3. Для получения позитронного

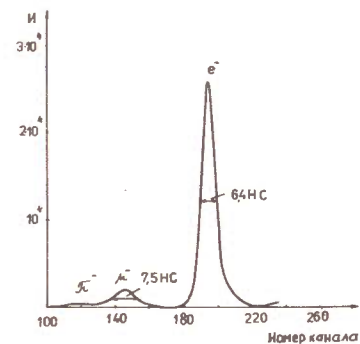


Рис.3. Состав пучка отрицательных частиц с импульсом 125 МэВ/с (в низкофоновой лаборатории), полученный по времени пролета.

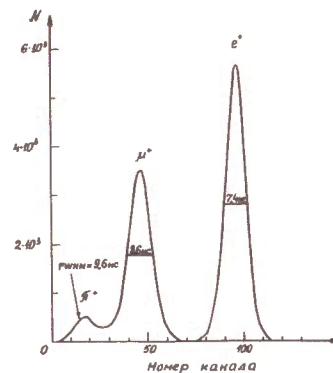


Рис.4. Состав пучка положительных частиц с импульсом 125 МэВ/с (в низкофоновой лаборатории за линзой № 62), полученный по времени пролета.

пучка полярность источников питания (табл.1) изменяется на противоположную. Его спектр приведен на рис.4. Параметры пучков даны в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что при примерно одинаковой интенсивности электронов и позитронов этого импульса примеси положительных мезонов в пучках примерно втрое больше, чем отрицательных. Импульсный разброс в этих пучках тот же, что и для базового пучка, - ± 6 МэВ/с.

5. Пучки позитронов с импульсами 350 и 250 МэВ/с

Пучки с этими импульсами содержат не только позитроны, но также в значительном количестве протоны (см. табл.2). Измеренная интенсивность пучка с импульсом 350 МэВ/с составляет 7×10^5 в секунду, а с импульсом 250 МэВ/с - $1,7 \times 10^6$ в секунду на 1 мкА протонного пучка. Методика времени пролета была использована для разделения частиц. Поскольку протоны этих импульсов короткопробежные, то их легко убрать из пучка, используя соответственно фильтры 2,5 и 1,5 см из плексигласа.

На спектре частиц по времени пролета можно выделить область времени, куда попадают частицы разной массы и, используя "временные ворота", зарегистрировать или устранить те или иные частицы. На рис.5 показан спектр по времени пролета пучка частиц с импульсом 350 МэВ/с, когда перед первым счетчиком устанавливается фильтр толщиной 3,5 см из плексигласа, т.е. протоны в пучке отсутствуют. На рисунке видны пики электронов и мезонов, причем

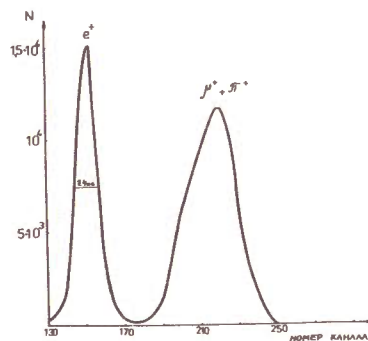


Рис.5. Состав пучка положительных частиц с импульсом 350 МэВ/с (с фильтром 3,5 см из плексигласа), полученный по времени пролета.

пионы и мюоны плохо разделяются. Что касается протонов, то пик от них находится между электронами и мезонами (из-за большой разницы времени пролета они попадают из соседних банчей), это можно видеть на спектре по времени пролета без фильтров. С помощью ворот во времени были выделены протоны и для них измерена кривая пробегов.

На рис.6 показана кривая пробегов протонов N(123) в плексигласе. Эта кривая позволяет определить импульс пучка. Из кривой рис.6 импульс протонов в пучке получается 350 МэВ/с, такой же, соответственно, и импульс позитронов в пучке. Импульсный разброс, как и для других импульсов, - $\pm 5\%$.

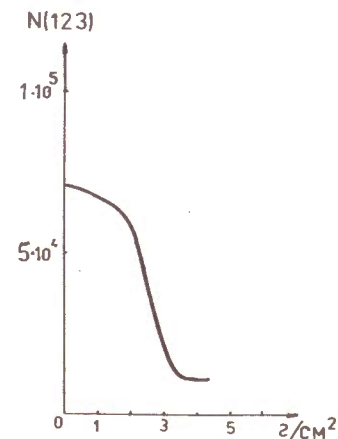


Рис.6. Кривая пробегов в плексигласе протонов пучка положительных частиц с импульсом 350 МэВ/с. Для исключения регистрации мезонов и позитронов использованы ворота во времени в спектре по времени пролета.

Режим работы трактов для позитронов в пучке с импульсом 250 МэВ/с также получен из режима для базового импульса и приведен в таблице 1, а параметры пучка даны в таблице 2. При этом распадная часть тракта I и часть тракта II после анализирующих магнитов (эл.36, 32) не оптимизировались, поскольку в этом случае интенсивность была достаточно большой.

Режим работы трактов для получения пучков электронов с импульсами 350 и 250 МэВ/с получается из режимов (табл. 1) путем изменения полярности источников питания трактов I и II. Что касается состава пучка, то он не измерялся, но, как отмечено выше, ожидаемая примесь мезонов втрое меньше, чем в позитронных пучках, при несколько меньшей интенсивности.

6. Пучки электронов с импульсами 90, 62 и 31 МэВ/с

Режим работы трактов для получения пучков электронов с импульсами 90, 62, 31 МэВ/с приведены в таблице 1, а в таблице 2 даны параметры этих пучков. Они получены из режима для базового импульса 125 МэВ/с, используя то условие, что градиент магнитного поля в линзах и поле в отклоняющих магнитах прямо пропорциональны импульсу. При этом оптимизации токов в отдельных элементах не проводились.

Для точного измерения импульса пучка электронов с номинальным импульсом 90 МэВ/с были получены кривые остановок и пробегов мюонов в меди (рис. 7), примесь которых имеется в этом пучке. Мюоны выделялись из пучка посредством временных ворот в спектре по времени пролета.

Из рис. 7 следует, что истинный импульс пучка составляет 92 МэВ/с с импульсным разбросом ± 4 МэВ/с (полуширина на

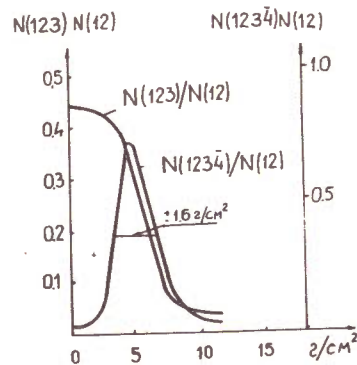


Рис. 7. Пробегная кривая $N(123)/N(12)$ и кривая остановок $N(1234)/N(12)$ отрицательных мюонов в пучке электронов с импульсом 90 МэВ/с, полученная в меди. (Регистрация электронов исключена с помощью ворот в спектре по времени пролета).

полувысоте). В пучке электронов примесь мюонов составляет несколько процентов, а пионы (см. табл. 2) практически отсутствуют из-за их распада (общая пролетная база составляет 6,3 распадных длин).

Важной характеристикой пучка является его пространственное распределение. Это распределение может отличаться от пространственного распределения ^{4/} базового мюонного пучка,

поскольку электроны возникают в мишени, а мюоны - в мезонном канале, в основном, вдоль пути в его распадной части, заполняя апертуру тракта. Измеренная на расстоянии 50 см от линзы полуширина на полувысоте в горизонтальной плоскости составляет $\pm 4,0$ см (сходимость около $\pm 2^\circ$), а в вертикальной - $\pm 5,6$ см (расходимость около $4,5^\circ$). Распределение не сильно отличается от распределения мюонного пучка ^{4/}.

Для пучка электронов с импульсом 62 МэВ/с режим работы приведен в таблице 1, а параметры пучка - в таблице 2. Режим создан аналогично предыдущему из базового. В этом пучке примесь мюонов (1,2%) еще меньше, чем в пучке с импульсом 92 МэВ/с. Для измерения импульса пучка получена пробегная кривая в плексигласе примеси мюонов (см. рис. 8), при этом электроны не регистрировались

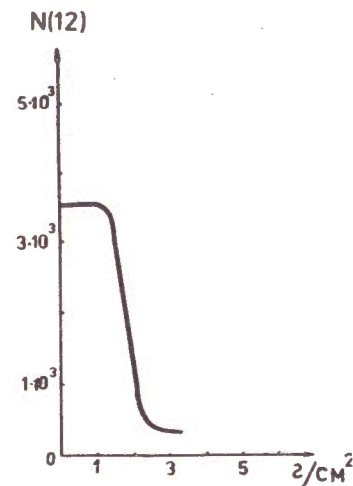


Рис. 8. Кривая пробегов в плексигласе мюонов из пучка электронов с импульсом 62 МэВ/с (регистрация электронов исключена с помощью ворот в спектре по времени пролета).

с помощью временных ворот в спектре по времени пролета. Из кривой рис. 8 получено, что импульс мюонов, а, следовательно, и пучка электронов равен 64 МэВ/с с разбросом $\pm 3,2$ МэВ/с.

Аналогично был сформирован пучок электронов с импульсом 31 МэВ/с (см. табл. 1 и 2). Его интенсивность составляет $1,4 \times 10^5$ в секунду на 1 мкА интенсивности протонного пучка. Состав пучка по времени пролета показан на рис. 9, на котором видно, что практически примеси мюонов и пионов в пучке отсутствуют.

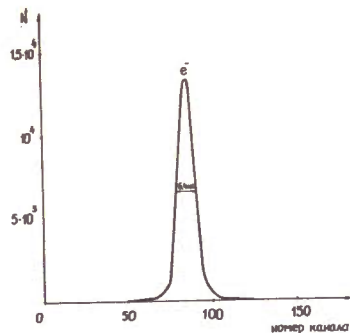


Рис.9. Состав пучка электронов с импульсом 31 МэВ/с, полученный по времени пролета.

7. Заключение

В настоящей работе описаны пучки электронов (позитронов) с импульсами 350, 250, 125, 90, 62, 31 МэВ/с и импульсным разрешением $\pm 5\%$, транспортируемые в низкофоновую лабораторию за линзу № 62. Их достоинство состоит в том, что аппаратура, располагаемая на этих пучках, доступна при проведении экспериментов. Примесь протонов и мезонов в позитронных пучках изменяется от сравнимой с числом позитронов при импульсе 350 МэВ/с до пренебрежимо малой при 31 МэВ/с. Для электронных пучков примесь мезонов значительно меньше. Интенсивность пучков составляет $1,4 \times 10^5 \pm 10^5$ частиц на 1 мкА выведенного из ускорителя протонного пучка.

Особенностью настоящей работы является использование для определения импульса пучка электронов (позитронов) сопутствующих им частиц (мюонов, протонов). Для выделения частиц нужного сорта применяются временные ворота в спектре времени пролета и водяной пороговый черенковский спектрометр, который позволял регистрировать мезоны (включение спектрометра в антисовпадения) или электроны и позитроны (включение спектрометра в совпадения).

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Л.М.Онищенко, Б.Ж.Залиханова, Е.А.Пасюка, Г.А.Конюненко за помощь и содействие работе.

1. Роганов В.С. ОИЯИ, В1-9-4707, Дубна, 1969.
2. Андреев Е.М. и др. ОИЯИ, 9-90-376, Дубна, 1990.
3. Баландин М.П. и др. ОИЯИ, 9-90-435, Дубна, 1990.
4. Андреев Е.М. и др. ОИЯИ, 9-92-225, Дубна, 1992.
5. Евюков Ю.Д. и др. ЖЭТФ, т.32, 1957, с.667.
6. Бобров В.Д. и др. ПТЭ, т.3, ч.55, 1963.
7. Купцов А.В. и др. ПТЭ, № 4, 1971, с.86.

Рукопись поступила в издательский отдел
1 июня 1992 года.